DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2026.5238

基于 ProCAST 的铁型覆砂曲轴工艺换热系数反算

罗琨献[1],郑科泽[2],李静文[2],卢德宏[1]

(1. 昆明理工大学 材料科学与工程学院,云南 昆明 650500;2. 云南云内动力机械制造有限公司,云南 昆明 651701)

摘　要:铁型覆砂球墨铸铁曲轴铸造过程中,界面换热系数(HTC)是影响温度场演化和凝固行为的关键参数,但其受温度变化、界面气隙形成及接触状态演化等因素影响显著,难以通过传统方法准确获得。本文在实际生产条件下于铸件内部和覆砂层内同步布置热电偶,获取充型–凝固全过程的温度曲线;在此基础上,利用 ProCAST 软件中的 Optimization 优化模块,对铸件–覆砂层及覆砂层–铁型界面的 HTC 进行反算。结果表明,铸件/覆砂层界面 HTC 随温度呈现明显的阶段性变化特征,其数值由约 315 W/(m²·K)随温度升高逐渐增加至约 712.5 W/(m²·K),并在液–固相变区发生显著变化。将反算得到的 HTC 作为边界条件输入模拟后,所得温度曲线与实测结果在 1 500 s 之后基本重合,整体误差控制在 5%以内,明显优于采用恒定 HTC 模型的模拟结果。研究表明,考虑 HTC 的温度依赖特性可有效提升铁型覆砂工艺温度场模拟的可靠性。

关键词:换热系数;铁型覆砂;球墨铸铁;反算换热;热电偶;数值模拟

中图分类号:TG255　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2026)09-1060-12

Inverse Determination of the Heat Transfer Coefficient for Iron Mold Sand–coated Crankshaft Process Based on ProCAST

LUO Kunxian[1], ZHENG Keze[2] , LI Jingwen[2], LU Dehong[1]

(1. School of Materials Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 2. Yunnan Yunnei Power Machinery Manufacturing Co., Ltd., Kunming 651701, China)

Abstract: During the casting of sand-coated iron mold ductile iron crankshafts, the interfacial heat transfer coefficient (HTC) is a key parameter governing the evolution of the temperature field and solidification behavior; however, it is strongly affected by temperature variation, interfacial air-gap formation, and changes in contact conditions, making accurate determination by conventional methods difficult. In this study, thermocouples were synchronously embedded inside the casting and within the sand coating under actual production conditions to record the temperature histories throughout the entire filling and solidification process. On this basis, the HTC at the casting-sand coating and sand coating-iron mold interfaces was inversely determined using the Optimization module in ProCAST software. The results indicate that the interfacial HTC of the cast/sand coating exhibits a pronounced stage-dependent variation with temperature, increasing from approximately 315 W/(m²·K) to approximately 712.5 W/(m²·K) as the temperature increases and significantly changes in the liquid-solid phase transformation region. When the inversely determined HTC is applied as the boundary condition in the simulation, the calculated temperature curves show good agreement with the experimental results after 1 500 s, with the overall deviation controlled within 5%, which is markedly better than that obtained using a constant HTC model. The results demonstrate that considering the temperature dependence of the HTC can effectively improve the reliability of the temperature field simulation for the sand-coated iron mold casting process.

Key words: HTC; iron mold sand coating; ductile iron; inverse heat transfer calculation; thermocouples; numerical simulation

收稿日期:2025-11-02

基金项目:云南省重大科技专项(202402AG050003)

作者简介:罗琨献,1999 年生,硕士生.研究方向为铁型覆砂球墨铸铁曲轴工艺等.Email:1842665043@qq.com

通信作者:卢德宏,1968 年生,博士,教授.研究方向为铸造技术.Email:ldhongkust@126.com

引用格式:罗琨献,郑科泽,李静文,卢德宏.基于 ProCAST 的铁型覆砂曲轴工艺换热系数反算[J].铸造技术,2026,47(9):1060-1071.

LUO K X, ZHENG K Z, LI J W, LU D H. Inverse determination of the heat transfer coefficient for iron mold sand-coated crankshaft process based on ProCAST[J]. Foundry Technology, 2026, 47(9): 1060-1071.

中国知网　https://www.cnki.net

随着计算机技术的发展,数值模拟已成为研究铸件凝固过程与缺陷形成机理的重要工具。通过对铸造过程中温度场与凝固行为的准确模拟,可实现潜在缺陷的提前预测,从而提高产品合格率并降低试错成本。

对于铁型覆砂工艺球墨铸铁曲轴,铁型的高导热性与覆砂层的隔热作用共同决定了铸件在充型与凝固过程中的复杂传热行为。与传统砂型或单一金属型铸造相比,该工艺同时涉及“铸件–覆砂层–铁型”多界面传热过程,使温度场演化更加敏感,并对缩松缺陷的形成及组织均匀性产生显著影响。

在覆砂层与曲轴铸件界面之间,界面换热系数(interfacial heat transfer coefficient, HTC)难以直接测量,由于其会显著影响铁液的凝固过程[1-3],且换热系数的大小直接影响铸件与覆砂层界面的传热能力[4],对模拟设置的准确性至关重要[5-6]。HTC 代表着两个物体之间的热交换能力,它受到多种因素的影响,如界面粗糙度、铸件几何形状、模具温度、金属静压以及是否存在空气间隙[7-8]。目前,针对 HTC 的确定方法主要包括经验公式法、理论模型法以及基于反问题热传导的反算方法。相关研究已在熔模铸造、压铸及低压铸造等工艺中取得一定进展[9-13]。

近年来,针对复杂传热过程的数值模拟精度问题,研究者逐渐认识到界面换热参数准确性的重要性。Zhao 等[14]通过嵌入式传感器与逆热传导模型相结合,实现了复杂结构表面热信息的反演,为难以直接测量热边界条件的问题提供了新的解决思路。Guan 等[15]对熔模铸造过程中型壳转运阶段边界条件难以准确预设的问题,建立了基于热电偶测量的实时修正模型,对环境温度、辐射特性及换热条件进行动态校正。结果表明,该方法可有效提高温度场模拟精度,并改善缩松缺陷预测结果。Chen 等[16]提出了一种基于割线法的简化界面换热系数反算方法,仅利用单一测点的温度曲线即可实现界面换热系数的反算。研究结果表明,该方法在保持较高精度的同时显著降低了实验测量难度,适用于复杂工艺和特殊浇注环境下的界面换热系数求解。Vergnano 等[17]针对重力砂型铸造过程,提出了一种实验与数值模拟相结合的参数辨识方法,利用遗传算法同时反算砂型热物性参数及界面换热系数。研究发现,软件数据库中给出的平均参数在实际生产条件下并不总是适用,尤其是在旧砂重复使用的情况下,反算得到的参数可显著提高模拟精度。Khalifa 等[18]系统研究了绿砂中含水量、紧实率及透气性等因素对热导率的影响,结果表明砂型热物性参数对材料状态高度敏感,采用文献或数据库中的平均值可能导致数值模拟结果产生偏差。李日等[19]用与实际铸锭形状相似、型砂相同,但尺寸较小的试样测得温度场,然后针对小试样反算获得界面换热系数;再用此界面换热系数来计算实际铸锭的温度场,并与实测温度场对比,分析温度场平均差。郑行等[20]直接对实际铸件进行测温,不但会造成热电偶插入位置的漏钢,而且由于热电偶与铸件会凝固在一起而导致铸件的报废,因此通过实际工况下的物理模拟测温。

综上所述,针对实际生产条件下铁型覆砂工艺球墨铸铁曲轴铸造过程中“铸件–覆砂层–铁型”多界面传热行为的研究仍较为有限,尤其缺乏基于现场实测温度数据的数值模型校核与验证。为提高模拟结果在工程实践中的可靠性,本文采用现场测温、反算界面换热系数及模拟验证相结合的方法,对铁型覆砂工艺球墨铸铁曲轴的温度场模拟进行研究。

基于此,本文以实际生产条件下的铁型覆砂工艺球墨铸铁曲轴为研究对象,通过在现场铸造过程中于铸件内部及覆砂层内布置热电偶,获取充型与凝固过程的温度曲线;在此基础上,借助 ProCAST 模拟软件,对铸件–覆砂层及覆砂层–铁型界面的界面换热系数进行反算,得到铁型覆砂曲轴工艺的 HTC-温度变化关系。研究结果可为该类铸件的温度场模拟、凝固分析及缺陷预测提供更加可靠的热边界条件。

