

大型复杂多腔挤压件校形工艺数值模拟与实验研究

王清峰, 孙磊, 初冠南

(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: 提出了一种新的充液轴向镦压校形工艺, 以降低大型复杂多腔型材在热挤压生产过程中产生的变形, 该工艺的核心是在内压的支撑下通过轴向压缩变形来提高零件截面的形状精度。通过有限元模拟和实验研究, 验证了该工艺在 6005-T6 铝合金复杂多腔挤压件上的可行性。结果表明: 在内压的支撑下, 经过压缩变形, 型材的宽度增大。充液轴向镦压校形工艺获得的型材关键尺寸与目标值基本一致, 而且截面形状与设计轮廓基本贴合, 且机加工后满足后续工装需求。充液轴向镦压校形工艺在减小复杂多腔热挤压型材变形、提高形状精度方面是可行的。

关键词: 热挤压件; 多腔型材; 镦压校形; 镦形量; 形状精度

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.05.037

中图分类号: TG394 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2023) 05-0282-05

Numerical simulation and experimental study on correction process for large complex multi-cavity extruded parts

Wang Qingfeng, Sun Lei, Chu Guannan

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

Abstract: A new axial hydroforming extrusion correction process was proposed to reduce the deformation of large complex multi-cavity profiles during hot extrusion production process, and the core of the process was to improve the shape accuracy of part section through axial compression deformation supported by internal pressure. Then, the feasibility of the process on 6005-T6 aluminum alloy complex multi-cavity extruded parts was verified by finite element simulations and experimental studies. The results show that the width of the profile increases after compression deformation under the support of internal pressure. The key dimensions of the profiles obtained by the axial hydroforming extrusion correction process are basically consistent with the target values, and the sectional shape basically fits the designed contour, which meets the requirements of subsequent tooling after machining. Thus, the axial hydroforming extrusion correction process is feasible in reducing the deformation of complex multi-cavity hot extruded profiles and improving the shape accuracy.

Key words: hot extruded parts; multi-cavity profiles; extrusion correction; extrusion amount; shape accuracy

随着我国航天航空和国防事业的飞速发展, 在满足性能需求的前提下, 对通过减小自身结构重量来提高飞行速度和飞行距离的轻量化技术提出了更高的要求^[1]。重要结构件由单一功能的简单部件组合形式变为一体化多功能集成异形件, 目前对高性能大型复杂多腔铝合金型材的需求日益增多, 从而对铝合金复杂结构件连续热挤压成形工艺提出了新

的挑战^[2-3]。但复杂结构件在连续热挤压过程中, 由于坯料成分不纯、模具精度差、工艺参数不合适等原因, 易造成挤压形面精度差、壁厚超差等问题^[4]。为了避免这些问题, 需要进行校形, 即对型材进行必要的整形以满足设计要求。

结构件的校形有多种方法, 如拉伸校直^[5]、蠕变时效校形^[6]、振动时效校形^[7]、喷丸校形^[8]、激光校形^[9]和电磁校形^[10]等, 其中, 校形方法的选择应根据结构件的形状、材料和成形精度的偏差情况来确定。Zhang J 等^[11]研究了不同张力矫直参数对钢带显微组织和力学性能的影响。Zhang X Z 等^[12]提出了一种充分利用高温蠕变特性的蠕变矫直铸造曲线来提高板件质量的方法。刘晓霏^[13]采用振动时效方案消除了大型铝合金环框工件在机械加工过程中产生的加工应力。郭超亚^[14]针对单曲度 2024-

收稿日期: 2023-03-01; **修订日期:** 2023-05-14

基金项目: 山东省重大科技创新工程 (2020CXGC010303); 国家自然科学基金重点项目 (U1937205); 山东省重大科技创新工程 (2019TSLH0103)

作者简介: 王清峰 (1995-), 男, 博士研究生

E-mail: wqf1826@163.com

通信作者: 初冠南 (1979-), 男, 博士, 教授

E-mail: chuguannan@hit.edu.cn

T351 铝合金变形实验件进行了数控超声波喷丸校形工艺研究。王秀凤等^[15]利用激光热源局部作用在铝合金薄壁件待校形的区域来提高校形效果。聂鹏等^[16]利用电磁成形方法对航空钛合金管件的端口进行校形。但这些校形方法均存在一定的局限性,并不适用于大型复杂多腔挤压件的校形。

针对大型复杂多腔型材在热挤压生产过程中产生的变形问题,本文提出了一种新的充液轴向镦压校形工艺。通过有限元模拟和实验研究,验证了该工艺在 6005-T6 铝合金复杂多腔挤压件上的可行性。

