

doi: 10.3969/j.issn.2095-0411.2023.02.001

梯度石墨铸铁玻璃模具液态模锻模拟与仿真

邢书明¹, 王卓群¹, 吴毅², 张胜德²

(1. 北京交通大学 机械与电子控制工程学院, 北京 100044; 2. 河北安迪模具有限公司, 河北 沧州 061100)

摘要: 为解决传统砂型铸铁玻璃模具铸件工艺出品率低、缩孔缩松等问题, 采用液态模锻工艺成型, 通过不同的冷却条件实现铸件石墨形态呈梯度分布。利用 Procast 对液态模锻过程的温度场和凝固场模拟, 对缩孔缩松缺陷进行了预测, 对浇注温度、冷却方式、浇口尺寸等关键工艺参数进行了调整优化, 并根据热分析观点对铸件不同部位组织进行预测。结果表明, 液态模锻可以有效减少缩孔缩松等铸造缺陷。

关键词: 玻璃模具; 蠕墨铸铁; 液态模锻; 数值模拟

中图分类号: TG 316.3

文献标志码: A

文章编号: 2095-0411(2023)02-0001-09

Squeeze casting simulation of gradient graphite cast iron glass mold based on procast

XING Shuming¹, WANG Zhuoqun¹, WU Yi², ZHANG Shengde²

(1. School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Hebei Andy Mould Co., Ltd., Cangzhou 061100, China)

Abstract: In order to solve the problems of low yield and easy shrinkage cavity and porosity in the traditional sand casting process of cast iron glass mold, the liquid die forging process was adopted, and the graphite shape of the casting was distributed in gradient by different cooling conditions. The temperature field and solidification field of liquid die forging process were simulated by Procast, shrinkage cavity and porosity defects were predicted, and the key process parameters such as pouring temperature, cooling mode and gate size were adjusted and optimized, and the microstructure of different parts of the casting was predicted according to the view of thermal analysis. The results show that liquid die forging can effectively reduce shrinkage defects.

Key words: glass mold; vermicular graphite cast iron; squeeze casting; numerical modeling

收稿日期: 2022-10-09。

作者简介: 邢书明(1962—), 男, 河北平山人, 博士, 教授, E-mail: smxing@bjtu.edu.cn。共同第一作者: 王卓群(1999—), 男, 山西大同人, 硕士生。

引用本文: 邢书明, 王卓群, 吴毅, 等. 梯度石墨铸铁玻璃模具液态模锻模拟与仿真[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2023, 35(2): 1-9.

玻璃模具^[1-4]是玻璃制品生产过程中最重要的部件，模具质量直接影响到玻璃产品的质量，同时也直接关系到玻璃制品的生产效益，因此对于玻璃模具铸件的质量有较高的要求。传统的砂型铸造工艺出品率较低，且容易产生缩孔缩松等铸造缺陷。铸铁模具中的石墨形态会对模具的性能产生较大的影响，STEFANESCU 等^[5]提出铸铁冷却过程的速度会严重影响石墨组织形态，随着冷却速度的降低，石墨形态会由球状石墨转变为蠕虫状石墨，最后变为片状石墨。徐倩等^[6]通过定量取样杯对铸铁的热分析特征值和热分析整体曲线进行分析，获得了其与石墨形态之间的关系，并且给出了不同石墨形态铸铁的热分析曲线特征值范围，以预测和判断材料的石墨组织形态。液态模锻^[7]作为一种先进的金属成型技术，可以有效减少铸件产生缩孔缩松，同时获得的铸件组织致密、尺寸精良，因此为弥补传统单一石墨形态的铸铁难以满足玻璃模具的工作要求，文章设计了液态模锻玻璃模具铸件的工艺方案，并通过设计梯度冷却条件，使铸件具有梯度石墨组织，通过 Procast 模拟工艺方案对初步的工艺方案进行优化，通过温度曲线分析预测，有效减少铸造缺陷，缩短生产周期，降低成本，为生产和实验提供合理的工艺参数。

1 铸件结构和技术要求

利用 UGNX 对玻璃瓶模具铸件进行建模，铸件的长×宽×高为 285 mm×121 mm×86 mm，铸件的三维建模如图 1 所示。铸件整体形状为半圆柱结构，底面为玻璃瓶的轮廓形状，外表面为圆弧状，玻璃瓶的变径形状导致铸件的整体壁厚不均，其中铸件中段凸台处壁厚最大，约 65 mm，其余壁厚均为 40 mm 左右。最大壁厚处位于铸件中间位置，容易产生热节，从而导致缩孔缩松等缺陷。

