

车用水箱弯管接头熔模铸件工艺优化

丁华锋^{1,2} 金先志^{1,2} 陈 涛³ 潘俊杰²

(1.湖北文理学院汽车与交通工程学院; 2.纯电动汽车电力系统设计及测试湖北省重点实验室;
3.襄阳市立强机械有限公司)

摘 要 经验法熔模铸造成形的弯管接头零件在通孔内壁和底座圈上都普遍存在缩松。利用 ProCAST 软件,对弯管接头铸件进行缺陷分析,分别从浇注系统的优化和增设冒口及冷铁入手,研究两种可以降低铸件缩松率的方案。对比发现,对浇注系统进行优化为最优方案,并在此基础上设计了正交试验。结果表明,在浇注温度为 1 520 ℃、浇注速度为 0.6 kg/s、型壳预热温度为 1 120 ℃下,缩松率最大为 1.44%,有效提高了产品品质。

关键词 熔模铸造;ProCAST;弯管接头;工艺优化

中图分类号 TG249.5 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.02.025

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Investment Casting Process Optimization of Water Tank Elbow Joint for Vehicle

Ding Huafeng^{1,2}, Jin Xianzhi^{1,2}, Chen Tao³, Pan Junjie²

(1.School of Automotive and Traffic Engineering, Hubei University of Arts and Science; 2.Hubei Key Laboratory of Power System Design and Test for Electrical Vehicle; 3.Xiangyang Liqiang Machinery Co., Ltd.)

Abstract: The shrinkage porosities in elbow joint parts formed by empirical investment casting generally exists on the inner wall of hole and base ring. The ProCAST simulation software was utilized to analyze the defects of elbow joint castings. With the optimization of gating system and the addition of riser and cold iron, two schemes for reducing the shrinkage rate were proposed. The comparative analysis reveals that the optimization of gating system is the optimal scheme and the orthogonal test is designed. The results indicate that when the pouring temperature is 1 520 ℃, pouring speed is 0.6 kg/s and shell preheating temperature is 1 120 ℃, the maximum shrinkage rate is 1.44%, effectively improving the quality of the product.

Key Words: Investment Casting, ProCAST Software, Elbow Joint, Process Optimization

收稿日期:2021-06-21;修改稿收到日期:2021-08-30

基金项目:湖北省教育厅科学技术研究计划青年人才资助项目(Q20202602)

第一作者简介:丁华锋,男,1986 年出生,讲师,湖北襄阳(441053),E-mail:hfding86@163.com

引用格式:丁华锋,金先志,陈涛,等. 车用水箱弯管接头熔模铸件工艺优化[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(2):248-252.

DING H F, JIN X Z, CHEN T, et al. Investment casting process optimization of water tank elbow joint for vehicle[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(2):248-252.

服强度变化不明显,伸长率随固溶处理温度的升高和人工时效温度的升高呈下降趋势,另外可以看出,延长人工时效时间和降低固溶热处理温度可以提高材料伸长率。

4 结 语

高真空压结构铸件在热处理后内浇口附近的力学性能好于填充末端的。较低的固溶温度和较长的人工时效时间以及较低的人工时效温度可以取得较好的力学性能。

参 考 文 献

[1] 万里,赵芸芸,潘欢,等.铝合金高真空压铸技术的开发和应用[J].特种铸造及有色合金,2008,28(11):858-861.

[2] 万里,潘欢,罗吉荣.高真空压铸技术及高强韧压铸铝合金开发和应用的现状 & 前景[J].特种铸造及有色合金,2007,27(12):939-942.

[3] 张百在,徐飞跃,余亮,等.一种高强度高韧性压铸铝合金及其制品.中国:201510830880.X[P].2015-11-25.

[4] 张百在,刘学强,万里,等.型腔真空度及热处理对 AlSiMgMn 压铸件性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2016,36(7):673-676.

[5] 徐飞跃,安肇勇,万里,等.压铸高强韧铝合金汽车底盘结构件的组织和力学性能[J].特种铸造及有色合金,2016,36(6):616-619.

[6] 万里,刘学强,胡祖麒,等.高真空压铸 AlSi10MnMgFe 合金的组织和力学性能[J].特种铸造及有色合金,2014,34(5):499-503.

