

基于凝固过程电导率变化的球墨铸铁球化效果预测方法及装置

李朝, 马旭梁, 李大勇

(哈尔滨理工大学材料科学与化学工程学院, 黑龙江哈尔滨 150080)

摘要: 石墨形态对铸铁力学性能具有重要影响, 炉前快速预测铸铁石墨形态对于提高铸件质量和生产效率具有重要意义。本文根据电磁感应原理, 设计了一款基于凝固过程电阻率监测的铸铁石墨形态预测方法及装置, 采用环形试样和电磁信号传感器同时获取熔体凝固过程电阻率及温度变化信号, 以电磁参数评价石墨形态。预测装置包括铸铁熔体取样器、电磁信号传感器、高速信号采集模块、FPGA信号处理模块等硬件单元, 软件采用Verilog语言编程。通过试验建立了铸铁石墨形态与电磁参数的相关性模型。

关键词: 球墨铸铁; 石墨形态; 电磁感应; 预测方法; 预测装置

随着智能铸造和绿色铸造技术的不断进步, 对铸造过程检测技术提出了越来越高的要求。石墨形态对铸件性能具有重要影响, 炉前快速预测石墨形态对于调控铸件质量无疑具有重要意义。目前, 已有多种快速检测方法及装置用于实际生产, 包括快速金相法、热分析法、共晶膨胀法、氧电势法、表面张力法、超声波波速法及音频检测法等^[1-5]。为了进一步提高炉前快速预测铸铁石墨形态的准确度和速度, 本文提出采用铸铁熔体凝固过程电磁参数预测石墨形态的方法, 并研制了基于电磁参数变化动态监测的铸铁石墨形态预测装置。以下介绍预测方法的基本原理、装置构建方法及其初步应用结果。

1 基于电阻率变化预测铸铁石墨形态的基本原理

以铸铁冷却曲线特征温度值为判据预测石墨形态已有多项研究和应用历史, 典型判据有单样杯采样共晶回升温度和冷却曲线尾部斜率等^[6-7]。也有用三样杯热分析建立判据预测铸铁石墨形态的研究, 该方法将共晶凝固过冷回升温度与稳定系共晶温度之差记为 ΔT_1 , 介稳定系共晶温度与稳定系共晶温度之差记为 ΔT_E , 二者之比记为石墨比度, 以此作判据预测铸铁石墨形态^[8]。

铸铁凝固是一个新相析出和转变的过程, 伴随着新相析出和相转变将发生电阻率变化。因此, 利用凝固过程电阻率等参数可以表征某些相组织变化。

表1和表2是文献[9-10]给出的常见铸铁组织常温及1 130 °C时的电阻率数据。虽然铸铁试样电阻率变化是基体组织与石墨共同影响的结果, 但通过处理工艺稳定基体组织改变仍可获得石墨形态与试样电阻率的相关性, 因不同形态石墨对电子阻抗能力不同, 从而使依据电阻率变化预测铸铁石墨形态成为可能。

基于电阻率变化监测铸铁新相生成及长大具有明显优势, 利用试样凝固过程冷

作者简介:

李朝(1999-), 男, 硕士生, 主要研究方向为铸铁石墨形态的快速预测。电话: 17763169730, E-mail: 1151970370@qq.com

通讯作者:

李大勇, 男, 教授, 工学博士, 博士生导师。E-mail: dyli@hrbust.edu.cn

中图分类号: TG143.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)03-0380-06

收稿日期:

2023-11-22 收到初稿,
2023-12-20 收到修订稿。

表1 铸铁内部组织在常温时的电阻率

Table 1 Resistivity of internal structure of cast iron at room temperature

项目	铁素体	渗碳体	珠光体	多晶体石墨	退火碳	球状石墨
比电阻率/ $(\mu\Omega \cdot \text{cm}^{-1})$	10	140	20	1 375	150	150

表2 铸铁内部组织在1 130 °C时的电阻率
Table 2 Resistivity of internal structure of cast iron at 1 130 °C

