

文章编号 1004-924X(2010)12-2610-06

T2 紫铜箔材的 U 型弯曲变形

王春举, 郭 斌, 单德彬

(哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 设计了箔板 U 型弯曲试验方案, 使用不同凹模槽宽尺寸和圆角半径的微型模具, 在三思微型试验机上完成了试验, 分析了模具几何尺寸、箔板厚度等对箔板 U 型弯曲变形中冲头载荷、回弹以及表面质量的影响。研究结果表明, 槽宽尺寸或圆角半径减小时, 最大冲头载荷显著增加, 且冲头载荷上升和下降速率都明显增大; 对比两种不同厚度箔板的冲头载荷显示, 冲头载荷减小速率明显快于横截面面积的减小速率, 说明产生了明显的尺寸效应; 另外, 圆角半径或板厚减小, 导致回弹角度增大, 成形件精度降低; 虽然成形件表面比较平整, 但侧面出现划痕提示需要提高模具表面质量和采取润滑措施。以上研究结果对指导箔板微成形工艺设计具有重要意义。

关键词: 紫铜箔材; 微成形; U 型弯曲; 尺寸效应; 回弹

中图分类号: TG306 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101812.2610

U-bending process of T2 copper foil

WANG Chun-ju, GUO Bin, SHAN De-bin

(School of Material Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: A U-bending test was designed by using a micro female mold with different groove widths and corner radii on a micro extension tester made by SANS company. The effects of the mold dimension and foil thickness on the maximum punch load, springback and surface quality were analyzed during the micro U-bending process. The results indicate that the reductions of groove width or radius leads to the increases of maximum punch load and the rates of increasing or decreasing of punch load increase greatly. By comparison of the punch loads of foils with different thicknesses, it is shown that the decreasing rate of punch load is larger than that of cross section area, and the size effect occurs obviously. Furthermore, the springback angle increases with the decreasing of thickness or radius, which reduces the accuracy of microparts. As the scratch appears at the side surface of a micro bending part, it suggests that the surface quality of the mold should be improved and the lubricating should be taken. The results have an important significance on the design of foil microforming process.

Key words: copper foil; microforming; U-bending; size effect; springback

收稿日期: 2010-03-05; 修订日期: 2010-05-28.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50835002; 50805035); 中国博士后科学基金资助项目 (No. 20090460889); 哈尔滨市创新人才基金资助项目 (No. 2008RFQXG041); 微系统与微结构教育部重点实验室开放基金资助项目 (No. HIT. KLOF. 2009008)

1 引言

塑性微成形技术是以塑性变形构件的方式来成形微型零件或结构的工艺方法,通常构件的成形尺寸或特征尺寸至少在两个方向上小于 1 mm^[1]。该技术继承了传统塑性成形工艺的优点,能够采用如挤压、闭式锻造、拉深、冲裁以及弯曲等多种工艺低成本、大批量地成形出高质量的复杂三维微型构件,在微机电系统(MEMS)和微系统技术(MST)等多个领域具有广泛的应用前景^[2]。目前,箔材微成形主要开展了微拉深、冲裁、增量成形和弯曲等工艺方法的研究。德国不莱梅大学的 Vollertsen 教授和日本群馬大学的 Saotome 教授等人研究了箔材微拉深成形工艺参数对极限拉深比的影响规律,得出了微型化对拉深比没有显著影响的结论^[3-5]。德国的 Geiger 教授等人采用单边弯曲变形试验研究了尺寸效应现象,结果表明箔板厚度与晶粒尺寸比是影响弯曲力的主要因素^[6]。荷兰的 Raulea 等人的三点弯曲试验结果表明,当晶粒尺寸小于板厚时,随着板厚方向晶粒数量的减少,屈服强度和抗拉强度减小;而当晶粒尺寸大于板厚时,屈服强度随晶粒尺寸的增加而增加^[7]。为了进一步研究该现象的产生机理,Engel 等人采用光学应变测量方法得到了 CuZn15 箔板弯曲变形在板材厚度方向上的应变分布,结果表明粗晶粒箔板的应变分布不规则,并从材料微观尺度非均匀性如单个晶粒性能的各向异性角度对这一结果给予了解释^[8]。Kocanda 和 Stolken 等人设计了三一点弯曲装置,对箔板弯曲中的弯曲力测量方法进行了研究^[9-10]。Gau 等人采用三点弯曲试验研究了板厚与晶粒比对弯曲回弹的影响规律,结果表明传统的弯曲回弹理论不适用于箔板回弹规律,板厚与晶粒比是影响箔板回弹的主要因素^[11]。

