

铝合金电池端板低压铸造工艺参数的设计与优化

陈非凡, 苏小平

(南京工业大学机械与动力工程学院, 江苏南京 211816)

摘要: 以某新能源汽车铝合金电池端板为研究对象, 基于正交试验设计以及信噪比分析法探究低压铸造过程中金属液的浇注温度、模具预热温度以及充型时间3个工艺参数对铸件成型质量的影响, 以疏松缩孔体积值、凝固时间和二次枝晶间距大小为评价指标, 探究出一套标准化的工艺设计参数, 为新能源汽车铝合金电池端板低压铸造成型工艺研究与实际生产提供重要参考。研究结果显示: 浇注温度690 °C, 模具预热温度330 °C, 充型时间8 s时铸件无疏松缩孔缺陷, 二次枝晶间距最小, 凝固时间最短。

关键词: 电池端板; 低压铸造; 正交试验; 信噪比; 工艺优化

随着时代的发展、科技的进步, 新能源汽车因其节能环保、政策保障等诸多优势, 受到了广泛的推广, 现在越来越多的人选择购买新能源汽车。新能源汽车不仅满足人们日常出行的需要, 更是在保护自然环境、减少废气排放等多个方面发挥了重要的作用^[1-2]。新能源汽车的电池端板一般选择铝合金, 铝合金材料的使用寿命长, 阻燃、无烟、无毒, 防爆性能和抗老化性能优良。通过电池端板的开发与研制, 可以更合理地扩大生产同时提高技术的研发速度^[3]。采用传统的低压铸造工艺可以灵活地调节浇注压力和充型速度, 从而确保金属液平稳地充型, 使低压铸造的铸件表面光滑、组织致密、力学性能优良、经济高效^[4-6]。然而, 低压铸造过程涉及众多的工艺参数, 且由于人们日益增长的对美观的追求, 一些零部件的设计日趋复杂化。因此, 在缺乏优化方法的前提下, 研究人员很难得到合理的工艺参数。

针对上述问题, 本文以某新能源汽车的铝合金电池端板为研究对象, 利用ProCAST软件对其低压铸造过程进行数值模拟分析, 基于正交试验和信噪比分析法进行工艺参数的多目标优化, 旨在得出一套标准化的工艺设计参数, 为新能源汽车铝合金电池端板低压铸造成型工艺研究与实际生产提供重要参考。

作者简介:

陈非凡(1999-), 女, 硕士, 主要研究方向为汽车轻量化技术。电话: 15951616806, E-mail: 956369552@qq.com

中图分类号: TG146.2;
TG249

文献标识码: B
文章编号: 1001-4977(2024)
03-0419-05

收稿日期:

2023-11-22 收到初稿,
2023-12-27 收到修订稿。

1 初始工艺分析

1.1 数值模拟模型的建立

带浇注系统的端板三维模型如图1所示, 电池端板为矩形结构, 最大轮廓尺寸为558 mm × 244 mm × 40 mm, 体积为0.003 m³, 质量为7.3 kg, 整体形状比较规则, 壁厚相对均匀, 平均壁厚为31 mm。在铸件上增设四个渣包, 有利于其周围部位的凝固补缩。低压铸造浇注系统的设计要求是能够确保铸件型腔内的金属液平稳充填, 避免任何飞溅和涡流的产生, 且能



图1 带浇注系统的端板三维模型

Fig. 1 3D model of end plate with pouring system

够实现顺序凝固，以获得最佳的补缩效果，因此采用底注式单侧浇道的浇注方式，选择合适的浇口位置，并确定浇口数量，应用CATIA建模软件建立带浇注系统的三维模型，然后将模型导入PROCAST的MESH模块中进行网格划分。

