

工艺优化设计

空心双拐曲轴加载路径优化与成形规律

郭群¹, 陶杰¹, 靳凯¹, 李经明², 赵长坚², 万柏方³, 郭训忠¹

(1.南京航空航天大学 先进材料及成形技术研究所, 南京 211100; 2.佛山市南海兴迪机械制造有限公司, 广东 佛山 528200; 3.江苏图南合金股份有限公司, 江苏 镇江 212352)

摘要: **目的** 研究加载路径对空心双拐曲轴成形效果的影响。**方法** 基于有限元分析软件, 对 304 不锈钢双拐曲轴内高压胀形工艺进行有限元仿真, 分析了加载路径对双拐曲轴胀形高度与壁厚的影响, 并对开裂、起皱等缺陷产生的原因进行分析, 最后, 根据数值模拟结果, 对双拐曲轴进行实际成形试验, 并将数值模拟结果与试验结果进行对比。**结果** 成形压力小于 20 MPa 时, 管坯产生起皱; 成形压力大于 60 MPa 时, 管坯产生开裂。通过试验获得了壁厚分布均匀的双拐曲轴零件, 并且数值模拟结果和试验结果基本一致。**结论** 轴向进给大、内压不足容易导致过渡圆角处起皱; 轴向进给小、内压过大容易导致拐部顶端开裂。只有设置合理的加载路径才能成形出壁厚均匀性好, 胀形高度达到要求的双拐曲轴。

关键词: 双拐曲轴; 内高压成形; 有限元模拟; 加载路径

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2016.06.007

中图分类号: TG394 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457 (2016)06-0038-06

Loading Paths Optimization and Forming Rules of Hollow Double-throw Crankshaft

GUO Qun¹, TAO Jie¹, JIN Kai¹, LI Jing-ming², ZHAO Zhang-jian², WAN Bo-fang³, GUO Xun-zhong¹

(1.Institute of Advanced Materials and Forming Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211100, China; 2.Foshan Nanhai Xing Di Machinery Manufacturing Company, Foshan 528200, China; 3.Jiangsu ToLand Alloy Co., Ltd., Zhenjiang 212352, China)

ABSTRACT: The work aims to study the effects of loading paths on the formability of hollow double-throw crankshaft. Finite element simulation of hydroforming processes of 304 stainless steel hollow double-throw crankshaft was conducted by using finite element analysis. During the simulation, the effects of loading paths on bulging height of the double hollow crankshaft and thickness distribution were studied and the causes of defects such as cracking and wrinkling were analyzed. Finally, according to the results of the numerical simulation, the actual forming experiment was conducted. The numerical simulation results were compared with the experimental results. Wrinkling occurred on pipe billet as the forming pressure was < 20 MPa and cracking occurred as the forming pressure was > 60 MPa. In the experiment, parts of double-throw crankshaft with uniformly distributed wall thickness were obtained. And the numerical simulation results were basically consistent with test results. High axial feed and insufficient internal pressure may cause wrinkling in transition corners; low axial feed and excessive pressure may bring about severe thickness reduction and even cracking in the throw parts. Only when reasonable loading path is set up, an eligible double-throw crankshaft of good wall thickness uniformity and bulging height can be successfully manufactured.

KEY WORDS: double-throw crankshaft; hydroforming; finite element modelling; loading paths

收稿日期: 2016-10-14

基金项目: 江苏省自然科学基金 (SBK2015022427); 中央高校基本科研基金 (NJ20150023, NJ20160035, NJ20160036); 江苏高校优势学科建设工程资助项目

作者简介: 郭群 (1991—), 男, 江苏高邮人, 硕士生, 主要研究方向为金属精密塑性成形技术及装备。

通讯作者: 陶杰 (1963—), 男, 江苏人, 教授, 主要研究方向为金属精密塑性成形技术及装备。

双拐曲轴是汽车发动机中的关键部件,对发动机整体性能有较大的影响,其性能的好坏直接影响汽车的寿命。采用锻造工艺和铸造工艺已经不能满足汽车对双拐曲轴高精度、高性能和低成本的要求。采用内高压胀形工艺制备双拐曲轴具有整体成形、流线连续分布、组织致密^[1-3]、强度高、质量轻、综合力学性能优越、成本低,易实现自动化生产等优势^[4-5]。

