

曲轴轮毂中间齿精压成形工艺研究

李贝贝¹, 严军², 刘雨生¹, 贺鹏¹, 薛克敏¹

(1. 合肥工业大学, 合肥 230009; 2. 南通福乐达汽车配件有限公司, 江苏 南通 226000)

摘要: **目的** 为了解决某型号曲轴轮毂中间齿形充填困难的问题。**方法** 对齿形精压过程进行了数值模拟, 分析了不同摩擦因数、减压孔尺寸对金属流动分布、等效应变及成形载荷的影响, 并进行了试验验证。**结果** 摩擦因数影响变形金属轴向和径向的流动分布, 减压孔尺寸影响分流面位置及金属的流动速度; 根据模拟结果, 生产出了合格的产品。**结论** 摩擦因数过小, 径向流动阻力减小, 不利于金属轴向流动充填齿形, 较大的摩擦因数有利于齿形充填, 但是摩擦因数过大会导致成形载荷过大; 随着减压孔直径增大, 金属的分流面外移, 对大直径处齿形充填不利。模拟结果对实际生产具有重要的指导意义。

关键词: 曲轴轮毂; 中间齿; 精压; 数值模拟; 试验验证

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2014.03.003

中图分类号: TG376

文献标识码: A

文章编号: 1674-6457(2014)03-0010-05

Precision Coining Process of Crankshaft Hub Tooth

LI Bei-bei¹, YAN Jun², LIU Yu-sheng¹, HE Peng¹, XUE Ke-min¹

(1. Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Nantong FLD Automobile Parts Company, Nantong 226000, China)

ABSTRACT: **Objective** In order to solve the filling difficulty of one type of crankshaft hub tooth. **Methods** The precision coining process was studied by numerical simulation, the effects of different friction coefficient and pressure relief hole size on metal flow distribution, equivalent strain and forming load were analyzed, and the results were validated by experiments. **Results** The friction coefficient affected the deformation of metal flow in axial and radial directions, and the pressure relief hole size affected shunt surface position and metal flow velocity. According to the simulation results, qualified products were produced. **Conclusion** The radial flow resistance was reduced because of too low friction coefficient, which was not conducive to the axial flow of filling tooth shape. Larger friction coefficient was advantageous for tooth filling, but excessive friction coefficient led to large forming load. As the relief hole diameter increased, the shunt of the metal surface was moving outwards, which was adverse to the tooth filling. The simulation results guides the production practice, and is of great significance.

KEY WORDS: crankshaft hub; precision coining; numerical simulation; experimental validation

以净成形或近净成形为目标的精密塑性成形技术, 是 21 世纪先进制造技术的发展趋势^[1-2]。作为

一种先进制造技术, 精密塑性成形技术在制造业特别是机械制造业的发展中, 发挥了重要的作用, 大量

优质、高效、少无切削的新型成形技术得到了发展^[3-4]。近年来,轮毂成形以板材为坯料,采用旋压工艺成形,大大提高了产品精度,金相组织致密、机械性能良好,而且重量轻、表面光洁,机械加工余量大大减少^[5-7]。

文中所研究的曲轴轮毂,在凸台中间有一部分齿形,齿深相对坯料厚度较小,齿形和精度具有严格要求。曲轴轮毂一般采用劈开式旋压^[6]工艺,将拉深的毛坯旋压成形得到,在劈旋之前,需先精压出曲轴轮毂中间的齿形。实际生产中,由于是局部变形,大量未变形金属影响变形金属的流动,导致齿形难以充满,而过大的压下量虽然可以压出齿形,但是会导致轮毂变形严重,形状尺寸无法满足要求,因此在保证轮毂形状尺寸的前提下,如何精压出轮毂花齿部分是十分关键的因素。现有研究多集中在研究曲轴轮毂的旋压成形工艺^[5,8-9],为了解决齿形充填困难的问题,并了解齿形充填过程中金属的流动状况,文中利用有限元仿真软件 DEFORM-3D 进行数值模拟,分析不同工艺参数对成形过程中金属流动的影响,为工艺方案的制定提供指导。

