● 工艺技术 Technology ●
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.10.005

某机床主轴箱铸造工艺数值模拟及优化

刘 栋,芦 刚,严青松,黄朋朋,黄普英
(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:通过分析某型机床主轴箱零件结构特点,初步确定其砂型铸造工艺方案,利用 ProCAST 软件对该主轴箱铸造工艺方案进行数值模拟。经过温度场、凝固过程和缩松缩孔缺陷等分析,并合理设置冒口和冷铁等优化措施,确定出主轴箱铸件最佳铸造工艺方案。结果表明:采用 1:1.4:1.2($A_{内}$:$A_{横}$:$A_{直}$)中注缓流式浇注系统,浇注温度 1 370 ℃,浇注速度为 5.7 kg/s 时,主轴箱铸件的充型及凝固过程合理,并有效避免缩松缩孔缺陷的产生。

关键词:机床主轴箱;砂型铸造;ProCAST 数值模拟;工艺优化

中图分类号:TG251 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2020)10-0916-05

Numerical Simulation and Optimization of the Casting Process of a Machine Tool Spindle Box

LIU Dong, LU Gang, YAN Qingsong, HUANG Pengpeng, HUANG Puying
(National Defence Key Discipline Laboratory of Light Alloy Processing Science and Technology Institute, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: Based on the analysis of the structural characteristics of the spindle box parts of a certain machine tool, the sand mold casting process scheme was preliminarily determined, and the casting process scheme of the spindle box was numerically simulated by ProCAST software. Through the analysis of temperature field, solidification process and shrinkage cavity and porosity, and the optimization measures such as reasonable setting riser and chill, the optimum casting process scheme of spindle box casting was determined. The results show that the filling and solidification process of spindle box castings is reasonable and the defects of shrinkage cavity and porosity are effectively avoided when the medium enlarge runner system is used 1:1.4:1.2 (Aingate:Aruuner:A sprue), the pouring temperature is 1 370 ℃ and the pouring speed is 5.7 kg/s.

Key words: machine tool spindle box; sand casting; ProCAST numerical simulation; process optimization

主轴箱作为现代工业主要装备机床的重要部件之一,其铸件精度及性能的优良直接决定着机床工作的稳定性和加工精度,尤其对于高速机床,其主轴箱等部件必须有尽可能高的刚度、强度及吸振性[1]。然而,由于材料(优/缺)性能遗传性行为,以及组织决定性能的特点,通过现代计算机数值模拟技术,来优化和调控材料成形过程,已经得到了广泛应用。徐贵强等人[2]采用 ProCAST 软件对薄壁类汽车熔模铸件的凝固过程进行了模拟,经增加工艺补缩通道,提高了铸件的内在品质,降低铸件的试制成本。郑瑞等人[3]等人运用 ProCAST 对 ZL101 航空壳体铸件铸造工艺进行模拟优化,准确地预测了缺陷分布,实际生产中提高了铸件质量并降低了生产成本。刘艺等人[4]使用 ProCAST 对上倾倒框铸造工艺的模拟优化,最终获得了满足铸件使用要求的铸造方案。R. Kumar 等人[5]利用 ProCAST 对旋转适配器零件不同浇注系统的模拟对比,使得铸件缺陷最小化。

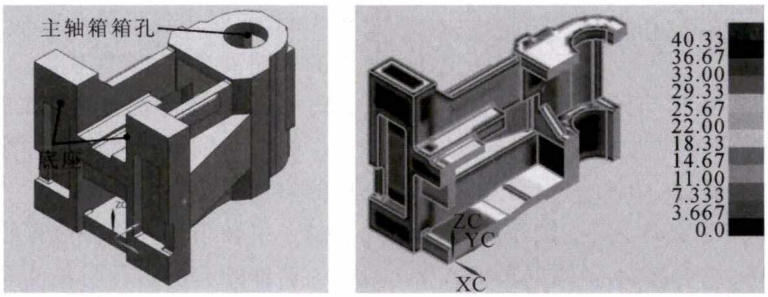
本文主要应用 ESI 集团 ProCAST 数值模拟软件对某型机床主轴箱铸件铸造工艺方案的充型、凝固过程及温度场、流场等进行模拟。并通过合理设置冒口和冷铁对方案进行了优化,确定出主轴箱铸件最佳铸造工艺方案,对于该型机床主轴箱铸件后续铸造工艺设计及实际生产具有指导意义。

