

2A12 铝合金平底筒形件充液拉深数值模拟研究

陈绪国¹, 李继光¹, 张杰刚², 田恕¹

(1. 天津航天长征火箭制造有限公司, 天津 300462; 2. 首都航天机械公司, 北京 100076)

摘要: **目的** 研究工艺参数对2A12铝合金平底筒形件充液拉深成形的影响规律。**方法** 采用数值模拟方法,研究了液室压力加载路径、成形液室压力、压边力和压边间隙对板材充液拉深成形效果的影响。**结果** 获得了充液拉深成形的失效形式,以及不同工艺参数下零件壁厚减薄率的变化规律。成形前期,液室压力不宜过大,最大液室压力在10~25 MPa之间,压边间隙在1.05~1.15 mm之内,可有效避免零件过度减薄和法兰起皱。**结论** 合理的液室压力加载路径和压边间隙,可以有效地控制零件法兰区起皱,防止凸模圆角处破裂。

关键词: 充液拉深; 2A12 铝合金; 平底筒形件; 数值模拟

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2015.06.014

中图分类号: TG394

文献标识码: A

文章编号: 1674-6457(2015)06-0086-06

Numerical Simulation of 2A12 Aluminum Flat Bottom Cylindrical Part by Hydromechanical Deep Drawing

CHEN Xu-guo¹, LI Ji-guang¹, ZHANG Jie-gang², TIAN Shu¹

(1. Tianjin Long March Launch Vehicle Manufacturing Co. Ltd., Tianjin 300462, China;

2. Capital Aerospace Machinery Company, Beijing 100076, China)

ABSTRACT: The aim of this study was to analyze the influence of the process parameters on the hydromechanical deep drawing of a 2A12 aluminum alloy flat bottom cylindrical part. The effects of the forming pressure, the loading path, the force and the gap of the blank holder on the hydromechanical deep drawing were analyzed by numerical simulation. The failure types of the hydromechanical deep drawing and the changing pattern of wall thickness distribution of the part under different technical parameters were obtained. In the early stage of forming, the chamber pressure should not be too large, the maximum chamber pressure should be between 10~25 MPa, and the blank space should be within 1.05~1.15 mm. In these conditions, excessive thinning of parts and wrinkle of the flange could be avoided. The results showed that suitable fluid chamber pressure, loading path and blank holder gap can prevent wrinkle of the flange and crack near the punch corner.

KEY WORDS: hydromechanical deep drawing; 2A12 aluminum; flat bottom cylindrical part; numerical simulation

充液拉深成形是一种利用液体作为传力介质,结合机械拉深成形零件的柔性钣金先进制造技术。在液压作用下,零件与模具之间形成了“摩擦保持效果”、“流体润滑效果”和“软拉深筋效果”,在其综合作用下,此种成形方法不仅提高了零件的成形极限,

而且能获得更优的尺寸精度。充液拉深成形因其具有的独特优势,在汽车、航空航天和医疗器械等制造领域的应用越来越广泛^[1-4]。

目前,应用充液拉深成形的零件种类主要有筒形件、锥形件、球壳、盒形件和复杂型面类零件^[5-6]。文

收稿日期: 2015-09-10

作者简介: 陈绪国(1990—),男,山东泰安人,硕士,主要研究方向为金属塑性加工。

中以某型号火箭箭体结构中的一平底筒形件为研究对象,该零件在拉深成形时,不同部位的变形量差异较大,毛坯相对厚度小于0.5%,在拉深毛坯的变形区,即法兰部分,极易因失稳而发生起皱现象,而且2A12铝合金塑性成形能力差,成形过程中易出现破裂、起皱等失稳现象^[7-15]。鉴于充液拉深成形的优点,文中针对平底筒形件在充液拉深成形过程中常见的失稳形式,利用数值模拟方法,研究主要工艺参数对其充液拉深成形的影响规律,提出控制零件起皱、破裂等失稳的措施。

