

博士学位论文

热超声倒装键合界面运动与界面性能
的生成规律研究

作者姓名：王福亮
学科专业：机械电子工程
学院(系、所)：机电工程学院
指导教师：钟掘院士

中南大学
2007年06月

分类号 VDC_____

密级_____

博士学位论文

热超声倒装键合界面运动与界面性能的生成规律研究

**Studies on Vibration Propagation and Performance
Formation of Thermosonic Flip Chip Bonding Interface**

作者姓名：王福亮
学科专业：机械电子工程
学院(系、所)：机电工程学院
指导教师：钟掘院士

论文答辩日期_____ 答辩委员会主席_____

中南大学
2007年06月

摘要

热超声倒装键合是最具潜力的新一代微电子封装技术之一，目前尚缺乏对键合机理的透彻分析与掌握。如何通过优化工艺、运动与能量参数来获得高性能的倒装键合界面、提高多点键合的可靠性，以形成成套的高效率、高精度、高质量的工业技术与装备，对微电子制造仍然是重大挑战。本文针对热超声倒装键合界面运动与界面性能生成规律进行研究，所开展的研究工作和主要认识有：

- 1) 建立了热超声倒装键合试验系统，该系统可在超声、热、力等作用下完成倒装键合工艺；建立了在线参数监测系统，对键合过程的超声功率、键合力、工具传递的超声振动和芯片振动等参数进行采集；研究了“键合参数—界面运动—键合界面微观结构—键合性能”的键合过程和键合质量的评估原理。
- 2) 发现键合过程工具/芯片界面的相对运动由速度相同演变为“速度分离”，突变点在启动后数毫秒间，说明工具载有的能量在两个阶段有不同形式的转化与耗散。在“突变点”处键合界面已形成初始强度，而“速度分离”后工具载有的能量一部分通过金球的流变传递到键合界面系统继续增强界面结合强度；另一部分消耗于工具/芯片界面的摩擦磨损。据此过程特征，提出以“速度分离”点为界的变键合参数工艺思路。
- 3) 分析了芯片振动信号的频率组成，发现其三倍频信号是“速度分离”的特征信号，提出以三倍频信号控制键合过程的思路。
- 4) 从 SEM 中观察到了环状键合界面。通过建立了键合界面的有限元模型，研究了键合过程中不同状态下键合界面的应力分布，发现接触面边缘的应力远大于其它位置，更有利于氧化膜去除、驱动原子扩散，并形成键合强度，这是产生环状键合界面的重要原因。
- 5) 获得了键合机理的初步认识：在键合力和超声作用下，金凸点/焊盘中产生高达数百 MPa 的应力，使金凸点和焊盘中的位错大量增殖、产生塑性流变、接触界面的氧化膜破裂；金凸点/焊盘在塑性流动过程中，将氧化膜碎片带出接触面，使键合界面裸露的金和银原子直接接触，一方面通过电子云共享形成化学键（金属键），另一方面形成物理键（范德华力吸附），生成最初始的键合强度。在持续的循环应力加载和卸载过程中，位错密度迅速增加，接触面逐步扩大；同时，键合界面原子在高达数百 MPa 应力作用下，获得了足够的能量，越过势垒，沿着接触界面、晶界和位错等短路通道，在数百毫秒时间内实现互扩散，生成数百纳米厚的原

子扩散区域，形成可靠的键合强度。

6) 研究了键合参数对工具末端振幅、芯片振幅、倒装芯片键合强度以及键合界面微观结构的影响，观测到不同的键合失效形式。获得了键合界面强度的新认识：“键合强度”是键合区域各结构组成强度，而不仅是金凸点/基板焊盘界面的强度。

7) 提出了新型键合参数加载方案：在键合初期采用大超声功率、小键合力，有利于金凸点和焊盘界面的相对运动，提高键合接触面氧化膜的去除效率，形成更多的原子裸露直接接触界面；之后，采用小超声功率、大键合力，以提高接触界面的应力场梯度，促进界面间的原子互扩散，同时降低超声振动对金凸点、焊盘等键合区域面组成部分的疲劳破坏，提高键合区域的整体强度。试验验证了这种新型键合参数加载方法的有效性。

关键词 热超声倒装键合，键合过程监测，运动传递，键合机理，键合强度，键合可靠性，新型倒装键合工艺，原子扩散

ABSTRACT

Thermsonic Flip Chip (TSFC) bonding is a new generation micro-electronic package technology with full potential. At present, the bonding mechanism is still unclear. So, it's a great challenge for microelectronic manufacturers to construct a whole set of industry process and equipments with great efficiency, high precision and good qualities by optimizing process, motion and energy parameters. And it's still difficult to achieve high-qualified flip chip bonding interface and bonding reliability for multi I/O TSFC bonding. In this dissertation, the vibration propagation and performance formation at TSFC bonding interface were studied. The primary researches and results are as follows:

1) A TSFC bonding experiment system and bonding process monitor system were constructed. With this bonding system, the TSFC bonding process was realized by applying ultrasonic, heat and force at the bonding interface; with the monitor system, the ultrasonic power, force, vibration on tool and flip chip during bonding process were acquired. Based on the relationship among bonding parameters, bonding interface vibration, bonding interface microstructure and bonding reliability, a bonding process—bonding quality evaluation method is developed.

2) The vibration velocities of chip and tool tip were observed, and the evolution from tool tip vibration with chip to stall—chip velocity decreased suddenly—was found. The stall phenomenon occurs after the bonding started for several milliseconds, which indicates that ultrasonic energy propagation and consumption at bonding interface is changed before and after stall. Meanwhile, initial bonding strength is formed when stall occurs, and some ultrasonic energy is propagated to bonding interface through golden bumps to enhance the bonding strength after stall; some is consumed by the friction wear at tool and chip interface. Therefore, a time-variable bonding parameter process method based on stall phenomena is proposed.

3) The frequency characters of chip vibration signal were analyzed. It found that the third harmonics can locate the stall, based on which the bonding process control method is proposed.

4) A ring-shaped bonding pattern of bonding interface was observed with SEM. And a FE model of bonding interface was developed to study the stress distribution at bonding interface. The simulation results show that the periphery of bonding interface is in a better condition for surface layer breaking, debris removing and atom diffusion than other area, which is a significant cause of ring-shaped bonding pattern formation.

5) Some preliminary understanding about bonding mechanism was obtained. With the bonding force and ultrasonic, the stress on bump/pad can reach several MPa, which causes dislocation proliferation, plastic flow of bumps and pads and oxide film broken at bonding interface. During the plastic flow, the oxide film debris are expelled from bonding interface and the Au/Ag atoms are contacted directly, which results in initial bonding strength by forming chemical bond (metallic bond) and physics bond (adsorption caused by van der Waals force). With the durative and cyclic stress, the dislocation density increases and contact area enlarges quickly; at the same time, the atoms at bonding interface acquire enough energy to over the energy barrier, and inter-diffuse along short-circuit diffusion paths, which forms atom diffusion area and reliable bonding strength in hundreds milliseconds.

6) The effects of bonding parameters on vibration amplitude of tool tip and chip, bonding strength and microstructure of bonding interface were studied. And different bonding failure patterns were observed. It is found that the bonding strength should include the strength of all components in bonding area, not only the strength of bumps/pads interface.

7) A time-variable bonding parameter process method is proposed: At the initial stage, great ultrasonic power and little bonding force are used to enlarge the relative vibration of bumps and pads interface, to break the oxide films and to form more exposed and directly contacted atoms; After stall, little ultrasonic power and great bonding force are used to increase the stress at bonding interface, to accelerate the atom inter-diffusion and to avoid fatigue failure of bumps and pads caused by ultrasonic vibration. Experiments show that this bonding process can ensure higher bonding strength and bonding reliability than traditional bonding process.

KEY WORDS thermosonic flip chip bonding, bonding process monitoring, vibration propagation, bonding mechanism, bonding reliability, novel TSFC bonding process, atom diffusion

目 录

摘要	I
ABSTRACT	III
目录	I
第一章 综述	1
1.1 本研究的工程背景	1
1.1.1 国内外微电子封装技术的发展现状	1
1.1.2 微电子封装装备产业	2
1.2 芯片互连技术的发展现状	2
1.2.1 引线键合(WB)技术	3
1.2.2 载带自动焊(TAB)技术	5
1.2.3 倒装芯片键合(FCB)技术	7
1.2.4 各种芯片互连技术比较	8
1.3 国内外热超声倒装键合技术的发展现状	9
1.3.1 热超声倒装键合应用研究	10
1.3.2 键合参数对键合强度和可靠性影响研究	10
1.3.3 热超声倒装键合机理和装备研究	11
1.3.4 超声功率和键合力加载曲线研究及其他	13
1.4 本文的课题来源、研究内容、研究方法	13
1.4.1 课题来源	13
1.4.2 研究内容和研究思路	13
第二章 热超声倒装键合实现及基本实验设计与观测	17
2.1 热超声倒装键合试验台	17
2.1.1 热超声倒装键合工艺介绍	17
2.1.2 热超声倒装键合试验台组成与功能	18
2.1.3 热超声倒装试验材料体系	22
2.1.4 热超声倒装键合过程	23
2.2 热超声倒装键合过程监测系统	25
2.2.1 监测系统硬件构成	25
2.2.2 监测系统软件构成	29
2.3 键合过程监测系统数据采集和分析	32
2.3.1 超声功率信号采集和分析	32
2.3.2 倒装工具/芯片振动信号采集和分析	35
2.3.3 其他信号采集和分析	37
2.4 小结	39
第三章 外场作用下热超声倒装键合系统的运动与能量传递分析	41

3.1 概述	41
3.1.1 超声振动在变幅杆和倒装工具中的传递研究进展	41
3.1.2 超声在倒装界面间的传递研究进展	41
3.2 超声在变幅杆/工具中的传递	42
3.2.1 超声在变幅杆中的传递	42
3.2.2 超声在倒装工具中的传递	45
3.3 超声在倒装界面间的传递过程	48
3.3.1 倒装工具/芯片界面的运动传递过程	48
3.3.2 倒装工具/芯片界面的运动传递模型	59
3.4 小结	61
第四章 热超声倒装键合界面结构与强度	63
4.1 金凸点/焊盘界面的有限元模型及其求解	63
4.1.1 金凸点/焊盘界面的有限元模型	63
4.1.2 模型求解	65
4.2 键合力和超声振动对键合面应力分布的影响	67
4.2.1 键合力对键合面应力分布的影响	68
4.2.2 超声振动对键合面应力分布的影响	71
4.3 键合强度的形成机理	73
4.3.1 键合材料表面氧化膜的去除机理	73
4.3.2 键合界面原子扩散的机理	78
4.3.4 键合强度的形成机理	81
4.4 小结	82
第五章 热超声倒装键合工艺优化	83
5.1 超声功率对热超声倒装键合的影响	83
5.1.1 超声功率的动态变化特征	83
5.1.2 超声功率对工具末端和芯片振幅及键合强度的影响	84
5.2 键合力对热超声倒装键合的影响	87
5.2.1 倒装键合系统中的键合力施加装置原理	87
5.2.2 键合力对工具末端和芯片振幅的影响	88
5.2.3 键合力对倒装界面微观形貌的影响	89
5.3 键合时间对热超声倒装键合的影响	90
5.3.1 键合时间对工具末端和芯片振幅的影响	91
5.3.2 键合时间对热超声倒装键合强度的影响	91
5.3.3 键合时间对倒装界面微观形貌的影响	92
5.4 超声作用下金凸点的变形测量	93
5.4.1 金凸点变形率的测量	93
5.4.2 金凸点在超声作用下的相对变形规律	95
5.5 热超声倒装键合的典型失效形式	96
5.5.1 金凸点的两种典型失效形式	96
5.5.2 芯片表面磨损	97

5.5.3 芯片焊盘破碎	97
5.5.4 键合界面键合强度低	98
5.5.5 键合界面失效的多种内涵	99
5.6 新型热超声倒装键合工艺的提出	99
5.7 阶梯式键合参数加载过程对倒装键合强度的影响	100
5.7.1 阶梯式键合力加载试验	100
5.7.2 阶梯式超声功率加载	104
5.7.3 阶梯式键合参数加载优化	108
5.8 小结	108
第六章 全文总结	109
参考文献	111
致 谢	121
攻读学位期间发表的论文和参与科研情况	122

第一章 综述

1.1 本研究的工程背景

1.1.1 国内外微电子封装技术的发展现状

微电子技术是信息产业的核心技术之一，其发展水平和产业规模是衡量一个国家经济实力的重要标志，也影响着国家的科技、经济和军事在世界上的地位。为此，各国为争夺微电子技术的制高点和主动权，都加强了科研和资金的投入，尤以美、日、欧、韩和中国台湾为甚。

目前微电子产业主要分为芯片设计业、芯片制造业、封装业。微电子产业之所以能够飞速发展，封装技术的进步和支持起到了极为关键的作用。随着电路集成度增加，微电子封装正日益成为微电子产业的瓶颈。

封装是指将 IC（集成电路）芯片可靠地安装到一定的外壳上，芯片上的电路用导线连接到封装外壳的引脚上，这些引脚又通过印制板上的导线与其他器件连接。封装外壳起着保护芯片、增强电热性能、沟通芯片内部电路与外部电路等作用。芯片封装起到了组合 IC 芯片和其它电路、传输电源、传递讯号、提供散热及承载并保护 IC 芯片的作用。因此封装是 IC 芯片成为具有使用价值的微电子器件的桥梁。

随着微电子技术的进步，封装技术也不断更新换代。如表 1-1：封装技术依次经历了双列直插式封装（DIP）、小型方块平面封装（QFP）、球栅阵列封装（BGA）到倒装芯片封装（FC）、芯片尺寸封装（CSP）、多芯片组件（MCM）的发展。

表 1-1 微电子封装技术的演变

单芯片封装

DIP→QFP→TQFP→BGA→CSP→MCM

芯片互连

引线键合→TAB→倒装芯片

多芯片封装

陶瓷→薄膜→PWB 或者陶瓷上薄膜→SLIM

当前 IC 封装正朝低功耗、小尺寸、高速度、高集成度方向发展，以满足芯片频率更高、引脚数增多、引脚间距减小、可靠性提高的发展需求。随着微电子产品向轻、小、高速化、数字化和多功能化的发展，微电子封装技术将越来越成为微电子产业的重要组成，而且面临着更多、更高的挑战，先进封装技术将不断涌现，同时也孕育着更大的发展。

微电子封装是一项市场需求量大、需要投入资金较少、收益快、发展迅速的高技术产业。在微电子产业链中，芯片设计、芯片制造、芯片封装的资金投入比呈 1:100:10

的关系。纵观世界半导体工业的发展，一些后起的国家和地区，如韩国、马来西亚、新加坡以及中国台湾，都是先以封装业为主体而发展起来的，在当前中国微电子产业基础比较薄弱的情况下，通过发展封装产业来带动微电子产业的发展是一条值得中国微电子产业借鉴的发展道路^[1-3]。

1.1.2 微电子封装装备产业

具有高性能微电子先进制造装备的设计制造能力，决定着微电子产业的发展速度与水平。

我国的半导体市场巨大。例如：身份证 IC 卡的正式应用，将是数 10 亿计的数量、数百亿计的 IC 销售额，读卡机及其系统更是成倍的产值；数字电视传输的实现，全国将有数亿台电视机更新换代，所有编录、传输装置也都全部换代，产品产值将是千亿量级。西方专家和一些大公司认为：中国大陆将在 10 年内成为全球最大的半导体消费市场。

目前我国集成电路的自给率不到 15%。2002 年中国消耗的半导体占世界半导体器件市场份额的 14.4%，生产的半导体器件只占世界产值的 1.8%。中国所消费的半导体器件产品中 85% 依靠进口。一个重要原因是中国的微电子产业设备国产化不到 1%。以微电子封装中的引线键合装备为例：世界顶级的设备提供商 ASMPT，2005 年销售额超过 5 亿美元，可提供每秒 15 线以上的全自动引线键合设备；而中国大陆仅有少数几家企业能生产引线键合设备，其销售额还不到 2000 万元人民币，且仅能提供手工操作的半自动引线键合机。因此，即便中国能设计出高性能 IC，但落后的装备技术也生产不了，这就是中国的半导体器件大多进口的一个重要原因^[4,5]。

中国大陆是世界上最大的消费市场，但不是中国人的市场。为了改变这种状况，就必须发展中国自己的微电子装备产业，也包括微电子封装装备产业。

进行自主知识产权的封装工艺及其装备技术研究，对于中国微电子整体发展，无疑具有重要意义。目前我国的微电子封装装备技术面临前所未有的发展机遇，需要研究工作的不失时机的支持。以主流的超声键合技术为例，虽然已有几十年发展史，但对于超声键合的机理，较多的是依靠试验规律来确定键合工艺参数。随着芯片封装密度的增加，这种解决方法已难以适应要求。我国若能在学习目前工业应用经验基础上，深入键合机理研究，获得超声键合机理的新认识，在此基础上形成自主知识产权的新工艺和装备技术，以推动微电子封装技术的跨越式发展。

1.2 芯片互连技术的发展现状

互连技术是微电子封装中的关键技术之一，一般分为内引线连接和外引线连接。内引线连接即本文所指的芯片互连技术，主要用于微电子器件中芯片间或芯片与引线

框架间的互连，也称芯片微互连；外引线连接是指经封装后的芯片或者独立器件与印刷电路板（PCB）焊盘间的连接。

芯片互连技术是影响微电子封装产品质量、效率和成本的核心技术，主要包括引线键合(Wire bonding)、载带自动焊(Tape automated bonding)、倒装芯片键合(Flip chip bonding)三种技术^[6,7]。

1.2.1 引线键合(WB)技术

(1) 引线键合

引线键合(Wire bonding, 缩写为 WB)是最成熟的芯片互连技术，也是当前最重要的微电子封装技术，目前 95%以上的芯片均采用这种技术进行封装，满足了从消费类电子产品到高性能大型芯片的需求^[8]。

引线键合技术又分三种：热压键合、热超声引线键合和超声引线键合。

1) 热压键合 (Thermocompress bonding)^[9]:

热压键合是最早用于芯片互连的方法，目前已很少采用。热压键合是指通过压力与加热，使键合区产生塑性变形，实现引线与焊盘的连接。热与压力通过毛细管形或楔形工具，直接或间接地，以静载或脉冲方式施加到键合区。该方法对键合金属表面和键合环境的洁净度要求十分高，且只有金丝才能保证键合可靠性。对于 Au-Al 键合系统，则易形成“紫斑”，减弱焊点机械强度。

2) 热超声引线键合 (Thermosonic wire bonding)^[10-12]:

热超声引线键合是指在热压键合基础上引入超声，在超声作用下将引线软化，可降低键合温度和压力、提高键合强度。

典型的热超声引线键合过程如图 1-2: 首先，直径 25μm 的金丝通过毛细管劈刀中心的孔穿出；由电弧放电将金丝伸出部分熔化，并在表面张力作用下形成直径 50μm 左右的金球，如图 1-2(a)；然后，劈刀往下运动，使金球和焊盘接触；超声能和键合力通过劈刀加在键合界面上，同时在温度的共同作用下，将金球键合到芯片焊盘上，如图 1-2(b)；然后，劈刀升起将引线拉起，在空间中形成一个拱 (Loop)，如图 1-2(c)；再往下运动，使金丝和焊盘接触；在超声和热、力作用下将金丝键合到基板引脚或其他芯片焊盘上，并在键合后将金丝拉断，如图 1-2(d)。从而将芯片和基板的电路连接在一起。

由于金丝的价格昂贵，近年来国际上一直在寻求采用铝丝或铜丝替代金丝来实现热超声引线键合。到上世纪 80 年代，国外铜丝球焊已在生产中应用，但键合可靠性和键合强度一直较低，因此并未得到广泛应用。

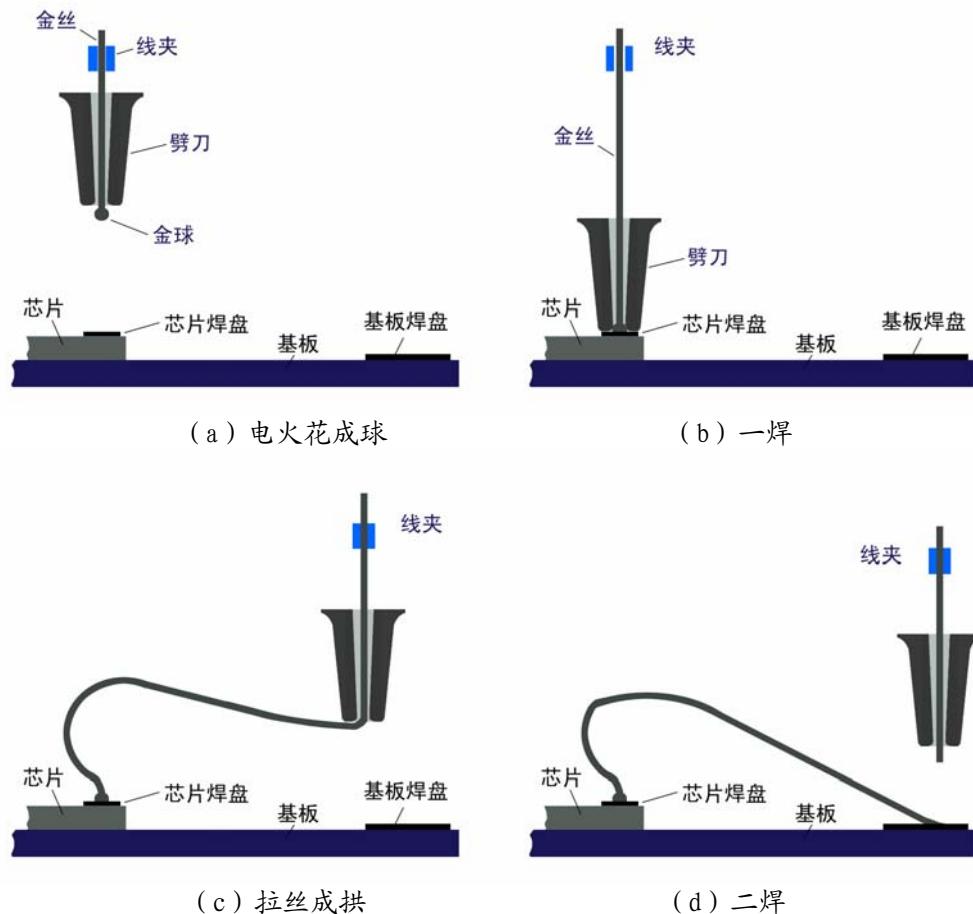


图 1-2 热超声引线键合过程

热超声引线键合具有操作简单、成本低、可靠性高等优点，但也存在封装密度低的弱点。综合来看还是一种相当成功的芯片互连方法，目前仍是芯片互连中最重要、应用最广的方法。

3) 超声引线键合(Ultrasonic wire bonding)^[13]:

超声引线键合是指在常温下，仅施加超声和键合力（超声波振动平行于键合面，键合力垂直于键合面）就可将引线键合到焊盘上的方法。由于采用如图 1-3 所示的楔形劈刀，故又称楔键合（Wedge bonding）。

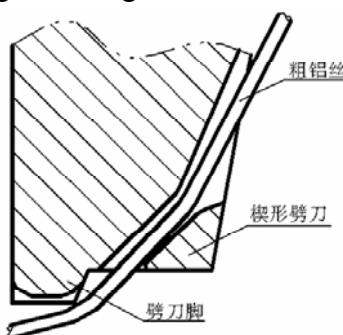


图 1-3 超声引线键合所采用的工具为楔形劈刀

典型的超声引线键合过程如图 1-4：在超声振动及键合力的共同作用下，将引线的一端键合到芯片焊盘上；然后将引线拉起，形成一个桥形拱（Loop），同时将拱的另一

端键合到基板引脚或者其他芯片焊盘上；然后在键合点后将引线切断，从而将芯片和基板的电路连接在一起。连接焊盘和引脚的引线必须形成一定形状的拱(Loop)，并处于自由无引力状态以承受机械冲击。

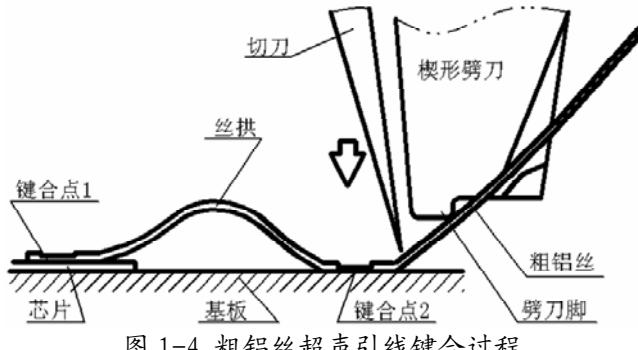


图 1-4 粗铝丝超声引线键合过程

该方法所使用的引线一般为高纯度铝丝或 1% 硅铝合金丝，芯片焊盘表面一般镀铝，可避免热压键合的“紫班”，又可解决 Au-Al 系统焊接困难问题，同时降低了成本。其缺点是尾丝不好处理，不利于提高器件的集成度，生产效率比较低。

(2) 引线键合的优、缺点

目前所采用的引线键合一般指后两种，其共同特征是以超声为主要键合能量。经四十多年发展，引线键合已成为 IC 封装业的标准技术，具有低成本、适应性强，几乎可以适应各种封装形式的优点；引线键合的缺点主要有：芯片的 I/O（输入输出端）必须布置在芯片周边，限制了芯片集成密度；键合强度和可靠性受环境影响大，存在互连密度低的缺点；相对比较低的生产率和较差的电导性能；对于热超声引线键合，还需要大量高质量的黄金^[14]。

(3) 引线键合的新发展方向

近年来，引线键合的新发展方向主要有^[15,16]：a)引线新材料。使用不同掺杂、不同处理工艺，具有更高强度和更大刚度的金丝，以提供更好的键合性能，形成低而长的丝拱；缺点是高掺杂会导致成本提高，以及潜在的可靠性问题。b)控制新技术。提高键合头运动精度、精确定位引线键合位置，可降低丝拱高度、提高跨度。一些设备供应商更认为：所有键合性能提高都可通过改进设备达成，而无需提高对引线的要求。

通过减小引线直径、缩小焊盘间距等方式是目前提高互连密度的思路，但引线直径和焊盘间距终会达到其物理极限。在这种情况下，就必须发展其他芯片互连技术，比如：TAB、倒装键合。

直到目前，超声引线键合依然占有最广阔的市场，除非微电子封装技术出现革命性进步，否则众多微电子产品制造商不会轻易放弃这项好用的技术。

1.2.2 载带自动焊(TAB)技术

随着超大规模集成电路的发展，微电子器件 I/O 数目亦随之增加。超声键合作为一种点焊技术，不论是键合质量、还是键合效率都不能适应大规模生产的要求，群焊

技术便应运而生，载带自动焊（Tape-automated bonding，缩写为 TAB）是其中一种。载带自动焊是一种改进的引线键合方法，它是指在柔性载带上粘结金属薄片，然后在金属薄片上腐蚀出特定图形的引线框，而后，再将引线框与芯片上的凸点进行连接的技术^[17,18]。

TAB 的封装流程为：首先，将芯片放置在金属薄片载带中央，芯片凸点与载带金属焊盘对齐，然后采用引线键合/热压键合技术，将芯片凸点和载带焊盘键合在一起，这部分称为内键合；经过内键合的产品如图 1-5 所示。接下来，就可以采用引线键合将载带金属电路的另一端与外部电路连接起来，实现芯片电路和外部电路的互连，这一部分称为外引线键合。

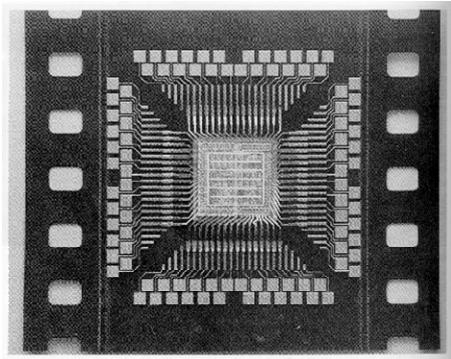


图 1-5 载带自动焊

TAB 用金属载带代替管壳，载带既可作为芯片 I/O 引线，又可作为芯片的承载体。载带金属有铜和铝两种，它们各具优势。目前西方各国广泛采用铜载带，载带引脚表面镀金，芯片则采用引线键合技术制作金凸点，凸点和引线框间的采用热压键合技术进行键合；而前苏联各国多采用铝载带。

TAB 的优势在于：生产效率高；同时能在使用前对芯片进行老化、筛选和考核，能保证器件的可靠性，这一点是其它方法不能比拟的。同样 TAB 有其不足：封装集成度不如芯片直接引线键合高；工艺复杂，载带制作所需要设备较为复杂，因此成本较高；芯片通用性差。

TAB 技术通过减小键合节距、增加芯片 I/O 数来提高封装密度。只是它改善幅度不高，而工艺却变得更复杂、成本也大幅提高，这使得 TAB 很难取代引线键合，使得它无法向更多民用电子产品普及。TAB 技术在日本得到了改进和发展。NEC、Fujimitso、Mitsui-Kinzoku 等公司都对 TAB 技术进行改进，取得了显著效果，并应用到他们的产品中。

目前，TAB 研究重点在高 I/O、高性能芯片封装中的应用，比如：晶圆键合、载带设计、芯片在线测试等技术。值得一提的是一种被称为 flip-TAB 的新型 TAB 技术，它借鉴了倒装键合技术的优点。在这种 TAB 技术中，芯片整个表面都分布着高 $25\mu\text{m}$ 、直径 $50\mu\text{m}$ 的金球，然后采用倒装键合技术，将金球键合到表面镀金的载带上，这样以来，芯片的 I/O 和功率/接地终端就可分布在芯片的任意位置，使得单位面积的 I/O

数目增加。

1.2.3 倒装芯片键合(FCB)技术

(1) 倒装芯片键合

倒装芯片键合(Flip-chip Bonding, 缩写为 FCB)是一种面阵列芯片互连技术，具有高的互连密度和互连强度^[19,20]。

倒装芯片键合技术最早由 IBM 公司在 60 年代开发。最初的方法是在硅片焊盘处预制钎料凸点，同时将钎料膏印刷到基板焊盘上，然后将硅片倒置，使硅片上的钎料凸点与基板盘对位，经加热后使双方的钎料熔为一体，从而实现连接。这种方法满足了微电子器件小型化的要求，甚至可直接把芯片粘接到 FR-4 (环氧-玻璃纤维层压板)卡上，从而使芯片变成“最小封装”。但由于钎料凸点制作工艺复杂，焊后检查困难，且需焊前处理和严格控制钎焊规范，因此，复杂的制造工艺和高昂的制造成本使得它仅限于高档微电子产品的封装应用^[21]。

经过几十年的发展，如今的倒装芯片键合已经远远超出了最初的方法。目前主要的倒装芯片技术有热超声倒装键合、回流焊接、热压键合和导电胶键合等几种技术。

a) 回流焊接技术：

回流焊接技术即上述的倒装键合技术最初原型，它有可靠性好、可焊接的 I/O 点多等优点，但其焊盘和倒装凸点的制作技术复杂、成本高，因此主要针对大批量生产的应用；且其焊料中含铅，对环境及人体不利，不能适应绿色封装的要求^[3]。回流焊接的制造工艺流程包括助焊剂(fluxing)、芯片贴装(die placement)、回流(reflow)、底部充胶(underfill)和固化(cure)几个过程^[22]。

b) 导电胶粘接技术：

导电胶粘接是指在基板上涂覆带有纳米导电粒子的环氧树脂，芯片凸点和基板焊盘通过纳米导电粒子连通的一种封装技术。根据导电粒子的导电性，可分为各向异性导电胶粘接。导电胶粘接的工艺简单，可在低温下键合，但存在连接强度低、可靠性低和寄生电阻大的缺点^[23,24]；

c) 热压键合技术：

热压键合技术是指在芯片焊盘中通过引线键合的方式植金凸点，然后将芯片倒置，凸点向下反扣在基板焊盘上，然后采用热压键合的方式，将芯片凸点键合到基板焊盘的方法。热压键合技术没有铅污染问题，效率也较高，但存在可靠性差、可键合窗口小等缺点，且高温高压的键合条件对芯片不利^[25]；

d) 热超声倒装键合技术：

热超声倒装键合技术借鉴了热超声引线键合技术。它是指在超声、键合力和热的作用下，将金凸点键合到基板焊盘上的一种微电子芯片互连技术^[28]。它首先在芯片焊盘上用超声引线键合的方式植金凸点，然后将芯片倒置，凸点向下反扣在基板焊盘上；

通过超声、键合力和温度的共同作用，将芯片凸点键合到基板焊盘^[26]。

相对而言，热超声倒装键合技术具有如下优点：1)是一种清洁、无铅、无焊锡、无胶的阵列 I/O 互连方式；2) 超声波能量的引入使键合工艺简化、键合力和温度降低、键合时间缩短，减小了对芯片和基板的损伤；3) 热超声倒装键合所产生的金属间连接强度，比其它方式所产生的连接强度大得多。4) 工艺周期和时间可从数分钟缩短到数 10ms；5)一旦充分发展起来，热超声倒装工艺可兼容大部分传统的装备和技术，比如热超声引线键合机、薄或厚胶片基板技术、倒装键合机和底填料布胶机等^[27]。

此外，由于热超声引线键合凸点制作技术简单，使得热超声倒装键合技术非常灵活，可满足个性化封装要求，缩短新产品封装周期和进入市场的时间。

由于具备以上这些优势，热超声倒装键合被认为是最具潜力的下一代芯片互连技术。目前，热超声倒装键合技术以其独特的优势在低成本、低 I/O 数目的封装应用中越来越被广泛地采用，比如智能卡封装、LED 封装以及通信领域中的 SAW Filter 器件封装等。

(2) 倒装芯片键合的优、缺点

倒装芯片键合（特别是热超声倒装键合）的优点众多，包括：1)芯片的 I/O 和功率/接地终端可分布在芯片任意位置，不必限制在芯片周边，使得芯片单位面积的 I/O 数目增加；2)倒装芯片键合是面阵列封装方式，是封装密度最大的互连方式；3)互连线最短，减少了电阻、电感，有利于提高信号的传输速度；4)凸点倒扣技术为集成电路设计工作提供了方便，不必再将 I/O 引出到芯片周边。

倒装芯片技术具有高互连密度，使得封装尺寸和重量减少，称得上是革命性进步。但凡事都有两面性，倒装芯片技术也有相应的缺点和不足：在芯片上制作凸点所需的设备、材料价格昂贵，工艺复杂，使封装的成本高，这一点对于回流焊接技术特别突出；由于键合点隐藏在芯片下面，难以判定键合的质量，存在着 Know Good Die 问题。

可靠性、成本、性能和尺寸是选择倒装键合作为首选芯片互连技术的关键驱动力量。在移动电话和手持消费电子应用中，经常要求采用倒装芯片键合技术，以缩小产品尺寸、提高产品性能。目前，几乎所有的主要微电子产品公司都在开展倒装芯片技术研究，且相当多的技术都已被应用到产品中。

1.2.4 各种芯片互连技术比较

芯片互连通常采用上述三项技术之一来完成：引线键合、载带自动焊或倒装芯片。具体应用则取决于多种因素，主要包括^[1]：

(1) 芯片和基板上的 I/O 连接数量、焊盘间距以及所允许的成本

图 1-6 表示了每种技术的封装芯片上可能的 I/O 数，其中箭头指出了 2000 年生产中所用的技术，而更高的数字则是可能达到的极限。

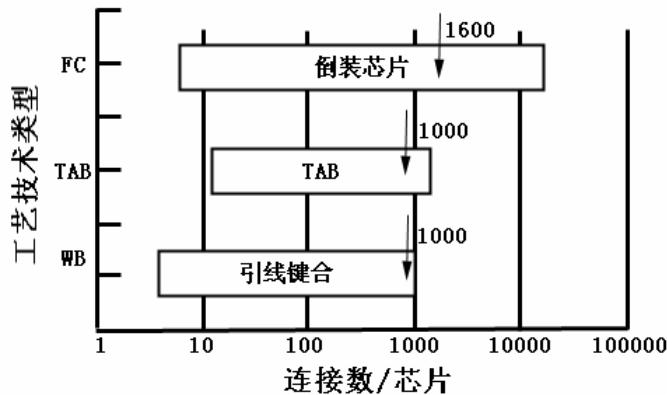


图 1-6 芯片连接技术概况

上图表明倒装芯片键合技术的 I/O 数最高；TAB 次之；引线键合最小。提高芯片 I/O 数的一个途径是减小焊盘间距，要满足今天的要求，引线键合需要将其节距缩小到原来的 1/4，这是它面临的主要挑战。除此之外，引线键合边缘上的引线并不能对芯片上的所有晶体管提供良好的散热，特别是对于大芯片。

除了 I/O 数和焊盘间距差别外，引线键合的芯片面积要比倒装芯片的面积大三分之一以上，这将导致多花几百万到几千万美元，因为它减少了每个硅圆片上的芯片数。

(2) 引线电感、电阻、芯片反修和失效率：引线键合最高而芯片倒装最低。

(3) 封装可靠性：倒装芯片的可靠性比引线键合高三个数量级。

总体而言，基于市场竞争，不断提高产品的性价比是微电子技术发展的动力。缩小特征尺寸，提高集成度是提高产品性价比最有效手段之一。只有特征尺寸缩小了，在同等集成度的条件下，芯片面积才可以做得更小，同等直径尺寸的硅片产出量才可以提高；而集成度的提高不仅可以提高产出率，而且可以使产品的速度、可靠性都得到提高，相应地成本可以降低。各种芯片互连技术都必须迎合这种发展趋势。

各种技术都有其独特优点，实际产业分布中由于应用需求的差别，往往是多种技术并存，以成本最低、收益/投入比最大的原则各自占领相关应用领域。故目前这三种芯片互连技术都将继续得到使用和发展。

1.3 国内外热超声倒装键合技术的发展现状

综上所述，热超声倒装键合(Thermosonic flip chip bonding，缩写为 TSFC)技术被认为是最具潜力的下一代微电子芯片互连技术^[28]，它具有键合温度低、键合力小、工艺简单、适合个性化封装等众多优点；它所产生的金属间连接强度也比其它倒装方式所产生的连接强度大；同时，它是基于热超声引线键合而发展来的，由于引线键合的广泛应用，使用热超声倒装代替现有芯片互连技术的成本最低。更重要的是，热超声倒装键合具有绿色环保的优点，因而受到了工业界和学术界越来越多的关注^[29,30]。

近年来，对热超声倒装键合的研究主要集中在以下几个方面：

1.3.1 热超声倒装键合应用研究

目前针对热超声倒装键合的应用，人们已做了大量研究，获得了各种工况下工艺参数对可键合性的影响。包括^[28,30-41]：

1) Kurata, H.等人采用 $0.83 \times 0.78 \times 0.2\text{mm}$ 的双运算放大器硅芯片，研究了热超声倒装键合在 8 个 I/O 的芯片互连中的应用，并发现热超声倒装键合的可靠性与传统的树脂模封装几乎是一样高。

2) Irwin, Ronda S. 等人则研究了热超声倒装键合在 MEMS 封装中的应用。芯片焊盘上植有直径约 $100\mu\text{m}$ 的金凸点，然后键合在含 CPW 器件的基板上。发现热超声倒装的可靠性几乎达 100%；且器件功耗和频率都比采用引线键合的产品高很多。

3) Yatsuda, H.等人研究了热超声倒装键合技术在 SAW 器件封装中的应用，将植有 8 个金凸点的芯片键合到陶瓷基板的镀金焊盘上。研究表明：在 200°C 以下可实现键合、且连接的电特性和机械特性均稳定；由于芯片间连线缩短，使得芯片尺寸缩小，滤波效果较传统方式大幅提高。

Jaakola, T.等人也做了类似研究，采用 GGI（金凸点和镀金基板焊盘）材料体系做热超声倒装键合试验。键合完成后，进行了电特性和剪切强度测试，以及 $40-120^\circ\text{C}$ 的热循环载荷测试，测试结果表明热超声倒装键合是一种很有效的键合技术。

4) Luk, C.F. 等人则研究了在硬盘驱动器磁头悬架上，采用热超声倒装技术将信号读写芯片键合在悬臂尖端，以缩短信号读取到信号处理间的距离，提高读写速度。在他们的应用中，也采用了 GGI 材料体系，即将金凸点键合到镀金的焊盘上。由于芯片尺寸减小、质量减小、芯片间连线缩短，因此使得磁盘读写头的控制更加有效、硬盘读写速度得到进一步提高。

5) McLaren, T.S.等人研究了采用热超声倒装技术将 8×8 VCSEL(垂直腔表面发射激光器)阵列封装成 SPA (smart pixel array 智能像素阵列) 的应用。由于超声能的介入，使得制造速度提高，同时降低了施加在器件上温度和键合力。

6) 采用热超声引线键合封装的砷化镓功率放大器散热困难。采用热超声倒装键合技术来封装砷化镓功率放大器，可缩短从热区到散热区的传热距离，可使散热率达到 300W/cm^2 ，降低了节点温度。

1.3.2 键合参数对键合强度和可靠性影响研究

大量试验表明，键合温度、键合力、超声频率、输入超声功率、变幅杆的材料和形状等，都将影响热超声倒装键合(Thermosonic Flip Chip Bonding)的强度和可靠性。通过试验观测和理论推导，人们获得了不同键合参数对键合强度和可靠性的影响规律。主要有^[42-45]：

1) Wei, J.等人研究了 GGI 材料体系下的热超声倒装键合，试验了超声功率、键合温度、键合力和键合时间等键合参数对键合可靠性的影响。结果表明：超声功率和键

合力是影响键合可靠性的最主要因素。大超声功率和键合力可产生高键合强度。热应力循环测试表明封装经过 1250 次-55°C~125°C 的循环，电阻不会改变；压力蒸煮试验表明，在压力、湿度和温度分别为 15 磅/平方英寸、100% 和 121°C 条件下，经过 168 小时，电阻也不会改变；剪切力测试则表明每个金凸点的抗剪切力是 10~40g，具体值依赖于键合参数。而 SEM（扫描电镜）观测到失效位置一般在金凸点和芯片焊盘界面，即热超声引线键合产生的植球界面，表明热超声倒装键合产生的金凸点/基板焊盘界面，其连接强度大于植球界面。至于键合的机理，他们认为是在超声功率驱动下，金凸点和焊盘间产生相对运动，导致键合面产生摩擦和热，产生了微键合点并形成连接强度。

2) Cheah, L.K. 等人研究了基板焊盘镀金厚度、芯片金凸点数目、金凸点形状对 GGI 热超声倒装键合的影响。对键合后的芯片进行了剪切试验以判定键合强度；采用 SEM 观测了键合面形貌；采用热循环和热冲击试验来优化键合工艺。试验表明基板焊盘薄镀金和厚镀金的键合强度分别为 32.16g/凸点和 52.20g/凸点；通过键合面截面分析发现，芯片和基板的平行度是影响键合强度的重要因素之一。

3) Pang, C.C.-H. 等人研究了 109 kHz 超声的热超声倒装键合，获得了超声功率和键合力对键合强度的影响规律：随着超声功率增加，键合强度随之增加，在 2W 时达到最大值；之后键合强度保持不变，而金凸点高度降低、变形率增加。提高键合力也会导致金凸点高度下降。通过比较发现：采用 63kHz 超声，须采用大超声功率才能获得足够键合强度；而采用 109 kHz 超声，即使在 60°C 低温下，较小超声功率就可获得满意的键合强度。而从键合面 SEM 看，低频下金凸点的变形较严重。

1.3.3 热超声倒装键合机理和装备研究

现有热超声倒装键合机理和装备的相关研究主要有^[46-53]：

1) McLaren, T.S. 等人指出：金凸点尺寸、键合力控制和超声能量的重复性对键合结果的影响巨大。认为以下几方面对发展热超声倒装键合技术非常重要：(i) 建立计算模型以指导键合参数设计和选择、了解工艺参数对键合可靠性的影响；(ii) 设计新的、有效的执行器，以准确控制、监测键合力加载过程；(iii) 监测和控制超声系统的机械和电系统阻抗，确保传递到键合面超声能量的一致性。

2) Kang, S.Y. 等人通过研究 64 个 I/O 凸点的芯片在热超声倒装键合中的应用，认识了热超声倒装键合的潜力，了解到需要深入研究超声键合机理以提高封装可靠性。并认为需要解决封装效率和可靠性问题，解决热超声键合窗口不可控问题，才能充分发挥其低成本、工艺简单和小节距的优势。

为此，他们研究了超声在倒装工具中的传递过程。首先，建立了解析模型，用一个简单方程描述了倒装工具中的横波传递过程，提供了快速评估方法，可用于检验有限元模型和实验结果；然后，采用有限元模型，仿真了倒装工具的长度和质量对振幅

的影响，仿真了工具长度和芯片吸嘴摩擦系数对键合系统的影响。最后，采用激光干涉仪测量了倒装工具各位置的振幅，验证了模型的精确性。研究表明：在能量恒定条件下，工具长度对系统的影响较小，而吸嘴摩擦系数对系统的影响巨大。这对于评估不同的工具长度和质量条件下，传递到倒装工具的能量级别差异；指导选择工具的长度以获得最好的键合可靠性；了解新的热超声倒装键合工艺都具有一定作用。

进一步，他们采用 30 和 1000 个 I/O 的倒装芯片，研究了倒装工具配置和质量对键合可靠性的影响。研究表明：可靠性与超声导致的倒装工具振幅紧密相关。对于 30 个 I/O 的倒装芯片，最佳的超声振幅是 $1.30\mu\text{m}$ ；然而，对于 1000 个 I/O 的倒装芯片，由于倒装工具的质量增加，此时的最佳的超声振幅可减小到 $0.26\mu\text{m}$ 。这样的一些差别可通过设计不同长度的倒装工具和不同质量的芯片吸嘴来实现。

Kang, S.Y. 等人的另一项研究是关于超声键合过程中换能器系统的模态随机变化机制。防止模态的随机变化是工艺控制的一项挑战。纵向到弯曲模态的改变可能降低键合面的超声振幅，导致键合质量下降。因此他们研究了超声频率、键合工具长度和吸嘴摩擦系数对随机模态变化的影响。结果表明：当工具长度（变幅杆轴心到工具末端的距离）为 2.32cm 时，没有发现模态改变；当工具长度增加到 2.63cm 后，在其他参数都保持不变情况下，发现系统的谐振频率一直在 58.4 和 60.0 kHz 间转换，而超声振幅则在 $1.63\mu\text{m}$ 和 $0.55\mu\text{m}$ 间转换。最后他们还通过理论模型解释了试验中观测到的随机模态变化。理论模型包括系统的模型分析和工具的振动模型分析。模型分析结果可用于修正系统参数，并以此来防止模态改变，提高键合可靠性。

3) Tan, Qing 等人研究了热超声倒装过程中工具/芯片平行度对键合强度的影响。他们认为：由于超声能量的传输过程难以控制，因此导致了键合可靠性低且不稳定。在工具与键合平台间，即使是很小的不平行度也会导致超声能量分布不均匀。因此他们建立了“自平行”的概念，意图解决不平行的问题。具体的方法是在键合工具和倒装芯片之间加入一层高分子聚合物。试验和有限元仿真表明，该方法可使得超声能量在芯片上分布均匀；但也降低了能量传输效率。

Tan, Qing 等人的另外一项研究是发展一种纵向热超声倒装键合系统，以增加多 I/O 芯片封装时的键合能力。所谓纵向热超声倒装键合系统，即超声振动的方向垂直于芯片表面。与传统的横向热超声倒装键合系统相比，它克服了平行度问题、简化了键合工具配置，但带来了芯片易碎的问题。

