

冷冻砂型对铸铁合金凝固行为及组织性能影响规律研究

戴宇峰^{1, 3}, 单忠德^{1, 2, 3}, 杨浩秦^{1, 3}, 罗磊^{1, 3}, 梁校^{2, 3}

1. 南京航空航天大学材料科学与技术学院 江苏南京 210006

2. 南京航空航天大学机电学院 江苏南京 210006

3. 航空航天机械结构力学与控制全国重点实验室 江苏南京 210006

摘要: 采用冷冻砂型铸造铸铁合金, 界面换热系数是反映冷冻砂型与铸铁合金换热程度的重要参数, 对于分析铸铁合金组织性能具有重要意义。研究测定了合金的界面接触温度随时间的变化规律, 在此基础上分析了界面换热特征, 获得了界面换热系数随初始界面温度变化的函数式, 同时分析了冷冻砂型中铸件凝固的铸态微观组织及力学性能。结果表明: 界面换热系数随着冷冻砂型初始温度的增加而降低, 随含水率的减少而升高。当含水率为6% (质量分数, 下同) 时, 在 -35°C 、 -30°C 、 -25°C 初始冷冻温度条件下, 铸型铸件界面换热系数峰值分别是 $195663\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 、 $147933\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 、 $120836\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$; 当含水率为5%时, 在 -35°C 、 -30°C 、 -25°C 初始冷冻温度条件下, 铸型铸件界面换热系数峰值分别是 $209257\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 、 $176878\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 、 $134472\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。相同含水率下初始冷冻温度越低, 珠光体晶粒越细, 石墨化程度越高, 抗拉强度也越高。

关键词: 冷冻砂型; 铸铁合金; 界面换热系数; 初始温度; 含水率

Effect of frozen sand mold on solidification behavior and microstructure of cast iron

DAI Yufeng^{1, 3}, SHAN Zhongde^{1, 2, 3}, YANG Haoqin^{1, 3}, LUO Lei^{1, 3}, LIANG Xiao^{2, 3}

1. School of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210006, Jiangsu, China

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210006, Jiangsu, China

3. National Key Laboratory of Structural Mechanics and Control of Aerospace Machinery, Nanjing 210006, Jiangsu, China

Abstract: The interfacial heat transfer coefficient of cast iron is an important parameter to reflect the heat transfer degree between the frozen sand cast iron alloy and cast iron alloy, which is of great significance for the analysis of microstructure properties of cast iron alloy. In this study, the change rule of the interfacial contact temperature of the alloy with time was measured. Based on this, the characteristics of the interfacial heat transfer were analyzed, and the function of the interfacial heat transfer coefficient changing with the initial interfacial temperature was obtained. Meanwhile, the as-cast microstructure and mechanical properties of the castings solidified in the frozen sand mold were analyzed. The results show that the interfacial heat transfer coefficient decreases with the increase of the initial temperature of the frozen sand mold, and increases with the decrease of water content. At the initial freezing

基金项目: 国家重点研发计划 (2021YFB3401200); 江苏省基础研究计划 (自然科学基金) 青年基金 (BK20230885)。

temperature of -35°C , -30°C and -25°C with moisture content of 6wt.%, the peaks of interface heat transfer coefficients of cast castes are $195663\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, $147933\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ and $120836\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$. At the initial freezing temperature of -35°C , -30°C and -25°C with moisture content of 5wt.%, the peaks of interface heat transfer coefficients of cast castes are $209257\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, $176878\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ and $134472\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$. Under the same moisture content, the lower the initial freezing temperature, the finer the pearlite grain, the higher the graphitization degree and the higher the tensile strength.

Keywords: frozen sand mold; cast iron; interfacial heat transfer coefficient; initial temperature; moisture content

1 序言

冷冻砂型铸造工艺不同于传统砂型铸造工艺,其采用纯水或水溶液作为黏结剂,将纯水或水溶液和原砂混制均匀后在低温下冷冻获得足够强度,再进行金属熔炼浇注来获得铸件^[1-4]。冷冻砂型具有高强度、高硬度,以及透气性好的特点,在浇注金属时,高温金属熔液注入冷冻砂型,使砂型温度急剧升高,铸件四周的冰晶蒸发后逸出,砂型自然溃散,落砂容易^[3-5]。该工艺成形过程绿色环保,有助于推进铸造行业数字化、绿色化发展。目前,已有关于冷冻砂型铸件快速凝固机理的研究,并进行了铸铁合金相关浇注试验。

