

铝合金制动钳金属型重力铸造工艺的多目标优化

张 涛, 苏小平, 毛旭海

(南京工业大学 机械与动力工程学院, 江苏南京 211816)

摘要: 利用数值模拟对铝合金制动钳金属型重力铸造过程进行分析, 预测了钳体中缩松缩孔缺陷的分布情况, 并分析其形成原因, 改进了冷却方案, 基于正交试验对工艺参数进行了多目标优化。得到最优工艺参数为: 浇注时间28 s、浇注温度700 ℃、模具预热温度300 ℃、冷却水温度35 ℃。结果表明, 优化后的制动钳铸件无缩松缩孔缺陷。通过生产试制验证了此优化工艺的可行性。

关键词: 制动钳; 铝合金; 金属型重力铸造; 数值模拟; 工艺优化

近年来, 新能源汽车得到飞速发展, 但是新能源汽车的续航里程仍是瓶颈, 同时碳中和已成为全球范围内应对气候变化的长期发展战略。因此无论是在传统汽车节能减排的要求下, 还是新能源汽车克服里程焦虑以及碳中和等环保目标的推动下, 汽车轻量化技术已成为世界汽车工业发展的趋势, 如铝合金和镁合金等轻量化材料也已逐渐被广泛应用于汽车零部件的生产中^[1-2]。制动钳是汽车制动系统中最主要的受力部件, 其材质一般为球墨铸铁, 大多通过砂型铸造得到, 质量较大, 表面较为粗糙且容易出现铸造缺陷^[3]。相比于砂型铸造的球墨铸铁制动钳, 通过金属型重力铸造制成的铝合金制动钳具有质量更小, 表面较为光洁、组织致密等优点^[4]。本文针对某车用铝合金制动钳, 通过MAGMAsoft软件对其金属型重力铸造成形过程进行模拟分析, 采用正交试验法对工艺参数进行多目标优化, 以期提高铸件的成形质量。

1 原始工艺分析

1.1 数值模拟模型建立

按金属型重力铸造的工艺要求, 通过CATIA软件建立铝合金制动钳浇注系统的三维模型, 如图1所示, 设计为一模两件式浇注工艺方案。单个制动钳铸件质量为3.744 kg, 三维尺寸为296 mm × 152 mm × 130 mm。由于该型铝合金制动钳为整体型固定式, 结构较为复杂, 主体壁厚为9~45 mm不等, 壁厚不均匀, 其中两侧活塞孔处所在的部位厚度较厚。为使钳体两侧能够得到铝合金液补缩并使铸件实现顺序凝固, 采用侧注式浇注系统, 在钳体两侧设置内浇道, 并在其两侧上方添加冒口以增强浇注系统的补缩能力, 同时为避免铸件充型过程中产生卷气和夹渣等铸造缺陷, 设计了三维尺寸为130 mm × 80 mm × 5 mm的10 × 10⁻⁶滤网片^[5]。将建立好的三维模型以stl格式导出, 并导入到MAGMAsoft软件中, 在网格划分

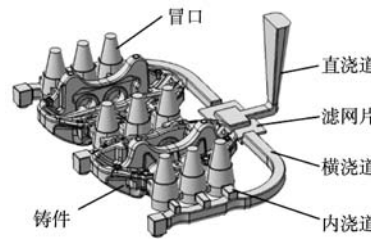


图1 浇注系统三维模型
Fig. 1 3D model of the gating system

作者简介:

张 涛 (1999-), 男, 硕士, 主要研究方向为铝合金成形工艺。电话: 18351808288, E-mail: zhangtaojobs@163.com

中图分类号: TG249.3

文献标识码: B

文章编号: 1001-4977 (2024)

09-1311-05

收稿日期:

2023-09-28 收到初稿,
2023-11-01 收到修订稿。

模块采用有限差分法进行自动网格划分，根据试验将网格数设置为3 900 000。

1.2 材料及工艺参数设置

制动钳材料为A356铝合金，其热物性参数如表1所示。模具采用H13钢。制动钳壁厚不均匀，采用金属型重力铸造成形时，为避免钳体薄壁部分过早凝固而使后续难以补缩，造成冷隔和浇不足等铸造缺陷，应适当提高浇注温度和模具预热温度，故设置初始浇注温度为740 ℃，模具预热温度为340 ℃。同时设置初始浇注时间为22 s。设定金属液与模具之间的传热系数为2 000 W/(m²·K)，模具间的传热系数为3 500 W/(m²·K)，为便于制动钳铸件活塞孔等部位的成形，在模具内放置有砂芯，设定砂芯与金属液、模具与砂芯之间的传热系数分别为1 000 W/(m²·K)和300 W/(m²·K)，初始冷却方式为室温20 ℃自然冷却。

表1 A356铝合金的热物性参数
Table 1 Thermophysical parameters of A356 aluminum alloy

密度 /(kg·m ⁻³)	液相 温度/℃	固相 温度/℃	潜热 /(kJ·kg ⁻¹)	导热系数 /(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
2 430	613	542	430.518	70

1.3 原始工艺数值模拟结果分析

图2是制动钳铸件在原始工艺下凝固过程中的固相率变化，模拟结果表明，铸件整体上有呈顺序凝固的趋势，即从钳体顶端和两侧薄壁处先凝固，并逐渐向两侧活塞孔所在厚壁处凝固。但由于活塞孔两侧部位较为厚大，传热困难，容易出现孤立液相区，在凝固时间为74.49 s和136.73 s时分别出现如图中圈出部位所示的孤立液相区，由于是采用一模两件工艺，故图中的孤立液相区呈对称分布。在金属型重力铸造的铸件



图2 铸件凝固过程中的固相率变化
Fig. 2 Changes of solid phase rate of the casting during the solidification process

凝固过程中，孤立液相区无法通过重力作用和冒口进行补缩，随着凝固过程体积的收缩将会出现缩松缩孔缺陷。

2 优化分析

2.1 冷却优化

通过对原始工艺方案数值模拟结果凝固过程中固相率的分析，铸件在凝固过程中出现了孤立液相区，不能实现顺序凝固，因此需要对钳体两侧活塞孔所在厚壁处的孤立液相区强化冷却，加快该部位的凝固速度从而改善凝固温度梯度，使其能够顺序凝固。图3是强化的冷却系统，冷却管路的直径和流量根据缩松缩孔缺陷的体积大小进行设置，各管路的开闭时间结合凝固过程中的温度和固相率变化确定，初始冷却水温度为25 ℃，表2是具体的初始冷却方案参数。在实际生产中，模具的水冷却系统是通过内外部管道连接形成闭合回路结构，其中冷却系统设备的控制采用单独的水路控制阀和流量控制阀，使每个冷却水通道的冷却水流速可以通过调节阀和流量计精确地调节和显示，从而实现冷却水的流速大小和开关闭时刻的控制。冷却水温度则可通过比例阀调节混合冷水与冷却回水，以达到要求的温度。

表2 初始冷却方案参数
Table 2 Initial cooling scheme parameter

管路编号	管路直径/mm	流速/(m ³ ·h ⁻¹)	开启时刻/s	关闭时刻/s
1	18	3.5	25	130
2	16	2	45	110
3	18	3	30	90
4	18	3	25	110
5	16	2	25	90
6	18	3	25	80

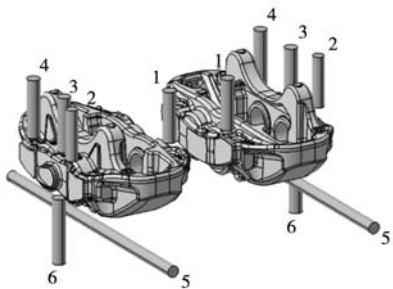


图3 冷却系统
Fig. 3 Cooling system

2.2 基于正交试验的工艺参数优化

在原始工艺方案基础上添加冷却措施后，利用正

交试验设计进行工艺参数的多目标优化。根据经验,浇注时间、浇注温度、模具预热温度和冷却水温度是金属型重力铸造工艺的重要参数,对铸件成形质量有显著影响,因此选取上述4个因素作为优化参数,并对每个因素在合适范围内设置4个水平,得到如表3所示的正交试验因素水平表,采用正交表 $L_{16}(4^4)$ 进行试验方案设计。