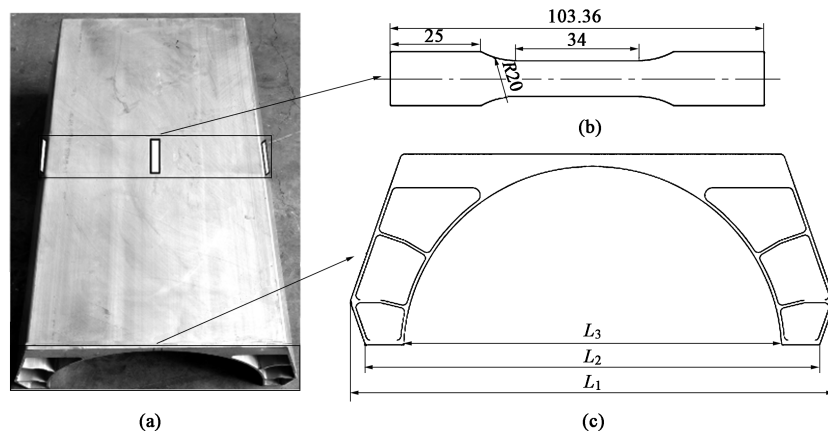


图1 挤压件 (a)、拉伸试样 (b) 和截面关键尺寸位置 (c)

Fig. 1 Extruded part (a), tensile sample (b) and key dimension locations of cross-section (c)

充液轴向镦压校形工艺的具体过程为:首先,将放有型材的模腔闭合;然后,型材两端密封充液,左、右冲头进给压缩型材;最后,卸载外力,取出

1 充液轴向镦压校形工艺

从连续热挤压制得的某 6005-T6 铝合金大型复杂多腔型材为研究对象,其中关键尺寸为外轮廓宽度 L_1 、底面宽度 L_2 和内轮廓宽度 L_3 ,如图 1 所示。按照国家标准 GB/T 228.1—2021^[17]设计拉伸试样,并在型材不同位置加工单轴拉伸试样,如图 1b 所示。拉伸数据取 3 组试样的均值,其屈服强度为 239 MPa、抗拉强度为 266 MPa、伸长率为 20%。

校形件。该工艺的原理为通过轴向压力将法向力和支撑约束作用下产生的内拉外压应力变为同向压应力,以减小回弹、提高形状精度,如图 2 所示。

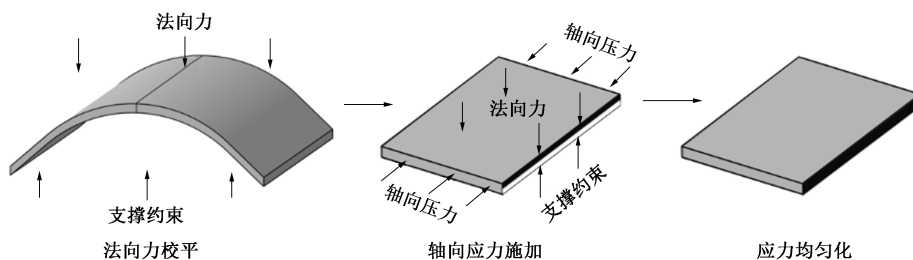


图2 充液轴向镦压校形工艺原理

Fig. 2 Principle of axial hydroforming extrusion correction process

2 数值模拟

2.1 数值模型的建立

采用 ABAQUS 6.14 有限元软件对 6005-T6 铝合金复杂多腔挤压件的充液轴向镦压校形工艺过程进行模拟。其中型材为变形体,上、下模和左、右冲头为离散刚体,模型如图 3 所示,模拟过程中采用 Mises 屈服准则。型材与模具的接触采用面与面接

触,模具由于刚度大设为主面,型材表面设为从面。接触属性采用罚函数,摩擦因数设为 0.05。

2.2 模拟结果与讨论

由图 4a 可以看出,型材初始截面形状与设计形状的偏差较大,尤其在肩膀位置的形状精度较差。在传统机械校形过程中,模具闭合使零件贴合型腔,此过程发生弯曲变形,从而会处于内拉外压的应力状态,如图 4b 所示。如果型材中内拉外压的应力状态不消除,开模后型材会发生回弹,造成几何尺寸

