

铝合金深腔厚壁舱体充液锻压校形工艺

周蕾蕾¹, 苏 灿¹, 王清峰², 高 慧¹, 周小京¹, 吴利明¹, 刘 雷¹,
韩 冰¹, 王胜龙¹, 秦中环¹, 初冠南²

(1. 北京航星机器制造有限公司, 北京 100013; 2. 哈尔滨工业大学(威海) 材料科学与工程学院, 山东 威海 264209)

摘要: 针对铝合金深腔结构件校形困难、校形后型面精度差的问题, 提出充液锻压校形深腔厚壁结构件的新方法。通过模拟仿真和试验验证, 证明了充液锻压校形 6005A-T6 铝合金深腔厚壁结构件的可行性, 探索关键工艺参数对校形结果的影响规律, 确定最佳工艺参数。针对校形产品设计充液锻压校形模具, 进行铝合金深腔厚壁结构件校形试验。结果表明: 利用充液锻压校形工艺, 通过控制工艺参数范围, 产品的内圆弧贴模收缩, 外轮廓宽度增大; 校形后的产品满足技术要求且和理论模型对比, 型面尺寸精度可以达到 ± 0.3 mm 内, 对于壁厚达 30 mm 的产品背部, 型面尺寸精度仍可达到 ± 0.3 mm。

关键词: 深腔厚壁舱体; 充液锻压; 精密校形; 三维扫描; 液体密封

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.08.016

中图分类号: TG376.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 08-0110-06

Hydraulic upsetting-shaping process of aluminum alloy cabin body with deep cavity and thick wall

Zhou Leilei¹, Su Can¹, Wang Qingfeng², Gao Hui¹, Zhou Xiaojing¹, Wu Liming¹, Liu Lei¹,
Han Bing¹, Wang Shenglong¹, Qin Zhonghuan¹, Chu Guannan²

(1. Beijing Hangxing Machinery Manufacturing Co., Ltd., Beijing 100013, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology (Weihai), Weihai 264209, China)

Abstract: For the problems of difficult shaping and poor profile accuracy after shaping for aluminum alloy structural components with deep cavity, a new method of hydraulic upsetting-shaping for structural components with deep cavity and thick wall was proposed. Then, the feasibility of hydraulic upsetting-shaping for 6005A-T6 aluminum alloy structural component with deep cavity and thick wall was proved by simulation and experimental verification, and the influence laws of key process parameters on the shaping results were explored to determine the optimal process parameters. Furthermore, the hydraulic upsetting-shaping die was designed for shaping product, and the shaping experiment of aluminum alloy structural components with deep cavity and thick wall was conducted. The results show that by controlling the range of process parameters in the hydraulic upsetting-shaping process, the inner arc sticking die of product shrinks and the outer contour width increases. After shaping, the product can meet the technical requirements, and the dimensional accuracy of the profile can reach ± 0.3 mm compared with the theoretical model. For the back of products with a wall thickness of up to 30 mm, the dimensional accuracy of the profile can still reach ± 0.3 mm.

Key words: cabin body with deep cavity and thick wall; hydraulic upsetting; precision shaping; 3D scanning; liquid sealing

随着飞行器对轻量化、高性能的要求越来越高^[1], 深腔舱体类结构件随之受到越来越多的关注及应用。对于此类产品加工方法的研究多是针对薄壁舱体类产品^[2-4]; 而对于壁厚较厚且腔体深度较大的结构件的校形加工方案鲜有报导。

对于铝合金的校形方案主要有: 高温气胀校

形^[5], 需要高温胀形, 校形效率低; 热塑成形^[6], 需要高温, 工序复杂, 校形效率低; 电磁成形^[7], 在大型复杂型腔校形中, 由于其成形能量的限制, 所以很难得到较好的校形结果。对于充液锻压校形技术, 曹梦凯^[8]针对薄壁大尺寸截面产品充液锻压校形工艺进行了研究。周永新等^[9]已针对大径厚比薄壁变曲率构件的校形进行了试验, 证明充液锻压校形工艺可以有效地减少起皱风险, 从而提高其形状精度。王清峰等^[10]验证了充液锻压工艺在铝合金复杂多腔挤压件校形上的可行性。然而, 关于利用

