

板料成形

钛合金板材反向粘性介质压力胀形及性能研究

杨朋飞¹, 王 璋², 陈元琨¹, 高铁军¹

(1. 沈阳航空航天大学 航空宇航学院, 辽宁 沈阳 110136; 2. 中国航发哈尔滨东安发动机有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150060)

摘要: 针对钛合金板材室温下塑性变形能力差的问题, 采用实验和有限元分析相结合的方法, 进行了反向粘性介质压力胀形研究, 借助粘性介质性能及反向压力改善板材的受力状态和变形规律, 提高钛合金板材胀形性能及成形极限。首先, 进行了钛合金板材半球形凸模反向粘性介质压力胀形过程分析, 得到了不同反向粘性介质压力试件的等效应力及壁厚的分布规律; 在此基础上, 通过不同椭圆度凸模反向粘性介质压力胀形研究, 分析了试件复杂程度与反向粘性介质压力胀形质量及性能的关系, 并通过应变网格法构建了不同反向粘性介质压力条件下的成形极限图。研究结果可为钛合金板材反向粘性介质压力成形工艺参数的确定提供重要参考。

关键词: 钛合金; 反向粘性介质压力胀形; 胀形性能; 椭圆度; 成形极限

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.03.005

中图分类号: TG302

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 03-0034-06

Study on reverse viscous medium pressure bulging and performance for titanium alloy sheet

Yang Pengfei¹, Wang Zhang², Chen Yuankun¹, Gao Tiejun¹

(1. College of Aerospace Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;

2. AECC Harbin Dongan Engine Co., Ltd., Harbin 150060, China)

Abstract: Aiming at the poor plastic deformation ability of titanium alloy sheet at room temperature, the reverse viscous medium pressure bulging was studied by combining experiment and finite element analysis, and with the help of viscous medium performance and reverse pressure, the stress state and deformation law of sheet were improved to improve the bulging performance and forming limit of titanium alloy sheet. In the research process, the reverse viscous medium pressure bulging process of titanium alloy sheet with hemispherical punch was analyzed, and the distribution laws of equivalent stress and wall thickness of different reverse viscous medium pressure specimens were obtained. On this basis, the relationship between the complexity of specimen and the quality and performance of reverse viscous medium pressure bulging was analyzed by the study of reverse viscous medium pressure bulging with different ellipticity punches, and the forming limit diagram under different reverse viscous medium pressure conditions was constructed by strain grid method. The research results provide an important reference for determining the process parameters of reverse viscous medium pressure forming of titanium alloy sheets.

Key words: titanium alloy; reverse viscous medium pressure bulging; bulging performance; ellipticity; forming limit

钛合金具有密度低、强度高、屈强比大、耐高温以及耐腐蚀等优点, 广泛应用于航空航天、生物医学和石油化工等重要领域。尤其是在航空航天领域, 钛合金自 20 世纪 50 年代首次在飞机机身上应

用以来, 钛合金零件数量越来越多, 结构也愈来愈复杂, 钛合金用量已成为衡量飞机选材先进程度和航空工业发展水平的重要指标。然而, 与传统金属材料相比较, 由于钛合金自身的伸长率低、变形抗力大, 室温下钛合金板材的塑性变形能力较差, 成形过程中容易发生过度减薄以及破裂等问题, 很难成形出复杂形状的钣金零件^[1-4]。

为了提高钛合金的塑性变形能力, 一般多采用一定温度条件下的热成形方法, 并借助材料的高温软化效应, 降低变形抗力、提高塑性变形能力。现有资料显示, 在航空制造领域中 80% 以上的钛合金

收稿日期: 2023-08-06; **修订日期:** 2023-11-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52075347); 辽宁省高等学校基本科研面上项目 (LJKZ0192)

作者简介: 杨朋飞 (1995-), 男, 硕士研究生

E-mail: 1437937721@qq.com

通信作者: 高铁军 (1977-), 男, 博士, 教授

E-mail: tiejun_gao@163.com

钣金零件是采用热成形制造的,但高温加热、高温模具、高温过程质量控制等也较大幅度地增加了零件的制造难度和生产成本。然而,对于材料塑性变形能力的提高,除了采用加热方式外,还可以通过改变板材受力状态、优化加载路径等方式,同时也可以选择新的成形工艺等方法^[5-8]。