表3 正交试验的因素和水平
Table 3 Factors and levels of orthogonal tests

水平	A浇注 时间/s	B浇注 温度/℃	C模具预热 温度/℃	D冷却水 温度/℃
1	19	700	300	20
2	22	720	320	25
3	25	740	340	30
4	28	760	360	35

本文以缩松缩孔缺陷和二次枝晶间距作为对铸件质量的评价指标。缩松缩孔缺陷是制动钳铸件主要的内部缺陷,其直接影响铸件的力学性能和疲劳寿命。本文缩松缩孔缺陷的评判值是在考虑局部温度梯度和冷却速度的基础上,引入局部凝固时间的适用于预测铝合金铸件中的缩松缩孔缺陷的判据式^[6]:

$$\text{Porosity}=0.325\ 226\left(\frac{-G^2\times t^{2/3}}{R}\right)-0.287\ 53\quad(1)$$

式中: G 为局部温度梯度,℃/mm; t 为局部凝固时间,s; R 为冷却速度,℃/s;Porosity为铝合金的缩松缩孔缺陷的判断值,当铸件某处的判断值大于1时,则可认为该处将产生缩松缩孔缺陷^[6]。由于缩松缩孔缺陷的严重程度不仅与该判据式的计算结果有关,还与缺陷的体积和位置有关,因此综合以上要素,对试验结果中缩松缩孔缺陷的大小进行重新取值:当判据式计算结果的最大值大于1时,赋予1~9之间的值,值越小表明缩松缩孔缺陷的严重程度越低;当该值小于1时,则直接采用判据式计算结果的最大值。图4是重新取值的缩松缩孔缺陷评判值的示意图。二次枝晶间距对铸件的

力学性能有重要影响,在铸件没有缩松缩孔缺陷时,二次枝晶间距越小,则铸件的力学性能越好^[7]。根据 $L_{16}(4^4)$ 正交试验,得到的试验结果如表4所示。

表4 正交试验结果
Table 4 Results of orthogonal experiment

试验 编号	试验因素				试验结果	
	A/s	B/℃	C/℃	D/℃	缩松缩孔评判值	二次枝晶间距/ μm
1	19	700	300	20	6	42.82
2	19	720	320	25	6	44.59
3	19	740	340	30	9	46.57
4	19	760	360	35	9	48.50
5	22	700	320	30	3	44.30
6	22	720	300	35	2	43.66
7	22	740	360	20	7	48.18
8	22	760	340	25	8	47.03
9	25	700	340	35	0.955	45.48
10	25	720	360	30	7	47.68
11	25	740	300	25	4	44.31
12	25	760	320	20	8	45.79
13	28	700	360	25	0.834	46.94
14	28	720	340	20	1	46.07
15	28	740	320	35	4	45.51
16	28	760	300	30	5	44.43

2.3 工艺参数对评价指标的影响

为了揭示各因素对评价指标的影响规律,并确定各因素的优水平,基于正交试验的结果,进行均值和极差分析,结果如表5所示。

根据表5均值与极差分析的结果,缩松缩孔评判值随着浇注时间的增加而减小,随着浇注温度的升高而增大,而随着模具预热温度和冷却水温度的变化呈现出波动变化,各因素对缩松缩孔缺陷的影响权重排序为:浇注温度>浇注时间>冷却水温度>模具预热温度。二次枝晶间距随着浇注时间的增加而先增大后

