

锻造

涡旋盘精密模锻成形

谭群燕¹, 周昊奕^{1,2}, 丁明明^{1,2}, 陶惠敏², 沈 铨^{1,2}

(1. 华北水利水电大学 机械学院, 河南 郑州 450000;

2. 浙江水利水电学院 机械与汽车工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要:以涡旋盘动盘为研究对象, 基于流动控制成形技术提出在凹模中分别添加背压阻尼和分流腔的两种成形工艺方案, 通过 DEFORM-3D 软件对两种成形工艺方案进行数值模拟和试验验证。模拟结果表明: 采用背压结构, 涡旋盘金属的流动性更好, 但所需成形载荷较大, 且凹模的等效应力和变形量较大; 采用分流腔结构, 所需成形载荷更小, 凹模的等效应力和变形量更小, 同时涡旋盘的成形效果较好。结合模拟结果, 利用添加分流腔后的模具结构进行涡旋盘精密模锻成形, 得到的涡旋盘质量较好, 端面填充饱满, 未出现折叠、裂纹、压伤等缺陷, 验证了此成形工艺的可行性。

关键词: 涡旋盘; 流动控制成形; 背压阻尼; 纵向分流腔; 精密模锻

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.04.004

中图分类号: TG316

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 04-0037-06

Precision die forging for scroll

Tan Qunyan¹, Zhou Haoyi^{1,2}, Ding Mingming^{1,2}, Tao Huimin², Shen Cheng^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450000, China;

2. College of Mechanical and Automotive Engineering, Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, Hangzhou 310018, China)

Abstract: For the scroll, based on the flow control forming (FCF) technology, two forming process schemes of adding back pressure damping and splitter cavity in the die were proposed, and the two forming process schemes were numerically simulated by software DEFORM-3D and verified by experiments. The simulation results show that with the back pressure structure, the metal fluidity of the scroll is better, but the required forming load is larger, and the equivalent stress and deformation amount of the die are larger. However, with the splitter cavity structure, the required forming load is smaller, the equivalent stress and deformation amount of the die are smaller, and the forming effect of the scroll is better. Combined with the simulation results, the precision die forging of the scroll was conducted by the die structure with the splitter cavity, and the quality of the scroll was good with well-filled end faces and without defects such as folding, crack and crush. Thus, the feasibility of the above forming process is verified.

Key words: scroll; flow control forming; back pressure damping; vertical splitter cavity; precision die forging

涡旋盘压缩机具有体积小、可靠性高、噪音小等优势, 被广泛应用于汽车空调、化工和医疗器械领域^[1-2]。随着新能源汽车的发展, 涡旋压缩机作为汽车上空调的关键零部件, 对其制造工艺提出极高要求^[3], 涡旋盘作为涡旋压缩机的核心部件, 需提高尺寸精度、减少机械加工。

1 涡旋盘工艺分析及有限元模型

1.1 涡旋盘结构

涡旋盘动盘的锻件如图 1 所示, 涡旋盘基盘直径 D 为 $\Phi 60.36$ mm, 基盘厚度 b 为 12 mm, 涡旋体部分壁厚为 5 mm, 高度 H 为 20 mm, 涡旋体根部圆角半径 r 为 1 mm, 凸台 h 为 2 mm。采用 6061 铝合金。该材料为高强度铝合金, 塑性较差、变形抗力大。在挤压过程中, 涡旋体部分金属材料流动速度与其在涡旋中的位置有关, 涡旋体壁高且薄, 极易造成金属材料流速不均匀, 导致涡旋高度不一致。

收稿日期: 2021-12-15; 修订日期: 2022-03-15

基金项目: 浙江省重点研发计划项目 (2020C01062)