项目	铁液	奥氏体	渗碳体	片状石墨	球状石墨	奥氏体+片状石墨共晶团	奥氏体+球状石墨共晶团	奥氏体
比电阻率/($\mu\Omega \cdot \text{cm}^{-1}$)	131	107.6	296	700	67	153.7	108	196.5

却曲线辅助判定共晶反应起始时刻可使电阻率参数检测更准确。制造热电参数取样器，采用双电偶直接测定试样冷却曲线，用非接触方法测定试样电阻率，建立基于凝固过程电阻率参数监测的预测模型，实现铸铁石墨形态快速预测。

1.1 系统总体构成

用于铸铁凝固过程热电参数监测系统总体构成简图如图1所示，主要由热电参数取样器、信号前处理单元以及FPGA单元组成。热电参数取样器由环形试样池和励磁线圈构成，用于铸铁凝固过程温度及电阻率信

号采集；信号前处理单元包括热电偶信号放大器、励磁线圈交流信号整流及滤波处理电路和热电信号模/数转换；FPGA单元主要功能是产生励磁信号和完成数据处理以及结果输出，是本系统的核心模块。

监测系统工作过程如下：FPGA被启动后，发出正弦励磁信号，使励磁线圈产生感应磁场，铁液浇入取样器后，热电偶输出试样温度信号，励磁线圈磁场在环形试样内部产生感生电流并反作用于励磁线圈，FPGA单元采集励磁线圈电流变化可知环形试样电阻率变化，进而依据热电参数判据预测铸铁石墨形态。

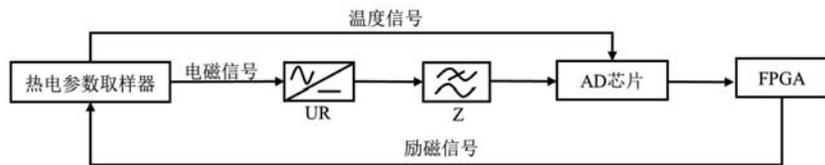


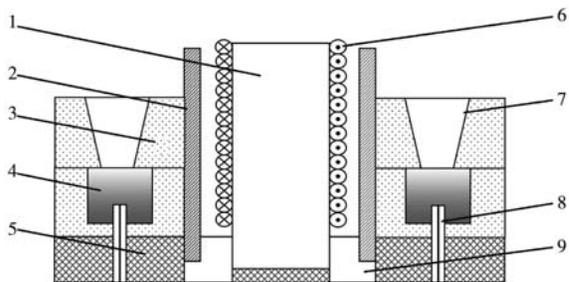
图1 热电参数监测系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of thermoelectric parameter monitoring system

1.2 热电参数取样器

热电参数取样器由环形试样池和励磁线圈两部分组成，结构简图如图2所示。

环形试样池由树脂砂制成，上下分型结构，下型试样池底部有两只K型热电偶用于实时监测试样温度，试样凝固时间大约3 min。励磁线圈由高频锰锌铁氧体磁芯和多匝线圈组成，励磁线圈外部与隔热材料之间设有冷却风道。本装置采用小型风机对励磁线圈和铁氧体铁芯进行冷却处理，风机功率一定的情况下，通过冷却风道的风量在单位时间内相



1. 锰锌高导磁铁氧体；2. 隔热层；3. 树脂砂型；4. 铁液；5. 固定底座；6. 电磁线圈；7. 浇口杯；8. K型热电偶；9. 冷却风道进风口

图2 热电参数采样器示意图

Fig. 2 Schematic diagram of thermoelectric parameter sampler

近，可认为冷却风道的冷却能力恒定。为保证试验结果的准确性和重复性，特设计了固定底座，用于采样器的定位，确保浇注时K型热电偶与环形试样具有恒定的相对位置。

1.3 信号前处理单元

对K型热电偶输出的毫伏级电压信号，采用AD620数据放大器放大；在励磁信号输出端与励磁线圈之间接入采样电阻并对压降信号实施整流滤波处理。调理后的热电偶信号和励磁线圈电压信号送入A/D转换电路完成模数转换，AD9280芯片为8位A/D芯片，转换精度和速度满足本文采样要求。信号前处理单元原理简图如图3所示。