收稿日期: 2023-08-29; **修订日期:** 2023-12-03

基金项目: 航天科工集团工艺振兴项目 (GYZX2021B003)

作者简介: 周蕾蕾 (1989-), 女, 硕士, 工程师

E-mail: 409545609@qq.com

充液镦压技术对于大尺寸厚壁舱体类产品的校形研究，目前还未进行验证。

本文提出利用充液镦压校形技术对于深腔厚壁舱体类产品进行校形的工艺方案，实现深腔厚壁舱体类产品的精密校形；通过仿真模拟及试验验证，证明了充液镦压校形技术对于深腔厚壁舱体类产品实现精密校形的可行性，并且实现了校形后产品的型面尺寸精度达到 $\pm 0.3\text{ mm}$ 。

1 校形方案分析

1.1 材料分析

6005A 铝合金是一种中等强度的 Al-Mg-Si 系铝合金，具有密度低、挤压性好、焊接性优、力学性能优异等特点，在民用型材挤压中得到了广泛应用，尤其是在大型薄壁、空心型材等方面的应用^[11-13]。热处理状态为 T6 的 6005A 铝合金的力学性能见表 1。

表 1 6005A-T6 铝合金的力学性能

Table 1 Mechanical properties of 6005A-T6 aluminum alloy

| 参数 | 屈服强度/ MPa | 抗拉强度/ MPa | 伸长率/ % | 杨氏模量/ GPa | 泊松比 |
|----|--------------|--------------|-----------|--------------|------|
| 数值 | 239 | 266 | 20 | 69 | 0.33 |

1.2 模型分析

本文所述试验件为长度约为 1200 mm、宽度约为 800 mm、高度约为 500 mm 的深腔厚壁舱体类产品，如图 1 所示，试验件的壁厚大部分在 3.5~5.0 mm 范围内，背部壁厚达 30 mm。本试验重点关注产品背部校形效果，要求整体产品校形精度在 $\pm 0.4\text{ mm}$ 以内。本试验件的结构特点为：多型腔结构、型腔狭窄且深度较深、局部壁厚较厚；传统工艺无法校形，更无法实现精密校形。

1.3 工艺分析

本文提出利用充液镦压校形对深腔厚壁舱体类产品进行精密校形的新方案，其技术原理为：内压力作为支撑，依靠端部冲头的机械力进行压缩变形，在内压力和机械力的配合下坯料贴模并达到全域屈服，从而实现校形的目的。原理如图 2 所示。

