气动控制单元支架背压成形工艺研究及数值模拟分析

刘守生[1]，吴珩[2]，王雷刚[2]，常国其[1]
（1.昆山惠众机电有限公司，江苏 昆山 215331；2.江苏大学 材料科学与工程学院，江苏 镇江 212013）

摘要：目的 背压成形工艺是一种能够控制材料塑性流动的流动控制技术，研究背压工艺在气动控制单元支架零件成形中的可行性。**方法** 针对支架零件特殊结构设计工艺方案，结合有限元数值模拟技术，利用 DEFORM-3D 软件，模拟分析了支架零件的背压成形过程，获得了成形过程中的等效应力分布状态及成形载荷的变化情况。 **结果** 通过模拟结果及工艺试验结果显示，零件下端薄壁状支脚充填效果较好，两端高度一致，端面平整。**结论** 验证了背压工艺在支架零件成形中的可行性。

关键词： 支架；流动控制技术；背压；等效应力；成形载荷
DOI： 10.3969/j.issn.1674-6457.2016.04.005
中图分类号： TG306 **文献标识码：** A **文章编号：** 1674-6457 (2016)04-0028-05

Technology and Numerical Simulation of Pneumatic Control Unit Bracket Counterpressure Craft

LIU Shou-sheng[1], *WU Heng*[2], *WANG Lei-gang*[2], *CHANG Guo-qi*[1]
(1. Kunshan Huizhong Machine Co., Ltd., Kunshan 215331, China;
2. School of Material Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

ABSTRACT: Counterpressure is a flow control forming technology which can control the plasticity flow of materials. The aim of this paper is to study the feasibility of counterpressure craft in the forming process of pneumatic control unit bracket. Aiming at the technology design proposal for the special construction of bracket and based on the FEM simulation technology, the counterpressure process of bracket was analyzed by DEFORM-3D software. The changes of stress state and forming load were obtained. Both of the simulated results and industrial test showed that the bottom thin-walled feet of parts were filled well with same height and smooth plane. The feasibility of the counterpressure craft in the forming of bracket parts has been verified.
KEY WORDS: bracket; FCF; counterpressure; effective stress; forming load

在气压传动系统中，气动控制元件是调节及控制压缩气体的压力、流动方向、流量和信号发送的重要组成元件，所构成的不同气动控制回路确保了执行机构或元件的正常工作[1]，现已广泛应用于列车、机械设备等领域。铝合金支架是构成气动控制元件的重要零部件，作为单元中重要的支撑件，其性能及强度直接影响到整个系统的控制精度及使用寿命，一般由锻造加工生产，由于下端存在薄壁状支脚，并且零件为非对称结构，锻造时容易产生支脚长度不同及充填不足的缺陷，成形难度较大。

本文采用闭塞锻造加背压的成形方法，并基于 DEFORM-3D 有限元模拟软件对背压成形过程进行数值模拟分析，根据模拟分析结果，分析了背压成形过程及背压时等效应力分布及成形载荷的变化特

收稿日期： 2016-06-01
作者简介： 刘守生（1969—），男，江苏人，本科，工程师，主要研究方向为密塑性成形工艺优化及立式卧式加工中心工艺优化。

点，为实际生产提供了理论基础与指导。

1　支架零件结构及工艺分析

1.1　零件结构分析

研究对象为气动控制单元支架，其零件造型如图 1 所示，零件材料为 2014 铝合金，其力学性能及高温强度较好，锻造性能优良，并具有良好的可焊性[2—3]。图 2 所示为支架零件，下端支脚部分厚度为 7.5 mm，高度为 43 mm，零件上端主体部分为非对称结构。分析零件的结构可知，零件的成形难度为下端薄壁状支脚，由于上端的特殊结构，材料分配不均，在充填过程中，材料会先向一端型腔内填充，从而导致两端支脚不平，有充填不足的可能[4]。

