

# 小尺寸梯形凸台曲轴盖板成形工艺研究

徐杰<sup>1</sup>, 王久林<sup>1</sup>, 周敏<sup>2</sup>, 李萍<sup>1</sup>

(1. 合肥工业大学 材料科学与工程学院, 合肥 230009;

2. 南通福乐达汽车配件有限公司, 江苏 南通 226300)

**摘要:** **目的** 研究汽车曲轴盖板复合加工工艺的可行性。**方法** 根据零件特点,采用多道次拉深和整形相结合的加工工艺成形零件,并利用有限元技术,对成形过程进行了数值模拟分析,然后结合物理实验对工艺可行性进行了验证。**结果** 试制出的零件表面质量较好,法兰内缘处梯形凸台尺寸精度达到了要求,和有限元仿真模拟结果相吻合。**结论** 采用多道次拉深和整形复合工艺所获得的汽车曲轴盖板,完全满足零件实际使用要求,成形工艺有效、可行。

**关键词:** 曲轴盖板; 拉深; 整形; 梯形凸台

**DOI:** 10.3969/j.issn.1674-6457.2015.04.004

**中图分类号:** TG316

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1674-6457(2015)04-0016-06

## Process of Small Size and Trapezoid Convex Platform of Crankshaft Cover

XU Jie<sup>1</sup>, WANG Jiu-lin<sup>1</sup>, ZHOU Min<sup>2</sup>, LI Ping<sup>1</sup>

(1. School of Materials Science & Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Nantong Fuleda Vehicle Accessory Component Co., Ltd., Nantong 226300 China)

**ABSTRACT:** The aim of this study was to investigate the feasibility study of the cover of automobile crankshaft machining process. According to the characteristics of the part, parts were assembled by machining process combined with multi pass drawing with shaping, and the numerical simulation of forming process was analyzed by the finite element technology. Finally, the feasibility of process was verified using physical experiments. The surface quality of the trial is good, the size precision of the trapezoidal bulge at the inner edge of the flange meet the requirements, which was consistent with the finite element simulation results. The automobile crankshaft cover board processed by multi-pass drawing and plastic composite technology can fully meet the requirements of the actual use, and the forming process is effective and feasible.

**KEY WORDS:** crankshaft cover; drawing; shaping; trapezoid convex platform

近年来随着汽车产业的迅猛发展,曲轴盖板作为整个汽车产业链中不可或缺的零部件之一,其生产工艺的改进和革新越来越受到业内人士的关注。零件法兰内缘处的梯形凸台尺寸较小,利用传统制造工艺成形困难。目前国内外针对曲轴盖板的制造工艺主要是采取两个步骤:首先采用多道次拉深成形出

曲轴盖板主要轮廓,再利用机械加工的方法加工出法兰内缘圆角处梯形凸台<sup>[1-2]</sup>。现有加工方法会耗费大量的能源和材料,资源利用率较低,零件综合性能差。在竞争越来越激烈的汽车产业中,已经不能适应汽车工业对减轻重量、降低能源消耗等方面的要求<sup>[3-5]</sup>。

收稿日期: 2015-06-12

作者简介: 徐杰(1988—),男,安徽肥西人,硕士研究生,主要研究方向为挤压成形与数值仿真。

通讯作者: 李萍(1973—),女,哈尔滨人,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为精密成形和数值模拟。

在塑性成形技术领域,各种成形技术合理的交叉复合使用正被越来越多的业内人士所认可。其独特的零件生产方法符合节约材料和能源,减少加工工序,提高劳动生产效率和降低成本的实际生产要求<sup>[6-7]</sup>。

如图1所示曲轴盖板为一回转体,加工特点如下:(1)直筒直径为 $\phi 57.3$  mm,表面积较大;(2)直壁厚度为2.5 mm,多次拉深后直筒处壁厚难以保证;(3)法兰内缘处的梯形凸台,垂直高度分别为2.0 mm和2.3 mm,厚度为2.5 mm,水平角度为 $10.5^\circ$ ,尺寸要求较高,成形困难,是整个零件成形的关键区域。

