

铝合金汽车顶盖充液成形的数值模拟

郎利辉, 巫永坤, 陈杨锴, 王耀, 孙志莹

(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** 研究铝合金汽车顶盖拉延工序的充液成形工艺。**方法** 基于有限元分析软件 Dynaform, 利用带局部刚性凹模整形的被动式充液成形工艺, 通过建立有限元分析模型, 优化成形过程中的关键工艺参数, 分析变形规律并进行质量控制。**结果** 成形过程中的液室压力加载路径、压边力、拉延筋, 以及坯料形状等工艺参数对成形影响较大。液室压力不宜过早加载。液室压力过大或压边力过小不利于顶部产生充分塑性变形。压边力过大极易造成顶盖圆角处的破裂。**结论** 该成形工艺可行, 且数值模拟的准确性及适用性较高, 采用该成形工艺可得到表面质量良好, 未出现起皱、破裂缺陷的合格零件。

关键词: 充液成形; 数值模拟; 汽车顶盖; 铝合金; 液室压力

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2017.03.003

中图分类号: TG394 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2017)03-0013-06

Numerical Investigation into the Hydroforming of Aluminum Alloy Automobile Roof Cover

LANG Li-hui, WU Yong-kun, CHEN Yang-kai, WANG Yao, SUN Zhi-ying

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

ABSTRACT: To study the hydroforming process for aluminum alloy automobile roof cover drawing operation. By means of the passive hydroforming process with local rigid die shaping, the key process parameters in the forming process are optimized, the deformation rules are analyzed, and the quality control is carried out using the finite element analysis model in the finite element analysis software Dynaform. The results show that the process parameters such as cavity pressure loading paths, blank holder force, drawbead, and blank shape during the forming process have a greater impact on the forming. The cavity pressure should not be prematurely loaded. Excessive cavity pressure or excessive blank holder force is not conducive to having full plastic deformation for the top of the roof cover. Excessive blank holder force can easily cause the rupture at the corner of automobile roof cover. It can be known that the forming process is feasible, and the accuracy and applicability of the numerical simulation are high. The qualified parts with better surface quality and no wrinkling and cracking defects can be obtained by the forming process.

KEY WORDS: hydroforming; numerical simulation; automobile roof cover; aluminum alloy; cavity pressure

汽车轻量化能够显著降低油耗、提高汽车的动力性能。目前主要依靠结构的优化、新型材料的使用以及柔性制造工艺来实现汽车轻量化, 选择铝合金材料应用在车身系统上是轻量化的关键技术之一。汽车外

覆盖件通常选用 5 系和 6 系铝合金材料, 该材料强度较高、性能较好。研究表明, 使用铝合金的发动机罩内外板能够达到 54% 左右的轻量化率^[1-2]。

铝合金汽车外覆盖件的成形存在一些难题。铝合

收稿日期: 2017-03-14

基金项目: 国家科技重大专项 (2014ZX04002041)

作者简介: 郎利辉 (1970—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为液压柔性成形技术与装备、粉末热等静压技术。

金板材延伸率较低、屈服比大、塑性应变比小, 常温下的成形性较差。同时, 铝合金板材抗凹性较差, 成形过程容易产生桔皮、表面极易划伤。成形后回弹较严重, 因此, 需要新的柔性成形工艺, 成形出表面质量良好、成形精度较高的铝合金汽车覆盖件。当前, 先进的板材充液成形技术以其突出的优点, 被广泛应用于汽车、航空航天等行业^[3]。同时, 以有限元法为基础的数值模拟技术的完善, 可以较为准确地对板料成形过程进行数值模拟, 从而实现成形工艺的设计与优化, 预测成形过程中出现的破裂、起皱、回弹。板材充液成形是采用流体介质(乳化液, 油或粘性介质)作为传力介质代替传统拉深成形过程中的刚性凸模或者凹模, 在成形过程中依靠传力介质的作用, 使板料贴向凸模或凹模成形的一种柔性成形技术^[4]。在充液拉深成形过程中, 凹模上表面与坯料下表面之间有流体溢流, 产生溢流润滑的作用, 减少凹模与板料的摩擦力, 使板料更容易流入凹模圆角。同时板料与凸模之间由于液室压力的作用产生了较大的摩擦力, 这部分摩擦力承担了一部分变形力, 使板料危险截面上的变形减小, 从而提高板材的成形极限^[5]。板材充液成形用流体介质代替凹模或者凸模, 可以减少一部分模具制造的费用, 并且可减少模具之间相互研配的时间, 同时在流体介质作用下, 板料与凹模接触过程变少, 从而减少零件表面的划伤, 最终可以得到表面质量较高的零件^[5-6]。