4) Leung, M.L.H. 等人则比较了纵向和横向热超声倒装键合系统在芯片倾斜和硅片破碎失效方面的差别。所谓横向和纵向系统，是指工具的振动相对芯片表面是共面还是离面运动。他们采用 ANSYS 模型，获得了键合过程中工具刚度和键合力对硅片应力的影响。仿真和试验都表明：在键合力作用下，横向键合系统的变幅杆发生变形并导致芯片倾斜；而对于纵向键合系统，即使在大键合力情况下，芯片和工具也能保持极好的平行度，避免了倾斜问题。他们还采用激光振动测量系统测量了两种系统

在不同超声功率和键合力下的实际振幅。然后将测得的振幅和键合力数据输入 FEM 模型，研究芯片的应力变化，发现纵向系统产生的应力高于横向系统。在键合力和超声功率为 200g/凸点和 2W 条件下，纵向系统的最大应力达到 1.2GPa，比横向系统大 20%。因此纵向系统对硅片破碎敏感。试验也发现纵向系统容易导致硅片破碎，而横向系统则没有发现。

1.3.4 超声功率和键合力加载曲线研究及其他

在热超声倒装键合的实践中，人们发现除了键合功率、温度、时间、键合力和超声频率等键合参数对键合强度和可靠性有影响外，还发现不同的参数加载过程也会对键合可靠性产生重要影响。相关研究主要有^[29,54]：

1) Tomioka, T. 等人研究了热超声倒装键合在低 I/O 数芯片封装中的应用。试验中用了 6 个和 11 个 I/O 的芯片，研究了基板焊盘材料对键合可靠性的影响，并通过优化键合力的加载曲线，提高了键合可靠性。在此基础上，发展了可靠的热超声倒装键合机器，可达到 1.5 秒/芯片的稳定封装速度。

2) Tomioka, T. 等人还研究了热超声倒装键合技术在 8 个 I/O 的 SAW 器件封装中应用，应用中也是采用了 GGI 材料体系，将芯片键合到陶瓷基板上。研究表明：采用直线上升的键合力加载方式，可以提高可键合性，加大键合窗口范围。这一结论通过可靠性试验得到了验证。

除了上述的研究之外，还有一些关于键合面形貌、键合失效机制和键合监测方法的研究^[55-58]。

1.4 本文的课题来源、研究内容、研究方法

1.4.1 课题来源

本课题来源于国家重大基础研究发展项目（973 计划）“高性能电子产品设计制造精微化数字化新原理和新方法”的课题 2“复合能场作用下微互连界面的微结构演变规律”（项目编号：2003CB716202）；国家自然科学基金“十五”重大项目“先进电子制造中的重要科学技术问题研究”的课题 4“芯片封装界面制造过程多参数影响规律与控制”（项目编号：50390064）；国家自然科学基金项目“LEDs 照明器件连接制造中的非线性机理及其工艺监测研究”（项目编号：50575230）。

1.4.2 研究内容和研究思路

由上述研究现状可知，热超声倒装键合是一种很有潜力、可行的、高效面阵列芯片互连技术，国外的有关研究机构对该技术进行了大量的研究。然而，相关工作多是基于试验的工艺研究，侧重于解决生产工艺问题；而对于深刻阐明热超声倒装键合机

理规律与在此基础上的工艺参数优化，对微电子封装领域依然是巨大挑战。随着微电子封装密度增加、体积缩小，热超声倒装更具有应用前景，键合机理深入研究的重要性凸显。

目前对超声键合机理缺乏系统和深刻认识于以下几方面有关：

- 1) 在试验观测上,由于热超声倒装键合界面空间小(金凸点直径 $80\mu\text{m}$,高 $30\mu\text{m}$)、键合时间短(仅数百毫秒),有关参数(如每一个键合点的温度)难以直接测量。
- 2) 在基本机理上,对超声作用下材料转移与特性改变的过程与基本机理缺乏系统观测、实验。
- 3) 在学科融合上,热超声倒装键合过程涉及到机械、电子、材料、力学、传热、等多学科交叉,增加了认识问题的难度。

本文在理解国内外现有研究基础上,拟通过建立多参数热超声倒装键合系统及其过程的监测系统,通过多尺度、多参数观测热超声倒装过程现象,了解超声能量在键合界面的传递、键合界面运动与物质转移过程和键合强度生成过程,以期在键合机理认识上有所进展;研究并建立相关模型,以此为基础,形成创新工艺和装备技术。

具体的研究内容包括以下几个方面:

1) 热超声倒装键合实现及基本实验设计与观测

设计、实现倒装键合系统,在此基础上建立倒装键合过程的观测系统。

由于热超声倒装键合的界面空间小、键合时间短,是典型的非平稳局部瞬态过程,且键合过程涉及应力、温度、超声振动以及相应的运动传递、能量转化和材料的弹塑性变形过程等,对这样的复杂过程,现有的研究观测角度单一、手段有限,所获得的信号单一,因此难以全面认识界面行为过程,难以获得对键合机理的本质认识。

直接观测键合界面可为研究提供重要实验数据,因此,本文建立的多参数的过程监测系统,可以记录与键合过程相关的换能器电流和电压信号、键合温度信号、芯片和工具振动信号等数据,为后续的研究提供试验观测数据。

2) 外场作用下热超声倒装键合系统的运动与能量传递分析:

超声的介入使得键合的强度、可靠性和效率大幅度提高,了解超声在键合系统中的传递过程,是理解键合机理的基础。然而,超声在界面间的传递过程是比较复杂的,特别是在键合界面的传递过程。因此,若能获得键合过程中界面的运动,就可从这个侧面认识键合过程,进而获得对键合机理的认识,为键合参数优化提供最直接的依据。本文将通过理论分析,研究超声在键合系统中的传递过程,通过试验观测,研究键合过程中工具末端和芯片的振动,认识超声振动在倒装界面的传递过程。

3) 热超声倒装键合界面结构与强度:

超声传递到键合界面后,与键合力和温度共同作用,将金凸点键合到焊盘上。这个过程中,键合面的应力在改变,使得金凸点的微观结构产生变化,比如:位错密度增强、原子扩散加剧等。这样的微观结构变化影响了键合界面强度的分布、以及最终

的键合面强度。试验也发现键合面的形貌与键合力、与超声振动有密切关系。因此，本文将建立金凸点/焊盘有限元模型，研究键合面在超声和键合力作用下的应力变化过程，了解键合面强度分布及强度生成过程。

4) 热超声倒装键合工艺优化：

通过超声功率、键合力、键合温度和键合时间等基本键合工艺参数对键合强度的影响研究试验，获得键合过程中不同的键合参数，如：换能器电流和电压信号、键合温度信号、芯片和工具振动等信号的变化过程；同时检测对应的键合界面的结合强度和微观结构，分析这些信号的变化与键合强度、键合界面形貌间的联系，以此来获得对键合真实过程的认识。

在上述研究基础上，根据对键合过程和键合机理的新认识，提出新的、合理的工艺和装备参数与结构，并进行试验验证，提高热超声倒装键合的键合强度、可靠性，形成自主知识产权的单元技术。

上述研究内容的研究思路如图 1-7。

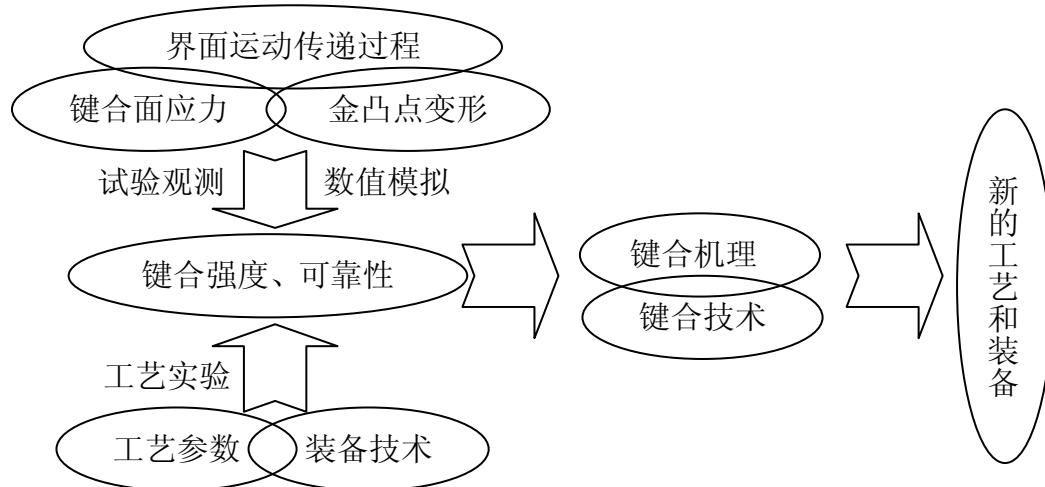


图 1-7 研究内容和思路示意图

第二章 热超声倒装键合实现及基本实验设计与观测

根据热超声倒装键合工艺，建立热超声倒装键合实验平台，进行热超声倒装键合的各类实验；观察键合功率、温度、时间、压力和超声功率等键合参数如何影响热超声倒装的键合强度。同时，建立了热超声倒装键合过程多参数监测系统，较完整地观测、记录了键合过程；建立了数据分析系统，对监测系统获得的键合过程数据进行分析，为键合机理的研究提供试验数据。

2.1 热超声倒装键合试验台

2.1.1 热超声倒装键合工艺介绍

热超声倒装键合的典型工艺过程为：

- 1) 用超声引线键合的方式，在晶圆的芯片焊盘植金凸点；将晶圆贴在表面涂胶的蓝膜上（金凸点朝上），用划片机将晶圆划开；将蓝膜安装在晶圆环(Wafer Ring)上，用扩晶机将晶圆扩开，成为独立的芯片；
- 2) 将扩晶后的芯片连同蓝膜和晶圆环放在专用的芯片输送设备上；在蓝膜的下方用一根顶针将需要键合的芯片顶起，同时在该芯片上方用一个吸嘴将芯片吸起，将芯片从蓝膜取出并转移到专用的芯片翻转夹，翻转180°后，背面朝上地放置在输送带上输入热超声倒装键合设备；
- 3) 在热超声倒装键合设备中，背面朝上的芯片被输送到倒装工具下方，倒装工具在视觉识别系统的引导下将芯片吸起，并带到键合基板上。倒装工具安装在超声变幅杆的末端，变幅杆由压电陶瓷驱动，并将压电陶瓷产生的机械振动传递到倒装工具和芯片上，最终作用在倒装界面（如图 2-1）；在超声振动、键合力和温度的共同作用下，、装芯片的金凸点被键合在基板焊盘上，实现倒装键合。

一般情况下，步骤 1) 和 2) 由其他辅助装备完成；热超声倒装键合设备主要完成步骤 3) 的功能。

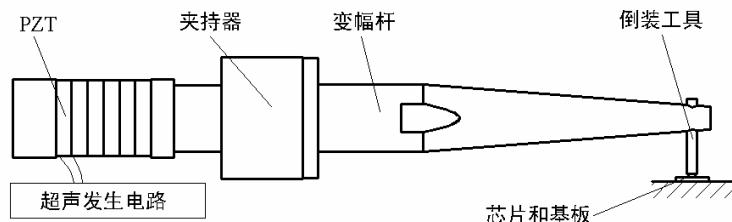


图 2-1 超声在变幅杆和倒装工具中的传递路径示意图

2.1.2 热超声倒装键合试验台组成与功能

热超声倒装键合可采用两种方式实现：超声振动方向垂直键合界面（简称纵向振动）或超声振动平行键合界面（简称横向振动），它们在原理上都是可行的^[51-53]。目前业界多采用后者，本文建立的超声倒装键合试验台也采用这种方式，即工具振动方向与芯片表面平行。

按照倒装键合工艺的要求，本文构建的热超声倒装键合试验台主要由五部分组成：超声发生和传递系统、键合台加热系统、键合力控制系统、键合机机械结构和键合机运动控制系统。它们的关系如图 2-2：



图 2-2 热超声倒装键合试验台结构示意

键合机机械结构主要是实现键合头的支撑、运动，以及为其他系统和部件提供安装底座；键合头运动控制系统实现键合头运动控制；键合力控制系统控制键合力加载过程；键合台温度控制系统对键合工作台加热并进行温度控制；超声发生和传递系统是热超声倒装键合试验台的核心部分之一。各部分的结构和功能具体介绍如下：

(1) 超声发生和传递系统

超声发生和传递系统包括：超声发生电路、PZT (压电陶瓷)、变幅杆、夹持环、倒装工具等几部分，如图 2-1。其工作原理为：具有锁相功能的超声发生电路产生 $60 \pm 2 \text{ kHz}$ 的正弦电功率信号驱动 PZT；PZT 将电功率信号转换成机械振动(压电逆效应)；振动以纵波形式在变幅杆中传递；超声振动到达倒装工具后转换为横波，经工具传递到键合界面，作用在键合点上，在键合力和温度共同作用下，将芯片上的金凸点键合在基板焊盘上，完成热超声倒装键合。

研究表明倒装工具的材料和长度都对超声波在超声系统中的传递效率、倒装工具末端的振型等有影响，并最终影响键合强度和可靠性^[46-48]。根据工业生产经验和已有研究资料，本文采用钨钢工具，其材料为标准碳化钨钢(Tungsten Carbide)，弹性模量为 500GPa；密度为 4900 kg/m^3 ，几何形状和尺寸如图 2-3。

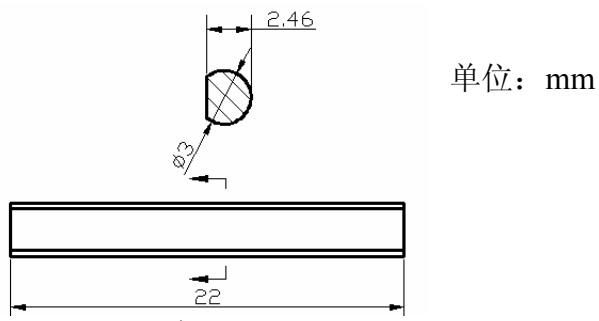


图 2-3 倒装工具几何结构

此外，倒装芯片夹持方式是超声能量传递环节的重要组成，决定了键合界面所能

获取能量的效率。现有研究或应用中所采用的夹持方式主要有两种：几何约束和真空吸附，其原理如图 2-4(a)和(b)：

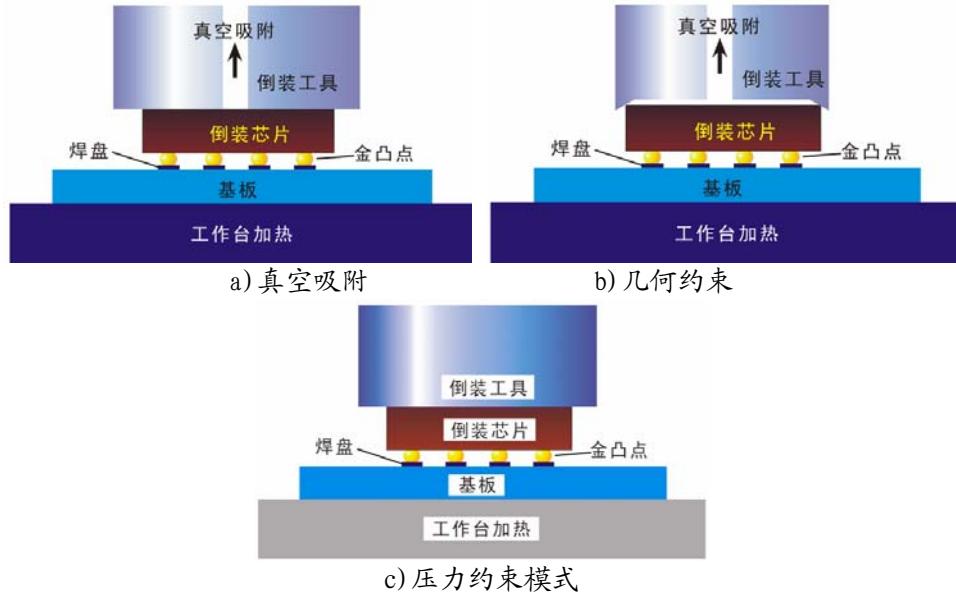


图 2-4 常用芯片夹持方式原理

真空吸附是指芯片在负压作用下固定在工具末端，键合过程中通过键合力所产生的摩擦力和大气压力来约束芯片、传递超声振动；几何约束是在工具末端加工出凹坑，键合时芯片嵌入凹坑并被约束（芯片和凹坑底部不接触），以此传递超声振动，真空吸附主要用于拾取芯片；本文采用图 2-4(c)所示的压力约束模式，倒装工具是实心的钨钢圆柱体，末端端面光滑平整；在热超声倒装键合过程中，工具通过键合力所引起的摩擦力约束芯片、在键合界面中传递超声能量。

这三种夹持方式各有优缺点。真空吸附方式的超声能量利用率高，但容易导致过键合、真空度的控制也较困难：过大芯片会破碎；过小没有足够约束力，芯片键合不上。几何约束方式没有真空度控制问题，但同样易导致过键合，且不同尺寸的芯片需不同的倒装工具。压力约束模式没有真空吸附问题、也没有更换工具问题，且对控制系统的要求低，但需要较大键合力，容易磨损芯片表面。本文在试验中采用压力约束模式。

(2) 键合台加热和温度控制系统

热超声倒装键合系统中的键合台温度控制原理如图 2-5：

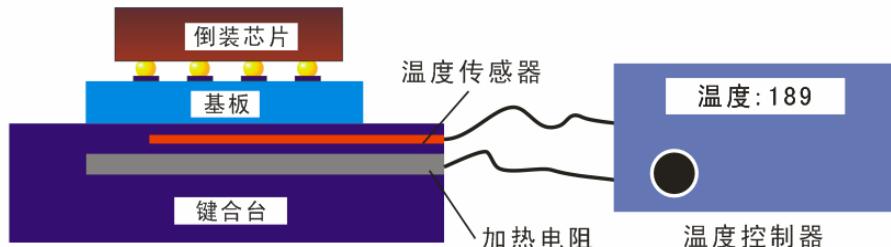


图 2-5 键合台温度控制原理

这是一个闭环控制系统。在键合台的内部植入一个加热电阻和温度传感器，通过

温度控制器向加热电阻供电，将加热台加热；同时，温度传感器获得加热台的温度信息，一方面显示在温度控制器上；另一方面为温度控制器控制加热电阻的电流提供依据：当键合台温度还没有达到设定温度时，加大加热电阻的供电电流，对键合台进行加热；当温度接近达到设定温度后，切断加热电阻的电流，停止加热，直到键合台的温度低于设定温度，再重新加热。采用合适的温度控制算法，可以实现 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 的控制精度，满足了键合工艺的要求。

(3) 键合力控制系统

热超声倒装键合系统中的键合力施加装置原理如图 2-6：

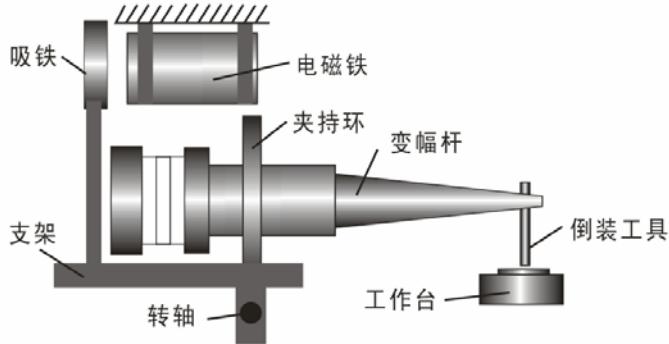


图 2-6 键合力施加装置原理

在键合开始之前，由于变幅杆和倒装工具的重量大于吸铁重量，支架绕转轴顺时针旋转，倒装工具下垂，但还没有接触到工作台；键合开始后，整个键合系统向下运动，当倒装工具接触到工作台后，变幅杆系统受力使得支架稍稍绕转轴逆时针旋转一个微小的角度，并将一个常闭触点打开，系统据此感知到倒装工具接触到键合芯片。然后，系统给电磁铁线圈通电，产生磁场吸引吸铁，使支架绕转轴顺时针旋转一个角度，支架旋转使得安装在夹持环上的换能器系统（包括变幅杆、倒装工具等）倾斜，倒装工具抵在工作台上，对键合芯片施加一定的键合力。由于变幅杆的长度远大于转角，因此，可认为变幅杆的转动不会影响芯片和变幅杆端面的平行度，不会对键合质量带来根本的影响。

键合力大小可通过控制电磁铁的电流实现，其原理如图 2-7：

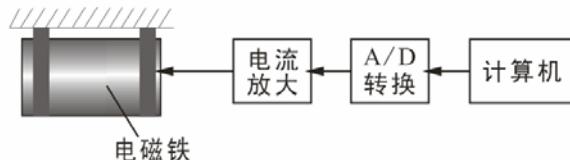


图 2-7 键合力控制原理

这是一个开环控制系统。计算机通过 A/D 转换接口输出模拟量信号，控制电流放大环节的参数，实现对电磁铁线圈供电的精确控制，从而实现对键合力的控制。但是，由于电磁铁和吸铁之间的气隙等因素，电流和键合力的大小并不是线性的，因此需要通过大量的实验，来确定二者之间的非线性关系。这将在第四章相关部分详细描述。力的控制精度可以达到 2g，能满足倒装工艺的要求。

(4) 键合机机械结构

热超声倒装键合实验系统的机械结构包括：键合头的运动台、键合台的运动台、以及整机底座支撑台。其中，键合头的运动台通过步进电机驱动丝杠导轨实现移动和定位。整机底座支撑台采用铸铝铸造，为上述的所有机构提供确定的相互位置和功能匹配的集成平台。

(5) 键合头运动控制系统

控制系统包括：温度控制系统、键合力控制系统和运动控制系统。其中运动控制系统主要是键合头的两轴运动控制，其结构如图 2-8：这是一个开环运动控制系统。计算机发出一定相序的脉冲，通过 A/D 转换接口，控制步进电机的电流大小和变换规律，实现对步进电机转角和转速的控制，从而实现键合头位置的精确控制。

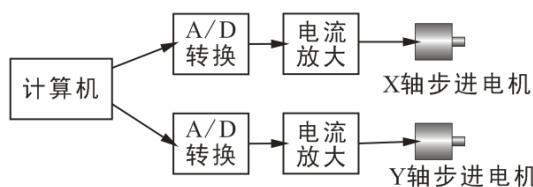


图 2-8 键合头的运动控制系统原理

采用小螺距的丝杠，加上细分的步进驱动方式，可以实现 $5\mu\text{m}$ 的定位精度，满足了倒装工艺的要求。

(6) 热超声倒装键合实验系统的性能

采用上述方案实现的热超声倒装键合试验台，其部分工艺参数及其调节范围如表 2-1：

表 2-1 热超声倒装键合试验台工艺参数调节范围

试验参数	调节范围
芯片 I/O 数目	8 个
键合力	0~1200g
基板温度	RT~400°C
超声频率	$58\pm2\text{kHz}$
超声功率	0~5W
键合时间	0~500ms

其中，实际的倒装试验台的倒装工具和倒装芯片细节如图 2-9：



图 2-9 实际倒装试验台的细节

2.1.3 热超声倒装试验材料体系

热超声倒装的材料体系也是影响键合可靠性的重要因素，不同材料体系采用的键合参数截然不同。材料体系主要包括基板焊盘、凸点以及芯片焊盘的结构、材料及其特性。本文采用的材料体系为：

(1) 倒装芯片

本文采用硅芯片，面积为 $1 \times 1\text{mm}^2$ ，由香港 ASMPT 公司提供。芯片表面有 28 个铝焊盘(pad)，其中有 8 个焊盘采用热超声引线键合方式植有直径约 $80\mu\text{m}$ 、高度约 $30\mu\text{m}$ 的金凸点(bump)，焊盘和金凸点分布如图 2-10。

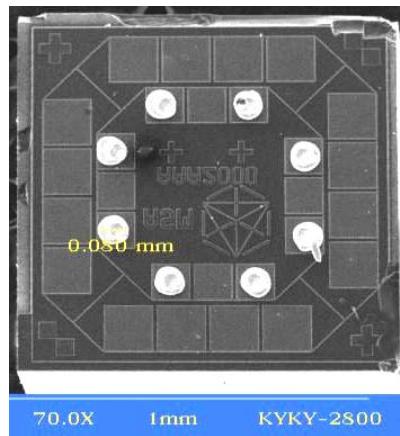
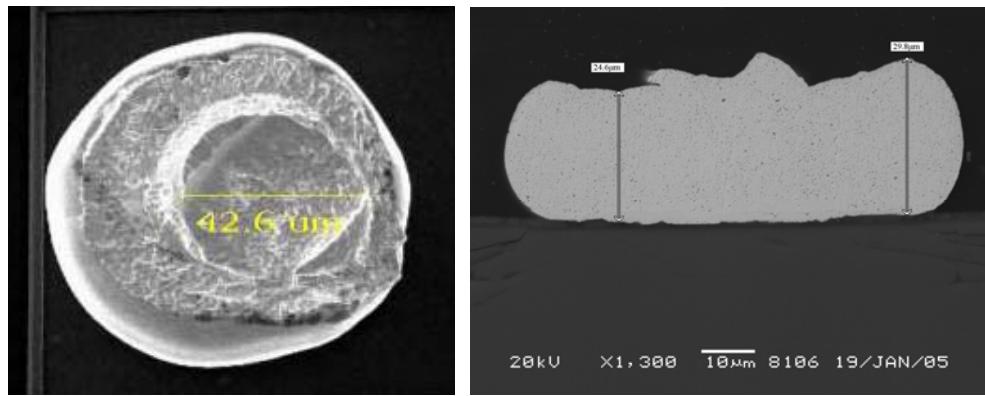


图 2-10 试验所采用芯片的结构和芯片上的金凸点分布

由于金凸点高度一致性对键合强度都有影响，本文采用了严格控制金凸点一致性的芯片，最大程度地消除了这方面的影响。图 2-11 是金凸点的 SEM 照片。



(a) 俯视 SEM 照片 (b) 纵截面 SEM 照片

图 2-11 试验所采用芯片的结构

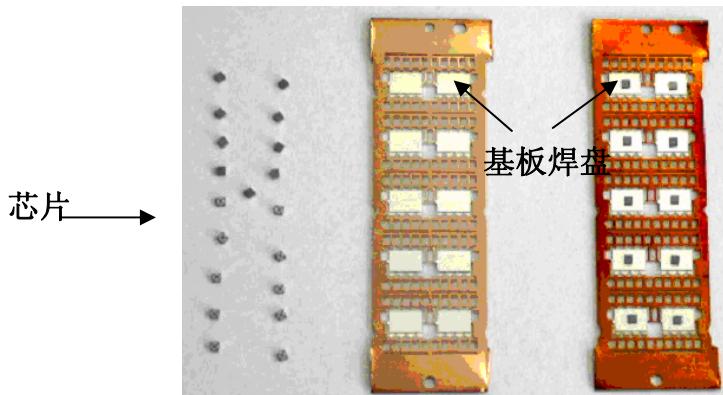


图 2-12 试验所采用芯片的结构

(2) 倒装基板

本文所用的基板是铜基板。为方便试验，基板焊盘整个表面都镀银，如图 2-12。图中左边是倒装前的基板；右边是倒装后的基板。

2.1.4 热超声倒装键合过程

在上述设备和材料体系下的热超声倒装键合过程如图 2-13：

(1) 将铜基板固定在工作台上，加热到键合所需温度（对比热超声引线键合工艺，本文选用 160°C）；

(2) 将芯片放在基板上，背面朝上、植有金凸点的一面朝下，金凸点与银焊盘接触；

(3) 键合工具压下与芯片背面接触；并施加所需要的键合力；

(4) 开启超声；由于键合力的存在，芯片与工具间、金凸点/焊盘间存在摩擦力，因此超声振动得以在界面间传递。在键合力、加热台加热和工具传递过来的超声能作用下，金凸点被键合在基板焊盘上；

(在这里补充：几种力作用在几个界面键合系统的作用关系。这是后续内容的基础。)

(5) 超声开启一段时间后完成键合，然后关闭超声、升起倒装工具，撤走键合力，完成了键合全过程。

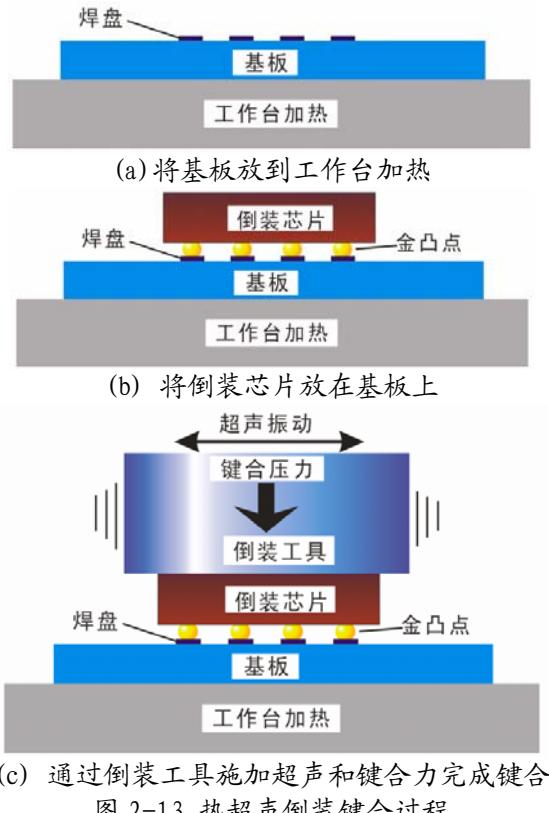


图 2-13 热超声倒装键合过程

其中，工具与芯片接触面称为键合上界面，金凸点与基板焊盘接触面称为键合面（或者是键合下界面）。由倒装芯片/金凸点/基板焊盘/基板组成的系统称为键合区域。而倒装键合系统则是指整个键合实验台。

本文的热超声倒装键合试验所采用的工艺参数如表 2-2 所示：

表 2-2 热超声倒装键合试验所采用的工艺参数

试验参数	设置
芯片 I/O 数	8 个
键合力	1.18~4.70N
基板温度	120~240℃
超声功率	1.5~3W
超声频率	60±2 kHz
工具尖端振幅	0.5~1.4μm
键合时间	100~300ms
芯片抗剪切力	0.98~1.57N

2.2 热超声倒装键合过程监测系统

热超声倒装键合过程是一个复杂的过程，键合强度和可靠性与键合超声功率、键合力、键合温度等因素相关。在键合过程中，监测这些信号的变化是了解热超声倒装键合过程、认识键合机理、提高键合强度和可靠性的重要途径。从认识键合机理的角度出发，获取关于键合过程的信号当然是越多越能全面反映键合过程的物理本质。然而，限于目前的技术手段，有些过程难以被观测，比如：金凸点的运动过程和流变过程。本文根据研究需要，结合键合试验台的结构和现有的监测技术手段，建立了如下的监测系统。

2.2.1 监测系统硬件构成

本文建立的热超声键合过程监测系统硬件构成如图 2-14。

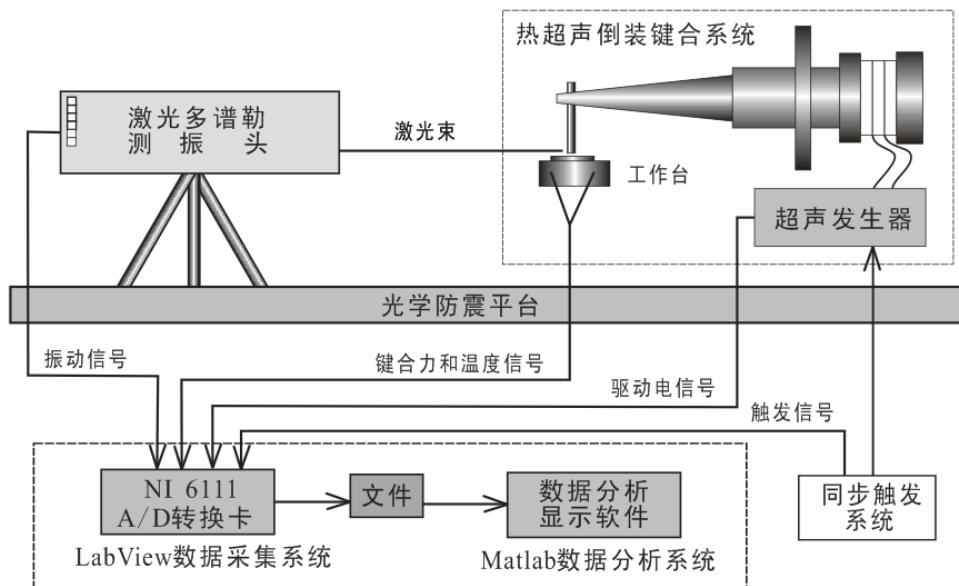


图 2-14 超声键合过程监测系统组成原理

该系统可监测键合过程中的 PZT 输入功率/阻抗（超声功率）、键合力、倒装工具和芯片的振动；以及键合后的键合点强度和键合面微观形貌。监测系统的工作原理为：同步触发系统在启动热超声倒装键合过程同时，也启动数据采集系统，通过各种传感器获得键合过程中与界面行为过程相关的各种信号，且信号的时间轴相同，因此数据可充分表征各参数间的相关性和演变的动态特征。

监测系统各部分的功能、详细结构和具体参数分别为：

(1) 光学防震平台

1.5×3.0m 的隔震平台，可承载热超声倒装键合试验台和监测系统，并消除大部分环境振动对试验过程的干扰。



图 2-15 光学防震平台

(2) 超声功率监测

超声能是热超声倒装键合的主要能量，键合界面的超声能量输入，在很大程度上决定了键合强度的生成。采集并分析驱动功率的变化在一定程度上可了解键合强度的生成过程，为键合机理研究提供基础。

然而目前的测试技术直接观测输入键合界面的能量几乎是不一种可行的办法是测量对键合系统输入的总能量，即测量键合过程中驱动 PZT 的电功率信号。一方面，PZT 将电能转换为超声能后，在传播的途径中必然有一些能量损耗，但是主要的能量还是传递到键合界面做功。也正是基于这种考虑，目前的超声键合系统，几乎都是通过采集 PZT 的输入超声功率，来决定实际键合参数和键合窗口，如图 2-16。另一方面，采集 PZT 的驱动电压和电流信号，计算输入电功率，在技术上也容易实现，可实现功率的在线监测。

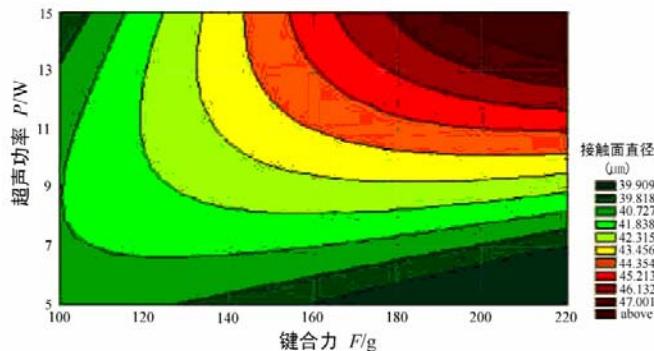


图 2-16 超声功率和键合力决定的键合窗口

在超声发生电路和 PZT 间接入信号采集电路，可获取 PZT 的电功率信号。其原理如图 2-17：

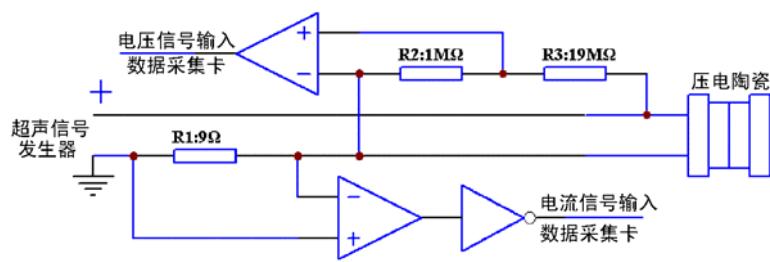


图 2-17 PZT 驱动信号的采集接口电路

在信号发生器和压电陶瓷间的电路中，串入一个 9Ω 电阻作为电流采样电阻，并入一个 $1M\Omega$ 和 $19M\Omega$ 电阻作为电压采样电阻。获得的电流和电压信号输入数据采集

卡进行采集。由于驱动 PZT 的信号电压峰值可达 100V (一般约 40V)，而数据采集卡最大输入电压为 10V，因此电压信号须经分压电路衰减 20 倍后才能输入采集卡。

(3) 键合力、键合温度监测

键合过程的键合力也是决定键合强度的一个重要因素。键合力监测采用美国 PCB 公司的 200B01 压电压力传感器。该传感器的线性度好，响应频率为 75kHz，灵敏度为 119.4mV/N，量程为 4.5N。配以信号调理模块，键合力信号可直接经数据采集卡输入计算机，如图 2-18。



图 2-18 键合力监测装置

键合温度则采用埋入键合台的热电偶温度传感器测量，温度信号经数据采集卡输入计算机，其测量精度可达 0.5°C 。

(4) 倒装工具/芯片振动监测

超声振动在键合界面的传递过程及伴随的能量传递过程是影响热超声倒装键合强度的关键因素之一。超声能量在倒装工具/芯片界面的传递，受到键合力、超声功率等因素的影响，并决定了耗散在该界面的能量和能够输入到键合面的能量，最终影响到倒装芯片和工具表面的磨损，也影响到键合面强度的生成。

测量热超声倒装键合过程中键合工具和芯片的振动，对于建立倒装工具/芯片界面运动传递过程动力学模型，研究超声振动在该界面的运动传递过程，揭示超声功率、键合力等因素对该过程的影响；对于提高能量传递效率，同时降低倒装工具/芯片表面磨损，针对该界面高效的能量传递过程寻求优化的键合时变参数加载过程和模式，都具有重要的意义。

振动监测可通过图 2-19 所示的 PSV-400-M2 激光多普勒测振系统（德国进口）实现。它根据多普勒原理工作：首先向被测物体表面发射一束激光，然后通过测量反射激光的频移来确定被测体的实时速度和位移。系统主要由振动传感器、测振控制器、数据采集系统和测量管理系统构成，它们在软件控制下完成扫描、数据预处理和测量结果显示等功能。该系统具有非接触测量的功能，采用波长为 633nm 的 He-Ne 激光，最高可测振动频率为 1.5MHz，具有 10~1000 mm/s/V 多种测速范围，双通道的数据采集系统可同时输入触发信号和振动信号，多种触发方式可方便地采集任意时刻被测物体的振动信号。该系统可测量键合过程中倒装工具和芯片的振动。



图 2-19 激光多谱勒振动监测

该设备的一个缺点是激光光斑直径比较大，测量到的振动信号噪声大、不容易测到稳定的键合过程；在试验中可通过改进光路、重复试验等方法来解决。

(5) 倒装芯片剪切测试强度

测量倒装芯片剪切测试强度，是工业界了解键合质量的一种重要方法。本文通过测量剪切强度，可了解芯片每个 I/O 点的平均连接强度；也可为上述物理信号分类提供依据，通过分析不同强度下物理信号的差别，可确定影响键合强度的重要因素和重要阶段，从而为认识键合机理提供最直接的试验依据。

根据美国军标 STD-883E 规范，自行设计了键合剪切力测试台，如图 2-20。它由芯片夹持底座、微小位移实现装置和测力传感器组成。测量范围 0~9.8N，精度可达 0.0098N。

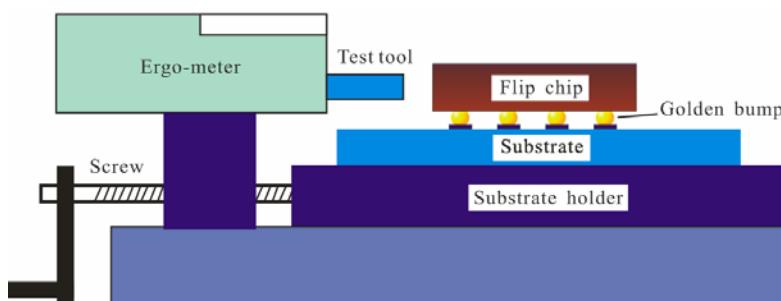


图 2-20 键合剪切力测试台

(6) 键合面微观形貌观测

键合面微观形貌可为键合强度生成过程和键合强度的分布研究提供更微观和更直接的认识，可为键合机理的研究结果和结论提供最直接的佐证。可用 KYKY2800 扫描电镜和 Finder1000 能谱仪观测键合界面微观结构。

(7) 同步触发系统

上述大部分需在超声键合开始时启动进行监测，因此需研制同步触发系统。本文研制了基于单片机的同步触发系统，其结构和原理如图 2-21。该系统将 PZT 的驱动电压信号作为输入信号，在热超声键合过程启动的时，系统被触发，并输出高电平信号去触发各种数据采集系统，对键合过程进行记录。该系统具有反应速度快(<9ns)、稳定性好、驱动能力强、对监测设备无干扰等优点^[59-61]。通过该系统，可实现各种物

理信号的同步采集，各种信号有共同的时间轴，在研究中可互相参照。

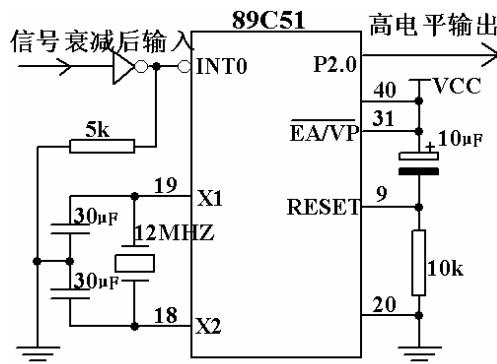


图 2-21 同步触发装置

(8) 高速数据采集卡

整个监测系统各种传感器的信号最后都通过数据采集卡被纪录下来，供后续研究分析用。本文采用了 NI PCI6110 数据采集卡，该系列卡是高精度、多功能的同步多功能数据采集卡，具有 4 路和 2 路精度为 12 位的同步模拟量输入通道，最高采样率可达 5MSa/s。数据采集卡的触发通道连接同步触发系统的输出端，当热超声键合过程开启的时候，同步触发系统将触发数据采集卡，从而将键合过程的各种物理信号记录下来。

上述监测系统平台能够满足了本文研究需要，且其开放性的特点可满足未来进一步研究的新需要。

2.2.2 监测系统软件构成

监测系统除了记录传感器信号外，还要适当处理信号。上述系统中除了激光多普勒振动测量部分自带数据采集和处理外，其他部分均需研制数据采集和处理软件。

监测系统的软件组成如图 2-22：软件基于 Windows2000 操作系统开发。其中数据采集部分基于 LabView 平台开发了数据采集卡的 LabView 驱动程序，实现了对采集卡的控制，包括触发方式、采样速率、通道选择、数据采集和存储等。数据以文本格式存储，虽然占用的存储空间大，但数据便于被其他程序读取。数据分析部分则是基于 Matlab 开发，利用了 Matlab 强大的数组数据处理能力。最后，所有的处理结果都以图形化方式显示^[63]。

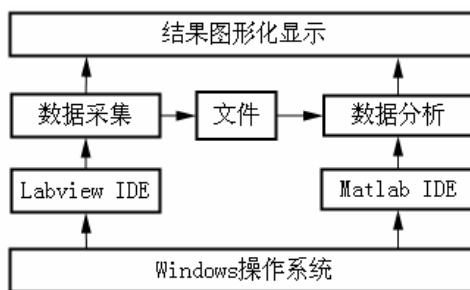


图 2-22 数据采集、分析系统软件逻辑框图

监测系统数据采集软件的总体设计如图 2-23。软件由四个模块构成，核心是数据

采集模块，实现数据采集的参数设置，包括：采样频率、触发方式等；数据显示模块和保存模块负责保存或实时显示采集的数据；用户响应模块则响应用户的输入，比如终止、暂停采集等。

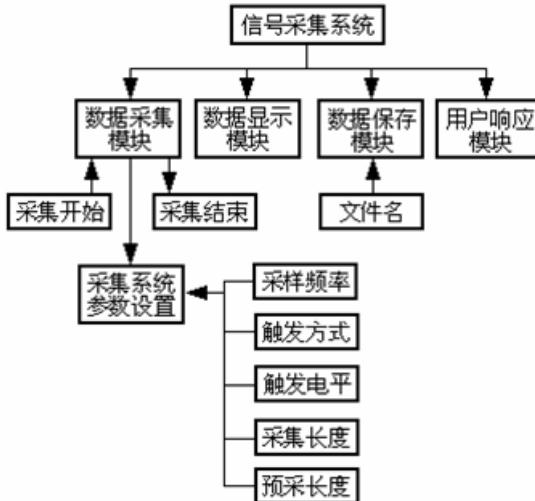


图 2-23 数据采集系统软件总体设计

数据采集软件基于 LabVIEW 的实现流程如图 2-24：程序启动后，系统首先对数据采集卡进行配置，包括：配置设备缓冲区、输入通道、输入范围；然后配置触发器，包括：设定触发通道、选择触发种类和类型。然后设置采样频率和预触发的长度并启动采集；最后，将存储在数据采集卡上的数据读取到系统内存，存入指定文件、同时显示出来。

采用 LabView 实现了上述过程的数据采集软件分为前面板窗口和后流程窗口 [64-70]，如图 2-25。前面板窗口包括设置采集卡参数、显示数据、响应用户等，可通过前面板设置数据采集的采样频率、采样次数、触发源、阈值电平、触发模式、输入范围等参数；后流程窗口是前面板窗口功能的图形化语言解释，除了实现前面板显示的功能，还包括保存数据、处理意外等。

上述高速数据采集系统能够实时采集除芯片和工具振动外的其他信号（芯片和工具振动通过多普勒测振系统测量），并将数据保存到指定文件中。

振动信号需通过激光多普勒测振系统获得，虽然 PSV-400-M2 型激光多普勒测振系统具有很强的测振能力，比如：可测量的频率范围可有静止到 1.5MHz；最小可测量的区域是 $1 \times 1\text{mm}$ 等。但由于系统需要实时处理测量数据，因此限制采集的数据不能大于 32000 点，即在 5MHz 的采样速率下仅仅能记录 6.4ms 的运动过程；而倒装键合的过程往往长达数百 ms，相比之下，测振系统显得记录时间过短。为此对其进行改造：振动传感器获得的振动信号经 NI 6111 数据采集卡数字化后，不输入振动测量系统的数据处理软件，而是经自行开发的数据采集软件记录存储下来，这样就解决了数据记录长度问题。而数据的处理和显示则可采用基于 Matlab 平台开发的专门处理软件完成。