铸件成型后需要加入冷却水道等通孔结构，为避免在加工过程中缩孔缩松，导致铸件受力不均而产生损坏，要尽量避免铸造缺陷的产生。

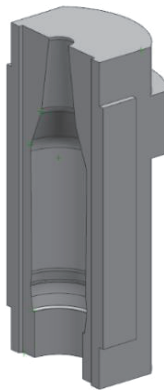


图 1 铸件三维建模

Fig.1 3D modeling of casting

2 液锻工艺方案及模具设计

考虑到铸件的模具制造和脱模等因素，将铸件水平放置，分型面设置在玻璃瓶轮廓部位，如图 2 所示。采用一模六腔方案，考虑到如果内浇口开设在铸件圆弧处可能会在去除浇道过程中影响铸件外形，因此将内浇口开设在铸件端面，采用梯形截面浇道，截面上底×下底×高为 40 mm×45 mm×20 mm。

铸铁石墨形态的研究表明，铸铁的石墨形态很大程度受到冷却速度的影响，在冷却速度较慢的情况下较容易获得片状石墨铸铁，在冷却速度较大的情况下则比较容易获得球状石墨铸铁。因此，为了使铸件最终可以获得石墨形态且呈梯度变化，设计工艺方案 1，模具设计采用球墨铸铁材料 QT500，且上下模采用不同的预热温度、不同的冷却速率来创造铸件不同部位的冷却速度差异，工艺方案 1 如图 3 所示，具体液态模锻工艺参数见表 1。

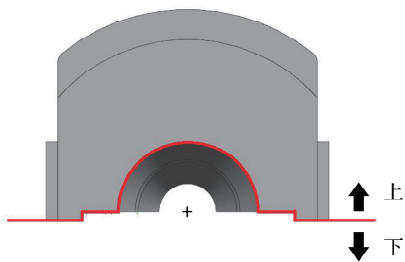


图 2 分型面设置
Fig.2 Setting of parting face of the casting

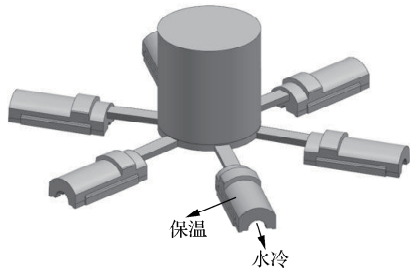


图 3 工艺方案 1
Fig.3 Processing plan 1

表 1 液态模锻工艺参数
Table 1 Technical parameters of squeeze casting

参数	浇注温度/℃	上模温度/℃	下模温度/℃	比压/MPa	保压时间/s	压射速度/(m·s ⁻¹)
数值	1 280~1 350	500	150	80~120	80	0.5

液锻模的模具原理如图 4 所示,该方案的充型和保压是通过两个压头共同协作完成。充型阶段,下压头处于初始位置,此时浇口由于下压头作用处于封闭状态,金属液进入料筒后,盛放在下压头之上,充型开始后上压头下行,随着压力的传递下压头下行至限位处,浇口开放,金属液进入型腔充型。该结构的设置是为了在金属液进入料筒后将金属液的氧化物和浮渣上浮,最后留在料饼中,以保证成型的铸件质量。为了简化模型,动态结构并未在模拟中体现,这不会对充型和凝固阶段产生较大影响。根据液态模锻工艺原理^[8],金属液在压头压入型腔后,率先与模具接触的金属液凝固成壳,在后续的凝固过程中,由压头提供一个较大的压力,通过压力的传递进行补缩,保证铸件的成型质量。

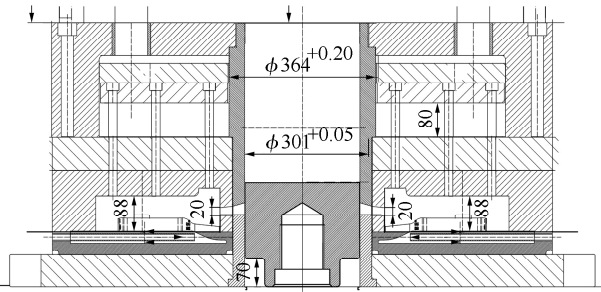


图 4 模具原理图
Fig.4 Mold design

3 液锻工艺方案模拟及优化

3.1 前处理及边界条件设置

将 UGNX 软件建好的模具、浇注系统等三维建模导入 Procast 软件,首先在 Visual-Mesh 模块中对模型进行质量检查并修复,随后进行网格划分,网格划分示意图如图 5 所示。

进入 Visual Cast 模块,进行初始参数设置。一般初始条件设置包括几何体管理器、界面传热系数、边界条件、铸造工艺参数设置等。几何体管理器主要调节模具、压头、金属液、铸型等部分,具体条件设置见表 2。

