

全尺寸球墨铸铁车轮铸造组织预测

张 华^{1, 2}, 张明辉¹, 洪 新², 翟启杰²

(1. 江苏永钢集团有限公司, 江苏苏州 215600; 2. 上海大学材料科学与工程学院, 上海 200072)

摘要: 通过铸型尺寸的设计, 研究冷却速率对砂型激冷球墨铸铁 (SCDI) 铸态组织的影响规律, 并对全尺寸球墨铸铁车轮铸造过程进行数值模拟。结合全尺寸球墨铸铁车轮铸造过程的温度场和对应的组织建立铸态组织预测模型, 并对铸态全尺寸球墨铸铁车轮的组织分布进行预测。结果表明, 随着铸型尺寸减小, 球化率和石墨球数量增加, 而尺寸减小。基于所建立的组织预测模型, 车轮铸件由于同时凝固的工艺设计, 其石墨相在基体中分布较为均匀, 而基体组织含量沿径向变化不大, 只是在轮辋表层出现了铁素体含量减小、珠光体含量增大的现象。

关键词: 球墨铸铁; 数值模拟; 组织预测模型

球墨铸铁凭借其综合力学性能高、减磨性好、良好的机械加工性能和较低的生产成本等优点成为轨道交用车轮的理想材料^[1-4]。改变球墨铸铁在凝固阶段的冷却速度可在很大范围内改变其铸态组织^[5-8]。球墨铸铁车轮具有壁厚变化较大的特点, 在铸造过程中不同位置降温速率不同, 从而造成车轮各部位组织和性能不均匀性。球墨铸铁材料制备的可控性和车轮质量的稳定性, 既是制备工艺的难点, 也是其应用的必要和前提条件。因此, 全尺寸球墨铸铁车轮制备过程中不同位置的降温历程和组织分布是一个十分重要的研究课题。而在试验研究的基础上, 通过数值模拟实现全尺寸球墨铸铁铸造组织预测, 对于降低球墨铸铁车轮制备工艺的研发时间及成本, 有效预测制备过程中可能出现的问题, 缩短研发周期^[9-11], 具有十分重要的意义。

本文通过不同铸型的设计, 研究冷却速率对砂型激冷球墨铸铁 (Sand cooled ductile iron, SCDI) 铸态组织的影响规律, 采用ProCAST软件对全尺寸球墨铸铁车轮砂型重力铸造进行数值模拟计算, 同时结合石墨相形态和基体组织建立铸态组织预测模型。根据数值模拟得到的全尺寸球墨铸铁车轮铸造过程的温度场, 进行铸态球墨铸铁车轮的组织分布预测, 以此探讨和优化球墨铸铁车轮的制备工艺, 为其在未来城轨运输领域中的应用提供技术储备。

1 试验材料与方案

采用球墨铸铁作为试验材料, 其成分如表1所示。

为了研究全尺寸球墨铸铁车轮铸造过程中不均匀的降温历程, 分别设计了不同铸型尺寸的SCDI。图1为不同铸型尺寸的SCDI铸锭示意图。6组SCDI的铸型厚度分别为3 mm、12.5 mm、25 mm、50 mm、75 mm和100 mm, 而其他尺寸尽可能保持一致

作者简介:

张华 (1990-), 男, 博士, 主要研究方向为金属材料加工及数值模拟。E-mail: huazhang1003@163.com

中图分类号: TG255

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977 (2022)

05-0579-07

收稿日期:

2022-01-24 收到初稿,
2022-03-20 收到修订稿。

表1 球墨铸铁化学成分

Table 1 Chemical composition of the ductile iron

w_B /%

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Mg	Ceq
3.68	2.16	0.13	0.05	0.02	0.61	0.63	0.05	4.40

并且远大于厚度,从而保证铸锭凝固过程以厚度方向传热为主。根据球墨铸铁的凝固特点^[12-14],选用强度较高的呋喃树脂砂造型,采用铸铁砂箱,以增加铸型刚度,防止球墨铸铁凝固过程中的膨胀变形,降低疏松缩孔出现的可能性。同时采用贴边冒口进行补缩,从而避免铸锭内部缺陷的出现。采用K型热电偶实时记录SCDI凝固和冷却过程温度变化。受熔炼条件限制,上述6组SCDI铸锭分为两炉熔炼浇注,分别命名为SCDI-1和SCDI-2。