1 主轴箱件结构分析与铸造方案设计

1.1 零件结构分析

机床主轴箱铸件三维模型如图 1,材料牌号 HT300,其化学成分见表 1,外形轮廓尺寸为 360mm×344 mm×468 mm,主轴箱铸件不允许出现气孔、夹杂、裂纹、砂眼的铸造缺陷。整体上主轴箱件左右对称,主体壁厚为 22 mm,最大壁厚主要分布在主轴箱箱孔及底座处如图 1(b),其中底座与箱孔中间部分

收稿日期:2020-06-17
作者简介:刘 栋(1994-),甘肃天水人,硕士研究生.研究方向:液态金属精密成形.电话:15682811301,
E-mail:1064924104@qq.com



(a)主轴箱零件模型　　(b)壁厚分析示意图

图 1 机床主轴箱

Fig.1 Machine tool spindle box

表1 灰铸铁HT300化学成分 w(%)

Tab.1 Chemical composition of gray cast iron HT300 (%)

C	Mn	Si	Cr	Mo	Cu	S	P	Fe
3.10	0.75	1.32	0.10	0.15	0.07	0.03	0.03	其余

是加强筋板起支撑作用，主轴箱箱孔处形位公差要求较高，是主要的承载部位。

1.2　铸造方案设计与模拟参数确定

综合考虑主轴箱结构特点、尺寸及形位公差要求，结合铸造工艺设计过程中所遵循的相关原则，正确的浇注位置应该能保证获得健全的铸件，并使造型、制芯和清理方便[6]。主轴箱铸件的浇注位置及分型面设置如图 2 所示。

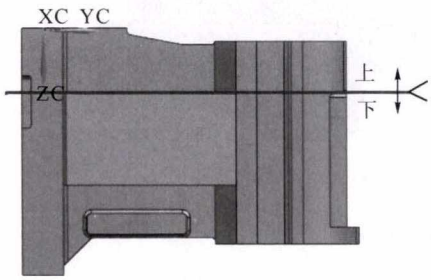


图 2 主轴箱分型面

Fig.2 Spindle box parting line

主轴箱铸件本体重量 95 kg，根据铸造手册[6]浇注重量 G_L 按 1.5~2.0 倍的铸件重量估算为 140 kg，浇注时间为 20 s，选择浇道截面比为 $\Sigma A_{内}:\Sigma A_{横}:\Sigma A_{直}$=1:1.4:1.2 的中注缓流式浇注系统。内浇道最小控流截面积根据阻流截面法计算得 $\Sigma A_{内}$=10.08 cm²，结合浇道截面比取 $\Sigma A_{横}$=15.12 cm²，$\Sigma A_{直}$=12.96 cm²。为合理分配金属液进入型腔，设置 6 个内浇道(1.8 cm²/个)、2 个横浇道 (7.5 cm²/ 个)、1 个直浇道，主轴箱初始浇注系统方案如图 3，浇注温度 1 370±10 ℃，浇注时间 20 s，铸件与砂型间换热系数 500 W/m²·K，铸件与冷铁间换热系数为 3000 W/m²·K。

铸造过程数值模拟是基于质量守恒、动量守恒、能量守恒三大定律以及有限元思想进行的，所以铸件的数值模拟过程可以利用连续性方程(1)、动量方程(2)、体积函数方程(3)以及能量守恒方程