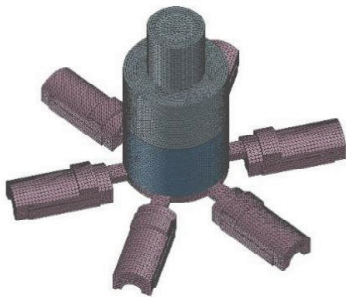


图 5 铸造工艺和网格划分示意图
Fig.5 Schematic diagram sketch of the grid division

界面换热系数对不同的界面、不同的材料是否会有接触运动都会有影响。其中铸件与金属液间换热类型为 EQUIV; 模具与模具之间换热类型为 COINC, 换热系数为 2 000 W/(m²·℃); 压头与金属液之间有穿透, 换热类型为 NCOINC, 换热系数为 2 000 W/(m²·℃); 金属液与型腔之间有流动

无穿透，换热类型为 COINC，换热系数为 $2\,500\text{ W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$ 。

设置边界条件，即对模具添加铸造工艺参数、冷却条件、压头速度，比压等，同时设置对应的模拟参数，具体参数见表 3。

表 2 几何体管理参数

Table 2 Geometry management parameters				
Name	Type	Material	Fill/%	Initial team
Die1	Mold	EN-GJS-500-7	100	500
Die2	Mold	EN-GJS-500-7	100	150
Punch	Mold	EN-GJS-500-7	100	500
Alloy	Alloy	EN-GJV-350-5	100	1 280
Casting	Alloy	EN-GJV-350-5	0	1 280

表 3 边界条件及模拟参数

Table 3 Boundary cond & simulation parameters			
Name	Type	Boundary cond	Value
Heat-1	Heat	Water cooling ($F=5\,000$)	
Heat-2	Heat	Oil ($F=1\,500$)	
Translate	Translate	($0\sim10\text{ s}$, $v=0.5\text{ m/s}$)	
Pressure-1	Pressure	($5\sim100\text{ s}$, $P=80\text{ MPa}$)	
Penetrate			ON
Gas			ON
Gatefeed			ON

3.2 初步方案模拟结果

3.2.1 充型模拟

铸件充型过程的温度场如图 6 所示，金属液经过内浇道，从铸件侧壁缓慢进入型腔延伸至整个铸件底部，没有出现金属液直接冲刷型芯的现象，随后从下至上缓慢充型，液面逐渐上升，保证型腔内的气体被有效排出，避免产生卷气等不良现象，在 $t=4.575\,1\text{ s}$ 时型腔充满。