2 有限元数值模拟

图2a为全尺寸球墨铸铁车轮的实体模型,其车轮铸件尺寸为 $\Phi 840$ mm \times 170 mm,最大热节圆直径约为100 mm,铸件质量约为350 kg。根据轮毂和轮辋较厚而轮辐较薄的车轮铸件外形尺寸,并考虑到球墨铸铁糊状凝固的特点,采用如图2b所示的同时凝固的铸造工艺设计:封闭雨淋式浇注系统,设置8个均匀分布在较薄轮辐上的内浇道,并在轮毂和轮辋等热节位置的周围布置冷铁,以及在轮毂和轮辋上表面分别均匀布

置 $\Phi 10$ mm的小冒口。同样选用强度较高的呋喃树脂砂铸型并采用铸铁砂箱。

在有限元模拟计算中,车轮铸件选用JMatPro给出的球墨铸铁热物性参数^[4]。另外,铸型选用ProCAST自带数据库中的SAND_Silica,冷铁选用自带数据库中Fe_Eutectic_Gray_Iron。铸件与铸型以及铸型与冷铁的界面换热系数设定为 700 W/($m^2\cdot^{\circ}C$),而铸件与冷铁的界面换热系数设定为 $1\ 000$ W/($m^2\cdot^{\circ}C$)。边界条件主要包括浇注温度、浇注速度以及冷却条件。根据铸造工艺设计的结果,浇注温度设计为 $1\ 400$ $^{\circ}C$,浇注速度设计为 19.29 kg/s。整个铸型的冷却条件设定为空冷,其与空气的换热系数为 100 W/($m^2\cdot^{\circ}C$)。模拟过程中,重力方向为浇口平面的负法向,大小为 9.8 m/s^2 。铸件、铸型和冷铁的初始温度均设定为 20 $^{\circ}C$ 。

3 结果与讨论

3.1 铸型尺寸对激冷球墨铸铁铸态组织的影响

图3为SCDI铸锭铸造过程中的冷却曲线。可以发现,随着铸型厚度的减小,SCDI的局部凝固时间减小

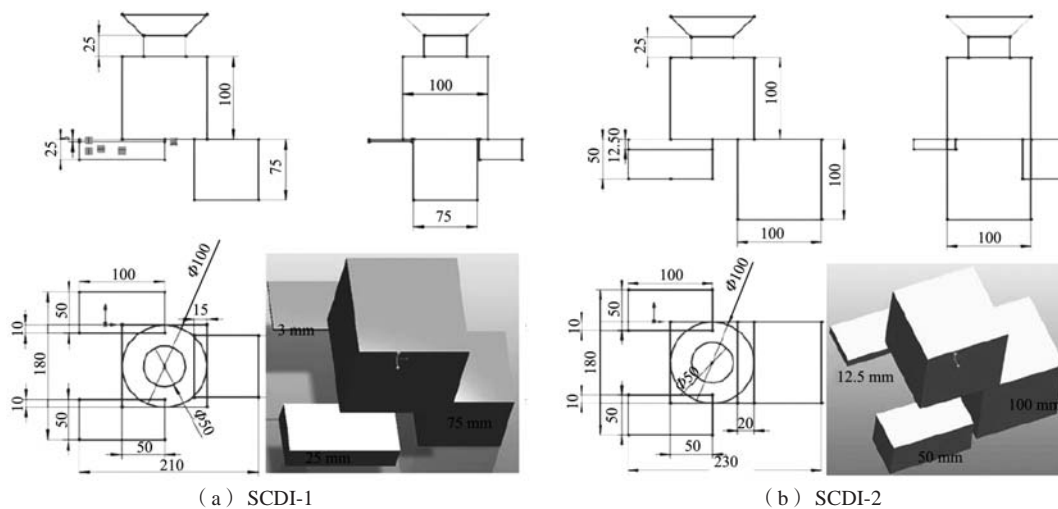
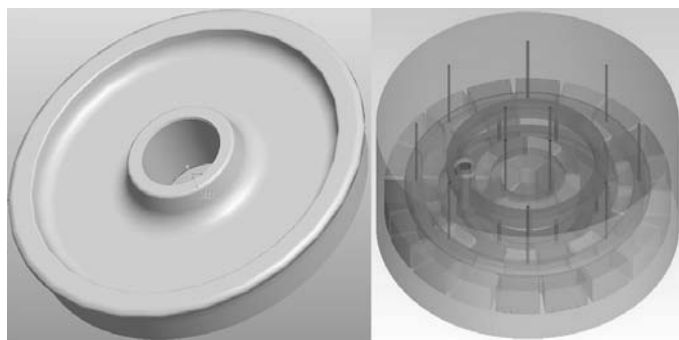