粘性介质压力成形是近年来发展起来的一种软模成形工艺,选用半固态、可流动及具有一定速率敏感性的高粘度聚合物作为成形用凸模(或凹模)。现有研究表明,复杂形状薄壁零件粘性介质压力成形过程中,多采用刚性模具作为凹模、粘性介质作为凸模,在正向粘性介质压力条件下进行成形。如高铁军等^[9]对复杂形状TA2钛合金半管件粘性介质压力成形进行了分析,并成形出满足条件的零件;汪凯旋等^[10]对底部中空方盒形件粘性介质压力成形进行了有限元分析,得到了坯料预制孔形状和尺寸对其流动及变形方式的影响规律。而关于粘性介质作为凹模方面的研究较少,对于形状复杂的锥形、半球形、抛物线形等深腔类钣金件,采用反向压力的成形质量及效果一般要优于正向压力^[11-15]。因此,本文对不同反向粘性介质压力条件下的钛合金板材胀形性能进行了系统研究。

1 实验方案及材料

1.1 实验原理及装置

图1为反向粘性介质压力胀形原理,成形过程

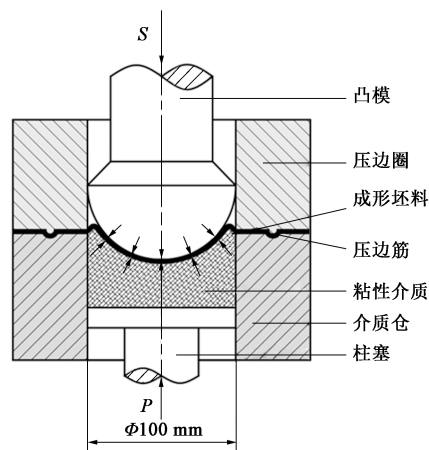


图1 反向粘性介质压力胀形原理

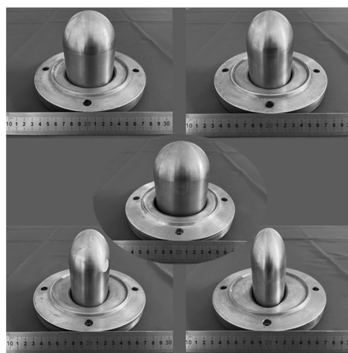
Fig. 1 Principle of reverse viscous medium pressure bulging

中成形坯料置于粘性介质与凸模之间,通过压边圈与介质仓之间的压边筋压紧,限制法兰区材料流动,通过控制凸模向下运动及反向粘性介质压力之间的耦合作用和变形路径,提高板材的胀形性能。图1中, P 为柱塞压力, S 为凸模下行距离。

图2为钛合金板材反向粘性介质压力胀形装置及模具,主要由胀形模具与液压控制系统两大部分组成。胀形模具由胀形凸模、压边圈及凹模等组成,考虑到零件复杂程度与胀形性能的关系,胀形过程选取凸模椭圆度 η 分别为1.0、0.9、0.8、0.7和0.6,凸模长轴固定不变,为100 mm。反向粘性介质压力大小通过调整液压回路节流阀进行控制。



(a)



(b)

图2 反向粘性介质压力胀形实验装置(a)及模具(b)

Fig. 2 Experimental equipment (a) and dies (b) for reverse viscous medium pressure bulging

1.2 实验材料及力学性能

实验用钛合金牌号为TA1,该材料钛的含量较高,成形性能较为优异,主要用于非承力结构件,如飞机的内蒙皮、发动机波纹板等。实验用TA1钛合金板材的厚度为0.5 mm,通过单向拉伸实验得到

的真实应力-真实应变曲线如图3所示,材料的屈服强度为350 MPa、极限强度为500 MPa、伸长率为20%。同时,为了便于胀形试件的应变分析,胀形前采用光纤激光标刻机在坯料表面印制直径为 $\Phi 2.5$ mm的圆形网格。