1 零件材料及尺寸

研究对象为平底筒形件,其形状尺寸如图1所示,材料为2A12铝合金,状态为退火态,厚度为1 mm,材料参数如下:屈服强度 $\sigma_s = 74$ MPa,抗拉强度 $\sigma_b = 195$ MPa,厚向异性指数 $r = 0.778$,硬化模量 $K = 281$ MPa,硬化指数 $n = 0.179$ 。

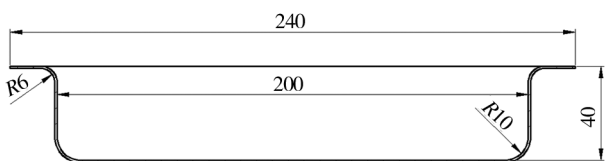


图1 零件形状及尺寸

Fig. 1 Part shape and size

2 有限元模型

采用有限元仿真分析软件 DYNIFORM5.7 进行模拟研究。由于零件具有对称性,选取零件的1/4建立有限元模型,如图2所示。其中凸模圆角半径为10

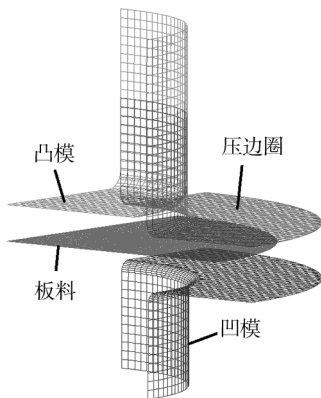


图2 有限元模型

Fig. 2 Finite element model

mm,凹模圆角半径为6 mm,凸模直径为200 mm,凹模直径为202 mm。模具均视为刚性体,坯料选择36号3参数各向异性Barlat材料模型,采用四节点Belytschko-Tsay壳单元。接触条件:板料与凹模、压边圈之间的摩擦因数为0.05,与凸模之间的摩擦因数为0.12,接触类型均为单面接触,凸模下行速度为1 m/s。

3 充液拉深成形有限元分析

影响充液拉深成形的工艺参数包括坯料形状与尺寸、润滑条件、压边间隙、初始液室压力和液室压力加载路径等,其中关键参数是压边力、压边间隙、液室压力及其加载路径,在控制零件破裂及起皱等缺陷中起着重要的作用,因而文中主要研究这4个工艺参数对平底筒形件充液拉深成形的影响规律。

3.1 液室压力加载路径对成形的影响

为研究液室压力加载路径对充液拉深成形的影响,选择7种不同的加载路径进行模拟研究,如图3所示,初始液压设为1 MPa,采用定间隙压边,间隙值为1.1 mm。

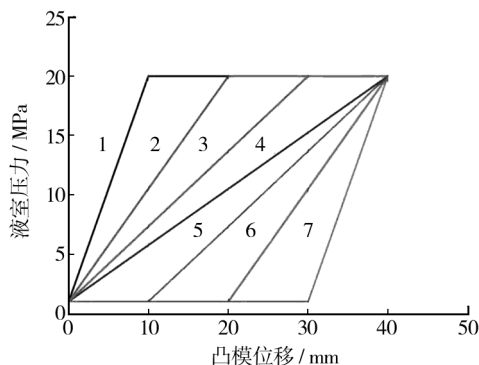


图3 液室压力加载路径

Fig. 3 Chamber pressure loading paths

图4所示为7种不同液室压力加载路径下厚度最大减薄率随凸模位移的变化情况。由模拟结果可以看出,针对某一加载路径,在一定的凸模位移行程内,壁厚减薄率均随着凸模位移的增大而逐渐增大,一定值后,由于液室压力形成的摩擦保持效果,壁厚减薄率基本保持不变直到拉深结束。凸模拉深到位后,加载路径1下零件的壁厚减薄最严重,最大减薄率约为10.2%,加载路径5下零件的壁厚减薄率最小约为4.5%。

