

CAE 技术结合测温试验在树脂砂实型铸造中的应用

曹海, 王宜, 王磊, 吴锦江

(天津虹冈铸钢有限公司, 天津 300457)

摘要: 在呖喃树脂砂实型铸造的基础上, 通过对铸件凝固过程中铸件—型砂界面处测温得到温度变化曲线, 结合ADSTEFAN数值模拟软件的反算功能优化热物性参数, 并验证其在实际生产中的有效性, 以达到提高CAE计算精度的目的, 为铸造工艺优化提供更精准的参考依据。其次用数值分析软件拟合出温度曲线及函数表达式, 可以探究实际生产条件下厚大断面铸件的温度变化曲线特征以及本体金相状态与冷却速率之间的关系, 为铸件局部位置提升珠光体含量的研究提供参考和新思路。

关键词: 铸造CAE; 实型铸造; 厚大球铁铸件; 热物性参数优化; 数据拟合

铸造CAE技术作为铸造现代化、信息化生产的标志之一, 对提升铸造工艺水平、降低铸件报废率有重要作用, 铸件成形过程数值模拟中热阻抗值、比热容、热导率等热物性参数对温度场计算结果准确性有显著影响。计算结果如冷却速度、温度梯度、缩松等都是基于温度场数值模拟结果的再计算, 因此温度场的准确与否对数值模拟结果的可靠性起着至关重要的作用^[1]。本研究通过CAE技术结合测温试验优化热物性参数, 提高数值模拟准确性。

1 测温试验方案及实施

1.1 铸件结构分析及数值模拟参数简介

研究测试对象为汽车冲压模具铸件, 材质选用GGG70L球墨铸铁, 外廓尺寸1 500 mm × 2 400 mm × 300 mm, 截面厚度50~80 mm, 质量2 700 kg, 属厚大截面铸件。浇注温度(1 415 ± 2) °C, 采用自硬呖喃树脂砂实型铸造, 冷却测温时间设定为50 h。通过将泡沫模样充当实型进行浇注, 该类铸造方式免除了高额铸造模具制作费用, 对小批量铸件生产具有较大的成本优势^[2-3]; 但泡沫模样在浇注过程中燃烧产生大量气体, 强大气压对砂型壁面冲击较大, 容易出现飞边, 另一方面燃烧产生的残渣较多, 需专门的集渣工艺以降低底面残渣几率。铸件GGG70L与呖喃树脂砂热物性参数初始值如表1所示, 热阻抗值参数初始值如表2所示。

1.2 测温试验简介

因为球墨铸铁在浇注及凝固过程中, 周围型砂长时间处于1 000 °C以上高温,

表1 GGG70L材质与呖喃树脂砂热物性参数初始值

Table 1 The initial thermophysical parameters of the GGG70L material and furan resin sand

项目	液相线	固相线	结晶潜	热导率	比热容	密度
	温度/°C	温度/°C	热/(J·g ⁻¹)	/(W·cm ⁻¹ ·°C ⁻¹)	/(J·g ⁻¹ ·°C ⁻¹)	/(g·cm ⁻³)
GGG70L	1 150	1 145	50	0.05	0.17	7.2
呖喃树脂砂	-	-	-	0.002 5	0.25	1.6

作者简介:

曹海(1987-), 男, 中级机械工程师, 研究方向为汽车冲压模具类铸件工艺设计、消失模铸造工艺研发、高淬火性能铸铁材质研发、CAE技术在生产中的应用等。电话: 022-66231080, E-mail: caohai@trhccn.com

中图分类号: TG235

文献标识码: B

文章编号: 1001-4977(2024)

01-0107-07

收稿日期:

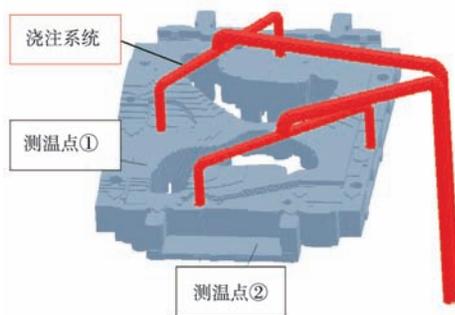
2023-09-26 收到初稿,

2023-11-29 到修订稿。

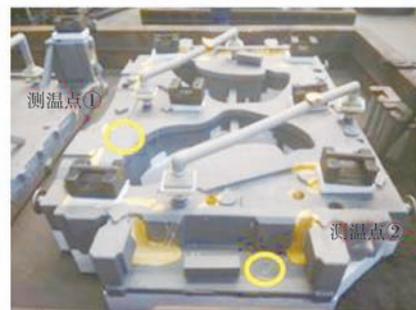
表2 热阻抗值设定初始值
Table 2 The initial thermal resistance

