

摘要

微电子器件的失效往往与其所处的环境温度及工作温度有关，如何有效解决其热可靠性问题已成为制约微电子封装发展的关键技术之一。因此，对微电子封装器件的温度分布以及热应力进行研究就显得十分重要，具有重要的理论和实际意义。

本文建立了简易的焊点模型，利用公式推导计算出焊点在温度上升时各处的剪应力分布情况，利用有限元软件 ANSYS10.0 建立了球栅阵列(BGA)结构封装体的基本模型，在计算时考虑到芯片具有一定的功率，工作时会产生热量的实际情况，对封装结构的温度场分布进行了仿真，并将温度结果作为体载荷施加给封装体，分析其所受热应力情况。为了研究恶劣环境温度下封装体的可靠性，分析了封装体经受 $-55^{\circ}\text{C}\sim+125^{\circ}\text{C}$ 温度循环荷载作用下所受热应力应变情况，以预测处于极端恶劣环境中的电子器件的疲劳寿命。

关键词：温度场 温度循环 热应力 疲劳寿命

Abstract

Electronic equipment's invalidation usually related with the environmental temperature and working temperature, how to resolve the thermal reliability problem of thermal reliability has become one of the key technologies of micro-electronic package. Therefore, research on temperature distribution and thermal stress of micro-electronic package is very important, which has both theoretical and practical significance.

The dissertation firstly built simple model of solder balls, using expressions deduced shearing strength of solder balls when the temperature rised, and built the basic model of BGA structure packaging by using ANSYS10.0. Considering the fact that chip could produce heat when it works, the dissertation simulated the temperature distribution of packaging, and used the temperature as a load on the packaging, analysed the thermal stress of it. To analyse the thermal reliability under abominable condition, the dissertation also analysed the thermal stress and thermal strain of packaging upon the temperature cycling condition which range from -55°C to $+125^{\circ}\text{C}$, at last the dissertation predicted the fatigue life of packaging.

Keyword: temperature field temperature cycling thermal stress
fatigue life

西安电子科技大学 学位论文独创性（或创新性）声明

秉承学校严谨的学风和优良的科学道德，本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢中所罗列的内容以外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果；也不包含为获得西安电子科技大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中做了明确的说明并表示了谢意。

申请学位论文与资料若有不实之处，本人承担一切的法律责任。

本人签名：罗文功

日期 2009年3月16日

西安电子科技大学 关于论文使用授权的说明

本人完全了解西安电子科技大学有关保留和使用学位论文的规定，即：研究生在校攻读学位期间论文工作的知识产权单位属西安电子科技大学。学校有权保留送交论文的复印件，允许查阅和借阅论文；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以允许采用影印、缩印或其它复制手段保存论文。同时本人保证，毕业后结合学位论文研究课题再撰写的文章一律署名单位为西安电子科技大学。

（保密的论文在解密后遵守此规定）

本学位论文属于保密，在 年解密后适用本授权书。

本人签名：罗文功

日期 2009年3月16日

导师签名：陈建章

日期 2009-3-16

第一章 绪论

1.1 引言

当今信息时代,社会和经济的发展对信息资源、信息技术和信息产业的依赖程度越来越大,信息化程度已成为衡量一个国家现代化水平的重要标志。信息化程度与计算机和微电子产品的普及与发展密切相关,也是当今世界竞争最激烈、发展最迅速的领域。据统计,当今发达国家国民生产总值增长部分的 65%与电子有关。在发达国家的发展过程中存在一条规律:电子工业产值的增长速率一般为 GDP(Gross Domestic Product)增长速率的 3 倍,集成电路工业产值的增长速率又是电子工业产值增长速率的 2 倍。美国半导体协会(Semiconductor Industry Association, SIA)预测:到 2012 年,集成电路全行业销售额将达到 5000-6000 亿美元,并将支持 6-8 万亿美元电子装备和 30 万亿美元电子信息服务业,后者相当于 1997 年全世界 GDP 的总和^[1]。目前,集成电路已成为全球第一大产业。

2007 年中国集成电路产业快速发展,销售额规模在 2006 年首次突破 1000 亿元的基础上继续较快增长,达到 1251.3 亿元,同比增长 24.3%,其中 IC 设计业增长 21.2%,规模为 225.7 亿元;芯片制造业增长 23%,规模为 397.9 亿元;封装测试业增长 26.4%,规模达到 627.7 亿元。在新增投资推动与市场需求拉动下,国内集成电路产业将继续保持较快的增速,预计 2008 年国内集成电路产业增幅将在 20%左右,其规模将突破 1500 亿元^[1]。

广义的集成电路制造包括电子产品从市场分析、经营决策、工程设计、加工装配、质量控制、销售运输直至售后服务的全过程。狭义的集成电路制造则是指电子产品从硅片开始到产品系统的物理实现过程,如图 1.1 所示。图 1.1 中的椭圆部分称为微电子封装(Electronic Packaging),而晶片的制造则称为半导体制造(Semiconductor Manufacture)^[2]。

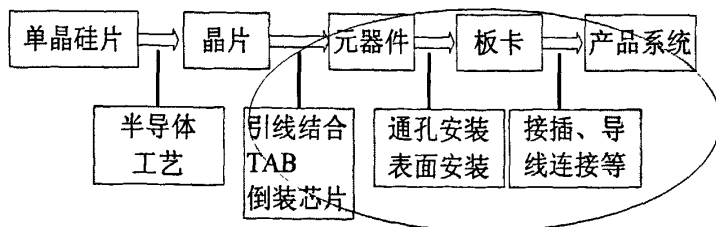


图 1.1 微电子产品的物理实现过程

微电子封装指的是从电路设计的完成开始,将裸芯片、陶瓷、金属、有机物

等物质封装成芯片、元件、板卡、电路板，最终组装成电子产品的整个过程。

半导体制造指的是利用微细加工技术将各单元器件按一定的规律制作在一块微小的半导体片上进而形成半导体芯片的过程。

集成电路制造可视为广义的机械制造：芯片制造对应于二维零部件成形，芯片封装对应于结构装配，只是前者的精度要远远高于后者，目前芯片制程工艺已达 32nm，22nm 技术也处于研发之中。

业界从技术和经济两个因素综合考虑，认为到 16nm 时摩尔定律可能将无法再继续下去。摩尔定律基于经典半导体物理和工艺技术，目前的工艺尺寸已经趋近物理极限。当半导体生产工艺达到 10nm，绝缘层厚度将达到分子级别，电子在量子效应下将产生短路。据摩尔本人说，这个极限将出现在 2010~2020 年之间，而届时，或许将是摩尔定律的终点。但是即便到达那一天，集成电路制造不可能止步，全球近 600 条各种尺寸的芯片生产线仍能正常工作，因为集成电路产业的进步并不是单单由缩小特征尺寸来推动，相信未来一定会有替代技术呈现。

1.2 微电子封装研究内容

由硅片制作出的具有特定功能的芯片并不是一个孤立的元件，它必须同其它元件通过输入输出(I/O)进行互连才能发挥功能。电子产品需求量的日益提升，推动了电子封装产业的蓬勃发展。封装最初的定义是：保护电路芯片免受周围环境的影响(包括物理、化学的影响)。随着电子制造技术的不断发展演进，在 IC(Integrated Circuit) 芯片轻、薄、短、小、高功能的要求下，封装技术不断推陈出新，以符合电子产品的需要并充分发挥其功能。封装技术(Packaging)的定义可以理解为一个或多个晶片有效和可靠地封装和组装起来^[3]。

电子封装的主要功能如下：

1. 提供给晶片电流通路；
2. 引入或引出晶片上的信号；
3. 导出晶片工作时产生的热量；
4. 保护和支撑晶片，防止恶劣环境对它的影响。

1.2.1 微电子封装技术的发展

随着半导体制造技术不断精细，芯片功能日益多元，半导体芯片信号传输量与日俱增，芯片的引脚数也随之快速增加，这让封装产业由低阶的 DIP(Dual In-line Package)、SOP(Small Outline Package)、PGA(Pin Grid Array)快步走向 BGA(Ball Grid Array)、FC(Flip Chip)、CSP(Chip Scale Package)等高阶封装形式迈进。

70 年代器件的主流封装形式为通孔器件和插入器件,以 DIP 和 PGA 为代表;器件分别通过波峰焊接和机械接触实现器件的机械和电学连接。由于需要较高的对准精度,因而组装效率较低,同时器件的封装密度也较低。

80 年代出现了表面贴装技术(Surface Mount Technology, SMT),器件通过回流技术进行焊接,由于回流焊接过程中焊锡熔化时的表面张力产生自对准效应,降低了对贴片精度的要求,同时回流焊接代替了波峰焊,也提高了组装良品率。此阶段的器件封装类型以 PLCC 和 QFP 为主,由于采用四面引脚,因而在很大程度上提高了封装和组装的密度。

90 年代随着器件引脚增加及对封装、组装亮度的要求,出现了球栅阵列式封装 BGA。典型的 BGA 以有机衬底(如 BT)代替了传统封装内的引线框架,且通过多层板布线技术实现焊点在器件下的阵列平面分布,既减轻了引脚间距不断下降在贴装表面所遇到的阻力,同时又实现了封装、组装密度的大大增加,因而很快获得了大面积的推广且在产业中的应用急剧增长。如图 1.2 所示为几种常见的封装结构图。

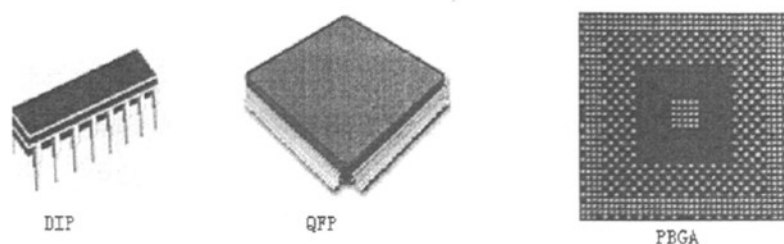


图 1.2 几种常见的封装结构

90 年代后期在 BGA 基础上,进一步发展起来的有芯片级封装(CSP)、晶片级封装(Wafer Level Package, WLP)等,使得 SMT 在小型化、高密度组装上的适用范围越来越广。CSP 器件可以实现芯片面积与封装面积之比超过 1: 1.14,约为普通 BGA 器件的 1/3,而且更薄。CSP 器件与 PCB 板的连接与 BGA 相同,为焊锡球阵列,而内部芯片到 BGA 基板的连接既可以采用线焊技术,也可以采用倒装焊接技术(FC)。倒装焊接技术是在芯片上制备高铅焊料凸点,再将芯片正面朝下直接贴在衬底上,使用回流焊接实现多个焊点的一次性组装,如图 1.3 所示。

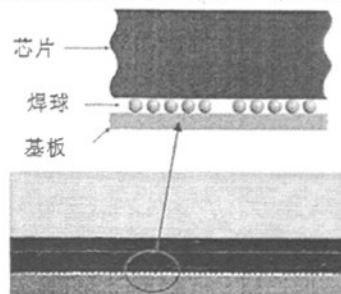


图 1.3 倒装芯片示意图

1.2.2 目前主流封装形式

微电子的发展方向,是由一个组件的开发,进入到集结和整合多个组件的阶段,再随着产品效能与轻薄短小需求的带动下,迈向“整合”阶段。在该发展方向的引导下,便形成了现今微电子产业上相关的两大主流:系统级芯片(System on Chip, SoC)与系统级封装(System in Package, SiP)。

SoC 技术将数字电路、模拟电路、信号采集和转换电路、存储器、MPU(Microprocessor Unit)、MCU(Microprocessor Control Unit)、DSP(Digital Signal Processor)等集成在一块芯片上实现一个系统,将电路系统设计的高可靠性、低功耗等都考虑在 IC 设计之中,外部可以对 SoC 进行编程,如图 1.4 所示。正是基于此设计思想,近年来,DSP、通用的 MCU/MPU、FPGA(Field Programmable Gate Array)、以及嵌入式操作系统获得空前发展。

SiP 是近几年来为适应整机的便携式发展和系统小型化的要求,在 SoC 基础上发展起来的一种新型封装集成方式。2005 年国际半导体技术蓝图(International Technology Roadmap for Semiconductors, ITRS)对 SiP 的定义是:系统级封装是采用任何组合,将多个具有不同功能的有源电子元件与可选择性的无源器件以及诸如 MEMS(Micro-Electro-Mechanical Systems)或者光学器件等其他器件首先组装成为可以提供多种功能的单个标准封装件,形成一个系统或者子系统^[4]。与其他封装结构相比, SiP 具有工艺兼容性好(可利用已有的电子封装材料和工艺),集成度高,成本低,可提供更多新功能,易于分块测试,开发周期短等优点。按照技术类型不同, SiP 可分为堆叠型、并排型等,如图 1.5 所示。

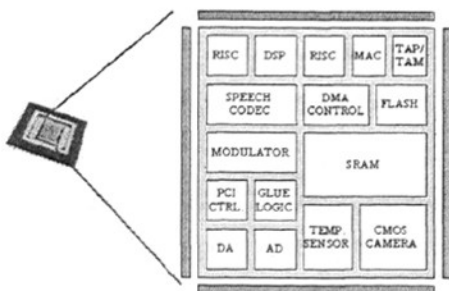


图 1.4 系统级芯片 SOC

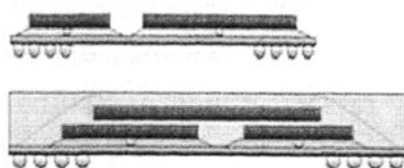


图 1.5 并排型 SiP 和堆叠型 SiP

从发展目的来看, SoC 与 SiP 极为相似,两者均希望将一个包含逻辑组件、内存组件,甚至包含被动组件的“系统”,整合在一个单位中。简单地说,无论是哪种技术,两者的目的都只有一个,那就是要提高集成度,究竟是把系统直接做在一个芯片里还是把几个裸片包在一个封装里只是实现方式的不同而已。然而就发展的方向来说,两者却是大大的不同: SoC 是站在设计的角度出发,目的将一个系统所需的组件,整合于一芯片上;而 SiP 则是由封装的立场发展,将不同功

能的芯片整合于电子封装中。实际上, SoC 具有性能高、可靠性高、使用寿命长等优点, 但其开发测试成本都很高, 而且越复杂成品率越低, 同时上市时间长, 对批量的要求大。而 SiP 则相反, 它的适用性很强, 可将不同工艺不同功能(数字、模拟、存储器等)芯片放在一起, 成本与上市时间都优于前者, 但它在性能上却要稍逊一筹。

1.2.3 BGA 封装

BGA 封装, 即球栅阵列封装, 它将 IC 的引脚以焊球代替, 并将焊球以阵列模式排列。与传统 SMT 封装相比, BGA 的优点包括: 优良的互连密度、低廉的组装成本、在回焊时能自动对齐、采用小尺寸规格、容易散热与支持电子管理、容易配置电路。集成电路技术的发展, 对集成电路封装的要求只会更加严格, 这是因为封装技术关系到产品的功能, 当 IC 频率超过 100MHz 时, 传统封装方式会使信号产生串扰现象, 当 IC 的引脚数大于 208 时, 除使用 QFP 封装方式外, 现今大多数的高引脚数芯片均转向使用 BGA 封装技术。BGA 现为 CPU 等高密度、高性能、多引脚 IC 封装的最佳选择。

BGA 器件的结构可按焊点形状分为两类: 球形焊点和柱形焊点。球形焊点包括塑料球栅阵列 PBGA(Plastic Ball Array)、载带自动键合球栅阵列 TBGA(Tape Automatic Ball Grid Array)和陶瓷球栅阵列 CBGA(Ceramic Ball Grid Array)。PBGA、TBGA 和 CBGA 是按封装方式不同划分的; 柱形焊点称为 CCGA(Ceramic Column Grid Array)。球形焊点和柱形焊点的简图分别如图 1.6 所示。



图 1.6 球形焊点和柱形焊点

1.3 微电子封装可靠性

1.3.1 环境对封装可靠性的影响

微电子器件在制造、操作、装运、和储藏期间所接触到的环境因素都会对可靠性产生影响, 使其受到各种物理或化学形式的破坏, 主要故障机理包括: 扭曲变形, 蠕变, 疲劳, 断裂, 磨损, 腐蚀等。

与扭曲变形、疲劳和断裂有关的故障产生的原因通常是由于设备工作在超出

它的设计环境或者超出其预定寿命范围。使电子元件和组件过早产生故障的环境因素包括振动、热循环和热冲击。表 1.1 列出在机械环境下存在的环境因素的故障分布^[5]。

表 1.1 机载系统中与环境有关的故障分布

| 环境因素 | 故障百分数 (%) |
|-------|-----------|
| 温度 | 40 |
| 振动 | 27 |
| 湿度 | 19 |
| 沙土和灰尘 | 6 |
| 盐雾 | 4 |
| 冲击 | 2 |
| 高度 | 2 |

1.3.2 焊点失效及影响因素

电子封装产品尺寸的缩小,造成芯片线路密集化及线路直径细小化,细小化的结果产生了许多问题如电磁干扰、高温、热应力等。由于封装元件本身是由各种不同热膨胀系数的材料组成,当封装体的温度发生变化时,因各层材料收缩与膨胀程度不同,内部会产生热应力,这时既用于电连接,又用于机械连接的焊点就成为了封装结构中最弱的地方,研究表明焊点最常见的破坏是由于热循环造成的。

