DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.07.019

轴承机匣熔模精铸过程模拟

胡　玥[1],雷四雄[1],胡　兵[1],周　坚[1],芦　刚[2]

(1. 中国航发南方工业有限公司，湖南 株洲 412002; 2. 南昌航空大学 轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室,江西 南昌 330063)

摘　要:对轴承机匣铸件进行熔模铸造工艺方案设计,并采用 Procast 数值模拟软件模拟了铸件的充型凝固过程,观察了凝固场及金属液流态的变化情况,预测了疏松缩孔缺陷存在的位置。根据模拟结果,提出铸件优化工艺方案。结果表明,优化后的工艺方案,其充型过程金属液流态平稳,合理的放置冒口及控制冒口尺寸可增大有效补缩距离,减少缺陷,并通过模拟与试验的论证,获取高质量铸件。

关键词:轴承机匣铸件;数值模拟;充型凝固;疏松缩孔

中图分类号:TG269　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2020)07-0672-05

Simulation of Investment Casting Process for Bearing Housing Casting

HU Yue[1], LEI Sixiong[1], HU Bing[1] , ZHOU Jian[1], LU Gang[2]

(1. AECC South Industry Co., Ltd., Zhuzhou 412002, China; 2. National Defense Key Discipline Laboratory of Light Alloy Processing Science and Technology, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: The investment casting process of bearing casing was designed, and the mold filling and solidification process of castings was simulated by Procast numerical simulation software, the solidification field and the change of metal liquid flow state were observed, and the location of porosity and shrinkage defects was predicted. According to the simulation results, the optimized casting process scheme was proposed. The results show that the optimized process scheme has a stable flow state of the molten metal in the mold filling process, reasonable placement of the riser and control of the riser size can increase the effective filling distance and reduce defects, and high quality castings can be obtained through simulation and test.

Key words: bearing casing; numerical simulation; filling and solidification; shrinkage porosity

某型号的飞机发动机的轴承机匣,或称之为燃烧室内套,其工作时高压及低压涡轮转子的径向载荷完全作用于轴承机匣的后部,一旦轴承机匣零件内部出现疏松缩孔缺陷,缺陷部位出现应力集中而产生显微裂纹,大大降低了零件的综合性能[1]。航空发动机的轴承机匣生产一般通过熔模精铸后机加工成形[2]。但熔模铸造的充型凝固过程较为复杂,其涉及到充型流态、凝固收缩及固态相变等一系列问题。而传统铸造业一般先试验,然后通过分析铸件质量、不断改善工艺方案以获取无缺陷,性能良好的铸件,这样将会增加企业人力、物力的损耗[3,4]。针对上述问题,常采用数值模拟软件对零件进行铸造方案工艺设计,通过数值模拟软件模拟液态金属的充型凝固过程,预测铸造缺陷如疏松、缩孔及热裂等缺陷[5],为铸造工作者对工艺方案的优化设计具有一定的指导意义。

本课题基于 Procast 数值模拟软件,对某企业生产的轴承机匣熔模铸造过程进行分析，旨在为铸件工艺方案的优化及高质量、高性能铸件的制备提供参考。

1　轴承机匣浇注系统设计

轴承机匣铸件见图 1，零件主体外壁及顶部存在大量壁厚不一的凸台,轴承机匣后座较薄,考虑到

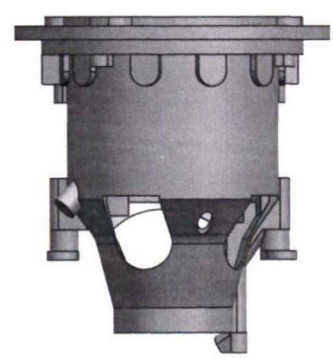


图 1 铸件图
Fig.1 Casting drawing

收稿日期:2020-03-21

作者简介:胡　玥(1987-),女,苗族,贵州铜仁人,学士,工程师.主要从事高温合金精密铸造方面的工作,
电话:073128558516,E-mail:12249974@qq.com

某企业实际生产要求及零件结构的问题，依据熔模铸造浇注系统的设计原则，熔模铸件以小件为主，多数情况下合金的液态和凝固收缩直接靠浇、冒口补缩，浇口和冒口合二为一[6]。因此，采用阶梯式浇注系统，但实际上，充型以顶部侧面的浇口为主，其余内浇道起到补缩作用，见图 2。