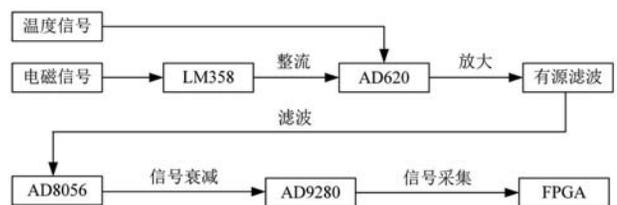


图3 系统信号前处理单元原理简图

Fig. 3 Principle diagram of system signal pre-processing unit

1.4 FPGA 单元

FPGA主要用以产生励磁信号和完成热电信号的实时处理与保存。

励磁信号产生：由于FPGA具有高速读取和写入数据的优点，可将正弦信号通过波形数据发生器转换成二进制字符并存入ROM内供FPGA读取，通过建立时钟锁相环的形式控制FPGA读取数据的速度，实现信号频率可调的功能。

数据采集与处理：FPGA通过AD控制器模块、存储器模块和数据处理模块，其中存储器模块包括FIFO和SDRAM的设计。

基于凝固过程电阻率监测的铸铁石墨形态预测装置的软件设计逻辑框图如图4所示

AD控制器利用一个有限状态机来实现。State0状态下，系统上电，完成系统参数的初始化，当检测到AD控制器接收的信号时，进入State 1状态；系统转入State 1状态后，首先判断接受的数据是否有效，若数

据有效，数据开始计数，当数据量达到预设值时，完成系统计数，进入State 2状态；系统转入State 2状态之后，首先判断接入数据是否符合预设要求，如若符合要求，数据流入存储模块，系统等待计数，待数据传输完成，进入State 0状态。否则系统转入State 1状态，重新对数据计数。

存储模块主要应用FIFO进行数据缓存和传递，首先由AD控制器读取数据，当接受信号时，首先进行使能端信号识别，若使能端为高电平，FIFO在系统时钟的第三个时钟的上升沿开始写入数据并计数，数据写入完成后，FIFO使能端降为低电平，数据终止写入。FIFO进行数据读取时，其端口和时钟与写数据时相同。

SDRAM工作前首先要完成初始化操作，初始化完成后开始读写操作，因为SDRAM在工作时需要不断进行刷新才能完成数据的存储，所以在其工作时需要定时对SDRAM进行刷新操作，并且刷新的优先级为最高。