图1 不同铸型尺寸SCDI铸锭示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the SCDI ingots with different mold sizes



(a) 实体模型 (b) 三维铸造模型

图2 全尺寸球墨铸铁车轮模型

Fig. 2 Model of the full-size ductile iron wheel

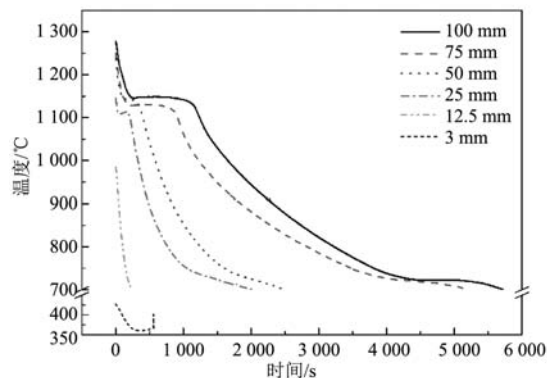
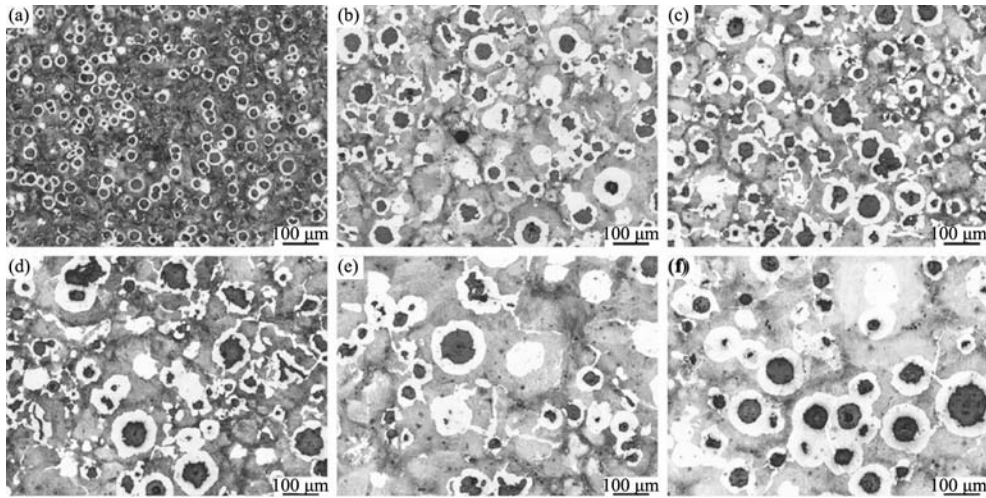


图3 SCDI铸造过程中的冷却曲线

Fig. 3 Cooling curves of the casting process of the SCDI



(a) 3 mm; (b) 12.5 mm; (c) 25 mm; (d) 50 mm; (e) 75 mm; (f) 100 mm

图4 不同铸型尺寸SCDI基体组织

Fig. 4 Matrix microstructures of the SCDI with different mold dimensions

的同时其实际共晶温度也相应降低，其变化规律与文献[5-6]报道相符。值得注意的是，当铸型厚度为12.5 mm时，由于铸锭的凝固冷却太快，热电偶无法检测出其凝固阶段的共晶平台，因此也无法得到其局部凝固时间。但其冷却阶段的冷却速度同样随着铸锭厚度的减小而增大。而当铸型厚度为3 mm时，由于铸锭太薄，热电偶无法准确测得其铸造过程中的冷却曲线。因此，通过不同铸型尺寸的设计，不同尺寸SCDI的铸造过程可以得到不同的降温历程，从而实现全尺寸球墨铸铁车轮铸造过程中不均匀的降温历程模拟。

为考察铸型尺寸对SCDI铸态组织的影响规律，分别从6组SCDI铸锭的中心切取金相试样进行显微组织观察。图4为不同铸型尺寸SCDI组织的显微形貌，其中黑色区域为石墨相，大致呈现球状均匀分布，明亮区域为铁素体组织，而灰暗区域为珠光体组织。采用Image-Pro Plus软件分别对6组SCDI中石墨相形态（球化率、平均直径以及石墨球数量）和基体组织（铁素体和珠光体含量）进行定量分析，结果如图5所示。