界面	冷铁-型砂	冷铁-铸件	铸件-型砂
热阻抗值/($\text{cm}^2 \cdot \text{C} \cdot \text{s} \cdot \text{J}^{-1}$)	5	30	50

并伴随着周围强烈的热辐射及物理化学反应的复杂环境，对于热电偶的耐高温及抗氧化性方面存在较高要求，经过查阅相关资料^[5-8]，测温端热电偶采用K型热电偶，并设置相应的补偿导线。测温设备选用HE130X测量仪。



(a) 试验—测温点分布



(b) 实际模型

图1 试验—测温点分布与实际模型

Fig. 1 The temperature measuring locations and the pattern in the first experiment

2 试验结果处理及分析

2.1 测温曲线分析及数值模拟参数优化

通过以上测温试验，得到温度数据曲线并与数值模拟结果对比，如图2所示。

测温点选择在距铸件表面一定距离的型砂中，该温度曲线虽不能直接反应铸件本体凝固冷却时的温度变化，但也能在一定程度上较好地推测出铸件温度变化趋势。凝固温度变化曲线图中实线为测温点实际温度，虚线为模拟软件ADSTEFAN的对应测温点计算结果。浇注开始后，测温点实际砂温在前5 min内急速上升，之后升温速度减慢，直至温度最高点。根据观察

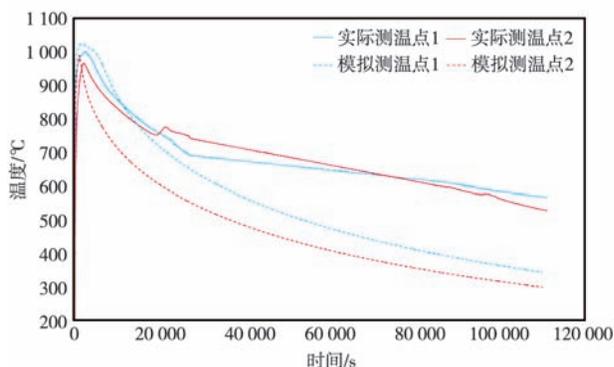


图2 测温及数值模拟温度曲线对比图

Fig. 2 The temperature measuring curves compared to the simulations

为避免热电偶及其保护管对铸件表面的损害，造型作业过程在设置热电偶时，泡沫实型内不设测温点，测温点分布于距模型表面2~5 mm的型砂中。因为测温点不与铸件直接接触，为提高测量精度，使热电偶温度更准确和灵敏地反映周围型砂温度，热电偶测温端不设置陶瓷保护管。测温试验热电偶设置及软件ADSTEFAN设定测温点如图1所示，数值模拟设置的测温点位置及序列号与实际生产设置的测温点保持一致。

测温点砂温从最高点下降后，曲线斜率逐渐变大，说明该冷却阶段降温速度出现逐渐变慢的情况。

对比实际温度变化曲线和计算温度曲线虽趋势大致相同，但两者实际差异明显过大，如测温结束温度的实际值和计算值之间部分区域差值超过200 °C，计算误差值过大；另一方面数值模拟温度曲线在冷却过程中存在冷却速度大于实际温度变化的情况，这也导致了两者的温度误差随着时间的推移而越来越大。数值模拟温度变化结果与实际情况的过大偏差的这种情况，对于其他数值模拟结果如缩松预测的准确度也存在较大影响。

为提升计算精度，有必要以该温度曲线为蓝本，通过ADSTEFAN的反算系统优化模拟软件中的热物性参数、热阻抗值等，使计算结果更贴近实际。在ADSTEFAN材料校验工具模块中，输入实际测温点1和测温点2的温度变化曲线，通过多次调整参数后并验证计算，将计算温度曲线与实际温度曲线的标准偏差从初始271降低到30。得到优化后的数值模拟参数如表3和表4所示。