1　技术要求及传热过程

1.1　曲轴结构及技术规格

铸件为铁型覆砂球墨铸铁曲轴,是发动机中传递动力的重要部件。在运行过程中不仅要承受复杂的交变应力和较大的扭矩载荷,还需要具备良好的疲劳强度、抗冲击性能和耐磨性。铸件要求组织致密,石墨球化良好,珠光体含量高,表面光洁,无气孔、缩松、裂纹、夹砂等铸造缺陷。

如图 1 所示,四缸机曲轴总长为 652 mm,轴颈和连杆轴颈的直径分别为 87 mm 和 72 mm,位于腹板与轴颈之间的圆角区域包含多处过渡结构,几何形状较为复杂,平均壁厚为 20 mm,最大壁厚可达 87 mm。单件重量 37.5 kg,牌号为 QT950-4,采用 2 t 中频电炉熔炼,原料配比(质量分数)为:废钢 75%~85%,回炉料 15%~25%;碳化硅 0.6%~1%。铁液化学成分要求见表 1 所示。

1.2　铁型覆砂界面传热过程

由于曲轴各个部位的厚度差异较大,且传热是一个非稳态的过程,因此用三维非稳态傅里叶导热

中国知网　https://www.cnki.net

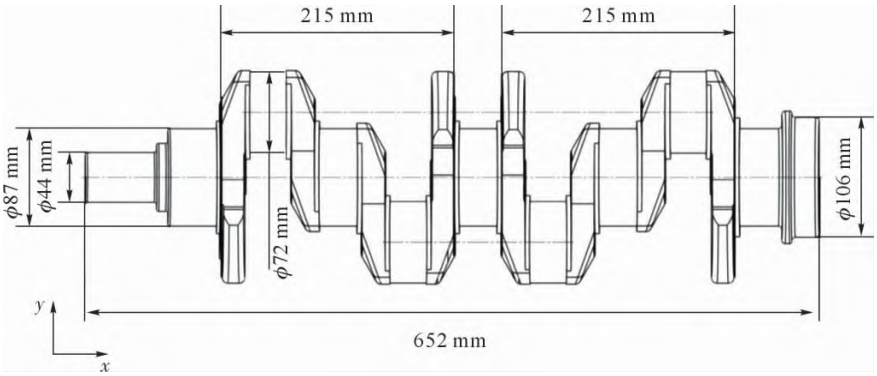


图 1 曲轴基本尺寸
Fig.1 Basic dimensions of the crankshaft

表1 化学成份
Tab.1 Chemical composition
(mass fraction/%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mg
3.44	2.22	0.355	≤0.035	≤0.035	0.039 8	0.85~0.95	0.056 7

微分方程来描述,其表达式为:

$$\rho c\frac{\partial T}{\partial t}=\nabla\cdot(k\nabla T)+Q \tag{1}$$

笛卡尔坐标展开为:

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

式中,ρ 为金属密度,kg/m^3;c 为材料比热容,J/(kg·K);λ 为材料热导率,W/(m·K)。ρ、c 与 λ 均为随温度 T 变化的热物性参数。T 表示温度,℃,Q 为单位质量的结晶潜热,J/kg;t 为时间,s。该方程左侧为非稳态热传导中的热积蓄项,描述了单位体积材料随时间变化所储存的热能;右侧依次为 3 个正交空间方向上的导热项以及相变过程中由于潜热释放或吸收所产生的热源项。铸件与铁型之间有一层覆砂层,如图 2 和 3 所示,是铁型覆砂与其他铸造工艺的最大区别。

铁液充填型腔后,金属液在铸造凝固过程中作为高温热源,其释放的热量会通过铸件的液相区、固液两相区、固相区、砂型传导到大气环境中。热传导、热对流、热辐射 3 种传热方式同时存在[21]于整个砂型铸造系统中,如图 4 所示是其二维传热过程。对于铁型覆砂工艺而言,其冷却速率介于金属型铸造和砂型铸造之间。

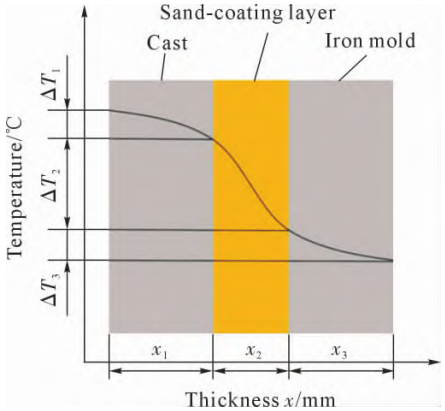


图 2 铁型覆砂剖面温度分布
Fig.2 Temperature distribution diagram of the cross-section of the sand-coated iron mold

图中,λ 为热导率,代表热传导;R 为热辐射;h_f 为表面换热系数,代表热对流。

此外,考虑到酚醛树脂砂在高温条件下易发生热分解,以及球墨铸铁在凝固期间石墨析出膨胀所引起的界面变形,铁液与铁型之间的接触界面往往存在气隙,从而显著影响传热效率。因此,界面换热系数并非恒定值,而是随界面温度及接触状态动态变化的数值。

2 反算优化模型

2.1 反算法原理

正向的铸造数值模拟通常是基于已知的有限元模型、热物性参数、初始条件以及边界条件,通过将其代入傅里叶导热微分方程建立热传导数学模型,

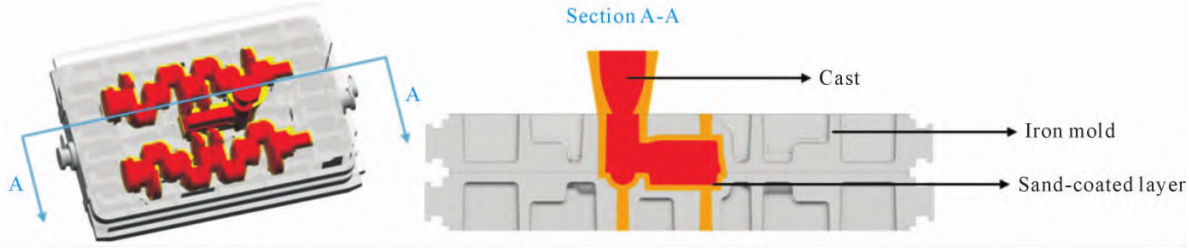


图 3 铁型覆砂剖面示意图
Fig.3 Schematic diagram of the cross-section of the sand-coated iron mold

中国知网 https://www.cnki.net

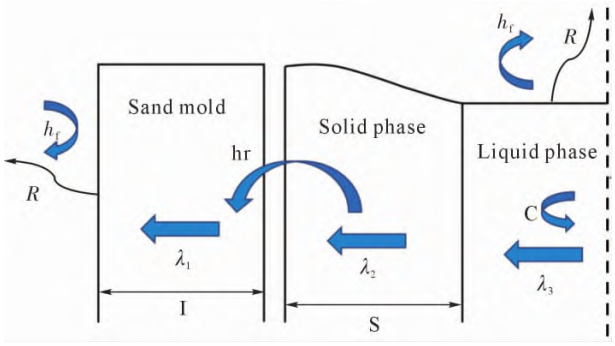


图 4 铸造传热示意图

Fig.4 Schematic diagram of heat transfer during casting

并利用有限元(finite element method, FEM)或有限差分(finite difference method, FDM)方法对温度场进行数值求解，从而获得铸造过程中不同区域的温度数据。与此不同，反算算法的核心在于：在已知特征点温度测量数据和几何模型的前提下，针对某一未知热参数(如界面换热系数、初始温度等)进行反向求解。其基本思路是：在铸件与覆砂层关键位置布置的实测温度曲线作为输入，同时设定该未知参数的取值范围，借助优化算法对其进行迭代修正，不断计算模拟温度场，并通过最小二乘拟合策略评估计算值与实测值的误差，最终收敛于误差最小的参数值[22-23]。该方法可有效提高热边界条件的准确性。正向与反向的求解流程如图 5 所示。

2.2 反算求解法的数学模型

反算求解法采用的最小二乘拟合算法公式[24]：

$$S(\beta)=\sum_{i=1}^{N_T}\sum_{j=1}^{N_m}\frac{1}{\sigma_T^2}\left[T_{ij}^m-T_{ij}^c(\beta)\right]^2+\sum_{k=1}^{N_m}\frac{1}{\sigma_k^2}\left[\beta_k-\beta_k^0(\beta)\right]^2 \tag{3}$$

