


Y1792353

原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的科研成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名: 吴涛 日 期: 2010.4.20

关于学位论文使用授权的声明

本人完全了解山东大学有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留或向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅；本人授权山东大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文和汇编本学位论文。

(保密论文在解密后应遵守此规定)

论文作者签名: 吴涛 导师签名: 王立华 日 期: 2010.5.2

目 录

目 录	I
CONTENTS	I
摘 要	I
ABSTRACT	III
第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 微塑性成形技术的研究现状	1
1.2.1 微体积成形的工艺研究	2
1.2.2 微成形的尺寸效应研究	4
1.2.3 数值模拟技术在微成形中的应用	6
1.3 选题的意义及主要研究内容	9
1.3.1 选题的意义	9
1.3.2 主要研究内容	10
第 2 章 微细特征模压成形工艺的实验研究	11
2.1 引言	11
2.2 实验方案设计	11
2.2.1 实验方法选择	11
2.2.2 实验模具设计与制造	12
2.2.3 坯料的制备与预处理	13
2.3 微细特征模压成形实验研究	15
2.3.1 成形力对模压成形高度的影响	15
2.3.2 微特征尺寸对模压成形高度的影响	16
2.3.3 材料塑性条件对模压成形高度的影响	17
2.3.4 摩擦条件对模压成形高度的影响	18
2.3.5 坯料尺寸对模压成形高度的影响	19
2.4 本章小结	21

第3章 刚塑性有限元基本理论及软件系统	23
3.1 引言	23
3.2 塑性成形过程研究方法	23
3.3 刚塑性有限元基本理论	25
3.3.1 刚(粘)塑性材料的基本假设	25
3.3.2 塑性力学基本方程及边值条件	26
3.3.3 刚(粘)塑性材料的变分原理	26
3.3.4 摩擦边界条件	28
3.3.5 动态接触边界条件的处理	29
3.3.6 网格重新划分	30
3.4 相关软件介绍	30
3.4.1 造型软件	30
3.4.2 数值模拟软件	31
3.5 本章小结	35
第4章 微细特征模压成形规律数值模拟	37
4.1 引言	37
4.2 细柱微特征模压成形数值模拟	37
4.2.1 有限元模型的建立	37
4.2.2 细柱微特征模压成形模拟结果与分析	39
4.3 薄筋微特征模压成形规律数值模拟	45
4.3.1 有限元模型的建立	45
4.3.2 薄筋微特征模压成形模拟结果与分析	45
4.4 数值模拟结果与实验结果的对比	52
4.5 本章小结	53
第5章 微细特征模压变形机理及提高成形性工艺措施	55
5.1 引言	55
5.2 微细特征模压变形机理	55
5.3 微细特征模压成形提高工艺性措施研究	63

5.3.1 有限元模型的重建立	63
5.3.2 提高工艺性措施方案设计	64
5.3.3 模拟结果分析	65
5.4 本章小结	67
第6章 结论与展望	69
6.1 结论	69
6.2 展望	70
参考文献	73
致谢	77

CONTENTS

CONTENTS (CHINESE)	I
CONTENTS (ENGLISH)	I
ABSTRACT (CHINESE)	I
ABSTRACT (ENGLISH)	III
Chapter1 Introduction	1
1.1 Forewords	1
1.2 Present situation of micro plastic forming technique	1
1.2.1 Research of micro bulk forming process.....	2
1.2.2 Research of micro-forming size effect	4
1.2.3 Application of numerical simulation in micro-forming	6
1.3 Significance and contents of the dissertation.....	9
1.3.1 Significance of the dissertation	9
1.3.2 Contents of the dissertation.....	10
Chapter2 Experimental research on coining with micro-feature.....	11
2.1 Forewords	11
2.2 Design of experimental scheme.....	11
2.2.1 Choice of experimental methods.....	11
2.2.2 Design and manufacture of experimental mold	12
2.2.3 Preparation and annealling of specimen.....	13
2.3 Experimental research on coining with micro-feature.....	15
2.3.1 Forming force's impact on coining height.....	15
2.3.2 Micro-feature size's impact on coining height.....	16
2.3.3 Material plastic condition's impact on coining height	17
2.3.4 Friction condition's impact on coining height.....	18
2.3.5 Blank size's impact on coining height	19

2.4	Summary.....	21
Chapter3	Basic theory of rigid plastic FEM and software system.....	23
3.1	Foreword.....	23
3.2	Research methods in metal forming process	23
3.3	Basic theory of Rigid plastic FEM	25
3.3.1	Basic assumptions of rigid(visco)-plastic materials.....	25
3.3.2	fundamental equation and boundary conditions of plastic mechanic	26
3.3.3	variation principle of rigid(visco)-plastic materials	26
3.3.4	Friction boundary conditions	28
3.3.5	Dynamic contact boundary conditions.....	29
3.3.6	Grids' re-division.....	30
3.4	Introduction of software system	30
3.4.1	Modeling software.....	30
3.4.2	Numerical simulation software	31
3.5	Summary.....	35
Chapter4	Numerical simulation of deformation law on coining with micro-structural characteristic.....	37
4.1	Forewords	37
4.2	Numerical simulation of on coining with micro-cylinder	37
4.2.1	Establishment of FEM model	37
4.2.2	Numerical simulation results and analysis of coining with micro-cylinder.....	39
4.3	Numerical simulation of on coining with thin bar.....	45
4.3.1	Establishment of FEM model.....	45
4.3.2	Numerical simulation results and analysis of coining with thin bar .	45
4.4	Contrast of numerical simulation results and experimental results	52
4.5	Summary.....	53
Chapter5	Deformation mechanism of coining with micro-structural characteristic and	

CONTENTS

mesures of improving coining process' formability	55
5.1 Forewords	55
5.2 Deformation mechanism of coining with micro-structural characteristic .	55
5.3 Research of mesures of improving coining process' formability	63
5.3.1 Re-establishment of FEM model.....	63
5.3.2 Design of improving coining process' formability	64
5.3.3 Numerical simulation results and analysis	65
5.4 Summary.....	67
Chapter6 Conclusion and prospect.....	69
6.1 Conclusion	69
6.2 Prospect.....	70
References	73
Acknowledgements	77

微细特征模压成形实验研究及数值模拟

摘要

随着微系统技术（MST）、微机电系统（MEMS）的产业化，微细加工技术成为机械制造领域新的研究与应用热点。而微塑性成形技术以其高生产率、低材料损失、产品力学性能优秀和误差小等特点在微细零件和具有微细特征构造的零件的加工领域中占很大比例。由于加工对象尺寸微小，微塑性成形技术存在不同于宏观成形的规律。本文采用实验研究和计算机数值模拟相结合的方法，研究分析微细特征模压成形中的基本规律和内在机理。

设计并加工带有微孔和微槽的精密模压模具。以塑性较好的纯铜为试验材料，对细柱和薄筋两种典型的微细特征进行模压成形实验，将微细特征的成形高度作为模压成形难易程度的评价标准，得到不同成形力、试样热处理状态、坯料尺寸、微细特征尺寸以及摩擦条件等因素下微细特征模压的成形规律。

通过纯铜性能单向压缩实验得到实验条件下的纯铜流动应力曲线，建立有限元模型，利用有限元分析软件模拟微细特征模压成形过程，结合实验结果，总结出不同坯料尺寸、微细特征尺寸、摩擦条件以及凹模圆角半径等因素下微细特征模压的成形规律。

结合有限元模拟结果，对影响微细特征模压成形的坯料尺寸、微细特征尺寸、摩擦条件以及圆角半径等参数进行分析。根据坯料局部变形方式的不同，引入变形区域的概念；通过对变形区域材料的场量分析，揭示不同成形参数下微细特征模压变形的内在机理；并以有效降低成形力为目标，研究探讨提高微细特征成形性的工艺措施。本文可为微体积成形及其他微成形工艺的实际生产提供参考。

关键词 微细成形；模压；有限元模拟；成形规律；变形机理

Experimental Investigation on Coining with Micro-feature and Numerical Simulation

ABSTRACT

With the industrialization of micro system technology (MST) and micro electro mechanical systems (MEMS), micro processing technology becomes a new research and application hot spot in the field of machinery manufacturing. Besides, due to its high productivity, low material losses, fine product quality and accuracy, the micro plastic forming technology occupies a large proportion in this area where micro parts and parts with micro features were processed. However, because the size of specimen in processing are extremely small, the law in micro plastic forming technology is different from macro plastic forming. In this thesis, the basic law and mechanism in coining with micro-structural characteristics were accomplished by experimental investigation and numerical simulation.

First, the precision coining mold with micro-hole and micro-slot were designed and manufactured. And, using pure copper as the test materials because of its better plasticity, the micro-cylinder and thin-bar which are two typical micro features were coined in the experiments. Then the height of micro-feature was selected as the evaluation criteria for the deformation behavior. The influences of forming load, heat treatment condition, size of specimen, size of micro feature and friction condition on the height of micro-feature were concluded.

The stress-strain curve of pure copper is obtained from uniaxial compression experiment. On these basis, the FEM model was established and used in the finite element analysis software to simulate the coining process with micro feature. Combining the simulational and experimental results, the deforming law was also summarized under different factors such as size of specimen, size of micro feature friction condition and radius of die.

Based on the finite element simulation results, the parameters referred above which have the influence on coining with micro-feature were analyzed. According to the deforming way of specimen, the concept of deformation region was introduced. By analyzing materials of the field on the deformation region, the mechanism of the coining process with micro-feature were disclosed under different parameters. To reduce the forming force, techniques that are improving the formability of coining with micro-feature were studied. The thesis could provide technical references for the process of micro plastic forming and other micro-forming.

Keywords: Micro-forming; Coining process; Numerical simulation; Deforming law; Deforming mechanism

第1章 绪论

1.1 引言

随着电子工业及精密机械的飞速发展，产品微型化已成为工业界的发展趋势之一，特别是在通讯、电子、微系统技术（MST）、微机电系统（MEMS）等领域。除电子组件以外，各种插头插槽、微细螺钉、主框架等微型组件也大量使用^[1-4]。由此，以形状尺寸微小或操作尺寸极小为特点的微细加工技术日益得到关注并取得了迅速发展。在微型零件的微细加工制造技术中，利用金属的塑性能力来进行微构造与微细特征的成形占很大比例^[5]。因此，面向微细制造的微细特征塑性成形技术具有重要的研究意义和应用前景。

模压成形通常是闭式模锻，其变形特点是仅局部区域的金属发生变形，而不产生大范围的金属体积流动，几何形状的三维可示踪性强^[6]。由于变形存在微小结构，微细特征模压和微挤压、微镦粗都属于微塑性体积成形。本文利用实验研究的方法对微细特征模压成形进行研究，并与计算机数值模拟相结合分析其成形规律与变形机理，对研究更复杂的微挤压以及微型腔填充成形工艺乃至其它微体积成形工艺具有重要的指导意义和实用价值。

1.2 微塑性成形技术的研究现状

微型化产品包括微零件(Micro-part)，微结构零件(Micro-structured Components)和微精度零件(Micro-precision Parts)三类。微零件可理解为具有低于毫米级的内部特征形状，而外形只有几毫米的微小零件；微结构零件的外形在几毫米到几厘米之间，但在其一个或几个面上嵌有微米级甚至纳米级的微细结构零件；微精度零件一般指高精度零件，其外形及内部特征具有微米级的几何公差，尺寸精度小于1%。微成形技术主要适用于成形微零件和微结构零件。作为一种新的塑性加工技术，微成形是指利用材料的塑性变形来生产至少在两维方向上尺寸处于毫米量级以下零件的技术。典型的微成形工艺有微挤压、微冲压、微模锻工艺等。这一技

术继承了传统塑性加工技术的高生产率、最小或零材料损失、最终产品力学性能优异和误差小的特点，使得这一工艺适合于近净产品或净产品的大批量生产。利用这一技术生产的微小尺度的零件如连接件、接触弹簧、导线框等大量应用于微电子、医疗、微机械等行业当中^[7-9]。

1.2.1 微体积成形的工艺研究

在微体积成形方面，主要进行微连接器、弹簧、螺钉、顶杆、齿轮、阀体、泵和叶片等微型器件的精密成形研究，涉及到的工艺有微挤压、微锻造、微铸造等。其中螺钉最小尺寸可以达到 $M0.8\text{ mm}$ ，微成形坯料(线材)最小直径为 0.3 mm ，模压成形的微结构件沟槽最小宽度可以达到 200 nm 。常见的微型件如图 1-1 所示^[10,11]。

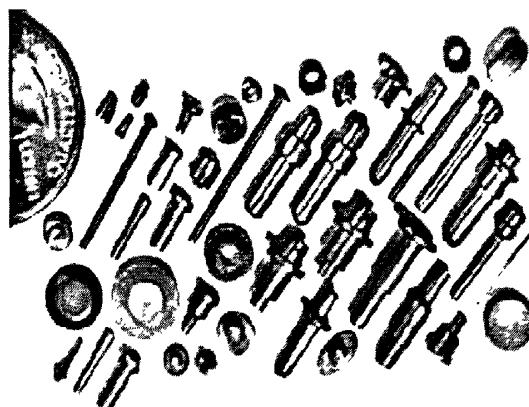


图 1-1 常见微型件

Y.Saotome 教授领导的研究小组利用自行研制的微型模具装置系统地研究了微型齿轮的微成形技术^[12]，节圆直径最小可以达到 $200\text{ }\mu\text{m}$ ，并将微成形的模数为 0.1 mm 、分度圆直径分别为 1.0 mm 和 2.0 mm 、齿数为 10 和 20 个的微型齿轮，用直径为 0.4 mm 的轴作为齿轮轴，组装成减速比为 $1/128$ 的微型减速装置。如图 1-2 所示。

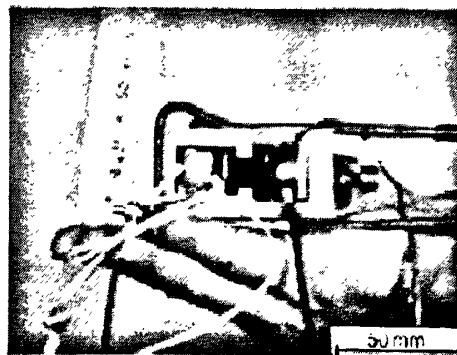


图 1-2 微型减速装置

美国 Colorado 大学的 Dunn 教授等人利用微锻造和微铸造组合技术完成了齿轮、叶片等微型构件的成形和组装^[13]。

日本学者 Yoshida 对手表上微型零件（图 1-3）的多工位成形工艺进行了有限元分析和实验研究^[14]，并将常规的锻造工艺由三步改为四步（图 1-4），采用锥形冲头增加内部金属的变形速率，有效提高了零件的成形质量，如图 1-5。

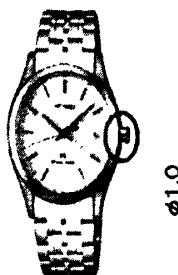


图 1-3 微型零件的几何形状和尺寸

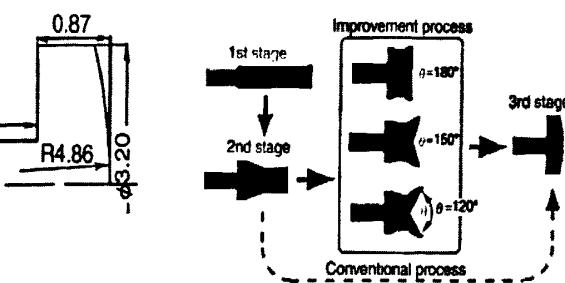


图 1-4 改进后的工艺过程

(a) Conventional (b) $\theta = 180^\circ$ (c) $\theta = 170^\circ$ (d) $\theta = 150^\circ$ (e) $\theta = 120^\circ$ 

图 1-5 改进后锥形角度对表面质量的影响

M.Geiger 教授对微型构件的冷锻工艺进行了研究，重点研究了微小化对挤压件精度的影响，研究结果表明微型挤压件的晶粒尺寸不仅影响挤压件的形状和尺寸精度，而且对挤压件的机械性能也有重要的影响。此外，各国学者还利用轧制、

精压和局部锻造等体积成形方法精密成形各种微型器件^[15]。

国内方面,哈尔滨工业大学的郭斌教授和单德彬教授^[15,16]等设计并制造了一套集计算机、微压力传感器、微位移传感器和热电偶等各种测量和控制技术一体化的精密微塑性成形系统,并用5A02铝合金等温精密成形出微齿轮。如图1-6,图1-7,图1-8所示。

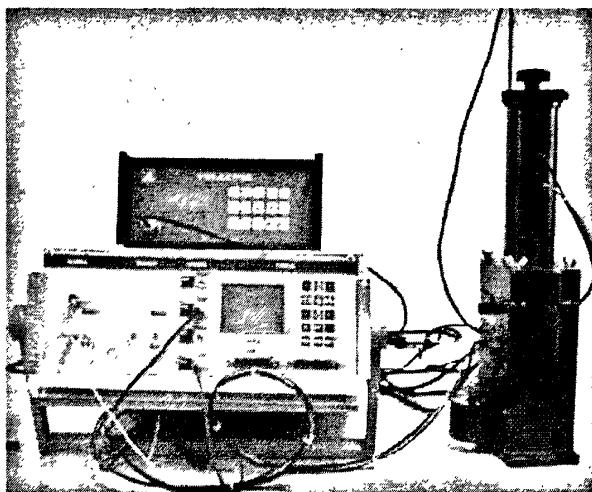


图 1-6 微成形的成形设备

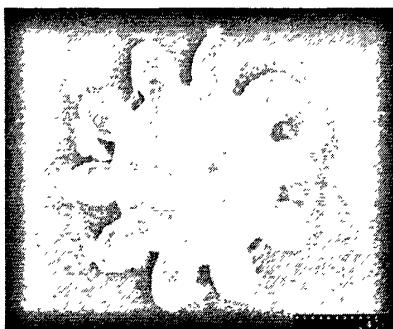


图 1-7 微型齿轮的 SEM 照片图

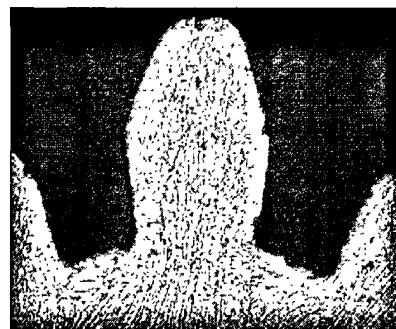


图 1-8 微型齿轮的横向截面流线

1.2.2 微成形的尺寸效应研究

尺寸效应是指在微成形过程中,由于制品整体或局部尺寸的微小化引起的成形机理及材料变形规律表现出不同于传统成形过程的现象。究其原因,目前的理解是,与宏观成形相比,微成形制品的几何尺寸和相关的工艺参数可以按比例缩小,但仍有一些参数是保持不变的,如材料微观晶粒度及表面粗糙度等。所以不

能将微成形过程简单理解为宏观成形过程的等比微型化，而且在具体的微成形过程中材料的成形性能、变形规律以及摩擦等确实表现出特殊的变化^[17]。

日本的 Sasawat Mahabunphachai 在研究微成形的过程中，引进了比值 N ，即试样尺寸（直径或厚度）与晶粒尺寸之间的比值^[18]。通过对不同材料的试样拉伸等实验的应力应变曲线的分析（图 1-9），得出结论：晶粒尺寸无论对于微型件和宏观件的塑性都有影响，但只有当 N 在 10~15 的时候，尺寸效应才会影响到金属成形，同样的趋势也表现在镦粗实验中。值得注意的是，当 N 小于一定比值时，金属表现出更多的是单晶的性质，所以流动应力反而上升（图 1-10）。

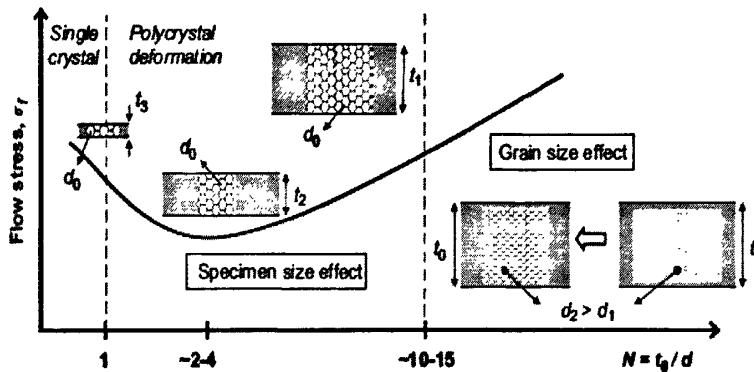


图 1-9 尺寸效应和晶粒大小对流动应力的影响^[18]

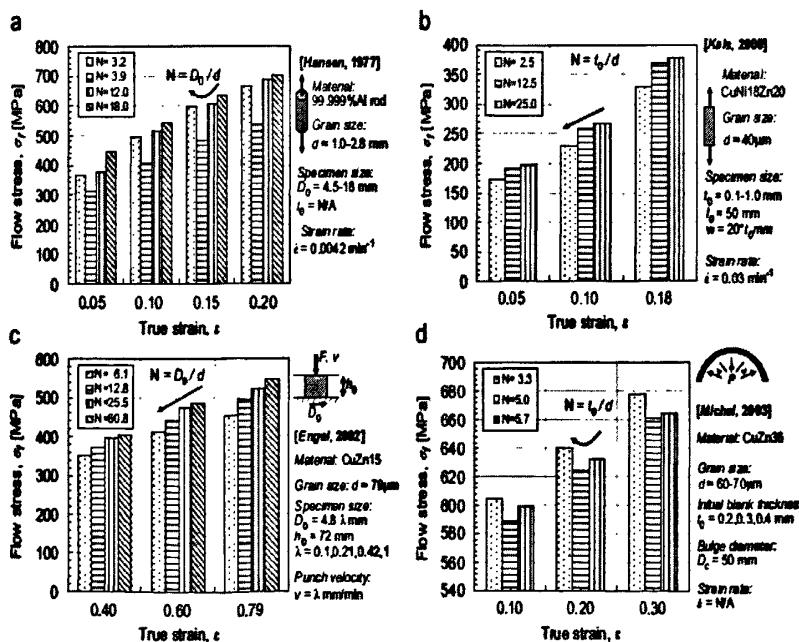


图 1-10 不同实验中 N 对材料流动应力的影响^[18]

国内方面,哈尔滨工业大学的郭斌教授和单德彬等人针对微型镦粗件的流动性进行了研究^[19]。图 1-11 是平均晶粒尺寸大小 L 分别为 $10 \mu\text{m}$ 、 $45 \mu\text{m}$ 和 $65 \mu\text{m}$, 应变速率为 0.002 s^{-1} , 试样尺寸大小分别为 $\Phi 0.81 \times 1.62 \text{ mm}$ 和 $\Phi 1.54 \times 1.62 \text{ mm}$ 的纯铜圆柱形试样在室温下镦粗压缩时的真应力-应变曲线。在室温变形过程中, 试样的变形遵循 Hall-Petch 公式, 即随着试样晶粒尺寸的增大, 试样的流动应力呈现出减小的趋势, 表现出一定的尺寸效应。

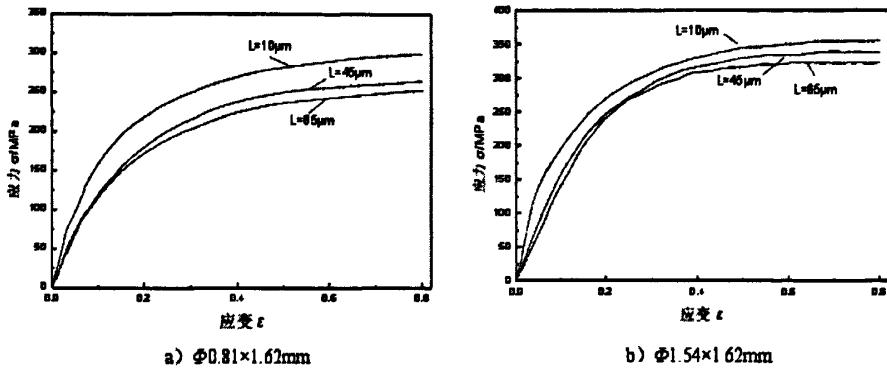


图 1-11 晶粒尺寸对流动应力的影响^[19]

