• 工艺技术 Technology •

DOI：10.16410/j.issn1000-8365.2022.05.010

基于 ProCAST 的转子盘熔模铸造数值模拟研究

夏 琨[1]，徐向阳[2]，段士伟[1,2]

(1.安徽工业大学 机械工程学院，安徽 马鞍山 243000；2.马鞍山宏力精铸机械有限公司，安徽 马鞍山 243000)

摘 要：根据转子盘的结构特点，分析转子盘的浇注成形工艺，运用 ProCAST 有限元软件模拟两内浇道、两浇冒浇注过程中充型场和凝固场的变化规律，预测了转子盘缩松缩孔缺陷位置。结果表明，转子盘顶部法兰、底部法兰、筋条以及扇叶处均有缩松缩孔现象产生。进一步将浇注系统进行改进，经过模拟可知缩松缩孔缺陷明显降低，随后对改进方案设计正交试验，得出最优工艺参数，即浇注温度 1 650 ℃，浇注速度 309 mm/s，模壳预热温度 960 ℃。最后模拟结果显示铸件内缩松缩孔缺陷完全消除。

关键词：转子盘；ProCAST；缩松缩孔；正交试验；浇注工艺

中图分类号：TG249 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-8365(2022)05-0375-07

Numerical Simulation of Investment Casting of Rotor Disc Based on ProCAST

XIA Kun[1], XU Xiangyang[2], DUAN Shiwei[1,2]

(1. School of Mechanical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243000, China; 2. Ma'anshan Hongli Precision Casting Machinery Co., Ltd., Ma'anshan 243000, China)

Abstract: According to the structural characteristics of the rotor disc, the casting process was analyzed. The Pro CAST s oftware was used to simulate the changing law of mold filling field and solidification field during the pouring process of two inner gates, two pouring runners and riser, and the locations of shrinkage cavity and porosity defects of the rotor disc were predicted. The results show that the top flange, bottom flange, ribs and fan blade of the rotor disk all have shrinkage and shrinkage holes. The gating system is further improved, and the simulation shows that the shrinkage and shrinkage holes are significantly reduced. After submitting the test, the optimal process parameters were obtained, the pouring temperature was 1 650 ℃, the pouring speed was 309 mm/s, and the mold shell preheating temperature was 960 ℃. The final simulation results show that the shrinkage porosity defects in the casting were completely eliminated.

Key words: rotor disc; ProCAST; shrinkage porosity; orthogonal test; gating and feeding system

转子盘铸件是汽车辅助制动系统涡流缓速器中转子的重要组成部分。汽车在公路上发生减速的时候，电涡流缓速器会将车辆行驶时的动能通过转子盘上电涡流与电阻共同作用产生大量的热能，使得转子盘出现较大的温升，影响车辆制动性能[1]。转子盘温升过大就会影响车辆制动的稳定性能，严重时会使转子盘发生翘曲现象[2]，因此在实际生产的情况下，需对转子盘的浇注系统进行精确设计，以确保转子盘铸件组织致密、强度高，不存在缩松缩孔等铸造缺陷。转子盘结构极为复杂，两法兰盘通过涡轮与扇叶片相连接，传统的砂铸无法满足要求，需采用熔模铸造进行生产。

熔模铸造是一种近净形制造复杂结构零件的方法。熔模铸造技术在航空发动机上，采用熔模铸造技术一次成形大型复杂件，可以简化装配步骤，提高尺寸精度，实现发动机结构大幅减重，显著提高推重比[3]。熔模铸造技术早期主要被用于制作生活用品、首饰珍宝、艺术品和雕塑等[4-7]。熔模铸造技术弥补了传统锻造技术的不足，20 世纪 60 年代已成为高温合金涡轮叶片的主要制造方法[8-13]。

转子盘铸件常采用顶注浇冒一体式浇注系统，这种工艺生产出来的产品缩松缩孔缺陷极为严重，废品率极高，质量无法得到保证。本课题利用 ProCAST 软件对转子盘进行数值模拟，通过分析流场和凝固场，预测缩松缩孔缺陷的位置，对浇冒系统进行改进，降低铸造缺陷，提高铸件质量，为同类铸件生产提供工艺参考。