式中，β 为需反算的未知参数，$\beta=\{\beta_1,\beta_2,\cdots,\beta_k\}$；$T_{ij}^m$ 为在 $t_i(i=1,\cdots,N_T)$时间下在 $x_j(j=1,\cdots,N_m)$处的测量温度；$T_{ij}^c(\beta)$为在 t_i 时间下在 x_j 位置的模拟温度；σ_T 表示实测误差，σ_k 表示反求迭代过程中 β_k^0 的最大增量，表示预先设定值。

反求未知参数 β，实质是一个优化问题，优化目标是使得目标函数 $S(\beta)$值最小，也就是其函数的偏导为零，即：

$$\frac{\partial S}{\partial\beta_l}=\sum_{i=1}^{N_T}\sum_{j=1}^{N_m}\frac{-2}{\sigma_T^2}\cdot\left[T_{ij}^m-T_{ij}^c(\beta)\right]\cdot X_{ijl}+\frac{-2}{\sigma_l^2}\left[\beta_l-\beta_l^0\right]=0 \tag{4}$$

式中，X_{ijl} 为敏感系数。

$$X_{ijl}=\frac{\partial T_{ij}^c(\beta)}{\partial\beta_l}\approx\frac{T_{ij}^l(\beta_1,\beta_l+\delta\beta_l,\cdots,\beta_{N_\beta})-T_{ij}^c(\beta_1,\beta_l\cdots,\beta_{N_\beta})}{\delta\beta_l} \tag{5}$$

式中，$\delta\beta_l$ 为前一次迭代 β_l 的变化量，用来计算敏感系数 X_{ijl}，下一次迭代的温度值 $T_{ij}^c(\beta^{\nu+1})$被线性化为：

$$T_{ij}^c(\beta^{\nu+1})\approx T_{ij}^c(\beta^{\nu})+\sum_{k=1}^{N_\beta}X_{ijk}^{\nu}\cdot\Delta\beta_k \tag{6}$$

式中的每一次迭代的未知参数增量 $\Delta\beta_k$，可以有以下线性方程组求得：

$$[A]\cdot\Delta\beta=f\text{ 或 }\sum_{k=1}^{N_\beta}A_{lk}\cdot\Delta\beta_k=f_l \tag{7}$$

式中 A_{lk} 可写成：

$$A_{lk}=\sum_{i=1}^{N_T}\sum_{j=1}^{N_m}\frac{X_{ijk}\cdot X_{ijl}}{\sigma_T^2}+\frac{\delta_{lk}}{\sigma_l^2} \tag{8}$$

$$f_l=\sum_{i=1}^{N_T}\sum_{j=1}^{N_m}\frac{1}{2\sigma_T}\left[T_{ij}^m-T_{ij}^c(\beta^{\nu})\right]\cdot X_{ijl}-\frac{1}{\sigma_l^2}(\beta_l^{\nu}-\beta_l^0) \tag{9}$$

δ_{lk} 是克罗内克尔符号，$\delta_{lk}=\begin{cases}1(l=k)\\0(l\neq k)\end{cases}$。

反演过程中未知参数 β 有两种分类，既可以表达热物性参数如 $\beta=\{k_1,k_2,\cdots,k_{N_\beta}\}$，$k$ 为材料的热导率，也可以表示热相关的边界条件如 $\beta=h_1,h_2,\cdots,h_{N_\beta}$，$h$ 为界面换热系数；$\beta=\{q_1,q_2,\cdots,q_{N_\beta}\}$，$q$ 为铸型-大气间的对流换热系数；$\beta=\{r_1,r_2,\cdots,r_{N_\beta}\}$，$r$ 为铸型-大

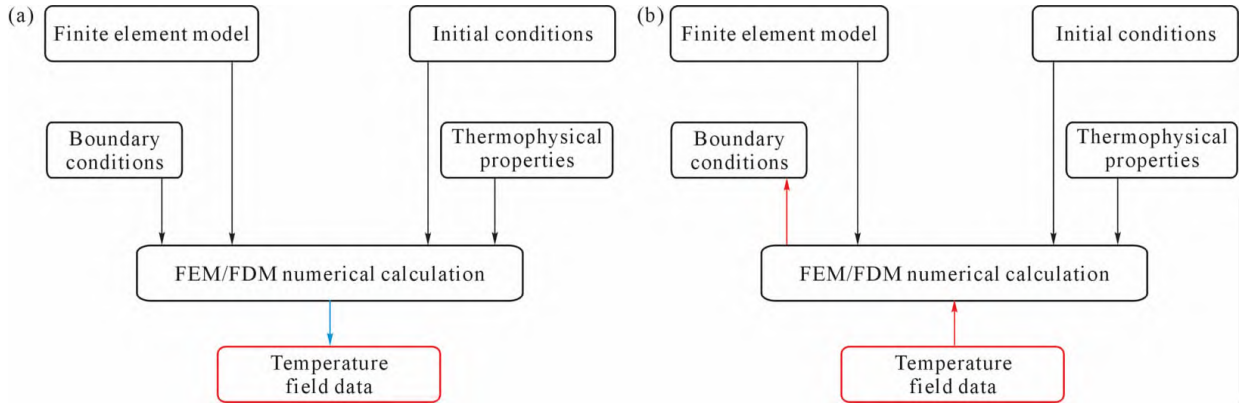


图 5 求解过程示意图：(a) 正向求解图；(b) 反向求解图

Fig.5 Schematic illustration of the solution procedures: (a) forward solution; (b) inverse solution

中国知网 https://www.cnki.net

气间的辐射系数。

反演计算的一般步骤如下：

(1)构建数值模拟模型，模型内含几何和材料信息；

(2)搭建与仿真模型相对应的实验平台，通过测温手段记录铸件或模型选定位置的温度变化曲线 T_{ij}^{m}，并导入仿真模型中；

(3)为待识别参数 β 设定初始猜测值 $\beta^{0}=(\beta_1^{0},\beta_2^{0},\cdots,\beta_{N_k}^{0})$，初值应尽量贴近实际以提升算法收敛性，并预设最大迭代步数 M；

(4)进行一次正向热传导模拟，计算温度场 $T_{ij}^{c}(\beta)$；

(5)根据公式(4)得出对应的敏感系数 X_{ijl}；

(6)利用上述参数与公式，求解每一轮迭代的参数调整量 $\Delta\beta_k$，通过迭代逼近最优值，最终输出反算得到的 β 参数。

3 反求实验过程

3.1 ProCAST 网格模型与现场温度测定

将三维模型导入 ProCAST 中进行网格划分，其中铁型、覆砂层、铸件网格划分尺寸分别为 25、7 与 2 mm 同时浇道位置进行网格细化，确保浇道位置网格层数较密，在 Mesh 模块与 Cast 模块分别对各部分材质的属性以及温度进行设置，铁型与覆砂层预热温度 146 ℃，浇注温度设置为 1 350 ℃；浇注时间为 20 s，铸件与覆砂层的界面 HTC为 900 W/(m²·K)，铁型与覆砂层的 HTC 为 580 W/(m²·K)。

如图 6 所示，由于是对称零件只需要 1/2 模型进行模拟即可，划分后的面网格数量为 326 844，体网格数量为 1 889 102。考虑到实际生产过程中放置热电偶的便利性，在图 7 中为两组热电偶分别布置的位置示意图，在现场布置热电偶时根据图 7 所设定的点位和深度进行热电偶的布置，在射砂后砂层未完全固化时从上铁型开孔布置热电偶。如图 8 所示。其中铁液温度变化用 P1 处的热电偶测定，覆砂层的温度变化用 P2 处热电偶测定。

3.2 材料热物性参数

铸件和砂型的热物性参数是数值模拟铸件凝固过程中所需用到的最基本的参数，也是衡量铸型传热能力的重要依据。准确的热物性参数才能使数值模拟结果更具有评估价值，因此采用 JMatPro 计算各材质的热物性参数，砂型材质为酚醛树脂砂，铁型材质为 HT250，球墨铸铁曲轴材质为 QT950-4，热物性参数分别如图 9，10，11 所示。