在汽车顶盖成形领域, 虽然我国对传统钢板冲压成形已经积累了较为丰富的经验, 但是对于铝合金材料的顶盖成形研究还较少, 且对于不同车型的顶盖, 尺寸与形状相差较大, 成形工艺也会有所差别^[7]。文中对某型铝合金汽车顶盖零件的充液成形工艺进行研究, 通过工艺补充型面的设计、利用有限元数值模拟软件对充液成形工艺过程进行分析, 优化工艺参数, 控制成形过程中出现的起皱、破裂缺陷。通过现场试验, 证明了所设计的充液成形工艺对该铝合金汽车顶盖成形的适用性。

1 零件概述与材料性能

某型铝合金汽车顶盖外形尺寸见图 1, 长为

表 1 铝合金 6016-T4 材料力学性能
Tab.1 Mechanical properties of AA 6016-T4

方向/(°)	弹性模量 E/MPa	屈服强度 σ_s/MPa	抗拉强度 σ_b/MPa	各向异性指数 r	加工硬化指数 n	延伸率 $\delta/\%$
0	68200	138	246	0.73	0.22	26.3
45	69800	132	238	0.45	0.22	26.3
90	68200	131	233	0.60	0.22	23.0

2 零件成形工艺分析

该顶盖表面质量以及精度要求较高, 而在成形后

1526.668 mm, 宽为 1068.112 mm, 高为 120.472 mm。该型汽车顶盖无天窗, 整体曲面较为平缓。顶盖外露面需要保证一定的刚度, 同时其表面质量以及几何精度要求较高。顶盖外露面与侧壁部分的过渡圆角半径为 $R5\text{ mm}$, 侧壁底部与法兰部分的过渡圆角半径为 $R4\text{ mm}$ 。圆角半径较小, 同时由于需要满足顶盖外露面刚度要求, 保证顶部一定的塑性变形, 使得顶盖 4 个角部在成形过程中容易发生破裂。4 个角也是顶盖成形过程中减薄率最大的位置, 侧壁高度为 10 mm, 顶盖法兰部分具有一些局部关键特征。法兰处需要保证成形精度, 从而将顶盖与车架部分相搭接。所用材料为铝合金 6016-T4 板料, 厚度为 1.0 mm。通过单向拉伸试验得到的力学性能见表 1 和图 2。