1.2.3 数值模拟技术在微成形中的应用

微成形数值模拟是微体积成形工艺设计的有效辅助手段, 通过微成形工艺过程的模拟可以减少实验摸索的次数, 节约工艺设计的时间与成本。特别对于成形模具等主要微成形工具的设计, 需要大量的资金与精力的投入, 通过精确的数值模拟可以预见工艺中的问题, 为工艺设计和工艺优化提供必理论依据。由于微细成形的特殊性, 相应的数值模拟建模方法有有差异, 在这一方面很多学者进行了开创性的研究。目前, 针对微成形的数值模拟技术的研究主要有基于实验数据的微成形数值模拟、表面层理论和晶粒晶界理论。

由于微成形的成形原理方面的理论还不够成熟, 国内外很多学者利用传统的有限元理论, 在获取实验数据的基础上对微成形的成形工艺进行研究。

韩国学者 Ku 和 Hwang 等通过数值模拟和实验研究了尺度在毫米以下的拉深成形工艺^[20]。基于 SPEC (深冲用冷轧碳素钢薄板钢) 的塑性变形数据, 运用相似设计方法来设计微盒形件的成形工艺, 并采用 8 节点的实体单元来模拟成形工艺。

过程。

根据实验要求, 模拟设定凸模下压 4 mm, 成形力在 200-400 N 之间, 如图 1-12 所示。通过模拟可以看出, 零件变薄最严重处出现在成形力为 260 N 的底角区域。模拟结果与实验结果相当吻合, 如图 1-13 所示。

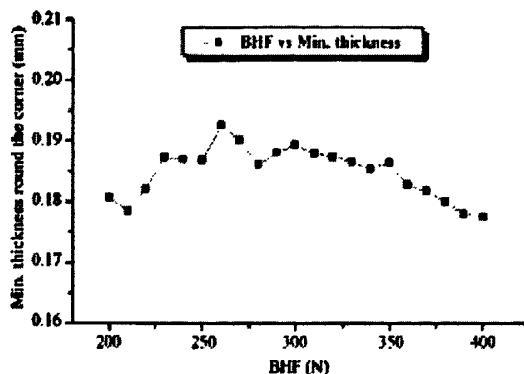


图 1-12 不同成形力下工件所得到最大厚度^[20]

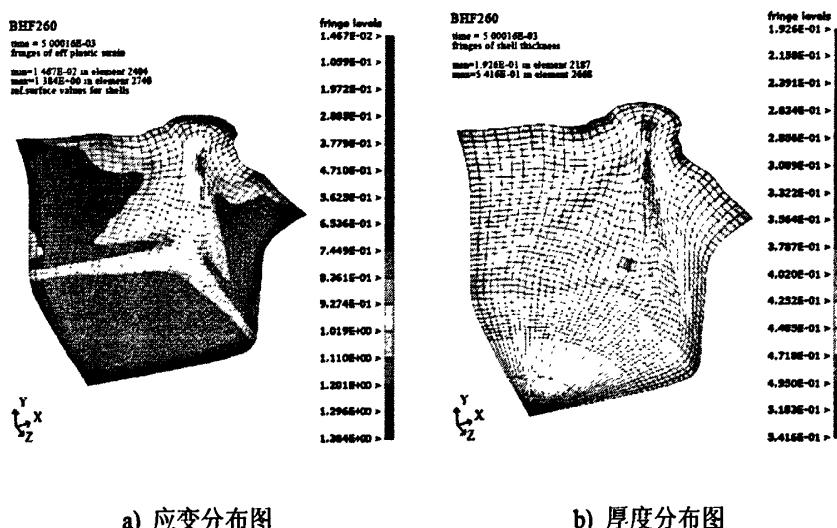
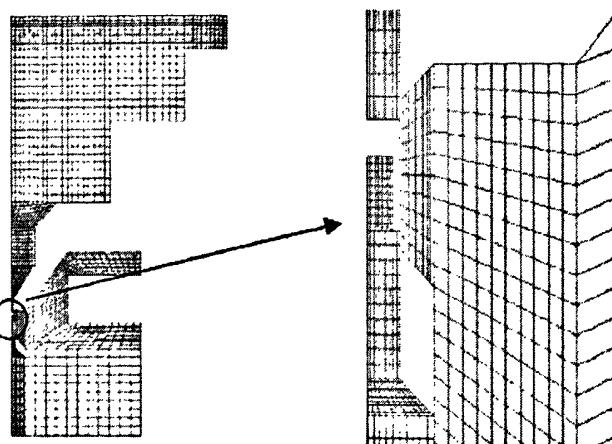


图 1-13 成形力为 260 N 时的模拟结果^[20]

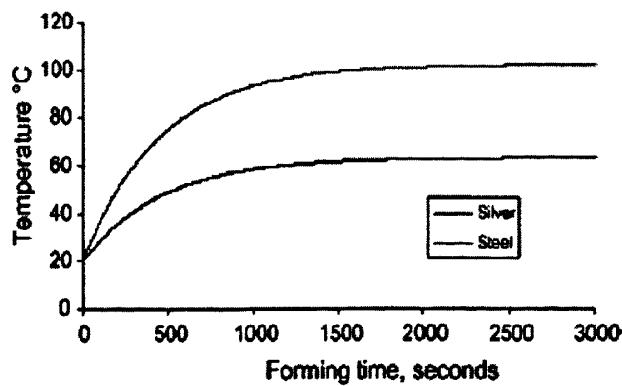
University of Strathclyde 的 Pan 和 Qin 等根据材料特性分别对纯银和低碳钢的多循环微挤压工艺进行研究^[21]。通过热力耦合采用传统的有限元模拟手段对多循环微挤压工艺的模具及坯料温度分布进行了研究。其所建立的闭式模锻有限元模拟模型如图 1-14 所示。

图 1-14 闭式模锻的有限元模拟模型^[21]

模拟从材料选择, 初始温度, 摩擦和循环时间等条件对微挤压工艺进行分析, 结果表明随着摩擦的增大和循环时间的增加, 模具温度呈明显的上升趋势。

表 1-1 成形过程各部分的最高温度^[21]

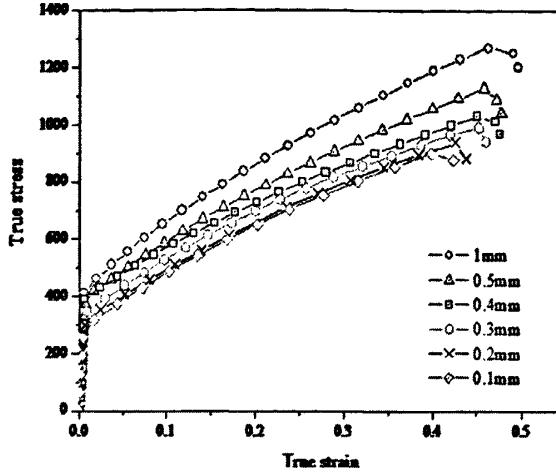
Friction coefficient	$T_{\text{component}} (\text{°C})$ (fully formed)	$T_{\text{die inner surface}} (\text{°C})$ (fully formed)	$T_{\text{die inner surface}} (\text{°C})$ (when ejected)
0.05	71.26	21.87	20.33
0.10	75.19	22.25	20.50
0.20	80.61	22.62	21.17

图 1-15 模具温度与成形时间的关系^[21]

上海交通大学的刘芳在传统 Swift 模型的基础上结合大量实验数据, 将尺寸效应 (厚度 t) 通过最小二乘法引入板料材料的本构关系中, 拟合到应力应变关系与实验得到的真实应力应变关系有较好的吻合度^[22]。如表 1-2 所示。

表 1-2 两种 Swift 模型的对比^[22]

	不考虑应变速率的本构方程	待定系数
传统的 Swift 模型	$\sigma_k = k(\varepsilon_0 + \varepsilon)^n$	k, n
考虑尺寸效应的 Swift 模型	$\sigma_k = a \exp(bt)(\varepsilon_0 + \varepsilon)^{n(\exp(bt)-1)}$	a, b, n, t

图 1-16 不同厚度板料材料的真应力应变曲线^[22]

1.3 选题的意义及主要研究内容

1.3.1 选题的意义

本课题来源于国家自然科学基金项目“微体积成形有限元数值模拟技术应用中的基础问题研究”(项目编号为 50975163)。

从上述微细塑性成形技术的研究现状和发展可以看出, 作为一种新兴多学科交叉的微型零件加工技术, 微细塑性成形技术自从其出现以来, 就因诸多的优点而迅速发展, 并已部分应用于电子行业微型零件的制造。然而, 由于微小尺度下一系列尺寸效应现象的出现, 微细塑性成形技术在成形理论, 零件尺度及材料、模具构造、模具制造等方面都明显区别于传统成形工艺。因此, 传统的塑性成形理论和技术不能简单地直接用于微细成形领域, 限制了微细塑性成形技术的发展与广泛应用。微细塑性成形技术目前尚处在实验研究阶段, 成形的零件多为简单

零件。因此,研究微细特征模压成形变形机理与成形规律以及尺度效应的影响,对于进一步研究微细塑性成形技术以及生产形状复杂的高强度微型零件,乃至对于微型机电产品和微系统的开发和产业化都具有十分重要的意义。

1.3.2 主要研究内容

本课题采用实验研究与计算机数值模拟分析相结合的方法来研究微细特征成形工艺,主要有以下三部分研究内容:

- (1) 采用模压实验的方法研究在微细特征成形中成形力、试样热处理状态、坯料尺寸、微细特征尺寸以及摩擦条件等参数对微细特征成形的影响规律;
- (2) 结合实验,利用有限元分析软件 Deform 对细柱和薄筋两种微细特征成形过程进行模拟,研究总结不同工艺参数下微细特征模压成形的规律。
- (3) 根据局部变形方式的不同,引入主要变形区域的概念;通过对变形区域材料的场量分析,揭示不同成形参数下微细特征模压变形的内在机理;并研究探讨提高微细特征成形性的工艺措施。

第2章 微细特征模压成形工艺的实验研究

2.1 引言

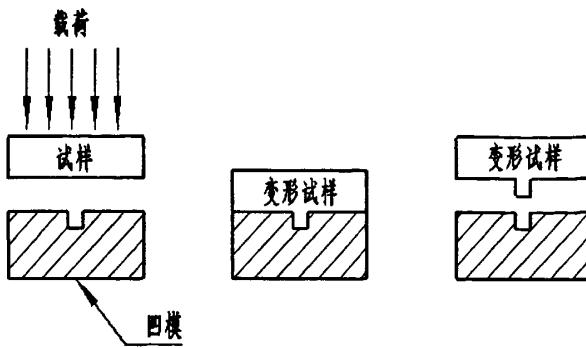
近年来随着微机电系统的迅速发展，对微小零件的需求越来越迫切。塑性成形在批量生产、低成本和成形件强度高等方面有很大的优势，因此研究微型零件的微塑性成形技术是非常必要的。所谓微塑形成形技术，是指利用材料的塑形生产至少在两维方向上尺寸处于 1 毫米以下零件的技术。而在微型零件的微塑性成形中，对微型模具型腔的填充或挤压成形又占有很大的比例。由于在微成形过程中存在尺寸效应，表现出了与常规宏观成形不同的规律。因此，对材料微填充成形规律的研究具有重要的理论意义和实用价值。

本章以细柱和薄筋两种典型的微细特征为例，采用模压实验方法研究不同成形力、试样热处理状态、坯料尺寸（厚度）、微细特征尺寸以及摩擦条件等因素对微细特征模压成形工艺的影响，从而研究材料在微细特征成形中的变形规律。

2.2 实验方案设计

2.2.1 实验方法选择

根据微成形的特点，选用了模压成形的实验方法，研究成形工艺参数对微细特征成形的影响规律。模压的变形特点是仅局部区域的金属发生变形，而不产生大范围的金属体积流动，几何形状的三维可示踪性强。由于变形存在微小结构，微细特征模压和微挤压、微镦粗都属于微塑性体积成形。尽管模压看起来比较简单，只不过是利用塑性成形使工件与模具几何匹配，然而以下方面限制了微米级尺寸的微特征模压：卸载过程的变形，润滑剂过量，模具损伤等等^[23]。模压微成形过程如图 2-1 所示。

图 2-1 模压微成形过程^[23]

实验设备采用微机控制电子万能试验机 CMT5000，该系统能通过计算机对成形过程中的成形力、位移、冲头速度等参数进行采集和控制，如图 2-2 所示。

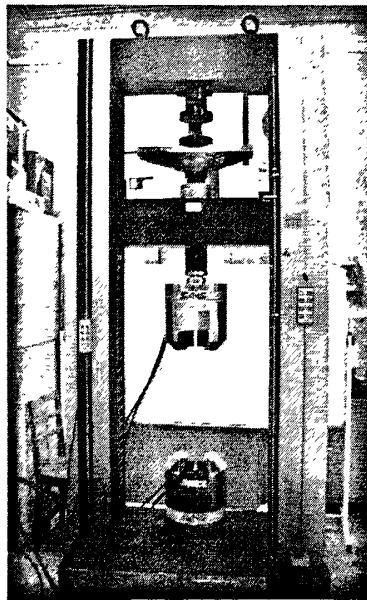


图 2-2 电子万能试验机 CMT5000

2.2.2 实验模具设计与制造

实验将模具的模腔设计成直径不同的微孔和宽度不同的微槽，并且孔径和槽宽的尺度均在 1mm 以下，以使成形得到的微细特征在 1mm 以内。选用的模具材料为典型的模具钢 5CrNiMo。为了保证模具具有良好的精度，表面光泽度和垂直度，采用精细电火花加工，使冲头表面及凹模内腔表面的粗糙度达到 $Ra0.1$ 以下。

设计并加工制造的微特征微孔和微槽凹模实物如图 2-3 所示。

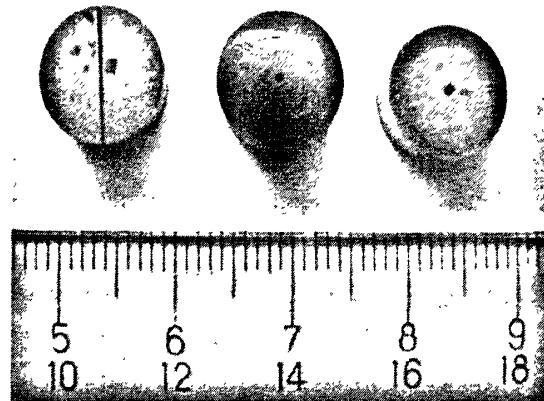


图 2-3 微特征凹模实物照片

整套实验模具的装配图及实物照片如图 2-4 所示。

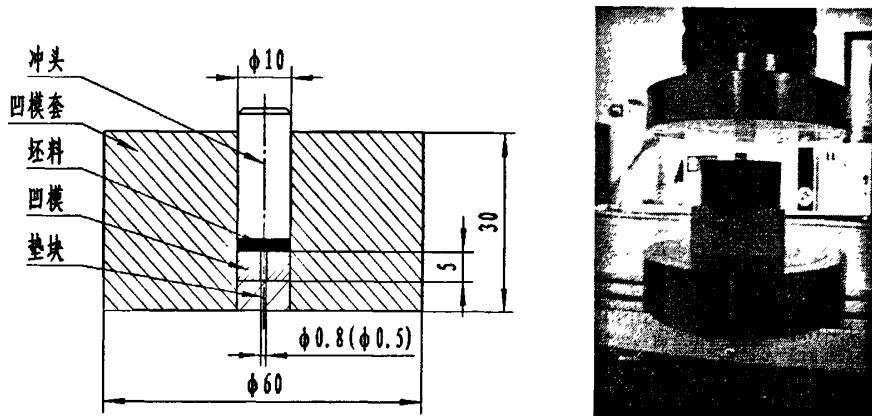


图 2-4 实验模具的装配图及实物照片

2.2.3 坯料的制备与预处理

微细特征成形与宏观成形相比难度较大，要求选用塑性较好的材料来进行成形。本文选用紫铜棒作为原材料，紫铜(即纯铜)除了具有优良的导电、导热性及耐腐蚀性，同时具有良好的塑性。紫铜的化学成分如表 2-1^[24]所示。

表 2-1 紫铜化学成分

	Cu	Pb	Bi	Fe	Sn	As
质量分数 (%)	>99.9	0.005	0.002	0.005	0.005	0.002

由于在市场上选购的工业纯铜是轧制所得，晶粒不均匀，为提高塑性及各项同性指标，需要对试件进行退火处理^[24,25]。同时，为使坯料具有较好的塑性，并具有不同的塑性指标，分别采用了以下两种具有不同保温温度及保温时间的热处理规范对试样进行退火处理^[26,27]：430 °C退火保温1小时；800 °C退火保温48小时。经过热处理后试件的晶粒尺寸及金相照片如表2-2和图2-5所示。

表2-2 热处理工艺与晶粒尺寸

热处理工艺	原始状态	430 °C退火保温1小时	800 °C退火保温48小时
晶粒尺寸 (μm)	120	70	400

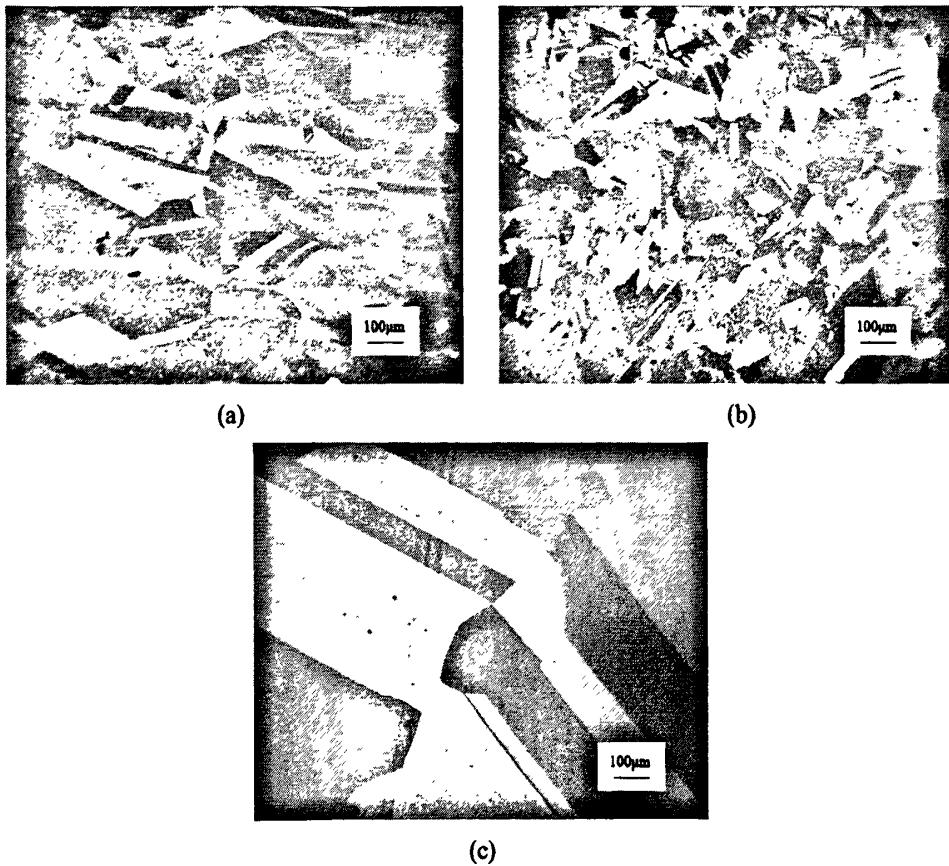


图2-5 三种不同热处理状态下的试件晶粒金相照片：(a)原始状态试件晶粒金相照片；(b)经430 °C退火保温1小时试件晶粒金相照片；(c)经800 °C退火保温48小时试件晶粒金相照片

图2-5 (a)为原始状态，由于棒料为冷拉棒，可见晶粒沿轴向变形方向发生歪扭。(b)为试件经430 °C退火保温1小时后的金相照片，变形组织已完全再结晶，晶粒平均尺寸约为70 μm。(c)试件经800 °C48小时保温退火后的金相照片，

变形组织完全再结晶后，晶粒持续长大，其晶粒平均尺寸约为 400 μm 。

由于坯料尺寸非常微小，其表面对划痕、毛刺等缺陷的敏感性增强，因此传统坯料加工工艺已不再可用^[28]。本课题中坯料形状采用精细电火花线切割加工，为了保证模压实验的精确性，要注意以下几个方面：（1）坯料端面的平行度和端面与轴的垂直度；（2）控制电火花加工的放电量和线切割速度，以保证坯料能够及时散热；（3）坯料的表面质量，一般采用超声波去污，并进行细磨。

2.3 微细特征模压成形实验研究

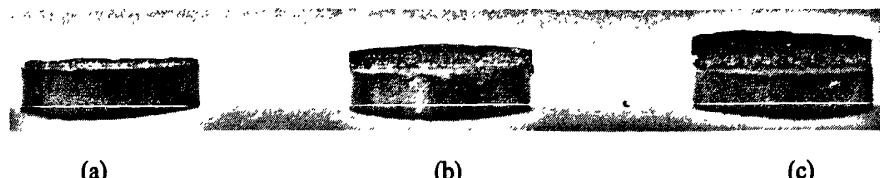
微细特征模压成形属于微体积成形，其工艺过程受以下多种因素的影响^[23]：微特征种类及其尺寸，也即微孔直径或微槽宽度的大小；坯料尺寸，如坯料厚度、坯料外径等；坯料的热处理状态也即塑性情况；摩擦条件，有无润滑，润滑剂的种类和性质；成形力的大小及加载速度；变形温度等。本文中微细特征模压成形实验，是在室温环境下进行的，以不同条件下的微细特征成形高度为评价标准，对成形力，塑性条件，微特征尺寸，摩擦条件及坯料尺寸（厚度）这五个因素进行研究，现分别阐述针对上述几种因素开展的实验方案和实验结果。

2.3.1 成形力对模压成形高度的影响

凹模选用槽宽为 0.3 mm 的微槽模，试件为经 800 $^{\circ}\text{C}$ 保温退火 48 h，厚度为 2.0 mm 的纯铜圆形坯料，试件及模具表面采用石墨润滑。分别使用了 90 kN，135 kN，180 kN 的成形力对试件进行了薄筋微细特征模压成形实验。每个试件微特征薄筋的高度采用千分尺测量高中低三点取其平均值，实验结果如表 2-3 和图 2-6 所示。

表 2-3 不同成形力下的薄筋微细特征模压成形高度

成形力	微特征高度(mm)			微特征高度
	试件 1	试件 2	试件 3	平均值(mm)
90kN	0.303			0.303
135kN	0.991	0.969	1.042	1.001
180kN	1.635			1.635

图 2-6 不同成形力 F 下的薄筋微特征模压试件:(a) $F=90$ kN (b) $F=135$ kN (c) $F=180$ kN

本组实验是为了获得理想的成形力而设置, 所选用的万能试验机的极限成形力是 200 kN, 选择 180 kN 进行实验时, 成形高度达到了 1.635 mm, 但是这时所设计的模具冲头发生了变形; 第二次采用 90 kN 进行实验, 成形高度仅为 0.303 mm (约等于缝隙的宽度); 选择 135 kN 进行实验时, 成形高度则达到约为 1.0 mm, 较为理想, 于是选定 135 kN 作为本实验的成形力。同时, 从实验结果看出, 虽然同是增大了 45 kN, 但第二组比第一组的成形高度高出约 0.7 mm, 而第三组比第一组的成形高度高出约 0.6 mm, 这说明变形初期比变形后期难度要大。

2.3.2 微特征尺寸对模压成形高度的影响

凹模选用孔径为 $\Phi 0.5$ mm 及 $\Phi 0.8$ mm 的微孔模, 试件为经 800 ℃ 保温退火 48 h, 厚度为 2.0 mm 的纯铜圆形坯料, 试件及模具表面采用石墨润滑, 成形力为 135 kN, 分别对两种不同微特征尺寸凹模下的试件进行了模压成形实验。微特征细柱的高度采用千分尺测量, 实验结果如表 2-4 及图 2-7 所示, 表中 H 为成形得到的微特征细柱高度, D 为细柱的直径。

