University of Wollongong

Research Online

Faculty of Engineering and Information
Sciences - Papers: Part A

Faculty of Engineering and Information
Sciences

1-1-2012

Experimental research on size effect of micro upsetting of pure copper

Guangchun Wang
Shandong University, wang@uow.edu.au

Wei Zheng
Shandong University

Hua Jiang
Shandong University

Zhengyi Jiang
University of Wollongong, jiang@uow.edu.au

Follow this and additional works at: <https://ro.uow.edu.au/eispapers>

Research Online is the open access institutional repository for the University of Wollongong. For further information contact the UOW Library: research-pubs@uow.edu.au

Experimental research on size effect of micro upsetting of pure copper

Keywords

micro, upsetting, experimental, pure, copper, size, research, effect

Publication Details

Wang, G., Zheng, W., Jiang, H. & Jiang, Z. (2012). Experimental research on size effect of micro upsetting of pure copper. *Jixie Gongcheng Xuebao/Journal of Mechanical Engineering*, 48 (14), 32-37.

DOI: 10.3901/JME.2012.14.032

纯铜微锻粗过程尺寸效应的试验研究*

王广春¹ 郑伟¹ 姜华¹ 姜正义²

(1. 山东大学液固结构演变与加工教育部重点实验室 济南 250061;

2. 伍伦贡大学机械、材料和机电一体化学院 伍伦贡 2522 澳大利亚)

摘要: 在微塑性成形试验机上对纯铜圆柱试样进行恒定速度的微锻粗试验。通过热处理和精细线切割技术,设计不同的试样尺寸和晶粒尺寸。分别研究晶粒尺寸和试样尺寸对微塑性成形的影响。研究发现:试样流动应力随着试样尺寸的减小而减小,其减小趋势与表面晶粒体积分数存在线性关系;当试样尺寸较大时,晶粒尺寸对试样流动应力的影响并不明显,而随着试样尺寸的减小,大尺寸晶粒试样的流动应力要明显低于小晶粒尺寸的试样;当试样尺寸较小时,试样在微锻粗过程中表现出明显的不均匀性。通过表面层理论和细晶强化对有试样尺寸和晶粒尺寸变化引起的尺寸效应现象进行解释,同时,引入尺度参数量化由试样尺寸引起的尺寸效应现象,从而对当应变一定时流动应力随着表面层晶粒体积分数 ϕ 呈现近似线性变化的原因进行解释。

关键词: 微成形 锻粗 流动应力 尺寸效应

中图分类号: TG316

Experimental Research on Size Effect of Micro Upsetting of Pure Copper

WANG Guangchun¹ ZHENG Wei¹ JIANG Hua¹ JIANG Zhengyi²

(1. Key Laboratory for Liquid-solid Structural Evolution and Processing of Materials of Ministry of Education, Shandong University, Jinan 250061;

2. School of Mechanical, Materials and Mechatronic Engineering, University of Wollongong, Wollongong 2522, Australia)

Abstract: The process of pure copper micro-cylinder upsetting is performed by a micro universal testing machine. Through the heat treatment and precision wire cutting technology, the specimens are designed with different dimensions and grain sizes. The effects of grain size and specimen size on the flow stress are investigated, respectively. It is found that the flow stress decreases with the miniaturization of the specimen size and the relationship between flow stress and volume fraction of surface grain is linear. The effect of grain size on the flow stress is indistinct as the specimen is larger, but the flow stress of the specimen with larger grain size is obviously lower than that with small size. The surface of the micro-forged specimens show significant inhomogeneous deformation as the specimen size is smaller. The size effects due to the changing of specimen size and grain size can be explained by surface model and fine grain strengthening theories. Meanwhile, the scale parameter is introduced to quantify the size effect and thus the linearly changing of flow stress with the volume fraction ϕ can be explained.

Key words: Micro-forming Upsetting Flow stress Size effect

0 前言

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。而传统的基于机械加工、激光等的微细加工技术已经不能满足微

型零件批量制造的要求。因此,低成本和高效率的微塑性成形工艺成为了微细加工领域的重要发展趋势。微塑性成形技术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1 mm以下零件的技术^[1-2],然而微塑性成形并不是传统塑性成形工艺简单的几何缩小。由于晶粒尺寸和粗糙度等参数并不随着加工尺寸的减小而变化,导致微塑性成形工艺中出现了有别于传统宏观塑性成形的尺寸效应现