目前,铸铁合金广泛应用于汽车制造、天然气工业等领域,采用铸铁合金制造的内燃机、压缩机铸件壁厚较小、性能较高,并且可以减小噪声、振动、变形,改善平顺性。铸铁因其良好的性能被应用于钢锭模、液压件、管道及玻璃模具等方面。随着发动机向高功率、高转矩等方向发展,随之而来的机械负荷已逐渐接近或超过铸铁材料的使用极限。因此,优化铸铁合金铸造工艺,对于保证铸铁合金性能、提升铸铁合金制品的整体加工水平具有重要意义^[6-9]。

实现铸铁合金成形过程精确模拟仿真的前提是确定合适的边界条件,界面换热系数是影响模拟过程的重要边界条件参数之一,直接影响了铸件凝固成形过程的温度场、应力场、应变场等计算的准确性。目前,有关冷冻砂型的研究是关于砂型导热系数^[10]及铝合金与冷冻砂型界面换热系数规律研究^[11],针对铸铁等高温合金在冷冻铸造凝固过程界面换热系数变化还未有相关试验证明其规律性^[12-15],因此有必要研究铸铁合金在冷冻砂型含水率及初始冷冻温度影响下界面换热系数随凝固温度的变化关系。

本试验以铸铁合金作为熔体金属,50/100目硅

砂作为型砂,研究高温熔体凝固过程中,砂型含水率和初始冷冻温度下熔体与砂型接触界面的传热过程,测量熔体及砂型温度随时间变化关系曲线,通过共轭梯度法及伴随问题函数估计,反算求解得到界面换热系数及热流密度变化关系曲线^[16-18]。

2 试验材料与方法

本文设计了冷冻砂型与铸铁界面换热试验。其中,造型砂箱为正方体,内边边长20cm,型砂完全填充造型砂箱。从型腔与砂型界面处开始算起,在砂箱外壁中心线处打上第一个孔,孔径为2mm,深度为10cm,孔与砂箱上表面的距离为5cm。随后沿水平方向每间隔1cm打一孔,以此类推共打4个小孔,打孔的目的是便于插入热电偶进行温度采集。热电偶测温排布如图1所示。

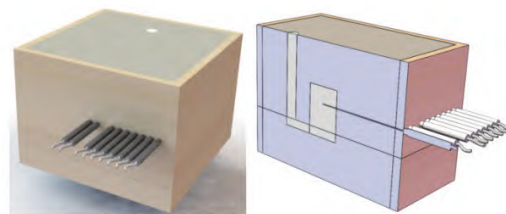


图1 热电偶测温排布

采用K型铂铑-铂热电偶测量熔体及冷冻砂型界面温度。热电偶接在多通道信号处理模块上,温度采集数据由数据采集卡采集。冷冻砂型初始温度分别设置在 -35°C 、 -30°C 、 -25°C 。球墨铸铁采用5kg中频感应电炉熔炼,原材料是生铁+中碳钢+硅铁,配比时需要控制各种元素含量。熔炼过程需加入球化剂和孕育剂,球化剂选用FeSiMg8RE7,孕育剂选用75SiFe。控制球化温度为 $1400\sim 1500^{\circ}\text{C}$,球化剂加入量为1.5%,球化时间30s。当测得金属液温度达到 1400°C 后开始浇注。将金属液浇入冷冻砂型型腔,同时采集温度变化数据。考虑到外界环境对界面换热系数的影响也很大,因此通过在砂箱外

壁包裹一层石棉布来隔绝与外界的联系，以减少热量损耗。图2所示为TOPRIE温度记录仪，图3所示为K型铂铑-铂热电偶。



图2 TOPRIE温度记录仪



图3 K型铂铑-铂热电偶

发生热传导时，界面换热系数 h 的计算公式为

$$h = q / (T_{\text{sand}} - T_{\text{liquid}}) \quad (1)$$

式中 h ——界面换热系数 $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$ ；

q ——热流量 (W)；

T_{sand} ——冷冻砂型界面温度 ($^{\circ}\text{C}$)；

T_{liquid} ——熔体界面温度 ($^{\circ}\text{C}$)。

根据式(1)，只要测得冷冻砂型与熔体界面温差及通过界面的热流量，即可求得界面换热系数。通常来说，为了不干扰界面处的热传递，通常不选择在界面处布置温度传感器，这使得界面处的温度和热流量难以被测量，但熔体与砂型非换热面内部温度变化容易被测量。

$$S[q(t)] = \int_{t=0}^{t_f} \{T_{\text{exp}}(L, t) - T_{\text{cal}}(L, t)\}^2 dt \quad (2)$$