使用优化后的参数计算得到的温度曲线与实际温度曲线对比情况如图3所示，新温度曲线虽与实际温度曲线具有一定程度偏差，与之前数值模拟温度曲线相比，该曲线与实测温度变化轨迹较为贴近，最大温度

表3 GGG70L材质与呋喃树脂砂热物性参数优化值

Table 3 The optimized thermophysical property parameters of the GGG70L material and Furan resin-bonded sand

项目	液相线温度/ $^{\circ}\text{C}$	固相线温度/ $^{\circ}\text{C}$	结晶潜热/ $(\text{J}\cdot\text{g}^{-1})$	热导率/ $(\text{W}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1})$	比热容/ $(\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1})$	密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$
GGG70L	1 150	1 145	40	0.05	0.25	7.2
呋喃树脂砂	-	-	-	0.000 8	0.45	1.6

表4 热阻抗值设定优化值

Table 4 The optimized thermal resistance

界面	冷铁-型砂	冷铁-铸件	铸件-型砂
热阻抗值/ $(\text{cm}^2\cdot^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}\cdot\text{J}^{-1})$	5	30	150

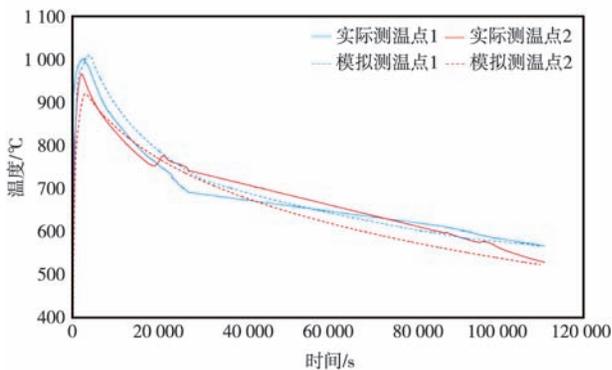
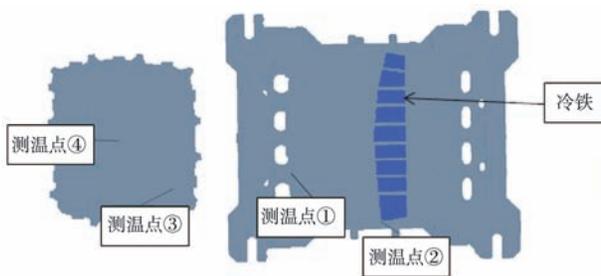


图3 测温曲线与参数优化后数值模拟温度曲线对比图

Fig. 3 The temperature measuring curves compared to that of numerical simulation after parameter optimization



(a) 测温点分布



(b) 实际模型

图4 试验二测温点分布与实际模型

Fig. 4 The temperature measuring locations and the pattern in the second experiment

统及反复模拟对比测算,对冷铁相关的热阻抗值优化结果为:冷铁-型砂界面热阻抗值为 $30\text{ cm}^2\cdot^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}\cdot\text{J}^{-1}$ 、冷铁-铸件界面热阻抗值为 $50\text{ cm}^2\cdot^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}\cdot\text{J}^{-1}$ 。观察实际温度曲线图,可以发现在实验测温过程中,某些测温点在某些时段温度(如测温点3在 $7\ 000\sim 33\ 000\text{ s}$ 区间段)发生了比较剧烈波动,表现为温度曲线在某些区段呈现出锯齿状波动。导致这类情况的可能性原因是在铸造浇注过程中,大量高温铁液短时间内涌入泡沫实型,型腔温度的急剧上升及泡沫猛烈燃烧所产生的气压及热辐射对型砂的冲击导致型腔周围型砂出现微

误差值能控制在 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内。这也在一定程度上说明了优化后的参数更贴合实际生产条件。

2.2 数值模拟参数合理性验证

为验证优化后数值模拟参数的合理性和厂内生产条件的普遍适用性,在同等生产条件下,再进行测温试验二,将测温点增加至4个,同时引入新元素冷铁(材质HT300),探究冷铁对周围型砂温度变化的影响。本次测温试验铸件材质仍采用GGG70L,浇注温度($1\ 415\pm 2$) $^{\circ}\text{C}$,其他试验设置条件如热电偶选择、型砂树脂配比等与第一次试验均保持一致。采用同一砂箱中的两个铸件为试验样本,铸件质量分别为 $6\ 900\text{ kg}$ 和 $1\ 800\text{ kg}$ 。每个铸件设置2个测温点。测温点分布情况如图4所示,与铸件表面距离控制在 $2\sim 5\text{ mm}$,其中测温点2距离冷铁边缘 $25\sim 35\text{ mm}$ 。