2 仿真模拟及模具设计

2.1 最佳工艺参数范围

采用 Abaqus 软件对试验件的充液镦压校形进行仿真模拟，其结果如图 3 和图 4 所示。由图 3 可知，零件的初始形状与要求形状偏差较大，背部中间部

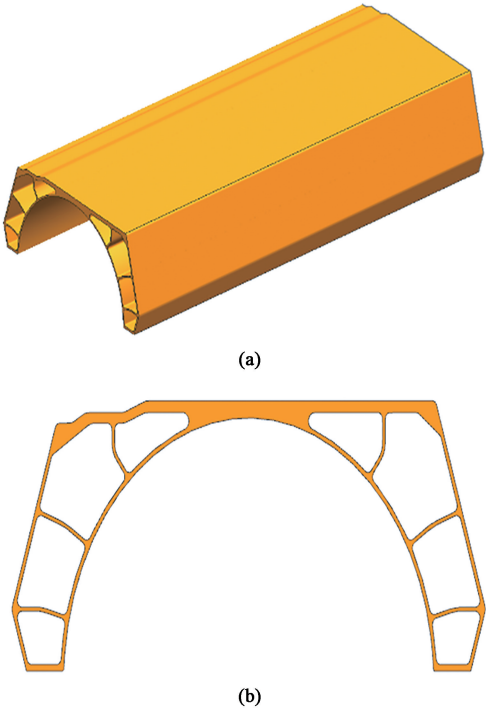


图 1 试验件模型

(a) 模型轮廓图 (b) 模型横截面图

Fig. 1 Model of experiment piece

(a) Contour diagram of model (b) Cross-section diagram of model

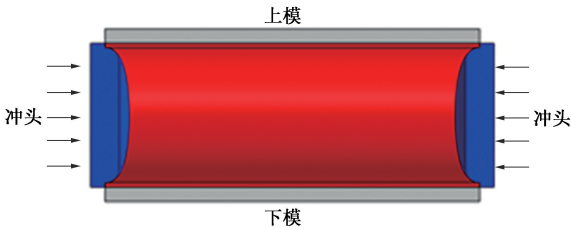


图 2 充液镦压工作原理图

Fig. 2 Working principle diagram of hydraulic upsetting

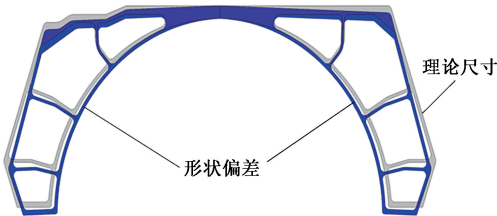


图 3 校形前充液镦压校形仿真结果

Fig. 3 Simulation result of hydraulic upsetting-shaping before shaping

位的零件与理论模型可以贴合，左右两端均出现较大偏差；而校形之后，零件的形状明显变化，基本与要求形状一致，零件背部整体可以与理论模型完全贴合，如图 4 所示。可以看出，校形后零件的主要尺寸均在设计要求范围内，模拟结果说明校形后零件的形状精度显著提高。

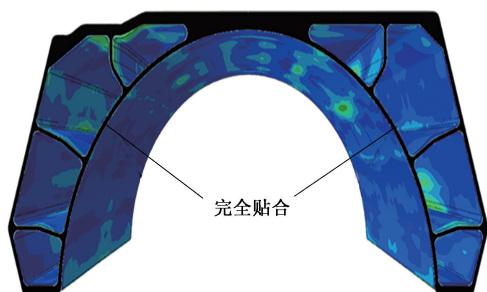


图 4 校形后充液锻压校形仿真结果

Fig. 4 Simulation result of hydraulic upsetting-shaping after shaping

对于铝合金校形最常遇到的校形后零件回弹问题,为进一步控制校形后零件回弹量,现对关键工艺参数的压缩量和内压进行调整,控制内压为 100 MPa,调整不同的压缩量对于校形零件进行等效应力仿真模拟,模拟结果如图 5 所示。由图 5 可知:当轴向压缩量为 10 mm 时,零件背部的等效应力明显集中于中间部位;当轴向压缩量为 20 mm 时,零件的整体等效应力均增大,但是背部中间部位的等效应力集中现象得到缓解;轴向压缩量为 50 mm 时,等效应力集中于零件两端。将零件最外轮廓作为关键尺寸,对不同轴向压缩量下校形时零件的回弹量进行统计,结果如表 2 和图 6 所示,其中, L 前端面指按照图 5 方式放置的产品左端面, L 后端面指按照图 5 方式放置的产品右端面。由图 6 和表 2 可以明显看出,随着压缩量的增大,校形后零件的回弹量减小。可以通过调整充液锻压校形的关键工艺参数轴向压缩量和内压来控制回弹量的大小,从而实现精密校形的目的。