常用的 SnPb 焊料合金因其低熔点以及对 Cu、Au、Ni、Ag 等金属(或合金)的良好润湿性,在电子封装(及组装)技术中得到了广泛的应用。由于 SnPb 焊料合金的熔点相对较低,环境温度一般都达到或超过 SnPb 焊料熔点的一半。此时,SnPb 焊料的机械强度较低,因此,SnPb 焊料在一般工程中避免用来作机械连接材料,但对轻小的电子封装不受此限。近年来,集成电路技术的飞速发展,推动了电子封装和组装技术的不断发展,使 SnPb 焊料在电子封装技术中既用于电连接,又用于机械连接。但是,电子封装在服役条件下,电路的周期性通断和环境温度的周期性变化,会使焊点经受温度循环过程。又由于封装材料间的热膨胀失配,将致使经受温度循环的电子封装的 SnPb 焊点内产生周期性的应力应变过程,导致焊点裂纹的萌生和扩展,最终使焊点失效^[5]。

影响可靠性的因素主要包括:

1. 工艺条件。对于大型复杂电路板,焊接温度通常为 260℃,这可能会给 PCB 和元器件的可靠性带来负面影响,但它对小型电路板的影响较小,因为最大

回流焊温度可能会比较低。

2. PCB 层压材料。PCB (特别是大型复杂的厚电路板)层压材料,可能会发生分层、层压破裂、Cu 裂缝等故障。

3. 环境因素。在热循环条件下,蠕变疲劳会通过损伤积聚效应而导致焊点失效(即组织粗化/弱化,裂纹出现和扩大),蠕变应力速率是一个重要因素。蠕变应力速率随着焊点上的热机械载荷幅度变化,无铅焊点在相对温和的条件下能够比 Sn-Pb 焊点承受更多的热循环,但在比较恶劣的条件下比 Sn-Pb 焊点承受更少热循环。热机械负荷取决于温度范围、元器件尺寸及元器件和基底之间的 CTE 不匹配程度。

4. 焊接合金。随着各个国家和组织陆续出台禁铅法令,含铅焊料正逐步退出历史舞台,但目前仍然占据着市场相当大的比例。目前主流的无铅合金是 Sn-Ag-Cu 合金,在民用领域,由于使用环境没有太大的应力,无铅焊点的机械强度比含铅的要高,但是在军用和航空航天领域的高低温、低气压等恶劣环境下,由于无铅焊点的蠕变较大,造成比含铅焊点的可靠性差很多。

5. 焊点形态。焊点形态参数主要有焊点几何形状、焊点高度、焊点间距等,不同的参数对其产生的应力应变值差别很大,从而导致了焊点的热疲劳寿命差异较大。

1.3.3 焊点可靠性工程

由于电子封装 SnPb 焊点可靠性问题的重要性,现在在电子封装技术领域,提出了焊点可靠性工程的概念,其内涵包括:可靠性设计,可靠性测试和数据分析以及失效分析。

焊点的可靠性研究目的有两个:首先要研究在焊接及焊点服役过程中,哪些因素会影响焊点的可靠性,从而给焊接工艺和焊点的设计提供依据;其次是研究焊点在服役过程中的变化规律,从而找到焊点寿命的疲劳预测方法。目前,国内外关于电子封装 SnPb 焊点可靠性研究主要集中在以下方面。

1. 研究和预测电子封装 SnPb 焊点热循环可靠性的基础理论和测试技术。包括焊点在热循环下寿命预测方法、在热循环下的失效机制以及焊点可靠性的加速实验方法等。

2. SnPb 焊料合金的研究。包括研制和开发高可靠性焊料合金,改进 SnPb 焊料的力学本构方程等。目前,通过往 SnPb 焊料中添加合金元素(如 Cu, Ag, In 等)或稀土使材料改性,研究开发出了多种新的 SnPb 焊料合金,在一定程度上提高了焊点在热循环下的可靠性。

3. SnPb 焊点应力应变分析。在热循环过程中,周期性的应力应变导致了焊

点的失效,而分析 SnPb 焊点的应力应变为合理地进行焊点寿命预测提供了依据。

4. 焊点失效分析。实际焊点失效过程一般为:塑性变形—裂纹萌生—裂纹扩展—失效。从焊点经受的实际温度来看,焊点发生了蠕变变形;从器件频繁开关或环境温度波动来看,由于焊点热膨胀系数不匹配,焊点经受了热循环冲击。因而有学者分别从疲劳失效和蠕变失效的角度去建立模型。

焊点在热循环条件下的热应力应变,可以通过试验研究和理论计算两种途径来完成:

1. 试验研究需要高精度的测试设备和制作特定的测试样件。目前主要采用多种方法(如应变计、激光全息、光栅云纹等)对焊点热循环过程的应力应变进行测量,但是现有的测试技术还只能提供平均的或表面(断面)的测量结果。

2. 理论计算在微电子封装的可靠性分析中是最常用的一种方法。而有限元方法(Finite Element Methods, FEM)是评价焊点可靠性和进行理论研究的有效方法。通过有限元模拟可以得到新产品或新设计的可靠度资料,从而可以节省大量的开发成本,及缩短产品的开发周期,可以对故障机理有更深入的了解。

1.4 国内外研究现状

封装器件在高低温工作环境及温度多次循环作用下引起的损伤与破坏现象,以及热应力应变可靠性分析研究是国内外微电子封装界的一个主要关注的问题。国内外研究发展现状如下:

清华大学做此方面的课题时建立了循环交互模型(物理模型),他们认为封装焊点的热循环中主要存在循环损伤和蠕变损伤(包括应力松弛)。在一定条件下,两种损伤交互作用,蠕变会加速循环裂纹的形成和扩展,而循环开裂造成的损伤又促进了蠕变的进展,这种交互作用会加剧损伤,使循环寿命大大减少^[6]。陈国海,马营生^[7]等采用激光云纹干涉法,测量了不同热循环规范下焊点内的残余应变分布及最后失效的焊点内最大的累积残余应变,结果表明:材料热膨胀系数的不匹配导致焊点中存在很大的剪切变形,而且焊点内的残余应变的分布是很不均匀的。桂林电子科技大学周德俭^[8]等研究在热循环载荷条件下,由于焊点和基板的热膨胀系数不匹配所产生的阵列对关键的焊点的热位移影响,利用非线性有限元分析,从而得到关键焊点的最大应力应变值,利用低周热疲劳寿命预测公式得到焊点的热疲劳寿命。中国科学院上海微系统与信息技术研究所张礼季,王莉,高霞^[9]等对比了填充胶和未填充胶塑料封装球栅阵列(PBGA)器件在 $-40^{\circ}\text{C}\sim 125^{\circ}\text{C}$ 温度循环条件下的热疲劳寿命,采用光学显微镜研究了失效样品焊点的失效机制,并分析了填充胶提高器件热疲劳寿命的机制。实验发现:底部填充胶可使 PBGA 样品的寿命从 500 周提高到 2000 周以上,失效样品裂纹最先萌生于最外侧

焊球靠近硅芯片界面外边缘处。国防科技大学褚卫华, 陈循^[10]等以统一型粘塑性 Anand 本构方程为基础, 采用非线性有限元方法研究了热循环试验过程中高温端点温度、温度升降速率、高温保持时间对 Sn63Pb37 焊点应力分布和塑性应变的影响, 并结合基于塑性应变的疲劳寿命预测 Coffin-Masson 公式, 分析了热循环试验效率与这些参数之间的关系。

Hall^[11]在陶瓷基板与印刷电路板的末端焊接上 Sn60Pb40 成分的锡铅合金, 以此模型做为简易的封装体模型, 导出当封装体承受温度循环负载时力、力矩与位移的公式。而 Lau^[12]利用 Hall 的实验模型, 建立有限元素分析模型, Lau 以有限元素分析结果与 Hall 实验中的结果做比较。Lau^[13]指出电子封装破坏大致可分为下列三项: 1. 芯片破裂, 由于不恰当的晶圆切割造成芯片边缘的缺陷, 在芯片受到大应力时产生断裂现象。2. 脱层, 一般电子封装所采用的基板材料 FR-4 属于易吸湿材质, 若在高湿度的环境中, 吸收了大量的水气, 则在温度升高时, 会因水分急速蒸发而造成基板裂开。3. 锡球破裂, 这是导因于周期性的热负载, 加上锡球因蠕变而产生的应力与应变不断积, 最后因疲劳失效而破裂。Pao^[14]等人利用氧化铝与铝合金于两板的末端焊接上 Pb90Sn10 的锡铅合金进行温度循环实验, 利用实验所获得数据, 导出锡焊接点部分所承受的力量、剪应力与上下两板的位移, 并且使用有限元素方法仿真双层板承受温度负载下的应力/应变行为, 将实验结果与有限元分析仿真的结果做比对, 结果显示, Pao 的解析解与有限元素仿真的结果基本相符。

1.5 本文所要研究的内容

到目前为止, 人们对 BGA 焊点的热应力分析进行了大量的研究, 但在实际应用中还存在一定的局限性, 大多数研究者主要考虑的是处于温度循环荷载作用下的焊点, 对在实际工作中会散发热量的功率芯片下焊点的热应力研究还很少见。本文运用 ANSYS 有限元软件先对功率芯片的热分布进行了仿真, 并把得到的温度作为荷载施加给封装体, 求解其所受热应力状态。同时, 本文也对温度循环荷载作用下的焊点热应力进行了研究, 与前一种情况进行对比。此外, 大多数的研究者在建立的模型中假设材料属性是等方向性的、弹性的和不依赖时间变化的, 本文在假设除焊点外的其他材料属性都为线弹性外, 还假设基板材料属性是随温度而变化的。

本文第一章绪论部分主要对电子封装的发展现状做了简要的介绍, 对电子封装失效进行了综述, 对国内外研究进展进行了总结。

第二章主要介绍了文中所涉及到的理论, 包括温度场理论, 热应力理论, 用于非线性计算的牛顿-辛普森法则, 以及疲劳寿命预测理论。

第三章对材料性质进行了介绍，分析了简易焊点在温度上升情况下的应力。

第四章为数值模拟，利用 ANSYS 软件并结合 APDL 语言建立了三维 BGA 封装模型，计算内部有热源情况下封装体的温度场分布，再将温度作为体载荷加载到封装体上，计算其热应力应变情况；对温度循环荷载作用下的模型进行了仿真，分析其应力应变情况，并计算了其疲劳寿命。

第五章总结本文工作，并对未来所要做的工作进行了展望。

第二章 理论基础

2.1 温度场理论

物质的热胀冷缩现象是人们早已熟知的,工程中的许多结构和部件常常在温度变化的情况下工作。如果由于受到结构或部件的外部或内部约束的限制,使得温度变化而产生的胀缩不能自由进行,那么这些结构或部件内将产生热应力。因此,要研究物体的热应力就必须首先知道物体中的温度场。温度场是指某一瞬间,空间(或物体内部)中所有各点温度分布的总称。温度场是个数量场,可以用一个数量函数来表示。一般说,温度场是空间坐标和时间的函数^[1]:

$$T = f(x, y, z, t) \quad (2-1)$$

式中, x, y, z 为空间直角坐标, t 为时间。为了确定物体内的温度场,必须建立起温度场的通用方程,也就是导热微分方程。建立导热微分方程所用的方法为能量守恒的方法,即定义一个微分控制体积,判明有关的能量传递过程,并对微元控制体列出能量平衡方程,从而得出导热微分方程:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_v \quad (2-2)$$

式中, T 为温度($^{\circ}\text{C}$), k 为材料的导热系数($\text{W}/\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C}$), t 为过程进行的时间(s), c 为材料的比热容($\text{J}/\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$), ρ 为材料的密度(kg/m^3), q_v 为内热源的发热率(W/s),如果物体无内热源微分方程则变为:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2-3)$$

整个微分方程的意义即为单位时间内进入单位体积的热量必然等于单位时间该单位体积内物质的内能增量。在再流焊过程中,式(2-2)中, ρ 、 c 和 k 是材料的密度、比热容和热导率,它们是温度的函数,其值随温度的变化而不同。物体中的温度场的确定还依赖于热传递问题(包括传热方式有热传导,热对流,热辐射等)的解决。

2.1.1 热传递的基本方式

1. 热传导

热传导可以定义为完全接触的两个物体之间或一个物体的不同部分之间由于

温度梯度而引起的内能的交换。热传导遵循傅立叶定律^[15]:

$$q'' = -k \frac{dT}{dx} \quad (2-4)$$

式中 q'' 为热流密度(W/m^2),

k 为导热系数($W/m \cdot ^\circ C$),

“-”表示热量流向温度降低的方向。

2. 热对流

热对流是指固体的表面与它周围接触的流体之间, 由于温差的存在引起的热量的交换。热对流可以分为两类: 自然对流和强制对流。热对流用牛顿方程来描述: $q'' = h(T_s - T_b)$, 式中 h 为对流换热系数(或称膜传热系数、给热系数、膜系数等), T_s 为固体表面的温度, T_b 为周围流体的温度。

3. 辐射

热辐射指物体发射电磁能, 并被其它物体吸收转变为热的热量交换过程。物体温度越高, 单位时间辐射的热量越多。热传导和热对流都需要有传热介质, 而热辐射无须任何介质。实质上, 在真空中的热辐射效率最高。在工程中通常考虑两个或两个以上物体之间的辐射, 系统中每个物体同时辐射并吸收热量。它们之间的净热量传递可以用斯蒂芬-波尔兹曼方程来计算^[15]:

$$q = \varepsilon \sigma A_1 F_{12} (T_1^4 - T_2^4) \quad (2-5)$$

式中, q 为热流率, ε 为辐射率(黑度), σ 为斯蒂芬-波尔兹曼常数, 约为 $5.67 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$, A_1 为辐射面 1 的面积, F_{12} 为由辐射面 1 到辐射面 2 的形状系数, T_1 为辐射面 1 的绝对温度, T_2 为辐射面 2 的绝对温度。由上式可以看出, 包含热辐射的热分析是高度非线性的。

2.1.2 初始条件和边界条件

要求解瞬态温度场不仅要给定边界条件, 还要给出初始条件, 这样才能由通解中找出具体的特解。

1. 初始条件

初始条件是初始时刻温度场的分布状况, 一般情况下:

$$T|_{t=t_0} = T(x, y, z) \quad (2-6)$$

若在初始时刻, 温度场内温度处处相同, 则初始条件为:

$$T|_{t=t_0} = T_0 \quad (2-7)$$

2. 边界条件

边界条件描述的是温度场在边界上的状况。边界条件通常分为以下三种类型。

(1) 第一类边界条件(刚性边界条件)

若温度场某部分边界 S_1 上的任意点处各个时刻的温度已知, 则这样的边界条件叫做第一类边界条件, 可表示为^[15]:

$$T(M, t) \Big|_{M \in S_1} = \varphi(M, t) \quad (2-8)$$

式中 $T(M, t)$ 为 t 时刻 M 点的温度($^{\circ}\text{C}$),

$\varphi(M, t)$ 为边界上给定的已知函数,

M 为边界 S_1 的点, S_1 是边界的一部分。

这种边界条件相当于弹性力学中已知位移边界, 所以叫刚性边界。

(2) 第二类边界条件(自然边界条件—传导边界)

若温度场的某部分边界 S_2 上任一点处, 各个时刻的法向传导热流强度

$$q_{s_2}(M, t) \text{ 已知, 则由傅立叶假设 } q = \frac{dQ}{dA} = -K \frac{\partial T}{\partial n} n$$

$$k_n \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{M \in S_2} = q_{s_2}(M, t) \quad (2-9)$$

式中 k_n 为沿边界法线方向的导热系数,

$\frac{\partial T}{\partial n}$ 为温度场沿边界法线方向的梯度值,

M 为边界 S_2 上的点, S_2 是边界的一部分。

在绝热边界上, $q_{s_2}(M, t) = 0$, 有

$$\frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{M \in S_2} = 0 \quad (2-10)$$

(3) 第三类边界条件(自然边界条件—对流和辐射边界)

1) 对流边界条件

若温度场的某部分边界 S_c 上任一点处, 各个时刻的对流条件已知(如对流系数 h , 流体温度 T_e 等), 则由牛顿公式 $q_c = h(T_e - T_s)n$, 可得从周围介质导入温度场内的热流强度为

$$q_{s_c}(M, t) = h(T_e - T_s) \quad (2-11)$$

式中 $q_{s_c}(M, t)$ 为从周围介质导入温度场内的热流强度,

h 为对流系数($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$),

T_e 为周围流体的温度,

T_s 为温度场边界 S_c 部分的温度($^{\circ}\text{C}$)。

据傅立叶假设, 热流强度又与温度梯度成正比, 所以在边界 S_c 上应有

$$k_n \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{M \in S_c} = q_{s_c}(M, t) = h(T_e - T_s) \quad (2-12)$$

2) 辐射边界条件

若温度场某部分边界 S_r 上任一点处, 各个时刻的辐射条件已知(如两物体黑度

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$, 形状因子 f 、斯蒂芬—波尔兹曼常量 σ 、辐射体温度 T_r 等等), 则由斯蒂芬—波尔兹曼定律 $q = \varepsilon \sigma A_1 F_{12} (T_1^4 - T_2^4)$ 得到温度场边界 S_r 上所受的辐射热流强度^[15]为

$$q_{S_r}(M, t) = \varepsilon f \sigma (T_r^4 - T_{S_r}^4) \quad \varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_{S_r} \quad (2-13)$$