表 2-4 不同直径的细柱微特征模压成形高度

微特征直径 (mm)	微特征高度(mm)			微特征高度 平均值(mm)	微特征高径比 H/D
	试件 1	试件 2	试件 3		
$\Phi 0.5$	0.567	0.577	0.549	0.564	1.13
$\Phi 0.8$	0.988	1.186	1.203	1.126	1.41

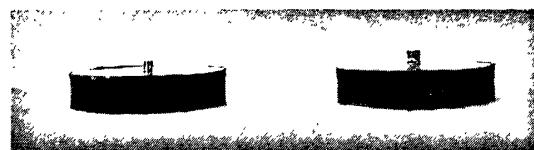


图 2-7 不同直径的细柱微特征模压试件

由表 2-4 细柱微特征成形高度值及其高径比可以看出, 微特征尺寸越小, 其成形难度越大。

2.3.3 材料塑性条件对模压成形高度的影响

凹模选用宽度为 0.3 mm 的微槽模, 试件为三种不同的热处理状态: 未经退火处理, 经 430 °C 保温 1 h 退火及经 800 °C 保温 48 h 退火, 并且厚度都为 2.0 mm 的纯铜圆形坯料, 试件及模具表面采用石墨润滑, 成形力设定为 135 kN, 分别对上述三种不同状态的试件进行了薄筋微特征模压成形实验。每个试件微特征薄筋的高度采用千分尺测量高中低三点取其平均值, 实验结果如表 2-5 和图 2-8 所示。

表 2-5 不同退火处理条件的薄筋微细特征成形高度

退火处理方法	薄筋微细特征高度(mm)			薄筋微细特征高 度平均值(mm)	薄筋微细特征高宽比
	试件 1	试件 2	试件 3		
未处理	0.483	0.457	0.448	0.463	1.54
430 °C 保温 1 h	0.871	0.811	0.892	0.858	2.86
800 °C 保温 48 h	0.991	0.969	1.042	1.001	3.34

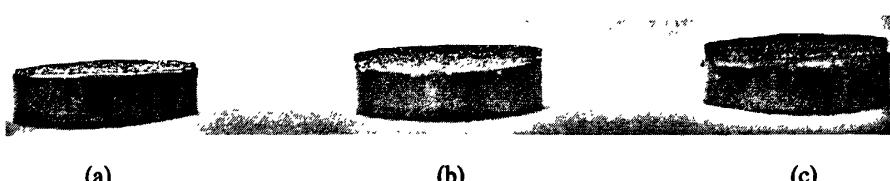


图 2-8 不同热处理条件的薄筋微特征模压试件

(a) 未处理 (b) 430 °C 保温 1 h (c) 800 °C 保温 48 h

经过退火处理的试件成形高度明显高于未经退火处理的原始坯料试件, 同时由第二组与第三组的实验结果对比可见, 提高退火温度和保温时间在适当降低流动应力同时也能够提高其塑性, 但塑性提高的效果并不显著。

此外,经800℃保温48h退火相同的试件材料的0.3mm薄筋微特征成形高度与相同实验条件下的Φ0.8mm细柱微特征成形高度相当,而远大于Φ0.5mm细柱的成形高度。从成形的微特征的高径比及高宽比比较来看,薄筋较细柱更易成形。表2-6按宏观挤压成形挤压比的定义(参与变形的坯料横截面积与所成形结构的横截面积之比)计算给出了细柱及薄筋微特征模压成形的挤压比,从中也可以看出,薄筋挤压比远小于细柱的挤压比,因此,从挤压成形规律看,0.3mm薄筋的成形性理应较Φ0.5mm与Φ0.8mm细柱的成形性好。

表2-6 不同微细特征模压成形挤压比

不同微细特征	Φ0.5mm 细柱	Φ0.8mm 细柱	0.3mm 薄筋
挤压比	400	156	33

2.3.4 摩擦条件对模压成形高度的影响

凹模选用Φ0.8mm的微孔模,成形力为135kN,试件为经800℃保温退火48h,厚度为2.0mm的纯铜圆形坯料,对摩擦条件分别为以下两种不同情况进行了细柱微特征模压成形实验:坯料表面抛光,坯料与模具接触面都进行石墨粉涂刷润滑;坯料表面不抛光,坯料与模具接触面不润滑。微特征细柱高度采用千分尺测量,实验结果如表2-7和图2-9所示。

表2-7 不同摩擦条件的细柱微特征模压成形高度

摩擦条件	微特征高度(mm)			微特征高度 平均值(mm)
	试件1	试件2	试件3	
表面抛光及石墨润滑	0.988	1.186	1.203	1.126
表面未抛光及无润滑	1.006	0.995	0.963	0.988

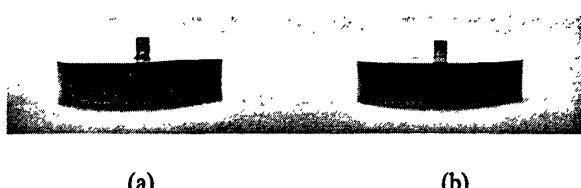


图2-9 不同摩擦条件的细柱微特征模压试件:

(a) 表面抛光及石墨润滑 (b) 表面未抛光及无润滑

摩擦条件对微特征成形高度具有一定影响,就本组实验条件来看,采取石墨润滑相比无润滑条件,可提高变形程度约20%。同时,从成形后的试件表面状况可以看出,有润滑的试件比无润滑的试件表面光洁。因此,为了提高微细特征的成形性及成形试件的表面质量,应尽量对坯料表面进行抛光处理,并采用润滑进行成形。

2.3.5 坯料尺寸对模压成形高度的影响

凹模选用 $\phi 0.8\text{ mm}$ 微孔模,试件为经 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保温 48 h 退火的纯铜圆形坯料,试件及模具表面采用石墨润滑,成形力设定为 135 kN ,分别对厚度为 0.5 mm , 1.0 mm , 2.0 mm , 3.0 mm , 4.0 mm , 5.0 mm 的试件进行了细柱微特征模压成形实验。微特征细柱的高度采用千分尺测量,实验结果如表2-7及图2-10所示,表中 H 为成形得到的微特征细柱高度, D 为细柱的直径。

表2-7 不同试件厚度的细柱微特征模压成形高度

试件厚度 (mm)	微特征高度(mm)			平均值(mm)	微细特征 高径比 H/D
	试件1	试件2	试件3		
0.5	0.570	0.604	0.562	0.579	0.72
1.0	0.775	0.775	0.806	0.785	0.98
2.0	0.837	0.845	0.836	0.839	1.10
3.0	1.017	1.057	0.969	1.014	1.27
4.0	0.886	0.854	0.935	0.892	1.11
5.0	0.882	0.918	0.872	0.891	1.11

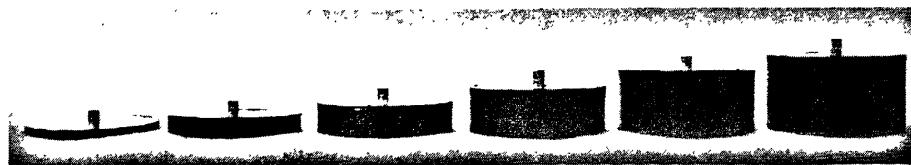


图2-10 不同试件厚度的细柱微特征模压试件

随坯料厚度的增加,在相同成形条件下,微特征成形高度呈现先增大后减小最后趋于稳定的态势。这是因为在试件较薄时($t<2.0\text{ mm}$),微特征的成形受尺寸

效应影响较大, 随试件厚度减小, 成形难度逐渐增大, 导致微特征成形高度逐渐减小; 而在试件较厚时 ($t > 3.0$ mm), 微特征的成形则受坯料与模具侧壁的摩擦影响较大, 随坯料厚度的增加, 摩擦影响导致的微细特征高度逐渐减小, 而当坯料厚度到达一定程度后则微细特征的成形高度则趋于稳定。图 2-11 与图 2-12 分别给出了不同厚度的坯料模压成形细柱微特征的高度及相应的高径比。另外, 在坯料尺寸为 $0.5 * \Phi 10$ mm 这组实验中, 发现与冲头接触的坯料表面, 中心处有较明显的凹陷, 如图 2-13 所示, 说明本实验中材料的流动是属于局部流动, 成形出来的小突起基本都是坯料中心处的材料减少所得。这与宏观成形中挤压缩孔的机理相类似, 由于轴心部位金属的轴向压力较小, 故当周围金属向模孔流动时, 便拉扯着轴心区金属一道流动, 使其上端面离开冲头并呈凹形, 再加上径向压力的作用, 便形成了缩孔^[29], 如图 2-14 所示。

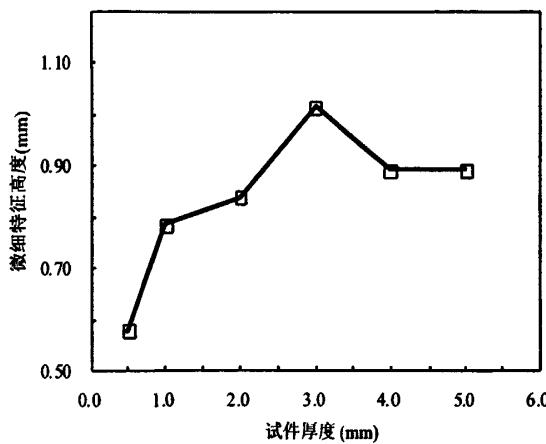


图 2-11 微细特征高度与试件厚度关系

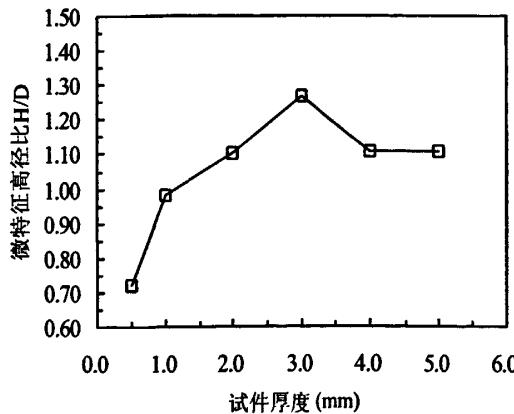


图 2-12 微细特征高径比与试件厚度关系

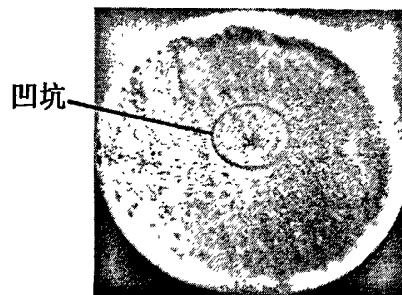


图 2-13 厚度 0.5 mm 坯料试件表面形貌

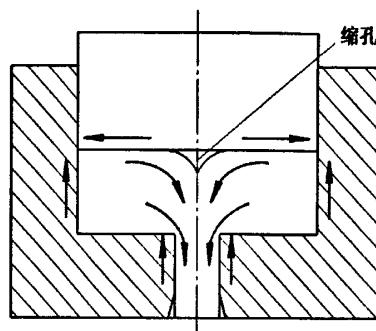


图 2-14 挤压缩孔

从本组实验结果可以看出,微细结构特征的成形性或者成形极限与宏观尺度的塑性成形相比,显示出尺寸效应的一定影响,其影响程度与微特征尺寸及成形该微特征的局部区域坯料尺寸有关。为此,进行微细结构特征成形时,应利用该规律进行坯料尺寸尤其是微细结构特征局部区域的坯料尺寸设计,以充分提高微细结构特征的成形性。

2.4 本章小结

本章以塑性较好的T2纯铜棒材作为实验材料,设计并制造尺度在1.0 mm以下的微孔及微槽精密模具,合理规划实验方案,对细柱与薄筋两种微特征进行了模压成形实验的研究,通过实验结果对比与分析,得出以下结论:

1. 微细特征模压成形变形初期与后期相比较难,变形抗力大。
2. 微细特征成形难易程度与微细特征尺寸有关,微细特征尺寸越小,其成形越难。

3. 坯料与模具表面的摩擦状态对微细特征成形及其表面质量具有直接的影响。为提高微细特征成形性，应对模具及坯料表面进行抛光处理，并在成形过程中采用润滑措施。

4. 微细结构特征成形应注意尺寸效应的影响。根据所成形的微细特征尺寸，通过合理设计微特征局部区域的坯料尺寸，能够显著提高微细特征的成形性。

5. 微细特征模压成形类似于宏观挤压工艺，金属流动随着坯料厚度的变形而变化；且在特定的成形力下，并不是坯料厚度越厚微细特征高度越高，因此对于特定微细特征成形，选择适当的坯料尺寸（厚度）可以降低成形力。

第3章 刚塑性有限元基本理论及软件系统

3.1 引言

有限元法^[30]是 20 世纪 60 年代提出的一种分析方法，由于可分析各类塑性成形问题，考虑多种外界因素(如温度、速度、模具型腔形状等)的影响，能够获得成形过程中的多方面信息，如成形力、应力分布、应变分布以及对金属流动方向的预测等。因此，有限元法在金属成形过程中获得了广泛的应用。

本章对刚塑形有限元基本理论及课题中使用到的软件系统进行简要介绍，为后续对微细特征模压成形进行的计算机数值模拟工作奠定理论基础。

3.2 塑性成形过程研究方法

金属塑性成形过程是一个复杂的变形过程，材料的特性、变形速度、温度、摩擦条件、坯料形状和尺寸、模具的形状等因素对成形过程都有一定的影响。这些因素及其作用就是塑性成形研究的主要对象。金属塑性成形过程的主要任务是结合金属材料的特性，分析和研究塑性成形过程中应力应变的分布情况以及不同因素对成形过程的影响。例如通过研究坯料形状和尺寸、成形工序和锻造参数对成形过程的影响，得到金属塑性成形的规律，从而为解决塑性加工过程中出现的各种实际问题，制定最佳的工艺参数，高效低耗地实现成形过程，获得优质的产品而提供科学的依据。

金属塑性成形过程的研究方法大致可以分为三类。第一类是基于经典塑性理论的解析方法，其中包括：精确地联立求解塑性理论基本方程的数学解析法，将平衡方程和塑性条件简化后联立求解塑性理论基本方程的主应力法，针对平面问题提出的滑移线法，基于能量守恒原理的能量法和上限法；第二类是以实测数据为分析基础的实验力学研究方法，如网格法、密栅云纹法等；第三类是随着塑性理论的发展和计算机应用的普及，而产生并且快速发展的数值分析方法，其中包括上限元法(UBFT)、有限差分法(FDM)，边界元法(BFM)和有限元法(FEM)等等。

比较以上三类研究方法，基于经典塑性理论的解析方法，即主应力法、滑移线法、上限法的突出优点是：能够直接给出各种影响因素在金属塑性成形过程中相互之间的关系，便于进一步进行成形极限分析和工艺参数的优化，有利于从全局把握成形过程。但是由于数学求解方面的困难，这些方法只能对某些特殊的平面问题和轴对称问题给出较为精确的解析解。对于大多数平面问题和轴对称问题只有在附加了一些假设条件并且进行了大量的模型简化的前提下，才能给出近似的解析解。而对于复杂的三维问题，该类方法的应用就较为困难了。

实验力学研究方法所得的结果直接或间接的来自于实测数据，减少或回避了对变形条件及其材料性能等多方面的许多假设。其突出优点就是结果可靠，但是耗资大、周期长、局限性大，不便于进一步进行成形极限分析以及工艺参数优化。

数值分析方法的优点是：利用数学领域在数值分析方面的成就，克服了求解塑性理论中的三重非线性偏微分方程所遇到的数学方面的困难，可以给出复杂的金属塑性成形问题数值解。近年来随着有限元法和计算机技术的发展，该类方法已经成为分析金属塑性成形过程最有力的工具之一。利用有限元法可以在计算机上模拟分析塑性加工时从坯料到零件的整个成形过程，可以求出应力场、应变场、变形所需的载荷和能量，可以给出成形过程中坯料几何形状、尺寸和性能的改变，预测缺陷的产生和分析成形质量等。有限元模拟的优点是：功能强，精度高，解决问题的范围广，可以用不同的形状、不同大小和不同类型的单元来描述任意形体的变形，适用于任意速度边界条件，可以方便合理地描述模具形状，处理毛坯与模具间的摩擦，考虑材料硬化效应、温度等各种工艺参数对成形过程的影响，可以获得成形过程中任意时刻的力学信息和流动信息，如应变场、速度场、应力场、位移场、温度场，预测缺陷的生成和扩展等并且可以在计算机上虚拟实现成形过程，反复演示、计算和优化，这是其它研究方法所无法比拟的。目前有限元法已经成为研究塑性成形规律、材料变形行为及各种物理场的强有力的工具之一，并且得到了广泛的应用^[31,32]。

塑性有限元法分为两类：一类是流动型塑性有限元法，包括刚塑性有限元与刚粘性有限元；另一类是固体型塑性有限元，包括弹塑性有限元与弹粘塑性有限元^[32,33]。弹塑性有限元能有效处理卸载问题，计算残余应力和残余应变，常用于

工程承载问题的分析：但工作量大，数学处理比较复杂。刚塑性有限元由于简化了有限元计算列式，使计算过程大为简化，计算效率较高，故常用于大变形金属塑性加工过程的模拟^[31]。

3.3 刚塑性有限元基本理论

金属塑性加工是材料成形的一种主要工艺方法，属大变形问题。根据变形特点分为两大类工艺问题，即体积成形和板料成形问题。板料成形工艺中，由于金属材料在变形中既有弹性变形又有塑性变形，且弹性变形占有相当的比例，因此常采用弹塑性有限元法进行工艺过程模拟与分析。体积成形工艺中，金属材料产生较大的塑性变形，而弹性变形相对极小，可忽略不计，于是就出现了刚塑性有限元法。由于体积成形工艺中金属材料呈现不同的特性，典型有刚塑性硬化材料、刚粘塑性材料。刚塑性硬化材料所对应的有限元法即刚塑性有限元法，它适用于冷、温态体积成形问题。刚粘塑性材料对应的则是刚粘塑性有限元法，它适于热态体积成形工艺，并且可以进行变形过程中变形与传热的耦合分析。由于忽略了弹性变形，所以刚(粘)塑性有限元法不能进行卸载分析，无法得到残余应力、变形及回弹，此外刚性区的应力计算等也有一定误差。尽管如此，对于绝大多数锻造成形过程的分析，采用刚(粘)塑性有限元法是非常有效的。微细特征模压成形过程同样适用。

3.3.1 刚(粘)塑性材料的基本假设

材料成形过程中其塑性变形的物理过程十分复杂，为便于数学处理，必须做出一些假设将变形中的某些过程理想化。

对于刚(粘)塑性材料，其基本假设如下^[30]：

- ① 忽略材料的弹性变形；
- ② 不计体积力的影响；
- ③ 材料是均质且各向同性；
- ④ 材料的变形流动服从 Levy-Mises 流动理论；
- ⑤ 材料体积不变。

3.3.2 塑性力学基本方程及边值条件

刚(粘)塑性材料发生塑性变形时, 满足下列塑性力学基本方程^[30]:

① 平衡微分方程

$$\sigma_{ij} = 0 \quad (3-1)$$

② 本构关系

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{3}{2} \frac{\dot{\varepsilon}}{\bar{\sigma}} \sigma'_{ij} \quad (3-2)$$

③ 屈服准则

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2} \sigma'_{ij} \sigma'_{ij}} = \bar{\sigma}(\bar{\varepsilon}, \dot{\bar{\varepsilon}}, T) \quad (3-3)$$

④ 几何方程(协调方程)

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2} (u_{ij} + u_{ji}) \quad (3-4)$$

⑤ 体积不变条件

$$\dot{\varepsilon}_v = \dot{\varepsilon}_{ij} \delta_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ii} = 0 \quad (3-5)$$

⑥ 边界条件

$$\text{在力面 } S_F \text{ 上} \quad \sigma_{ij} n_j = F_i \quad (3-6)$$

$$\text{在速度面 } S_u \text{ 上} \quad u_i = \bar{u}_i \quad (3-7)$$

3.3.3 刚(粘)塑性材料的变分原理

金属塑性成形问题实际上是一种边值问题, 对于刚(粘)塑性材料, 其边值问题可以描述为: 在准静态变形过程的某一阶段, 已知变形体的几何形状、内部的温度分布、变形的不均匀状态以及当前的材料参数, 同时在速度面上给定了速度矢量和在力面上给定了面力, 则该问题的解即为满足塑性力学基本方程和边界条件的应力场和速度场。

刚塑性有限元法的基础是 Markov 变分原理^[35,36]: 设变形体由理想刚塑性材料

构成, 服从 Mises 屈服准则及其相关联的流动准则(即 Levy-Mises 本构关系), 在所有满足动可容条件的速度场中, 真实的速度场使变形体的总势能取最小值。

若物体的体积为 V , 表面积 $S = S_u + S_F$ (S_u 为给定速度面, S_F 为给定表面应力面), 在满足上述 (3-4)式、(3-5)式、(3-6)式和(3-7)式的所有的动可容速度场 u_i 中, 使泛函

$$\pi = \int \bar{\sigma} \dot{\varepsilon} dV - \int_{S_F} F_i u_i dS \quad (3-8)$$

取驻值的速度场为问题的真实解。

泛函取驻值的条件为一次变分为零, 即

$$\delta\pi = \int \bar{\sigma} \delta \dot{\varepsilon} dV - \int_{S_F} F_i \delta u_i dS = 0 \quad (3-9)$$

对于刚塑性材料, 等效应力 $\bar{\sigma}$ 仅为等效应变 $\bar{\varepsilon}$ 的函数, 对于刚粘塑性材料, 则 $\bar{\sigma}$ 还与等效应变速率 $\dot{\varepsilon}$ 和温度 T 有关。

由于采用刚(粘)性材料模型, 忽略了变形体的弹性变形部分, 因而增加了体积不可压缩条件, 这样就难于确定静水压力 σ_m , 从而给刚(粘)塑性变形分析中的应力计算带来一定困难。

采用 Markov 变分原理求解刚(粘)塑性变形体的速度场问题, 就是求解一个带有约束条件(即体积不可压缩条件)的泛函的最小值问题。在实际求解过程中, 要选择一个既满足速度边界条件又满足体积不可压缩条件的速度场十分困难, 而仅满足速度边界条件的速度场易于找到。因此, 可将体积不可压缩条件引入泛函式中, 使其由一个有约束条件的泛函变为一个无约束条件的新泛函。针对不同的体积不变条件的处理方法, 提出了不同的刚塑性有限元解法。其中主要有 Lagrange 乘子法、体积可压缩法和罚函数法。

Lagrange 乘子法由于引入了附加的 Lagrange 乘子, 从而使方程的数目增加了 m 个 (m 为单元总数), 增加了计算时间; 体积可压缩法多应用于可压缩的多孔材料; 在刚(粘)塑性有限元法中较多地采用罚函数法。

罚函数法通过引进罚常数 Q , 在泛函(3-8)式中增加一项 $\int \frac{Q}{2} \dot{\varepsilon}_v^2 dV$ 来解除体积

不变这一约束条件，从而得到新泛函

$$\pi = \int \bar{\sigma} \dot{\varepsilon} dV + \int \frac{Q}{2} \dot{\varepsilon}_v^2 dV - \int_F F_i u_i dS \quad (3-10)$$

其变分为

$$\delta\pi = \int \bar{\sigma} \delta \dot{\varepsilon} dV + Q \int \dot{\varepsilon}_v \delta \dot{\varepsilon}_v dV - \int_F F_i \delta u_i dS = 0 \quad (3-11)$$

该式即为刚（粘）塑性有限元分析中罚函数法的基本方程^[37,38]。

3.3.4 摩擦边界条件

用有限元法求解金属塑性成形问题，实际上是一个边值问题。而在处理边值问题时，界面的摩擦条件有着重要的影响。金属成形过程中的摩擦机制十分复杂，它取决于多种因素。为便于分析计算，通常采用两种简化的摩擦应力模型，即库仑摩擦模型和剪切摩擦模型^[39,40]。

