

基于热分析技术的球墨铸铁组织性能预测

杨湘杰^{1, 2}, 李 锐^{1, 2}, 杨明浩^{1, 2}, 邓博焰^{1, 2}, 刘钦标^{1, 2}, 叶 寒^{1, 2}

(1. 南昌大学先进制造学院, 江西南昌 330031; 2. 江西省高性能精确成形重点实验室, 江西南昌 330031)

摘要: 通过单变量试验分别研究了不同新型球化剂、孕育剂加入后的球墨铸铁热分析曲线特征值对收缩倾向及球化效果的影响规律, 并利用SPSS回归分析软件建立了曲线特征值与收缩倾向、球化率关联性的数学模型。研究表明, 在其他因素相同时, 共晶再辉温度 ΔT 越大, 共晶反应速度越快, 平均石墨球数越少, 球化级别越差; 球化率、石墨球数随着共晶最低温度 TEU 的升高而逐渐上升。前期收缩时间比例 G_1/G 所占的时间越长, 被测铁液的缩孔率越大; 石墨化膨胀时间比例 G_2/G 越长, 则被测缩松率越大; 并且建立了曲线特征值与收缩倾向、球化率的数学模型, 该模型能够准确预测球化率和收缩倾向。

关键词: 球墨铸铁; 热分析技术; 收缩倾向; 球化效果; 金相图像处理

球墨铸铁是一种铸造铁材料, 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、建筑材料和水管等领域, 成为工业发展的重要材料之一^[1-2]。然而, 在球墨铸铁的工业化生产中, 由于缩孔、缩松和球化不良等铸造缺陷的存在, 导致废品率较高^[3]。对比国外的铸造工作者在球铁的收缩特性、凝固特性以及缩孔、缩松的形成方面开展了广泛而深入的研究, 国内的工作者在上述方面的研究则较少。而且, 在迄今为止的研究工作中, 多数人只考虑了单因素或双因素的影响, 只有少数人才考虑了多因素, 但也未综合考虑多因素进行系统的深入研究。作者在前人研究的基础上, 研究不同球化剂、孕育剂加入后的球墨铸铁热分析曲线特征值对收缩倾向和球化效果的影响规律。并利用SPSS回归分析软件建立了曲线特征值与收缩倾向、球化率的数学模型, 进而达到预测球墨铸铁收缩倾向和球化效果的目的。

1 试验原料及方法

1.1 试验原料

研究不同球化剂、孕育剂对热分析曲线特征值与收缩倾向、球化率、石墨球数的关系, 首先需要确定效果最好的球化剂, 再确定效果最好的孕育剂。在优先确定球化剂的过程中都采用75硅铁孕育剂, 其他材料保持固定不变, 同时试验过程中保证其他影响因素不变。优选孕育剂的过程与此类似, 选用第一阶段优选的效果最佳的球化剂, 搭配孕育剂进行试验。试验过程中保持熔炼所使用的各种原材料及成分稳定不变。原材料主要包括球化剂、孕育剂、废钢、增碳剂、硅铁等, 参考QT400-18配料, 具体化学成分如表1所示。

表1 球墨铸铁成分设计
Tab. 1 Ductile iron composition design

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

作者简介:

杨湘杰(1960-), 男, 教授, 主要从事铝、镁、铜、钛合金及半固态加工技术与设备的研发工作。电话: 18170948136, E-mail: yangxj@ncu.edu.cn

中图分类号: TG143.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)

01-0016-10

收稿日期:

2023-09-18 收到初稿,
2023-12-14 收到修订稿。

在球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 ℃。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：事先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化学成分如表2所示。

表2 球化剂及孕育剂化学成分
Tab. 2 Chemical compositions of spheroidizing agents and inoculants

添加剂	Si	Ca	Ba	Mg	RE	Al	Sr	Bi	Mn	S+O	w _B /%
Q1	46	2.5	1.0	7.0	1.5 (La65Ce35)						
Q2	46	2.5	1.0	7.0	1.5 (La35Ce65)						
Q3	46	2.5	1.0	7.0	1.5 (La65Y35)						
Q4	46	2.5	1.0	7.0	1.5 (La35Y65)						
Q5	46	2.5	1.0	7.0	1.5 (La100)						
Y1	70		3.0								
Y2	76						1.0				
Y3	73		1.0		1.0 (La100)						
Y4	70					4.0					
Y5	64				1.0 (Ce100)			1.0			
Y6	73				1.0 (Ce100)	1.0				1.0	
Y7	70		3.0						3.0		