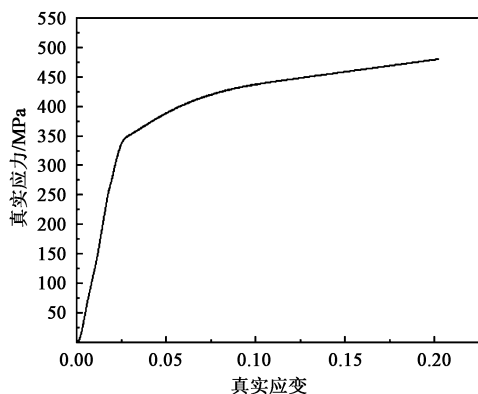


图3 TA1钛合金板材真实应力-真实应变曲线

Fig. 3 True stress-true strain curve for TA1 titanium alloy sheet

2 有限元分析模型

采用有限元软件 Ansys/Ls-Dyna 对钛合金板材反向粘性介质压力胀形过程进行仿真分析。建模过程中考虑到胀形零件及模具结构的对称性,在不影响计算精度和质量的情况下,为减少运算时间、提升运算效率,采用 1/4 模型辅以约束条件进行过程仿真。所建立的有限元分析模型如图 4 所示,其中粘性介质采用 SOLID164 实体单元,凸模、压边圈等采用 SHELL163 壳单元,为保证计算精度,所划分的网格尺寸均为 1.0 mm。同时分析过程中,对柱塞分别施加 0、2、4、6 和 8 MPa 的 5 种反向粘性介质压力。

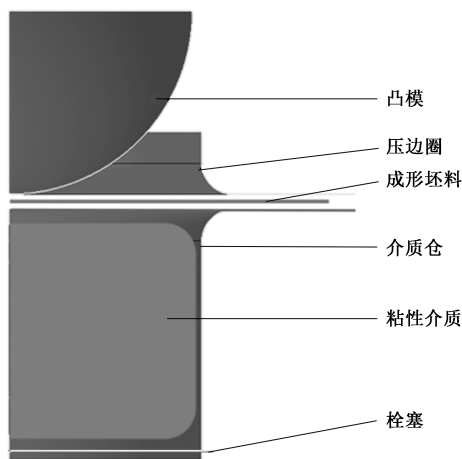


图4 有限元分析模型

Fig. 4 Finite element analysis model

3 有限元分析结果

图 5 为反向粘性介质压力胀形过程,主要包括

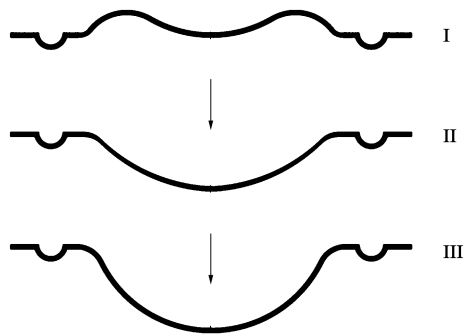


图5 反向粘性介质压力胀形过程

Fig. 5 Process of reverse viscous medium pressure bulging

3 个阶段:阶段 I, 胀形凸模与板材接触并保持不动,之后通过柱塞向上加载粘性介质使其达到指定压力,此时胀形试件形状与传统刚性凸模胀形不同,表现出一定的预反胀形效果;阶段 II, 在指定反向粘性介质压力作用下凸模向下移动实现胀形,直至预反胀形形状消失;阶段 III, 凸模继续向下移动进行完全胀形,直至试件破裂。