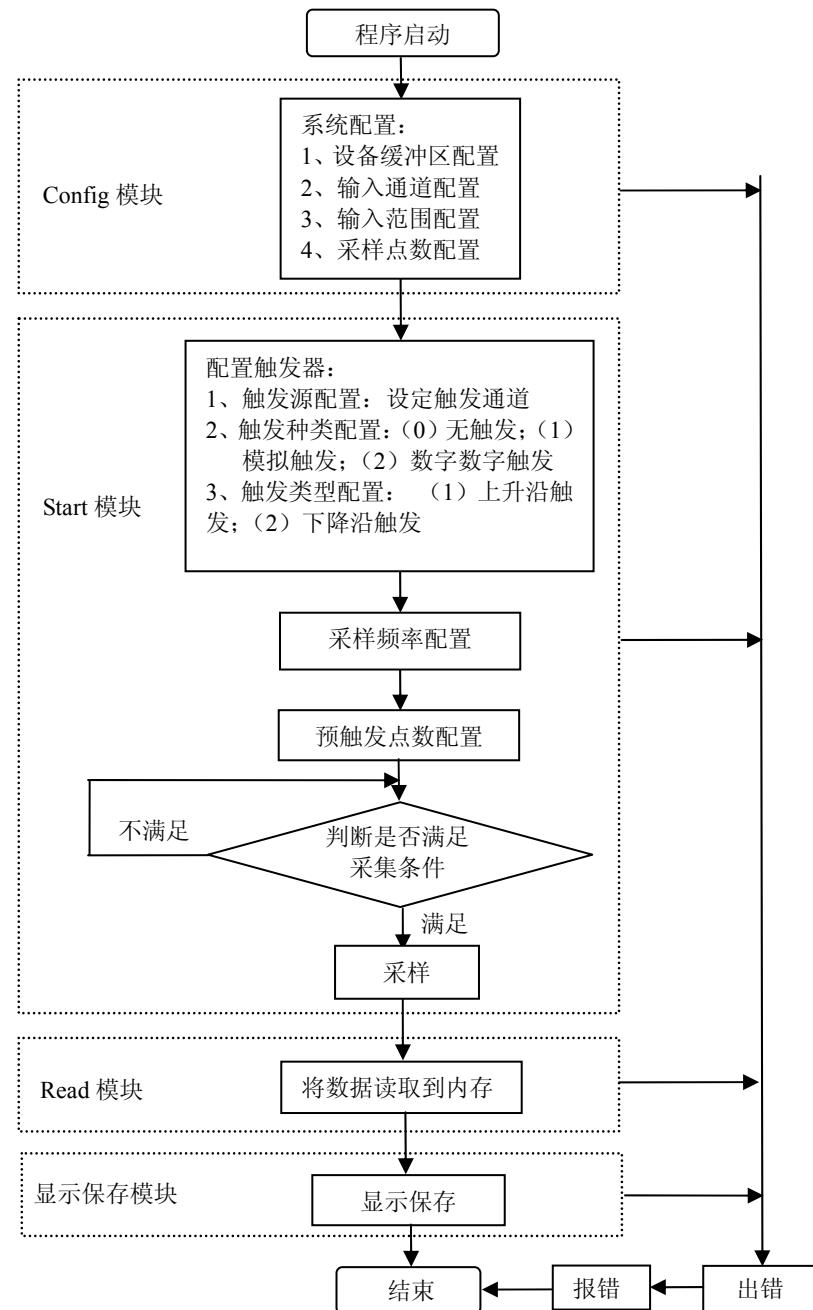


图 2-24 软件的具体实现流程

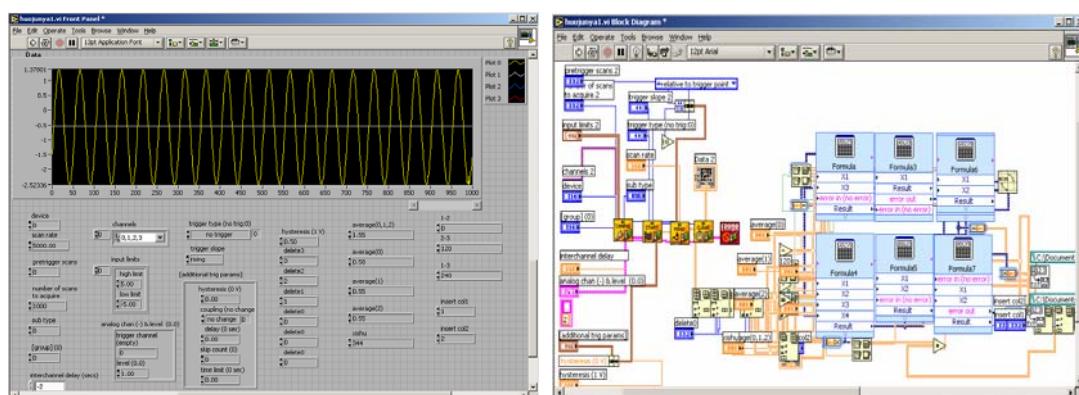


图 2-25 LabVIEW 数据采集软件界面

采用上述的系统，采集芯片和倒装工具振动数据方法为：数据采集卡使用预触发方式，触发前预采 5000 个点；将同步触发系统输出信号作为数据采集卡的触发信号输入触发通道，上升沿触发；数据采集卡的采样频率为 1.2MHz，采样长度为 140000 个采样点，大约相当 116.7ms（键合过程约 100ms）。

2.3 键合过程监测系统数据采集和分析

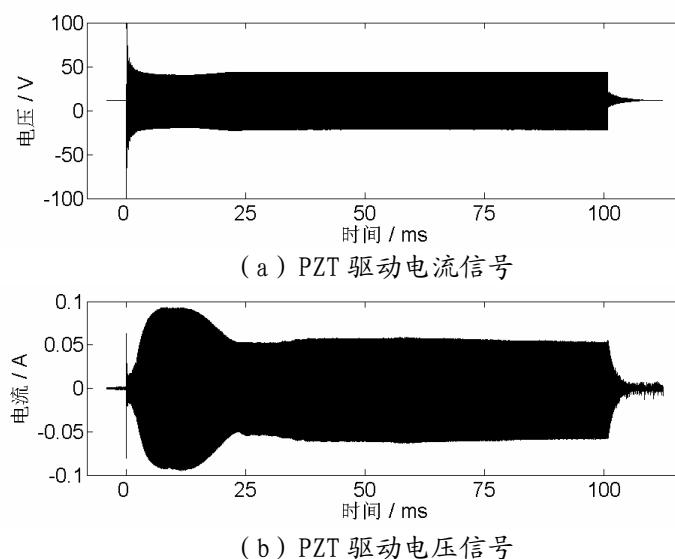
采用上述监测系统获得了关于热超声倒装键合过程的信号数据。对采集的数据作深层分析处理，可获得关于键合过程的认识。

2.3.1 超声功率信号采集和分析

(1) 超声功率信号采集

超声功率信号通过采集 PZT 驱动功率信号获得（包括电压和电流信号）。启动热超声倒装键合系统后，PZT 驱动电压将超过 0.5V，同步触发系统被触发，并触发数据采集卡启动采集程序，直到采集点数目超过设定值为止，从而将键合过程的 PZT 驱动信号记录下来。通过调整采样速率和采样点数目，可以获得不同分辨率的信号。采集完成后，数据以文本形式顺序分列存储在指定文件中，以备进一步分析。其中，频率参数和功率信号可通过处理电压、电流信号获得。由计算得到超声功率信号。

图 2-26(a)和(b)是采用上述方法所获得的典型键合过程 PZT 驱动信号电流和电压曲线。该曲线由 140000 个采样点绘出，由于采样点多，而时间轴短，测试点未充分拉开。若将曲线展开，每个超声周期有 16 个采样点，足以表达键合过程超声功率信号的变化，如图 2-26(c)和(d)。



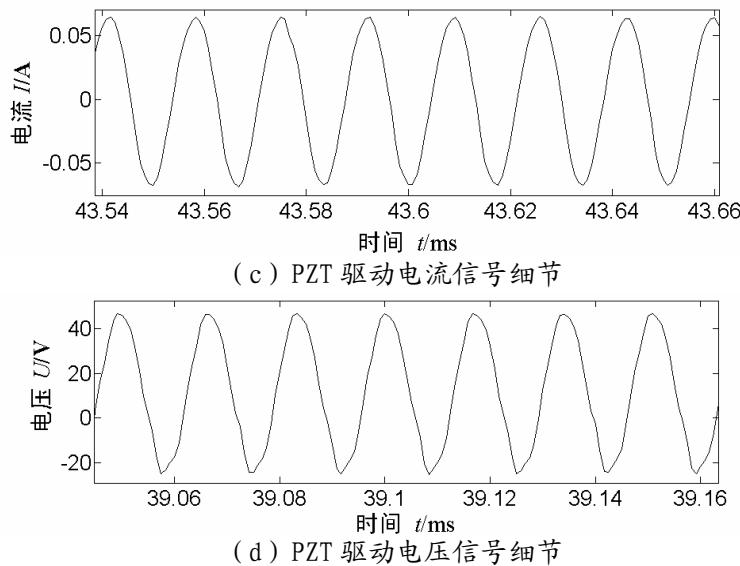


图 2-26 典型 PZT 驱动信号

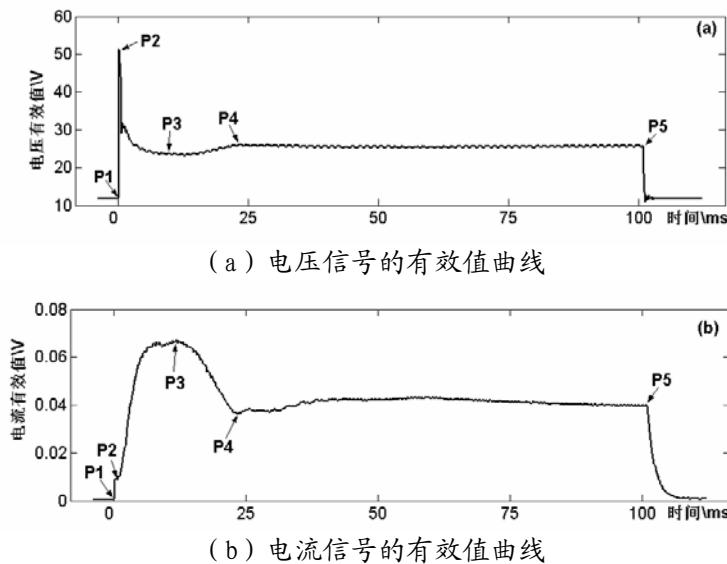


图 2-27 电压、电流信号的有效值曲线

(2) 超声功率信号分析

Matlab 对于大量数据的处理效率是非常高的^[71-75]。因此，功率信号的分析系统软件用 Matlab 语言编写。主要完成三部分工作：a)计算电流和电压的瞬时频率和相差；b)计算电流和电压的有效值以及提取其有效值特征点，分析有效值特征点的稳定性。这对于键合过程各阶段划分及各阶段对键合强度形成过程的影响研究是非常有意义的。c)根据电流和电压信号计算超声功率。第三部分将在第三章详细述。

电流和电压均为交流信号，为便于分析，首先要计算其有效值序列：

$$\begin{cases} U(m) = \sqrt{\frac{1}{2n} \sum_{k=m-n}^{m+n} u^2(k)} \\ I(m) = \sqrt{\frac{1}{2n} \sum_{k=m-n}^{m+n} i^2(k)} \end{cases} \quad (2.1)$$

其中， $m = 2cn(c=1, 2, 3\dots 14000/2n)$ ；这里取 $n=100$ ，对图 2-26 所示信号，可得有效值曲线如图 2-27 所示。

由测试得到的 PZT 的输入功率中电功率/阻抗的变化和信号频率的变化可知：键合界面在键合过程中是动态变化的，其变化将影响金凸点和焊盘的约束、影响倒装工具和芯片表面的约束，从而改变键合界面的机械阻抗、改变键合系统的固有频率。因此，计算瞬时频率对于了解键合过程中键合界面系统的稳定性也具有重要作用。其计算原理如图 2-28：电压和电流信号均为交流信号，其特征是每周期有两个 0 点；由于每个采样点时间 Δt 已知（ $1/1.2\text{e}6\text{s}$ ）；因此，确定 0 点的位置及其间距 Δs ，由式 2-2 就可计算瞬时频率。

$$\Delta f = \frac{1}{\Delta s \Delta t} \quad (2.2)$$

设通过数据采集卡获得的 PZT 驱动电流和电压信号的离散数字序列为：

$$\begin{cases} U = \{u(k)\} \\ I = \{i(k)\} \end{cases} \quad (2.3)$$

其中 $k=1, 2, 3\dots 140000$ ；

以电压信号为例，瞬时频率的计算过程为：

1) 计算 0 点位置：

若：

$$\begin{cases} u(m) \times u(m+1) > 0 \\ u(m-1) \times u(m) \leq 0 \end{cases} \quad (2.4)$$

则 $u(m)$ 为 0 点；可得 0 点位置序列：

$$U(0) = \{u_0(n) | n=1, 2, 3, \dots\} \quad (2.5)$$

2) 计算周期间距序列：

$$\Delta Su = \{su(l)\} = \{u_0(n+2) - u_0(n)\} \quad (2.6)$$

3) 计算瞬时频率序列：

$$\Delta Fu = \{fu(l)\} = \{1/su(l)\Delta t\} \quad (2.7)$$

同理可得到电流信号的周期间距序列 ΔSi 和瞬时频率序列 ΔFi 。相差 $\Delta\theta$ 的计算为：

$$\Delta\theta = 2\pi[su(l) - si(l)]/su(l) \quad (2.8)$$

只考虑键合阶段（0~100ms 阶段），由上述计算方法，对图 2-26 所示的信号，可得电流、电压信号瞬时频率和相差曲线如图 2-29 所示。

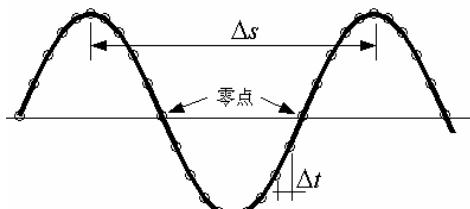


图 2-28 瞬时频率的计算原理

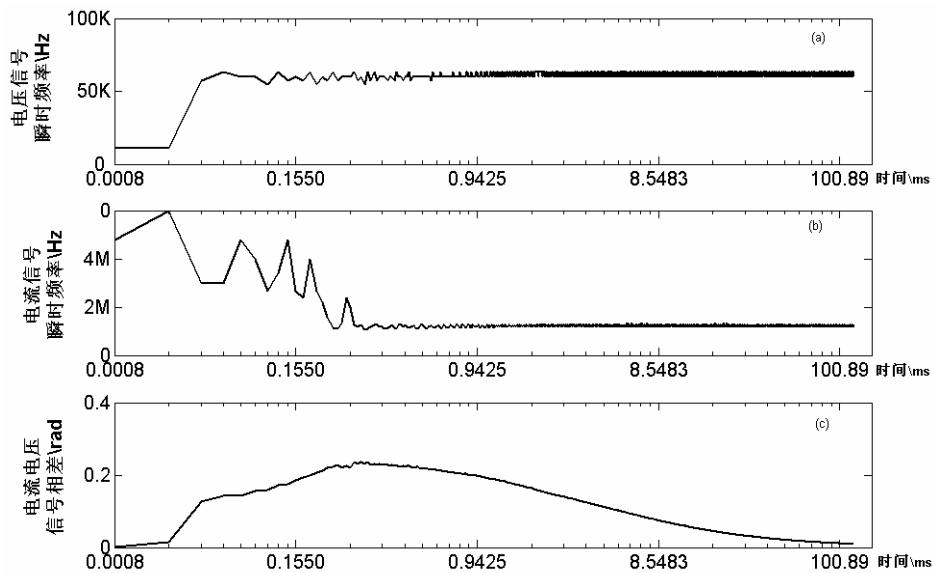


图 2-29 电压、电流信号瞬时频率和相差

由图可知：在键合开始阶段（约 0~0.3325ms），电压信号频率很快上升到 60kHz（设定工作频率），而电流信号则迅速下降到 60kHz，即驱动信号的稳定需要一个过程，该过程大约为 0.3ms；此后，信号的频率在 60kHz 或 63.158kHz 间变化，直到键合结束。与此对应，电流和电压间的相差在键合开始的时候由 0 快速上升到 0.235rad 然后逐渐下降，最后趋于 0。表明键合系统在键合过程中并不稳定。

2.3.2 倒装工具/芯片振动信号采集和分析

(1) 倒装工具/芯片振动信号采集

倒装工具/芯片振动信号采集过程为：首先，将激光多普勒测振头发出的激光光斑精确地聚焦在倒装芯片 $1 \times 0.3\text{mm}$ 的侧面或工具末端的侧面，如图 2-30；然后启动热超声倒装键合的过程，倒装工具和芯片发生振动，测振仪根据反射激光的频移可分别测量到芯片和工具的振动。由于测振系统一次只能测量一个物体的振动，工具与芯片的振动不能同时测得，为此需进行大量重复试验，一方面保证工具与芯片的振动曲线能反映相同的键合过程；另一方面保证测量观测结果不是偶然现象。

在测量的过程中，由于被测表面小（特别是对于芯片侧面），因此保证激光垂直入射在被测表面，增大返回激光的强度是振动测量的关键。

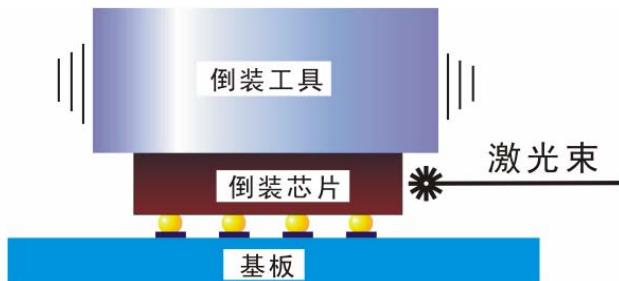


图 2-30 激光多谱勒测量芯片和工具的振动

在键合力 180gf、键合温度 163°C、键合时间 100ms，键合功率为 2.8W 条件下，倒装键合键合界面的抗剪切强度为 0.98~1.57N。此时采用激光多谱勒测振系统，测得键合过程中工具末端和芯片的典型振动速度曲线，转化为位移后如图 2-31，图中时基零点是超声开启的时刻。

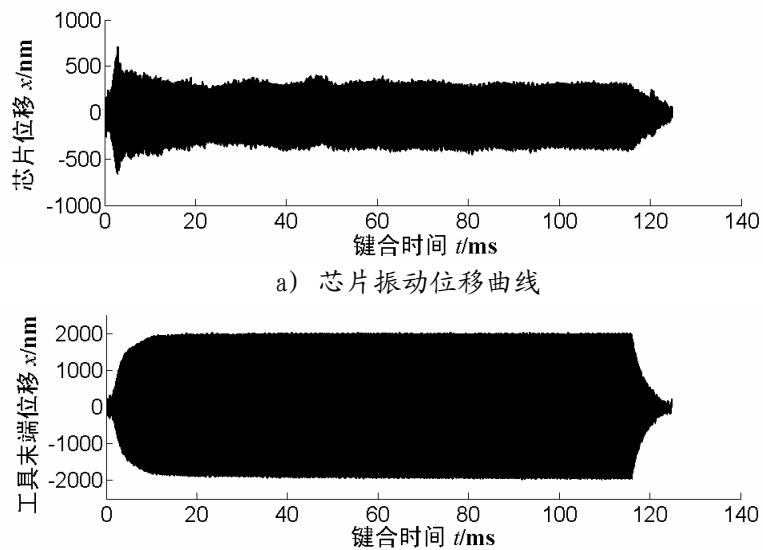


图 2-31 芯片和工具末端振动位移曲线

采用上述系统观测界面振动传递过程，对于 60kHz 的超声振动系统，可分辨出 1/16 超声周期内信号的微小变化。图 2-32 是键合过程中工具末端和芯片振动传递的细节。

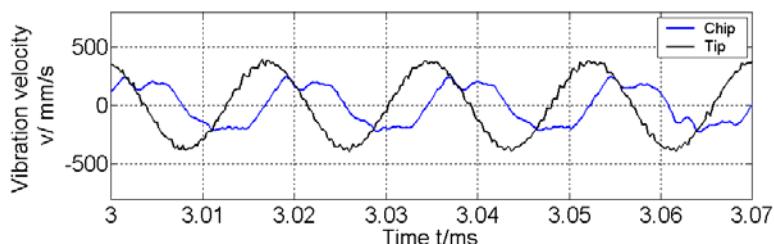


图 2-32 芯片和工具末端振动细节

(2) 倒装工具/芯片振动信号分析

通过测量工具末端和倒装芯片的实时运动曲线就可了解超声振动在键合界面间的传递过程。分析参见第三章相关部分。

2.3.3 其他信号采集和分析

(1) 倒装键合芯片抗剪切强度数据采集

热超声倒装键合完成后，还要测量倒装芯片的抗剪切强度，作为键合强度的判断依据，也可作为键合过程信号分类研究的依据。抗剪切强度的测量采用自制的测试平台，其原理如图 2-20。上述键合装备条件下，当键合力、超声时间和超声功率分别为 240gf、100ms 和 2.8W 时，键合完毕后用自制的测力平台测得的平均抗剪切力为 12.5gf/凸点。

(2) 倒装键合界面微观形貌观测

热超声倒装键合完成后，将倒装芯片从基板上撕开，用扫描电镜(Scanning Electron Microscopy, SEM)观测倒装界面的微观形貌，可以获得键合界面的微观结构信息。典型的金凸点/银焊盘倒装界面结构如图 2-33。

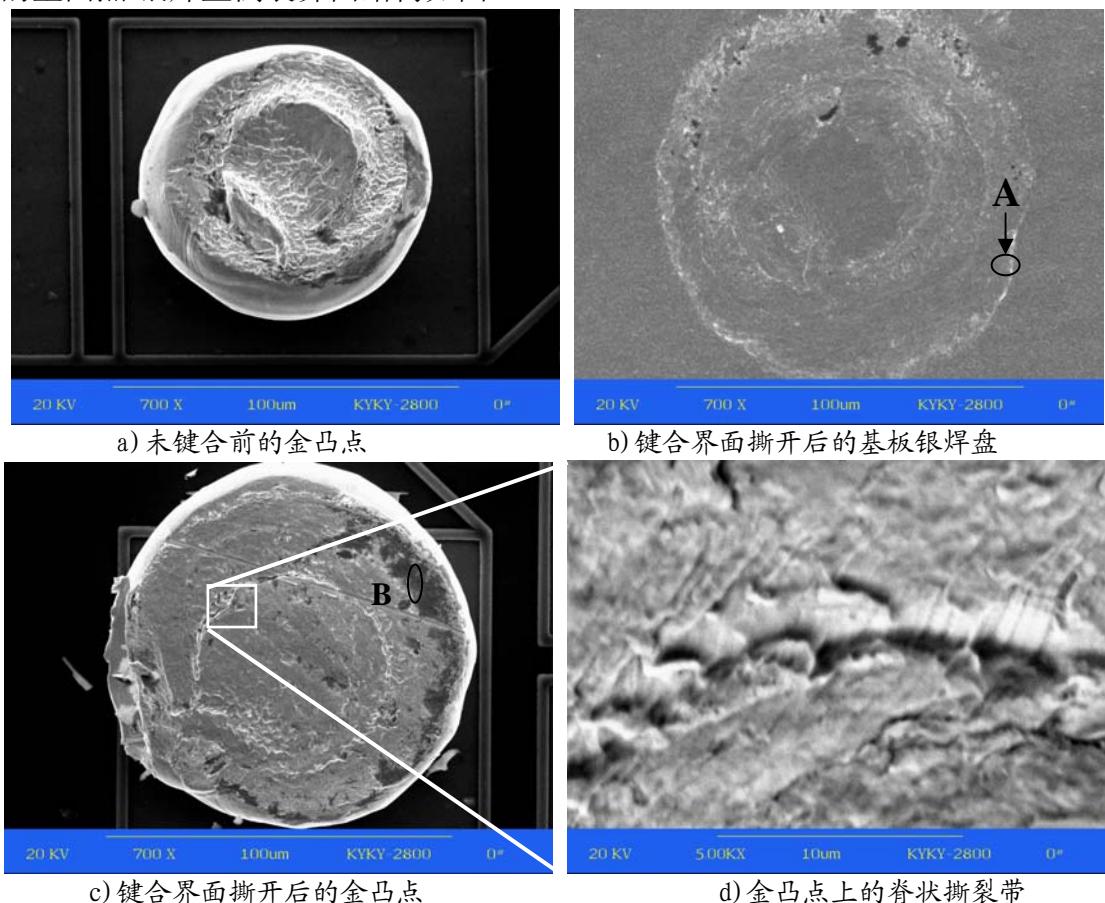
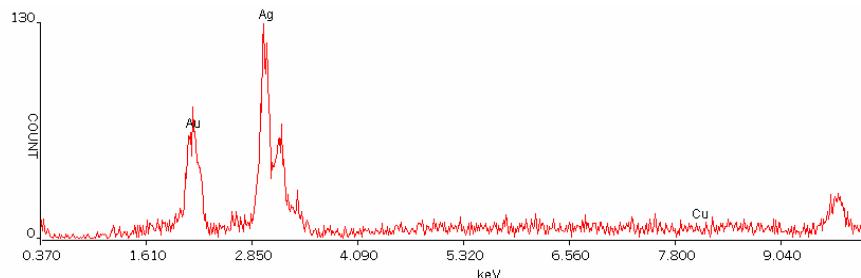


图 2-33 键合界面的形貌

未键合前的金凸点形貌如图 2-33(a): 它是比较规则的圆鼓形，表面不平，留有热超声键合机植球形成的尾巴。键合后的金凸点如图 2-33 (c): 在超声、键合力和温度的共同作用下变成椭圆柱形状，表面比较平整，中间和边界有两个环带，中间环带非常明显，放大后如图 2-33 (d)，是一种脊状撕裂棱（韧性断裂的特征），表明了良好的键合强度。

对两个环之间的黑色部分（图 2-33 (c) 的 B 区域）进行能谱测定，发现以 Ag 为主，

如图 2-34(a)和表 2-3。这是破碎的银基板表皮层被挤入了金凸点中，并随着凸点变形移动到键合界面边缘。而对应的基板焊盘如图 2-33(b): 也显示为两个环，对两个环之间的白色部分（图 2-33(b)的 A 区域）进行能谱测定，发现以 Au 为主，如图 2-34(b) 和表 2-4，表明金凸点与焊盘产生了良好的键合，使得在键合界面被破坏时，破坏不是发生在键合面，而是在金凸点上，这样才在焊盘上留下了 Au 元素，表明键合面产生了良好的键合强度，其强度甚至大于金凸点。



(a) A 点的 EDAX 能谱测试

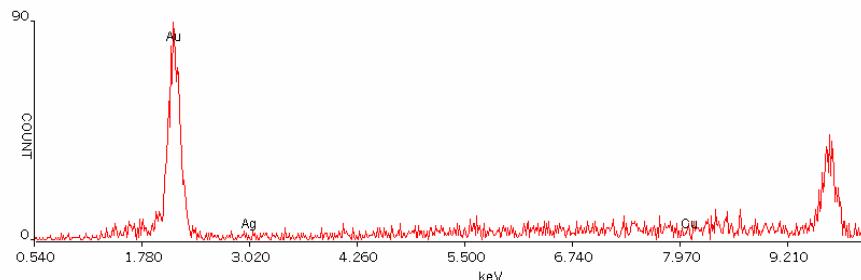
(a) B 点的 EDAX 能谱测试
图 2-34 键合界面的 EDAX 能谱测试

表 2-3 A 点的 EDAX 测试数据

元素	Weight%	Atom%
Cu	1.4759	2.9661
Ag	61.8996	73.2869
Au	36.6245	23.7470

表 2-4 B 点的 EDAX 测试数据

元素	Weight%	Atom%
Cu	0.0000	0.0000
Ag	0.5318	0.9667
Au	99.4682	99.0333

这种形貌说明键合面为环状界面。在文献[62]中发现热超声引线键合中有类似的现象，这可能是由于热超声倒装键合和热超声引线键合的键合原理类似--即运用了超声能。说明在键合系统中使用超声能时，键合界面实际上为环状键合面。它们表明键合强度在界面上分布不均匀，仅仅分布在环状区域；界面在环带位置形成了牢固的原子间结合。

因此，如何增大真实键合界面，提高键合强度和芯片工作的可靠性是封装技术面对的发展目标之一。

2.4 小结

- 1) 建立了热超声倒装键合试验系统，能够实现倒装芯片金凸点和基板焊盘的精确对准（定位精度在 $5\mu\text{m}$ 以下）、键合力的精确控制（控制精度在 1g 以下）、超声振幅的控制和温度控制，以及各个动作的时序控制；采用 8 个金凸点的倒装芯片和表面镀银的铜基板，实现了热超声倒装键合过程。
- 2) 从认识键合机理的角度出发，结合键合试验台的结构和研究需要，建立了由光学防震平台、激光多普勒测振仪、键合力传感器、同步触发装置等构成的热超声倒装键合过程监测系统，开发了相应的数据采集软件，可监测到超声功率、键合力、倒装工具/芯片振动等信号在键合过程中的变化；观测到键合面微观形貌，可以为了解热超声倒装键合过程、认识键合机理提供试验数据。
- 3) 开发了基于 Matlab 的数据处理软件，可对大量的关于热超声倒装键合过程的信号进行深层次分析处理，为研究键合机理提供条件。
- 4) 初步分析了 PZT 驱动信号，发现在键合开始阶段（约 $0\sim0.3325\text{ms}$ ），电压信号频率很快上升到 60kHz （设定工作频率），而电流信号则迅速下降到 60kHz ，即驱动信号的稳定需要一个过程，该过程大约为 0.3ms ；此后，信号的频率在 60kHz 或 63.158kHz 间变化，直到键合结束。表明键合系统在键合过程中有一些不确定状态需要认识和控制。

第三章 外场作用下热超声倒装键合系统的运动与能量传递分析

超声能是热超声倒装键合的主要能量来源之一。了解超声振动在键合系统中的传递过程和在键合界面的传递和耗散机理，是了解键合强度生成过程的基础。超声在键合系统中的传递可分为两个部分：超声在变幅杆和倒装工具中的传递、超声在键合界面间的传递。本文将通过测量键合过程中工具末端和芯片的振动，认识超声振动在工具/芯片、芯片/基板界面的传递过程；从界面运动传递的角度认识键合强度的形成过程、了解键合机理。

3.1 概述

换能器系统是热超声倒装键合系统最关键的部件之一，也是超声振动传递到键合界面的路径，其结构如图 2-1。超声能量在换能器系统中的传递是一个复杂的过程。

3.1.1 超声振动在变幅杆和倒装工具中的传递研究进展

目前的研究主要有三类：(a)基于力电类比原理的分析方法^[76-79]。该方法将复杂的机械振动问题转化为熟知的交流电路来分析，因方法简单而被广泛使用；其缺点是只能处理集中参数振动系统，对于分布参数振动系统不能精确求解。(b)基于有限元的动力学分析方法^[80-83]。该方法可精确建立并求解复杂分布参数振动系统模型；但难以确定决定系统的关键因素及其相互影响规律。(c)基于解析模型的分析方法^[84-87]。该方法通过建立系统的动力学方程并确定边界条件求解超声波在变幅杆中的传递规律；需要简化细节，但能确定影响系统的关键因素。

比较而言，基于解析模型的方法最能了解超声波在变幅杆中的传递规律。本文将采用解析方法，建立变幅杆系统的动力学方程，了解超声在倒装工具/变幅杆中的传递形式。

3.1.2 超声在倒装界面间的传递研究进展

超声在倒装键合界面间的传递存在区域小、时间短等特点，试验观测困难，目前仅在 Mayer 等人的文献中见到相关研究：他们将焊盘(Pad)做成 MEMS 压电传感器，监测到引线键合过程中键合界面的应力变化，发现界面间的运动传递是一个时变过程^[88-92]。

本文将采用激光多谱勒测振系统，观测热超声倒装过程中倒装工具末端和倒装芯片的振动变化过程，建立超声在倒装界面中的传递模型，以此了解超声在倒装界面的

传递、耗散影响因素和规律、了解键合强度的生成过程；结合键合强度测试结果，确定优化的键合工艺加载方式。

3.2 超声在变幅杆/工具中的传递

3.2.1 超声在变幅杆中的传递

根据变幅杆的特征，可认为：

- (a) 变幅杆由均匀、各向同性的材料构成，密度是 ρ ，杨氏模量是 E ；
- (b) 变幅杆中的机械损耗很小，可以忽略不计；
- (c) 变幅杆中通过的弹性波的波阵面是平面，即变幅杆横截面上应力分布均匀；
- (d) 平面纵波沿变幅杆的轴线传播。

在变幅杆的横向尺寸小于 $1/4$ 波长时，这些假设是合理的。根据动力学理论，可推导出变幅杆的波动方程、振幅分布函数等：

(1) 变截面杆纵振动的波动方程^[93-96]

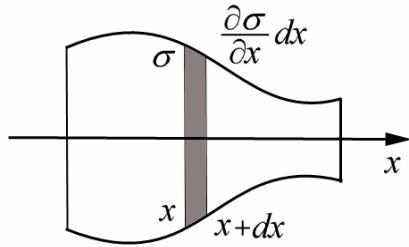


图 3-1 变截面杆的纵振动

图 3-1 为一变截面杆。其对称轴为坐标轴 x ，作用在小体元($x, x+dx$ 所限定的区间)的张应力为 $\frac{\partial \sigma}{\partial x} dx$ ，根据牛顿定律可写出其动力学方程：

$$\frac{\partial(S\sigma)}{\partial x} dx = S\rho \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} dx \quad (3.1)$$

其中： $S = S(x)$ 为杆的横截面积函数； $\xi = \xi(x)$ 为质点位移函数； $\sigma = \sigma(x) = E \frac{\partial \xi}{\partial x}$ 为应力函数； ρ 为杆材料的密度； E 为杨氏模量。

在简谐振动情况下 $\xi = \xi e^{j\omega t}$ ，式(3.1)可写成：

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{1}{S} \frac{\partial S}{\partial x} \frac{\partial \xi}{\partial x} + k^2 \xi = 0 \quad (3.2)$$

上式就是变截面杆纵振动波动方程。其中 $k = \frac{\omega}{c}$ 为圆波数， ω 为圆频率， $c = \sqrt{E/\rho}$ 是纵波在变幅杆中的传播速度。

解式(3.2)可得到变幅杆中的振幅分布表达式为：

$$\xi = (a_1 \cos k'x + a_2 \sin k'x) \quad (3.3)$$

其中 k' 和变幅杆的形状有关， a_1, a_2 由边界条件确定。

由此还可得到振速分布表达式: $v = \frac{d\xi}{dt} j\omega \xi$; 应变分布表达式: $\frac{\partial \xi}{\partial x}$;

(2) 一般复合变幅杆的振幅分布函数

为改进变幅杆的性能(如增加刚度、长度),通常需使用复合变幅杆。复合变幅杆的种类很多,这里仅讨论如图3-2的复合变幅杆。其特点是:由3段连接而成,长度分别为 l_1, l_2, l_3 , I和III是等截面杆,II是变截面杆;各段截面是圆形,材料相同。

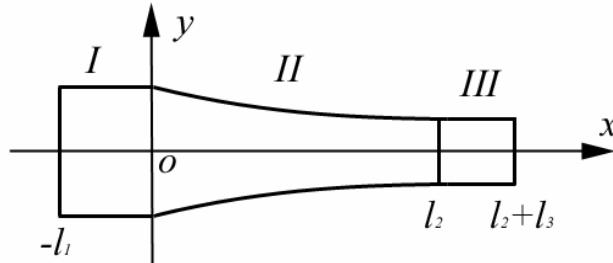


图 3-2 复合变幅杆

为研究方便,设定复合变幅杆的坐标如图3-2:原点在I和II段连接处, x 轴是对称轴。由变截面的波动方程3.2出发,可得到各段杆中的振动位移分布:

$$\begin{cases} \xi_I = (a_1 \cos kx_1 + a_2 \sin kx_1) \\ \xi_{II} = (a_3 \cos k'x_2 + a_4 \sin k'x_2) \\ \xi_{III} = (a_5 \cos kx_3 + a_6 \sin kx_3) \end{cases} \quad \text{其中: } \begin{cases} x_1 \in (-l_1, 0) \\ x_2 \in (0, l_2) \\ x_3 \in (l_2, l_2 + l_3) \end{cases} \quad (3.4)$$

变幅杆左边是驱动器件,可设在 $t=0$ 时刻输入振幅为 ξ_1 ,驱动力为 F_1 ;右端是空载。因此其边界条件是:

$$\begin{cases} x = -l_1 : \xi = \xi_1, F = -S_1 E \frac{\partial \xi}{\partial x} \Big|_{x=-l_1} = F_1, \\ x = l_2 + l_3 : \frac{\partial \xi}{\partial x} \Big|_{x=l_2+l_3} = 0; \end{cases} \quad (3.5)$$

加上两段连接处振幅连续、应变连续的边界条件。就可得到复合变幅杆中各段质点振动位移分布为:

$$\begin{cases} \xi_I = a_1 \xi_1 \cos(kx_1 + \alpha_1) \\ \xi_{II} = a_2 \xi_1 \frac{R_1}{R} \cos(k'x_2 + \alpha_2) \\ \xi_{III} = a_3 \xi_1 \cos(kx_3 + \alpha_3) \end{cases} \quad \text{其中} \begin{cases} x_1 \in (-l_1, 0) \\ x_2 \in (0, l_2) \\ x_3 \in (l_2, l_2 + l_3) \end{cases} \quad (3.6)$$

式中: R_1 是第I段杆的半径; R 是第II段杆的半径函数;

$$a_1 = \cos(-kl_1 + \alpha_1)^{-1}$$

$$\tan \alpha_1 = \frac{k'}{k} \tan \alpha_2 + \frac{R'(0)}{kR_1}$$

$$R'(0) = \frac{\partial R}{\partial x} \Big|_{x=0}$$

$$a_2 = \frac{\cos \alpha_1}{\cos \alpha_2} \cos(-kl_1 + \alpha_1)^{-1}$$

$$\begin{aligned}\tan(k'l_2 + \alpha_2) &= -\frac{k}{k'} \tan kl_3 - \frac{R'(l_2)}{k'R_2} \\ R'(l_2) &= \left. \frac{\partial R}{\partial x} \right|_{x=l_2} \\ a_3 &= N \frac{\cos \alpha_1}{\cos \alpha_2} \frac{\cos(k'l_2 + \alpha_2)}{\cos(-kl_1 + \alpha_1)} \cos(kl_3)^{-1} \\ \alpha_3 &= -k(l_2 + l_3) \\ k'^2 &= k^2 - \frac{R''}{R}\end{aligned}$$

这样就得到了复合变幅杆振幅分布一般表达式。对于具体的复合变幅杆（过渡段是指数杆或者圆锥杆），只要代入其半径函数就可以确定振幅分布。

(3) 热超声倒装键合机的变幅杆振幅分布

本文的变幅杆过渡段是圆锥杆，结构如图 3-3，具体的参数为：

- (a) 材料：45 号钢；
- (b) 尺寸： $l_1 = -48mm; l_2 = 40mm; l_3 = 5mm; D_1 = 10mm; D_2 = 3mm;$
- (c) 纵波波速： $C_L = 5200000mm/s$ ，

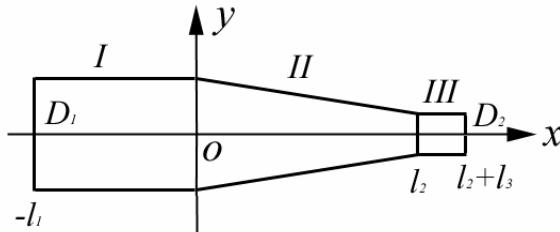


图 3-3 过渡段是圆锥形的复合变幅杆的结构

由这些参数可得圆锥杆的半径函数： $R = R_1(1 - \alpha x)$ 。其中： $\alpha = \frac{D_1 - D_2}{D_1 l_1}$ ， $N = \frac{D_1}{D_2}$ 。

将变幅杆参数代入上述计算式，可得到振幅分布函数：

$$\begin{cases} \xi_I = \xi_1 \cos(kx_1 + kl_1), x_1 \in [-l_1, 0] \\ \xi_{II} = \xi_1 \frac{\cos kl_1}{\cos \alpha_2} \frac{1}{1 - \alpha x_2} \cos(kx_2 + \alpha_2), x_2 \in [0, l_2] \\ \xi_{III} = \xi_1 N \frac{\cos kl_1}{\cos \alpha_2} \frac{\cos(kl_2 + \alpha_2)}{\cos kl_3} \cos(kx_3 + \alpha_3), x_3 \in [l_2, l_2 + l_3] \end{cases} \quad (3.7)$$

其中：

$$\begin{cases} \alpha_1 = kl_1 \\ \tan \alpha_2 = \tan kl_1 + \alpha/k \\ \alpha_3 = -(kl_2 + kl_3) \end{cases} \quad (3.8)$$

假设换能器的最大输入振幅： $\xi_1 = 4\mu m$ ，激励频率： $f = 60000Hz$ 。采用 Matlab 计算，可得到如图 3-4 所示的振幅分布：21mm 和 61mm 附近是节点；末端是振幅最大的位置。实际上，21mm 附近是变幅杆的安装环（不产生位移的支点）；末端则与倒

装工具连接。这样的结构符合超声传递的规律，可获得最大的工作能量输入。因此，模型和实际情况相当接近，表明上述模型是合理的。

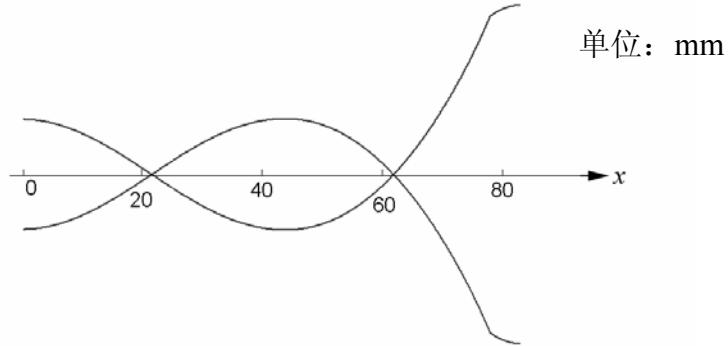


图 3-4 复合变幅杆的振型

3.2.2 超声在倒装工具中的传递

将倒装工具视为伯努利—欧拉梁，仅考虑细长梁的横向弯曲振动^[97-100]。根据梁的横向振动微分方程，可得到倒装工具的振动方程为：

$$EJ \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = p(x, t) - \frac{\partial}{\partial x} m(x, t) \quad (3.9)$$

其中： E ：倒装工具材料的弹性模量；

J ：倒装工具截面对中性轴的惯性矩；

ρ ：倒装工具的材料质量密度；

A ：倒装工具的横截面积；

$p(x, t)$ ：单位倒装工具长度上分布的外力；

$m(x, t)$ ：单位倒装工具长度上分布的外力矩。

在(3.9)式中，令 $p(x, t)=m(x, t)=0$ ，得到倒装工具的自由振动方程：

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} (EJ \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}) + \rho A \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (3.10)$$

假设倒装工具的主振动为：

$$y(x, t) = Y(x) b \sin(\omega t + \varphi) \quad (3.11)$$

其中 $Y(x)$ 为主振型或者是振型函数，将上式代入(3.10)可得：

$$(EJY'')'' - \omega^2 \rho A Y = 0 \quad (3.12)$$

对于等截面梁，可写成：

$$Y'' - \beta^4 Y = 0 \quad (3.13)$$

其中： $\beta^4 = \frac{\omega^2}{a^2}$ ； $a^2 = EJ / \rho A$ 。对于(3.13)式，其通解为：

$$Y(x) = D_1 e^{i\beta x} + D_2 e^{-i\beta x} + D_3 e^{\beta x} + D_4 e^{-\beta x} \quad (3.14)$$

利用简谐函数和双曲函数，上式可写成：

$$Y(x) = C_1 \cos \beta x + C_2 \sin \beta x + C_3 \cosh \beta x + C_4 \sinh \beta x \quad (3.15)$$

代入(3.11)式可得到梁的主振动为：

$$y(t, x) = [C_1 \cos \beta x + C_2 \sin \beta x + C_3 \cosh \beta x + C_4 \sinh \beta x] b \sin(\omega t + \varphi) \quad (3.16)$$

其中：常数 C_1, C_2, C_3, C_4 以及固有频率 ω 由边界条件和主振型归一化条件确定，常数 b, φ 由初始条件确定。对于倒装工具，其上端转角受限制，位移不受限；下端是自由端。因此边界条件为：

$$\begin{cases} Y'(x)|_{x=0} = 0; [EJY''(x)]'|_{x=0} = 0; \\ EJY''(x)|_{x=l} = 0; [EJY''(x)]'|_{x=l} = 0; \end{cases} \quad (3.17)$$

将 $x=0$ 的边界条件代入(3.15)式的一阶和三阶导数，可得：

$$C_2 = -C_4; C_2 = C_4; \quad (3.18)$$

从而得到 $C_2 = C_4 = 0$ 。再将 $x=l$ 的边界条件代入式(3.15)的二阶和三阶导数，可得：

$$\begin{cases} -C_1 \cos \beta l + C_3 \cosh \beta l = 0 \\ C_1 \sin \beta l + C_3 \sinh \beta l = 0 \end{cases} \quad (3.19)$$

要 C_1, C_2 不同时为 0，则必有：

$$\begin{vmatrix} -\cos \beta l & \cosh \beta l \\ \sin \beta l & \sinh \beta l \end{vmatrix} = 0 \quad (3.20)$$

简化后得频率方程：

$$\sinh \beta l \cos \beta l + \cosh \beta l \sin \beta l = 0 \quad (3.21)$$

方程的前几个根为： $\beta_0 l = 0$ （刚体振型）；2.365；5.497；8.639；11.780；14.922；18.064；21.205；24.347；

由于： $\beta^4 = \frac{\omega^2}{a^2}$ ， $a^2 = EJ / \rho A$ ，所以其固有频率为：

$$\omega_i = (\beta_i l)^2 \sqrt{\frac{EJ}{\rho A l^4}} \quad (3.22)$$

由(3.19)式，令：

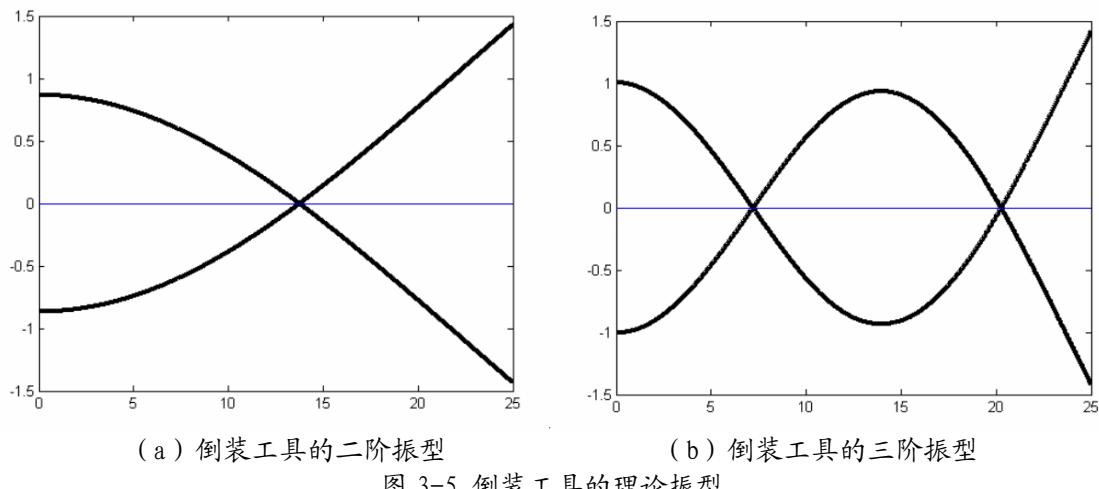
$$r_i = \left(\frac{C_3}{C_1} \right)_i = \frac{\cos \beta_i l}{\cosh \beta_i l} \quad (3.23)$$

则主振型可表示为：

$$Y(x) = C_{1i} \cos \beta_i x + C_{2i} \sin \beta_i x + C_{3i} \cosh \beta_i x + C_{4i} \sinh \beta_i x \quad (3.24)$$