* 国家自然科学基金(50975163)和教育部长江学者及创新团队(IRT0931)资助项目。20120201收到初稿,20120601收到修改稿

象^[3-4]。因此,对尺寸效应的研究成为了指导微塑性成形工艺的基础。

在微塑性成形过程中,材料本身的性能对零件和工艺设计都有非常重要的意义。因此,与材料性能有关的尺寸效应的研究成为微塑性成形研究的热点。ENGEL等^[5]在对CuZn15微锻粗试验的研究中发现:相同晶粒尺寸下,当试样尺寸减小时,材料的流动应力也随之减小。KALS等^[6]在对CuNi18Zn20薄板拉伸试验的研究中也发现:当板料厚度由1.0 mm减小到0.1 mm时,流动应力明显减小。KRISHNAN等^[7]对晶粒尺寸为211 μm 的CuZn30试样进行微挤压试验研究时发现:当挤出部分直径小于1 mm时,60%的试样挤出部分出现了弯曲,这说明微成形过程中单个晶粒对整个变形的影响变大了。然而,对尺寸效应现象及其产生机理的认识仍然不足。

在微塑性成形工艺中,微锻粗试验是研究微塑性成形过程中材料尺寸效应的主要手段。本文设计了不同的试样尺寸和晶粒尺寸,对微塑性成形过程中的尺寸效应进行了研究。

1 纯铜微锻粗试验设计

1.1 试样的制备与预处理

微锻粗的试验材料选用的是电子行业广泛使用的纯铜。为了得到尺寸微小的圆柱锻粗件,试验选取直径不同的纯铜铜丝作为原始坯料。在惰性气体保护状态下对坯料分别采用700 $^{\circ}\text{C}$ 加热8 h和700 $^{\circ}\text{C}$ 加热24 h两种退火热处理工艺,以便获得不同的晶粒尺寸^[8]。图1为不同热处理工艺所得到的晶粒尺寸。通过测量,两种热处理条件下得到的平均晶粒尺寸分别为35 μm 和46 μm 。

(a) 700 $^{\circ}\text{C}$ 加热8 h

(b) 700 $^{\circ}\text{C}$ 加热24 h

图1 两种不同热处理状态下的试件晶粒金相照片

由于坯料尺寸非常微小,传统的机加工工艺很难对坯料进行夹持,坯料表面对划痕、毛刺等缺陷也很敏感,因此坯料采用精细电火花线切割加工。为了保证试验的精确性,需要注意以下两个方面:

- ① 要保证坯料端面的平行度和端面与轴线的垂直

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。

将不同直径的铜丝统一加工成高径比为1.5:1的圆柱锻粗试样。试样的直径分别为0.6 mm、0.8 mm、1.0 mm、1.5 mm、2.0 mm和3.0 mm,加工后的试样如图2所示。

图2 试验中采用的不同尺寸的试样

固体润滑剂颗粒若分布不均会对试验结果会产生很大的影响。而采用液体润滑剂时,由于试样与工具表面之间存在润滑油膜,易造成试样上下端面形成自由表面,在降低摩擦对锻粗成形影响的同时,不受约束的自由表面晶粒沿着最易变形的方向发生塑性变形而造成表面凹凸不平^[9]。为尽可能减小润滑不均匀对变形的影响,试验中不采用任何润滑剂。

1.2 试验条件

为了尽可能减小摩擦对试验的影响,锻粗用的上下压头表面被精加工成镜面,试样端面的粗糙度处理成0.1 μm 以下。试验在室温下进行,压下速度为0.1 mm/s。微锻粗试验使用位移精度为0.001 mm和载荷精度为1 N的微塑性成形试验机(DT-3AW),以固定的时间频率实时采集变形过程中的成形力和位移。试验设备和模具如图3所示。

(a) 微成形试验机

(b) 微锻粗模具

图3 试验设备和模具

2 纯铜微锻粗试验结果分析

2.1 流动应力

材料的流动应力是衡量材料塑性性能的主要标准。由于可以真实地反映瞬时的变形程度和变形抗

力之间的关系,正应力应变曲线具有更普遍的意义。根据式(1)处理采集的微细粗数据可以得到材料的正应力应变关系曲线^[10]

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

式中, H_0 和 A_0 分别为坯料的初始高度和横截面积, 坯料实时高度 H 和成形力 F 可以通过试验设备进行采集。微塑性成形中材料的力学性能受两种尺度的影响: 一种是晶粒尺寸对微塑性成形的影响; 一种是由产品或坯料空间尺寸微小化对微塑性成形的影响。

