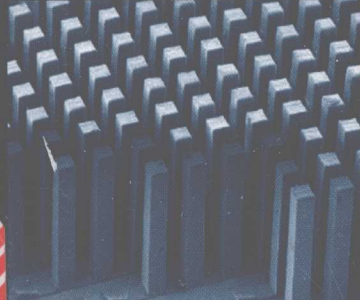
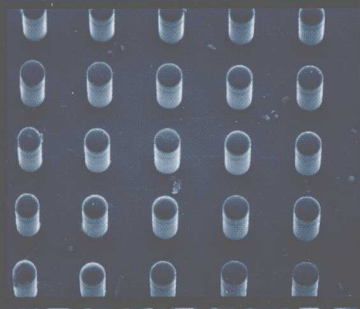
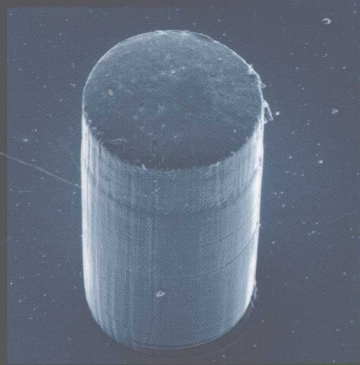


WEICHENGXING  
ZHIZAO JISHU

# 微成形

# 制造技术

张凯锋 编著

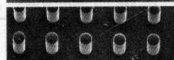
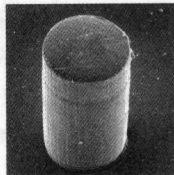


化学工业出版社

WEICHENGXING  
ZHIZAO JISHU

# 微成形 制造技术

张凯锋 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

## 图书在版编目 (CIP) 数据

微成形制造技术/张凯锋编著. —北京: 化学工业出版社, 2008.7

ISBN 978-7-122-02962-1

I. 微… II. 张… III. 成型-工艺 IV. TG39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 074974 号

---

责任编辑: 刘丽宏  
责任校对: 吴 静

装帧设计: 尹琳琳

---

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)  
印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司  
装 订: 三河市万龙印装有限公司  
720mm×1000mm 1/16 印张 19 字数 371 千字 2008 年 9 月北京第 1 版第 1 次印刷

---

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

---

定 价: 48.00 元

版权所有 违者必究

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趋势之一，特别是在通讯、电子、微系统技术 (MST)、微机电系统 (MEMS)、汽车、生物医学工程等领域，前景十分广阔。

微成形 (Micro forming) 技术是在 20 世纪末出现的新兴技术，并迅速成为成形领域的研究热点。随着微/纳米技术的兴起，以尺寸微小或操作尺寸极小为特点的微细加工技术已经成为人们认识和把握微观世界的一种高新技术。MST、MEMS 的产业化进程推动了微细加工技术 (Microfabrication Technology) 的发展。近年来，人们把视线转向传统的成形工艺 (冲裁、弯曲、拉深、超塑挤压、压印、注射等)，因为这些成形工艺具备微型化产业要求的低成本与批量化。由于这些特点，面向微细制造的微成形技术在短短十年内得到了迅速发展。

一些工业发达国家，如日本、德国，已经进行了大量研究，在本领域处于领先地位。国内的高校和研究院所也相继开展了这方面的研究。不过，到目前为止，即使是在先进国家，微成形技术还基本处于探索和实验室研究阶段。这有该技术自身发展水平的原因为，更因为它受所服务的微机电系统产业的发展进程制约。

本书力求较为系统地反映微成形领域的研究现状与成果，并试图突出理论和实际应用综合的特色，重点介绍了微尺度效应、板材微冲压成形、微零件体积成形、微注射成形等内容。

本书主要供从事与成形技术相关的高等院校、研究院所的师生和研究人员，以及与微系统、微制造技术有关的企业技术人员参考。

书中内容主要取材于我所指导的研究生的学位论文工作，其中包括博士研究生王长丽、雷鹏、丁水、李细锋、卢振，硕士研究生童敏杰。卢振在书稿整理过程中还做了很多协助工作。谨向他们致以谢意。