[7] 卢宏远,卢敏,宋青,等.汽车结构件的压铸[J].特种铸造及有色合金,2012,32(3):251-254.

[8] 李四娣,安肇勇,黄明军,等.高真空压铸汽车底盘结构件的热处理[J].特种铸造及有色合金,2017,37(9):975-978.

(编辑:张正贺)

随着 CAE 技术的快速发展,运用铸造仿真软件来辅助铸件生产已越来越多的被应用到汽车工业上^[1]。熔模铸造能够生产出结构形状复杂、壁厚不均且尺寸精度高的铸件^[2]。弯管接头应用于某商用车的水箱接头处,是保证冷却液紧密输入与输出的重要部件,故对零件的整体性要求较高,特别是在管道连接的通孔处要求不能有缩松。原工艺条件下生产的弯管铸件废品率高达 60%,为减少缩松,提高弯管接头的成品率,合理的设计浇注系统可以在较大程度上减少铸件的缩松、缩孔缺陷^[3]。赵健等^[4]对复杂的不锈钢叶轮进行了分析,采用在铸件中空处添加冷铁的方法减少了复杂叶轮缩松、缩孔缺陷。白瑀等^[5]运用 ProCAST 软件对比分析了 Z101A 铝合金叶轮顶注式与侧注式两种浇注方式的优劣,并对结果较优的侧注式浇注系统设计正交试验,调整工艺参数,使得叶轮缩松、缩孔率降到 1.795%。魏剑辉等^[6]以仿真结合实践,对 K423 合金衬板进行优化,通过在浇注系统表面添加保温棉,延长补缩时间,将衬板的致密度提高到 99.8%,并验证了其可行性。黄静等^[7]对 0Cr17Ni4Cu3Nb 不锈钢航空发动机尾部搭件进行了缩孔分析,通过增大内浇道的横截面积,并针对浇注温度、型壳预热温度、浇注速度等工艺参数设计了正交试验,最终成功消除部件的缩孔。王晋忠等^[8]对 ZG1Gr18Ni9 材料的座圈铸件进行缩松、缩孔缺陷优化分析,通过在补缩困难的部位增设两个直径为 10 mm 的内浇道,成功消除缩松、缩孔缺陷,并用 X 射线探伤检测优化后的铸件内部缩松、缩孔缺陷情况,均满足一级探伤标准。张晓光等^[9]对于不锈钢多管道的接头零件进行了分析,设计 4 组浇注方案对其仿真结果进行比较,确定最优的工艺参数:浇注温度为 1 376 ℃、型壳预热温度为 1 050 ℃、浇注速度为 3 kg/s。

为了提升弯管接头铸件的整体性能,减少其废品率,本课题对弯管铸件在凝固完成后的缩松问题进行研究与分析,通过 ProCAST 软件仿真模拟,比较了两种工艺方案的优劣,并最终确定以设计浇注系统和设计正交试验找到了最优工艺参数。经生产验证,铸件通孔内壁处缩松缺陷消失。

1 经验法生产及缺陷分析

1.1 铸件结构及前处理

弯管接头零件的尺寸为 75 mm×75 mm×120 mm,主管道的壁厚为 2.75 mm,平均厚度为 3.5 mm。其三维模型见图 1。材质为 304 不锈钢,其化学成分见表 1。

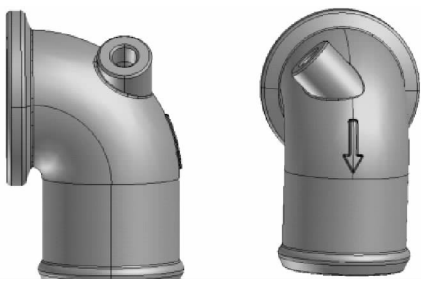


图 1 弯管接头三维模型
Fig.1 3D Model of the elbow joint

表 1 304 不锈钢的化学成分

Tab.1 Main chemical composition of 304 stainless steel %							
wB							
C	Cr	Mn	Mo	Ni	S	Si	Fe
0.08	18	1.5	0.5	8	0.03	1	余量

将弯管接头零件的模型文件导入 ProCAST 的 Mesh 模块中,在原工艺浇注系统的条件下,进行网格划分,并进行网格质量检测,修复不合格网格后将全局网格单元尺寸设置为 3 mm,生成 35 748 个面网格,添加 5 mm 厚型壳后在面网格基础上生成了 189 689 个体网格。