1.2 材料及工艺参数设置

电池端板的材料为A356铝合金，其热物性参数见表1，模具材料为H13钢。根据帕斯卡原理及经验公式设置工艺过程中压力曲线如图2所示。经过多次模拟结果对比，选择初始浇注温度710℃，模具预热温度330℃。设置铸件、浇注系统与模具之间的换热系数为2 000 W/(m²·K)，模具与大气之间的换热系数为10 W/(m²·K)。

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

密度/ (kg·m ⁻³)	液相线 温度/℃	固相线 温度/℃	潜热/ (kJ·kg ⁻¹)	热导率/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
2 430	630	568	430.518	70

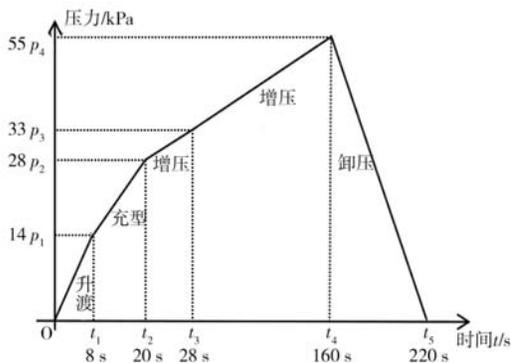


图2 工艺过程的压力曲线

Fig. 2 Pressure curve of process

2 低压铸造工艺参数优化

低压铸造过程的工艺参数主要有升液压力、升液时间、充型压力、充型时间、浇注温度和模具预热温度等^[7]。不同的工艺参数组合对电池端板的成型质量都有着巨大的影响，但由于各个参数的取值不同，因此需要考虑多种不同的参数组合。本文采用正交试验方法，选取浇注温度、模具预热温度和充型时间这3个工艺参数，设置一个3因素4水平的试验方案，具体因素水平表如表2所示。

以缩松缩孔体积值、凝固时间和二次枝晶间距的大小为评价指标。缩松缩孔缺陷是影响铸件力学性能和疲劳寿命的重要因素，当铸件某处的缩松缩孔体积值大于1时，该处就会出现缩松缩孔缺陷，体积值越

表2 因素水平表
Table 2 Factor level table

水平	浇注温度/℃	模具预热温度/℃	充型时间/s
1	690	330	8
2	700	340	10
3	710	350	12
4	720	360	14

大，缺陷也越大^[8]。铸件的实际生产效率会受到凝固时间的影响，凝固时间越短，生产效率越高；铸件的凝固时间与二次枝晶间距大小有着紧密的联系，金属液凝固速度越快，铸件的性能就越好，二次枝晶间距越小^[9]，因此在实际生产中可以通过适当缩短凝固时间来提高和改善合金性能。

“信噪比”的概念是由日本的田口玄一博士在田口试验法中引出的评价参数组合好坏的一种量度，它有望大、望小和望目三种类型的质量特性。本文是通过电池端板低压铸造工艺参数的寻优，得到最小的缩松缩孔体积值和二次枝晶间距以及最短的凝固时间。因此，本文采用“望小”特性，计算公式如下：

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m y_i^2 \right) \quad (1)$$

式中： y_i 是第*i*次铸件某个评价指标的试验值； m 是该因素组合的试验次数（本文 $m=1$ ）。

采用正交表 $L_{16}(4^3)$ ，基于ProCAST软件得到缩松缩孔体积值、二次枝晶间距和凝固时间的试验值，并根据上面公式（1）分别计算出它们的信噪比，最终结果如表3所示。

2.1 均值和极差分析

通过上述试验得到的结果，对三个评价指标的信噪比进行均值和极差的分析，比较各因素对评价指标的影响权重，制定出最优的工艺参数组合，结果如表4所示。

由均值和极差分析表可以看出：三个因素对缩松缩孔体积值影响的大小为：充型时间>浇注温度>模具预热温度（即C>A>B），依据各个因素的最优水平，获得使缩松缩孔体积值最小的工艺组合方案为A4B3C3（方案1）。对二次枝晶间距影响最大的因素是模具预热温度，模具预热温度的最优水平为B1；其次是充型时间，充型时间的最优水平是C4；浇注温度对二次枝晶间距的影响程度最小，其最优水平为A4；依据各个因素的最优水平，获得使二次枝晶间距最小的工艺组合方案为A4B1C4（方案2）。对凝固时间影响最大的因素为模具预热温度，其次是浇注温度，充型时间对凝固时间的影响程度最小，根据各个因素的最优水平，获得使凝固时间最优的工艺组合方案为A1B1C1

