基于数值模拟和砂型 3D 打印的机匣整体重力铸造工艺研究

徐伟业[1]，陈维平[1]，金　枫[2]，朱德智[1]，凌自成[1]

（1. 华南理工大学广东省金属新材料制备与成形重点实验室，广东广州 510641；
2. 广东峰华卓立科技股份有限公司，广东佛山 528225）

摘要：机匣具有内腔复杂、壁薄等特征，传统工艺方法难以在短期内对其进行整体铸造和性能验证。本文结合ProCAST数值模拟软件和砂型3D打印方法对其进行整体铸造工艺研究。模拟仿真得出：720 ℃浇注初温下，浇注8 s，铸件成形效果良好，充型平稳且顺序凝固。整体凝固达到46%时，铸件主体区域已凝固完毕，无孤立液相区，可有效避免缩孔类缺陷的产生。随后用砂型3D打印方法试制铸件，试制周期有效缩短至原时间的1/4。通过X-Ray与尺寸精度检测显示：铸件形状完整、无气孔和明显缺陷，尺寸精度符合标准，试制结果与仿真结果一致。

关键词：3D打印砂型；模拟仿真；重力铸造；机匣

作者简介：
徐伟业（1993–），男，硕士生，研究方向为数值模拟和增材制造。E-mail：xu782673255@126.com
通讯作者：
陈维平，男，教授，电话：020-87113267，E-mail：mewpchen@scut.edu.cn

中图分类号：TG172
文献标识码：A
文章编号：1001-4977（2019）08-0905-06

基金项目：
广东省重大专项资金支持项目（项目编号2017B090911010）；广州市重点项目专题（项目编号201804020071）。
收稿日期：
2019–03–19 收到初稿，
2019–04–17 收到修订稿。

本文机匣为直升机传动器中间机匣（下称机匣），一般位于风扇机匣和高压压气机之间，是重要的承力框架结构，其内腔结构复杂，工作环境恶劣，常受极端温度、振动、高压等因素影响，故对铸造品质的要求极为严格。

近年来，机匣生产多采用模型拼装等传统手工方法制造，该方法成形质量差、生产效率低，浪费大量的资源却无法批量生产出合格的产品。随着计算机数值模拟技术及3D打印技术的发展，将传统制造工艺材料体系广泛、成形尺寸大、产品质量认证体系成熟的优势与3D打印高效、智能、对零件复杂度不敏感的优势相结合，形成一套新型铸造生产工艺模式，从而有效地实现生产自动化、环境绿色化，并大幅提升铸件生产的合格率[1-3]。本文以直升机传动器中间机匣为研究对象，开展基于数值模拟和砂型3D打印的机匣整体重力铸造工艺研究。

1　试验方法

首先建立模拟仿真软件所需的三维模型，包括浇注系统设计、工艺方案设定等；利用ProCAST软件完成模型前处理、相关模拟参数设定和仿真模拟；根据仿真模拟结果对模型及相关工艺方案进行分析并优化。将优化后的模型数据导入砂型3D打印平台，打印实际生产所需的砂型。该过程无需人工干预、生产效率高。将砂型清理组装后，利用传统重力铸造法试制铸件。最后对试制铸件进行X-Ray成形质量检查及尺寸精度测量，将结论与仿真结果进行对比分析。

2　仿真模拟及优化分析

2.1　仿真前处理

利用UG三维软件建立机匣模型，如图1a所示。零件壁厚尺寸分析如图1b所示。外观尺寸为343 mm × 337 mm × 480 mm，最小壁厚6 mm，最大壁厚37 mm，零件侧壁存在众多油路及冷却管道（图2）。