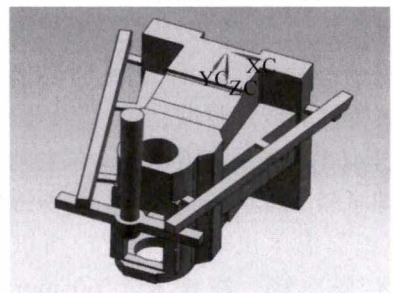


图 3 主轴箱初始浇注系统方案

Fig.3 The initial pouring system scheme of the spindle box

(4)来描述[7]。

$$\left.\begin{aligned}&\frac{\partial\rho}{\partial t}+\nabla(\rho c)=0\\&\nabla=i\frac{\partial}{\partial x}+\mathrm{j}\frac{\partial}{\partial y}+k\frac{\partial}{\partial z}\\&\frac{\partial\rho}{\partial t}+\frac{\partial(\rho U)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho V)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho W)}{\partial z}=0\end{aligned}\right\}\tag{1}$$

其中，ρ 是流体密度；υ 是流体速度；其中 x,y,z 方向的分量分别为 U、V、W；t 是时间；∇ 是矢量微分算子。

$$\left.\begin{aligned}&\rho\frac{D\nu}{Dt}=-\nabla P-\nabla T+\rho G\\&\rho\frac{D\nu}{Dt}=\frac{\partial}{\partial t}+u\frac{\partial}{\partial x}+\nu\frac{\partial}{\partial y}+w\frac{\partial}{\partial z}\end{aligned}\right\}\tag{2}$$

式中，G 是重力；T 是应力张量；D 是偏微分算子。

$$\frac{\partial F}{\partial t}+u\frac{\partial F}{\partial x}+\nu\frac{\partial F}{\partial y}+w\frac{\partial F}{\partial z}=0\tag{3}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t}+u\frac{\partial T}{\partial x}+\nu\frac{\partial T}{\partial y}+w\frac{\partial T}{\partial z}=\alpha\left(\frac{\partial^2T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2T}{\partial z^2}\right)\tag{4}$$

式中，T 是流体温度；是 C_p 流体等压比热容；λ 是流体导热系数；α 是流体热扩散系数，$\alpha=\lambda/\rho C_p$。

同时在铸件的凝固传热过程中，释放的潜热以及温度梯度较小可忽略不计，所以铸件凝固过程中温度、时间和空间的数学模型关系可以傅里叶导热偏微分方程(5)来表示，其中 Q 表示在铸件两相转变过程中，单位时间内单位体积所释放出来的结晶潜热。

$$\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{\partial\lambda}{\rho c}\left(\frac{\partial^2T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2T}{\partial z^2}\right)-\frac{Q}{\rho c}\tag{5}$$

2 主轴箱件数值模拟结果与分析

2.1 主轴箱初始铸造方案模拟与分析

根据图 3 所示主轴箱铸造方案对其进行初步模拟，模拟结果如图 4 所示，从图 4(a)中可以看出主轴箱铸件的温度场整体分布均匀，主轴箱箱孔厚壁处温度较周围区域高，结合图 4 凝固时间(b)及固相分数(c)，显然，厚壁处最后凝固。虽然 HT300 材料在凝固过程中会发生石墨化膨胀，实现自膨胀补缩效果，但根据初步模拟结果可以推测，在主轴箱铸件壁厚处凝固时，所发生的石墨化膨胀并不能完全抵消凝固时的体积收缩，因此需要设置补缩系统补给灰铁铸件的液态收缩。

结合图 4(d)疏松孔隙率结果，在主轴箱孔尺寸较厚处出现了较大缩孔，同时为了改善铸件的温度场，防止厚壁高温区出现较大热节，所以在厚壁高温处设置石墨冷铁，冷铁大小 60 mm×50 mm×10 mm，同时为保证液态收缩过程中，铸件顶部有足够的补缩液量，在铸件顶部设置圆台形暗压边冒口。