（1）库仑摩擦模型

库仑摩擦模型采用恒定的摩擦系数 μ ，当接触面上的正应力为 σ_n 时，摩擦剪应力 τ_f 为：

$$\tau_f = \mu |\sigma_n| \quad (3-12)$$

库仑摩擦模型在接触压力不高时是正确的，如果接触压力较高时，该模型计算的摩擦应力将会超过真实值。

（2）剪切摩擦模型

剪切摩擦模型不考虑接触面积正应力的大小，可以避免因接触压力过高而超出摩擦作用的情况。它可以表示为：

$$\tau_f = m k = m \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \quad (3-13)$$

式中 m —摩擦因子，一般取 $0 \leq m \leq 1$ ；

K —剪切屈服应力。

3.3.5 动态接触边界条件的处理

非稳态有限元分析的每一步加载，都是根据上一加载步的速度场和模具运动的速度以及选定的时间增量来修改网格节点的坐标和模具位置。因此，与稳态分析不同，非稳态分析过程中，变形体的边界不断变化，边界节点与模具外轮廓表面之间存在着贴合与脱离的过程。动态接触边界条件确定的实质就是在每一个增量加载步内处理边界节点与模具的接触和脱离而引起的约束条件的变化。在加载步之前，对边界约束条件没有改变的节点，其约束代码和速度条件维持不变；对脱离模具的节点，则解除其约束条件释放为自由节点；对新与模具产生接触的节点则应施加速度边界条件和摩擦边界条件。有限元分析中动态边界条件的处理，直接影响到程序的自动化、通用化以及模拟分析过程的求解效率^[41]。

(1) 自由节点触模的判别方法和处理

设边界节点 i 在 $t = t_n$ 时刻的位置为 (x_i, y_i) ，速度为 (u_i, v_i) ，模具边界表面轮廓函数为 $G(x, y) = 0$ ，运动速度为 (u_d, v_d) ，则节点 i 相对于模具的运动轨迹可表示成时间增量 Δt 的参数方程，并与模具表面轮廓函数联立得

$$\left. \begin{array}{l} x = x_i + (u_i - u_d) \cdot \Delta t \\ y = y_i + (v_i - v_d) \cdot \Delta t \\ y = f(x) \end{array} \right\} \quad (3-14)$$

求解该方程组，若时间增量 Δt 存在正解 $\Delta t'$ ，并且小于给定的加载时间增量步长 Δt^0 ，即有 $0 < \Delta t' \leq \Delta t^0$ ，则表明该边界节点已经与模具表面发生了接触。对该接触节点，在下次增量加载之前，必须对其位置进行调整，以保证该节点位于模具表面上。

(2) 接触节点脱模的判断与约束的解除

对于非稳态成形问题，已经与模具接触的节点会随着变形过程的进行而脱离模具，如果在某加载步内某节点有脱离模具的趋势，则该节点势必会受到接触表面的拉力作用，节点力为正值，也就是说，该边界节点处的法向应力为拉应力，也为正值，即

$$F_n \geq 0 \text{ 或 } \sigma_n \geq 0 \quad (3-15)$$

由此即可判断该节点在当前步内已开始脱离模具并将其约束条件解除。

3.3.6 网格重新划分

金属成形过程尤其是体积成形过程其变形量很大,利用有限元法模拟时,网格很容易出现退化,即单元形状严重的畸变或网格与模具发生严重干涉。网格退化现象使有限元数值计算过程无法继续下去,必须重新定义新的网格系统,即网格再划分或调整。网格再划分技术是塑性有限元模拟技术的重要组成部分。

有限元分析中网格再划分包括三方面内容:再划分的触发、新网格生成和场变量变换。网格再划分判断是通过一定的准则来决定网格是否需要再划分,当需要再划分时,则在当前的分析区域内形成新的网格。为保证分析的连续性,在形成新的网格之后,必须将旧网格上的场变量变换到新网格上。

最初划分的质量较好的网格经过剧烈塑性变形后产生畸变,严重时须进行网格再划分。在重新定义新网格系统之前,必须用一定的准则对旧网格进行判别,以确定何时进行网格再划分。常用的判据有 Jacobian 矩阵行列式的值是小于某一极小的正常数、单元的内角接近于 0° 或 180° 以及与模具的干涉量大于某一给定的常数等^[42]。

重新划分网格后,为了保证分析的连续性,必须把旧网格上的信息转换到新网格上,对刚塑性有限元分析来说,这些信息包括与变形历史有关的应力、应变、速度场等状态变量。准备数据时,系统要将每个单元的必要的场量转换到节点上,输出所有节点的必要的场量。新网格体系生成后,应将旧网格体系中每个节点上的必要的场量转换到新的网格单元中。

3.4 相关软件介绍

3.4.1 造型软件

随着三维 CAD 技术的飞速发展,其在机械工程领域的应用越发广泛,尤其在模具设计制造方面,三维 CAD 软件更是设计人员的得力助手,有效地提高了工作效率,减轻了劳动强度。在众多三维 CAD 软件中, Unigraphics(简称 UG)以其强大

的功能长期占据业界的主导地位。

UG 软件为美国 Unigraphics Solution(简称 UGS)公司的拳头产品，以 CAD/CAM/CAE 一体化而著称。UG 软件起源于美国麦道公司，它是从二维绘图、数控加工编程、曲面造型等功能发展起来的软件。上世纪 90 年代初，美国通用汽车公司选中 UGII 作为公司的 CAD/CAE/CAM/CIMS 主导系统，进一步推动了 UGII 软件的发展，因此，该软件汇集了美国航空工业及汽车工业的实践经验。

UG 是一个高度集成的 CAD/CAE/CAM 软件系统，可应用于整个产品的开发过程，包括产品的概念设计、建模、分析和加工。该软件不仅有强大的实体造型、曲面造型、虚拟装配和生成工程图等设计功能，而且在设计过程中还可以进行有限元分析、机构运动分析、动力学分析和仿真模拟，提高了设计的可靠性；同时，可用建立的三维模型直接生成数控代码，用于产品的加工，其后处理程序支持多种类型的数控机床和加工中心。此外，它还提供了简单易学的二次开发语言，便于用户开发专用的 CAD 系统。

经过 20 多年的发展，UG 软件现已成为世界一流的集成化机械 CAD/CAE/CAM 软件，广泛应用于航空、航天、汽车、通用机械、模具和家用电器等领域。许多世界知名公司均选用该软件作为企业计算机辅助设计、制造和分析的标准，如美国通用公司、波音飞机公司、贝尔直升飞机公司、美国宇航公司、惠普发动机等都以 UG 作为企业产品开发的软件平台。

UG 软件自 1990 年进入中国市场以来，以其先进的理论基础、强大的工程背景、完善的功能和专业化的技术服务赢得了广大中国 CAD/CAM 用户。目前该软件拥有中国用户 1500 多家，装机 8000 多台(套)，在航空、模具、汽车、家电等领域应用十分广泛，成为我国高档 CAD/CAE/CAM 系统的主流产品^[43]。

3.4.2 数值模拟软件

随着计算机性能的提高，计算机图形学的发展以及有限元技术的成熟，上个世纪 90 年代以来国际上出现了法国 FORGE3，美国 ALPID, DEFORM, MARC/Auto Forge 以及俄罗斯 QForm 等通用体积成形刚-粘塑性有限元数值模拟的商业软件。这些软件以其友好易用的界面和可靠的性能在世界各地的科研院所及锻造企业中

得到了广泛的应用。表 3-1 给出了目前国际上应用较多的商用软件。

DEFORM 软件是由美国 SFTC 公司开发的一套基于过程模拟系统的面向金属塑性加工及相关行业的有限元分析软件。利用该软件模拟制件的塑性加工过程，可以显示加工过程中材料的流动规律、预测各种成形缺陷的产生，优化模具设计和工艺方案，减少现场生产试验和修模时间和费用。

DEFORM™ 是一个高度模块化、集成化的模拟系统，它主要包括有限元模拟器，前处理器、后处理器和用户处理器四大模块，其系统结构如图 3-1 所示。

其中前处理器包括三个子模块^[46]：

表 3-1 国际商用锻造过程数值模拟软件系统^[45]

软件系统	维数	国 别	开发商	联系方 式
CAPS-Finel	2	德 国	CPM Gesellschaft fur Computeranwendung	Prozeß- und Materialtechnik mbH Kaiserstrasse 100
EESY-2-FORM	2			Herzogenrath D-52134 Germany e-mail: cpm-gmbh@t-online.de
EESY-FORM	3			
DEFORM PC	2	美 国	Scientific Forming Technologies	5038 Reed Road Columbus, Ohio 43220-2514
DEFORM PC	2		Corporation	e-mail: SFTC@compuserve.com
PRO	2			WWW: http://www.deform.com
DEFORM 2D	3			
DEFORM 3D	2			
DEFORM HT				
FORGE 2	2	法 国	Transvalor SA	Les Espaces Delta, BP 037, Sophia Antipolis Cedex
PCFORGE	2			e-mail: 100604.2665@compuserve.com
FORGE3	3			WWW: http://www.transvalor.com
FORGE3 PC	3			
MARC	2	美 国	MARC Analysis	260 Sheridan Avenue, Palo Alto, CA 94306
Autoforge	3		Research Corporation	e-mail: autoforge@marc.com WWW: http://www.marc.com
MSC Superforge 3 (2)		荷 兰	Technical Project Coordinator	MacNealSchwendler E.D.C. B.V. Groningenweg 6, 2803 PV Gouwda e-mail: wim.slagter@macsch.com WWW: http://www.macsch.com
Qform	2	俄 罗 斯	Quantor Ltd	P.O.Box 39, 117049 Moscow e-mail: inform@quantor.com WWW: http://www.quantor.com

1)数据输入模块，便于数据的交互式输入，如：初始速度场、温度场、边界条

件、冲头行程以及摩擦系数等初始条件。

2)网格的自动划分与自动再划分模块。

3)数据传递模块,当网格重划分后能够在新旧网格之间实现应力、应变、速度场、边界条件等数据的传递,从而保证计算的连续性。

而真正的有限元分析计算过程是在模拟处理器中完成的,DEFORMTM运行时,首先通过有限元离散化将平衡方程、本构关系和边界条件转化为非线形方程组,然后通过迭代法等数值分析的方法进行求解,求解的结果以二进制的形式进行保存,用户可在后处理器中获取所需要的结果。后处理器用于显示计算结果,结果可以是图形形式,也可以是数字、文字混编的形式。并且在后处理中可通过软件提供的各种工具获取每一步变形的具体数据。用户处理器允许用户对数据库精细操作,对系统设置进行修改,以及定义自己的材料模型等。

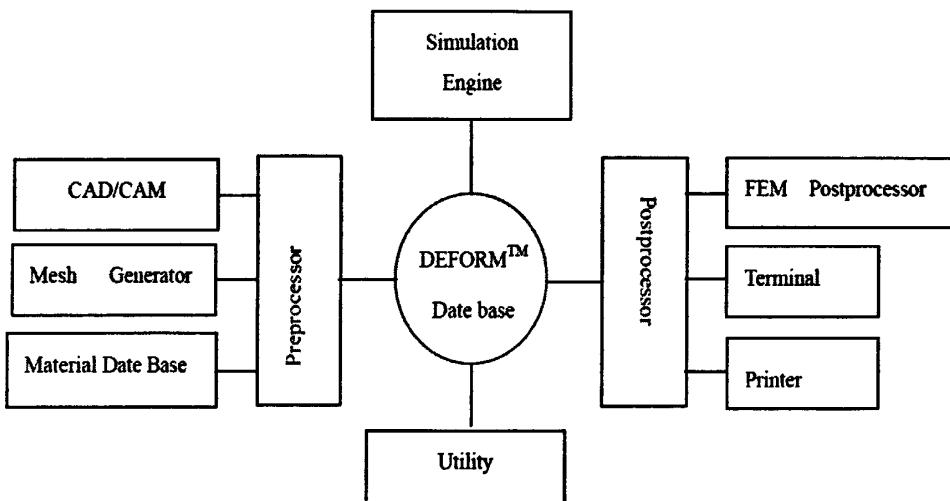


图 3-1 DEFORMTM 系统结构示意图^[45]

本课题在进行细柱和薄筋微特征模压成形过程模拟时,分别采用了 DEFORM-2D 和 DEFORM-3D 这两个数值模拟软件,这主要是基于以下考虑:

1. DEFORM-2D 功能介绍和特点

DEFORM-2D 是一套基于工艺模拟系统的有限元系统(FEM),专门设计用来分析各种金属成形过程中的二维(2D)流动。提供极有价值的工艺分析数据。DEFORM-2D 几十年来一直被世界范围内的企业用于分析锻造、挤压、拉拔、镦头、镦粗、和其它成形手段。DEFORM-2D 提供了最现代的工艺模拟技术。

DEFORM-2D 强大的模拟引擎能够分析金属成形过程中，多个材料特性不同的关联对象耦合作用下的大变形和热特性。以此能够保证金属成形过程中的模拟精度，使得分析模型和模拟环境和实际生产环境高度一致。任何需要时，能够自行触发高级自动网格重划生成器，生成优化的网格系统。DEFORM-2D 图形界面，既强大又灵活。为用户准备输入数据和观察结果数据提供了有效工具。根据每个求解特性，在要求精度较高的区域，可以划分较细密的网格，从而降低题目的规模，并显著提高计算效率。DEFORMTM-2D 采用了 SFTC 公司数十年来一直代表国际领先水平的核心技术。它的具体特点有^[47-49]：

- (1) 二维功能包括平面应变、轴对称。二维半功能能够模拟均匀平面外流动过程。
- (2) 不需要人工干预，全自动网格再剖分。前处理中自动生成边界条件，确保数据准备快速可靠。
- (3) 集成有成形设备模型，如：液压压力机、锤锻机、螺旋压力机、机械压力机和用户自定义类型。
- (4) 材料模型有弹性、刚塑性、热弹塑性、热刚粘塑性、粉末材料、刚性材料及自定义类型。
- (5) 实体之间或实体内部的热交换分析既可以单独求解，也可以耦合在成形模拟中进行分析。
- (6) FLOWNET 和点迹示踪、变形、云图、矢量图、力-行程曲线等后处理功能。
- (7) 程序具有多联变形体处理能力，能够分析多个塑性工件和组合模具应力。
- (8) FEM 引擎中集成了基于损伤因子的断裂萌生和裂纹扩展模型，应用于剪断、冲孔、机加工和冲裁模拟。
- (9) 自接触边界状态处理能力能够自我修正接触边界。
- (10) 自定义过程可用于计算流动应力、冲压系统响应、断裂判据和一些特别的处理要求，如：金属微结构，冷却速率、机械性能等。

2. DEFORM-3D 功能介绍和特点

DEFORM-3D 软件是基于刚塑性有限元法开发的，国际上一致认为其是研究

冷锻、热锻成形方面比较成熟的专业有限元软件。并且软件自带的算法较多，运算结果较容易收敛，还提供相应接口以便于用户根据研究的具体需求作二次开发。

DEFORM-3D 软件功能强大，它是在一个集成环境内综合建模、成形、热传导和成形设备特性进行模拟仿真分析，尤其适用于热成形、冷成形、温成形，能够提供极有价值的工艺分析数据。如：材料流动、模具充填、成形载荷、模具应力、晶粒流动、金属微结构和缺陷产生发展情况等。DEFORM-3D 有以下具体特点^[46-48]：

(1) DEFORM-3D 中可以导入来自 CAD 系统的面或实格式的模型。系统集成有成形设备模型，如：液压压力机、锤锻机、螺旋压力机、机械压力机、轧机、摆辗机和用户自定义类型。

(2) DEFORM-3D 不需要人工干预，具有全自动网格再剖分功能。材料库中模型丰富，有弹性、刚塑性、热弹塑性、热刚粘塑性材料、刚性材料，并且可以根据实际情况进行自定义。

(3) 单步模具应力分析方便快捷，适用于多个变形体、组合模具、带有预应力环时的成形过程分析。实体之间或实体内部的热交换分析即可以单独求解，也可以耦合在成形模拟中进行分析；具有 FLOWNFT 和点追踪、变形受力图、受力-行程曲线等强大的后处理功能；具有 2D 切片功能，可以显示工件或模具剖面结果。

(4) 程序能够分析多个塑性工件和组合模具应力。后处理中的镜面反射功能，为用户提供了高效处理那些具有对称面或周期对称面特征的零件的机会，并且可以在后处理中显示整个模型。自定义过程可用于计算流动应力、冲压系统响应、断裂判据和一些特别的处理要求，如：金属微结构，冷却速率、机械性能等。

3.5 本章小结

本章阐述了刚塑（粘）性有限元的理论基础，并对本课题所使用到的软件系统进行了简要介绍。给出了刚塑（粘）性材料的基本假设及塑性力学基本方程，介绍了刚（粘）塑性有限元变分的基本原理，摩擦边界条件，动态接触边界条件的处理，网格重新划分等内容。介绍了课题中使用到的 Deform 软件系统的功能和特点。本章为后续研究内容奠定了理论基础，使后续工作的顺利进行得到了有力

的保证。

第4章 微细特征模压成形规律数值模拟

4.1 引言

在常见的微型零件中，微细特征一般可以分为细柱与薄筋作为典型结构。模压成形过程的特点是整体加载，局部变形，尤其对于微尺度下的模压成形来说，参与变形的材料体积占整体坯料体积极小，影响微细特征模压成形规律的主要工艺因素可以从以下几个方面进行考虑：坯料厚度（或厚高比），摩擦条件，微特征尺寸，成形温度，凹模圆角半径等。

本章利用有限元分析软件 DEFORM，分别对纯铜的上述细柱和薄筋两种微细特征模压成形过程进行数值模拟，研究不同工艺因素对微细特征模压成形的参数对流动应力应变曲线的影响规律，为微细特征模压成形乃至其它微体积成形工艺提供指导^[51,52]。

4.2 细柱微特征模压成形数值模拟

4.2.1 有限元模型的建立

（1）纯铜流动应力曲线实验测定

为了给数值模拟的有限元模型材料提供可靠的真实应力应变曲线，对模压实验中用到的原始未退火，430 °C退火保温 1 小时以及 800 °C退火保温 48 小时的三种状态的纯铜试样进行镦粗试验。实验设备同样采用微机控制电子万能试验机 CMT5000，该系统能通过计算机对成形过程中的成形力、位移、冲头速度等参数进行采集和控制。为了使试样镦粗时尽可能获得单向应力状态，除了保证模具和坯料端光滑外，还必须在模具与坯料的接触处涂有合适的润滑剂。在冷成形过程中根据纯铜的特性，选择机油作为润滑剂。根据公式 4-1 处理采集的数据得到真应力应变关系曲线^[53]，如图 4-1 所示。在模拟过程中选择了塑性状态最好的 800 °C 退火保温 48 小时的试件的应力应变关系曲线作为模拟中使用的材料参数。

$$\begin{cases} \varepsilon = \ln \frac{H_0}{H} \\ \sigma = \frac{F}{A_0 e^\varepsilon} \end{cases} \quad (4-1)$$

其中, H_0 和 A_0 为坯料的初始横截面积, 坯料实时高度 H 和成形力 F 可以通过实验设备进行采集。

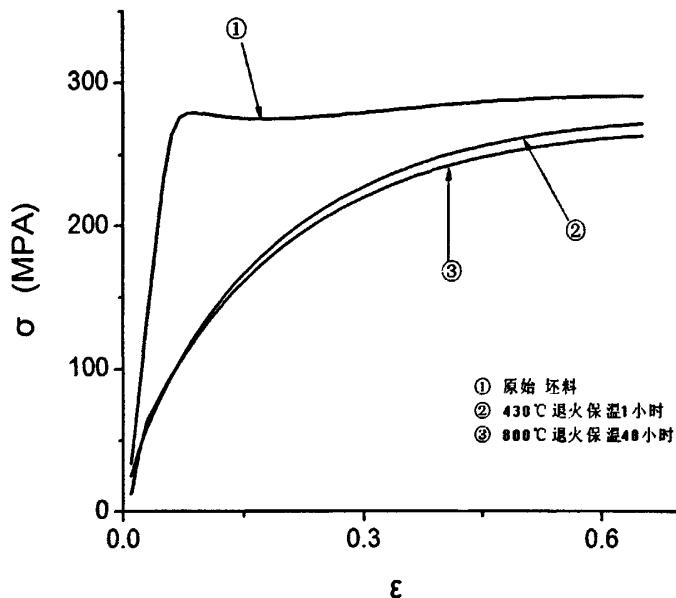


图 4-1 纯铜真应力应变曲线

(2) 细柱模压成形数值模拟模型建立

有限元数值模拟采用的模型如图 4-2, 其中坯料直径 10.0 mm, H 为坯料厚度, D 为微孔直径。对影响成形的摩擦条件、坯料厚度、圆角半径和微孔尺寸进行冷态下变形过程数值模拟。材料的应力应变曲线由上面所述的纯铜流动应力曲线实验获得。

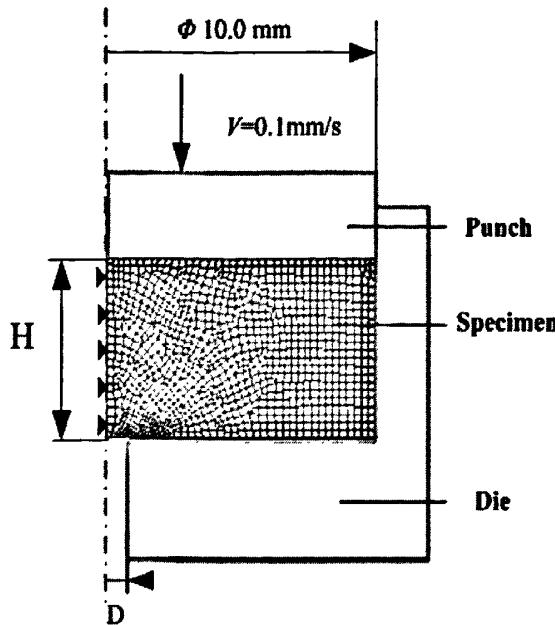


图 4-2 有限元模拟模型

4.2.2 细柱微特征模压成形模拟结果与分析

本节细柱微特征模压成形数值模拟以成形相同细柱微特征高度时所需要的成形力作为衡量微细特征成形难易程度的指标, 对坯料厚度、摩擦状态、微细特征尺寸、凹模圆角半径等影响因素进行数值模拟分析。

(1) 坯料厚度

在其他条件相同的情况下, 分别对不同厚度的坯料进行 $\Phi 0.8$ mm 细柱特征模压过程的数值模拟。对模拟过程中细柱高度分别为 0.5 mm、0.8 mm 和 1.0 mm 时的不同坯料厚度的成形力进行采集, 如图 4-3 所示。随着细柱成形高度的增加, 相应的成形力逐渐增大。而不同厚度的坯料成形相同细柱高度时, 厚度 3.0 mm 坯料所用成形力最小。当厚度大于或小于 3.0 mm 时成形力都有所增大, 尤其坯料厚度小于 1.0 mm 时, 变形力显著增大。

当坯料厚度小于 3.0 mm 时, 随着坯料厚度的减少, 可供成形的材料并不多, 成形只能依靠加大成形力挤压微孔周围的材料径向流动来补给成形, 因此成形力逐渐增大; 而当坯料厚度大于 3.0 mm 时, 随着坯料厚度的增加, 需要克服厚度方向与侧壁产生的摩擦力增多, 所以成形力逐渐增大。不同坯料厚度在成形微特征