1.2 试验方法

1.2.1 热分析曲线特征值及含义

热分析曲线是用热电偶测得的铁液凝固过程中的温度变化曲线，它真实反映了铸铁凝固过程中各种综合因素影响下的实际温度变化情况。常见球墨铸铁的铁液凝固过程的热分析曲线及其微分曲线如图1所示，从理论上讲，图1反映的是亚共晶成分的铁液凝固过程，初生奥氏体的析出释放结晶潜热从而产生第一个平台，也即初晶平台，而共晶球墨铸铁在共晶前无初生相的析出。理论上，由于初生石墨析出，过

共晶成分的球墨铸铁的铁液在热分析曲线上也会产生初晶平台，但在实际操作中，由于热电偶测量的局限性以及初生石墨成核释放的结晶潜热较低，不足以使热分析曲线上出现明显的初晶平台。因此需要注意的是，当热分析曲线上没有瞬态初晶平台时，并不一定是典型的共晶球铁曲线。当过共晶球铁之前析出的初生奥氏体或初生石墨量较小时，释放的热量较少，热分析曲线上不会出现瞬态初晶平台^[4]。

热分析曲线包含大量信息，非常复杂。本试验主要研究热分析曲线和一些时间段上的重要特征值，找出特征值对收缩趋势和球化效果的影响规律，达到建立数学模型和预测目的。试验中各特征值的含义如表3所示^[5]。

1.2.2 不同球化剂对特征值、收缩倾向和球化效果影响试验

球化剂的加入对球墨铸铁的球化效果起着重要作用。球化剂中的镁、稀土等球化元素先消耗铁液中的氧、硫元素，降低石墨棱面的表面能，促进球状石墨的形成和长大^[6]。因此，如果球化剂加入量过少的话，石墨球化效果不好，球化剂加入量过多的话，易增加铁液的白口化倾向和收缩倾向，球墨铸铁质量降低^[7]。

由此可见，不同球化剂肯定会影响球墨铸铁热分析曲线特征值、收缩倾向和球化效果。为此，采用了

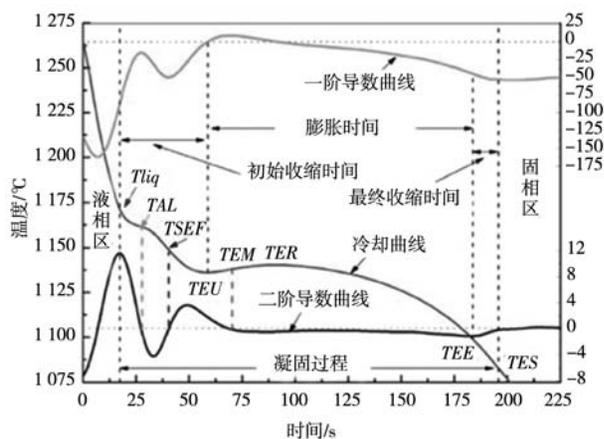


图1 球墨铸铁热分析曲线示意图

Fig. 1 Schematic diagram of thermal analysis curve for ductile iron

表3 热分析曲线特征值及其含义
Tab. 3 Characteristic values and their meanings of thermal analysis curves

特征参数	意义	说明
T_{liq}	液相线温度	铁液开始凝固温度，二阶导第一个极大值
TAL	奥氏体析出温度	冷却曲线上第一个拐点，一阶导接近于零
$TSEF$	共晶开始形核温度	TAL 和 TEU 之间一阶导数极小值
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
TEM	共晶再辉最大速度	温度回升速率最大值，一阶导数最大值
ΔT	共晶再辉温度	$\Delta T=TER-TEU$ ，反映共晶奥氏体和石墨析出量
TES	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/G	前期收缩时间比例	T_{liq} 到 TEU 之间的时间占总凝固时间的比例
G_2/G	石墨膨胀时间比例	TEU 到 TER 之间的时间占总凝固时间的比例
G_3/G	后期收缩时间比例	TER 到 TES 之间的时间占总凝固时间的比例
G	总凝固时间	总凝固时间