微成形技术在迅速发展，一些概念、理论、技术在不断更新，加之编者水平所限，不当之处恳请读者批评指正。

编著者

## 第 1 章 绪论

1.1	微成形技术的发展	1
1.2	微零件与微成形的定义	3
1.3	微成形的种类	4
1.4	微成形的应用前景	4
	参考文献	7

## 第 2 章 微成形的理论基础

2.1	微尺度效应概述	9
2.1.1	微尺度效应的分类	12
2.1.2	微尺度效应的动态性和相关性	15
2.1.3	微尺度效应相似评估的理论基础	16
2.1.4	微尺度效应评估分析实例	18
2.1.5	微成形中微尺度效应评估的意义	20
2.2	微成形的塑性力学	21
2.2.1	本构模型的种类	22
2.2.2	微塑性变形的应变梯度理论	35
2.2.3	微尺度应变梯度塑性有限元法及应用	53
	参考文献	62

## 第 3 章 板材微冲压成形

3.1	板材微冲压成形的特点与分类	67
3.2	板材微冲压成形的材料	70
3.2.1	箔材的种类	70
3.2.2	箔材的性能	72
3.3	板材微冲压成形的设备与模具	80
3.3.1	微冲压成形设备	80
3.3.2	微冲压模具特点与制造工艺	84
3.4	板材微冲压成形工艺	85
3.4.1	板材微弯曲	85
3.4.2	微冲裁	87
3.4.3	板材微拉深	88



3.4.4 板材微胀形 .....	100
参考文献 .....	108

## 第4章 微零件体积成形

4.1 微零件体积成形的特点与分类 .....	115
4.2 微零件体积成形的材料 .....	116
4.2.1 超细晶材料 .....	116
4.2.2 非晶材料 .....	128
4.3 微零件体积成形的设备与模具 .....	135
4.3.1 微体积成形的设备 .....	135
4.3.2 微体积成形模具特点与制造工艺 .....	138
4.4 微零件体积成形工艺 .....	139
4.4.1 微锻粗 .....	139
4.4.2 微挤压 .....	144
4.4.3 微锻造 .....	154
4.4.4 超塑材料微体积成形 .....	158
4.5 微体积成形件的组织 .....	176
参考文献 .....	178

## 第5章 微注射成形

5.1 概述 .....	183
5.1.1 微注射成形基本原理 .....	183
5.1.2 微注射成形分类 .....	184
5.1.3 微注射成形研究现状 .....	185
5.2 微注射成形装置 .....	187
5.2.1 微注射成形机 .....	187
5.2.2 微型模具 .....	194
5.3 微注塑成形 .....	200
5.3.1 微注塑成形工艺 .....	200
5.3.2 微型塑料件的内部形态结构 .....	210
5.3.3 微型塑料件的力学性能测试 .....	221
5.4 粉末微注射成形 .....	223
5.4.1 粉末微注射成形喂料及混炼造粒 .....	227
5.4.2 粉末微注射成形 .....	236
5.4.3 脱脂 .....	244
5.4.4 烧结 .....	247

5.4.5	粉末微注射成形件的尺寸精度 .....	255
5.4.6	粉末微注射成形件的微观组织 .....	262
5.4.7	粉末微注射成形件的力学性能 .....	264
5.5	微注射成形流变学 .....	276
5.5.1	聚物流变学 .....	276
5.5.2	喂料流变学 .....	285
	参考文献 .....	291

# 第 1 章

## 绪 论

### 1.1 微成形技术的发展

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。在这些领域中,除电子组件外,各种插头插槽、微细螺钉、主框架等微型组件也得到大量使用。由于MST、MEMS具有体积小、精度高、性能稳定、耗能低、灵敏性和工作效率高、多功能、智能化等优点,正受到国内外科技界的广泛关注,成为各国研究和投资的热点,被业界公认为是与信息技术、生物技术并列的另一个产业增长点,可广泛应用于汽车、通讯(MEMS技术将是解决光纤网络瓶颈的关键技术之一)、医疗生物工程(DNAchips、biochips以及lab-on-chips)等70多个不同领域,前景十分广阔。