1.2 工艺参数设置

切换到 CAST 模块,设置仿真模拟参数,在用户自定义编辑,型壳材料为锆英砂,浇注温度为 1 550 ℃,型壳焙烧温度为 1 150 ℃,浇注速度为 0.7 kg/s。界面传热类型选择 COINC 类型,304 不锈钢与锆英砂的界面传热系数 Q 取 500 W/(m²·K)。

1.3 仿真结果分析

为便于分析,只对单一铸件进行缺陷分析。对原始工艺的缩松、缩孔缺陷分布情况进行模拟见图 2。

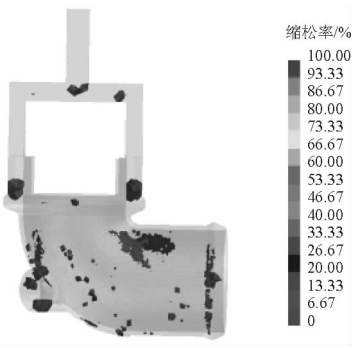
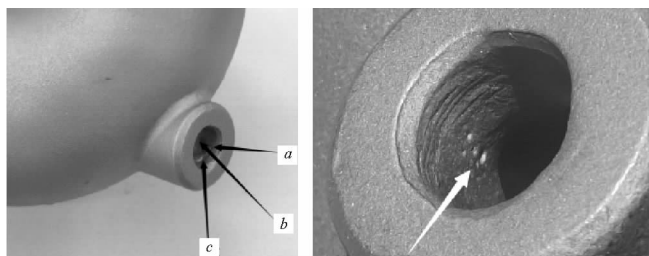


图 2 原始方案生产的铸件缩松、缩孔缺陷模拟
Fig.2 Shrinkage defects simulation of castings

通过仿真分析可以看出,缩松主要分布在通孔和底圈部分。实际铸造缩松缺陷见图 3。可见铸件表面有细微凹陷,通孔内壁缩松较为严重,实际缺陷分布和模拟结果一致。



(a) 凸台螺纹处 (b) 螺纹处放大

图 3 铸件缩松缺陷

Fig.3 Shrinkage defects of castings

2 工艺方案的改进

2.1 增设保温冒口与冷铁

2.1.1 增添冒口的理论依据

熔模铸造弯管接头合理设计冒口位置能够有效解决补缩问题^[10]。同时对铸件的凝固顺序、金属液进入型壳的流动状态也有影响^[11]。从图 2 可以看出,在凝固过程中,浇口及通孔中间位置处出现孤立液相区,这可能是铸件在凝固过程中,随着金属液温度降低,浇口外表面及通孔外端与空气的传热快,中间区域金属液向两端补缩造成。所以在浇口及通孔处增设保温冒口用以解决补缩困难问题,在通孔下表面增设一块冷铁用以控制金属液的凝固顺序,确保金属液从铸件底部朝浇口方向顺序凝固^[12];对增加了冒口和冷铁铸件(优化工艺 1)进行模拟见图 4。

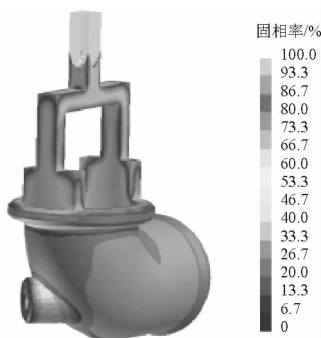


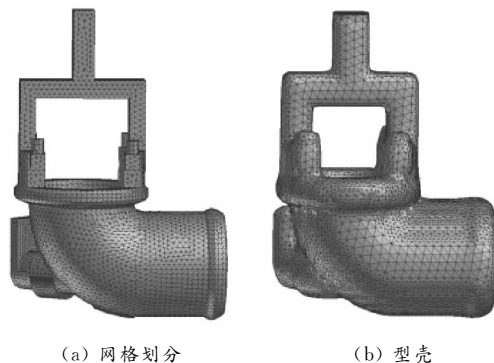
图 4 增加了冒口和冷铁铸件的凝固过程模拟

Fig.4 Solidification field simulation

2.1.2 仿真过程及结果

将增添保温冒口与冷铁的铸件模型导入到 Pro-CAST 中,生成体网格和型壳后进入 CAST 模块进行参数设定,冷铁材质为 Steel Fe52、初始温度为 25℃。划分网格和生成的型壳见图 5。网格单元大小和型壳厚度与原方案相同,工艺参数保持不变,进行仿真分析(称为优化方案 1),模拟结果见图 6。可以看出,通孔部分的缩松已基本消除,在铸件底座圈部位有少许缩松,与原始方案相比,铸件缩松情况得到明显改善。图 7 是