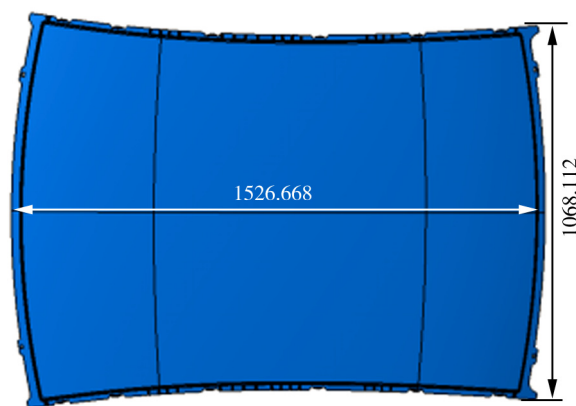


图 1 零件几何尺寸

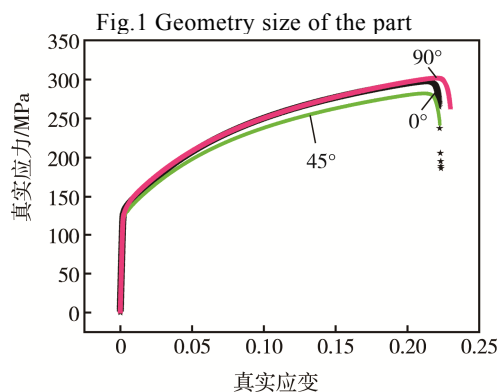


图 2 6016-T4 铝合金板材应力-应变曲线
Fig.2 The relation curve between true stress and true strain of AA 6016 sheet metal

回弹量较大。利用传统刚性模冲压成形该铝合金顶盖, 极易在表面造成划伤, 出现冲击线、滑移线。同时, 顶盖顶部外露面拉深相对较浅, 在满足一定刚度要求下, 顶部需要达到一定的塑性变形, 因此成形过

程中需要在顶盖前后、左右侧产生一定的拉延阻力。拉延阻力将影响顶盖4个角附近的流料,且4个角的圆角半径较小,极易发生破裂。传统顶盖刚性模冲压成形凸、凹模往往需要根据回弹结果进行反复修模,工作量大。采用充液成形技术,可替代部分凸模或凹模,同时,可以使坯料在流体介质作用下贴合凸模(或凹模)而成形,形成“摩擦保持”效果。在凹模(或凸模)与坯料表面之间产生流体润滑,更易流料,因此利用充液成形技术,有利于提高铝合金顶盖成形的成形极限,改善成形质量。

针对该铝合金顶盖第1道拉延工序,如采用主动式充液成形工艺,因该顶盖顶部面积较大,板料受液体作用力大,需要较大的压边吨位以阻止板料完全流入凹模,且顶盖圆角较小,板料完全贴模需要很大的液室压力。虽然主动式充液能利用流体介质使板料胀形,顶部胀形变薄量相对较大,易达到刚度要求,但小圆角贴模困难,设备吨位要求高。零件在20 MPa主动充液胀形后贴模间隙见图3,可以看出,在20 MPa液压胀形下,顶盖圆角以外贴模间隙较大,最大达到2.909 mm,因而采用被动式充液成形工艺。无凹模被动式充液工艺很难保证顶盖圆角、法兰处局部特征、侧壁等部位的完全贴模,因此采取局部刚性凹模整形的被动式充液工艺成形该顶盖。利用液体代替部分凹模,顶盖圆角以外部分用刚性凹模来整形。在发挥被动式充液成形优势的同时,利用局部刚性凹模整形出局部小特征,以保证拉延工序板料的贴模。



图3 零件在20 MPa主动充液胀形后贴模间隙

Fig.3 The gap between part and die after active hydraulic bulging under 20 MPa pressure

3 成形数值模拟

3.1 有限元模型

基于Dynaform数值模拟软件对该顶盖进行成形工艺过程的数值模拟。在有限元分析中采用36号BARLAT各向异性材料模型。坯料网格划分采用Belytschko-Tsay壳单元。充液成形有限元分析模型

中,坯料与凹模、压边圈以及凸模的摩擦因数设置为0.17。该零件的有限元模型见图4。



图4 有限元模型

Fig.4 Finite element model

3.2 关键工艺参数对成形的影响

利用带局部刚性凹模整形的被动式充液工艺成形顶盖,为了满足顶部的刚度要求,顶部减薄率要基本大于3%,保证一定的塑性变形,同时不发生破裂失稳、起皱等缺陷。顶盖成形过程中往往4个圆角处较容易发生破裂。考虑后续整形工序,4个圆角需要尽可能留足安全裕量的同时,尽可能提高顶部的塑性变形,然而,这两者是相矛盾的。加大顶盖顶部的塑性变形量的同时,4个圆角壁厚减薄往往会相应增大,甚至发生破裂失稳。带局部刚性凹模整形的被动式充液成形过程中的液室压力加载路径、压边力、拉延筋、坯料形状等工艺参数都会影响顶盖的成形质量。

