

基于响应面法的喷射成形 7055 铝合金飞机轮毂锻造工艺优化

杨兴旺¹, 陶志伟¹, 袁 凯², 黄 瑶¹, 王雷刚¹

(1. 江苏大学 材料科学与工程学院, 江苏 镇江 212013; 2. 江苏豪然喷射成形合金有限公司, 江苏 镇江 212009)

摘要: 针对由于飞机轮毂形状复杂而导致的轮毂锻件充填不完整和模具磨损等问题, 在某型号飞机起落系统的轮毂锻造中, 采用喷射成形 7055 铝合金挤压棒, 并采用热模锻方式和增加锻件预成形设计, 建立以锻件的终锻充填率和终锻力为优化目标、以坯料预锻压下量、坯料加热温度、模具预热温度和模具下压速度为设计变量的响应面模型。利用二阶响应面法与 Design Expert 软件相结合, 对轮毂锻件的工艺参数进行优化, 确定最佳参数为: 坯料预锻压下量为 45.30 mm、坯料预热温度为 430 ℃、模具预热温度为 447 ℃、模具下压速度为 5.00 mm·s⁻¹。生产验证表明, 改进后的预成形方案与工艺参数可以在较低的终锻力下, 解决充填不完整的问题, 生产出合格的产品。

关键词: 飞机轮毂; 喷射成形; 7055 铝合金; 热模锻; 预成形; 响应面法

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.10.004

中图分类号: TG319

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 10-0023-06

Optimization on forging process for spray formed 7055 aluminum alloy aircraft wheel hub based on response surface method

Yang Xingwang¹, Tao Zhiwei¹, Yuan Kai², Huang Yao¹, Wang Leigang¹

(1. School of Material Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

2. Jiangsu Haoran Spray Forming Alloy Co., Ltd., Zhenjiang 212009, China)

Abstract: For the problems such as incomplete filling of wheel hub forgings and mold wear caused by the complex shape of aircraft wheel hub, in the wheel hub forging for a certain type of aircraft take-off and landing system, spray formed 7055 aluminum alloy extruded rod was used, and the hot die forging method was taken by adding a design of forgings preforming. Taking final forging filling rate and final forging force of forgings as the optimization goal and billet pre-forging reduction amount, billet heating temperature, mold preheating temperature and mold pressing speed as the design variables, the response surface model was established. Then, the process parameters of wheel hub forgings were optimized by the combination of the second-order response surface method and Design Expert software, and the optimal parameters were determined as the billet pre-forging reduction amount of 45.30 mm, the billet preheating temperature of 430 ℃, the mold preheating temperature of 447 ℃ and the mold pressing speed of 5.00 mm·s⁻¹. The production verification shows that the improved preforming scheme and process parameters can solve the problem of incomplete filling and produce qualified products under the lower final forging force.

Key words: aircraft wheel hub; spray forming; 7055 aluminum alloy; hot die forging; preforming; response surface method

飞机轮毂作为飞机起降系统中核心组成部分的重要支撑结构件, 保证了飞机在起飞、降落以及滑行过程中的安全性能, 而目前国内飞机轮毂大部分采用的是铝合金压铸成形的生产工艺^[1]。随着成形工艺的快速发展, 轮毂的锻造成形凭借高效、省料、

高精度、高性能等特点, 正逐渐取代传统的压铸成形^[1]。目前, 锻造铝合金逐渐成为我国航空机轮主要材料, 而 7055 铝合金属于 Al-Zn-Mg-Cu 系超高强度铝合金, 具有高韧性、高强度、优良的抗腐蚀性以及低密度轻合金化的特点, 被广泛应用于航空航天领域中一些主要的结构件中^[2]。目前, 在工业生产中已得到应用的铝合金轮毂锻造工艺经常出现锻件充填不满、折叠等缺陷, 这些缺陷可以通过改变工艺策略来改善与控制^[3-6]。

本文研究的飞机轮毂的形状复杂、尺寸较大, 在锻造过程中会产生锻件充填不完整和成形载荷较大等问题, 针对此问题, 重新研究其制坯工艺, 增

收稿日期: 2021-10-12; 修订日期: 2022-01-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51775249)