表3 试验结果
Table 3 Test results

试验 编号	试验结果			缩松缩孔体积值/cm ³		二次枝晶间距/ μm		凝固时间/s	
	A	B	C	试验值	信噪比	试验值	信噪比	试验值	信噪比
1	690	330	8	0.830	1.618	43.94	-32.857	140.6	-42.960
2	690	340	10	0.837	1.545	44.93	-33.051	148.2	-43.417
3	690	350	12	0.630	4.013	45.45	-33.151	156.8	-43.907
4	690	360	14	0.633	3.972	46.39	-33.328	166.2	-44.413
5	700	330	10	0.835	1.566	44.42	-32.952	142.6	-43.082
6	700	340	8	0.841	1.504	44.93	-33.051	149.1	-43.470
7	700	350	14	0.633	3.972	45.91	-33.238	159.7	-44.066
8	700	360	12	0.633	3.972	46.80	-33.405	167.3	-44.470
9	710	330	12	0.628	4.041	47.33	-33.503	145.8	-43.275
10	710	340	14	0.632	3.986	45.42	-33.145	153.7	-43.733
11	710	350	8	0.632	3.986	45.89	-33.234	158.7	-44.012
12	710	360	10	0.000	-	46.83	-33.410	169.1	-44.563
13	720	330	14	0.629	4.027	37.25	-31.423	148.0	-43.405
14	720	340	12	0.634	3.958	45.43	-33.147	155.0	-43.807
15	720	350	10	0.632	3.986	45.93	-33.242	161.8	-44.180
16	720	360	8	0.412	7.702	46.83	-33.410	169.9	-44.604

表4 均值与极差分析
Table 4 Analysis of mean and range

因素	缩松缩孔体积值/cm ³			二次枝晶间距/ μm			凝固时间/s		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
水平1均值	2.787	2.813	3.703	-33.097	-32.684	-33.138	-43.674	-43.181	-43.762
水平2均值	2.754	2.748	1.774	-33.162	-33.099	-33.164	-43.772	-43.607	-43.811
水平3均值	3.003	3.989	3.996	-33.323	-33.216	-33.302	-43.896	-44.041	-43.865
水平4均值	4.918	3.912	3.989	-32.806	-33.388	-32.784	-43.999	-44.513	-43.904
极差	2.164	1.241	2.222	0.517	0.704	0.518	0.325	1.332	0.142
优水平	A4	B3	C3	A4	B1	C4	A1	B1	C1
权重	2	3	1	3	1	2	2	1	3

(方案3)。

此外,注意到在正交试验表3中,第12组的缩松缩孔试验值为0。在实际的铸造过程中,工艺方案首先就是要确保铸件不会出现缩松缩孔缺陷,根据工艺参数的不同选择,对于缩松缩孔评判结果会产生的影响分析,这一工艺组合是最优的,因此将工艺组合A3B4C2作为方案4进行比较。

2.2 优化方案及试验验证

针对上述分析得出的四种方案,进行数值模拟验证,确定铝合金电池端板低压铸造的最优工艺参数组合,其数值模拟结果如表5所示:

由表5可知:四种方案的缩松缩孔体积值都小于

表5 四种方案的数值模拟结果比较

Table 5 Comparison of numerical simulation results of four schemes

项目	方案1	方案2	方案3	方案4
缩松缩孔体积值/cm ³	0.635	0.629	0.830	0.000
二次枝晶间距/ μm	45.93	44.47	43.94	46.83
凝固时间/s	163	148	140.6	169.1