1 工艺方案的确定

1.1 零件分析

文中所研究对象为汽车用曲轴轮毂,其零件如图1所示。中间凸台部分的外径为64 mm,侧壁壁厚为4 mm,端面壁厚为4.5 mm。凸台部分有放射状齿形分布,齿形的外径为42 mm,中间孔的直径为19 mm。

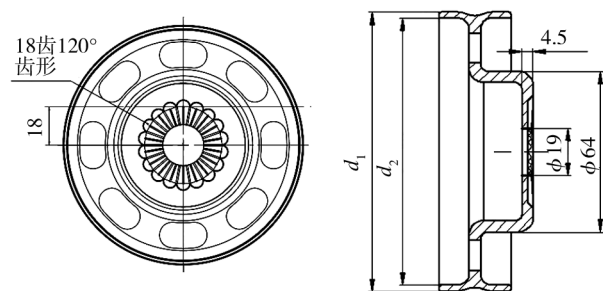


图1 零件

Fig. 1 Part diagram of wheel

1.2 轮毂中间齿形工艺方案确定

该曲轴轮毂以板材为毛坯,经拉深后采用劈开式旋压成形。由于齿深较浅,齿形要求高,在劈开式旋压之前精压出花齿部分。为了提高锻件精度、降低成形载荷,在毛坯中间预先压出减压孔,通过挤压减压孔产生的向心收缩力来实现分流^[3,10]。如图2所示,在成形过程中,上冲头下行,与凹模接触的坯料产生塑性变形,金属向凹模型腔及减压孔方向流动,完成齿形的成形。

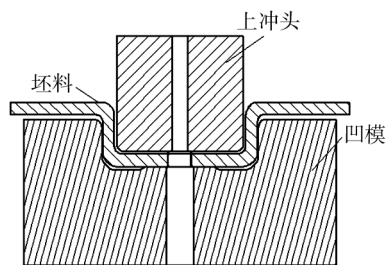


图2 成形过程示意

Fig. 2 Principle diagram of forming

2 工艺过程有限元模拟

运用 DEFORM-3D 有限元软件,采用刚塑性有限元法,对轮毂中间齿精压成行进行计算机仿真模拟。模拟过程的坯料是经拉深及冲孔后的毛坯,整个模型中除坯料设为塑性体外,其他部分均设为刚体。坯料材料选择 AISI1008,成形温度为 20 ℃,冲压速度为 20 mm/s,划分网格时,对主要变形区齿形部分进行了局部细化,细化比例因子为 0.2,网格总数为 180 000,减压孔直径取 0 ~ 17 mm,摩擦因数取 0.1 ~ 0.5,有限元模型如图3所示。

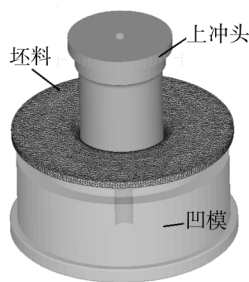


图3 模具与工件的有限元模型

Fig. 3 The finite element model of the die and workpiece

3 模拟结果分析

在成形过程中,选取不同的工艺参数会对成形结果产生影响。结合实际生产,选取摩擦因数和坯料减压孔直径作为变量,研究工艺参数对轮毂齿形成的影响规律。

3.1 摩擦因数对成形的影响

塑性成形过程中,当模具与变形体间的接触面上有相对运动或运动趋势时,接触面间必然产生摩擦^[3]。塑性成形中的摩擦会增大变形抗力、产生不均匀变形、降低模具寿命等,但是塑性成形中也常应用摩擦的有益作用帮助成形^[12]。通过数值模拟,分析不同摩擦因数条件的影响效果。

3.1.1 摩擦因数的选择依据

对于变形量较小的冷成形工序,采用库伦摩擦条件,即: $\tau = \mu \sigma_N$, τ 是摩擦切应力 (MPa), σ_N 是接触面上的正应力, μ 是摩擦因数。实际上摩擦切应力不能随 σ_N 的增大而无限增大,当 $\tau = \tau_{\max} = K$ 时,接触面将会产生塑性流动,此时 σ_N 的极限值为材料真实应力-应变曲线上的屈服应力 Y 。根据 Mises 屈服准则, $K = (1/2 \sim 1/\sqrt{3}) Y$, 故可确定摩擦因数 μ 的极限值为 $\mu = 0.5 \sim 0.577$ ^[3]。所以为了分析摩擦因数对成形过程的影响,选取 μ 为 0.1, 0.3, 0.5, 分别进行数值模拟。