2.1.1 试样尺寸的影响

为了研究试样尺寸对流动应力的影响, 对直径分别为 0.6 mm、0.8 mm、1.0 mm、1.5 mm、2.0 mm 和 3.0 mm, 晶粒尺寸为 46 μm 的微圆柱试样进行微粗试验。通过多次重复试验取平均值的方法求得不同试样尺寸下的材料正应力应变曲线如图 4 所示。从图 4 中可以看出: 随着样件尺寸的减小, 流动应力呈现减少的趋势。这种现象可以采用表面层模型理论来解释^[11]。表面层模型认为, 在小尺度情况下, 表面层晶粒增多, 表面层变厚。根据金属物理原理, 与材料内部晶粒相比, 表面层晶粒所受约束限制较小, 在较低的流动应力下就能变形, 这样变形体的整体应力就会降低, 而且晶粒尺寸不变时, 随着试样尺寸的减小, 其比表面积增大, 这种趋势更加明显^[12]。

图4 试样尺寸对流动应力的影响

这里引入尺寸参数 φ 来描述表面层晶粒体积分数。图 5 为圆柱试样的二维截面晶粒分布示意图。其中, 截面上的晶粒由表面层晶粒和内部晶粒两部分组成, 晶粒假设为正六面体, 晶粒的尺寸为 d , 试样直径 D , 高度 H 。则可知, 表面层晶粒体积分数

$$\varphi = 1 - \frac{(D-2d)^2(H-2d)}{D^2H} \quad (2)$$

图5 圆柱截面晶粒分布示意图

根据式(2)可得到高径比 1.5 : 1, 晶粒尺寸为 46 μm 的圆柱试样的直径与表面层晶粒体积分数 φ 的关系, 如图 6 所示。从图 6 中可以看出, 当试样直径小于 1.0 mm 时, 表面层晶粒体积分数 φ 已大于 20%, 这也是试样小于 1.0 mm 时, 材料流动应力迅速减小的原因。

图6 试样尺寸与表面层晶粒体积分数 φ 的关系

通过对不同直径试样流动应力的分析发现: 相同应变下, 流动应力随着 φ 的增加基本呈现线性下降的趋势, 如图 7 所示。微塑性成形材料的流动应力可以理解表面层晶粒应力 σ_{surf} 和内部晶粒应力 σ_{in} 共同组成。假设不同表面层晶粒体积分数 φ_1 和 φ_2 下的流动应力分别为 σ_1 和 σ_2 , 则有以下关系

$$\begin{cases} \sigma_1 = \varphi_1 \sigma_{\text{surf}} + (1 - \varphi_1) \sigma_{\text{in}} \\ \sigma_2 = \varphi_2 \sigma_{\text{surf}} + (1 - \varphi_2) \sigma_{\text{in}} \end{cases} \quad (3)$$

由此可知, 图 7 曲线中两点 (φ_1, σ_1) 和 (φ_2, σ_2) 之间的斜率

$$K = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\varphi_1 - \varphi_2} = \sigma_{\text{surf}} - \sigma_{\text{in}} \quad (4)$$

相同应变下 σ_{surf} 和 σ_{in} 都是定值, 这也是当应变一定

时流动应力随着表面层晶粒体积分数 φ 呈现近似线性变化的原因。

图7 表面层晶粒体积分数 φ 对流动应力的影响

2.1.2 晶粒尺寸的影响

细小的晶粒可以改善多晶体材料强度，这一点在微观组织对宏观成形的影响中已经被证实了，并可以根据位错塞积理论来解释^[13]。而对于微型件的成形，晶粒尺寸的大小还决定着表面层晶粒的体积分数，从而进一步影响到材料的流动应力。

图8是平均晶粒尺寸分别为 $35\mu\text{m}$ 和 $46\mu\text{m}$ ，试样尺寸分别为 $\phi 3.0\text{mm} \times 4.5\text{mm}$ 和 $\phi 0.6\text{mm} \times 0.9\text{mm}$ 时的锻粗压缩时的流动应力—应变曲线。当试样尺寸为 $\phi 3.0\text{mm} \times 4.5\text{mm}$ 时，表面层晶粒的体积分数很小，可以认为工件为宏观成形件，此时由于细晶强化的作用，晶粒尺寸为 $35\mu\text{m}$ 的试样的流动应力要略大于晶粒尺寸为 $46\mu\text{m}$ 的试样的流动应力，如图8a所示，但二者在流动应力上的差别并不明显，这主要是由于两种热处理下得到的晶粒尺寸相差不大导致的。当试样尺寸为 $\phi 0.6\text{mm} \times 0.9\text{mm}$ 时，两种晶粒尺寸下的流动应力差别变大，如图8b所示。这种差别一方面是由于细晶强化的作用造成的，另一方面是由于晶粒尺寸为 $46\mu\text{m}$ 的试样其表面层晶粒体积分数要大于晶粒尺寸为 $35\mu\text{m}$ 的试样，而表面层晶粒所受约束限制较小，这便导致晶粒尺寸为 $46\mu\text{m}$ 的试样其整体的流动应力下降得更明显。