3.3 ProCAST 模拟与换热系数反算

图 12 为 P1 与 P2 铸件内部与覆砂层内部实测温度曲线与初步模拟仿真的对比图，图 12a 为 P1 位

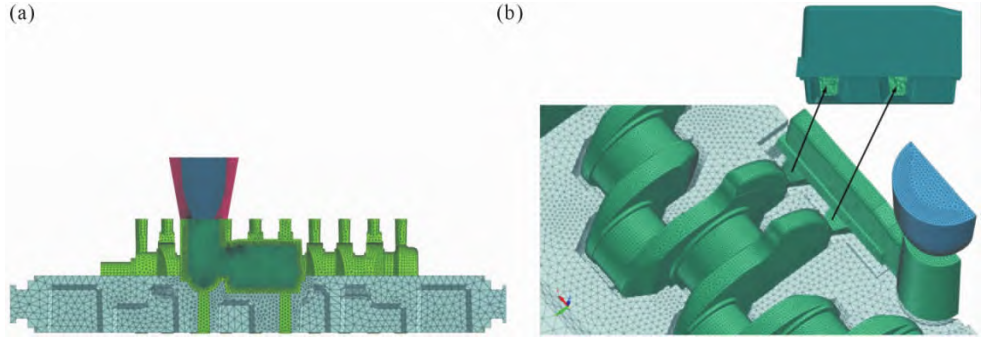


图 6 ProCAST 模型图；(a) ProCAST 网格模型；(b) 铸件浇道放大图

Fig.6 ProCAST model: (a) finite element mesh of the ProCAST model; (b) enlarged view of the casting and gating system

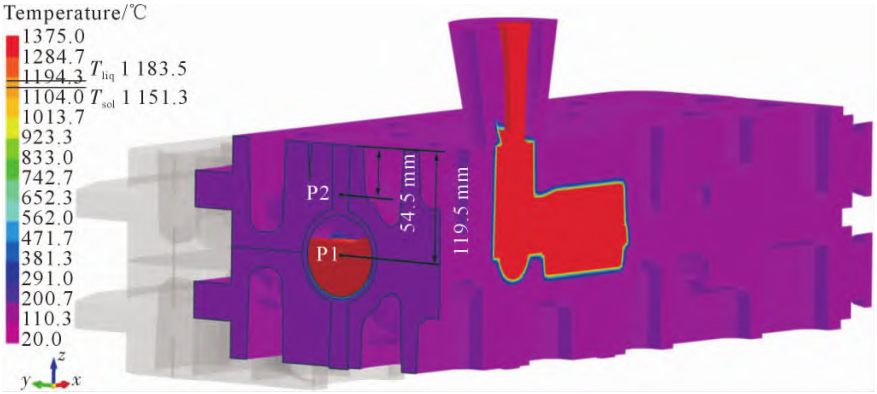


图 7 ProCAST 模型测温点位置示意图

Fig.7 Schematic illustration of the locations of the temperature measurement points in the ProCAST model

中国知网 https://www.cnki.net

图 8 现场热电偶测量布置

Fig.8 Arrangement of the thermocouple measurements on site

置实测温度曲线和在 ProCAST 里相同坐标点下铸件内部温度曲线的对比，由于采用恒定换热系数，500 s 以后模拟冷却速率明显偏离实测结果，导致共晶反应持续时间和后续温度演化出现显著误差，相同时间下最大偏差有 102 ℃，使数值模拟与实际不相符。图 12b 为 P2 位置实测温度曲线与在 ProCAST 里相同坐标点下覆砂层内部温度曲线的对比，同样的由于换热系数采用较高的固定值 580 W/(m²·K)，导致覆砂层仿真温度曲线与 P2 处实测温度曲线存在一定的偏差，在最后凝固阶段的偏差有 15~30 ℃。

铸件–覆砂层界面的换热系数作为影响铁型覆砂温度场模拟精度的重要因素，如果铸件–覆砂层界面换热系数采用常值 900 W/(m²·K)，将导致模拟仿真的结果与铸件实际生产情况差别较大。

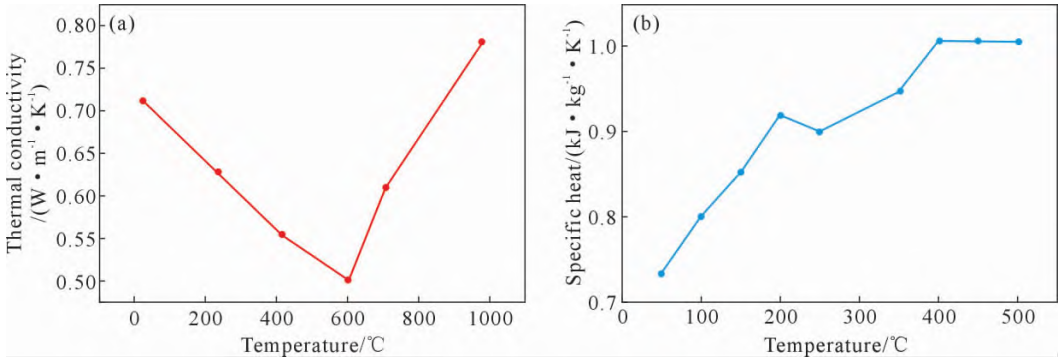


图 9 酚醛树脂砂热物性参数：(a) 热导率；(b) 比热容

Fig.9 Thermophysical parameters of phenolic resin sand: (a) thermal conductivity; (b) specific heat capacity

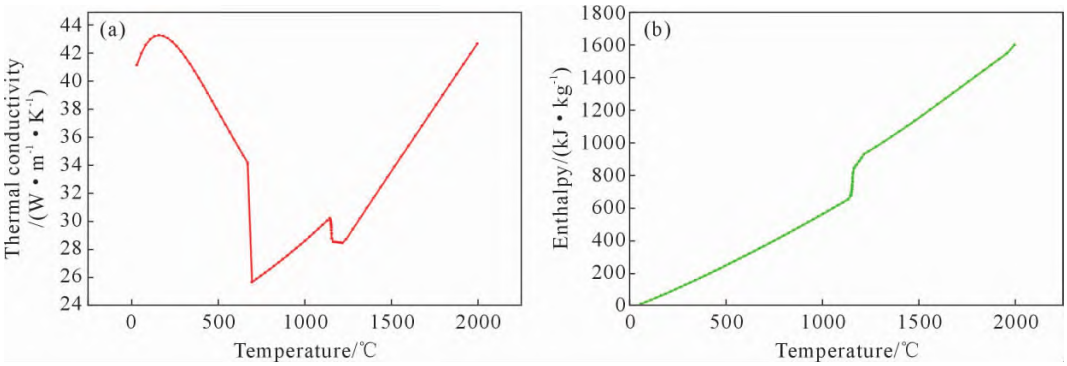


图 10 铁型热物性参数：(a) 热导率；(b) 热焓

Fig.10 Thermophysical parameters of the iron mold: (a) thermal conductivity; (b) enthalpy

ProCAST 反算方法基于软件中已集成的优化工具 Pam-OPT 的自适应响应面法[25]，在 Cast 模块中打开 Optimization 选择 Inverse HTC 进行换热系数反算，在有限元模型中按照实际布置热电偶位置进行网格单元节点选取会存在与实际测温点有些微的偏差，模型为有限元网格模型，实际坐标点与网格节点无法完全重合。将铸件实测温度曲线导入的同时在模型中找到距离实测点最近的网格节点，其最近节点坐标如图 13 所示。

以铸件实测温度曲线为反算基础，运用ProCAST 反算求解模块对铸件/覆砂层的界面换热系数进行反向求解计算。选取 25、1 155、1 182 和 1 350 ℃为温度反算点，分别对应环境温度、固相线、液相线及浇注温度，代表不同阶段的界面传热行为。模拟参数仍取初始值，设定最大迭代次数 10、收敛公差 5%，经多次循环迭代，结果如图 14 所示，从图 14 看出，铸件与覆砂层之间的换热系数是有阶段性变化的，液相线以上为第一阶段，换热系数下降较慢，第二阶段在液相和固相间，换热系数急剧下降，到了固相线以下为第三阶段，换热系数缓慢下降。导致这种情况发生的原因是高于液相线时金属液与覆砂层贴合紧密没有气隙产生，换热系数较高。随着冷却的进行当金属凝固以后，由于金属的液态收缩，与覆砂层