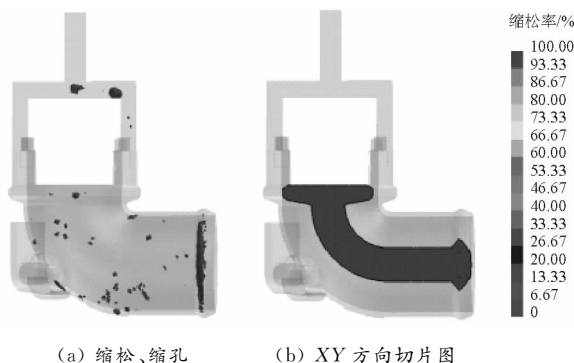
原始方案与增加保温冒口及冷铁后的优化方案的缩松、缩孔曲线。可以看出,传统方案最大缩松率为 1.81%,原始最大缩松率为 1.66%,较原始方案最大缩松率降低了 8.28%。



(a) 网格划分 (b) 型壳

图 5 网格划分与生成型壳

Fig.5 Grid meshment and shell meshment



(a) 缩松、缩孔 (b) XY 方向切片图

图 6 优化方案 1 缩松预测

Fig.6 Shrinkage prediction in scheme 1

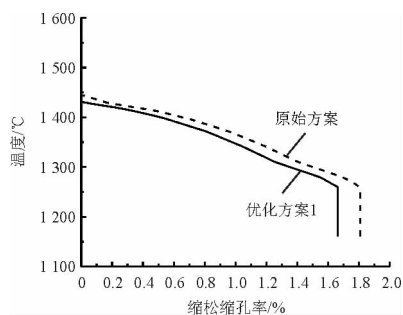


图 7 温度-缩松率曲线

Fig.7 Temperature-porosity rate curve

2.2 优化浇注系统和增设工艺补贴

2.2.1 设计浇注系统

在不考虑保温冒口的情况下,通过合理设计浇口杯、直浇道、横浇道和内浇道的结构尺寸,也能够有效改善铸件缩松^[13]。直浇道在一定程度上兼有补缩作用^[14]。考虑到弯管接头铸件通孔外端的封闭性以及顶端接头处壁厚较厚的特点,分别在铸件通孔外端面与铸件顶部设置内浇道。内浇道的长度为 6 mm,矩形截面,直浇道的直径为 20 mm,长度为 250 mm。经过比

较填充方向的浇注情况,发现重力方向设为+X 方向时填充效果最好,且铸件缩松较少。

2.2.2 增设工艺补贴

从传统工艺方案下铸件缩松分布位置可知,铸件在底座圈部位收缩较大,为了避免底座圈产生缩松,在铸件底座圈外壁上增大加工余量,改变铸件局部结构,形成倒梯形的工艺补贴,用以改变底座圈部分的凝固顺序,优化后的浇注系统(优化方案 2)见图 8。



图 8 优化设计的浇注系统及铸件结构

Fig.8 Optimization design of gating system and casting structure

2.2.3 仿真分析结果

优化方案 2 模拟结果见图 9。可以看出,通孔处和底部座圈处的缩松基本消除,且最大缩松率为 1.51%,从铸件凝固过程可以看出(见图 9b),铸件基本实现顺序凝固,无孤立液相区产生。