收稿日期：2021-12-25

基金项目：国家自然科学基金(11802001)；安徽工业大学科研基金项目(QZ201712)

作者简介：夏 琨(1995—)，硕士研究生，研究方向：铸造工艺，电话：18356548551，Email:1102738489@qq.com

通讯作者：段士伟(1984—)，博士，副教授，硕士生导师，研究方向：材料的动态力学性能，Email:1102738489@qq.com

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1　转子盘铸造工艺模拟

1.1　转子盘的结构分析

图 1 所示为转子盘的三维模型，材质为 ZG12CrMoV。转子盘是由两个结构相同，尺寸不同的圆盘组成，两圆盘之间的散热叶片采用的是均等圆弧叶片，且内外圈设有筋条，转子盘最大轮廓尺寸为 360 mm×48 mm，最小壁厚 6 mm，质量为 16.5 kg。



图 1　转子盘三维模型
Fig.1　Three-dimensional model of rotor disc

1.2　初始浇注系统设计及布局

熔模铸造在设计浇注系统时应充分考虑金属液快速平稳充型，并在合理的位置留有排气孔、内浇道、补缩通道等，以避免铸件产生缩孔影响铸件质量[14]，所以对于熔模铸造来说，浇注系统的选择和设计至关重要。浇注系统一般是由浇口杯、直浇道、横浇道和内浇道 4 个单元组成，其结构上主要包括顶注式、底注式、中间注入式和分层注入式。结构对比见表 1。

此次课题综合考虑转子盘的结构特点以及形状尺寸，保证铸钢件浇注系统的设计原则，确定初始工艺采用顶注式浇冒系统，即 1 个浇口杯，1 个横浇道，2 个内浇道，2 个浇冒口外加 4 个排气口，在铸件最厚的涡轮处设置 2 个内浇口，其次在顶部法兰处设置 2 个浇冒口，内浇道与浇冒口关于圆盘对称分布，横浇道以及圆盘两侧分别设置 1 个排气筋，浇口杯与横浇道两侧也各设置 1 个排气筋，总体布局如下图 2 所示。

2　浇注工艺模拟过程前处理

2.1　网格划分

三维建模软件 Creo7.0 建立转子盘三维模型与浇注系统，并输出成.igs 格式，然后导入 ProCAST 中的 Visual Mesh 模块进行 2D 网格划分。众所周知，模拟仿真计算的精度直接决定于网格的质量，对于一些模型，其网格质量对结果影响很高，甚至有可能出现结果不收敛，或者结果不符合实际生产的情况。因此，要获得高质量的铸造仿真计算结果，首先应该保证网格质量达标。由于转子盘最大尺寸为 360 mm，最薄部分尺寸为 6 mm，属于中小型铸件，故在 ProCAST 中网格划分尺寸取 3 mm，生成面网格，利用软件自带的修复功能对面网格进行排查，无误后生成型壳，型壳厚度设为 8 mm，之后生成体网格。最后初始工艺网格划分面网格数量为 160 878，体网格数量为 1 526 452。

2.2　模拟参数的设置

面网格、体网格检查无误后转到 Cast 模块，设置重力方向为 Y 轴正方向，合金材料为自建的 12CrMoV，材料化学成分如表 2 所示，型壳材料设为 Refractory Mullite。合金初始温度设为 1 610 ℃，型壳预热温度取 900 ℃。铸件与型壳之间的界面换热类型为 COINC，换热系数取 750 W/(m^2·K)；浇注时间为工厂平均浇注时间 6~8 s，此次工艺选取

表 1 不同浇注系统结构对比
Tab.1 Comparison of different gating system

浇注方式	顶注式	底注式	中间注入式	分层注入式
浇注位置	内浇道设在铸件顶部，金属液由铸件顶面流入型腔	内浇道设置在铸件底部，金属液由铸件底部进入型腔	内浇道设置在铸件中间的某个部位，一般设在分型面	金属液分层自下而上进入型腔，直浇道不封闭，内浇道分散、分层注入
浇注特点	有利于铸件实现自下而上的凝固顺序，补缩效果显著	对型、芯冲击力小，有利于排气，不利于补缩	兼具顶注式和底注式的优缺点	金属液冲击小，充型平稳，有利于补缩排气

