

基于热分析技术的球墨铸铁球化率和收缩特性预测

白宇轩¹, 叶 寒¹, 顾 嘉¹, 杨明浩¹, 李仕林², 朱福生²

(1. 南昌大学先进制造学院, 江西南昌 030024; 2. 龙南龙钇重稀土科技股份有限公司, 江西赣州 341001)

摘要: 针对球铁生产中存在的缩孔、缩松和球化不良等铸造缺陷导致废品率较高的问题, 开展基于热分析技术的球铁球化率和收缩特性的预测研究。使用特定的热分析样杯进行铁液取样分析, 在浇注目标成分铁液后, 多路温度采集系统记录试样凝固温度曲线, 计算了液相线温度 TL 、共晶最低温度 TEU 、共晶最高温度 TER 特征温度, 并以这些特征值为变量, 通过多元线性回归方法建立了预测收缩率和球化率的数学模型。经现场试验测试, 采用模型预测收缩率和球化率的平均误差分别不超过1%和2%。

关键词: 热分析; 球墨铸铁; 收缩倾向; 球化效果; 回归分析

作者简介:

白宇轩(1999-), 男, 硕士生, 主要研究方向为热分析仪器开发。E-mail: 1345468386@qq.com

通讯作者:

叶寒, 男, 博士, 副教授。电话: 13767168648, E-mail: yehan@ncu.edu.cn;
顾嘉, 男, 博士, 讲师。电话: 13687918766, E-mail: gujia@ncu.edu.cn

中图分类号: TG143.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)

07-0975-07

基金项目:

蠕墨铸铁铁水热分析关键技术开发与应用(HX202105210001)。

收稿日期:

2023-08-03 收到初稿,

2023-09-26 收到修订稿。

球墨铸铁是一种常用的铸件材料, 它通过球化处理使石墨以球形存在, 从而提高了材料的品质和使用寿命。相比于普通铸铁, 球墨铸铁具有高强度、高韧性、高可锻性和高耐磨性等优点, 因此被广泛应用于机械制造、汽车工业、建筑材料和管道等领域, 成为工业发展的重要材料之一。球墨铸铁还具有阻尼性好、耐热性高、抗腐蚀性能好等特点, 这些优点使得球墨铸铁在现代工业生产中得到了广泛的应用和推广^[1-2]。

但在球墨铸铁的工业化生产中, 因为球化不良、球化衰退、缩孔、缩松等铸造缺陷的存在, 导致废品率相对较高, 影响球墨铸铁件的质量^[3-4]。现今企业所用的球铁质量检验方法, 如快速金相^[5], 其缺点也比较明显, 金相试样的制备时间较长, 只能对试样球化率做评估, 对铁液的收缩性能无法评估, 此时生产的铸件已经浇注成型, 无法对铁液做出调整, 出现问题只能对相应的几箱铸件进行剔除处理。

热分析是研究合金凝固过程的一种有效检测方法, 具有简便、低廉、实用、快速等优点。不仅可以作为可锻铸铁熔化过程的评估工具^[6], 分析Fe-C-Si合金的显微结构和流动性能^[7], 而且可以用来测定合金的主要化学成分(如铸铁的碳硅含量、碳当量)^[8-11]; 测定合金的共晶团数目; 预测铸铁的力学性能等^[12]。在球铁铁液性能预测方面, 美国Ohio州立大学Stefanescu^[13]、华中科技大学熊国庆^[14]、哈尔滨理工大学徐振宇^[15]等开展了球铁球化率的定性分析研究^[16], 但未进行收缩特性研究。本文基于热分析技术, 使用特定方杯和圆柱形热分析样杯进行取样分析, 建立能快速预测球铁液的收缩率(包含缩孔、缩松)、球化率的数学模型, 并测试其准确性。

1 试验流程

1.1 原料与制备

本试验在江西龙南龙钇重稀土科技股份有限公司铸造车间进行, 原材料主要包括球化剂、孕育剂、废钢、增碳剂、硅铁等。本试验以废钢为基本炉料, 通过添加碳增强剂和硅铁调整炉前的碳硅含量, 用300 kg中频感应炉进行熔炼。铁液成分参考QT400-18来配料, 具体化学成分如表1所示。