对于充液锻压技术,其关键工艺参数为充液内压和锻挤轴向压缩量;通过调整充液内压和轴向压缩量的大小,进行仿真模拟,在高度方向取 2 个关键尺寸 ΔH_1 、 ΔH_2 (前后 2 个端面的高度) 作为评价背部平面度校形结果的关键尺寸;取长度方向的 2 个关键尺寸 ΔL_1 、 ΔL_2 (前后 2 个端面的宽度) 作为评价背部扭拧度校形结果的关键尺寸,统计其回弹结果,如图 7 所示。由图 7 可知,随着轴向压缩量的增加,高度方向的回弹量逐渐减小,长度方向的回弹量逐渐增大;随着内压的增加,高度方向的回弹量逐渐增大,长度方向的回弹量逐渐减小。因此,确定轴向压缩量为 65~85 mm、内压为 100~150 MPa 为最佳工艺参数范围。

2.2 模具设计

根据产品模型及充液锻压校形技术特点设计充液锻压校形模具,如图 8 所示。模具包含上模垫板、

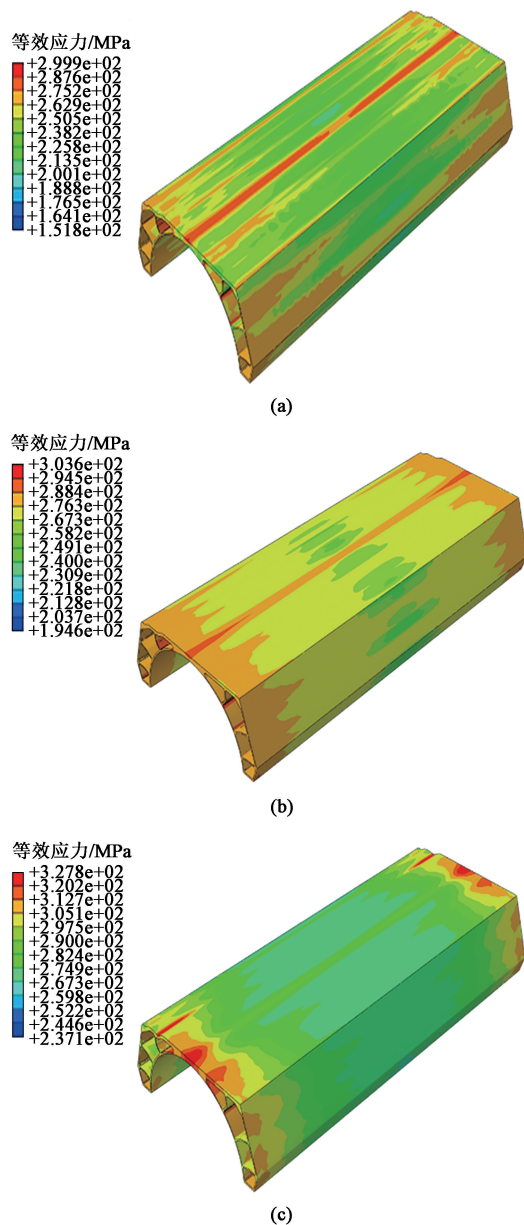


图 5 不同轴向压缩量校形时的等效应力云图

(a) 10 mm (b) 20 mm (c) 50 mm

Fig. 5 Equivalent stress nephograms during shaping with different axial compression amounts

上模、挡液板、进液管、冲头、下模、下模垫板,其中,关键部件为左右冲头。左右冲头和成形产品实现金属和金属之间密封,此密封问题为充液锻压能否对于多腔舱体类产品进行校形的关键。本研究采用渐进密封的方案,对于零件及工作液进行密封,以便对于薄壁部位校形到位后继续增加内压,实现背部厚壁部分的校形。

3 试验验证

为验证充液锻压对于深腔厚壁舱体类产品精密

表 2 不同轴向压缩量校形时的回弹量 (mm)