可以发现，石墨相的球化率变化区间为80.71%~93.75%，平均直径的变化区间为12.29~30.67 μm，数量的变化区间为74.77~549.51个/mm²。随着铸型厚度的减小，石墨球化率提高，尺寸减小，数量增多。当铸型厚度为3 mm时，其值达到了549.51个/mm²。这是由于铸型厚度越小，SCDI的铸造过程的冷却能力就越大，从而导致实际共晶温度降低和共晶反应的过冷度增大，提高了石墨相的形核率，从而使石墨球数量增多；同时，由于较短的局部凝固时间，石墨相没有足够的时间长大，从而减小了石墨相的平均直径并提高了石墨相的球化率。

还可以发现，基体组织中铁素体含量的变化区

间为11.61%~39.08%，而珠光体含量的变化区间为60.92%~88.39%。随着铸型厚度的减小，铁素体含量先变化不大，再出现明显下降；而珠光体含量则是先变化不大再明显上升。这主要是由于球墨铸铁的共析转变主要与碳元素的扩散方式有关，而碳元素的扩散方式则主要取决于冷却速度、石墨相的分布情况、合金元素含量等因素。当铸型厚度为3 mm时，由于冷却阶段较强的冷却能力，导致SCDI的共析转变过冷度增大，从而降低了共析转变过程中的碳扩散速率，导致共析转变主要以铁素体和渗碳体的协作长大方式进行，最终导致珠光体含量增大而铁素体含量减少。此外，当铸型厚度大于12.5 mm时，随着铸型厚度的增大，SCDI冷却阶段的冷却速度略微降低，但同时其石墨球数量也在下降，从而降低了铁素体的形核位置，最终导致其基体组织含量变化不大。

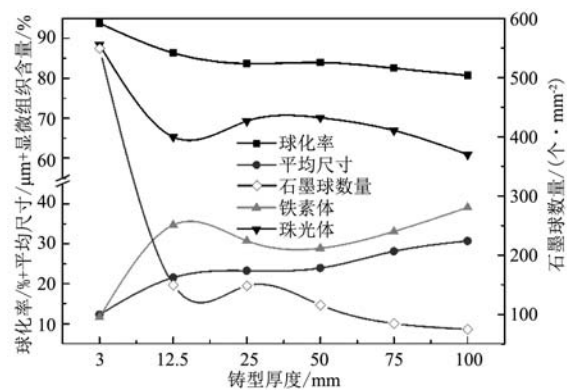


图5 SCDI 铸态组织随铸型尺寸的变化曲线

Fig. 5 Characterizations of as-cast microstructure for the SCDI as a function of mold thickness

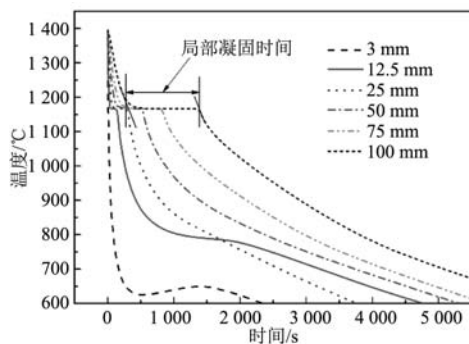
3.2 全尺寸球墨铸铁车轮铸态组织预测

球墨铸铁的组织与其成分和制备工艺密切相关，全尺寸球墨铸铁车轮组织预测的关键基础是组织预测模型，其直接决定了组织预测结果的准确性。因此，采用ProCAST软件对SCDI铸造过程进行温度场数值模拟，同时结合对应的石墨相形态和基体组织建立铸态组织预测模型；最后，根据数值模拟得到的全尺寸球墨铸铁车轮铸造过程的温度场，对铸态全尺寸球墨铸铁车轮铸态组织分布进行预测。