式中 T_{exp} ——通过热电偶得到的熔体/砂型内温度测量值 ($^{\circ}\text{C}$)；

T_{cal} ——求解反问题得到的熔体/砂型内温度计算值 ($^{\circ}\text{C}$)；

t_f ——最后时间 (s)。

将实测的熔体温度、砂型实测温度数据、熔体物性参数导入测温软件中进行传热模拟计算，得出界面温度、界面热流量、模拟砂型温度数据，将模拟的砂型温度与砂型实测温度数据进行对比，从而验证换热系数的准确性。

3 试验结果及讨论

根据不同冷冻温度下铸铁合金和冷冻砂型界面-温度换热数据，通过共轭梯度法及伴随问题函数估算得到热流密度及界面换热系数，将热流密度及界面换热系数随着温度变化汇总到一个曲线图上。图4所示为含水率6%（质量分数，下同）时求得的不同砂型初始冷冻温度下界面换热系数及热流密度随时间变化曲线关系。

对于 -25°C 初始温度的砂型，在金属液浇注进入砂型后热流密度 q 迅速下降到一最低值，界面换热系数 h 迅速上升至峰值随即迅速下降，而热流密度 q 在一定范围内平稳波动。此时热流密度和界面换热系数受冷冻砂型与金属液温差影响较大。当时间达到750s左右时界面换热系数 h 又迅速上升达到第二个峰值后迅速下降，随后界面换热系数不再变化。

对于 -30°C 、 -35°C 初始温度的砂型，在金属液浇注进入砂型后热流密度 q 迅速下降到一最低值，界面换热系数 h 迅速上升至峰值随即迅速下降，而热流密度 q 在一定范围内平稳波动。此时热流密度和界面换热系数受冷冻砂型与金属液温差影响较大。当时间达到750s时界面换热系数 h 又迅速上升后迅速下降达到第二个峰值，再经过约1000s后界面换热系数 h 达到第三个峰值。砂型初始温度不同，对应砂型的蓄热能力也各不同，对应热流密度变化不同，相应的界面换热系数峰值也不相同。随着砂型初始温度的降低，界面换热系数的峰值增加， -35°C 初始温度冷冻砂型的界面换热系数峰值达到最大。