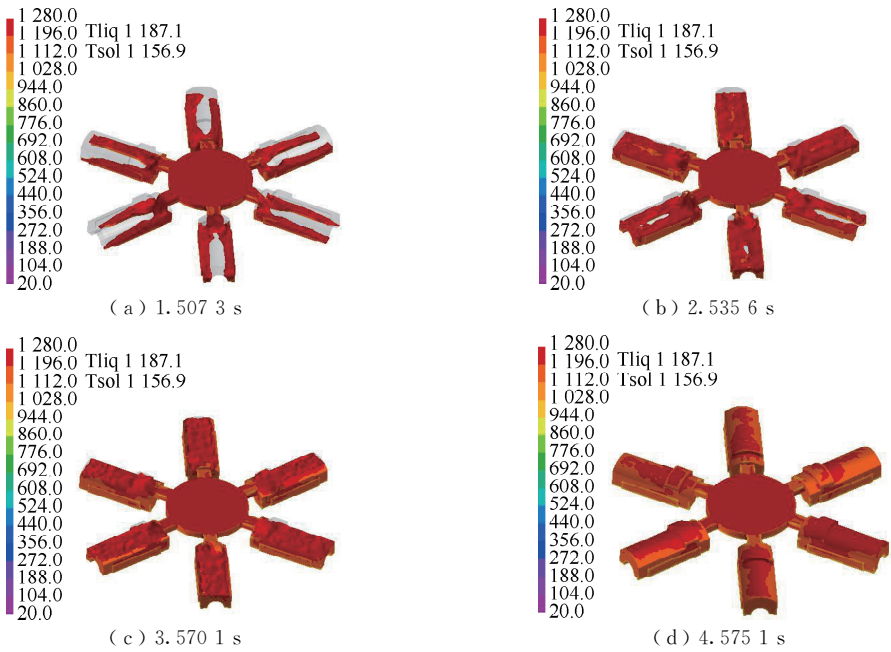


图 6 充型模拟

Fig.6 Simulation of mold filling

3.2.2 凝固模拟

玻璃模具铸件的凝固过程切片如图 7 所示。由图 7 (a) 可知，金属液进入型腔后率先与下模接触，下模温度较低，并且冷却较强，铸件底部最先开始凝固，此时铸件绝大部分仍处于液态。由图 7 (b) 可知，铸件开始从边缘凝固，已经基本形成凝固壳，此时内浇道也开始从边缘向中心产生凝固壳，但是铸件中心和内浇道中心仍以液态金属为主，铸件内部可以接受由内浇道传递的压力。如图 7 (c) 所示，此时形成凝固壳，但是在铸件凸台处心部仍然存在大量液态金属，内浇道处已有约 50% 厚度的凝固层，此时铸件心部仍与内浇口相连，部分压力仍可以传递。如图 7 (d) 所示，此时铸件除凸台处厚度较大的部位存在大量液态金属，其余部位基本都已凝固，铸件心部形成孤立，外部压力无法传

递,无法通过压力进行补缩,因此该部位最终可能产生缩孔缩松等缺陷。如图 8 所示,铸件确实在凸台壁厚较大处产生缩松缩孔缺陷,最大空隙率 90%。

根据工艺方案的充型、凝固阶段模拟和缩孔缩松预测结果分析,该工艺方案在铸件充型过程中无卷气等不良现象产生,但是在凝固过程中最大壁厚处难以满足顺序凝固原则,造成局部孤立,产生缺陷。