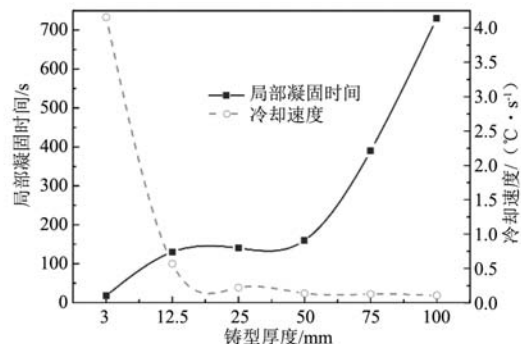
为了得到全尺寸球墨铸铁车轮的铸态组织预测模型，首先采用ProCAST软件对SCDI铸造过程进行数值模拟，其凝固冷却曲线如图6a所示。可以发现，数值模拟得到的凝固冷却曲线与试验得到的类似。随着铸型厚度的减小，SCDI的凝固冷却能力增大。值得注意的是，3 mm和12.5 mm的铸锭在低温段出现冷却速度降低的现象，这是由于100 mm × 100 mm的贴边冒口凝固冷却散热导致的。根据数值模拟得到SCDI的凝固冷却曲线，可以分别得到不同铸型厚度SCDI的共晶凝固阶段的局部凝固时间和冷却阶段的冷却速度两个表征参数：局部凝固时间可以反映凝固阶段冷却强度的大小，具体表征为冷却曲线上共晶反应持续的时间；冷却速度为冷却曲线中800~900 °C温度段的平均冷却速度。且铸造过程的表征参数随铸型尺寸的变化曲线如图6b所示。可以发现，随着铸型厚度的增大，SCDI的局部凝固时间逐渐增大而冷却速度逐渐减小；当铸型厚度大于12.5 mm时，SCDI的冷却速度变化不大。

结合试验中得到的铸型尺寸对SCDI石墨形态和基体组织的影响规律，可以分别得到石墨球表征参数与局部凝固时间、基体组织与冷却速度的关系。基于以上数据关系，采用最小二乘法进行多模型变量个数的指数拟合，并采用式(1)所示的校正决定系数评估拟合效果。具体由Origin进行指数拟合，并直接给出校正决定系数。

$$R^2 = 1 - \frac{n-1}{n-k} (1-R^2) \quad (1)$$



(a) 凝固冷却曲线



(b) 铸造过程的表征参数随铸型尺寸的变化曲线

图6 SCDI 铸造过程数值模拟结果

Fig. 6 Numerical simulation results of the SCDI during casting process

式中： R^2 为回归平方和与总平方和的比值； n 为样本数量； k 为模型变量个数。

图7a是石墨相表征参数与局部凝固时间的关系，随着局部凝固时间增加，石墨相的球化率和石墨球数量逐渐减小，而石墨相的平均直径逐渐增大。石墨相的球化率、平均直径和石墨球数量的拟合曲线分别如图7b、c和d所示。其校正决定系数接近于1，拟合结果较好。因此，石墨相表征参数分别可以通过式(2)、(3)、(4)近似表示：

$$\text{球化率} = 81.38 + 14.84 \times e^{(-t_s/95.63)} \quad (2)$$

$$\text{平均直径} = 30.29 - 18.20 \times e^{[(15.27-t_s)143.99]} \quad (3)$$

$$\text{石墨球数量} = 78.50 + 628.12 \times e^{(-t_s/60.40)} \quad (4)$$

式中： t_s 为数值模拟得到的SCDI凝固阶段的局部凝固时间。

图8a为基体组织与冷却速度的关系，随着冷却速度的增加，铁素体含量总体呈现减小趋势，而珠光体含量总体呈现增大趋势。铁素体含量的拟合曲线如图8b所示，特别说明，拟合时包括了平衡条件下的数据点。其校正决定系数为0.926，说明铁素体含量的拟合程度一般，这可能与设计铸型尺寸大于12.5 mm的试验点的冷却速度比较密集有关。总的来说，铁素体含量可以通过式(5)近似表示：

$$\text{铁素体含量} = 12.66 + 86.44e^{(-R_c/0.095)} \quad (5)$$

式中： R_c 为数值模拟得到的SCDI冷却阶段的冷却速度。另外，珠光体含量与铁素体含量总和为1，因此珠光体含量可以通过铁素体含量求得。

根据之前全尺寸球墨铸铁车轮铸造过程数值模拟的结果，可以得到车轮铸件不同位置共晶凝固阶段的局部凝固时间和冷却阶段的冷却速度两个表征参数。由于计算过程较为繁杂，选择车轮铸件的剖面中心线进行铸态组织预测分析，计算结果见图9。可以发现，轮毂和轮辋的表层以及轮辐等位置表现出较低的局部凝固时间，其变化范围为75~150 s。这是由于这些位置存在冷铁，从而在凝固阶段具有较大的冷却能力。与