图5所示为含水率5%时不同冷冻温度下热流密度和界面换热系数随时间变化规律。

对于铸件与砂型间热流密度及界面换热系数与凝固时间存在一定的变化关系，主要经历了3个阶段，每个阶段界面换热系数的变化规律都是在短时间内先迅速上升后迅速下降。

第一阶段主要存在于合金的液相阶段，首要原因是当熔融的金属液浇注进入冷冻砂型中时，两者

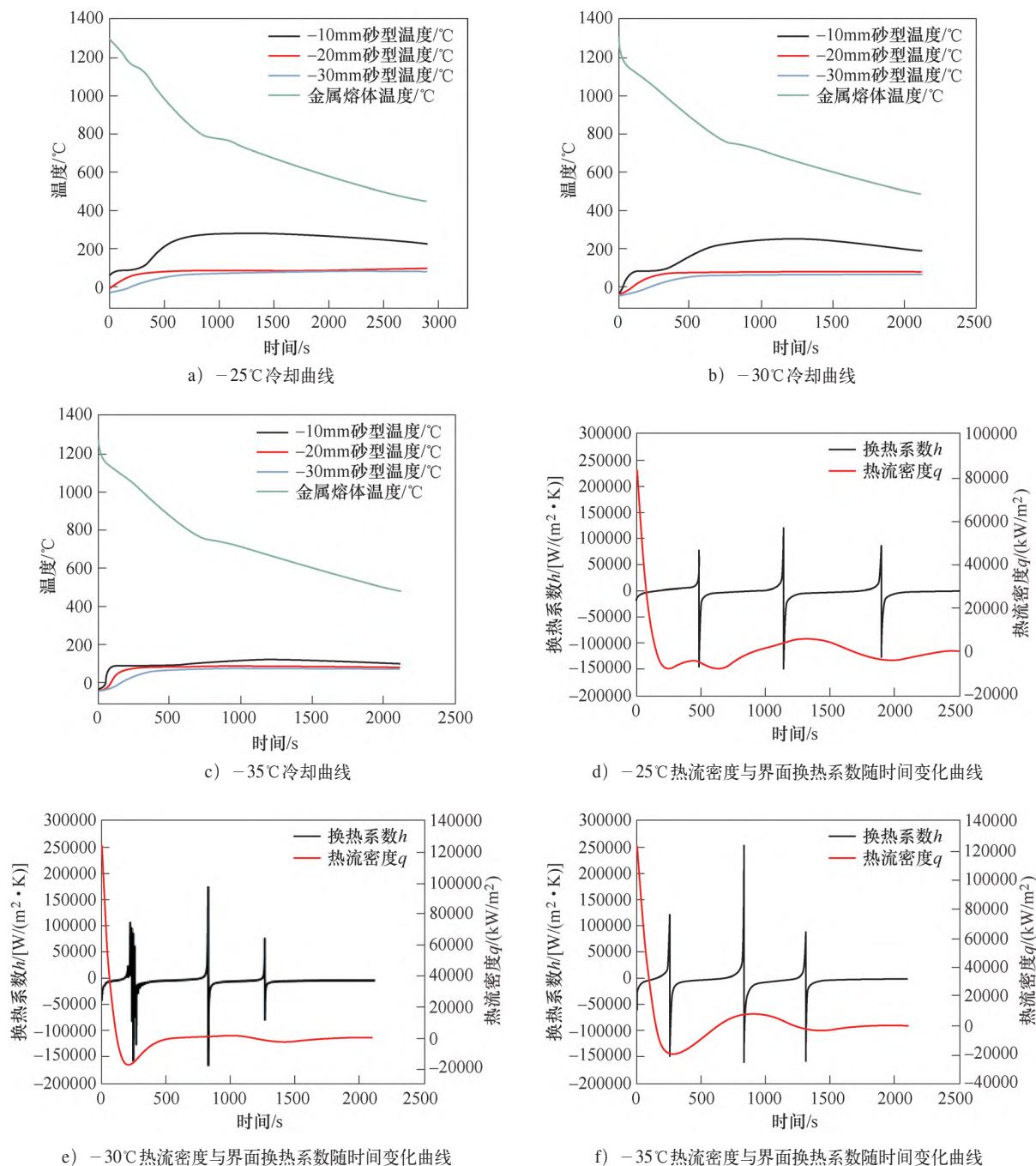


图4 含水率为6%时不同冷冻温度下热流密度和界面换热系数随时间变化规律

之间产生了一个较大的温度差，温度差值越大，界面换热系数越大。当两者温度差降低时，界面换热系数减小。同时，冷冻砂型与铸件接触表面中的水分受热蒸发产生大量水蒸汽，水蒸汽难以离开冷冻砂型，在界面中形成气隙，换热系数也随之降低。随着冷冻砂型含水率的增大，所产生的水蒸汽也越多，对应界面换热系数的值也越小。

