

大拉深比薄壁筒形件充液成形过程数值模拟

张泉达, 郎利辉, 孔德帅, 王耀, 李奎

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘要: **目的** 利用充液成形工艺成形普通拉深工艺难成形的大拉深比筒形件。**方法** 通过理论公式计算了冷冲压工艺成形该制件的道次, 利用有限元软件 Dynaform 对充液成形过程进行了3个步骤模拟, 并研究了第1步拉深时初始反胀高度对成形制件减薄率的影响规律。**结果** 利用理论公式计算, 传统冲压方法成形拉深比为3.2的筒形件至少需要5个道次, 而采用被动式充液成形方法只需要3个道次。每个道次的最大减薄率都在8%以内, 最后得到拉深制件的最大减薄率为8.53%, 在安全范围以内; 第1步充液拉深时, 反胀高度分别为1.75, 2.75, 3.75, 4.75, 5.75 mm时, 得到制件的最大减薄率分别为5.28%, 5.08%, 4.8%, 5.03%, 5.03%。**结论** 充液成形工艺较传统冲压工艺可以大大提高板料的成形极限, 减少成形道次, 成形制件质量好; 合适的初始反胀高度, 可以减小成形制件壁厚的最大减薄率。

关键词: 充液成形; 拉深比; 反胀高度; 数值模拟

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2015.05.015

中图分类号: TG394

文献标识码: A

文章编号: 1674-6457(2015)05-0093-06

Numerical Simulation Analysis of Hydroforming Process for Thin-wall Tube Workpiece with Big Deep Drawing Ratio

ZHANG Quan-da, LANG Li-hui, KONG De-shuai, WANG Yao, LI Kui

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

ABSTRACT: The sheet hydroforming process was used to form the Tube workpiece with big deep drawing ratio, which is difficult to form by the ordinary deep drawing process. The forming steps of the part using traditional deep drawing process were calculated by theoretical equation. The three steps of the hydroforming process were simulated by means of the finite element software Dynaform, and the impact of initial inverse bulging height on the part thinning rate in the first step was studied. Results At least five steps were needed to form the tube workpiece with a drawing ratio of 3.2 using traditional stamping as calculated by the theoretical equation, while only three steps were needed with the passive hydroforming process. The maximum sheet reduction of every step was less than 8% and the maximum sheet reduction of the final part was 8.53%, so it was within the safe range. In the first step of the hydroforming process, when the inverse bulging heights were 1.75, 2.75, 3.75, 4.75 and 5.75 mm, the part's maximum thinning rates were 5.28%, 5.08%, 4.8%, 5.03% and 5.03%, respectively. The forming limit of the sheet was improved by the hydroforming process compared with the traditional deep drawing process, the number of the forming steps was reduced and the part quality was good. The maximum thinning rate of the part wall thickness could be effectively decreased by using an appropriate initial inverse bulging height.

KEY WORDS: hydroforming; deep drawing ratio; inverse bulging height; numerical simulation

收稿日期: 2015-07-27

基金项目: 国家科技重大专项(2014ZX04002-071)

作者简介: 张泉达(1986—),男,河北沧州人,博士研究生,主要研究方向为铝合金板材充液成形。

近年来,我国航空、航天、汽车、化工等行业迅速发展,因为工作环境的多样化,对一些形状复杂、功能多、壁厚较薄的零件提出了更高的成形要求。为了解决大拉深比薄壁零件利用传统冲压方法很难成形,需要进行多道次拉深和中间退火,使得制件表面质量差、废品率高等问题^[1-4],近几十年里,液压机械拉深、周向液压充液拉深、充液拉深、热态介质充液拉深和液体凸模主动拉深等技术得到了迅速发展^[5-13]。其中板材充液成形技术由于具有拉深比高、成形零件的表面质量好和形状冻结性好、模具简单等优点,受到了各个领域的重视^[14]。充液成形工艺是一种利用液态的水、油、粘性介质作为传力介质,代替刚性凸模或凹模,使坯料在传力介质的压力作用下按照预先设计的轮廓发生塑性变形,从而成形出所需零件的先进成形方法^[15-16]。