机匣整体铸造工艺方案的浇注系统与冷铁布局如图2a、2c所示，图2b、2d为后期优化后工艺方案。原工艺方案中铸件部分重16.02 kg，浇注总重39.07 kg，工艺出品率41%，铸件材质为ZL114A。根据铸件的工况要求及铸造工艺规范，设置浇注系统参数，拟采用工字浇注系统，设计如图2a所示的上下两层随形横浇道与冒口（冒口需倒圆角），并在冒口难以补缩的复杂部位与铸件末端区安置冷铁，直浇道内置过滤网，砂模外壁合理布置排气通道[4-6]。根据金属液流动“大孔出流”理论[7]，采用截面比流道设计法，铝合金浇注系统各单元截面比参考如下：

$$A_{直}:A_{横}:A_{内}=1:(2\sim4):(2\sim4) \quad (1)$$

截面比流道设计法可根据上述截面比，计算出内浇道中的压力高度（h_p），并用该压力高度设计可得内浇道的截面积，计算如下：

$$A_{内}=G_L[\rho_L\cdot\mu\cdot t(2g\,h_p)^{1/2}] \quad (2)$$

式中：G_L为流经浇注系统最下截面时的金属液质量（kg），ρ_L为金属液密度（kg/cm^3），μ为流量损耗系数，t为浇注时间（s），g为重力加速度，h_p为内浇道中压力高度，对于四单元浇注系统而言，计算方法如下：

$$h_p=(k_2^2\cdot H_p)/(1+k_1^2+k_2^2) \quad (3)$$

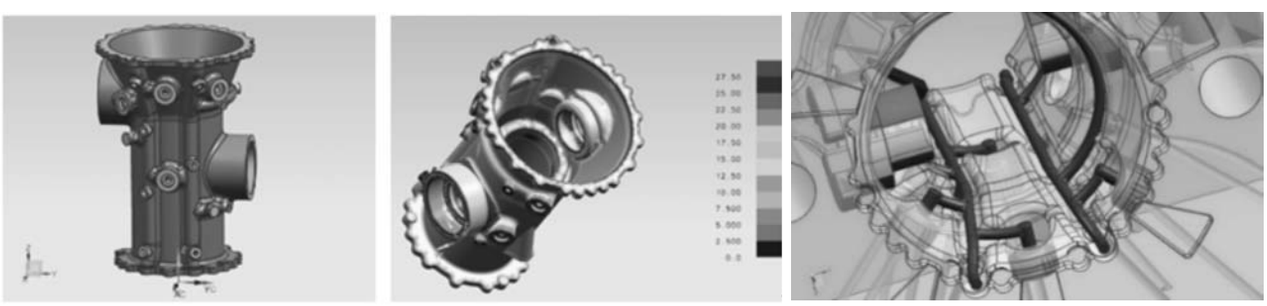
式中：k_1为直浇道截面积与横浇道截面积之比，k_2为直浇道截面积与内浇道截面积之比，H_p为静压头高度，计算公式如下：

$$H_p=H_0-0.5h_c \quad (4)$$

式中：H_0为直浇道总高度，h_c为铸件高度。

按上述计算可得直浇道浇注孔直径为25 mm，可有效降低腔内紊流及时充型。为降低3D打印中砂颗粒的尺寸影响及装配的适配性，在整体模型设计完毕后，设置收缩率0.1%，补偿3D打印成形误差。

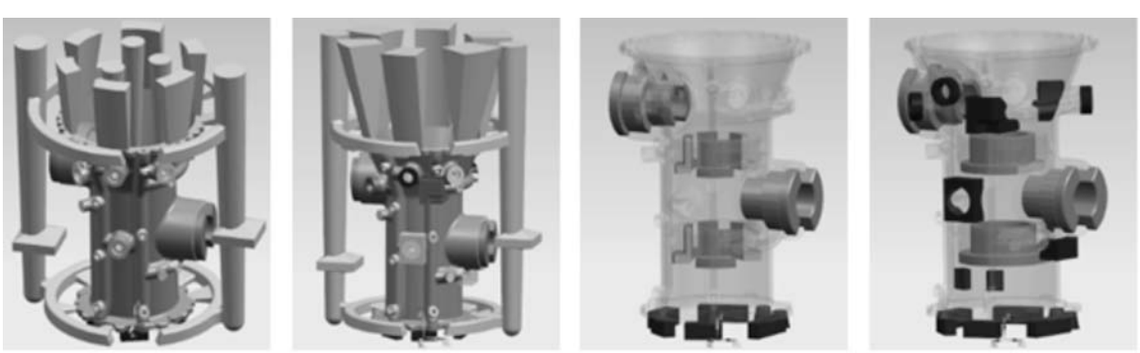
将设计好的机匣及浇注系统模型导入ProCAST，在Mesh模块中完成网格划分，采用四面体渐变式网格划分法，其中铸件主体区域网格尺寸4 mm，砂型模具区域网格尺寸20 mm，交接位置为过渡式网格，共划分二维网格428 447个；二维网格检查无误后，划分体网格，共划分了9 761 367个四面体，浇注系统及铸件的网格划分如图3a所示，砂型模具网格划分如图3b所示。