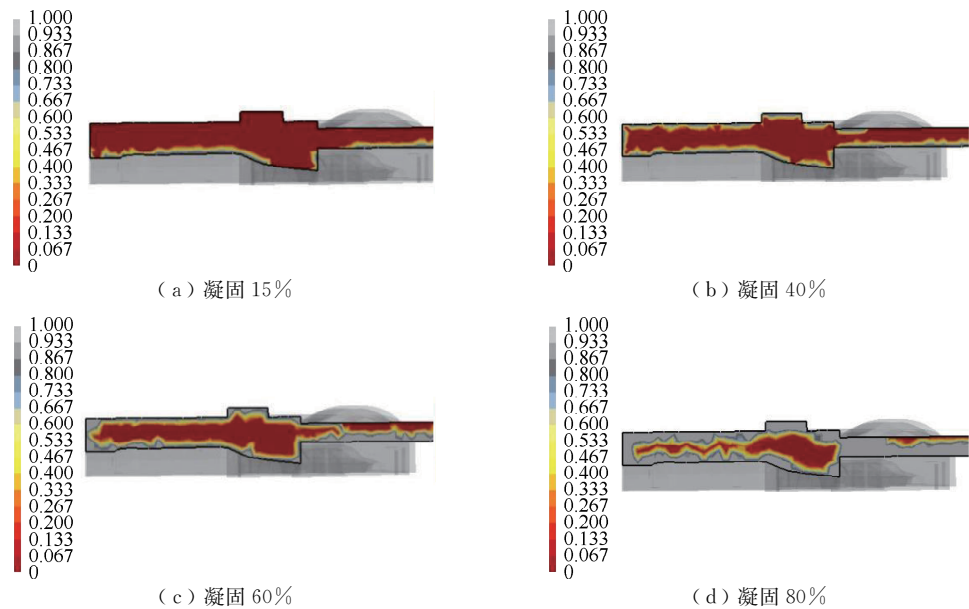


图 7 凝固模拟
Fig.7 Solidification simulation

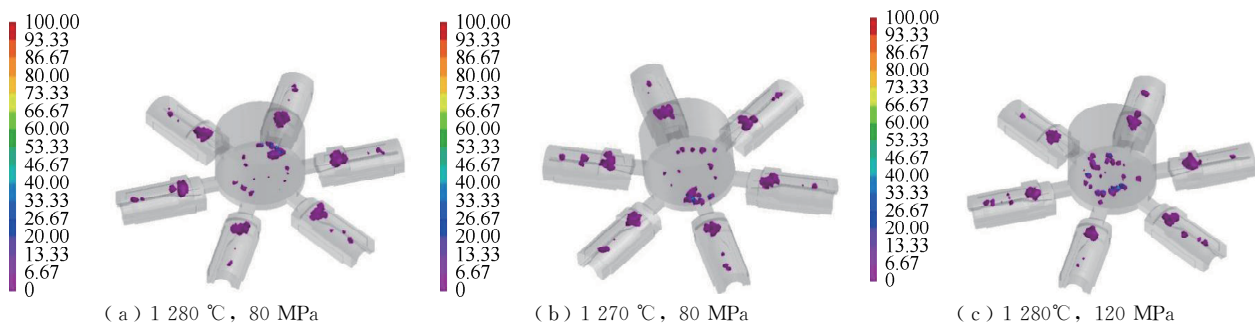


图 8 缩孔缩松预测
Fig.8 Total shrinkage porosity

3.3 浇注温度和比压对缩孔缩松的影响

对于玻璃模具铸件,缩孔缩松可能会导致后期加工冷却水道时局部应力集中而引起铸件断裂,通过对不同的工艺参数调整,能尽量避免或减少缺陷的产生。

如图 8 所示,通过对浇注温度上下调整 10 °C,发现缩孔缩松的产生对 1 280 °C 时缩孔缩松的体积和最大孔隙率并未发生明显的改变。

后又仅对比压作调整,将比压由初始方案的 80 MPa 增加至 120 MPa,同样铸件的缩松缩松并未产生明显减少。对产生该现象的原因进行分析,发现通常降低浇注温度会减少铸件的收缩程度,从而减少缩孔缩松倾向,增大比压则能增强补缩能力从而减少缩孔缩松的产生,但是根据凝固过程的模拟结果来看,这并没有从根本上改变铸件的凝固顺序。

综上结果分析,对于该工艺方案,减少缺陷产生的方法是改变整个方案的温度场,从而满足顺序凝固,可以通过增加内浇口的尺寸,来增加浇道凝固的时长从而提高补缩效率。另一方面,可以在铸

件最大壁厚处添加局部冷却，加快该部分凝固的速度，这样可以保证在该部分凝固的过程中，浇道仍可以提供有效补缩。

3.4 工艺方案的改进

根据上述思路，对原有工艺方案进行优化。经过多次模拟，最终确定工艺方案 2，将浇道改为变截面方案，铸件一侧的截面扩大至上底 45 mm，下底 50 mm，高 45 mm 梯形截面，并存在 10 mm 过渡后，料饼一侧截面尺寸增加至上底 45 mm，下底 52.5 mm，高 60 mm 梯形截面，浇道示意图如图 9 所示。冷却设计方面，原有上模整体采用保温材料改为在铸件中间较为厚大的位置添加局部冷却，采用铜块局部冷却，使得铸件中间壁厚最大处凝固时长缩短，最终工艺方案 2 如图 10 所示。对优化后的工艺方案再进行多次模拟，调整参数，重点关注缩孔缩松结果。

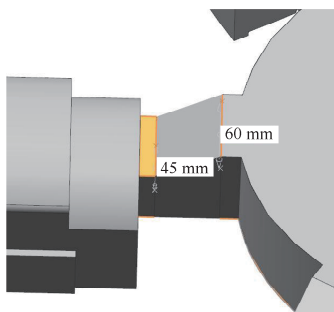


图 9 浇道示意图
Fig.9 Pouring gate

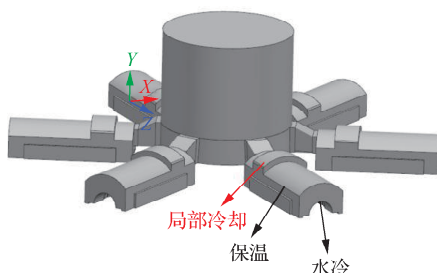


图 10 工艺方案 2
Fig.10 Processing plan 2

3.5 改进方案的模拟验证

将优化后的工艺方案与初始工艺方案相比较，如图 11 所示，在凝固 40% 时，优化后的方案明显可见铸件凸台处已经完全凝固，这是由于模具在该部位增加了导热较快的铜，提高了该部位的冷却速度。在凝固 80% 时，通过对两方案的比较，可以明显发现，在浇道刚刚凝固时，优化后的方案铸件心部剩余的液态金属体积明显减少，这是添加了局部冷却和增大内浇口尺寸共同的结果，二者作用使得凝固更加倾向于顺序凝固。