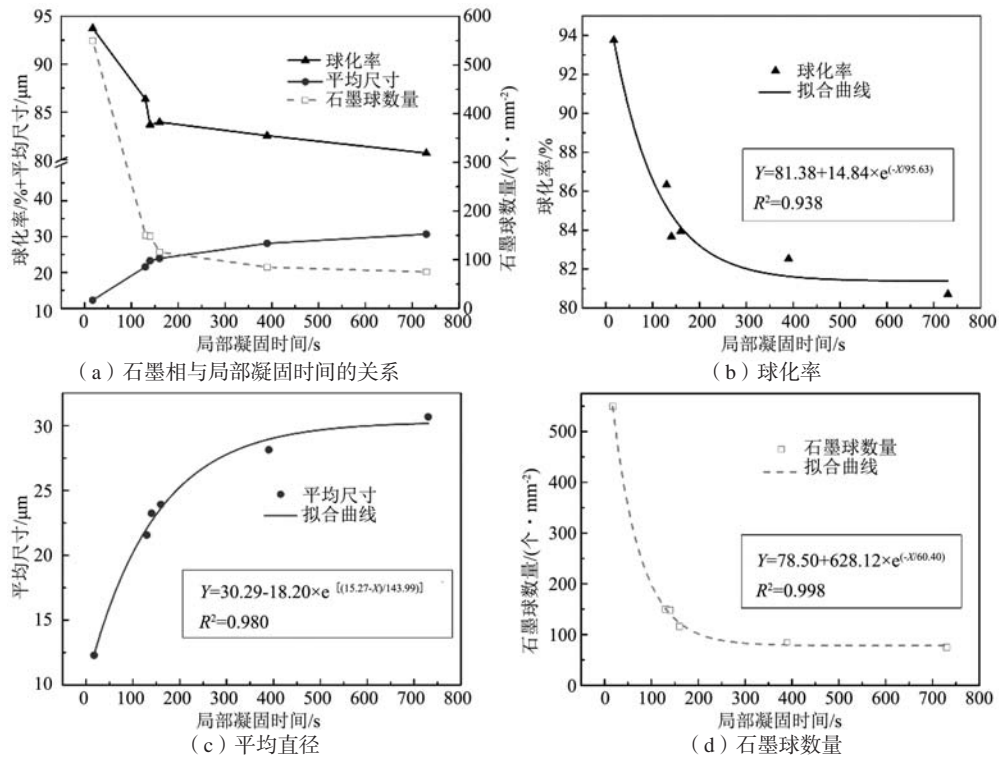


图7 铸态球墨铸铁中石墨相预测模型

Fig. 7 Prediction model of the graphite in as-cast ductile iron

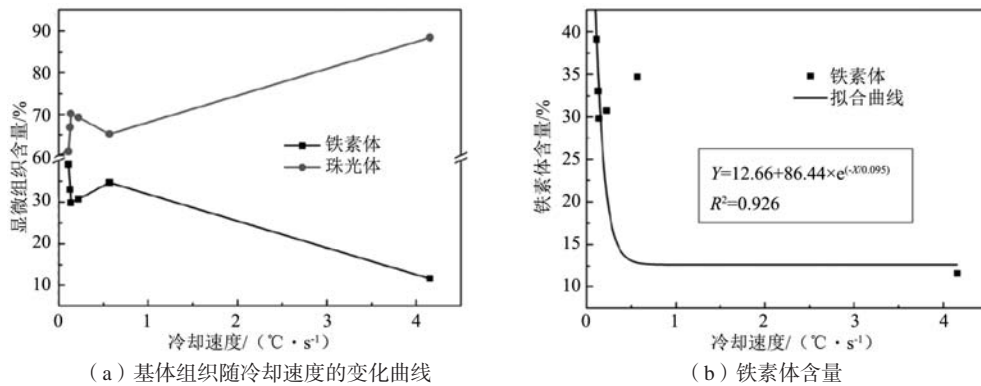


图8 铸态球墨铸铁中基体组织预测模型

Fig. 8 Prediction model of the matrix microstructure in the as-cast ductile iron

此同时，轮毂和轮辋中心以及靠近内浇道的轮辐部位等位置出现了热节，导致其局部凝固时间出现了极大值。另外，随后的冷却阶段冷铁不具有激冷作用，从而导致从铸型中心沿径向进行传热，因此车轮铸件冷却阶段的冷却速度从铸型中心沿径向逐渐增大。