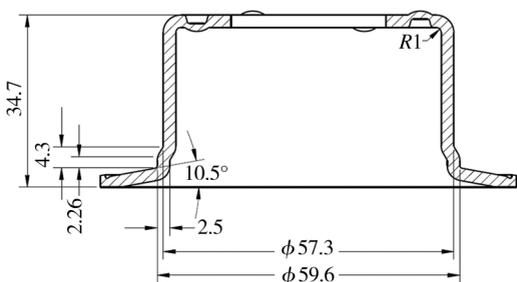


图1 曲轴盖板零件模型

Fig. 1 Crankshaft cover part model

## 1 工艺原理和有限元模型的确定

### 1.1 新工艺的确定

对于该零件,常规加工方法为多道次拉深,以达到零件的尺寸要求(包括筒形壁厚、筒形高和筒形底部最小圆角半径),但是法兰内缘处梯形凸台由于特殊的尺寸要求难以通过多道次拉深工艺实现。国内外普遍的加工方法是采用较厚坯料多道次拉深,增厚法兰内缘处壁厚,再机加工出法兰内缘处梯形小凸台<sup>[8-10]</sup>,从而完成整个零件的制造。这样的做法虽然能够得到符合要求的零件,但材料利用率低,加工成本高,加工效率低。通过一次整形达到所需梯形凸台尺寸亦难度较大,主要原因有:(1)通过多次拉深之后材料在法兰内缘处增厚不明显,导致整形所需充填金属体积不足,凸台难以成形;(2)由于法兰内缘处梯形凸台尺寸很小,采用锻压工艺实现该处梯形台阶的一次成形,金属极易产生折叠,而且该处变形类似于冲裁,模具极易嵌入金属内,破坏零件表层;(3)整形时凸模的单位载荷较大,模具容易损坏。

根据零件特殊尺寸要求,在常规工艺分析的基础上,提出新的加工工艺方法<sup>[11-13]</sup>,如图2所示,其成

形工序依次为:多道次拉深→压边→梯形凸台处预整形→梯形凸台处终整形。多道次拉深的目的是成形零件筒壁部分,增厚法兰内缘处的坯料,为之后的预整形和终整形提供足够体积的金属。压边的作用是成形出一定法兰内缘形状,减少预整形金属的变形量,保护模具。预整形采用较大圆角的挤压环将金属聚集在圆角处,避免金属过多的横向流动。终整形采用较小的圆角,成形出零件要求尺寸。

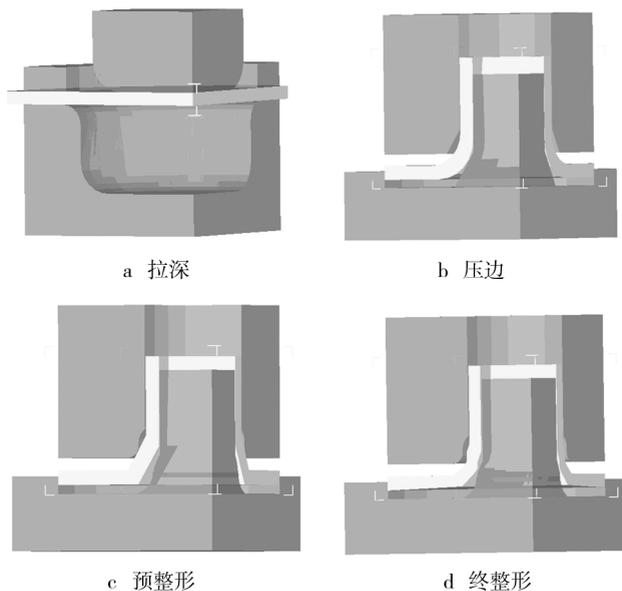


图2 工艺流程

Fig. 2 Flow diagram of the process

### 1.2 有限元模型的建立

曲轴盖板零件的几何形状、边界条件和载荷都相对中心轴对称,为提高有限元模拟计算效率和精度,建立1/4几何模型进行有限元模拟,采用四面体单元的网格划分方式<sup>[9,14]</sup>;多道次拉深过程凸模移动速度设为30 mm/s,压边、预整形和终整形阶段凸模移动速度设置为1 mm/s,整个成形阶段坯料和模具之间的摩擦因数设为0.12。根据体积不变原则,坯料尺寸选择厚度为2.5 mm,直径为150 mm。材料选择1.0338冷轧深拉伸板,材料的基本力学性能如下:屈服强度为231 MPa,密度为7.851 g/cm<sup>3</sup>,弹性模量为220 GPa,泊松比为0.283。