表1 球墨铸铁原铁液原始和最终化学成分
Table 1 Chemical compositions of raw and final molten ductile cast iron w_B/%

项目	C	Si	Mn	P	S	Mg	RE
原铁液	3.7~3.9	1.6~1.8	<0.3	<0.04	<0.02		
终铁液	3.6~3.8	2.6~2.8	<0.3	<0.04	<0.01	0.035~0.055	0.007~0.012

控制熔炼温度不要超过1 550 ℃，温度过高会导致原铁液中碳烧损严重，最终导致球化不良^[17]；且保温时间要适当，铁液的保温时间过长时，会恶化铁液的冶金质量，会增大球铁的缩松倾向^[18-19]。在铁液出炉前利用红外测温枪进行测温，保证出炉温度控制在1 510~1 530 ℃，并且通过炉前快速碳硅分析仪确定原铁液的碳硅含量在预计的成分范围内，若有误差可补加少量的废钢、增碳剂、硅铁。在实验室有限的条件下为保证球化效果，试验过程采用一次冲入法进行球化处理：出炉前对铁液包进行预热处理，铁液包底部设置凹坑防止熔炼后的铁液浇入铁液包中反应过于剧烈，之后将球化剂、孕育剂放在铁液包底部凹坑内，上面覆盖一层石棉以防止球化剂、孕育剂与铁液剧烈反应而过量烧损。球化反应结束后，撒上珍珠岩造渣并扒渣以净化铁液。球化剂以及孕育剂的成分如表2所示。

表2 试验用球化剂、孕育剂化学成分
Table 2 Chemical compositions of spheroidizing agent and inoculant for test w_B/%

项目	Si	Ca	Ba	Mg	RE
球化剂	46	2.5	1.0	7.0	1.5 (La65Y35)
孕育剂	73		1.0		1.5 (La65Y35)

在铁液球化处理完成后，将铁液倒入准备好的热分析方杯和圆杯。采集热分析温度数据使用的圆杯和制作收缩试样使用的方杯如图1所示。

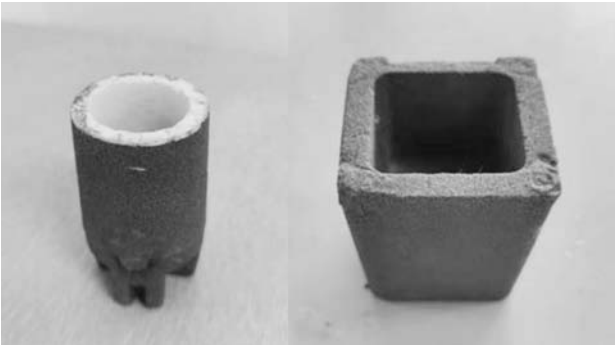


图1 热分析圆杯和热分析方杯
Fig. 1 Thermal analysis round cup and thermal analysis square cup

1.2 原料与制备
试验设备为自主开发的多通道热分析检测仪。待铁液球化处理完毕后，使用天津撒布朗斯生产的Φ30 mm×50 mm的圆柱形热分析样杯（砂型样杯，热分析杯内径为25 mm，高度为55 mm，壁厚为6 mm）进行取样，用来采集热分析试验数据。该样杯中热电偶的测温点位于圆柱形样杯的正中心，工作时热电偶会把采集到的温度信号转换为电信号，并将该信号发给热分析仪。热分析试样凝固过程中的温度数据通过多通道热分析检测仪（图2）记录完成。



图2 多通道热分析检测仪
Fig. 2 Multi-channel thermal analysis detector

1.3 金相测球化率
对自然冷却完毕后的热分析圆杯试样进行以下处理：①从试样中的热电偶位置切割；②分别用400、600、800、1 000、1 200、1 500目的砂纸打磨；③用金相研磨膏抛光；④应用编制的Python程序对金相图片进行灰度处理、二值化、降噪、形态学处理，最后提取出圆整度大于等于0.6的石墨，并采用计数法和面积法计算出球化率。