式中 $q_{S_r}(M, t)$ 为周围物体向温度场辐射的热流强度,

ε_r 为辐射物体表面黑度, ε_{S_r} 为计算温度场的物体 S_r 边界处的黑度,

f 为形状因子, 由辐射物体和计算温度场的物体的形状和尺寸而定,

σ 为斯蒂芬—波尔兹曼常量, 查表而得,

T_r 为辐射物体的温度($^{\circ}\text{C}$),

T_{S_r} 为计算温度场的物体边界 S_r 处的温度($^{\circ}\text{C}$)。

据傅立叶假设, 在边界 S_r 上应有^[15]

$$k_n \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{M \in S_r} = q_{S_r}(M, t) = \varepsilon f \sigma (T_r^4 - T_{S_r}^4) \quad (2-14)$$

上式也可写成如下形式

$$k_n \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{M \in S_r} = \hbar (T_r - T_{S_r}) \quad (2-15)$$

式中 $\hbar = \varepsilon f \sigma (T_r^2 + T_{S_r}^2)(T_r + T_{S_r})$

求解温度场可采用多种方法^[15], 一般分为两大类, 一类是精确解法, 即用分析方法求精确解的方法; 另一类是近似解法, 即用数值计算方法、图解法、电热模拟或水热模拟法等求近似解的方法。以数学分析为基础, 得到以函数形式表示的解为解析解, 即精确解。该解法的优点是, 在整个求解过程中物理概念与逻辑推理都比较清晰, 最后结果也比较清楚地表示出各种因素对温度场的影响, 同时还可用解析解作为其它方法, 特别是数值解法精确度的检验。精确解法虽有不少优点, 但它只适用于比较简单的问题, 对于较为复杂的情况, 如几何形状不规则, 材料的物理参数随温度变化, 边界条件复杂等问题, 解析法就无能为力, 而必须用数值法求近似解。数值法是以离散数学为基础, 以计算机为工具的方法。在热分析方面主要有有限差分法和有限元法。本文主要采用有限元法求解温度场。

用有限元法求解温度场有两种方式, 一是用加权残数法推导出有限元公式; 二是人为地造出一个温度场的泛函, 然后用变分法去推导有限元公式^[16]。

2.1.3 温度场的泛函表达式

1. 温度场的导热微分方程, 边界条件和初始条件

为了用变分法去推导有限元公式, 首先必须人为地创造出一个温度场的泛函表达式。该泛函表达式必须包括导热微分方程, 边界条件和初始条件的全部内容。为了创造这个泛函, 首先将导热微分方程, 初始条件和边界条件规范化, 即^[16]

$$\frac{\partial}{\partial x}(k \frac{\partial t}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k \frac{\partial t}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(k \frac{\partial t}{\partial z}) = -q_B \quad (2-16)$$

如果材料导热各向异性, 则上式可变为^[16]

$$\frac{\partial}{\partial x}(k_x \frac{\partial t}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k_y \frac{\partial t}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(k_z \frac{\partial t}{\partial z}) = -q_B \quad (2-17)$$

$$k_n \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{M \in S_c} = h(T_e - T_{S_c}) \quad (\text{对流边界上}) \quad (2-18)$$

$$k_n \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{M \in S_r} = \hbar(T_r - T_{S_r}) \quad (\text{辐射边界上}) \quad (2-19)$$

$$k_n \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{M \in S_2} = q_{S_2}(M, t) \quad (\text{传导边界上}) \quad (2-20)$$

$$T(M, t) \Big|_{M \in S_1} = \varphi(M, t) \quad (\text{给定温度的边界上}) \quad (2-21)$$

$$T \Big|_{t=t_0} = T(x, y, z) \quad (\text{初始条件}) \quad (2-22)$$

当求稳态场时, $q_B = q_v$, 瞬态场时 $q_B = q_v - \rho c \frac{\partial t}{\partial \tau}$ 。

根据上述各式, 现造一个泛函^[16]如下:

$$\begin{aligned} \Pi = & \int_V \frac{1}{2} \{ k_x (\frac{\partial T}{\partial x})^2 + k_y (\frac{\partial T}{\partial y})^2 + k_z (\frac{\partial T}{\partial z})^2 \} dV - \int_{S_c} h(T_e T_s - \frac{1}{2} T_s^2) dS \\ & - \int_{S_r} \varepsilon f \sigma (T_r^4 T_s - \frac{1}{5} T_s^5) dS - \int_{S_2} T_s q_{S_2} dS - \int_V T q_B dV \end{aligned} \quad (2-23)$$

其中, T 为物体内部的温度, T_s 为物体表面边界温度, 它们都是待求的量。

2. 温度场的变分表达式

对式(2-18)进行变分运算并取极值, 有 $\delta \Pi = 0$, 即^[16]

$$\begin{aligned} & \int_V \{ k_x \frac{\partial T}{\partial x} \delta(\frac{\partial T}{\partial x}) + k_y \frac{\partial T}{\partial y} \delta(\frac{\partial T}{\partial y}) + k_z \frac{\partial T}{\partial z} \delta(\frac{\partial T}{\partial z}) \} dV \\ & - \int_{S_c} h(T_e - T_s) \delta T_s dS - \int_{S_r} \hbar(T_r - T_s) \delta T_s dS \\ & - \int_{S_2} q_{S_2} \delta T_s dS - \int_V q_B \delta T dV = 0 \end{aligned} \quad (2-24)$$

将式中第一项用矩阵形式表示, 变为^[16]

$$\begin{aligned} & \int_V T^T K T dV - \int_{S_c} h(T_e - T_s) \delta T_s dS - \int_{S_r} \hbar(T_r - T_s) \delta T_s dS \\ & - \int_{S_2} q_{S_2} \delta T_s dS - \int_V q_B \delta T dV = 0 \end{aligned} \quad (2-25)$$

式中 $T' = (\frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial z})^T$,

$$K = \begin{pmatrix} k_x & 0 & 0 \\ 0 & k_y & 0 \\ 0 & 0 & k_z \end{pmatrix}, K \text{ 称为传热系数矩阵。}$$

3. 推导有限元方程

(1) 离散求解域

对于一温度场域, 可将它离散成 n 个单元, 此时上边的变分式变为^[16]:

$$\delta \Pi = \sum_{i=1}^n \delta \Pi_i = 0 \quad (2-26)$$

式中, $\delta \Pi_i$ 是单元的变分式。

(2) 选取单元的温度函数(插值函数)

可设温度函数^[16]为

$$T = NT_i \quad (2-27)$$

式中, T 为单元内任一点的温度, 对稳态场 $T = f(x, y, z)$, 瞬态 $T = f(x, y, z, t)$, N 为单元插值函数, 即单元形函数, T_i 为单元节点温度列阵。

(3) 推导有限元方程

由上式得

$$T' = BT_i \quad (2-28)$$

式中 $B = (N_x' N_y' N_z')^T$

将(2-23)代入(2-21), 有

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^n \{ \delta T_i^T \int_{V_e} B^T K B T_i dV - \delta T_i^T \int_{S_e} (N^T h T_e - N^T h N T_i) dS \\ & - \delta T_i^T \int_{S_r} (N^T h T_r - N^T h N T_i) dS - \delta T_i^T \int_{S_2} N^T q_{s_2} dS - \delta T_i^T \int_{V_e} N^T q_B dV \} = 0 \end{aligned} \quad (2-29)$$

将(2-24)按已知温度项和未知温度项加以整理, 有

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^n \delta T_i^T \int_{V_e} B^T K B T_i dV T^e + \sum_{i=1}^l \delta T_i^T \int_{S_e} N^T h N dS T^e + \sum_{i=1}^p \delta T_i^T \int_{S_r} N^T h N dS T^e \\ & = \sum_{i=1}^l T_i^T \int_{S_e} N^T h T_e dS + \sum_{i=1}^p \delta T_i^T \int_{S_r} N^T h T_r dS \\ & + \sum_{i=1}^l \delta T_i^T \int_{S_2} N^T q_{s_2} dS + \sum_{i=1}^n \delta T_i^T \int_{V_e} N^T q_B dV \end{aligned} \quad (2-30)$$

等式左边各项都含有欲求的未知温度。左边第一项, $\sum_{i=1}^n$ 表示温度场内全部(n 个)单元进行积分后的和, 每个单元的节点温度列阵 T_i 总和起来将构成整个温度场

的节点温度列阵 T ，体积分 $\int_V (\cdot) dV$ 为单元热传导矩阵 K_{ir} ，全部单元的 K_{ir} 总和起来将构成整个温度场的热传导矩阵 K_T 。

左边第二项， $\sum_{i=1}^r$ 表示对温度场的 r 个对流边界单元求和，这里的 T_i 仅是对流边界单元的节点温度列阵， $\int_{S_c} (\cdot) dS$ 仅在对流边界单元的边界面上进行积分运算，构成单元对流矩阵 K_{ic} 。

左边第三项， $\sum_{i=1}^p$ 表示对温度场的 p 个辐射边界单元的求和，这里的 T_i 仅是辐射边界单元的节点温度列阵， $\int_{S_r} (\cdot) dS$ 仅在辐射边界单元的边界面上进行积分运算，构成单元辐射矩阵 K_{ir} 。

等式右边各项都是已知的，称为节点热流矢量。第一项 $\int_{S_c} (\cdot) dS$ 是由对流给温度场的节点热流矢量 R_{ic} ，只作用在对流边界节点上，第二项 $\int_{S_r} (\cdot) dS$ 是由辐射给温度场的节点热流矢量 R_{ir} ，只作用在辐射边界节点上，第三项 $\int_{S_2} (\cdot) dS$ 是由热传导给温度场的节点热流矢量 R_{is} ，只作用在传导边界节点上。

右边第四项分两种情况：

当 T 为稳态场时， $q_B = q_v$ ， $\int_V N^T q_B dV = \int_V N^T q_v dV$ 是由内部热源产生的节点热流矢量 R_{ib} 。

当 T 为瞬态场时， $q_B = q_v - \rho C \frac{\partial T}{\partial t}$ ，

$$\int_V N^T q_B dV = \int_V N^T q_v dV - \int_V N^T \rho c N dV \dot{T}_i \quad (2-31)$$

式中，右边第一项就是 R_{ib} ，而第二项 $\int_V N^T \rho c N dV$ 构成单元热容矩阵 C_{ir} ， \dot{T}_i 是节点温升速率列阵。 $C_{ir} \dot{T}_i$ 是由温升产生的节点热流矢量 R_{irc} 。

综上所述，可以把(2-25)式写成如下形式：

稳态场： $T = T(x, y, z)$ ，有限元方程为：

$$KT = P \quad (2-32)$$

式中， K 由 K_T ， K_{ic} ， K_{ir} 构成， P 由 R_{ic} ， R_{ir} ， R_{is} ， R_{ib} 构成。

瞬态场为 $T = f(x, y, z, t)$ ，其有限元方程为

$$C_T \dot{T} + KT = P \quad (2-33)$$

式中， C_T 由 C_{ir} 构成，其余两项除了 T ， P 与时间有关外，与式(2-27)相同。

2.2 热应力理论

单有温度的变化,不一定会在物体内产生热应力,只有当温度变化所引起的膨胀或收缩受到约束时,才会在物体内产生应力。这种无外力作用而是由于温度变化引起的热变形受到约束所产生的应力,称为热应力或温度应力^[17]。另一种情况是,在同一物体内部,如果温度的分布是不均匀的,虽然物体不受外界约束,但由于各处的温度不同,每一部分因受到不同温度的相邻部分的影响,不同自由伸缩,也会在内部产生热应力。

还有一种情况,构件是由若干不同材料的零件组合起来的,即使构件受到相同的加热或者冷却,但由于各种零件的膨胀系数不同,或由于膨胀方式不同,造成零件相互之间的制约,不能自由胀缩,从而各自产生不同的热应力。本文所研究的 BGA 焊点就是这种情况。BGA 焊点连接 PCB 板和芯片基板,它们的热膨胀系数不同,但它们是焊接成一体的,因而彼此间相互约束,所以两两之间均产生一定的热应力。

2.2.1 热弹性理论基本方程

比较复杂的热应力问题需要用热弹性理论来求得解答。热弹性理论与一般弹性理论类似,也是从静力学、几何学和物理学三方面出发,来考虑建立基本方程。从静力学出发建立的平衡方程与无温度改变的一般弹性理论的方程完全相同,如下式所示^[17]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + X = 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + Y = 0 \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + Z = 0 \end{array} \right. \quad (2-34)$$

其中式中的应力分量包括温度改变引起的热应力。热弹性理论的几何方程的形式也与一般热弹性理论中的方程一样,如式(2-35)所示。几何方程的形式之所以不变,是因为几何方程反映的是应变与位移之间的纯粹几何关系。只要保证弹性体变形连续,必然会得到这 6 个几何方程,它不会随应力引起应变的原因不同而不同(过去只有外力,现在增加了温度变化)。这里的应变和位移是由应力和温度变化两方面原因共同引起的,因此热弹性理论的物理方程与等温情况(即无温度变化改变的情况)不同。应变中由应力引起的那一部分仍服从胡克定律,与等温情况一样,而由于温度变化直接引起的另一部分应变,则服从热膨胀规律,即

$\varepsilon = \alpha(t_1 - t_0) = \alpha t$ 。由于假设物体是各向同性并且是均匀的，所以热弹性理论的物理方程^[17]为式(2-36)。

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \\ \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \\ \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \\ \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \gamma_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \\ \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \end{array} \right. \quad (2-35)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)] + \alpha T \\ \varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_z)] + \alpha T \\ \varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_y + \sigma_x)] + \alpha T \\ \gamma_{xy} = \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{xy} \\ \gamma_{xz} = \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{xz} \\ \gamma_{yz} = \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{yz} \end{array} \right. \quad (2-36)$$

热弹性理论的物理方程还有另一种形式，即用应变表示应力的形式^[17]，如式(2-37)所示。

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_x = \lambda e + 2G\varepsilon_x - \beta T \\ \sigma_y = \lambda e + 2G\varepsilon_y - \beta T \\ \sigma_z = \lambda e + 2G\varepsilon_z - \beta T \\ \tau_{xy} = G\gamma_{xy} \\ \tau_{xz} = G\gamma_{xz} \\ \tau_{yz} = G\gamma_{yz} \end{array} \right. \quad (2-37)$$

式中 λ 、 G 为拉梅系数， β 为热应力系数。

$$\lambda = \frac{E\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}$$

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}$$

$$\beta = \frac{E\alpha}{1-2\mu} = (3\lambda + 2G)\alpha$$

求解热弹性理论的基本方程的方法有应力法(选应力分量为基本未知量)和位移法(选位移分量为基本未知量)。热弹性理论位移法的基本方程^[17]为

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial e}{\partial x} + G\nabla^2 u - \beta \frac{\partial T}{\partial x} + X = \rho \left(\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \right) \\ (\lambda + G) \frac{\partial e}{\partial y} + G\nabla^2 v - \beta \frac{\partial T}{\partial y} + Y = \rho \left(\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \right) \\ (\lambda + G) \frac{\partial e}{\partial z} + G\nabla^2 w - \beta \frac{\partial T}{\partial z} + Z = \rho \left(\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \right) \end{array} \right. \quad (2-38)$$

位移法的位移边界条件:

$$\left\{ \begin{array}{l} u|_s = \bar{u} \\ v|_s = \bar{v} \\ w|_s = \bar{w} \end{array} \right. \quad (2-39)$$

2.2.2 热应力的有限元方程

同温度场的有限元方法一样,有限元的基本观点出自这样一种假定,即将连续体分割成有限个单元,并且近似地认为连续体是由有限个单元通过节点连接起来的集合体。在应力分析中,则可根据一个单元所受的外力极其位移来确定这个单元的势能。如对所有的单元,将其势能叠加起来,则可得到连续体的全部势能。当该连续体处于静力平衡状态时,势能取最小值,这就是所谓最小势能原理。因此,若给出各单元的外力和位移的关系,根据最小势能原理,就可求出各节点的位移。这种方法称为位移法。

如果物体各部分的热变形不受任何约束时,则物体上有变形而不引起应力。但是,物体由于约束或各部分温度变化不均匀,热变形不能自由进行时,则在物体中产生应力。物体由于温度变化而引起的应力称为“热应力”或“温度应力”。当弹性体的温度场已经求得时,就可以进一步求出弹性体各部分的热应力^[18]。

物体由于热膨胀只产生线应变,剪切应变为零。这种由于热变形产生的应变可以看作是物体的初应变。计算热应力时只需算出热变形引起的初应变 ε_0 ,求得相应的初应变引起的等效节点载荷 P_{ε_0} (简称温度载荷),然后按通常求解应力一样解得由于热变形引起的节点位移 a ,然后可以由 a 求得热应力 σ 。也可以将热变形引起的等效节点载荷 P_{ε_0} 与其他载荷项合在一起,求得包括热应力在内的综合应力。

计算应力时应包括初应变项^[18]：

$$\sigma = D(\varepsilon - \varepsilon_0) \quad (2-40)$$

式中， D 为单元材料弹性常数所确定的弹性矩阵， ε_0 为温度变化引起的温度应变，它现在是作为初应变出现在应力应变关系式中。对于三维问题是

$$\varepsilon_0 = \alpha(\phi - \phi_0) [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (2-41)$$

式中， α 为材料的线膨胀系数， ϕ 为结构的现时温度场， ϕ_0 为结构的初始温度场。

将(2-41)式带入虚位移原理^[18]的表达式(2-42)

$$\int_V (\delta \varepsilon^T \sigma - \delta u^T \bar{f}) dV - \int_{S_\sigma} \delta u^T \bar{T} dS = 0 \quad (2-42)$$