为研究液室压力加载路径,压边力对成形的影响,设置了3种不同的液室压力加载路径(见图5),并在此基础上,改变压边力参数。考虑顶盖成形零件的要求,以顶盖顶部最小减薄率以及4个圆角处最大减薄率来分析液室压力加载路径、压边力这2个工艺参数的影响,结果见图6。

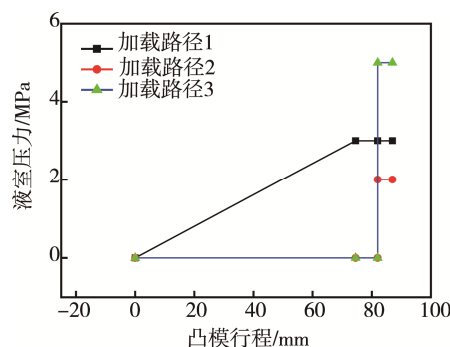


图5 液室压力加载路径

Fig.5 Cavity pressure loading paths

在顶盖被动式充液成形过程中,液室压力加载过早,板料贴向凸模,首先接触顶盖顶部最高处的凸模位置,在液体压力作用下,一定程度上抑制了顶部的塑性变形。虽然圆角处壁厚减薄率能够适当减小,但顶部塑性变形不充分,导致刚度不足。液室压力过大,板料紧紧贴向凸模,不利于顶盖顶部充分变形,同时凹模圆角处板料胀形变薄,如聚料过多而将发生叠料。液室压力过小,则不能有效抑制圆角处板料的变薄。为了提高顶部塑性变形量,通过设置拉延筋来增

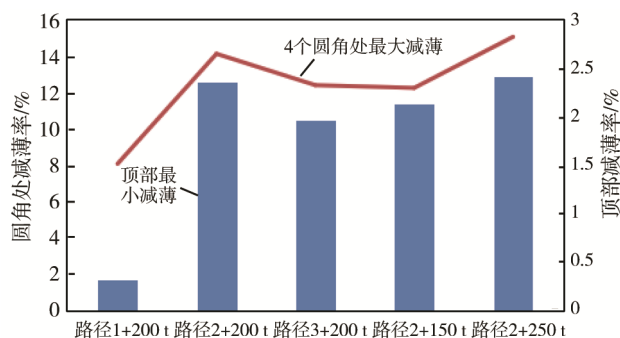


图6 不同液室压力加载路径与压边力下的壁厚减薄情况
Fig.6 Wall thickness reduction under different cavity pressure loading paths and blank holder forces

大拉伸阻力, 且成形过程中需要合适的压边力。

3.3 工艺优化结果与分析

通过优化充液成形过程中的液室压力加载路径、压边力、坯料形状、拉伸筋等参数后, 得到了较优的成形结果。顶盖顶部减薄率大于3%, 局部大于5%。在顶盖后侧圆角处零件整体最大减薄率为13.642%, 顶盖后侧另一个圆角减薄率为12.618%。前侧2个圆角减薄率分别为11.637%和11.256%。顶盖工艺优化后数值模拟结果的壁厚分布见图7。

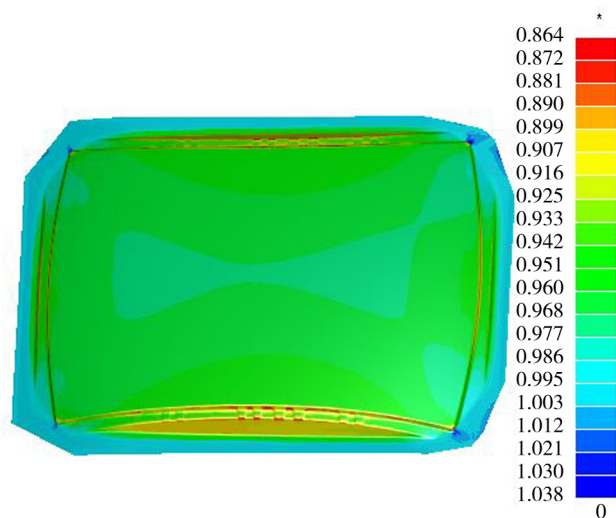


图7 工艺优化后零件壁厚分布(mm)