1.4 排水法测收缩率
采用如图1所示的热分析方杯采集收缩试样，但方杯内无热电偶，以便后期的收缩率测量。
测量方杯试样收缩率分为两步，具体操作如图3所示。

（1）测试球墨铸铁试样的实际质量 m_1 ，并根据球墨铸铁的密度 $\rho_{\text{球铁}}=7.3\text{ g/cm}^3$ ，得出包含内部缩孔、缩松时的试样的实际体积 $V_{\text{实}}$ ， $V_{\text{实}}=m_1/7.3$ 。



图3 排水法测收缩率

Fig. 3 Measuring of shrinkage rate by using of drainage method

(2) 测烧杯加水的质量 m_2 及用细绳悬挂试样浸没水中后质量 m_3 , 得出试样整体体积 $V_{\text{整}} = (m_3 - m_2) / \rho_{\text{水}}$ 。因此, 试样的实测收缩率 $(\%) = (V_{\text{整}} - V_{\text{实}}) / V_{\text{实}}$ 。

2 试验结果及分析

2.1 热分析曲线与温度特征值

采用专门设计的温度采集分析系统对浇注试样温度进行显示和保存, 可设置1~3路温度采集, 采样频率为每秒5个温度数据, 单路数据采集系统界面如图4示。

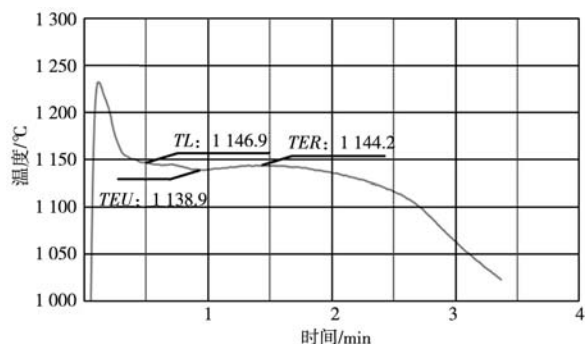


图4 亚共晶球墨铸铁冷却曲线

Fig. 4 Cooling curve of hypoeutectic ductile iron

本论文主要研究热分析曲线和一些关键时间点上的重要特征值, 探索出特征值对球墨铸铁凝固收缩趋势和球化效果的影响规律, 达到建立数学模型并预测收缩率和球化率的目的。试验中测得的各特征值的含义如表3所示。

2.2 预测球化率的数学模型

回归分析是数学统计中用来确定两个或多个变量之间定量相互依赖关系的常用方法^[20-21]。SPSS软件作为当今世界上应用最广泛的统计分析软件, 可以帮助人们完成各种任务, 如相关性分析、曲线估计、回归分析等。本文利用SPSS软件作为数据处理工具, 进行相关分析和曲线估计, 确定因变量和自变量之间的影响关系, 最后进行回归分析, 得到数学模型。

在回归分析中, 相关性是衡量变量之间关联程度的指标。球化率与冷却曲线温度特征值的相关性分析结果如表4所示。

表4中的数字表示参数之间的相关性(R_2)。 R_2 值越高, 相关性越强。正数表示直接相关, 负数表示反向相关。由表4可知, 球化率与特征值TEU、 ΔT 的相关系数较高, 分别为0.522和-0.957。并且结合图5来看,

表3 热分析曲线特征值及其含义

Table 3 Characteristic values and meanings of thermal analysis curves

特征参数	意义	说明
TL	液相线温度	冷却曲线上第一个拐点, 一阶导接近于零
TEU	共晶最低温度	温度回升前最低点, 一阶导数等于零
TER	共晶最高温度	温度回升后最高点, 一阶导数等于零
ΔT	共晶再辉温度	$\Delta T = TER - TEU$, 反映共晶奥氏体和石墨析出量
TS	共晶结束温度	所有金属液全部凝固结束, 一阶导数极小值
G_1	前期收缩时间	TL到TEU之间的时间
G_2	石墨膨胀时间	TEU到TER之间的时间
G_3	后期收缩时间	TER到TS之间的时间
G	总凝固时间	从TL到TS之间的凝固时间
G_1/G	前期收缩时间比例	前期收缩时间占总凝固时间的比例
G_2/G	石墨膨胀时间比例	石墨膨胀时间占总凝固时间的比例
G_3/G	后期收缩时间比例	后期收缩时间占总凝固时间的比例