作者简介: 杨兴旺 (1995-), 男, 硕士研究生

E-mail: 1286953517@qq.com

通信作者: 王雷刚 (1963-), 男, 博士, 教授, 博士生导师

E-mail: lgwang@mail.ujs.edu.cn

加了一道锻件预成形工序，结合改进之后的工艺流程，设计了关于多目标的中心复合设计（Central Composite Design, CCD）正交试验，以锻件的终锻充填率和终锻力为目标函数，通过结合有限元和响应面法，对飞机轮毂锻件的工艺参数进行优化，并通过实际生产进行验证。

1 飞机轮毂结构和成形工艺分析

1.1 7055 铝合金

喷射成形 7055 铝合金挤压棒的化学成分组成如表 1 所示。

表 1 7055 铝合金的化学成分（%，质量分数）
Table 1 Chemical compositions of 7055 aluminum alloy（%，mass fraction）

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Zr	Al
0.1	0.15	2.0~2.5	0.05	1.8~2.2	0.04	7.7~8.4	0.06	0.08~0.25	余量

1.2 零件结构分析

该零件的结构比较复杂，属于等轴类含有高筋和孔型的结构，与传统的轮毂不同，其包含有内、外高筋圆环，底部存在向内的凹槽，外部连接轮胎，内部安置刹车装置。飞机轮毂零件的二维图和三维图如图 1 所示，其在中心线方向上呈轴对称。图 1a 中，1 处的外轮廓是较不规则的凹槽，2

处为轴对称的圆柱孔，其高度为 247 mm，厚度为 40 mm，高径比约为 2，其中轮毂的外形轮廓具有一定的拔模斜度，图 1b 为锻件的 3/4 三维剖面图。在锻造过程中，由于轮毂内、外环的高度较高，且壁厚均较薄，金属流动不易，使得锻件的终锻充填率较低，模具承受载荷较大，最终造成模具损坏。

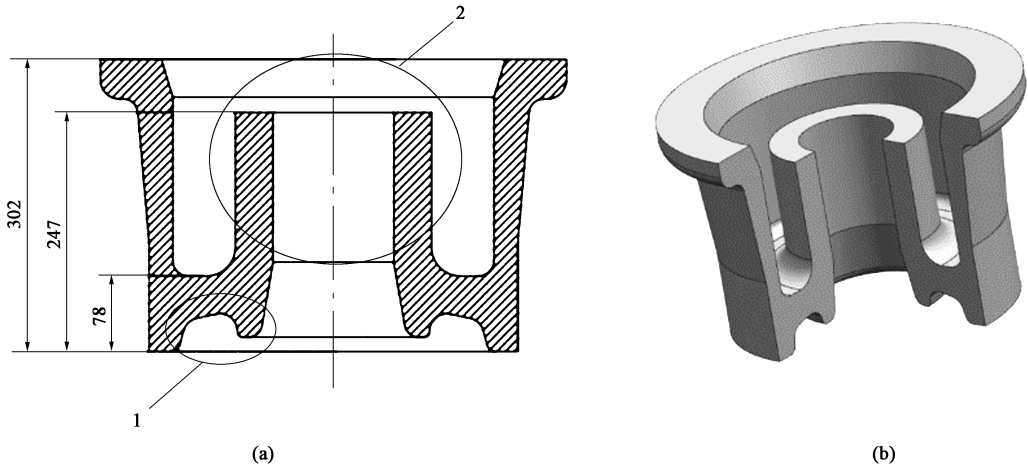


图 1 飞机轮毂锻件图
(a) 二维图 (b) 三维剖面图
Fig. 1 Drawings of aircraft wheel hub forgings
(a) Two-dimensional drawing (b) Three-dimensional section drawing

1.3 锻件成形工艺分析

轮毂锻件的成形工艺路线为：下料—镦粗—冲孔—锻造成形，在江苏某公司的试生产过程中，发现锻件的终锻充填率比较低，不能达到锻件的加工尺寸要求，需要改善其成形工艺路线。由于飞机轮毂在轴向尺寸上的变形量比较大，再加上零件本身具有内、外高筋，因此，在轮毂锻造过程中考虑增加一道火次，进行锻件的预成形，本文设计的成形工艺路线为：挤压棒料—镦粗—冲孔—预锻成形—