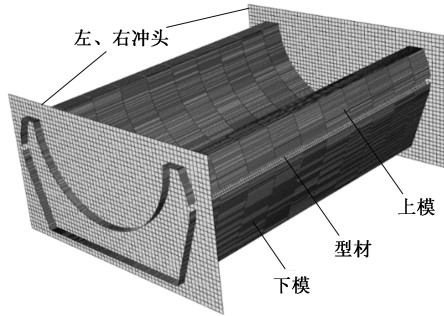


图 3 充液轴向镦压校形的有限元模型

Fig. 3 Finite element model of axial hydroforming extrusion correction

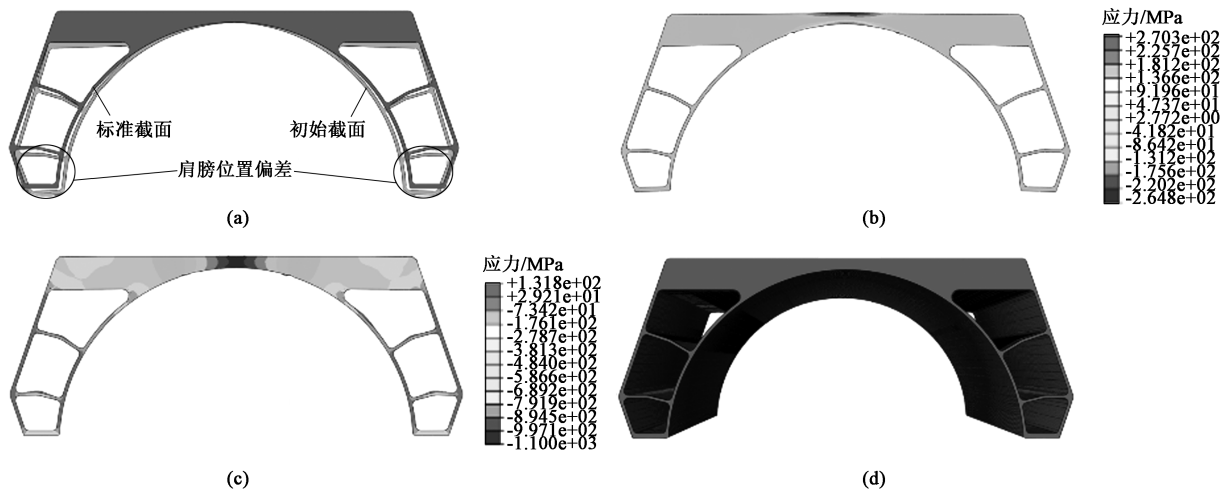


图 4 型材校形前后轮廓

(a) 初始截面偏差 (b) 传统机械校形应力云图 (c) 充液轴向镦压校形应力云图 (d) 充液轴向镦压校形截面轮廓

Fig. 4 Contours of profiles before and after correction

(a) Initial cross-section deviation (b) Stress cloud diagram of traditional mechanical correction

(c) Stress cloud diagram of axial hydroforming extrusion correction (d) Cross-section contour of axial hydroforming extrusion correction

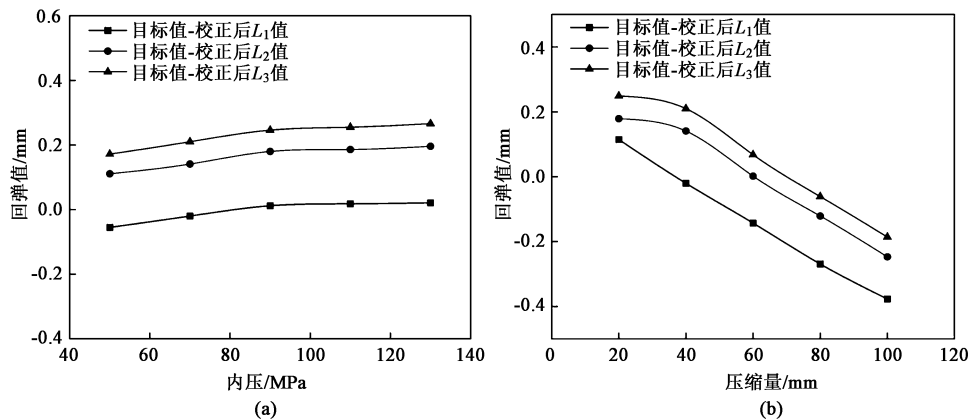


图 5 内压 (a) 和压缩量 (b) 对回弹的影响

Fig. 5 Effects of internal pressure (a) and compression amounts (b) on springback