表4 球化率相关系数计算结果
Table 4 Calculation results of correlation coefficients for the spheroidization rate

项目	TL	TEU	TER	ΔT	TS	球化率
TL	1					
TEU	0.072	1				
TER	0.128	0.718	1			
ΔT	0.031	-0.682	0.019	1		
TS	0.067	0.609	0.461	-0.230	1	
球化率	-0.066	0.522	-0.196	-0.957	0.283	1

球化率与 ΔT 显著相关，且球化率随着 ΔT 的增大而减小，两者呈线性相关。众所周知，球墨铸铁为石墨与奥氏体离异生长的糊状凝固，球墨在液态自由生长的同时逐渐被奥氏体壳包围，奥氏体壳形成后石墨与铁液隔离开来，其长大是碳原子通过奥氏体壳的扩散进行的，共晶反应释放的潜热较小，速度较慢，此时再辉度较小，球化级别较高。而当因为各种因素使得奥氏体壳沿晶界破裂，使球状石墨局部暴露在铁液中，从而转变为共生生长模式，共晶反应放出大量的结晶潜热，共晶回升温度增加，再辉度提高，球墨形态畸

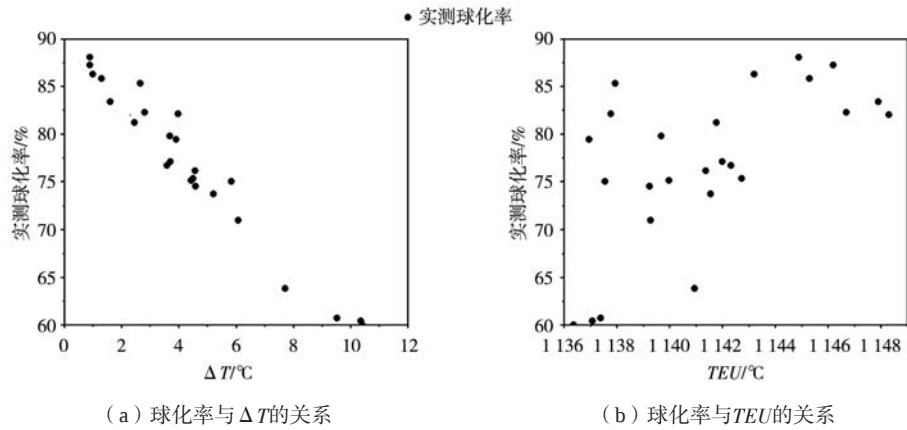


图5 球化率与TEU和 ΔT 的关系
Fig. 5 Relationship between nodularity and characteristic values

变，球化级别降低。
大量试验表明，TEU和 ΔT 是区分球化程度的主要特征温度值，并且两者之间存在很好的对应关系，这也与上面的相关性分析结果是一致的。为了更好地阐明球化率与TEU之间的对应关系，更准确地预测球化率，对TEU和 ΔT 进行曲线估计分析，确定回归分析的类型。曲线估计结果如表5所示。

表5 各特征值与球化率的曲线估计结果
Table 5 Estimation results of the curves between characteristic values and spheroidization rate

变量	线性	二次	三次	逆	指数	对数
TEU	0.273	0.273	0.274	0.272	0.265	0.272
ΔT	0.916	0.918	0.923	0.557	0.919	0.803