U 型弯曲变形更加接近实际的箔材成形工艺,其研究结果对箔材成形工艺设计更具指导意义。本文采用 U 型弯曲试验研究了模具几何参数和箔板厚度对 T2 紫铜箔板变形规律的影响,并对弯曲成形件的质量进行了分析与评价。

2 试验方案

2.1 模具装置设计

U 型弯曲变形较三点弯曲变形更加复杂,箔板的弯曲变形性能不仅和材料本身的性能有关,而且和模具的尺寸如凸、凹模间隙等密切相关。为了获得准确的箔材弯曲性能,设计了精密 U 型弯曲变形模具装置,其示意图如图 1 所示,实物图如图 2 所示。该模具装置采用双导柱、导套结构来提高凸模的运动精度,从而保证凸、凹模间隙的精度。凹模的槽宽设定为 1.0 mm 和 0.6 mm,圆角半径为 0.1 mm 和 0.3 mm,凸、凹模单边间隙设定为板厚尺寸。微小的凹模槽宽尺寸决定了凸模的厚度较小,必然会降低其强度和刚度,为此,将凸模设计为阶梯形。

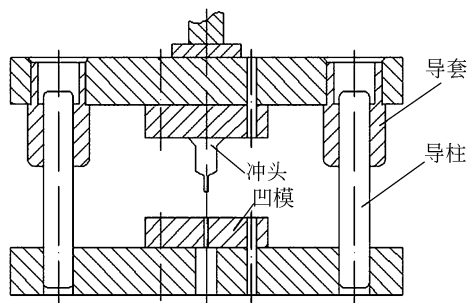


图 1 模具装置示意图

Fig. 1 Diagram of mold system



图 2 模具装置实物照片

Fig. 2 Photo of mold system

2.2 试验材料

使用牌号为 T2 的紫铜箔材,厚度分别为 0.05 mm 和 0.09 mm。试验使用的铜箔为轧制态,材料的化学成分如表 1 所示。采用精细慢走

丝电火花加工技术来制备箔板试样,试样尺寸为宽 4 mm、长 8 mm。

表 1 T2 紫铜箔的化学成分(质量分数)

Tab.1 Component of T2 copper foil

元素	Cu	Sn	Pb	Zn	其他
含量	≥99.9	≤0.002	≤0.005	≤0.005	余量

2.3 微成形件测量与分析方法

U 型弯曲试验在三思公司生产的 CMT8502 型微机控制电子万能试验机上进行。试验中使用设备自带的 Transcell BAB-5 kg 力传感器,其量程为 500 N、精度为 0.15 N,能够满足 U 型弯曲变形力值测量的需要。位移精度为 ±0.5%。U 型弯曲变形中,冲头速度设定为 1 mm/s,且不使用润滑剂。

由于回弹是影响箔板成形件精度的重要因素之一,故将 U 型件的回弹角度作为评价参数。U 型件角度采用激光共聚焦显微镜(Olympus, OLS-3000)测量,成形件的表面使用扫描电子显微镜(HITACHI, S-4300)进行观察和分析。

3 试验结果与分析

3.1 凹模几何尺寸的影响

图 3 为箔板厚度 90 μm、圆角尺寸 0.3 mm、不同槽宽尺寸时的冲头载荷-位移曲线。在弯曲变形的初始阶段,冲头载荷迅速增加,在很短的冲头位移内达到最大值;然后冲头载荷快速下降,当冲头位移约为 1.0 mm 时,冲头载荷基本不变化,弯曲变形过程结束。分析槽宽尺寸对冲头载荷的影响表明,当槽宽尺寸较小,为 0.6 mm 时,最大冲头载荷显著增大,且冲头载荷上升速率和下降速率都明显大于槽宽尺寸为 1.0 mm 时的速率。

为了对上述现象给予解释,对箔板弯曲变形中受力进行了分析,如图 4 所示。当凸模施加外力到箔板时,在凸、凹模与箔板的接触点 A、B 处形成外力 P,由于两点间有距离 L,从而形成弯曲力矩 M,导致弯曲变形的产生,且弯曲圆周半径为 R。在弯曲变形中,凸、凹模与箔板的接触点 A、B 是变化的,弯曲圆周半径也随之变化。凸模下移,弯曲圆周半径 R 逐渐减小,冲头载荷逐渐