第二阶段主要存在于合金自液相转变为固相的

凝固区间内。当熔体温度降至液相线以下时，金属液中析出晶体，此过程会释放结晶潜热。结晶潜热释放越多，界面换热系数越大。

第三阶段主要存在于合金自一种固相转变为另一种固相的凝固区间内。此时合金温度因降至共晶点而发生共晶反应。共晶反应释放热量越多，界面换热系数越大。

图6所示为界面换热系数随冷冻温度变化规律。

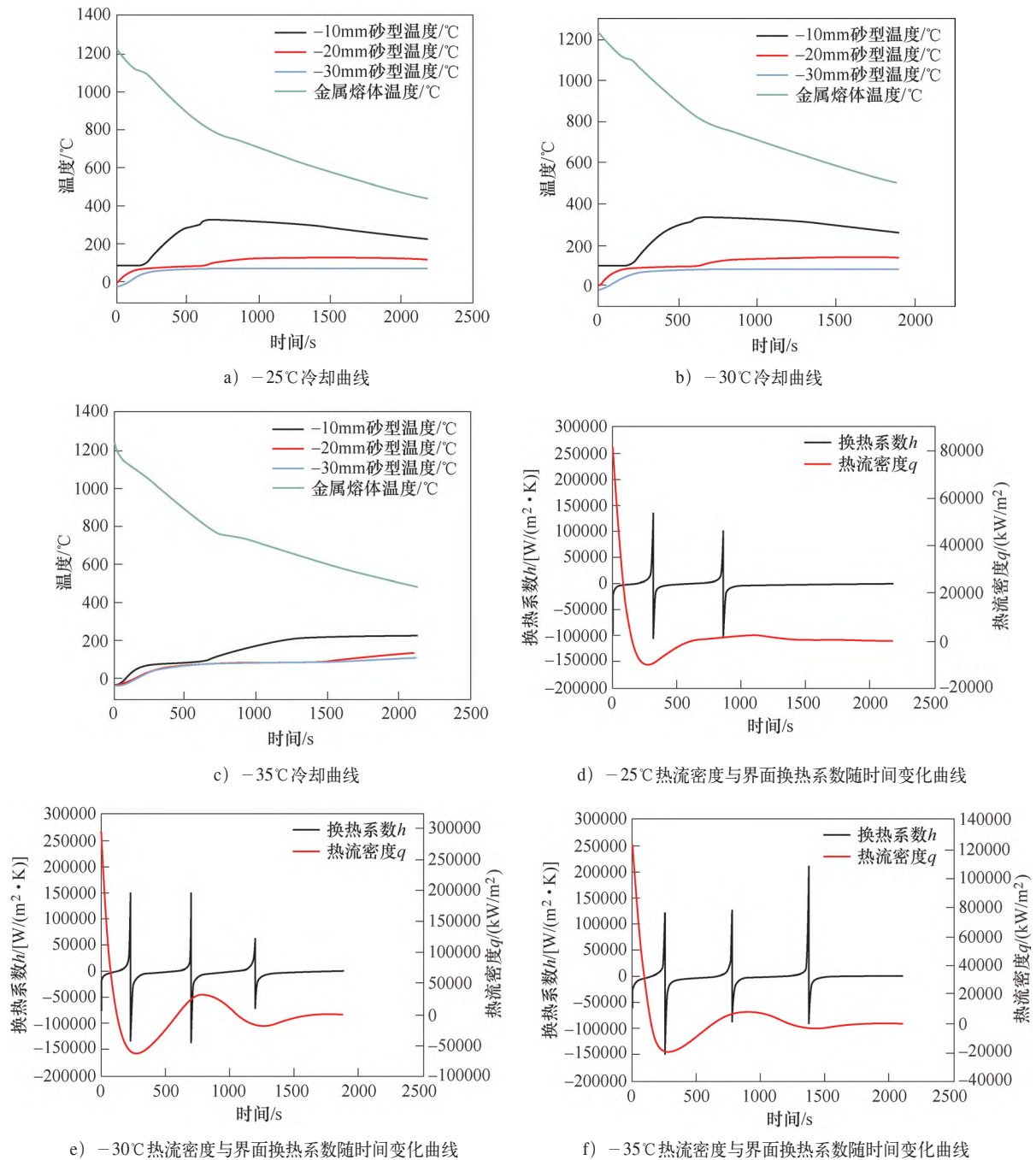


图5 含水率5%时不同冷冻温度下热流密度和界面换热系数随时间变化规律

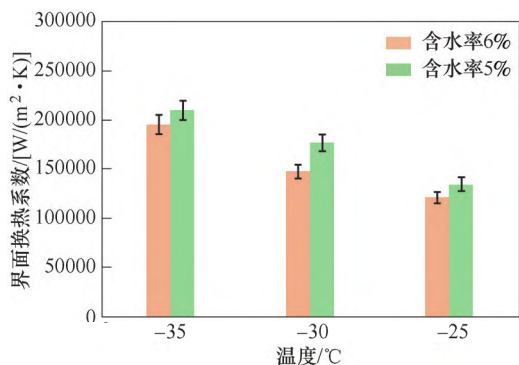
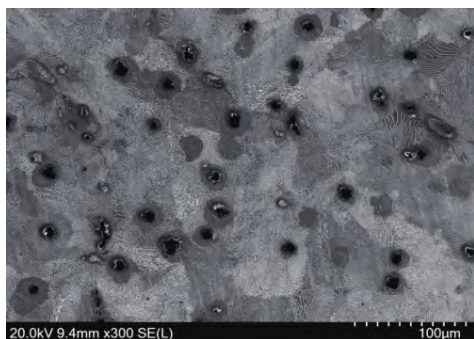