通过对两个变量曲线估算的结果观察可知，对于TEU，各曲线模型的 R_2 相差很小，考虑到回归方程的简便性，就选用线性方程形式；对于 ΔT ，三次函数的结果最高，选用三次函数形式。
建立的球化率的预测经验公式如下（为方便表示，把球化率记为SG）：

$$SG = -0.5351 \times TEU + 0.0206 \times \Delta T^3 - 0.2782 \times \Delta T^2 - 2.5161 \times \Delta T + 701.9704$$

最后，对建立的球化率预测模型的预测值与实际值进行对比分析，结果如表6所示。
可以发现，球化率预测值与实际值的最大相对误差为3.34%，平均相对误差只有1.52%。因此可以认为该预测模型能用于预测球墨铸铁球化率。

2.3 预测收缩率的数学模型

与建立预测球化率的数学模型的步骤相同，先进行各种特征值与收缩率的相关分析。在理论上，缩孔、缩松主要与球墨铸铁凝固过程中的凝固膨胀时间比例与凝固收缩时间比例有关，即与 G_1/G 、 G_2/G 、 G_3/G 有关。所以对收缩率与冷却曲线温度特征值 G_1/G 、 G_2/G 、 G_3/G 进行相关性分析，结果如表7所示。
从表7中可以看出，与收缩率相关性最高的是 G_3/G （-0.855），其次是 G_1/G （0.741），最小的是 G_2/G （0.470）。结合图6来看，收缩率与 G_3/G 的相关性最为显著，两者呈负相关，收缩率随着 G_3/G 的增大而减小，收缩率与 G_3/G 之间为近似线性关系。收缩率与 G_1/G 也有很强的相关性， G_1/G 越大，收缩率越大。而收缩率与

表6 基于数学模型的球化率预测值与实际值的比较分析
Table 6 Comparison and analysis of the predicted based on the mathematical model and real spheroidization rate values

TL	TEU	TER	ΔT	实测球化率/%	预测球化率/%	相对误差/%
1 144.75	1 139.24	1 143.82	4.58	74.50	76.99	3.34
1 145.99	1 141.37	1 145.94	4.57	76.10	75.88	0.29
1 143.55	1 139.98	1 144.42	4.44	75.10	77.12	2.69
1 141.08	1 140.95	1 148.67	7.72	63.80	64.91	1.74
1 138.37	1 137.09	1 147.46	10.37	60.40	60.48	0.14
1 149.09	1 142.32	1 145.91	3.59	76.70	79.06	3.08
1 145.96	1 139.28	1 145.36	6.08	71.00	71.39	0.55
1 143.62	1 141.56	1 146.78	5.22	73.70	73.35	0.48
1 144.37	1 142.74	1 147.24	4.50	75.30	75.40	0.13
1 152.87	1 137.93	1 140.58	2.65	85.30	84.83	0.55
1 153.69	1 137.78	1 141.77	3.98	82.10	80.02	2.54
1 148.30	1 148.30	1 150.60	2.30	82.01	80.51	1.83
1 147.90	1 147.90	1 149.50	1.60	83.36	83.08	0.34
1 146.70	1 146.70	1 149.50	2.80	82.26	79.60	3.24
1 159.79	1 137.39	1 146.97	9.54	60.70	61.92	2.01
1 159.05	1 136.36	1 146.78	10.42	60.00	60.79	1.31
1 143.90	1 141.78	1 144.22	2.45	81.20	83.49	2.82
1 139.68	1 139.68	1 143.36	3.69	79.80	80.11	0.39
1 142.13	1 142.00	1 145.70	3.70	77.10	78.81	2.21
1 144.90	1 144.90	1 145.80	0.90	88.05	86.86	1.35
1 142.42	1 137.56	1 143.39	5.83	75.00	73.22	2.38
1 146.20	1 146.20	1 147.10	0.90	87.22	86.16	1.22
1 145.30	1 145.30	1 146.60	1.30	85.84	85.43	0.48
1 148.99	1 136.95	1 140.85	3.91	79.40	80.75	1.69
1 143.20	1 143.20	1 144.20	1.00	86.29	87.47	1.36
1 140.68	1 140.68	1 144.52	3.84	78.90	79.00	0.12
1 141.41	1 141.42	1 143.83	2.41	83.14	83.80	0.78
1 140.13	1 140.13	1 142.55	2.42	83.27	84.47	1.42
1 143.12	1 143.12	1 144.89	1.77	84.60	85.08	0.57
1 139.75	1 139.75	1 141.67	1.92	84.55	86.37	2.11
1 141.01	1 141.01	1 142.71	1.70	86.29	86.44	0.17
1 142.04	1 142.04	1 145.51	3.47	79.77	79.66	0.15