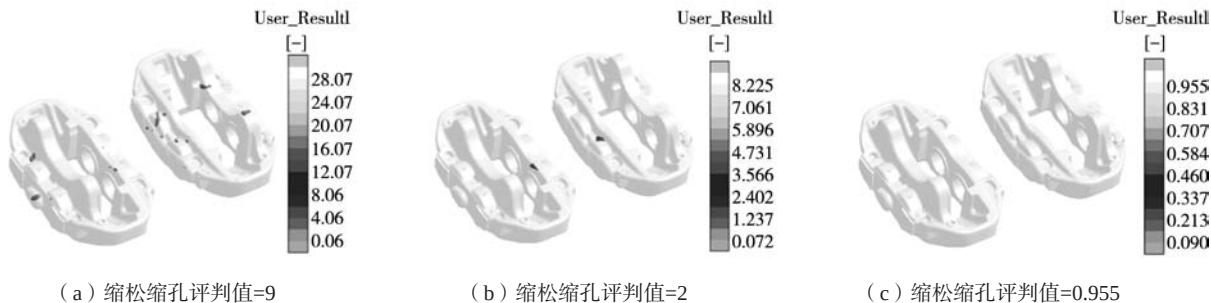


图4 缩松缩孔评判值的取值示例

Fig. 4 Examples of the value of the shrinkage porosity

表5 均值和极差分析表
Table 5 Mean and range analysis table

因素	缩松缩孔评判值				二次枝晶间距/ μm			
	A	B	C	D	A	B	C	D
水平1均值	7.500	2.697	4.250	5.500	45.62	44.88	43.80	45.71
水平2均值	5.000	4.000	5.250	4.709	45.79	45.50	45.05	45.72
水平3均值	4.989	6.000	4.739	6.000	45.81	46.14	46.29	45.75
水平4均值	2.709	7.500	5.959	3.989	45.74	46.44	47.83	45.79
极差	4.791	4.803	1.709	2.011	0.20	1.55	4.02	0.07
权重排序	2	1	4	3	3	2	1	4
优水平	A4	B1	C1	D4	A1	B1	C1	D1

减小，随着浇注温度和模具预热温度以及冷却水温度的升高而增大，各因素对二次枝晶间距影响权重的排序为模具预热温度 > 浇注温度 > 浇注时间 > 冷却水温度。

2.4 优化方案的确定及试制验证

基于对上述工艺参数对评价指标的影响规律分析，确定的优化方案如下：

（1）缩松缩孔缺陷是实际铸件生产过程中首先需解决的铸造缺陷，工艺方案应首先保证铸件中无缩松缩孔缺陷，使缩松缩孔评判值最小的工艺组合方案为A4B1C1D4。在确保铸件没有缩松缩孔缺陷的同时，二次枝晶间距应当越小越好，以提高铸件的力学性能。根据极差分析的结果，模具预热温度对二次枝晶间距的影响最大，而对缩松缩孔评判值的影响最小。由于模具预热温度对减小二次枝晶间距和缩松缩孔缺陷的最优水平均为C1，因此可将工艺参数组合A4B1C1D4作为第一组优化方案。

（2）正交试验的结果中有两组工艺参数组合没有缩松缩孔缺陷，分别是第9组（A3B1C3D4）和第13组（A4B1C4D2），因此可将该两组的工艺方案分别作为第二组和第三组优化方案进行比较。

上述的优化方案数值模拟的结果如表6所示。3个

表6 优化方案结果对比
Table 6 Comparison of optimization results

评价 指标	方案1 (A4B1C1D4)	方案2 (A3B1C3D4)	方案3 (A4B1C4D2)
缩松缩孔评判值	0.551	0.955	0.834
二次枝晶间距/ μm	42.73	45.48	46.94

优化方案的缩松缩孔评判值均小于1，即均不发生缩松缩孔缺陷。其中方案1的缩松缩孔评判值最小，且对应的二次枝晶间距也最小，因此，综合上述分析，将方案1（A4B1C1D4）作为最优工艺方案，即浇注时间为28 s，浇注温度为700℃，模具预热温度为300℃，冷却水温度为35℃。