采用原始参数和优化参数分别进行CAE计算分析,并分别与实际温度曲线进行对比,得到图5及图6铸件凝固过程温度变化曲线。采用ADSTEFAN反算系

小裂缝,在后期铸件凝固膨胀过程中型砂裂缝断断续续生长,改变了铸件-型砂界面散热条件,导致界面附近的测温点型砂温度异常波动。测温点2也可能是因为该类原因在测温过程热电偶发生断裂,导致其在约 13 h 后温度数据缺失。

采用原始参数计算得到的温度曲线与实际温度变化情况差异较大。以测温点1温度曲线为例:两者温度最高点存在差异,约 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,同时从曲线走向看,两者曲率相近,在以后较长的一段时间内模拟与实际温度差值呈现出减小的趋势。使用优化参数的测温点3

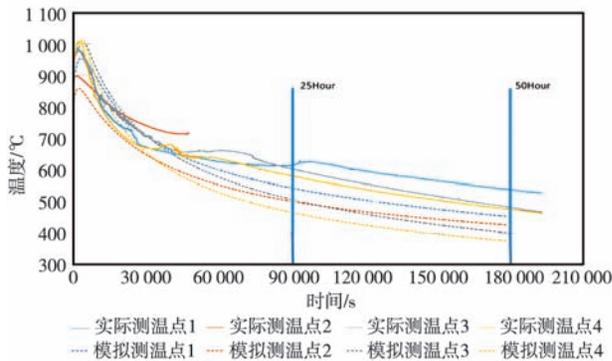


图5 测温曲线与原始参数的计算温度曲线对比图

Fig. 5 The temperature measuring curves compared to the initial parameters simulations

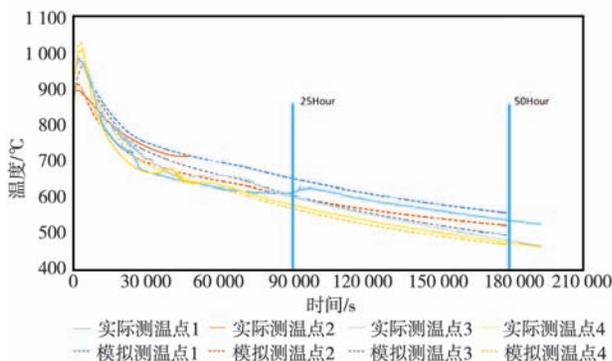
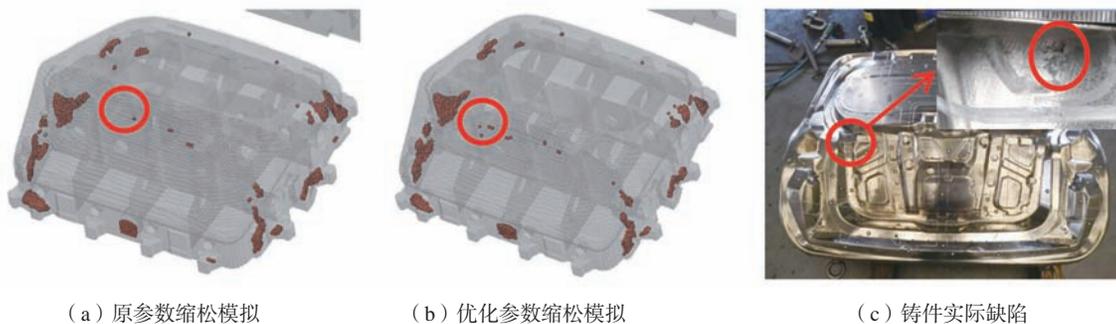


图6 实际温度曲线与优化参数模拟温度曲线对比图

Fig. 6 The temperature measuring curves compared to the optimized parameters simulations