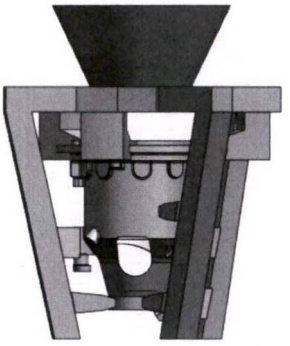


图 2 初始浇注方案
Fig.2 Initial gating design

2 数学模型的建立

2.1 充型过程数学模型

充型过程中金属液的流动遵循流体动力学，并涉及到质量、动量及能量的变化过程。对此建立充型过程的控制方程。

连续性方程[7]：

$$D=\frac{\partial \mu}{\partial x}+\frac{\partial \nu}{\partial y}+\frac{\partial \omega}{\partial z}=0 \tag{1}$$

式中，μ、ν、ω 为速度矢量在 x、y、z 方向的分量；D 为速度的散度。能量守恒方程

$$\rho c\frac{\partial T}{\partial t}+\rho c u\frac{\partial T}{\partial x}+\rho c\nu\frac{\partial T}{\partial y}+\rho c w\frac{\partial T}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right)+S \tag{2}$$

式中，ρ 为流体密度，kg/m^3；t 为时间，s；C 为比热容，J/ (kg·C)；k 为导热系数，W/ (m·K)；T 为温度，℃；S 为粘性耗散相。

动量守恒方程(N-S 方程)

$$\begin{aligned}\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t}+\mu\frac{\partial u}{\partial x}+\nu\frac{\partial u}{\partial y}+\omega\frac{\partial u}{\partial z}\right)&=\frac{\partial P}{\partial x}+\rho g_x+\mu\nabla^2 u\\ \rho\left(\frac{\partial \nu}{\partial t}+\mu\frac{\partial \nu}{\partial x}+\nu\frac{\partial \nu}{\partial y}+\omega\frac{\partial \nu}{\partial z}\right)&=\frac{\partial P}{\partial y}+\rho g_y+\mu\nabla^2\nu\\ \rho\left(\frac{\partial \omega}{\partial t}+\mu\frac{\partial \omega}{\partial x}+\nu\frac{\partial \omega}{\partial y}+\omega\frac{\partial \omega}{\partial z}\right)&=\frac{\partial P}{\partial z}+\rho g_z+\mu\nabla^2\omega\end{aligned} \tag{3}$$

式中，P 为单位密度压力，Pa；μ 为动力粘度。

2.2 凝固过程数学模型

在凝固过程中，铸件与型壳及外部环境之间存在着不稳定的热量传递[8]，如热传导、对流传热及辐射换热等。因此，在不考虑辐射及对流的情况下，建立凝固过程的控制方程：

$$\rho C_p\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda\frac{\partial t}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda\frac{\partial t}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda\frac{\partial t}{\partial z}\right)+Q \tag{4}$$

式中，C_p 为定压比热容，J/ (kg·℃)；λ 为热导率，W/(mK)；Q 为源项。

3 熔模铸造数值过程模拟

3.1 ProCAST 网格剖分

由于该企业生产的轴承机匣零件尺寸较小，某些部位壁厚较薄。因此，在网格划分方面设置面网格单元尺寸为 5 mm，面网格划分完成后对网格进行自动修复，最后生成的面网格数量为 61 863。在面网格成功生成之后，在铸件面网格表面创建一个厚度为 8 mm 的型壳。在铸件及型壳的面网格上进一步划分出体网格，该模型的节点数为 654 048。

3.2 工艺参数及边界条件的设定

3.2.1 铸件及型壳材料的选用

轴承机匣铸件的材料为奥氏体不锈钢，由软件材料库中可以看出该材料的热物性参数，其液相线温度为 1 492 ℃，固相线为温度 1 321 ℃。随着温度场及时间场的推移，奥氏体不锈钢的热物理参数如热导率、密度、比热容及粘度等都将发生变化。根据企业实际生产要求，采用刚玉砂作为型壳材料。

3.2.2 界面换热系数

由于浇注面积小，导致热辐射产生产生的影响微乎其微。因此，以金属液与型壳之间的热传导为主，建立传热数学模型。

$$Q=\mathrm{FLux}+h(T-T_a)+\sigma\varepsilon(T_4-T^4_n) \tag{5}$$

式中，T_a 为环境温度，℃；ε 为材料发射率；h 为对流传热系数，W/(m^2·K)；σ 为 Stefan-Bolzman 常数。故铸件与型壳之间的界面传热系数为 500 W/(m^2·K)，型壳与外界环境的传热方式设置为空冷。