3.1.2 摩擦因数对齿形充填及载荷的影响

图4为摩擦因数 μ 为 0.1, 0.3, 0.5 时的载荷-时间曲线,当 $\mu = 0.1$ 时,成形载荷最小,但充填时间最长,即上冲头压下量最大,导致底部材料减薄严重,这是因为摩擦因数小,金属易向径向流动,轴向流动受阻,因此需要大的压下量才能充满齿形; $\mu = 0.5$ 时,成形载荷最大,充填时间最短; $\mu = 0.3$ 时,充填时间、成形载荷均介于摩擦因数为 0.1 和 0.5 之间。不同摩擦因数下齿形填充及减薄情况见表1,深色部分表示成形后坯料与模具的贴合情况。摩擦因数 $\mu = 0.1$ 时,坯料底端减薄最严重,但在齿端的凹槽部分仍未完全贴合,摩擦因数 $\mu = 0.5$ 时,齿形轮廓与模具完全贴合,且坯料底端减薄最少。这是因为摩擦因数越小,金属向外流动的阻力越小,根据体积不变条件及最小阻力定律^[3,11-13],大量金属朝拐角及直壁处流动,成形齿形需要更长时间,底部减

薄严重,因此中间齿形部分难以充填。

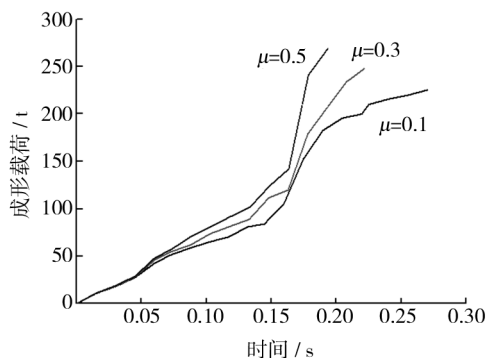


图4 不同摩擦因数下的成形载荷

Fig. 4 Forming load curves with different frictional coefficient

表1 不同摩擦因数下齿形的充填及减薄情况

Table 1 Tooth filling and thinning with different frictional coefficient

μ	齿形与模具贴合	减薄情况
$\mu = 0.1$		
$\mu = 0.3$		
$\mu = 0.5$		

3.1.3 摩擦因数对等效应变的影响

齿形充填结束时,不同摩擦因数条件下的等效应变分布如图5所示,为了方便观察,截取坯料的1/4剖面。从图5可以看出,等效应变主要集中在齿形部分,且在齿端凹槽及减压孔附近的应变较大。摩擦因数为 0.1 时,等效应变的分布区域最大,在齿形部分的整个坯料厚度上都存在明显应变分布,且齿底部分等效应变很大,这是由于摩擦因数很小时,金属更容易沿径向流动,不利于轴向流动成形齿形,齿形充填困难,应变增大;摩擦因数为 0.5 时,在减