图6 界面换热系数随冷冻温度变化规律

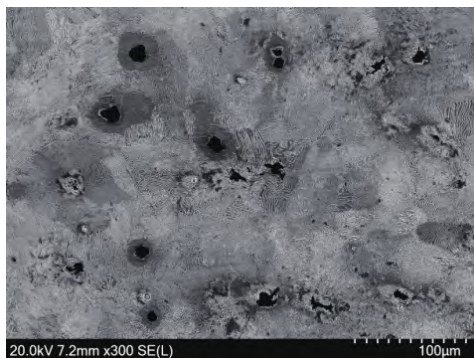
由图6可知,随着砂型初始冷却温度的降低,铸件铸型界面处换热系数的峰值随之升高。这是由于初始冷冻温度越低,熔体与砂型之间瞬态温度差越大,瞬态热量差也越大,热流密度也越大,因此导致在瞬态时产生较大的换热系数峰值。

4 界面换热系数变化对铸铁组织与性能的影响

图7所示为含水率6%、冷冻砂型初始温度分别为-35℃、-30℃和-25℃时,QT500-7的显微组



a) 含水率6%时-35℃冷冻砂型



b) 含水率6%时-30℃冷冻砂型

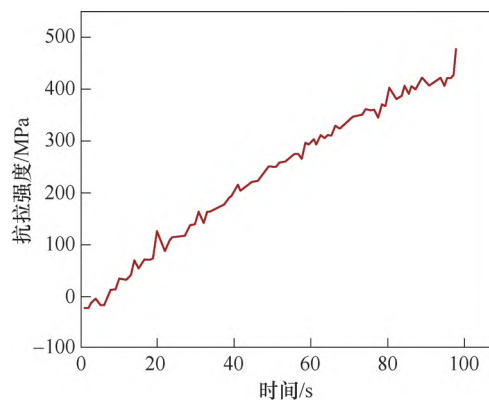


c) 含水率6%时-25℃冷冻砂型

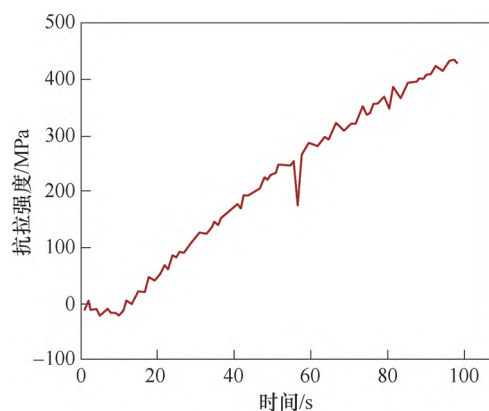
图7 QT 500-7显微组织形貌

织形貌。影响了凝固过程，最终影响铸件质量。在不同冷冻温度下结晶，由于初始冷冻温度不同，使得晶粒生长快慢不同，从而影响晶粒形貌，进一步影响了晶界上析出相的形貌。当冷冻砂型初始温度为 -35°C 时，晶粒细小组织均匀。随着冷冻砂型初始温度的升高，晶粒较粗，组织均匀性降低。

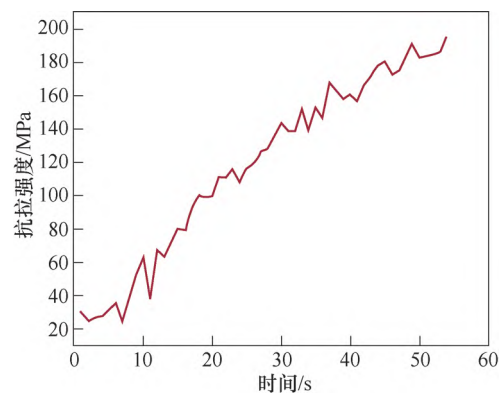
图8所示为不同冷冻温度砂型铸铁合金的抗拉强度测试曲线，石墨的基体组织影响了铸件的力学性能，同时由于熔炼过程中杂质元素掺入金属以及未对铸件进行后续热处理，因此影响了铸件的抗拉强度，使抗拉强度 $<500\text{MPa}$ ，但抗拉强度的变化规律符合以上所述。从图8可看出，抗拉强度随初始冷