3.2.3 浇注温度及型壳预热温度

根据合金的性能参数及刚玉型壳的特性，设定浇注温度为 1 530 ℃，型壳预热温度为 950 ℃。

3.2.4 浇注速度的确定

浇注速度与冷隔、卷气及疏松缩孔等铸造缺陷密切相关，合理设置浇注速度是获取高质量铸件的关键。浇注速度利用卡尔金公式进行计算。

$$\nu_{充}=0.22\times\frac{\sqrt{b}}{\delta\cdot\ln\frac{t}{180}} \tag{6}$$

式中，b 为铸件高度，cm；$\nu_{充}$ 为金属液的浇注速度，cm/s；δ 为铸件壁厚；t 为浇注温度，℃。通过此公式计算出浇注速度为 35 mm/s。

4 数值模拟结果与分析

4.1 初始方案充型过程数值模拟

初始浇注方案的充型过程模拟，见图 3。在 t=0 s 时金属液开始注入型腔，1.9 s 时金属液在重力作用下流至内浇口，2.9 秒后金属液到达铸件底部，充型时间达到 3.9 s 底部内浇道开始对型腔进行充填，在 8.7 s 时整个轴承机匣铸件充型基本完成。从金属液流动情况来讲，整个浇注系统结构设计较为合理，金属液顺利平稳的充满型腔。

4.2 初始方案凝固过程数值模拟

初始方案凝固过程模拟，见图 4。轴承机匣后座壁厚最小，散热较快，凝固时间短，故在 25 s 时率先发生凝固；在 75 s 时，铸件后座的上部及底部已经开始凝固，铸件后座到顶部形成顺序凝固的凝固过程，铸件底部位置的凝固趋势向内浇道附近靠近，此时型腔内金属液温度处于固液相共存之间，各凸台位置固相分数低于铸件主体部分；当凝固时间达到 135 s 时，铸件整体凝固完成，最后凝固位置分布在内浇道及凸台位置。

4.3 疏松、缩孔缺陷预测

当合金的液态体积收缩和凝固收缩大于固态体积收缩时，合金的内部将会产生疏松缩孔[9]。初始浇注方案的疏松缩孔缺陷预测分布，见图 5。铸件主体的顶部及中部凸台处存在缩松缩孔缺陷。原因是顶部内浇道开设在铸件顶部的侧面，不利于垂直补缩即无法对凸台起到良好的补缩效果，因而易产生缩孔疏松缺陷，中部凸台处的缺陷的产生亦是如此。针对此问题，需要对浇注系统进行优化改进。

5 铸造工艺方案优化

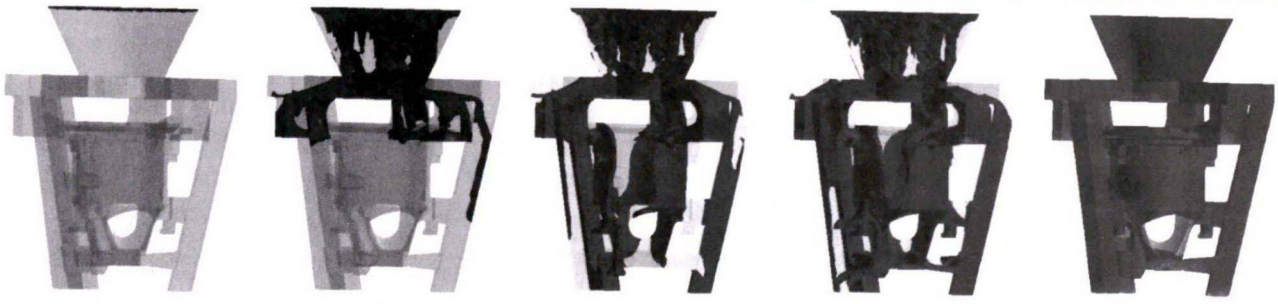
5.1 第一次浇注方案优化

初始浇注方案采用阶梯式浇注系统，此方案的上中下浇口都可当作冒口进行补缩，从而减少缩松缩孔的数量。由于企业生产时型壳需预热至 950 ℃，无法安置冷铁来消除缩松缺陷。因此，改进方案依旧采用阶梯式浇注系统，但将顶部侧面内浇口直接垂直于顶部凸台放置，并引入一个浇道在铸件中部凸台以增强补缩效果，故铸件外表面产生缺陷的凸台全部使用内浇口将其连接，意在降低铸件疏松缩孔的发生率，见图 6。