随着微/纳米技术的兴起,以形状尺寸微小或操作尺寸极小为特点的微细加工技术已经成为人们认识和把握微观世界的一种高新技术。MST、MEMS的产业化极大地推动了微细加工技术(Microfabrication Technology)的发展,先后出现了超精密机械加工、深反应离子蚀刻、LIGA及准LIGA技术、分子装配技术等。但是微型化产业所要求的大批量、高效率、高精度、高密度、短周期、低成本、无污染、净成形等固有特点制约了这些微细加工技术的广泛应用,因此,人们把视线转向传统的成形工艺(冲裁、弯曲、拉深、超塑挤压、压印、注射等),因为在常规尺度的制造领域,成形工艺恰恰具备微型化产业要求的特点。由于这些特点,面向微细制造的微成形技术在短短十年内得到了迅速发展。除了市场推动因素外,其深刻的技术背景是微成形技术在短时间内得以较快发展的关键原因。因为,虽然微成形工艺与传统成形工艺在成形机理上存在较大差异,对其相关技术比如模具、设备等的要求进一步提高甚至苛



刻，但是已有千百年历史的成形工艺所积累的成熟的工艺数据和试验方法、成形理论的不断突破以及各种模拟手段的出现为微成形技术的研究奠定了坚实的基础。加之各种微细加工技术的发展使得微成形相关装备（模具、设备、传输机构等）的实现也成为可能。

但是，在微成形中工艺系统整体微型化带来了一系列难题。和传统的成形工艺一样，微成形工艺系统也由四部分构成，即材料、成形工艺、工模具、设备，如图 1-1 所示。在微成形加工中同样需要考虑工具、模具的设计，工艺参数的优化，材料的磨损及处理等问题，但其主要特点却是由微小尺寸引起的微尺度效应决定的，简言之，就是不能把常规尺度下的工艺参数、结构参数、物理参数简单地按几何比例缩小应用到微成形过程中。而且，微型化的影响波及到整个工艺系统的各个方面。材料方面的影响主要表现在成形过程中的流动应力、各向异性、伸长率及成形极限等都与材料的晶体尺度及产品的微小结构尺寸有关；对材料的影响进一步波及到具体的工艺过程，成形力、摩擦、回弹、毛刺以及制品精度等都表现出与常规尺度下工艺的不同特性；微成形过程中摩擦和润滑条件发生了变化，宏观摩擦学中有关摩擦的理论和控制方法已不再适用，由于微小尺度下表面积和体积之比增大，摩擦力对成形的影响比宏观尺寸下要大得多，相应地，润滑也成为微成形工艺中一个十分重要的因素，且润滑机理与宏观情况下也不再相同；在使用有限元程序分析模拟中也必须考虑这些影响；在工具、模具方面主要是制造问题，即如何制造出微小尺寸、高精度、复杂内腔、内孔、外凸的成形部件。对成形设备和传输装备而言主要是成形和传输速度问题，比如微冲裁要达到以每分钟 300 次的速度冲制直径不到 0.5mm 的小孔，而又必须在不到 0.2s 内将

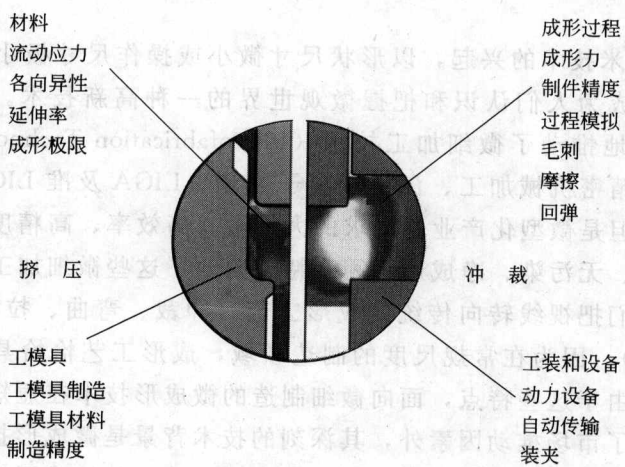


图 1-1 微成形工艺系统<sup>[1]</sup>

其装夹定位于下一步微米级精度的模具上将是极其困难的。微小零件与工装的黏附作用更增加了操作过程的难度，微机械的发展已经开始解决这一问题。此外，产品的微型化在精度测量与控制方面也带来难度，相关的测量手段也必须发展，而且加工场地也有特殊要求。