作者简介: 谭群燕 (1964-), 女, 学士, 教授

E-mail: tqy@ncwu.edu.cn

通信作者: 丁明明 (1964-), 男, 硕士, 教授

E-mail: dingliumingming@163.com

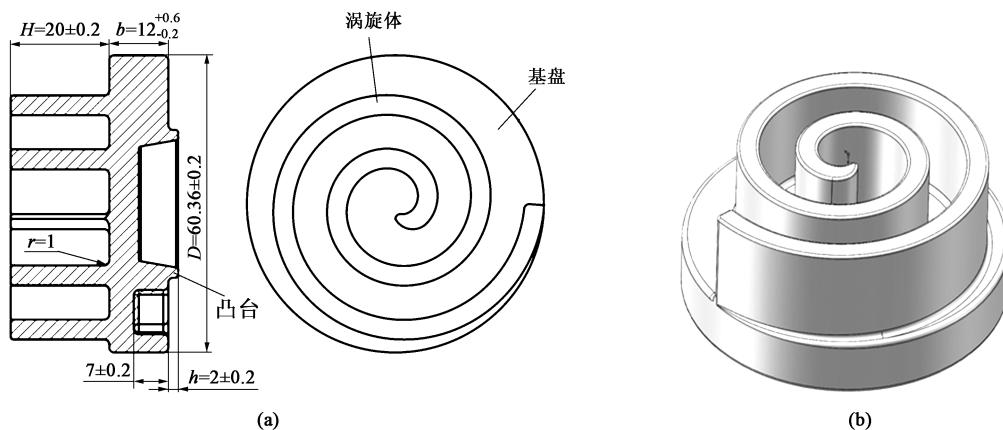


图 1 涡旋盘锻件

(a) 锻件尺寸 (b) 锻件三维图

Fig. 1 Forgings of scroll

(a) Sizes of forgings (b) 3D drawing of forgings

1.2 工艺分析

成形工艺采用正向闭式挤压成形。涡旋盘体积为 46215 mm^3 ，坯料采用直径为 $\Phi 60 \text{ mm}$ 、高度为 16.5 mm 的铝合金圆盘。通过加热炉将圆盘加热至 $(400 \pm 10)^\circ\text{C}$ 后，利用流动控制成形 (Flow Control Forming, FCF) 技术进行精密模锻成形。FCF 技术是一项通过控制金属材料非均匀塑性流动从而实现复杂构件精密成形的技术，可以改善锻件在成形过程中产生的折叠、充不满等缺陷，同时提高锻件尺寸精度^[4]。FCF 技术包括阻尼式控制和减压式控制两种方法^[5]，本文分析研究了在成形工艺中分别应用两种控制方法后涡旋盘的成形质量及模具情况。此外，温挤压的精度无法达到要求，挤压成形后需通过机加工来保证零件的精度要求。

1.3 有限元模型

构建采用背压阻尼式控制方法的有限元模型。通过在凹模中添加背压结构以实现金属流动控制。通常背压阻尼式控制方法的背压力需要由专用模架结构或专用锻压机床提供，背压力主要作用在金属材料流速快的区域，以阻碍此区域的金属材料流动，从而保证涡旋端面高度的一致性。本文中背压力设置为 20 kN ，采用背压阻尼式结构的有限元模型如图 2 所示。

构建减压式控制方法的有限元模型。通过添加纵向分流腔的方法可以达到减压的效果，纵向分流腔位置通常选在模膛最后充满的位置，用于储存挤压时坯料中多余的金属材料，从而在达到减压效果的同时保证涡旋盘填充饱满。设计时，模膛最后充满处的深度略大于周边的深度，采用分流腔结构的

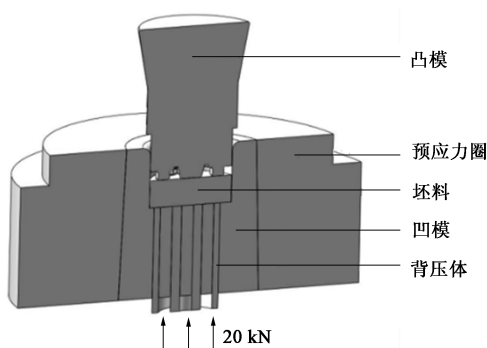


图 2 带背压结构的有限元模型

Fig. 2 Finite element model with back pressure structure

有限元模型如图 3 所示。

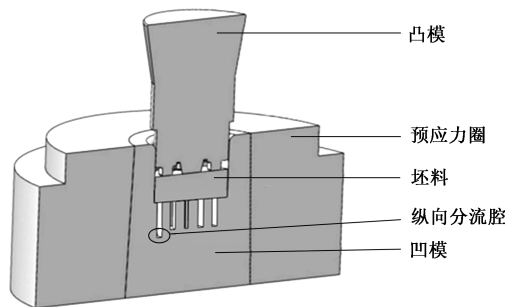


图 3 带分流腔结构的有限元模型

Fig. 3 Finite element model with splitter cavity structure

利用 DEFORM-3D 软件进行涡旋盘精锻成形的模拟仿真，定义 DEFORM-3D 软件中涉及的各类参数。将坯料、背压体和凹模定义为塑性体，坯料选择材料库中的 Al6061 铝合金，网格数量选择 60000；背压体和凹模选择材料库中的 AISI-H-13 钢，将其网格数量设置为 30000，减少网格数量以提高运算速度^[6]；将凸模设置为刚性材料。温度设置为