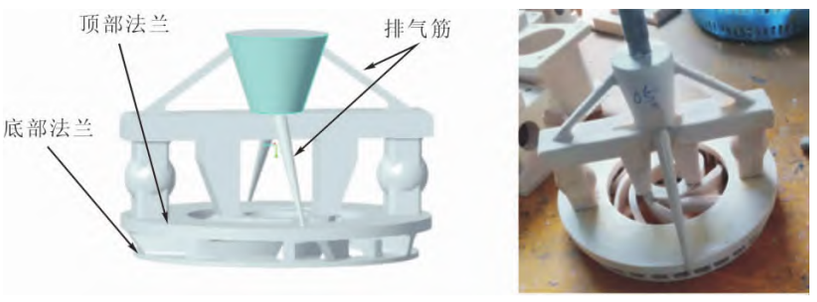


图 2　初始方案浇注系统
Fig.2　Initial scheme gating system

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表2 ZG12CrMoV的化学成分 *w*/%
Tab.2 Chemical constituents of ZG12CrMoV

Cr	Mo	C	Mn	Si	V
2.25	0.30	0.12	0.50	0.20	0.20

8 s。浇注速度的大小和充满铸型所用的时间息息相关，过快或者过慢都容易产生浇注缺陷[15]；根据软件自带的质量流率计算器进行计算，由浇注时间和浇注温度确定，经计算取 3.167 9 kg/s，预定义参数选择标准的 Investment or Shell Casting，其余参数采用默认[16-18]。

3　初始工艺数值模拟结果分析

3.1　充型过程模拟结果分析

原方案充型过程如图 3 所示，在 0.2 s 时钢液进入横浇道然后向两侧散开，0.5 s 时开始对铸件涡轮部分进行充型，4.5 s 的时候钢液基本充满铸件，在 8 s 时浇冒系统和铸件充型完毕。可以看出总体充型过程较为平稳，并没有出现明显的卷气、夹渣以及浇不足等现象。

3.2　凝固过程模拟结果分析

图 4 为初始方案转子盘浇冒系统的凝固过程模拟，通过凝固过程可以观察铸件凝固顺序和孤立液相区的位置，为预测缩松缩孔缺陷提供参考。可以看到整个凝固过程都是由下而上、由外向内的凝固顺序，在 1 999.1 s 时完全凝固。随着温度降低，金属液粘度逐渐增大，流动性降低，故当金属液固相率达到 70%时默认其基本凝固，不再具有流动性。由图 4(a)可知，转子盘在充型过程中就已经发生了温降的趋势，其原因是该工艺是由内浇道进行充型，浇冒口虽也运输溶液，但主要还是起到补缩作用，而顶部法兰离内浇道较远，所以产生了热量损失，由图可知此时固相率为 53%，还具有流动性；当凝固至 49.1 s 时可以明显看到扇叶片以及筋条处存在孤立液相区，如图 4(b)所示，这是因为金属液在凝固时体积收缩，而底部法兰与筋条凝固速度快，导致补缩通道被阻断，无法对其实现补缩。由此可判断铸件此处存在孤立热节，当凝固至 89.1 s 时，如图 4(c)所示，观测到顶部法兰盘中部区域也出现孤立液相区，可判断此处最后也会出现孤立热节，在铸件最后凝固时会出现缩松缩孔缺陷[19-20]。缩松缩孔缺陷分布如图 5 所示，铸件底部以及顶部法兰出现大量的缩松缩孔缺陷，铸件内（不包括浇注系统）缺陷总体积为 14.766 cm^3。