Table 2 Springback amounts during shaping with different axial compression amounts (mm)

| 轴向压缩量 | 理论值 | L 前端面 | | L 后端面 | |
|-------|-----|--------|------|--------|------|
| | | 模拟值 | 回弹量 | 模拟值 | 回弹量 |
| 5 | 821 | 817.98 | 3.02 | 817.99 | 3.01 |
| 10 | | 818.61 | 2.39 | 818.63 | 2.37 |
| 15 | | 818.96 | 2.04 | 818.95 | 2.05 |
| 20 | | 819.25 | 1.75 | 819.24 | 1.76 |
| 30 | | 819.49 | 1.51 | 819.48 | 1.52 |
| 40 | | 819.91 | 1.09 | 819.92 | 1.08 |
| 50 | | 820.3 | 0.70 | 820.29 | 0.71 |
| 70 | | 820.8 | 0.20 | 820.79 | 0.20 |
| 90 | | 820.9 | 0.10 | 820.89 | 0.11 |
| 100 | | 820.93 | 0.07 | 820.93 | 0.07 |

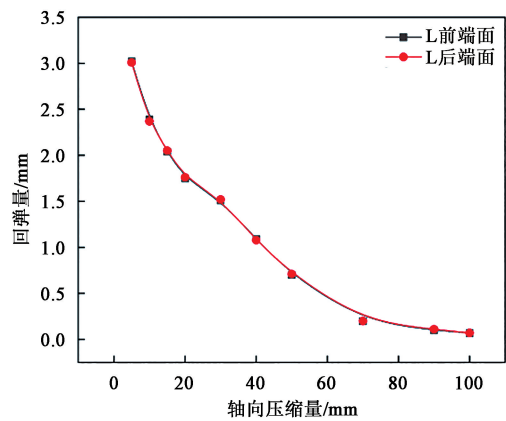


图 6 不同轴向压缩量校形时零件回弹量

Fig. 6 Springback amounts of parts during shaping with different axial compression amounts

校形的可行性,同时验证仿真模拟结果的准确性,采用模拟的最佳工艺参数进行充液镦压校形试验。将轴向压缩量设置为 65~85 mm,内压设置为 100~150 MPa,以 10 为单位设梯度参数,利用控制变量法进行试验,试验结果表明轴向压缩量为 70 mm、内压为 100 MPa 时校形效果最好,其校形前后对比如图 9 所示。由图 9 可知,校形前,零件与理论模型形状的差别较大,背部零件和理论模型的型面偏差范围为 (-17, 2) mm;校形后零件与理论模型的型面尺寸基本一致,整体型面尺寸偏差在 ±0.3 mm 内,背部壁厚较厚处也实现了型面尺寸精度达±0.3 mm。试验结果表明,充液镦压校形工艺可以实现深腔厚壁舱体类结构件的精密校形。

4 结论

(1) 本文提出一种深腔厚壁舱体类产品精密校形的

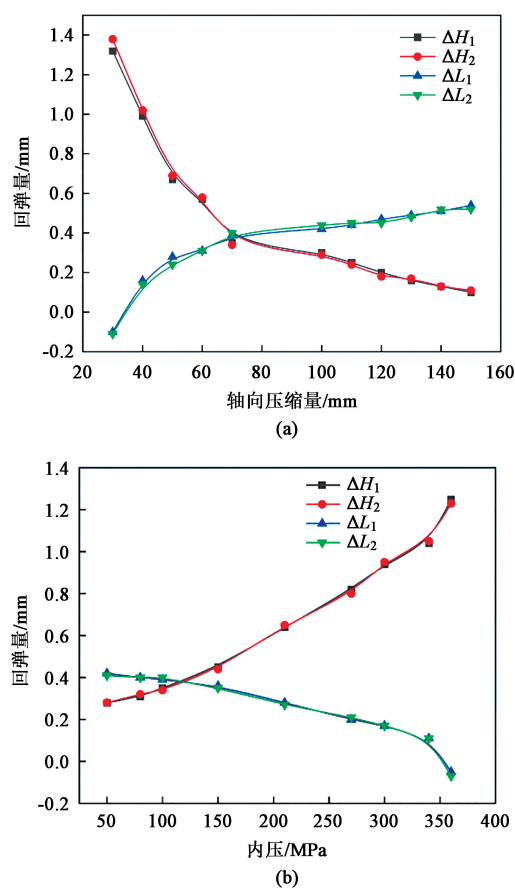


图 7 轴向压缩量 (a) 和内压 (b) 对于零件回弹量的影响

Fig. 7 Influence of axial compression amount (a) and internal pressure (b) on springback amount of parts