总之，就本文的试验结果而言，几何尺寸对流动应力的影响较晶粒尺寸的影响要明显。因此，不同于宏观成形，在不考虑温度和应变速度的影响的情况下，微塑性成形过程中流动应力的主要影响因素已经不仅仅只有晶粒尺寸，还包括试样几何尺寸的影响，而且几何尺寸越小这种影响越明显。

2.2 材料不均匀流动

图9为晶粒尺寸 $46\mu\text{m}$ ，试样直径分别为 0.6mm

图8 晶粒尺寸对流动应力的影响

和 3.0mm 的试样锻粗后的表面形貌照片。从图9中可以看出，当晶粒尺寸一定时，试样尺寸越小，变形后的试样表面凹凸不平的程度越大。这说明与宏观成形不同，试样在微小尺度情况下，材料会呈现出不均匀流动的现象。

这种现象可以用金属晶体塑性理论来解释。当外力作用于多晶体时，各晶粒滑移系统上的分切应力因晶粒取向不同而相差很大，因而各个晶粒的变形也就不一样。但当试样尺寸处于宏观尺度时，一方面由于晶粒数量巨大，单个晶粒对整个变形的影响很小，另一方面由于多晶体中绝大多数晶粒都被其相邻晶粒所包围，这就要求多晶体变形必须依靠晶粒之间的变形协调来完成，因此其变形仍表现为均匀的。

当试样尺寸处于微观尺度时，试样几何尺寸和晶粒尺寸之间的比值也随之减小，这会对微塑性成形产生如下影响：一方面构成试样的晶粒总体数目减少了，单个晶粒由于形状和位向的差异而会导致微塑性成形的不均匀性；另一方面与自由表面接触的晶粒相对数量却增加了，这些晶粒本身受到周围晶粒的约束较小，这势必加剧材料变形的不均匀性。

(a) $\phi 0.6 \text{ mm} \times 0.9 \text{ mm}$ (b) $\phi 2.0 \text{ mm} \times 3.0 \text{ mm}$

图9 微锻粗后试样的表面形貌

3 结论

设计不同的试件尺寸和晶粒尺寸对纯铜圆柱微锻粗过程进行了试验研究并得到二者对微塑性成形材料流动应力的影响规律。

(1) 试样尺寸微小化导致材料流动应力降低及其变形不均匀性增加,而在相同试样尺寸下具有较大晶粒的试样其流动应力要小于具有较小晶粒的试样,其原因可以用表面层理论和细晶强化理论来解释。

(2) 引入表面层晶粒的体积分数 ϕ 量化由试样尺寸引起的尺寸效应现象,从而对当应变一定时流动应力随着表面层晶粒体积分数 ϕ 呈现近似线性变化的原因进行解释。

参考文献

- [1] 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.
SHAN Debin, YUAN Lin, GUO Bin. Research situation and development trends in precision plastic micro forming[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2008,

- 15(2): 46-53.
- [2] VOLLERTSEN F, HU Z, SCHULZE H, et al. State of the art in micro forming and investigations into micro deep drawing[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 151(1-3): 70-79.
- [3] 雷鹏, 张凯锋. 金属微成形过程中微尺度效应与相似评估[J]. 机械工程学报, 2007, 43(7): 213-220.
LEI Kun, ZHANG Kaifeng. Micro-size effects and their similarity evaluating methods in metal micro-forming processes[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(7): 213-220.
- [4] 张凯锋, 王长丽. Zn-Al22 合金超塑微成形[J]. 机械工程学报, 2004, 40(5): 82-86.
ZHANG Kaifeng, WANG Changli. Microforming of superplastic Zn-Al22 alloy[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(5): 82-86.
- [5] ENGEL U, ECKSTENIN R. Microforming—from basic research to its realization[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 125-126(9): 35-44.
- [6] KALSA T, ECKSTEIN R. Miniaturization in sheet metal working[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 103(1): 95-101.
- [7] KRISHNAN N, CAO J, DOHDA K. Study of the size effects on friction conditions in microextrusion-part I: Microextrusion experiments and analysis[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2007, 129(4): 669-676.
- [8] 常妍妍. 微型圆柱件微粗变形规律数值模拟研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
CHANG Yanyan. Research on numerical simulation of micro copper cylinder-upsetting deformation process[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.
- [9] EBRAHIMI R, NAJAFIZADEH A. A new method for evaluation of friction in bulk metal forming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 152(2): 136-143.
- [10] 俞汉清, 陈金德. 金属塑性成形原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
YU Hanqing, CHEN Jinde. Principles of metal forming[M]. Beijing: China Machine Press, 1999.
- [11] GEIGER M, MESSNER A, ENGEL U. Production of microparts—size effects in bulk metal forming, similarity theory[J]. Production Engineering, 1997, 4(1): 55-58.
- [12] 郑伟, 王广春, 吴涛. 微体积成形晶界影响区域材料本构方程的构建及有限元模拟[J]. 机械工程学报, 2011, 47(22): 31-35.
ZHENG Wei, WANG Guangchun, WU Tao.