可得到包含温度应变在内，用以求解热应力问题的最小位能原理，它的泛函表达式^[18]如下：

$$\Pi_p(u) = \int_\Omega \left(\frac{1}{2} \varepsilon^T D \sigma - \varepsilon^T D \varepsilon_0 - u^T f \right) d\Omega - \int_{\Gamma} u^T \bar{T} d\Gamma \quad (2-43)$$

将求解域 Ω 进行有限元离散，从 $\Pi_p(u) = 0$ 可得到有限元求解方程

$$Ka = P \quad (2-44)$$

式中， K 为单元节点力矩阵， a 为节点位移， P 为节点温度载荷。

与不包括温度应变的有限元求解方程相区别的是载荷向量中包括由温度应变引起的温度载荷。即

$$P = P_f + P_T + P_{\varepsilon_0} \quad (2-45)$$

其中， P_f ， P_T 为体积载荷和表面载荷引起的载荷项， P_{ε_0} 为温度应变引起的载荷项：

$$P_{\varepsilon_0} = \sum_e \int_\Omega B^T D \varepsilon_0 d\Omega \quad (2-46)$$

2.3 牛顿-辛普森法则

本文的非线性材料可利用牛顿-辛普森法(Newton-Raphson Method)非线性迭代方程来求解，其分析过程如下：

1. 非线性问题有限单元法基本公式^[19]如式(2-42)所示

$$[K(u)]\{u\} = \{F^a\} \quad (2-47)$$

式中 $[K(u)]$ 为系数矩阵为未知函数，

$\{u\}$ 为未知数向量，

$\{F^a\}$ 为施加荷载向量。

对此非线性问题通常无法直接求解方程组，因此必须采用迭代法求解。

2. 在迭代求解过程中，除非数值已经收敛，否则式(2-47)将不成立，因此可假设一残留向量 $\{R\}$ ^[19] 存在

$$\{R\} \equiv [K]\{u\} - \{F^a\} = \{F^r\} - \{F^a\} \equiv \{0\} \quad (2-48)$$

式中 $\{F^r\}$ 为施加荷载向量。

3. 将 $\{R\}$ 对 $\{u_i\}$ 取泰勒级数，展开可得^[19]

$$\{0\} = \{R\} = \{R_i\} + \left(\frac{\partial \{R\}}{\partial \{u\}} \right)_i (\{u_{i+1}\} - \{u_i\}) + \frac{1}{2!} \left(\frac{\partial^2 \{R\}}{\partial \{u\}^2} \right)_i (\{u_{i+1}\} - \{u_i\})^2 + \dots \quad (2-49)$$

式中 i 为循环数。

式(2-49)也可写成^[19]

$$\{0\} = \{R_i\} + [K_i^T](\{\Delta u_i\}) + o(\{\Delta u_i\})^2 \quad (2-50)$$

式中 $[K_i^T]$ 为切线矩阵 $\equiv \left(\frac{\partial \{R\}}{\partial \{u\}} \right)_i$

$\{\Delta u_i\}$ 为增量解 $= \{u_{i+1}\} - \{u_i\}$

$o(\{\Delta u_i\})^2$ 为非线性项 $\equiv \frac{1}{2!} \left(\frac{\partial^2 \{R\}}{\partial \{u\}^2} \right)_i (\{u_{i+1}\} - \{u_i\})^2 + \dots$

将式(2-50)中保留线性项可得

$$\{0\} = \{R_i\} + [K_i^T](\{\Delta u_i\}) \quad (2-51)$$

并将式(2-47)代入可得

$$\{\Delta u_i\} = -[K_i^T]^{-1} \{R_i\} = [K_i^T]^{-1} (\{F^a\} - [K]\{u_i\}) \quad (2-52)$$

引用式(2-48)可得

$$[K_i^T]\{\Delta u_i\} = \{F^a\} - \{F_i^r\} \quad (2-53)$$

$$\{\Delta u_i\} = \{u_{i+1}\} - \{u_i\} \quad (2-54)$$

式中 $[K_i^T]$ 为第 i 次迭代的切线矩阵

$\{u_i\}$ 为第 i 次迭代的位移向量

$\{u_{i+1}\}$ 为第 $i+1$ 次迭代的位移向量

$\{F^a\}$ 为施加荷载向量

$\{F_i^r\}$ 为第 i 次迭代的内部荷载向量

4. 在牛顿-辛普森法求解过程中，由于每一次迭代都需要重新形成及求得新的切线矩阵，故具有良好的收敛性，其非线性方程式迭代计算过程如下^[19]：

(1) 以一个自由度模型的迭代计算为例，如图 2.1 所示， u_i 已知。

(2) 计算更新的 K_i^T 和 F_i^r ，再由图可知， K_i^T 为第 i 次荷载-位移曲线的切线斜率。

(3) 由(2-53)式计算 $\{\Delta u_i\}$ 。

(4) 将 $\{\Delta u_i\}$ 加入 u_i 即可求得第 $i+1$ 次的解即为 u_{i+1} ，至此完成第 $i+1$ 次循环。

(5) 接着再求第 $i+2$ 次迭代的解 u_{i+2} ，其求解方法重复步骤 2~4，如图 2.2 所示，迭代运算至收敛为止。

(6) 然后再进入下一个荷载的迭代计算，如此可获得非线性荷载-位移曲线解，如图 2.3 所示。

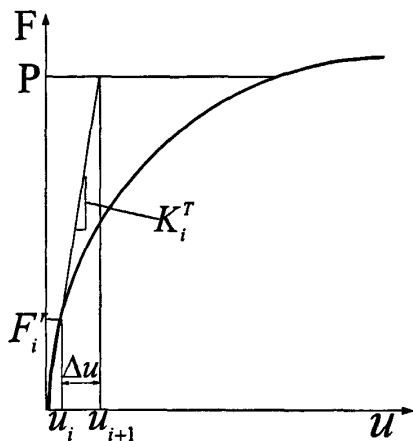


图 2.1 牛顿-辛普森法第 i 次迭代计算过程

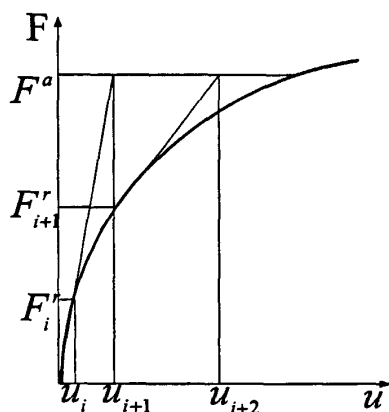


图 2.2 牛顿-辛普森法第 $i+1$ 次迭代计算过程

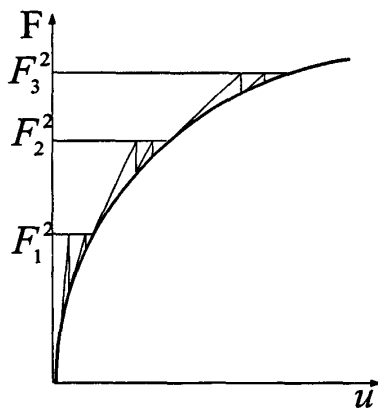


图 2.3 牛顿-辛普森法施加荷载迭代计算过程

5. 牛顿-辛普森法除了上述以位移方式收敛外，即

$$\|\{\Delta u_i\}\| < \varepsilon_u u_{ref} \quad (2-55)$$

还可以采用受力方式收敛^[19]，即

$$\|\{R\}\| < \varepsilon_R R_{ref} \quad (2-56)$$

式中 $\|\cdot\|$ 为向量范数， ε_u 、 ε_R 为容许误差， u_{ref} 、 R_{ref} 为参考值

2.4 疲劳寿命预测理论

通过寿命预测模型,可利用有限元模拟的结果预测出封装组件的寿命。在微电子封装的设计和研发阶段,分析者对封装设计构造和循环加载条件引起的失效比较感兴趣。这需要利用寿命预测方法把有限元解的结果转换成焊接连接层失效的循环数。针对封装组件来说,依照不同的破坏信息,可将寿命预测模型主要分成五类:以应力为基础、以塑性变形为基础、以蠕变变形为基础、以能量为基础和以断裂参量为基础的模式。本文采用基于塑性变形的疲劳模型(Modified Coffin-Manson Equation)^[20],如式(2-57)所示。

$$N_f = \frac{1}{2} \left[\frac{\Delta\gamma_t}{2\varepsilon_f} \right]^{1/c} \quad (2-57)$$

式中 N_f 为焊点的疲劳寿命

$\Delta\gamma_t$ 为一次温度循环中,总剪应变范围

ε_f 为疲劳延展系数,约为 0.325

C 为疲劳延展指数

$$c = -0.442 - 6 \times 10^{-4} \bar{T}_s + 1.74 \times 10^{-2} \ln(1+f)$$

\bar{T}_s 为平均循环焊球温度,以 $^{\circ}\text{C}$ 表示

f 为一天内温度循环频率

本文采用的温度循环频率为 1circle/hour,其最高温、最低温为 $+125^{\circ}\text{C}$ 和 -55°C ,

故 $\bar{T}_s = 35^{\circ}\text{C}$, $f=24$,将上述两参数带入上式,最终求得 $c=-0.407$ 。

$$\text{综上可得, } N_f = 0.5 \left(\frac{\Delta\gamma_t}{0.65} \right)^{-\frac{1}{0.407}} = 0.1735 \Delta\gamma_t^{-2.457}$$

2.5 本章小结

本章主要对本文所涉及到的相关理论进行了综述,包括温度场理论、热应力理论及预测焊点寿命的理论,并对用于非线性计算的牛顿-辛普森方法进行了介绍,这些理论和方法都在下文的推导以及仿真求解过程中应用到。

第三章 材料性质及简易模型的力学分析

3.1 材料性质

在实际状况中，材料可概分为延性材料与脆性材料两种。材料在破裂前能够承受很大应变的称为延性材料，反之，若在破裂前只有些许甚至没有屈服发生的材料称为脆性材料。基本上这是根据应力-应变曲线的特性来定义的，如图 3.4 所示，当材料承受外力负载时，一开始会遵循胡克定律^[21]：

$$\sigma = E\varepsilon \quad (3-1)$$

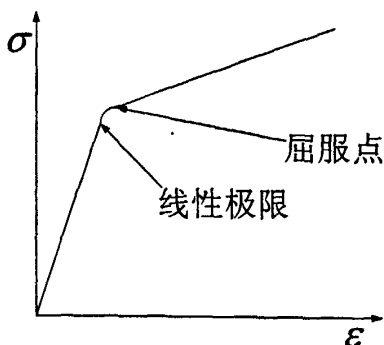


图 3.1 应力-应变曲线关系图

在到线性极限点之前，此部分为线性材料性质，其应力应变行为呈现完全线性，即当荷载移除，应变会依斜率回到原点。而自线性极限到屈服点前，其应力应变行为虽为非线性，但当荷载移除后，应变还是会依斜率回到原点，因为两点间的数值很接近，所以一般都把线性极限与屈服点当成同一点来使用。如果荷载大到使应力超过屈服点，便使得材料进入到塑性状态，在屈服点之后，材料性质已达塑性区，故当荷载移除后便会产生永久变形，此部份为非线性材料性质。

如上所述，每一种材料都可分为弹性区与塑性区两部分，但在数值模拟时，若全部材料依真实情况假设很容易造成最后结果无法收敛的情况，所以在合理的考虑下，本文把封装体的部分材料简化成线弹性材料来仿真。

3.1.1 线性材料性质

线性材料性质就是材料结构在变形时是与荷载以线性的方式变化，也就是遵循(3-1)式虎克定律变化，如图 3.1 所示，前段直线的部分即是符合虎克定律的线性材料性质， E 值便代表其斜率，称为弹性模量，也称为杨氏系数。因此，在合

理的考虑下, 本文在数值仿真分析时把硅芯片和基板材料都当成线弹性, 但为了使模拟更精准, 所以在基板部分使用随温度变化的线性材料性质, 即材料 E 值随温度变化而变化。

3.1.2 非线性材料性质

在倒装芯片中最重要的便是锡铅焊球, 它负责传递信号, 所以一旦锡铅焊球毁坏, 则整个封装体也将失去功能, 在数值分析时为了能更精准的模拟锡铅焊球的力学行为, 因此把锡铅焊球设定为非线性材料。

1. 屈服准则

目前最常用的屈服准则有两个, 一个是最大切应力理论, 一个是形状改变应变能密度理论, 也就是通常所说的第三强度理论和第四强度理论。本文采用的是 ANSYS 所内建的第四强度理论, 也称之为米塞斯(Von Mises)屈服准则^[22]。

米塞斯屈服准则认为, 在一般应力状态下, 当形状改变应变能密度达到拉伸试验中试件屈服时的形状改变应变能密度值时, 材料就屈服。

形状改变应变能密度^[22]为

$$u_d = \frac{1+\mu}{6E} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right] \quad (3-2)$$

当材料承受荷载时, 对于多轴应力而言可以用一个等效应力 σ_e ^[22] 表示, 以等效应力 σ_e 作为依据来判断材料的状态, 即 $\sigma_e = f(\{\sigma\})$, 其中 σ_e 可表示为:

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]} \quad (3-3)$$

当 σ_e 大于材料的屈服应力 σ_0 时, 材料进入塑性状态。

2. 蠕变

当材料工作温度高于本身熔点的一半时, 材料会产生一种塑性变形随时间变化的变形行为, 称之为蠕变。简而言之就是当材料在上述所提的温度下承受外力很长的一段时间时, 材料可能会连续变形直到突然破裂, 这种与时间及温度有关的永久变形即称之为蠕变^[23]。依此定义, 材料即使是在室温下, 蠕变的影响也是很重要的, 在本文中, 热循环荷载的最低温度是 298K, 而传统铅锡共晶焊料的熔点是 456K, 所以蠕变是应该要被考虑进去的。

蠕变行为是很难用数学式子去完整描述的, 因为它与太多的变量有关, 但若若要描述稳态蠕变, 目前大多数的蠕变方程式都可以充分表示。在有限元软件 ANSYS 中就内建了 13 个稳态与瞬时的蠕变方程式, 其中最常用的是 Arrhenius 方程, 用来描述锡铅焊点的行为^[24], 如式(3-4)所示:

$$\left(\frac{d\varepsilon}{dt} \right) = C_1 \left[\sinh(C_2 \sigma) \right]^{C_3} \exp \left[-\frac{C_4}{T} \right] \quad (3-4)$$

简单的说, 应变率是温度与应力的函数。在使用 ANSYS 模拟时, 只要把所需材料的以上四个常数 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 设定好即可。

3. Anand 模型

Anand 模型是 Anand 于 1982 年提出应用于粘塑性材料的理论^[25]。粘塑性材料是一种应力或应变率随时间变化的材料性质。就是当材料所承受的外力大到使材料产生塑性变形时, 塑性变形与时间相关。

对大部分材料而言, 常用的塑性理论就可以足够表示其力学行为, 但对于部分金属来说, 材料在高温下, 容易同时具有蠕变与塑性行为。Anand 在文中提到当材料的温度(绝对温度)高于本身熔点的一半时, 就必须考虑粘塑性行为。这种材料行为其实和蠕变有点类似, 但比蠕变复杂, 所以 Anand 所建构的本构方程式是以 Arrhenius 蠕变方程式为基础, 再加入阻止变形因子, 并另外再建立两条本构方程式以连接阻止变形因子与 Arrhenius 方程, 构成 Anand 本构方程式^[26]。

首先, Anand 以 Arrhenius 方程推导出式(3-5)^[26]:

$$\dot{\varepsilon}_p = A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \left[\sinh\left(\xi \frac{\sigma}{s}\right) \right]^{1/m} \quad (3-5)$$

式中, Q 为激活能, m 为应变率敏感指数, R 为气体常数, ξ 为应力乘子, ε_{eq} 为等效塑性应变变量, s 为阻止变形因子。

内部状态变量的演化方程的具体形式是^[26]:

$$\dot{s} = \left[h_0 \left| 1 - \frac{s}{s^*} \right|^\alpha \cdot \text{sign}\left(1 - \frac{s}{s^*}\right) \right] \cdot \dot{\varepsilon}_p \quad (3-6)$$

式中, s^* 表示给定温度和应变率时内部变量的饱和值, 其具体形式为^[26]

$$s^* = \hat{s} \left[\left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{A} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \right) \right]^n \quad (3-7)$$

式中, h_0 为硬化/软化常数; α 为与硬化/软化相关的应变率敏感数; \hat{s} 为参数, n 为指数。使用该模型进行预测首先要根据试验数据确定材料常数。

(3-5)~(3-7)三个式子即是 Anand 模型的本构方程, Anand 模型已经内建在 ANSYS 中, 所以在 ANSYS 中只要输入 9 个 Anand 参数即可, 9 个参数的意义如表 3.1 所示^[27]。

表 3.1 Anand 模型参数含义

| 参数 | 参数变量 | 含义 |
|----|---------------------------|-------------------|
| C1 | S_0 (MPa) | 形变抵抗初始值 |
| C2 | Q/R (K) | 激活能 |
| C3 | A (sec^{-1}) | 指数因子 |
| C4 | ξ | 应力系数 |
| C5 | m | 对应于应力的应变率敏感度 |
| C6 | h_0 (MPa) | 硬化系数 |
| C7 | \hat{s} (MPa) | 变形抵抗饱和值系数 |
| C8 | n | 对应于变形抵抗饱和值的应变率敏感度 |
| C9 | a | 对应于硬化应变率敏感度 |