在充液成形工艺的应用方面,哈尔滨理工大学的李官对径向加压液压拉深过程进行了数值模拟,获得了拉深比为 3.1 的筒形件,成形零件壁厚分布均匀^[3];北京航空航天大学的郎利辉采用机械液压拉深(hydromechanical deep drawing)方法,从数值模拟与试验验证的角度出发,得到了拉深比为 3.11 的筒形件。文中利用有限元方法对大拉深比的薄壁筒形件进行多道次数值模拟,并分析了关键工艺参数,例如初始反胀高度对零件的壁厚影响规律。

1 板材充液成形工艺

1.1 传统冲压过程与充液成形方法对比

传统冲压过程与板材充液成形过程如图 1 所示。充液拉深(Hydrodynamic deep drawing)是被动式的典型代表,该技术在凹模中充以液体当作液室,当凸模下行时,通过液室压力阀调整液室压力从而将毛坯紧紧地贴在凸模上,形成“摩擦保持”并使液体在凹模与毛坯板料下表面之间产生流体润滑,减小板料与凹模之间的摩擦,从而可以得到高精度的零件,减少传统拉深时板料局部缺陷的生成,极大地提高了板料的成形极限(比普通拉深成形极限提高 1.2 ~ 1.4 倍)^[14,17]。传统冲压工艺因为在拉深过程中,传力区处于悬空状态,受到零件已成形部分的拉力作用从而承受很大的轴向拉应力,容易出现破裂;同时法兰区在切向应力的作用下壁厚增加容易起皱,从而限制了零件的成形极限。

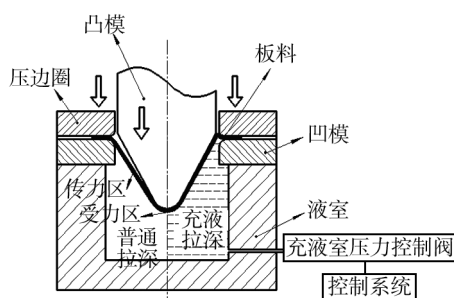


图1 传统冲压工艺与充液成形工艺的对比

Fig.1 Comparison of the traditional deep drawing process with the hydroforming process

1.2 初始反胀

充液成形之前,凸模在板料以上一定位置静止不动,液室内充入较小压力的液体,在液体的压力作用下板料向上抬起与凸模接触,这样板料形成初始反胀高度实现聚料,可以有效减小板料在拉深过程的变薄,过程原理如图 2 所示。初始反胀高度过小,聚料效果不明显,抑制减薄不明显;初始反胀高度过大,板料形成两次折弯,弯矩较大,产生的变形也较大,板料在拉深过程中容易发生断裂。因此,寻找合适的初始反胀高度是急需解决的任务。

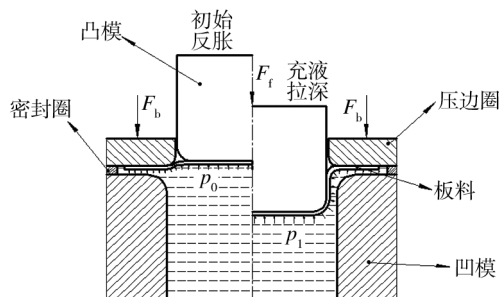


图2 初始反胀过程

Fig.2 Initial inverse bulging process

2 工艺分析与方案设计

2.1 坯料尺寸的确定

最后筒形件的高度为 250 mm,外径为 116 mm,圆底圆角半径为 8 mm,壁厚为 0.5 mm。为此选择壁厚为 0.5 mm 的圆形板料。根据表面积不变原理,利用式(1)计算圆形坯料的半径 R 。

$$\pi 58^2 + 2\pi \times 58 \times 250 = \pi R^2 \quad (1)$$

解得 $R = 180$ mm,加上修边余量,最后确定圆形坯料的半径为 186 mm。

2.2 拉深次数的确定

冷冲压拉深系数公式为:

$$m=\frac{d}{D}$$
 (2)

式中: D 为平面毛坯直径, d 为拉深后的圆筒直径。

拉深比 K 计算公式为:

$$K=\frac{1}{m}=\frac{D}{d}$$
 (3)

带入数值计算得拉深系数 $m=0.31$, $K=3.23$ 。为了减少拉深次数,希望采用小的拉深系数(大的拉深比)。根据力学分析可知,拉深系数过小,将会在危险断面产生破裂,因此,要保证拉深顺利进行,每次拉深系数应大于极限拉深次数。