400 ℃, 坯料与模具间的摩擦因数为 0.25, 凸模加载速度设为 $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2 数值模拟分析

2.1 分流腔设计

设置纵向分流腔需要首先确定模膛最后充满的位置, 随后在该位置设分流腔。涡旋盘最难成形的部位在涡旋部分^[7], 涡旋部分中最难填充的区域与涡旋盘的结构有关。因此, 利用数值模拟的方法确定凹模模膛最后充满的部位, 进行数值模拟的模具

的有限元结构如图 4a 所示; 为便于寻找材料最难填充的位置, 在涡旋处设 11 个采样点, 如图 4b 所示; 通过分析数值模拟结果的高度分布规律可知, 涡旋部分最难充满的部位为采样点 10 处, 如图 4c 所示。将分流腔设在此区域, 其结构为在原凹模型腔的基础上加深 3 mm, 分流腔示意图如图 5a 所示。利用添加分流腔后的模具进行数值模拟, 最终得到涡旋盘的高度分布规律如图 5b 所示, 通过高度分布规律可知, 涡旋部分填充饱满, 证明了分流腔位置选择合理。

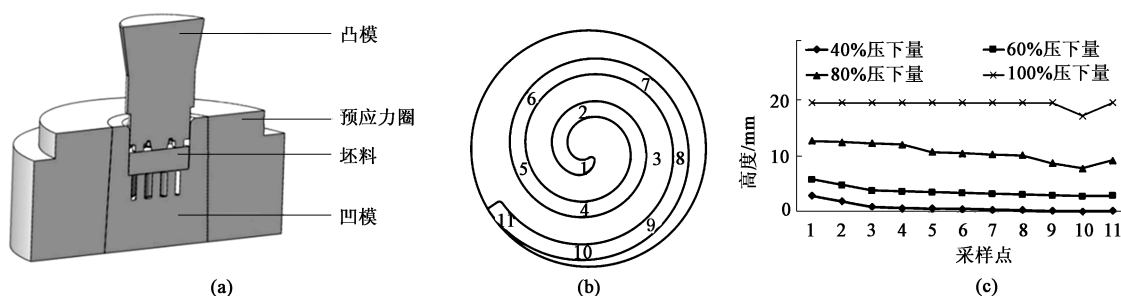


图4 无分流腔的涡旋盘成形区域的数值模拟

(a) 无分流腔的有限元结构 (b) 采样点分布 (c) 无分流腔的涡旋盘端面高度分布

Fig. 4 Numerical simulation of forming region for scroll without splitter cavity structure

(a) Finite element structure without splitter cavity structure (b) Distribution of sampling points

(c) Height distribution of scroll end face without splitter cavity structure

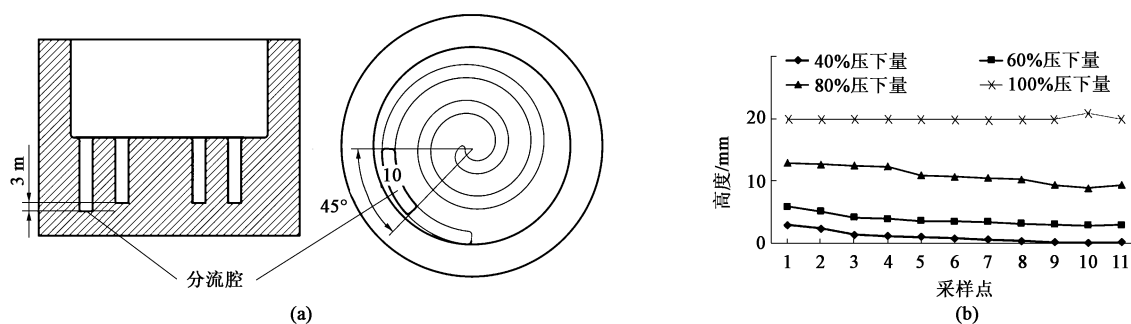


图5 带分流腔的涡旋盘成形区域的数值模拟

(a) 分流腔结构 (b) 带分流腔时涡旋盘端面高度分布

Fig. 5 Numerical simulation of forming region for stroll with splitter cavity structure