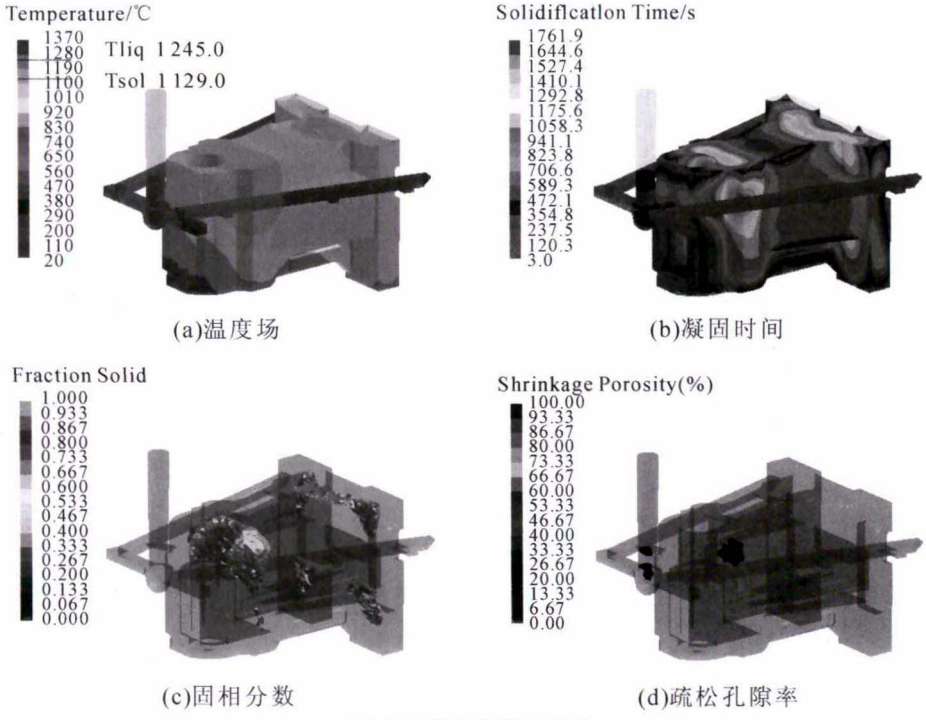
2.2 主轴箱铸件优化铸造工艺方案模拟与分析

根据主轴箱铸件初始方案模拟结果分析，优化后的浇注工艺方案如图 5。

2.2.1 主轴箱铸件充型过程模拟

铸件的充型过程与浇注系统密切相关，合理的浇注系统能够保证金属液平稳地充满型腔，否则会因为速度太快而产生喷射，进而导致冲砂，产生二次夹杂及铁豆，最终致使铸型型壁破损出现多肉现象，若金属液充型流量过小，易导致浇不足冷隔等缺陷[7]。在此，选取主轴箱铸件重要的充型时刻以期能够动态的观测 ProCAST 模拟主轴箱铸件的充型过程。

充型过程如图 6 所示，可以看出采用中注缓流式浇注系统，对于下砂箱铸件具有顶注式浇注系统优点，同时由于横浇道截面积最大，金属铁液经过内浇道迅速充满下铸型部分如图 6 (d)，充型时间