工程领域主要从2方面来实现汽车轻量化。材料上多采用铝镁合金及复合材料等轻质材料和具有较高比强度的高强度材料,而轻质材料及高强度在冷成形过程中塑性较差,只能制造结构较简单的零件;结构上可采用整体成形的空心构件代替原焊接、铸造件,在保证零件精度、承载强度及安全性的同时,有效实现车体自身减重,因此,零件的结构优化和成形工艺的改进成为实现汽车轻量化的重要途径^[6]。

内高压整体成形工艺实施难度较大,对工艺参数的匹配关系要求较高。对于双拐曲轴的内高压成形过程,其影响因素主要有加载路径,包括管内压力与时间的关系、左右两端轴向进给与时间的关系^[7-8]以及管材润滑条件^[9-10]等方面。

文中拟对双拐曲轴的内高压胀形工艺过程进行有限元模拟,分析不同加载路径对双拐曲轴胀形效果的影响规律,获得了双拐曲轴胀形的最佳工艺参数。基于数值模拟结果,对双拐曲轴进行实际成形试验,获得了较好的试验结果。

1 零件尺寸及成形工艺分析

1.1 零件尺寸

双拐曲轴具有变截面空心结构,其截面形状是圆形,双拐曲轴的几何尺寸见图1,双拐曲轴的初

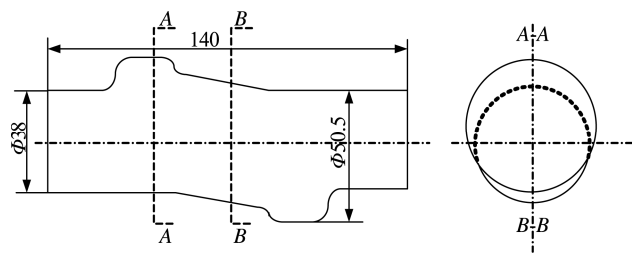


图1 双拐曲轴几何尺寸及典型截面位置

Fig.1 Geometry and cross-sections of double-throw crankshaft

始管径为38 mm,壁厚为1 mm,长度为140 mm,截面A-A处管径从38 mm变化到50.5 mm,最大膨胀量为33%。双拐曲轴是传递扭矩和力的零件,因此研究采用强度高、韧性好的SS304奥氏体不锈钢作为材料^[11-12],对双拐曲轴的几何模型的典型截面周长进行分析见表1。

表1 典型截面周长及管坯直径

Table 1 Perimeters and tube diameters of typical section

截面	周长/mm	管坯直径/mm	膨胀量/%
A-A	158.57	50.5	33
B-B	137.71	43.8	15.4
原始管坯	119.32	38	—

1.2 成形工艺分析

双拐曲轴的关键工艺参数包括内压力大小、左右冲头进给量。内高压成形是内压和轴向进给补料联合作用的复杂成形过程,因此它们之间的匹配关系对管件的成形性能影响非常大^[13]。内压较低,轴向进给过大,会使得轴向进给的材料无法及时向拐部流动,在拐部圆角处和管坯端部堆积,形成褶皱;内压较大,轴向进给过小,材料无法及时向拐部补充,会使得拐部变得越来越薄,直至破裂,因此,为了研究出合理的加载路径,决定通过大量的模拟试验,来得出最优的加载路径。在模拟之前,先要确定大致的压力范围,然后再进行模拟计算^[14]。

1.2.1 初始屈服压力

管材在内高压成形过程中,内表面首先产生屈服,然后向外层扩展,当外表面应力达到屈服应力时,整个管件才发生屈服,因此可将管材外表面发生塑性变形时的力作为管材的初始屈服压力。假设管材为承受内压作用的圆柱壳体, σ_z 与 σ_θ 分别表示轴向应力与环向应力,且分别为:

$$\sigma_z = \frac{p\pi r^2}{2\pi r t} = \frac{pr}{2t} \quad (1)$$

$$\sigma_\theta = \frac{p2r}{2t} = \frac{pr}{t} \quad (2)$$

由 Tresca 屈服准则:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_s \quad (3)$$