细柱高度为 1.0 mm 时的等效应变如图 4-4 所示。

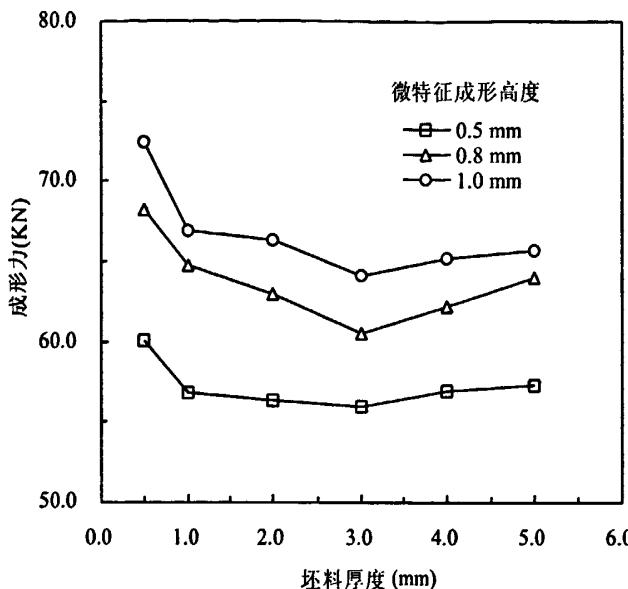


图 4-3 不同细柱微特征高度时坯料厚度与成形力的关系

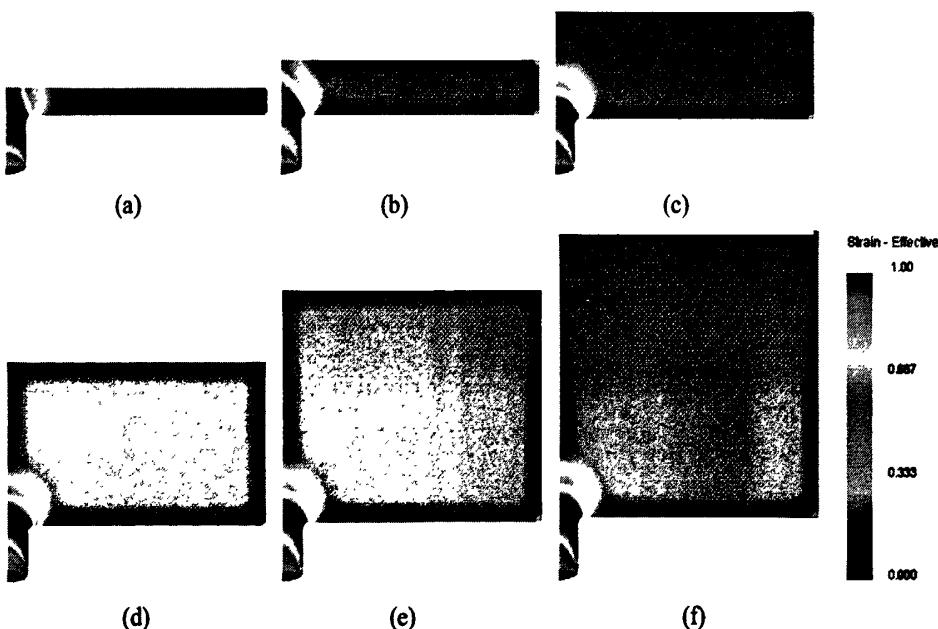


图 4-4 不同坯料厚度 H 的等效应变

(a) $H=0.5$ mm (b) $H=1.0$ mm (c) $H=2.0$ mm (d) $H=3.0$ mm (e) $H=4.0$ mm (f) $H=5.0$ mm

(2) 摩擦

为考察不同的摩擦状态对微细特征成形的影响, 本文选取冷态下金属塑性成形中接近无摩擦的状态和较差的摩擦状态两种情况进行对比分析, 选取的摩擦系数

分别为 0.05 和 0.3。在其他条件相同情况下, 分别对这两种摩擦系数条件下的不同厚度坯料进行 $\Phi 0.8$ mm 细柱特征成形进行数值模拟, 采集特征高度 1.0 mm 时的成形力, 如图 4-5 所示。从图 4-5 可以看出, 不管是哪种摩擦状态, 摩擦条件对微特征成形高度都具有一定的影响, 摩擦系数为 0.05 时成形相同特征高度的成形力较摩擦系数为 0.3 时显著降低, 这说明好的摩擦条件能明显改善微细特征的成形。这里引进摩擦系数 0.05 和 0.3 成形 1.0 mm 特征高度时所需成形力的比值 ($Load_{0.3}/Load_{0.05}$) 用来描述摩擦条件对成形的影响。 $Load_{0.3}/Load_{0.05}$ 越大, 摩擦条件对成形的影响越大, 如图 4-6 所示。从图 4-5 看出, 当坯料厚度小于 3.0 mm 时, 摩擦条件对成形的影响增大。尤其是当坯料厚度小于 1.0 mm 时, $Load_{0.3}/Load_{0.05}$ 摩擦对成形的影响剧增。因此, 坯料越薄, 越要改善摩擦条件, 以增加成形能力。坯料厚度为 0.5 mm, 2.0 mm, 5.0 mm 在不同摩擦系数 μ 下成形微特征细柱高度为 1.0 mm 时的等效应变如图 4-7 所示。

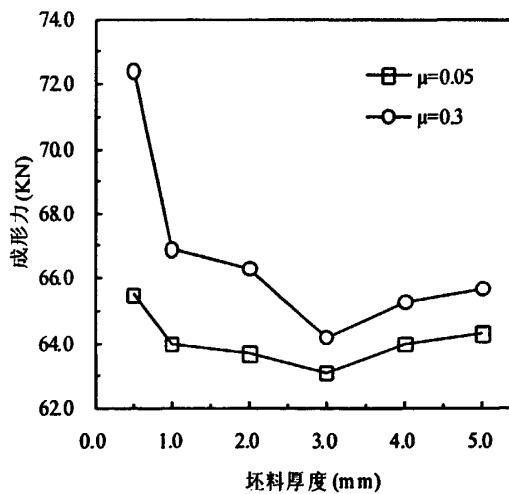
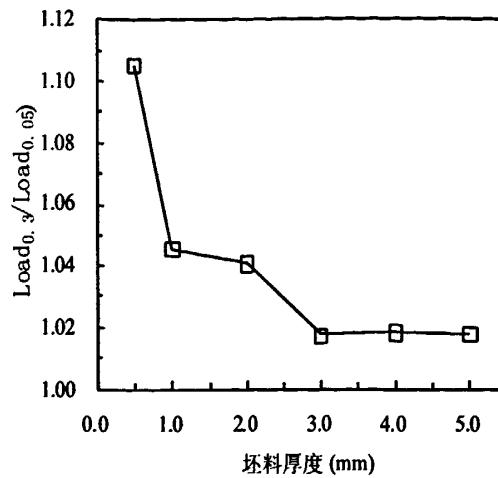
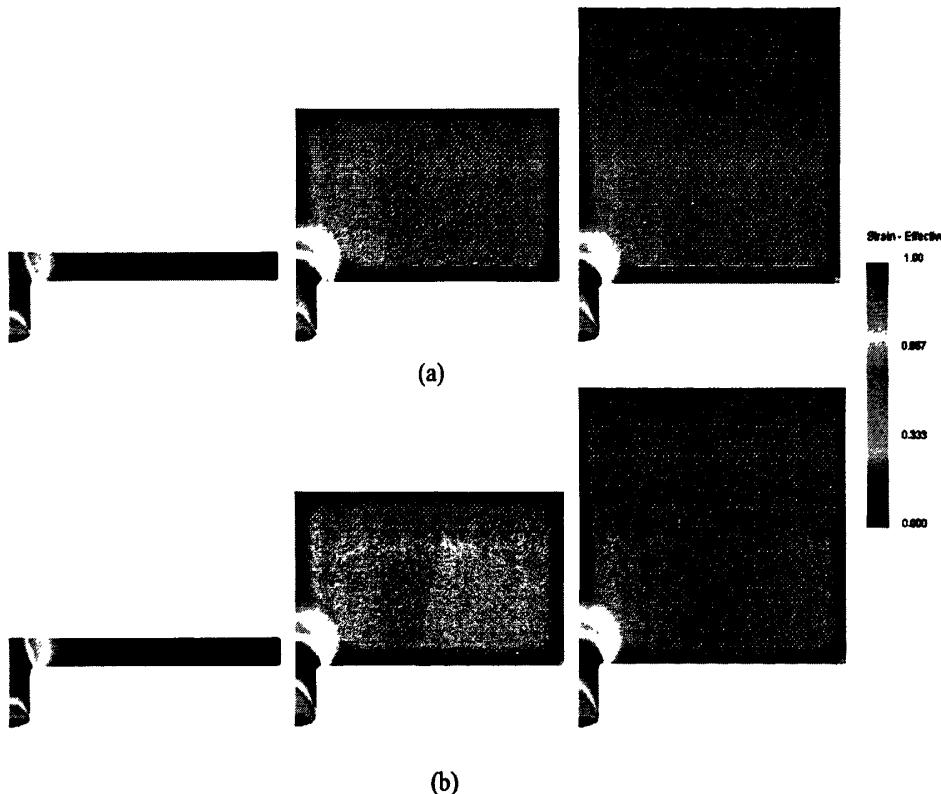


图 4-5 不同厚度坯料的成形力受摩擦条件的影响

图 4-6 坯料厚度与 $Load_{0.3}/Load_{0.05}$ 的关系图 4-7 厚度为 0.5 mm, 2.0 mm, 5.0 mm 的坯料在不同摩擦系数 μ 下的等效应变
(a) $\mu=0.05$ (b) $\mu=0.3$

(3) 微特征尺寸

为分析不同微细特征尺寸的成形性, 分别选取微孔直径 $D=0.2$ mm、0.5 mm 和

0.8 mm, 对厚度 $H=2.0$ mm 的坯料进行模压成形分析, 分别采集微细特征成形高度为 0.2 mm, 0.4 mm, 0.6 mm, 0.8 mm, 1.0 mm 时的成形力, 得到不同尺寸的细柱成形力的变化曲线, 如图 4-8 所示。就模拟结果来看, 微特征尺寸(微孔直径)对成形的影响比较明显: 在上述成形条件下, 微孔直径越小, 成形越困难。三种孔径下在成形微特征高度为 1.0 mm 时的等效应变情况如图 4-9 所示, 可见随孔径的增大, 发生变形的区域和范围也随之增大。

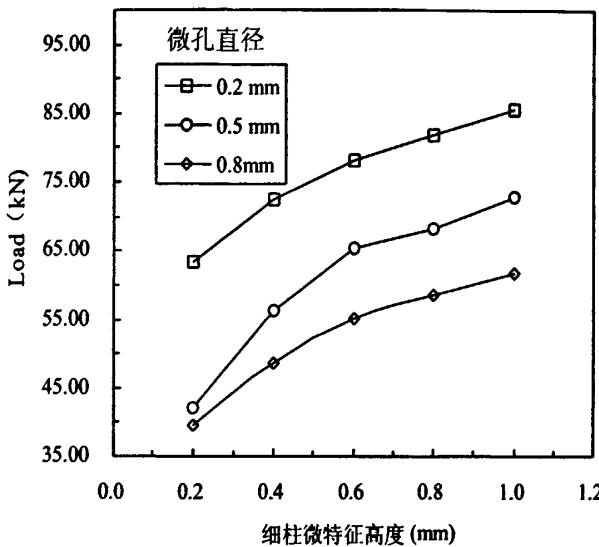


图 4-8 不同微孔直径下成形力与微特征高度的关系

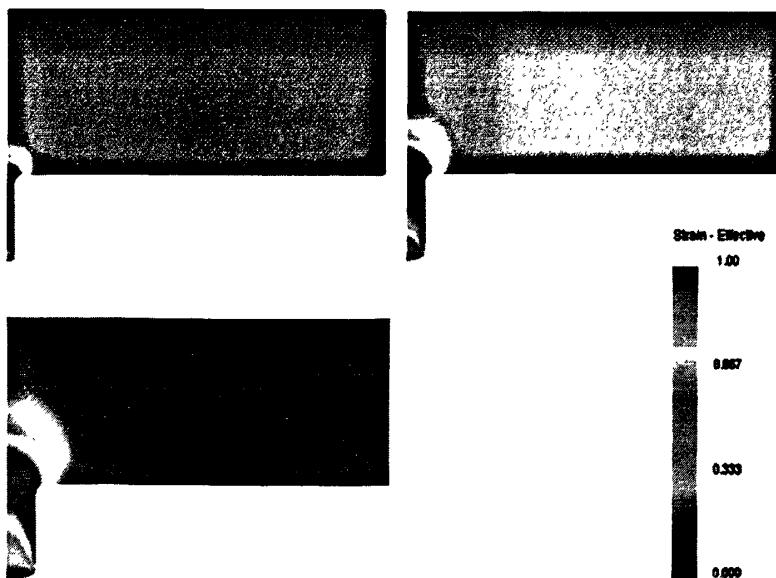


图 4-9 不同微孔直径下坯料的等效应变

(4) 凹模圆角半径

微细特征模压成形时, 成形细柱的凹模微孔入口处的圆角半径对材料流动及成形力具有一定的影响。为此, 对微孔直径 $D=0.5\text{ mm}$, 不同凹模微孔入口圆角半径 $R=0.1\text{ mm}$ 、 0.2 mm 和 0.3 mm , 厚度为 0.5 mm , 1.0 mm , 2.0 mm , 3.0 mm 与 5.0 mm 的坯料, 在特征高度为 1.0 mm 时的成形力进行采集, 如图 4-10 所示。与宏观挤压成形有所不同, 在微细特征模压成形过程中, 随圆角半径的增大, 成形力也逐渐增大。这是因为, 在微尺度下, 圆角半径的增大造成了变形材料的增多, 同时, 也增加了坯料与模具的接触面积, 材料要流入微孔需要克服更大的摩擦阻力。三种不同凹模圆角半径下, 厚度为 2.0 mm 的坯料在成形微特征高度为 1.0 mm 时的等效应变情况如图 4-11 所示。

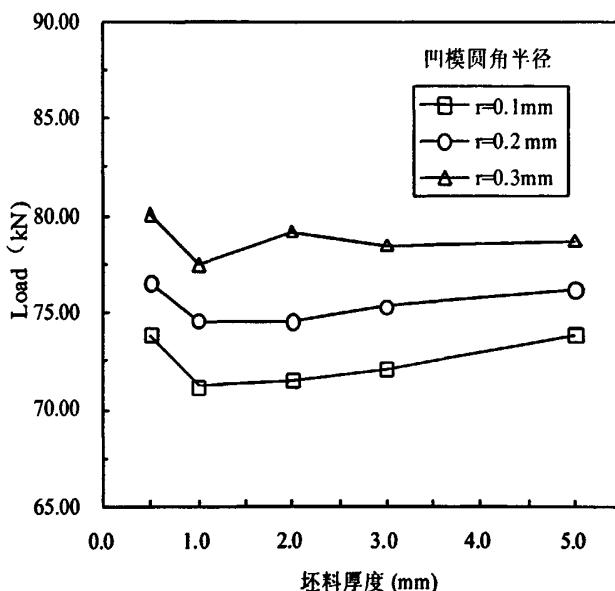


图 4-10 不同圆角半径成形相同高度细柱时坯料厚度与变形力的关系

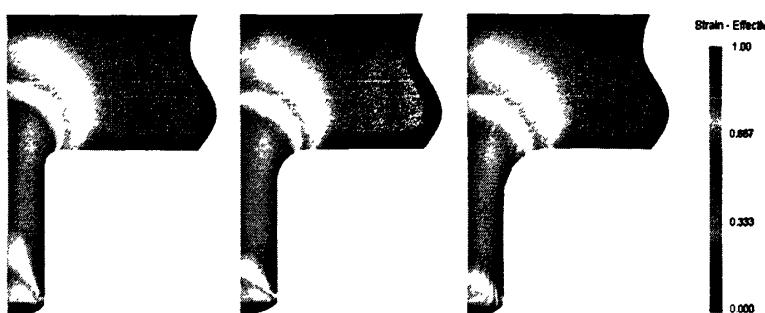


图 4-11 不同凹模圆角半径下坯料的等效应变

4.3 薄筋微特征模压成形规律数值模拟

4.3.1 有限元模型的建立

由于薄筋微特征坯料为平面对称图形，现取坯料和模具的 1/4 部分进行模拟，有限元数值模拟采用的模型如图 4-12 所示，其中坯料直径 10.0 mm， H 为坯料厚度， W 为细槽的宽度， r 为凹模细槽入口处的圆角半径。对影响成形的摩擦条件、坯料厚度、细槽尺寸和凹模圆角半径等因素进行了数值模拟。材料的应力应变曲线同样由纯铜流动应力曲线实验获得。

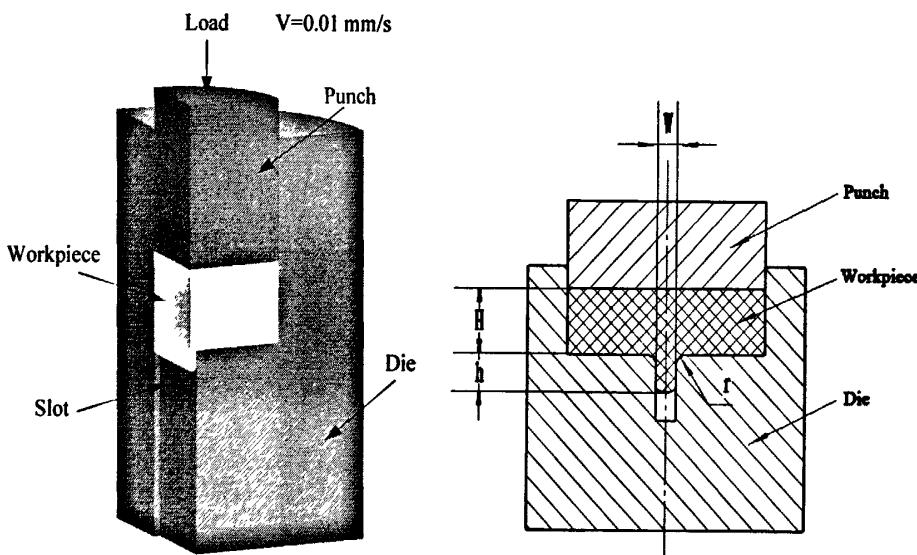


图 4-12 有限元模拟模型

图 4-13 有限元模型参数示意

4.3.2 薄筋微特征模压成形模拟结果与分析

本节薄筋微特征模压成形数值模拟以成形相同高度的薄筋微特征时所需要的成形力作为衡量微细特征成形难易程度的指标，同样对坯料厚度、摩擦状态、微细特征尺寸、凹模圆角半径等因素对成形性进行数值模拟分析。在进行薄筋微特征高度采集时，这里统一以模压挤出的薄筋最高点作为衡量标准。

(1) 坯料厚度

在其他条件相同的情况下，分别对不同厚度的坯料进行厚度 $W=0.5\text{ mm}$ 的薄筋特征模压过程的数值模拟。对模拟过程中薄筋高度分别为 0.5 mm 、 0.8 mm 和 1.0 mm 时的不同坯料厚度的成形力进行采集，如图 4-14 所示。随着薄筋成形高度的增加，相应的成形力同样逐渐增大，与细柱微特征模压成形有所区别，不同厚度的坯料成形相同薄筋高度时，厚度 1.0 mm 坯料所用成形力最小，并且当厚度大于 1.0 mm 时，成形力逐渐趋于稳定，而当厚度小于 1.0 mm 时，成形力会急剧增大。不同厚度坯料在成形薄筋微特征高度为 1.0 mm 时的等效应变如图 4-15 所示。从图中可以看出，与细柱微特征相比，成形力最低点出现在了坯料厚度为 1.0 mm 时，这可能与所指定的衡量标准有关。

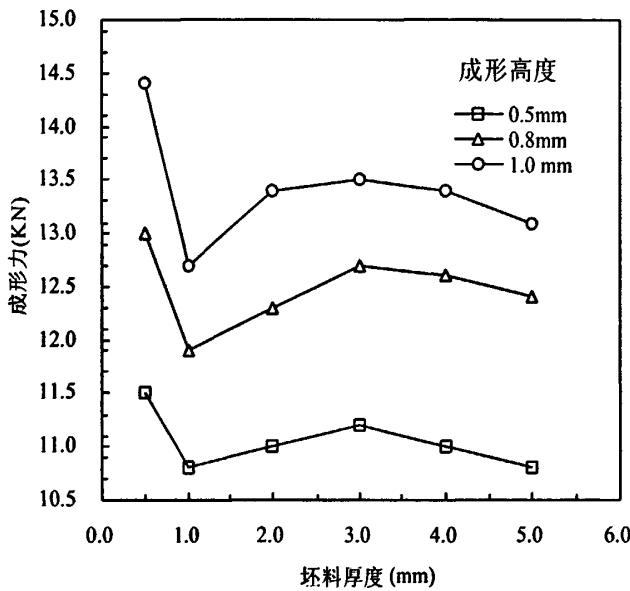
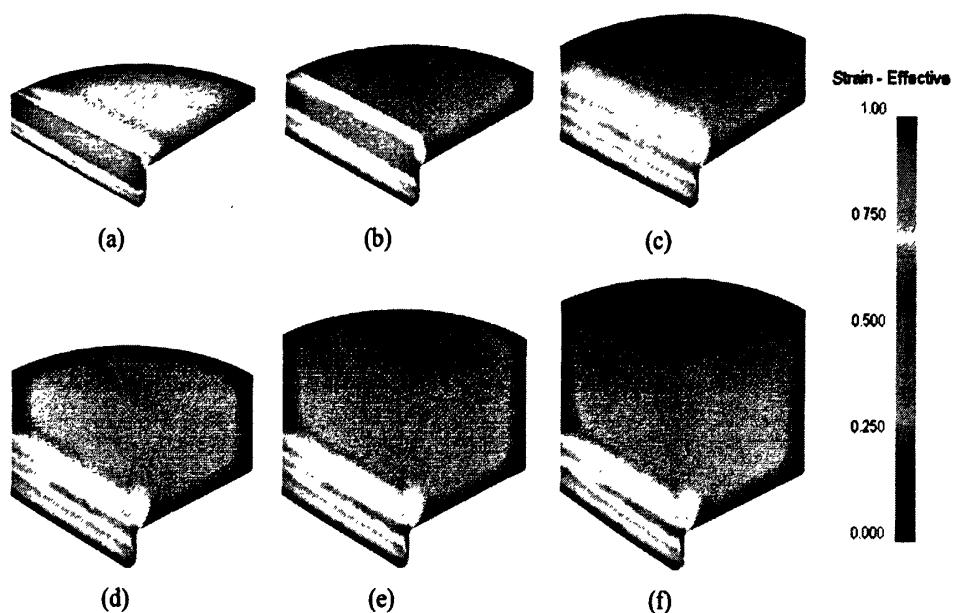


图 4-14 不同薄筋高度时坯料厚度与成形力的关系

图 4-15 不同坯料厚度 H 的等效应变

(a) $H=0.5$ mm (b) $H=1.0$ mm (c) $H=2.0$ mm (d) $H=3.0$ mm (e) $H=4.0$ mm (f) $H=5.0$ mm

(2) 摩擦

为考察不同的摩擦状态对薄筋特征成形的影响, 同样选取冷态下金属塑性成形中接近无摩擦的状态和较差的摩擦状态两种情况进行对比分析, 选取的摩擦系数分别为 0.05 和 0.2。在其他条件相同情况下, 分别对这两种摩擦系数条件下的不同厚度坯料进行厚度 $W=0.5$ mm 薄筋特征成形进行数值模拟, 采集特征高度 1.0 mm 时的成形力, 如图 4-16 所示。

从图 4-16 可以看出, 与细柱微特征相同, 不管是哪种摩擦状态, 摩擦条件对薄筋微特征成形高度同样都具有一定的影响, 摩擦系数为 0.05 时成形相同特征高度的成形力较摩擦系数为 0.2 时显著降低。同时发现两种摩擦系数下成形得出的薄筋微特征最高点位置明显不同, 摩擦系数为 0.05 条件下成形得到的的薄筋微特征最高点出现在了坯料径向外缘处, 而摩擦系数为 0.2 条件下成形得到的薄筋微特征最高点则出现在了坯料心部, 如图 4-17 所示。