4　工艺改进模拟与参数优化

4.1　浇注系统工艺改进

模拟结果显示转子盘铸件的缺陷主要集中在顶部法兰、扇叶片、底部法兰与筋条处。改进工艺选择将涡轮中间孔洞不铸出，后期利用机械加工出来，这方便工艺设计，也有利于制壳生产，不容易掉件。具体设计方案为直浇冒口与冒口搭配排气筋方式，在顶部法兰设置 8 个冒口，排气筋连接冒口与浇口杯；接着在底部法兰与筋条处也同样设置 8 个冒口，冒口与底部法兰通过补贴连接，排气筋则连接冒口与浇口杯，此方案的冒口可以储存足够的金属液来补缩法兰盘和涡轮，更加有利于铸件按照自下而上、由

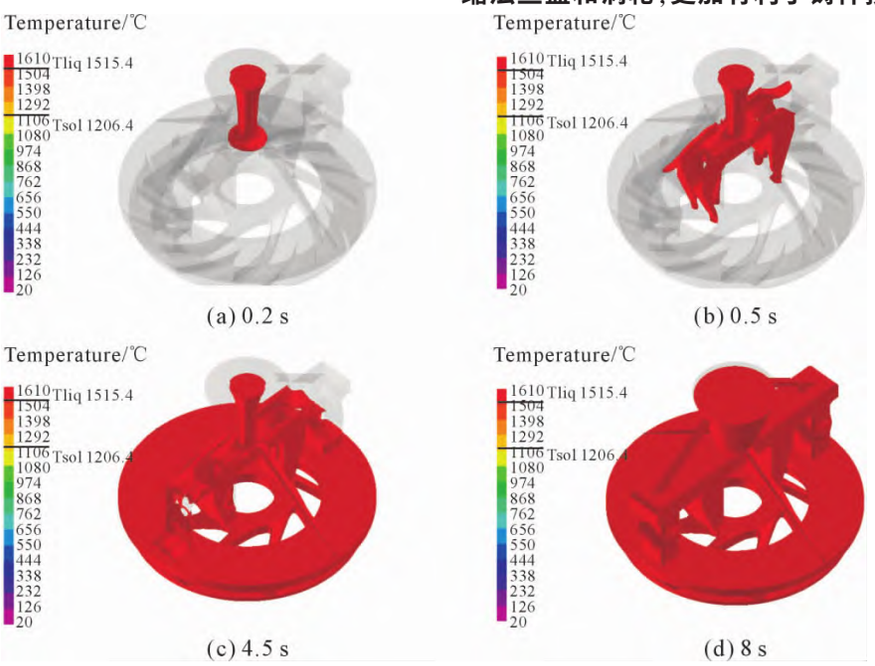


图 3　模拟的铸件不同时刻的充型过程
Fig.3　Simulated filling process of the casting at different time