终锻成形，如图 2 所示。

2 试验方案的选取

2.1 有限元模型的建立

利用 Deform-3D 有限元分析时，由于轮毂锻件为对称体，采用 1/8 锻件进行模拟，不但能节省计算时间，而且能够有效解决模拟计算过程中的准确性问题。上模的运动速度为 $5.00\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ，摩擦因

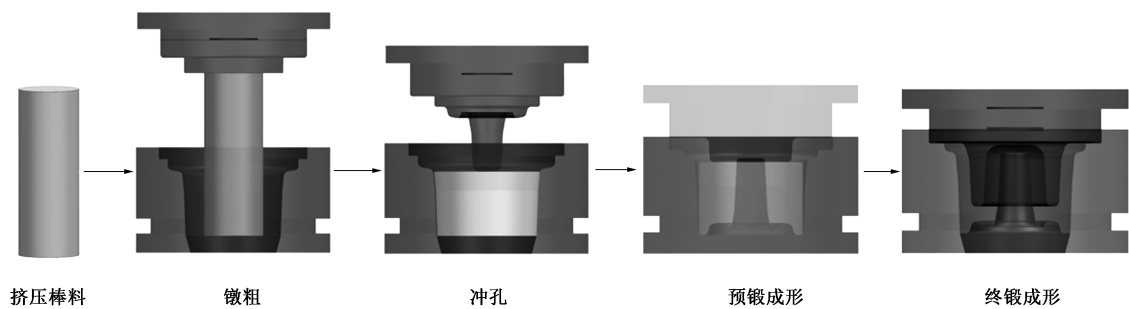


图 2 改进后的飞机轮毂锻件工艺流程
Fig. 2 Improved process flow of aircraft wheel hub forgings

数为 0.3，热传导系数为 $11\text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ ，平均每步增长 0.25 mm。

2.2 试验方案设计

响应面法根据设计变量与优化目标采取合理的试验设计方法，通过试验获得数据，并使用回归方程来拟合设计变量与优化目标之间的函数关系，通过对回归方程的研究来寻找最优设计变量，是一种解决多变量问题的优化方法^[7]。

针对飞机轮毂最大尺寸凸台处的充填率不足和较大的成形载荷对模具的损耗比较严重的问题，在热模锻过程中，由于模具的受力情况比较复杂，模具损耗较为严重，因此，降低终锻载荷对于模具使用寿命的延长以及工业经济效益和模具材料利用率的提高具有实际意义。本文选择锻件的终锻充填率 Y_1 和终锻力 Y_2 作为优化目标函数。

锻件的终锻充填率 Y_1 的定义为：

$$Y_1 = \frac{G_1}{G_0} \times 100\% \tag{1}$$

式中： G_1 为坯料与上、下模具型腔的实际接触面积； G_0 为坯料与上、下模具型腔的理想接触面积。

锻件的终锻力 Y_2 定义为：

$$Y_2 = \text{Max}(F_Y) \tag{2}$$

式中： F_Y 为模锻过程中上模在 Y 轴运动方向（竖直方向）上给予锻件的最大成形载荷，kN。

为了获得内部组织与外形结构无缺陷且综合性能优良的锻件，同时充分考虑在实际生产过程中每个锻造工艺参数对轮毂锻件的综合影响，选取坯料预锻压下量 A 、终锻压下量 B 、坯料加热温度 C 、模具预热温度 D 、模具下压速度 E 为研究对象。由图 1 可知，锻件的变形总量为一个定值，坯料预锻压下量与终锻压下量是关于一次函数的反比例函数关系，因此，坯料预锻压下量与终锻压下量只需要研究其中一个即可，选择坯料预锻压下量作为研究对

象。设置模具预热温度比坯料加热温度高 20°C ，以降低坯料与模具接触瞬间的温度差。采用 4 因素 5 水平的中心复合试验设计^[8]，如表 2 所示，得到的部分试验结果如表 3 所示。

表 2 4 因素 5 水平中心复合试验设计
Table 2 Central composite experiment design of four factors and five levels

因素	水平				
	-2	-1	0	1	2
A/mm	10	20	30	40	50
$C/^\circ\text{C}$	370	390	410	430	450
$D/^\circ\text{C}$	390	410	430	450	470
$E/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	5	10	15	20	25