虽然到目前为止，微细塑性成形技术还处于探索和实验研究阶段，但是世界上一些工业发达国家，如日本、德国，已经进行了大量研究，在技术探索的同时，也为该领域将来必然发生的激烈竞争抢占了一些技术制高点。

## 1.2 微零件与微成形的定义

一般地，微成形定义为：成形的零件或结构至少在两维尺度上在亚毫米范围内。

尽管微成形工艺的发展已经初具规模，部分技术已经实现产业化，但是不同领域关注的侧重点不同，关于微尺度的概念也有些许差异。产业界关心的是成形的难易程度，因此大多认为微成形是指成形微小零件，因为越微小的零件成形就越困难；而理论研究领域的核心课题是有关微尺度效应的一系列问题，因此大多持微米尺度零件的观点。

一般地，将零件上具有相近尺度的几何要素（线、面、体）所构成的微小结构定义为零件的特征结构。将制件的名义尺寸定义为特征尺寸。特征尺寸为亚毫米的制件称为微零件，如图 1-2；具有亚毫米或微米级微特征结构的制件称为微结构零件，如图 1-3。同时，在成形过程中表现出微尺度效应的是微成形工艺的根本特征。

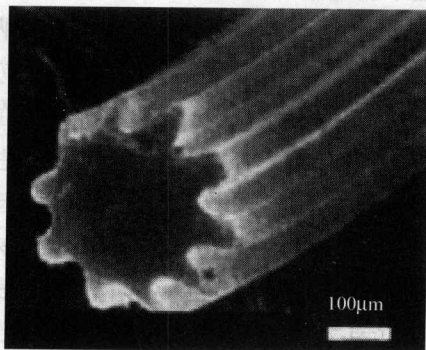


图 1-2 微零件（微齿轮轴）<sup>[2]</sup>

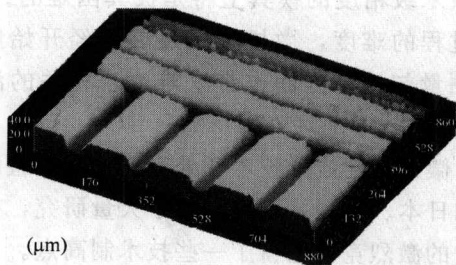


图 1-3 微结构零件 (压印制件)<sup>[3]</sup>

### 1.3 微成形的种类

根据所成形材料的状态,微成形工艺可以分为固态成形和流体成形两大类。固态成形一般是采用塑性加工,和常规塑性加工一样,其中根据坯料形态的不同,可分为体积成形和板材成形。体积成形包括模锻、正反挤压、压印等;板材成形包括拉深、冲裁、胀形等。流体成形包括塑料注射成形、金属和陶瓷粉末注射成形、铸造等。

### 1.4 微成形的应用前景

随着近年来电子及精密机械的高速发展,细微零件的成形加工越来越重要。随着结构微型化趋势的发展,对微型工件的需求将不断增加,生产高精度、低价格的微零件的成形工艺将是非常有前途的,目前成形微零件的技术在工业生产中仍受到限制。

一般来说,常规的厘米及毫米尺度的成形,无论从机理还是从工艺上,均已比较成熟。目前人们在精密成形中对微米级及亚微米级甚至纳米级的成形加工有极大的兴趣。而工业中应用比较普遍的则是 500nm 到 500 $\mu$ m 范围内的成形加工。纳米级的成形已开始通过计算机仿真技术(如分子动力学等)在原子水平上进行研究。