1,所以都不存在缩松缩孔缺陷。在二次枝晶间距大小和凝固时间方面,方案3是最小的,因此经过综合分析,确定方案3(A1B1C1)为最优的工艺参数组合,即浇注温度为690℃,模具预热温度为330℃,充型时间8s。

最优工艺方案的缩松缩孔分布情况如图3所示, 缩松缩孔的体积值为 0.83 cm^3 ; 二次枝晶间距分布如图4所示, 二次枝晶间距的最大值为 $43.94 \mu\text{m}$; 凝固时间为 140.6 s , 凝固结束时的温度场分布情况如图5所示。

电池端板经优化处理后, 数值模拟结果中已无宏观的缩松缩孔缺陷。为了验证这一优化工艺方案的可行

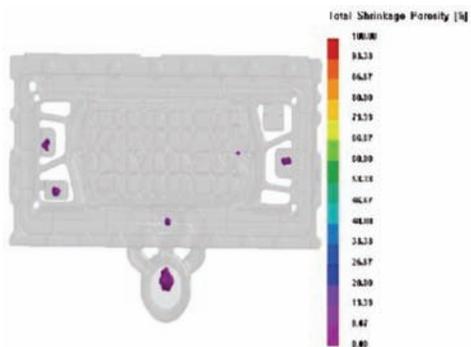


图3 缩松缩孔分布

Fig. 3 Distribution of shrinkage porosity and porosity

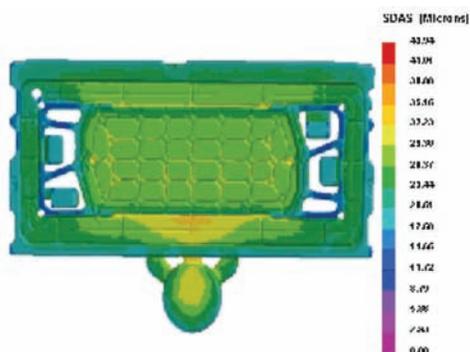


图4 二次枝晶间距分布

Fig. 4 Distribution of secondary dendrite spacing

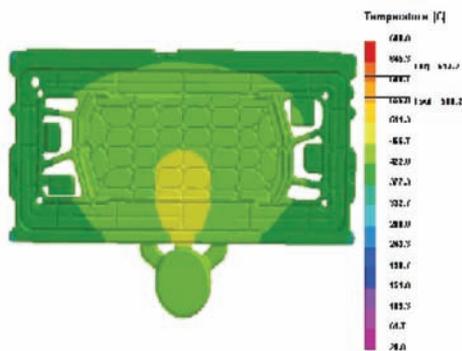


图5 凝固结束时的温度场分布

Fig. 5 Temperature field distribution at the end of solidification

行性, 按照最佳工艺方案进行生产试制, 并在试制过程中选取具有代表性的位置进行金相试样的提取, 如图6中的A、B两点所示。试样经过粗磨、精磨、抛光等一系列处理后, 用体积分数5%的HF酸进行腐蚀, 然后用酒精冲洗并吹干。在显微镜下观察到的抛光面显微组织如图7所示。观察显示, 铝合金电池端板内部组织均匀、晶粒细小, 且没有明显的缩松缩孔缺陷。这一结果充分证明了本优化工艺方案的可行性。

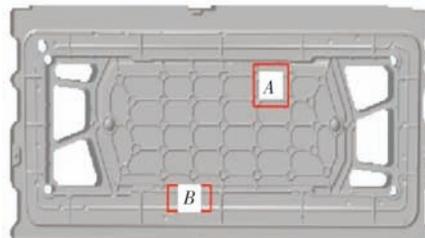
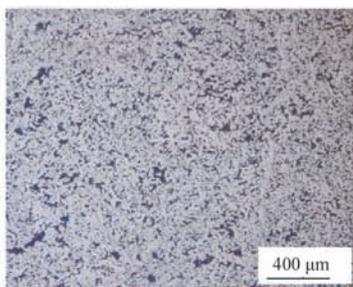
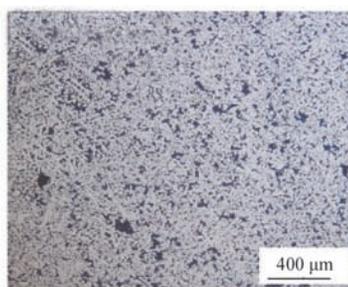