(a) 原参数缩松模拟

(b) 优化参数缩松模拟

(c) 铸件实际缺陷

图7 缩松数值模拟与实际情况对比图

Fig. 7 The shrinkage simulation compared to the casting

况更符合，同时优化参数对提高缩松模拟精度具有良好的效果。

3 凝固冷却温度曲线对金相影响预测探究

球墨铸铁金相组成及状态的影响因素有很多，如合金成份、熔炼工艺、球化和孕育工艺等重要方面^[1]。

和测温点4计算温度变化曲线与实际温度变化曲线贴合情况良好；测温曲线1在中期7~25 h时间范围内，与实际有一定差距，其他时间段两曲线贴合良好。测温点2在实际测温过程中故障，数据部分缺失，不做评价。原参数与优化参数相比，其计算值与实际温度曲线标准偏差由245降低为54。综上，优化参数后的模拟曲线比原参数更贴近实际生产，即优化后的数值模拟参数符合本厂实际生产情况。

2.3 缩松模拟结果验证分析

本研究ADSTEFAN软件缩松预测所采用的方法是新山判据结合流动临界固相率：固相率在0~0.75（临界固相率）周围补缩通道畅通，当固相率高于临界固相率，补缩量随新山判据值减小及固相率的增大而减少。数值模拟参数优化的最终目的是确保计算结果更好地贴近实际，为铸造工艺制作提供可靠依据，以便技术人员在铸造数值模拟的基础上分析，针对各类潜在铸造缺陷提出工艺改善措施。

本研究试验对象汽车冲压模具凸模铸件在冲压型面机加工作业中发现一处弥散分布的缩松，如图7所示。图中可以看出两个数值模拟结果虽然都能反馈出缩松缺陷的大致位置，但不同的是：原参数计算结果显示缩松轻微，且位置存在少许偏差，而优化参数数值模拟结果显示缩松比较严重，更贴合实际情况。

综上：通过测温实验结合CAE技术，优化后ADSTEFAN数值模拟参数的温度曲线与本公司实际情

以上影响因素在同一砂箱内的不同铸件或同一铸件的情况下基本一致，然而铸件各位置的金相却表现出各不相同，这是因为铸件各处结构不一致，热量和散热条件不尽相同，导致其冷却速度不一致。冷却速度对金相组成具有较大的影响。

3.1 温度曲线数据处理

将测温试验二的凝固温度变化曲线数据输入到

数据分析软件，拟合计算出时间—温度函数关系。因为测温曲线在某些时间段温度均出现过大的锯齿状波动，不利于数据拟合及规律探索；另一方面，以上两次测温试验也在一定程度上证明优化参数的计算温度曲线与测温曲线较为贴合，因此为节约研究成本费用，后续此类探究以数值模拟温度曲线作为研究对象，不重复测温试验。分别将四个测温点计算温度变化曲线的温度—时间数据输入至数据分析软件，得到拟合曲线及多项式函数关系如图8所示。4条拟合曲线的R-square函数确定系数分别为：0.999 6、0.999 2、0.998 9和0.999均接近数值1，说明拟合效果良好。

对以上4个测温点的温度函数曲线分别求导，得到各测温点的冷却函数及曲线如图9所示。观察各图的冷却速度变化走势，可以发现测温点1和测温点2温度变化曲线的形状具有很强的相似性；测温点3和测温点4也具有相同的特点，只是各曲线具体数值如最低点有一定差别。该试验一箱两件，测温点1和2属同一铸件，测温点3和4同属于另一铸件，也从另一方面说明：凝固冷却过程中，铸件整体散热条件基本恒定，铸件表面各处冷却速率变化趋势基本相同。

3.2 铸铁组织与冷却速率的关系探究

通过对温度函数求导得到冷却速度函数，以此可

以得到铸件凝固过程中冷却速度的变化情况，结合各测温点处铸件珠光体情况可探究现场条件下珠光体与冷却速度两者之间的大致关系。片状珠光体转变温度约为700 ℃^[4]，为方便计算，各测温点700 ℃降温至650 ℃的平均冷却速率分别为：0.089 ℃/min、0.11 ℃/min、0.109 ℃/min、0.14 ℃/min。各测温点金相珠光体情况如图10所示，珠光体含量分别为75.6%、82.1%、83.5%、86.9%。在该区间段，珠光体含量随冷却速度的加快基本呈增长趋势。在该冷却速率区间内，两者函数关系为：