## 2 模拟仿真结果分析

### 2.1 多道次拉深增厚阶段分析

$h_n$  和  $t_n$  为拉深件的相对高度和相对厚度,二者

分别表示零件实际厚度、高度和零件直径之间的相对数值关系。二者是确定拉深次数的2个主要量化指标。根据式(1)和(2)计算可得,  $h_n$  和  $t_n$  分别为0.7和1.6。由表1可知整个拉深过程分为3道次完成, 考虑到直筒底部圆角半径  $R$  仅为5 mm, 在拉深增厚

阶段增加一次整形过程, 以更好成形直筒底部圆角, 圆角半径大小从一道次的17.5 mm, 减小到四道次的5 mm。拉深后材料直筒高为34.9 mm, 壁厚由坯料时的2.6 mm减薄至2.5 mm, 法兰内缘处厚度则增厚至2.92 mm, 达到之后整形所要求的壁厚要求。

表1 筒形件拉深相对厚度  $t/D$  与拉深次数的关系

Table 1 Relationship of relative thickness and number for cylindrical deep drawing

拉深次数	毛坯相对高度 $(L+l)/D$ (%)					
	0.08~0.15	0.15~0.3	0.3~0.6	0.6~1.0	1.0~1.5	1.5~2.5
1	0.38~0.46	0.45~0.52	0.5~0.62	0.57~0.71	0.65~0.84	0.77~0.94
2	0.7~0.9	0.83~0.96	0.94~1.13	1.1~1.36	1.32~1.60	1.54~1.88
3	1.1~1.3	1.3~1.6	1.5~1.9	1.8~2.3	2.2~2.8	2.7~3.5
4	1.5~2.0	2.0~2.4	2.4~2.9	2.9~3.6	3.5~4.3	4.3~5.6
5	2.0~2.7	2.7~3.3	3.3~4.1	4.1~5.5	5.1~6.6	6.6~8.9

$$h_n = \frac{H+l}{D} \quad (1)$$

$$t_n = \frac{t}{D} \times 100 \quad (2)$$

式中:  $H$  为零件高度, mm;  $l$  为有凸缘拉深件修边余量, mm;  $D$  为零件直径, mm;  $t$  为零件厚度, mm。

## 2.2 整形工艺阶段分析

通过对拉深后零件法兰内缘处梯形凸台的挤压成形实现零件整形过程。该过程采用整体凸模, 并且预整形和终整形采用同一凹模, 主要目的是保证零件的表面质量、外围尺寸和降低零件加工成本。

图3为不同斜面厚度零件整形后截面面积形状的变化。I区域表示坯料体积减少部分, II区域表示坯料体积增加部分。其中图3a斜面厚度为2.5 mm, 图3b斜面厚度为2.9 mm。通过计算, 图3a中II区域面积大于I区域面积, 说明当法兰内缘没有增厚, 厚度仅为2.5 mm时, 金属减少的区域面积少于增加面积, 零件成形过程金属体积补充不足, II区域可能会出现充不满现象, 产生缺陷。图3b为I区域面积和II面积区域相等的理想情况, 表明零件成形过程中, 有足够金属充填。计算得图3b法兰内缘斜面厚度约为2.9 mm。多道次拉和压边阶段结束后法兰内缘斜面处增厚到2.92 mm, 符合金属充填要求。

整形工艺模具设置如图4所示, 预整形阶段采用具有较大圆角的挤压环将金属聚集在圆角处, 避免金属过多的横向流动。然后再采用较小圆角的挤压环终整形, 有效避免了金属发生折叠现象。

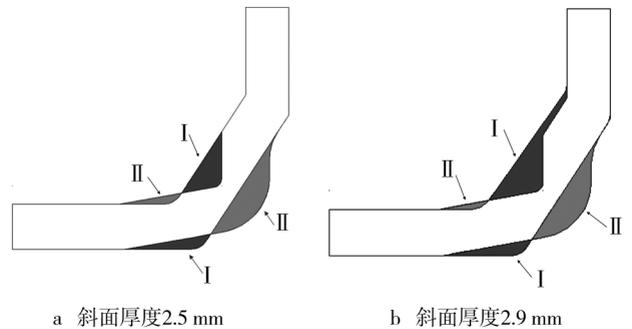


图3 不同斜面厚度零件整形前后截面面积的变化

Fig. 3 Sectional area of the ramp before and after different thickness plastic parts