式中: $\sigma_1 = \sigma_\theta$, $\sigma_2 = \sigma_z$, $\sigma_3 = 0$ 。

可知屈服压力 p 为:

$$p = \frac{t}{r} \sigma_s \quad (4)$$

式中: σ_s 为材料屈服强度(MPa); t 为管材壁厚

(mm); r 为管材半径(mm); 双拐曲轴零件原始管坯: $r=19\text{ mm}$; $\sigma_s=245\text{ MPa}$, 则 $p=12.89\text{ MPa}$ 。

1.2.2 整形压力

在内高压成形后期, 零件已经基本成形, 但圆角和过渡部分未完全成形, 为提高零件的尺寸和形状精度, 需要更高的压力进行最终整形, 这个阶段的内压称为整形压力或者最大压力。内高压成形领域一般可用下式估算整形压力 p_c :

$$p_c = \frac{t}{r_c} \sigma_s \quad (5)$$

式中: r_c 为零件最小过渡圆角半径; t 为管材壁厚; σ_s 为材料屈服强度。对于双拐曲轴零件, $r_c=5.31\text{ mm}$, 则 $p_c=46.89\text{ MPa}$ 。在实际成形过程中, 整形压力越大, 需要的合模压力机吨位越大, 因此降低整形压力是内高压成形优化工艺的目标所在。一般整形压力为材料屈服强度的 $1/10 \sim 1/3$, 因此, 选择整形压力为 50 MPa 。

2 双拐曲轴内高压成形数值模拟

2.1 有限元模型的建立

双拐曲轴内高压胀形的有限元模型见图2。该模型包含模具、管坯、左冲头、右冲头等4个部分, 模具和冲头划分为刚性单元, 数值模拟时考虑板料的各向异性, 选用材料库中36号材料模型。管坯材料为不锈钢SS304, 其摩擦因数为0.1, 泊松比为0.28, 屈服强度为245 MPa, 抗拉强度为408 MPa, 材料密度为 7850 kg/m^3 , 硬化指数 n 为0.32, 强化系数 K 为537 MPa, 材料的本构关系为 $\sigma = K \varepsilon^n$ 。

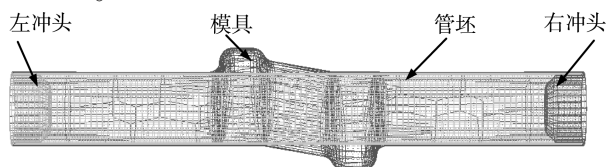


图2 SS304 不锈钢双拐曲轴内高压成形有限元模型
Fig.2 FEM model of SS304 crankshaft hydroforming

2.2 加载路径对双拐曲轴壁厚分布及胀形高度的影响

双拐曲轴成形过程中内压和轴向进给的关系是决定成形与否的关键性因素, 因此, 在数值模拟和实际成形试验时内高压加载必须遵循以下准则:

加载峰值不得超过材料的最大整形压力, 一般为材料屈服强度的 $1/3 \sim 1/10$; 成形初期压力应尽快达到材料的屈服强度, 防止出现起皱缺陷; 成形后期, 保压一定时间, 在较高内压作用下, 管坯充分贴模。基于上述设计原则, 双拐曲轴内高压成形过程设置了5条加载路径见图3。5种载荷路径分别定义为路径1—5。5种加载路径的主要是液压和锻造工步不同, 最后的整形压力相同^[15]。

加载路径1的液压胀形压力为20 MPa, 在最后的锻造阶段保持该数值; 加载路径2的液压胀形力为40 MPa, 在后续的锻造阶段保持不变; 加载路径3的液压胀形力为30 MPa, 在后续的锻造阶段保持不变; 加载路径4的液压胀形力为35 MPa, 在后续的锻造阶段保持不变; 加载路径5的液压胀形力为35 MPa, 在后续的锻造阶段压力线性增加到40 MPa。加载路径1—5的轴向进给量一样, 为17 mm。