（a）三维模型　（b）壁厚分析　（c）砂型内部形貌

图1　机匣模型

Fig. 1 Mold of the of cartridge receiver



（a）原浇注系统设计　（b）优化后浇注系统　（c）原冷铁设计　（d）优化后冷铁

图2　工艺设计图

Fig. 2 Original and optimized 3D gating and feeding system design

在Cast前处理模块中，设置各项参数如下：铸件及浇注系统材料为铝合金（ZL114A），砂型材料为呋喃树脂砂（CBFMS-M），过滤网为high filter，冷铁材质为灰铸铁（iron）；接触界面网格一致、 材质不同的换热类型选用COINC，材质相同部分的换热类型选用EQUIV，其中铸件与砂型间的界面热交换系数设500 W/（m^2·℃），铸件与冷铁之间的界面热交换系数设2 000 W/（m^2·℃），冷铁与砂型之间的界面热交换系数设500 W/（m^2·℃）；模具外表面的边界条件设为刚性，170 ℃预热发气后，降至室温下浇注，排气通道类型设为管道，材料选air，初温20 ℃；用Inlet流量法控制浇注速度，设置浇注初温730 ℃，浇注时间6 s，冷却方式为空冷[8-10]。

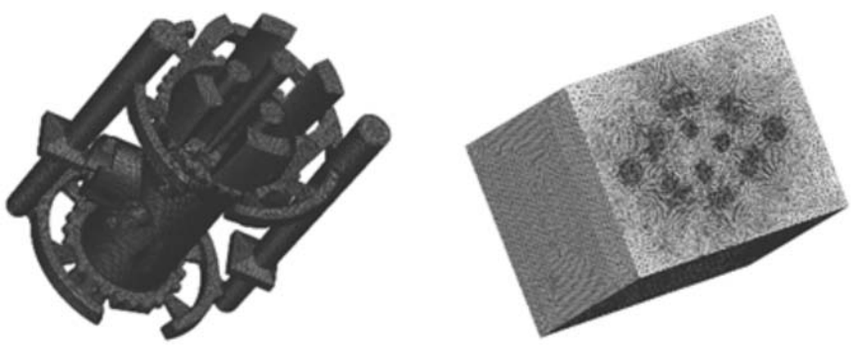
2.2 仿真结果分析

通过分析图4的铸件充型模拟过程可以发现：0~0.96 s，铝合金熔体逐渐充满底层横浇道；0.96~3.12 s，熔体通过底层内浇道注入铸件主体区域，流速平稳，扰动、紊流现象较少，型壁部分顺序充型，细节部位充型完整；3.12~5.21 s，顶层浇道开始注入熔体，增加充型动力，保证铸件上部的充型完整性；5.21~5.90 s熔体开始填充冒口区域，对铸件内腔及型壁等部位进行补缩，将浮渣、气体等集中到冒口，减少缺陷产生、控制成形质量。整个铸件充型过程平稳有序、无明显卷气现象产生，浇注系统具备初步合理性[12]。