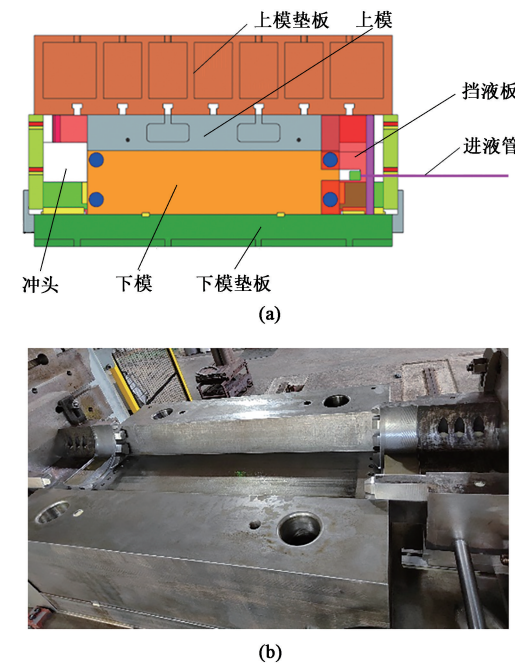


图 8 模具结构图 (a) 及实物图 (b)

Fig. 8 Die structure diagram (a) and physical photo (b)

新工艺,通过仿真模拟和试验证明了此方案是可行的。

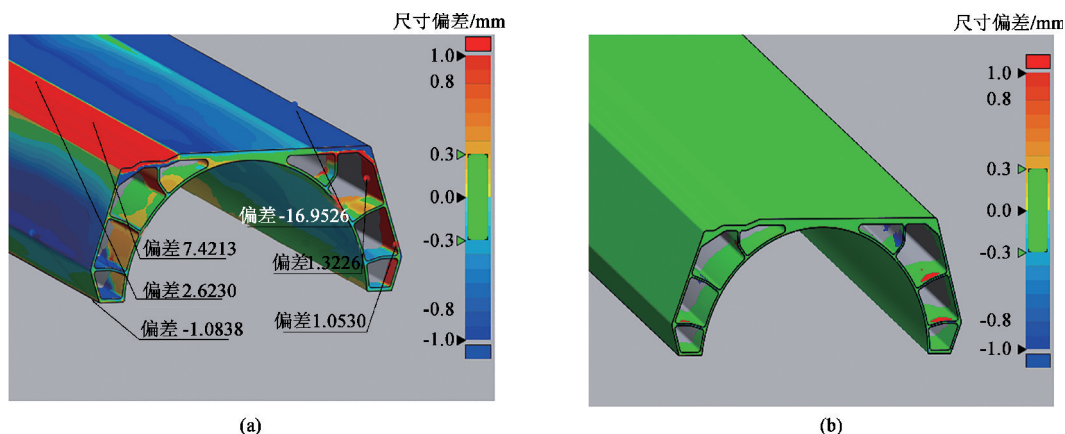


图 9 校形前 (a) 和校形后 (b) 的三维扫描结果图

Fig. 9 3D scanning result diagrams before (a) and after (b) shaping

(2) 探索充液锻压校形的关键工艺参数对于零件校形后回弹量的影响规律, 确定了最佳工艺参数。

(3) 根据关键工艺参数对于零件校形后回弹量的影响规律调整试验参数, 得到的产品壁厚达 30 mm, 实现型面尺寸精度达 ± 0.3 mm。

(4) 创新性地提出在测量关键尺寸的基础上增加三维扫描测量, 以分析产品型面的尺寸精度, 关注产品的整体型面, 验证了充液锻压校形技术对于壁厚较厚产品校形的可行性。