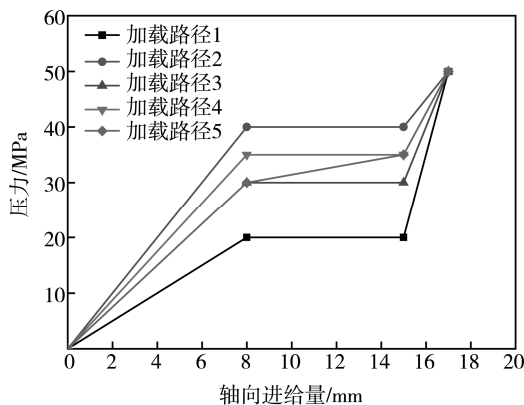


图3 模拟时的5种加载路径
Fig.3 Five loading paths of the simulation

加载路径1发生起皱时的成形状态及FLD见图4, 这是由于液压胀形阶段和锻造阶段压力较低, 管坯材料无法周向扩展, 轴向继续进给, 导致壁厚逐渐增加向内产生起皱, 出现折叠。情况严重时, 即便后续整形压力非常高也无法消除褶皱。图4可以明显看到拐部底端变形区的折叠。

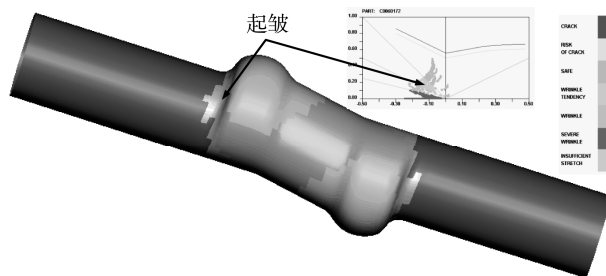


图4 加载路径1的模拟结果及FLD
Fig.4 Results and FLD of loading path 1

加载路径 2 发生破裂时的成形状态及 FLD 见图 5, 这是由于在液压胀形阶段的压力过高, 而此时的轴向进给较小, 轴向进给不能补偿周向变形量, 拐部顶端壁厚越来越薄, 使得拐部顶端在未贴模时发生破裂。

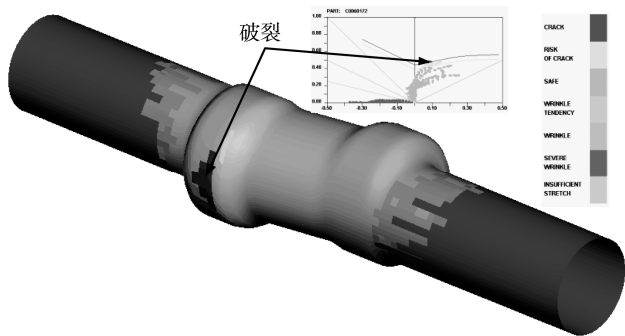


图 5 加载路径 2 的模拟结果及 FLD
Fig.5 Results and FLD of loading path 2

根据加载路径 1 和加载路径 2 的模拟结果可知, 液压胀形阶段的压力不能太高或者太低, 合理的胀形压力应该在 30~35 MPa 之间, 在这个压力范围设置 3 组加载路径。加载路径 5 的模拟结果见图 6, 从图 6 可以看出, 曲轴拐部顶端最薄, 拐部底端以及主管端部最厚, 并且减薄率控制在允许范围之内, 拐部顶端贴模, 成形零件合格。