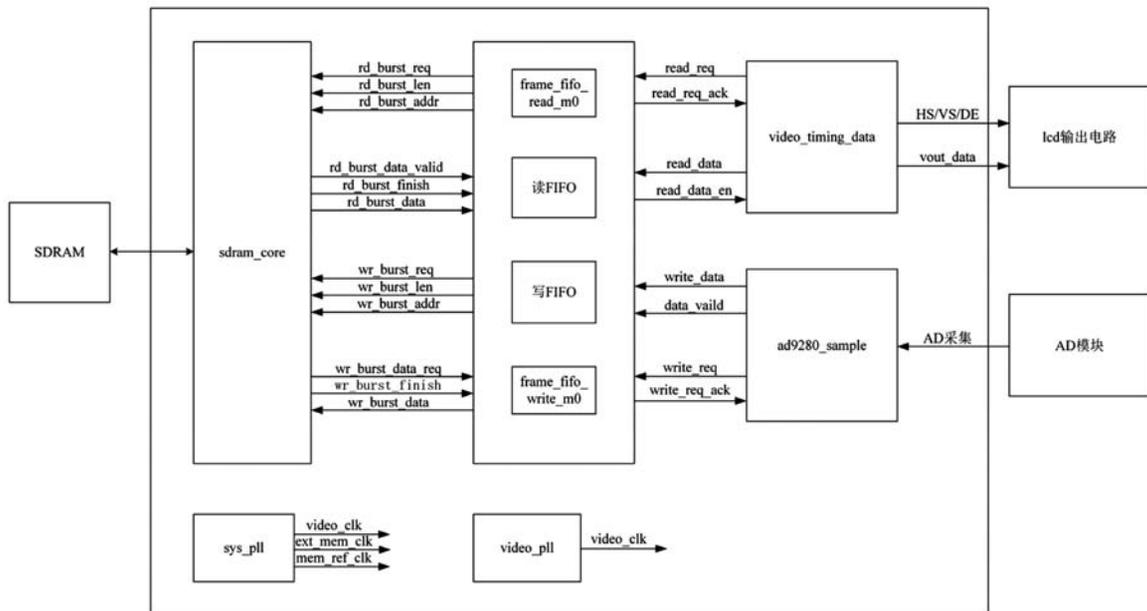


图4 FPGA软件设计总体逻辑框图

Fig. 4 FPGA software design overall logic block diagram

2 基于电阻率变化预测石墨形态的数学模型建立

本试验以灰铸铁和球墨铸铁为研究对象，每次试验将2 kg配置好的生铁、钼铁、钼铁和碳钢放置在中频感应炉中，在 $(1\ 500 \pm 25)$ °C下熔化。浇注球墨铸铁时先进行球化和孕育处理，将铁液倒入浇包进行扒渣后加入二次孕育剂，再将铁液浇入砂型中。浇注灰铸铁时，孕育操作和浇注过程与球墨铸铁相同。为了研究石墨形态变化对电磁参数的影响，本试验还设计了原铁液凝固试验。球墨铸铁试验中通过控制球化剂

的添加量获得不同球化等级的试样，记录铁液凝固过程中的温度和电阻率变化，待铁液凝固后在其热电偶附近取样观察。试样经过预磨、抛光处理后，采用金相显微镜观察试样的金相组织。对于球墨铸铁，不同球化剂含量的试样选取5个视场，采用Image-Pro软件测量和统计其石墨面积和最大Feret直径，根据国家标准GB/T 9441—2021对球化等级进行评级。图5为以上几种试样的金相照片。