(5) 设计充液锻压校形模具, 研究金属和金属之间的密封方案, 解决了金属和金属之间的密封难题。

(6) 通过试验验证, 校形后零件型面的尺寸精度在 ± 0.3 mm 内, 实现了深腔厚壁舱体类产品的精密校形。

参考文献:

- [1] 廖文和, 戴宁. 航空航天结构轻量化设计制造技术发展现状与挑战 [J]. 南京航空航天大学学报, 2023, 55 (3): 347-360.
Liao W H, Dai N. Development and challenge of lightweight design and manufacturing technology for aerospace structures [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2023, 55 (3): 347-360.
- [2] 杨晓峰, 刘永红, 黄攀宇, 等. 大口径深孔薄壁铝合金舱体的加工工艺 [J]. 机械制造, 2023, 61 (3): 44-46.
Yang X F, Liu Y H, Huang P Y, et al. Processing technology of large diameter, deep hole, and thin wall aluminum alloy cabins [J]. Machinery, 2023, 61 (3): 44-46.
- [3] 王波, 游东洋, 李永君, 等. 薄壁异型铸造舱体的精密划线方法 [P]. 中国: CN201410098299.9, 2016-04-27.
Wang B, You D Y, Li Y J, et al. Precision marking method for thin-walled special-shaped casting cabin [P]. China: CN2014-10098299.9, 2016-04-27.
- [4] 谭晓芳. 薄壁舱体零件加工变形分析与精车夹具设计 [D]. 湘潭: 湘潭大学, 2015.
Tan X F. Analysis of Processing Deformation and Design of Precision Turning Fixture for Thin Walled Cabin Parts [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2015.
- [5] 秦中环, 徐柄桐, 李保永, 等. 5A06 铝合金薄壁球形封头高温气胀成形工艺研究 [J]. 航天制造技术, 2019 (1): 7-11, 31.
Qin Z H, Xu B T, Li B Y, et al. Research on high temperature gas expansion forming process of 5A06 aluminum alloy thin wall spherical head [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2019 (1): 7-11, 31.
- [6] 李志强, 郭和平. 超塑成形/扩散连接技术的应用与发展现状 [J]. 航空制造技术, 2004 (11): 50-52.
Li Z Q, Guo H P. Application and development status of superplastic forming/diffusion bonding technology [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2004 (11): 50-52.
- [7] 李春峰, 于海平. 电磁成形技术理论研究进展 [J]. 塑性工程学报, 2005, 12 (5): 1-7.
Li C F, Yu H P. Progress in theoretical research on electromagnetic forming technology [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2005, 12 (5): 1-7.
- [8] 曹梦凯. 薄壁复杂截面铝合金管件充液锻压校形工艺研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
Cao M K. Research on Liquid Filling Upsetting and Calibration Technology for Thin Wall and Complex Section Aluminum Alloy Pipe Fitting [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [9] 周永新, 冯苏乐, 杨学勤, 等. 大径厚比薄壁变曲率构件充液拉深成形技术 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (4): 126-133.
Zhou Y X, Feng S L, Yang X Q, et al. Hydro-drawing technology for thin-walled variable curvature part with large diameter to thickness ratio [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (4): 126-133.
- [10] 王清峰, 孙磊, 初冠南. 大型复杂多腔挤压件校形工艺数值模拟与实验研究 [J]. 锻压技术, 2023, 47 (5): 282-286.
Wang Q F, Sun L, Chu G N. Numerical simulation and experimental research on the shaping process of large and complex multi-cavity extrusion parts [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 47 (5): 282-286.
- [11] 徐振宇. 卫星天线扫描机构控制系统的研究与实现 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.
Xu Z Y. Research and Implementation of Control System for Satellite Antenna Scanning Mechanism [D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2012.