进一步观察, 当内压为 70 MPa、单侧压缩量为 60 mm 时, 型材肩膀处 3 个关键位置的尺寸最接近目标值, 如表 1 所示, 回弹值均在允许范围内。其

偏差, 影响后续的装配与使用。为解决此问题, 提出采用充液轴向镦压校形工艺来消除应力差值。在 6005-T6 铝合金大型多腔挤压件的充液轴向镦压校形工艺中内压和轴向压缩是关键影响因素, 因此, 使用有限元模拟研究了内压支撑下型材的镦压校形, 校形后的应力云图如图 4c 所示。经过充液轴向镦压校形后, 型材的截面形状基本与设计轮廓相贴合, 如图 4d 所示。图 5 给出了内压和压缩量对回弹的影响, 可以发现, 随着内压的增加, 3 个关键尺寸的回弹值 (目标尺寸减去校正后尺寸) 增大, 但变化幅度很小; 随着压缩量的增大, 回弹值先减小后增大。

原因在于: 通过压缩变形将合模时型材弯曲变形产生的内拉外压应力变为同向压应力, 从而减弱了回弹的驱动力。校形后型材的关键尺寸和截面

表 1 型材校形前后的关键尺寸 (mm)

Table 1 Key dimensions of profiles before and after correction (mm)

关键尺寸	目标值	仿真数据			实验数据		
		初始尺寸	校正尺寸	回弹值	初始尺寸	校正尺寸	回弹值
L_1	714.00	710.00	714.143	-0.143	710.06	714.20	-0.20
L_2	632.71	628.00	632.708	0.002	627.80	632.53	0.18
L_3	505.40	502.20	505.332	0.068	502.23	505.25	0.15

形状均恢复到设计要求的精度，从而证明了充液轴向镦压校形工艺的可行性。

3 实验验证

为了验证有限元模型的准确性，采用模拟仿真获得的最佳校形工艺参数进行了铝型材的充液轴向镦压校形实验。根据校形工艺原理和铝型材形状设计了校形实验装置，其主要由上模、下模和左、右冲头组成，如图 6a 所示。下模固定，用于放置原始

型材，上模下移使型材发生弯曲并固定，左、右冲头用于液压密封，同时提供轴向压缩。

图 6b 和图 6c 给出了型材充液轴向镦压校形前后的轮廓。从图 6b 中可以看到，型材整体存在明显的扭转缺陷。进一步观察，由原始型材内轮廓对比可以看出，检具被圆弧段两端卡住，中间部分未能贴合；由原始型材外轮廓对比可以看出，检具肩膀处与型材之间留有很大间隙，表明原始型材整体弯曲。对充液轴向镦压校形之后形状检测合格的型材端面进行机加工并测量剩余厚度，如图 6c 所示，可以发现，扭转缺陷也得以校正，完全符合产品规格需求。对型材校形前后的关键尺寸进行测量，结果如表 1 所示。从表 1 中可以看出，型材校形前的关键尺寸与目标尺寸存在较大的偏差，而型材校形后关键尺寸差值较小，均在误差允许范围内。说明充液轴向镦压校形可以显著提高型材的形状精度，满足设计要求。验证了有限元模型的准确性，并证明了充液轴向镦压校形工艺在大型复杂多腔挤压件校形中的可行性。

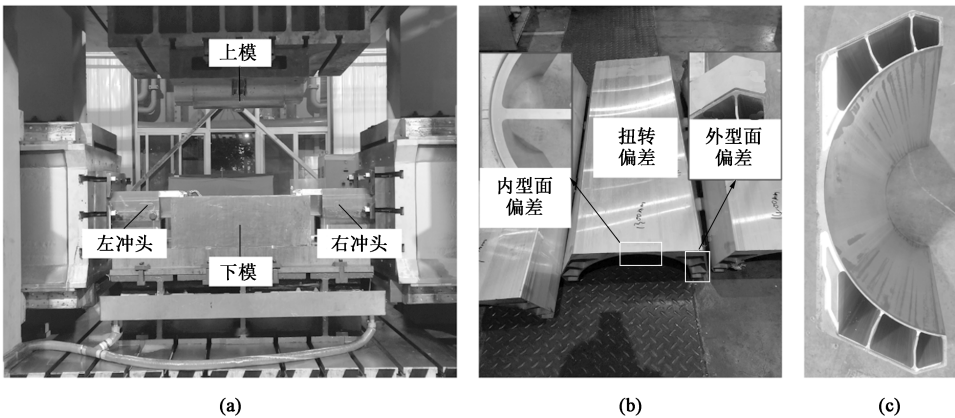


图 6 实验设备 (a)、校形前型材几何缺陷 (b) 和校形合格后截面机加工 (c)