(a) Splitter cavity structure (b) Height distribution of scroll end face with splitter cavity structure

2.2 成形工艺对成形载荷及金属流动的影响

本文中背压力设置为 20 kN, 通过带背压体的凹模进行数值模拟, 所得的成形载荷如图 6a 所示。进行到第 16 步时, 坯料开始接触模具, 此时金属向凸模侧流动的阻力较小, 优先向凸模侧流动, 且由于此时背压结构的阻碍作用, 金属不足以推动背压体向凹模方向流动, 因此金属主要以向凸模方向填充为主, 如图 6b 所示, 在此阶段内, 起始时刻的成形载荷为 103 kN。第 36 步时, 金属材料基本充满

凸模型腔, 金属向上流动的阻力增大, 金属开始推动背压体向下流动, 如图 6c 所示, 此刻成形载荷快速增大至 310 kN, 随后缓慢增大至 432 kN。直到第 62 步, 涡旋部分基本成形, 此时由于背压体受到限位的影响, 金属材料向下流动的阻力增大, 导致成形载荷迅速增大至 983 kN。

对带分流腔的凹模进行数值模拟所得的成形载荷如图 6d 所示。在成形初期, 凸模下压, 由于金属材料向凸模流动的阻力比向凹模流动的阻力小, 这

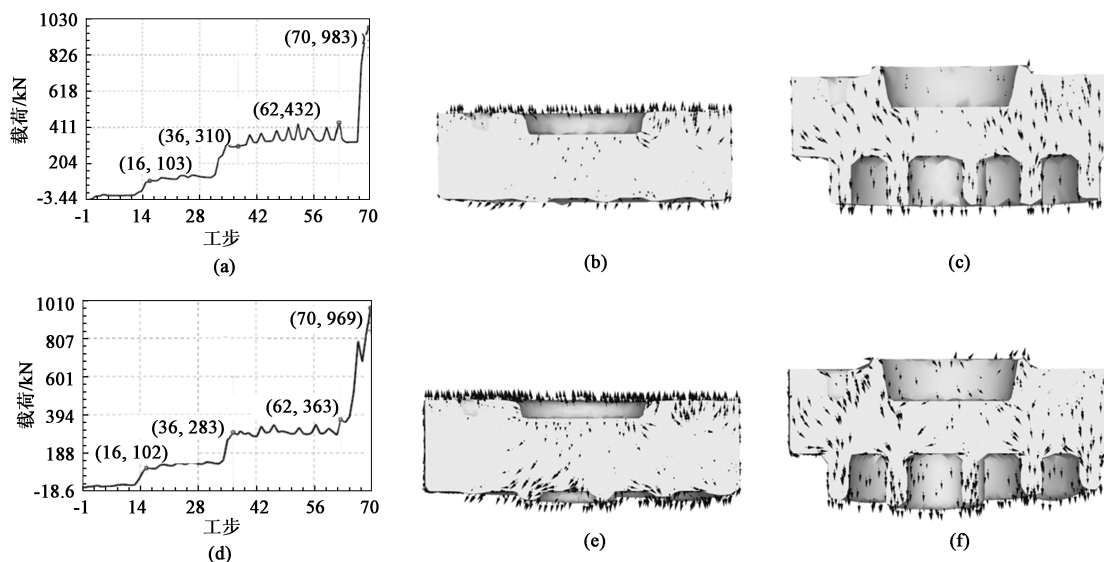


图 6 涡旋盘数值分析结果

(a) 采用背压结构的成形载荷 (b) 采用背压结构初期的金属流动情况 (c) 采用背压结构中期的金属流动情况
(d) 采用分流腔结构的成形载荷 (e) 采用分流腔结构初期的金属流动情况 (f) 采用分流腔结构中期的金属流动情况

Fig. 6 Numerical analysis results of scroll

(a) Forming load with back pressure structure (b) Metal flow condition in early stage with back pressure structure
(c) Metal flow condition in middle stage with back pressure structure (d) Forming load with splitter cavity structure
(e) Metal flow condition in early stage with splitter cavity structure (f) Metal flow condition in middle stage with splitter cavity structure