凸模位移20 mm之前的不同时刻,零件最大减薄

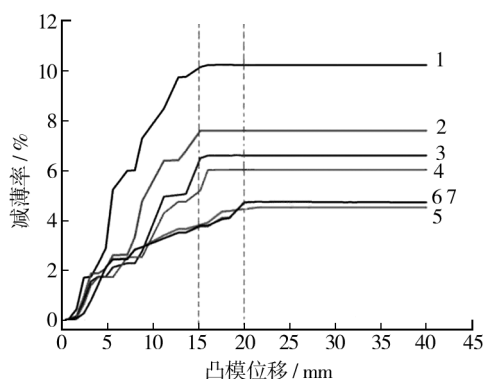


图4 7种液室压力加载路径下厚度减薄率的变化情况

Fig. 4 Changes on thickness reduction rate under seven kinds of pressure loading paths

率随着液室压力加载速率的增大而增大,凸模位移15 mm时不同加载路径下板料的壁厚减薄率如图5所示。这是因为液室压力加载速率越大,液室压力将很快增大到较大值,因而对板料的压力也很大,凹模圆角处的板料较早的受到双向拉应力的作用,板料胀形量过大,所以零件减薄严重。加载路径1在凸模位移到10 mm时,液室压力已达到最大值20 MPa,因而其减薄也最严重。

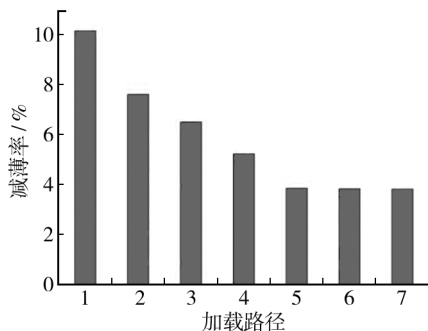


图5 凸模位移15 mm时不同加载路径下板料的减薄率

Fig. 5 Sheet thinning rate under different loading paths at the punch displacement of 15 mm

加载路径6和7下零件的减薄率变化基本相同,凸模位移20 mm之后减薄率大于加载路径5下的减薄率。这是因为成形后期较大的液压促使板料紧贴凸模,增大板料与凸模之间的接触摩擦力,降低筒壁传力区的拉应力,进而抑制了零件的过度减薄。加载路径6和7在成形后期液室压力仍然处于较低水平,难以形成有利的摩擦保持效果,因而零件壁厚减薄率也较大。

比较7种不同的加载路径可知,路径5成形前期液室压力较路径1~4小,成形后期液室压力较加载

路径6和7大,最终零件的壁厚减薄程度最小。因此,在成形过程前期液室压力不宜太大,成形后期适当加大液室压力有利于成形。

3.2 成形液室压力对成形的影响

根据前述结果设定如下图6所示的不同液室压力加载路径,进行数值模拟,得到如图7所示的不同液室压力下零件的减薄率,以及图8所示的不同液室压力下零件的壁厚分布图。

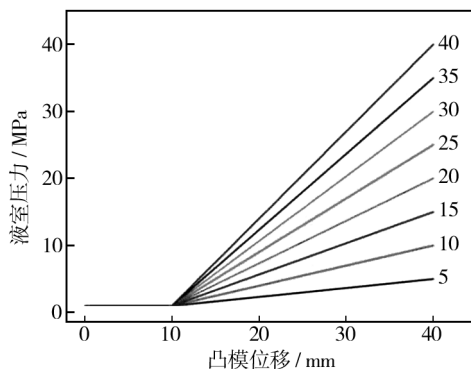


图6 不同液室压力加载路径

Fig. 6 Different chamber pressure loading paths

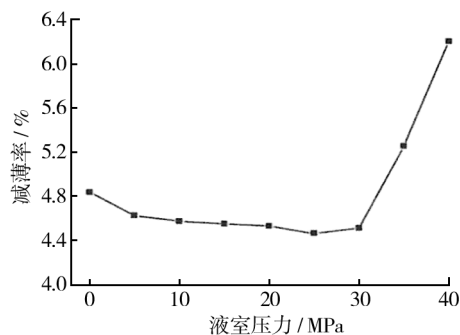


图7 不同液室压力下零件的减薄率

Fig. 7 Thinning rates for parts at different chamber pressures

由模拟结果可以看出,随着液室压力的增大,零件的减薄率随之减小,但当液室压力增大到一定值后,减薄率也随液室压力的增大而增大。这是因为合理的液室压力有利于使零件在成形过程中形成“摩擦保持效果”,减少径向拉应力,避免零件的过度减薄,但当液室压力过大时,凹模圆角处的零件发生反胀变形,零件受到较大的双向拉应力,因而减薄严重。