不同石墨形态铸铁试样温度及电磁参数随时间的变化曲线如图6所示，试样电阻率以监测系统输出的电磁参数代表。从图中可以看出，共晶反应前灰铸铁

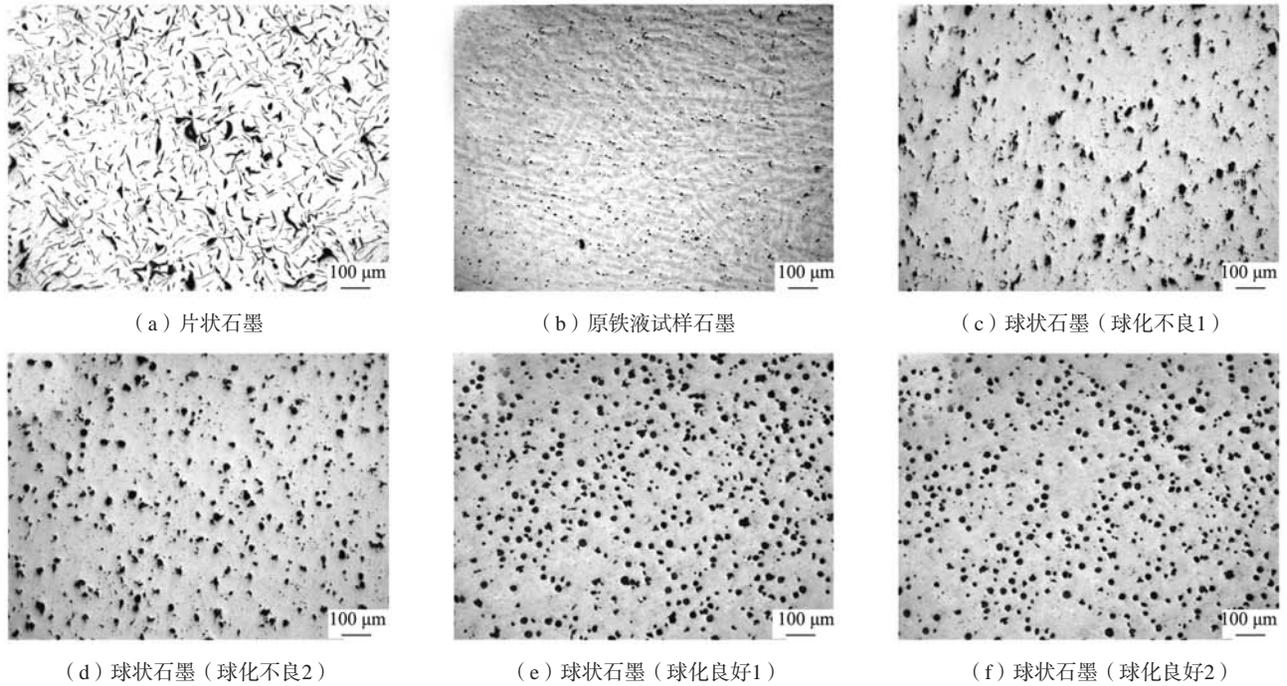


图5 不同试样的金相组织

Fig. 5 Metallographic structure of different samples

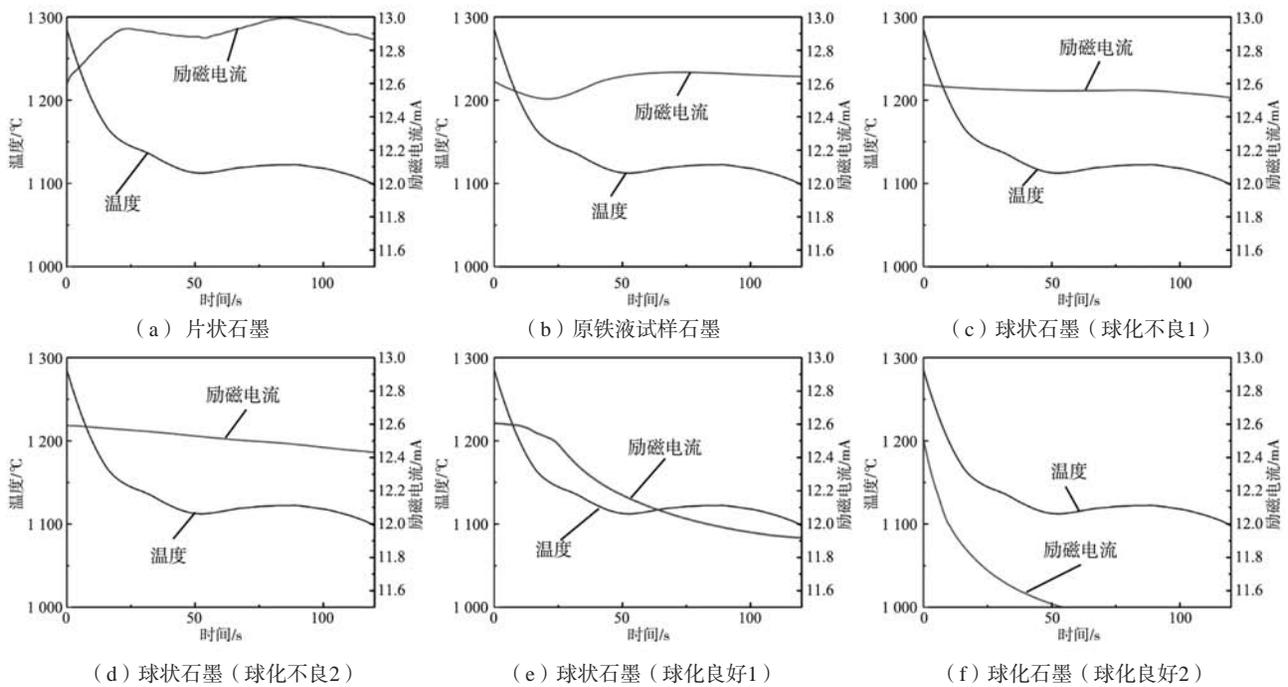


图6 不同石墨形态铸铁试样温度及电磁参数随时间的变化

Fig. 6 The change of temperature and electromagnetic parameters of cast iron samples with different graphite morphology with time

的电磁参数随温度的下降而上升，原铁液和球墨铸铁的电磁参数随温度下降而下降。共晶反应开始后，原铁液试样电磁参数变化趋势发生转变，灰铸铁电磁参数变化趋势逐渐平缓，球墨铸铁电磁参数依然延续之前的下降趋势。因此，铁液从凝固开始到共晶结束时电磁参数的差值可作为评价铁液石墨形态以及球化效

果的判据。此外，为了严格试样凝固条件，还对铸铁的冷却速率进行了计算，灰铸铁、原铁液、球化不良（1）、（2）、球化良好（1）、（2）试样冷却速度分别为1.555 °C/s、1.546 °C/s、1.550 °C/s、1.553 °C/s、1.567 °C/s，冷却速度相近，可认为以上试样是在相同的冷却条件下凝固的。

由于灰铸铁和未经处理的球铁原铁液试样凝固过程中电磁参数变化具有明显特征, 依此即可准确预测其为非球状石墨形态。对于球化处理后铸铁石墨形态预测和球化级别判定, 依据电磁参数结合温度参数予以细分。本文以球化剂添加量为变量, 设置了质量分

数为0.5%~2.0%的对比试验。测量不同球化剂添加量球墨铸铁的冷却曲线和电磁参数曲线, 凝固取样后, 进行预磨、抛光处理后观察金相组织, 根据国家标准GB/T 9441—2021对球化等级进行评级。图7为选取的部分球墨铸铁的金相照片。图8为不同球化程度铁液凝固过