3.2 简易焊点的力学分析

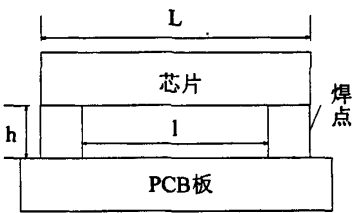


图 3.2 简易模型

本节对简化的倒装焊焊点的应力场进行了分析，图 3.1 是关于焊点的简化模型，芯片、印刷电路板及焊点的几何尺寸如图所示。这里只考虑二维的情形。各种材料有关性能参数如表 3.2 所示。其中，芯片的热膨胀系数一般为 2~3ppm/℃，基板的热膨胀系数约为 15~20 ppm/℃，锡铅焊料的热膨胀系数约为 25ppm/℃。

表 3.2 材料性能参数

| | 芯片 | PCB | 焊点 |
|--------|------------|------------|------------|
| 杨氏模量 | E_1 | E_2 | E_3 |
| 剪切弹性模量 | G_1 | G_2 | G_3 |
| 热膨胀系数 | α_1 | α_2 | α_3 |

热应力在焊点内部及焊点与芯片和 PCB 接触面上的分布是由两部分构成的。一部分是因为芯片与 PCB 热膨胀系数不同而使焊点发生变形，在焊点内部及接触面上便产生了应力；另一部分是因为焊点与芯片及 PCB 的热膨胀系数不同而产生的内应力。

在上述条件下，当温度 T_0 变为 $T_0 + \Delta T$ 时的应力分布，焊点及结构尺寸变化如

图 3.3 所示。

1. 由芯片与 PCB 热膨胀系数差引起的剪应力

如图 3.3 所示，原焊点对称中线由于温度变化而不再平行，变化如下：

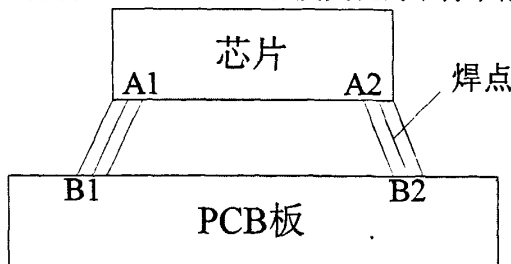


图 3.3 $T_0 + \Delta T$ 时焊点的变形

芯片内的变形为

$$A_1 A_2 = \frac{\alpha_1 (L+l) \Delta T}{2} \quad (3-8)$$

PCB 内的变形为

$$B_1 B_2 = \frac{\alpha_2 (L+l) \Delta T}{2} \quad (3-9)$$

因为变形是关于焊点中线对称的，所以焊点中线所产生的剪应变为

$$\gamma = \frac{(\alpha_2 - \alpha_1)(L+l)\Delta T}{4(1+\alpha_3\Delta T)h} \quad (3-10)$$

由胡克定律可知，芯片与 PCB 热膨胀系数之差而在焊点对称中点上产生的剪应力值为

$$\tau_3 = G_3 \gamma = \frac{G_3 (\alpha_2 - \alpha_1)(L+l)\Delta T}{4(1+\alpha_3\Delta T)h} \quad (3-11)$$

剪应力在焊点中线两侧的分布因应变的不同而有所不同，向焊点外侧剪应力递增，向焊点内侧剪应力递减。以 A 或 B 为 x 轴原点，向焊点外侧移动 x，此点的剪应力值为

$$\begin{aligned} \tau_1 &= \frac{G_3 (\alpha_2 - \alpha_1) \left[\frac{(L+l)}{2} + 2x \right] \Delta T}{2(1+\alpha_3\Delta T)h} \\ &= \tau_3 + \frac{G_3 (\alpha_2 - \alpha_1) x \Delta T}{(1+\alpha_3\Delta T)h} \quad x \in \left[0, \frac{(L-l)}{4} \right] \end{aligned} \quad (3-12)$$

由对称点向焊点内侧移动 x，此点的剪应力值为

$$\tau_1' = \frac{G_3 (\alpha_2 - \alpha_1) \left[\frac{(L+l)}{2} - 2x \right] \Delta T}{2(1+\alpha_3\Delta T)h} = \tau_3 - \frac{G_3 (\alpha_2 - \alpha_1) x \Delta T}{(1+\alpha_3\Delta T)h} \quad x \in \left[0, \frac{(L-l)}{4} \right] \quad (3-13)$$

以上剪应力分布是由芯片与 PCB 材料热膨胀系数不同而引起整体结构热变形

在焊点内部及接触面上产生的。由于变形是上下对应的，故上下接触面剪应力是相互对应的。焊点内部剪应力也是如此。

在上述推导过程中将芯片与 PCB 之间的距离变化视为 $(1 + \alpha_3 \Delta T)h$ 。此值与实际变化情况有一个微小的差值，实际值较此值要小些，但在此推导过程中，不影响找出应力的极值点，故作如上近似假定。

2. 焊点与芯片和 PCB 热膨胀系数不同在接触面上产生的剪应力

由于焊点与芯片及 PCB 的热膨胀系数不同，则热变形量不同。在焊点与芯片及 PCB 的接触面上，焊点的刚度远小于芯片及 PCB，其变形受到芯片和 PCB 板的约束，因此在接触面上产生相应的剪应力。

焊点的变形规律如下：与芯片接触面上的变形随芯片的变形而变化。与 PCB 接触面上的变形随 PCB 的变形而变化。焊点内部的变形有如下三种可能情况：

- (1) 某区域内达到应有的变形量，无内部应力。
- (2) 某点的变形量最大，但仍未达到应有的变形量，有内部应力。
- (3) 某点达到应有的变形量，无内部应力。

焊点内部形变沿 x 方向的变化梯度是由焊点本身的特性所决定的。同一种焊点的形变梯度是一样的。内部形变的三种分布与 h 有关，当 h 值较大时形变如图 3.4 (a) 所示，当 h 值较小时形变如图 3.4 (b) 所示，某一特定情况下如图 3.4 (c) 所示。为了简化推导，以 (c) 情况为出发点进行计算，其他情形可通过对情况 (c) 的修正来推出。由于上述变形量皆很小，都在弹性变形范围内，因此假定焊点内部形变是线性的。

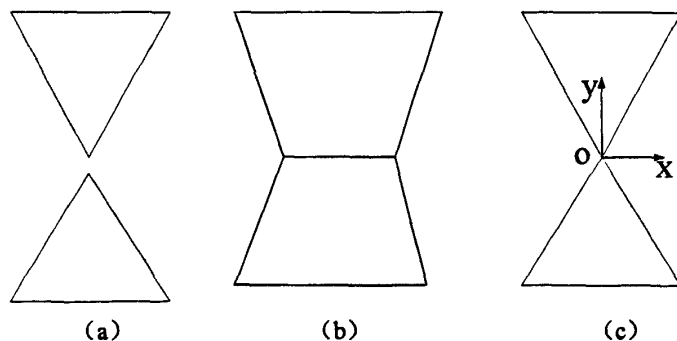


图 3.4 三种形变情况

在焊点与芯片的接触面上焊点的变形量为

$$\Delta x_1 = \frac{(\alpha_3 - \alpha_1)(L - l)\Delta T}{2} \quad (3-14)$$

在焊点与 PCB 的接触面上焊点的变形量为

$$\Delta x_2 = \frac{(\alpha_3 - \alpha_2)(L - l)\Delta T}{2} \quad (3-15)$$

由于焊点内部形变变化梯度一样, 故有

$$h_1 : h_2 = \Delta x_1 : \Delta x_2 \quad (3-16)$$

式中, h_1 为 $y > 0$ 部分的焊点高度, h_2 为 $y < 0$ 部分的焊点高度。

由于有关系式 $h_1 + h_2 = (1 + \alpha_3 \Delta T)h$, 故可解得

$$h_1 = \frac{(1 + \alpha_3 \Delta T)(\alpha_3 - \alpha_1)h}{(2\alpha_3 - \alpha_1 - \alpha_2)} \quad (3-17)$$

$$h_2 = \frac{(1 + \alpha_3 \Delta T)(\alpha_3 - \alpha_2)h}{(2\alpha_3 - \alpha_1 - \alpha_2)} \quad (3-18)$$

为了求出该变形在接触面上所对应的剪应力, 采用变形能进行计算。如图 3.3(c), 在 $y = 0$ 以上的变形由焊点与芯片接触面内的剪应力所引起, 在 $y > 0$ 部分, 焊点变形量为

$$\Delta x_1' = \frac{(L-l)(2\alpha_3 - \alpha_1 - \alpha_2)\Delta T y}{2h(1 + \alpha_3 \Delta T)} \quad (3-19)$$

剪应变量为

$$\gamma = \frac{\Delta x_1'}{y} = \frac{(L-l)(2\alpha_3 - \alpha_1 - \alpha_2)\Delta T}{2h(1 + \alpha_3 \Delta T)} \quad (3-20)$$

根据变形能定义, 可得

$$W_\gamma = \int_0^l \tau d\gamma = \int_0^l G_3 \gamma dy = \frac{G_3 \gamma^2}{2} \quad (3-21)$$

$$\begin{aligned} U_1 &= \int_0^h W_\gamma ds = \int_0^h \frac{G_3 \gamma^2}{2} ds \\ &= \int_0^h \int_{\frac{L-l}{2}}^{\frac{L-l}{2} + \Delta x_1'} \frac{G_3 \gamma^2}{2} dx dy \end{aligned} \quad (3-22)$$

求解积分, 可得

$$\begin{aligned} U_1 &= \int_0^h \frac{G_3 \gamma^2}{2} \frac{(L-l)(2\alpha_3 - \alpha_1 - \alpha_2)\Delta T}{[2h(1 + \alpha_3 \Delta T)]} dy \\ &= \frac{G_3 (L-l)^3 (2\alpha_3 - \alpha_1 - \alpha_2)(\alpha_3 - \alpha_1)^2 \Delta T^3}{16h(1 + \alpha_3 \Delta T)} \end{aligned} \quad (3-23)$$

由于焊点与芯片的接触面上从对称中心向两侧变形量线性变化, 故假设其内部剪应力也是线性变化的, 且随 τ 的变化规律为

$$\tau_1 = K_1 x \quad K_1 \text{ 为某一常数}$$

此时, 剪应力做功为

$$\begin{aligned}
 U_1 &= \int_{\frac{(L-l)}{4}}^{\frac{(L-l)}{4}} K_1 x (\alpha_3 - \alpha_1) x \Delta T dx \\
 &= K_1 (\alpha_3 - \alpha_1) \Delta T \int_{\frac{(L-l)}{4}}^{\frac{(L-l)}{4}} x^2 dx \\
 &= \frac{K_1 (\alpha_3 - \alpha_1) \Delta T (L-l)^3}{96}
 \end{aligned} \tag{3-24}$$

结合(3-23)式可得

$$K_1 = \frac{6G_3(2\alpha_3 - \alpha_1 - \alpha_2)(\alpha_3 - \alpha_1)\Delta T^2}{h(1 + \alpha_3\Delta T)} \tag{3-25}$$

将此值代入 $\tau_1 = K_1 x$ 便可得因焊点与芯片热膨胀系数失配而在其接触面上产生的剪应力函数, 该应力的分布是以焊点中线形成对称分布。

通过分析可知, 在焊点与芯片接触面上的应力分布由对称中心点向外侧两种剪应力相加, 而向内侧两种剪应力相减。这样, 在该接触面 A 点向外侧剪应力分布为

$$\begin{aligned}
 \tau_1 &= \frac{G_3(\alpha_2 - \alpha_1)(L+l)\Delta T}{4(1 + \alpha_3\Delta T)h} + \frac{G_3(\alpha_2 - \alpha_1)\Delta T}{(1 + \alpha_3\Delta T)h} x \\
 &\quad + \frac{6G_3(2\alpha_3 - \alpha_1 - \alpha_2)(\alpha_3 - \alpha_1)\Delta T^2}{(1 + \alpha_3\Delta T)h} x
 \end{aligned} \tag{3-26}$$

在该接触面 A 点向内侧剪应力分布:

$$\begin{aligned}
 \tau_1 &= \frac{G_3(\alpha_2 - \alpha_1)(L+l)\Delta T}{4(1 + \alpha_3\Delta T)h} + \frac{G_3(\alpha_2 - \alpha_1)\Delta T}{(1 + \alpha_3\Delta T)h} x \\
 &\quad - \frac{6G_3(2\alpha_3 - \alpha_1 - \alpha_2)(\alpha_3 - \alpha_1)\Delta T^2}{(1 + \alpha_3\Delta T)h} x
 \end{aligned} \tag{3-27}$$

同理, $y=0$ 以下的变形由焊点与 PCB 接触面内的剪应力所产生。在 $y=0$ 以下, 焊点变形量为

$$\Delta x_2' = \frac{(L-l)(2\alpha_3 - \alpha_1 - \alpha_2)\Delta T y}{2h(1 + \alpha_3\Delta T)} \tag{3-28}$$

应变量为

$$\gamma = \frac{\Delta x_2'}{y} = \frac{(L-l)(2\alpha_3 - \alpha_1 - \alpha_2)\Delta T}{2h(1 + \alpha_3\Delta T)} \tag{3-29}$$

根据变形能定义, 可得

$$W_\gamma = \int_0^\gamma \tau d\gamma = \int_0^\gamma G_3 \gamma d\gamma = \frac{G_3 \gamma^2}{2} \tag{3-30}$$

$$\begin{aligned}
 U_2 &= \int_s W_\tau ds = \int_s \frac{G_3 \gamma^2}{2} ds \\
 &= \int_0^h \int_{\frac{L-l}{2}}^{\frac{L-l}{2} + \Delta x_2} \frac{G_3 \gamma^2}{2} dx dy
 \end{aligned} \quad (3-31)$$

对上式进行整理后可得

$$\begin{aligned}
 U_2 &= \int_0^h \frac{G_3 \gamma^2}{2} \frac{(L-l)(2\alpha_3 - \alpha_1 - \alpha_2)\Delta T y}{2h(1 + \alpha_3 \Delta T)} dy \\
 &= \frac{G_3 (L-l)^3 (2\alpha_3 - \alpha_1 - \alpha_2)(\alpha_3 - \alpha_2)^2 \Delta T^3}{16h(1 + \alpha_3 \Delta T)}
 \end{aligned} \quad (3-32)$$

由于焊点与芯片的接触面上从对称中心向两侧变形量线性变化, 故假设其内部剪应力也是线性变化的, 且随 τ 的变化规律为

$$\tau_2 = K_2 x \quad K_2 \text{ 为一常数} \quad (3-33)$$

此时, 剪应力做功为

$$\begin{aligned}
 U_2 &= \int_{\frac{L-l}{4}}^{\frac{L-l}{2}} K_2 x (\alpha_3 - \alpha_2) x \Delta T dx \\
 &= K_2 (\alpha_3 - \alpha_2) \Delta T \int_{\frac{L-l}{4}}^{\frac{L-l}{2}} x^2 dx \\
 &= \frac{K_2 (\alpha_3 - \alpha_2) \Delta T (L-l)^3}{96}
 \end{aligned} \quad (3-34)$$

结合(3-32)式可得

$$K_2 = \frac{6G_3 (2\alpha_3 - \alpha_1 - \alpha_2)(\alpha_3 - \alpha_2)\Delta T^2}{(1 + \alpha_3 \Delta T)h} \quad (3-35)$$

将此值代入 $\tau_2 = K_2 x$ 便可得因焊点与 PCB 板热膨胀系数失配而在其接触面上产生的剪应力函数, 该应力的分布是以焊点中线形成对称分布。

通过分析可知, 在焊点与 PCB 板接触面上的应力分布由对称中心点向外侧两种剪应力相加, 而向内侧两种剪应力相减。这样, 在该接触面 A 点向外侧剪应力分布为

$$\begin{aligned}
 \tau_2 &= \frac{G_3 (\alpha_2 - \alpha_1)(L+l)\Delta T}{4(1 + \alpha_3 \Delta T)h} + \frac{G_3 (\alpha_2 - \alpha_1)\Delta T}{(1 + \alpha_3 \Delta T)h} x \\
 &\quad + \frac{6G_3 (2\alpha_3 - \alpha_1 - \alpha_2)(\alpha_3 - \alpha_2)\Delta T^2}{(1 + \alpha_3 \Delta T)h} x
 \end{aligned} \quad (3-36)$$

在该接触面 A 点向内侧剪应力分布为

$$\tau_2 = \frac{G_3(\alpha_2 - \alpha_1)(L+l)\Delta T}{4(1 + \alpha_3\Delta T)h} + \frac{G_3(\alpha_2 - \alpha_1)\Delta T}{(1 + \alpha_3\Delta T)h}x - \frac{6G_3(2\alpha_3 - \alpha_1 - \alpha_2)(\alpha_3 - \alpha_2)\Delta T^2}{(1 + \alpha_3\Delta T)h}x \quad (3-37)$$

3.3 本章小结

对线性材料及非线性材料(主要是焊点)的性质做了介绍, 由于焊点在热循环下不仅要考虑到塑性和蠕变, 而且还要考虑到塑性和蠕变的相互影响, 因此从理论上精确地描述其应力、应变分布较为困难。在下面一章, 本文将利用有限元来对焊点的热应力问题进行分析。

对焊点的简易模型进行分析, 发现在焊点内部受到的剪应力小于焊点上下两个接触面上的剪应力。焊点接触面的剪应力由焊点中线向两侧增大, 焊点与芯片接触面的剪应力比焊点与 PCB 接触面的剪应力要大。接触面的剪应力在边缘点处最大, 在上下接触面四个边缘点中, 以焊点和芯片接触面外边缘点的应力值为最大。

尽管上述结果只是在二维的条件下给出的, 但其与三维应力分布情况是一致的。在一般情况下, 结构最薄弱环节出现在属于高应力区的焊点与芯片接触面附近, 该区域最易发生焊点的疲劳开裂现象, 故在考虑焊点可靠性时, 着重考虑该区域的可靠性。