沿零件某一截面进行等弧线距离壁厚的测量,壁厚测量线如图9所示,提取测量点的壁厚值,绘制得到不同液室压力下的零件壁厚分布图,如图10所示。结果表明,平底区壁厚基本不变化,凸模圆角处零件

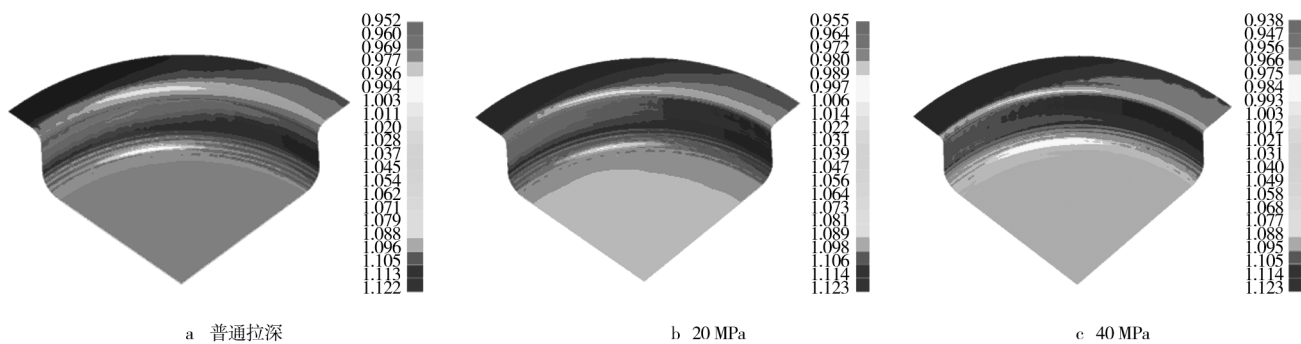


图 8 不同液室压力下的零件壁厚分布

Fig. 8 Part wall thickness distribution at different fluid chamber pressures

减薄最严重,随着液室压力的增大,侧壁区近凸模圆角处零件减薄也逐渐增大,存在破裂的风险。液室压力为 25 MPa 时,零件的减薄最小。

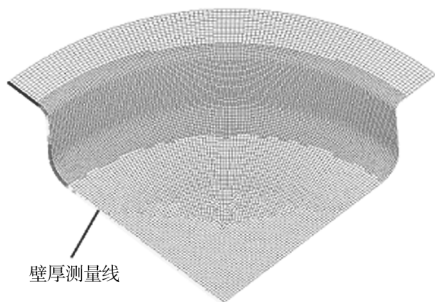


图 9 壁厚测量线

Fig. 9 Wall thickness measuring line

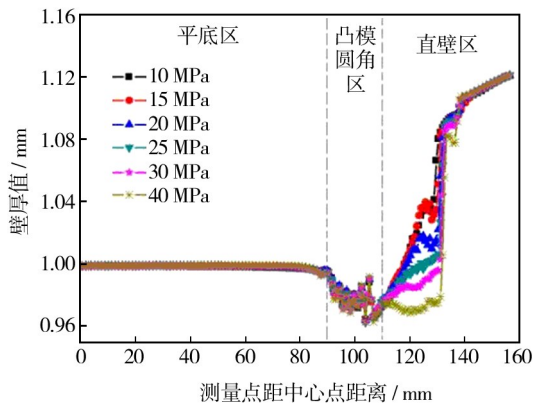


图 10 不同液室压力下的零件壁厚分布

Fig. 10 Wall thickness distribution

3.3 压边间隙对成形的影响

在相同的液室压力加载路径下(选择图 3 中的加载路径 5),设定不同的压边间隙进行数值模拟,得到如图 11 和 12 所示不同压边间隙下零件的减薄率和成形极限示意图。