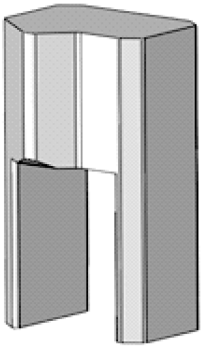


图 1　支架三维造型
Fig.1 The three-dimensional model of bracket

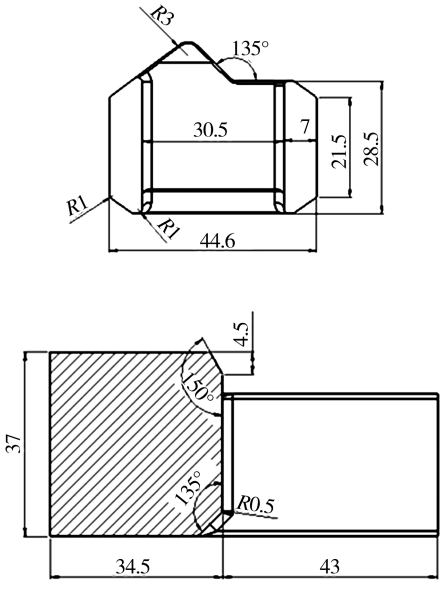


图 2　支架几何尺寸
Fig.2 The geometries of bracket

1.2　成形工艺分析

本文采用闭塞锻造成形，并添加背压工艺。主要的工艺路线为下料制坯和锻造一次成形，后续对锻件进行 T6 热处理，提升零件的强度与组织稳定性。

1.2.1　背压成形原理

背压成形是金属流动控制成形技术中最典型的方法[5]，其成形原理如图 3 所示。坯料在凸模作用下进入凹模型腔，由于支脚壁厚小且材料的分布不均，金属进入凹模下部型腔中的速度不同，此时在金属挤出方向添加一个背压体模具，在与金属流动的反向施加适当的力，可以解决支脚端面成形高度不一致的问题[6—7]。

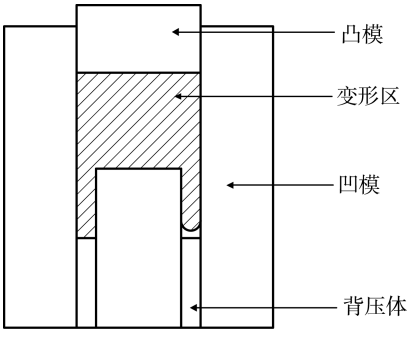


图 3　背压成形原理
Fig.3 The schematic diagram of counterpressure forming

1.2.2　模具结构分析

根据零件的成形要求，设计了可实现针对支架零件成形的模具及背压装置，图 4 所示为支架背压模具装配简图[8]。

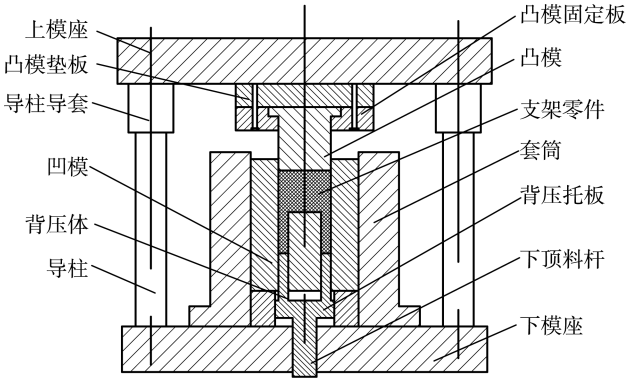


图 4　支架背压成形模具装配简图
Fig.4 Assembly diagram of bracket counterpressure forming die

模具工作时，将加热制坯后的坯料放入凹模内，液压机带动凸模向下对坯料进行挤压，当坯料成形

接触至背压体后，背压体在下端液压系统的作用下，会产生一个持续向上的压力，对支架零件实现背压，坯料在凸模及背压体的共同作用下发生变形至充填结束[9]。成形完成后，上模泄压，模具打开，下端背压体在液压系统的作用下，向上回复到初始位置并将零件顶出[10]。

2 数值模拟

2.1 有限元建模

运用 DEFROM-3D 三维有限元模拟软件，采用刚塑性有限元法，对支架的锻造背压过程进行计算机模拟仿真。坯料材料选择 AISI2014 铝合金，坯料初始温度选择 470 ℃[11]，在划分网格时，对坯料下端主要变形区进行局部细化。凸模、凹模及背压体均选取刚性模型，初始温度为 220 ℃，凸模速度为 10 mm/s，摩擦因数选择 0.3，坯料与模具之间的导热系数为 3 N/(m· s·℃)。背压体的刚性选择 300 kN/mm，预负荷选择为 350 kN。求解方法选择稀疏矩阵法，迭代方法为直接迭代法[12—13]。模拟过程的坯料是经镦扁之后的圆棒料，有限元模型如图 5 所示。