Establishment of constitutive equation of material in region affected by grain boundary and numerical simulation of micro-bulk-forming[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(22): 31-35.

[13] 杨觉先. 金属塑性变形物理基础[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1987.

YANG Juexian. Physical basis of metal forming[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1987.

作者简介: 王广春(通信作者), 男, 1966年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为金属塑性成形数值模拟与优化技术及快速成形与快速模具制造技术。

E-mail: wgc@sdu.edu.cn

郑伟, 男, 1982年出生, 博士研究生。主要研究方向为微成形数值模拟方法及技术。

E-mail: zhengweino1@163.com

《机械工程学报》被 EI 收录论文目次(2011 年第 21 期)

基于多约束的机器人关节空间轨迹规划	张 斌 (1)
仿壁虎脚趾结构设计及粘附运动性能测试	俞志伟 李宏凯 张晓峰等 (7)
基于概率分布的 3-UPU 机构误差影响敏感度	郭 盛 王乃羽 方跃法等 (14)
基于人工免疫反馈的自治水下机器人推力器控制	吴乃龙 刘贵杰 李思乐等 (22)
多楔带传动系统轮一带振动的实测与计算方法研究	上官文斌 张 智 许秋海 (28)
磁隙式爬壁机器人的研制	薛胜雄 任启乐 陈正文等 (37)
空间共轭啮合副二次包络面三面共点构造法	李锦上 (43)
带弹性环保护轴承的动力学特性	朱益利 徐龙祥 (49)
采用粒子群算法的冲击信号自适应单稳态随机共振检测方法	李继猛 陈雪峰 何正嘉 (58)
基于有限元法的周期拱形结构振动特性	张玉光 温淑鸿 肖 勇等 (64)
磁悬浮球形关节三维动力学模型与控制特性	曾 励 张 帆 徐媛媛 (69)
行星齿轮系扭转非线性振动建模与运动分岔特性研究	李同杰 朱如鹏 鲍和云等 (76)
含裂纹故障齿轮系统的非线性动力学研究	马 锐 陈子恕 (84)
线接触滑—滚条件下微凹坑表面摩擦特性	李 兵 刘 焜 王 静等 (91)
钴基合金的滑动磨损行为及仿真预测	李聪聪 曾 攀 雷丽萍等 (97)
基于 Navier 滑移的油膜缝隙微流动特性数值分析	刘赵森 王国斌 中 峰 (104)
一种结合部法向刚度的预估方法	王世军 赵金娟 张慧军等 (111)
一种支持型腔粗加工刀具序列高效优化的刀具筛选方法	尹震随 刘 飞 刘 霜等 (116)
基于技术杂交的一类产品技术集成创新设计	刘 芳 江 屏 檀润华 (123)
废弃电路板插装件的自适应磨削拆解方法	龙旦凤 向 东 董晔弘等 (133)
一种基于硬件在环的可重构数控系统验证方法	杜少华 于 东 黄 艳等 (139)
基于扩展干涉矩阵的几何可拆卸性判别方法	于嘉鹏 邢宇飞 王成恩 (146)
光制造科学与技术的现状和展望	王国彪 (157)
基于锯切弧区切向力分布的功率消耗模型	黄国钦 徐西鹏 (170)
微结构光学功能元件模具的超精密磨削加工技术	赵清亮 郭 兵 (177)
磁性复合磨粒化学机械抛光技术及其加工试验研究	许雪峰 郭 权 黄亦中等 (186)