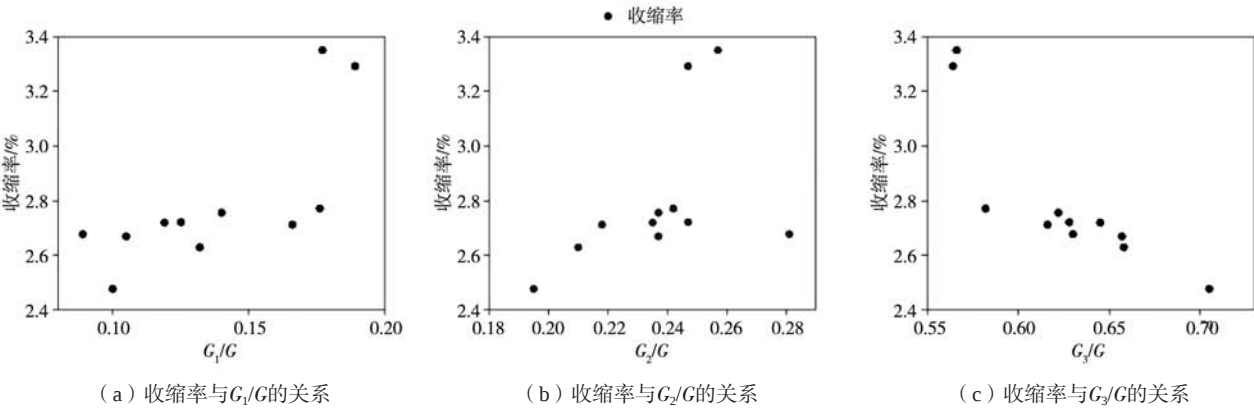


图6 收缩率与特征值的关系
Fig. 6 Relationship between shrinkage rate and characteristic values

表7 收缩率相关系数计算结果
Table 7 Calculation results of correlation coefficients of the shrinkage rate

项目	G_1/G	G_2/G	G_3/G	收缩率
G_1/G	1			
G_2/G	0.057	1		
G_3/G	-0.837	-0.593	1	
收缩率	0.741	0.470	-0.855	1

G_2/G 的相关性并不强,但考虑到 G_1/G 、 G_2/G 、 G_3/G 之间的相关性很强,且 G_2/G 代表的石墨膨胀时间比例在整个凝固过程中有重要意义,所以,选用 G_1/G 、 G_2/G 、 G_3/G 三个特征值作为自变量,收缩率作为因变量进行回归分析。

通过相关性分析,获得了各个特征值与收缩率之间的相关系数后,再通过SPSS软件的曲线估计模块对变量进行分析,确定回归分析的类型。曲线估计结果如表8所示。

表8 各特征值与收缩率的曲线估计结果
Table 8 Estimation results of the curves between characteristic values and shrinkage rate

变量	线性	二次	三次	逆函数	指数	对数
G_1/G	0.549	0.653	0.665	0.444	0.560	0.500
G_2/G	0.221	0.341	0.349	0.255	0.237	0.239
G_3/G	0.730	0.826	0.826	0.768	0.757	0.750