Fig.7 Wall thickness distribution of the part after optimization

顶部能满足刚度要求。成形后壁厚分布较为均匀。后侧2个圆角附近的压料面由于优化坯料后, 压边范围减少, 在液室压力作用下, 流料增多, 且在液反胀下得以聚料, 料多后在该处有一定的增厚。成形极限见图8。成形过程中顶盖顶部中心最高位置附近A点, 以及成形后4个圆角中最大减薄处B点的壁厚变化见图9。顶盖顶部的A点在未加载液室压力时, 壁厚持续变薄, 能够保证一定的塑性变形。在后期液室压力加载后, 在液室压力作用下, 一定程度上抑制了顶部的减薄, 壁厚变薄趋于平缓。顶盖圆角主

要在成形后期合模成形出圆角特征, 圆角减薄主要发生在2个阶段。第1阶段在加载液室压力后, 板料贴向凸模表面的顶盖圆角位置, 受凸模拉深力与液体压力反胀作用, 板料受拉变形, 壁厚变薄; 第2阶段在成形后期, 由刚性凹模与凸模整形出最终圆角特征, 合模过程圆角处板料继续减薄, 液室压力能够反胀聚料, 同时增大流料, 从而避免圆角处的过度减薄。

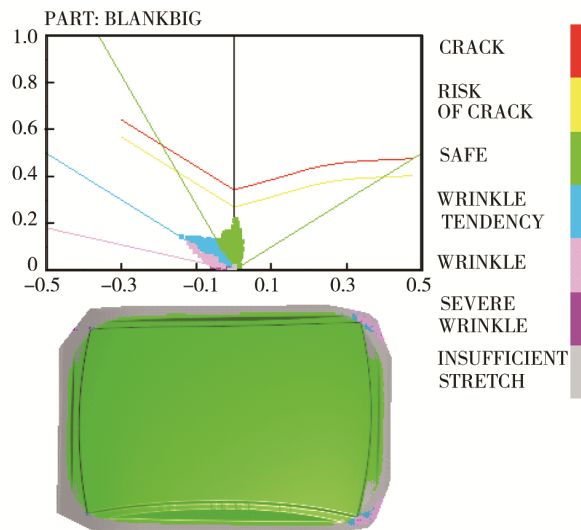


图8 成形极限

Fig.8 Forming limit diagram of the part

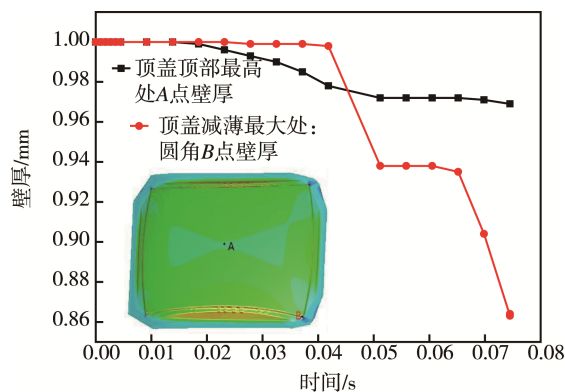


图9 成形过程壁厚变化

Fig.9 Variation of wall thickness during forming process

4 试验

基于数值模拟分析的结果, 试验在5000 t板材充液成形设备上完成。设备及该顶盖充液成形模具见图10。通过试模, 现场调试, 试验过程中, 压边力过大会造成顶盖圆角处出现颈缩, 如图11a所示; 压边间隙较大时, 在液室压力作用下, 流料较多, 容易在圆角附近的法兰处发生失稳起皱, 如图11b所示。通过优化成形过程的工艺参数, 最终得到合格的成形件见图12。验证了带局部刚性凹模整形的被动式充液成形工艺成形该顶盖的可行性。成形后的顶盖未出现起皱、破裂等缺陷, 表面质量良好。