3.1 椭圆度 $\eta=1.0$ 凸模反向粘性介质压力胀形

图 6 为阶段 I 椭圆度 $\eta=1.0$ 时、不同反向粘性介质压力下胀形试件的截面及等效应力分布情况,其中, $h_1 \sim h_5$ 为不同反向粘性介质压力下试件预反胀形高度。此时,坯料在反向粘性介质压力作用下,变形主要集中在凸模中心与压边圈凹模口之间,并形成了一定的预反胀形效果。不同反向粘性介质压力条件下预反胀形试件高度分别为 0.0、6.3、7.6、9.1 和 10.4 mm,随着反向粘性介质压力的增大而增大;预反胀形试件的最大等效应力分别为 0.0、369.9、381.8、391.2 和 398.3 MPa,随着反向粘性介质压力的增大而增大,最大等效应力主要位于胀形凸模中心与预反胀形最高处之间的过渡区域。这是由于板材受到凸模与粘性介质的摩擦力以及预反胀形等因素的影响,从而使最大等效应力由胀形试件中心向外侧偏移。

图 7 为阶段 II 椭圆度 $\eta=1.0$ 时预反胀形效果消除时的胀形试件截面形状及等效应力分布情况。当板材完全消除预反胀形后,反向粘性介质压力为 0、2、4、6 和 8 MPa 对应的凸模移动距离 $S_1 \sim S_5$ 分别为 15.08、16.85、19.51、21.29 和 24.31 mm,对应的等效应力分别为 365.8、373.7、386.4、406.0 和 429.3 MPa。反向粘性介质压力越大,消除预反胀形所需要的凸模移动距离越大,对应的等效应力也越大。

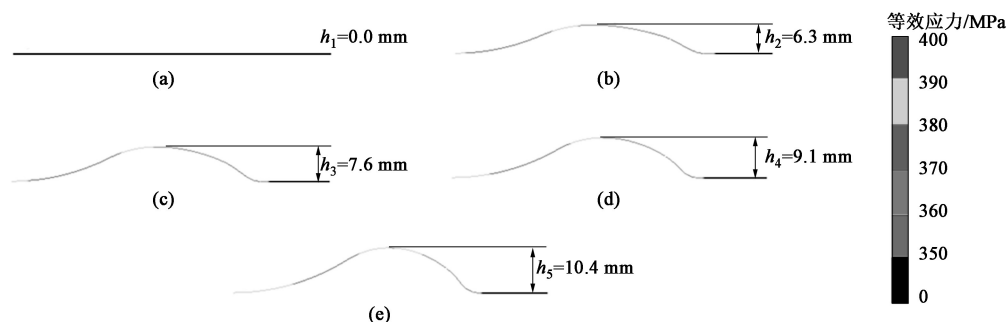


图6 阶段I不同反向粘性介质压力下胀形试件截面形状及等效应力分布

(a) 0 MPa (b) 2 MPa (c) 4 MPa (d) 6 MPa (e) 8 MPa

Fig. 6 Cross-sectional shapes and equivalent stress distributions of bulged parts under different reverse viscous medium pressures in stage I

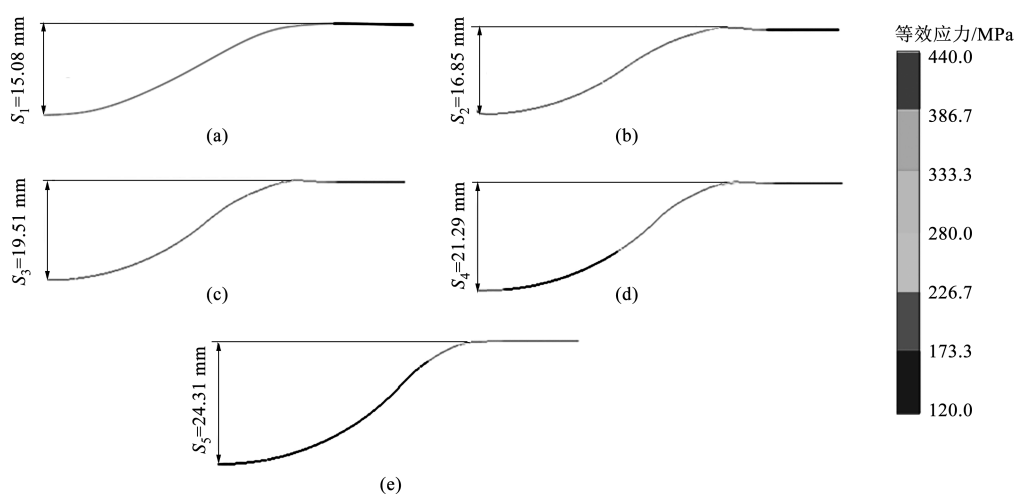


图7 阶段II不同反向粘性介质压力下胀形试件截面形状及等效应力分布

(a) 0 MPa (b) 2 MPa (c) 4 MPa (d) 6 MPa (e) 8 MPa

Fig. 7 Cross-sectional shapes and equivalent stress distributions of bulged parts under different reverse viscous medium pressures in stage II