可以看出,各变量的对应的各种曲线模型中,都是三次函数的 R^2 最大。所以,以三次函数的形式进行多元回归分析,建立了收缩率的预测经验公式(为方便表示,把收缩率记为 K , G_1/G 记为 G_1 , G_2/G 记为 G_2 , G_3/G 记为 G_3):

$$K = -1\,087.521 \times G_1^3 + 1\,066.609 \times G_1^2 - 601.523 \times G_1 - 40\,947.59 \times G_2^3 + 30\,029.002 \times G_2^2 - 7\,722.279 \times G_2 - 4\,143.529 \times G_3^3 + 7\,506.582 \times G_3^2 - 4\,943.985 \times G_3 + 1\,927.897$$

表9是对所建立的收缩率数学模型与实际值的对比分析,所有预测结果与实际值的相对误差都较小,最

表9 基于数学模型的收缩率预测值与实际值的比较分析
Table 9 Comparison and analysis of the predicted based on the mathematical model and real shrinkage rate values

$G_1/G/\%$	$G_2/G/\%$	$G_3/G/\%$	实测收缩率/%	预测收缩率/%	相对误差/%
16.9	26.8	84.2	2.629	2.650	0.782
20.2	34.2	89.7	2.756	2.790	1.246
18.4	36.2	92.2	2.721	2.720	0.055
15.75	31.1	85.3	2.721	2.668	1.905
21.0	27.6	78.0	2.712	2.688	0.872
26.2	35.9	86.4	2.771	2.784	0.473
12.6	24.4	88.4	2.476	2.473	0.103
12.4	39.2	88.0	2.677	2.679	0.078
14.8	33.4	92.5	2.669	2.687	0.656
25.8	33.8	77.2	3.292	3.301	0.268
27.2	39.4	87.0	3.351	3.334	0.504

大误差不超过2%,平均误差只有0.63%。说明使用热分析方法快速预测球墨铸铁缩孔、缩松是可行的、准确的。

3 结论

(1) 热分析特征值 TL 、 TEU 、 TER 等与球墨铸铁球化率和收缩率相关,球墨铸铁的球化率预测模型为:

$$SG = -0.535\,1 \times TEU + 0.020\,6 \times \Delta T^3 - 0.278\,2 \times \Delta T^2 - 2.516\,1 \times \Delta T + 701.970\,4;$$

收缩率预测模型为:

$$K = -1\,087.521 \times G_1^3 + 1\,066.609 \times G_1^2 - 601.523 \times G_1 - 40\,947.59 \times G_2^3 + 30\,029.002 \times G_2^2 - 7\,722.279 \times G_2 - 4\,143.529 \times G_3^3 + 7\,506.582 \times G_3^2 - 4\,943.985 \times G_3 + 1\,927.897.$$

(2) 对所建立的球化率和收缩率的预测模型进行了测试,其中收缩率的最大相对误差为1.905%,平均相对误差为0.63%,球化率的最大相对误差为3.266%,平均相对误差为1.39%。

参考文献:

- [1] 柯志敏. QT600-10注塑机尾板铸件的研制[J]. 铸造设备与工艺, 2019(2): 26-29.
- [2] 孟兴堂, 吕猛, 姚钦仁. 铸态QT700-2的生产控制[J]. 铸造设备与工艺, 2021(1): 8-9.
- [3] 郑洪亮. 基于宏-微观模型的球墨铸铁凝固过程数值模拟[D]. 济南: 山东大学, 2007.
- [4] 田代才, 陈铁群. 球墨铸铁铸造质量的无损检测综合评价方法[J]. 无损探伤, 2006(1): 42-45.
- [5] 孙理敏. 流水线生产球墨铸铁铸件的质量检测与控制[J]. 居舍, 2018(21): 248.
- [6] 冯淑花, 孟庆丰, 张燕明, 等. 球墨铸铁缩孔、缩松形成机理的探讨与预防[J]. 铸造技术, 2015, 36(8): 2153-2155.