若 $m\geq m_1$,则可一次拉深成形。若 $m<m_1$,则需要的拉深次数 n 为:

$$m_1m_2\cdots m_n\leq m$$
 (4)

根据极限拉深系数(见表1)和式(4)可知,如果采用传统冷冲压工艺成形该薄壁筒形件,至少需要5个拉深道次。

表1 极限拉深系数
Table 1 The limit drawing coefficient

拉深系数	毛坯的相对厚度 $\frac{t}{D}\times 100$					
	0.08 ~ 0.15	0.15 ~ 0.30	0.30 ~ 0.60	0.6 ~ 1.0	1.0 ~ 1.5	1.5 ~ 2.0
m_1	0.63	0.60	0.58	0.55	0.53	0.50
m_2	0.82	0.80	0.79	0.78	0.76	0.75
m_3	0.84	0.82	0.81	0.80	0.79	0.78
m_4	0.86	0.85	0.83	0.82	0.81	0.80
m_5	0.88	0.87	0.86	0.85	0.84	0.82

采用充液成形方法,只需要3步。第1步拉深筒形件的外半径为112 mm;第2步拉深筒形件的外半径为85 mm;第3步最终成形外半径为58 mm的筒形件,如图3所示。

2.3 实验材料

实验材料选为不锈钢321,因为该材料塑性比较好,可以产生大的塑性变形。通过单拉实验可以获得该材料的基本力学参数,不锈钢321基本力学性能测试结果如下:屈服强度为240 MPa,抗拉强度为590 MPa,厚向异性指数 r 为1.0767,应变强化系数 K 为

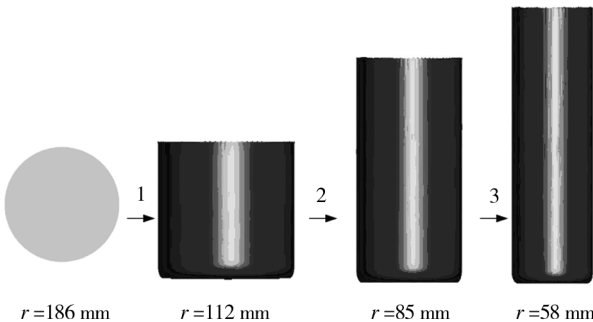


图3 三步充液成形流程

Fig. 3 Flowchart of the three-step hydroforming process

1210.975,应变强化指数 n 为0.4233。

3 有限元模型的建立

利用板材成形专用软件Dynaform对该充液成形过程进行数值模拟,3个工步的有限元模型见图4所示。

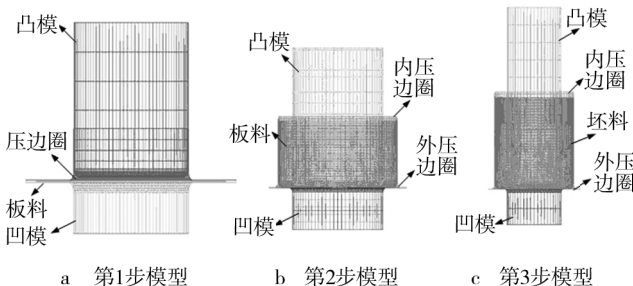


图4 有限元模型

Fig. 4 Finite element models

板材坯料划分网格时采用的是4节点BT壳单元,凸模、凹模和压边圈为刚体,划分网格采用4节点网格单元。在成形模拟过程中,设置凸模与板料之间的摩擦因数为0.15,压边圈与板料之间的摩擦因数为0.1,凹模与板料之间的摩擦因数为0.05。凸模与凹模间隙为1.1倍的板厚,凸模与压边圈间隙为1.2倍的板厚,板料初始胀形高度为3.75 mm。