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

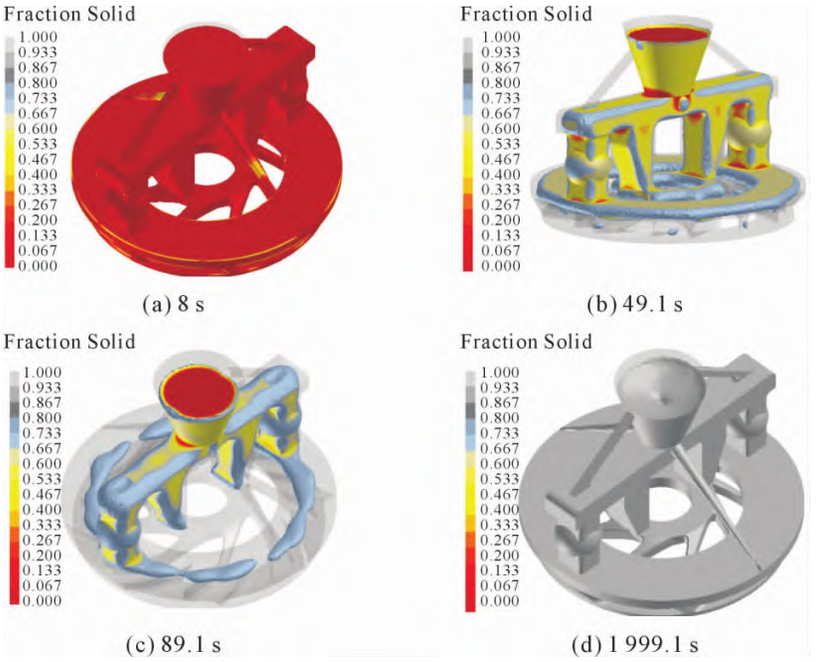


图 4 模拟的铸件不同时刻的凝固过程

Fig.4 Simulated solidification process of the casting at different time



图 5 模拟的铸件缩松缩孔缺陷分布

Fig.5 Simulated shrinkage defect distribution in the casting

外向内的凝固顺序。改进后的转子盘浇注系统如图 6 所示，改进后的网格划分数量为 2 103 149，模拟参数不变。

4.2 改进方案模拟结果分析

图 7 为改进方案不同时刻的充型过程，铸件经过改进后在充型过程中更加平稳，钢水首先进入涡轮，接着向四周扩散，在 0.8 s 时开始对筋条充型完毕并开始进入底部法兰，在 2.7 s 时充满底部法兰然后开始对顶部法兰进行充型，最终在 8 s 时充型结束。改进后的工艺与初始工艺相比，两次方案在充型过程中都比较平稳，没有出现裹气、夹渣以及浇不足等现象[21-22]。

图 8 为改进方案不同时刻的凝固状态。由图 8(a~b)可知，铸件在浇注过程跟初始一样温度有下降，当凝固至 23.2 s 时排气道基本凝固完毕，底部法兰与顶部法兰开始逐渐向内凝固；当凝固至 43.2 s 时，图 8(c)，能够看出转子盘底部法兰扇叶片与筋条处有溶液断流趋势，总体来看凝固顺序还是遵循自下而上、由外向内的凝固顺序[23-25]；由图 8(d)可得，当凝固至 1 843 s 时，铸件完全凝固；铸件缩松缩孔缺陷如图 9 所示，为方便观察，将顶部法兰的冒口隐藏，可以发现，改进后的工艺方案铸件内缩松缩孔体积为 2.295 cm^3，与初始工艺相比明显减小。

4.3 工艺参数优化

根据改进后的铸件缩松缩孔缺陷图可知，铸件在工艺改进后缩松缩孔缺陷明显降低，但在扇叶片和个别筋条处还存在着缺陷，因此需对浇注过程进行参数优化。影响铸件质量的因素有很多，如浇注温