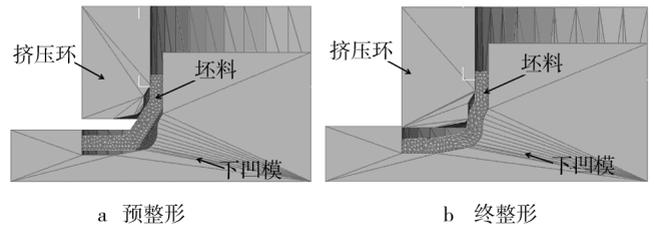


图4 整形工艺的模具设置

Fig. 4 Shaping process die set

图5为预整形过程材料的等效应变云图。从图5可以看出, 材料首先发生变化的位置是挤压圆环圆角处, 随着挤压过程的进行变形主要集中在材料法兰内缘圆角处。预整形结束后材料成形效果良好, 材料和模具完全接触, 没有发生金属折叠和未充满现象, 达到了预整形目的。

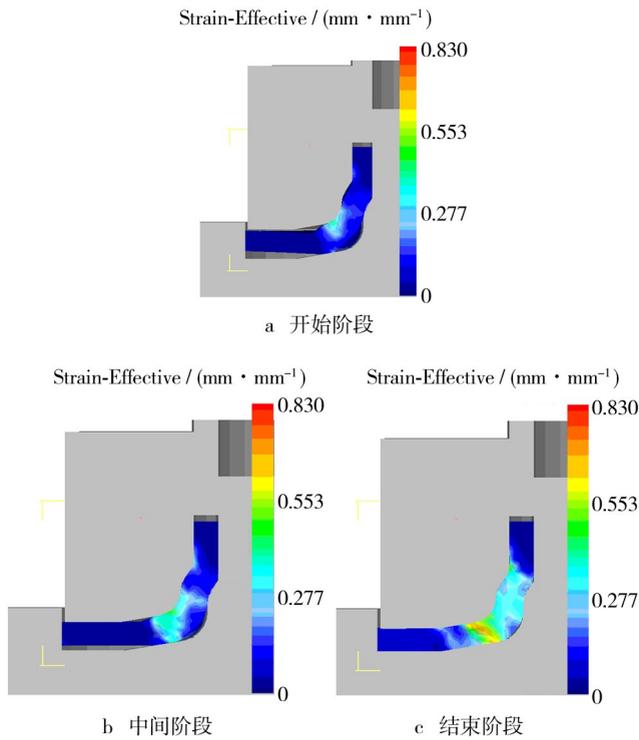


图5 预整形过程的等效应变云图

Fig.5 Pre-shaping process equivalent strain

图6为终整形阶段材料的等效应变云图。可以看出和预整形阶段相比,材料变形程度降低,变形区域

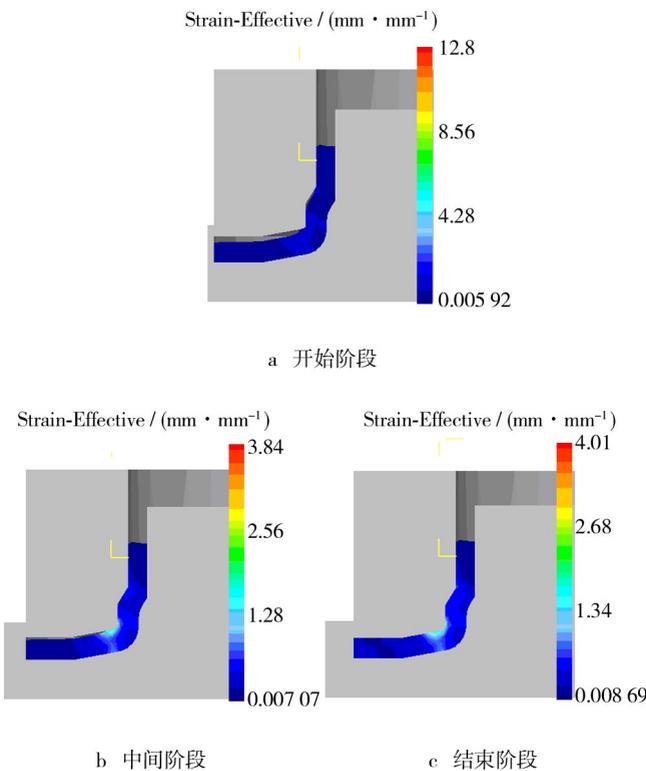


图6 终整形过程的等效应变云图

Fig.6 Final shaping procedure is the equivalent strain

减小,主要发生在挤压环圆角处。这是因为在预整形阶段,较大的挤压环半径,较小摩擦阻力,保证了金属能够在横向上充分流动,完成整个整形阶段大部分变形。

### 2.3 挤压环圆角半径对零件成形效果的影响

法兰内缘处梯形凸台尺寸较小,金属不易流动,成形困难。挤压环圆角半径通过影响成形圆角处摩擦阻力,对成形过程中金属流动产生显著的影响。根据经验选取3组圆角半径进行预整形阶段模拟,根据模拟成形效果和实际实验效果确定最优参数。3组圆角半径分别为1.5,2.0,2.5 mm。