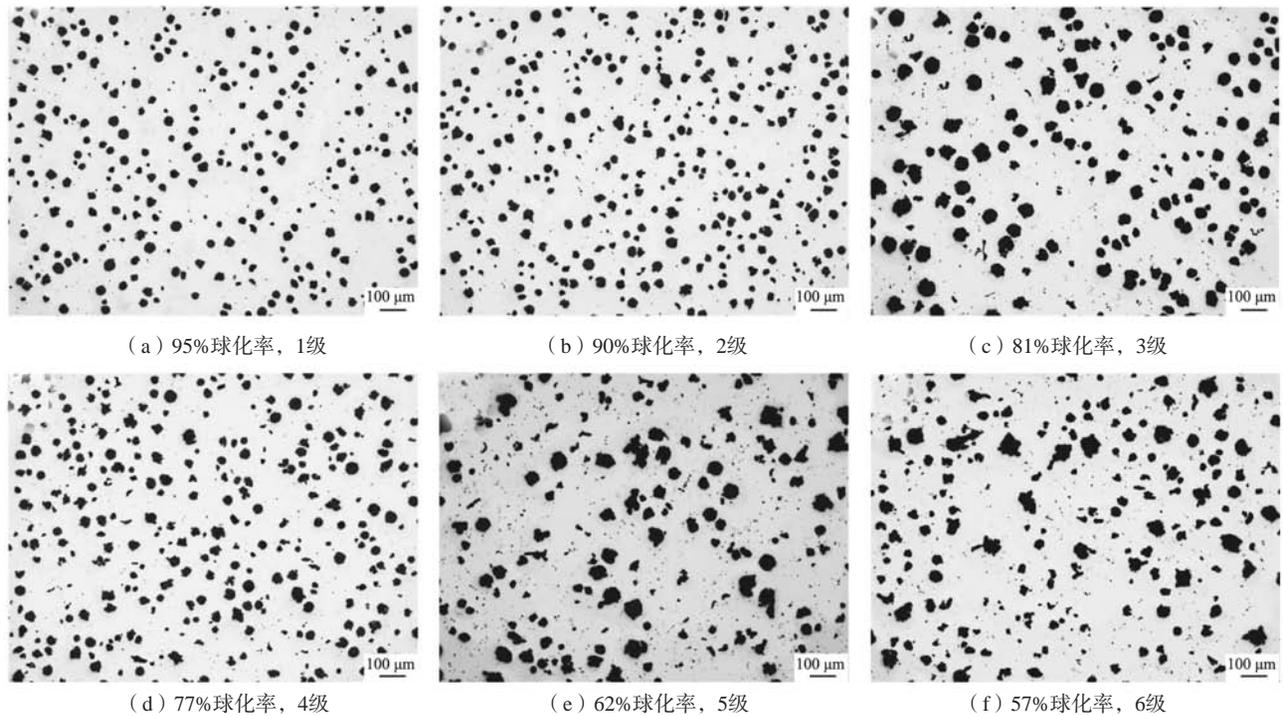


图7 不同球化等级球墨铸铁的金相组织

Fig. 7 Metallographic structure of ductile iron with different spheroidization grades

程中电磁参数的变化曲线。

从图8可以看出随着球化效果越来越好, 其电磁参数在铸铁共晶阶段的差值也逐渐增大, 将从浇注到铁液共晶反应结束所用的时间记为 Δt , 将电磁参数在 Δt 时间内的差值记为 ΔA , 并对 ΔA 和球化率 ML 的关系进行拟合, 建立评价球化效果的评价模型, 如式(1)所示。二者的相关系数接近于1, 拟合效果符合预期要求。

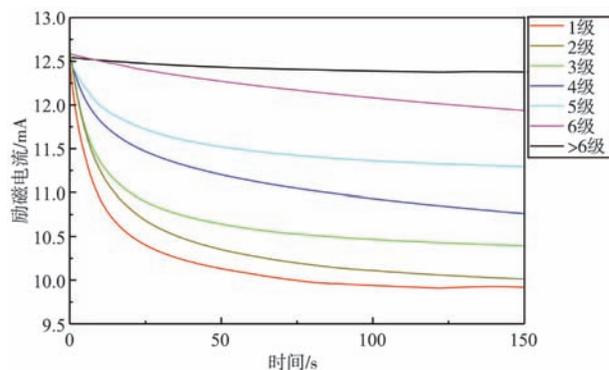


图8 不同球化等级球墨铸铁的电磁参数随时间变化曲线

Fig. 8 The variation curves of electromagnetic parameters of different spheroidized grade ductile iron with time

$$ML=0.02555\Delta A^3-0.16\Delta A^2+0.40768\Delta A+0.45554 \quad (1)$$

其相关系数 $R^2=0.97554$ 。

为验证模型的准确度, 采用本文所述方法和金相法同时对16组不同球化剂添加量的球墨铸铁进行球化等级评价, 数学模型准确度的验证结果如表3所示。从表格中可以看出除试样3和9以外, 两种方法预测结果完全一致。依据国标GB/T 9441—2021, 试样3的球化率为60.03%, 试样9的球化率为79.82%, 两法判定结果相差分别为1.2001%和1.274%, 由于两试样球化率处于球化等级的分界处, 因此使判断出现差异。