4 数值模拟及参数优化分析

4.1 三步充液成形法数值模拟分析

第一步成形后的制件应力分布与厚度分布情况决定着后续的成形过程以及最终零件的质量,因此经过参数优化过程,选择液室的加载曲线如图5所示。

初始反胀高度为 3.75 mm,反胀压力为 2 MPa。

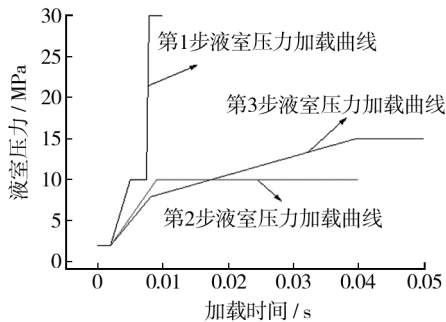


图5 液室压力加载曲线
Fig. 5 Curve of pressure loading

经过 3 个步骤的充液拉深后,每一步的 FLD 如图 6 所示,每一步的零件壁厚分布如图 7 所示。

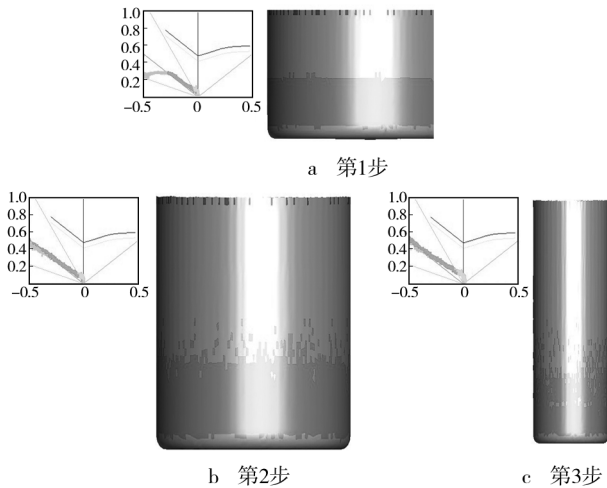


图6 FLD
Fig. 6 Forming limit diagram

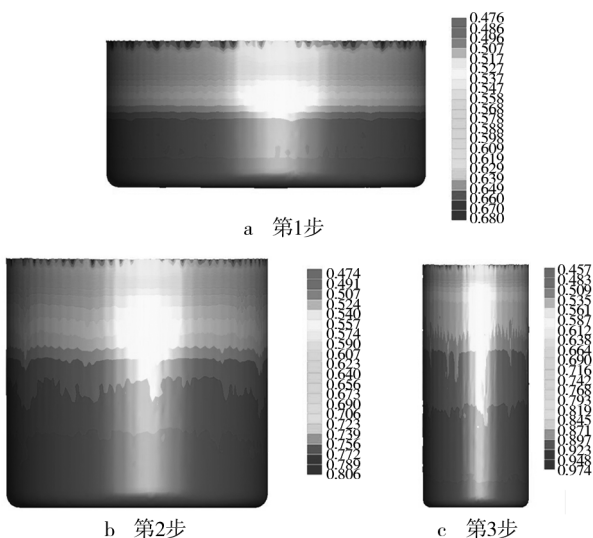


图7 板材厚度分布(mm)
Fig. 7 Wall thickness distribution

为了研究每一步成形结束时的零件壁厚分布情况,从筒形件底部中心沿半径方向向筒口端部取点,测量零件壁厚值。因为筒形件为轴对称件,所以取点情况如图 8 所示。根据这些点的值绘制壁厚分布曲线,如图 9 所示。

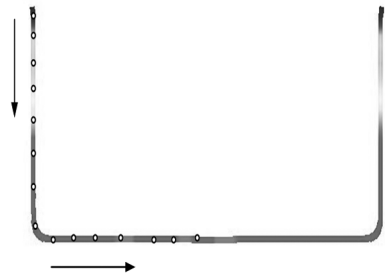


图8 测量节点沿径向的分布
Fig. 8 Distribution of the measurement points along radial direction