5种新型球化剂进行试验：由于有5种球化剂，粒度为2~5 mm左右，故一共熔炼5次，每次在相同的孕育剂的基础上加入不同球化剂。每次熔炼20 kg并分别做球化、孕育处理，保持铁液中其余合金元素的含量及处理工艺不变，随后浇注两个热分析试样和两个缩松试样。具体试验参数如表4所示。

表4 加入不同球化剂的试验方案
Tab. 4 Experimental schemes for adding different nodularizers

编号	C/%	Si/%	球化剂%	孕育剂/%	浇注温度/℃
Q1	3.7	2.8	1.2	0.6	1 520
Q2	3.7	2.8	1.2	0.6	1 520
Q3	3.7	2.8	1.2	0.6	1 520
Q4	3.7	2.8	1.2	0.6	1 520
Q5	3.7	2.8	1.2	0.6	1 520

1.2.3 不同孕育剂对特征值、收缩倾向和球化效果影响试验

孕育剂在球墨铸铁的生产中也起着重要的作用。孕育剂不仅可以增加石墨核心数，增加石墨球的数量，还能延长一包铁液的浇注时间，延长球化衰退时间，减少包底铁液的衰退几率^[8]。为此，研究不同孕育剂对热分析曲线特征值、收缩倾向及球化效果的影响，设计一组加入不同孕育剂的试验：由于有7种孕育剂，粒度1~2 mm左右，故一共熔炼7次，同样每次熔炼20 kg并做球化、孕育处理。保持铁液中其余合金元素的含量及处理工艺不变，随后浇注两个热分析试样和两个缩松试样。具体试验参数如表5所示。

表5 加入不同孕育剂的试验方案
Tab. 5 Experimental schemes for adding different inoculants

编号	C/%	Si/%	球化剂%	孕育剂/%	浇注温度/℃
Y1	3.7	2.8	1.2	0.6	1 520
Y2	3.7	2.8	1.2	0.6	1 520
Y3	3.7	2.8	1.2	0.6	1 520
Y4	3.7	2.8	1.2	0.6	1 520
Y5	3.7	2.8	1.2	0.6	1 520
Y6	3.7	2.8	1.2	0.6	1 520
Y7	3.7	2.8	1.2	0.6	1 520

1.3 金相图像处理

球化率是作为评定球墨铸铁质量的重要指标，目前主要的两种评定方法为目测法和图像法，但目测法受人为因素干扰较大，而通过建立球化率数学公式使用图像法对球化率进行评估则可以较好避免人为因素的影响^[9]。在计算机技术高度发展的今日，金相分析的很多工作可以由计算机来承担，本研究采用python语言编程序对试验获得的金相图像进行处理，具体算法流程如图2所示。

本算法中采用计数法和面积法两种方法计算球化率。计数法定义球化率为圆整度系数大于等于0.6的石墨颗粒面积除以所有形态石墨颗粒的面积，计算公式如下：

$$p_{nod} = \frac{N_{VI} + N_V}{N_{all}} \quad (1)$$

式中： p_{nod} 为球化率， N_{VI} 为VI型石墨颗粒的数量； N_V 为V型石墨颗粒的数量； N_{all} 为所有石墨颗粒的数量；其中VI型和V型石墨颗粒为圆整度系数即石墨颗粒面积

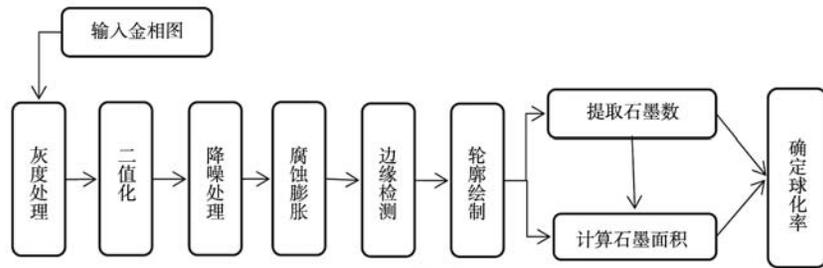


图2 算法流程模型

Fig. 2 Algorithm flow model

与该颗粒最大弗雷德圆面积的比值 ≥ 0.6 的石墨颗粒。

面积法定义球化率为圆整度系数大于等于 0.6 的石墨颗粒面积除以所有形态石墨颗粒的面积，计算公式如下：

$$p_{\text{nod}} = \frac{A_{\text{VI}} + A_{\text{V}}}{A_{\text{all}}} \quad (2)$$