压孔附近的等效应变较大,这是由于摩擦因数很大时,金属向外流动的阻力变大,内部金属更易朝减压孔方向流动;摩擦因数为0.3时,等效应变分布整体

上较均匀,这是由于摩擦因数适中时,金属朝内和朝外流动出现一定程度的平衡,使得整体上齿形处的等效应变分布较为均匀。

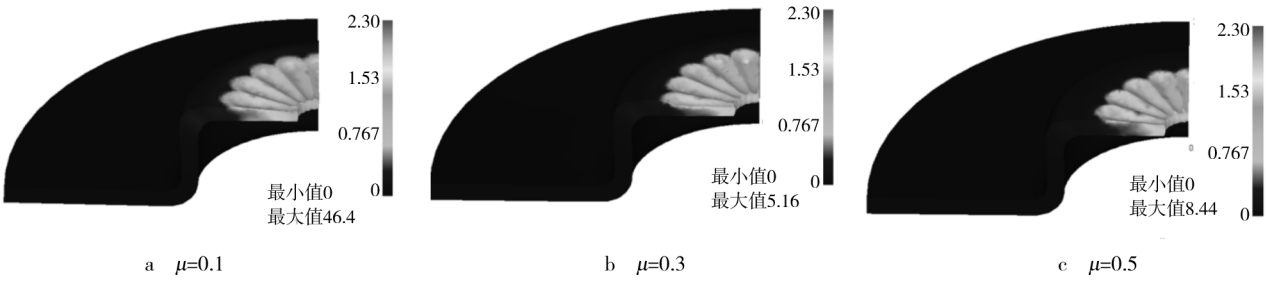


图5 不同摩擦因数下的等效应变分布

Fig.5 Effective strain distribution with different frictional coefficient

由于板料与模具之间的摩擦对成形有着双重作用,一方面较大的摩擦力会增加成形载荷,另一方面,正是因为摩擦的作用,底部材料才能顺利流向型腔^[12],因此实际中要合理控制坯料与模具间的摩擦情况。

3.2 减压孔尺寸对金属流动的影响

选取减压孔直径为7,13,17 mm,以及无减压孔的情况,分别对坯料的精压过程进行讨论,分析减压孔对齿形成形的影响。各情况下的流动速度分布如图6所示,在成形过程中,金属流动出现分流面,这

是由于摩擦力的作用,改变了金属质点的流动方向,当接触面上的摩擦很小或无摩擦时,根据体积不变条件,金属质点将作辐射状向外流动。当接触面上摩擦增大,则向外流动的阻力增大,靠近内部的质点向外流动的阻力大于向内流动的阻力,此处金属向内流动,从而出现一个分流面。由图6可以看出,分流面处金属流动缓慢,不同减压孔下的金属流动分布也存在差异,减压孔越大,大直径处齿形部分的金属流动速度越小。

图7为分流半径、成形载荷与减压孔直径的关系,分流半径随着减压孔直径的增大而增大,成形载

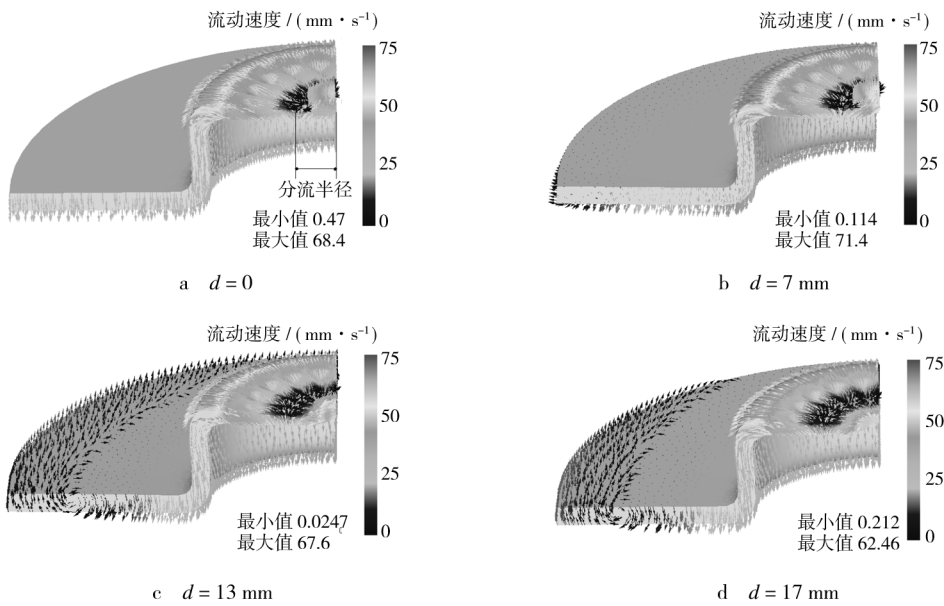


图6 不同减压孔直径的金属的流动分布

Fig.6 Material flow velocity with different hole size

荷随减压孔直径的增大而降低。由最小阻力定律可知,中间的变形金属更易朝阻力小的减压孔方向流动,为了保持整体的完整性和连续性,这部分金属会对大直径处金属的流动产生影响,阻碍其流动,导致分流面随减压孔增大而向外偏移^[10,14],分流半径越大,金属流动缓慢的部分越靠近大直径处的齿形部分,从而会导致这部分成形更为困难。