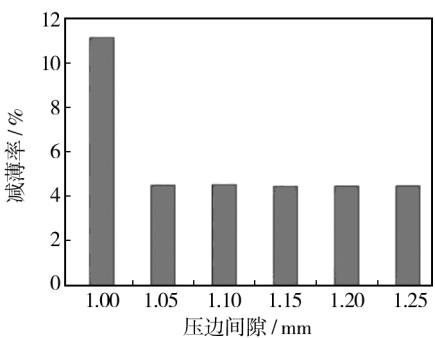


图 11 不同压边间隙下零件的减薄率

Fig. 11 Thinning rates at different blank gaps

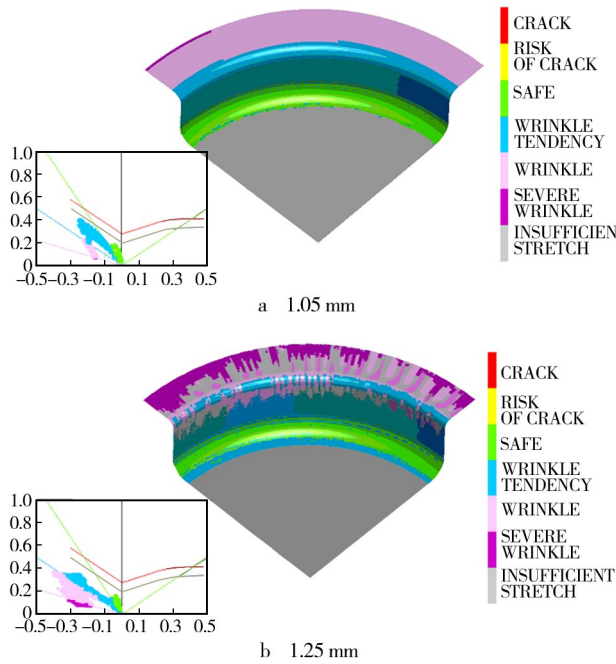


图 12 不同压边间隙下零件的 FLD 示意图

Fig. 12 FLD schematic view at different blank gaps

由结果可知,压边间隙为 1 mm 时,板料明显减薄,而大于 1 mm 后,减薄率基本不再变化。这是因为

压边间隙过小导致板料在法兰区所受到的摩擦力增大,材料流动困难,使得传力区受到的拉应力增大,因而材料减薄严重。过大的压边间隙对改善壁厚减薄效果不再明显,此时法兰区发生严重的起皱。合理的压边间隙既可以避免零件的过度减薄,又可以有效地控制法兰区材料起皱,为避免零件产生此种缺陷,压边间隙应选择 1.05 ~ 1.15 mm。

3.4 压边力对成形的影响

在相同的液室压力加载路径下(选择图 3 中的加载路径 5),设定不同的压边力进行数值模拟,得到如图 13 和 14 所示的不同压边力下零件的减薄率和成形极限示意图。