5.1.1 一次优化后数值过程模拟

图 7 为一次优化后的充型过程模拟。从图 7 可以看出，优化方案的充型过程与初始方案基本一致，在整个浇注过程中金属液充型顺利且平稳充满型腔，无明显卷气或紊流现象产生，该优化方案浇注系统设计合理。

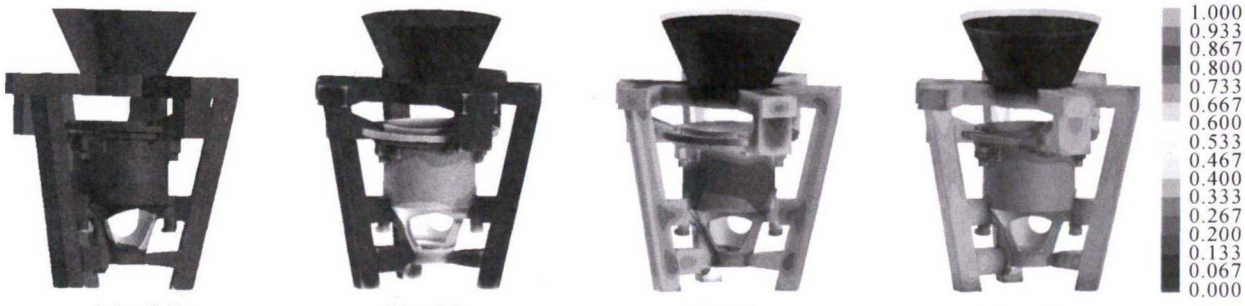
图 8 为一次优化方案凝固过程模拟。从图 8 看出，方案一次优化后凝固顺序及最后凝固位置与初始方案相比未发生明显改变，均在内浇道连接凸台处最后凝固。对浇注系统第一次改进后疏松缩孔缺陷预测发现，铸件内部仍然有两处位置存在疏松缩



(a)t=0 s　(b)t=1.9 s　(c)t=2.9 s　(d)t=3.9 s　(e)t=8.7 s

图 3 铸件充型过程模拟

Fig.3 Simulation of mold filling process for the casting



(a)t=8.7 s　(b)t=25 s　(c)t=75 s　(d)t=135 s

图 4 铸件凝固过程模拟

Fig.4 Simulation of casting solidification process

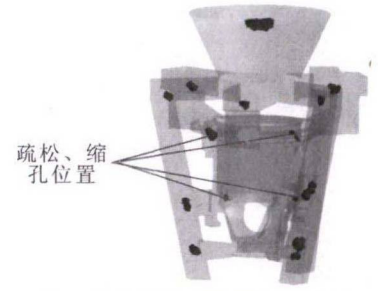


图 5 铸件疏松缩孔预测分布图

Fig.5 Predicted shrinkage porosity distribution in the casting

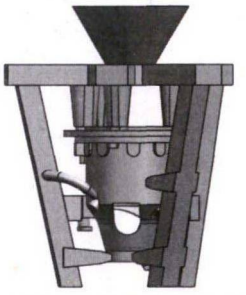
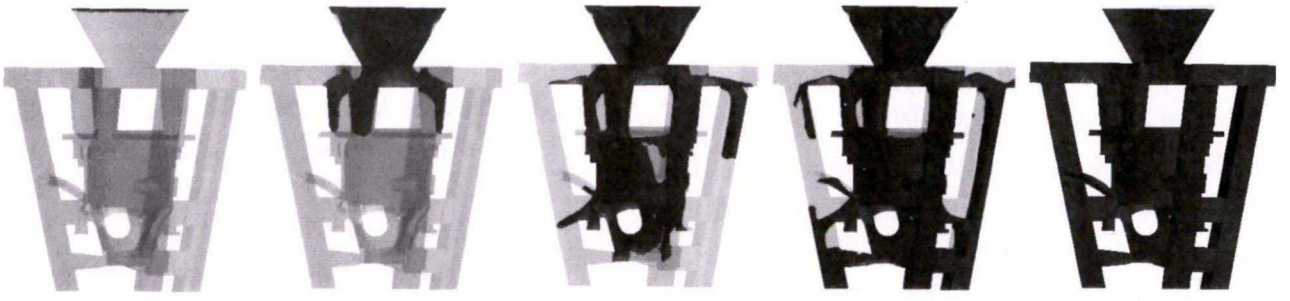