Fig. 6 Experimental equipment (a), geometry defects of profile before correction (b) and machining of cross-section after passing correction (c)

4 结论

(1) 通过模拟和实验证明了充液轴向镦压校形工艺在多腔挤压件校形中的可行性，在内压的支撑下经过压缩变形，型材的宽度增大。

(2) 充液轴向镦压校形过程中，轴向压缩可将型材截面上内拉外压的应力状态转变为同向压应力状态，改善了回弹状态。

参考文献：

[1] Wang K H, Wang L L, Zheng K L, et al. High-efficiency forming processes for complex thin-walled titanium alloys components;

state-of-the-art and perspectives [J]. International Journal of Extreme Manufacturing, 2020, 2 (3): 20-43.

[2] Bajor T, Kawalek A, Berski S, et al. Analysis of the extrusion process of aluminium alloy profiles [J]. Materials, 2022, 15 (23): 8311.

[3] Wang Y X, Zhao G Q. Hot extrusion processing of Al-Li alloy profiles and related issues: A review [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2020, 33 (1): 64.

[4] Sairajan K K, Aglietti G S, Mani K M. A review of multifunctional structure technology for aerospace applications [J]. Acta Astronautica, 2016, 120: 30-42.

[5] Deng X W, Hui S X, Ye W J, et al. Numerical simulation and process optimization on hot twist-stretch straightening of Ti-6Al-4V alloy profile [J]. Materials, 2022, 15 (13): 4522.

- [6] 湛利华, 杨有良. 大型构件蠕变时效成形技术研究 [J]. 航空制造技术, 2016, 508 (13): 16-23.
Zhan L H, Yang Y L. Research on creep age forming technology for large integrated component [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 508 (13): 16-23.
- [7] 廖凯, 吴运新, 郭俊康. 振动时效在铝合金厚板应力消减中的局限与应用 [J]. 振动与冲击, 2012, 31 (14): 70-73.
Liao K, Wu Y X, Guo J K. Application of VSR technique in stress reduction of aluminum alloy thick plate and its limitation [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31 (14): 70-73.
- [8] 刘峰, 鲁世红, 张炜. 超声波喷丸技术的研究进展 [J]. 航空制造技术, 2016, (14): 24-28.
Liu F, Lu S H, Zhang W. Research progress of ultrasonic shot peening technology [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, (14): 24-28.
- [9] Ueda T, Wakimura Y, Furumoto T, et al. Experimental investigation on laser flattening of sheet metal [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2011, 49 (1): 137-144.
- [10] Imbert J, Worswick M. Reduction of a pre-formed radius in aluminium sheet using electromagnetic and conventional forming [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212 (9): 1963-1972.
- [11] Zhang J, Zhou C L, Li H B, et al. Influence of tension leveling parameters on the microstructure and mechanical properties of steel strip [J]. The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society, 2017, 69: 937-941.
- [12] Zhang X Z, Guo L. Creep straightening technology of continuous casting slab based on high-temperature creep property [J]. ISIJ International, 2017, 57 (1): 76-83.
- [13] 刘晓霁. 振动时效原理分析及在大型环框类零件上的应用 [J]. 航天制造技术, 2008, 152 (6): 10-14, 21.
Liu X F. Analysis of principle of vibration stress relief and its application in large-scale ring-shaped frame parts [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2008, 152 (6): 10-14, 21.
- [14] 郭超亚. 数控超声波喷丸校形工艺研究与预测模型建立 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
Guo C Y. Research on Numerical Control Ultrasonic Shot Peening Straightening Process and Prediction Model [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.
- [15] 王秀凤, 郭晓丽, 彭青, 等. 铝合金薄壁件的激光校形试验 [J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50 (2): 156-160.
Wang X F, Guo X L, Peng Q, et al. Laser correction of the thin-walled aluminum alloy part [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50 (2): 156-160.
- [16] 聂鹏, 李聪, 王哲峰, 等. 航空钛合金管件端口电磁校形技术 [J]. 火力与指挥控制, 2019, 44 (2): 155-160, 165.
Nie P, Li C, Wang Z F, et al. Study on electromagnetic correction technology of aviation titanium alloy tube ports [J]. Fire Control & Command Control, 2019, 44 (2): 155-160, 165.
- [17] GB/T 228.1—2021, 金属材料 拉伸试验 第1部分: 室温试验方法 [S].
GB/T 228.1—2021, Metallic materials—Tensile testing—Part 1: Method of test at room temperature [S].