Leopold<sup>[4]</sup>对微成形应考虑的基本原理作了介绍,并提出了开展微成形研究的微黏塑性法。由于在微成形加工中,变形区很小,与晶粒尺寸相当。在微黏塑性法中,分格尺寸小于晶粒尺寸。这种方法与有限元法结合起来的混合方法(HMVF)能有效地计算稳态和非稳态的金属成形,包括能量消耗、表面的形成、工艺力、流动应力及温度等。HMVF方法在微成形中适用于从 nm 级到 mm 级这样一个范围,远远优于经典机械学仅适用于 mm 级的微成形、分子动力学仅适用于次表层厚度小于 3nm 的情况。

金属成形工艺的各种发展趋势：短期化、灵活及各种工艺的结合、中空结构技术等，将改变未来工厂的结构和制造技术。有限元法和优化技术越来越成为开发新工艺和改善工艺的重要工具。金属成形工艺已成功用于制造微零件。采用金属注射模具法制造微零件，同一批生产拉伸件、弯曲件及轮毂件，重量偏差不到0.5%，密度基本恒定，说明只要注射参数及其他条件选择合理，就能达到一定的精度要求。有学者对手表上的装饰冠状件进行了多相锻造制造的研究，并将传统的锻造由三步改为四步，采用锥形冲头增加心部金属应变速率。当人们把注意力集中在板材成形上时，日本学者却采用纵向剪切棒材的方法制造出微零件，并将纵横剪切结合起来，加上局部锻造，生产出形状复杂的微零件。金属板成形微零件，几何参数和材料参数对成形的重要性的理论数值分析也有报道，实验分析得到的结果，及一些推测对小尺寸零件的成形过程具有指导意义。微型冲压在传统的冲压工艺上发展起来，已成为一种很重要的金属微成形工艺<sup>[4~14]</sup>。

由于零件的微型化，与传统成形工艺相比，微成形在另外一种程度上受材料参数（材料流动应力）和技术（成形力、各向异性、摩擦）参数的影响。微型化对摩擦影响的研究，以双杯挤压为代表，板厚及试件尺寸对金属流动应力的影响通过胀形实验也已得到证明。晶粒与板材厚度的比例对成形的影响，已通过单向拉伸实验（晶粒大小不变，板厚改变）和弯曲实验（板厚不变，晶粒大小改变）进行了探讨；展宽与组织的可控性是展宽轧制的两个突出优点，展宽轧制是一种降低带平面力学性能各向异性的有效方法。采用横展轧制法生产的广泛用于半导体铅架的Cu-Fe合金带，与传统平轧带相比，展宽轧制加工硬化更大，屈服应力、拉伸强度和硬度稍高一些，伸长量减小，轧制组织不如平轧明显，力学性能各向异性及罗德常数均比平轧小。

微零件的应用主要有以下几个方面。

① 在医疗领域，微起搏器安装在皮肤之下，能连续精确控制药量；微机械学的发展，使得人们研制出更好更小的内窥镜，通过它不仅可以进行诊断疾病，还可以进行更为复杂的检查，如溃疡。如图1-4为内置助听器微型支架。

② 在航空电子学领域，不断的微型化，将给该领域带来更大的收益，电容性

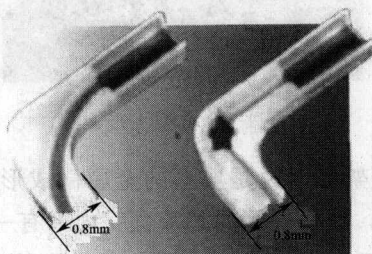


图1-4 内置助听器支架<sup>[15]</sup>



加速器传感器是一种 LIGA 产品，已被应用于飞机中，并可作为汽车中气囊激发装置。另外，各种飞行器、飞行装置的微型化小型化也离不开其各个组成零部件的微型化和小型化，图 1-5~图 1-7 所示为微齿轮组、微型零部件和微型飞行器。