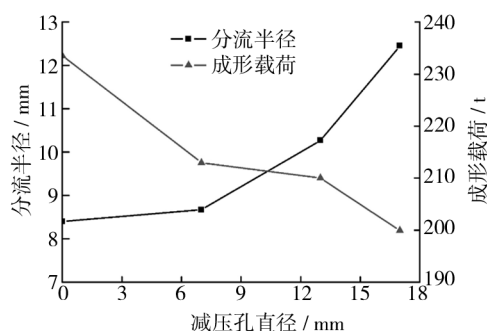


图7 不同减压孔下金属的分流半径及成形载荷

Fig.7 Split-flow radius and forming load with different hole size

大尺寸的减压孔虽然有利于降低成形载荷,但分流半径的增大阻碍了大直径齿形处的金属流动,因此减压孔尺寸的选择十分关键,在成形力允许范围内,减压孔尺寸要尽可能小。

4 工艺验证

保持其他工艺参数不变,采用 $\phi 10$ mm 的减压孔坯料,在不加润滑条件下进行齿形成形的物理试验,齿形成形效果良好,如图8所示。



图8 试验结果

Fig.8 Results of the experiment

5 结语

针对生产中遇到的问题,采用有限元软件 DE-

FORM-3D 进行数值模拟,分析了摩擦因数及坯料减压孔尺寸对齿形充填的影响,经过分析得出以下结论。

1) 摩擦因数过小,径向流动阻力减小,不利于金属轴向流动充填齿形,较大的摩擦因数有利于齿形充填,但是摩擦因数过大会导致成形载荷过大,应变分布更加不均。

2) 随着减压孔直径增大,金属的分流面外移,对大直径处齿形充填不利。

3) 以模拟结果为指导,进行了物理试验,挤压得到了完整齿形,模拟结果得到了验证。数值模拟分析为制定合理的工艺提供了参考,对指导生产实践,降低生产成本,具有重要意义。

参考文献:

- [1] 吕炎. 精密塑性体积成形技术[M]. 北京:国防工业出版社,2003.
LYU Yan. Technology of Precision Plastic Forming[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2003.
- [2] 王忠雷,赵国群. 精密锻造技术的研究现状及发展趋势[J]. 精密成形工程,2009,1(1):32—38.
WANG Zhong-lei, ZHAO Guo-qun. Recent Condition and Developing Trends of Precise Forging Technology [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2009, 1(1):32—38.
- [3] 刘全坤,祖方遒,李萌盛,等. 材料成形基本原理[M]. 北京:机械工业出版社,2010.
LIU Quan-kun, ZU Fang-qiu, LI Meng-sheng, et al. Principles of Material Forming [M]. Beijing: China Machine Press, 2010.
- [4] KUDO H. Towards Net-shape Forming [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1990(22):307—342.
- [5] 滕焕波,冯再新,张治民. 轻合金汽车轮毂的生产方法[J]. 轻合金加工技术,2006,34(10):16—19.
TENG Huan-bo, FENG Zai-xin, ZHANG Zhi-min. Methods of Light Alloy Wheels Production [J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2006, 34(10):16—19.
- [6] 刘金年. 汽车发动机 V 型皮带轮的旋压工艺[J]. 科技与经济,2006,36(4):56—58.
LIU Jin-nian. The Spinning Technology of the Automobile Engine V Belt Pulley [J]. Technology and Economy, 2006, 36(4):56—58.