即： $Y(x) = C_{1i} \cos \beta_i x + C_{3i} \cosh \beta_i x = C_{1i} [\cos \beta_i x + r_i \cosh \beta_i x]$ ，其中：常数 C_{1i} 由主振型归一化条件确定。

令 $l = 25mm$ （工具长度）； $C_{1i} = 1$ ，由 Matlab 可算出倒装工具的振型如图 3-5。其中倒装工具的二阶振型对应着 60kHz 的振动，是工具振动的主要成份。



通过确定固有频率 ω_i 和主振型 $Y_i(x)$ ，将各阶主振动叠加，可获得梁的固有振动表达式：

$$\begin{aligned} y(t, x) &= \sum_{i=1}^n [C_{1i} \cos \beta_i x + C_{2i} \sin \beta_i x + C_{3i} \cosh \beta_i x + C_{4i} \sinh \beta_i x] b \sin(\omega_i t + \varphi_i) \\ &= \sum_{i=1}^{\infty} Y_i(x) b_i \sin(\omega_i t + \varphi_i) \end{aligned} \quad (3.25)$$

其中：常数 b_i, φ_i 由初始条件确定。

采用激光多普勒振动测试系统，测得倒装工具的二阶振型（主要的振动成份）如图 3-6。由测量结果可知：上述关于倒装工具的振型计算基本是正确的。

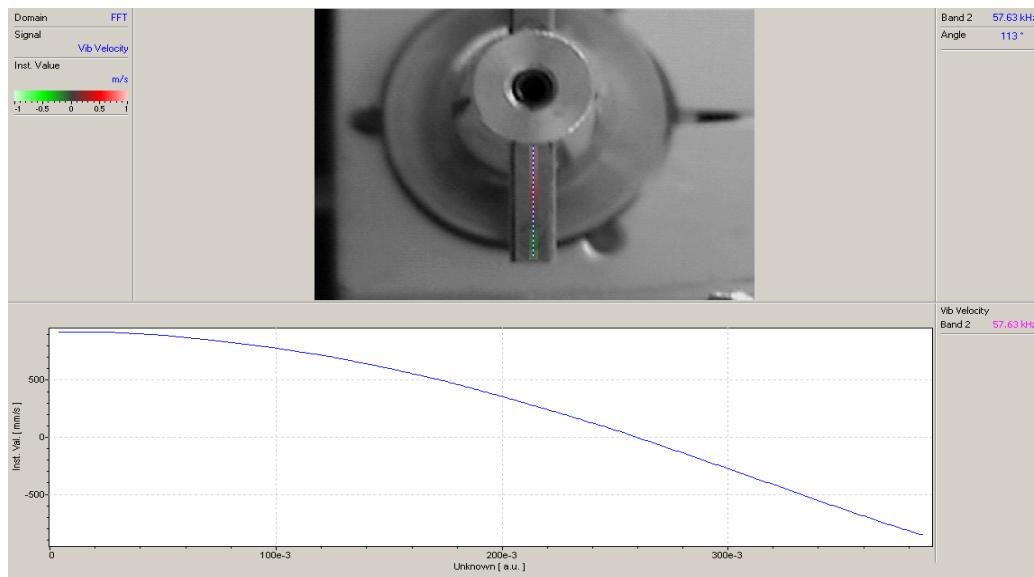


图 3-6 倒装工具的实测振型

3.3 超声在倒装界面间的传递过程

热超声倒装键合的主要影响因素是超声振动和键合力。实验发现键合界面的形貌与键合力和超声振动有密切关系。因此可从振动在键合界面的传递过程认识键合强度的生成过程，进而获得对键合机理的认识。

3.3.1 倒装工具/芯片界面的运动传递过程

倒装界面系统的结构如图 3-7：倒装工具和芯片界面称为上界面；金凸点和基板焊盘界面称为键合界面（下界面）。

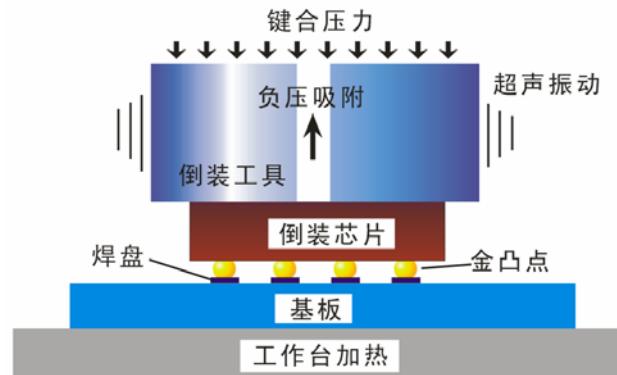


图 3-7 热超声倒装键合界面系统

(1) 界面运动传递过程观测

采用 PSV-400-M2 激光多谱勒测振系统来测量工具末端和芯片的振动，如图 2-11。工具振动频率约为 58kHz。将多谱勒振动测量系统的采样频率设为 2560kHz，1% 的预触发模式；可获得界面振动过程（包括超声开启瞬间）的所有细节。图 3-8 是多谱勒测振系统软件的一个工作界面：

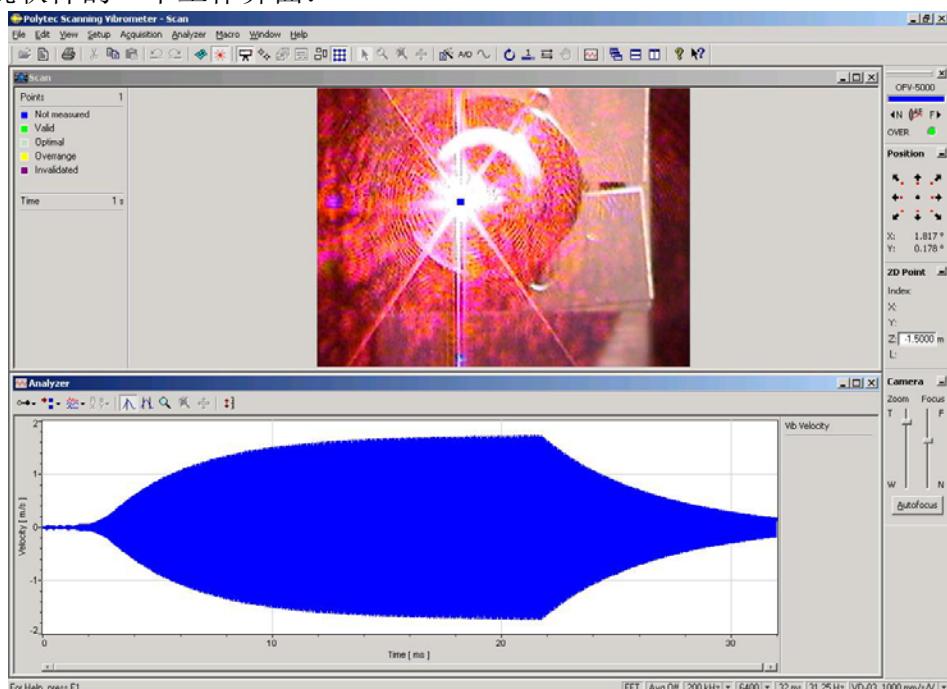


图 3-8 多普勒测振系统的软件界面

图中上部分(Scan 窗口)的光点是瞄准在变幅杆端面的激光束;下部分(Analyzer 窗口)是变幅杆端面在键合过程中振幅的变化曲线。

由第二章所述方法,可获得芯片和工具末端振动速度曲线,如图 3-9。由速度曲线和采样频率设置,可计算得到振动位移曲线。

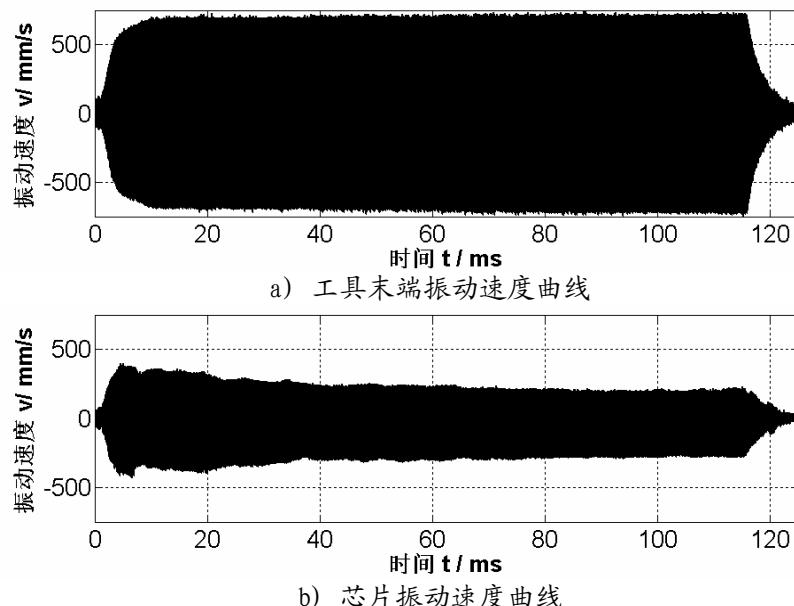


图 3-9 芯片和工具末端振动速度曲线

由图 3-9 可获得倒装工具末端和芯片的运动速度/位移有效值曲线如图 3-10:

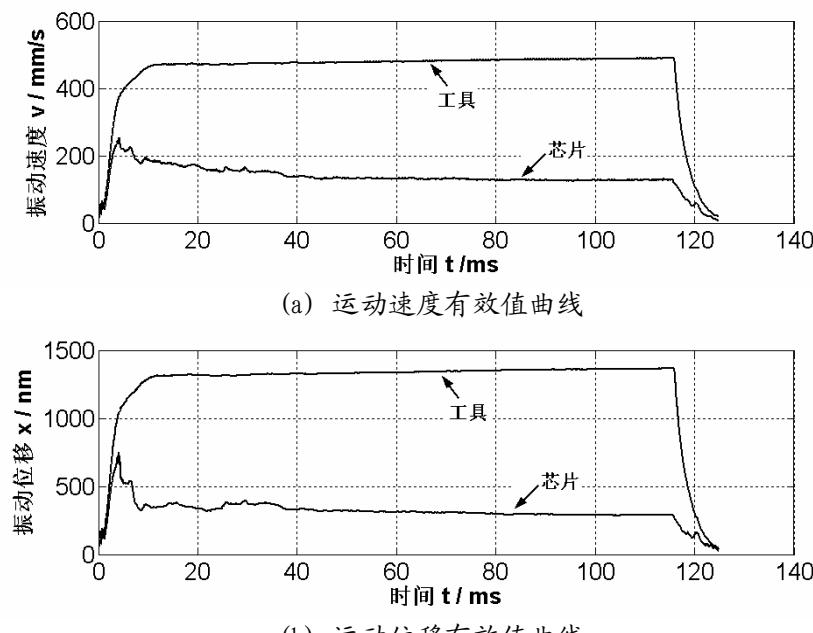


图 3-10 芯片和工具末端运动有效值曲线

由图 3-10 可知:1)在键合初始阶段(0~3ms)芯片与工具末端几乎以相同速度/位移运动,表明:金凸点和银焊盘间的连接十分微弱,由键合力引起的工具/芯片间摩擦阻力大于金凸点/焊盘引脚间的运动阻力,金凸点本身也未出现塑性变形;工具/芯片界面没有明显相对运动,而金凸点/焊盘间产生相对运动,这种相对运动有利于去除接触

表面的氧化层和污染层，暴露出洁净金属表面，为对偶金属表面无间隙接触并进行材料的转移提供条件。2)在3ms前后，芯片运动速度开始小于工具速度，本文称之为“速度分离”现象。表明：金凸点/焊盘界面间具有一定的连接，形成了某种运动阻力，而使得芯片的运动滞后于工具运动，一部分相对运动转移到工具/芯片界面。3)“速度分离”后，芯片运动幅值逐渐减小，最后保持在一个相对稳定值(与具体键合条件有关)；而工具振幅逐渐增大，最后也达到一个稳定值(与超声功率、键合压力、工具配置等无关)。这时在工具/芯片间开始产生大幅度相对运动。

因此，“速度分离”是键合过程中重要临界点，反映了界面间运动状态的改变：工具/芯片界面逐渐加大相对运动；金凸点/焊盘界面的相对运动逐渐减小。

将“速度分离”前后的位移展开后得到运动细节如图3-11和3-12：

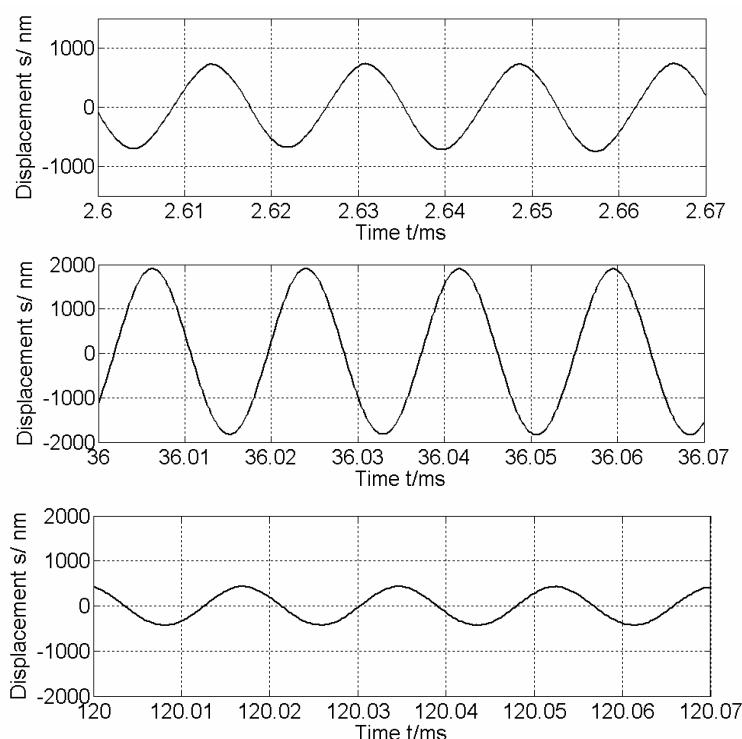
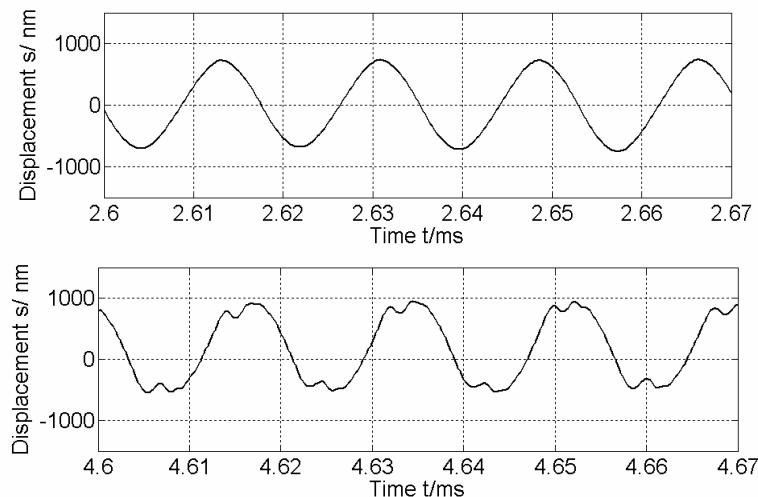


图 3-11 工具振动的细节



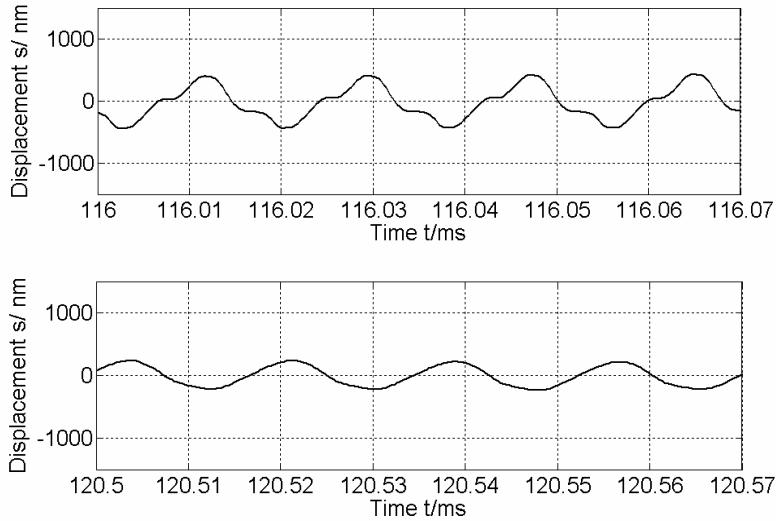


图 3-12 芯片振动的细节

由此可知：工具位移始终是简谐曲线。将键合界面视为一个振动系统，工具运动视为系统激励，则芯片运动为系统响应。由于工具振动是整个键合界面的激励源，因此可认为键合界面是简谐激励的振动系统。在工具的简谐激励下，芯片却表现出复杂的响应：“速度分离”前，芯片的振动位移是简谐曲线，来自工具的激励传递到芯片上，芯片跟随工具运动；“速度分离”后，芯片振动位移曲线出现削峰。芯片运动到位移最大的位置后停下来，出现与倒装工具间的相对运动。

将倒装工具和芯片的振动进行比较，可获得关于界面间运动传递和界面间相对的运动的直观认识，如图 3-13。

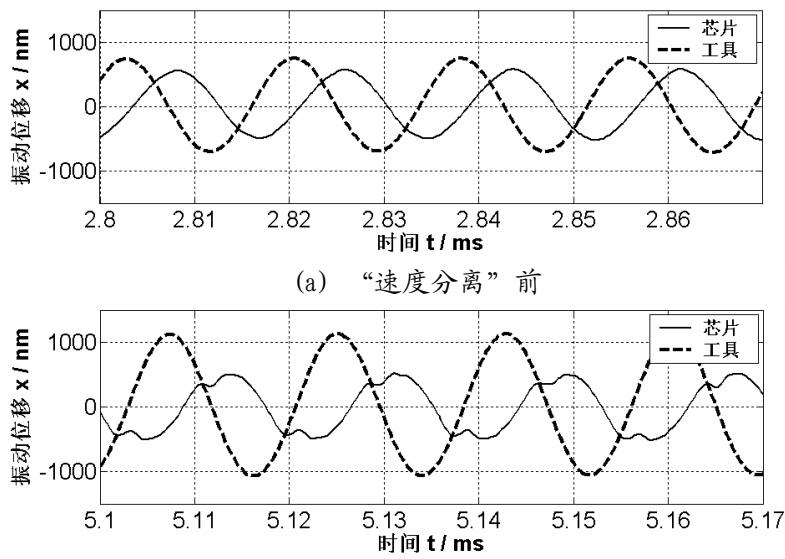


图 3-13 工具/芯片的运动细节

图 3-13 表明“速度分离”前二者运动幅值相当接近，但存在相差。而相差来源主要是：1)测量芯片和工具末端的测量点之间约有 2mm 的距离，两点到达位移最大的时刻不同导致图中的相差，如图 3-14；根据超声在工具中的传递速度，可以通过数据处理将这个相差消除，得到真实的响应状态。2)芯片/金凸点/焊盘组成的系统存在阻

尼，反映在芯片对工具激振的响应滞后出现相差。实验表明测量点之间的距离是主要相差来源。

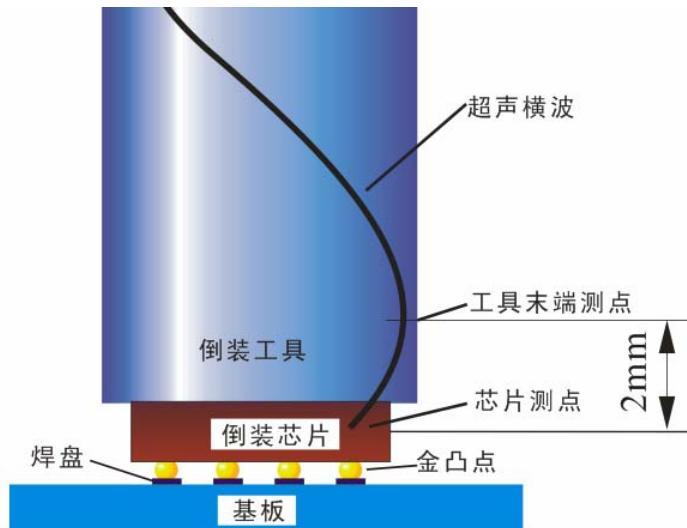


图 3-14 测点间的距离导致相差

相差修正后的结果如图 3-15：“速度分离”前后的工具位移始终是简谐曲线；而芯片位移在“速度分离”前是简谐曲线，之后却是“削峰”的简谐曲线。芯片在不同键合阶段的不同响应特点，反映了键合界面系统的状态改变。

由键合界面结构可知芯片的位移协调源于：1)金凸点弹塑性变形；2)金凸点和焊盘之间存在的相对运动；3)焊盘弹塑性变形（焊盘厚度仅仅数 μm ，相对金凸点的弹塑性变形很小）。

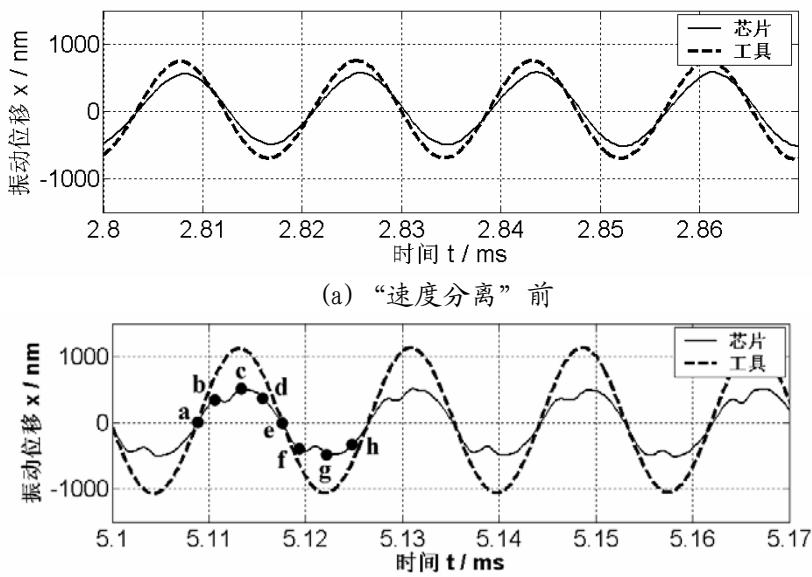


图 3-15 工具末端和芯片的运动细节

图 3-15(a)表明：“速度分离”前，芯片在工具简谐激励下的响应是简谐曲线；在键合力作用下，工具和芯片界面上存在摩擦力使芯片跟随工具运动，超声能量被传递到芯片上。在这个阶段，金凸点在键合力和超声作用下发生的塑性变形\流动，芯片运动破坏了接触界面的表皮层，使新鲜原子裸露出来，为原子扩散和键合强度形成提供

了条件，而裸露的界面金属键的相互作用形成初步键合约束。

图 3-15(b)表明：“速度分离”后芯片对工具激励的响应是个复杂的过程。在一个超声激励周期中各阶段响应可表示为图 3-16(a)~(h)所示的过程，图中箭头表示工具末端和芯片运动方向；金凸点中的斜线表示其弹性变形方向。

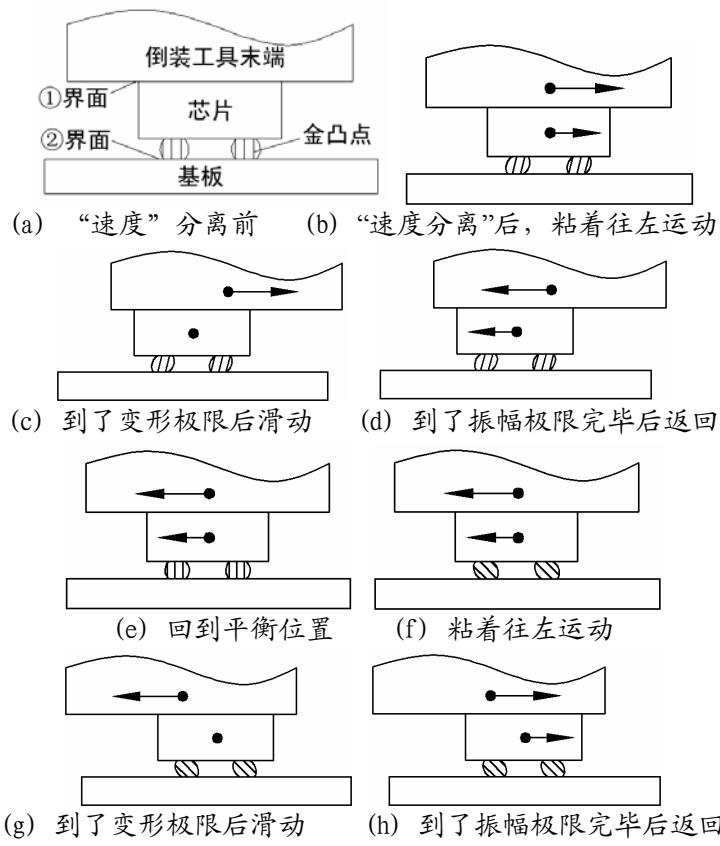


图 3-16 芯片对工具激励的响应（“粘-滑”过程示意图）

由图可知：开始时，工具和芯片中心重合在一起，并处于平衡位置(a)；(a)→(b)阶段，在键合力所导致的摩擦力作用下，工具和芯片一起运动，金凸点产生弹性变形与之适应；(b)→(c)阶段，金凸点弹性变形达到对应外力下的极限，限制了芯片运动，①界面（工具和芯片界面）的摩擦力小于②界面（芯片金凸点和基板焊盘界面）的摩擦力，不足以驱动芯片继续运动，工具/芯片间产生相对滑动；(c)→(d)阶段，工具达到振幅最大位置，开始反向运动，倒装工具/芯片间摩擦力再次驱动芯片跟随工具运动，金凸点反向变形，工具/芯片间的相对滑动逐渐减小；(d)→(e)阶段，工具和芯片再次粘着在一起，相对位移进一步缩小；到达平衡点(e)时，中心再次重合；接下来的(e)~(f)~(g)~(h)阶段重复上述过程，只是方向不同而已。这就是一个周期内芯片对工具激励的响应过程，在反复的“粘着—滑动”交替过程中实现了超声振动在工具和芯片间的传递，超声能量被传递到②界面，使得界面间的原子互相扩散形成可靠的键合。

由图 3-16 还可知：“速度分离”后，芯片处于“粘—滑”运动状态。在振动位移较大的时刻，芯片与倒装工具间有相对运动，处于滑动状态；在振动位移较小的时刻，芯片与工具末端一起振动，处于粘着状态。

“速度分离”后芯片的“粘一滑”运动对键合强度有两面性。不利的一面：“速度分离”表明下界面键合强度的生成，此时芯片的大振幅“粘一滑”运动，一方面将破坏已经形成的键合强度，使键合界面处于“生成强度—破坏强度—生成强度”的循环中，其结果是键合界面的总体强度没有提高，反而导致金凸点、焊盘疲劳，并降低键合点强度；另一方面则消耗大量超声能量，降低了键合效率，磨损了键合工具和倒装芯片。有利的一面：“速度分离”使得芯片的振幅不增加，有利于保护已生成强度的连接界面，只是①界面的相对运动导致超声振动能量的耗散。

因此，在键合时必须充分考虑“速度分离”现象：在“速度分离”后应降低超声振幅，使得工具输入的振动能量和芯片所需要/能接受的能量相当，避免芯片和工具间的相对滑动，也避免芯片大振幅的“粘一滑”运动。

(2) 工具末端和芯片振动的频域特征

倒装工具和芯片振动速度曲线的时域特征反映了热超声倒装键合过程中倒装上、下界面的相对运动变化过程。而振动速度曲线的频域特征将进一步提供振动信号频率组成及其变化过程的信息。对图 3-9 所示的倒装工具和倒装芯片振动速度曲线做 FFT 变换，获得其频率组成如图 3-17：

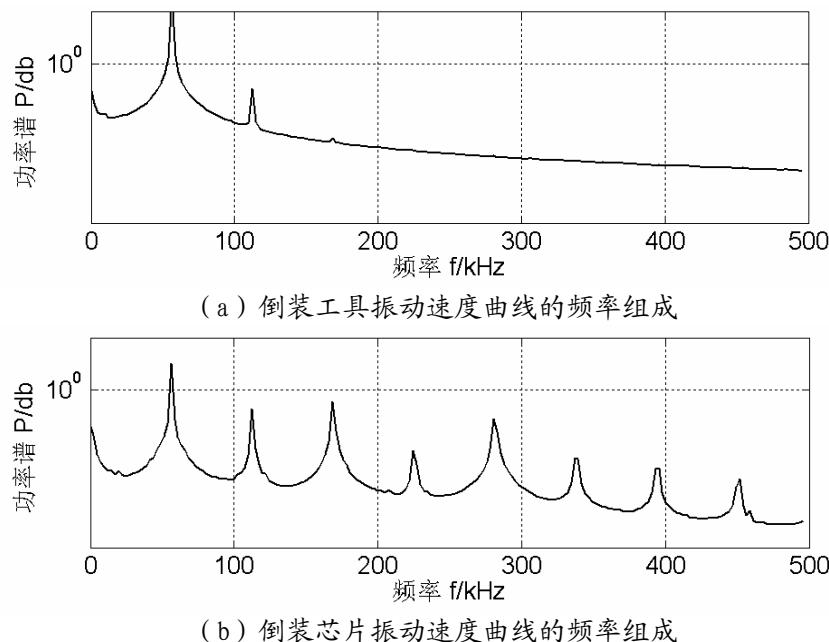


图 3-17 倒装工具和倒装芯片振动速度曲线的频率组成

由图可知：倒装工具和倒装芯片的振动频率集中在 500kHz 以下。倒装工具的振动频率组成较单一，主要是 56kHz，相对而言 112kHz 几乎可忽略；而倒装芯片的振动频率成份则包括：56kHz 以及 56kHz 的 2~5 倍频，其中 56kHz 是基频，也是主要成份；且表现出 3 倍频大于 2 倍频、5 倍频大于 4 倍频的非线性特征。

由傅里叶变换理论可知，倒装芯片振动曲线出现削峰，如图 3-15(b)，表现在频率域上则是振动信号中产生了高频谐波成份，如图 3-17(b)。而削峰是由于金凸点和焊盘

之间产生了初始键合强度、产生了粘着、限制了芯片的运动，使芯片和工具间有相对滑动。因此，削峰是初始连接强度产生的直接表征，高频成份出现也表明金凸点/焊盘间开始产生键合强度。

将芯片振动速度信号的 56kHz, 168kHz, 280kHz 等几种主要的成份滤出，计算它们的有效值随时间的变化过程，计算结果如图 3-18(a)；将前 20ms 的细节展开后如图 3-18(b)。

由图可知：1)在键合全过程中，56kHz（基频）是主要成份，随着超声开启而出现，在速度分离时刻达到最大，之后逐渐下降，达到一个稳定阶段，直到超声关闭，然后逐渐衰减到零；2)在键合开始时，三倍频几乎没有，表明此时芯片是简谐振动，工具与芯片粘着在一起振动，金凸点与焊盘间是完全的相对运动；随着键合的进行，三倍频信号开始缓慢增加；到“速度分离”时刻更是迅速增加。表明芯片位移曲线开始出现削峰，即金凸点和焊盘间开始产生键合强度，限制芯片跟随工具运动，芯片出现相对倒装工具的滑动。“速度分离”后，三倍频信号维持在一个比较稳定的水平，直到超声关闭。3)五倍频信号变化规律与三倍频信号类似，也反映了芯片类似的运动规律：“速度分离”前与倒装工具一起振动；“速度分离”后，开始出现相对倒装工具的相对运动。

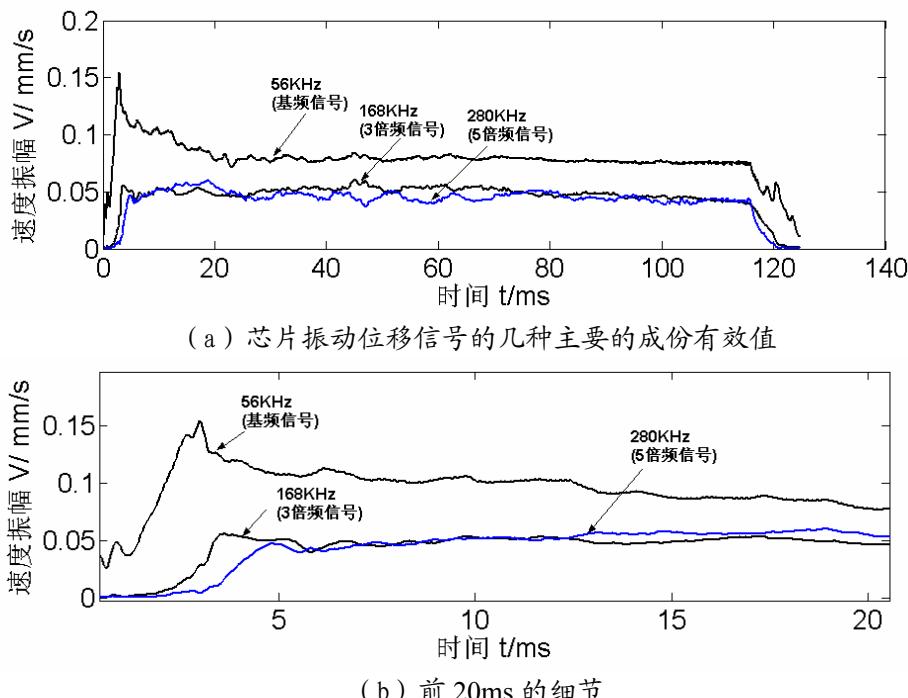


图 3-18 芯片振动位移信号三种主要频率成份的振幅有效值

因此在键合工艺参数设计中，可将三倍频信号作为“速度分离”出现的标志，以此作为键合过程控制的依据。

(3) 键合力对芯片振动信号的影响

进一步还研究了键合力对芯片振动信号各种频率成份振幅有效值变化的影响。试验条件为：键合温度 163℃；键合功率 2.8W（实际输入功率因键合力而异）；键合时间 100ms；键合力分别为 120g、180g、240g。测得各种键合力条件下芯片的振动。

图 3-19 表明了键合力对芯片振动信号的基频（56kHz）成份振幅有效值的影响。由图可知：1) 基频成份振幅有效值随键合力增加而增加，稳定阶段的振幅也随着增加；2) 大键合力(240g)条件下“速度分离”发生的时刻延迟，小键合力(120g)条件下的“速度分离”发生时刻几乎提前了一半。产生这种情况可能有两个因素：一是在小键合力条件下，金凸点和焊盘之间在键合初期，更容易产生相对滑动，将氧化膜去除，迅速形成键合；二是①界面产生的摩擦力太小，很快就带不动下面的系统。这两个因素都有利于键合强度的生成和保持。3) 在“速度分离”前，不同键合力条件下的振幅上升速度、过程相似。

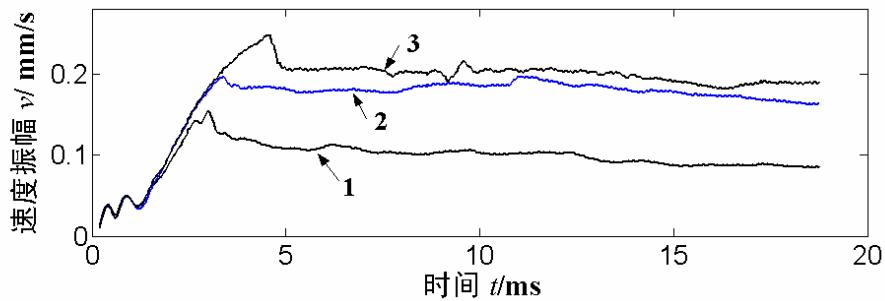


图 3-19 键合力对芯片振动信号的基频（56kHz）成份振幅有效值的影响

1、键合力为 120g；2、键合力为 180g；3、键合力为 240g

图 3-20 表明了键合力对芯片振动信号的二倍频（56×2kHz）成份振幅有效值的影响。由图可知：键合力对其影响规律并不明显；且二倍频成份的振幅有效值也非常小。

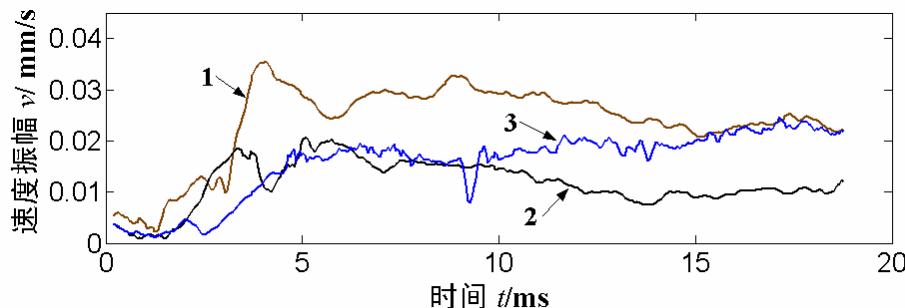
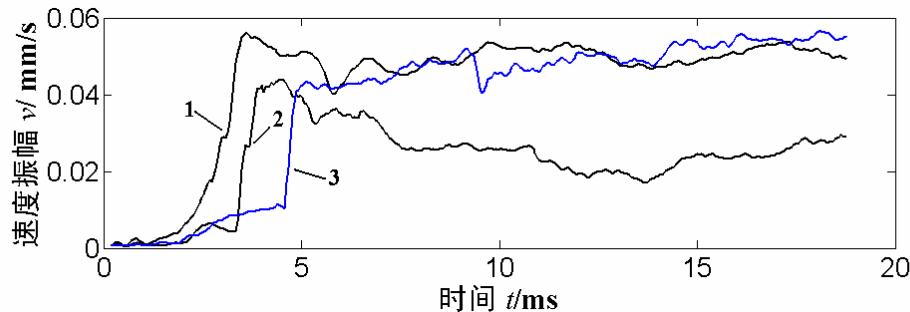


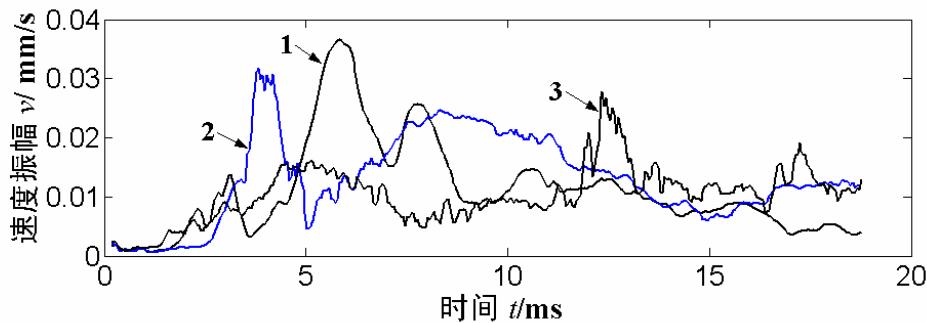
图 3-20 键合力对芯片振动信号的二倍频（56×2kHz）成份振幅有效值的影响

1、键合力为 120g；2、键合力为 180g；3、键合力为 240g

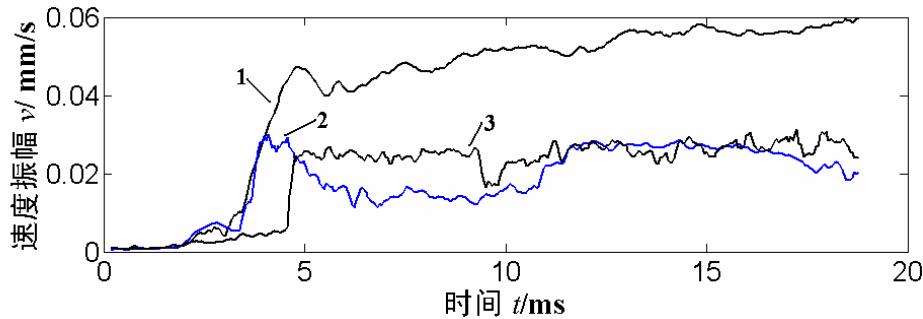
图 3-21 键合力对芯片振动信号的三倍频 ($56 \times 3\text{kHz}$) 成份振幅有效值的影响

1、键合力为 120g; 2、键合力为 180g; 3、键合力为 240g

图 3-21 表明了键合力对芯片振动信号的三倍频 ($56 \times 3\text{kHz}$) 成份振幅有效值的影响。由图可知：1)不同的键合力对信号变化规律的影响是相同的：“速度分离”之前三倍频信号开始缓慢增加；“速度分离”时刻对应着三倍频信号的迅速增加；“速度分离”后三倍频信号维持在一个比较稳定的水平，直到超声关闭。2)迅速上升的阶段明显，但是迅速上升现象与最后键合的强度并无统计性规律。迅速上升的阶段对应速度分离的时刻。3)不同的键合力对三倍频信号迅速上升的时刻有影响，小键合力条件下产生得比较早；大键合力条件下产生得比较迟。

图 3-22 键合力对芯片振动信号的四倍频 ($56 \times 4\text{kHz}$) 成份振幅有效值的影响

1、键合力为 120g; 2、键合力为 180g; 3、键合力为 240g

图 3-23 键合力对芯片振动信号的五倍频 ($56 \times 5\text{kHz}$) 成份振幅有效值的影响

1、键合力为 120g; 2、键合力为 180g; 3、键合力为 240g

图 3-22 表明了键合力对芯片振动信号的四倍频 ($56 \times 4\text{kHz}$) 成份振幅有效值的影响。由图可知：键合力对其影响规律也不明显。

图 3-23 表明了键合力对芯片振动信号的五倍频 ($56 \times 5\text{kHz}$) 成份振幅有效值的影响。它反映了与图 3-21 相似的规律。

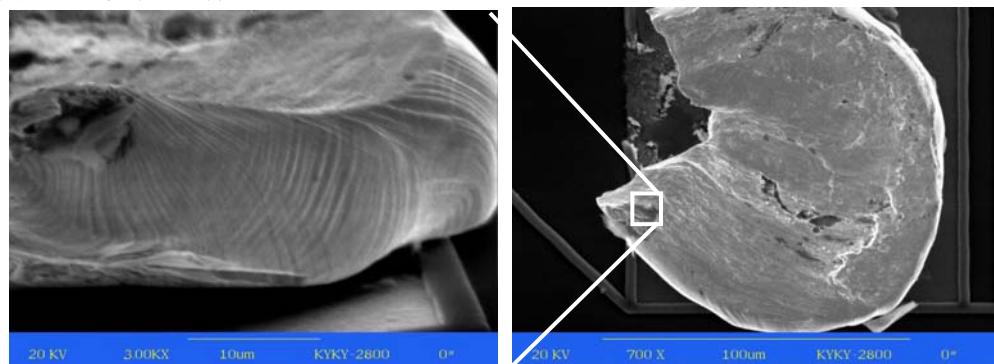
由上述分析可知：“速度分离”之前，小键合力情况三倍频信号出现得早，也就是

芯片振动曲线很快出现削峰，表明产生了初始的键合强度，因此，小键合力有利于金凸点和焊盘界面产生初始键合。其原因之一为：小键合力条件下，金凸点和焊盘间容易产生相对位移，从而能有效去除接触面的氧化膜，暴露出新鲜的原子，并产生初始键合强度，约束芯片振动；在运动曲线上表现为三倍频信号产生的时机较早。

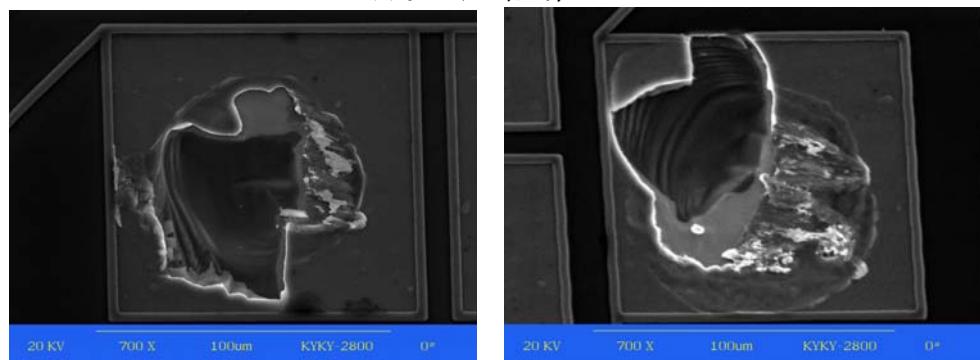
因此，键合过程中的键合力不应恒定不变，应在“速度分离”之前输入小键合力。

(4) 界面运动传递过程对界面的影响

由上述研究可知：“速度分离”后工具的能量一部分通过芯片传递到金凸点/焊盘界面，使金凸点与焊盘的原子互扩散，形成键合强度。另一部分则消耗在工具/芯片界面的摩擦上，给工具/芯片/焊盘/金凸点带来负面影响：1) 磨损了芯片和工具末端表面。图 5-27 是芯片表面的 SEM 照片，芯片表面在工具的反复摩擦下出现大面积剥落，对有剥落的表面进行能谱分析可发现 Fe 元素，表明工具末端也被磨损（工具磨损后需经常更换，由此带来频繁复杂的设备调试，影响生产效率和产品一致性）；此外，芯片表面（硅基体）还发现了与相对运动方向垂直、互相平行的长条形凹坑，这对芯片是有害的。2) 工具/芯片的长时间、大幅的“粘一滑”运动使金凸点和芯片焊盘处于反复应力加载、卸载状态，由此产生的疲劳将破坏焊盘和金凸点。图 3-24 是疲劳破坏的金凸点和焊盘。图 3-24(a) 中的断口形貌是疲劳裂纹，断口的网状条纹表明了超声对基体材料的反复交变作用。



(a) 金凸点的疲劳破坏



(b) 芯片焊盘的疲劳破坏

图 3-24 运动传递对金凸点/芯片焊盘的影响

因此，在“速度分离”后保证键合界面足够的原子扩散的前提下，应降低超声输

入强度。一方面减小工具/芯片间的相对运动；另一方面避免金凸点、基板焊盘和芯片焊盘疲劳。这样有利于提高超声倒装键合效率，提高键合强度及可靠性。

3.3.2 倒装工具/芯片界面的运动传递模型

(1) 倒装界面运动传递简化模型

根据倒装界面结构和运动传递分析，可将倒装界面系统视为一个机械振动系统。其中，倒装工具运动是系统的激励，芯片运动为系统对激励的响应，基板对芯片的约束以及工具对芯片的约束则是系统的弹性和阻尼环节，如图 3-25 和 3-26。

对系统进行以下合理的假设，以期简化模型、简化求解难度：

- a)倒装工具/芯片间的“粘滑”在界面上同时进行，没有“部分粘滑”出现；
- b)工具的激励是简谐的（试验也发现高阶谐波分量非常小）；
- c)由于焊盘的振动和变形相对金凸点小，可以忽略；
- d)金凸点的切向弹性变形与切向力线性相关；
- f)芯片振幅适当，不会引起金凸点和焊盘界面的明显相对运动（否则键合被破坏）；
- g)倒装工具/芯片间的摩擦系数是常数，与速度无关；