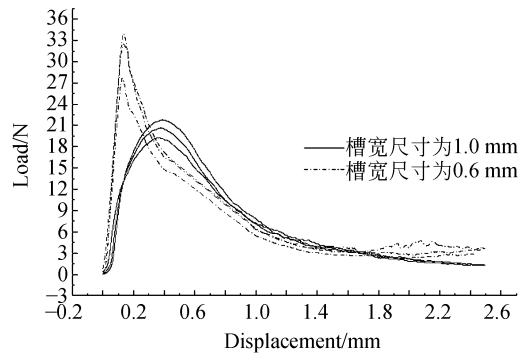


图 3 不同槽宽尺寸时的冲头载荷-位移曲线

Fig. 3 Curves of load-displacement with different channel widths

增加,R 减小到一定值时箔板发生塑性变形。当凸模继续下移时,箔板的塑性变形程度逐渐增大,由于加工硬化现象的存在,使得冲头载荷逐渐增加。随着凸模逐渐进入凹模,箔板塑性变形的增加量越来越小,直至减小为 0,导致冲头载荷下降。在相同圆角半径、箔板厚度以及冲头位移时,槽宽尺寸减小,弯曲圆周半径减小,导致弯曲力增大;同时随着冲头位移的增加,弯曲圆周半径减小的速率增大,使得冲头载荷的变化也变大。

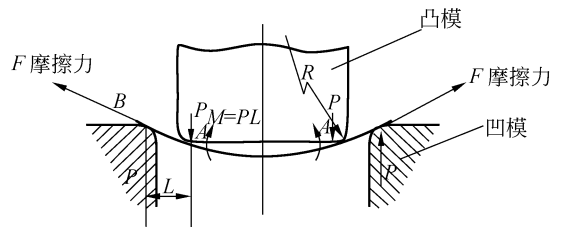


图 4 箔板 U 型弯曲受力示意图

Fig. 4 Diagram of force during U bending of foil

图 5 为箔板厚度 0.05 mm、槽宽尺寸 1.0 mm、不同圆角半径时的冲头载荷-位移曲线。当圆角半径较小时,最大冲头载荷增大,并且冲头载荷的上升和下降速率都明显增大。图 6 显示不同圆角半径对箔板弯曲变形的影响。当圆角半径较小时,相同冲头位移条件下圆周半径较小,导致冲头载荷较大。另一方面,由于凹模圆角较小,箔板与凹模接触点的移动速度明显较大,导致圆周半径的变化速率也较大,使得冲头载荷的上升和下降速率较大。

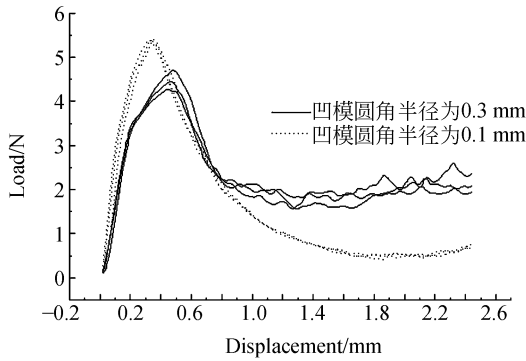


图 5 不同圆角半径时的冲头载荷-位移曲线
Fig. 5 Curves of load-displacement with different corner radii

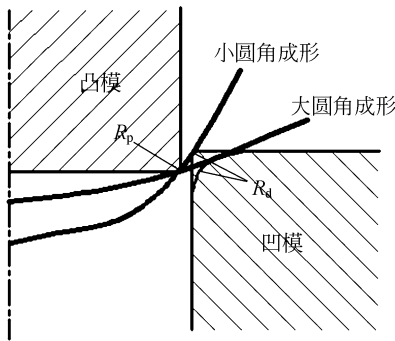


图 6 凹模圆角半径对箔板变形影响示意图
Fig. 6 Diagram of corner radius effect on deformation of foil

3.2 箔板厚度的影响

图 7 为槽宽尺寸为 1.0 mm、圆角半径为 0.3 mm、箔板厚度分别为 0.09 mm 和 0.05 mm 时的冲头载荷-位移曲线。对比两种板厚的冲头载荷,虽然箔板横截面面积减小约 0.55%,但最大冲头载荷减小 0.24%,冲头载荷减小速率快于横截面面积的减小速率,产生了明显的尺寸效应现象。这可以从箔板弯曲变形特点的角度来分析。在箔板弯曲变形中,塑性变形主要发生在箔板的表层,其中外层为拉伸变形、内表层为压缩变形,中间为不变形的中性层。在箔板微成形中,由于自由表面效应的影响,位于自由表层的晶粒内部在塑性变形中位错很容易滑移出表面而消失,导致塑性变形抗力明显减小。当箔板的外形尺寸减小时,其内部的晶粒尺寸并没有明显改变,使得位于表层晶粒占总晶粒数目的比值显著增加,如图 8 所示。在宏观上表现为箔板尺寸的减小,箔板塑