(下转第 19 页)

- GAO Jian, WEI Xian-bo, WEI Xing-min, et al. The Car Left and Right Rear Wheel Cover Design Formability Analysis and Process the Outer Plate[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2013(8): 64—67.
- [12] 王玉国, 卫原平, 沈启. 覆盖件拉深模工艺补充部分和压料面设计[J]. 上海交通大学学报, 1999, 33(2): 184—187.
- WANG Yu-guo, WEI Yuan-ping, SHEN Qi, et al. Panel Drawing Die Addendum and Binder Surface Design[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1999, 33(2): 184—187.
- [13] 韩宗斌. 汽车表面覆盖件常见冲压缺陷及处理措施[J]. 装备制造技术, 2012(8): 56—60.
- HAN Zong-bin. A Common Stamping Defects and Treatment Measures of Automobile Covering[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2012(8): 56—60.
- [14] 江东海. 汽车覆盖件拉伸站中起皱、拉裂、回弹的分析[J]. 民营科技, 2013(3): 24—29.
- JIANG Dong-hai. Analysis of Tensile Fracture, Wrinkling, Station of Springback of Automobile Covering[J]. Private Technology, 2013(3): 24—29.
- [15] 徐迎强, 薛克敏, 曹婷婷, 等. 汽车门槛内板零件冲压数值模拟及参数优化[J]. 精密成形工程, 2010, 2(3): 36—40.
- XU Ying-qiang, XUE Ke-min, CAO Ting-ting, et al. Auto Threshold in Numerical Simulation and Parameter Optimization of Sheet Metal Parts[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2010, 2(3): 36—40.
- [16] OUSA L C, CASTRO C F, ANTONIO C A C. Optimal Design of V and U Bending Processes Using Genetic Algorithms[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(8): 45—49.
- [17] CHUNG J S, HWANG S M. Application of a Genetic Algorithm to Process Optimal Design in Non-isothermal Metal Forming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 80/81: 136—143.
- [18] LIU Yu-qi. Quantitative for Springback of Unloading and Trimming in Sheet Metal Stamping Forming[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013(16): 116—124.
- [19] ZHANG Yu-liang, LI Yi. Numerical Simulation and Analysis of Solid-liquid Two-phase Flow in Centrifugal Pump[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013(1): 53—57.
- [20] YAO Rui, ZHU Wen-bai, HUANG Peng. Accuracy Analysis of Stewart Platform Based on Interval Analysis Method[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013(3): 29—34.

(上接第14页)

- [7] 杨明辉, 梁佰祥, 夏琴香, 等. 旋压技术分类及应用[J]. 机电工程技术, 2004, 33(11): 14—16.
- YANG Ming-hui, LIANG Bai-xiang, XIA Qin-xiang, et al. Classification and Application of Spinning Technology[J]. Mechanical and Electrical Engineering Technology, 2004, 33(11): 14—16.
- [8] MUSIC O, ALLWOOD J M, KAWAI K. A Review of the Mechanics of Metal Spinning[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(1): 3—23.
- [9] KATHRYN J, JULIAN A. The Mechanics of Incremental Sheet Forming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(3): 1158—1174.
- [10] 李峰, 初冠南, 刘晓晶. 铝合金圆环压缩过程中的分流行为[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(11): 1923—1927.
- LI Feng, CHU Guan-nan, LIU Xiao-jing. The Shunt Behavior in the Process of Aluminum Alloy Ring Compression[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2009, 19(11): 1923—1927.
- [11] 赵振铎, 邵明志, 张召铎, 等. 金属塑性成形中的摩擦与润滑[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- ZHAO ZHEN-duo, SHAO Ming-zhi, ZHANG Zhao-duo, et al. The Friction and Lubrication of Metal Plastic Forming[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [12] 许光明, 崔建忠. 金属成型过程中摩擦成因的分析[J]. 塑性工程学报, 2000, 7(4): 29—32.
- XU Guang-ming, CUI Jian-zhong. The Analysis of the Friction Causes in the Process of Metal Forming[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2000, 7(4): 29—32.
- [13] LEE B H, KEUM Y T, WAGONER R H. Modeling of the Friction Caused by Lubrication and Surface Roughness in Sheet Metal Forming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 130: 60—63.
- [14] MORI K, ABE Y, OSAKADA K, et al. Plate Forging of Tailored Blanks Having Local Thickening for Deep Drawing of Square Cups[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211: 1569—1574.