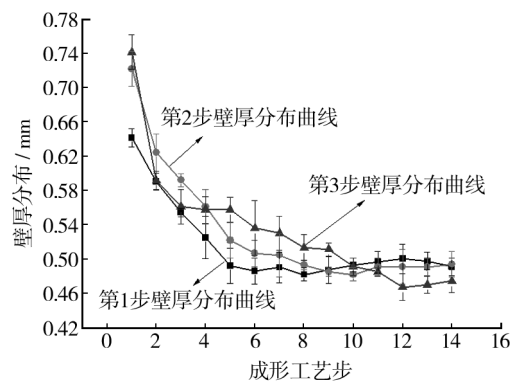


图9 壁厚沿径向的分布曲线
Fig. 9 Distribution curve of wall thickness along radial direction

通过图 8 和图 9 可以看出,每一步成形结束时,沿着筒形件的母线路径上,零件的壁厚分布比较均匀。第 1 步成形结束时,壁厚最大处与最小处的差值为 0.164 mm;第 2 步结束时,壁厚最大处与最小处的差值为 0.245 mm;第 3 步结束时,壁厚最大处与最小处的差值为 0.275 mm。第 1 步与第 2 步成形后的零件虽然壁厚发生减薄,但是坯料在凸模的作用下,被拉进凹模的过程中,由于液体的“摩擦保持”与“流体润滑”效果,使得坯料与凸模之间的摩擦加强,减少了相对滑动,从而受力区与传力区过渡处的拉应力减小,限制了板料的进一步减薄。每一步成形结束时的最大减薄率如图 10 所示。

从图 10 中可以看出,每一步成形后的壁厚最大减薄率都没有超过 7%,每一步结束时的壁厚累积最大减薄率也没有超过 8%,说明成形的零件满足强度要求。从图 10 可以看出,第二步成形结束时的壁厚

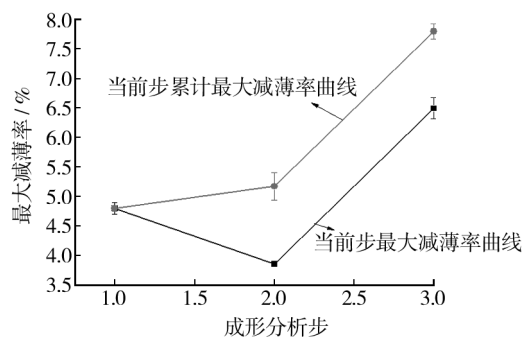


图 10 壁厚最大减薄率曲线

Fig. 10 The maximum thinning rate curve of the wall thickness

最大减薄率和壁厚累积最大减薄率都是最小的,这是因为第二步采取了一个较小的拉深比。

4.2 初始反胀高度优化分析

成形初期,凸模在冲压方向上距离板料有一个高度值 h ,液室内通入一定的初始液室压力使得板料向上胀高 h ,这个值就是初始反胀高度,如图 11 所示。初始胀形可以提前给后期的拉深成形聚集板料,减小后期的板料减薄,成形过程如图 12 所示。