表 3 部分试验模拟结果
Table 3 Part simulation results of experiment

序号	A/mm	$C/^\circ\text{C}$	$D/^\circ\text{C}$	$E/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	$Y_1/\%$	Y_2/kN
1	40	390	450	20	0.9365	4870
2	10	410	430	15	0.7777	2760
3	20	430	450	10	0.8597	2540
4	50	410	430	15	0.9793	4960
5	40	430	410	20	0.9371	3750
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
26	40	430	450	10	0.9490	3170
27	30	370	430	15	0.8866	5820
28	20	430	410	10	0.8432	2870
29	20	430	450	20	0.8540	2710
30	30	410	430	15	0.8968	3290

3 响应面模型的分析 and 优化

3.1 模型建立

综合表 3 中的模拟结果，对其数据进行二阶响

应面分析,得到的模型方程如式(3)和式(4)所示^[9]。

$$Y_1 = 30.92 + 2.0A + 0.122C - 0.083D + 0.39E - 0.00166AC - 0.00124AD + 0.00283AE + 0.000013CD + 0.000513CE - 0.00138DE - 0.00548A^2 - 0.000061C^2 + 0.000182D^2 - 0.00448E^2 \quad (3)$$

$$Y_2 = 2.01 \times 10^5 + 1.65A - 622.50C - 239.67D - 313.13E - 0.68AC + 0.53AD + 0.89AE + 0.31CD + 0.47CE + 0.21DE + 1.44A^2 + 0.62C^2 + 0.10D^2 + 0.75E^2 \quad (4)$$

锻件的终锻充填率 Y_1 与终锻力 Y_2 在模型中的试验值与预测值如图3所示,模型数值回归分析结果如表4所示。

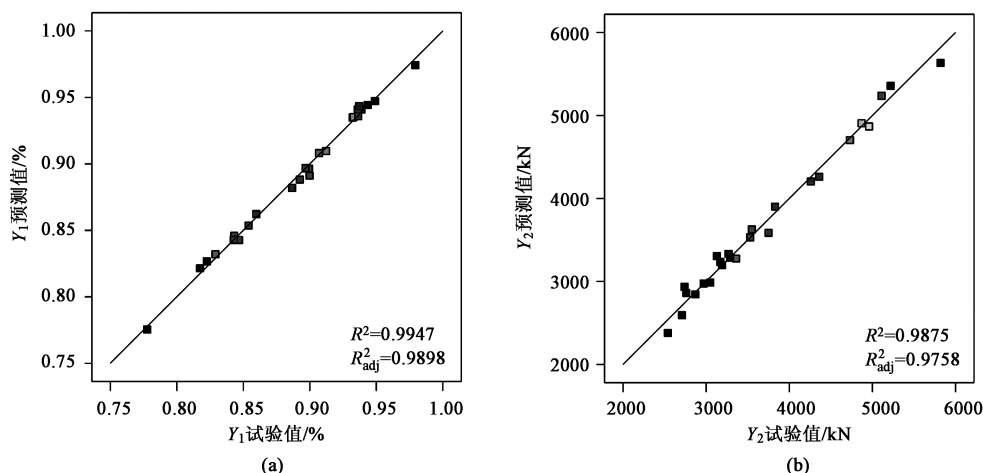


图3 预测值与试验值对比

(a) 终锻充填率 (b) 终锻力

Fig. 3 Comparison between predicted and experimental values

(a) Final forging filling rate (b) Final forging force

表4 响应面回归分析结果

Table 4 Results of response surface regression analysis

目标函数	决定系数 R^2	修正决定系数 R^2_{adj}	统计量 F	概率 P	显著性
Y_1	0.9947	0.9898	202.53	0.0003	显著
Y_2	0.9875	0.9758	84.56	<0.0001	显著

从图3和表4中可以看到,两个回归方程的决定系数分别为0.9947和0.9875, R^2 均接近于1,统计量 F 值远大于1,且 P 值均小于 α ($\alpha=0.05$),说明两个二阶回归方程均是显著的^[10],且二阶响应面模型的拟合程度较好、可信度较高以及预测值的精度较高^[7],因此,式(3)、式(4)能够较准确地预测铝合金飞机轮毂锻造成形过程中优化目标参数的数值^[11]。