中国知网　https://www.cnki.net

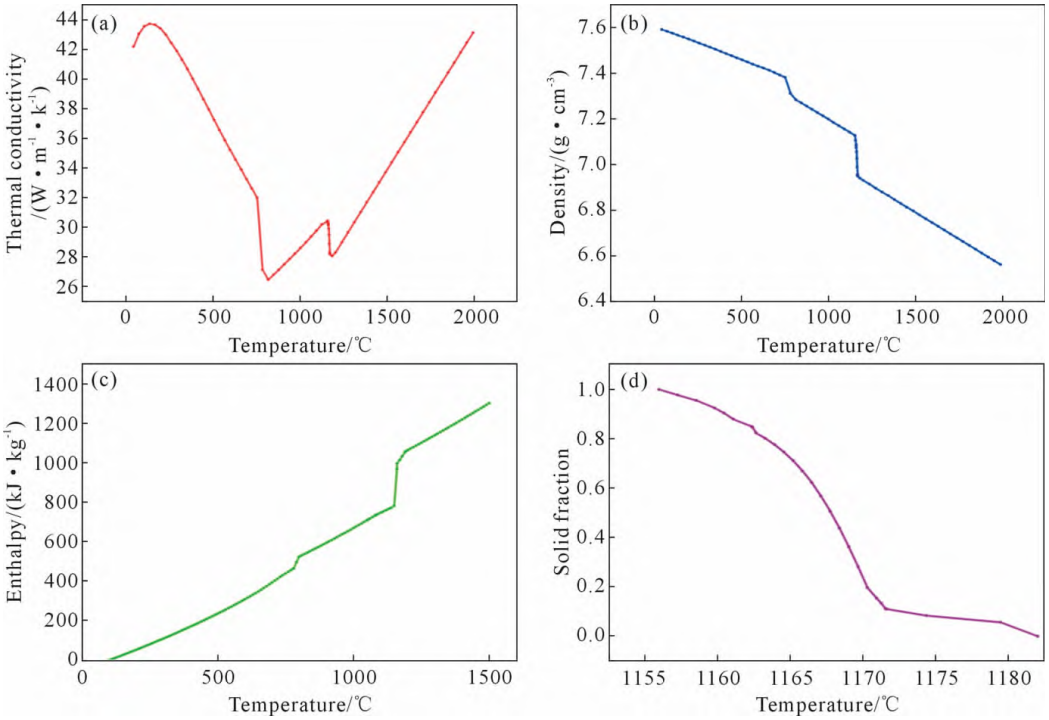


图 11 球墨铸铁热物性参数:(a) 热导率;(b) 密度;(c) 焓变;(d) 固相分数

Fig.11 Thermophysical parameters of ductile iron: (a) thermal conductivity; (b) density; (c) enthalpy variation; (d) solid fraction

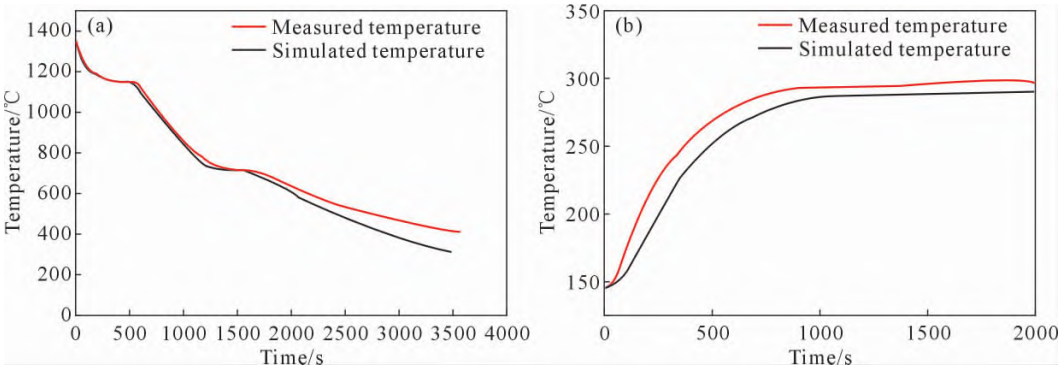


图 12 温度曲线对比:(a) 铸件实测与模拟温度曲线对比;(b) 覆砂层实测与模拟温度曲线对比

Fig.12 Comparison of temperature curves: (a) comparison between measured and simulated temperature curves of the casting; (b) comparison between measured and simulated temperature curves of the sand-coated layer

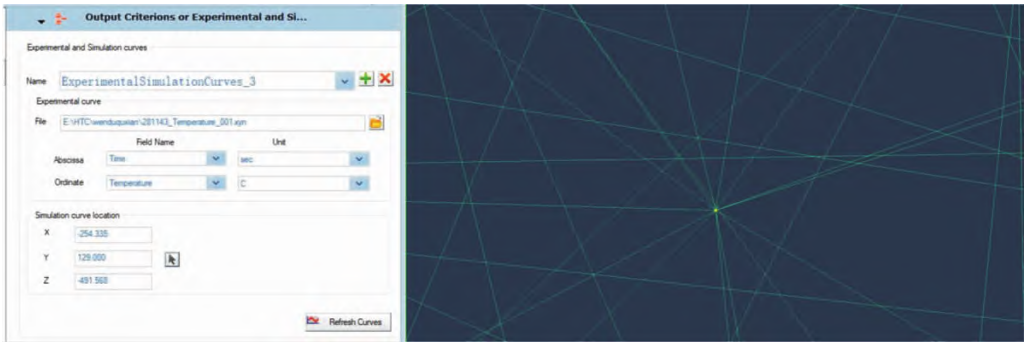


图 13 最近节点坐标位置

Fig.13 Coordinates of the nearest node

之间可能存在气隙导致换热系数的急剧下降，当到达固相线以下时由于固态收缩的产生，换热系数仍缓慢下降。随后，将反算后的铸件与覆砂层的换热系数作为模拟的初始条件，通过在 P2 位置实测的温度曲线导入 ProCAST 来进行反算求解,得到铁型与覆砂层的换热系数是 500 W/(m²·K),图 15 为铁型与覆砂层之间换热系数的反算结果,相比之下,覆砂层–铁型界面在整个浇注与凝固过程中不存在相变及收缩行为,界面接触状态相对稳定,且该界面的温度变化速率和热流敏感性明显低于铸件–覆砂层

中国知网 https://www.cnki.net

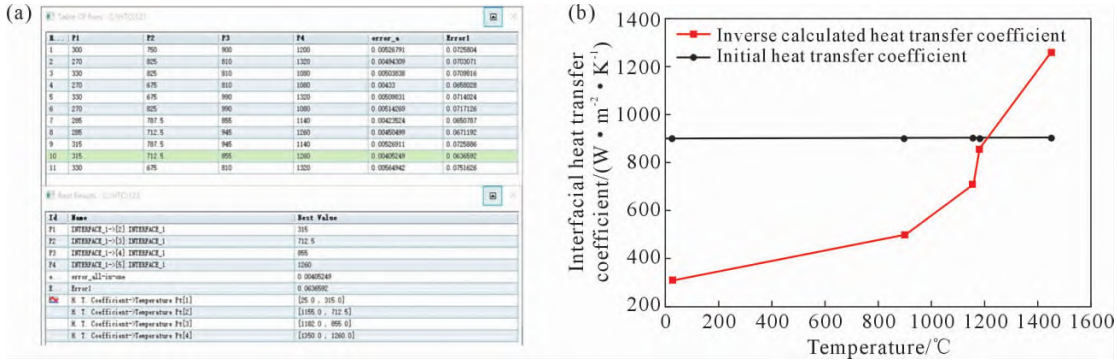
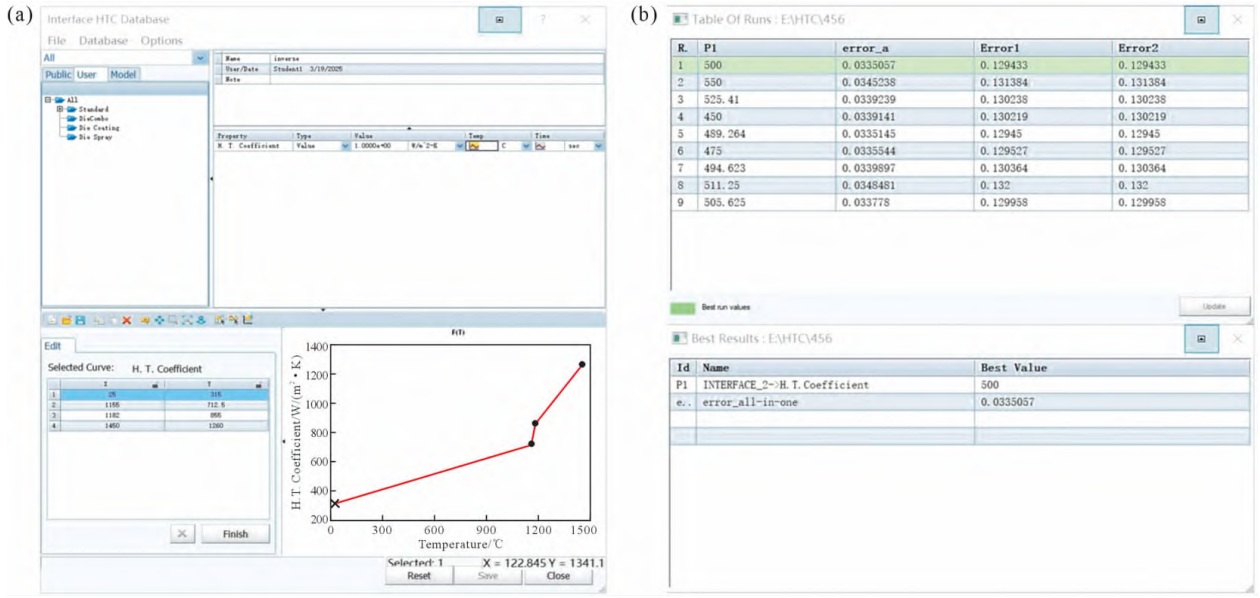