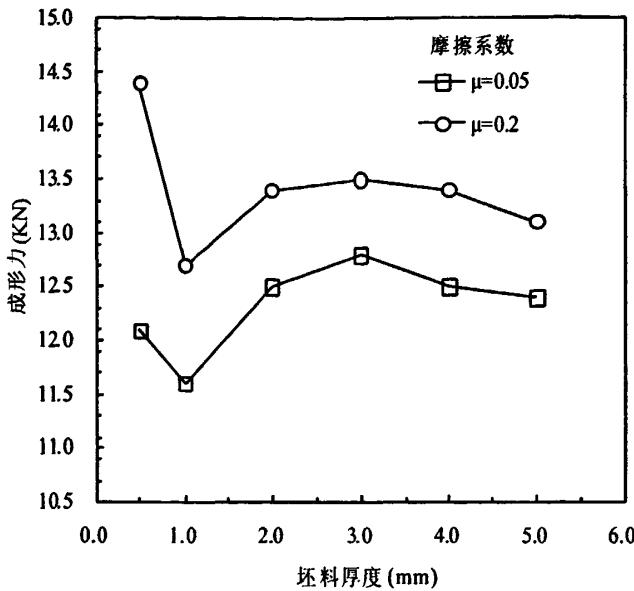


图 4-16 不同厚度坯料的成形力受摩擦条件的影响

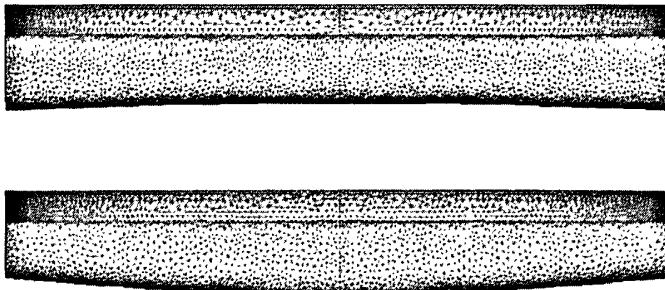
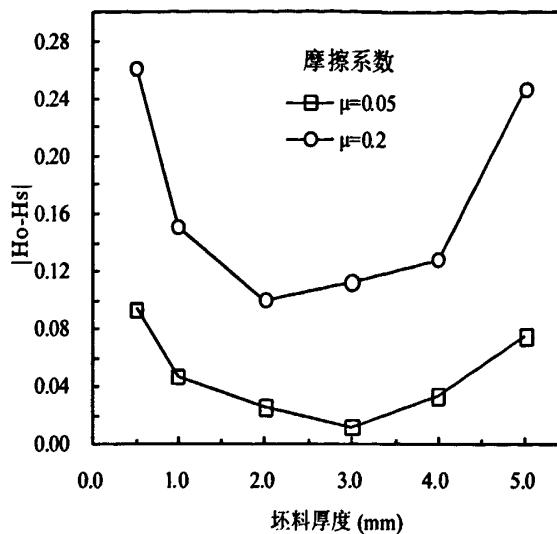
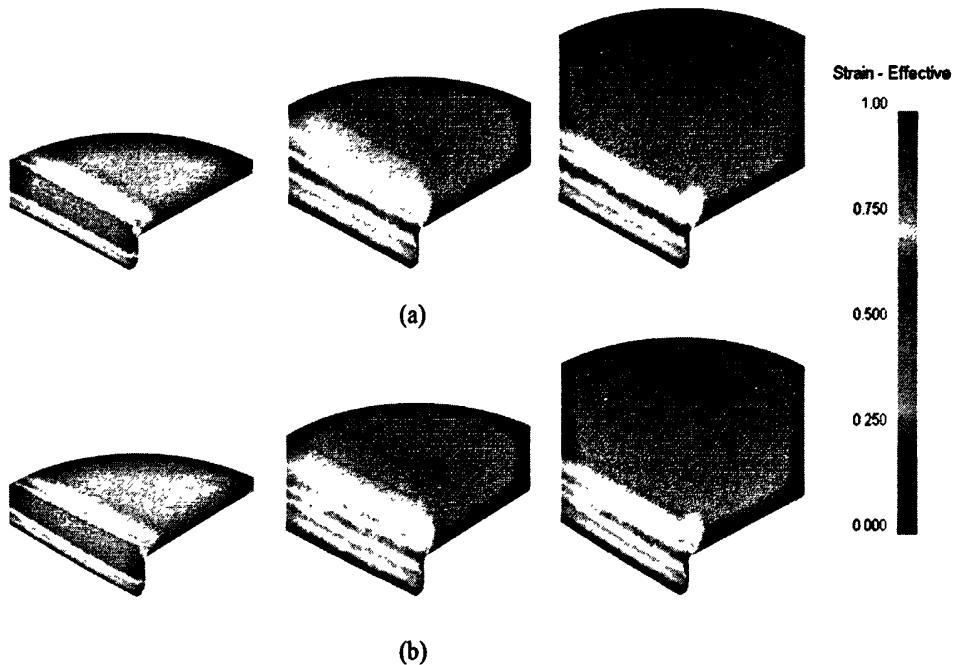


图 4-17 摩擦系数 0.05 和 0.2 下成形得到的薄筋微特征形状

这里引进参数 H_o 和 H_s , 其中 H_o 代表坯料中心位置成形得到的薄筋微特征的高度, 而 H_s 则代表坯料端部位置成形得到的薄筋微特征的高度, 用 $|H_o-H_s|$ 来描述摩擦条件对成形的影响。 $|H_o-H_s|$ 越大, 坯料沿径向流动越不均匀, 说明摩擦条件对成形的影响也越大, 如图 4-18 所示。从图 4-18 看出, 摩擦条件越差, 坯料成形得到的薄筋最高点与最低点相差越大, 改善摩擦条件可以显著提高薄筋微特征成形时材料的流动均匀性。同时可以看出, 不管哪种摩擦条件下, 坯料越薄或越厚时, 坯料成形得到的薄筋最高点与最低点相差也越大, 这说明摩擦条件对其影响也越严重。为了使变形更加均匀, 在坯料厚度小于 1.0 mm 以及大于 4.0 mm 时, 要更加注意改善摩擦条件。厚度为 0.5 mm, 2.0 mm, 4.0 mm 的坯料在三种不同摩擦系数下的等效应变如图 4-19 所示。

图 4-18 坯料厚度与薄筋高度沿径向不均匀性指标 $|H_o - H_s|$ 的关系图 4-19 坯料厚度为 0.5 mm, 2.0 mm, 4.0 mm 在不同摩擦系数 μ 下的等效应变(a) $\mu=0.05$ (b) $\mu=0.2$

(3) 微特征尺寸

为了分析不同微细特征尺寸的成形性, 分别选取细槽宽度 $W=0.1$ mm、 0.3 mm 和 0.5 mm, 摩擦系数设为 0.2 , 凹模圆角半径为 0.1 mm, 对厚度 $H=1.0$ mm 的坯料进行模压成形分析, 分别采集微细特征成形高度为 0.2 mm, 0.4 mm, 0.6 mm,

0.8 mm, 1.0 mm 时的成形力, 得出不同尺寸的薄筋成形力的变化曲线, 如图 4-20 所示。对薄筋型微特征来说, 微特征尺寸(细槽宽度)在 1.0 mm 以下时, 细槽宽度越小, 成形越困难, 尤其在 0.3 mm 以下时, 所需变形力随成形高度的增加而急剧增大。同时, 从图中可以看到, 在成形 1.0 mm 以内的薄筋高度时, 变形力随微特征成形高度的增长基本呈线性关系增大。模压成形得到的三种不同薄筋宽度坯料的等效应变如图 4-21 所示。

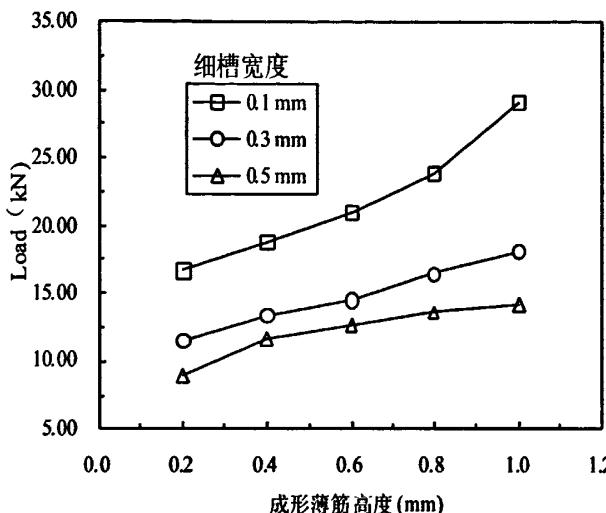


图 4-20 不同细槽尺寸下成形力与微特征高度的关系

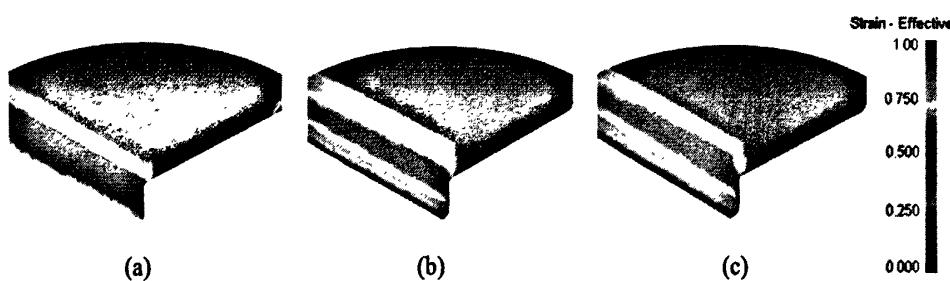


图 4-21 不同薄筋宽度 W 坯料的等效应变:

(a) $W=0.1 \text{ mm}$ (b) $W=0.2 \text{ mm}$ (c) $W=0.3 \text{ mm}$

(4) 凹模圆角半径

对槽宽 $W=0.3 \text{ mm}$, 不同凹模微孔入口圆角半径 $r=0.1 \text{ mm}$ 、 0.2 mm 和 0.3 mm , 厚度为 0.5 mm ~ 5.0 mm 不同厚度的 6 组的坯料进行了模压成形模拟, 分别采集薄筋微特征高度为 1.0 mm 时的成形力, 如图 4-22 所示。与细柱微特征的模拟情况

相似, 薄筋微特征模压成形中, 成形力随凹模圆角半径的增大而逐渐增大, 这主要是因为在微细特征成形中, 凹模圆角半径的增大导致了参加变形坯料体积的增多, 材料要流入因凹模圆角半径增大而多出的型腔, 因此变形力也随之增大。同时从图 3-22 中可以看出, 在薄筋微特征成形中, 当凹模圆角半径 $r>0.2$ mm 时, 成形力虽仍然随圆角半径的增大而增加, 但变形力基本不变或增加很少。厚度为 1.0 mm 和 4.0 mm 的坯料在三种凹模圆角半径下的等效应变如图 4-23 所示。

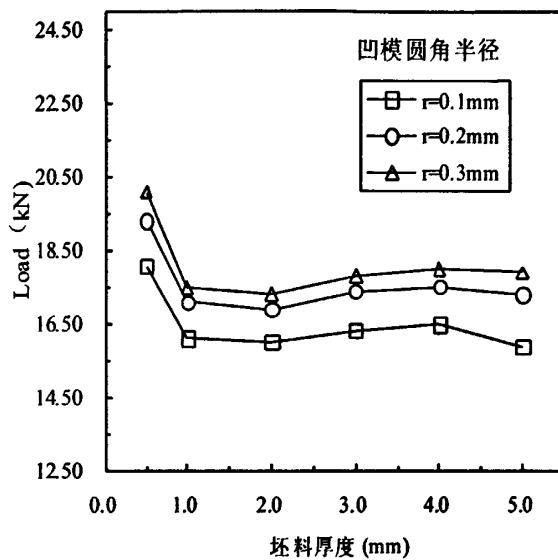
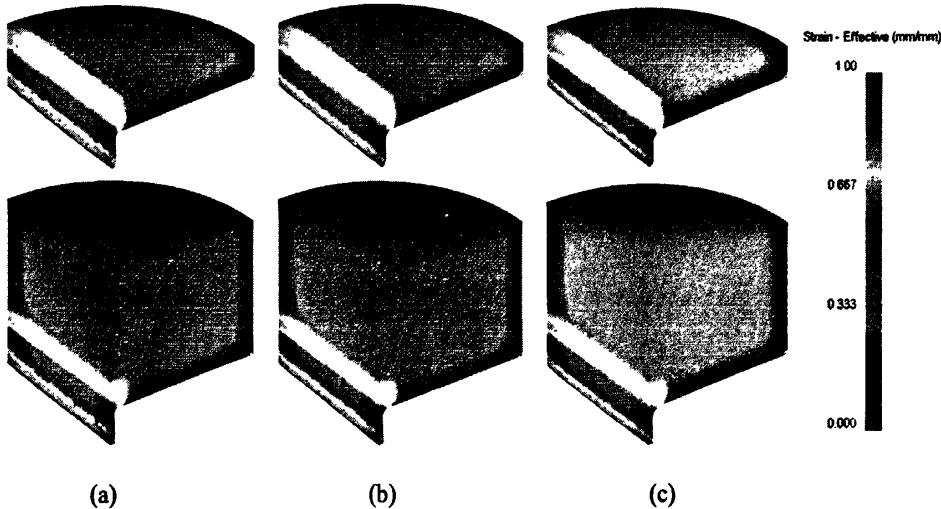


图 4-22 成形力与凹模圆角半径的关系

图 4-23 不同凹模圆角半径 r 坯料的等效应变

(a) $r=0.1\text{ mm}$ (b) $r=0.2\text{ mm}$ (c) $r=0.3\text{ mm}$

4.4 数值模拟结果与实验结果的对比

经过上述有限元模拟过程可见, 微细特征模压成形有不同于宏观成形的独特规律。本节结合微细特征模压成形实验, 拟对所得到的数值模拟结果与实验结果进行对比分析。然而受实验条件所限, 实验条件不能完全与有限元数值模拟情况相同, 现以细柱微特征受坯料尺寸(厚度)因素的影响规律为例, 探讨和验证数值模拟在微细特征模压成形过程中的可行性。

有限元模拟过程中要得到与实验相对应的细柱高度, 不同厚度坯料所需的成形力在 $6.8 \times 10^4 \text{ N}$ 左右, 而实际实验过程中所需成形力为 $1.35 \times 10^5 \text{ N}$, 是有限元模拟结果的 2 倍。分析认为主要是因为微细特征模压实验中模具为闭式成形结构、润滑不均匀尤其是成形中飞刺的形成等因素的影响所致^[53]。

为了描述细柱成形的难易程度, 引入成形力与细柱高度的比值 η (Load/h)。 η 越大, 成形相同高度的细柱越困难。图 4-24 为成形与实验相同细柱高度时, 数值模拟结果与实验结果的 η 的比较。可以看出, 模拟分析中不同厚度坯料的成形难易程度的变化趋势与实验极其相符。其中, 厚度 3.0 mm 的坯料最易变形, 0.5 mm 坯料最难变形。

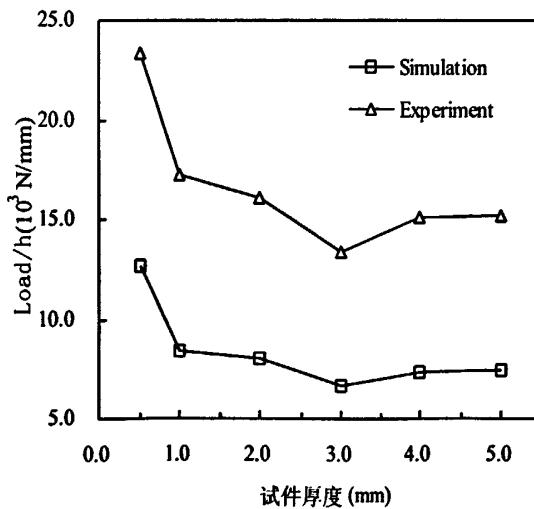


图 4-24 坯料厚度与成形难易程度的关系

模拟结果中成形 0.5 mm 坯料对应的成形力($\text{Load}=6.8 \times 10^4 \text{ N}$)要明显高于其他厚度的坯料所对应的成形力。但实验中成形不同厚度坯料时设定的成形力都是相

等的，这就说明，实验中 0.5 mm 的坯料比模拟中更容易完成变形，反映出当试件较薄时，微细特征成形会产生一定的尺寸效应。

根据表面层理论，参与微成形的晶粒可分为内部晶粒和自由表面晶粒。又根据金属塑性成形原理，坯料的自由表面无法存储和传递位错，内部位错运动剧烈而表面层影响较小，导致表面层晶粒流动应力比内部晶粒要小^[54]。随着坯料尺寸的减小，自由表面晶粒数目与内部的晶粒数目之比增加，自由表面层相对变厚，流动应力也相应减小了^[6]。

对于微细特征模压：当厚度较大时，自由表面晶粒数目很小，可以认为坯料为多晶体，只在模孔处因变形在有限个晶粒中进行而存在尺寸效应。但当厚度为 0.5 mm 时，自由表面晶粒数目相对较多，因此实验中表现出一定的尺寸效应。

4.5 本章小结

本章利用通过纯铜流动应力曲线实验测定拟合得到材料真应力应变参数，建立细柱和薄筋微细特征模压成形有限元模拟模型，应用有限元分析软件 Deform 对纯铜的微细特征模压成形过程进行了数值模拟，研究分析了微细特征的两种典型结构细柱和薄筋在模压变形过程中金属的流动规律以及不同工艺参数包括坯料厚度、摩擦条件、微特征尺寸及凹模圆角半径对流动应力应变曲线的影响规律，并验证了部分实验结果，同时也证明了数值模拟在微细特征模压成形应用中的可靠性，得出以下结论，可为其它微成形过程提供理论指导：

1. 在微细特征模压成形中，坯料尺寸对成形能力具有重要影响，坯料越薄或越厚，成形都将越难进行，坯料厚度在 2-3mm 范围时，最易成形。
2. 摩擦在微细特征模压成形中同样有重要影响，尤其是当坯料越薄时，越应改善摩擦条件，以增加成形能力。同时在薄筋微特征模压成形模拟中发现，不同的摩擦条件甚至导致表现出了不同的特征形貌，为了提高变形的均匀性，应当适当选择润滑条件。
3. 在微特征尺寸方面，微细特征越小，成形越困难，这与实验部分得出的结果相一致。
4. 本章在模具尺寸方面对凹模圆角半径进行了研究，综合分析发现，与宏观

成形不同，在微细特征成形中，圆角半径对成形影响并不大，这主要是由于圆角半径的尺度已经能与微特征尺度相比较，圆角半径的增大虽然易于使材料流入，但也同时增加了需要变形的材料。因此可以根据实际需要来合理设计和选择凹模圆角半径。

第5章 微细特征模压变形机理及提高成形性工艺措施

5.1 引言

微细特征模压成形不同于常规体积成形，其变形主要集中在微细特征结构附近区域。考虑到现代电子产品的微细结构中，较多的为轴对称形状或类似轴对称形状的微突起，因此，本章根据前面得出的微细特征模压成形的基本规律，以细柱微特征为例，通过对变形区域材料的场量分析，揭示微细特征模压变形的内在机理。同时，以有效降低成形力为目标，研究探讨提高微细特征成形性的工艺措施，为实际生产提供技术参考。

5.2 微细特征模压变形机理

模压成形属于闭式成形。微细特征模压成形不同于常规体积成形，其变形主要集中在微细特征结构附近区域。如图 5-1 所示，变形金属大体可分为 A、B 和 C 三个变形区域。B 区的受力主要由 A 区的变形引起的，C 区变形很小，在坯料足够高时可认为金属只是被冲头推移。微特征细柱成形所需的材料由 A 和 B 两区域供给。A 区的变形相当于一个外径受限制的环形件镦粗，B 区的变形犹如在圆形砧内拔长^[29]。下面结合成形细柱直径与坯料直径的比值、摩擦条件、坯料高度等因素对三个变形区分布的影响进行微细特征变形机理分析。

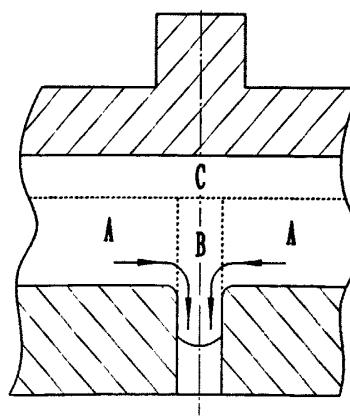


图 5-1 模压过程各变形区

1. 坯料厚度

这里引入坯料中等效应变大于 0.05 的区域为主要变形区域, 如图 5-2 所示, 根据其分布情况, 探讨不同厚度坯料微特征模压的变形机理。

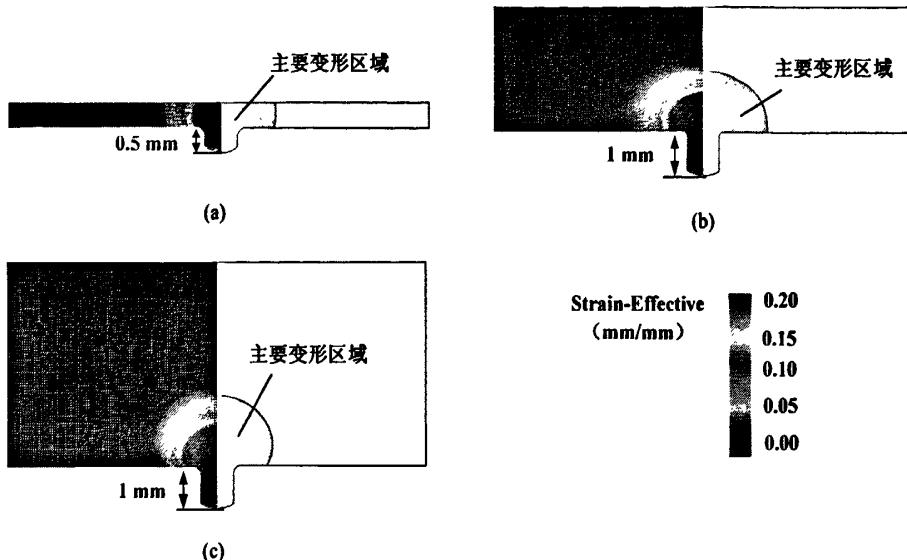


图 5-2 不同厚度坯料成形过程的等效应变

(a) 0.5 mm; (b) 3.0 mm; (c) 5.0 mm

(1) 变形区域穿透坯料

当坯料较薄时, 可供成形的材料较少, 造成材料流动困难。图 5-2(a)表示 0.5 mm 厚度的坯料在成形 $\Phi 0.8 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ 细柱时的主要变形区域。从图中可以看出, 此时主要变形区域已穿透坯料, 变形过程没有 C 区域, 材料要想继续变形只能从侧面流入, 增加了成形困难性。

(2) 变形区域未穿透坯料

当坯料厚度大于 2.0 mm 时, 主要变形区域不再穿透坯料, 说明坯料可以为局部成形提供足够的材料。

① C 区参与变形

当坯料不太高时, 由于主要变形区域相对坯料的比体积较大, C 区不能简单的看作为刚性平移区域, 如图 5-2(b)所示。

成形细柱的材料, 一部分是来自于 A 区, A 区材料通过挤压 B 区, 在圆角附近获得通道进入微细模孔; 另一部分来自于被拔长的 B 区材料。这就造成 C 区材

料存在两种流动趋势：一方面 C 区材料有被冲头挤压径向外补给 A 区的趋势，另一方面有被 B 区材料拉扯着径向向里流动的趋势，如图 5-3 所示。何种趋势占主导地位主要取决于 C 区沿高度方向上最小主应力（轴向应力） $|\sigma_3|$ 的变化情况。图 5-4 描述了坯料 C 区中距对称轴径向 1.0 mm 处的材料质点在成形细柱高度 0.6 mm 时的变化情况。此时，越靠近模压影响区域 $|\sigma_3|$ 反而越高。此时 C 区像实心圆柱被镦粗，材料由外侧向下补给 A 区。