图6 金相组织取样位置图

Fig. 6 Location of metallographic tissue sampling



(a) 位置A



(b) 位置B

图7 铸件不同位置的微观组织

Fig. 7 Microscopic structure of castings at different positions

3 结论

(1) 基于正交试验设计, 探究了各工艺参数对电池端板质量评价指标的影响规律。对于缩松缩孔体

积这一指标, 影响最显著的是充型时间, 其次是浇注温度和模具预热温度; 对于二次枝晶间距而言, 模具预热温度的影响最为显著, 其次是充型时间和浇注温

度；对于凝固时间，模具预热温度的影响最为显著，其次是浇注温度和充型时间。

(2) 经过综合分析，确定了铝合金电池端板低压铸造最优工艺参数结果为方案3 (A1B1C1)，即浇注

温度690℃、模具预热温度330℃、充型时间8s。

(3) 优化方案下铸件无疏松缩孔缺陷，二次枝晶间距最小，凝固时间最短。最终通过生产试制和金相分析验证了优化方案的正确性。

参考文献:

- [1] 张凯. 新能源汽车动力电池热管理系统研究 [J]. 专用汽车, 2022 (9): 18-20.
- [2] 胡伟钦. 新能源汽车动力电池热管理系统设计 [J]. 机电技术, 2022 (2): 62-64.
- [3] 陈茂新. 高品质锂电池铝端板开发设计及运用 [J]. 福建冶金, 2019, 48 (5): 47-50.
- [4] 单嘉立, 尹家新, 徐志锋, 等. 低压铸造ZL114A铝合金舱段壳体铸件工艺研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38 (8): 856-859.
- [5] 冯志军, 申泽骥. 大型铝合金铸件低压铸造 [J]. 铸造, 2003 (12): 1186-1188.
- [6] 吴江, 冯志军, 李宇飞, 等. 铝合金铸件V法造型低压铸造新技术 [J]. 铸造, 2015, 64 (4): 307-312.
- [7] 杨闯, 苏小平, 周大双, 等. 铝合金悬架摆臂低压铸造数值模拟与工艺优化 [J]. 铸造技术, 2021, 42 (5): 371-374.
- [8] 吴琪琪, 苏小平, 杨闯, 等. 基于正交试验的铝合金减速机壳体低压铸造工艺优化 [J]. 热加工工艺, 2023 (4): 1-5.
- [9] 邱孟书, 王小平. 低压铸造使用技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.

Design and Optimization of Low Pressure Casting Process Parameters for Aluminium Alloy Battery End Plates

CHEN Fei-fan, SU Xiao-ping

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

Abstract:

Based on an orthogonal experimental design and signal-to-noise ratio analysis, the effects of three process parameters-casting temperature, mold preheating temperature and mold filling time-on casting quality in low-pressure casting were investigated, and a set of standardized process design parameters using shrinkage rate and shrinkage pore volume, solidification time and secondary dendrite interval as evaluation indicators were explored. A set of standardized process design parameters was investigated as an important reference for the study and practical application of a low-pressure casting process for aluminum alloy battery end plates for new energy vehicles. The results showed that the casting temperature of 690℃, the die preheating temperature of 330℃ and the filling time of 8s resulted in no shrinkage or shrinkage of the castings, the smallest secondary dendrite spacing and the shortest solidification time.

Key words:

battery end plate; low pressure casting; orthogonal test; signal to noise ratio; process optimization