图 6 第一次优化方案示意图

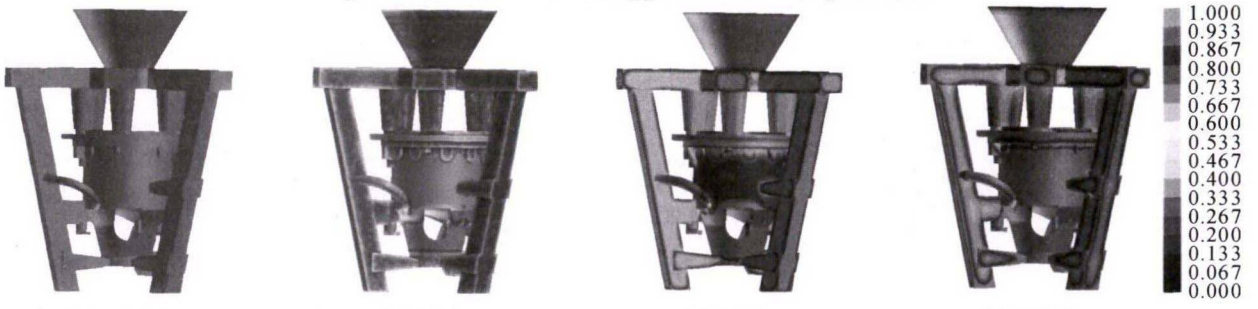
Fig.6 Schematic diagram of the first optimization scheme



(a)t=0 s　(b)t=1.8 s　(c)t=3.1 s　(d)t=4.6 s　(e)t=8.9 s

图 7 一次优化后充型过程模拟

Fig.7 Simulation of mold filling process after first optimization



(a)t=8.9 s　(b)t=32 s　(c)t=70 s　(d)t=140 s

图 8 一次优化后凝固过程模拟

Fig.8 Simulation of solidification process after first optimization

孔缺陷，见图 9。对缺陷位置进行切片分析，见图 10。1# 疏松缩孔虽然有浇(冒)口进行补缩，但冒口颈部截面积较小，未形成补缩所需的温度梯度且凸台存在液相区时冒口颈部已经凝固，封锁了补缩通道，无法产生有效的补缩；2# 疏松缩孔的产生是由于该处壁厚较大，凝固时间较长，临近浇冒口有效补缩距离不足从而产生疏松缺陷。根据一次优化方案疏松缩孔产生的原理，仍需对现有方案进行方案改进。

5.2　第二次浇注方案优化

为了进一步减少孤立液相区的存在，避免铸件内部出现疏松缩孔缺陷。因此，将产生 1# 缺陷位置的内浇道移除，同时内浇道尺寸加大以加强浇冒口有效补缩距离，见图 11。

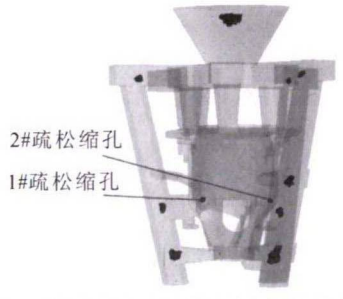
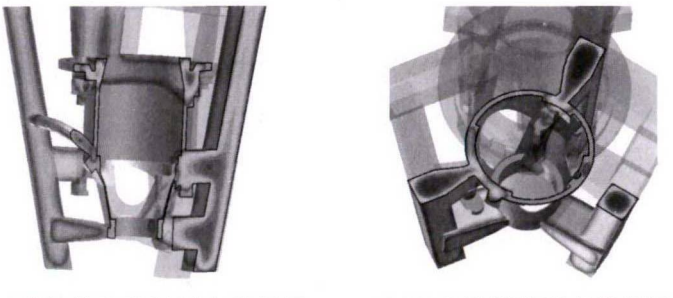


图 9 一次优化方案疏松缩孔预测分布图

Fig.9 Predicted Shrinkage cavity and shrinkage porosity distribution after first optimization



(a)1#疏松缩孔位置孤立液相区　(b)2#疏松缩孔孤立液相区

图 10 一次方案疏松缩孔位置切片示意图

Fig.10 Schematic locations of shrinkage cavity and shrinkage porosity distribution in different sections for the first design