式中： p_{nod} 为球化率， A_{VI} 为VI型石墨颗粒的数量； A_{V} 为V型石墨颗粒的数量； A_{all} 为所有石墨颗粒的数量。

试验整体技术路线如图3所示。

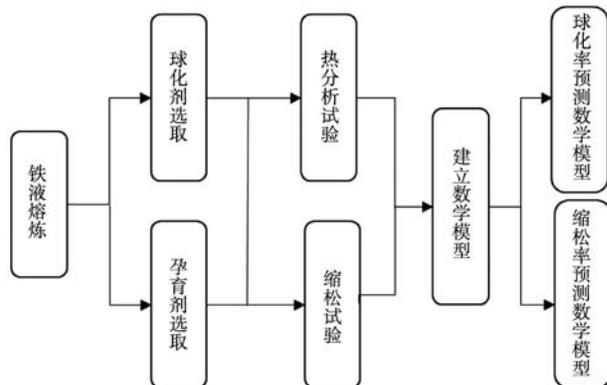


图3 试验技术路线

Fig. 3 Experimental technical route

2 结果与分析

2.1 热分析曲线特征值与球化效果的关系

2.1.1 特征值 ΔT 对球化效果的影响

如图4所示是不同球化剂、孕育剂 ΔT 与球墨铸铁热分析试样凝固组织石墨球化率的关系，图5所示是 ΔT 与对应试样组织中石墨形态和分布的金相照片。从图中我们可以看到，随着 ΔT 值的增大，球墨铸铁热分析试样球化率明显下降。已有研究表明^[10]：片状和不规则状的石墨形态对应的 ΔT 最小；蠕虫状石墨形态对应的 ΔT 最大；而球状石墨形态对应的 ΔT 介于二者之间。其原因是：当 ΔT 较小时，晶粒生长速率相对较慢，晶粒尺寸分布较窄，球化效果较好；而当其较大时，晶粒生长速率相对较快，晶粒尺寸分布宽，球化

效果较差。所以 ΔT 越高，共晶反应速度越快，平均石墨球数越少，球化级别越差。因此，为了获得良好的球化效果，需要控制晶界处的温度梯度，使其尽可能小，从而使晶粒生长速率均匀，晶粒尺寸分布窄。