- [7] SILLEN R V. Optimizing iron quality through artificial intelligence [J]. Modern Casting, 1996, 86 (11) : 43–46.
- [8] HUMPHREYS J G. Effect of composition on the liquidus and eutectic temperatures and on the eutectic point of cast irons [J]. BCRIA J., 1961 (5) : 609–621.
- [9] 王凤娟. 灰铸铁热分析数学模型的研究 [J]. 铸造技术, 2009, 30 (8) : 986–988.
- [10] 吕建南, 征灯科, 华勤. 灰铸铁热分析数学模型及选用范围的研究 [J]. 上海金属, 2008 (3) : 35–38.
- [11] 佟媛媛, 吕建南, 唐生平, 等. 灰铸铁热分析特征值多元线性回归及数学模型优化 [J]. 铸造技术, 2009, 30 (5) : 614–617.
- [12] RIPOSAN I, CHISAMERA M, STAN S, et al. A new approach to graphite nucleation mechanism in gray irons [C]//Proceedings of the AFS Cast Iron Inoculation Conference, September 29–30, 2005, Schaumburg, Illinois.
- [13] CHEN I G, STEFANESCU D M. Computer aided differential thermal analysis of spheroidal and compacted graphite cast irons [J]. AFS Transactions, 1984, 92 (1) : 947–964.
- [14] 熊国庆, 林汉同, 陈平昌, 等. 热分析法测试球墨铸铁球化率的研究 [J]. 华中工学院学报, 1978 (3) : 67–76.
- [15] 徐振宇, 李大勇, 马旭梁, 等. 球铁炉前热分析-共晶膨胀双曲线精密测量方法 [J]. 机械工程学报, 2016, 52 (6) : 65–71.
- [16] 周小平. 球墨铸铁炉前快速检测的热分析方法 [J]. 热加工工艺, 2003 (3) : 39–40.
- [17] 白龙, 任智勇, 张国伟, 等. QT500-7球墨铸铁熔炼过程控制 [J]. 铸造技术, 2014, 35 (2) : 411–413.
- [18] 周启明. 防止球墨铸铁件缩孔、缩松方法的新进展 [J]. 现代铸铁, 2012, 32 (5) : 79–84.
- [19] 刘建东, 伏克松, 刘思涛. 影响球墨铸铁过冷度因素及控制方法 [C]// 中国科协, 青海省科协. 第九届中国西部科技进步与经济社会发展专家论坛, 2007.
- [20] VREDEVOE, DONNA L. Book review: applied multiple regression/correlation analysis for the behavioral sciences, hillsdale [J]. Western Journal of Nursing Research, 1980 (3) : 630–631.
- [21] KISS I, CIOATĂ G V, ALEXA V, et al. Multivariate research in areas of phosphorus cast-iron brake shoes manufacturing using the statistical analysis and the multiple regression equations [J]. IOP Conference Series, 2017 (1) : 012022.

Spheroidization Rate and Shrinkage Characteristics Prediction of Ductile Cast Iron Based on Thermal Analysis Technology

BAI Yu-xuan¹, YE Han¹, GU Jia¹, YANG Ming-hao¹, LI Shi-lin², ZHU Fu-sheng²

(1. College of Advanced Manufacturing, Nanchang University, Nanchang 330009, Jiangxi, China; 2. Longnan Longyi Heavy Rare Earth Science and Technology Co., Ltd., Ganzhou 341001, Jiangxi, China)

Abstract:

In order to solve the problem of high rejection rate caused by casting defects such as shrinkage cavity, porosity and poor spheroidization and so on in the production of ductile cast iron, a study on the spheroidization rate and shrinkage characteristics prediction of ductile cast iron based on thermal analysis technology was carried out. Using a specific thermal analysis sample cup for molten iron sampling analysis, after pouring the target component molten iron, a multi-channel temperature acquisition system was applied to record the solidification temperature curve of the sample, and the characteristic temperatures of liquidus temperature TL , eutectic minimum temperature TEU and eutectic maximum temperature TER were calculated. Using these characteristic values as variables, the mathematical models for predicting shrinkage rate and spheroidization rate have been established through multiple linear regression method. After on-site experimental testing, the average prediction errors of the models for the shrinkage rate and spheroidization rate do not exceed 1% and 2%, respectively.

Key words:

thermal analysis; ductile cast iron; shrinkage tendency; spheroidization effect; regression analysis