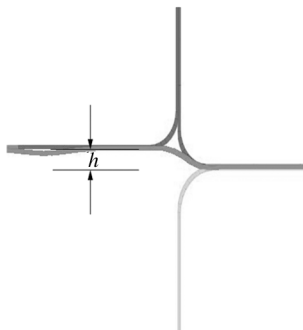


图 11 胀形高度

Fig. 11 The bulging height

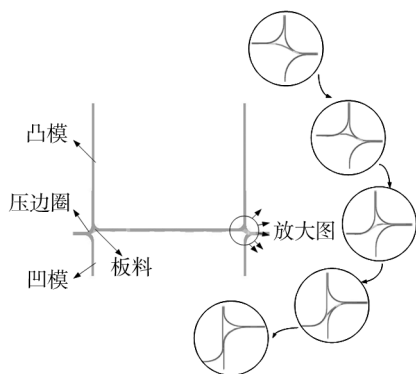


图 12 充液成形过程

Fig. 12 Hydroforming process

设置不同的初始胀形高度,得到不同胀形高度后零件的壁厚分布图,如图 13 所示。

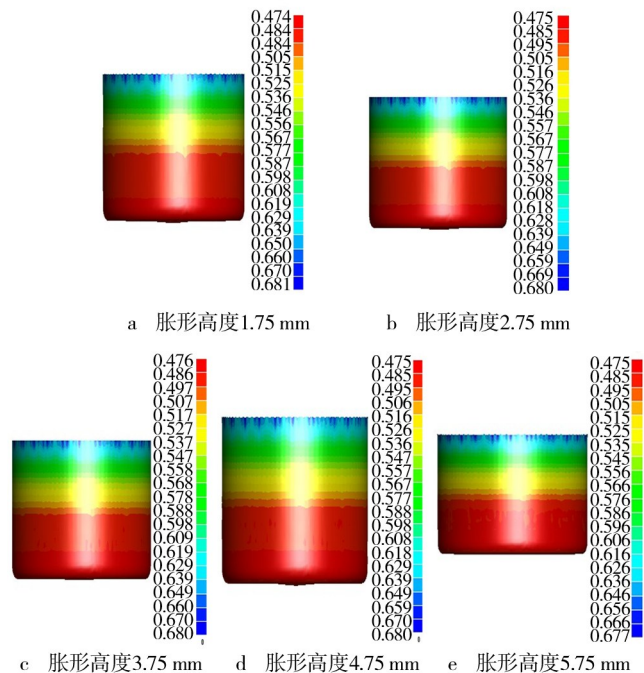


图 13 不同胀形高度下的壁厚分布 (mm)

Fig. 13 Distribution of sheet wall thickness at different bulging height

充液成形后板料的壁厚最大减薄率如图 14 所示。从图 14 中可以看出,当胀形高度在 1.75 ~ 3.75 mm 之间时,随着胀形高度的增加,最终零件的壁厚最大减薄率呈下降趋势。这是因为,初始胀形为后续拉深成形提前聚料,减缓了板料因为从法兰区向传力区转移的变薄情况。在该范围内,当胀形高度为 3.75 mm 时最终零件的最大减薄率最小为 4.80%;当胀形高度在 3.75 ~ 5.75 mm 范围内变化时,最终零件的壁厚最大减薄率呈上升趋势,胀形高度 4.75 mm 时,最大减薄率为 5.04%,胀形高度为 5.75 mm 时,最大减

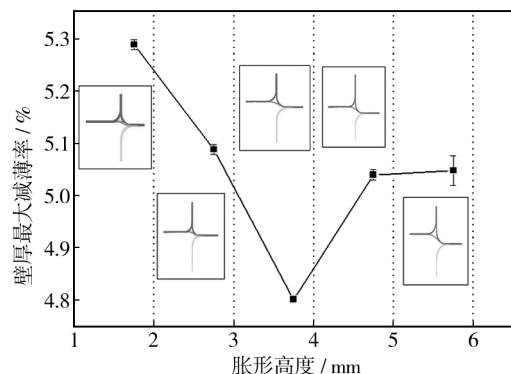


图 14 不同胀形高度时的壁厚最大减薄率

Fig. 14 The maximum sheet thinning rate at different bulging height

薄率为5.05%。这是因为,板料从初始胀形到被拉进凹模整个过程经历了两次折弯变形,在板料内部会形成正反两个弯矩,初始胀形量过大,板料变形也大,使得板料提前产生断裂缺陷。可见,选择合适的初始胀形高度能有效地减小零件的壁厚减薄情况。

5 结论

1) 针对大拉深比薄壁零件的成形方法,利用传统冲压成形工艺需要多道次,中间需要退火处理,耗费大量时间,模具复杂。利用板材充液成形方法,最大的优势就是可以减少成形的道次。本文的零件用传统方法需要至少5个道次成形,而充液成形只需要3个道次即可形成。获得的零件壁厚分布均匀,壁厚减薄率很小,成形的零件表面质量好。

2) 在充液成形过程中,关键的工艺参数如初始胀形高度,对成形过程影响很大。合适的初始胀形高度可以有效地减小零件的壁厚最大减薄率。通过对第一道次的数值模拟分析可以得出,初始胀形高度为3.75 mm时,第一步拉深结束后零件的壁厚最大减薄率最小为4.803%。

3) 影响充液成形过程的关键参数还有液室压力加载方式、压边间隙、凸凹模间隙等,这些参数对充液成形过程的影响有待于研究。

参考文献:

- [1] 李涛,郎利辉,安冬洋,等. 复杂薄壁零件板多级充液成形及过程数值模拟[J]. 北京航空航天大学学报,2007,33(7):830—833.
LI Tao, LANG Li-hui, AN Dong-yang. Multi Sheet Hydroforming of Complicated Thin Wall Part and Numerical Simulation[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2007,33(7):830—833.
- [2] 刘欣,徐永超,苑世剑,等. 铝合金复杂曲面薄壁件液压成形技术[J]. 精密成形工程,2010,2(1):42—46.
LIU Xin, XU Yong-chao, YUAN Shi-jian, et al. Hydroforming for Aluminum Alloy Complex-shaped Components[J]. Journal of Netshape Forming Engineering,2010,2(1):42—46.
- [3] 李官. 基于FEA的大高径比筒形件液压成形工艺的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2010.
LI Guan. Investigation on Large Height-Diameter Ratio Cylindrical Cup Forming Process by Hydrodynamic Deep Drawing Based on FEA[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology,2010.
- [4] 丁少行,郎利辉,黄磊. 2024 铝合金成形高锥盒形件充液成形数值模拟[J]. 精密成形工程,2014,6(3):31—35.
DING Shao-hang, LANG Li-hui, HUANG Lei. Simulation Research on Hydroforming of Hard Forming Deep Taper-shaped Part of 2024 Aluminum Alloy[J]. Journal of Net-shape Forming Engineering,2014,6(3):31—35.
- [5] 郎利辉,许诺,王永铭,等. 321 不锈钢 V 形件充液成形失稳控制研究[J]. 锻压技术,2012,37(5):51—55.
LANG Li-hui, XU Nuo, WANG Yong-ming, et al. Research on Failure Control of Hydroforming for 321 Stainless Steel V-shaped Components[J]. Forming & Stamping Technology,2012,37(5):51—55.
- [6] BECKER H J, BENSMAN G. Further Development in Hydro-mechanical Deep Drawing[C]//Developments in the Drawing of Metals on Metal Society. London,1983.
- [7] NAKAMURA K, NAKAGAWA T. Sheet Metal Forming with Hydraulic Counter Pressure in Japan[J]. Annal, CIRP, 1987,36:191—194.
- [8] LANG Li-hui, ZHANG Shu-tong, LI Tao, et al. Investigation into the Forming of Complicated Parts with Poor Formability Materials in Cold/Warm Sheet Hydroforming[C]//Tube Hydroforming Techonolgy. Minemachi,2007.
- [9] LANG Li-hui, DANCKERT J, NIELSEN K B. Study on Hydro-mechanical Deep Drawing with Uniform Pressure onto the Blank[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture,2004(44):495—502.
- [10] 李群一,聂绍珉,唐景林,等. 矩形抛物面反光罩充液成形的研究[J]. 锻压技术,2005,33(4):12—14.
LI Qun-yi, NIE Shao-min, TANG Jing-lin, et al. Research on Hydroforming of Square Parabolic Reflector[J]. Forming & Stamping Technology,2005,33(4):12—14.
- [11] 刘合军,郎利辉. 高强度铝合金板材的温热介质充液成形研究[J]. 塑性工程学报,2009,16(1):32—36.
LIU He-jun, LANG Li-hui. Investigation on Warm/Hot Hydro-forming of High Strength Aluminum Alloy Sheet[J]. Journal of Plasticity Engineering,2009,16(1):32—36.
- [12] 杨踊,孙淑锋,刘慧茹. 航空发动机复杂型面罩子板充液成形技术[J]. 航空制造技术,2010,1(1):91—99.
YANG Yong, SUN Shu-feng, LIU Hui-ru. Hydro. Forming Technology of Complex Profile Cover Sheet of Aeroengine[J]. Aeronautical Manufacturing Technology,2010,1(1):91—99.
- [13] 项辉宇,冷崇杰,张媛. 覆盖件成形缺陷的数值仿真实例分析[J]. 计算机仿真,2009,26(12):226—229.
XIANG Hui-yu, LENG Chong-jie, ZHANG Yuan. Case Analysis of Numerical Simulation for Automobile Panel Forming Defects[J]. Computer Simulation,2009,26(12):226—229.

(下转第114页)