图8为阶段III椭圆度 $\eta=1.0$ 时不同反向粘性介质压力条件下凸模下行距离与胀形试件最小壁厚分布关系曲线,相比刚模胀形,施加反向粘性介质压力能够减缓胀形试件壁厚的减薄,且随着反向粘性介质压力的增大,减缓效果有一定的提升。

3.2 不同椭圆度凸模反向粘性介质压力胀形

假设胀形破裂试件的最小壁厚为0.365 mm,那么凸模椭圆度 η 为1.0、0.9、0.8、0.7和0.6时,无反向粘性介质压力条件下对应的板材胀形高度分别为28.0、26.6、25.2、23.5和21.7 mm,随着凸模椭圆度的降低,相同最小壁厚条件下的胀形高度不断下降。因此,成形零件的复杂程度对板材胀形性能具有极大的影响。

图9为上述不同椭圆度胀形高度条件下施加6 MPa的反向粘性介质压力与无反向粘性介质压力(0 MPa)胀形试件的最大等效应力对比。反向粘性介质压力为0 MPa,椭圆度 η 分别为1.0、0.9、

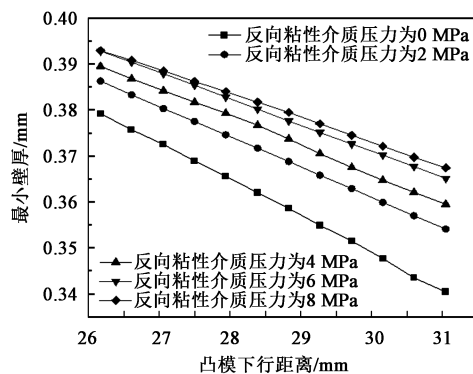


图8 阶段III凸模下行距离与胀形试件最小壁厚关系曲线

Fig. 8 Relationship curves between downward distance of punch and minimum wall thickness of bulged parts in stage III

0.8、0.7和0.6时,对应的最大等效应力分别为505.1、511.0、515.5、519.1和520.5 MPa。反向粘性介质压力为6 MPa时,对应的最大等效应力分别为476.2、486.6、490.9、494.6和497.5 MPa,

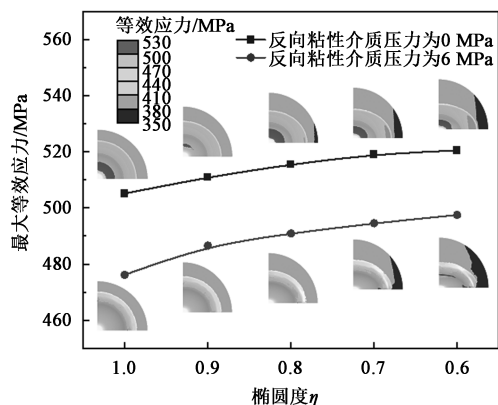


图 9 0 和 6 MPa 反向粘性介质压力下不同椭圆度凸模胀形试件的最大等效应力分布

Fig. 9 Maximum equivalent stress distributions of bulged parts with different ellipticity punches under 0 and 6 MPa reverse viscous medium pressures

随着椭圆度 η 的减小, 板材所受最大等效应力不断提高, 成形难度增大。但与无反向粘性介质压力相比, 6 MPa 的反向粘性介质压力下, 板材的最大等效应力均有所降低。这说明反向粘性介质压力的存在可以有效降低成形零件的应力集中, 抑制成形过程中板材的破裂。