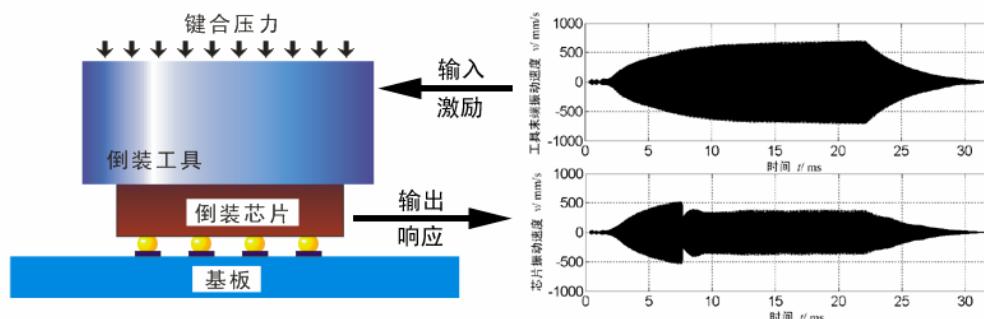


图 3-25 倒装界面系统的激励和响应

根据上述的分析，可将倒装工具/芯片/焊盘界面简化为图 3-26 所示的模型：其中 x_{tool} 和 x_{chip} 分别是工具和芯片振动的坐标系；将芯片/金凸点/基板焊盘视为一个子系统，具有相同的速度和位移，则它们在水平方向上的受力有：芯片的惯性力 $m_{\text{chip}} \ddot{x}_{\text{chip}}$ 、金凸点/焊盘界面的阻尼力 $c_{\text{chip}} \dot{x}_{\text{chip}}$ 、金凸点变形导致的弹性力 $k_{\text{chip}} x_{\text{chip}}$ 和倒装工具/芯片界面的摩擦力 F_{frict} 。因此，根据牛顿定律，可建立“速度分离”后，倒装工具/芯片界面的运动微分方程。

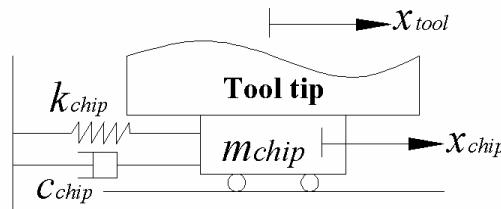


图 3-26 倒装界面系统的动力学模型

对于滑动过程，芯片的运动和受力为：

$$m_{\text{chip}} \ddot{x}_{\text{chip}} + c_{\text{chip}} \dot{x}_{\text{chip}} + k_{\text{chip}} x_{\text{chip}} = F_{\text{frict}} \quad (3.26)$$

其中：

$$F_{\text{frict}} = \mu F_N \operatorname{sgn}(\dot{x}_{\text{tool}} - \dot{x}_{\text{chip}}) \quad (3.27)$$

对于粘着过程，芯片的运动和受力为：

$$m_{\text{chip}} \ddot{x}_{\text{tool}} + c_{\text{chip}} \dot{x}_{\text{tool}} + k_{\text{chip}} x_{\text{chip}} = F_{\tan} \quad (3.28)$$

其中 x_{tool} 是工具的简谐激励：

$$x_{\text{tool}} = A \sin \omega t \quad (3.29)$$

而“粘着”和“滑动”的判据分别为：

$$\begin{cases} |F_{\tan}| \geq F_{\text{static}}, \vee \dot{x}_{\text{chip}} \neq \dot{x}_{\text{tool}} \\ |F_{\tan}| < F_{\text{static}}, \wedge \dot{x}_{\text{chip}} = \dot{x}_{\text{tool}} \end{cases} \quad (3.30)$$

其中 F_{static} 是键合力作用下倒装工具/芯片界面的静摩擦力：

$$F_{\text{static}} = \mu_0 F_N \quad (3.31)$$

因此，可以得到倒装界面系统的运动传递过程微分方程：

$$\begin{cases} m_{\text{chip}} \ddot{x}_{\text{chip}} + c_{\text{chip}} \dot{x}_{\text{chip}} + k_{\text{chip}} x_{\text{chip}} = F_{\text{frict}}, \text{when}, |F_{\tan}| \geq F_{\text{static}}, \vee \dot{x}_{\text{chip}} \neq \dot{x}_{\text{tool}} \\ m_{\text{chip}} \ddot{x}_{\text{tool}} + c_{\text{chip}} \dot{x}_{\text{tool}} + k_{\text{chip}} x_{\text{chip}} = F_{\tan}, \text{when}, |F_{\tan}| < F_{\text{static}}, \wedge \dot{x}_{\text{chip}} = \dot{x}_{\text{tool}} \end{cases} \quad (3.32)$$

求解式 3.32，就可由倒装工具的振动确定芯片的振动过程。

(2) 运动传递过程模型求解

将实测的倒装工具和芯片振幅代入式 3.32，经过参数拟合可得到系统的质量、阻尼和弹性系数等参数如表 3-1：

表 3-1 振动系统参数估计

参数	参数值
系统质量	3e-10kg
系统阻尼	200000
系统弹性	0.6e6
激励频率	60000Hz
激励振幅	1700nm
摩擦系数	0.6

将上述参数代入式 3.32，根据微分方程理论和数值计算方法，采用四阶龙格-库塔(Runge-Kutta)法进行数字求解，由倒装工具的位移、速度和加速度，可计算出倒装芯片的振动位移-时间曲线，如图 3-27。

相较而言，实际的测量波形细节更复杂。即便如此，该计算模型仍较好地反映了倒装工具/芯片界面的“粘滑”规律。因此可认为上述模型能够反映倒装键合过程中倒装工具/芯片界面的超声振动传递。

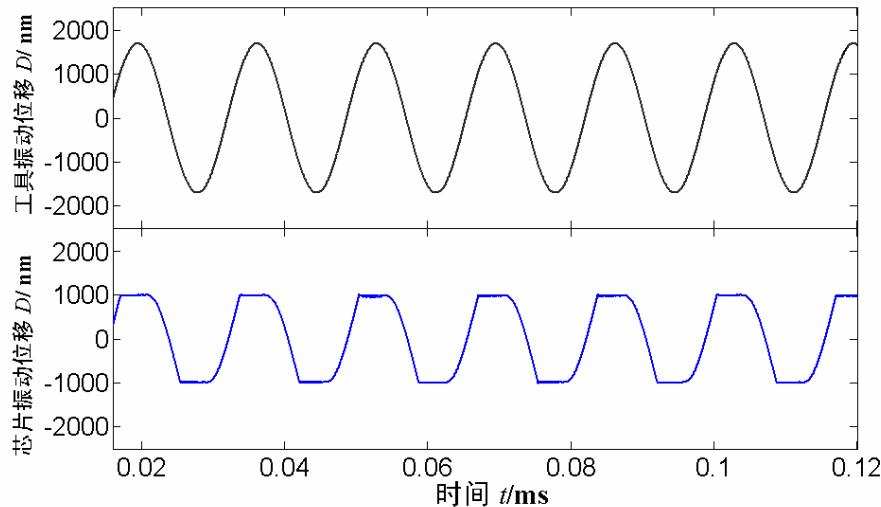


图 3-27 倒装工具和芯片的位移 - 时间曲线

3.4 小结

键合过程中超声能量的传递是以振动传递的方式实现，对键合可靠性和键合强度都有重要影响。本章研究了超声在变幅杆/工具中的传递、研究了超声在倒装界面系统的传递：

- 1) 根据变截面杆的纵向振动方程，建立了超声在变幅杆中的传递方程，获得了超声在变幅杆中传递时振幅的分布规律；将倒装工具视为伯努利—欧拉梁，获得了超声在倒装工具中传递时振幅的分布规律。
- 2) 观测了键合过程中工具末端/芯片的振动，发现了“速度分离”现象、芯片振动的“粘一滑”过程，揭示“速度分离”后工具一部分能量传递到键合界面，形成键合强度；另一部分被消耗在倒装工具/芯片间的摩擦上，磨损芯片和工具、损害键合界面结构和强度；因此在提高键合强度的设计中，必须充分考虑“速度分离”现象，在“速度分离”发生后降低超声振幅。
- 3) 分析了芯片振动信号的频率组成，以及不同频率组成的振幅有效值在键合过程中的变化。通过研究键合力对各频率成份的影响，发现“速度分离”之前，小键合力有利于产生初始的键合强度。建立了通过倒装芯片振动信号的三倍频来判断“速度分离”时机的方法，可作为键合过程控制的依据。
- 4) 建立了倒装界面系统的运动传递模型。了解了倒装工具/芯片间“粘一滑”运动传递过程。

第四章 热超声倒装键合界面结构与强度

由前文研究可知：不同键合条件下，倒装芯片的振幅不同，超声在键合界面的传递过程不同，“粘滑”过程不同，最终使得键合强度不同。然而，这仅仅是从运动学的角度，认识了键合参数对表皮层去除过程、对金凸点和焊盘疲劳的影响；而键合参数的加载过程对原子扩散的影响却未涉及。实际上，超声在倒装界面的传递，不仅影响了金凸点/焊盘界面的运动传递，同时还影响了金凸点/焊盘界面的应力分布，影响了界面的应力场梯度，最终影响了界面的原子扩散、影响了界面键合强度。本文将通过试验和有限元模型研究热超声倒装键合面应力分布，以及它对键合强度分布的影响。

4.1 金凸点/焊盘界面的有限元模型及其求解

键合面的应力分布难以通过试验直接观测，因此本文将采用以下方法来了解键合面的应力及其变化对键合强度生成过程和分布的影响：

首先，根据键合面的结构、受力条件，建立金凸点/焊盘键合界面的有限元模型；根据激光多普勒测振系统所获得的倒装工具/芯片振动数据，确定仿真位移边界条件，对模型进行求解，认识界面应力分布在键合过程中的变化；

然后，采用 SEM(扫描电镜)观察键合区域的微观形貌，了解键合界面的键合强度分布规律，通过分析键合界面应力分布和键合强度分布之间的关系，结合键合过程中芯片的振动，了解键合强度的生成过程及强度分布规律。

最后，根据金属塑性变形理论和原子扩散理论，确定键合界面应力分布和键合强度分布之间的内在联系，获得键合面应力分布变化对键合强度生成过程的影响规律。获得对键合强度形成机理的认识，进而确定优化的功率和键合力加载过程，提出新的键合工艺。

4.1.1 金凸点/焊盘界面的有限元模型

1) 几何模型

SEM 观察显示：分布在不同位置的金凸点，形成的键合面形貌基本类似。即可通过了解一对金凸点/焊盘界面来研究界面形貌的形成原因。由于金凸点和焊盘是中心对称的几何体，且受力也是对称的。故可将界面区域简化为图 4-1 所示的二维模型^[101-104]：模型中金凸点的直径是 80μm，高度是 30μm；银焊盘的宽度是 240μm，高度是 120μm。金凸点和焊盘的接触面积就是金凸点下端面的表面积；应力由键合力和接触面积确

定；切向位移就是倒装芯片的振动位移，可在试验中通过激光多普勒测量系统测得。以金凸点和焊盘的接触面中心为坐标原点，建立如图所示的平面坐标系 xoy (在有限元分析软件中 x 轴为 1 轴， y 轴为 2 轴)。

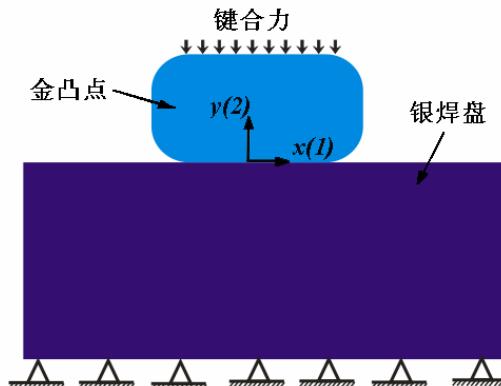


图 4-1 凸点和焊盘的几何模型

2) 动力平衡微分方程

根据弹塑性理论，金凸点和焊盘的动力平衡方程可写为：

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + X = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + Y = \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \end{cases} \quad (4.1)$$

其中， u, v 是沿着 x, y 轴方向的位移分量， ρ 是金凸点或者焊盘的质量密度。

3) 几何方程：

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \\ \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \\ \gamma_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \end{cases} \quad (4.2)$$

4) 变形协调方程

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y} \quad (4.3)$$

5) 应力--应变关系：

目前，金凸点和焊盘在超声条件下的应力-应变关系在物理上还没有实用的模型描述，这也是超声键合机理不清楚的一个重要因素。但是，在文献[105]中，有学者测得了键合金丝的经验性准静态应力-应变关系：

$$\sigma = E_0(1 - e^{-\alpha\varepsilon}) + E_1\varepsilon(1 - T^*) \quad (4.4)$$

其中： E_0, E_1, α, T^* 都是与测量温度有关的系数。

$E_0(1 - e^{-\alpha\varepsilon})$ 项：表示弹性和转折部分。其中： E_0 决定了进入塑性区域的应力大小； α ：决定了进入塑性区域的速度；

$E_l \epsilon (1 - T^*)$ 项：表示塑性部分。其中： E_l 决定了塑性区域的斜率； T^* 是温度修正系数。

图 4-2 绘出了根据文献[105]获得的通常状况下金凸点/金丝的应力—应变曲线：

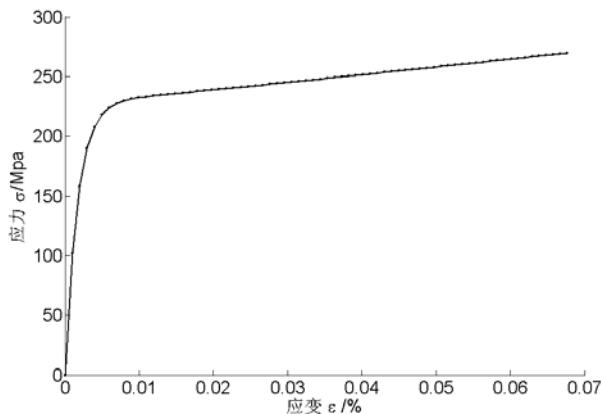


图 4-2 通常状况下金丝的应力—应变曲线

虽然这样的试验数据与实际超声作用下的材料特性还是有差别，但这是目前仅有基础的试验数据。本文将采用该试验数据进行金凸点的应力应变计算，并与考虑超声软化后的计算结果进行对比，结果表明材料数据对应力的大小有重要影响，但是对应力的分布基本没有影响。详见 4.1.2 节的“模型求解”部分。

6) 边界条件

由于键合过程中金凸点和焊盘之间的接触是时变的，金凸点的位移载荷也是时变的，且金凸点在键合过程中存在大变形，要完全仿真这样的键合过程，模型求解将非常困难^[106-108]。

为了简化求解过程，本文在边界条件上进行了简化：金凸点上表面的应力均布，大小为 58.6MPa(即每凸点 0.294N)；在超声激励下，金凸点上表面有交变位移载荷，位移数据采用 3.3.1 节的芯片振动位移数据；基板固定在工作台上，因此银镀层底部所有自由度都被限制，如图 4-1 所示。

4.1.2 模型求解

模型中材料的数据为：金凸点的 E 常数为 7.95e10Pa，泊松比为 0.42。而银焊盘的 E 常数为 7.32e10Pa，泊松比为 0.38；为简化模型求解，忽略了银焊盘塑性变形。

由于超声对材料作用机理目前依然不清楚，因此无法获得准确的、超声作用下的材料数据^[109-113]。图 4-3 描述了金凸点在两种条件下的应力—应变关系：曲线 1 是金凸点在常温、无超声加载条件下的材料特性^[101]，即式 4.4；曲线 2 是金凸点在超声加载条件下变软的材料特性^[102]，即曲线往下移动，虽然下移（软化）的程度没有足够的试验依据，但它能为仿真的结果提供一个参照，为确定应力分布提供对比。本文模型采用曲线 1 作为金凸点的材料数据。

为了了解金凸点的材料数据对键合面应力分布的影响，分别将两种材料数据输入

模型进行计算，并比较计算结果中应力的大小和分布的差别。

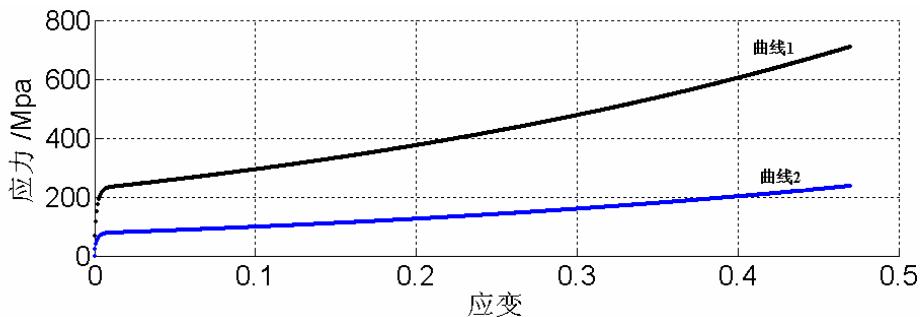


图 4-3 金凸点在两种条件下的应力 - 应变关系

金凸点/焊盘界面的应力分布计算采用 ABAQUS 软件，求解过程如图 4-4：

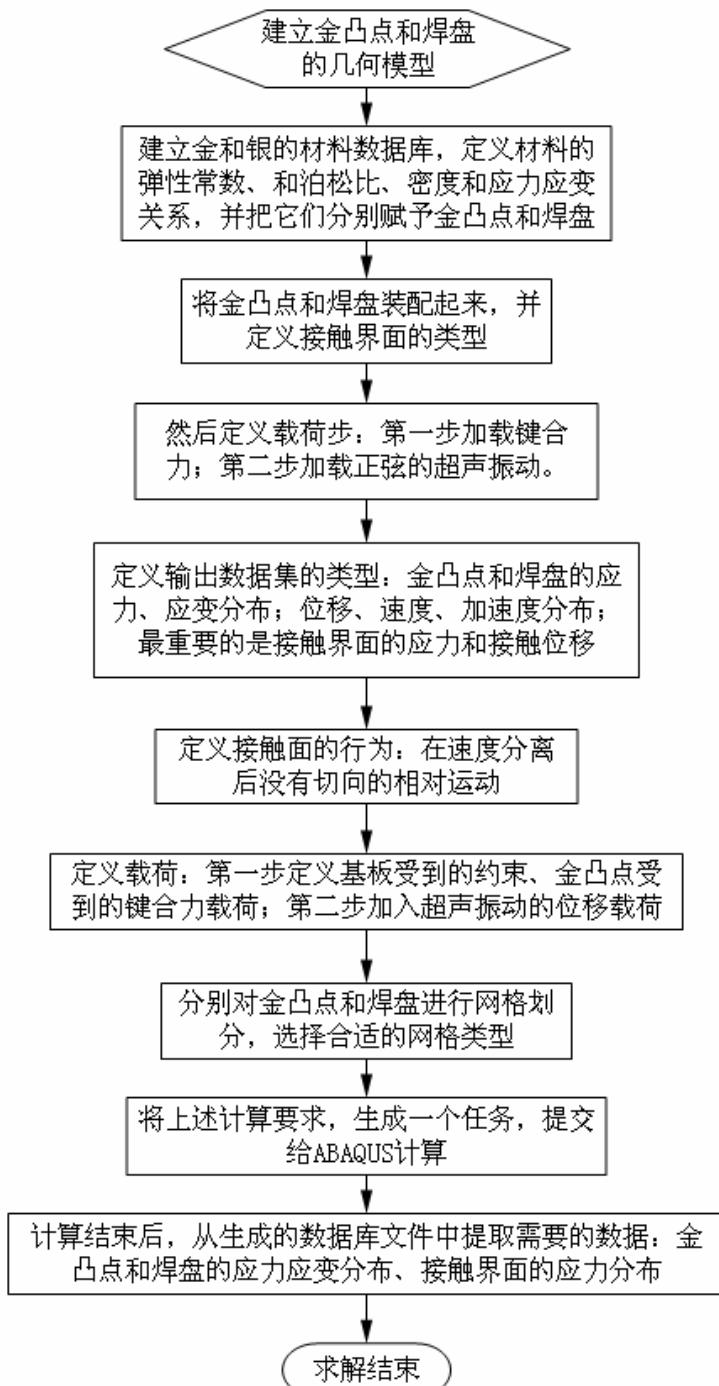
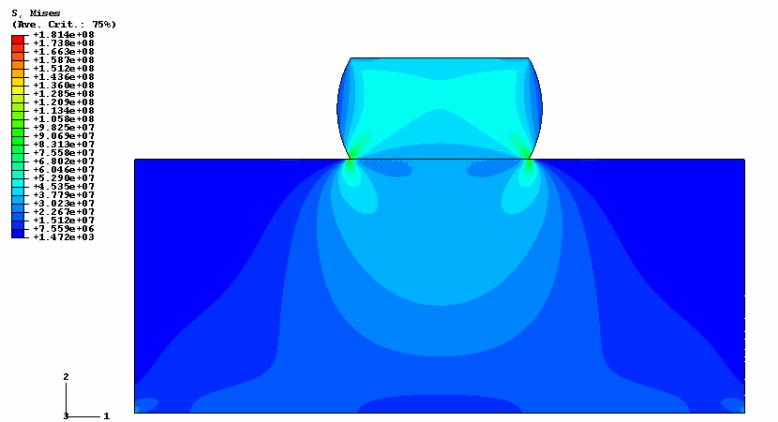
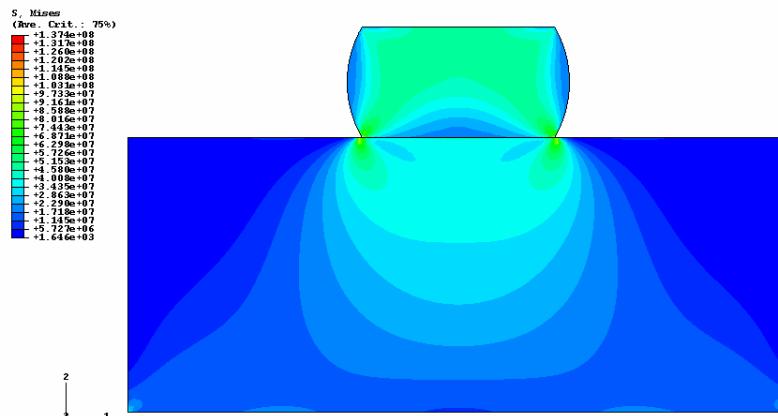


图 4-4 ABAQUS 求解过程

采用 ABAQUS 软件，按上述方法，计算键合力为 0.294N/金凸点条件下，键合区域的应力分布情况。根据曲线 1 计算得到的金凸点和焊盘的 Mises 应力云图如图 4-6 (a)，采用曲线 2 计算的结果如图 4-6 (b)。



(a) 曲线 1 的计算 (最大应力 181Mpa)



(b) 曲线 2 的计算 (最大应力 137Mpa)

图 4-6 材料数据对 Mises 应力云图的影响

由上图可知：金凸点的材料数据对计算结果的应力大小有影响，对应力分布基本没有影响。而分布直接关系键合界面的微观形貌。因此本文选择的材料数据不会对研究结果（应力分布对键合强度生成过程和分布的影响）产生根本的影响。下面的计算都将采用曲线 1 作为金凸点的材料数据。

4.2 键合力和超声振动对键合面应力分布的影响

前文的研究结果表明：键合力和超声功率通过影响键合面氧化膜去除过程，决定了初始键合强度的生成过程。但是，进一步的超声加载如何影响键合强度的强化却并不清楚。下面将通过有限元分析，确定键合力和超声振幅对键合过程中金凸点内应力场的影响，对金凸点/焊盘界面应力分布和应力梯度的影响，了解键合强度生成过程。

4.2.1 键合力对键合面应力分布的影响

根据上述有限元分析方法, 计算了金凸点和焊盘界面在加载 0.294N/金凸点键合力条件下应力的分布。以键合界面为 x 轴, 对称中心为坐标原点, 可获得界面正应力和切应力的分布如图 4-7 和 4-8 所示:

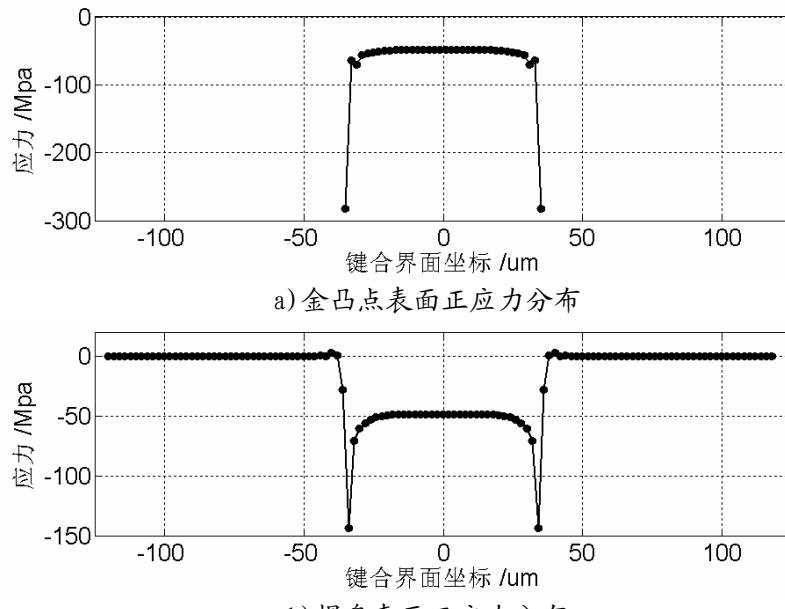


图 4-7 界面的正应力分布

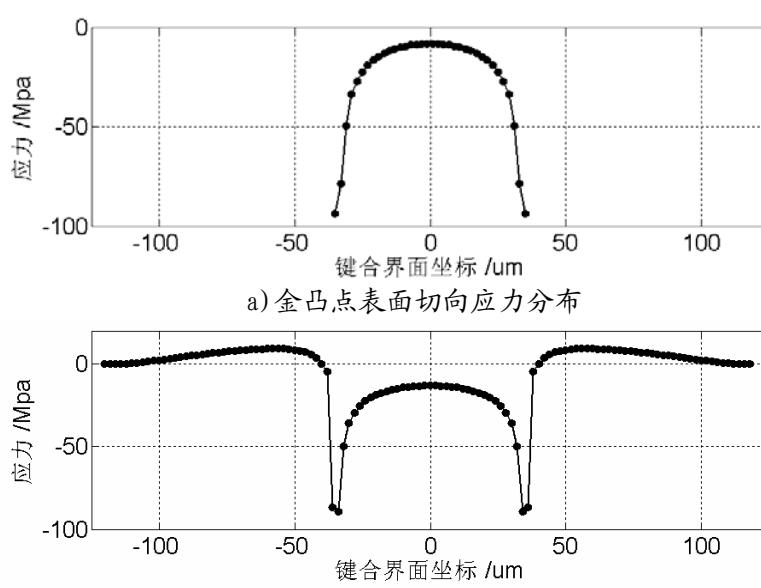


图 4-8 界面的切向应力分布

由图可知: 在金凸点和焊盘接触面的边缘 (坐标为 $-37.5\mu\text{m}$ 和 $37.5\mu\text{m}$ 处, 由于金凸点是鼓形的: 直径最大位置是 $80\mu\text{m}$, 接触面的直径是 $75\mu\text{m}$), 此处焊盘和金凸点的正应力和切应力都最大。边缘正应力是中心正应力的 3 倍; 边缘切应力是中心切应力的 4 倍以上。

目前人们认为热超声倒装键合过程可分为两个阶段^[103]: 1) 氧化膜去除: 洁净的

金属表面具有较高的表面能，可在接触时形成金属键；但被键合表面往往覆盖有污染层和氧化层，习惯上称为氧化膜，因此，要在键合初期去除金凸点和焊盘接触面上覆盖的氧化膜；键合界面的氧化膜去除是决定键合形貌的主要因素之一。2)原子扩散：氧化膜去除后，在键合力和超声作用下，裸露的金属表面接触到一起，原子间产生相互作用，并发生原子间互扩散，产生原子间键合。因此，氧化膜去除和原子扩散是形成键合强度的重要原因，也是决定键合界面形貌的重要原因。

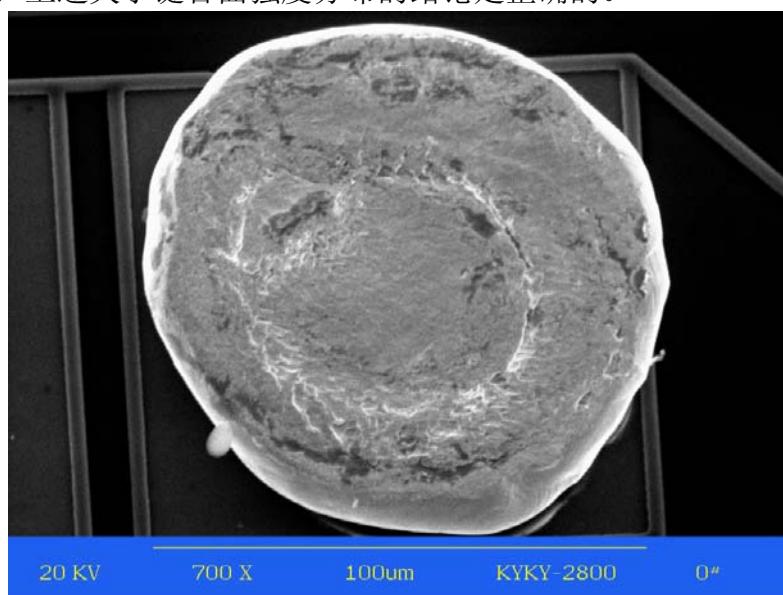
根据金属塑性变形理论^[114]，氧化膜去除至少需要两个条件：1)接触表面有足够的正应力使氧化膜破碎；2)接触表面间有相对滑动使碎片能够排出接触界面。

在键合初期，正应力使界面产生塑性变形、氧化膜破碎，同时限制了金凸点与焊盘之间的相对运动；而切应力使氧化膜破碎；同时克服正应力导致的摩擦，使金凸点和焊盘间产生相对运动，将氧化膜碎片排出接触面，为界面间的原子扩散做准备。

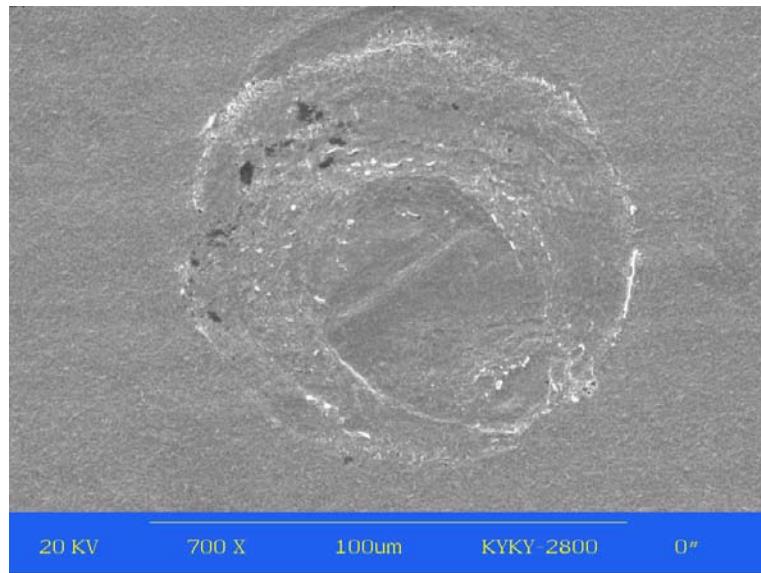
上述仿真结果表明：接触面边缘的正应力最大，可有效破碎键合界面氧化膜；同时，切应力也最大，能有效将氧化膜碎片排除接触面，裸露出新鲜的原子。键合面边缘最有条件形成键合强度。因此，键合面的强度分布应为环状分布。

将键合完成后的键合点拉开后，采用 SEM 获得了键合面的微观形貌，如图 4-9 所示。由图可知：金凸点上有白色的环状键合痕迹存在。由第二章的微观形貌分析可知：这些白色的环状焊接痕迹是表示韧性断裂的脊皱，表明了键合界面在这些位置产生了良好的键合，其强度甚至大于金凸点本身强度。此外，金凸点的周边还观察到黑色的物质分布，根据第二章的分析可知：这是破碎的银基板氧化膜，它们在接触面正应力最大的位置产生，然后被排出来。此外，环状区域外也有少量的白色痕迹存在，其产生的原因是：金凸点在键合前的表面是凹凸不平的，其突出部位在键合力的作用下产生局部应力集中，导致氧化膜去除、键合强度的产生。

由此可知：上述关于键合面强度分布的结论是正确的。



(a) 键合面金凸点的微观形貌



(b) 键合面焊盘的微观形貌

图 4-9 键合面的微观形貌

上述的分析似乎很合理，但仔细观察后可发现：

- 1) 为什么金凸点上的白色键合环不是分布在键合界面的边缘，而是中间？
- 2) 黑色的破碎的银基板氧化膜为什么也在键合表面？
- 3) 图 4-9 (b) 所示的基板微观形貌中，为什么会有内外两个环？

要回答上述问题就还需要进一步的研究。

根据原子扩散理论^[115]，原子扩散是由物质中存在浓度梯度、温度梯度、应力场梯度等化学位梯度所引起的物质输运过程，原子扩散的动力是化学位梯度。应力场梯度是化学位梯度之一，应力场梯度是影响键合界面强度和形貌的因素之一。因此应力场是决定键合形貌和强度的重要因素，同时也是决定金凸点和焊盘产生塑性变形的重要因素。应力集中的程度决定键合界面的塑性变形程度，决定了原子扩散的程度；应力集中的位置就是键合强度生成的位置。

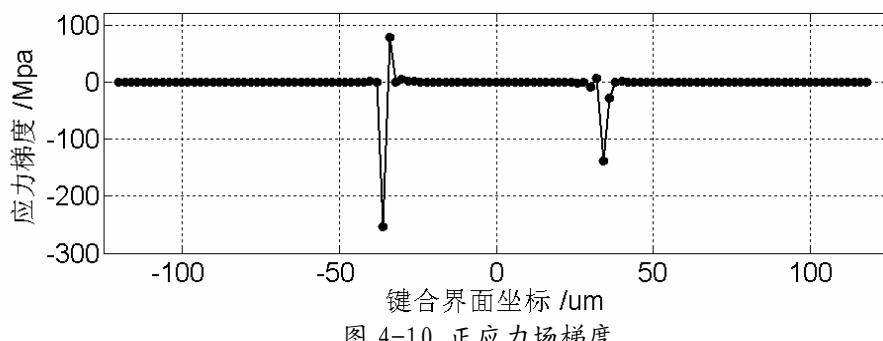


图 4-10 正应力场梯度

根据仿真结果可得到如图 4-10 所示的正应力场梯度：接触面边缘较其它位置的应力场梯度大，更有利于原子扩散、形成键合强度，并最终形成环状界面。在接触面边缘，由于几何边界条件的不连续，应力场产生了巨大的突变，从约 100Mpa 迅速变为 -250Mpa，也就意味着将出现两个原子扩散最多的区域，一个是在接触面边缘的内侧，一个是在接触面边缘的外侧。这正是基板微观形貌中有内外两个环的原因。实际上金

凸点上也存在着对应的内外两个环，只是在 SEM 照片中外环不明显罢了，观测到的仅是内环，因此觉得金凸点上的白色键合环分布在中间。

4.2.2 超声振动对键合面应力分布的影响

上述分析仅考虑了键合力的加载，相当于超声振动在平衡位置的状态。实际上，超声振动的介入将进一步加强这样的应力分布、键合强度分布。

当芯片振动并离开平衡位置时，金凸点的切向位移加载被考虑进来。试验测量在上述条件下芯片的振幅约为 700nm。图 4-11 是在金凸点上表面沿着 1 方向 (x 方向) 正向加入 700nm 位移载荷后的计算结果。

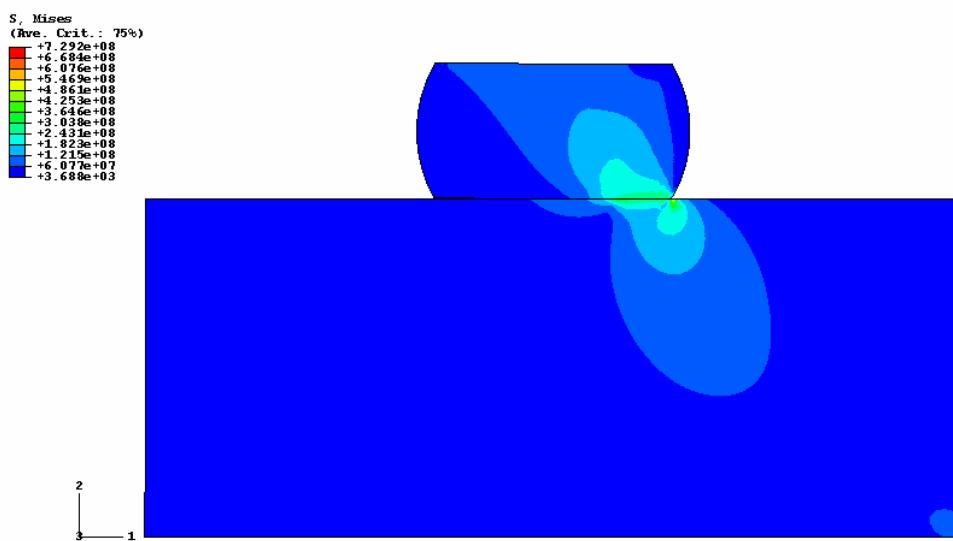


图 4-11 切向位移加载

由图可知，超声振动改变了金凸点和焊盘的应力分布和大小。对于键合界面，应力的大小和分布如图 4-12 和 4-13：模型考虑超声振动后，在振动方向相应的一侧边缘，正应力和切应力达到最大值。其中正应力最大值增大了约一倍；切应力增大了约四倍。由于超声振动是交变的，因此，在接下来的半个超声周期后，在键合面的另一侧也会有这样的应力分布。由于超声的介入，在这样的应力条件下，金凸点迅速产生塑性变形（宏观表现为软化），金凸点和焊盘的接触表面增加，边缘位置往外扩展；同时，切应力的迅速增加促进了界面间产生切向相对位移，将氧化膜碎片排出切应力峰值区域，并分布在两个切应力峰之间以及内侧切应力峰的内侧，最终形成如图 4-9(a) 所示的氧化膜碎片分布。

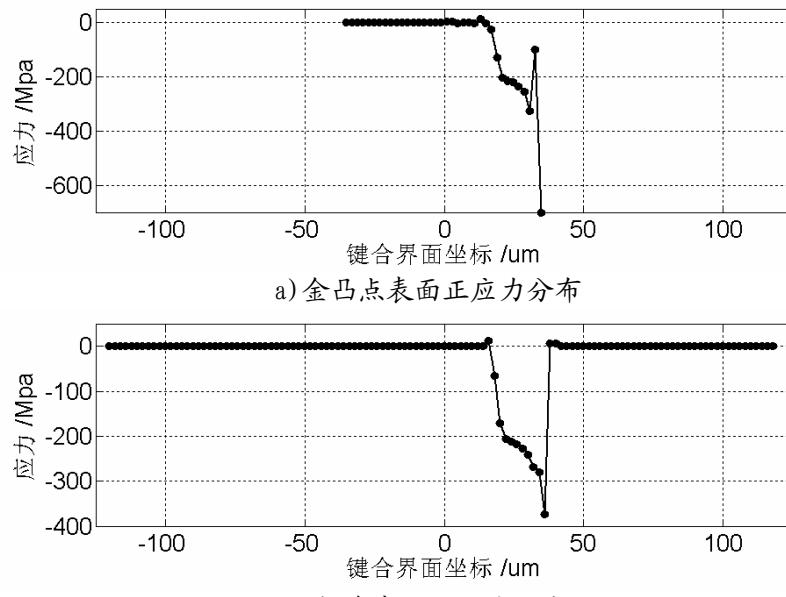


图 4-12 键合界面的正应力分布

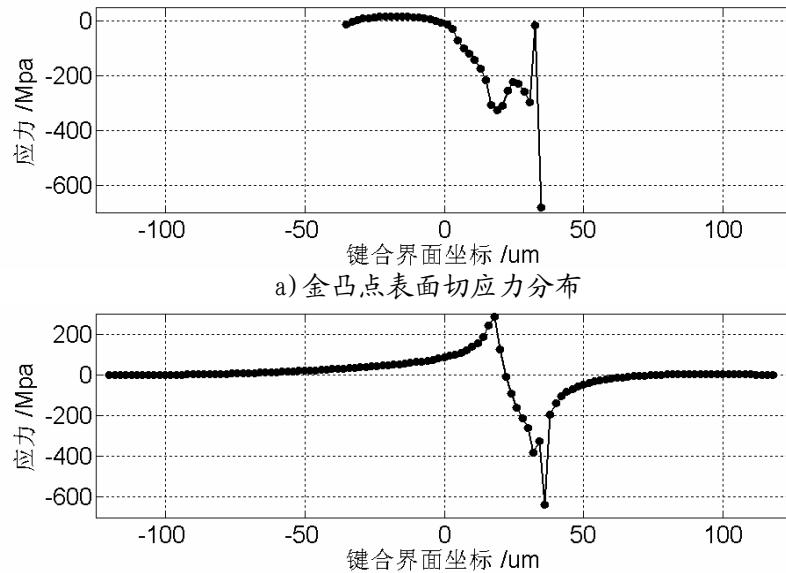


图 4-13 键合界面的切应力分布

而键合界面的正应力梯度场则如图 4-14 所示：在与振动位移对应的键合界面边沿位置，应力和应力场进一步集中，促进了环状界面的形成。

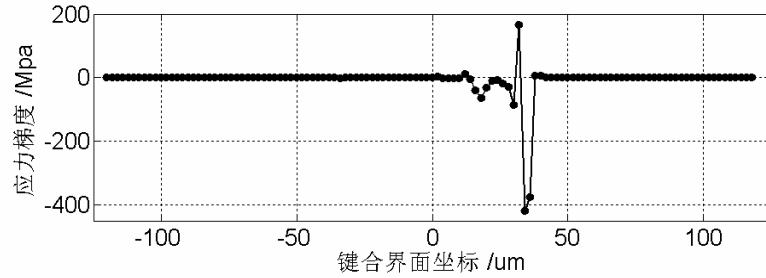


图 4-14 键合界面的正应力场梯度

因此，在热超声倒装键合中，键合界面的应力场分布是影响键合界面形貌的关键因素之一。其中，正应力对键合界面脆性氧化膜的破裂有重要影响，也决定了裸露金

属表面的接触及进一步的原子扩散；剪切应力对键合界面的氧化膜排出，以及键合界面间的相对运动有重要影响。

4.3 键合强度的形成机理

由上述研究可知，热超声倒装键合是一种固态焊接技术。所谓固态焊接，是指对焊件的焊接表面清理后，施加静态或动态压力，加热或不加热，在母材不熔化的情况下使两材料发生固相结合的焊接法^[116-119]。根据前人的研究和上述试验、理论分析，可把热超声倒装键合过程分为三个阶段：

第一阶段：物理接触阶段。在键合力作用下，键合界面局部接触点首先达到塑性变形；在持续压力的作用下，接触面逐渐扩大，最终达到整个键合界面可靠的接触。在这个过程中，键合表面的氧化膜被去除、原子间直接接触，形成初始的键合强度。具体过程将在 4.3.1 节详述。

第二阶段：接触界面原子间的相互扩散阶段。形成初始连接强度后，两种键合金属间的原子沿着表面、晶界、位错等短路通道进行扩散，形成牢固的结合层。

第三阶段：结合层厚度增加阶段。在超声振动、键合力和温度作用下，键合界面的原子在数百毫秒的时间内迅速互相扩散，形成数百纳米厚的原子扩散区域，生成可靠的键合强度，对于金/银键合，键合面一般形成固溶体。

上述三个阶段并没有明确界限，第一个阶段的后期和第二个阶段的初期往往同时存在；同样，第二个阶段的后期也和第三个阶段的初期同时存在。在键合过程中，键合材料表面的氧化膜去除、原子间的互扩散是形成键合强度的关键。

4.3.1 键合材料表面氧化膜的去除机理

理论上，两块分离金属材料的表面接近到原子的距离（即 0.4~0.5nm）时，按照材料的物理本性，它们就能连接在一起形成连接强度。

但实际上：1)材料的微观表面是凹凸不平的，大多数表面间有一定距离；2)常规环境下材料表面覆盖了一层表面膜，习惯上称为氧化膜。氧化膜的产生一方面是材料在大气中氧化，在表面形成氧化膜，氧化膜随着时间的延长不断增厚；另一方面是材料表面上的表面能（高熔点的贵金属具有较高的表面能），吸附了水分等其他杂质，形成附加层。氧化膜对金属起着保护作用，同时极大地阻碍材料的连接。要实现材料间的良好结合，就必须去除材料表面的氧化膜。

因此，键合的基本条件就是施加外部能量，去除阻碍原子键结合的氧化膜，促使分离金属材料的原子相互接近，形成原子键的结合。

(1) 氧化膜去除和初始键合强度形成过程

由仿真可知：在键合力的作用下，热超声倒装键合界面产生了 700MPa 以上的局部应力集中（如图 4-11），强大的应力足以使键合界面的材料产生塑性变形和塑性流动，使脆性的氧化膜破裂并被塑性流动的金属带出键合面。因此，可在键合界面周边观测到如图 4-9(a)所示的黑色氧化膜碎片。

在超声振动作用下，键合界面处于交变的应力加载一卸载循环中。键合界面在第 1 次压应力作用下，表面凸起部位的氧化膜首先破裂，裸露金属在此接触，达到原子间结合：一方面，键合界面两种材料的裸露金属依靠正离子和自由电子云的相互吸引而相互结合起来，形成稳定的金属键（化学键），是主要的初始连接强度；另一方面，原子间的距离小到范德华力作用的范围，形成物理键吸附，也是初始连接强度的一部分^[120]。

但是第 1 次压应力卸去后，受压的氧化膜产生反弹力，若反弹力大于裸露金属间的结合力，则结合部位重新开裂，第 1 次微键合失败；若反弹力小于裸露金属的结合力，则第 1 次微键合的接头可稳定存在，在接下来的第 2 次、第 3 次等一系列超声/应力作用过程中，氧化膜被逐步去除，裸露金属面积扩大，原子键键合面积越来越大；同时，经过严重变形的键合接触界面呈现复杂的、峰谷交错的空间形貌，其接触面面积（原子键键合面积）比简单的几何截面大，形成了较稳定的初始键合强度，在芯片的宏观运动上表现为“失速”。但此时仅是表面原子间的键合，键合层的厚度有限，所提供的连接强度不足，因此键合还不能结束。

(2) 键合力/超声振动在氧化膜去除过程中的作用

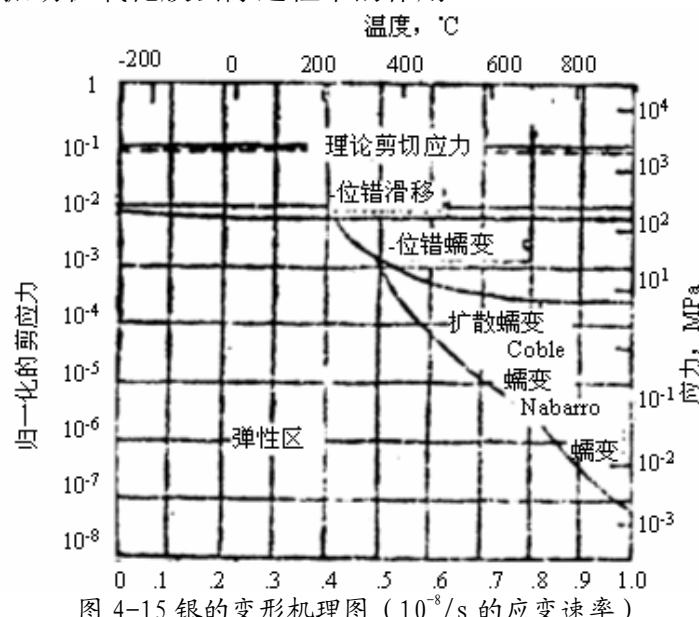


图 4-15 银的变形机理图 ($10^{-8}/s$ 的应变速率)