(a)温度场　(b)凝固时间

(c)固相分数　(d)疏松孔隙率

图 4 初始方案模拟结果

Fig.4 Simulation results of the initial scheme

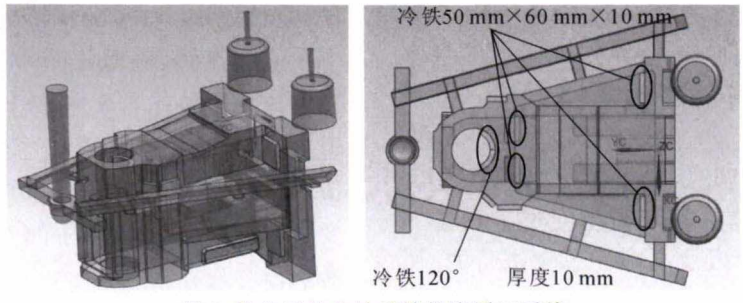


图 5 优化后的主轴箱铸件浇冒口系统

Fig.5 Optimized pouring and risering system of the Spindle box

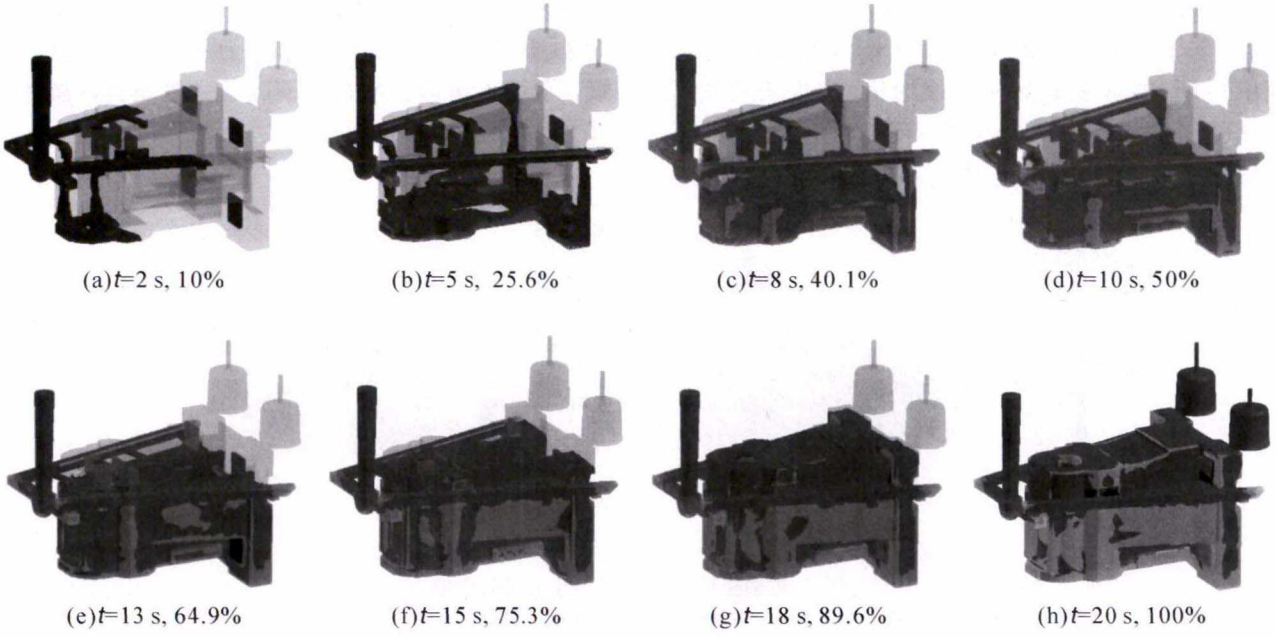


图 6 主轴箱铸件充型过程模拟

Fig.6 Simulation of the filling process of the spindle box casting

t=10 s 时，基本完成了下铸型型腔的填充，充填率达到 50%。从图 6(e)可知对于分型面以上型腔，相当于底注式浇注系统，充型相对下型腔更为平稳，利于排气和浮渣。

2.2.2 主轴箱铸件凝固过程模拟

铸造工艺设计及优化的关键在于通过设置合理浇冒系统并配合冷铁控制铸件温度场进而控制铸件的凝固过程及凝固顺序，因此凝固过程的分析是主轴箱铸件凝固模拟的关键所在。通过 ProCAST 模拟主轴箱铸件的凝固过程，可以较为直观地显示铸件热节部位、凝固过程中的温度场和孤立液相区位置，进而为铸造工艺方案的设计改进提供可行的依据。

为此，对主轴箱铸件凝固模拟结果图 7 进行分析，显然当 t=97 s 时，固相分数达到 15.4%，此时 6 个内浇道完全凝固，为后续铸件凝固过程中石墨化膨胀做好准备，防止膨胀过程中反向充填浇道。同时主轴箱铸件从 t=20 s 开始到图 7(c)t=216 s，铸件顶部的孤立液相区和冒口内金属液相通，可见冒口对铸件顶部的液态收缩有一定的补缩能力，当凝固时间 t=296 s 时，铸件顶部液相区被逐渐孤立起来，到 t=596 s 时，冒口补缩铸件顶部通道完全断开。从模