第四章 数值模拟

本章主要利用 ANSYS10.0 分别仿真 BGA 封装在内部有热源和在热循环荷载下两种情况下所产生的热应力与热应变问题,下面将逐一介绍数值模拟分析时所使用的有限单元模型,包含所使用的芯片和焊点的模型尺寸、材料参数、给定边界条件,以及分析结果等。

4.1 ANSYS 有限单元分析软件

有限元分析法是将结构分成许多微小单元,每一单元可有若干节点,而每一节点可有若干自由度,由每一单元的平衡方程式,组成整个结构的平衡方程式,最后对整个结构的方程式求解,以完成分析。所以本文使用 ANSYS 软件来进行 BGA 封装的结构分析,以了解封装体热应力、应变状态。

4.1.1 ANSYS 软件的介绍

ANSYS 软件是融结构、热、流体、电磁、声学于一体,以有限元分析为基础的大型通用 CAE 软件,被广泛应用于机械制造、石油化工、轻工、造船、航空航天、汽车交通、电子、土木工程、水利、铁道、家用电器、生物医学等众多工业领域及科学研究。它含有多种有限元分析的能力,包括从简单的线性静态分析到复杂的非线性动态分析^{[28][29]}。一个典型的 ANSYS 分析过程通常包括以下三个步骤:

- 1.前处理模块(PREP7)—创建有限元模型
- 2.分析求解模块(SOLUTION)—施加载荷进行求解
- 3.后处理模块(POST1 和 POST26)—查看分析结果

其中前处理模块为一个强大实体建模和网格划分工具,通过这个模块用户可以建立自己需要的工程有限元模型。分析求解模块即是对已建立好的模型在一定的载荷和边界条件下进行有限元计算,求解平衡微分方程。后处理模型是对计算的结果进行处理,可以将结果以等直线、梯度、矢量、粒子流及云图等图形方式显示出来。

ANSYS 不仅为用户提供一个优良的工作环境,使用户从繁琐、单调的常规有限元编程中解脱出来,而且具有很强的兼容性,为不同专业背景的用户进行二次开发提供了友好的环境。

4.1.2 ANSYS 软件的 APDL 编程

APDL 是 ANSYS Parametric Design Language 的缩写, 即 ANSYS 参数化设计语言, 它是一种类似 FORTRAN 的解释性语言。提供一般程序设计语言的功能, 如参数、宏、标量、向量及矩阵的运算、分支、循环、重复以及访问 ANSYS 有限元数据库等。另外还提供简单界面定制功能, 实现参数交互输入、消息机制、界面驱动和运行应用程序等^[30]。

利用 APDL 的程序语言可以实现参数化建模、施加参数化载荷与求解以及参数化后处理的显示, 从而实现参数化有限元分析的全过程, 同时这也是 ANSYS 批处理分析的最高技术。在参数化的分析过程中可以简单地修改其中的参数达到反复分析各种尺寸、不同载荷大小的多种设计方案或者序列性产品, 极大地提高效率, 减少分析成本。同时, 以 APDL 为基础用户可以开发专有有限元分析程序, 或者编写经常重复使用的功能小程序, 如特殊载荷施加宏、按规范进行强度或刚度校核宏等。

另外, APDL 也是 ANSYS 设计优化的基础, 只有创建了参数化的分析流程才能对其中的设计参数执行优化改进, 达到最优化设计目标。总之, APDL 扩展了传统有限元分析范围之外的能力, 提供了建立标准化零件库、序列化分析、设计修改、设计优化以及更高级的数据分析处理能力, 包括灵敏度研究等。

4.2 BGA 封装的有限元仿真

4.2.1 基本假设

在数值分析模型上, 一来为了避免求解过程中产生无法收敛的情形, 二来不可能完全模拟真实的情形, 所以在模拟前本文作了以下的基本假设:

1. 所有封装材料皆为均质等向性。
2. 除了锡铅焊点外, 其余材料性质均为线弹性。
3. 所有接触面完全接触, 且封装内部无任何空洞或杂质。
4. 不考虑芯片在制造过程中所产生的残留应力。
5. 不考虑产品有瑕疵的破坏。
6. 不考虑材料因吸收湿气后温度变化所产生的爆米花现象。

7. 在做热循环分析时, 模型内部温度与外界环境温度相同, 即 $T(x, t) = T(t)$, 并且不考虑热传导及热对流。

4.2.2 模型架构

本文数值模拟分析所要建构的基本模型是 BGA 结构的封装体，其中所使用到的模型组件包括硅芯片、基板和锡铅银焊点^{[31][32][33][34]}。

1. 选定单元形式

在热分析中，采用八节点六面体的 SOLID70 单元；在结构分析中，对塑性材料本文采用八节点六面体的 SOLID45 单元，对具有粘塑性的焊点材料，采用八节点六面体的 VISCO107 结构分析单元，它用于三维实体结构，每个节点都有三个自由度，分别为 X、Y、Z 三个方向上的节点位移，其单元示意图如图 4.1 所示。

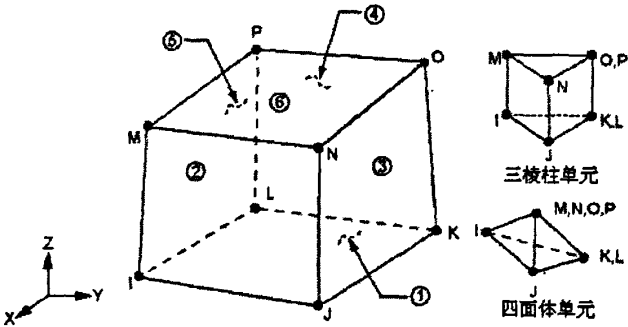


图 4.1 VISCO107 单元几何形状图

2. 给定材料性质

输入各材料的热传导系数、弹性模量、热膨胀系数、泊松比等物理性质，如表 4.1 所示，焊点和基板的弹性模量是随温度变化的，分别如表 4.2，表 4.3 所示。焊点采用的是 Sn62Pb36Ag2，其 Anand 本构方程参数值如表 4.4 所示。

表 4.1 各材料性质参数

| | 热传导系数 $W/(m \cdot K)$ | 弹性模量 GPa | 泊松比 | 热膨胀系数 ppm/k |
|----|--------------------------|---------------|------|------------------|
| 芯片 | 82 | 131 | 0.28 | 2.6 |
| 焊点 | 36 | 见表 4.2 | 0.35 | 24.5 |
| 基板 | 0.2 | 见表 4.3 | 0.28 | 18 |

表 4.2 焊点的弹性模量

| 温度(K) | 298 | 323 | 348 | 373 | 398 |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| E (MPa) | 29800 | 27600 | 25400 | 23200 | 21000 |

表 4.3 基板的弹性模量

| 温度(K) | 303 | 368 | 383 | 398 | 423 |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| E (MPa) | 22400 | 20680 | 19970 | 19300 | 17920 |

表 4.4 锡铅银焊料的 Anand 参数

| 常数 | 参数变量 | 数值 |
|----|----------------------|-------|
| C1 | S_0 (MPa) | 12.41 |
| C2 | $Q/R(K)$ | 9400 |
| C3 | $A(\text{sec}^{-1})$ | 4.0E6 |
| C4 | ξ | 1.5 |
| C5 | m | 0.303 |
| C6 | h_0 (MPa) | 1379 |
| C7 | \hat{s} (MPa) | 13.79 |
| C8 | n | 0.07 |
| C9 | a | 1.3 |

3. 几何模型的建立及网格分割

依次建立基板, 焊点和芯片的几何模型, 给各实体赋材料属性, 最后再作网格划分。模型的几何尺寸如表 4.5 所示建好后的模型如图 4.2 所示。

表 4.5 几何参数设定

| 几何参数(mm) | 参数意义 | 几何参数 | 参数意义 |
|----------------|------|----------------|------|
| D_LENGTH=8 | 芯片长度 | D_WIDTH=8 | 芯片宽度 |
| D_HEIGHT=0.65 | 芯片厚度 | SUB_LENGTH=10 | 基板长度 |
| SUB_WIDTH=10 | 基板宽度 | SUB_HEIGHT=1.5 | 基板厚度 |
| SB_RADIUS=0.15 | 焊球半径 | SB_HEIGHT=0.2 | 焊球高度 |
| SB_DIST=0.75 | 焊球间距 | SB_NB=8 | 焊球个数 |

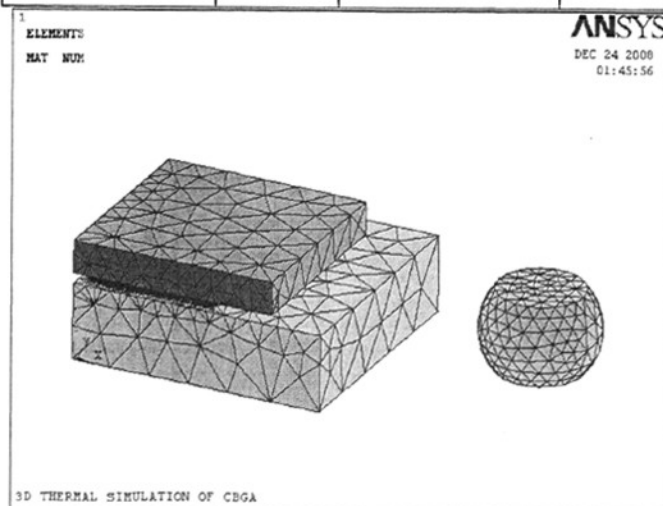


图 4.2 划分网格后的模型

4. 边界条件的给定

在进行热应力分析时,需要对模型施加位移边界条件,考虑到所建立的模型为实际封装体的四分之一结构,所以在内侧的四个平面上施加与该平面垂直方向的位移约束,在基板的底面也施加垂直方向的位移约束。

5. 加载条件的给定

在进行热分析时,设定外部环境温度为 25°C ,功率为 0.2W 的芯片其四分之一模型上的生热率为 $1.2\text{e}^6\text{W}/\text{m}^3$,芯片和基板的上下表面以及侧面的对流系数为 $10\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$,上下表面和侧面的灰度设为 0.8 。

在进行热应力分析时,热循环温度变化范围是 $-55^{\circ}\text{C}\sim+125^{\circ}\text{C}$,升降温时间为 9min ,高低温保持时间为 21min ,循环频率为 $1\text{cycle}/\text{hour}$,选择零应力应变状态时的参考温度为室温 25°C ,假定环境温度为 25°C ,内部无热源,无对流^[35]。

图 4.3 所示为温度循环加载情况,共进行四个高低温循环。

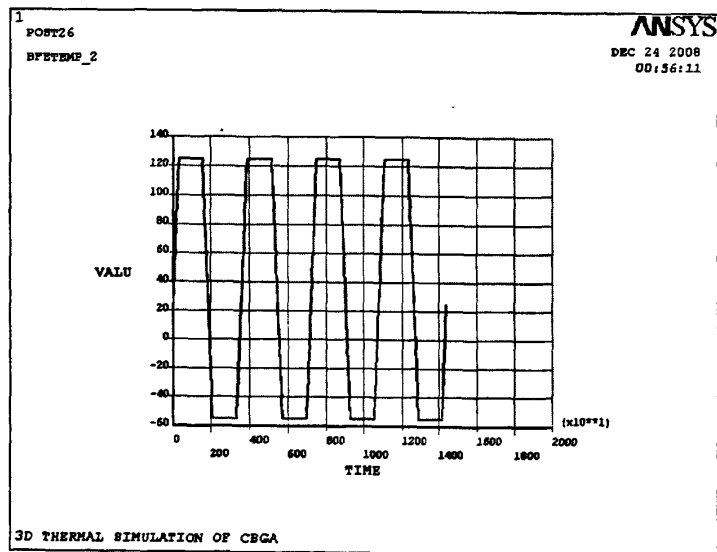


图 4.3 温度循环加载

4.3 模拟结果

4.3.1 热分析结果

热分析完成后,各部分显示的温度分布如图 4.4 所示。由于芯片上存在生热率,使得芯片产生热量,产生的热量通过焊点以热传导的方式向基板传输,并通过空气对流和热辐射向空间散发热量。因此芯片上温度最高,焊点和基板温度有所下降,远离中心的基板边界区域,温度最低。在整个器件内形成了以芯片为热源的温度梯度,芯片温度集中的结果造成局部温度过高,将影响器件的性能和可靠性。

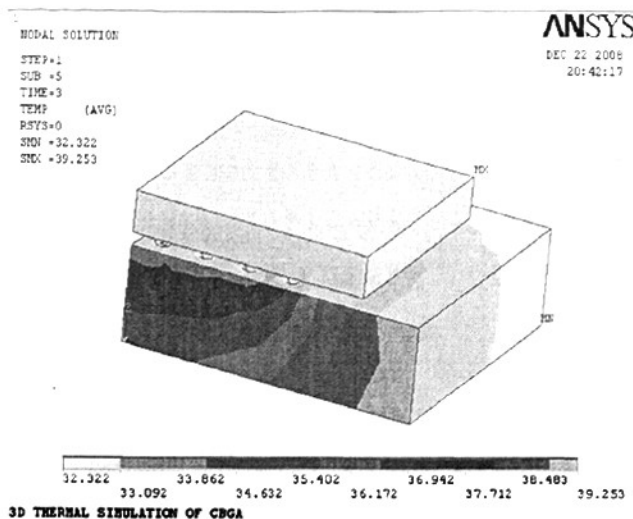


图 4.4(a) 整体温度分布

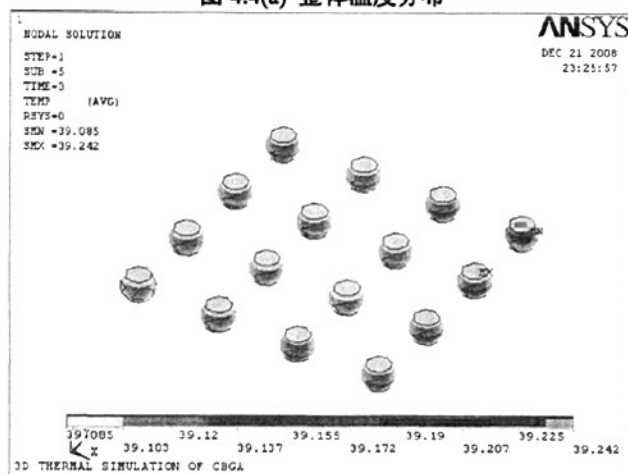


图 4.4(b) 焊点的温度分布

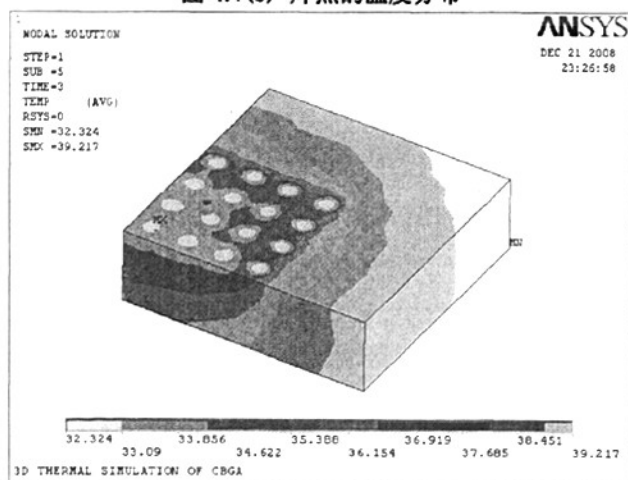


图 4.4(c) 基板的温度分布

封装体的温度梯度分布如图 4.5(a) (b) 所示。从图中可以看出，整个封装体中

焊点的温度梯度值最大,这是因为从芯片到基板的热传导主要是通过焊点来实现的,而芯片上的温度梯度很低,这是因为芯片上存在着均匀的生热率,所以温度变化不大。

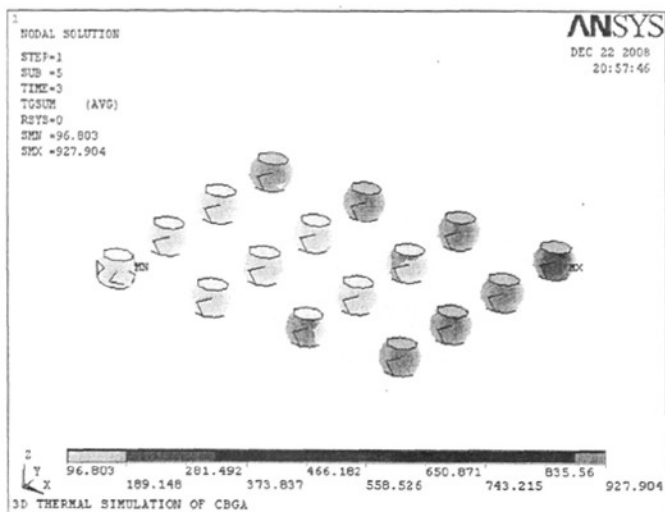


图 4.5(a) 焊点的温度梯度分布

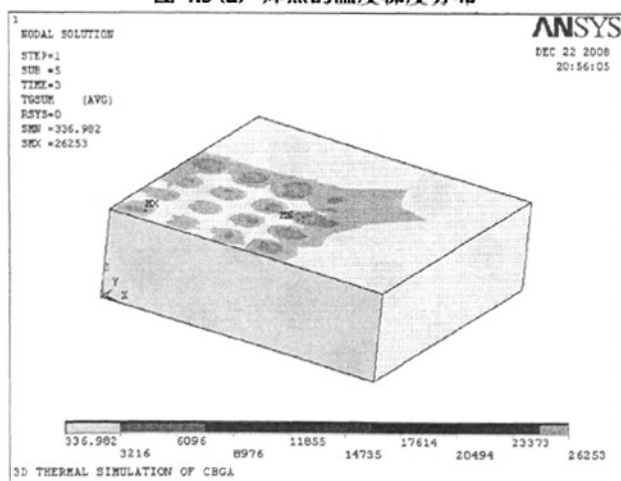


图 4.5(b) 基板的温度梯度分布

4.3.2 热-结构耦合

得到热分析结果后,把温度作为荷载加载到封装体上,分析其所受热应力情况。具体做法是,回到前处理器,将单元类型由热单元 SOLID70 转化为可以与之兼容的结构单元 SOLID45 和 VISCO107,添加热膨胀系数、弹性模量、泊松比等材料属性,设定结构边界条件,包括对四个内侧面施加与所在面垂直方向的位移约束和对底面施加的 Z 方向位移约束。完成这些之后,从热分析结果文件中读入温度,求解结构问题。