3.2 模型分析与优化

为了更好地了解飞机轮毂锻造过程中设计变量对优化目标的影响,利用3D图形来开展具体分析^[7]。

由图4可知:随着预锻压下量的增加和坯料加热温度的升高,铝合金的流动性较好,因此,流向轮毂锻件尺寸最大处的材料变多,锻件的终锻充填率升高;随着模具下压速度的降低和模具预热温度

的增加,坯料与模具接触时模具温度比坯料温度高,锻件尺寸最大处材料的温度降低速度会减缓,锻件的变形阻力降低,锻件的终锻充填率升高。

由图5可知:随着预锻压下量的缩短和轮毂坯料加热温度的提高,铝合金的流动性提高,变形阻力降低,同时变形材料的预锻压下量不断减少,终锻力也随之降低;随着模具预热温度的升高和模具下压速度的降低,坯料与模具接触时的热量损失降低,坯料整体的流动性增强同时下压速度降低,模具的冲击载荷减小。

综上所述,飞机轮毂在锻造过程中的4个设计变量对锻件的两个目标函数具有不同程度的影响。因此,为了使锻件获得更小的终锻力,同时终锻充填率更高,需要将上述各个设计变量在响应面回归方程式(3)和式(4)的基础上进行具体求解,可将其解析为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{优化目标: } \begin{cases} 95\% \leq Y_1 \leq 100\% \\ 0 < Y_2 \leq 60\% \text{Max}(F_Y) \end{cases} \\ \text{变量范围: } \begin{cases} 40 \text{ mm} \leq A \leq 50 \text{ mm} \\ 390 \text{ }^\circ\text{C} \leq C \leq 430 \text{ }^\circ\text{C} \\ 410 \text{ }^\circ\text{C} \leq D \leq 450 \text{ }^\circ\text{C} \\ 5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1} \leq E \leq 15 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1} \end{cases} \end{array} \right. \quad (5)$$

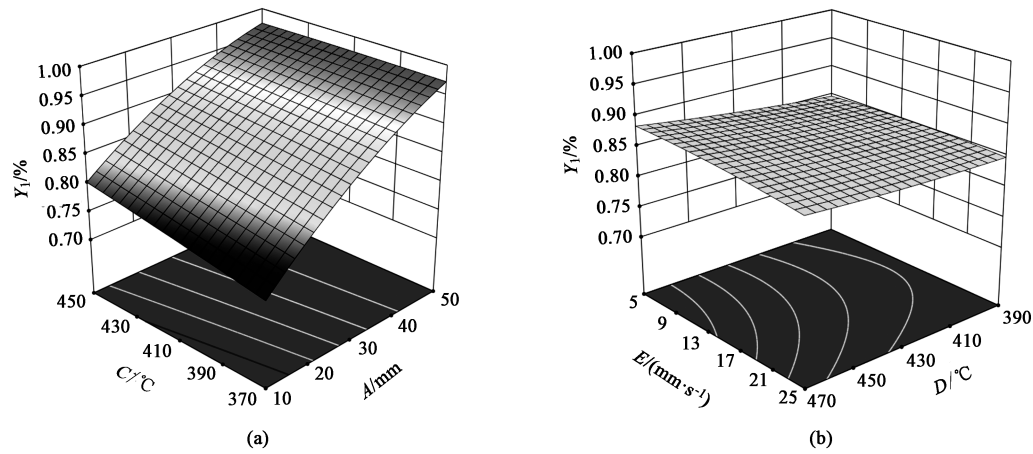


图 4 Y_1 与设计变量的关系
(a) Y_1 与 A 、 C (b) Y_1 与 D 、 E
Fig. 4 Relationships between Y_1 and design variables
(a) Y_1 and A , C (b) Y_1 and D , E