图 14　ProCAST 换热系数反算结果：(a) 各温度段换热系数迭代结果；(b) 铸件与覆砂层换热系数反算与常值对比曲线

Fig.14　Inverse calculation results of the heat transfer coefficient in ProCAST: (a) iterative results of the heat transfer coefficient at different temperature ranges; (b) comparison curves of the inversely calculated and constant heat transfer coefficients between the casting and the sand coating



R.	P1	error_a	Error1	Error2
1	500	0.0335057	0.129433	0.129433
2	550	0.0345238	0.131384	0.131384
3	525.41	0.0339239	0.130238	0.130238
4	450	0.0339141	0.130219	0.130219
5	489.264	0.0335145	0.12945	0.12945
6	475	0.0335544	0.129527	0.129527
7	494.623	0.0339897	0.130364	0.130364
8	511.25	0.0348481	0.132	0.132
9	505.625	0.033778	0.129958	0.129958

Id	Name	Best Value
P1	INTERFACE_2->H. T. Coefficient	500
e..	error_all-in-one	0.0335057

图 15　ProCAST 换热系数反算结果：(a) 铸件与覆砂层反算结果带入；(b) 铁型与覆砂层换热系数反算结果

Fig.15　Inverse calculation results of the heat transfer coefficient in ProCAST: (a) application of the inversely calculated heat transfer coefficient between the casting and the sand coating; (b) inverse calculation results of the heat transfer coefficient between the iron mold and the sand coating

界面。因此，换热系数采用常值即可。将反求得到的铸件与覆砂层以及覆砂层与铁型的最优换热系数作为输入，与图 9~11 中同样随温度变化的铸件、覆砂层和铁型的材料热物性值作为边界条件，其他参数设置不变，重新进行正向求解。

3.4　反算结果验证

图 16 是模拟结果中导出的温度曲线和实际温度曲线进行比较，总体来看曲线拟合较高，从图 16a 中可以看出，铸件在共晶反应与共析反应温度段之间与实测温度曲线仍存在一定的偏差。从图 16b 中可以看出，在 0~1 000 s 内，覆砂层实测温度略高于模拟温度曲线，在 1 500 s 后模拟与实际温度曲线几乎重合，反算后得到的模拟温度曲线与实测温度曲线整体偏差在 5%以内。表明采用以上数值进行温度场模拟，具有一定的准确性。图 17 为有、无反算换热系数的铸件凝固总体时间模拟图。从图 17a 和 b 对比中可以看出，采用反算得到的换热系数后，曲轴局部区域的凝固时间明显延长，尤其在轴颈与曲拐过渡等厚大部位表现更为显著，需要指出的是，凝固时间的变化并非单一参数作用的结果，而是界面换热系数、材料热物性及几何条件综合作用的体现。采用反算换热系数后，模拟得到的凝固时间分布发生了明显变化，反映出恒定换热系数在描述凝固阶段传热行为时存在一定偏差。图 18 和 19 分别为覆砂层与铸件在不同凝固时间下的温度场模拟分布图。图 20 为有、无反算换热系数的缺陷模拟图，从图 20a 和 b 可以看出没有采用反算换热系数的情况下进行模拟，采用两种不同换热系数条件下，缺陷的位置存在偏差。图 21 为铸件在中部位置取试样块进行的工业 CT 图与 SEM 图，采用的是 YXLON 设备在 300 kV 分辨率 31 μm 下得到的，从 CT 上看在 31 μm 分辨率下没有看到明显的缺陷，在 SEM 下

中国知网　https://www.cnki.net

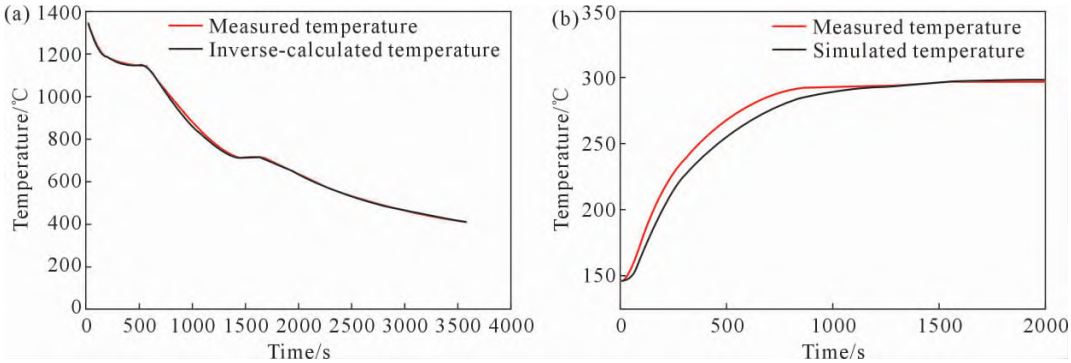


图 16 反算优化后温度曲线对比:(a) 铸件实测与反算温度曲线对比;(b) 覆砂层实测与反算温度曲线对比

Fig.16 Comparison of temperature curves after inverse optimization: (a) comparison between measured and inversely calculated temperature curves of the casting; (b) comparison between measured and inversely calculated temperature curves of the sand-coating layer

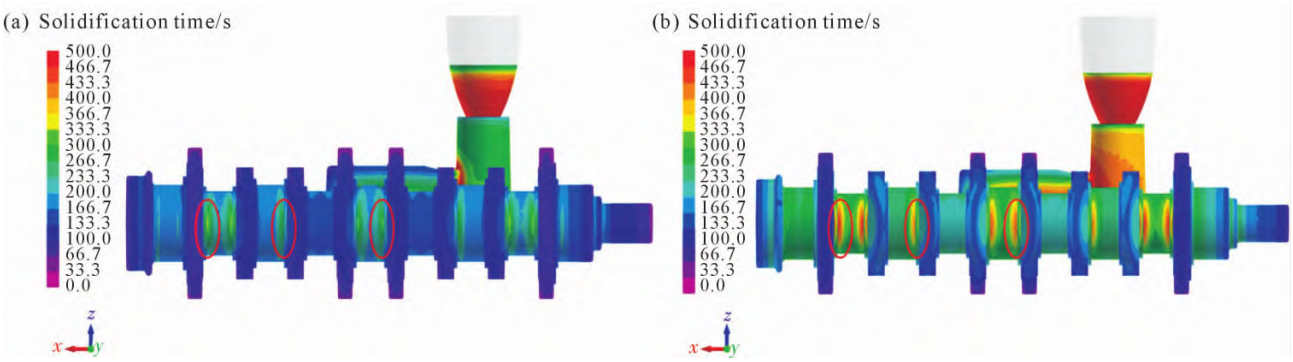


图 17 铸件各部位凝固时间数值模拟结果:(a) 无反算模拟结果;(b) 反算模拟结果

Fig.17 Numerical simulation results of the solidification time in different regions of the casting: (a) simulation result without inverse determination; (b) simulation result with inverse determination