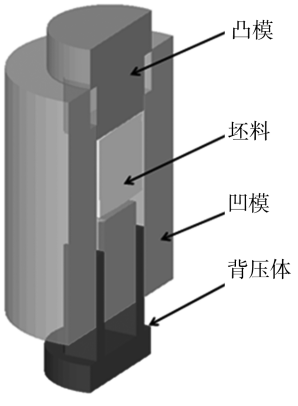
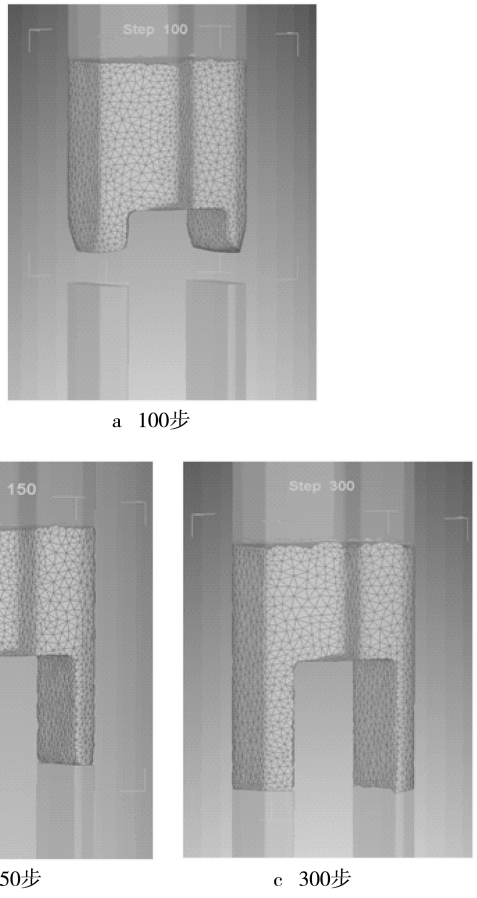


图 5 有限元模型
Fig.5 Finite element model

2.2 成形过程分析

根据有限元模拟结果可知，凸模先与坯料接触，正挤压坯料先形成一部分下端支脚，如图 6a 所示。待形成的支脚与下方背压体接触后，凸模继续向下运动，由于成形力大于背压体的预负荷及刚性负荷，将带动背压体向下运动，如图 6b 所示。此时，在背压体的作用下，两端支脚将同时向下成形直至达到设计尺寸，如图 6c 所示。



a 100步
b 150步
c 300步

图 6 支架背压成形过程
Fig.6 Forming process of bracket counterpressure

2.3 等效应力分析

图 7 所示为支架背压成形过程的等效应力分布图[14]。图 7a 所示为成形至第 100 步时的应力分布，此时背压力还未作用于坯料上，此时的等效应力主要集中于零件上端变形区及下端拐角区域，最大应力为 822 MPa，支脚下端由于没有背压力的作用，等效应力较小。图 7b 所示为成形至 150 步时的应力分布，此时坯料已处于背压状态，支脚受到一个持续向上的压力。可以看出，支脚下端在背压力的作用下，等效应力明显增大，此时最大应力达到 908 MPa。图 7c 所示为成形至 300 步时的应力分布，零件已基本成形，支脚部分的应力下降，整体应力处于均匀分布状态，此时的最大应力为 781 MPa。