个时期金属材料以向凸模方向填充为主,同时以较慢的速度向凹模方向流动,如图 6e 所示,此阶段成形载荷约为 102 kN。成形中期,随着凸模的继续下压,凸模和坯料的接触面积增大,金属向上流动的阻力随之增大并逐渐大于向下流动的阻力,金属材料向下流动的速度逐渐增大,如图 6f 所示,此刻成形载荷快速增大至 283 kN,随后缓慢增大至 363 kN。

同样的,锻件采用不同的工艺方案所需的成形载荷会随之改变^[8]。分析两种成形工艺的成形载荷,在挤压过程中背压阻尼式控制方法中的背压结构会阻碍金属材料向凹模型腔内流动^[9],会导致凸模载荷增加。比较两种成形工艺的成形载荷,20 kN 的背压力在成形初期导致凸模载荷比减压式控制方法大 27 kN,到成形末期大 69 kN,此时凸模载荷增加量约为背压力的 3.5 倍,可见随着凸模的持续推进,背压力产生的阻碍作用力将逐渐增大。分析比较后可知,两种成形工艺的最大成形载荷基本相同,在成形中期,采用减压式控制方法的成形载荷更小。

金属流动情况会影响锻件成形质量的稳定性^[10],分析两种成形工艺的金属流动情况。在成形过程中,一部分基圆外径处的金属材料向基圆中心

流动,如图 6f 所示,因此,在凹模中加入背压结构之前,基圆中心处的金属材料补料充足,而基圆外径处金属材料补料困难,导致在成形过程中基圆中心处金属材料的径向流动速度大于基圆外径处。在采用背压阻尼式控制方法后,由于背压结构会阻碍基圆中心处金属材料流动,因此,在成形过程中涡旋各部分的金属流动速度基本保持一致,如图 6c 所示。对于采用两种控制方法后金属的流动性而言,采用背压阻尼式控制方法在成形过程中的金属流动性更好。

2.3 成形工艺对模具的影响

通常在锻造生产中的模具成本比较高^[11],加工过程中等效应力过大会导致模具发生断裂进而失效,因此,对两种成形工艺的凹模等效应力分布进行分析。带背压阻尼结构的凹模在成形过程中的最大等效应力为 506 MPa,如图 7a 所示。带分流腔结构的凹模在成形过程中的最大等效应力为 410 MPa,如图 7b 所示。造成这一现象的主要原因为:背压结构会阻碍金属材料向凹模模膛内流动,导致成形载荷增大,凸模载荷增大会导致凹模的等效应力增大。由于带背压结构的凹模的最大等效应力较大,因此,理论上带背压结构的凹模发生断裂失效的概率更大。