金凸点/银焊盘的塑性流动是氧化膜破裂、去除的基本条件；由金和银的变形机理图（图 4-15）可知，在键合温度为 160°C、键合应力数百 MPa 条件下，它们的主要变

形机理是位错滑移。

应力和应变速率都是影响金属塑性变形的重要因素。由仿真可知：在键合力作用下，金凸点和银焊盘中的应力可达数百 MPa，应变速率可达 10/s 以上，如图 4-11。这对于位错的增殖、滑移和金凸点的塑性流动具有直接的影响。

根据材料物理学理论^[120]，在金属晶体的生长过程中，金属中不可避免地存在位错等缺陷，退火态下的位错密度（穿过单位面积的位错数目）一般为 $10^6 \sim 10^8 / cm^2$ 。在外力作用下，当位错线上的应力达到理论切变强度时，位错线将被拉长、变形、移动和增殖。位错增殖所谓机制多样，如双交滑移增殖机制、攀移机制等，典型的位错增殖机制是弗兰克-瑞德(Frank-Read)理论，如图 4-16。

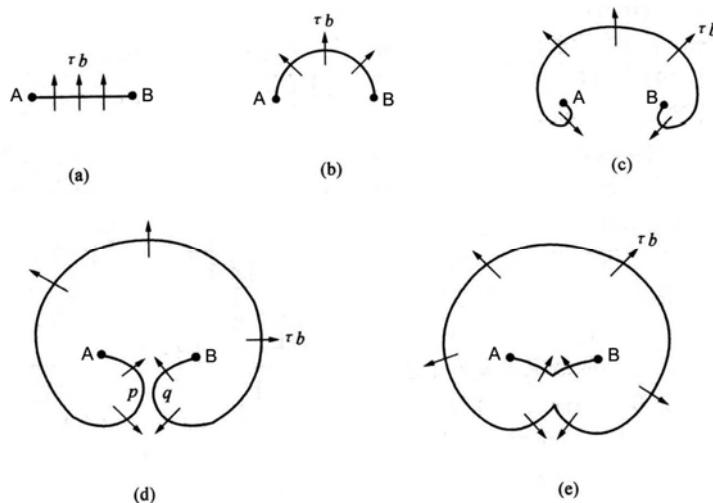


图 4-16 弗兰克-瑞德 (Frank-Read) 位错增殖理论

退火状态的位错以三维网络状存在于晶体中，有一两端钉扎的刃型位错线段 AB，在外加切应力 τb 作用下，位错线 AB 受力，方向垂直于位错线，使之克服位错线张力，产生弯曲，如图 4-16(a)(b)。由于位错线上各点线速度相同，在位错线两个端点附近要保证相同的线速度，必须增加角速度，使位错线形成卷曲状，如图 4-16(c)。当位错线弯曲成图 4-16(d)时，在两枝相遇处为两平行的异型螺型位错，它们互相吸引对消，形成一闭合的位错环和一段 AB 位错线，如图 4-16(e)，在外应力和张应力的共同作用力下（这时它们方向相同），位错线变直。只要外加应力继续作用，位错环便继续向外扩张同时环内的弯曲位错在线张力作用下又被拉直，恢复原始状态并重复以前的运动，这样源源不断地产生新的位错环，直到位错运动阻力与外加应力平衡，从而造成位错的增殖。

理论计算出使 F-R 位错源开动所需的临界切应力为^[120]：

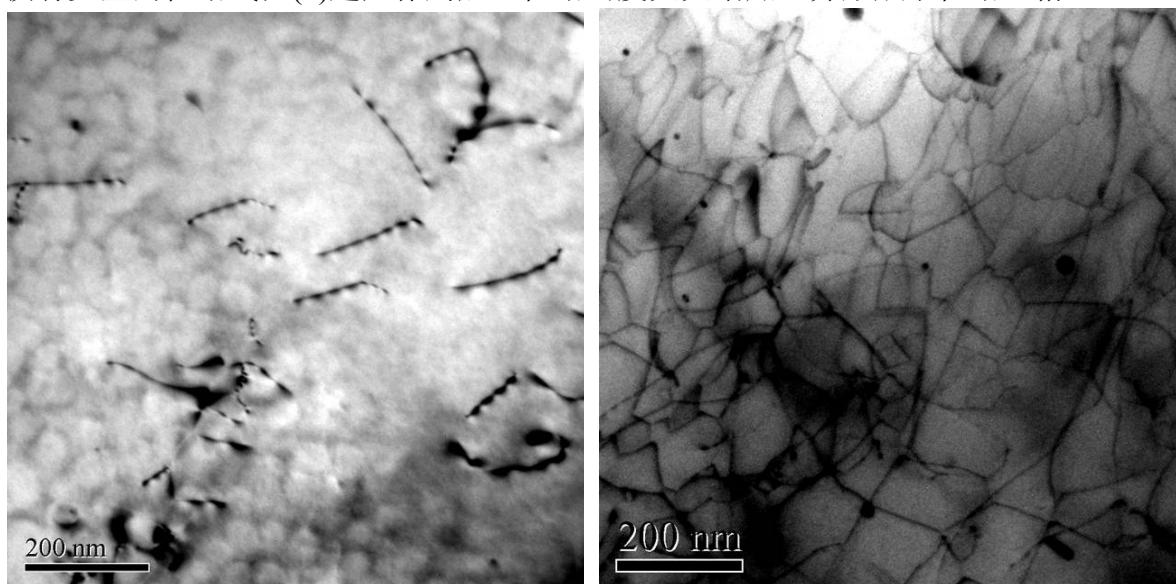
$$\tau = \frac{Gb}{L} \quad (4.5)$$

其中： G 为切变模量， b 为柏氏矢量， L 为 AB 间的距离，即位错线长度。一般 L 的量级为 $10^{-4} cm$, $|b| \approx 10^{-8} cm$ ；因此， $\tau \approx 10^{-4} G$ 。金和银的切变模量小于 300MPa,

理论计算其临界切应力应小于 0.3MPa ；实际上它们的临界分切应力是 0.79MPa 和 0.47MPa 。

由仿真计算中可知，键合区域的切应力可达 $100\sim300\text{Mpa}$ ，远大于金和银的极限切变强度，显然，键合区域的应力足以使金凸点和银焊盘发生位错增殖、位错滑移，产生塑性变形。而位错密度的增加又将减小滑移的临界切分应力^[120]，

经过强烈的塑性变形，位错密度可达到 $10^{10}\sim10^{12}/\text{cm}^2$ ，并形成位错网格^[1201]。用透射电镜(TEM)可观测到超声作用前后铝基板的位错如图 4-17：(a)超声作用前的基板仅有少量的位错线；(b)超声作用后，位错密度大大增加，并形成了位错网格。



(a) 超声作用前的铝基板

(b) 超声作用后的铝基板

图 4-17 铝基板的位错网格(注：本图引自李军辉的研究成果，参见文献[122])

当位错运动到金属表面时将形成台阶（滑移线）^[121]。在扫描电镜 (SEM) 下观察到金凸点表面的滑移线如图 4-18。

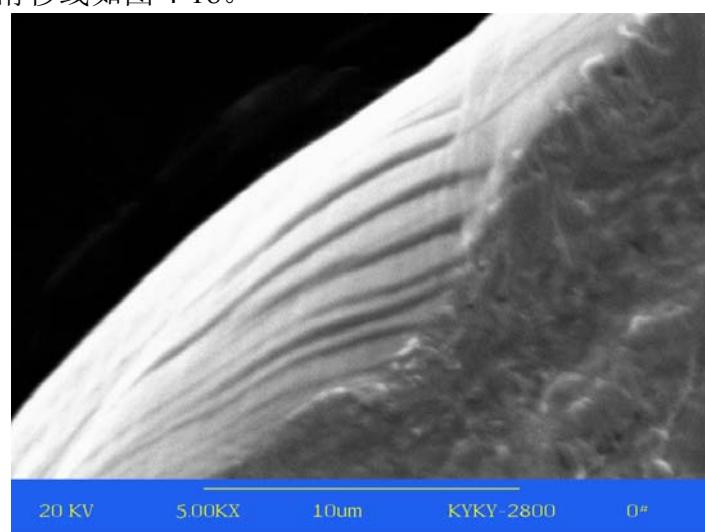


图 4-18 金凸点表面的滑移线

由上述分析可知：在超声和键合力作用下，金凸点/焊盘中的应力是其位错增殖、滑移的动力，是金凸点/焊盘产生塑性流变的主要原因。

应力除了使金凸点/焊盘产生塑性流变外，同时也增加了位错原子的自由能。根据虚功原理，自由能的增加可由位错导致的单位体积的弹性应变能计算^[120]：

$$\frac{W}{V} = \frac{1}{2} \sigma \epsilon \quad (4.6)$$

其中： $\frac{W}{V}$ 是单位体积增加的自由能； σ 是应力； ϵ 是应变；

对于螺位错，有：

$$dW = \frac{1}{2} \tau_{\theta z} \cdot \tau_{\theta z} dV \quad (4.7)$$

其中：L为位错长度；

$$dV = 2\pi r dr \cdot L \quad (4.8)$$

对4.8式积分，可得：

$$\int_0^{\frac{W}{L}} \left(\frac{dW}{L} \right) = \int_{R_0}^R \frac{1}{2} \tau_{\theta z} \cdot \tau_{\theta z} \cdot 2\pi r dr \quad (4.9)$$

其中：R为应力场半径；R₀为位错中心区半径。而：

$$\tau_{\theta z} = \tau_{z\theta} G \gamma_{\theta z} = \frac{Gb}{2\pi r} \quad (4.10)$$

其中：G为切变模量；b为相对位移距离。所以：

$$\int_0^{\frac{W}{L}} \left(\frac{dW}{L} \right) = \int_{R_0}^R \frac{1}{2} \frac{Gb}{2\pi r} \cdot \frac{Gb}{2\pi r} \cdot 2\pi r dr = \int_{R_0}^R \frac{Gb^2}{4\pi r} dr \quad (4.11)$$

即单位长度螺位错的应变能为：

$$W_s = \frac{Gb^2}{4\pi r} \ln\left(\frac{R}{R_0}\right) \quad (4.12)$$

同样可计算出刃位错的应变能为：

$$W_E = \frac{Gb^2}{4\pi(1-\nu)} \ln\left(\frac{R}{R_0}\right) \quad (4.13)$$

其中： ν 为泊松比，一般金属取1/3。所以，总应变能（单位长度位错具有的应变能）为：

$$W_t = W_s + W_E = \frac{W}{L} = \alpha G b^2 (J/m) \quad (4.14)$$

其中： α 是与几何因素相关的系数，一般取值0.54~1.0。因此可估计一个金凸点位错密度增加所需要的能量约为：

$$W = W_t \times V^* \quad (4.15)$$

其中， W_t 是单位长度位错的能量， $V^* \approx \rho \pi r^2 h$ 是金凸点内的位错总长度，其中 ρ 是位错的平均密度。假设： $\alpha=1.0$ ，位错的平均移动距离为 $b=10^{-10} m=1/10 nm$ ，位错的平均密度为 $\rho=1012/cm^2$ ，金的 $G \approx 220 MPa$ ，代入可得：

$$\begin{aligned} W_t &= 2.2 \times 10^{-12} J/m \\ V^* &\approx 10^{12} /cm^2 \times \pi (40 \mu m)^2 \times 30 \mu m = 1.508 \times 10^4 m \end{aligned} \quad (4.16)$$

因此：

$$W = 2.2 \times 10^{-12} J/m \times 1.508 \times 10^4 m \approx 3.3 \times 10^{-8} J \quad (4.17)$$

显然，这样的能量需求非常小，数瓦的输入超声功率足以提供。

(3) 氧化膜的去除机理

在键合力的作用下，键合界面凸出的局部首先接触；在超声和键合力共同作用下，金凸点/焊盘内部产生交变的应力场，导致位错增殖、滑移，使金属发生塑性流变、表面脆性氧化膜破裂；在流变过程中，氧化膜碎片随着材料的流变排出接触界面。

以上仅从位错的增殖、滑移角度分析了氧化膜的去除机理。实际上，氧化膜的去除过程非常复杂，还受到其他缺陷、其他因素（如变形速率等）的影响，尚需更深入的研究。

4.3.2 键合界面原子扩散的机理

原子扩散是固体中物质输送的唯一通道。扩散物质通常沿三种途径扩散，即晶内扩散（体扩散）、晶界扩散和自由表面扩散，后两者称为短路扩散。晶界、表面和位错等对扩散起着快速通道的作用，这是由于晶体缺陷处点阵畸变较大，原子处于较高的能量状态，易于跳跃，故各种缺陷处的扩散激活能均比晶内扩散激活能小，加快了原子的扩散。若以 Q_L, Q_S, Q_B 表示晶内、表面和晶界扩散激活能； D_L, D_S, D_B 分别表示晶内、表面和晶界的扩散系数，则一般规律是： $Q_L > Q_B > Q_S$ ； $D_S > D_B > D_L$ 。一般认为，位错对扩散速率的影响与晶界的作用相当，均有利于原子的扩散^[120]。

上述理论表明：键合界面的裸露原子接触后，首先是表面扩散，形成初始的键合强度；然后，沿着晶界和位错等短路通道往体积方向扩散，形成牢固的键合强度。用 TEM 电镜观察键合界面，可发现金银的互扩散如图 4-19：左边是 Ag 焊盘，右边是金凸点，金的浓度随着坐标增加逐渐降低，银的浓度随坐标减少逐渐降低；金和银在键合界面上互相扩散，形成了牢固的键合（在 300nm 附近是做试样时离子减薄工序所形成的空洞，故金和银的浓度近于 0）。

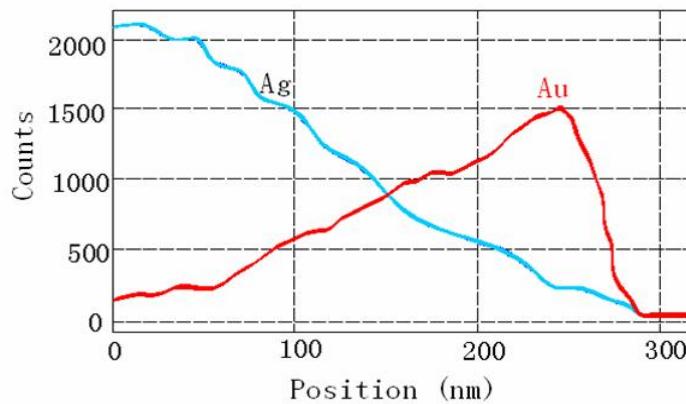


图 4-19 键合界面的金银互扩散(注：本图引自李军辉的研究成果，参见文献[122])

超声和键合力虽然使得键合区域的位错密度增加，为原子扩散提供了短路扩散通道；但是，倒装键合界面的原子要沿着短路扩散通道实现扩散，还需要足够的驱动力，

与扩散的本质、机制等相关。

(1) 扩散的本质

扩散就是当外界提供能量时，固体金属中原子偏离平衡位置的周期性振动，作或长或短距离的跃迁的现象^[120]。

在固态金属中，原子按照一定的规律周期性地重复排列着，其所处的晶格间的位能也周期性规律地变化着。原子的每个平衡位置都对应一个势能谷，在相邻的平衡位置间隔着一个势垒 (Energy barrier)，原子要由一个位置跳到另一个位置，必须穿过中间的势垒，而原子的平均能量总是低于势垒的，所以原子在晶格中要改变位置是非常困难的，必须要有足够的能量，跨越势垒，从原来的平衡位置跃迁到相邻的平衡位置上。原子克服势垒所需要的能量称为激活能(Activition Energy)，它在数值上等于势垒高度。加热是为原子提供激活能的一种途径；此外，在浓度梯度、应力梯度等扩散驱动力的作用下，也可以为原子扩散提供动力，使原子跨越势垒，实现扩散。

(2) 键合界面原子扩散的机制

扩散机制就是原子在晶体点阵中移动的具体方式。已知的扩散机制有：间隙扩散、空位扩散和换位扩散^[118]。在热超声倒装键合的金/银这两种原子大小相当、位错密度大的扩散偶条件下，空位扩散是最有可能的扩散机制。

根据 KirKendall 理论：扩散过程中原子与空位的换位。原子总是由熔点高的材料流向熔点低的材料；在原子流的反方向，存在空洞流，如图 4-20。在热超声倒装键合中，金凸点的原子将流向银焊盘。因此，在键合界面上的金凸点一侧应该出现扩散后空洞——KirKendall 空洞。实际没有在 TEM 中观测到空洞，一是因为金银的质地柔软，在磨样过程中空洞很容易被填平；二是因为键合过程短，扩散的物质总量小，空洞的体积因此也小。但是，键合后的破坏试验中，失效多发生在金凸点，这个实验现象应与金凸点中的空洞、位错等缺陷是有直接关系的。

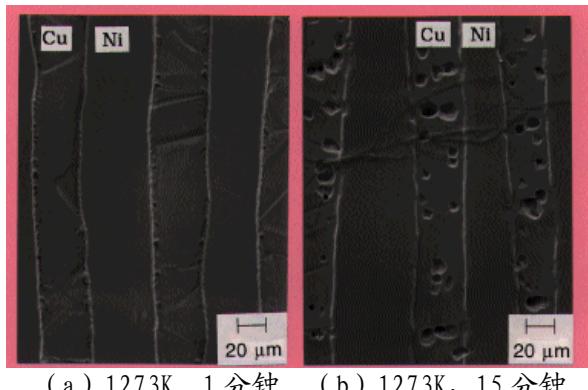


图 4-20 Cu/Ni 扩散时铜中的 KirKendall 空洞

(3) 影响键合界面原子扩散的因素

影响扩散的因素有本征因素和外界因素。前者包括：温度、固溶体类型、晶体结构、晶体缺陷、浓度等。后者则包括：应力场等外场。对于键合界面，固溶体类型、晶体结构是确定的，因此，影响键合界面原子扩散的主要因素有^[118,124-125]：

a) 温度：温度是影响扩散速率的最主要因素，温度越高，原子热激活能量越大，越易发生迁移，扩散系数越大，扩散速率越快。

b) 晶体缺陷：原子在晶体表面、晶面、位错处的扩散速度比原子在晶内扩散的速度要快。由于表面、晶界、位错占的体积份额很小，所以只有在低温时（晶内扩散十分困难）或晶粒非常细小时，短路扩散的作用才作用显著。

c) 浓度：扩散系数与溶质浓度有关，无论是置换固溶体还是间隙固溶体均是如此，扩散系数随浓度而变化。

d) 外场作用：金属中存在的应力梯度，可造成原子扩散（将在下面详细描述）。此外，大的电场也可促使晶体中原子按一定方向扩散。

(4) 键合界面的扩散驱动力

菲克第一定律描述了物质从高浓度向低浓度扩散的现象，扩散的结果导致浓度梯度的减小，使成份趋于均匀。但热力学研究表明：扩散的驱动力并不是浓度梯度，而应是化学势梯度；系统中的任何过程都是沿着吉布斯自由能 G 降低的方向进行。平衡条件是系统中各处的自由能 G 相等，即化学势梯度为 0，扩散过程也不例外。决定组元扩散的基本因素是化学势梯度，不管是上坡扩散还是下坡扩散，其结果总是导致扩散组元化学势梯度的减小，直至化学势梯度为零。

键合界面数百 nm 厚微小区域的吉布斯自由能与成分、温度和应力有关^[120]：

$$dG = VdP - SdT + \sum_i \mu_i dn_i \quad (4.18)$$

其中： VdP 是应力场有关的自由能， $\mu_i dn_i$ 是第种 i 组元在应力场为 0 时所具有的自由能， SdT 是温度场有关的自由能。对于键合界面系统，组元只有金和银；且在键合过程中，可认为金凸点/焊盘各处等温，即 $dT = 0$ 。因此，系统的吉布斯自由能 G 可写为：

$$dG = Vdp + \mu_{Au} dn_{Au} + \mu_{Ag} dn_{Ag} \quad (4.19)$$

因此，系统组元金、组元银的化学势（每摩尔物质的吉布斯自由能）分别为：

$$\mu_{Au} = \frac{dG}{dn_{Au}} = V_{m,Au} dp + \mu_{Au,\Delta p=0} \quad (4.20)$$

$$\mu_{Ag} = \frac{dG}{dn_{Ag}} = V_{m,Ag} dp + \mu_{Ag,\Delta p=0} \quad (4.21)$$

其中： $\mu_{Au,\Delta p=0}, \mu_{Ag,\Delta p=0}$ 是应力场为 0 时组元金、组元银的化学势； V_m 是摩尔体积，单位 mol/m^3 ； $V_m dp$ 是应力梯度对自由能的贡献，称为机械势能。

则键合界面组元金、组元银在垂直键合界面的方向 (y 方向) 所受到的化学力为:

$$F_{Au} = -\frac{\partial \mu_{Au}}{\partial y} \quad (4.22)$$

$$F_{Ag} = -\frac{\partial \mu_{Ag}}{\partial y} \quad (4.23)$$

由扩散方程的普遍形式可以得到金和银原子在垂直键合界面的方向(y 方向)的扩散通量:

$$J_{Au} = -B \frac{\partial \mu_{Au}}{\partial y} \rho_{Au} = -B \rho_{Au} F_{Au} \quad (4.24)$$

$$J_{Ag} = -B \frac{\partial \mu_{Ag}}{\partial y} \rho_{Ag} = -B \rho_{Ag} F_{Ag} \quad (4.25)$$

其中: ρ 是物质浓度, 单位 kg / m^3 ; B 是原子的迁移率; 都与晶体结构有关; F 是组元受到的化学力, 与应力场有关。 J_B 的单位是 $kg / (m^2 \cdot s)$ 。

即: 超声振动和键合力产生的键合界面应力场使键合界面的金、银原子自由能增加, 化学势增加, 受到的外力增加, 越过势垒的几率增加, 也就是扩散的几率增加, 扩散的速度增加。使得键合界面的原子能够在 $160^\circ C$, 数百毫秒的条件下实现 $200\text{-}500\text{nm}$ 的扩散距离, 产生键合强度。

除了应力场增加了化学势外, 位错等其他因素使晶格产生缺陷, 在一定程度上降低了势垒, 使得原子容易越过势垒, 实现原子扩散。实际上, 键合界面的驱动力是一个复杂的物理化学过程, 尚需要进一步的研究。

4.3.4 键合强度的形成机理

在键合力和超声作用下, 金凸点/焊盘中产生高达数百 MPa 的应力, 导致位错的大量增殖, 金凸点和焊盘产生塑性流变, 使接触界面的氧化膜破裂, 并在金凸点/焊盘的塑性流动过程中, 将氧化膜碎片带出接触面, 键合面裸露的金和银原子直接接触, 一方面通过电子云共享形成化学键(金属键), 另一方面形成物理键(范德华力吸附), 形成最初始的键合强度。在反复的应力加载和卸载过程中, 接触面逐步扩大, 位错密度迅速增加; 同时, 键合界面原子在应力作用下, 获得了足够的能量, 越过势垒, 沿着接触界面、晶界和位错等短路通道扩散, 在数百毫秒的时间内由互扩散生成数百纳米厚的原子扩散区域, 形成可靠的键合强度。

4.4 小结

采用有限元方法，研究了键合过程中不同状态下键合界面的应力和应力分布的改变，从应力分布对原子扩散影响的角度揭示了环状界面的形成机理，由 SEM 观察到的键合界面的环状形貌，证实了关于键合强度形成的认识；根据材料物理学理论，讨论了键合界面氧化膜去除、原子扩散的机理，获得了关于键合强度形成机理的初步认识：

- 1) 应力分布表明接触面边缘较其它位置更有利于去除表皮层、更有利于原子扩散形成键合强度，是形成环状界面的重要原因。超声振动的加载过程改变了金凸点/焊盘界面的应力分布，使得应力分布进一步集中在振动位移决定的边缘位置，加速了该区域的原子扩散过程，最终影响键合强度，促进了环状界面的形成。
- 2) 在键合力和超声作用下，金凸点/焊盘中产生高达数百 MPa 的应力，导致位错的大量增殖，使金凸点和焊盘产生塑性流变，使接触界面的脆性氧化膜破裂；金凸点/焊盘在塑性流动过程中，将氧化膜碎片带出接触面，使键合界面裸露的金和银原子直接接触，一方面通过电子云共享形成化学键（金属键），另一方面形成物理键（范德华力吸附），生成最初始的键合强度。在反复的应力加载和卸载过程中，位错密度迅速增加，接触面逐步扩大；同时，键合界面原子在应力作用下，获得了足够的能量，越过势垒，沿着接触界面、晶界和位错等短路通道，在数百毫秒时间内实现互扩散，生成数百纳米厚的原子扩散区域，形成可靠的键合强度。

第五章 热超声倒装键合工艺优化

键合界面的性能包括键合界面强度、导电性能、导热性能、键合界面失效形式等，本文研究的目标是键合强度，它受到众多因素的影响：键合界面材料体系、倒装芯片/基板的表面质量、键合工艺参数、键合装备等。其中，键合工艺参数是影响热超声倒装键合界面性能的最重要因素之一。

本文拟从基本键合实验中，系统提取相关数据，研究超声功率、键合力、键合温度和键合时间对热超声倒装键合界面性能的影响规律，作为前文机理研究的验证。试验中，每种条件下的倒装键合试验至少重复做5次，以获得可重复再现的真实状态和数据，包括：换能器系统的驱动功率信号、倒装芯片的剪切测试力值、金凸点变形率、倒装工具末端/芯片振动过程。最后，根据实验结果及键合机理的研究结论，提出了新的优化键合工艺。

5.1 超声功率对热超声倒装键合的影响

换能器系统的驱动功率是超声功率的表征，倒装芯片的剪切测试力值是键合强度(Shear strength)的表征。研究二者的关系可从一定程度上了解超声功率对热超声倒装键合界面性能的影响。两种数据的采集方法参见第二章相关部分。

5.1.1 超声功率的动态变化特征

热超声倒装实验台超声发生器的驱动电压是恒定的，在不同条件下，换能器系统的输入超声功率表现出不同的特征，本文首先研究了这种超声功率的加载特征。

按前文所述的数据采集方法，将采样频率设为1200kHz，可获得典型超声功率信号如图5-1：键合过程在0ms时刻开启超声，在101.15ms时刻关闭超声，这部分称为超声键合阶段。在这个过程中，超声功率的输入不恒定，键合前期的输入较大；此后有所下降；然后进入相对稳定的阶段，直到键合结束；超声关闭后，由于系统的惯性，超声能量有一个逐渐衰减的过程。研究中取信号的有效平均值作为超声功率的表征。

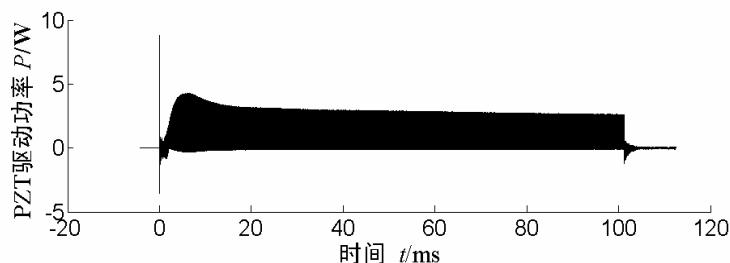


图 5-1 典型键合过程的超声功率信号

热超声倒装键合试验台的超声功率是通过改变超声功率比(设定超声功率与最大可调超声功率比)来实现。实际上就是改变串联在超声输出电路中的可调电阻来改变输出超声功率的电压,从而改变输出超声功率的大小。实验可测得设定超声功率比和实际输入键合系统的超声功率之间的关系如图 5-2:

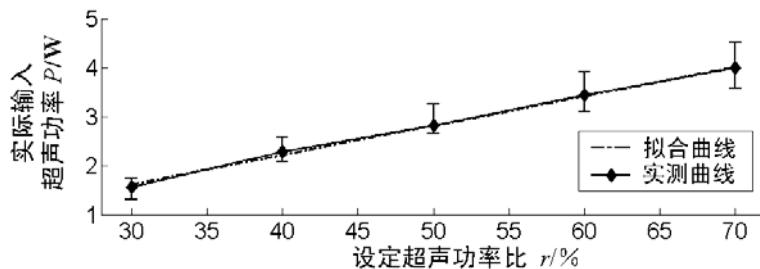


图 5-2 输入键合系统的功率与设定超声功率比的关系

对图 5-2 所示的数据进行拟合, 可得到它们的关系:

$$P = 0.0599r - 0.1773 \quad (5.1)$$

其中 P 是输入键合系统的超声功率, 单位 W , r 是设定超声功率比, 没有单位。

根据这个实验拟合公式, 可确定后续实验中不同设定超声功率比所对应的实际输入键合系统的超声功率。

由图 5-2 还可知: 倒装键合系统的输入超声功率随超声功率比的提高而提高; 输入超声功率的离散程度随超声功率的提高而提高。

由此可知, 热超声倒装键合是一个敏感的过程, 超声功率除受超声功率比这一可控因素影响外, 还受其他随机因素的影响。本文在研究中主要通过重复试验来消除这些随机因素的影响。

5.1.2 超声功率对工具末端和芯片振幅及键合强度的影响

在键合力、温度和时间分别为 240g、163°C 和 100ms 条件下, 进行了 5 组改变超声功率的试验。在试验中观测了倒装键合系统的输入超声功率、工具末端和芯片的振幅变化过程。图 5-3 是测得的典型倒装工具末端和倒装芯片的振动速度变化过程(键合时间为 22.5ms)。

这样的振幅变化过程表明了键合强度的形成过程: 在键合初始阶段(0~7ms), 芯片与工具末端几乎以相同速度运动, 工具/芯片界面没有明显相对运动。此时的超声振动将导致金凸点/焊盘间产生相对运动, 去除接触表面的氧化膜, 暴露出洁净金属表面, 为对偶金属表面进行原子扩散提供条件。在 7ms 前后, 芯片运动速度开始小于工具速度, 本文称之为“速度分离”现象。它表明金凸点/焊盘界面已初步形成键合强度, 使得金凸点/焊盘界面的运动阻力大于工具/芯片界面的摩擦力, 一部分相对运动转移到工具/芯片界面。“速度分离”后, 芯片运动幅值逐渐减小, 最后保持在一个相对稳定值(与具体键合条件有关); 而工具振幅逐渐增大, 最后也达到一个稳定值(与超声功率、

键合压力、工具配置等相关)。这时在工具/芯片间开始产生大幅度相对运动。

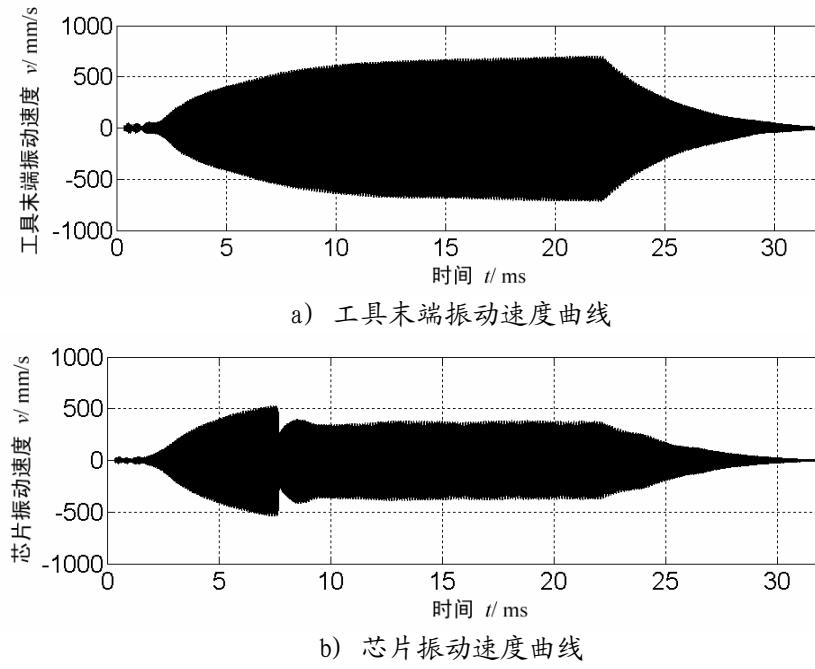


图 5-3 芯片和工具末端振动速度曲线

由于在超声振动在变幅杆、倒装工具以及各种连接界面上的传递过程非常复杂，目前尚没有精确的理论公式可以计算超声功率(激励)和芯片/倒装工具振动(响应)之间的关系。因此，本文通过实验测量了倒装工具和芯片的振幅、实际输入键合系统的超声功率，计算了它们在键合过程中的有效平均值，得到键合系统输入超声功率对振幅的影响规律如图 5-4 和 5-5。

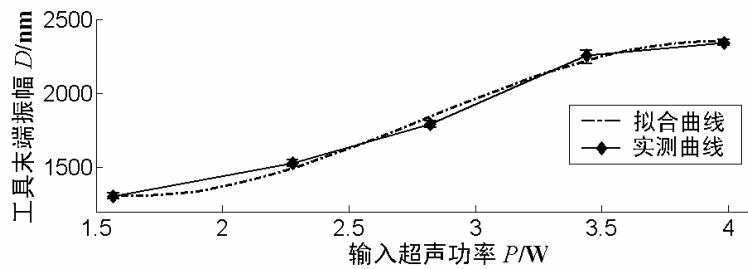


图 5-4 键合系统输入超声功率与工具末端振幅关系

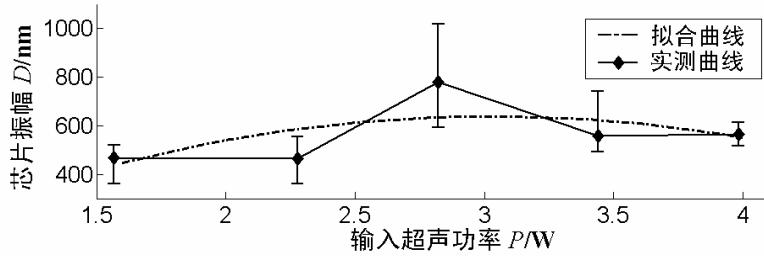


图 5-5 键合系统输入超声功率与芯片振幅关系

对上述实验数据进行拟合，可得到键合系统输入超声功率与工具末端、倒装芯片振幅的关系：

$$D = -174.6P^3 + 1469.7P^2 - 3436.1P + 3760.9 \quad (5.2)$$

其中：D 是工具末端振幅有效平均值，单位 nm；P 是输入超声功率，单位 W。

$$D = -93.1P^2 + 564.4P - 217.4 \quad (5.3)$$

其中: D 是倒装芯片振幅有效平均值, 单位 nm; P 是输入超声功率, 单位 W。

同时, 还测得了键合完毕后倒装芯片的抗剪切力, 获得了超声功率对倒装芯片抗剪切力的影响如图 5-6: 随着输入超声功率的增加, 倒装芯片抗剪切力先增加, 达到最大值后又下降。键合的输入超声功率存在一个区间 (也就是键合窗口), 在这个区间内倒装芯片有较大键合强度。若仅考虑键合强度, 在上述条件下, 这个窗口是 2.3~4W。然而, 当超声功率大于 3W 后, 虽然键合强度在增加, 但倒装芯片的金凸点变形也在增加, 使得相邻的两个金凸点接触在一起, 导致电路短路, 芯片失效; 除此之外, 随着超声功率增加, 键合强度的离散程度也在增加, 特别是在 4W 的条件下, 既有大的键合强度达 150g 以上, 也有过键合导致的键合强度为 0 的情况。因此, 综合考虑各种因素, 此时一般取键合窗口为 2.3~3W。这样的一个键合窗口是非常小的。

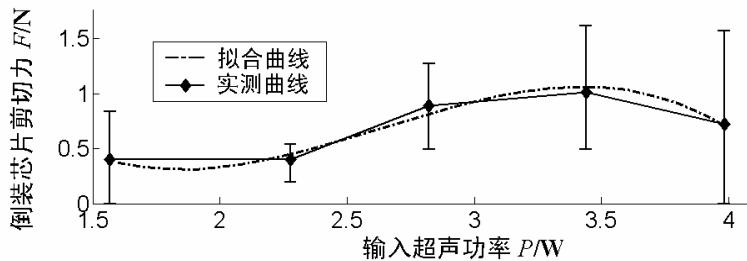


图 5-6 超声功率与倒装芯片抗剪切力的关系

对数据进行拟合后, 可得到式 5-4 所示的关系:

$$F = -0.385P^3 + 3.043P^2 - 7.311P + 5.855 \quad (5.4)$$

其中: F 是倒装芯片抗剪切力, 单位 N; P 是输入超声功率, 单位 W。

由上述的试验数据可知: 1)在较小超声功率情况下 (小于 2.3W), 工具末端振幅较小, 芯片振幅也小, 键合界面未能获得足够能量来形成键合, 因此倒装芯片的键合强度低; 2)随着超声功率增加, 芯片振幅也增加, 键合界面获得的能量增加, 因此键合强度增加; 3)进一步增加超声功率 (大于 3W), 虽然工具末端振幅继续增加, 但芯片振幅反而下降, 键合界面获得的能量也随着下降, 此时输入的超声振动能量部分消耗在工具和芯片间的相对运动及其所致的摩擦上, 并造成芯片和工具的磨损。图 5-7 显示了大超声功率输入条件下, 芯片背面严重的磨损甚至导致了孔洞。

因此, 键合过程中应尽可能消除芯片和工具间的相对运动。提出并实现既能消除芯片和工具间相对运动 (防止芯片表面磨损), 又能避免过多超声能量输入键合界面 (防止金凸点过度变形) 的芯片夹持方式, 是提高倒装键合性能和可靠性的一种途径。

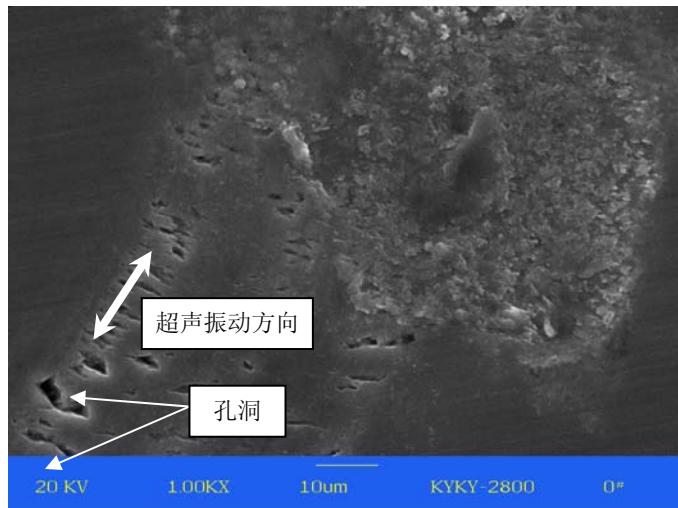


图 5-7 大超声功率输入条件下芯片背面的磨损

5.2 键合力对热超声倒装键合的影响

5.2.1 倒装键合系统中的键合力施加装置原理

热超声倒装键合系统中的键合力施加装置原理如图 2-4，通过控制电磁铁的电流可控制键合力大小。目前工程上难以精确计算电磁铁电流产生的电磁吸力，一般用式 5.5 近似估算^[126-128]：

$$F = 4B^2 \cdot S \cdot 10 \quad (5.5)$$

其中， F 为电磁铁吸力，单位为 N； B 为电磁感应强度，单位为 T； S 为铁芯横截面积，单位为 cm^2 ；

而带铁芯长直螺线管内轴线上任意点磁场强度为：

$$B = \frac{\mu_0 \mu_r n I}{2} (\cos \beta_2 - \cos \beta_1) \quad (5.6)$$

其中， μ_0 为电磁感应常数； μ_r 为介质磁化常数，是一个大于 1 的常数。

另外由欧姆定律可知：

$$I = \frac{U}{R} \quad (5.7)$$

由式 5.5~5.7 可得：

$$F = 10 \cdot (\mu_0 \mu_r n (\cos \beta_2 - \cos \beta_1))^2 \cdot S \cdot \frac{U^2}{R^2} \quad (5.8)$$

对于热超声倒装键合系统来说， $\mu_0, \mu_r, n, \beta_2, \beta_1, S, U$ 都是常数，故式 5.8 可简化为：

$$F = \frac{C}{(R + \Delta R)^2} \quad (5.9)$$

其中 C 为常数。电磁铁吸力（键合力）可通过改变控制电路中的电阻来改变。电阻 ΔR 和力 F 之间是非线性关系，因此，键合力加载是非线性的，这不便于实现精确的键合力加载。而键合力的精确加载对于提高键合强度而言具有重要的意义，这将在

5.7 节的相关部分做进一步说明。

5.2.2 键合力对工具末端和芯片振幅的影响

在键合温度和时间分别为 163°C 和 100ms 条件下，设定超声功率比为 50% ，进行了 5 组改变键合力的试验。

键合力作用在键合界面，改变了界面的约束条件，使得输入键合界面的功率改变、工具末端和芯片平均振幅也改变，但它们之间的影响规律尚无法通过理论公式推导，因此进行了键合力对倒装工具振幅、芯片振幅和输入超声功率影响的实验，结果如图 5-10~5-12：

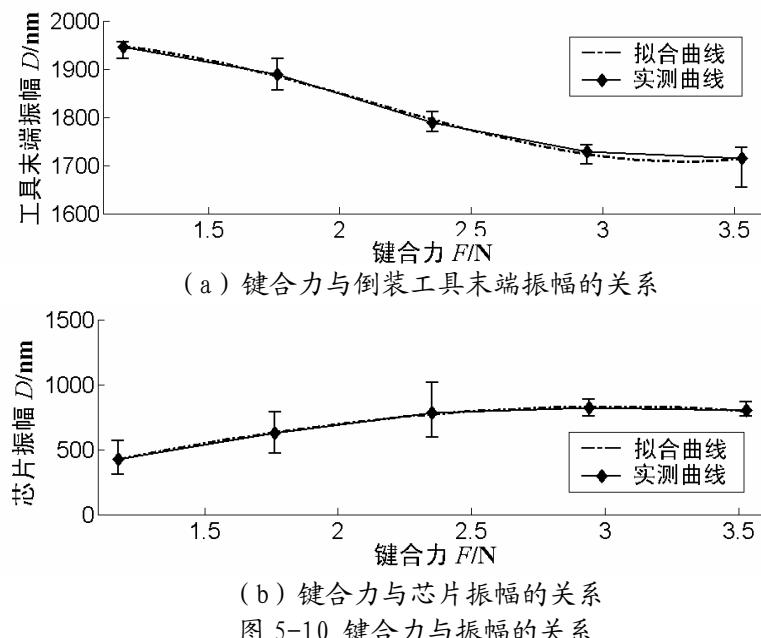


图 5-10 键合力与振幅的关系

对数据进行拟合后，可得到键合力对工具末端、倒装芯片振幅的影响为：

$$D = 36.9F^3 - 234.8F^2 + 341.8F + 1809.5 \quad (5.10)$$

其中： D 是工具末端振幅有效平均值，单位 nm ； F 是键合力，单位 N 。

$$D = -7.68F^3 - 61.0F^2 - 583.6F - 163.7 \quad (5.11)$$

其中： D 是倒装芯片振幅有效平均值，单位 nm ； F 是键合力，单位 N 。

由图可知：随着键合力增加，工具振幅逐渐下降，芯片和工具间的相对运动减小，芯片振幅逐渐增加。即随着键合力的增加，倒装工具和芯片间的相对运动幅度减小，超声在这个界面的传递效率提高了。

同样测得输入功率和倒装芯片键合强度随键合力改变的规律如图 5-11 和图 5-12：

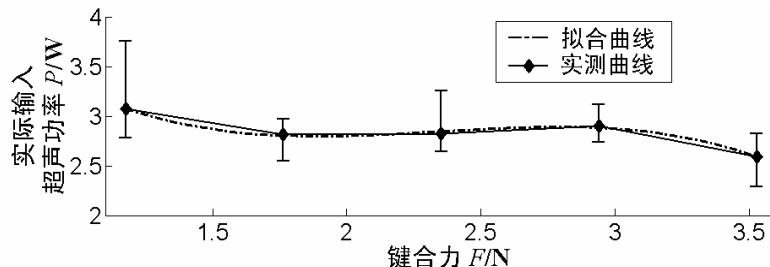


图 5-11 键合力与输入超声功率的关系

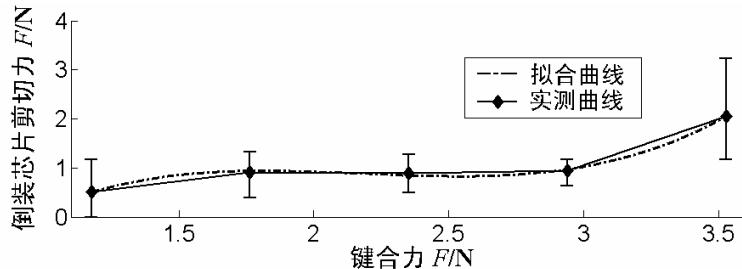


图 5-12 键合力与倒装芯片抗剪切力的关系

对数据进行拟合后, 可得到键合力对输入超声功率、倒装芯片抗剪切力的影响为:

$$P = -0.265F^3 + 1.863F^2 - 4.203F + 5.875 \quad (5.12)$$

其中: P 是倒装键合系统的输入超声功率, 单位 W ; F 是键合力, 单位 N 。

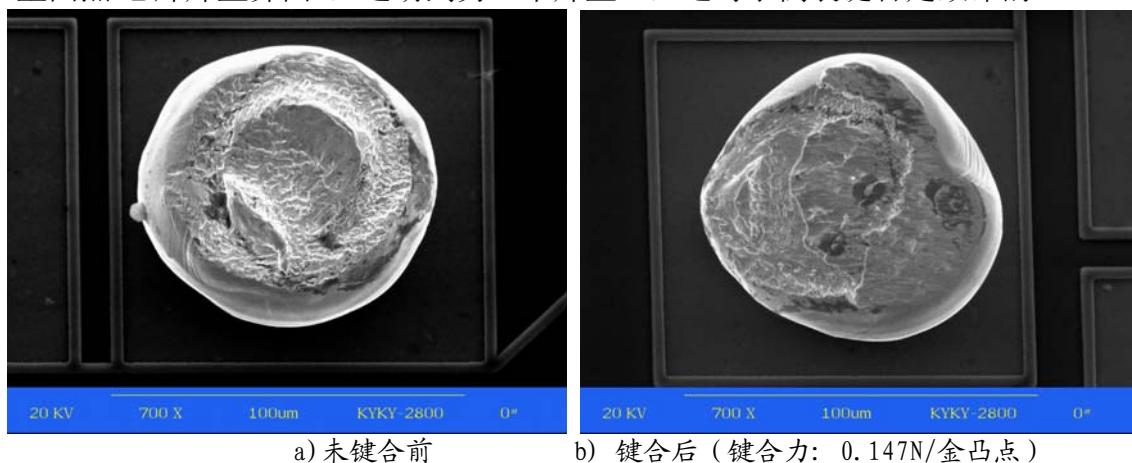
$$F' = 0.613F^3 - 4.015F^2 + 8.518F - 4.954 \quad (5.13)$$

其中: F' 是倒装芯片抗剪切力, 单位 N ; F 是键合力, 单位 N 。

由图可知: 键合系统的输入超声功率随着键合力的增加而下降; 键合强度随键合力增加而增加。当键合力较大时键合系统输入超声功率减小, 而键合强度增加, 因此高强度键合并不需要大超声功率输入。随着键合力的增加, 虽然系统的输入超声功率下降, 但是倒装芯片的键合强度却增加了, 表明大的键合力条件下有利于键合强度的形成。然而, 增大键合力在提高键合强度的同时也增加了金凸点变形, 金凸点的大变形可能导致相邻电路短路。