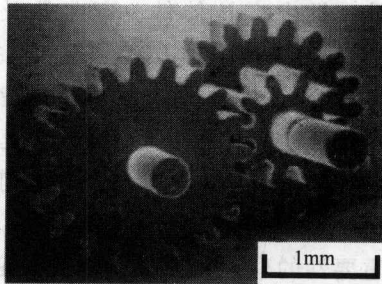


图 1-5 微齿轮组<sup>[16]</sup>

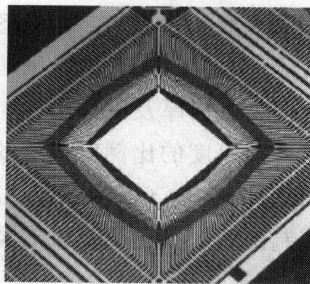


图 1-6 引线框<sup>[17]</sup>

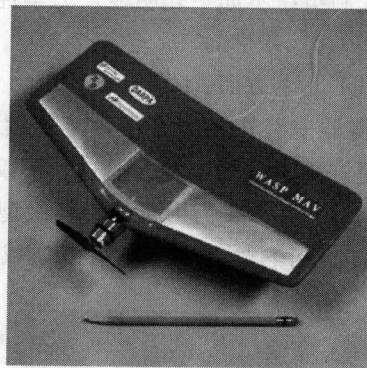


图 1-7 微型飞行器

③ 在计算机领域，铅架可以说是典型的金属微成形产品，微连接器的使用将使硅片盒的尺寸大大减小，目前使用的芯片盒，内部有一个连接器，而使得其体积过分臃肿。用 LIGA 方法已开发出微连接器。微成形的应用，将使磁道间距更小，数据存储更加密集，硬盘在体积减小的同时可保持大容量。随着现代计算机业的迅



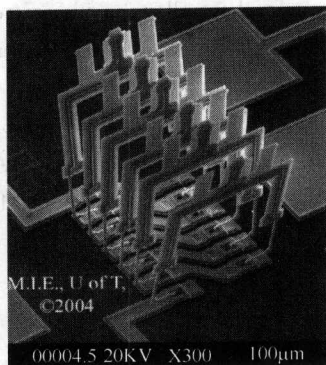
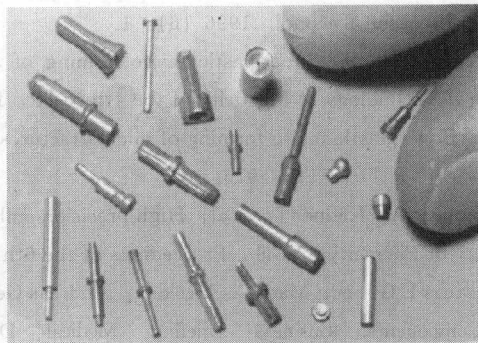


图 1-8 弹性连接接头

猛发展，微机械产品在这一领域的应用是相当喜人的（图 1-8）。

④ 微电子行业、微机械行业及其他应用领域产品不断微型化，必将导致微零件需求的增加，如微型接合件、螺栓、引线框、插口以及各式各样的微型连接元件等，图 1-9 展示了微挤出成形的多种微型零部件。产品的微型化也将引起微成形技术的革新，以满足产品在精度、质量等方面的要求。

图 1-9 微挤出成形件<sup>[17]</sup>

国外有许多公司或实验室致力于微成形技术研究和微零件的设计加工。如前苏联创立于 1986 年的 Forschungszentrum Karlsruhe (FZK) LIGA 的一个子公司，德国提出了一种经济廉价的新技术——micro-photo-lighting (MPL)，这种方法的功能已通过生产薄层而得到证实，这种 MPL 方法非常适合于生产厘米尺度的装置和侧向具有 0.01mm 的结构。挪威、德国、日本等也都有相应的研究机构或公司在这一领域开展工作。

## 参考文献

[1] R. T. A. Kals, R. Eckstein. J. Mater. Process. Technol. 2000, 103 (1): 95.