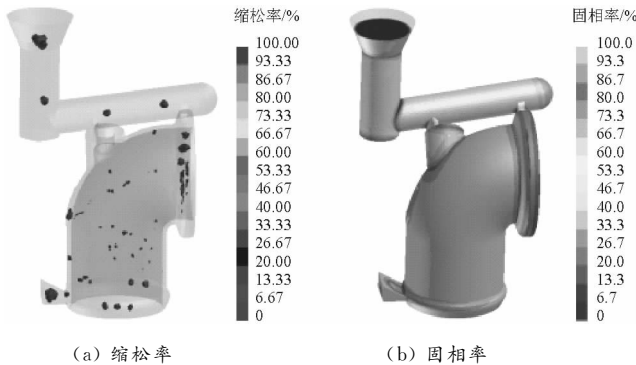


图 9 优化方案 2 缩松预测和凝固场模拟

Fig.9 Shrinkage prediction in scheme 2 and solidification field

3 调整工艺参数

3.1 确定最佳工艺方案组

由优化方案 1 可知,增添保温冒口可以改善浇口附近无法补缩的问题,且通孔部分的缩松完全消除,铸件底座座圈内部只残留少许缩松。从优化结果考虑,优化方案 2 的最大缩松率降低到 1.51%,从开发成本上考虑,优化方案 2 无需增设冒口与冷铁,较优化方案 1 来说更经济。综合考虑两种方案的优化效果与生产成本,

最终确定优化方案 2 为最终工艺方案。

3.2 设计正交试验

优化方案 2 在较大程度上降低了弯管接头缩松率,但铸件除通孔和底座圈外,其余部位缩松未得到改善,故在原始方案工艺参数为基础(浇注温度为 1 150 ℃、浇注速度为 0.7 kg/s、型壳预热温度为 1 150 ℃),对不锈钢水的浇注温度、浇注速度、型壳预热温度 3 个因子设计 3 因素 3 水平[$L_9(3^3)$]的正交试验,各因素之间无交互作用,见表 2。

表 2 影响缩松率的因素及水平

Tab.2 Factors and levels affecting shrinkage porosity			
水平	浇注温度(A)/℃	浇注速度(B)/(kg·s ⁻¹)	型壳预热温度(C)/℃
1	1 520	0.6	1 120
2	1 550	0.7	1 150
3	1 580	0.8	1 180

3.3 正交结果分析

正交试验结果见表 3。利用正交试验考察各因素对铸件最大缩松率的影响^[15]。

表 3 $L_9(3^3)$ 正交试验模拟结果

Tab.3 Simulation results of $L_9(3^3)$ orthogonal experiment				
因素	A/℃	B/(kg·s ⁻¹)	C/℃	最大缩松率/%
1	1 520	0.6	1 120	1.44
2	1 520	0.7	1 150	1.48
3	1 520	0.8	1 180	1.53
4	1 550	0.6	1 150	1.49
5	1 550	0.7	1 180	1.53
6	1 550	0.8	1 120	1.45
7	1 580	0.6	1 180	1.55
8	1 580	0.7	1 120	1.48
9	1 580	0.8	1 150	1.52

根据表 2,对各因素不同水平下的最大缩松率求均值,并用均值的最大值减去最小值的方法求出各因子的极差 R_x ,经计算得 $R_A=0.033\ 3$ 、 $R_B=0.006\ 7$ 、 $R_C=0.080\ 0$ 。可以看出,型壳预热温度对缩松率的影响最大,浇注温度的影响其次,浇注速度对缩松率的影响最小。方差分析结果见表 4。由表 4 可知,型壳预热温度对缩松率的影响最显著,金属液浇注温度对缩松率影响的显著性其次,浇注速度对缩松率影响的显著性最为微弱,由此得出最佳方案组为 A1B1C1,即浇注温度为 1 520 ℃、浇注速度为 0.6 kg/s、型壳预热温度为 1 120 ℃。

表 4 最大缩松率方差分析

Tab.4 Variance analysis of maximum shrinkage rate				
因素	平方和	自由度	均方	F 值
浇注温度/℃	0.001 86	2	0.000 93	25.135
浇注速度/℃	0.000 066	2	0.000 033	0.891 9
型壳预热温度/℃	0.009 6	2	0.004 8	129.73
误差	0.000 074	2	0.000 037	—
总和	0.011 526	8	—	—