对原始工艺的仿真结果进行分析发现：铸件充型过程符合工艺要求，但在凝固阶段，铸件主体区域各部分凝固速度不一（图5a），快慢相差近200 s，直接影响到铸件的最终成形质量与力学性能。另从铸件凝固的固相率结果（图6）可以发现，图6a原工艺中铸件主体区域凝固完成时，用时335.08 s，为整体凝固率的72.1%；可见主体凝固进程较慢，不利于冒口补缩及缺陷消除。导致铸件凝固完成后，存有大量缩孔缩松（图7a），无法达到工艺预期要求。

2.3 工艺优化

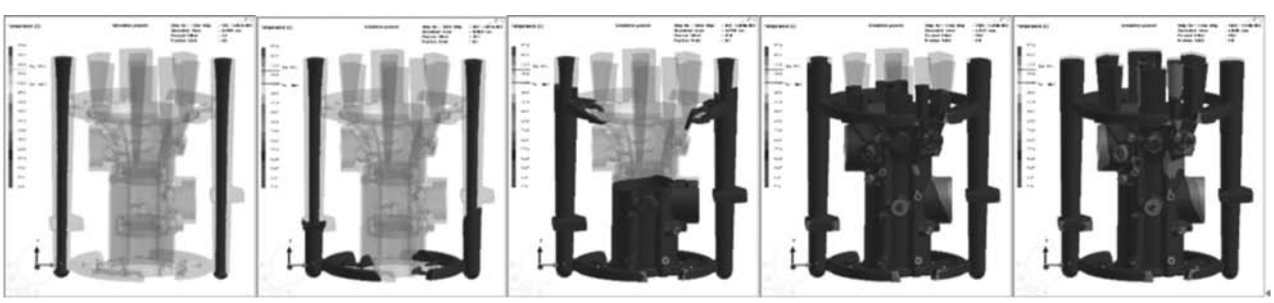
由仿真结果对原工艺进行优化发现：原工艺中铸件腔内冷铁布局松散、热传递不均匀，易导致腔套中产生缩孔类缺陷。优化工艺采用与腔套随形的冷铁布局，热传递均匀，有效增加铸件局部冷却速度，强化补缩效果，消除孤立液相区形成条件，并可去掉