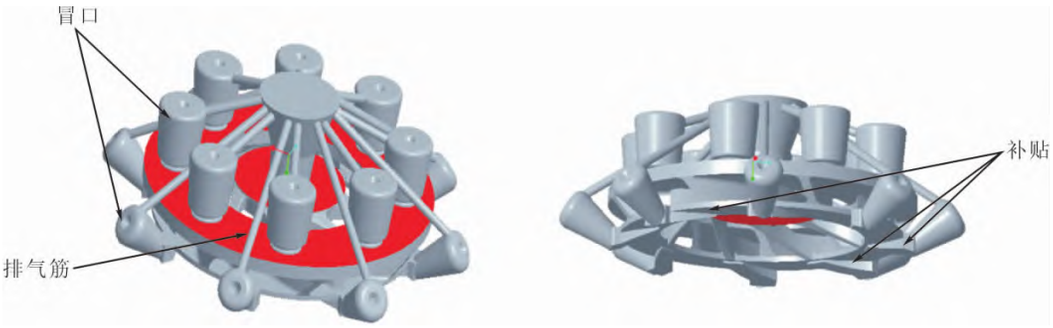


图 6 铸件改进后的浇冒口系统

Fig.6 Improved pouring and feeding system for the casting

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

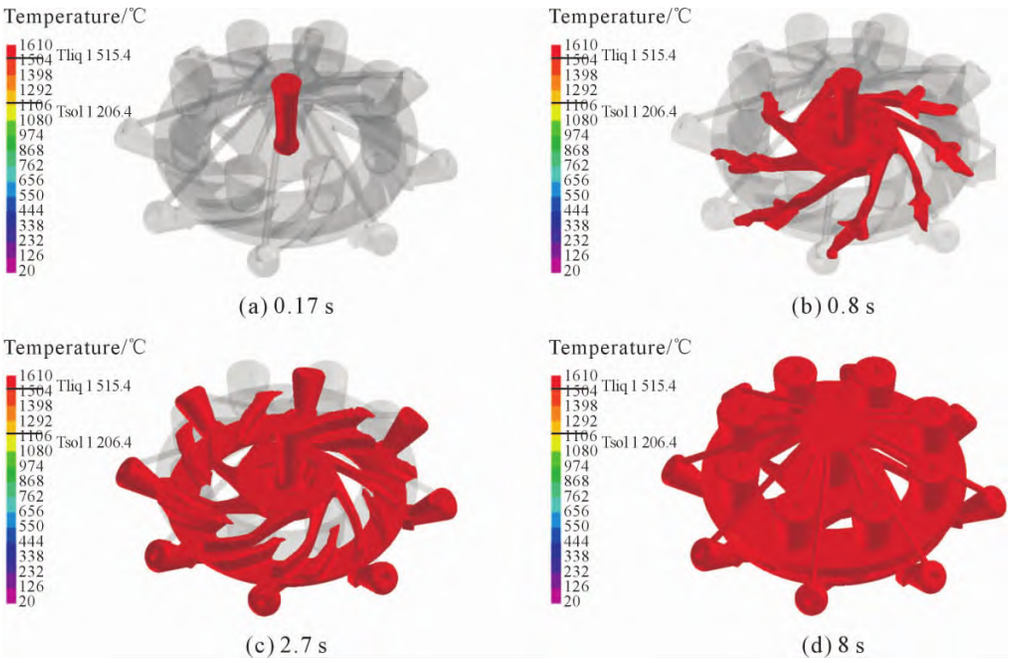


图 7　工艺改进后的模拟的铸件不同时刻充型过程

Fig.7　Simulated filling process of the casting with improved gating and feeding system at different time

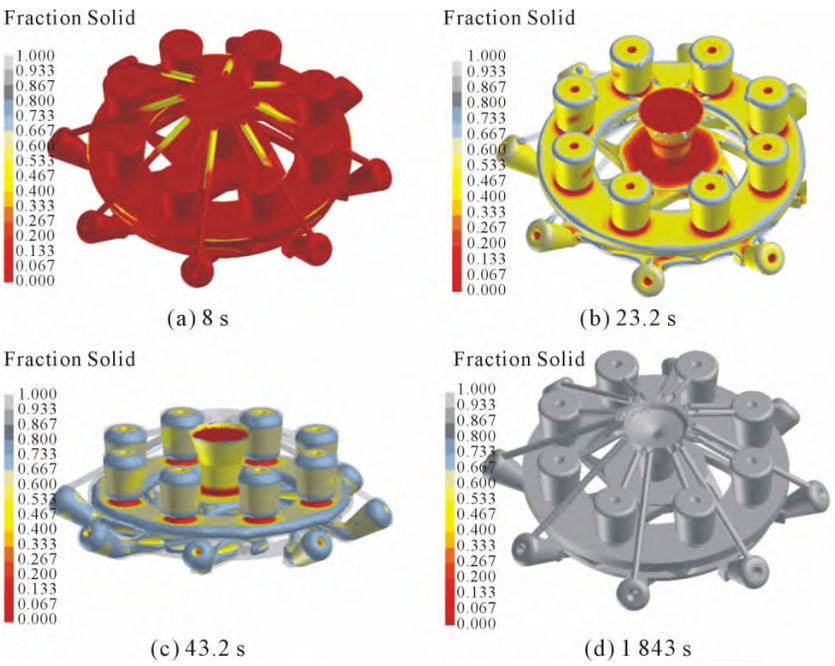


图 8　浇冒系统改进后模拟的铸件不同时刻的凝固过程

Fig.8　Simulated solidification process of the casting with improved gating and feeding system at different time