根据石墨相表征参数预测模型，结合车轮铸件剖面中心线局部凝固时间分布的模拟结果，其铸态组织中石墨相的分布规律如图10a所示。可以发现，整个车轮铸件剖面中心线的石墨相球化率在80%~90%的范围内波动，表现出较为出色的球化效果。石墨相平均直径的变化范围为20~30 μm，

而石墨球数量的变化范围为75~300 个/mm²，车轮铸件的热节位置发现石墨相平均直径略有升高，而石墨球数量相应降低。总的来说，由于车轮铸件采用同时凝固的铸造工艺设计，其石墨相在基体中的分布较为均匀。根据铸态基体组织含量预测模型，结合车轮铸件剖面中心线冷却阶段的冷却速度分布的模拟结果，其铸态组织中基体组织含量的分布规律如图10b所示。可以发现，整个车轮铸件剖面中心线的铁素体含量的变化范围为13%~41%，而珠光体含量的变化范围为59%~87%。基体组织含量沿着径向方向表现出铁素体含量减小，而珠光体含量增加。

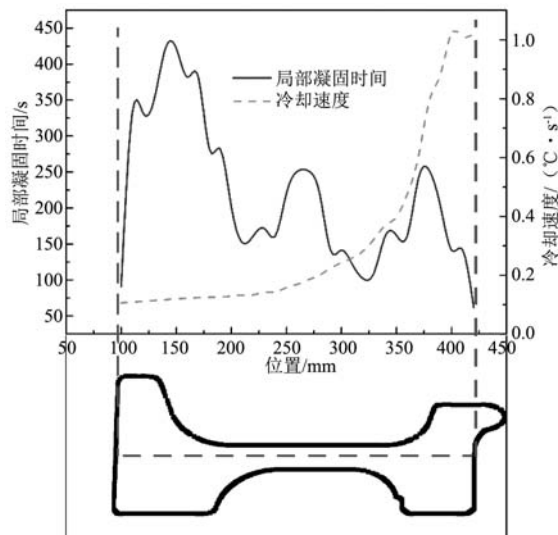
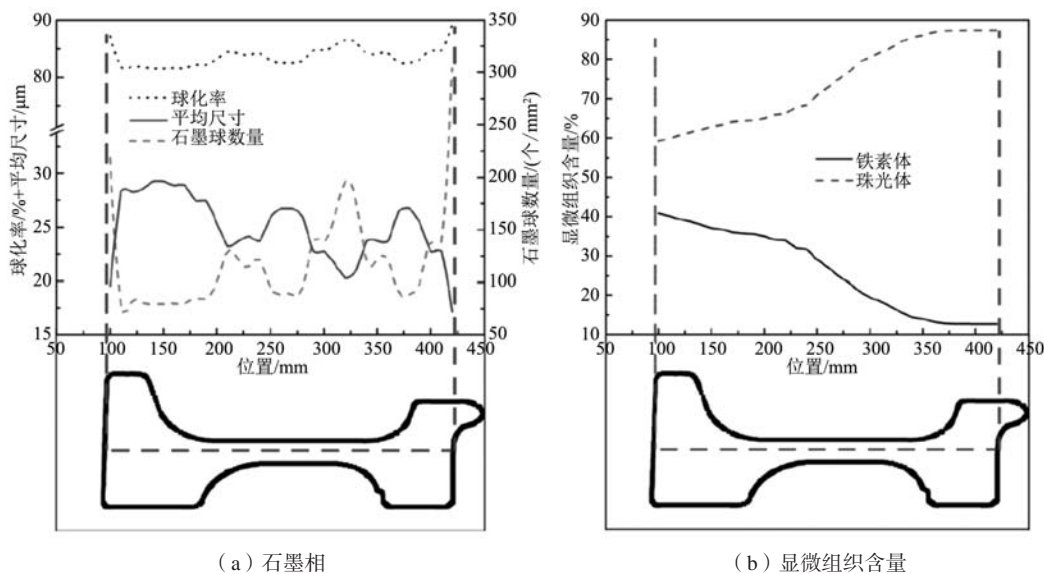


图9 全尺寸球墨铸铁车轮铸造过程的表征参数

Fig. 9 Characterization distribution of the casting process for the full-size ductile iron wheel