性流动应力减小,即为尺寸效应现象。在箔板弯曲变形中,塑性变形区主要位于塑性变形抗力较小的表层晶粒区,因而冲头载荷减小更为明显。

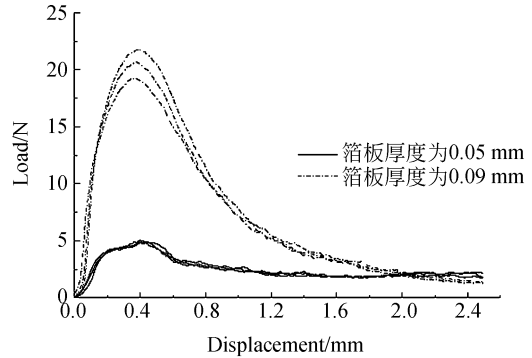


图 7 不同板厚箔板弯曲冲头载荷-位移曲线
Fig. 7 Curves of load-displacement with different thickness foils

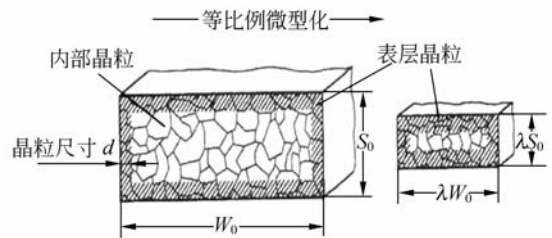


图 8 表面层模型
Fig. 8 Surface layer model

3.3 U 型件回弹分析

在板材成形中,图 9 为不同圆角半径、不同厚度条件下成形的 U 型件回弹角度。当模具参数相同,板厚减小时,回弹角度出现明显增加的现象;当板厚为 0.05 mm 时,圆角半径减小,回弹角度增大。箔板的弯曲变形中,外层为拉伸变形,内

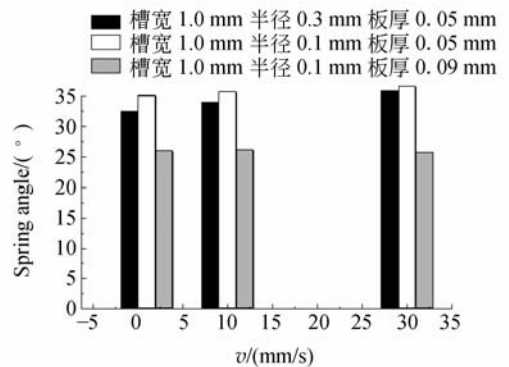


图 9 不同条件下微成形件的角度
Fig. 9 Angles of micro parts in different conditions

层为压缩变形,由此导致箔板厚度方向上的应力-应变分布不均匀,从而产生回弹。在相同模具参数条件下,板厚较小的箔板沿厚度方向的应力-应变变化更加剧烈,分布更不均匀,从而使回弹角度显著增加。而相同箔板厚度条件下,改变凹模圆角半径对箔板弯曲变形中的塑性应变率有影响:减小圆角半径,塑性应变率会增加,塑性流动应力增加,导致应力分布更加不均匀,致使回弹角度增大。

3.4 U 型表面质量分析

图 10 为模具槽宽 1.0 mm、圆角半径 0.3 mm 和板厚 0.09 mm 时 U 型件的实物照片。可以看出成形件表面比较平整,没有出现褶皱等缺陷。图 11 为成形件侧外表面的 SEM 照片。成形件的底部与凹模不接触,没有出现划痕;而上部由于受凹模的作用出现了明显的划痕。这说明,虽然 U 型弯曲中凹模对箔板的作用力比较小,但是仍然会对成形件的表面质量产生影响。因此,需要提高模具表面质量和采取润滑措施,以获得表面质量高的箔板成形件。