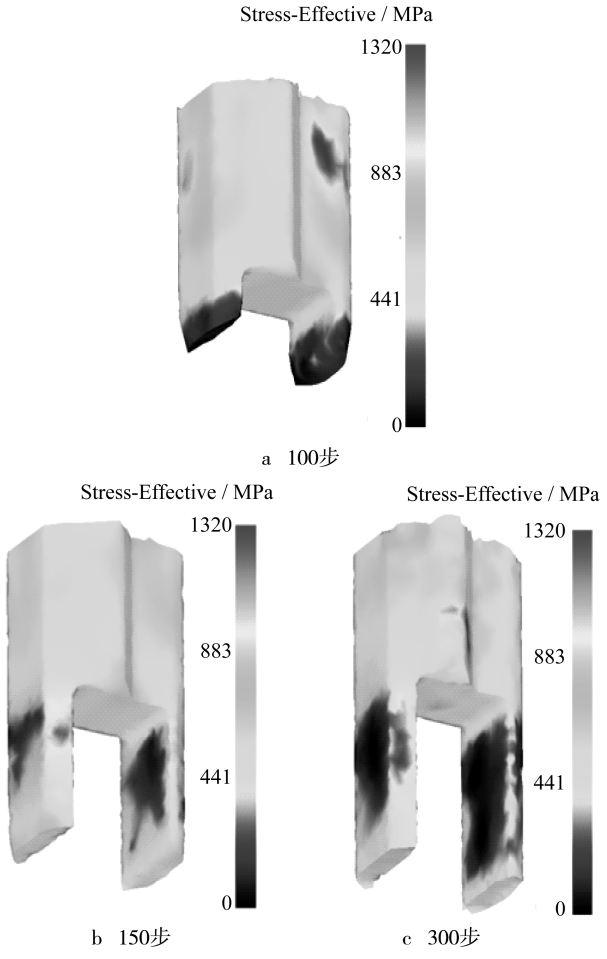


图 7　支架背压成形过程的等效应力分布

Fig.7 The equivalent stress distribution of bracket counterpressure process

2.4　成形载荷分析

如图 8 所示为背压成形时凸模的载荷-时间曲线，从曲线中可以看出，在未达到背压状态时，载荷曲线较平稳，载荷处于缓慢上升的过程[15]。在坯料接触背压体时，由于预负荷的存在，载荷会上升至背压

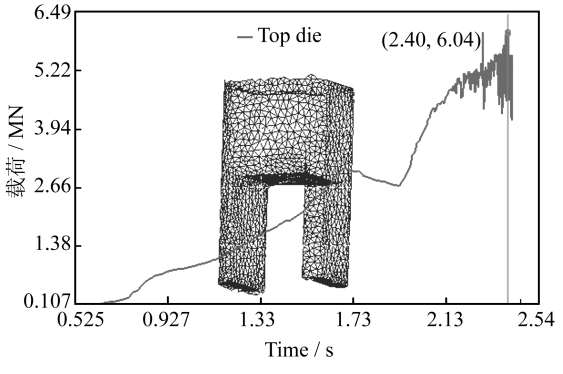


图 8　支架背压成形时凸模的载荷-时间曲线

Fig.8 Load-time curve of punch during counterpressure process

体开始运动，此时载荷出现小幅度下降，随后在背压作用力的作用下，坯料继续成形，成形载荷上升。在成形末尾阶段，成形载荷达到最大值，并且由于背压体的反作用力而出现波动，最大成形载荷为 6040 kN。

3　试验验证

根据以上模拟结果，按照工艺尺寸及参数设计制造模具进行成形试验。试验设备为 8000 kN 四柱液压机。试制产品成形效果良好，下端两侧支脚平整，符合设计尺寸，与模拟结果一致，验证了背压工艺的可行性，如图 9 所示。

图 9　试制的支架零件

Fig.9 Bracket by trail-experiment

4　结论

根据支架零件的结构特点及成形质量要求，针对锻造时下端支脚部分充填不均匀的问题，在普通闭塞锻造的基础上增加了背压成形装置，设计了有效的成形工艺方案。

应用有限元模拟软件对背压成形过程进行模拟分析，得到了成形过程的应力分布及载荷变化情况，并进行了工艺试验，得到了符合要求的零件，降低了生产风险并缩短了设计开发周期。

参考文献：

[1]　董林福，赵艳春. 液压与气压传动[M]. 北京：化学工业出版社, 2006.
DONG Lin-fu, ZHAO Yan-chun. Hydraulics & Pneumatics[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.

[2]　刘百成，董俊，韩华. 2A14 铝合金板材生产工艺[J]. 黑

龙江冶金, 2011, 31(1): 9—11.
LIU Bai-cheng, DONG Jun, HAn Hua. Production Process of 2A14 Aluminum Alloy Sheet[J]. Heilongjiang Metallurgy, 2011, 31(1): 9—11.

[3] 王金花, 王刚, 马英义,等. 2014 铝合金板材热处理工艺研究[J]. 轻合金加工技术, 2010(8): 66.
WANG Jin-hua, WANG Gang, MA Ying-yi. Study on Heat Treatment Process of 2014 Aluminum Alloy Sheet [J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2010(8): 66.