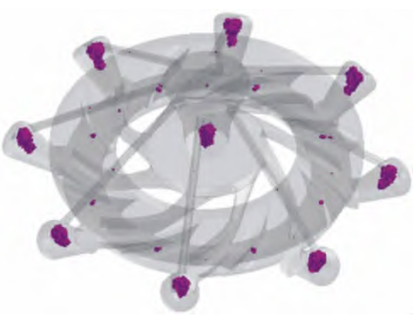


图 9　改进后的铸件缺陷分布

Fig.9　Improved casting defect distribution

度、浇注速度、模壳预热温度、铸件结构等，本文主要选取浇注温度、浇注速度、模壳预热温度这 3 个参数进行优化。

现以初始浇注工艺参数为基础，设计 3 因素 3 水平正交试验表，如表 3 所示。再以铸件内缩孔率为试验指标，建立 3 因素 3 水平 $L_9(3^3)$ 试验模拟方案结果如表 4 所示。其中，浇注速度通过浇注时间确定，运用软件自带计算器进行计算得浇注速度分别为 309 mm/s (8 s)、354 mm/s (7 s)、413 mm/s (6 s)；表 4 中 K_i 为任一列相同水平所对应得指标之和，R

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表3 因素水平表
Tab.3 Factor level table

水平	浇注温度 D/℃	浇注速度 E/mm·s^{-1}	预热温度 F/℃
1	1 610	309	900
2	1 630	354	930
3	1 650	413	960

表 4 正交试验模拟方案结果表
Tab.4 Shrinkage cavity rate statistical table of orthogonal experimental scheme

试验号	因素			缩孔率/%
	浇注温度 D/℃	浇注速度 E/mm·s^{-1}	预热温度 F/℃	
1	D_1	E_1	F_1	5.941
2	D_1	E_2	F_2	4.658
3	D_1	E_3	F_3	3.812
4	D_2	E_1	F_2	3.201
5	D_2	E_2	F_3	3.485
6	D_2	E_3	F_1	4.347
7	D_3	E_1	F_3	0
8	D_3	E_2	F_1	3.537
9	D_3	E_3	F_2	3.179
K_1	14.411	9.142	13.826	/
K_2	11.033	11.680	11.039	/
K_3	6.717	11.339	7.297	/
R	7.694	2.538	6.529	/

为极差。

由表 4 可知第 7 组试验铸件内缩孔率最低，因此最优组合为 $D_3E_1F_3$，所对应的工艺参数为浇注温度 1 650 ℃，浇注速度 309 mm/s，预热温度 960 ℃；通过极差分析也可推断各因素对结果的影响，极差越大表明影响就越大，故影响由大到小排列顺序为 $D>F>E$。图 10 是运用最优组合所模拟的结果，可知铸件内缩松缩孔缺陷完全消除，图中深色部分为缩松缩孔缺陷，主要集中在冒口中，后期会被清除，对铸件不会产生影响。

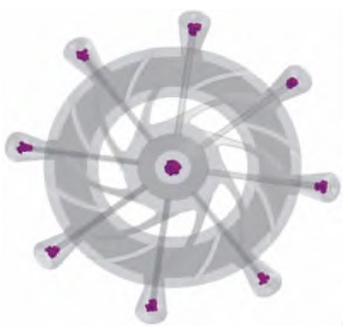


图 10 最优方案模拟的结果消除了铸件中的收缩缺陷，缩松缩孔完全在冒口中
Fig.10 Optimal scheme simulation totally eliminated shrinkage defects in the casting, all the shrinkage porosity and holes are in the feeder

5 结论

(1)运用 ProCAST 软件对转子盘初始工艺浇注方案进行数值模拟，通过观察流场、凝固场发现转子盘底部法兰以及扇叶两侧均发现孤立液相区，从而预测了缩松缩孔的位置。

(2)通过对初始浇注工艺进行改进，选择将转子盘中间孔洞不铸出，采用直浇冒口与冒口搭配排气筋的浇注工艺，其中底部法兰与冒口通过补贴相连接；此方案可通过冒口强大的补缩能力对转子盘扇叶片与筋条进行有效的补缩。

(3)运用正交试验方法对浇注工艺进行参数优化从而得出最优参数组合方案，最优参数组合为浇注温度 1 650 ℃，浇注速度 309 mm/s，模壳预热温度 960 ℃，最后根据模拟结果可知铸件内缩松缩孔缺陷完全消除。

参考文献：

[1] 何建清. 车用电涡流缓速器的设计方法及其性能分析[D]. 镇江：江苏大学，2003.