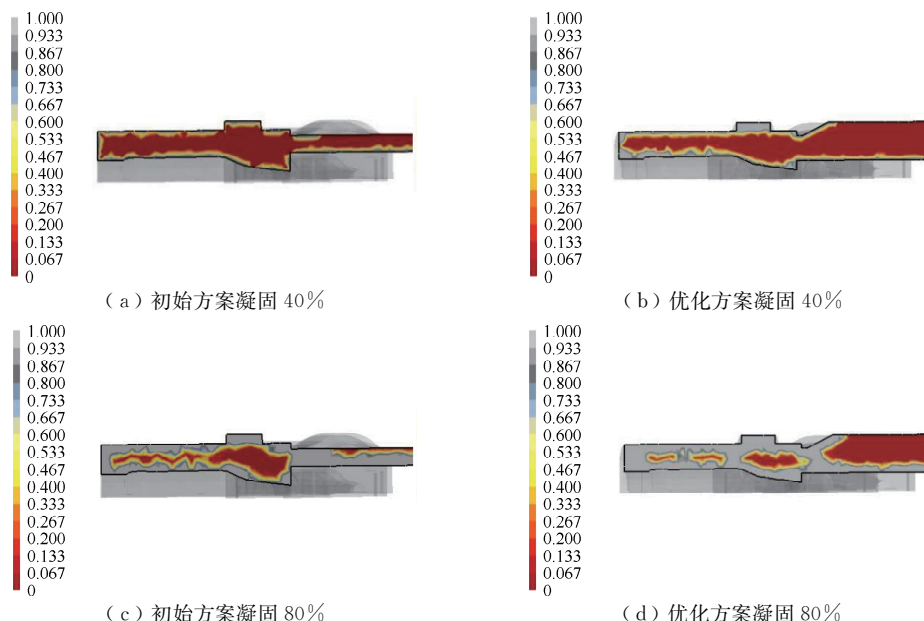


图 11 工艺方案对比

Fig.11 Comparison of process schemes

优化结果图如图 12 所示,优化后的工艺方案,铸件在凝固后的缩孔缩松倾向相较于原方案大幅度下降,不仅缩孔缩松的体积减小,最大空隙率也下降至 15%。尽管如此,但是缩孔缩松没有完全消除,在模拟的过程中没有考虑模具膨胀带来的自补缩和内浇道的过流加热作用,因此实际生产情况下,缺陷的产生会优于当前模拟情况。

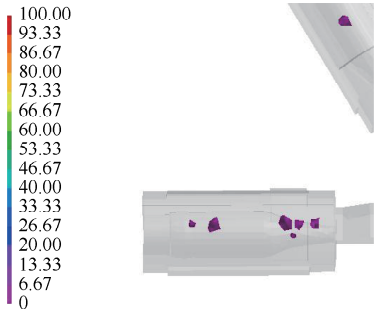


图 12 优化结果

Fig.12 Optimization results

4 石墨形态模拟与预测

玻璃模具材料通常要求具备良好的抗氧化性能、导热性能、抗热疲劳性能。玻璃模具最常用的材料为 HT200, 灰铸铁^[9]具有良好的加工性能和导热性能,但由于其石墨为片状,导致材料强度较低、脆性大、易磨损和氧化剥落。球墨铸铁的石墨组织成球状,且具有良好的抗氧化性能和抗热疲劳性能,但是导热性能较差,会限制产品生产效率。而蠕墨铸铁介于以上两种材料之间,具有良好的综合性能^[10]。故此,为了满足玻璃模具复杂的服役条件,采用梯度石墨方案,即型腔一侧铸铁中的石墨为球状,来提高抗氧化性和抗热疲劳性,而模具外表面用 10 mm 的片状石墨铸铁来提高导热效率,中间层用蠕虫状石墨铸铁来过渡。现利用 Procast 软件,对铸造过程进行模拟,结合铸铁热分析理论,在不同的模具材料和冷却强度条件下,对铸件不同位置的金属液时间-温度曲线来预测组织形态,为可行性试验提供参数参考。

4.1 模拟原理

已有的研究表明,铸铁组织中的石墨化过程主要是从过共晶铁液中直接析出石墨,在共晶转变过程中形成共晶石墨及奥氏体,冷却析出二次石墨。冷却速度是影响这一过程的关键因素^[11-12],当冷却速度较慢时则有利于获得灰铸铁,再此基础上增加冷却速度,则会获得蠕虫状和球状石墨。

热分析^[13-14]主要是对时间-温度曲线进行研究,通过曲线各段对应铸铁凝固过程的反应阶段,同时用曲线上的某些特征值来判断反应的开始与结束,同时评价反应过程中石墨化进程等,从而来预测或判断铸铁的蠕化或球化质量。图 13 是典型的蠕墨铸铁热分析曲线及其一阶微分曲线。研究总结热分析曲线上的特征点数值,可以与不同的石墨形态对应。图中 θ_L 为液相线转变点; θ_{EU} 为共晶体开始成长前铁水过冷的最低温度; θ_{ER} 为结晶热释放达到的最高共晶温度; θ_s 为固相线温度; $\Delta\theta_E$ 为共晶过冷度; $d\theta/dt$ 为共晶生长阶段最高温度变化; $d\theta_s/dt_2$ 为凝固终了的冷却速率; t_1 为共晶凝固时间; t_0 为微分曲线过点后与零线的相交点到微分曲线漆部冷却速率为 24 °C/分点的时间^[15]。