图7分别为采用3组不同挤压环圆角半径预整形后,得到的模具和材料的接触关系。当 $R=2.5$  mm时,由于圆角半径过大,圆角半径处的摩擦较小,造成金属在圆角处横向流动过多,在凹模圆角出现金属未充满现象,模拟结果则表现为材料和模具未接触。当圆角半径为2.0 mm和2.5 mm时金属与模具完全接触,没有发生金属充填不足现象。而圆角半径 $R=1.5$  mm时,由于圆角半径过小,挤压环圆角处的摩擦过大造成金属在预整形过程中横向流动过少,实际生产中在凹模圆角处产生金属过度堆积进而产生金属折叠现象,如图8所示。过大圆角和过小圆角都会使最终成形零件产生一定的缺陷,不符合实际生产要求,综合考虑实际生产中选择挤压环半径 $R=2.0$  mm。

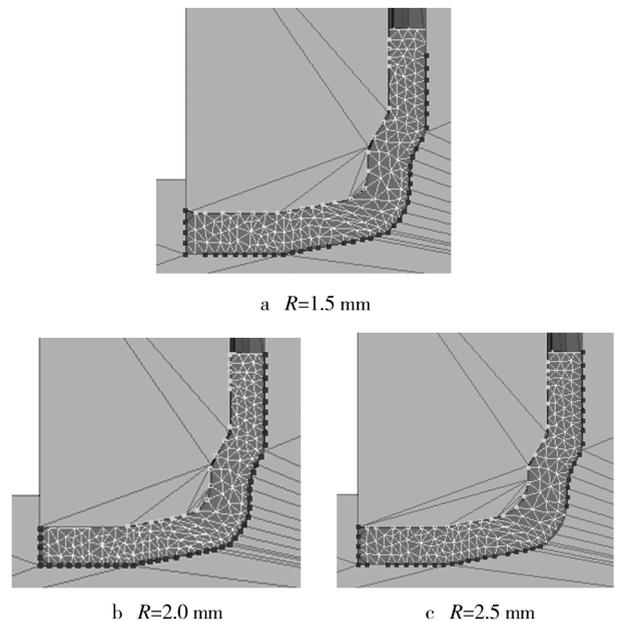


图7 不同圆角半径成形后材料和模具的接触关系

Fig.7 Materials and mold after forming different contact relationships radius

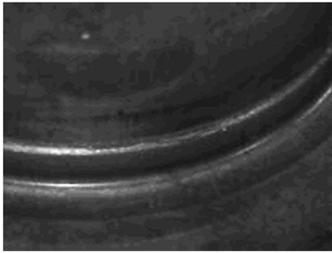


图8 产生折叠缺陷的零件

Fig. 8 Folding produce defective parts

## 2.4 成形载荷分析

图9为整形阶段材料成形载荷。预整形和终整形阶段载荷曲线均呈现渐升趋势,主要是因为随着成形的不断进行,坯料的挤压环接触面积逐渐增加,导致成形载荷不断增加。预整形阶段最大成形载荷约为200 t,终整形阶段最大成形载荷约为300 t,符合实际生产设备要求。