- [2] Y. Saome, A. Inoue. New amorphous alloys as micromaterials and the processing technology. Proceedings of the 13th Annual International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 2000: 288.
- [3] R. Neugebauer, A. Schubert, J. Kadner, et al. High precision embossing of microparts. Advanced Technology of Plasticity, Proceedings of the 6th Annual International Conference on technology of Plasticity ICTP, Nuremberg, Germany, 1999: 345.
- [4] Leopold J. Foundations of micro-forming Technology of Plasticity of the 6<sup>th</sup> ICTP, 1999: 883.
- [5] Saotome Y, Yasuda K, Kaga H. Microdeep drawability of very thin sheet steels. J. Mater. Process. Technol. 2001 (113): 641.
- [6] Tiesler N, Engel U, Geiger M. Forming of micro parts effects of miniaturization on friction. Advanced Technology of Plasticity, Vol II, Proceedings of the 6<sup>th</sup> ICTP, 1999: 19.
- [7] 张凯锋, 陆辛, 王国峰编. 第一届微米纳米成形技术研讨会论文集, 2006, 11, 苏州
- [8] Underwood E E. J. of Metals, 1962, 14 (3): 414.
- [9] Kaibyshev O A. Grain boundary sliding — the main mechanism of superplastic flow. Notman Ridley. Superplasticity: 60 years after Pearson, Machestar, 1994: The Institute of Materials, 1995: 2532.
- [10] Xing H L, Wang Z R. J. of Mate. Pro. Tech., 1998, 119 (13): 75.
- [11] Kopp R. J. Mater. Process. Technol. 1996 (6): 1.
- [12] Saotome Y, Itoh A, Amada S. Superplastic micro-forming of double gear for mini-machines. In: Advanced Technology of Plasticity of the 4th ICTP, 1993: 872.
- [13] Yasunori, Inoue A. Superplastic micro-forming of microfractures. In: Advanced Technology of Plasticity of the 4<sup>th</sup> ICTP, 1993: 976.
- [14] Weugebauer R, Schubert A, Kadner J, et al, High precision embossing of microparts. In: Advanced Technology of Plasticity, VoIII, Proceedings of the 6th ICTP, 1999: 921.
- [15] Volker Piottter, Andreas E Guber, Matthias Heckele, Andreas Gerlach. Micro Moulding of Medical Device Components. Business Briefing: Medical Device Manufacturing & Technology, 2004.
- [16] Saotome Y., The state art of micro forming. Asian Workshop on Nano/Micro Forming Technology., Sapporo, Japan. 2006, 10.
- [17] U. Engel, R. Eckstein. J. Mater. Process. Technol. 2002, 125~126: 35.

## 第2章

## 微成形的理论基础

## 2.1 微尺度效应概述

到目前为止,对微成形中的尺度效应的定义还并不十分明确完整,概括地讲,所谓的尺度效应就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,但仍然有一些参数是保持不变的,比如材料微观晶粒度及表面粗糙度等,从而引起材料的成形性能、变形规律以及摩擦等表现出特殊的变化<sup>[1]</sup>。

从材料行为方面考虑,在理想状态下,如果不存在尺度效应,同一材料的应力应变状态是相同的,如果应力及载荷的大小或应变的分布与理想状态不同,则被认为是由于尺度效应引起的。尺度效应可以通过以下试验体现出来。

(1) 单轴拉伸试验 在成形工艺中,描述材料变形行为的基本关系是应力-应变曲线,因为这一关系直接影响到成形力、工具载荷、局部变形行为以及充模情况等。将标准样件等比缩小,根据相似原理所进行的拉伸试验表明:由于尺度效应的影响,随着样件尺寸的减小,流动应力也呈现减小的趋势。L. V. Raulea等<sup>[2]</sup>的薄板拉伸试验中使用一致晶粒度的纯铝,经轧制得到不同的板厚:2.0mm到1.10mm、0.72mm、0.30mm和0.17mm。试验表明,随着板厚的减小屈服点、强度极限逐渐减小。T. A. Kals等<sup>[1]</sup>的拉伸试验中使用再结晶软化状态CuNi18Zn20和CuZn15薄板,结果表明:随着试样尺寸的减小,流动应力减小;当晶粒尺寸在0.2~0.5mm时,板厚尺寸范围是0.2~0.5mm,流动应力没有减小,反而增大,存在一个突变点;随着试样尺寸的减小,厚向异性指数 $\bar{r}$ 减小,平面各向异性指数 $\Delta r$ 未发生明显变化,但是,在轧制方向上随着试样尺寸的减小,