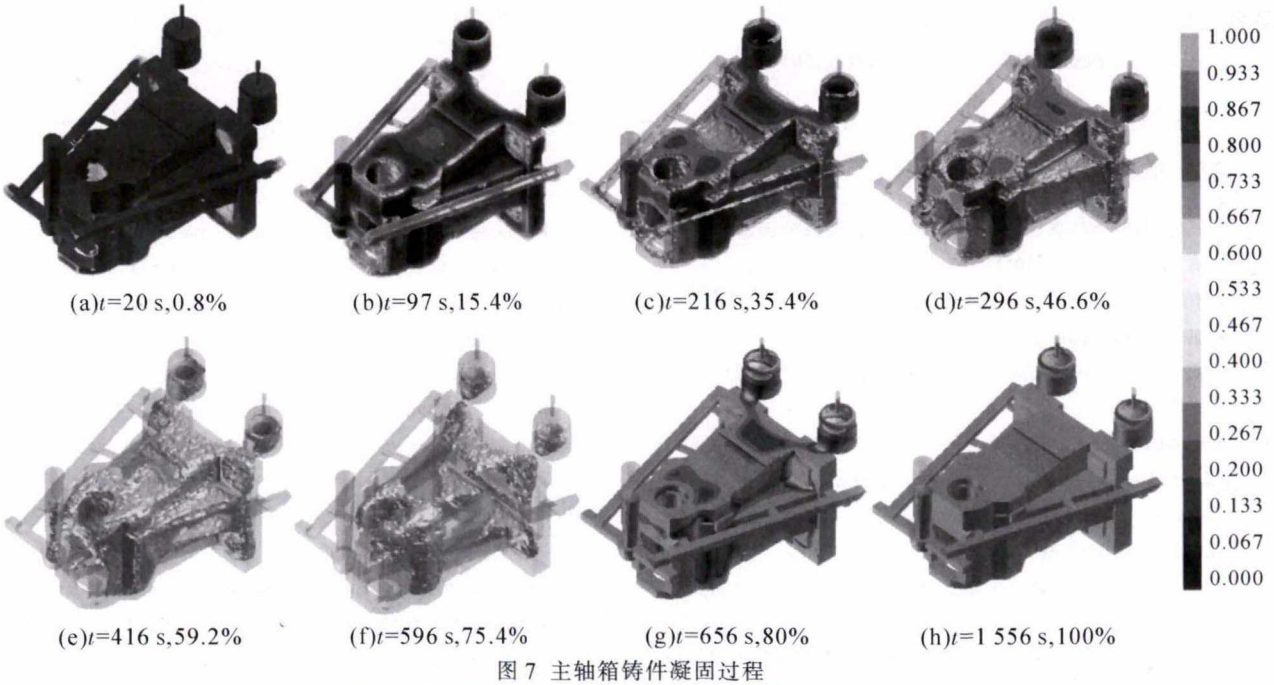
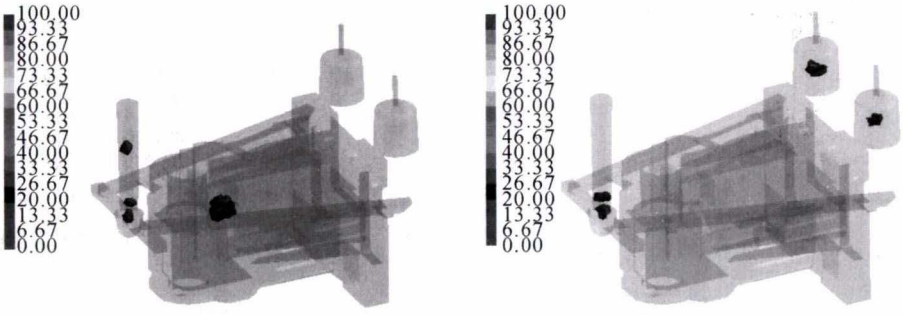


图 7 主轴箱铸件凝固过程

Fig.7 The solidification process of the spindle box casting

拟结果看出，对于 HT300 主轴箱铸件所设置的冒口，实现了液态收缩的金属液补充功用，同时在凝固中后期，能够及时封闭补缩通道，实现灰铸铁石墨化膨胀自补缩功用。经过不同冷铁方案的优化，如图 8(a)所示，由于 1# 位置是最后凝固的部位，HT300 凝固过程中的石墨化膨胀并未完全补缩体积收缩，出现了较大的缩孔缺陷，为此，在 1# 位置处增设冷铁进行激冷，当最终消除了主轴箱铸件疏松缩孔缺陷，模拟结果见图 8(b)。