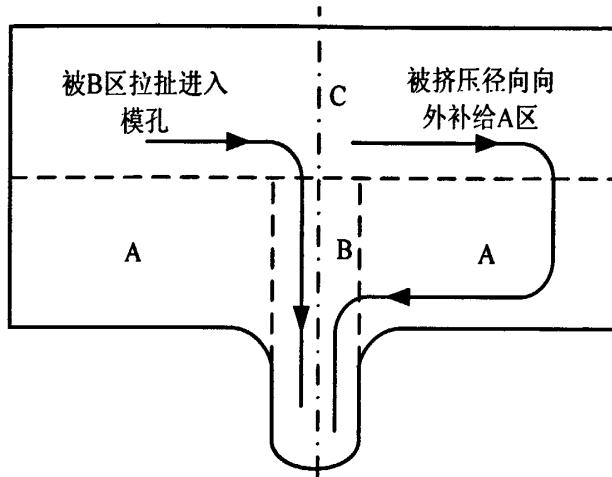


图 5-3 C 区材料两种流动趋势

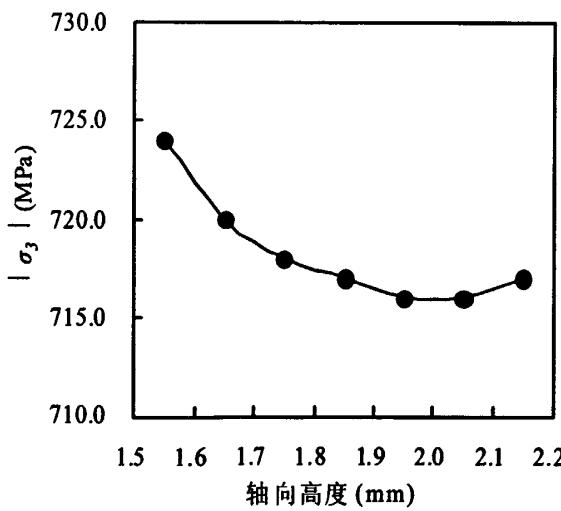


图 5-4 C 区距对称轴径向 1.0 mm 处的轴向应力分布

根据最小阻力定律，材料总是选择最小阻力方向流动^[55]。当拔长 B 区供成形

比 A 区金属直接被挤入模孔供给成形困难时, 变形会择优选择 A 区金属补给成形, 而由 C 区补给 A 区, 这也是在特定条件下, 厚度 3.0 mm 试件容易成形的原因。所以, 对于微细特征的模压成形, 在特定的工艺条件及坯料尺寸下, 适宜的坯料厚度可以降低微细特征的成形难度。

② C 区刚性平移

随着厚度的增加, 坯料在成形过程中, C 区体积较大。镦粗 C 区使其从外侧补给 A 区比较困难, 这时 C 区可认为是刚性平移区域, 因此实际参与变形的材料减少了, 成形力也相对大了, 如图 5-2(c)所示。通过对厚度 5.0 mm 和 6.0 mm 坯料的成形规律的研究, 可以认为随着厚度的增加, 厚度大于 5.0 mm 坯料的主要变形区域趋于恒定, 成形力大小取决于坯料与凹模筒之间摩擦影响的大小。

2. 摩擦条件

同样, 这里引入坯料中等效应变大于 0.05 的区域为主要变形区域; 同时对主要变形区轴向推进距离 OA 和径向推进距离 OB 进行研究。对于相同的试样, OA 与 OB 之间的比值 $\eta_{OA/OB}$ 可以描述材料的流动趋势: $\eta_{OA/OB}$ 越大, 轴向流动趋势越大, 反之径向流动趋势也大, 如图 5-5 所示。并对不用厚度和摩擦条件下的参数进行采集, 如表 5-1。

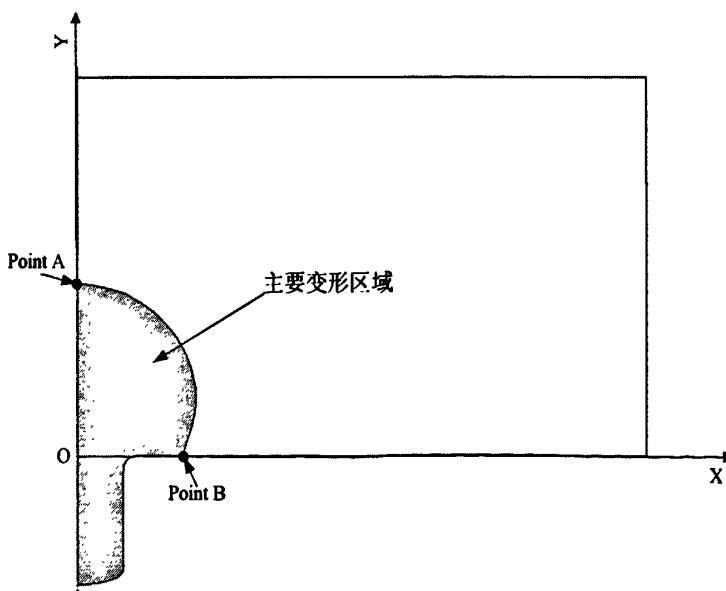


图 5-5 参数 OA 与 OB 示意图

① 变形区域穿透坯料

当坯料较薄时, 可供成形的材料较少, 造成材料流动困难, 主要变形区域很容易穿透坯料。因此不管摩擦多大, 变形所需的材料只能通过 A 区获得, 即材料以径向流动为主, 如图 5-6。这不可避免的加大了摩擦对成形的影响, 当摩擦系数增加时, 成形力急剧增大, 如表 5-1 中坯料厚度 $H=0.5\sim1.0\text{ mm}$ 的情况。

表 5-1 不同摩擦条件和成形力下的参数 OA 与 OB

厚度 (mm)	摩擦系数	成形力 (kN)	OA (mm)	OB (mm)	OA/OB
0.5	0.05	65.5	0.5	1.9118	0.261534
	0.3	72.4	0.5	1.85705	0.269244
1	0.05	64	1	1.30815	0.764438
	0.3	66.9	1	1.28438	0.778586
2	0.05	63.7	1.88066	1.3039	1.442335
	0.3	66.3	1.7973	1.15804	1.552019
3	0.05	63.1	1.69761	1.25198	1.35594
	0.3	64.2	1.73559	1.19476	1.452668
4	0.05	64	1.61877	1.26378	1.280895
	0.3	65.3	1.6424	1.15468	1.422385
5	0.05	64.3	1.59377	1.24713	1.27795
	0.3	65.7	1.68498	1.20168	1.402187

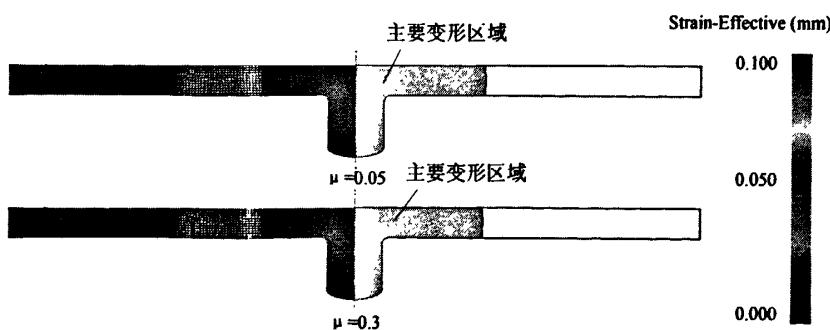


图 5-6 坯料厚度 0.5 mm, 成形高度 1.0 mm 时不同摩擦条件下的等效应变

② 变形区域未穿透坯料

与上面分析类似, 当坯料厚度大于 2.0 mm 时, 主要变形区域不再穿透坯料, 说明坯料可以为局部成形提供足够的材料。此时, 变形可以通过 C 区材料的调节进行: 当摩擦条件较差材料径向流动困难时, 变形可优先选择 B 区材料进行轴向流动。如表 5-1 中描述的坯料厚度 $H=2.0\sim5.0$ mm 的情况: 当摩擦系数增大时, 主要变形区域的轴向推进增加 (OA) 而径向推进减少 (OB), 如图 5-7。此时的成形力的增加主要是由于侧壁与坯料之间摩擦力的增加引起的。

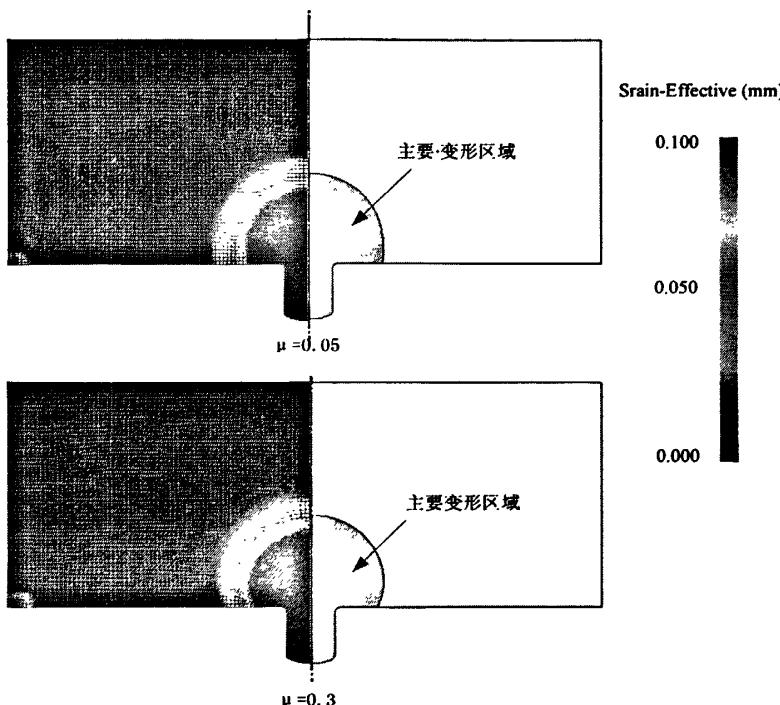


图 5-7 坯料厚度 3.0 mm, 成形高度 1.0 mm 时的不同摩擦条件下的等效应变

3. 微特征尺寸

微特征 (细柱) 成形是由 B 区材料和 A 区材料流动协调进行的, 变形总会择优选择阻力较小的区域的材料补给成形。

对于相同厚度的坯料, 不同的微特征 (微孔) 尺寸意味着 B 区区域的变化: 微孔直径越大, B 区区域越大。因此, 不管主要变形区域是否穿透坯料, B 区区域的增大都能使 B 区为成形提供更多的材料, 使得坯料更容易变形。不同微特征尺寸下的等效应变如图 5-8 和图 5-9。

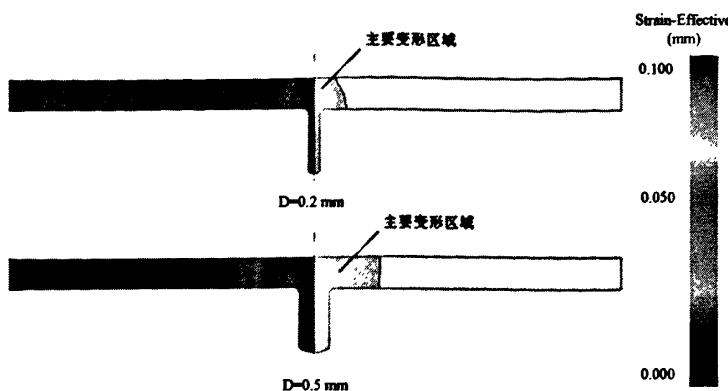


图 5-8 坯料厚度 0.5 mm, 成形高度 1.0 mm 时不同微特征尺寸下的等效应变

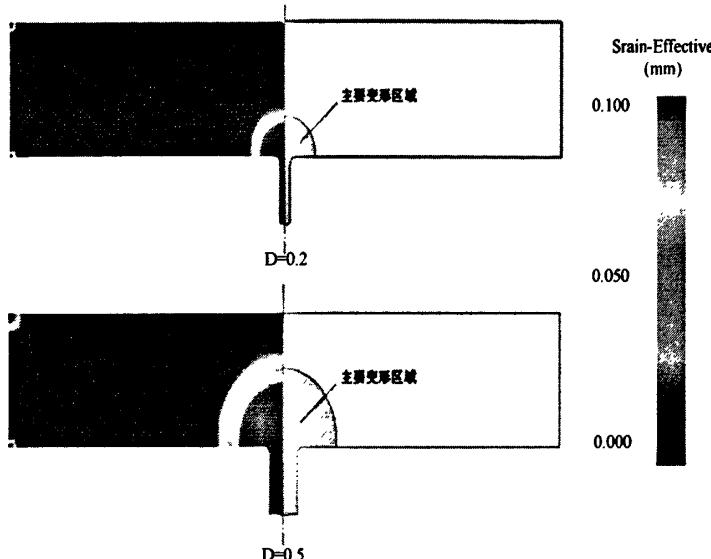


图 5-9 坯料厚度 3.0 mm, 成形高度 1.0 mm 时不同微特征尺寸下的等效应变

4. 凹模圆角半径

与微特征尺寸的变化不同,对于相同厚度的坯料,不同的凹模圆角半径改变的是 A 区材料进入微孔的通道:圆角半径越大,通道越宽。

① 变形区域穿透坯料

当坯料较薄时,主要变形区域很容易穿透坯料,B 区材料在成形初期已经不能满足成形的需要,成形要想继续只能由 A 区材料供给。因此,不管圆角半径大小与否,A 区材料始终比 B 区材料容易流入微孔。对于主要变形区域穿透坯料的情况,圆角半径的增大并不能使变形变得容易。而变形力随着圆角半径的增大而变

大，主要是因为圆角半径的增大使得成形所需的材料增加了。不同凹模圆角半径下的等效应变如图 5-10。

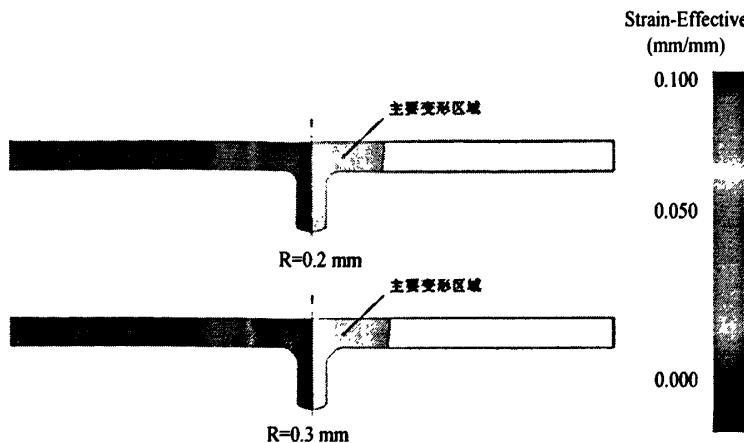


图 5-10 坯料厚度 0.5 mm, 成形高度 1.0 mm 时不同凹模圆角半径下的等效应变

② 变形区域未穿透坯料

当坯料厚度大于 2.0 mm 时，主要变形区域不再穿透坯料，说明坯料可以为局部成形提供足够的材料，而成形也会由 B 区材料和 A 区材料流动协调进行。由于圆角半径的增大，通道变宽，A 区进入微孔变得容易了。这使得某时刻变形优先选择 B 区材料进入微孔的情况变成了优先选择 A 区材料进入微孔，降低了变形难度。不同凹模圆角半径下的等效应变如图 5-11。

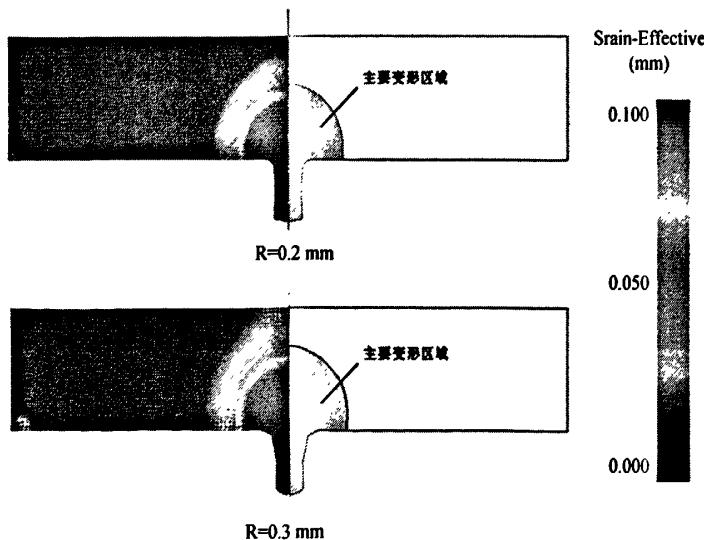


图 5-11 坯料厚度 2.0 mm, 成形高度 1.0 mm 时不同凹模圆角半径下的等效应变

5.3 微细特征模压成形提高成形性工艺措施研究

由上面的机理分析可知, 微细特征的模压成形属于整体加载, 局部变形, 变形主要集中在微细特征结构附近区域。坯料外圈的材料基本不参与变形, 或者说仅仅是刚性平移。这就意味着, 模具和坯料表面接触过度浪费, 这不仅增加了成形微特征所需要的变形力, 同时也增大了克服摩擦所产生的力。由图 5-5 和表 5-1, 合理设计坯料形状与模具形状, 将整体加载改进为局部加载, 以减小成形力为目标, 研究提高细柱微细特征模压成形工艺性的有效措施。

5.3.1 有限元模型的重建立

在塑性变形中, 只要变形前后金属的密度不变, 体积就不发生改变, 这就是塑性变形的体积不变定律^[29]。由于细柱微特征模压成形时, 主要变形区域集中在心部, 这样在原始的圆柱形坯料顶端设计一球缺形状, 如图 5-12 所示, 细柱微特征则可认其为一圆柱体。球缺的体积 V_1 和圆柱的体积 V_2 公式分别为

$$V_1 = \pi H^2 (R - H/3) \quad (5-1)$$

$$V_2 = \pi r_0^2 h_0 \quad (5-2)$$

其中, H 为球缺的高, R 为球缺所在的半径, r_0 为微孔的半径, h_0 为成形得到的细柱微特征的高。

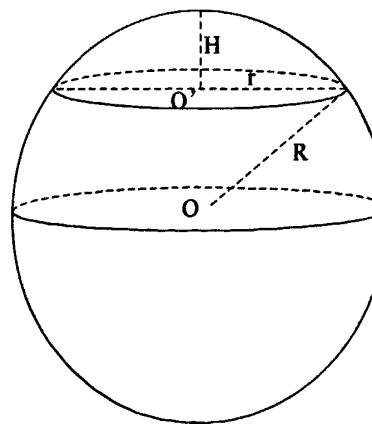


图 5-12 球缺示意图

再由表 5-1, 可以设计球缺的底面直径 d 恰好覆盖主要变形区域, 也即 $r=OB$ 。

由于 r , R 与 H 存在三角勾股定理关系, 根据体积不变定律, 联立上述公式, 可得出关于球缺高 H 的一个一元三次方程

$$H^3 + 3r^2H = 6r_0^2h_0 \quad (5-3)$$

其中, r , r_0 , h_0 均为已知值, 根据一元三次方程的求根方法, 可以求解得出 H , R 则可由 H 推出得

$$R = r^2 / 2H + H^2 / 2 \quad (5-4)$$

5.3.2 提高工艺性措施方案设计

由上面的分析可知, 微细特征模压成形的变形区域主要集中在微细特征结构附近区域, 坯料外圈的材料基本不参与变形, 现设计两种不同的改善措施以提高工艺性, 一种对外圈坯料不进行刚性约束, 另一种对外圈坯料进行刚性约束。

(1) 外圈坯料无刚性约束

以厚度为 2.0 mm 的坯料为例, 摩擦系数为 0.05, 凹模微孔直径为 $\phi 0.8$ mm 方案进行优化设计。模具结构不改变, 坯料顶端则增加上面所述的球缺形状。假设得到的细柱微特征高度 $h_0=1.0$ mm, 将已知数值带入公式 (5-3) 及 (5-4) 中, 求得球缺的高 $H=0.189$ mm, 所在球体的半径为 $R=4.565$ mm, 改进后的有限元模拟模型如图 5-13 所示。

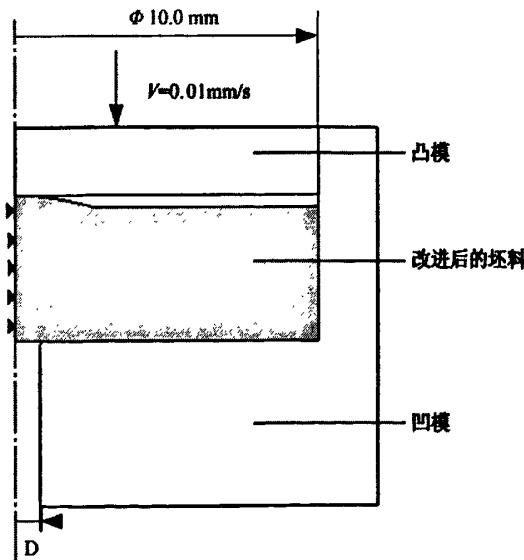


图 5-13 外圈坯料无约束方案设计

(2) 外圈坯料刚性约束

同样以厚度为 2.0 mm 的坯料为例, 摩擦系数为 0.05, 凹模微孔直径为 $\Phi 0.8$ mm 方案进行优化设计。不仅将坯料形状改进为顶端增加球缺, 而且对模具结构进行改造, 在球缺外坯料表面增加一环形刚性约束, 冲头直径则改为等于或略大于球缺的底面直径。坯料的设计尺寸同端部坯料无刚性约束方案, 改进后的有限元模拟模型如图 5-14 所示。

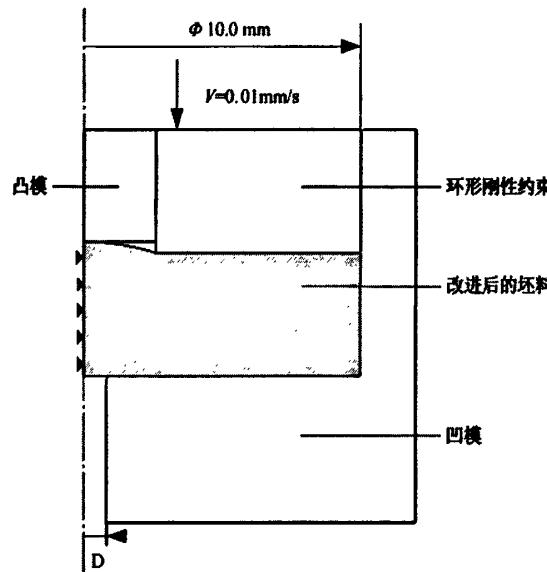


图 5-14 外圈坯料刚性约束方案设计

5.3.3 模拟结果分析

对上述两种方案建立的有限元模型进行数值模拟, 分别采集模拟过程中成形得到的细柱微特征高度为 0.2 mm, 0.4 mm, 0.6 mm, 0.8 mm 时的成形力, 并与原模压成形方案进行对比, F_0 , F_1 , F_2 分别为原方案, 外圈坯料无刚性约束方案, 外圈坯料刚性约束方案的成形力, 如表 5-2 所示。

在模拟过程中发现, 未对外圈坯料进行刚性约束的方案并未有效改善成形能力, 同等条件下的成形力反而比原有方案有所增大, 这是因为在冲头全部接触坯料表面后, 坯料才开始往微孔中流动; 而对外圈坯料进行了刚性约束的方案, 也就是冲头对所设计的球缺处进行局部施力的情况, 则大大降低了成形力, 同等条件下约是原有方案的 7.8% 左右。两种工艺方案对应成形细柱微特征高度为 0.2 mm,

0.4 mm, 0.6 mm, 0.8 mm 时的网格变化及等效应变如图 5-15 及图 5-16 所示。

表 5-2 三种不同模拟方案成形相同微特征高度的成形力对比

微特征高度 (mm)	F_0 (kN)	F_1 (kN)	F_2 (kN)	F_1/F_0	F_2/F_0
0.2	39.4	47.3	2.47	1.200	0.063
0.4	50.3	59.2	3.86	1.177	0.077
0.6	55.8	64.7	4.34	1.159	0.078
0.8	60.1	68.9	4.81	1.146	0.080