$\Delta r$  减小趋势比在轧制垂直方向明显；CuNi18Zn20 不同比例试样 SEM 断裂面图显示：对于同一晶粒尺寸，试样尺寸较大时，断口球形颈缩造成的弹坑面，此为典型的多晶断裂行为；而当尺寸较小时，断口为真实颈缩和局部剪切面，此为单晶延伸断裂行为；由此可以看出，随着试样尺寸的减小，颈缩和断裂行为越来越趋向于单晶材料。F. Michel 等<sup>[3]</sup>的 CuZn36 薄板拉伸试验表明：如果保持试样板厚不变，只改变板宽，应力应变关系曲线几乎不受影响；如果保持宽度/厚度的比率不变，改变板厚，则板厚变化对应力应变关系曲线影响明显。此外，文献 [4] 研究了 0.6mm 厚的 Mg-8.5Li-1Zn 合金板在室温不同应变率下的拉伸试验，结果表明：随着应变速率的增大，流动应力明显增大。文献 [5] 还研究了纳晶镍对应变速率敏感性。

(2) 微弯曲试验 L. V. Raulea 等<sup>[2,6]</sup>的铝薄板弯曲试验中保持板厚 1.0mm 不变，经热处理达到不同的晶粒度。根据厚度方向的晶粒度将试验所得图表分为在多晶区和单晶区。在多晶区，随着晶粒尺度的逐渐减小，屈服应力相应增大，表现出晶粒尺度增强效应或 Hall-Petch 效应。试验结果与晶粒度保持不变而厚度变化的单轴拉伸试验规律相同，可见，改变板厚和晶粒尺度的效果相同；随着试样厚度/晶粒度比率的增大屈服点逐渐增大。这也提示：表面层效应和晶粒尺度增强效应的本质原因可能一致。在单晶区，当晶粒尺度为试样厚度或超过试样厚度时，可观察到两个现象：

- ① 随着晶粒尺度的增大，试验结果的重复性越来越小；
- ② 随着晶粒尺度的增大，屈服点和弯曲平均载荷相应增大。

这是由于随着晶粒尺度增大，变形区晶粒数量减少，单个晶粒的变形位相不再一致，变得更为复杂，造成局部变形力的较大变化，当然这也是平均弯曲力增大的原因，由此可以推断出，变形力的变化趋势与晶粒的位相相关。

T. A. Kals 等<sup>[1]</sup>的 CuZn15 薄板弯曲试验表明：在晶粒度较小的多晶区，弯曲力随着试样几何比例系数的减小而逐渐减小，但当试样板厚与单晶尺度相近或比晶粒尺度小时，则表现相反，弯曲力随着试样几何比例系数的减小而呈增大的趋势；在同组试验中发现，微尺度效应不仅表现在弯曲力的变化趋势上，在几何效应上也表现出明显的差别：当晶粒尺度固定时，随着几何比例系数  $\lambda$  从 1 到 0.1 逐渐减小，回弹角度也以  $5^\circ$  的阶距逐渐减小，这与屈服应力的减小有关，随着几何比例系数的减小，变形区晶体的弹性变形到塑性变形的转变更为容易和顺利。

U. Engel 等<sup>[7]</sup>的薄板弯曲可视塑性试验中采用  $10\mu\text{m}$  晶粒度的细晶试样和  $70\mu\text{m}$  晶粒度的粗晶试样，试样厚度为 0.5mm，保持不变。细晶试样微弯曲应变分布图显示了典型的弯曲过程应变分布情况，外层材料受拉，内层受压，中间不变形；而在粗晶试样的微弯曲应变分布图中，应变分布就不再像细晶试样一样规则：这可能是由于晶粒的结晶位相不同所致。当变形区粗晶数目较多时，这种粗晶位相