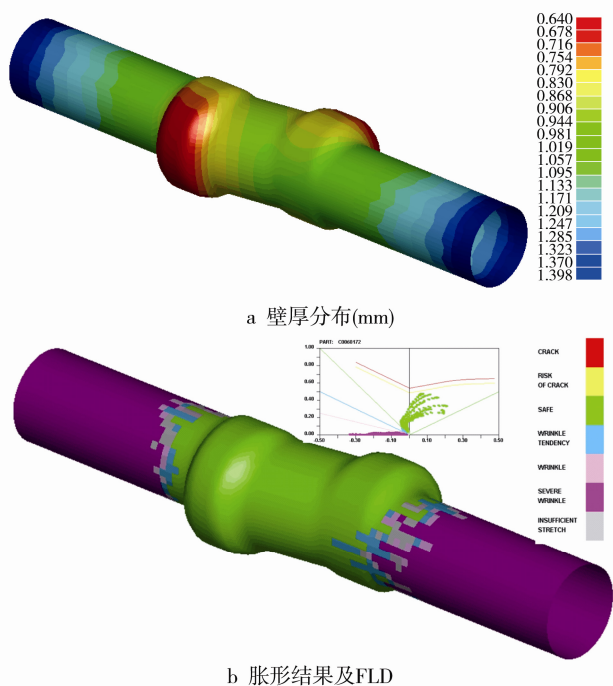


图 6 加载路径 5 的模拟结果
Fig.6 The wall thickness distribution

不同加载路径成形下胀形高度和壁厚最大减薄率见表 2, 当选择加载路径 3 时, 胀形高度达到

31.1 mm, 为最小值; 而加载路径 4, 5 对应的胀形高度均为 31.5 mm, 为最大值。从表 2 中可以看出, 在轴向进给一定的情况下, 随着胀形压力的增大, 胀形高度增加, 但是压力增大到一定值后, 胀形高度保持不变, 而减薄率会随胀形压力的增大继续增大。虽然加载路径 3 下, 较小的成形压力对应较小的壁厚减薄率, 但是胀形高度不能满足要求, 所以, 最终选择加载路径 5 为加载方式。

表 2 不同加载路径成形下胀形高度和壁厚最大减薄率
Table 2 Crankshaft bulging height and wall thinning ratio of different loading paths

加载路径	胀形高度/mm	最大减薄率/%
路径3	31.1	30
路径4	31.5	40
路径5	31.5	36

3 双拐曲轴的内高压成形试验研究

双拐曲轴实际成形工艺路线为: 先将 304 不锈钢管通过锯床下料得到 200 mm 的管坯, 再选择专用的表面涂层作为润滑剂, 涂刷于管坯的外表面, 然后将管坯放入模具型腔后合模 (见图 7), 按有限元模拟的工艺参数设定工艺值, 并在向管坯内输入高压油的同时, 冲头对管坯进行压缩。待试验程序走完全程, 将成形的双拐曲轴件取出。

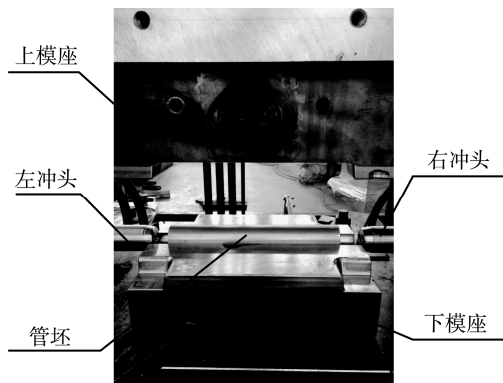


图 7 双拐曲轴内高压胀形试验模具
Fig.7 Hydroforming die of double-throw crankshaft

应用加载路径 1, 2, 5 的试验结果见图 8。胀形压力和轴向进给匹配较为适当时的胀形结果见图 8a, 从图 8a 中可以看出, 双拐曲轴既无起皱, 也无开裂。从图 8b 可以看出, 当胀形高度很低时, 双拐曲轴就已经出现破裂, 破裂的主要原因是前期压力过大, 轴向进给过小, 不能提供足够的材料用以周向扩展, 导致过度减薄直至破裂。从图 8c 可