依据最优工艺方案进行生产试制，得到图5所示的含浇注系统的制动钳铸件成品，可见在此金属型重力铸造工艺方案下能够得到充型完整且表面光洁的铸件。经检验，制动钳铸件成形质量较高，没有缩松缩孔缺陷，符合预期效果，从而验证了此优化工艺方案的可行性。

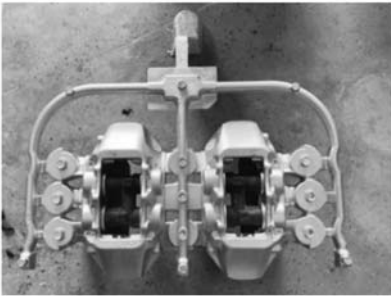


图5 含浇注系统的制动钳铸件成品
Fig. 5 The finished product of brake caliper castings with gating system

3 结论

（1）通过铝合金制动钳金属型重力铸造过程的数值模拟，对凝固过程的固相率进行分析，预测了制动钳体中缩松缩孔缺陷的可能分布情况，并在分析其形成原因后进行冷却优化。

（2）针对本文研究的铝合金制动钳，基于正交试验，得到了各工艺参数对制动钳成形质量评价指标的影响规律，并综合分析确定了其金属型重力铸造的最优工艺方案，即浇注时间28 s，浇注温度700℃，模具预热温度300℃，冷却水温度35℃。

（3）相比于初始工艺方案，优化后的方案在消除了缩松缩孔缺陷的同时，二次枝晶间距也减小到42.73，最终通过生产试制验证了优化方案的可行性。

（4）采用文中优化工艺生产的铝合金制动钳铸件，其工艺出品率为59%。如果需要进一步提高工艺出品率，可采用低压铸造或挤压铸造等其他特种铸造方法。

参考文献:

- [1] 吴兵舰, 张东凯, 王斐. 某汽车动力总成悬置支架的轻量化设计 [J]. 长安大学学报 (自然科学版), 2023, 43 (3): 134-144.
- [2] 黄朝慧, 郭春洁. 汽车缸盖用新型铝合金的重力铸造工艺优化 [J]. 热加工工艺, 2019, 48 (7): 94-97.
- [3] 周技, 范金辉, 袁修坪, 等. 制动钳体砂眼缺陷工艺改进 [J]. 铸造技术, 2018, 39 (6): 1250-1253.
- [4] 方赫. 金属型重力铸造发动机缸盖柔性化生产工艺流程 [J]. 特种铸造及有色合金, 2014, 34 (11): 1197-1198.
- [5] 杨成龙, 刘士渊, 徐宏, 等. 基于数值模拟和3D打印砂型的出气联接管铸造工艺设计及验证 [J]. 铸造, 2022, 71 (11): 1413-1417.
- [6] 杜强, 王利明, 韩维新, 等. A356铝合金显微疏松与二次枝晶臂距的计算机模拟 [J]. 中国有色金属学报, 2001 (S2): 226-229.
- [7] 张炳荣, 田身军, 王宏远. 二次枝晶间距和热处理工艺对铝合金发动机缸盖力学性能的综合影响 [J]. 铸造技术, 2009, 30 (10): 1367-1370.

Multi-Objective Optimization of Permanent Mold Gravity Casting Process of Aluminum Alloy Brake Calipers

ZHANG Tao, SU Xiao-ping, MAO Xu-hai

(School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, Jiangsu, China)

Abstract:

The permanent mold gravity casting process of aluminum alloy brake calipers was analyzed by numerical simulation. The shrinkage porosity defects distribution of the brake caliper was predicted. An improved cooling scheme was added by analyzing the causes. Based on this, the multi-objective optimization of the process parameters was performed by using orthogonal tests. The optimal process parameters were: pouring time of 28 seconds, pouring temperature of 700 °C, die preheating temperature of 300 °C, cooling water temperature of 35 °C. The results showed that the optimized brake caliper casting had no shrinkage porosity defects. The feasibility of this optimization process was verified by production trial.

Key words:

aluminum alloy; permanent mold gravity casting; numerical simulation; Process optimization