2.1.2 特征值 TEU 对球化效果的影响

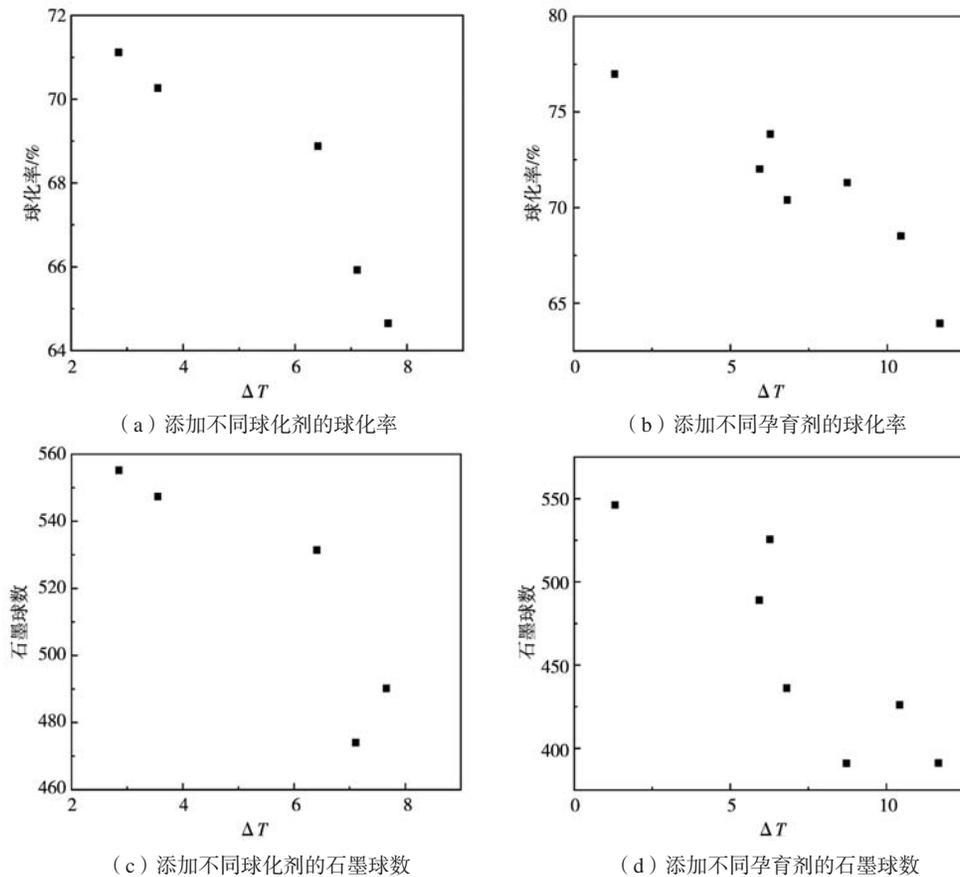
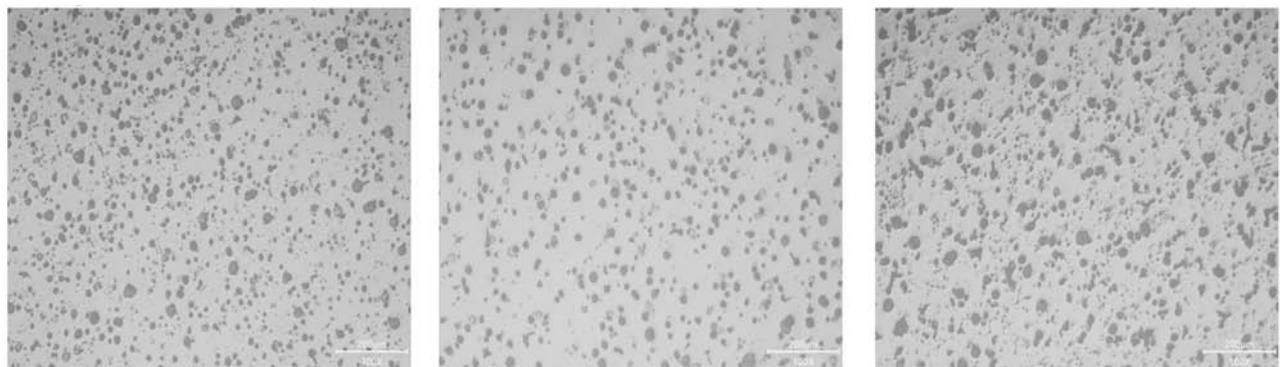
特征值 TEU 是指共晶最低温度，在热分析曲线中，它是共晶升温前的最低点，曲线一阶导数为零，此时铁液中已经有少部分铁液发生了共晶凝固反应，其表现在热分析曲线上为结晶潜热与散热相互抵消处^[11]。如图6所示是不同球化剂、孕育剂 TEU 与球墨铸铁热分析试样凝固组织石墨球化效果的关系，图7所示是不同 TEU 与对应试样组织中石墨形态和分布的金相照片。有研究表明： TEU 越大预示着共晶过冷度温度远大于白口共晶温度，因而熔体中的碳形成石墨的倾向越大，石墨球化率越高，球化效果越好^[12]。另一方面， TEU 温度升高则代表共晶前产生的热量很高，这将为真正的共晶过程提供大量形核介质，减少共晶凝固所需过冷度。在其他因素相同时，球化率、石墨球数随着共晶最低温度 TEU 的升高而逐渐上升。