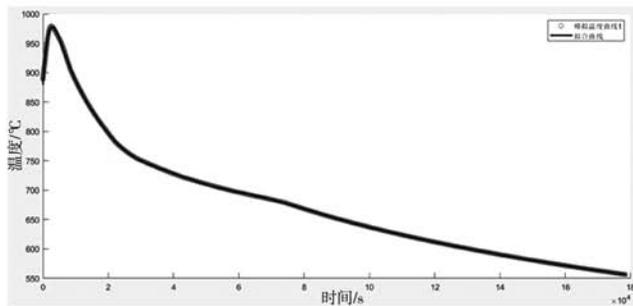
$$C_p = -42.3 (dT/dt)^2 + 11.8 (dT/dt) + 0.033 1$$

式中： C_p 为珠光体含量； dT/dt 为冷却速率。

该函数表达式的精确度可以通过增加测温点或多次测温试验等方式进一步优化。在铸件某些区域对珠光体含量有特定要求的情况下，通过该函数数据及表达式，可推算珠光体含量大致分布情况，进而对预测珠光体不足区域可采取调节该区域冷却速度，如设置合适厚度的冷铁，以稳定铸件整体的珠光体含量。

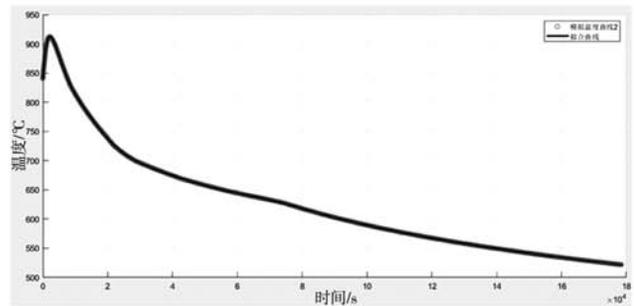
4 结论

本研究面向工厂实际生产，具有较强针对性。其数值模拟参数优化仅适用于实验对象工厂，不具有普



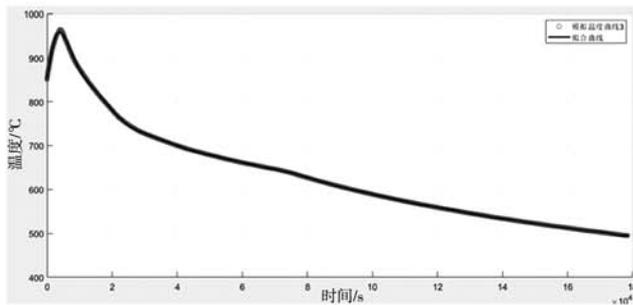
$$y = 6.919E-38x^8 - 1.988E-32x^7 + 2.419E-27x^6 - 1.624E-22x^5 + 6.565E-18x^4 - 1.64E-13x^3 + 2.491E-09x^2 - 2.148E-05x + 0.07907x + 876.4;$$

(a) 测温点1拟合函数及曲线



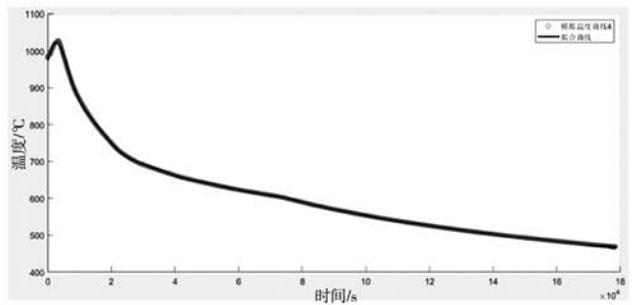
$$f(x) = 7.893E-38x^8 - 2.243E-32x^7 + 2.692E-27x^6 - 1.775E-22x^5 + 7.004E-18x^4 - 1.69E-13x^3 + 2.442E-09x^2 - 1.95E-05x^2 + 0.06208x + 842.7$$

(b) 测温点2拟合函数及曲线



$$f(x) = 5.081E-38x^8 - 1.501E-32x^7 + 1.884E-27x^6 - 1.311E-22x^5 + 5.527E-18x^4 - 1.451E-13x^3 + 2.344E-09x^2 - 2.186E-05x^2 + 0.09094x + 822.9$$