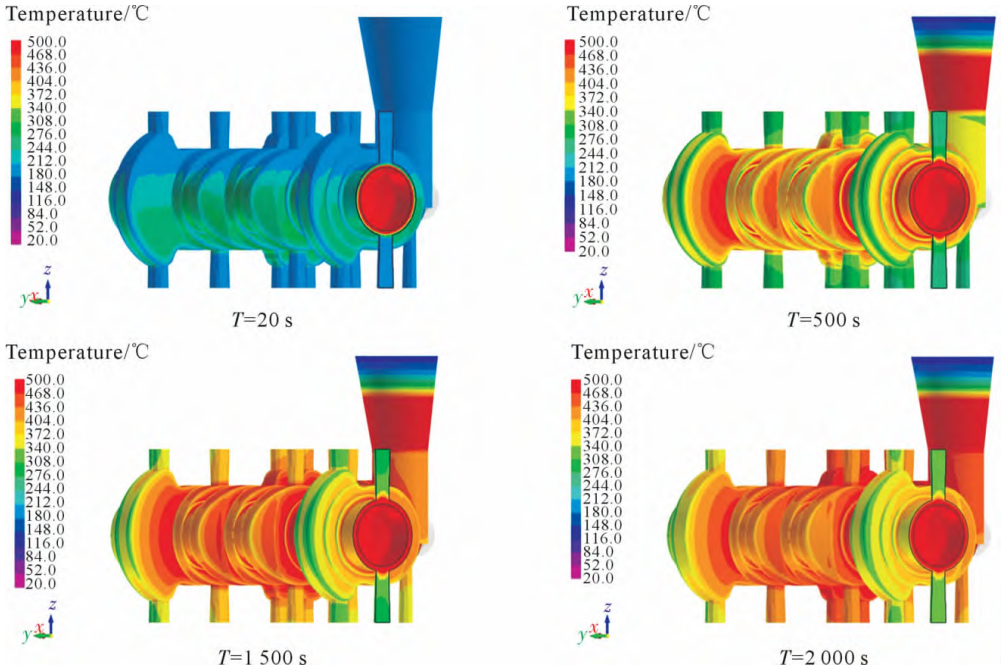


图 18 反算后覆砂层不同凝固时刻温度场

Fig.18 Temperature fields of the sand-coated layer at different solidification times after inverse determination

铸件中部位置存在 25 μm 左右微观的缩孔。通过与实际的对比可以看出采用反算后的换热系数进行数值模拟得到的缺陷模拟结果图更与实际相符合,因此对于铁型覆砂球墨铸铁曲轴工艺而言，通过反算铸件与覆砂层之间的换热系数从而能够有效的提高仿真精度得到准确的模拟结果。

4 结论

(1)在实际铁型覆砂工艺球墨铸铁曲轴生产过程中，通过在铸件内及覆砂层内分别布置一个热电

中国知网 https://www.cnki.net

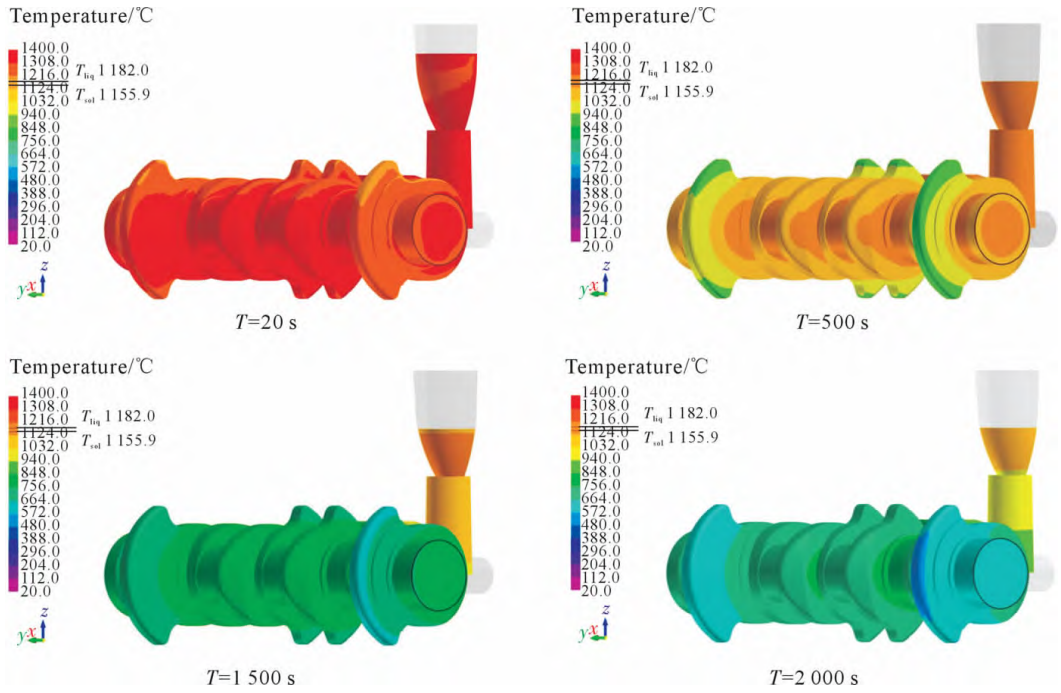


图 19　反算后铸件不同凝固时刻温度场

Fig.19　Temperature fields of the casting at different solidification times after inverse determination

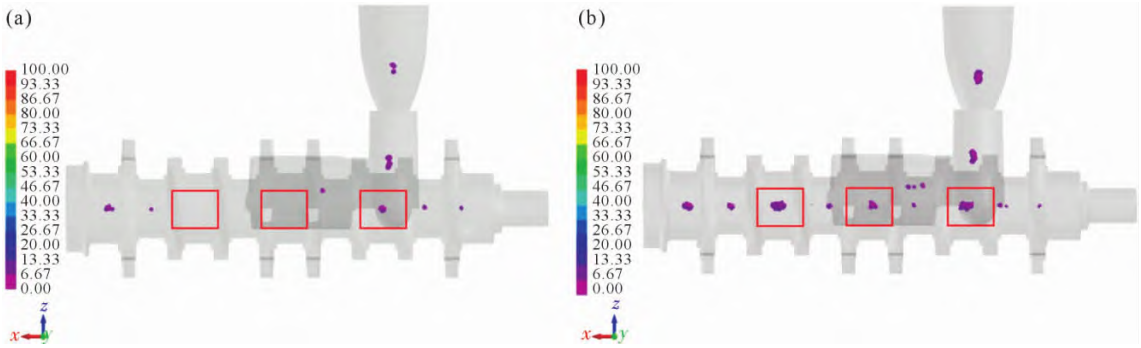


图 20　铸件缺陷数值模拟结果;(a) 无反算模拟结果;(b) 反算模拟结果

Fig.20　Numerical simulation results of casting defects: (a) simulation result without inverse determination; (b) simulation result with inverse determination

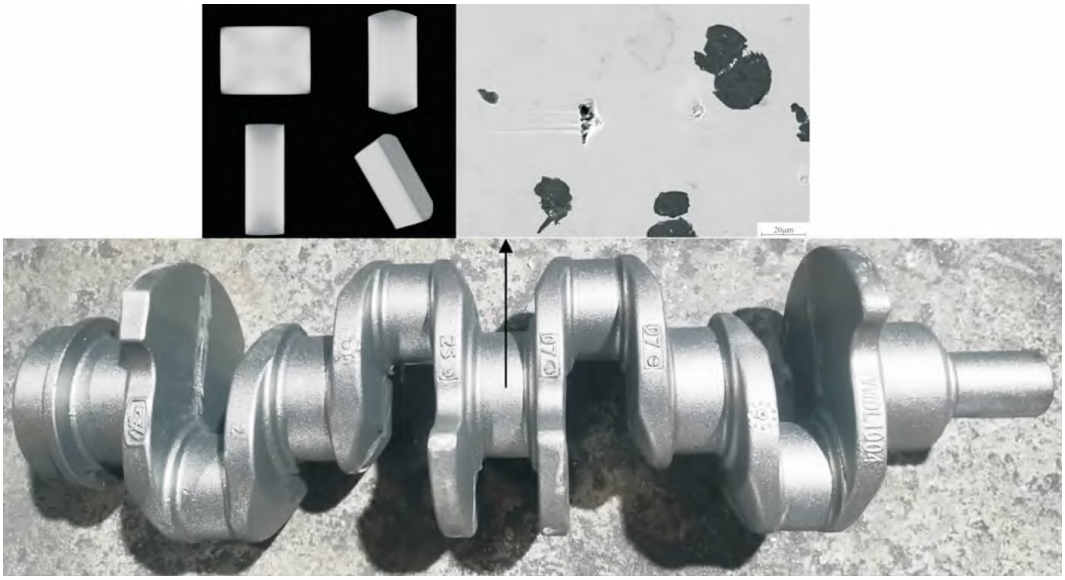


图 21　实际铸件缺陷取样位置 CT 与 SEM 图

Fig.21　CT and SEM images of defect sampling locations in actual casting

中国知网　https://www.cnki.net

偶，获得实际浇注过程中充型与凝固的温度曲线。

(2)使用 ProCAST 中 Optimization 模块来反算铸件与覆砂层以及覆砂层和铁型之间的换热系数，通过将反算优化后得到的换热系数作为正向输入模拟可以获得与实验曲线较好匹配的温度曲线。采用反算后的换热系数进行模拟得到的温度曲线与实测温度曲线偏差不超过 5%。