（a）浇注系统　　（b）砂型模具

图3　网格划分

Fig. 3 Mesh generation

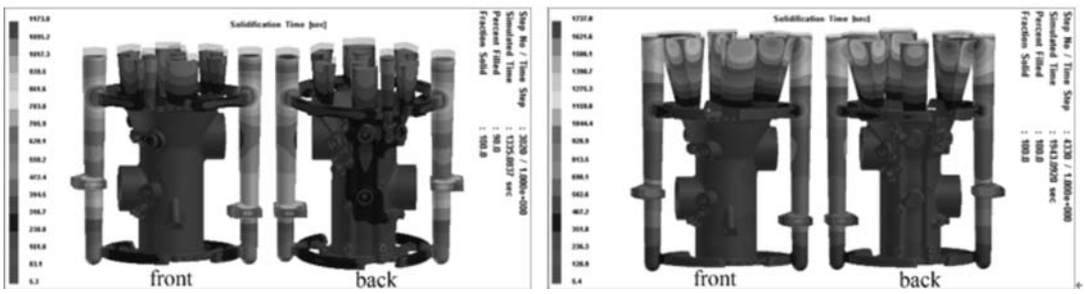


（a）充型0.44 s　（b）充型0.96 s　（c）充型3.12 s　（d）充型5.21 s　（e）充型5.90 s

图4　充型过程云图

Fig. 4 Cloud diagram of filling process

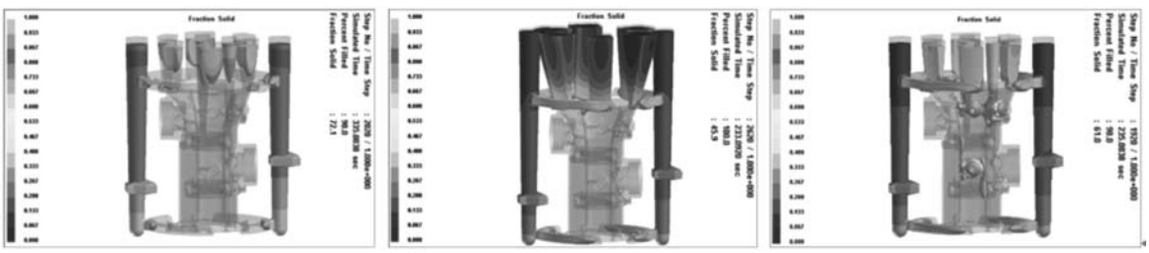
腔套上的补缩冒口，减少冒口数目和体积，提高工艺出品率；针对性的在油道等部分加放冷铁，加速热节冷却，使铸件主体接近于同时凝固，防止铸件变形；加大铸件顶部冒口的截面尺寸与高度，延缓冒口中熔体的凝固时间，扩大补缩通道与充型压力，实现复杂壁腔有效补缩，减少缺陷产生；扩大直浇道直径至30 mm，高度增加100 mm，提升充型压力；修改浇注初温为720 ℃，减慢浇注速度至8 s，铸件充型、凝固效果良好[13-15]。工艺优化后的凝固结果如图7b所示，铸件主体区域基本实现同时凝固、轮廓清晰、形状完整。主体区域凝固完成时，整体凝固率45.9%，用时233.09 s，对比原工艺提前了102 s，在此时刻的原工艺中还残留大量未凝固液相（图6c）。故优化工艺后，铸件主体区域的缩孔缩松类缺陷基本消除（图7b），剩余缺陷主要产生在冒口和浇注系统等非重要区域，基本解决该铸件在铸造过程中产生的问题，模拟仿真结果达到工艺预期要求。



（a）原始工艺　　（b）优化后工艺

图5　凝固过程云图

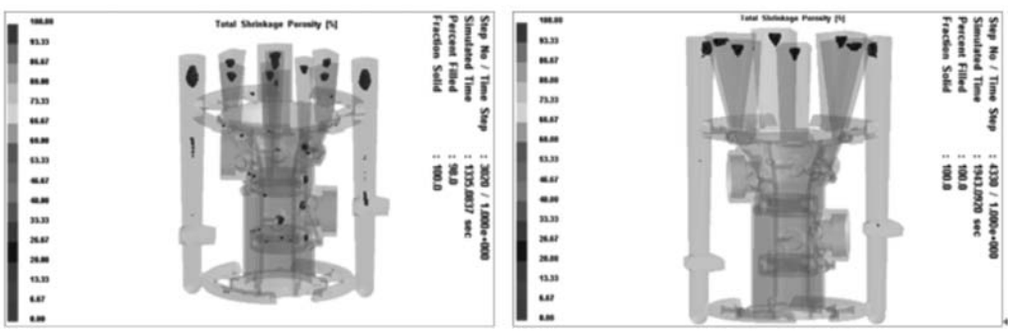
Fig. 5 Cloud diagram of solidification process