(c) 测温点3拟合函数及曲线



$$f(x) = 6.946E-38x^8 - 2.022E-32x^7 + 2.496E-27x^6 - 1.701E-22x^5 + 6.982E-18x^4 - 1.767E-13x^3 + 2.704E-09x^2 - 2.294E-05x^2 + 0.07289x + 949.2$$

(d) 测温点4拟合函数及曲线

图8 测温拟合函数及曲线图

Fig. 8 The fitting function and curves of the temperature measuring

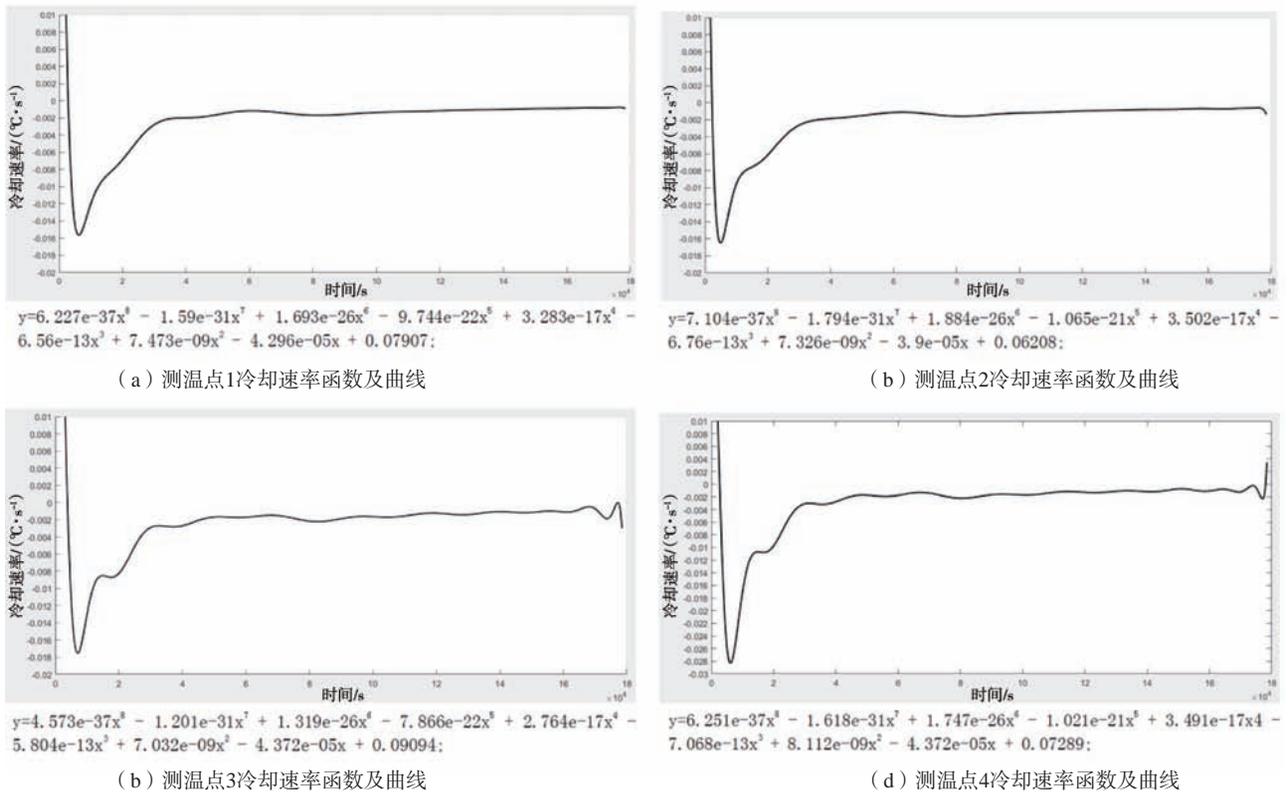


图9 测温拟合冷却速率函数及曲线图

Fig. 9 The fitting function and curves of the temperature cooling rates

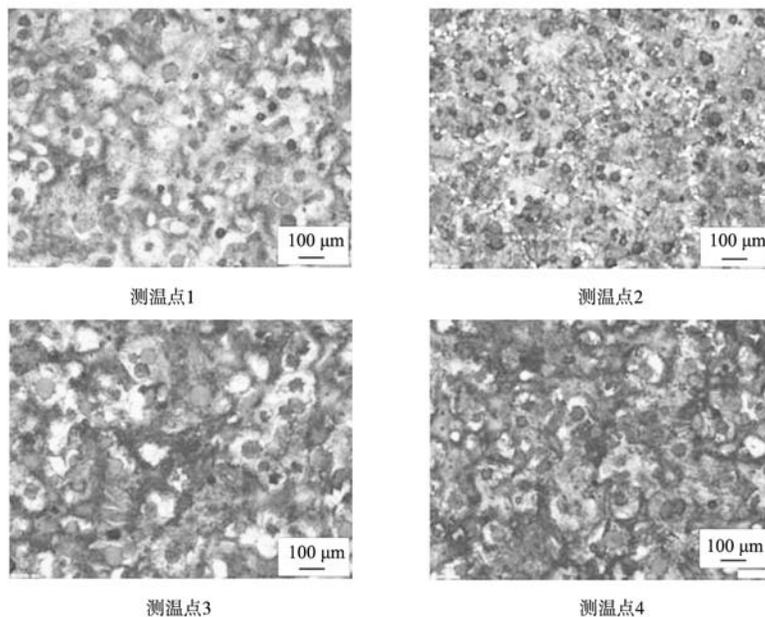


图10 测温点珠光体金相

Fig. 10 The temperature measuring points' pearlite metallography

遍适用性。但其研究思路对提高数值模拟精度及铸件本体珠光体含量控制具有一定的借鉴意义。

(1) 通过将CAE技术与测温试验相结合, 优化了

ADSTEFAN数值模拟参数, 使得计算结果与实际生产更加贴合, 提高了软件计算精度, 有利于铸造技术人员根据数值模拟结果做出更有效的工艺优化, 合理规

避潜在的铸造风险。

(2) 结合数据分析软件对温度曲线分析, 探索出了在实际生产条件下珠光体含量与冷却速度之间的函

数关系, 为实际生产稳定提高铸件珠光体含量提供工艺指导。

参考文献:

- [1] 毛红奎, 徐宏. 铸造过程模拟仿真及工艺设计 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 1-12.
- [2] 王世锋, 杨晋娜, 雷翠平. 厚重球墨铸铁本台铸件树脂砂实型铸造工艺探索 [J]. 铸造, 2020 (9): 938-942.
- [3] 王承辉, 徐怀志, 李德文. 厚大球铁件生产技术的研究 [J]. 铸造, 2012 (11): 1336-1339.
- [4] 张伯明. 铸造手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2013: 279-318, 370-380.
- [5] 周志杰, 王狂飞, 张锦志. 计算机模拟在水玻璃砂界面换热系数测量中的应用 [J]. 铸造设备与工艺, 2014 (3): 45-47.
- [6] 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: 12-40.
- [7] ZHANG W, XIE G, ZHANG D. Application of an optimization method and experiment in inverse determination of interfacial heat transfer coefficients in the blade casting process [J]. Experimental Thermal & Fluid Science, 2010, 34 (8): 1068-1076.