整体的位移变化和焊点的位移变化如图 4.6(a)(b)所示。从图中可以看到，整体结构发生最大位移的位置在离芯片中心最远的基板边界处，而焊球的最大位移发生在离芯片中心位置最远处焊点的底部，不妨将它标为 1 号焊点。

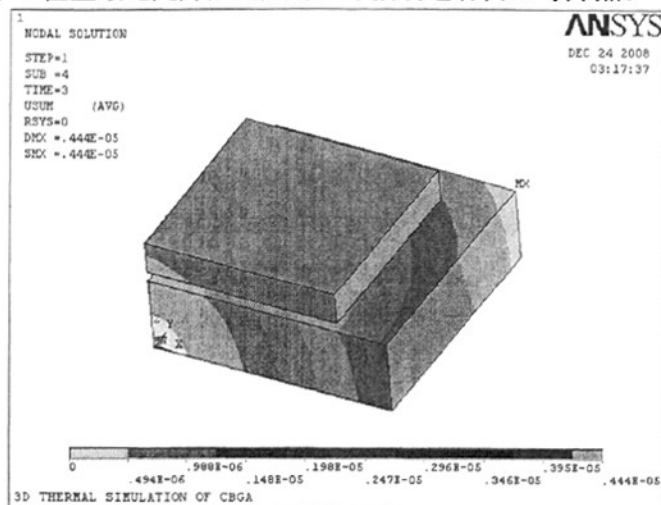


图 4.6(a) 整体的位移变化

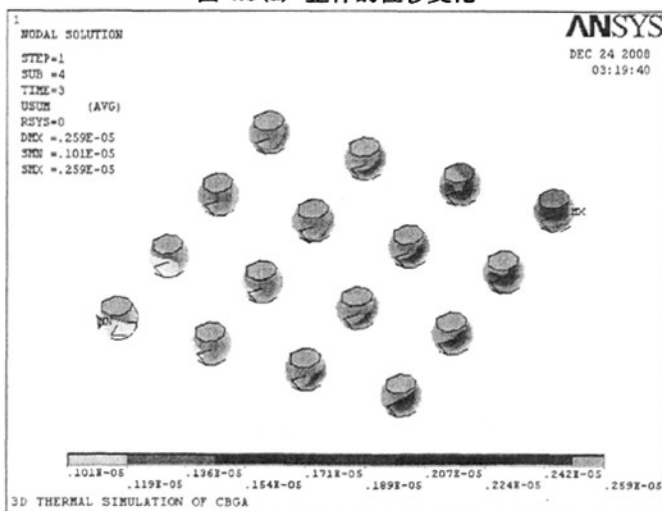


图 4.6(b) 焊点的位移变化

焊点 X 方向的正应力和 XY 方向的剪应力，以及等效应力分别如图 4.7(a)(b)所示。从图中可以看出，X 方向的正应力和 XY 方向的剪应力的最大值处于离中心最近处焊点的顶部位置，标为 2 号焊点，其中正应力的最大值为 35.3MPa，剪应力的最大值为 5.5MPa。而焊点等效应力的最大值处于 1 号焊点的顶部，为 24.9MPa，实际上，整个封装体的最大等效应力就发生在此处。

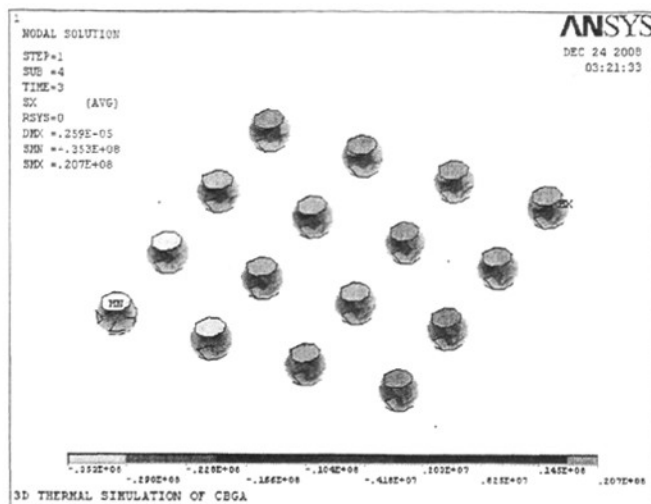


图 4.7(a) 焊点的正应力分布

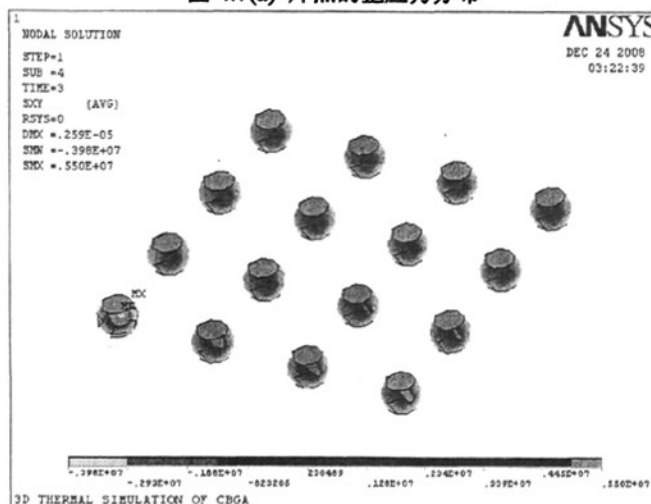


图 4.7(b) 焊点的剪应力分布

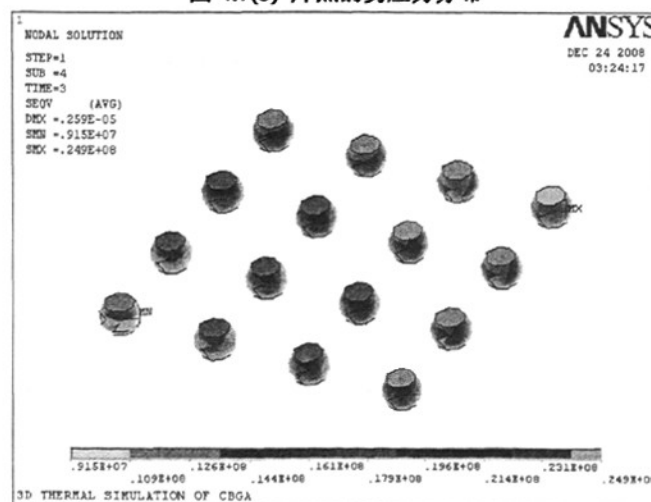


图 4.7(c) 焊点的等效应力分布

焊点的等效弹性应变和等效塑性应变如图 4.8 所示, 最大值都发生在 1 号焊点的顶部位置。其中, 最大等效弹性应变为 $0.876\text{e-}3$, 最大等效塑性应变为 $5.621\text{e-}3$ 。整个封装体的最大塑性应变也在此处。

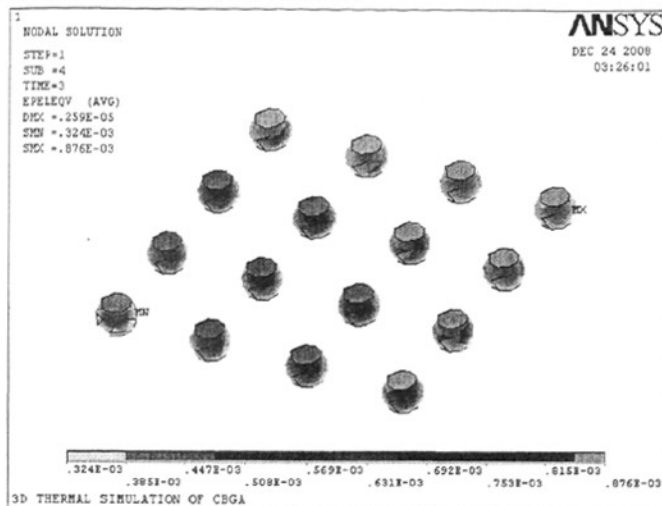


图 4.8(a) 焊点的等效弹性应变分布

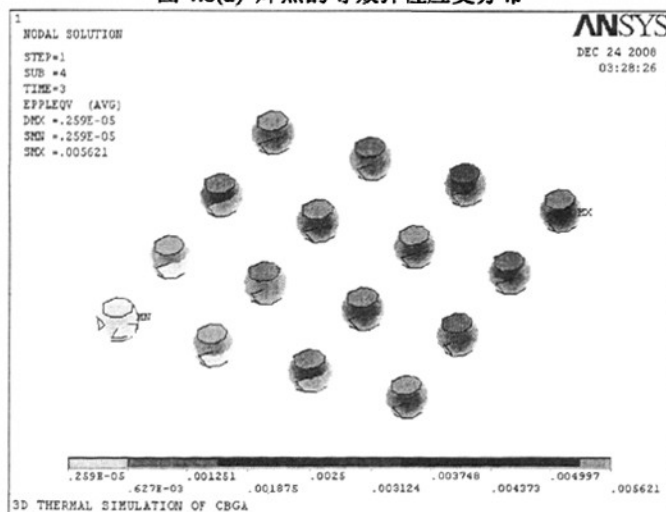


图 4.8(b) 焊点的等效塑性应变分布

4.3.3 热循环分析结果

如图 4.9(a)(b)分别是 -55°C 和 $+125^{\circ}\text{C}$ 时焊点的位移分布图。由图可知, 无论是在 -55°C 时还是在 $+125^{\circ}\text{C}$ 时, 最大位移都发生在 1 号焊点处, 可见距离中心位置越远, 位移就越大。

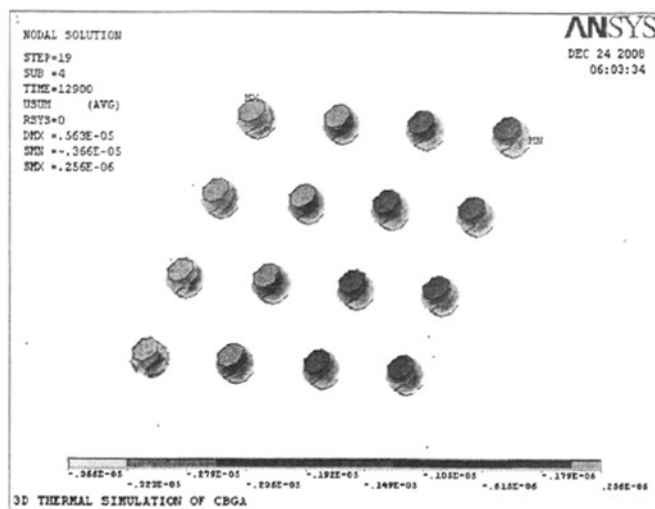


图 4.9(a) -55℃时的位移分布

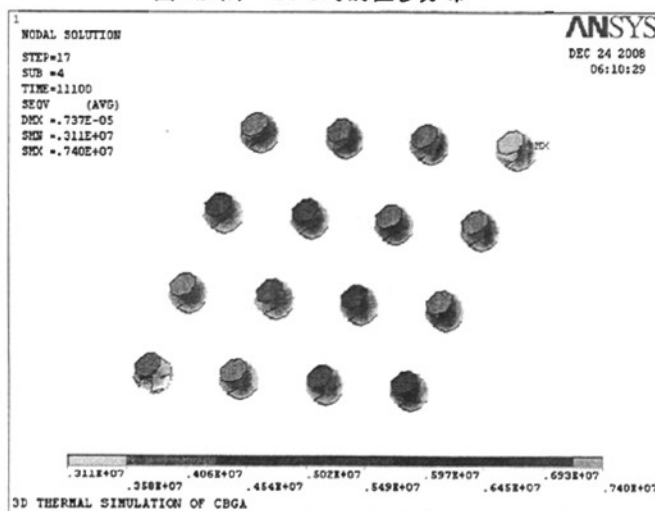


图 4.9(b) 125℃时的位移分布

如图 4.10(a) (b), 分别是-55℃和+125℃时焊点的等效力分布。从图中可以看出, 两种情况下的最大等效力也都发生在 1 号焊点处。

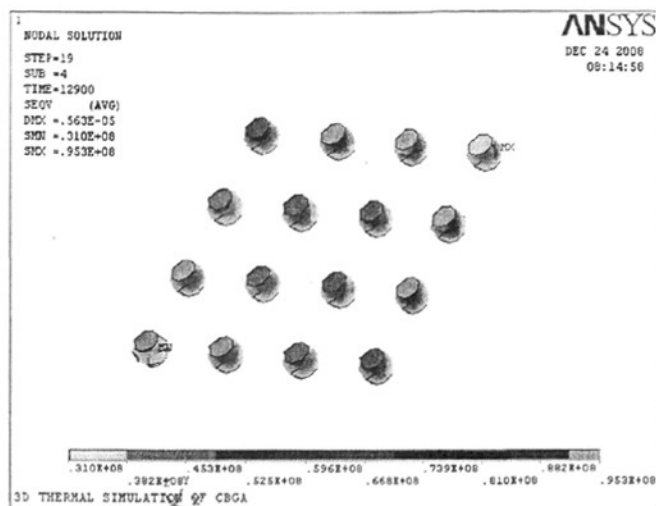


图 4.10(a) -55℃时的等效应力分布

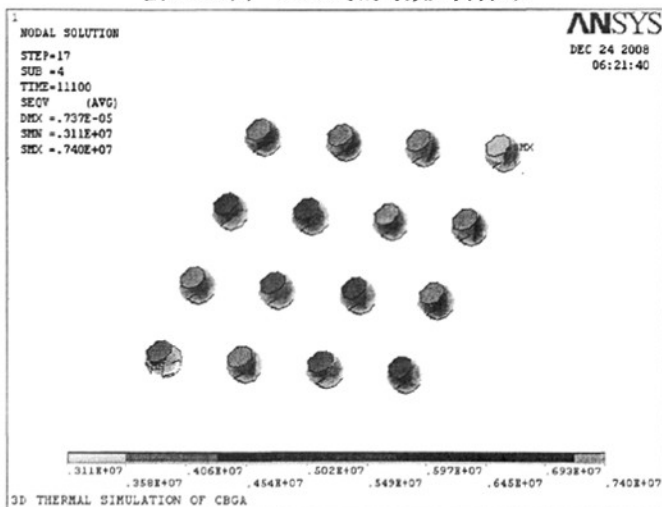


图 4.10(b) 125℃时的等效应力分布

如图 4.11(a)(b), 分别是-55℃和+125℃时焊点的等效应变分布图。

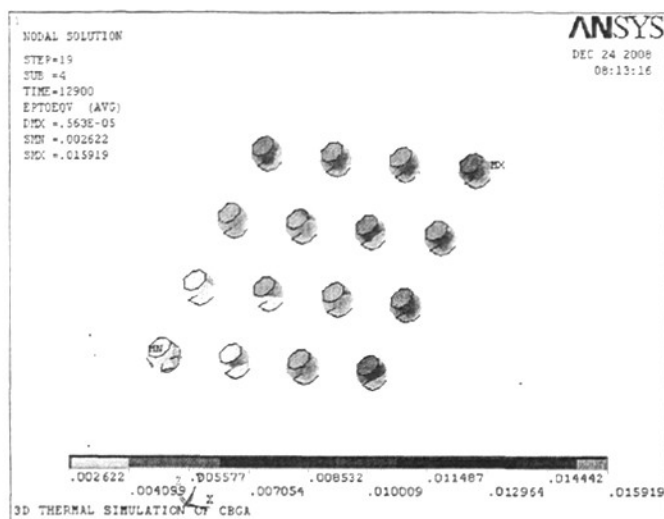


图 4.11 (a) -55℃时的等效应变分布图

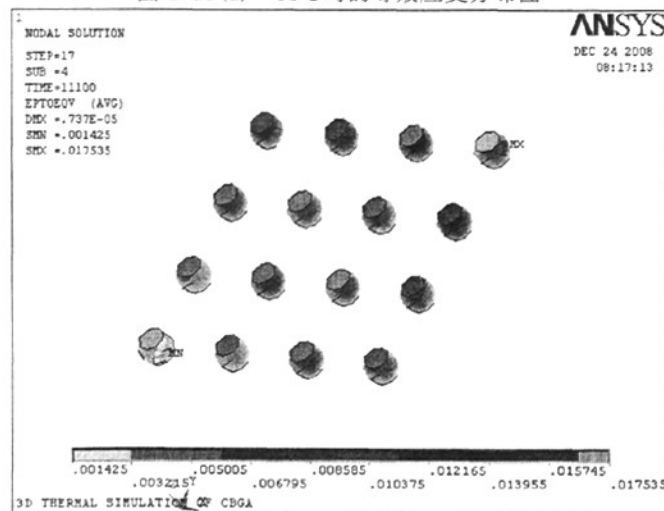


图 4.11 (b) 125℃时的等效应变分布图

从图 4.11, 图 4.12 中可以看出, 在高温时, 应力应变较大的区域集中在焊球的上下两个表面上。并且从上到下的变化规律是先减小后增大, 但应力应变最大值的位置在上端, 即与芯片的接触部位。这是由于在芯片、基板和焊球三种材料中, 焊球的热膨胀系数最大, 芯片材料的热膨胀系数最小。在升温时, 焊球发生膨胀, 但在纵向, 焊球的自由膨胀受到阻碍, 使焊球在与芯片的接触面上产生向下的压力。在横向, 由于芯片与基板的热膨胀系数相差较大, 而焊点将它们连在一起, 使他们在横向膨胀相互制约, 从而在与芯片的接触面上, 焊点承受向左的拉力, 在与 PCB 的接触面上承受向右的拉力。而总体上, 焊球在上表面所受应力最大。