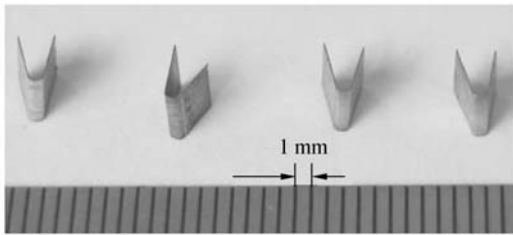


图 10 弯曲微成形件实物照片

Fig. 10 Photos of micro bending parts

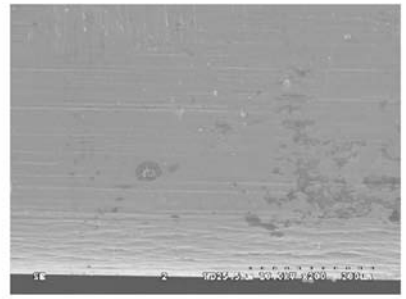


图 11 微成形件表面 SEM 照片

Fig. 11 SEM photo of micropart

4 结 论

本文对箔板进行了 U 型弯曲实验。从模具几何参数对弯曲圆周半径的影响角度分析得出:当槽宽尺寸或圆角半径较小时,最大冲头载荷显著增大,且冲头载荷上升和下降速率都明显增大。对比两种不同板厚的冲头载荷显示,箔板横截面积减小约 55%,但最大冲头载荷减小 24%,冲头载荷减小速率快于横截面积的减小速率,产生了明显的尺寸效应,认为这是由自由表面效应引起的。另外,圆角半径或板厚减小,使得应力-应变分布更加不均匀,导致回弹角度增大,成形件精度降低。U 型表面质量分析显示,成形件表面比较平整,没有出现褶皱等缺陷,但侧面出现了划痕现象,因此提出需要提高模具表面质量并采取润滑措施。

参考文献:

- [1] GEIGER M, KLEINER M, ECKSTEIN R. Micro-forming[J]. *Annals of the CIRP*, 2001, 50(2): 445-462.
- [2] GEIGER M, MERKLEIN M, TOLAZZI M. Metal forming ensures innovation and future in Europe [C]. *Proceeding of the 8th International Conference on Technology of Plasticity, Verona, Italy*, 2005.
- [3] VOLLERTSEN F, HU Z, SCHULZE NIEHOFF H, et al.. State of the art in micro forming and investigations into micro deep drawing [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 151:70-79.
- [4] VOLLERTSEN F, SCHULZE NIEHOFF H, HU Z. State of the art in micro forming [C]. *Proceeding of the 1st ICNFT, Harbin*, 2004:17-28.
- [5] SAOTOME Y, YASUDA K, KAGA H. Microdeep Drawability of very Thin Sheet Steels [J]. *Journal of Material Processing Technology*, 2001, 113:641-647.
- [6] ECKSTEIN R, GEIGER M, ENGEL U. Specific characteristics of micro sheet metal working [C]. *Proceeding of the 7th International Conference on Sheet Metal, Erlangen, German*, 1999, 27-28: 529-536.
- [7] RAULEA L V, GOIJERTS A M, GOVAERT L E, et al.. Size effects in the processing of thin met-

al sheet [J]. *Journal of Materials Processing Technology*. 2001,115:44-48.

- [8] ECKSTEIN R, ENGEL U. Behavior of the grain structure in micro sheet metal working [C]. *Proceeding of the 8th International Conference on Metal Forming*, 2000:453-459.
- [9] KOCANDA A, PREJS T. The effect of miniaturization on the final geometry of the bend product [C]// *Proceeding of the 8th International Confer-*

ence on Metal Forming, Krakow, Poland, 2000: 375-378.

- [10] STOLKEN, EVANS. A microbend test method for measuring the plasticity length scale [J]. *Acta Mater*. 1998,46(14):5109-5115.
- [11] GAU J T, PRINCIPE C, YU M. Springback behavior of brass in micro sheet forming [J]. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007, (191):7-10.

作者简介:



王春举(1978—),男,山东临沂人,讲师,硕士研究生导师,2001年、2003年、2007年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事微型构件微成形工艺及摩擦和润滑方面的研究。
E-mail: cjwang1978@hit.edu.cn



郭 斌(1963—),男,黑龙江拜泉人,教授、博士生导师,1983年、1985年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位,1991年由哈尔滨工业大学和日本千叶工业大学联合培养获博士学位,主要从事微型构件微成形工艺与装备、难变形材料高温变形行为以及基于电磁旋转效应的海水淡化等方向的研究。
E-mail: bguo@hit.edu.cn



单德彬(1967—),男,内蒙古通辽人,教授,博士生导师,1990年、1992年、1996年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士、博士学位,1999年10月至2000年10月于韩国庆北国立大学机械工程系完成博士后课题研究,主要从事微型构件精密微成形机理、精密锻造以及旋压成形等方面的研究。E-mail: shandeb@hit.edu.cn