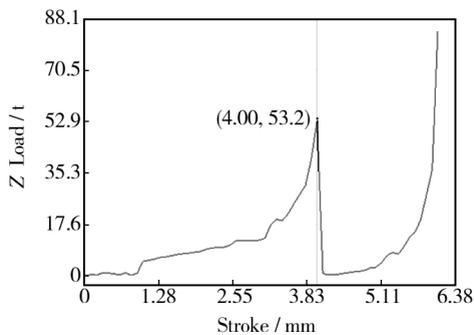
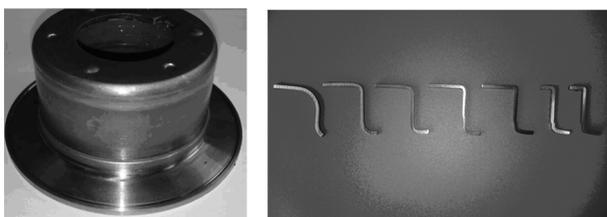


图9 整形过程载荷云图

Fig. 9 Shaping process loads

## 3 零件试制

根据模拟所得实验参数,生产企业利用 JL21-80A 高速冲床和 YQ32-500T 三梁四柱压力机对零件进行试制。试制过程采用高分子润滑剂,成形零件表面质量较好,较难成形的法兰内缘梯形凸台成形尺寸完全符合要求,没有产生金属折叠或充填不满等缺陷,满足了零件尺寸、形状和力学性能要求,获得了良好的汽车曲轴盖板,见图10。



a 试制零件

b 零件各道次剖面

图10 曲轴盖板的试制生产

Fig. 10 Crankshaft covers trial production

## 4 结论

1) 根据零件特点,采用了常规拉深、压边和整形相结合的新加工工艺。

2) 结合零件特点确定了拉深道次。采用四道次拉深成形,零件高度、直筒壁厚和直筒底部圆角均符合要求。法兰内缘处增厚成功,壁厚达到2.92 mm,符合预整形对壁厚要求。

3) 整形得到了满足要求的法兰内缘带有较小尺寸梯形凸台的较高质量汽车曲轴盖板。

4) 根据制定的工艺和数值模拟结果,进行了零件试制,验证了新工艺的可行性。

## 参考文献

- [1] 郭一鸣. 发动机曲轴多级混联式扭振减振器的设计与分析[J]. 湖北汽车工业学院学报, 2012, 26(4): 1—5.  
GUO Yi-ming. Research on Multi-hybrid Torsional Vibration Damper of Engine Crankshaft[J]. Journal of Hubei Automotive Industries Institute, 2012, 26(4): 1—5.
- [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, 83.
- [3] 杨煜. 国内外冷挤压技术发展综述[J]. 锻压机械, 2001, 12(1): 3—6.  
YANG Yu. Summary of Cold Extrusion Technology at Home and Abroad[J]. Forging Machinery, 2001, 12(1): 3—6.
- [4] 洪慎章. 冷挤压零件的工艺设计[J]. 模具技术, 2004(3): 44—48.  
HONG Shen-zhang. Cold Extrusion Process Design of Parts[J]. Die and Mould Technology, 2004(3): 44—48.
- [5] 李贝贝, 严军, 刘雨生, 等. 曲轴轮毂中间齿精压成形工艺研究[J]. 精密成形工程, 2014, 6(3): 10—14.  
LI Bei-bei, YAN Jun, LIU Yu-sheng, et al. Precision Coining Process of Crankshaft Hub Tooth[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2014, 6(3): 10—14.
- [6] 钟建华, 袁志燕, 刘艳霞, 等. 挤压工艺参数对挤压过程影响规律的仿真模拟研究[J]. 有色金属学报, 2013(3): 56—62.  
ZHONG Jian-hua, YUAN Zhi-yan, LIU Yan-xia, et al. Research on Effects of Extrusion Process Parameters on the Extrusion Process by Numerical Simulation[J]. Nonferrous