4 实验验证及结果分析

在 0 和 6 MPa 反向粘性介质压力下, 进行不同椭圆度凸模胀形并得到成形试件的极限胀形高度对比如图 10 所示。当椭圆度 η 分别为 1.0、0.9、0.8、0.7 和 0.6 时, 在无反向粘性介质压力条件下的极限胀形高度分别为 29.1、27.5、26.4、25.4 和 24.5 mm; 施加 6 MPa 的反向粘性介质压力后, 对应的极限胀形高度分别为 31.2、29.5、27.9、26.7 和 25.7 mm。对比可知, 施加 6 MPa 的反向粘性介质压力后, TA1 钛合金板材不同椭圆度凸模极限胀形高度分别提高了 7.5%、7.3%、5.7%、5.1% 和 4.9%, 随着椭圆度 η 的减小, 成形难度的增大, 提高幅度有所减小。

图 11 为通过应变网格法测量得到的不同反向粘性介质压力下的成形极限曲线, 对比无反向粘性介质压力胀形 (0 MPa), 施加 6 MPa 反向粘性介质压力后的成形极限略有提升, 但幅度小于极限胀形高度的提升幅度。对比图 10 和图 11 可知, 反向粘性介质压力胀形过程除了应力状态外, 变形路径的改变对提高极限胀形高度的影响最大。

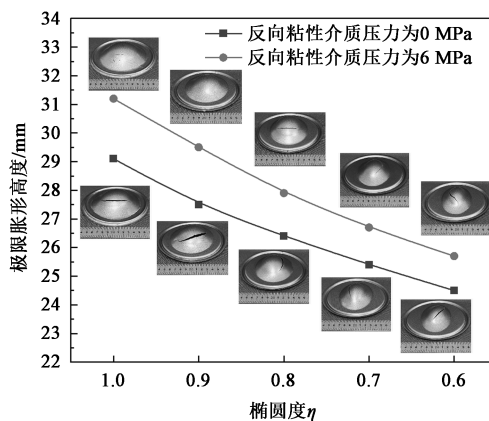


图 10 0 和 6 MPa 反向粘性介质压力下不同椭圆度凸模极限胀形高度对比

Fig. 10 Comparison of limit bulging height with different ellipticity punches under 0 and 6 MPa reverse viscous medium pressures

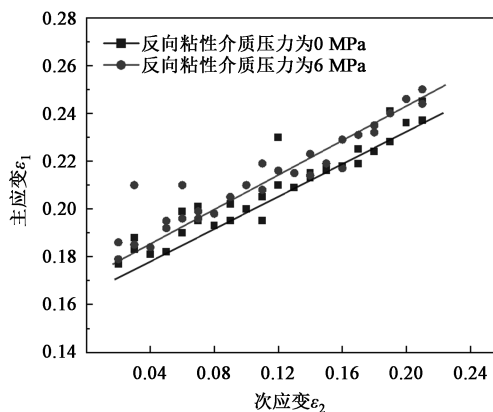


图 11 0 和 6 MPa 反向粘性介质压力下的成形极限图

Fig. 11 Forming limit diagram under 0 and 6 MPa reverse viscous medium pressures

5 结论

(1) 钛合金板材胀形过程中, 通过对钛合金施加一定大小的反向粘性介质压力, 改变板材的变形路径和变形规律, 使板材的变形更加均匀, 从而有效提高了钛合金板材的胀形性能。

(2) 不同椭圆度凸模反向粘性介质压力胀形研究表明: 随着胀形凸模椭圆度 η 的减小, 胀形难度增大, 反向粘性介质压力对钛合金板材胀形性能的提高幅度有所减小, 需要增大反向粘性介质压力。

(3) 通过不同反向粘性介质压力极限胀形高度和成形极限图对比可知, 相比较应力状态的改变, 反向粘性介质压力大小及对应的变形路径的改变对极限胀形高度提高的影响较大。

参考文献:

- [1] 李毅, 赵永庆, 曾卫东. 航空钛合金的应用及发展趋势 [J]. 材料导报, 2020, 34 (S1): 280-282.
Li Y, Zhao Y Q, Zeng W D. Application and development of aerial titanium alloys [J]. Materials Reports, 2020, 34 (S1): 280-282.
- [2] 刘志成, 张利军, 薛祥义. 关于先进战斗机结构制造用钛概述 [J]. 航空制造技术, 2017, (6): 76-83.
Liu Z C, Zhang L J, Xue X Y. Overview about advanced fighter aircraft structure made with titanium [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, (6): 76-83.
- [3] 刘世峰, 宋玺, 薛彤, 等. 钛合金及钛基复合材料在航空航天的应用和发展 [J]. 航空材料学报, 2020, 40 (3): 77-94.
Liu S F, Song X, Xue T, et al. Application and development of titanium alloy and titanium matrix composites in aerospace field [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2020, 40 (3): 77-94.
- [4] Williams J C, Boyer R R. Opportunities and issues in the application of titanium alloys for aerospace components [J]. Metals, 2020, 10 (6): 705.
- [5] 王珏, 韩颖杰, 谢洪志, 等. TC4 钛合金双曲面复杂航空零件热成形工艺研究 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (2): 29-37.
Wang J, Hang Y J, Xie H Z, et al. Research on hot forming process of TC4 titanium alloy hyperbolic complex aviation part [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (2): 29-37.
- [6] 胡云, 林彬. 钛合金曲面类零件的热冲压工艺 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (3): 95-98.
Hu Y, Lin B. Hot stamping process of titanium alloy curved surface parts [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (3): 95-98.
- [7] 陈灿. TA32 高温钛合金复杂飞机蒙皮零件热成形工艺研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
Chen C. Research on Thermoforming Process of Complex Aircraft Skin Parts for TA32 Titanium Alloy [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- [8] Maeno T, Tomobe M, Mori K, et al. Hot stamping of titanium alloy sheets using partial contact heating [J]. Procedia Manufacturing, 2018, 15: 1149-1155.
- [9] 高铁军, 刘青, 蔡晋, 等. 复杂形状 TA2 钛合金半管件黏性介质压力成形 [J]. 中国有色金属学报, 2016, 26 (4): 790-796.
Gao T J, Liu Q, Cai J, et al. Viscous pressure forming of semi-pipe parts of complex shape TA2 titanium alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26 (4): 790-796.
- [10] 汪凯旋, 高铁军, 葛蒙召, 等. 底部中空方盒形件粘性介质压力成形工艺研究 [J]. 机械设计与制造, 2023, (4): 144-147.
Wang K X, Gao T J, Ge M Z, et al. Research on viscous pressure forming of square box-shaped parts with a hole at the bottom [J]. Machinery Design & Manufacture, 2023, (4): 144-147.
- [11] 张佳彬. 基于界面效应的铝合金拼焊覆层板胀形性能研究 [D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2022.
Zhang J B. Research on Bulging Performance of Aluminum Alloy Tailor-welded Overlapping Sheets Based on Interface Effect [D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2022.
- [12] 高铁军, 王硕, 王晓康, 等. 界面摩擦对 5A02/SUS304 覆层板胀形性能影响的理论及有限元分析 [J]. 塑性工程学报, 2019, 26 (4): 194-199.
Gao T J, Wang S, Wang X K, et al. Theoretical and finite element analysis of influence of interface friction on bulging performance of 5A02/SUS304 overlapping sheet [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26 (4): 194-199.
- [13] 冯苏乐. 5A06 铝合金非对称件双向加压拉深成形研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
Feng S L. Drawing of 5A06 Aluminum Alloy Chamfered Cup with Double Side Pressure [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [14] 徐永超, 韩思雨, 刘胜京. 液室压力加载路径对 5A06 铝合金锥形件充液拉深成形的影响 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (12): 38-43.
Xu Y C, Han S Y, Liu S J. Influence of cavity pressure loading path on hydroforming for 5A06 aluminum alloy conical cups [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (12): 38-43.
- [15] Gao T J, Zhang J B, Wang K X. Viscous backpressure forming and feasibility study of hemispherical aluminum alloy parts [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 119 (7-8): 5069-5078.

请关注更加新颖的公众号

www.qctester.com