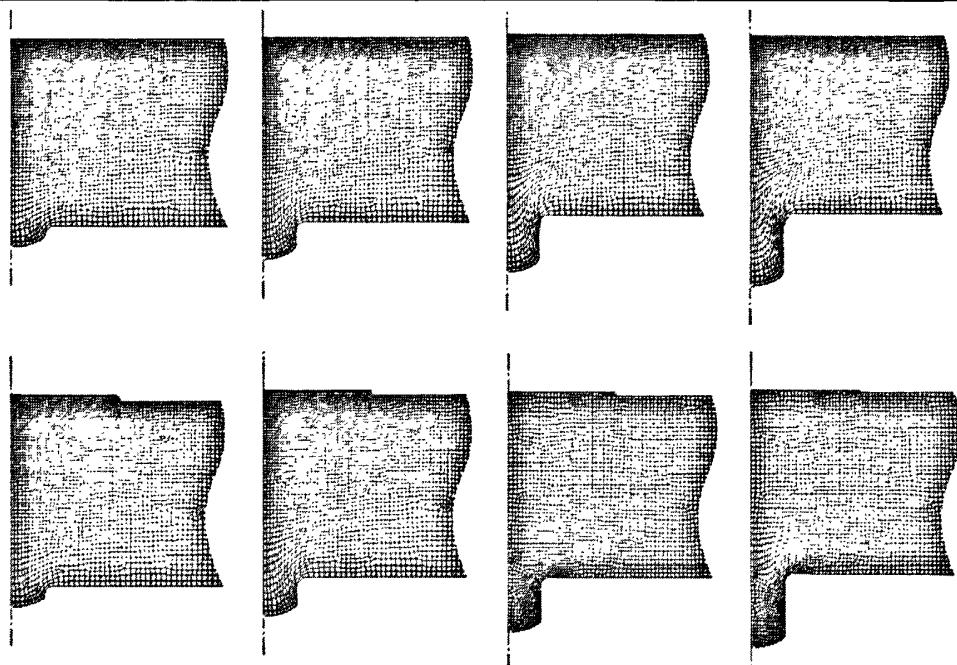


图 5-15 两种工艺方案在成形过程中的网格变化图

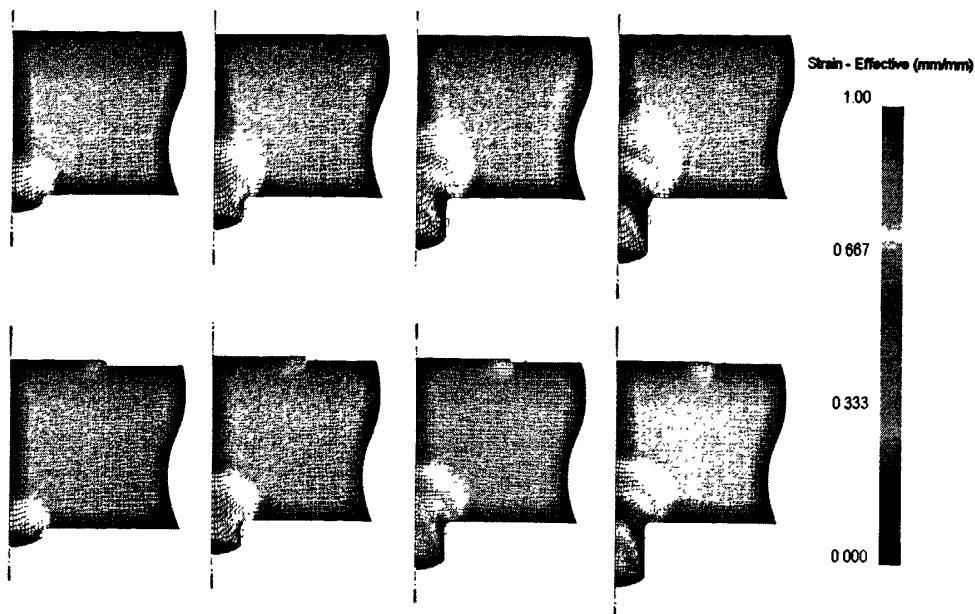


图 5-16 两种工艺方案在成形过程中的等效应变图

5.4 本章小结

本章根据前面得出的微细特征模压成形的基本规律，引入变形区域的概念，以细柱微特征为例，通过对变形区域材料的流动应力分析，揭示了微细特征模压变形的内在机理。同时以有效降低成形力为目标，研究探讨了如何提高微细特征成形性的工艺措施，可为实际生产提供理论依据和工艺参考。

1. 通过对有限元模拟结果的分析，定义等效应变小于 0.05 的区域为主要变形区域；并根据局部变形方式的不同，将变形体分为 A、B 和 C 三个变形区域。
2. 由于精密零件带有的微细特征多为轴对称结构，本章主要对不同工艺参数下（坯料厚度、摩擦条件、微细特征尺寸和凹模圆角半径）细柱模压成形规律体现的内在机理进行了分析。
3. 通过对主要变形区域的分析，设计提出了局部加载方案，科学地设计坯料形状，有效地降低了成形力；结果显示优化方案中的成形力是原有方案的 7.8% 左右。这对以后更复杂的微细特征成形具有一定的指导意义。

第6章 结论与展望

6.1 结论

通过实验研究和有限元分析模拟结合的方法，对细柱和薄筋两种微细特征的模压成形规律进行了研究，完成的主要工作及得出的结论如下：

(1) 选用塑性较好的纯铜作为实验材料，根据微细特征模压成形的特点，自行设计加工了带有微孔和微槽的精密模压模具。在不同成形力、微细特征尺寸、试样热处理状态、摩擦条件以及坯料尺寸等因素下对纯铜材料进行了细柱和薄筋两种微细特征的模压成形实验。实验研究表明：微细特征模压成形难易程度与材料热处理状态、微细特征尺寸、摩擦状态和试件厚度等因素密切相关。材料塑性越好，微细特征（细柱或薄筋）尺寸越大，润滑状态越好，微细特征越容易成形；对于直径相同的试件，在润滑状态相同的情况下，随着试件厚度的减薄，微细特征成形难度略有降低，但当试件厚度进一步减薄后，微细特征成形难度急剧增大。

(2) 结合实验结果，设计不同的坯料厚度、圆角半径、微细特征（微孔或微槽）尺寸和摩擦系数等，对微细特征模压成形过程进行数值模拟。模拟结果与实验结果较为一致，同时，模拟结果表明：对于微细特征的模压成形，细柱或薄筋尺寸越大，润滑状态越好，微细特征越容易成形，而且在特定的工艺条件下，微细特征成形存在最佳的坯料厚度，即：对于直径 $\phi 10\text{mm}$ 的纯铜试件，在良好润滑条件下，坯料厚度为 3.0mm 左右时细柱特征成形性较好，坯料厚度为 1.0mm 左右时，薄筋特征成形性较好；润滑状态对薄筋微特征成形的形貌具有显著的影响，摩擦系数较大时薄筋最高点出现在坯料端部，摩擦系数较小时成形得到的薄筋最高点则出现了坯料心部；凹模微孔或微槽圆角半径的增大并没有使成形变得更容易，相反由于成形所需的材料的增加，圆角半径较大时，成形力反而增大，提高了微细特征成形的难度。

(3) 由于精密零件带有的微细特征多为轴对称结构，本文对细柱模压成形的变形机理进行了比较详细的研究。结合微细特征模压成形数值模拟的结果和区域

变形特点，引入主要变形区域和A、B、C变形区。分析给出不同厚度的坯料成形细柱高度为1.0mm时主要变形区域和成形力变化情况：当坯料较薄时，可供微细特征成形的材料较少，造成材料流动困难，成形力较大；当坯料较厚时，主要变形区域主要集中在微细模孔附近，其他区域为刚性平移区域，成形力主要与摩擦及润滑情况有关；当坯料高度适中时，刚性平移区域消失，其材料可以补给主要变形区域，此时变形力最小。摩擦条件对不同厚度坯料成形的影响也不相同：当坯料较薄时，可供微细特征成形的材料较少，材料大部分通过径向流动补给成形，因而摩擦对成形的影响很大；当坯料较厚时，主要变形区域主要集中在微细模孔附近，变形自行调节A区和B区域材料的流动，当摩擦增大导致A区材料难流动时，因摩擦对厚坯料影响较小，使得B区材料会优先进入模孔。

(4) 通过对细柱模压成形的变形机理的研究，合理设计坯料形状与模具形状，将整体加载修正为局部加载，以减小成形力为目标，提出了提高细柱微细特征模压成形工艺性的有效措施。

6.2 展望

由于实验条件及时间所限，本文研究还存在许多不足之处，以后可从以下几个方面继续深入研究和探索：

(1) 限制于加工技术，微孔最小直径和细槽最小宽度分别为0.5mm和0.3mm，这些尺寸相对于微成形研究仍偏大；反复实验和大载荷造成的模具磨损和微小裂纹会对试验结果产生较大的影响；由于润滑不均、坯料本身的加工精度以及装载过程存在不可避免的差别，会对理论上的相同实验条件下的模拟结果与实验结果造成一定的误差。这些都是下一步工作亟待解决和完善的问题。

(2) 尺寸效应是微成形变形的重要特征。经典塑性理论的基本假设之一是一点的应力只取决于该点的应变或应变历史，现今的数值模拟方法都是以经典连续介质力学为基础的，因此在严格意义上不能直接用来分析微成形过程中金属流动问题。本文研究的微细特征尺寸相对于微成形尺寸较大，因此模拟结果与实验结果具有较好的一致性。但当微特征尺寸进一步较小时，有限元建模时必须考虑尺寸效应。

(3) 与宏观成形相比,微成形或微特征成形的变形区域微小,这便造成了单个晶粒尤其表面晶粒对整个成形的影响增大。因此对变形区域晶粒分布和晶粒位向的研究,从而揭示微特征变形的机理应成为下一步研究的主要目标。

参考文献

- [1] Jeswiet, M.Geiger et al. Metal forming progress since 2000[J]. *Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2008, 1(1):2-17
- [2] M.Geiger, M.kleiner, R.Eckstein. Microforming[C]. *Annals of the CIRP*. 2001, 50(2):445-462
- [3] F.Vollertsen, H.Schulze Niehoff, Z.Hu. State of the art in micro forming[J]. *Int J Mach Tool Manu*. 2006,46(11):1172-1179
- [4] U.Engel, R.Eckstein. Microforming-from basic research to its realization[J]. *Journal of Materials Processing Technology*. 2002,125-126(9):35-44
- [5] 单德彬, 袁林, 郭斌. 精密微塑性成形技术的现状和发展趋势[J]. 塑性工程学报, 2008,15(2):46-53
- [6] 张凯锋. 微成形制造技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2008
- [7] Ruprecht R, Gietzelt T, Miiller K. Injection molding of microstructured components from plastics, metals and ceramics[J]. *Microsystem Technologys*, 2002,8:351-358.
- [8] 申昱, 于沪平, 阮雪榆. 金属微成形技术[J]. 塑性工程学报, 2003. 10(6): 5-6
- [9] Manfred Geiger, U.Engel. Micro forming: a challenge to the plasticity research community[C]. Addressed to the 40th anniversary of the JSTP,Journal of the JSTP, 2002,494(43),171-172.
- [10] J. Keepler, What's a good number, *Fastener Technology International*, October 1999, www.coldheadermachinecorp.com.
- [11] N.Tiesler, U.Engel, M.Geiger. Basic research on cold forging of microparts[C], in:*Proceedings of the Seventh ICTP* (27 Oct.-1 Nov.,2002), Yokohama, Japan, 2002, 1, 379-384.
- [12] Y.Saotome, A.Itoh, S.Amada. Supperplastic micro forming of double gear for milli-machines[C]. Z.R.Wang, *Proceeding of the 4th ICTP*, Beijing, China. 1993:2000-2005

- [13] Yiping Liu,Li-Anne Liew and Martin L.Dunn etal. Application of Microforg to SiCN MEMS Fabrication[J]. Sensors and Actuators A.2002,95:143-151
- [14] K. Yoshida, I. Kuboki, S. Norasethasopon. Surface quality improvement of multistage forged microparts for wristwatches[J]. Journal of Materials Processing Technology 2003,143: 362-366
- [15] 王春举. 微型器件精密微塑性成形技术研究[D]. 哈尔滨工业大学硕士论文, 2003:1-49
- [16] 周健. 5A02铝合金微型齿轮精密微塑性成形工艺研究[D]. 哈尔滨工业大学硕士论文, 2004:150.
- [17] Kals T A, Eckstein R. Miniaturization in Sheet Metal Working. Journal of Materials Processing Technology[J]. 2000, 103: 95-101
- [18] Sasawat Mahabunphachai, Muammer Koc. Investigation of size effects on material behavior of thin sheet metals using hydraulic bulge testing at micro/meso-scales[J].. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2008, 48: 1014-1029
- [19] 常妍妍, 微型圆柱件镦粗变形规律数值模拟研究[D]. 哈尔滨工业大学硕士学位论文, 2006,6:40-52
- [20] Tae-Wan Ku,Sang-Moon Hwang,Beom-Soo Kan.Milli-component forming of ectangular cup drawing[J]. Journal of Materials Processing Technology 2001,113:749-753.
- [21] Wenke Pan, Yi Qin. FE analysis of multi-cycle micro-forming through using closed-die upsetting models and forward extrusion models[J]. Journal of materials processing technology, 2008, 201:220-225.
- [22] 刘芳. 微成形工艺关键技术研究[D]. 上海交通大学博士后论文, 2006: 27-36
- [23] 于君祖. 微塑性体积成形中尺寸效应的研究[D]. 哈尔滨工业大学硕士学位论文, 2005,6: 43
- [24] 郭贵中. 退火处理对紫铜组织和性能的影响[J]. 平原大学学报, 2006,23:129
- [25] 李才巨, 黄素贞, 张代明等. 冷轧及退火工艺对纯铜力学性能的影响[J]. 金属热处理,2007,32(10):67

- [26] 李松瑞, 周善初. 金属热处理(再版) [M]. 长沙:中南工业大学出版社, 1998.
- [27] 洛阳铜加工厂中心试验室金相组. 铜及铜合金金相图谱[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1983
- [28] 侣海燕, 申昱, 于沪平等. 微小尺寸纯铜镦粗试验及其成形特性[J]. 锻压技术, 2005,3: 14-15
- [29] 吕炎. 锻造工艺学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995
- [30] 彭颖红. 金属塑性成形仿真技术[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1999, 4.
- [31] 刘建生, 陈惠琴, 郭小霞. 金属塑性加工有限元模拟技术与应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2003: 52-63.
- [32] 董湘怀, 郑莹, 兰箭等. 金属塑性成形计算机模拟的若干进展[J]. 金属成形工艺, 2000, 18(1): 1-4.
- [33] 马爱军, 周传月, 王旭. Patran 和 Nastran 有限元分析专业教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005-06: 12-13.
- [34] 徐荣珍. 反挤压凹模内压力的有限元模拟及组合凹模优化[D]. 合肥工业大学硕士学位论文, 合肥工业大学, 2003.
- [35] 应富强, 更超, 潘孝勇. 金属塑性成形中的三维有限元模拟技术探讨[J]. 锻压技术, 2004, 2: 1-5.
- [36] C.M.Lee, D.Y Yang. A three-dimensional steady-state finite element analysis of square die extrusion by using automatic mesh generation[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2000, 40: 33-47.
- [37] 林新波, 李荣先, 柳百成. 利用有限元仿真技术优化模具结构[J]. 锻压技术, 2005, 2.
- [38] 赵新中, 张向. 金属成形有限元模拟网格在划分技术[J]. 机械传动, 2004, 3.
- [39] 赵健, 陈拂晓, 上官林健等. 金属体积成形模拟技术[J]. 热加工工艺, 2001, (3): 49-52.
- [40] 胡忠. 材料加工过程计算机模拟的现状与未来[J]. 塑性工程学报, 1998, 5(2): 1-8.
- [41] S.Kobayashi, S.I.Oh, T.Altan. Metal forming and the finite element method [J]. Oxford University Press, New York Oxford, 1989.
- [42] 吕丽萍. 有限元法及其在锻压工程中的应用[M]. 西安: 西北工业大学出版社,

1989.

[43] Unigraphics. Brief introduction[J]. EDS Unigraphics. 1996: 157, 165.

[44] A.N.BramleyU, D.J.Mynors. The use of forging simulation tools [J]. Materials and Design, 2000, 21: 279-286.

[45] S.I.Oh, WT.Wu, J.P.A Tang. Capability and application of FEM code DEFORM [J]. Journal of Material Processing Technology, 1991, (27): 25-42.

[46] DEFORM manual. Scientific Forming Technologies Corporation, Columbus, Ohio, 1996

[47] A.M.t lebraken, S.Cescotto. An automatic remeshing technique for finite element simulation of forming processes [J]. Int. J. Num. Methods Eng, 1990, 30: 1503-1525.

[48] DamirVucina. Flow formulation FE metal-forming analysis with boundary friction via penalty function [J]. Journal of Material Processing Technology, 2002: 125-126.

[49] 夏巨湛. 闭式模锻[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.

[50] 王匀, 孙日文, 许桢英等. 温挤压微成形系统及其数值模拟研究[J]. 材料工程. 2008, 4: 47-50

[51] SAOTOME Y, IWAZA KI H. Superplastic extrusion of microgear shaft of 10 μ m in modul [J]. Microsystem Technologies, 2000, (6):126 - 129.

[52] 俞汉清, 陈金德. 金属塑性成形原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 137-138

[53] U.Engel, M.Geiger. FE-simulation of microforming processes applying a mesoscopic model[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2006,46:1222-1226.

[54] Xinmin Laia, Linfa Peng, Peng Hu, Shuhuai Lan and Jun Ni. Material behavior modelling in micro/meso-scale forming process with considering size/scale effects[J]. Computational Materials Science, 2008, 43(4): 1003-1009

[55] 斯德洛日夫M.B.波波夫 E.A. 金属压力加工原理[M], 北京: 机械工业出版社, 1980.

致 谢

本文是在导师王广春教授的悉心指导下完成的。导师博大精深的科学知识、严谨务实的治学态度，使学生受益终生。三年来，导师不仅在学业上严格要求、言传身教，而且在生活方面给予了无微不至的关怀。值此论文完成之际，谨向导师的辛勤培育表示最崇高的敬意和最衷心的感谢。

在论文工作期间，山东大学塑性成形与模具研究所的宋立彬高工和刘清津工程师在研究工作中给予了许多有益指导和大力帮助，使得课题研究得以顺利进行，在此表示深深的感谢。

感谢山东大学塑性成形与模具研究所的赵国群教授、孙胜教授、管延锦教授、黄晓慧副教授、吴向红副教授、赵新海副教授、马新武副教授、李辉平副教授、张存生讲师、牟玥讲师等给予的多方面的指导和热情有力的帮助。感谢山东大学塑性成形与模具研究所为本课题提供的先进的学习条件和科研条件。

特别感谢博士生郑伟师兄在论文工作中的耐心指教，是他的无私帮助及愉快合作让我的论文得以顺利完成。

感谢实验室好友白建昌、汪耀、裴拂晓、王斐、于晓鸽、王翔、林军三年来的同甘共苦、互帮互学，还有好兄弟高瑞给我提供的热切帮助，这将是我终生的宝贵财富，祝他们学业有成，事业辉煌，前程似锦！

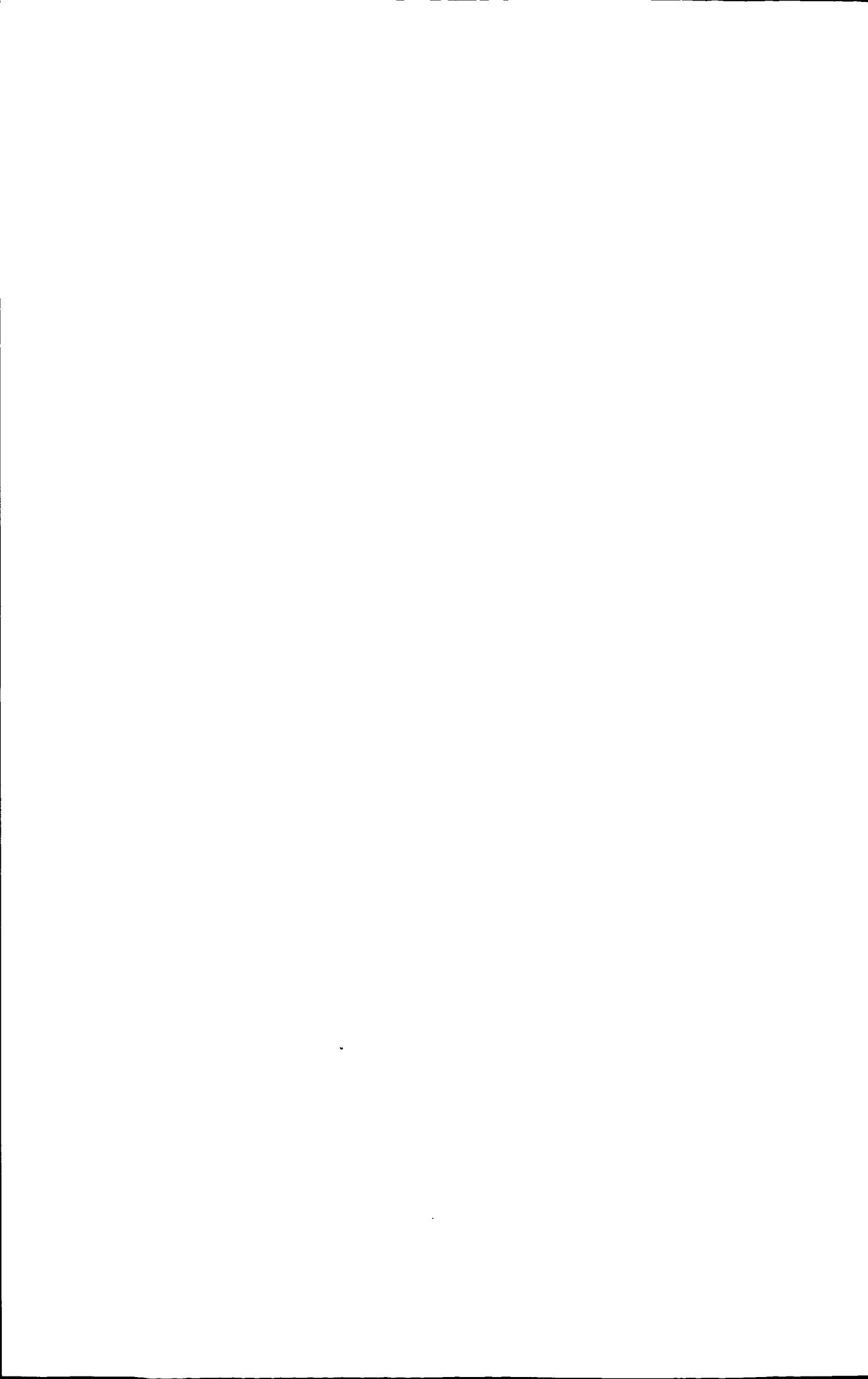
感谢师弟冯超、余志鹏和师妹张伟凤、宋婷婷、袁圆、姜华、倪荣华所给予的热情帮助和有益建议，祝他们学业有成！

尤其要感谢慈爱的父母二十几年呕心沥血的养育之恩和殷切希望，感谢他们对我的不断鼓励和无尽关怀，他们的无私奉献和谆谆教导是我顺利完成学业的动力和源泉，在他们的注视下，我将走的更远更稳！

最后向所有在学习、生活和工作中给予我关心和帮助的老师、同学和朋友们表示真诚的感谢！

吴涛

2010年4月



学位论文评阅及答辩情况表

论文评阅人	姓名		专业技术职务	是否硕导	所在单位	总体评价※
	王强	教授				
答辩委员会成员	栾贻国	教授	是	山东大学	A	
答辩委员会成员	姓名		专业技术职务	是否硕导	所在单位	
	王强	教授			是	济南大学
	委员	栾贻国	教授	是	山东大学	
		管延锦	教授	是	山东大学	
		黄晓慧	副教授	是	山东大学	
		马新武	副教授	是	山东大学	
答辩委员会对论文的总体评价※		良好	答辩秘书	张存义	答辩日期	2010.5.19
备注						