- Metals Science and Engineering, 2013(3):56—62.
- [7] 晏爽,李普,潘秀秀,等.精密锻造成形技术的应用及其发展[J].热加工工艺,2013,42(15):9—12.  
YAN Shuang, LI Pu, PAN Xiu-xiu et al. Precision Forging Application and Development of Technology[J]. Hot Working Technology, 2013, 42(15):9—12.
- [8] 张志伟.皮带轮锻件热态冲连皮模具优化设计[J].模具技术,2014(6):8—11.  
ZHANG Zhi-wei. Design Optimization of the Hot Wad-punching Die For Belt Pulley[J]. Die and Mould Technology, 2014(6):8—11.
- [9] 尹德良,张凯锋,吴德忠. AZ31 镁合金非等温拉深性能的研究[J].材料科学与工艺,2004(12):88—90.  
YIN De-liang, ZHANG Kai-feng, WU De-zhong. Nonisothermal Deep Drivability of AZ31 Magnesium Alloy[J]. Materials Science & Technology, 2004(12):88—90.
- [10] 孙岩志,郝滨海,徐桂华.基于 DEFORM 的十字轴预锻成形分析及模具改进[J].锻压装备与制造技术,2008(3):38—39.  
SUN Yan-zhi, HAO Bin-hai, XU Gui-hua. The Analysis of Pre-forging Simulation of Cross Shaft Based on DEFORM and the Improvement of Die[J]. Metal Forming Equipment and Manufacturing Technology, 2008(3):38—39.
- [11] 王桂龙,赵国群,李辉平,等.薄壁注塑制品翘曲影响因素分析与工艺优化[J].中国机械工程,2009,20(4):488—492.  
WANG Gui-long, ZHAO Guo-qun, LI Hui-ping, et al. Thin-walled Injection Warped Factors Analysis and Optimization[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(4):488—492.
- [12] 王尧.铝合金型材分流挤压过程的数值模拟研究[D].广州:华南理工大学,2010.  
WANG Yao. Numerical Simulation of Extrusion Process of Aluminum Profiles Shunt[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.
- [13] 刘全坤.材料成形基本原理[M].北京:机械工业出版社,2010.  
LIU Quan-kun. Material Forming the Basic Principles[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2010.
- [14] YOSHIMURA H, TANKA K. Precision of Aluminum and Steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 98:196—204.

(上接第10页)

- [9] 宋鹏,王小松,韩聪,等.铝合金矩形截面内高压成形圆角充填行为研究[J].机械工程学报,2010,46(12):59—64.  
SONG Peng, WANG Xiao-song, HAN Cong, et al. Filling Behavior of Transition Corner in Hydroforming of Aluminum Alloy Rectangular Section Tube[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(12):59—64.
- [10] 苑世剑,刘钢,韩聪.通过预成形降低内高压成形压力的机理分析[J].航空材料学报,2006,26(4):46—50.  
YUAN Shi-jian, LIU Gang, HAN Cong. Mechanism Analysis in Reducing the Hydroforming Pressure by Pre-forming[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2006, 26(4):46—50.
- [11] 郎利辉,苑世剑,王仲仁,等.防锈铝变径管内高压成形过程数值模拟[J].中国有色金属学报,2001,11(2):211—216.  
LANG Li-hui, YUAN Shi-jian, WANG Zhong-ren, et al. Numerical Simulation of Antirust Aluminium Tube Hydroforming with Variable Diameter[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(2):211—216.
- [12] 鄂大辛,宁汝新.管材无芯弯曲的最小相对弯曲半径[J].机械工程学报,2007,43(5):219—222.  
E Da-xin, NING Ru-xin. The Minimum Relative Bending Radius of Coreless Tube Bending[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(5):219—222.
- [13] 许杰,杨合,李恒,等.基于显著性的薄壁铝合金管小弯曲半径数控弯曲工艺参数优化[J].中国有色金属学报,2012,22(1):147—156.  
XU Jie, YANG He, LI Heng, et al. Significance-based Optimization of Processing Parameters for Thin-walled Aluminum Alloy Tube NC Bending with Small Bending Radius[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(1):147—156.
- [14] 李恒,杨合,詹梅,等.薄壁管数控绕弯塑性成形中摩擦作用机理的模拟研究[C].西安:西北工业大学,2005.  
LI Heng, YANG He, ZHAN Mei, et al. Simulation Research on the Friction Mechanism during Thin-walled Tube NC Bending Process[C]. Xi'an: Northwest Polytechnical University, 2005.
- [15] 杨兵.管件液压成形的加载路径理论与试验研究[D].上海:上海交通大学,2006.  
YANG Bing. Study on the Loading Paths of the Tube Hydroforming Process[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2006.
- [16] 苑世剑.现代液压成形技术[M].北京:国防工业出版社,2009.  
YUAN Shi-jian. Modern Hydroforming Technology[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2009.