[2] 何仁，刘成晔. 车用电涡流缓速器转子盘非稳态温度场数值分析[J]. 汽车工程，2006(2): 181-185.

[3] PATTNAIK S, KARUNAKAR D B, JHA P K. Developments in investment casting process: A Review[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(11): 2332-2348.

[4] 孙敏，梁宝桢. 熔模铸造(第 2 版)[M]. 北京：北京理工大学出版社，2015.

[5] 吕凯. 熔模铸造(第 1 版)[M]. 北京：冶金工业出版社，2018: 3.

[6] 沈昀，郑功，冯辰铭. 熔模精密铸造技术研究进展[J]. 精密成形工程，2019, 11(1): 54-62.

[7] WINTER H U, LINDIGKEIT J. 伴随牙科技术发展而改进的非贵金属合金[J]. 世界牙科技术，2016(2): 44-46.

[8] 刘林. 高温合金精密铸造技术研究进展[J].铸造，2012, 61(11): 1273-1285.

[9] 张立同，曹腊梅，刘国利，等. 近净形熔模精密铸造理论与实践[M]. 北京：国防工业出版社，2007, 10-11.

[10] 吕志刚. 我国熔模精密铸造的历史回顾与发展展望[J]. 铸造，2012, 61(4): 347-356.

[11] 师昌绪，仲增墉.我国高温合金的发展与创新[J].金属学报，2010, 46(11): 1281-1288.

[12] 张逢骏.叶轮快速成型件的熔模铸造工艺与数值模拟研究[D].江苏大学，2016.

[13] 李新亚. 中国机械工程学会铸造分会. 铸造手册：第 5 卷 铸造工艺(第 5 版)[M]. 北京：机械工业出版社，2011.

[14] 赵见知，韩旭，顾登禹. 基于 CAE 技术的铝合金变速箱箱体铸造工艺设计[J]. 热加工工艺，2017, 46(3): 97-100.

[15] 孟宪宝，张文朝，王晓菲，等. 铝合金离心滤座铸造工艺改进[J]. 铸造技术，2019, 40(5): 473-475.

[16] 韦洲，张晓光，马振哲. 插秧机支撑架熔模铸造工艺优化[J]. 热加工工艺，2019, 48(9): 108-110, 113.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[17] 周剑，严青松，芦刚，等. 不锈钢阀体熔模精铸件浇冒系统的数值模拟及工艺优化[J]. 铸造技术，2013, 34(3): 341-344.
[18] 杨胜男，吴文云，汪东红，等. 大型不锈钢球阀熔模铸造工艺优化[J]. 特种铸造及有色合金，2016, 36(6): 623-625.
[19] 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): 1259-1261.
[20] 梁敏，周璟，王助龙，等. 大型轧机轴承座的铸造工艺改进[J]. 铸造技术，2019, 40(10): 1093-1095.
[21] 李涛，沙羽，李金辉，等. 发动机缸体浇注系统设计及优化[J]. 铸造，2021, 70(4): 473-477.
[22] 姜淼，凌李石保. 复杂泵体熔模铸造工艺数值模拟与优化控制[J]. 铸造技术，2019, 40(5): 492-495.
[23] 郑伦川，刘贯军. 基于 ProCast 模拟的铸钢件熔模铸造工艺优化[J]. 铸造技术，2016, 37(8): 1776-1778.
[24] 武厚军，张亦杰. 基于仿真的熔模铸造不锈钢铸件浇注系统优化[J]. 铸造技术，2015, 36(4): 985-988.
[25] 聂金成，谌黎明，叶洁云，等. 大型铸钢支架铸造工艺数值模拟与优化设计[J]. 铸造技术，2019, 40(11): 1178-1182.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net