[4] 徐文臣, 单德彬, 郭斌, 等. 稀土镁合金薄腹高筋支架的等温锻造技术[J]. 塑性工程学报, 2014(2): 7—12.
XU Wen-chen, SHAN De-bin, GUO Bin. Isothermal Forging Rare Element Containing Magnseium Alloy Bracket with Thin Web and High Rib[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2014(2): 7—12.

[5] 李伦根, 边翊, 尉喆, 等. 安全气囊零件背压成形数值模拟及实验研究[J]. 锻压技术, 2005, 30(z1): 163—165.
LI Lun-gen, BIAN Yi, WEI Zhe. Numerical Simulation and Experiment Research of Airbag Parts in Car[J]. Forging and Stamping Technology, 2005, 30(z1): 163—165.

[6] 田野, 薛克敏, 孙大智,等. 涡旋盘背压成形工艺研究[J]. 机械工程学报, 2015(16): 143—149.
TIAN Ye, XUE Ke-min, SUN Da-zhi. Study on Back-pressure Forming Process of Scroll[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015(16): 143—149.

[7] 李君, 薛克敏, 孙艮芝, 等. 雷达波导件精密挤压成形工艺[J]. 塑性工程学报, 2013, 20(4):1—5.
LI Jun, XUE Ke-min, SUN Gen-zhi. Precise Extrusion Process of Waveguide Component for Radar Use[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2013, 20(4): 1—5.

[8] GEIGER M, MERKLEIN M, COJUTTI M. Hydroforming of Inhomogeneous Sheet Pairs with Counterpressure[J]. Production Engineering, 2009, 3(1): 17—22.

[9] 陈铃, 郑光文, 张雷, 等. 涡旋盘背压成形模具结构分析与研究[J]. 锻压技术, 2012, 37(4): 108—111.
CHEN Ling, ZHENG Guang-wen, ZHANG Lei. Analysis and Research of Scroll Mold Structure with Back Pressure Processing[J]. Forging and Stamping Technology, 2012, 37(4): 108—111.

[10] 郑伟刚, 唐超, 何勇, 等. 高压电磁阀体冷挤压工艺设计及研究[J]. 锻压技术, 2012, 37(5): 47—50.
ZHENG Wei-gang, TANG Chao, HE Yong. Cold Extrusion Process Design and Research of High Pressure Electromagnetic Valve[J]. Forging and Stamping Technology, 2012, 37(5): 47—50.

[11] KESNER D, FIŠER P, ZRNIK J, et al. Numerical Modeling of Constrained Groove Pressing with Deform 3D Software[J]. IEEE, 2007.

[12] 王锐, 赵国群, 吴向红,等. 大口径铝管平面分流模挤压过程数值模拟[J]. 模具工业, 2007, 33(7): 17—21.
WANG Rui, ZHAO Guo-qun, WU Xiang-hong. Numerical Simulation on Extrusion Process of Porthole Die for Large Caliber Aluminum Tubes[J]. Die and Mould Industry, 2007, 33(7): 17—21.

[13] 康锋, 王经涛. 背压对 ECAP 塑性变形区影响的有限元分析[J]. 材料与冶金学报, 2007, 6(2): 142—149.
KANG Feng, WANG Jing-tao. A Finite Element Study of the Effect of Back Pressure on Plastic Deformation Zone in Equal Channel Angular Pressing[J]. Journal of Materials & Metallurgy, 2007, 33(7): 17—21.

[14] 王姝俨, 夏华, 秦梁杰,等. 方形孔轴套冷挤压成形工艺研究及数值模拟分析[J]. 精密成形工程, 2016, 8(2):47—49.
WANG Shu-yan, XIA Hua, QIN Liang-jie. Technology and Numerical Simulation of Cold Extruded Square-hole Shaft Sleeve[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2016, 8(2): 47—49.

[15] 严健鸣, 王成勇, 朱取才,等. 双凸模冷径向挤压十字轴的模拟[J]. 精密成形工程, 2013, 5(2): 51—54.
YAN Jian-ming, WANG Cheng-yong, ZHU Qu-cai. Simulation on Universal Joint Pin Cold Forming based on Radial Extrusion with Double Punches[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2013, 5(2): 47—49.