5.2.3 键合力对倒装界面微观形貌的影响

图 5-13 是不同键合力条件下金凸点的 SEM 照片, 由图可知: 随着键合力的增加, 金凸点的变形加剧。在 0.294N/金凸点的键合力条件下, 金凸点的变形已经超出了焊盘的边界, 有可能使相邻的两个焊盘电路短接; 在 0.441N/金凸点的键合力条件下, 金凸点不仅超出了焊盘的边界, 而且与焊盘产生了相对移动, 破坏了植球形成的界面(金凸点/芯片焊盘界面), 运动到另一个焊盘上, 这对于倒装键合是致命的。



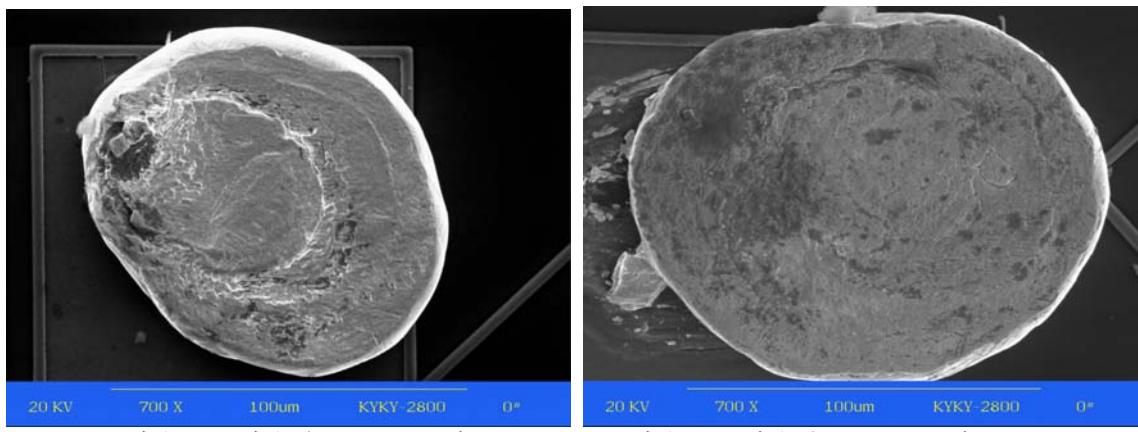


图 5-13 键合力对金凸点形貌的影响

根据键合前和键合后金凸点形貌的变化,获得了金凸点在超声作用下,不同键合力对应的变形率如图 5-14。由图可知:在超声作用下,金凸点的材料特性曲线与常规测量的材料特性曲线不同,在 0.25N/金凸点的键合力条件下(仅相当于 49MPa 的应力),可实现 0.3 的应变,而常规条件下金的屈服极限约为 200MPa,显示了超声对金凸点的软化作用。其本质是:超声导致的应力集中使得金凸点的位错增殖、滑动,使得金凸点流变;宏观上表现为屈服强度下降。

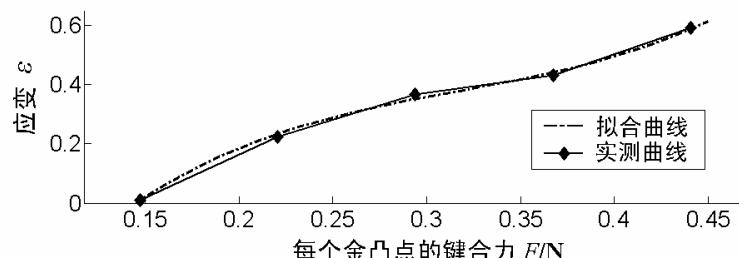


图 5-14 每个金凸点的键合力与应变关系

对数据进行拟合后,可得到:

$$\varepsilon = 34.55F^3 - 32.91F^2 + 11.62F - 1.09 \quad (5.14)$$

其中: ε 是相对变形率,没有单位; F 每个金凸点的平均键合力,单位 N。

由图 5-11 和图 5-14 可知:键合力增加减小了输入功率,但金凸点变形还是继续增加。增大键合力虽可提高键合强度,但也使金凸点塑性变形增加,超出焊盘的范围,这在高密度倒装中是不能接受的。因此,键合力选择要综合考虑两方面的影响,在提高键合强度同时也要使金凸点的变形尽量小。

由图 5-10~图 5-14 可知:键合力的增大导致金凸点塑性变形增加、键合强度增加、工具/芯片界面相对运动减小。

5.3 键合时间对热超声倒装键合的影响

在键合力和温度分别为 2.352N 和 163℃ 条件下,设定超声功率比为 50%,进行了 5 组改变键合时间的试验。

5.3.1 键合时间对工具末端和芯片振幅的影响

测得键合时间对工具末端和芯片平均振幅的影响如图 5-15：1)随着键合时间的增加，工具平均振幅先是下降，然后再增加。整个过程中变化的幅度很小，最大 1982nm 左右，最小也有 1790nm 左右，相对变化仅 9%。2)随着键合时间的增加，倒装芯片的平均振幅则一直增加。当时间为 50ms 时，振幅最小为 600nm，当时间为 250ms 时，振幅达 960nm，相对变化达 37.5%。3)随着键合时间的增加，倒装工具和芯片的振幅差逐渐缩小。

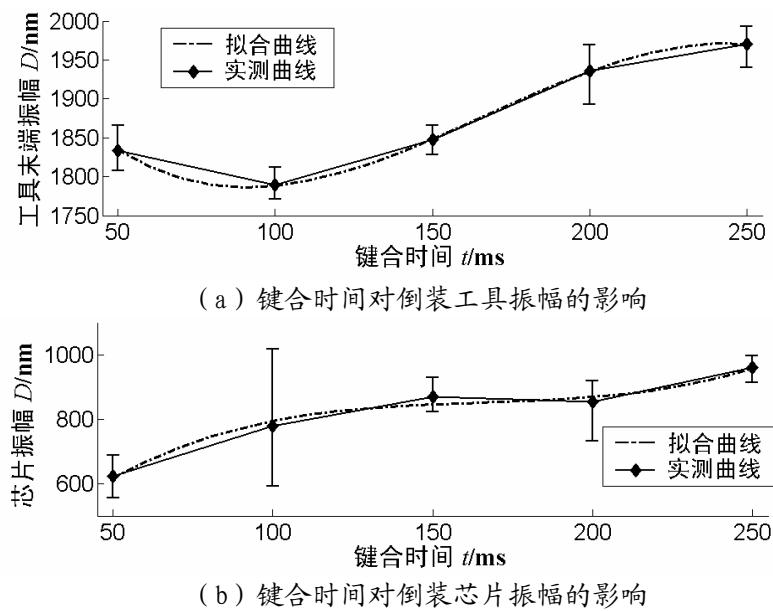


图 5-15 键合时间对工具末端和芯片振幅的影响

对数据进行拟合后，可得到键合时间对工具末端、芯片振幅有效平均值的影响：

$$D = -0.000105t^3 + 0.0527t^2 - 6.986t + 2064.7 \quad (5.15)$$

其中：D 是工具末端的振幅有效平均值，单位 nm；t 是键合时间，单位 ms。

$$D = 0.000126t^3 - 0.0627t^2 + 10.719t + 223.56 \quad (5.16)$$

其中：D 是倒装芯片的振幅有效平均值，单位 nm；t 是键合时间，单位 ms。

5.3.2 键合时间对热超声倒装键合强度的影响

试验测得键合时间对键合系统的输入超声功率的影响如图 5-16：随着键合时间的增加，输入超声功率稍有下降，即长键合时间将导致平均输入功率下降。

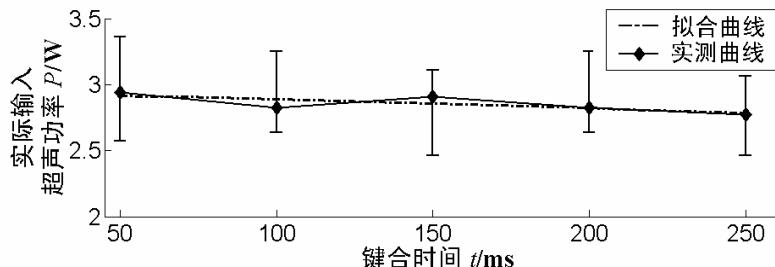


图 5-16 键合时间与倒装键合系统的输入超声功率的关系

对数据进行拟合后，可得到：

$$P = -0.000495t + 2.943 \quad (5.17)$$

其中： P 是倒装键合系统的输入超声功率，单位 W ； t 是键合时间，单位 ms 。

同时，测得了键合时间对键合强度的影响如图 5-17：键合强度先随键合时间增加而增加，达到最大值后又下降。即键合时间也存在键合窗口，在 100~250ms 这个区间内，键合强度具有较大值。

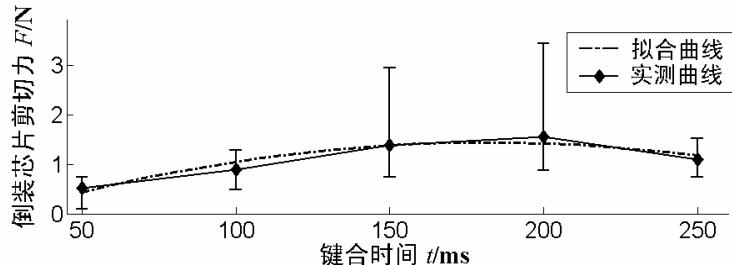


图 5-17 键合时间与键合强度的关系

对数据进行拟合后，可得到：

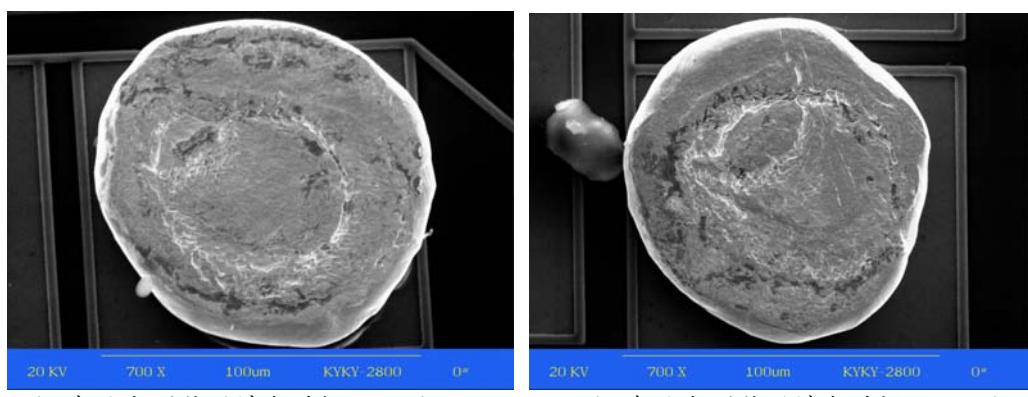
$$F = -0.0000575t^2 + 0.0209t - 0.470 \quad (5.18)$$

其中： F 是倒装芯片抗剪切力，单位 N ； t 是键合时间，单位 ms 。

5.3.3 键合时间对倒装界面微观形貌的影响

图 5-18 是试验获得的不同键合力条件下金凸点的 SEM 照片，由图可知：随着键合时间的增加，金凸点的变形加剧。当键合时间为 50ms 和 100ms 时，金凸点的变形比较小，基本没有超出焊盘的范围；当键合时间为 150ms 和 200ms 时，金凸点的变形超出了焊盘的范围，特别是在 200ms 情况下，金凸点在变形后将相邻焊盘挤破，这将导致相邻两个焊盘的电路短接；而当键合时间为 250ms 时，金凸点不仅超出了焊盘的边界，而且还破坏了植球界面，离开原来的焊盘运动到另一个焊盘上。

结合超声功率对键合强度的影响试验可知：键合强度不仅与超声功率有关，而且与键合时间有关，实际是与输入的超声能量总量有关。过小和过大的超声能量都不能形成好的键合强度，只有恰当的超声能量输入，才能在提供足够的超声能量产生位错增殖、原子扩散，形成键合强度的同时，不导致过大的金凸点流变。系统存在一个能量输入窗口；控制超声能量的输入过程和输入总量，是控制键合强度的一个重要方面。



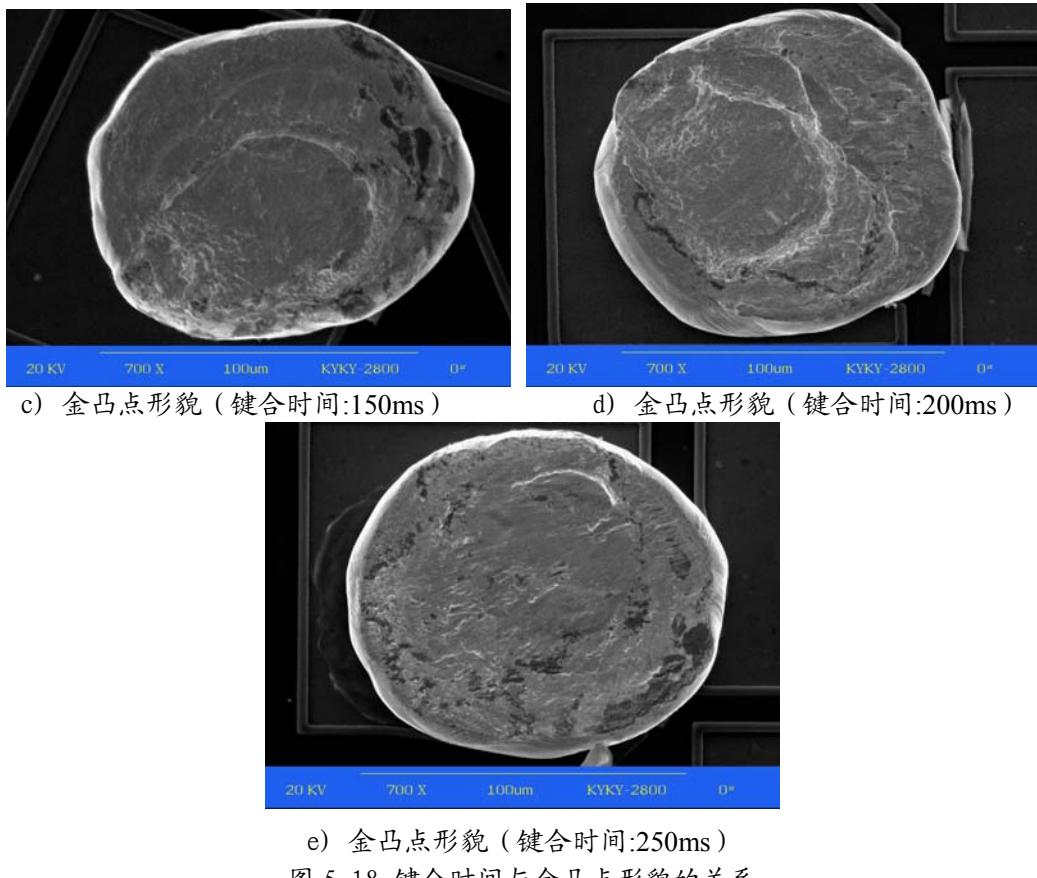


图 5-18 键合时间与金凸点形貌的关系

5.4 超声作用下金凸点的变形测量

SEM 照片表明金凸点在超声、键合力和温度的作用下发生了塑性变形，变形的过程有助于理解键合参数对键合强度的影响，但金凸点的变形过程难以直接观测。本文通过观测键合后金凸点的变形结果和键合前的金凸点形貌，获得了在特定超声功率、键合力和温度条件下，金凸点的相对变形率，了解了金凸点的变形规律。

5.4.1 金凸点变形率的测量

金凸点在键合前后的形状如图 5-13。由图可知：在超声功率、键合力和温度的作用下，金凸点发生了塑性变形。由于键合力、超声功率已在试验中测得，因此，若能够测得金凸点键合后的变形率，就可确定超声作用下的金凸点应力--变形率关系。

而变形率可通过测量金凸点表面积变化来估计。在有限变形条件下，可认为金凸点的体积恒定，因此：

$$V = S_1 \times h_1 = S_2 \times h_2 \quad (5.19)$$

其中， S_1, S_2 是键合前和键合后金凸点的表面积； h_1, h_2 是键合前后金凸点的高度。由变形率的定义可知：

$$\varepsilon = - \int_{h_1}^{h_2} \frac{dh}{h_1} = \frac{h_1 - h_2}{h_1} \quad (5.20)$$

将 5.19 代入 5.20 可得：

$$\varepsilon = \frac{\frac{V}{S_1} - \frac{V}{S_2}}{\frac{V}{S_1}} = \frac{S_2 - S_1}{S_2} \quad (5.21)$$

因此，通过测量金凸点在键合前后的表面积就可以估计其变形率；而金凸点的应力可通过测量键合力确定。这样就可获得超声作用下的金凸点的应力-变形率关系。

金凸点表面积的测量可通过多种方法实现，本文采用 AutoCAD 软件来实现。以如图 5-19 所示的金凸点为例，测量过程为：

1) 将金凸点的 SEM 照片导入 AutoCAD，导入时缩小放比例为 1:100，这样可看见金凸点的细节，提高测量精度。

2) 然后测量 100μm 的标尺在 AutoCAD 中的长度，测量结果为 100mm；将标尺实际长度记为 $D_{true} = 100\mu m$ ；测量长度记为 $D_{measure} = 100mm$ ，则可获得放大因子 S 为：

$$S = \frac{D_{measure}}{D_{true}} = 1000 \quad (5.22)$$

3) 用样条曲线沿着金凸点边界绘制一个闭合曲线圈，并测量圈的面积，获得 AutoCAD 中的金凸点的测量面积： $A_{measure} = 5653.6462mm^2$ ；根据放大因子，可计算出金凸点的实际面积为：

$$A_{true} = \frac{A_{measure}}{S^2} = 5653.6462\mu m^2 \quad (5.23)$$

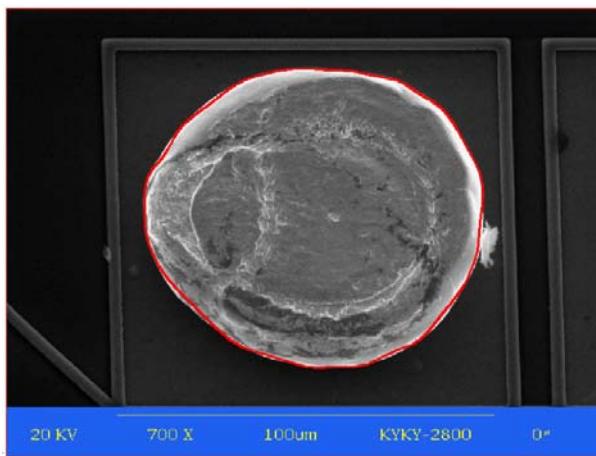


图 5-19 将 SEM 照片导入 CAD 中

这样的测量误差源于：样条曲线并不完全与金凸点边界重合。但是这样的误差与金凸点面积相比，显然足够小。

同样可测量键合前金凸点的面积，代入 5.21 式，可获得在这种条件下金凸点的变形率，再根据试验测得的键合力大小，计算出金凸点的应力，就获得了超声作用下金凸点的应力-变形率关系。

5.4.2 金凸点在超声作用下的相对变形规律

对一系列的热超声倒装键合试验，按照上述方法测量，获得的部分数据如表 5-2。根据测量的数据，计算出不同键合力条件下的平均应变，可得到如图 5-20 所示的金凸点变形率：

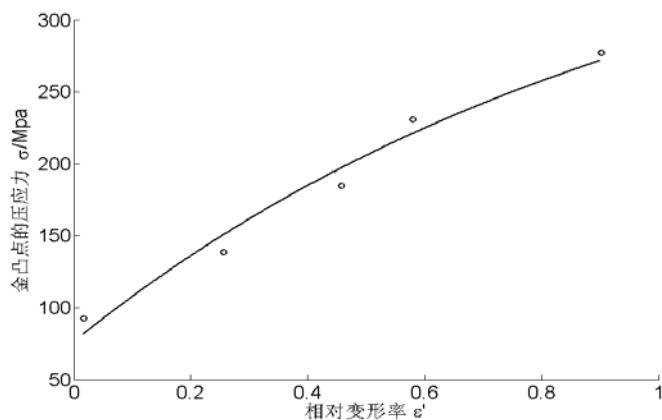


图 5-20 不同键合力条件下金凸点的变形率

由材料力学数据可知，在 200℃ 条件下，金的屈服极限是 238MPa，而上述的试验数据表明，金凸点在 90MPa 左右就可产生塑性变形。因此，超声降低了金凸点的屈服极限，使得金凸点易于变形，其本质是超声使得位错密度增加、位错滑移，使得金凸点产生塑性流变。在文献[129-135]中，也发现了超声作用后，材料的位错密度增加现象。

表 5-2 键合前后金凸点的面积

键合条件	金凸点编号	实测金凸点面积 (μm^2)
键合前	C9	5197
	C8	4904
	C7	5445
	C6	5185
	C2	5084
	C4	5119
	C5	5522
.....
键合后 (键合力 37.5g/金凸 点)	C8	9380
	C2	10731
	C6	8243
	C5	8937
	C3	10810
	C7	8568

注：键合条件为：键合时间 100ms，超声功率比设置为 50%，键合温度为 163°C。

5.5 热超声倒装键合的典型失效形式

合格的热超声倒装键合界面形貌如图 5-21：金凸点的变形没有超出焊盘范围；金凸点中也没有裂纹；金凸点与基板焊盘形成了良好的键合强度，同时也没有破坏与硅片焊盘的键合。除此之外都可称为失效^[30,136~143]。

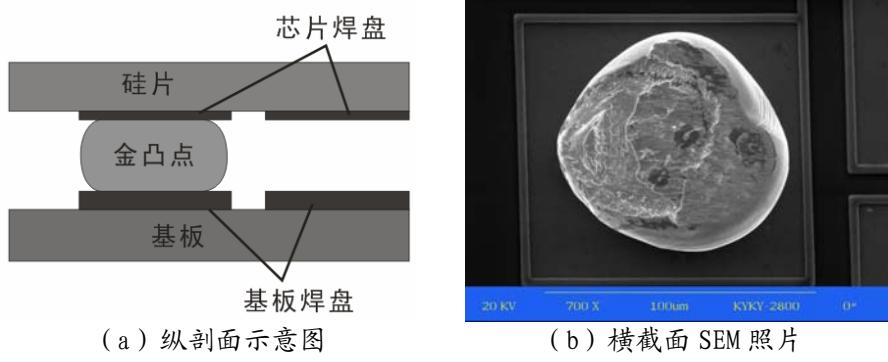


图 5-21 合格的热超声倒装键合界面形貌

在键合试验中观测到热超声倒装键合的几种失效形式主要有：金凸点变形太大、金凸点中产生裂纹、芯片表面磨损、芯片焊盘破碎和键合强度低。它们发生在不同的键合条件下。

5.5.1 金凸点的两种典型失效形式

在大键合力或大超声功率（超声功率超过 3W，键合力超过 3N）条件下，金凸点容易失效，典型的失效有：1)金凸点变形过大。键合完成后金凸点超出了焊盘的边界，使得相邻的两个芯片 I/O 连接在一起，导致电路短路。如图 5-22；2)金凸点中产生裂纹。在键合过程中，高频、长时间的超声振动使金凸点疲劳、产生裂纹甚至破裂。一方面降低了金凸点的强度导致其成为键合区域的薄弱环节；另一方面，金凸点破裂产生的碎片污染了倒装键合界面，导致潜在的可靠性问题。如图 5-23。

因此，在键合强度形成过程中，在形成足够键合强度的条件下，应避免采用大键合力和超声功率，以避免金凸点变形过大或产生裂纹。

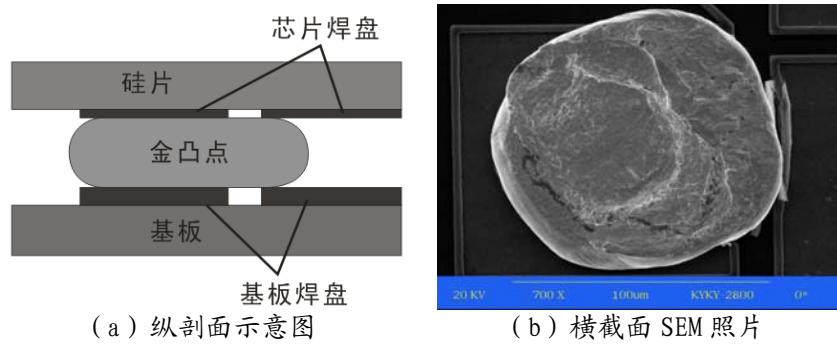


图 5-22 金凸点变形过大时的键合界面形貌

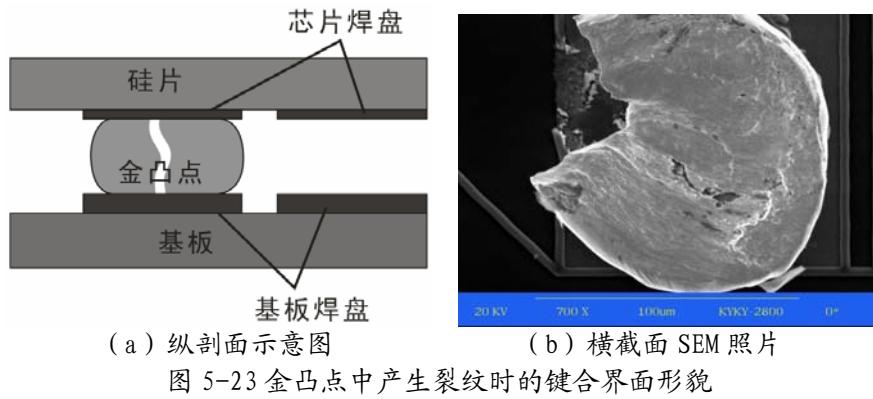
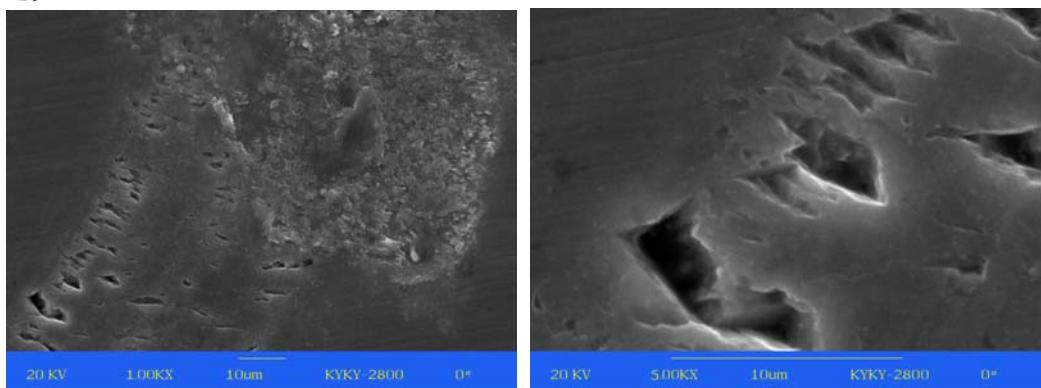


图 5-23 金凸点中产生裂纹时的键合界面形貌

5.5.2 芯片表面磨损

芯片表面磨损包含两种情形：一是芯片表面出现摩擦条纹。由于倒装工具和芯片之间有相对运动，且表面都比较粗糙；同时倒装工具硬度比芯片硬度大（工具和芯片的材料分别是钨钢和硅），使得倒装芯片表面产生沿着振动方向的摩擦条纹，如图 5-24(a)。一般在超声功率为 2.5~3W 和键合力在 3N 以上条件下，可观察到这样的失效。

二是芯片表面出现凹坑，甚至是芯片破碎，这是严重的失效，如图 5-24(b)。凹坑的长轴垂直于倒装工具的振动方向。这样的失效形式在超声功率比较大（3W 以上），而键合力比较小（2N 以下）的情形下。在实际生产中可以通过降低键合力和超声功率来避免。



(a) 芯片表面出现摩擦条纹 (b) 芯片表面的凹坑

图 5-24 芯片表面磨损

芯片表面磨损对于倒装键合是致命的。一方面，芯片表面出现大量摩擦痕，实际也给硅片内部带来一定的影响，导致晶体结构发生改变，从而改变电路的性能；另一方面，破碎的硅片将污染基板、倒装工具表面，给后续的倒装键合带来不利的影响。

芯片表面的磨损是由倒装工具和芯片的相对运动造成的。因此，应在“速度分离”后应降低超声输入的振幅，避免工具和芯片的相对运动。

5.5.3 芯片焊盘破碎

芯片焊盘破碎是另一种常见的失效，往往伴随着金凸点严重变形。键合前金凸点

植在芯片焊盘上，键合过程中超声再次作用在植球界面，过大的超声振幅将破坏原有的键合强度。破坏可发生在焊盘表面（如图 5-25）；也可发生在硅基板（如图 5-26）。

这样的失效不仅使基板或芯片报废，而且碎片污染键合台环境。其产生原因与倒装芯片/工具的相对运动有关：键合过程中，金凸点/焊盘界面的键合强度生成后，继续输入的超声振动造成芯片焊盘或硅片产生裂纹、破坏。

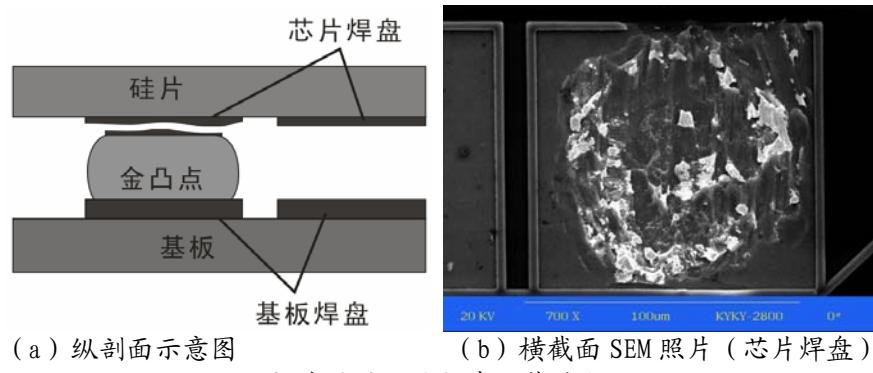


图 5-25 焊盘破碎的热超声倒装键合界面形貌

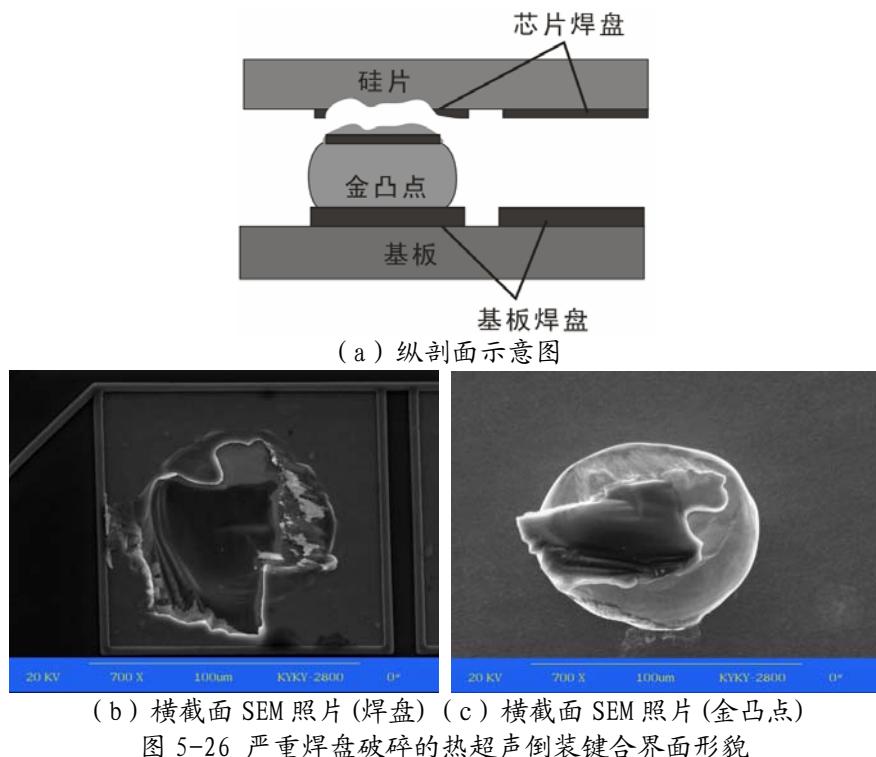


图 5-26 严重焊盘破碎的热超声倒装键合界面形貌

5.5.4 键合界面键合强度低

最常见的失效是键合界面键合强度低，原因多是键合参数不匹配、超声功率太小、键合力太小等，使得金凸点和基板焊盘间没有形成键合或键合强度不够，如图 5-27：

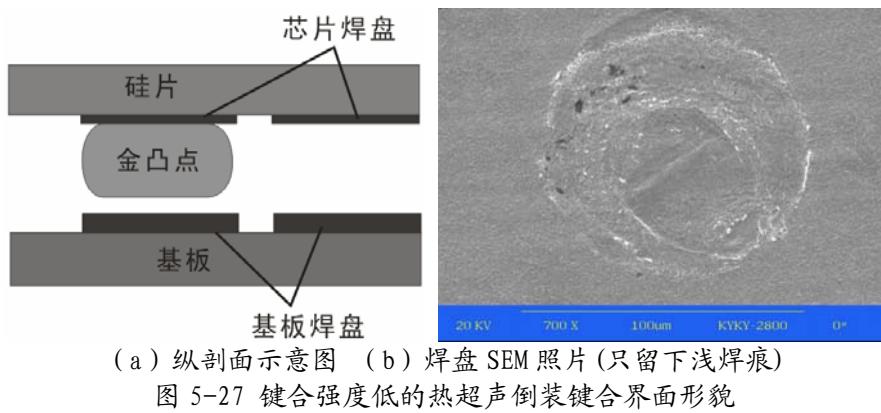


图 5-27 键合强度低的热超声倒装键合界面形貌

5.5.5 键合界面失效的多种内涵

1) 键合界面失效可能发生在不同的位置，因此键合强度的概念不仅是金凸点/基板焊盘界面，还应包括其他界面以及组成界面的基体（硅芯片、焊盘等）。键合强度涉及各种强度，主要包含：芯片焊盘强度、芯片焊盘和金凸点的键合强度、金凸点的强度、金凸点和基板焊盘的强度以及基板焊盘的强度。即“键合强度”应是芯片焊盘/金凸点/基板焊盘整个键合区域的强度，而不仅是金凸点/基板焊盘界面的强度。

2) 键合区域的失效形式、失效原因多样。任一种失效都将导致倒装键合失败，因此在确定键合参数时，应综合考虑各种情况，在确保形成金凸点/基板焊盘界面的高键合强度同时，避免上述各种失效。这需要提出新的键合工艺。

5.6 新型热超声倒装键合工艺的提出

影响键合强度和可靠性的因素是多方面的，除了键合力、超声功率和键合时间外，还有键合力与超声功率的加载过程。日本的 Tomioka 等人做了关于在键合过程中改变键合力的研究^[29]，在本文的绪论中有详细的介绍。但他们的研究仅是试验性的探索，没有深入研究改变键合力加载过程对键合强度生成过程带来的影响。他们的试验表明改变键合力的加载过程确实有利于提高键合强度。

实际上，试验中芯片的振动位移反映出：键合过程以“速度分离”为界，相对分为两个阶段；“速度分离”前后键合界面振动特性不一样。“速度分离”前后芯片振动位移的细节如图 5-28：在“速度分离”前，芯片与工具一起振动，金凸点和焊盘间的相对运动有利于去除键合界面氧化膜，为原子扩散提供必要条件；“速度分离”后，键合界面有初始键合强度，并限制金凸点运动，一方面使工具/芯片界面相对滑动，另一方面使金凸点的弹塑性变形增加。

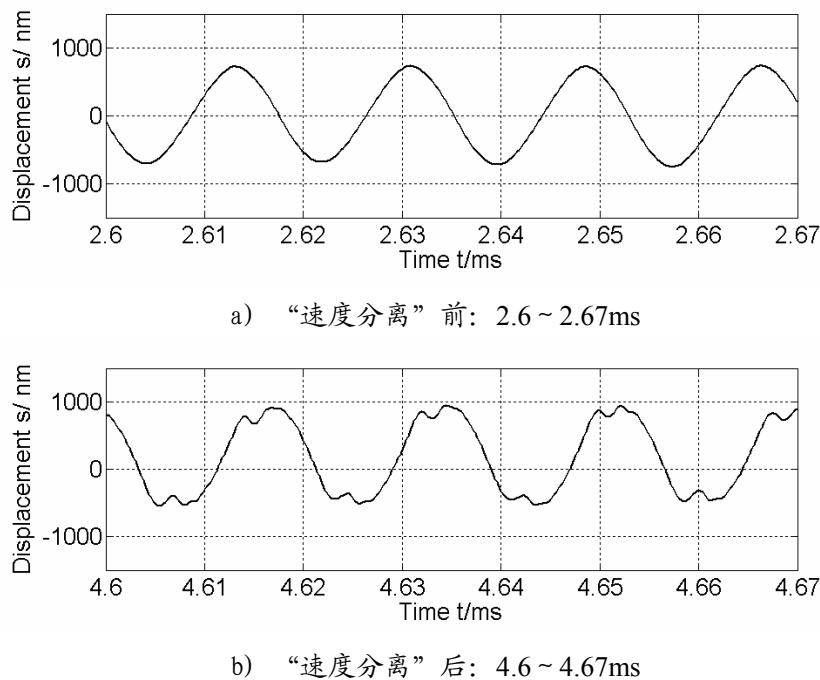


图 5-28 “速度分离”前后芯片振动位移细节

芯片运动曲线的频谱及键合界面的应力分析表明：“速度分离”前小键合力和大超声功率有利于氧化膜的去除和初始键合强度的生成；“速度分离”后，若采用小功率可避免工具/芯片间的相对运动，若增大超声功率和键合力，则可提供大应力场梯度，加速金凸点和焊盘的原子互扩散，但同时会加大金凸点的变形、导致金凸点和焊盘产生疲劳，降低键合强度。

综上所述，本文提出了新的键合参数加载方法——阶梯式键合参数加载：在“速度分离”前，施加大超声功率和小键合力；在“速度分离”后，施加大键合力和小超声功率。通过控制键合参数（键合力和超声功率）来控制“粘-滑”过程，延长应力集中的时间，减小金凸点的疲劳，减少工具/芯片界面的摩擦能耗和损害，增加键合强度和键合可靠性。

5.7 阶梯式键合参数加载过程对倒装键合强度的影响

5.7.1 阶梯式键合力加载试验

所谓阶梯式键合力加载，是指键合力在键合过程中有一个阶梯变化的过程，如图 5-31 和 5-32 所示。键合力控制是键合装备研究的一个难点，本文的实验设备难以直接实现阶梯式键合力加载过程，因此改用了等效方法实现，即把键合过程分为两次键合：第一次键合设定一种键合力，键合完后，此时的键合强度还是很低；然后再次设定键合力，进行第二次键合。改变不同的键合力组合就可实现不同的阶梯式键合力加载过程。期间其他键合参数保持不变。

1) 恒定键合力加载过程试验

为了对比变参数和恒定参数过程对键合强度、键合可靠性和键合界面性能等的影响，首先进行了恒定键合力加载过程试验，键合力加载过程如图 5-29。

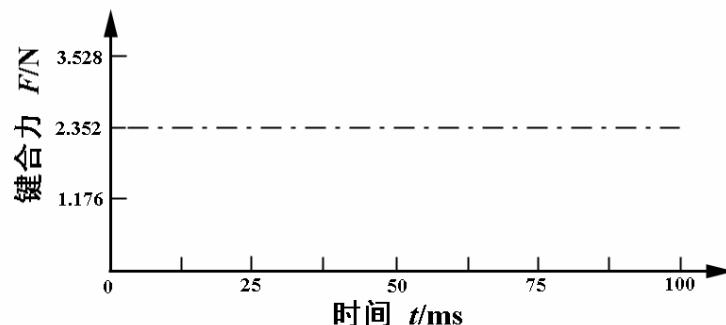


图 5-29 恒定键合力加载过程

键合设备和条件与前几章的研究相同，键合参数设置：键合温度 163℃，键合时间 100ms、键合力 240g、键合功率设定为 50%（约 2.1W，具体值与键合试验有关），进行了 10 次键合试验，结果如表 5-3：

表 5-3 恒定键合力加载过程试验

试验序号	芯片抗剪切强度(N)
chip1	1.96
chip2	0.49
chip3	0.34
chip4	0.53
chip5	1.76
chip6	0.73
chip7	0.63
chip8	0.19
chip9	0.68
chip10	0.58
平均抗剪切强度	0.79

由数据可知：在恒定键合力加载条件下，芯片抗剪切强度偏低、可靠性较差、强度测试值分散，与 5.2 节的试验结果一致。

同时，还观测了键合后金凸点的变形，如图 5-30：尽管键合力和超声功率都比较小、键合时间也短，但金凸点的变形还是比较大，超出了焊盘的范围。

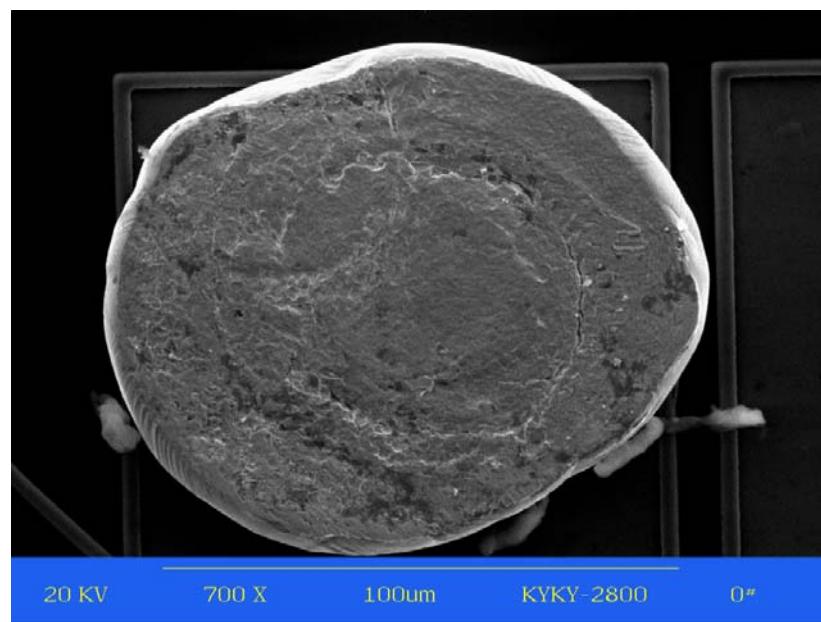


图 5-30 恒定键合力加载条件下的金凸点变形

2) 阶梯式键合力加载过程

本文试验了两种阶梯式键合力加载方法：1)在开始的 25ms 施加小键合力、接下来的 75ms 施加大键合力，如图 5-31；2)在开始的 25ms 施加大键合力、在接下来的 75ms 施加小键合力，如图 5-32。键合过程中还是采用相同的芯片，键合参数的设定同上。

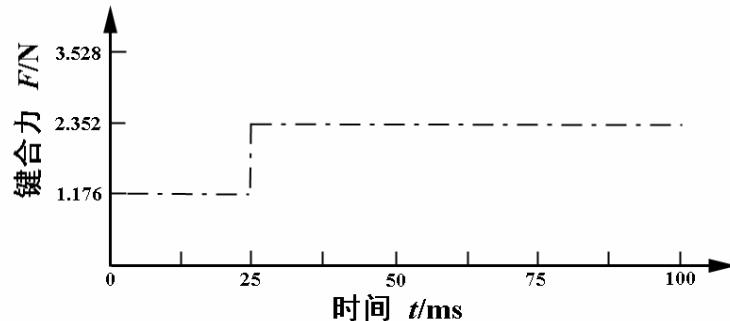


图 5-31 由小键合力向大键合力变化的加载

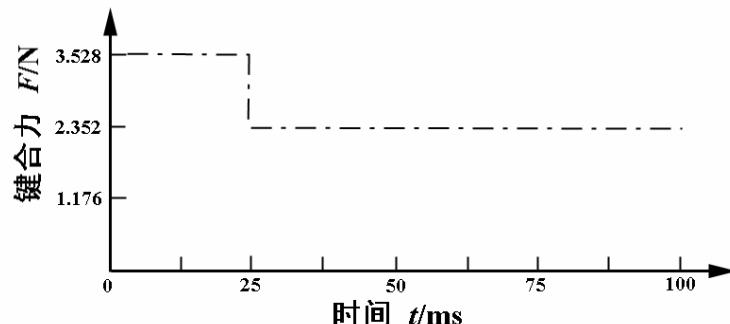


图 5-32 由大键合力向小键合力变化的加载

第一种键合力加载方法进行了 10 次键合试验，结果如表 5-4：

表 5-4 由小键合力向大键合力变化的加载过程试验

试验序号	芯片抗剪切强度(N)
chip1	1.37
chip2	1.08

chip3	1.27
chip4	1.17
chip5	1.17
chip6	1.32
chip7	1.23
chip8	1.17
chip9	1.37
chip10	1.23
平均抗剪切强度	1.24

由数据可知：由小键合力向大键合力变化的加载过程，可明显提高键合强度（比恒定参数过程提高了 57%），且倒装芯片的键合可靠性较好、强度测试值分散度小。表明“速度分离”前的小键合力有利于键合界面氧化膜去除；“速度分离”后的大键合力有利于界面间的原子扩散。

同时观测了键合后凸点的变形情况，如图 5-33：金凸点的变形比较小，同时键合强度也比较大。

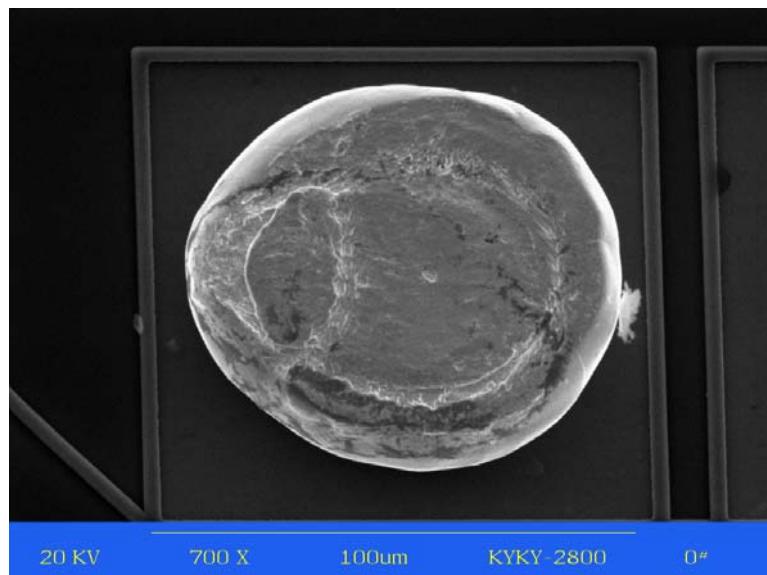


图 5-33 由小键合力向大键合力变化加载条件下的金凸点变形

第 2 种阶梯式键合力加载键合试验进行了 15 次，其结果如表 5-5：

表 5-5 由大键合力向小键合力变化的加载过程试验

试验序号	芯片抗剪切强度(N)
chip1	0
chip2	0
chip3	0
chip4	0
chip5	0

chip6	0
chip7	0
chip8	0
chip9	0
chip10	0
chip11	0
chip12	0
chip13	0
chip14	0
chip15	0
平均抗剪切强度	0