- [8] 董怀宇, 杨杰, 熊守美. 灰铸铁凝固过程结晶潜热处理模型 [J]. 铸造, 2006 (11): 1155-1157.

Application of CAE Technology Combined with Temperature Test on Furan Resin-Bonded Sand Full Mold Casting

CAO Hai, WANG Yi, WANG Lei, WU Jin-jiang
(Tianjin Rainbow Hills Cast Iron Co., Ltd., Tianjin 300457, China)

Abstract:

Based on the full mold casting of furan resin-bonded sand, the temperature change curves were obtained by measuring the temperature at the casting-mold sand interface during the solidification process of casting, and the thermophysical property parameters were optimized with the inverse calculation function of the ADSTEFAN numerical simulation software, and its effectiveness was verified in actual production, so as to achieve the purpose of improving the CAE calculation accuracy and providing a more accurate reference for the optimization of casting process. On the other hand, numerical analysis software is used to fit the temperature curve and function expression, which can be applied to explore the temperature change curve characteristics of thick and large section castings under actual production conditions and the relationship between the metallographic state of the body and the cooling rate, so as to provide reference and new ideas for the research on the local position of castings to increase the pearlite content.

Key words:

casting CAE; full mold casting; thick-walled ductile iron casting; optimization of thermophysical property parameters; data fitting