以看出,起皱的部位在曲轴圆角过渡处,起皱的主要原因是因为前期压力较低,使金属流动缓慢,轴向变形来不及转化为周向变形,材料在根部产生聚集,形成起皱。

加载路径 5 的数值模拟与试验的对比结果见表 3,从表 3 的截面形状对比可以看出,数值模拟结果和试验结果的情况基本一致。

表 3 试验与模拟结果对比
Table 3 Comparison of experimental results and simulation results

结果对比	数值模拟结果	试验结果
零件		
截面 A-A		
截面 B-B		

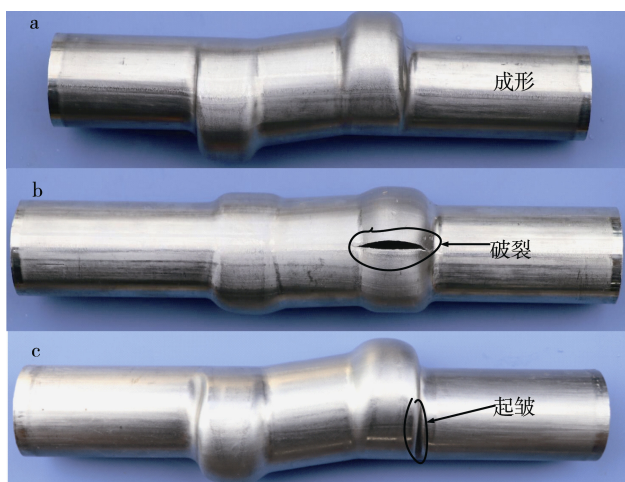


图 8 不同加载路径下双拐曲轴的试验结果
Fig.8 Experimental results of crankshaft under different loading paths

再对零件壁厚进行分析,将零件表面油污清洗后,表面光滑无凹坑和划痕,表面成形质量好。沿轴向方向将双拐曲轴用线切割切开进行厚度测量,选取截面上的 12 个点进行厚度测量,并与模拟结果进行比较,模拟结果和试验结果壁厚比较见图 9。

从图 9 可以看出,壁厚分布差异较大,曲轴拐部顶端(5 点)处壁厚最薄,向两侧沿轴向方向壁厚逐渐增加,曲轴拐部底端(1 点)处壁厚最厚。厚度分布方面,试验值和模拟值基本吻合。模拟及实验结果对比见图 10,由图 10 可知,实际成形的双拐

曲轴拐部胀形高度与长度均满足设计尺寸要求。

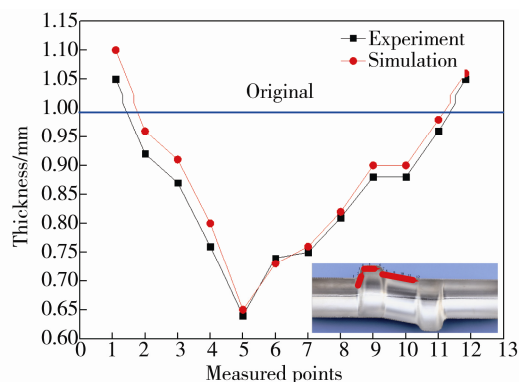


图 9 沿曲轴轴向方向截面壁厚分布对比
Fig.9 Comparison of the wall thickness distribution along the axial direction

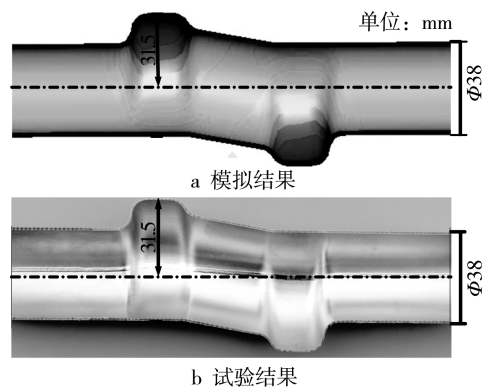


图 10 模拟及实验结果对比
Fig.10 Comparison of experimental and simulation results

4 结论

1) 通过数值模拟优化双拐曲轴内高压成形工艺参数。选择加载路径5为最佳工艺, 其内压力为50 MPa, 左、右冲头推进距离为17 mm, 摩擦因数为0.1。

2) 双拐曲轴拐部顶端区域减薄严重, 拐部顶端壁厚值最小, 管坯两端以及过渡圆角处壁厚值最大。

3) 通过优化加载路径可以避免双拐曲轴零件出现起皱和破裂的缺陷。

4) 通过试验获得胀形高度为31.5 mm及壁厚分布均匀的双拐曲轴零件。另外, 试验结果与模拟结果基本一致。

参考文献:

- [1] CHENG D M, TENG B G, GUO B, et al. Deformation and Defects in Hydroforming of Y-shaped Tubes[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 15(2): 206—210.
- [2] CHENG D M, TENG B G, GUO B, et al. Thickness Distribution of a Hydroformed Y-shaped Tubes[J]. Materials Science & Engineering A, 2009, 499(1): 36—39.
- [3] HWANG Y M, LIN T C, CHANG W C. Experiments on T-shape Hydroforming with Counter Punch[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, S192/193(10): 243—248.
- [4] DOHMANN F, HARTL C. Hydroforming a Method to Manufacture Light-weight Parts[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1996, 60(1/2/3/4): 669—676.
- [5] AHMETOGLU M, ALTAN T. Tube Hydroforming: State-of-the-art and Future Trends[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 98(1): 25—33.
- [6] 徐明达, 代宇春, 赵立伟. 管材内高压成形技术的研究进展[J]. 锻压装备与制造技术, 2009, 44(3): 23—25.
XU Ming-da, DAI Yu-chun, ZHAO Li-wei. Research Progress of Tube Hydroforming[J]. Forging Equipment and Manufacturing Technology, 2009, 44(3): 23—25.
- [7] IMANINEJAD M, SUBHASH G, LOUKUS A. Loading Path Optimization of Tube Hydroforming Process[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2005, 45: 1504—1514.
- [8] MANABE K, SUETAKE M, KOYAMA H, et al. Hydroforming Process Optimization of Aluminum Alloy Tube using Intelligent Control Technique[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2006, 46: 1207—1211.
- [9] NGAILE G, JAEGER S, ALTAN T. Lubrication in Tube Hydroforming(THF) Part I. Lubrication Mechanisms and Development of Model Tests to Evaluate Lubricants and Die Coatings in the Transition and Expansion Zones[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 146: 108—115.
- [10] NGAILE G, JAEGER S, ALTAN T. Lubrication in Tube Hydroforming(THF) Part II. Performance Evaluation of Lubricants using LDH Test and Pear-shaped Tube Expansion Test[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 146: 116—123.
- [11] LEBER H J, NIFFENEGGER M, TIRBONOD B. Microstructural Aspects of Low Cycle Fatigued Austenitic Stainless Tube and Pipe Steels[J]. Materials Characterization, 2007, 58: 1006—1015.
- [12] KOÇ M. Hydroforming for Advanced Manufacturing[M]. Woodhead Publishing, 2008.
- [13] 林俊峰, 苑世剑. 空心双拐曲轴内高压成形数值模拟[J]. 塑性工程学报, 2005, 12(5): 34—37.
LIN Jun-feng, YUAN Shi-jian. Numerical Simulation of Hydroforming Hollow Crankshaft Components[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2005, 12(5): 34—37.
- [14] 孙礼娜, 余心宏. 不规则四边形截面管件内高压成形数值模拟[J]. 锻压装备与制造技术, 2011(6): 90—93.
SUN Li-na, YU Xin-hong. Numerical Simulation of Hydroforming Process for Irregular Quadrilateral Cross-Section Tube[J]. Forging Equipment and Manufacturing Technology, 2011(6): 90—93.
- [15] 林俊峰, 李峰, 韩杰才, 等. 管件液压成形中加载路径的确定方法研究[J]. 材料科学与工艺, 2009(6): 840—843.
LIN Jun-feng, LI Feng, HAN Jie-cai, et al. The Study of Loading Paths Optimization for Tube Hydroforming Process[J]. Material Science and Technology, 2009(6): 840—843.