值得注意的是, 在+125℃时最大等效应力值为 7.4MPa, 而在-55℃时最大等

效应力值却达到了 95.3MPa ，即便是最小应力值也有 31MPa ，由此可见，低温对焊点的失效造成的影响更大，而且等效应力值随着温度的下降而急剧增长。

通过提取表结果中最大应力处的节点编号，可以知道模型的应力最大位置即危险点位置为 619 节点，在此节点处进行时间历程后处理，可以得到危险点处的应力应变随时间变化图。

图 4.12，图 4.13，图 4.14 分别为危险点处的剪切应力，剪切弹性应变和剪切塑性应变随时间变化图，把剪切弹性应变和塑性弹性应变的值相加，得到总剪切应变随时间变化的曲线图，如图 4.15 所示。图 4.16 为危险点的剪切应力—剪切应变环。

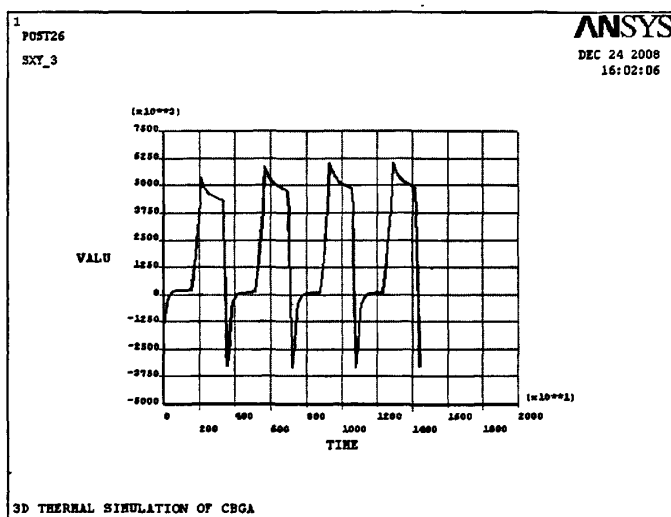


图 4.12 危险点处的剪切应力随时间变化图

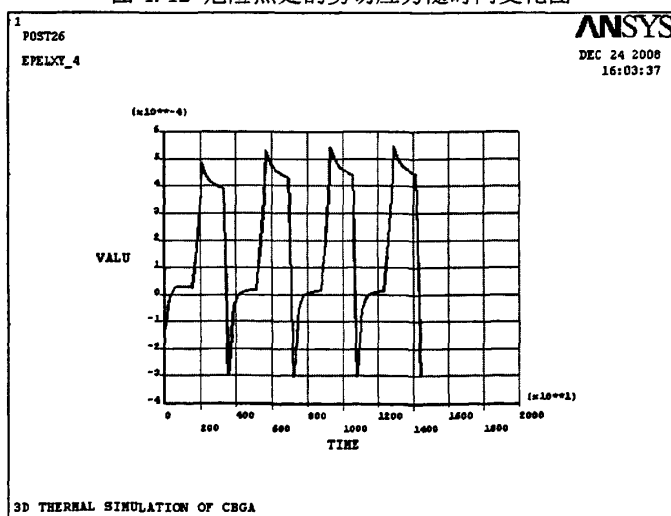


图 4.13 危险点处的剪切弹性应变随时间变化图

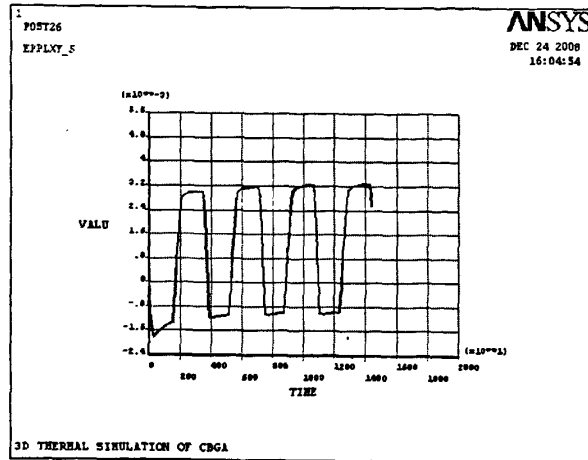


图 4.14 危险点处的剪切塑性应变随时间变化图

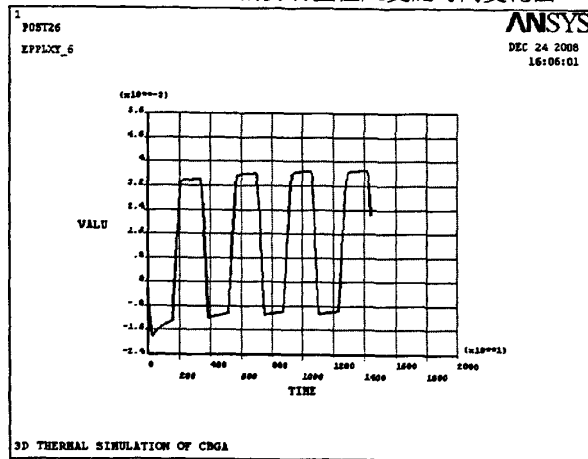


图 4.15 危险点处的总剪切应变随时间变化图

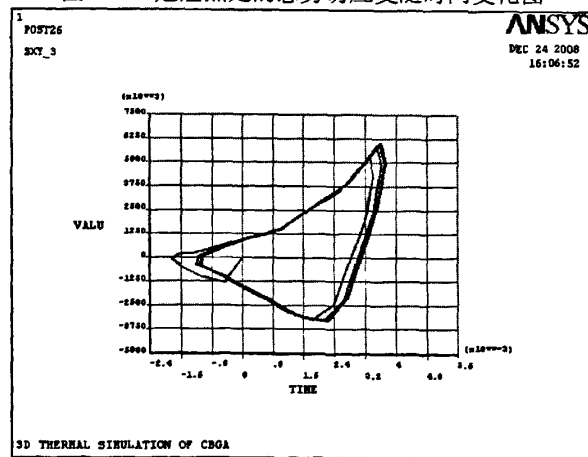


图 4.16 危险点处的剪切应力—剪切应变环

在热循环载荷作用下,焊点经历长期的应力应变交互作用,焊点是最薄弱的环节,当焊点的某一区域塑性变形能力耗尽时,裂纹便在此区域产生并扩展,直至焊点失效,导致封装器件失效,因此发生最大塑性变形的焊点容易产生塑性变形能力

衰竭,可利用最大塑性应变焊点的疲劳寿命作为评价封装器件失效的标准。图 4.16 是发生最大塑性应变的关键点的等效应力与等效塑性应变滞后环,可以看出从第一个到第四个温度循环加载后的滞后环在形态上和应力应变数值上的差异在逐渐缩小,说明计算结果已趋于稳定,故可根据最后一个周期的滞后环的等效塑性应变范围进行寿命预测。

查看 619 节点的表结果,可以计算出四个循环的总剪切应变分别为, 0.523246E-02, 0.481185E-02, 0.479336E-02, 0.478707E-02, 这表明结果已经趋于稳定。取 $\Delta\gamma_t = 0.478707 \text{ E-02}$, 运用第二章的疲劳寿命预测理论,可以得出焊点的疲劳寿命为:

$$N_f = 0.5 \left(\frac{\Delta\gamma_t}{0.65} \right)^{-\frac{1}{0.407}} = 0.1735 \Delta\gamma_t^{-2.457} = 86970 \text{ 个循环。}$$

4.4 本章小结

本章先对内部有热源的封装体的温度分布进行了模拟计算,再将温度作为体载荷加载到封装体上,求解其热应力分布,这种模拟分析方法与真实情况更加的相似;对热循环荷载作用下的热应力分布进行了研究,最终对其疲劳寿命进行了预测。

研究表明,随着电路的集成度越来越高,芯片功率逐渐变大,芯片生热率会导致芯片产生的热量逐渐积累,使芯片性能和可靠性受到严重影响。如何通过热传导,对流和辐射方式将热量散发转移,就显得十分必要。研究表明,温度梯度对焊点等效应力具有相当大的影响。

对热循环结果分析得知,过高或过低温度会给封装体带来很大的影响,而且低温时焊点的等效应力要比高温时焊点的等效应力大得多,更具破坏性。

第五章 结论与展望

本文初步建立了简易焊点的热应力分析数学模型,并应用有限元分析软件 ANSYS 对 BGA 封装结构体进行了建模,对内部有热源的封装体的温度分布进行了模拟仿真,并将温度值作为载荷施加给封装体,计算其热应力;对封装体进行温度循环仿真,计算热循环荷载作用下封装体的热应力应变,并预测其疲劳寿命。得出如下结论:

1. 分析焊点的简易数学模型,发现焊点内部受到的剪应力小于焊点上下两个接触面上的剪应力,焊点接触面的剪应力由焊点中线向两侧增大,焊点与芯片的接触面上的剪应力比焊点与 PCB 的接触面上的剪应力要大,接触面的剪应力在边缘点处最大,在上下接触面的四个边缘点中,以焊点和芯片接触面上外边缘点的应力值为最大。

2. 芯片生热率会导致芯片产生的热量逐渐积累,使封装体温度逐渐上升,通过热传递,对流和辐射方式可以有效的控制温度。由于各种材料的热传导系数不同,封装体上的温度分布有一定的差异,从而加剧了封装体所受到的热应力。

3. 整个封装体上焊点是最薄弱的部分,焊点所受到的应力与数学模型中得出的结论大体上一致。焊点在低温时所受到的应力比高温时受到的应力值要大很多,更容易发生失效。

4. 温度循环荷载使得焊点内产生周期性的应力应变,而焊点的塑性变形能力是逐渐缩小的,当焊点的某一区域塑性变形能力耗尽时,裂纹便在此区域产生并扩展,直至焊点失效。本文根据基于塑性变形的疲劳寿命预测方法,计算其疲劳寿命。

未来工作将继续基于热可靠性进行研究,主要有以下几点:

1. 计算对流和辐射的总散热量,与芯片的发热量进行对比,以便确定系统温度是否能够趋于稳定。

2. 建立基于蠕变的焊点模型,与基于 Anand 公式的粘塑性模型进行对比。

3. 本文中的模型没有使用填充底胶,而选用合适的填充底胶可以在一定程度上起到缓解应力与提高连接强度的作用,下一步将建立含填充底胶的封装模型。

致谢

首先向我的导师陈建军教授表示衷心的感谢和由衷的敬意！

本文是在导师的悉心指导和严格要求下完成的。导师在论文选题方面以及在论文各阶段富有启发性的指导是本文得以顺利完成的重要保证。导师严谨认真的治学态度、求实创新的科研作风、诲人不倦的敬业品德、乐于助人的师表精神，给我留下了深刻的印象，将永远留在我的脑海里，不仅使我在知识上受益匪浅，而且在学习态度和学习方法上，也使我终生受益。

在我论文的进行过程中，同年级的范西超、韩培宇、周育保、梁波同学在知识上给予了我无私的支持，在研究方法上给予了我很多启发。他们给予我的伟大的友谊使我拥有了一段美好的校园生活，并从他们身上学到了许多东西。

同时，还要感谢杨宇军、景麦丽两位高级工程师给我提供了很好的学习机会，是他们让我对微电子封装领域有了更深一步的了解。在此，我深表谢意。

特别感谢我的父母和远在外地的诸多亲人和朋友，正是他们在情感和生活上所给予地理解、支持和无微不至的关怀，才使得本人能够安心顺利地完成学业。在此向他们表示我最深情的谢意！

最后，特别向在百忙中参加我的论文评阅和答辩的各位老师致以深深的谢意！

参考文献

- [1] 俞忠钰. 中国集成电路产业 2007 年发展态势分析与 2008 年展望. 中国半导体市场年会, 2008.
- [2] 吴懿平. 电子制造技术基础. 第一版. 武汉: 机械工业出版社, 2005.
- [3] 田民波. 电子封装工程. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [4] Wolfgang M. Arden. The International Technology Roadmap for Semiconductors. Current Opinion in Solid State and Materials Science, 2002.
- [5] Martin P. L. 电子故障分析手册. 张伦等译. 第一版. 北京: 科学出版社, 2005.
- [6] 王谦, 汪刚强等. 电子封装中的焊点及其可靠性. 电子元件与材料. 2000, 19(2):24-26.
- [7] 陈国海, 马营生. 热循环过程中焊点残余应变的研究. 电子元件与材料. 2004, 23(11): 37-39.
- [8] 周德俭, 潘开林. PBGA 焊点的热疲劳寿命分析. 机械强度. 1999, 21(3):212-214.
- [9] 张礼季, 王莉等. 塑料封装球栅阵列器件焊点的可靠性. 中国有色金属学报. 2002, 12(S1):227-231.
- [10] 褚卫华, 陈循等. 焊点热应力应变分析与 HALT 热循环温度剖面图优化. 焊接学报. 2003, 24(6):37-42.
- [11] Peter M. Hall. Forces, Moments, and Displacements During Thermal Chamber Cycling of Leadless Ceramic ChiP Carriers Soldered to Printed Boards. IEEE Transactions on Components, and Manufacturing Technology. 1984, 7(4):315-327.
- [12] John H. Lan, Yi-Hsin Pao. Solder Joint Reliability of BGA, CSP, Flip Chip, and Fine Pitch SMT Assemblies. 1997, 7.110-156.
- [13] John H. Lau. Solder Joint Reliability. 1991, 6. 225-236.
- [14] Yi-Hsin Pao, Seott Badgley, Ratan Govila, Linda Baumgartner, and Ron Cooper. Measurement of Mechanical Behavior of High Lead-Tin Solder Joints Subjected to Thermal Cycling. Journal of Electronic Packaging. 1992, 114:135-144.
- [15] 戴锅生. 传热学. 第二版. 北京: 高等教育出版社, 1999.
- [16] 李景. 有限元法. 北京: 北京邮电大学出版社, 1999.
- [17] 严宗达, 王洪礼. 热应力. 北京: 高等教育出版社, 1993.
- [18] 王勖成, 劭敏. 有限单元法基本理论和数值方法. 北京: 清华大学出版社, 1997.

- [19] 张军. 数值计算. 第一版. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [20] W. Engelmaiei. Fatigue Life of Leadless Chip Carrier Solder Joints During Power Cycling. IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology. 1983(3):52-57.
- [21] 徐芝纶. 弹性力学简明教程. 第一版. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [22] 张功学, 侯东升. 材料力学. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008.
- [23] 平 修二主编. 郭廷玮, 李安定译. 热应力与热疲劳基础理论与设计应用. 北京: 国防工业出版社, 1984.
- [24] S. Wiese, A. Schubert, H. Walter, R. Constitutive Behavior of Lead-free Solders vs. Lead containing Solders-Experiments on Bulk Specimens and Flip Chip Joints. IEEE Electronic Components and Technology Conference, 2001.
- [25] Weber G. G Lush, A. M. Zavaliangos et al. An objective time-integration procedure for insotropic rate independent elastic plastic constitutive equations. International Journal of Plasticity. 1990(6):701-749.
- [26] John H. L. Pang, D. Y. R. Chong. Low Thermal Cycling Analysis of Flip-Chip Solder joint Reliability. Component and Package Technologies. 2001(24):705-711.
- [27] Rao R. Thmmala. Fundamentals of Microsystems Packaging. 2002.
- [28] 龚曙光. ANSYS 工程应用实例解析. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [29] 唐兴伦, 范群波, 张朝晖等. ANSYS 工程应用教程—热与电磁篇. 北京: 中国铁道出版社. 2003.
- [30] 博弈创作室. APDL 参数化有限元分析技术及其应用实例. 北京: 中国水利水电出版社. 2004.
- [31] 祝效华, 余志祥. ANSYS 高级工程有限元分析范例. 北京: 电子工业出版社. 2004.
- [32] Falcone. D, Silvestri. A, Bona. G. Integrated Factors Method for Reliability Allocation: Application to an Aerospace Prototype Project. Software Enginneering and Application. ACTA Press. 2002.
- [33] Foucher. B, Boullie. J, Meslet. B, Das. D. A Review of Reliability Prediction Methods for Electronic Devices. Microelectronics Reliability. 2002(42):1155-1162.
- [34] Tunga K. Experimental and Theoretical Assessment of PBGA Reliability in conjunction with Field-Use Conditions. Master Thesis, Mechanical Engineering. Atlanta: Georgia Institute of Technology. 2004.
- [35] JEDEC Standard, JESD22-A104-B, Temperature Cycling, 2000.