(3)反算结果表明，铸件–覆砂层界面的换热系数在冷却凝固过程中呈现阶段性变化特征：高温液态阶段换热系数维持在较高数值；当温度降低并进入液–固相区后，换热系数由液相线(约 855 W/(m^2·K))附近下降至固相线(约 712.5 W/(m^2·K))附近；随着温度进一步降低至固相线以下，换热系数进一步衰减，低温阶段最终稳定至约 315 W/(m^2·K)。

(4)不同铸造工艺条件下，界面换热行为存在明显差异，若直接采用通用推荐参数进行数值模拟，可能导致结果偏离实际工况。通过反算方法对关键界面换热系数进行优化，有助于提高温度场与凝固过程模拟的准确性。通过反算获得的 HTC 参数可为铁型覆砂球墨铸铁曲轴铸件的数值模拟及工艺参数优化提供工程依据。

针对未来的研究工作，有必要在类似铁型覆砂曲轴铸件上验证本研究所得结果，将优化后的 HTC 值模拟结果与实际工业案例进行对比。此外，还需更准确地对材料热物性进行表征，以进一步解释模拟中出现的温度波动现象。例如，将通过实验测试测定铸铁和覆砂层的热导率，因为该参数对温度变化趋势及铸件的凝固条件具有重要影响。

参考文献：

[1] ZHANG P, LI X T, ZANG X L, DU F S. Optimizing casting parameters of steel ingot based on orthogonal method[J]. Journal of Central South University of Technology, 2008, 15: 296-300.

[2] ZHANG A, LIANG S, GUO Z P, XIONG S M. Determination of the interfacial heat transfer coefficient at the metal-sand mold interface in low pressure sand casting[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2017, 88: 472-482.

[3] DONG S J, SHAN Z D, LIN F, YANG H Q, LIANG X. Determination of interfacial heat transfer coefficient at the frozen sand mold casting process of ZL101 alloy[J]. Journal of Materials Science and Technology, 2024, 194: 28-42.

[4] GOWSALYA L A, AFSHAN M E. Heat transfer studies on solidification of casting process[M]//ABDALLAH Z, ALDOUMANI N. Casting Processes and Modelling of Metallic Materials. Oxford: Elsevier, 2021: 41-60.

[5] LAU F, LEE W B, XIONG S M, LIU B C. A study of the interfacial heat transfer between an iron casting and a metallic mould[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 79(1-3): 25-29.

[6] PRABHU K N, GRIFFITHS W. Metal/mould interfacial heat transfer during solidification of cast iron in sand moulds[J]. International Journal of Cast Metals Research, 2001, 14(3): 147-155.

[7] HAMASAIID A, DARGUSCH M, DAVIDSON C, LOULOU T, DOUR G. A model to predict the heat transfer coefficient at the casting-die interface for the high pressure die casting process[A]. AIP Conference Proceedings[C]. Melville: American Institute of Physics, 2007. 1211-1216.

[8] LEWIS R W, RANSING R S. A correlation to describe interfacial heat transfer during solidification simulation and its use in the optimal feeding design of castings[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 1998, 29(2): 437-448.

[9] 曹永友，熊守美，郭志鹏. 压铸压室内部界面传热反算模型的建立和应用[J]. 金属学报，2015, 51(6): 745-752.
CAO Y Y, XIONG S M, GUO Z P. Development of an inverse heat transfer model between melt and shot sleeve and its application in high pressure die casting process[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2015, 51(6): 745-752.

[10] 董国疆，李世德，王克奇，王海翔，王佶，毕江. 铝车轮铸造模具水冷界面换热系数反算求解[J]. 中国有色金属学报，2024, 34(5): 1495-1505.
DONG G J, LI S D, WANG K Q, WANG H X, WANG J, BI J. Inverse calculation of heat transfer coefficient of water-cooled interface in aluminum wheel casting mold[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024, 34(5): 1495-1505.

[11] 冀晓磊，孟晓东，张荣强，邢昌勇，王琳，刘鑫霞，刘晓杰，郑宇航. 熔模铸造 ZL114A 铝合金凝固过程界面换热系数研究[J]. 铸造技术，2024, 45(4): 395-400.
JI X L, MENG X D, ZHANG R Q, XING C Y, WANG L, LIU X X, LIU X J, ZHENG Y H. Study on interface heat transfer coefficient during solidification of an investment casting ZL114A aluminum alloy[J]. Foundry Technology, 2024, 45(4): 395-400.

[12] 刘晋. 铸造模拟关键热参数的反算优化及应用研究[D]. 成都：西华大学，2020.
LIU J. Research on inverse optimization and application of key thermal parameters in casting simulation[D]. Chengdu: Xihua University, 2020.

[13] 孟晓东，张荣强，冀晓磊，邢昌勇，李波，许龙欢. 熔模铸造 ZM5 合金界面换热系数研究[J]. 铸造，2022, 71(9): 1154-1157.
MENG X D, ZHANG R Q, JI X L, XING C Y, LI B, XU L H. Research on interface heat transfer coefficient of ZM5 alloy under the condition of investment casting[J]. Foundry, 2022, 71(9): 1154-1157.

[14] ZHAO X, JIN K Z, YAN M Y, NAN P Y, ZHOU F XIN G G, LIM K S, AHMAD H, ZHANG Y P, YANG H Z. Inverse heat transfer for real-time thermal evaluation of aircraft thermal protection structure with embedded FBG sensors[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 260: 124869.

[15] GUAN B, WANG D H, XIAO C B, SHU D, SUN B D. Real-time correction model-based simulation for prediction of shrinkage porosity in investment casting[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2025, 137: 479-491.

[16] CHEN Y H, LIU K, LIAO D M, JI Z J, ZHANG J H. Simplified inverse heat conduction method for interfacial heat transfer coeffi-

中国知网 https://www.cnki.net

cient of casting process based on simulated feedback[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2025, 61: 103506.

[17] VERGNANO A, FACONDINI P, MORSELLI N, VERONESI P. Identification of heat transfer parameters for gravity sand casting simulations[J]. Machines, 2024, 12: 414.

[18] KHALIFA D, MZALI F. Study of the effect of green sand properties on thermal conductivity variation of sand mould[J]. Journal of Engineering and Applied Science, 2024, 71: 178.

[19] 李日,冯传宁. 界面换热系数和型砂热物性参数对凝固过程影响程度的比较[J]. 铸造技术,2015, 36(2): 389-393.
LI R, FENG C N. Influence of interface heat transfer coefficient and thermal physical parameters of mold sand on solidification process[J]. Foundry Technology, 2015, 36(2): 389-393.

[20] 郑行,郝新,闫彬,刘国怀,王晔,郭钊,王昭东. 熔模精铸型壳预热转移过程温度场及换热规律研究[J]. 精密成形工程,2022, 14(1): 141-146.
ZHENG H, HAOX, YANB, LIU G H, WANG Y, GUO Z, WANG Z D. Temperature field and heat transfer regularity of investment casting mold shell during preheating and transfer[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14(1): 141-146.

[21] 李建强. 大型铸钢件凝固过程数值模拟参数值优化[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
LI J Q. Numerical simulation f solidification process for large steel casting and optimization of parameters[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.

[22] 郭志鹏,熊守美,冒尚铉,崔正吉. 热传导反算模型的建立及其在求解界面热流过程中的应用[J]. 金属学报,2007(6): 607-611.
GUO Z P, XIONG S M, CHO S H, CHOI J K. Development of an inverse heat transfer model and its application in the prediction of the interfacial heat flux [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2007 (6): 607-611.

[23] 殷亚军,涂志新,田桥,周建新. 基于反热传导法的消失模铸件/铸型界面传热系数研究[J]. 特种铸造及有色合金,2018, 38(4): 391-394.
YIN Y J, TU Z X, TIAN Q, ZHOU J X. Interfacial heat transfer coefficient between the iron castings and mold in lost foam casting based on inverse heat transfer method[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2018, 38(4): 391-394.

[24] BECK J V, BLACKWELL B, HAJI-SHEIKH A. Comparison of some inverse heat conduction methods using experimental data[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1996, 39 (17): 3649-3657.

[25] MANTELLI A, POLA A, GELFI M, CICARDI C, BERGAMASCHI F, SVANERA M. Optimization of HTC value by inverse model based on experimental measurement of a 26.6-ton steel ingot[A]. Proceedings of the 2023 European Council for Modelling and Simulation (ECMS)[C]. Virtual Conference, 2023.

(责任编辑:宫文婧)

中国知网 https://www.cnki.net