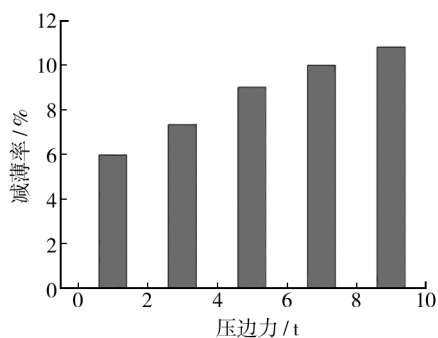


图 13 不同压边力下零件的减薄率

Fig. 13 Thinning rates at different BHF

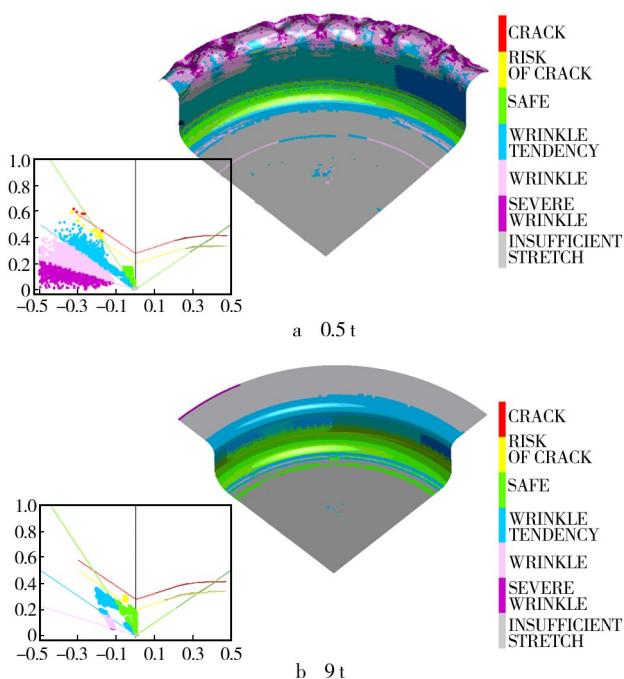


图 14 不同压边力下零件的 FLD 示意图

Fig. 14 FLD schematic at different BHF

由结果可知,零件减薄率随着压边力的增加而逐渐增大。压边力为 0.5 t 时,法兰区发生明显的起皱缺陷,而当压边力为 9 t 时,在直壁区靠近凸模圆角处零件发生严重减薄,有开裂的风险。由此可见,压边力过小时,法兰处板料容易在切向压应力的作用下发生失稳起皱;当压边力过大时,又因为摩擦力增大,材料流动困难,容易发生破裂缺陷。为避免零件发生起皱和破裂的缺陷,压边力应选择在 1 ~ 8 t,而且较低的压边力下材料不容易过度减薄。

相比于定压边间隙压边,采用压边力压边后零件的减薄率均有所增大,因而采用定间隙压边有利于平底筒形件获得更优的壁厚分布。

4 结论

1) 铝合金平底筒形件在充液拉深成形过程,主要的失效形式包括凸模圆角处破裂、法兰区起皱,合理的液室压力加载路径、液室压力和压边间隙有利于避免零件过度减薄和控制法兰边的起皱,采用定间隙压边有利于平底筒形件获得更优的壁厚分布。

2) 成形前期液室压力不宜过大,凸模行程 0 ~ 10 mm 之内,液室压力控制在 2 MPa 以内,10 ~ 40 mm 之间液室压力随凸模下行逐渐增大,最大液室压力在 10 ~ 25 MPa 之间,压边间隙在 1.05 ~ 1.15 mm 之内,可有效避免零件过度减薄和法兰起皱。

参考文献:

- [1] HARTL Ch. Research and Advances in Fundamentals and Industrial Applications of Hydroforming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 167(2/3): 383—392.
- [2] 李涛,郎利辉,周贤宾. 先进板材液压成形技术及其进展[J]. 塑性工程学报, 2006, 13(3): 30—34.
LI Tao, LANG Li-hui, ZHOU Xian-bin. Advanced Technology and Development of Sheet Metal Hydroforming[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2006, 13(3): 30—34.
- [3] 郎利辉,王永铭,谢亚苏. 铝合金异形件充液成形失稳控制策略[J]. 塑性工程学报, 2011, 18(5): 33—37.
LANG Li-hui, WANG Yong-ming, XIE Ya-su. Investigation into the Failure Control during Hydroforming of Specialshaped Aluminum Sheet Part by Finite Element Analysis and Experiment [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2011, 18(5): 33—37.
- [4] MENG Bao, WAN Min, YUAN Sheng, et al. Influence of Cavity Pressure on Hydrodynamic Deep Drawing of Aluminum Alloy Rectangular Box with Wide Flange[J]. Interna-