(a)无外冷铁　　(b)缺陷处加外冷铁

图 8 主轴箱铸件缩松缩孔及消除的模拟

Fig.8 Simulation of shrinkage porosity and shrinkage hole and elimination of spindle box casting

3 结论

(1)经过对某型机床主轴箱铸件结构特点的分析，确定了 $\Sigma A_{内}:\Sigma A_{横}:\Sigma A_{直}=1:1.4:1.2$ 的中注缓流式浇注系统，浇注温度 1370 ℃，浇注速度为 5.7 kg/s，主轴箱铸件与砂箱换热系数为 500 W/m²·K，铸件与冷铁间换热为 3 000 W/m²·K。

(2)通过对 ProCAST 铸件成形过程数值模拟结果分析，经过合理设置冷铁和圆台形暗压边冒口，能够使得主轴箱铸件的充型及凝固过程合理，并有效避免缩松缩孔的缺陷产生，对于该型机床主轴箱铸件的实际生产具有指导性意义。

参考文献：

[1] 卜昆. 计算机辅助制造[M]. 北京：科学出版社，2014.

[2] 徐贵强，郑蕊，包学春，等. 薄壁汽车零部件精铸工艺设计[J]. 特种铸造及有色合金，2019，39(11):1229-1231.

[3] 郑端，师素粉，任朋立. 基于 ProCAST 软件的 ZL101 航空壳体铸件的工艺研究[J]. 热加工工艺，2014，43(13):90-91，98.

[4] 刘艺，王华. 基于 Procast 的上倾倒框铸造工艺设计优化[J]. 热加工工艺，2019，48(15):72-77.

[5] Kumar R, Madhu S. Casting design and simulation of gating system in rotary adaptor using procast software for defect minimization,Materials To day: Proceedings,Volume 22, Part 3,2020: 799-805.

[6] 铸造手册第 5 卷，中国机械工程学会铸造分会编，铸造工艺[M]. 北京:机械工业出版社，2014.

[7] 王荣，隋欣梦，魏德强，等. 基于 ProCAST 的龙门加工中心滑枕铸件的数值模拟分析[J]. 铸造技术，2016，37(9):2017-2020.

(上接第 909 页)

[2] 罗子艺. 薄壁零件选区激光熔化制造工艺及影响因素研究[D]. 广州：华南理工大学，2011.

[3] 张冬云，曹扬，李丛洋. SLM 制造金属微小结构件可行性研究[J]. 电加工与模具，2016(3):0042-05.

[4] 王黎. 选择性激光熔化成形金属零件性能研究[D]. 武汉：华中科技大学，2012.

[5] Ali Gökhan Demir& Paolo Colombo& Barbara Previtali .From pulsed to continuous wave emission in SLM with contemporary fiber laser sources: effect of temporal and spatial pulse overlap in part quality[J] Int J Adv Manuf Technol，2017(10).

[6] 张俊. 选择性激光熔融脉冲加工工艺参数的研究[D]. 合肥：合肥工业大学，2019.

[7] 徐红祥. 选择性激光熔融成型层温度特性的研究[D]. 合肥：合肥工业大学，2018.

[8] Leonardo Caprio*, Ali Gökhan Demir, Barbara Previtali.Influence of pulsed and continuous wave emission on melting efficiency in selective laser melting [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 11. 019.

[9] Yali Li, Dongdong Gu. Thermal behavior during selective laser melting of commercially pure titanium powder: Numerical simulation and experimental study [J].Additive Manufacturing, 2014, (1): 99-109.

[10] 段声勤，刘婷婷，廖文和，等. 悬垂圆孔激光选区熔化成形质量研究[J]. 中国激光 2018(4):40.

[11] Giovanni Strano*, Liang Hao, Richard M. Everson, Kenneth E. Evans. Surface roughness analysis, modelling and prediction in selective laser melting[J]. Journal of Materials Processing Technology 213 (2013) 589-597.