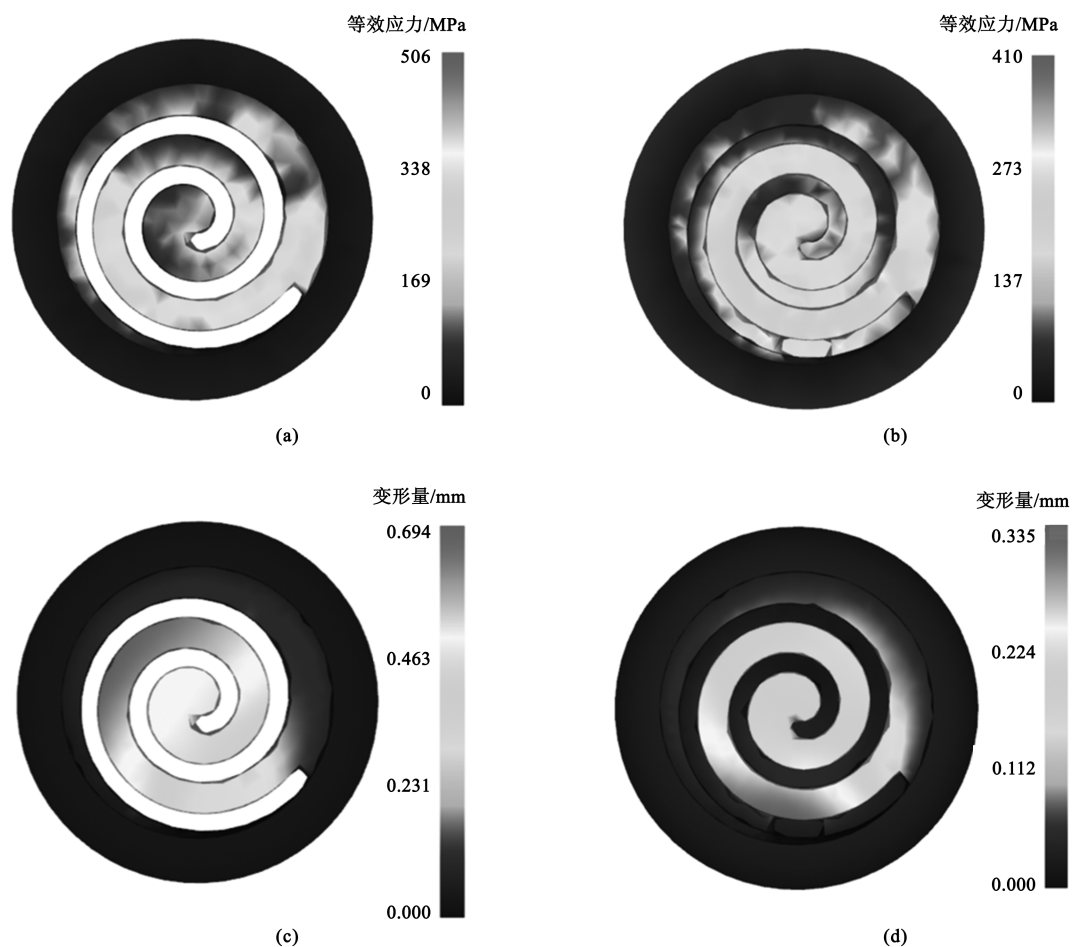


图7 模具数值分析结果

(a) 带背压结构凹模等效应力分布 (b) 带分流腔结构凹模等效应力分布 (c) 带背压结构凹模变形量分布
(d) 带分流腔结构凹模变形量分布

Fig. 7 Numerical analysis results of die

(a) Equivalent stress distribution of die with back pressure structure (b) Equivalent stress distribution of die with splitter cavity structure
(c) Deformation amount distribution of die with back pressure structure (d) Deformation amount distribution of die with splitter cavity structure

通常模具在挤压过程中会发生变形, 周期性的变形会导致模具发生疲劳断裂^[12], 因此, 对两种成形工艺的凹模的变形分布进行分析。带背压结构的凹模在成形过程中的最大变形量为 0.694 mm, 如图 7c 所示。带分流腔结构的凹模在成形过程中的最大变形量为 0.335 mm, 如图 7d 所示。虽然这种变形会在脱模后恢复, 但长期的周期性变形会使模具发生疲劳断裂。对两种成形工艺的凹模变形量而言, 带背压结构的凹模变形量更大, 因此, 理论上带背压结构的凹模相比采用分流腔结构的凹模更容易发生疲劳断裂。

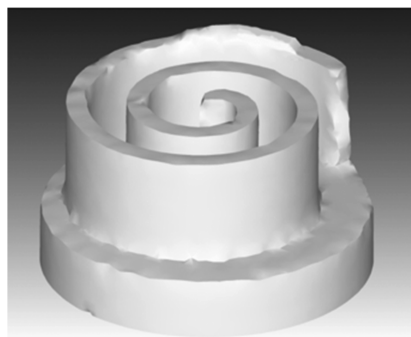
此外, 带背压结构的模具相较于带分流腔结构的模具结构更复杂。采用背压结构的成形工艺方案时需要在模具中额外增加机构或可以提供背压力的专用锻压机床, 增加了模锻的成本。

3 精密模锻成形验证

根据数值模拟结果, 设计制造了带分流腔结构的精密锻模, 并制定相应的精密模锻工艺, 进行模锻试验。模锻采用 200 t 热模锻压力机, 坯料材料为 6061 铝合金, 模锻温度为 $(400 \pm 10)^\circ\text{C}$, 下料直径为 $\Phi 60$ mm、高度为 16.5 mm。图 8 为数值模拟成形件和试验所得涡旋盘锻件实物对比。可见, 试验结果与模拟结果吻合较好, 涡旋盘均填充饱满, 未出现折叠、裂纹、压伤等缺陷。精密模锻试验很好地验证了数值模拟的准确性。

4 结论

(1) 在涡旋盘动盘成形过程中, 采用背压结构



(a)



(b)