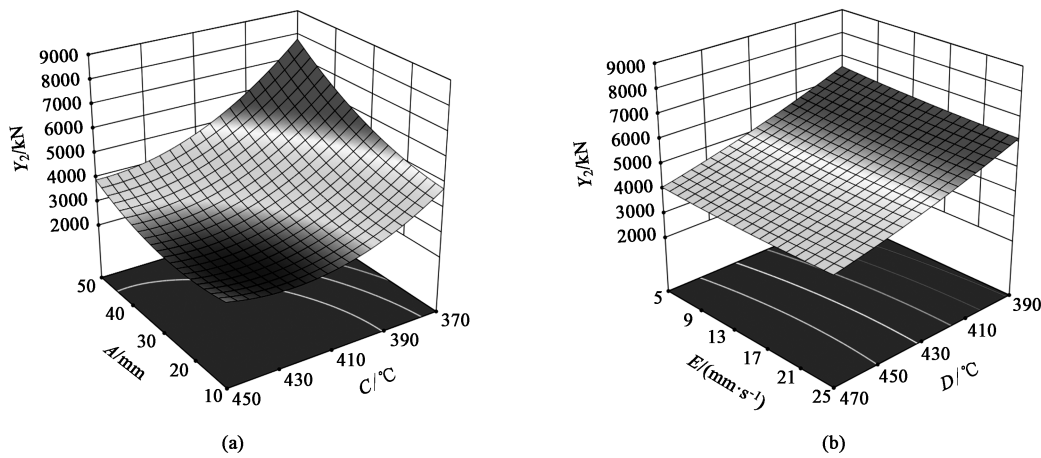


图 5 Y_2 与设计变量的关系
(a) Y_2 与 A 、 C (b) Y_2 与 D 、 E
Fig. 5 Relationships between Y_2 and design variables
(a) Y_2 and A , C (b) Y_2 and D , E

利用 Design Expert 对式 (5) 所示的优化目标求解其最佳变量组数值和预测值, 如表 5 所示。通过对其进行有限元数值模拟, 得到锻件的终锻充填率为 95.68%、终锻力为 3510 kN, 预测值与最终结

果的误差范围均在 5% 以下, 表明响应面法及优化是可靠的^[12]。

4 验证

基于 Deform-3D 有限元软件对上述优化的工艺参数进行模拟与实际的生产验证, 如图 6 所示。由图 6 可见, 轮毂锻件终锻完成时最大尺寸处充填完整, 其终锻力为 3510 kN。结果验证表明, 本文采用的中心复合试验设计和响应面法对轮毂的锻造工艺参数优化有较好的效果, 能够在较小的终锻载荷条件下充分保证锻件的充填完整性。

表 5 最佳设计变量值及优化目标预测值				
Table 5 Values of optimal design variables and prediction values of optimized objects				
设计变量	A/mm	$C/^{\circ}\text{C}$	$D/^{\circ}\text{C}$	$E/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$
最优值	45.30	430	447	5.00
优化目标	$Y_1/\%$	Y_2/kN		
预测值	95.85	3495		

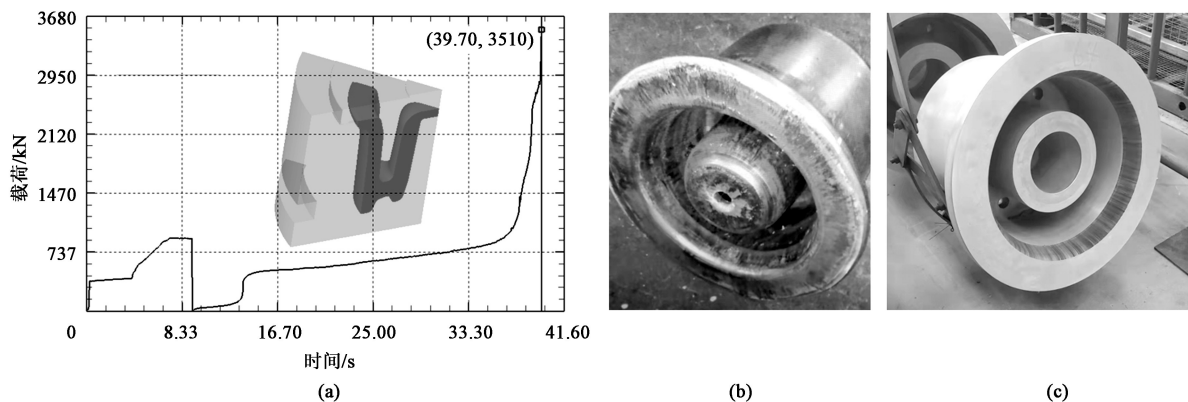


图 6 生产验证结果

(a) 成形载荷曲线与锻件模拟图 (b) 实际锻件 (c) 成品零件

Fig. 6 Results of production verification

(a) Curve of forming load and simulation drawing of forgings (b) Actual forgings (c) Finished part