由试验可知：采用大键合力向小键合力变化的加载过程，所有的倒装芯片抗剪切强度都是 0。同时，还观测了键合后凸点的变形情况，如图 5-34 所示：金凸点的变形比较大，而且在超声振动的方向产生的变形比垂直超声振动方向的变形大。这是非常糟糕的结果。其原因是：键合初期的键合力大，妨碍了键合面金凸点和焊盘之间的相对运动，减小了表面摩擦，使得后续的原子扩散条件不充分；同时，大键合力也加大了金凸点的变形。

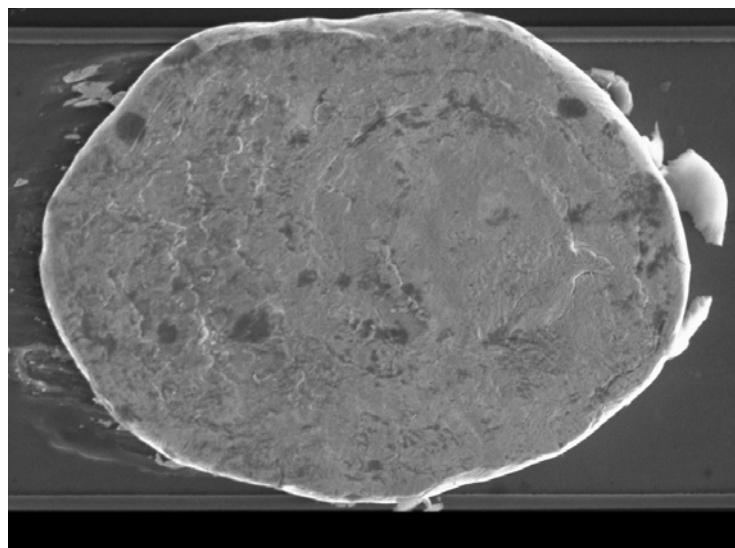


图 5-34 大键合力向小键合力变化加载条件下的金凸点变形

5.7.2 阶梯式超声功率加载

超声功率加载有缓慢的稳定过程，实现连续的超声功率实时控制是键合装备研究的另一个难点。本文采用了与键合力加载类似的等效方法，来实现阶梯式超声功率加载过程：把键合过程分为两次键合，第一次设定一次超声功率，键合完后，此时的键合强度还是很低；然后再次设定超声功率，进行第二次键合。改变不同的超声功率组

合就可实现不同的阶梯式超声加载过程。键合期间其他键合参数保持不变。

1) 恒定超声功率加载过程试验

为了对比实验结果，先进行了恒定超声功率加载过程试验，功率加载如图 5-35。

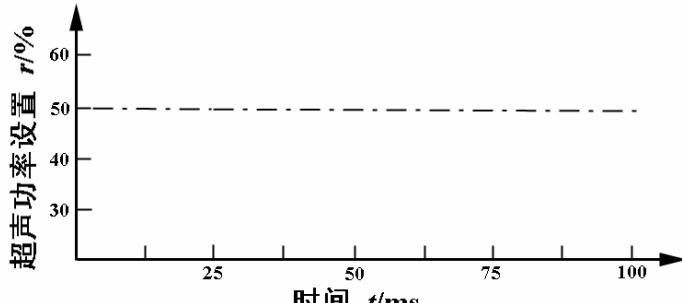


图 5-35 恒定超声功率加载过程

键合过程中采用的芯片同上述研究，键合参数为：键合温度 163℃，键合时间 100ms、键合力 240g、键合功率设定为 50%（大约 2.1W），进行了多次键合试验，结果参见 5.1 节相关部分。

2) 阶梯式超声功率加载过程

本文试验了两种阶梯式超声功率加载方法：1) 在开始的 25ms 施加大超声功率、在接下来的 75ms 施加小超声功率，如图 5-36；2) 在开始的 25ms 施加中等超声功率、在接下来的 75ms 施加小超声功率，如图 5-37。键合过程中键合力的加载过程采用图 5-39 的“由小键合力向大键合力变化的加载”。键合过程中采用相同的芯片，键合参数设置同前文研究。

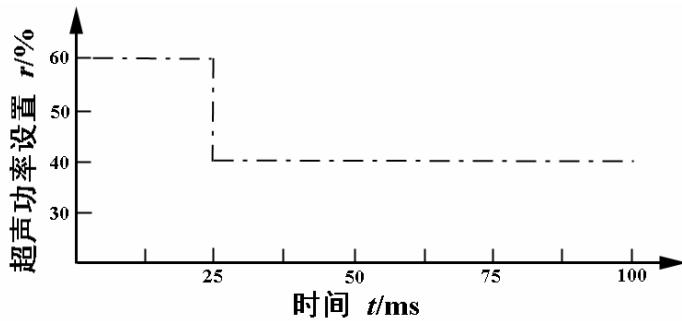


图 5-36 由大超声功率向小超声功率变化的加载

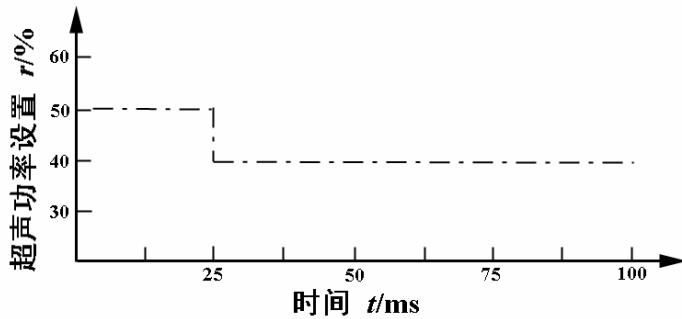


图 5-37 由中超声功率向小超声功率变化的加载

第一种超声功率加载进行了 10 次键合试验，结果如表 5-6：

表 5-6 由大超声功率向小超声功率变化的加载试验

试验序号	芯片抗剪切强度(N)
chip1	0.93
chip2	1.23
chip3	1.03
chip4	0.98
chip5	1.08
chip6	1.13
chip7	0.88
chip8	1.03
chip9	1.17
chip10	1.23
平均抗剪切强度	1.07

由试验可知：由大超声功率向小超声功率变化的加载过程，比恒定参数加载过程，的键合强度高，且倒装芯片的键合可靠性较好、强度测试值分散度小。但比仅变化键合力过程，其平均键合强度反而有所下降。

同时，观测了键合后凸点的变形情况，如图 5-38：在这种超声功率加载模式下，金凸点的变形比较小。

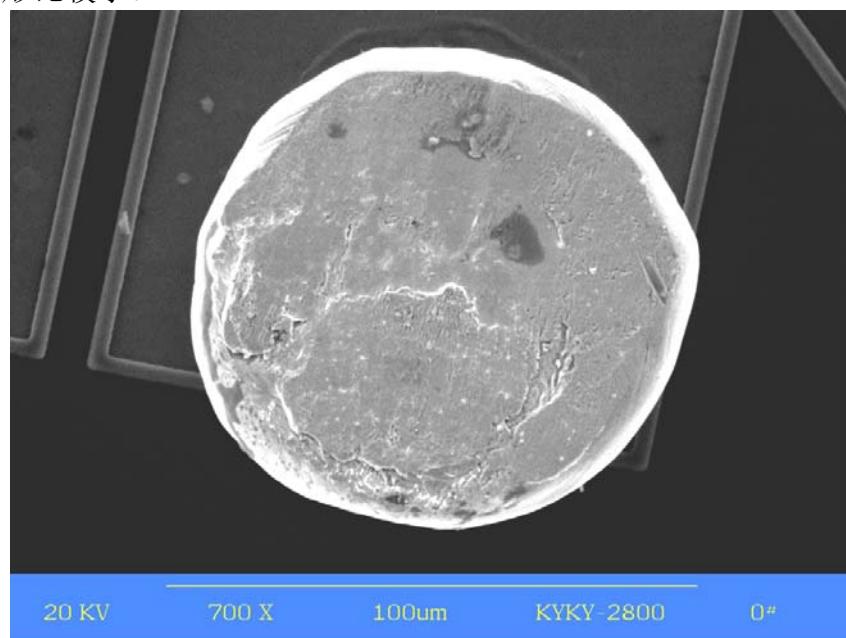


图 5-38 大超声功率向小超声功率变化加载条件下的金凸点变形

第二种超声功率加载方法进行了 10 次键合试验，其结果如表 5-7：

表 5-7 由中超声功率向小超声功率变化的加载试验

试验序号	芯片抗剪切强度(N)
chip1	0.88
chip2	0.78
chip3	1.08
chip4	0.78
chip5	0.93
chip6	1.13
chip7	0.83
chip8	0.98
chip9	0.78
chip10	0.78
平均抗剪切强度	0.89

由试验可知：由中超声功率向小超声功率变化的加载过程，比恒定参数加载过程，的键合强度高。但比仅变化键合力、或者是“由大超声功率向小超声功率变化的加载”过程，其平均键合强度有所下降。

同时，还观测了键合后凸点的变形情况，如图 5-39：在这中键合力加载模式下，金凸点的变形比较小。

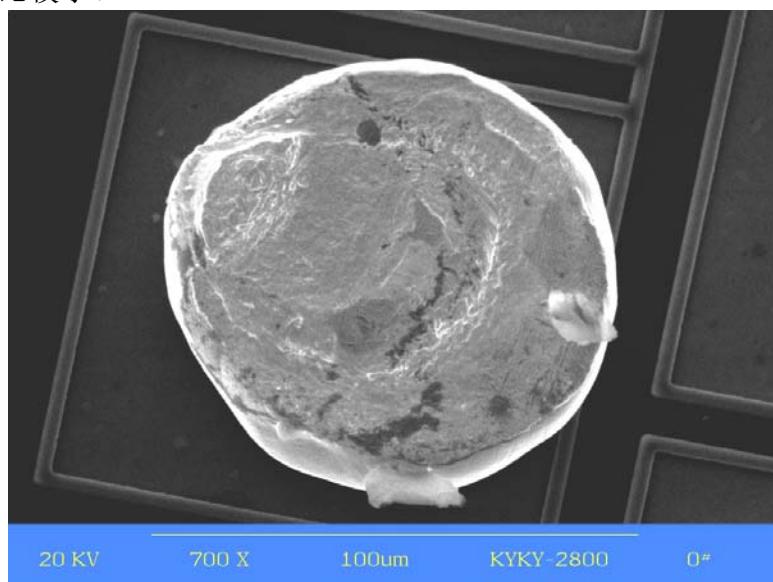


图 5-39 中超声功率向小超声功率变化条件下的金凸点变形

因此，由上述研究可知：大的初始功率可充分去除氧化层，较小的功率不利于去除表面层，使得后续的原子扩散条件不充分，从而降低了键合强度；保证键合初期必要的振幅是获得好键合的一个重要条件。

5.7.3 阶梯式键合参数加载优化

由上述研究可知：适当改变键合参数的加载过程，可大幅度提高键合强度和键合可靠性、降低金凸点的变形程度。

比较好的加载方案为：在键合初期采用大超声功率、小键合力，有利于金凸点和焊盘界面的相对运动，提高键合接触面表面层去除的效率，为后续的键合原子扩散提供裸露的原子接触；之后，采用小的超声功率、大的键合力，以提供接触界面大的应力场梯度，促进界面间的原子扩散，同时，降低超声振动对金凸点、焊盘等键合界面组成部分的疲劳破坏，提高键合界面的整体强度。

5.8 小结

研究了工艺参数对工具末端和芯片振幅、换能器系统输入功率、倒装芯片键合强度以及键合界面微观结构的影响，观测到了不同的键合失效形式。研究结果表明：

1) 超声功率和键合力都存在一个键合窗口，窗口的位置和宽度与键合材料体系和装备条件有关。键合强度与输入的超声能量有关，过小和过大的超声能量都不能形成好的键合强度；只有恰当的超声能量输入量和输入过程才能形成好的键合强度。

2) 工具/芯片间的摩擦是键合过程中能量的一个耗散环节，并使芯片背面和工具表面受到磨损。键合过程中应尽可能消除芯片和工具间的相对运动。

3) 获得了键合界面强度的新认识：“键合强度”应是键合区域整体的强度，而不仅是金凸点/基板焊盘界面的强度。键合应在确保形成金凸点/基板焊盘界面的高键合强度基础上，避免键合区其他位置失效。

4) 试验证实了关于键合机理的研究认识。在此基础上，提出了新型键合参数加载的方案：在键合初期采用大超声功率、小键合力，有利于金凸点和焊盘界面的相对运动，提高键合接触面表面层去除的效率，为后续的键合原子扩散提供裸露的原子接触；之后，采用小超声功率、大键合力，以提供接触界面的应力场梯度，促进界面间的原子扩散，同时，降低超声振动对金凸点、焊盘等键合界面组成部分的疲劳破坏，提高键合区域的整体强度。

第六章 全文总结

热超声倒装键合是一种基于热超声引线键合发展起来的新一代微电子封装技术，是无铅绿色、面阵列 I/O 芯片互连技术，具有键合温度低、键合力小和键合时间短等优点。本文针对微电子封装密度增加、体积缩小，特别是高性能芯片封装对热超声倒装提出的挑战，研究了热超声倒装键合界面运动与界面性能生成规律，以有助于信息倒装机研制和键合工艺优化，获得了如下主要结论和认识：

1、建立了热超声倒装键合实验系统，该系统主要由五部分组成：超声发生和传递系统、键合台加热系统、键合力控制系统、机械结构和控制系统。可以完成变键合参数下的各种键合实验。完成了 8 个金凸点的倒装芯片和表面镀银的铜基板间的热超声倒装键合。建立了热超声倒装键合过程监测系统，观测到超声功率、键合力、倒装工具/芯片振动等信号在键合过程中的变化，从 SEM 中观察到键合面为环状结构。

开发了基于 Matlab 的数据处理软件，可对关于热超声倒装键合过程的信号进行深层次分析处理。通过分析 PZT 驱动信号，发现键合过程是一个时变过程。

2、分析超声在变幅杆/倒装工具中的传递方程，获得了超声振动在变幅杆/倒装工具中的传递规律；指出工具/芯片/焊盘间的“粘一滑”过程与键合力和超声功率的相关规律，建立了工具/芯片界面的运动传递模型，可通过调整相关参数来控制芯片运动。

观测了键合过程中工具末端/芯片的振动，发现了“速度分离”现象。发现“速度分离”后工具一部分能量传递到键合界面，形成键合强度；另一部分被芯片/工具间的摩擦消耗；提出在“速度分离”后降低超声振幅的加载新思路。

分析了芯片振动信号的频率组成，发现“速度分离”之前，输入小键合力有利于产生初始的键合。提出了通过捕捉倒装芯片振动信号的三倍频来判断“速度分离”时机的方法，可作为键合过程控制的依据。

3、初步认识了热超声倒装键合界面强度生成机理：在键合力和超声的作用下，金凸点/焊盘中产生高达数百 MPa 的应力，导致位错的大量增殖，使金凸点和焊盘处于塑性状态，接触界面的氧化膜在应力作用下破裂，并在金凸点/焊盘的塑性流动过程中，将氧化膜碎片带出接触面，使得键合面裸露的金和银原子直接接触，一方面通过电子云共享形成化学键（金属键），另一方面形成物理键（范德华力吸附），形成最初始的键合强度。在反复的应力加载和卸载过程中，接触面逐步扩大，位错密度迅速增加；同时，键合界面原子在应力作用下，获得了足够的能量，越过势垒，沿着接触界面、

晶界和位错等短路通道扩散，在数百毫秒的时间内实现互扩散，生成数百纳米厚的原子扩散区域，形成可靠的键合强度。

4、采用有限元方法研究了键合过程中不同状态下键合界面的应力分布，发现键合界面的边缘较其它位置更有利于去除表皮层、更有利于原子扩散形成键合强度，是形成键合环状界面的重要原因。超声功率决定了倒装工具末端的振幅，并与键合力、温度共同决定了倒装芯片的振动过程，超声振动的加载过程改变了金凸点/焊盘界面的应力分布，使得应力分布进一步集中在振动位移决定的边缘位置，加速了该区域的原子扩散过程，最终影响键合强度，促进了环状界面的形成。

5、研究了键合参数对工具末端和芯片振幅、倒装芯片键合强度以及键合界面微观结构的影响，观测到了不同的键合失效形式。获得了键合界面强度的新认识：“键合强度”应是键合区域整体的强度，而不仅是金凸点/基板焊盘界面的强度。键合应在确保形成金凸点/基板焊盘界面的高键合强度的同时，避免其他失效形式。

发现超声功率和键合力都存在一个键合窗口；键合强度与输入的超声能量总量有关，如何控制超声能量的输入过程和输入总量，是控制键合强度的一个重要方面。

6、进行了新型热超声倒装键合工艺的试验：在认识键合机理基础上，提出了新型键合参数加载的方案：在键合初期采用大超声功率、小键合力，有利于金凸点和焊盘界面的相对运动，提高键合接触面表面层去除的效率，为后续的键合原子扩散提供裸露的原子接触；之后，可采用小超声功率、大键合力，以提供键合界面大的应力场梯度，促进键合界面间的原子扩散，同时降低超声振动对金凸点、焊盘等键合区域组成部分的疲劳破坏，提高键合区域的整体强度。实验结果表明，新型变参数加载工艺获得的键合强度和可靠性比传统工艺好。

有待继续深入研究的工作

对键合界面的材料迁移、原子扩散、微结构与强度的生成和键合界面运动传递、键合功率、键合时间的关系进行系统的、定量的计算分析，以获得更为具体和全面的工艺、装备设计科学依据。

参考文献

- [1] Rao R T, Eugene J R, Alan G K, et al. 微电子封装手册(第二版). 北京:电子工业出版社,2001.25-300
- [2] 高尚通, 杨克武. 新型微电子封装技术. 电子与封装, 2004, 4(1):10-15
- [3] 况延香, 朱颂春. 微电子封装的新进展领域及对 SMT 的新挑战. 电子工艺技术, 2004, 25(5):225-229
- [4] 田民波. 高密度封装进展之二——半导体封装技术的发展趋势. 印制电路信息, 2003, 11(5):3-7
- [5] 王毅. 世纪之交的半导体 IC 封装技术. 电子工业专用设备, 1997, 26(1):1-11
- [6] 鲜飞. 芯片封装技术介绍. 半导体技术, 2004, 29(8):49-52
- [7] 何田. 先进封装技术的发展趋势. 电子工业专用设备, 2005, 30(5):5-8
- [8] Chen, A S, Nguyen, L T, Burke, T S, et al. Wire bonding: Present and future trends. In: Mori T, ed. Proceedings of the 15th IEEE/CHMT International Electronics Manufacturing Technology Symposium (IEMTS). Santa Clara: IEEE Press, 1993.45-51
- [9] Timothy S, McLaren T, Lee Y C. Modeling and Evaluation Criterion for Thermocompression Flip-Chip Bonding. IEEE Transactions On Advanced Packaging, 2000, 23(4): 652-660
- [10] Shze J, Hu. G E, Foong K P. Study of temperature parameter on the thermosonic gold wire bonding of high-speed CMOS. IEEE transactions on components, hybrids, and manufacturing technology, 1991, 14(4): 855-858
- [11] Anton I, Lavrentyev U, James T B. Ultrasonic measurement of the diffusion bond strength. Ultrasonics, 2000, 38(12):513-516
- [12] Tsujino J, Yoshihara H, Kamimoto M, et al. Welding characteristics and temperature rise of high frequency and complex vibration ultrasonic wire bonding, Ultrasonics, 1998, 36(1-5):59-65
- [13] 王福亮, 韩雷, 钟掘. 超声功率对粗铝丝超声引线键合强度的影响. 中国机械工程, 2005, 16 (10): 919-923
- [14] 武志胜. 功率超声波在微连接中的应用. 焊接, 2005, 12(4):46-47
- [15] 葛励冲, 赵晓东. 晶圆键合技术与微电子机械系统新进展, 电子工业专用设备, 2004, 9(7):15-20
- [16] Sarangapani M, Narasimalu S, Charles J. Effect of wire diameter on the thermosonic bond reliability. Microelectronics Reliability, 2006, 46 (2-4):467-475
- [17] Whalen B H. Tape automated bonding technology developments at MCC. In: Rao

- J. ed. Proceedings of Sixth IEEE/CHMT International Electronic Manufacturing Technology Symposium. Nara, Japan: IEEE Press, 1989, 13-19
- [18] Cluff K, Kevin D. Analysis of TAB inner lead fatigue in thermal cycle environments. *Microelectronics and Reliability*, 1996, 36(4):537-542
- [19] 金德宣. 微电子焊接技术. 北京:电子工业出版社,1990,51-60
- [20] 郝跃, 贾新章, 吴玉广. 微电子概论. 北京:高等教育出版社,2003,22-36
- [21] 那扎洛夫. 微电子学焊接. 北京:国防工业出版社,1976, 33-37
- [22] 李川, 钟家骐. 敬兴久等. 倒装焊复合 SnPb 焊点应变应力分析. 电子产品可靠性与环境试验 ,2005,16(2):35-38
- [23] Kwon W S, Paik K W. Fundamental understanding of ACF conduction establishment with emphasis on the thermal and mechanical analysis. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2004,24(2):135-142
- [24] 秦连城. 导电胶导电性能的实验研究. 光学精密工程,2005,13(S1):114-120
- [25] Timothy S, McLaren T, Lee Y C. Modeling and Evaluation Criterion for Thermocompression Flip-Chip Bonding. *IEEE Transactions On Advanced Packaging*, 2000,23(4):652-660
- [26] Wong C P, Luo S J, Zhang Z Q. Microelectronics: Flip the Chip. *Science*, 2000, 290(5500):2269-2270
- [27] 茹延年, 刘开强, 张志伟等. Flip-chip 芯片关键技术的研究. 苏州大学学报(工科版):2004, 24(5):19-22
- [28] Yatsuda H, Eimura T. Flip-chip assembly technique for SAW devices. In: Harrington J A, Harris D M, ed, *Proceedings of the 1995 ISHM International Symposium on Microelectronics*, Los Angeles: IEEE Press, 1995,365-370
- [29] Tomioka T, Iguchi T, Mori I. Thermosonic flip-chip bonding for SAW filter. *Microelectronics Reliability*, 2004,44(1):149-154
- [30] Luk C F, Chan Y C, Hung K C. Development of gold to gold interconnection flip chip bonding for chip on suspension assemblies. *Microelectronics Reliability*, 2002,42(6): 381-389
- [31] Kurata H, Mitsuka K, Matsushita H. Dual operational amplifier using flip-chip fine package of 1.0*1.0*0.6-mm with 8-pin counts, In: Ernst L J. ed, *Proceedings of the 51st Electronic Components and Technology Conference*, Orlando: IEEE Press, 2001,1149-53
- [32] Irwin, R S, Zhang W, Harsh K F. et al. Quick prototyping of flip chip assembly with MEMS. In: Davie A M. ed, *Proceedings of the 44th International Instrumentation Symposium*, Reno: IEEE Press, 1998, 256-261.
- [33] Marksteiner S, Handtmann M, Timme H J, et al. A miniature BAW duplexer using

- flip-chip on LTCC. In: Peligrad D N. ed, 2003 IEEE Symposium on Ultrasonics. Honolulu: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2003, 1794-1797.
- [34] Yatsuda H, Eimura T, Oguri M, et al. Flip-chip SAW filters. JRC Review, 1999, 38(8), 39-42
- [35] Yatsuda H, Eimura T. Flip chip assembly technique for SAW devices. International Journal of Microcircuits and Electronic Packaging, 1996, 19(3): 238-244
- [36] Yatsuda H, Horishima T, Eimura T, et al. Miniaturized SAW filters using a flip-chip technique. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1996, 43(1): 125-130
- [37] Yatsuda H, Iijima H, Yabe K. Flip-chip STW filters in the range of 0.4 to 5 GHZ. In: Brand W. ed, Proceedings of 2002 IEEE Symposium on Ultrasonics, Munich: IEEE Press, 2002, 11-18
- [38] Jaakola T, Lenkkeri J, Vahakangas J. Flip-chip joining utilizing gold stud bumps. In: Tuinhout A. ed, Proceedings of ISHM-NORDIC 34th Annual Conference, Oslo: ASME Press, 1997, 5-12
- [39] McLaren T S, Kang S Y, Zhang W, et al. Thermosonic bonding of an optical transceiver based on an 8*8 vertical cavity surface emitting laser array. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, Part B: Advanced Packaging, 1997, 20(2): 152-160
- [40] McLaren T S, Kang S Y, Zhang W, et al. Thermosonic flip-chip bonding for an 8*8 VCSEL array. In: Loebel H P. ed, Proceedings of the 45th Electronic Components and Technology Conference, Las Vegas: IEEE Press, 1995, 21-24
- [41] Gupta D. A novel active area bumped flip chip technology for convergent heat transfer from gallium arsenide power devices, IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology, Part A, 1995, 18(1): 82-86
- [42] Wei J, Wang Z P, Tan Y M. Gold to gold thermosonic flip chip bonding on ceramic substrate. In: Milsom R F. ed, Proceedings of 2002 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, New Orleans: ASME Press, 2002, 431-436
- [43] Tomioka T, Iguchi T, Mori I, et al. Thermosonic flip chip bonding for low cost packaging. In: Tuinhout A. ed, Proceedings of 2002 International Symposium on Microelectronics, Denver: IEEE Press, 2002, 360-365
- [44] Cheah L K, Tan Y M, Wei J, et al. Gold to gold thermosonic flip-chip bonding. In: Lobeek J W. ed, Proceedings of 2001 HD International Conference on High-Density Interconnect and Systems Packaging, Santa Clara: IEEE Press, 2001, 165-70
- [45] Pang C C H, Sham M L, Hung K Y. Investigation on the high frequency

thermosonic flip chip bonding under low temperature. In: Macak K. ed, Proceedings of the 5th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC 2003), Singapore: IEEE Press. 2003, 376-379

[46] Kang S Y, Williams P M, McLaren T S. et al. Studies of thermosonic bonding for flip-chip assembly. *Materials Chemistry and Physics*, 1995, 42(1):31-37

[47] Kang S Y, Williams P M, Keyser T A. et al. Modeling and experiment on thermosonic flip-chip bonding. In: Berg S. ed, Proceedings of the ASME Winter Conference, New Orleans: ASME Press, 1993, 1-9

[48] Kang S Y, Williams P M, Lee Y C. Modeling and experimental studies on thermosonic flip-chip bonding. *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology Part B: Advanced Packaging*, 1995, 18(4):728-733

[49] Kang S Y, Ju T H, Lee Y C. Thermosonic bonding: an alternative to area-array solder connections. In: Makkonen T. ed, Proceedings of IEEE 43rd Electronic Components and Technology Conference (ECTC '93), Orlando: IEEE Press. 1993, 877-882

[50] Kang S Y, Lee C K, Lee Y C. Random change of vibration modes in thermosonic bonding. *Transactions of the ASME. Journal of Electronic Packaging*, 1998, 120(3):253-258

[51] Tan Q, Schaible B, Bond L J, Lee Y C. Thermosonic flip-chip bonding system with a self-planarization feature using polymer. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, 1999, 22(3):468-475

[52] Tan Q, Zhang W, Schaible B, et al. Thermosonic flip-chip bonding using longitudinal ultrasonic vibration. *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology Part B: Advanced Packaging*, 1998, 21(1):53-58

[53] Leung M L H, Lai H C, Liu C K. Comparison of bonding defects for longitudinal and transverse thermosonic flip-chip. In: Macak K. ed, Proceedings of the 5th Electronics Packaging Technology Conference, Singapore: IEEE Press, 2003, 350-355

[54] Jiromaru T, Tsutomu S, Hayato O, et al. Complex vibration ultrasonic welding systems with large area welding tips, *Ultrasonics*, 2002, 40(10):361~364

[55] Tang C W, Chan Y C, Hung K C, et al. Standoff Height Measurement of Flip Chip Assemblies by Scanning Acoustic Microscopy. In: Ella J. ed, 2000 International Symposium on Advanced Packaging Materials. Braselton: IEEE Press, 2000, 189-196

[56] Esser R H, Dimoulas A, Strifas N, et al. Materials interfaces in flip chip interconnects for optical components, performance and degradation mechanisms. *Microelectronics and Reliability*, 1998, 38(6-8):1307-1312

[57] John A, Scales A E. Malcolm. Laser characterization of ultrasonic wave propagation in random media, *Physical Review*, 2003, 67(2):1-7

- [58] Semmens J E. Flip Chips and Acoustic Micro Imaging: An Overview of Past Applications, Present Status, And Roadmap for the Future. *Microelectronics Reliability*, 2000,40(8-10):1539-1543
- [59] 霍军亚. 超声键合过程动态压力监测系统设计研究:[硕士学位论文].长沙:中南大学, 2006 年
- [60] LI J P, HUO J Y, HAN L, et al. Synchronization Trigger System Design of the Thermosonic Flip-chip Bonding. In: Liu J. ed, Proceedings of the 7th IEEE CPMT Conference on High Density Microsystem Design, Packaging and Failure Analysis, Shanghai: IEEE Press, 2005, 122-124
- [61] 李建平, 霍军亚, 王福亮等. 超声倒装键合同步触发系统的设计. 中南大学学报(自然科学版), 2005,36(6):1026-1030
- [62] Jun Q, Huang N C, Li M, et al, Mechanism analysis of process parameters effect on bondability in ultrasonic gold ball bonding. In: Liu J. ed, Proceedings of the 7th IEEE CPMT Conference on High Density Microsystem Design, Packaging and Failure Analysis, Shanghai: IEEE Press, 2005, 56-60
- [63] 王福亮, 韩雷, 钟掘. 超声引线键合 PZT 驱动信号采集分析系统. 焊接学报,2006,27(1):1-5
- [64] 陈真, 王延江, 王钊. 基于 LabVIEW 的远程数据采集系统开发. 仪表技术与传感器,2006,19(6):27-28
- [65] 张仁亮, 刘北英, 李占锋. 基于 LabVIEW 虚拟仪器自动测试系统的设计开发. 机械制造与自动化,2006,35(3):146-148
- [66] 钱媛媛, 贾民平. 基于 LabVIEW 的机械工况监测及分析系统的研制. 可编程控制器与工厂自动化,2006,6(5):125-127
- [67] 郑诗樵, 黄文达, 孙振宁等. 基于 LabVIEW 的远程 γ 能谱测量系统的开发. 核技术,2006,29(7):70-72
- [68] 宋振华, 李素有, 杜小军. 基于 LabVIEW 的振动实验控制与数据采集系统. 实验技术与管理,2006,23(5):82-84
- [69] 李郁峰, 朱金陵. 牵引试验车数据采集及处理系统设计与实现. 铁路计算机应用,2003,12(11):4-6
- [70] 陈培昕, 王晓敏, 郭赤. 基于 LabVIEW 平台的数据采集系统的研究. 医疗卫生装备,2006,27(2):19-23
- [71] 全必胜, 李斌. 基于声卡和 MATLAB 的数据采集与分析系统. 计算机仿真,2003,20(8): 148-150.
- [72] 刘卫国. 科学计算与 MATLAB 语言. 北京: 中国铁道出版社, 2000
- [73] 王沫然. MATLAB 6.0 与科学计算. 北京: 电子工业出版社, 2001

- [74] 周金萍, 王冉, 吴斌. MATLAB 6 实践与提高. 北京: 中国电力出版社, 2002
- [75] 张智星. MATLAB 程序设计与应用. 北京: 清华大学出版社, 2002
- [76] Lin S Y. Load characteristics of high power sandwich piezoelectric ultrasonic transducers. *Ultrasonics*, 2005, 43(5):365-373
- [77] 赵福令, 冯冬菊, 郭东明等. 超声变幅杆的四端网络法设计. *声学学报*, 2002, 27(6):554-558
- [78] 梁召峰, 林书玉. 余弦形过渡段阶梯形变幅杆研究. *陕西师范大学学报(自然科学版)*, 2003, 31(4):32-35
- [79] 刘世清, 林书玉. 扭转超声振动系统中局部共振的研究. *应用声学*, 2004, 23(2):11-16
- [80] Merz B, Mericske S R, Lengsfeld M, et al. Finite element model of a human mandible with dental implants based on in-vivo load measuring and CT-scanning. *Journal of Biomechanics*, 1998, 31(S1):42-48
- [81] Li H L, Po C C, Chan L W, et al. Finite element analysis on 1-3 piezocomposite rings for ultrasonic transducer applications. *Ceramics International*, 2004, 30(7):1827-1830
- [82] 解妙霞, 李全禄, 郝淑娟. 大截面变幅杆的有限元分析. *陕西师范大学学报(自然科学版)*, 2006, 34(2):51-53
- [83] Lee S, Tanaka T, Inoue K, et al. Stress influences on the ultrasonic transducers. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2005, 119(2):405-411
- [84] 刘世清, 林书玉. 工具杆几何尺寸对超声扭转振动特性的影响. *应用声学*, 2004, 23(6):16-19
- [85] Lin, Shuyu. Study on the multifrequency Langevin ultrasonic transducer. *Ultrasonics*, 1995, 33(6):445-448
- [86] Samulionis V, Banys J, Volkel G. Ultrasonic investigation of elastic phase transitions in betaine compounds. *Journal of Alloys and Compounds*, 2000, 310(1-2): 176-180
- [87] Lin, Shuyu. Study on the longitudinal-torsional composite mode exponential ultrasonic horns. *Ultrasonics*, 1996, 34(7):757-762
- [88] Mayer M, Paul O, Bolliger D, et al. Integrated Temperature Microsensors for Characterization and Optimization of Thermosonic Ball Bonding Process. *IEEE Trans. Comp. Packaging Technol.*, 2000, 23(2):393-398
- [89] Murali S, Srikanth N, Charles J. Grains, deformation substructures, and slip bands observed in thermosonic copper ball bonding. *Materials Characterization*, 2003, 50(1):39-50
- [90] Osorio R, Mayer M, Schwizer J, et al. Simulation procedure to improve piezoresistive microsensors used for monitoring ball bonding. *Sensors and Actuators*,

2001,92(5):299-304

- [91] Mayer M, Paul O, Baltes H. Complete Set of Piezoresistive Coefficients of CMOS n+-Diffusion. *Journal of Micromechanics and Microeng*, 1998,8(2):158-160
- [92] Schwizer J, Mayer M, Brand O, et al. In situ Ultrasonic Stress Microsensor for Second Bond Characterization. In: Graves John, ed. Proc of Intl. Symp. Microelectronics IMAPS'01, Baltimore: Elsevier Science, 2001,338-343
- [93] 林仲茂. 超声变幅杆的原理和设计. 北京:科学出版社,1987 年
- [94] 冯若. 超声手册. 南京:南京大学出版社, 1999 年
- [95] 贺西平. 一端带有圆柱杆的复合纵振超声变幅杆的简明设计理论. 声学技术,1994,13(2):85-88
- [96] Lan J, Simoneau M J, Boucher S G. Development of an efficient transducer design tool: complete finite element modeling of transducer performance parameters on a PC. *NDT & E International*, 1996,29(4):246-247
- [97] 张云电. 超声加工及其应用. 北京:国防工业出版社,1995 年
- [98] Dewey A, Srinivasan V, Icoz E. Visual modeling and design of microelectromechanical system transducers. *Microelectronics Journal*, 2001,32(4):373-381
- [99] 应崇福. 超声学. 北京: 科学出版社, 1993 年
- [100] 应崇福, 张守玉, 沈建中. 超声在固体中的散射. 北京:国防工业出版社, 1994 年
- [101] Xie L J, Schmidt J, Schmidt C, et al. 2D FEM estimate of tool wear in turning operation. *Wear*, 2005,258(10):1479-1490
- [102] K. C. Joshi, The formation of ultrasonic bonding between metal, *Welding J.*, 1979,50(21):840–848
- [103] Or S W, Chan H L W, Lo V C, et al. Ultrasonic wire-bond quality monitoring using piezoelectric sensor[J]. *Sensors and Actuators*, 1998,65(8):69 ~75.
- [104] Wu J Z, Herzog W, Epstein M. Evaluation of the finite element software ABAQUS for biomechanical modelling of biphasic tissues. *Journal of Biomechanics*, 1997, 31(2):165-169
- [105] Manet Vincent. The use of ANSYS to calculate the behaviour of sandwich structures. *Composites Science and Technology*, 1998,58(12):1899-1905
- [106] Heikkola Erkki, Laitinen, Mika. Model-based optimization of ultrasonic transducers, *Ultrasonics Sonochemistry*, 2005,12(1-2):53-57
- [107] Liu, D.S.; Chao, Y.C.; Wang, C.H. Study of wire bonding looping formation in the electronic packaging process using the three-dimensional finite element method. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2004,40(3): 263-286

- [108] Reh S, Beley J D, Mukherjee S, et al. Eng HuiProbabilistic finite element analysis using ANSYS. Structural Safety, 2006, 28(1-2):17-43
- [109] Patrick Hild. Numerical implementation of two nonconforming finite element methods for unilateral contact. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2000,184(1):99-123
- [110] Tsvelodub I Y. A three-dimensional inverse problemfor a physically non-linear inhomogeneous medium. Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 2005,69(2):263-267
- [111] Noskova N I, Ponomareva E G. Structure of nanocrystalline Cu subjected to ultrasonic waves. Nanostructured Materials, 1997, 9(1-8):141-144
- [112] Makarov P V, Romanova V A, Balokhonov R R. Plastic deformation behavior of mild steel subjected to ultrasonic treatment. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 1997, 28(2):141-146
- [113] Min X H, Kato H, Narisawa N, et al. Real-time ultrasonic measurement during tensile testing of aluminum alloys. Materials Science and Engineering: A, 2005,392(1-2):87-93
- [114] 郑金鑫, 万志敏, 杜星文等. 超声波对金属材料性能影响实验研究. 实验力学,13(4):492-496
- [115] 郑金鑫, 杜星文, 程靳. 受超声激励韧性金属的特殊力学行为分析. 航空学报,2000,21(4):334-337
- [116] 杨先觉. 金属塑性变形物理基础. 北京: 冶金工业出版社, 1988 年
- [117] 程晓农, 戴起勋, 邵红红编著. 材料固态相变与扩散. 北京: 化学工业出版社, 2006 年
- [118] 戚正风, 固态金属中的扩散与相变. 北京: 机械工业出版社,1998 年
- [119] 夏立芳. 金属中的扩散. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1989 年
- [120] 杨尚林,徐庭栋,李庆芬. 材料物理学. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004 年
- [121] 冯瑞等. 金属物理学. 北京: 科学出版社, 1987 年
- [122] 李军辉,韩雷,谭建平等. Ni-Al 超声楔焊键合分离界面的结构特性及演变规律.焊接学报,2005,26(4):5-8
- [123] 李军辉,韩雷,谭建平等. 引线键合的界面特性, 中南大学学报(自然科学版), 2005, 36(01):10-12
- [124] 郑子樵. 材料科学基础, 长沙: 中南大学出版社, 2005
- [125] 中国机械工程学会焊接学会.焊接词典,北京:机械工业出版社,1997; 郝长岭,亢世江,陈学广.不断发展的固态焊接技术, 焊接技术, 2002,31(5): 18-19

- [126] 周小擎. 直流电磁铁的优化设计. 华南理工大学学报(自然科学版),1994,22(3):55-58
- [127] 付文智, 李明哲, 邓玉山. 直流电磁铁磁场和牵引力的数值模拟. 农业机械学报,2005,36(2):100-103
- [128] 黄向东, 丁凡, 寿松乔等. 直流螺管式电磁铁的动特性研究. 机床与液压,1997,12(4):25-28
- [129] Min X H, Kato H, Narisawa N, et al. Real-time ultrasonic measurement during tensile testing of aluminum alloys. Materials Science and Eng., 2005,392(1-2): 87-93
- [130] Cantrell J H, Yost W T. Nonlinear ultrasonic characterization of fatigue microstructures. International Journal of Fatigue, 2001,23(S1):487-490
- [131] De A K, De B K, Vandepitte S, et al. Effect of dislocation density on the low temperature aging behavior of an ultra low carbon bake hardening steel. Journal of Alloys and Compounds, 2000, 310(1-2):405-410
- [132] Eiras J A. Influence of plastic deformation on the velocity and ultrasonic attenuation of copper single crystals. Journal of Alloys and Compounds, 2000,310(1-2): 68-71
- [133] Min X H, Kato H. Change in ultrasonic parameters with loading/unloading process in cyclic loading of aluminium alloy. Materials Science and Eng., 2004,372(1-2): 269-277
- [134] Kato N I, Nishikawa A, Saka H. Dislocations in Si generated by fatigue at room temperature. Materials Science in Semiconductor Processing, 2001,4(1-3):113-115
- [135] Hirao M, Ogi H, Suzuki N, et al. Ultrasonic attenuation peak during fatigue of polycrystalline copper. Acta Materialia, 2000,48(2):517-524
- [136] Marks M R, Qin W, Wang J J, et al. A high-quality cross-sectional transmission electron microscope specimen preparation technique for structural and interfacial property studies in microelectronic packaging. Microelectronics and Reliability, 1995,35(5):807-815
- [137] Tan C M, Eddie E, Hua Y, et al. Failure Analysis of Bond Pad Metal Peeling Using FIB and AFM. IEEE Transactions On Components, Packaging, And Manufacturing Technology—Part A, 1998,21(4):585-591
- [138] Lavrentyev A I, Beals J T. Ultrasonic measurement of the diffusion bond strength. Ultrasonics, 2000,38(5):513–516
- [139] Adams T. Acoustic micro imaging of flip chip interconnects. III-Vs Review, 1995,8(5):50-52.
- [140] Murali S, Srikanth N, Charles J. An analysis of intermetallics formation of gold and copper ball bonding on thermal aging. Materials Research Bulletin,2003,38(3):637-646

- [141] Li H L, Chan L H, Liu C K. Comparison od bonding defects for longitudinal and transverse thermosonic flip-chip. In: Liu D M. ed, Proceedings of the 5th Electronics Packaging Technology Conference, Singapore: Elsevier Science, 2003,350-355
- [142] Harsh K F, Zhang W, Bright V M, et al. Flip-chip assembly for Si-based RF MEMS. In: Park J Y. ed, Proceedings of the 12th IEEE International Conf. on Microelectromechanical Systems, Orlando: IEEE Press, 1999,273-278
- [143] Semmens J E. Flip Chips and Acoustic Micro Imaging: An Overview of Past Applications, Present Status, And Roadmap for the Future. *Microelectronics Reliability*, 2000,40(8):1539-1543

致 谢

首先，感谢我的导师钟掘院士。导师以敏锐的眼光、超前的科研思维，将我引领进入微电子封装工艺与装备技术这一充满挑战和前途的领域，让我接触到国内外众多优秀的科学家，在973项目、国家自然科学基金重大项目这样的高水平平台上做研究。几年来，导师勤奋刻苦、实事求是、积极创新的科研精神；热爱祖国、报效祖国的科研理念；严于律己、宽以待人的大家风范，深刻地影响了我，并将让我终生受益。

此外，感谢韩雷教授、邓圭玲教授、段吉安教授，在论文进展过程中，提出了中肯的意见和及时的帮助；感谢同事李军辉、隆志力，一起建设了试验平台，经常一起讨论问题；感谢霍军亚、许文虎等同学，帮忙采集试验数据。

感谢香港ASMPT为本文的研究工作提供咨询和试验材料；感谢该公司的CTO Mr. Peter Liu为本文的工作提出了中肯的建议。

感谢我的父母，不仅辛苦地养育了我，还给我提供了难得的受教育机会；感谢我的夫人，在我攻读学位期间，给我大力的支持。

攻读学位期间发表的论文和参与科研情况

公开发表的论文：

- [2] 王福亮,李军辉,韩雷,钟掘.压力约束模式下的热超声倒装键合实验, 中国机械工程,2006,17(18):1944-1947.
- [3] 王福亮,韩雷,钟掘.超声功率对引线键合强度的影响,机械工程学报,2007,43 (3):107-111.
- [4] WANG Fu-liang, HAN Lei, ZHONG Jue. Experiments on the Bonding Interface Vibration of Thermosonic Flip Chip. In proceedings: The 7th IEEE CPMT Conference on High Density Microsystem Design and Packaging and Component Failure Analysis (HDP'05),June 30-July 3,2005. Shanghai, China. pp: 33-36.
- [5] 王福亮,韩雷,钟掘.热超声倒装键合环状界面的形成, 焊接学报, 2006,27(11), 65-68
- [6] 王福亮,李军辉,韩雷,钟掘. 热超声倒装键合振动传递与键合强度形成研究, 中国机械工程,2006, 17(22): 2350-2353
- [7] Fuliang WANG, Junhui LI, Lei HAN, Jue ZHONG. Effect of bonding parameters on thermosonic flip chip bonding under pressure constraint pattern. In proceedings: The 8th IEEE CPMT Conference on High Density Microsystem Design and Packaging and Component Failure Analysis (HDP'06),June 30-July 3,2006. Shanghai, China. pp: 214-216.
- [8] 王福亮,韩雷,钟掘.键合时间对粗铝丝超声引线键合强度的影响研究,焊接学报,2006,27(5):47-51.
- [9] 王福亮,韩雷,钟掘.超声功率对粗铝丝超声引线键合强度的影响.中国机械工程, 2005.16 (10): 919-923.
- [10]WANG Fuliang, HAN Lei, ZHONG Jue. Effect of Ultrasonic Power on the Heavy Aluminum Wedge Bonding Strength. Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2005,18(4):515-518.
- [11]HAN Lei, WANG Fu-liang, ZHONG Jue. Bondability window and power input for wire bonding, Microelectronic Reliability. 2006,46(2-4):610-615.
- [12]WANG Fu-liang, HAN Lei, ZHONG Jue. Study of Ultrasonic Power Parameter on the Large Aluminum Wire Wedge Bonding Strength. In proceedings: The Seventh IEEE CPMT Conference on High Density Microsystem Design and Packaging and Component Failure Analysis (HDP'05), 2005: 42-46.
- [13]王福亮,韩雷,钟掘.超声引线键合 PZT 驱动信号采集分析系统,焊接学报,2006,27(1):1-5.

- [14] 王福亮, 韩雷, 钟掘, GDS-820 数字存储示波器控制软件的开发, 中南大学学报(自然科学版), 2005,36(2):262-265.
- [15] 王福亮, 李军辉, 韩雷, 钟掘. 超声波在引线键合机变幅杆中的传递, 中南大学学报(自然科学版), 2005,36(6):1017-1021.
- [16] WANG Fu-liang, HAN Lei, ZHONG Jue. Computer-based Data Acquisition for Wire Bonding Studies. In proceedings: The Sixth IEEE CPMT Conference on High Density Microsystem Design and Packaging and Component Failure Analysis (HDP'04), June 30-July 3, 2004. pp:227-230.
- [17] 王福亮, 韩雷, 钟掘, 引线键合机换能器计算机数据采集系统, 计算机应用研究, 2005,22(5):159-161.

参与的科研情况:

- [1] 国家重大基础研究发展项目(973计划)“高性能电子产品设计制造精微化数字化新原理和新方法”的课题2“复合能场作用下微互连界面的微结构演变规律”(项目编号: 2003CB716202);
- [2] 国家自然科学基金“十五”重大项目“先进电子制造中的重要科学技术问题研究”的课题4“芯片封装界面制造过程多参数影响规律与控制”(项目编号: 50390064);
- [3] 国家自然科学基金项目“LEDs 照明器件连接制造中的非线性机理及其工艺监测研究”(项目编号: 50575230)。