- HUANG Qun-ying, LI Chun-jing, LI Yan-fen, et al. R&D Status of China Low Activation Martensitic Steel[J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 2006, 27(1): 41—50.
- [5] SHARAFAT S, AOYAMA A, MORLEY N, et al. Development Status of a SiC-foam Based Flow Channel Insert for a US-ITER DCLL TBM[J]. Fusion Sic Tech, 2009, 56(2): 883—891.
- [6] 黄波. 聚变堆包层用低活化钢管类件成形性能研究[D]. 合肥: 中国科学院等离子体物理研究所, 2012.
- HUANG Bo. Study on Formability of Low Activation Steel Pipes for Blanket of Fusion Reactor[D]. Hefei: Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, 2012.
- [7] TANIGAWA H, SHIBA K, MÖSLANG A, et al. Status and Key Issues of Reduced Activation Ferritic/martensitic Steels as the Structural Material for a DEMO Blanket[J]. J Nucl Mater, 2011, 417(1-3): 9—15.
- [8] 叶兴福, 冯开明, 罗天勇, 等. ITER TBM 第一壁制造方法与样件试制[J]. 核聚变与等离子体物理, 2011, 31(4): 356—358.
- YE Xing-fu, FENG Kai-ming, LUO Tian-yong, et al. The First Wall Methods and Sample Test[J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2011, 31(4): 356—358.
- [9] 王久林, 薛世博, 徐杰, 等. 某型号十字轴精密成形工艺分析[J]. 精密成形工程, 2015, 7(3): 73—77.
- WANG Jiu-lin, XUE Shi-bo, XU Jie, et al. Process Analysis of Precision Forming for a Certain Type of Cross Shaft[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2015, 7(3): 73—77.
- [10] 吴向红, 赵国群, 孙胜, 等. 挤压速度和摩擦状态对铝型材挤压过程的影响[J]. 塑性工程学报, 2007, 14(1): 36—41.
- WU Xiang-hong, ZHAO Guo-qun, SUN Sheng, et al. The Influence of Extrusion Speed and Frictional Status on Aluminum Profile Extrusion Processes[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2007, 14(1): 36—41.
- [11] 张弛, 何巧, 骆静. 汽车变速器结合齿温锻-冷整形复合精锻工艺及模具研究[J]. 精密成形工程, 2014, 6(1): 9—14.
- ZHANG Chi, HE Qiao, LUO Jing. Compound Precision Forging of Warm Forging-cold Shaping and Die for Automatic Transmission Conjunction Gear[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2014, 6(1): 9—14.
- [12] SPEER W, ES-SAID O S. Applications of an Aluminum-beryllium Composite for Structural Aerospace Components[J]. Engineering Failure Analysis, 2004, 11(1): 895—902.
- [13] 包卫平, 任学平, 张毅. 纯铁在高应变率下的流动应力特征及其动态塑性本构关系[J]. 塑性工程学报, 2009, 16(5): 125—129.
- BAO Wei-ping, REN Xue-ping, ZHANG Yi. The Characteristics of Flow Stress and Dynamic Constitutive Model at High Strain Rates for Pure Iron[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2009, 16(5): 125—129.
- [14] 冯春雨. 浅谈合金元素在钢中的作用[J]. 冶金标准化质量, 1996, 8(1): 20—23.
- FENG Chun-yu. Discuss the Role of Alloying Elements in Just[J]. Metallurgical Standardization & Quality, 1996, 8(1): 20—23.
- [15] 马杰, 刘芳. 稀土元素在钢中的作用及对钢性能的影响[J]. 钢铁研究, 2009, 37(3): 54—56.
- MA Jie, LIU Fang. The Role of Rare Earth Elements in Steel and the Effect on the Properties of Steel[J]. Iron and Steel Research, 2009, 37(3): 54—56.

(上接第 98 页)

- [14] 郎利辉. 板材充液先进成形技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- LANG Li-hui. Innovative Sheet Hydroforming and Warm/hot Hydroforming [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014.
- [15] 孔德帅, 郎利辉, 孙志莹, 等. 铝合金薄壁波纹板充液成形工艺研究[J]. 精密成形工程, 2015, 7(3): 62—66.
- KONG De-shuai, LANG Li-hui, SUN Zhi-ying, et al. Hydroforming Process of Aluminum Alloy Thin-wall Corrugated Sheet[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2015, 7(3): 62—66.
- (3): 62—66.
- [16] 孙志莹, 郎利辉, 孔德帅. 铝合金马鞍形件充液成形工艺模拟分析[J]. 精密成形工程, 2015, 7(1): 46—50.
- SUN Zhi-ying, LANG Li-hui, KONG De-shuai. Simulation Analysis of Hydroforming Process for Aluminum Alloy Saddle Parts[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2015, 7(1): 46—50.
- [17] MCDOWELL D L. Modelling and Experiments in Plasticity[J]. International Journal of Solids and Structures, 2000, 37(1/2): 293—309.