图 8 涡旋盘模拟成形件 (a) 与精密模锻件实物 (b)

Fig. 8 Simulated forming part (a) and actual precision die forgings (b) of scroll

的凹模等效应力较大且变形量较大,但锻件金属流动更均匀,成形效果更好;采用分流腔结构的凹模的等效应力更小且变形量更小,模具寿命高,生产成本低。具体采用何种工艺方法可根据实际需求进行选择。

(2) 结合模拟仿真结果,利用带分流腔结构的模具进行精密模锻成形,最终得到的涡旋盘实物的质量较好,同时精密模锻试验结果验证了数值模拟仿真的准确性。

参考文献:

- [1] 郭刚. 变截面涡旋盘铣削参数与齿变形规律研究 [J]. 机械设计与制造工程, 2021, 50 (7): 24-28.
Guo G. Study on milling parameters and tooth deformation law of variable cross-section scroll plates [J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2021, 50 (7): 24-28.
- [2] 郭刚. 变截面涡旋盘高速铣削关键参数及实验研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2019.
Guo G. Key Parameters and Experimental Research of High-speed Milling of Variable Cross-section Scroll [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2019.
- [3] 吴涛, 段自豪, 石文超, 等. 空调压缩机用静涡旋盘成形工艺优化 [J]. 锻造与冲压, 2019, (9): 65-68.

- Wu T, Duan Z H, Shi W C, et al. Optimization of static scroll forming process for air conditioning compressor [J]. Forging & Metalforming, 2019, (9): 65-68.
- [4] 吴进, 王成勇, 何大宏, 等. 背压加载方式对轻量化压缩机涡旋盘成形质量的影响 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (1): 77-84.
Wu J, Wang C Y, He D H, et al. Influence of back pressure loading mode on forming quality of lightweight compressor scroll [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (1): 77-84.
- [5] 夏巨谌, 张茂, 金俊松, 等. 闭式模锻成形理论及其关键技术研究 [J]. 塑性工程学报, 2018, 25 (5): 1-10.
Xia J C, Zhang M, Jin J S, et al. Study on forming theory and key technology of close-die forging [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2018, 25 (5): 1-10.
- [6] 付传锋, 李月明, 陈胜, 等. 高速动车组钢质制动盘精密模锻研究 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (6): 64-71.
Fu C F, Li Y M, Chen S, et al. Research on precision die forging of steel brake discs for high-speed EMUs [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (6): 64-71.
- [7] 时迎宾, 薛世博, 段园培, 等. 新能源汽车 4032 铝合金涡旋件背压成形数值模拟与实验研究 [J]. 精密成形工程, 2020, (5): 88-92.
Shi Y B, Xue S B, Duan Y P, et al. Numerical simulation and experimental study on back pressure forming of new energy vehicle 4032 aluminum alloy scroll [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2020, (5): 88-92.
- [8] 魏科, 马庆, 徐勇, 等. 大型/复杂模锻件省力成形工艺研究进展 [J]. 塑性工程学报, 2021, (5): 166-182.
Wei K, Ma Q, Xu Y, et al. Research progress of less-loading forming technology for large-sized/complex die forgings [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, (5): 166-182.
- [9] 卜军伟, 蔡云. 基于 DEFORM 的直齿圆柱齿轮精锻工艺 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (11): 43-48.
Bu J W, Cai Y. Effect of precision forging process for spur gear based on DEFORM [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (5): 43-48.
- [10] 张旭峰, 王强, 张治民, 等. 变形参数对旋转反挤压大塑性变形金属流动的影响 [J]. 热加工工艺, 2021, 50 (5): 72-75.
Zhang X F, Wang Q, Zhang Z M, et al. Effect of deformation parameters on metal flow in large plastic deformation of rotary backward extrusion [J]. Hot Working Technology, 2021, 50 (5): 72-75.
- [11] 王鹏, 龚小涛, 吕学春. TC6 钛合金叶片精锻工艺及模具变形补偿设计 [J]. 锻压技术, 2021, 45 (6): 48-53.
Wang P, Gong X T, Lyu X C. Precision forging process and design on mold deformation compensation for TC6 titanium alloy blade [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 45 (6): 48-53.
- [12] 姜鼎. 变壁厚静涡旋盘背压成形工艺优化研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2020.
Jiang D. Study on Back Pressure Forming Process Optimization of Variable Wall Thickness Fixed Scroll [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020.