（a）原始工艺（凝固72.1%）　　（b）优化后工艺（凝固45.9%）　　（b）原工艺235 s时固相率

图6　铸件凝固过程固相率云图

Fig. 6 Cloud diagram of fraction solid in casting solidification process



（a）原始工艺　　（b）优化后工艺

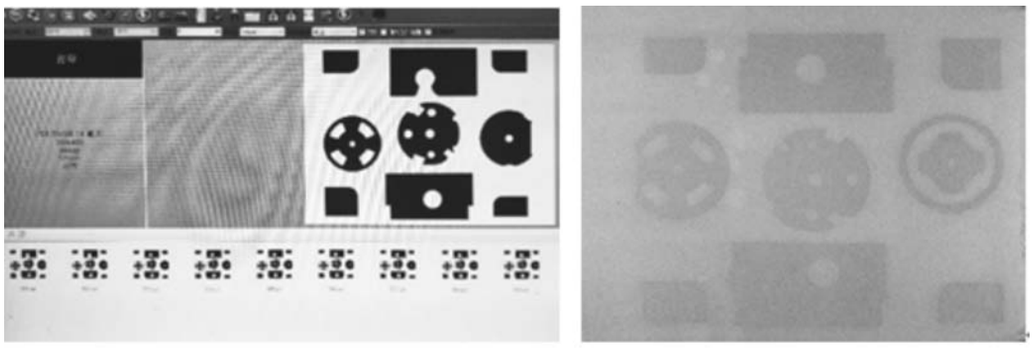
图7　缩孔缩松模拟结果

Fig. 7 Simulation results of shrinkage porosity

3 试制及检测

利用切片分层软件将模拟优化后的模型切片处理，分层情况如图8a所示，随后导入砂型3D打印平台，打印试制所需砂型，原砂为CB砂（目数70～140），粘结剂采用呋喃树脂配方，平台打印参数设置如下：铺砂层厚0.3 mm，单PASS打印，成形幅面800 mm×600 mm×500 mm，设置完毕后打印截面如图8b所示。

将打印好的砂型进行相关处理，随后组装成内含铸件及浇注系统空腔的模具，试制参数采用ProCAST模拟优化参数，即铝合金熔体初始浇注温度720 ℃，浇注时长8 s，自然空冷后开箱取件，完成后处理的成品铸件表面光洁度良好，轮廓清晰，无明显铸造缺陷（图9）。经X-Ray检查，关键部分成形良好，油口及装配孔中没有孔洞类缺陷产生（图10）。尺寸精度在允许误差范围，满足实际服役条件下的使用条件，符合客户要求。



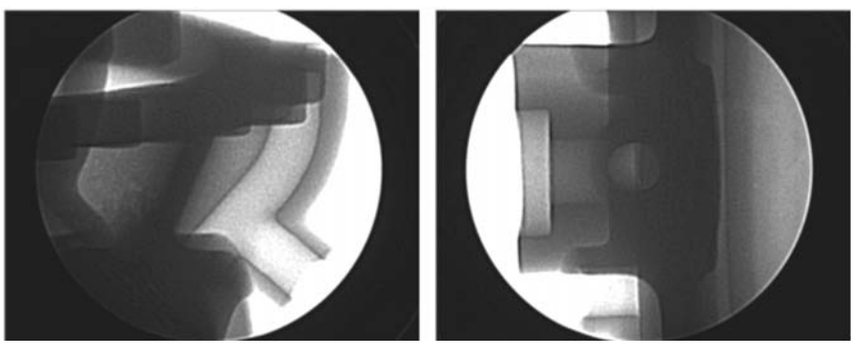
（a）分层软件界面　　（b）3D打印平台

图8　砂型打印示例

Fig. 8 Example of 3D sand printing

图9　试制样件

Fig. 9 Trial-produced part



（a）油口　　（b）装配孔

图10　X-Ray检查结果

Fig. 10 X-ray detection results

4 结束语

（1）利用ProCAST仿真软件优化工艺，实现铸件浇注过程的顺序充填，无或少紊流产生，铸件主体区域凝固进程一致，时间较原工艺提前102 s，且有效避免了孤立液相区的产生，缺陷产生较少，大部分集中在非重要区域。

（2）通过优化后的模拟工艺结果可知：720 ℃的浇注初温，浇注8 s，浇速先慢后快，铸件成形效果最好，铸件试制的检测结果也符合工艺目标要求，即仿真模拟结果与实际结果吻合。

（3）本文工艺方法可指导传统制造工艺中复杂零件的整体铸造成形，同时有助于颠覆传统铸件设计理念，将传统铸件设计方法转型到以功能实现为主导的理念设计上来，实现零部件集成化、轻量化生产。

参考文献：

[1] 柳百成. 建模与仿真在装备制造中的作用与前景 [J]. 航空制造技术，2008（3）：26–29.

[2] KANG Jinwu，MA Qiangxian. The role and impact of 3D printing technologies in casting [J]. 中国铸造，2017，14（3）：157–168.