(a) 石墨相

(b) 显微组织含量

图10 全尺寸球墨铸铁车轮铸态组织预测

Fig. 10 As-cast microstructure prediction of the full-size ductile iron wheel

4 结论

(1) 通过不同的铸型设计, 不同尺寸激冷球墨铸铁铸造过程可以得到不同的降温历程, 从而实现对全尺寸球墨铸铁车轮铸造过程中不均匀的降温历程的模拟。随着铸型尺寸的减小, 石墨相的球化率和数量增加, 而平均直径尺寸减小; 随着铸型厚度的降低, 铁素体含量先变化不大再出现明显下降, 而珠光体含量则是先变化

不大再明显上升。

(2) 根据不同尺寸试样热态试验和全尺寸车轮数值模拟结果, 建立了铸态组织中石墨相和基体组织预测模型。由于同时凝固的铸造工艺设计, 车轮铸件中石墨相在基体中分布较为均匀; 铸态基体组织含量沿径向变化不大, 只是在轮辋表层出现了铁素体含量减小、珠光体含量增大的现象。

参考文献:

- [1] 曾艺成, 李克锐, 张忠仇, 等. 等温淬火球墨铸铁研发工作的进展与发展趋势 [J]. 铸造, 2017, 66 (9): 940-947.
- [2] DÜNDAR S. Application of austempered ductile iron to rail wheel sets [J]. Journal of Engineering Sciences, 2003, 9: 283-287.
- [3] 房贵如, 王云昭. 现代球墨铸铁的诞生、应用及技术发展趋势 [J]. 现代铸铁, 2000 (1): 3-11.
- [4] 张华. 城市轨道交通车轮用球墨铸铁材料制备及性能研究 [D]. 上海: 上海大学, 2018.
- [5] SERTUCHA J, SUAREZ R, ASENJO I, et al. Thermal analysis of the formation of chunky graphite during solidification of heavy-section spheroidal graphite iron parts [J]. ISIJ International, 2009, 49 (2): 220-228.
- [6] ZHENG H L, SUN Y C, ZHANG N, et al. An evaluation model for the nodule count of graphite particles in ductile iron castings [J]. ISIJ International, 2010, 50 (12): 1981-1984.
- [7] GLAVAS Z, STRKALJ A, MALDINI K. Effects of antimony and wall thickness on graphite morphology in ductile iron castings [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2016, 47 (4): 2487-2497.
- [8] 吴家栋, 陈杨珉, 陈湘茹, 等. 铈对球墨铸铁共晶温度和铸态组织的影响 [J]. 上海金属, 2021, 43 (2): 49-60.
- [9] 郑志伟, 陈荣发, 李志龙, 等. 基于ProCAST等温淬火球墨铸铁车轮浇注系统的改进 [J]. 铸造, 2015, 64 (5): 430-433.
- [10] 魏冬冬, 徐贵宝, 张军, 等. 风电球墨铸铁行星架铸造工艺研究 [J]. 铸造, 2021, 70 (10): 1233-1238.
- [11] 白海龙, 陈东东, 滕媛, 等. 铝合金轮毂砂型重力铸造过程的数值模拟 [J]. 铸造技术, 2017, 38 (1): 250-256.
- [12] 夏小江. 铁型覆砂铸造球墨铸铁件缩松缩孔的防止 [J]. 铸造, 2020, 69 (2): 187-190.
- [13] 常亮, 张伟, 翟启杰, 等. 铈对高性能球墨铸铁微观组织的影响 [J]. 上海金属, 2015, 37 (1): 39-42.
- [14] 郑洪亮, 田卫星, 孙建俊, 等. 球墨铸铁缩松形成机理研究的现状 [J]. 铸造, 2005, 54 (11): 5-7.

Prediction of As-Cast Microstructure in Full-Size Ductile Iron Wheel

ZHANG Hua^{1,2}, ZHANG Ming-hui¹, HONG Xin², ZHAI Qi-jie²

(1. Jiangsu Yonggang Group Co., Ltd., Suzhou 215600, Jiangsu, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract:

The effect of cooling rate on sand cooled ductile iron (SCDI) was investigated by the design of the mold size. Besides, the numerical simulation was conducted in the casting process of full-size ductile iron wheel. According to the results of thermal test and numerical simulation, the prediction models of as-cast microstructure were established and the microstructure distributions of the full-size ductile iron wheel were predicted. The results showed that graphites were uniformly distributed in the matrix due to simultaneous solidification casting process. Besides, the matrix microstructure changed little along with the radial direction of the wheel, just showing the trends of the increase in ferrite content, and decreased in pearlite near the wheel rim.

Key words:

ductile iron; numerical simulation; prediction models of as-cast microstructure