- tional Journal of Mechanical Sciences, 2013.
- [5] 周玉梅, 雷君相. 圆筒形件充液拉深皱曲和破裂极限的研究[J]. 热加工工艺, 2013, 42(1): 87—90.
ZHOU Yu-mei, LEI Jun-xiang. Investigation of Wrinkle and Fracture Limits of Cylindrical Parts in Hydromechanical Deep Drawing Process[J]. Hot Working Technology, 2013, 42(1): 87—90.
- [6] 杨希英, 郎利辉, 刘康宁等. 筒形件充液热拉深及冷却对性能影响的研究[J]. 精密成形工程, 2015, 7(2): 35—40.
YANG Xi-ning, LANG Li-hui, LIU Kang-ning, et al. The Effect of Warm Hydroforming and Cooling on the Properties of Hydroformed Part[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2015, 7(2): 35—40.
- [7] 郭斌, 中村合彦, 李硕本. 圆筒形件充液拉深成形精度[J]. 塑性工程学报, 1997, 4(3): 92—97.
GUO Bin, LI Shuo-bin. Precision of Cylindrical Part by Hydromechanical Deep Drawing[J]. Journal of Plasticity Engineering, 1997, 4(3): 92—97.
- [8] CHEN B G, XU Y C, YUAN S J. Investigation into Influence of Prejudging on Subsequent Hydrodynamic Deep Drawing[J]. Reviews on Advanced Materials Science, 2013.
- [9] 陈一哲. 2219 铝合金筒形件充液拉深成形研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
CHEN Yi-zhe. Research on Hydromechanical Deep Drawing of 2219 Aluminum Cylindrical Cup[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [10] 陈保国, 徐永超. 预胀对筒形件充液拉深变形和硬化的影响[J]. 材料科学与工艺, 2011, 19(1): 17—20.
CHEN Bao-guo, XU Yong-chao. Influence of Pre-bulging on Deformation and Hardness of Dual-phase Steel Cylindrical Cup by Hydrodynamic Deep Drawing Process[J]. Materials Science and Technology, 2011, 19(1): 17—20.
- [11] LEE M G, KIM C, PAVLINA E J, et al. Advances in Sheet Forming: Materials Modeling, Numerical Simulation, and Press Technologies[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering Transactions of the ASME, 2011.
- [12] 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 Technology of Hydroforming[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009.
- [13] 郎利辉, DANCKERT J, NIELSEN K B. 板液压成形及无模充液拉深技术[J]. 塑性工程学报, 2002, 9(12): 29—34.
LANG Li-hui, DANCKERT J, NIELSEN K B. Plate Hydroforming and Hydromechanical Deep Drawing Technology Dieless[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2002, 9(12): 29—34.
- [14] 李涛, 郎利辉, 安东洋, 等. 航空铝合金复杂构件充液柔性成形过程及质量控制研究[J]. 中国机械工程, 2006, 17(S1): 8—11.
LI Tao, LANG Li-hui, AN Dong-yang, et al. Investigation into the Hydroforming Process and Quality Controlling of Complicated Aircraft Aluminum Part[J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(S1): 8—11.
- [15] NGAILE G, KINSEY B. Advances in Plastic Forming of Metals[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering Transactions of the ASME, 2011.

(上接第85页)

- XU Lan-gui. Variable Wall Thickness Large Taper Thin-walled Aluminum Cans Forming Key Technology Research[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.
- [12] 王哲. 超声旋压材料流变规律及机理研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
WANG Zhe. Ultrasonic Spinning Materials Rheological Regularity and Mechanism Research[D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [13] 刘建华. 多道次普通旋压成形机理与旋轮运动轨迹作用的研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2003.
LI Jian-hua. Research on Forming Mechanism of Multi-pass Conventional Spinning Process and Influence of Roller-trace on the Process[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2003.
- [14] 陈辉. 复杂曲面、薄壁件精密旋压成形技术研究[D]. 成都: 四川大学, 2004.
CHEN Hui. Research on the Turning-forming of Thin and Complicated Contour Surface[D]. Chengdu: Sichuan University, 2004.
- [15] 赵博. 薄壁筒体构件反旋减薄旋压载荷与鼓形规律研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
ZHAO Bo. Research on the Load and Drum of Thin Walled tube During the Spinning Process[D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [16] 时丰兵. 卧式普通旋压机床结构优化设计及整机研制[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
SHI Feng-bing. Horizontal Ordinary Spinning Machine and the Structure Optimization Design Research[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.