[3] MEET Upadhyay，SIVARUPAN Tharmalingam，MOHAMED El Mansori. 3D printing for rapid sand casting-A review [J]. Journal of Manufacturing Processes，2017，29（10）：211–220.

[4] 姜耀林，何朝辉，邵中魁. 基于ProCAST及3D打印技术的闭式叶轮快速铸造技术研究 [J]. 机电工程，2015（9）：1166–1169，1191.

[5] HSU F Y，JOLLY M R，CAMPBELL J. A multiple-gate runner system for gravity casting [J]. Journal of Materials Processing Technology，2009，209（17）：5736–5750.

[6] 吴爵盛，金枫，张全艺，等. 一种镶缸套铝合金缸体铸件的快速制造方法 [J]. 铸造，2015，64（9）：842–845.

[7] 李晨希. 铸造工艺设计及铸件缺陷控制 [M]. 第1版. 北京：化学工业出版社，2009：92–99.

[8] 韩大平，杨武，彭志江，等. 基于ProCAST的大型薄壁机匣件整体熔模铸造工艺研究 [J]. 铸造，2013，62（10）：979–982.

[9] 谢秋峰，薛鑫，吴亚夫，等. 基于ProCAST涡壳体铸件精铸过程数值模拟研究 [J]. 铸造，2015，64（7）：647–652.

[10] 邵珩，罗志辉，李岩，等. 铝合金熔模精密铸造界面换热系数测量 [J]. 铸造，2014，63（10）：1010–1013，1018.

[11] 胡红军. ProCAST软件的特点及其在铸件成形过程中的应用 [J]. 热加工工艺，2005（1）：70–71.

[12] 贾瑞娇，严继康. 砂型重力铸造铝合金轮毂温度场数值模拟 [J]. 特种铸造及有色合金，2013（2）：127–131.

[13] 白朝中. 基于数值模拟的发动机缸盖快速砂型铸造工艺研究 [D]. 绵阳：西南科技大学，2015.

[14] SYED Ferhathullah Hussainy，MOHD Viquar Mohiuddin，LAXMINARAYANA P，et al. Analysis of shrinkage characteristics of aluminium silicon Alloy [J]. Journal for Manufacturing Science and Production，2016，16（3）：163–171.

[15] 柳百成. 铸件凝固过程的宏观及微观模拟仿真研究进展 [J]. 中国工程科学，2000，2（9）：29–34.

Study of Cartridge Receiver Gravity Casting Process Based on 3D Printing Sand Mold and Numerical Simulation

XU Wei–ye[1], CHEN Wei–ping[1], JIN Feng[2], ZHU De–zhi[1], LING Zi–cheng[1]

（1. Guangdong Key Laboratory for Advanced Metallic Materials Processing, South China University of Technology, Guangzhou 510640,Guangdong,China; 2. Guangdong Fenghuazhuoli Technology Co., Ltd., Foshan 528225,Guangdong,China）

Abstract:

The cartridge receiver in helicopter transmitter has characteristics of complex internal cavity and thin-walled structure, therefore, it is difficult to prepare the cartridge receiver using traditional monoblock casting method. This research studied the monoblock casting process of cartridge receiver based on 3D printing method and ProCAST numerical simulation. The simulation results show that casting forming ability is better at the pouring temperature of 720 ℃ due to smooth filling and sequential solidification; when the overall solidification is up to 46%, the casting body has been solidified without isolated liquid phase area, thereby shrinkage porosity defects can be effectively avoided. Subsequently, the optimized model was imported into the 3D printing platform to make relevant sand molds for casting cartridge receiver. The examinations of X-ray and dimensional accuracy show that the cartridge receiver casting is complete, without any pores and evident defects, and the dimensional precision meets the requirements of standards. The manufacture cycle of the products is shortened 3/4. It can effectively promote the added value of products for traditional manufacturing, thereby enhancing their competitiveness in the field of high-technology products.

Key words:

3D print sand; simulation; gravity casting; cartridge receiver

（编辑：刘冬梅，ldm@foundryworld.com）