5 结论

(1) 针对在模拟分析时飞机轮毂锻件最大尺寸的凸台部位出现的充填不完整情况,重新设计其锻造工艺路线,增加一道预成形设计。

(2) 通过响应面法分析和 Design Expert 进行优化和模拟验证,确定最优锻造工艺参数组合为:预锻压量为 45.30 mm、坯料加热温度为 430 ℃、模具预热温度为 447 ℃、模具下压速度为 $5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

(3) 生产结果证明,采用该工艺参数可以在较小的锻造成形载荷下,生产满足需要的零件,降低材料的损耗。本文使用的方法对喷射成形 7055 铝合金飞机轮毂锻造具有较好的指导意义。

参考文献:

- [1] Partha Pratim Chatterjee. Recent developments in aerospace materials [J]. Journal of Metallurgy and Materials Science, 2016, 58 (2): 9-17.
- [2] 燕云程, 黄蓓, 李维俊, 等. Al-Zn-Mg-Cu 系超高强度铝合金的研究进展 [J]. 材料导报, 2018, 32 (S2): 358-364.
Yan Y C, Huang B, Li W J, et al. Research process of Al-Zn-Mg-Cu ultra-high strength aluminum alloy [J]. Materials Review, 2018, 32 (S2): 358-364.
- [3] 吴道祥, 周杰, 张建生, 等. 7050 铝合金航空锻件热锻成形穿流缺陷分析 [J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2015, 43 (4): 69-73.
Wu D X, Zhou J, Zhang J S, et al. Analyzing partial draining of 7050 aluminum alloy aircraft forging after hot die forming [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science Edition, 2015, 43 (4): 69-73.
- [4] 冯正海. 铝合金前梁模锻件粗晶缺陷及对策 [J]. 轻合金加工技术, 2009, 37 (11): 33-35.
Feng Z H. Aluminum alloy die forgings former beam defect of coarse-grained and countermeasures [J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2009, 37 (11): 33-35.
- [5] 刘静安, 潘伟津, 罗立新, 等. 铝合金锻件主要缺陷的特征及产生原因 [J]. 轻合金加工技术, 2014, 42 (1): 54-57.
Liu J A, Pan W J, Luo L X, et al. Main features and cause of the defects of aluminum alloy forging [J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2014, 42 (1): 54-57.
- [6] 马运柱, 闫盼莹, 胡则栋. 航空机轮轮毂的静力和疲劳分析及其结构改进 [J]. 航空精密制造技术, 2017, 53 (2): 32-37.
Ma Y Z, Yan P Y, Hu Z D. Static and fatigue analysis and structural improvement of aviation wheel hub [J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2017, 53 (2): 32-37.
- [7] 杜重凯, 黄瑶, 王雷刚, 等. 基于响应面法的机动车尾气后处理系统铝泵体的精锻工艺优化 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (1): 1-8.
Du C K, Huang Y, Wang L G, et al. Optimization on precision forging process for aluminum alloy pump housing in motor vehicle exhaust gas aftertreatment system based on response surface method [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (1): 1-8.
- [8] Owolabi R U, Usman M A, Kehinde A J. Modelling and optimization of process variables for the solution polymerization of styrene using response surface methodology [J]. Journal of King Saud University-Engineering Sciences, 2018, 30 (1): 22-30.
- [9] Poonkuzhali K, Palvannan T. Thermostabilization of laccase by polysaccharide additives: Enhancement using central composite design of RSM [J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 86 (2): 860-864.
- [10] 李向阳, 徐长达, 周佑才, 等. 基于响应面法的游艇转向臂锻造工艺优化 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (2): 1-6.
Li X Y, Xu C D, Zhou Y C, et al. Optimization on forging process for yacht steering arm based on response surface method [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (2): 1-6.
- [11] 石尚, 董洪波, 唐予松, 等. 2A12 铝合金截止阀阀体成形过程模拟研究 [J]. 塑性工程学报, 2019, 26 (4): 48-54.
Shi S, Dong H B, Tang Y S, et al. Simulation study on forming process of 2A12 aluminum alloy stop valve body [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26 (4): 48-54.
- [12] Zhang J, Wu D, Zhou J, et al. Multi-objective optimization of process parameters for 7050 aluminum alloy rib-web forgings' precise forming based on Taguchi method [J]. Procedia Engineering, 2014, 81: 558-563.