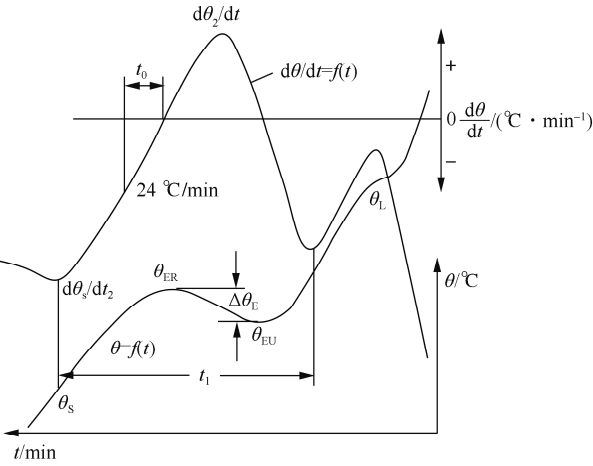


图 13 典型蠕墨铸铁热分析曲线^[8]

Fig.13 Typical thermal analysis curves of vermicular cast iron^[8]

当 $\theta_{EU} \geq 1\ 140\ ^\circ\text{C}$, $\theta_{ER} \geq 1\ 153\ ^\circ\text{C}$ 时,石墨为片状;当 $1\ 130\ ^\circ\text{C} \leq \theta_{EU} \leq 1\ 140\ ^\circ\text{C}$, $1\ 150\ ^\circ\text{C} \leq \theta_{ER} \leq 1\ 153\ ^\circ\text{C}$ 时,石墨为蠕虫加球状,蠕虫居多;当 $1\ 130\ ^\circ\text{C} \leq \theta_{EU} \leq 1\ 140\ ^\circ\text{C}$, $1\ 143\ ^\circ\text{C} \leq \theta_{ER} \leq 1\ 150\ ^\circ\text{C}$ 时,石墨为蠕虫加球状,球状居多^[6]。

4.2 模型建立

通过 UGNX 建立模型，如图 14 所示，为了简化模型，选择一模一腔方案进行模拟。通过 Procast 对内边界进行条件设置，上模选择为保温材料 Insulator，材料选择为 Insulator fireclay，其导热系数曲线如图 15 所示。下模采用球墨铸铁材料，水冷冷却条件，此时上下模存在较大的冷却强度差异，为了避免压力对试验结果的影响，此模拟过程中凝固阶段不施加压力。

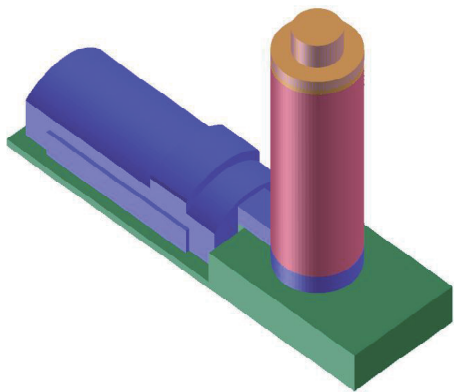


图 14 三维建模

Fig.14 3D modeling

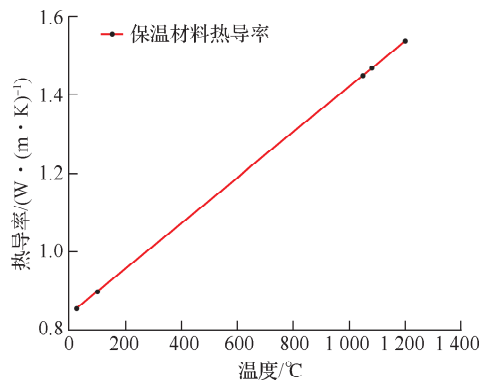


图 15 保温材料导热系数

Fig.15 Insulator fireclay conductivity

4.3 结果分析

为了探究通过采用不同的模具材料和冷却强度，是否可以在保温材料一侧获得片状石墨组织以及是否可以在金属型一侧获得球状石墨组织，选取上述位置的点，选点位置如图 16 所示，生成该两点的时间-温度曲线。为了避免偶然性，在同一厚度位置取 3 个点进行曲线分析，保温材料和金属型两侧结果如图 17 所示。

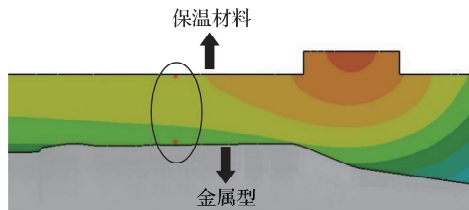
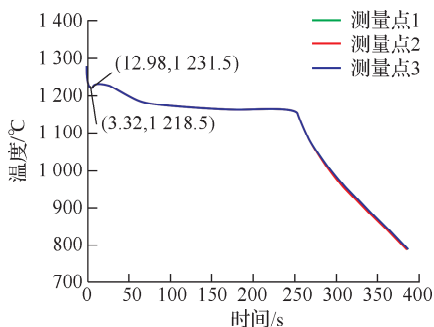
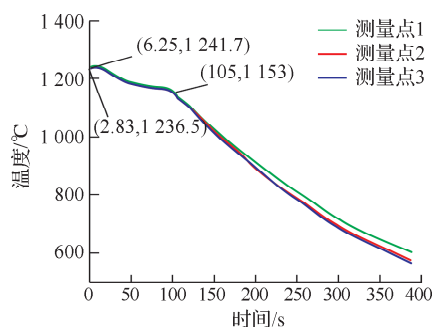