a) -35°C



b) -30°C



c) -25°C

图8 含水率6%时铸铁合金拉伸力学性能曲线

冻温度的降低而升高。其中含水率6%时， -25°C 、 -30°C 、 -35°C 下，最大抗拉强度分别为 195MPa 、 431MPa 、 475MPa 。

5 结束语

通过上述分析，可得出以下结论。

1) 冷冻砂型初始温度越低，含水率越高，砂型的蓄热能力就越强，对应合金凝固过程中冷冻砂型温度变化较为平缓，且最终砂型升高的温度也越

低。

2) 界面换热系数峰值随冷冻砂型初始温度的增加而降低, 随含水率的减少而升高。含水率6%时, -35°C 、 -30°C 、 -25°C 初始冷冻温度条件下, 铸型铸件界面换热系数峰值分别为 $195663\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 、 $147933\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 、 $120836\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$; 含水率5%时, -35°C 、 -30°C 、 -25°C 初始冷冻温度条件下, 铸型铸件界面换热系数峰值分别是 $209257\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 、 $176878\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 、 $134472\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。

3) 相同含水率下初始冷冻温度越低, 珠光体晶粒越细, 石墨化程度越高, 抗拉强度也越高。其中, 含水率6%时, -25°C 、 -30°C 、 -35°C 条件下, 最大抗拉强度分别为 195MPa 、 431MPa 、 475MPa 。

参考文献:

[1] 星山康洋, 三宅秀和. 负压冷冻铸型铸造及其铸件特性[J]. 铸造技术, 2015, 36 (5) : 1225-1228.
[2] 单忠德, 杨浩秦, 刘丰, 等. 数字化无模冷冻铸造成形方法研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49 (12) : 4321-4328.
[3] 杨浩秦, 单忠德, 刘丰, 等. 冷冻砂型高精高效制备过程研究[J]. 中国机械工程, 2021, 32 (10) : 1254-1259.
[4] 杨浩秦, 单忠德, 刘丰, 等. 冷冻铸造A356铝合金微观组织分析[J]. 工程科学学报, 2022, 44 (8) : 1331-1337.
[5] 武俊腾. 冷冻砂型成型工艺及性能研究[D]. 太原: 中北大学, 2023.
[6] 董海, 黄兴民, 程乾, 等. 铁素体球墨铸铁凝固形貌及力学性能[J]. 铸造, 2013, 62 (8) : 784-788.

[7] 张效夫. 蠕墨铸铁凝固过程中冷却速度与组织及导热性能的定量关系研究[D]. 济南: 山东大学, 2021.
[8] 王灼, 刘越, 周占虎, 等. 冷却速度对高硅球墨铸铁组织和性能的影响[J]. 铸造, 2023, 72 (3) : 241-249.
[9] 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.
[10] 梁昊天, 刘丰, 刘丽敏, 等. 基于热探针法的冷冻砂型导热系数测定与分析[J]. 铸造, 2023, 72 (5) : 570-575.
[11] 常涛. 低压铸造ZL205A合金界面换热系数的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
[12] 王鹏. 铸模-铸锭界面气隙对综合界面换热系数的影响[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2020.
[13] 倪嘉, 王练, 张志豪, 等. Zr-4合金与H13模具钢的界面换热行为研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48 (5) : 1579-1583.
[14] 曹永友. 压铸过程压室及铸型界面传热的研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.
[15] 孟晓东, 张荣强, 冀晓磊, 等. 熔模铸造ZM5合金界面换热系数研究[J]. 铸造, 2022, 71 (9) : 1154-1157.
[16] 李金辉. 水冷模模铸的铸件/铸型界面换热系数的反向求解分析[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2015.
[17] 刘晋, 彭必友, 包有宇, 等. 铸造模拟关键热参数的反求优化及应用研究[J]. 热加工工艺, 2019, 48 (5) : 131-135.
[18] 隋大山. 铸造凝固过程热传导反问题参数辨识技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.

MW 20240512

《金属加工（热加工）》2024年第9期广告目次

单位名称	查询编号	位置
陕西博创电器有限公司	5325	封面
北京金威焊材有限公司	1161	封底