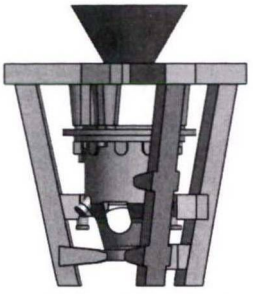


图 11 第二次优化方案示意图

Fig.11 Schematic diagram of the second optimization scheme

由于此优化方案将顶部内浇道尺寸不变，中部内浇口尺寸加大，顶部内浇道主要起到填充型腔的作用，而其余内浇道更多是为铸件提供补缩作用。因此，该优化方案的充型凝固过程基本与第一次优化方案无异，只通过优化方案疏松缩孔缺陷预测结果对铸件进行分析，见图 12。结果发现，铸件的疏松缩孔缺陷基本分布在浇冒系统中，而铸件主体结构则无明显缺陷出现，说明该方案的浇冒系统设计完全合理。

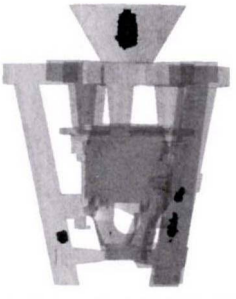


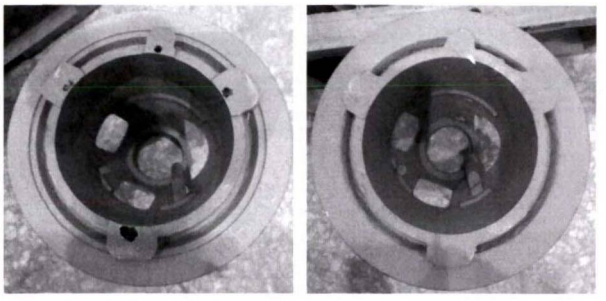
图 12 二次优化方案疏松缩孔预测分布图

Fig.12 Predicted shrinkage cavity and shrinkage porosity distribution after second optimization

通过对实际生产浇注出来的铸件进行对比，见图 13。发现铸件优化后表面无外露缺陷，对其进行 X 光无损检测，也发现无明显的疏松缩孔缺陷，铸件成型完整，无冷隔及浇不足等，满足企业生产要求及使用要求。

6 结论

(1)根据铸件的结构特点及熔模铸造的设计原则，并结合 ProCAST 数值模拟分析，合理的设计并优化了轴承机匣铸件的工艺方案。数值模拟结果表明，优化后的铸造工艺方案充型过程平稳，无明显疏松缩孔缺陷出现。



(a)优化前铸件图　(b)优化后铸件图

图 13 工艺优化前后铸件示意图

Fig.13 Casting schematic diagram before and after process optimization

(2)依据数值模拟轴承机匣铸件的充型凝固场及疏松缩孔预测分析，发现合理安放浇冒口位置及设计浇冒口尺寸可以有效降低铸件疏松缩孔的发生率。

参考文献：

[1] 张本斌. 某型航空发动机轴承机匣使用变形问题分析 [J]. 装备制造技术, 2006(3): 92-93.

[2] 陈光. 航空燃气涡轮发动机结构设计[M]. 北京：北京航空学院出版社,1988.

[3] 曹岩，张浩，石亚茹，等. 基于 ProCAST 的薄壁叶片熔模精铸过程模拟[J]. 特种铸造及有色合金, 2018,38(11):1226-1229.

[4] 徐桂洪，彭飞飞. 基于 Anycasting 的发动机缸体砂型铸数值模拟[J]. 热加工工艺, 2011, 40(23):59-61.

[5] 柳百成，荆涛. 铸造工程的模拟仿真与质量控制[M]. 北京：机械工业出版社, 2002.

[6] 车顺强. 熔模精密铸造实践[M]. 北京：化学工业出版社,2015.

[7] 孟昭昕，黄勇，李鑫. 基于 ProCAST 的阀体压铸数值模拟及工艺优化[J]. 沈阳理工大学学报, 2017, 36(5):79-83.

[8] 孙彪，夏元吉. 基于 ProCAST 砂型铸造铜钟的工艺优化[J]. 特种铸造及有色合金, 2014, 34(2):187-190.

[9] 李新亚. 铸造手册第五卷铸造工艺[M]. 北京：机械工业出版社, 2011.

《铸件均衡凝固技术及应用实例》

《铸件均衡凝固技术及应用实例》由西安理工大学魏兵教授编著。共 8 章：1、铸铁件均衡凝固与有限补缩；2、铸铁件冒口补缩设计及应用；3、压边浇冒口系统；4、浇注系统大孔出流理论与设计；5、铸件均衡凝固工艺；6、铸钢、白口铸铁、铝、铜合金铸件的均衡凝固工艺；7、浇注系统当冒口补缩设计方法；8、铸件填充与补缩工艺定量设计实例。全书 320 页，特快专递邮购价 226 元。

邮购咨询：李巧凤 029-83222071，技术咨询：13609155628