图 16 取点位置

Fig.16 Point location



(a) 保温材料



(b) 金属型

图 17 温度-时间曲线

Fig.17 Temperature - time curve

根据热分析理论观点，铁水在液相线转变温度后，铁水温度会持续下降至共晶反应温度，随着共晶反应的进行释放大量潜热，导致铁水温度重新升高，其中 θ_{EU} 和 θ_{ER} 是热分析的重要特征参数。将模拟获得的铸件时间-温度曲线与典型热分析曲线进行对比，以图 16 保温材料取点位置的温度-时间曲

线为例,曲线1 200 °C附近产生拐点,铁水温度有所回升,由1 218.5 °C上升至1 231.5 °C后重新开始下降,但是“回升”这一现象出现的位置并不在共晶温度附近,而是更接近于奥氏体析出的温度范围,反之,共晶温度附近,铁水温度处于持续下降,并没有发现有温度回升阶段。从金属型附近的温度-时间曲线可以看到,在105 s,1 153 °C时曲线出现明显拐点,此温度在共晶温度附近,但是此后铁水温度一直呈快速下降,意味着该点共晶反应接近结束。由于模拟结果曲线与典型的铸铁热分析曲线有所差异,缺乏对曲线分析的特征点数据,因此对该曲线以及该种模拟方法仍需要进一步讨论与研究。

5 结 论

1) 利用Procast对玻璃模具铸件液态模锻工艺方案进行模拟并优化工艺参数,在内浇道尺寸不变的情况下,降低浇注温度和增大比压对于铸件的缩孔缩松倾向并无较大的影响。

2) 增大内浇口尺寸和添加局部冷却措施可以有效减少缩孔缩松的产生,扩大内浇口尺寸至上底45 mm,下底50 mm,高45 mm梯形截面,添加局部冷却措施,浇注温度1 220 °C,比压80 MPa参数下,缩孔缩松体积减少,缩松概率下降至15%。

参考文献:

- [1] 孙德勤. 玻璃模具材料及其发展[J]. 常熟理工学院学报, 2009, 23(8): 108-110.
- [2] 赵光远. 玻璃模具材料分析研究[J]. 中国高新区, 2017(14): 101-102, 104.
- [3] 岳旭东, 吴春京, 余光达. 玻璃模具材质的研究进展[J]. 辽宁工学院学报, 2005, 25(3): 186-189.
- [4] 刘晴, 邵文宝, 吴春京. 玻璃模具材料选择的研究进展[J]. 铸造技术, 2005, 26(6): 551-553.
- [5] STEFANESCU D, LOPER C R, VOIGHT R C, et al. Cooling curve structure analysis of compacted vermicular graphite cast irons produced by different melt treatments[J]. AFS Transactions, 1982, 90: 333-348.
- [6] 徐倩, 杨湘杰, 叶寒, 等. 基于定量取样杯的凝固曲线与石墨形态的判据研究[J]. 铸造, 2015, 64(1): 37-40.
- [7] 邢书明, 邢若兰. 液态模锻(挤压铸造)技术研究与应用进展[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2021, 33(5): 1-7.
- [8] 罗守靖, 陈炳光, 齐丕骧. 液态模锻与挤压铸造技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [9] 芮争家. 铸铁及其熔炼技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [10] 韦玉屏, 陈勇. 玻璃模具材料的发展和应用[J]. 机械设计与制造, 2008(3): 201-203.
- [11] 宋维锡, 杨文英, 于丹, 等. 稀土铸铁定向凝固过程石墨形态的转化[J]. 北京钢铁学院学报, 1987, 9(3): 28-35.
- [12] 陈香. 不同冷却条件下亚共晶灰铁件凝固热分析和组织性能研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- [13] 董云菊, 黎振华, 蒋业华, 等. 球墨铸铁热分析技术的应用与发展[J]. 铸造, 2011, 60(3): 255-258, 264.
- [14] 马建华. 热分析技术在铸铁领域的应用[C]. 西安: 中国机械工程学会第十一届全国铸造年会, 2006: 662-668.
- [15] 杨景祥, 丁晖, 于海朋, 等. 铸铁一次结晶相析出的热效应[J]. 沈阳机电学院学报, 1982, 4(3): 25-48.

(责任编辑:李艳)