2.2 热分析曲线特征值与收缩倾向的关系

2.2.1 前期收缩时间比例 G_1/G 对收缩倾向的影响

前期收缩时间比例指的是 T_{liq} 到 TEU 之间的时间占总凝固时间的比例，其对收缩倾向的影响如图8所示。

铁液冷却到初始温度点 (T_{liq}) 时，首先在激冷的作用下凝固成封闭的激冷壳。从初始温度点 (T_{liq}) 到最低共晶温度 (TEU) 的凝固过程表现为初生奥氏体晶芽生长为树枝状奥氏体枝晶。由于铁液是液态的，它可以在枝晶之间流动，上层液态铁液绕过枝晶可以填补由冷却、凝固、收缩造成的体积间隙。因此，在封闭的冷却壳内，凝固产生的体积收缩被流动的铁液补充，并在中心上部合并成一个集中的体积空缺，这就是球墨铸铁缩孔的形成^[13]。本质就是从初晶温度点 (T_{liq}) 到共晶最低温度点 (TEU) 的凝固过程越长，被测铁液的缩孔率越大。

图4 不同 ΔT 值与石墨铸铁热分析试样凝固组织球化效果之间的关系Fig. 4 Relationships between different ΔT values and the nodularization effects of solidification structures of ductile iron thermal analysis specimens(a) $\Delta T=2.8$ 球化率=71.1(b) $\Delta T=3.6$ 球化率=70.3(c) $\Delta T=7.1$ 球化率=65.9图5 不同 ΔT 值与对应的热分析试样凝固组织的石墨形态Fig. 5 The different ΔT values and corresponding graphite morphologies of solidification structures of the thermal analysis specimens

2.2.2 石墨膨胀时间比例 G_2/G 对收缩倾向的影响

石墨膨胀时间比例指的是 TEU 到 TER 之间的时间占总凝固时间的比例，其对收缩倾向的影响如图9所示。从共晶温度最低点 (TEU) 开始，液态铁凝固到石墨和共晶奥氏体 (次生奥氏体) 共生的阶段。共晶奥氏体凝固后形成连续的固体，未凝固铁液被封闭在孤立的小熔池中。由于小熔池中的铁液凝固收缩，也会产

生体积空缺。在没有流动铁液或析出石墨的补充下，这些分散的体积空缺会形成缩松^[14]。在铁液有一定碳当量的前提下，球墨铸铁产生的石墨也是有一定数量的。共晶再辉点前石墨析出量越大，共晶再辉点后石墨析出量越小。因此共晶阶段的反应时间越长，则被测缩松率越大。