3 结论

(1) 由环形试样池和励磁线圈构成热电参数取样器可以实现铸铁试样凝固过程温度信号和电阻率信号实时采集。

(2) 构建的基于电磁参数的铸铁石墨形态预测模型具有较高预测精度, 热分析对新生相的敏感性与电阻率对相生长过程的关联性是预测精度高的主要原因。

(3) 以FPGA为中心构建的铸铁石墨形态预测装置具有结构简单、开发周期短和抗干扰能力强等优点。

表3 不同球化等级评价模型验证试验结果
Table 3 Different spheroidization grade evaluation model verification test results

试样编号	ΔA	ML	电阻率法预测	金相法检测	结果是否相同
1	0.173 2	0.521 483	6级	6级	是
2	0.227 9	0.540 443	6级	6级	是
3	0.394 7	0.593 096	6级	5级	否
4	0.561 7	0.638 581	5级	5级	是
5	1.002 8	0.729 229	4级	4级	是
6	1.385 7	0.781 219	4级	4级	是
7	1.459 2	0.789 129	4级	4级	是
8	1.555 3	0.798 696	4级	4级	是
9	1.661 2	0.808 371	3级	4级	否
10	1.775 3	0.817 981	3级	3级	是
11	1.998 5	0.835 189	3级	3级	是
12	2.186 2	0.849 064	3级	3级	是
13	2.336 4	0.860 502	3级	3级	是
14	2.398 4	0.865 445	3级	3级	是
15	3.032 8	0.933 017	2级	2级	是
16	3.299 1	0.976 507	1级	1级	是

参考文献:

- [1] 李大勇, 陈捷, 曾昕, 等. 炉前快速评价球墨铸铁球化质量的新方法 [J]. 中国机械工程, 2002 (19): 1699-1701.
- [2] 李大勇. 铸造生产过程在线快速检测技术研究及应用进展 [J]. 铸造, 2022, 71 (5): 517-543.
- [3] 徐振宇. 球墨铸铁球化孕育处理动态调控方法及系统研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2017.
- [4] 李峰. 基于表面张力快速检测方法的铸铁石墨形态炉前识别技术 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2005.
- [5] 裴立新, 徐振宇, 李大勇. 铁液氧含量快速检测法评价球墨铸铁球化效果 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2018, 23 (1): 30-34.
- [6] 吴万奋. 热分析法在铸铁质量控制方面的应用 [J]. 工业计量, 2017, 27 (S2): 30-32.
- [7] 蒋文君. 热分析法在铸铁生产中的应用简述 [C]//重庆铸造行业协会, 重庆市机械工程学会铸造分会. 2018重庆市铸造年会论文集. 2018: 94-96.
- [8] 菅野利猛. 三样杯热分析法预测石墨形态和力学性能 [J]. 铸造工学, 2000, 72 (3): 175-180.
- [9] 宋学孟. 金属物理性能分析 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2000.
- [10] 白洪金, 李洪, 姚剑浩, 等. 用电导率多重分析法对球墨铸铁炉前球化程度进行定量检测 [J]. 铸造技术, 2007 (9): 1167-1169.

Method and Device for Predicting Nodularization Effect of Ductile Iron Based on Conductivity Change During Solidification Process

LI Zhao, MA Xu-liang, LI Da-yong

(School of Materials Science and Chemical Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, Heilongjiang, China)

Abstract:

Graphite morphology has an important influence on the mechanical properties of cast iron. Rapid prediction of graphite morphology of cast iron in front of the furnace is significant to improve the quality and production efficiency of castings. In this paper, based on the principle of electromagnetic induction, a method and device for predicting the graphite morphology of cast iron based on the resistivity monitoring of solidification process are designed. A circular sample and an electromagnetic signal sensor are used to obtain the resistivity and temperature signals in melt solidification process at the same time, and the graphite morphology is evaluated by electromagnetic parameters. The prediction device includes cast iron melt sampler, electromagnetic signal sensor, high-speed signal acquisition module, FPGA signal processing module and other hardware units. The software is programmed in Verilog language. The correlation model between graphite morphology and electromagnetic parameters of cast iron was established by experiments.

Key words:

ductile cast iron; graphite morphology; electromagnetic induction; prediction method; prediction device