图10 试验设备及模具
Fig.10 Experiment equipment and tools

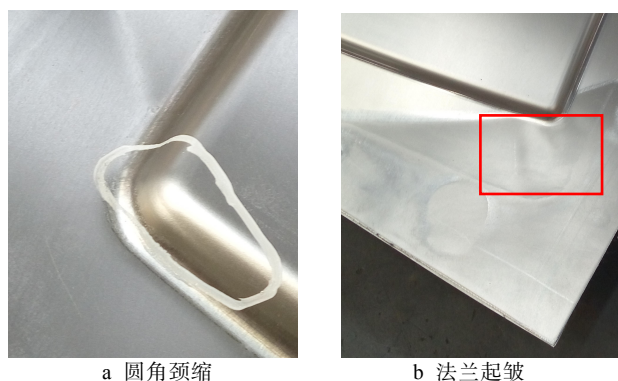


图11 典型缺陷
Fig.11 Typical defects

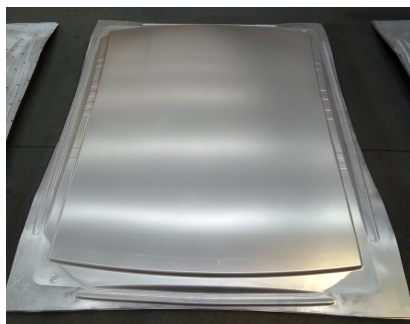


图12 合格零件
Fig.12 Qualified part

5 结论

1) 针对该顶盖零件的特征, 提出了带局部刚性凹模整形的被动式充液成形工艺。通过数值模拟对顶盖充液成形过程进行了分析, 获得了零件成形过程中的成形规律以及壁厚分布情况。经过分析优化, 最终得出了成形结果满足要求, 符合实际条件的成形工艺。通过试验, 完成了顶盖第1道拉延工序, 验证了带局部刚性凹模整形的被动式充液成形工艺的可行性, 也验证了数值模拟的准确性。

2) 该成形过程中, 液室压力加载路径、压边力、拉延筋、坯料形状等工艺参数对成形结果影响较大。

在顶盖侧边采用圆形拉延筋以增大拉延阻力。压边力过大, 虽然增加了顶盖顶部的塑性变形, 但容易造成圆角破裂。压边力过小, 则顶部板料变形不充分, 刚度不足。压边力在 150 t 左右较为合适。

3) 针对顶盖外露面刚度要求, 顶部需保证一定的塑性变形量, 同时不出现起皱、破裂缺陷, 液室压力加载不宜过早。过早加载在一定程度上抑制了顶盖顶部的减薄, 不利于产生塑性变形, 导致刚度不足。在液室压力作用下, 可以防止顶盖圆角处板料的过度变薄, 避免出现破裂失稳。

4) 采用带局部刚性凹模整形的被动式充液成形工艺成形该顶盖, 经试验调试工艺稳定后, 表面质量良好, 未发生起皱、破裂等缺陷。为后续切边后整形工序留有足够的安全裕度。

参考文献:

- [1] 李传福, 张丽萍. 浅谈铝合金材料在未来汽车轻量化中的应用与发展[J]. 装备制造技术, 2015(4): 143—145.
LI Chuan-fu, ZHANG Li-ping. Discussion on the Aluminum Alloy Materials in Automotive Lightweight Application and Development in the Future[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2015(4): 143—145.
- [2] 郎利辉, 张士宏, 康达昌, 等. 板液压成形及无模充液拉深技术[J]. 塑性工程学报, 2002, 9(4): 29—34.
LANG Li-hui, ZHANG Shi-hong, KANG Da-chang, et al. About Sheet Hydroforming and Hydromechanical Deep Drawing without Draw Die[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2002, 9(4): 29—34.
- [3] HARTL C. Research and Advances in Fundamentals and Industrial Applications of Hydroforming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 167(2/3): 383—392.
- [4] 王耀, 郎利辉, 孙志莹, 等. 铝合金发动机罩内板充液成形工艺研究[J]. 精密成形工程, 2016, 8(5): 47—52.
WANG Yao, LANG Li-hui, SUN Zhi-ying, et al. Hydroforming for the Aluminium Alloy Inner Panel of Automotive Engine Hood[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2016, 8(5): 47—52.
- [5] 苑世剑, 刘伟, 徐永超. 板材液压成形技术与装备新进展[J]. 机械工程学报, 2015, 51(8): 20—28.
YUAN Shi-jian, LIU Wei, XU Yong-chao. New Development on Technology and Equipment of Sheet Hydroforming[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(8): 20—28.
- [6] 郎利辉, 丁少行, 杨希英, 等. 汽车后备箱门内板充液成形数值模拟与试验验证[J]. 汽车工程, 2015(5): 599—604.
LANG Li-hui, DING Shao-hang, YANG Xi-ying, et al. Numerical Simulation and Test Verification of Hydroforming for the Inner Panel of Vehicle Trunk Door[J]. Automotive Engineering, 2015(5): 599—604.

- [7] 王耿. 汽车顶盖成形工艺设计分析[J]. 汽车工艺师, 2016(10): 55—59.
WANG Geng. Design and Analysis of Automobile Top Cover Forming Process[J]. Modern Components, 2016 (10): 55—59.
- [8] 李毅. 覆盖件用 6000 系铝合金粘性介质压力成形性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
LI Yi. Research on Formability of 6000 Series Aluminum Alloy for Panel Under Viscous Pressure Forming[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [9] 郎利辉, 杨希英, 孙志莹, 等. 基于响应面法的汽车覆盖件充液成形工艺参数多目标优化[J]. 汽车工程, 2015, 37(4): 480—484.
LANG Li-hui, YANG Xi-ying, SUN Zhi-ying, et al. Multi-objective Optimization of Hydroforming Process Parameters for Automotive Closure Panels Based on Response Surface Method[J]. Automotive Engineering, 2015, 37(4): 480—484.
- [10] 李钦生, 陈炜, 黄振荣, 等. 汽车顶盖拉延成形研究及工艺参数优化[J]. 锻压技术, 2011, 36(5): 19—22.
LI Qin-sheng, CHEN Wei, HUANG Zhen-rong, et al. Research on Forming Process of Automobile Cover and Technological Parameter Optimization[J]. Forging & Stamping Technology, 2011, 36(5): 19—22.
- [11] 徐国艳, 高峰, 杜发荣. 车顶盖拉延件的设计及成形分析[J]. 塑性工程学报, 2007, 14(4): 16—18.
XU Guo-yan, GAO Feng, DU Fa-rong. Design and Forming Analysis of the Stamping Part for Vehicle Covering[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2007, 14(4): 16—18.
- [12] 王峰, 钱顺峰. 轿车顶盖冲压工艺[J]. 模具制造, 2012(2): 35—39.
WANG Feng, QIAN Shun-feng. Stamping Process of Car Top-Cover[J]. Die & Mould Manufacture, 2012(2): 35—39.
- [13] WANG Wu-rong, CHEN Guan-long, LIN Zhong-qin. Application of New VBHF Optimization Strategy to Improve Formability of Automobile Panels with Aluminum Alloy Sheet[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(3): 471—477.
- [14] 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]. International Journal of Mechanical Sciences, 2013, 77(77): 217—226.
- [15] ZAMPALONI M, ABEDRABBO N, POURBOGHRAT F. Experimental and Numerical Study of Stamp Hydroforming of Sheet Metals[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2003, 45(11): 1815—1848.
- [16] SINGH S K, KUMAR D R. Effect of Process Parameters on Product Surface Finish and Thickness Variation in Hydro-mechanical Deep Drawing[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 204(1/2/3): 169—178.