3.4 生产验证

确定最佳工艺参数组后,重新设定参数进行模拟,结果与优化方案 1 进行比较,缩松模拟情况见图 10。



图 10 优化方案 1 和优化方案 2 的缩松的模拟过程

Fig.10 Simulation of shrinkage porosities

原始方案、优化方案 1 与优化方案 2 的缩松率对比见图 11。可以看出,优化方案 2 的最大缩松率值最小,最小值为 1.44%。

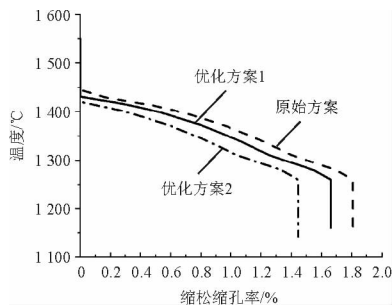


图 11 不同工艺方案下温度-缩松率曲线

Fig.11 Temperature-porosity rate curve in different schemes

图 12 是优化方案 2 生产出来的弯管接头。经检测,通孔处与铸件底圈处缩松缺陷消除,加工螺纹孔后,铸件整体成形品质较好,符合技术要求。



图 12 弯管接头铸件

Fig.12 Elbow joint casting

4 结 论

(1)采用 ProCAST 铸造仿真软件对某商用车水箱

弯管接头零件进行了缩松、缩孔分析。结果显示,在传统工艺成形条件下的铸件缩松情况较为严重,通孔处与铸件底座圈部分的缩松缺陷严重影响成形品质。

(2)通过对传统工艺下铸件缩松问题进行分析,提出了两种不同的优化方案。对比两种不同方案下的铸件缩松情况发现,在原有工艺条件不变的情况下,采用加工艺补贴的优化工艺的最大缩松率为 1.51%,在此条件下,设计正交试验,给出了一组最佳工艺参数组,即浇注温度为 1 520 ℃、浇注速度为 0.6 kg/s、型壳预热温度为 1 120 ℃。在该工艺参数条件下铸件的最大缩松率为 1.44%,较原始方案最大缩松率下降了 20.4%。经实际生产验证,铸件通孔处与底部座圈处缩松缺陷基本消除,符合技术要求。

参 考 文 献

- [1] 渠志刚,刘江南,贺辛亥,等.熔模精密铸造技术在汽车工业的应用及发展[J]. 热加工工艺, 2017, 46(1): 11-14.
- [2] 周建新,殷亚军,计效园,等.熔模铸造数字化智能化大数据工业软件平台的构建及应用[J]. 铸造, 2021, 70(2): 160-174.
- [3] 谭诗薪,郝新,胡兵,等.离心泵壳体精密铸造数值模拟研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(7): 770-773.
- [4] 赵健,衣春雷.复杂不锈钢叶轮熔模铸造工艺的优化[J]. 材料研究学报, 2015, 29(12): 955-960.
- [5] 白珉,张浩,黄亮.基于 ProCAST 的叶轮熔模铸造数值模拟仿真及优化[J]. 热加工工艺, 2021, 50(11): 71-75.
- [6] 魏剑辉,蒋梦麒.基于 ProCAST 的 K423 衬板熔模铸造工艺优化设计[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(11): 1 259-1 261.
- [7] 黄静,马原,王明杰,等.精密铸造 0Cr17Ni4Cu3Nb 不锈钢航空发动机零件[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(2): 159-162.
- [8] 王晋忠,杨国超,杨小建,等.基于 ProCAST 的座圈熔模铸造工艺数值模拟及优化[J]. 热加工工艺, 2021, 50(3): 64-66, 70.
- [9] 张晓光,韦洲.不锈钢多管接头铸件的熔模铸造工艺数值模拟[J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37(12): 1 344-1 346.
- [10] 陶承闯,赵海涛,王浩磊,等.奥氏体不锈钢蜗壳铸造工艺设计与优化[J]. 铸造, 2019, 68(2): 192-197.
- [11] 吕凯.熔模铸造[M].北京:冶金工业出版社, 2018.
- [12] KUO J K, HUANG P H, LAI H Y, et al. Optimal gating system design for investment casting of 17-4PH stainless steel enclosed impeller by numerical simulation and experimental verification[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 92(1-4): 1 093-1 103.
- [13] BRUNA M, DANA B B, RICHARD P, et al. Gating system design optimization for investment casting process[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2019, 28(7): 3 887-3 893.
- [14] 陈复生. ZL208 铝合金端盖熔模铸造工艺设计[J]. 铸造, 2020, 69(3): 297-300.
- [15] 吕宇阳,吕存昌,赵凯,等.熔模铸件的缩孔及表面毛刺缺陷防治方法[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(7): 767-769.

(编辑:刘卫)