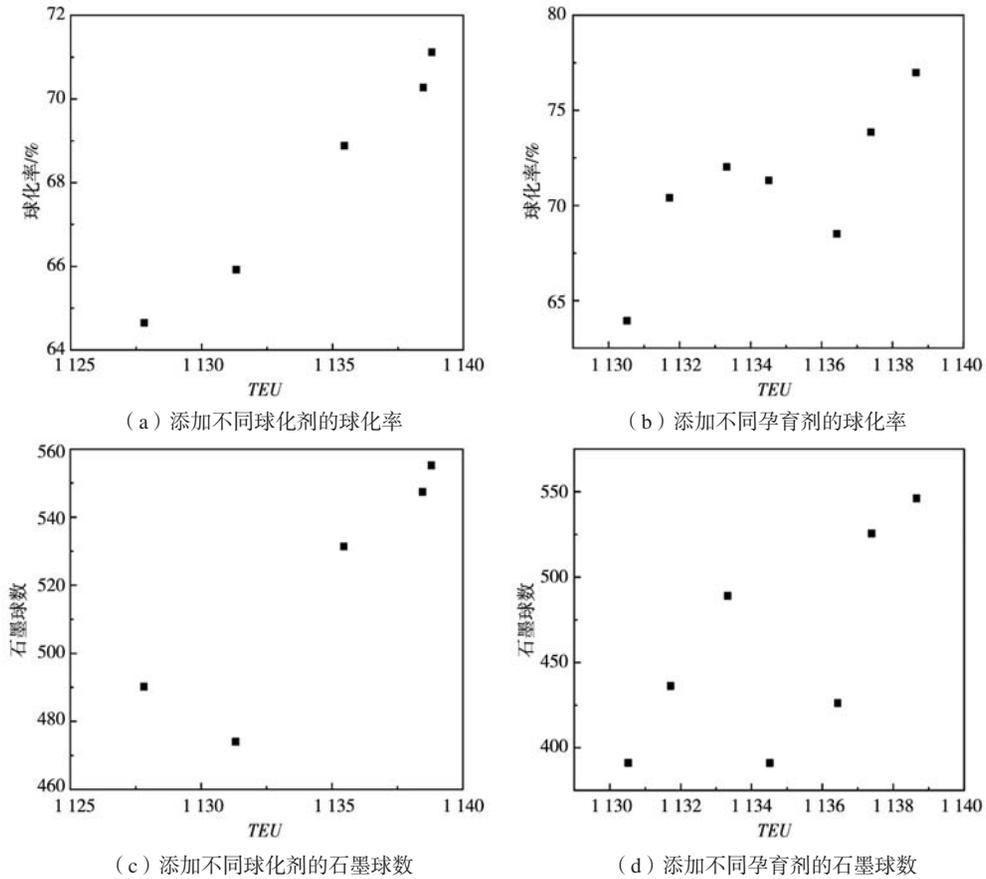


图6 不同TEU值与球墨铸铁热分析试样凝固组织球化率之间的关系

Fig. 6 Relationships between different TEU values and nodularity rate of solidification structures of the ductile iron thermal analysis specimens

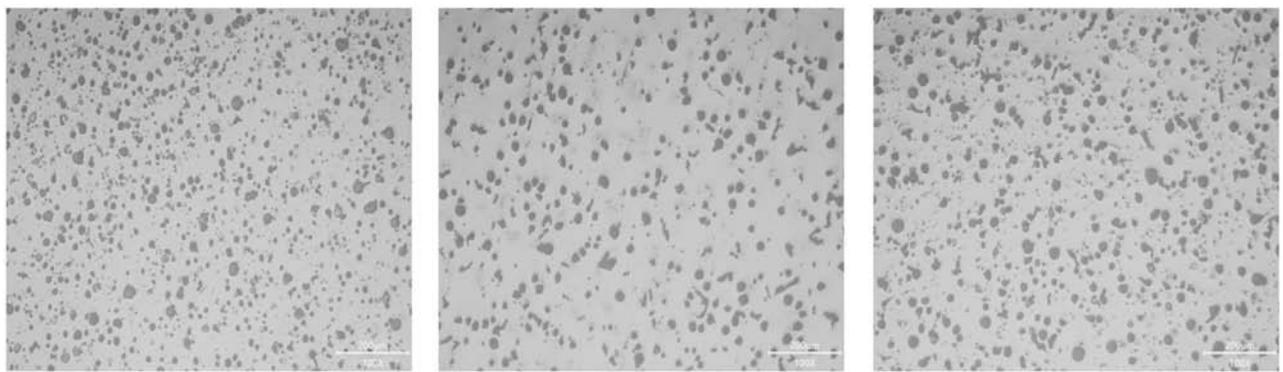


图7 不同TEU值与对应的热分析试样凝固组织的石墨形态

Fig. 7 The different TEU values and corresponding graphite morphologies of solidification structures of the thermal analysis specimens

2.2.3 后期收缩时间比例 G_3/G 对收缩倾向的影响

后期收缩时间比例指的是 TER 到 TES 之间的时间占总凝固时间的比例，其对收缩倾向的影响如图10所示。 G_3/G 的过程是从共晶末期到凝固结束的时间，这段时间又是凝固后期的补缩过程。这段时间越长，放热越多。代表补缩的时间越长，补缩的效果越好。此

外，如果前期共晶反应阶段析出过多的开花状初生石墨，将导致铁液被挤压至冒口和胀型的情况出现，使得后期凝固补缩阶段残余碳量贫乏，收缩能力不足以抵消共晶转变的石墨化膨胀。因此，在共晶温度最高点（ TER ）到共晶结束温度（ TES ）的凝固过程，后期收缩时间比例越小则被测缩松率越大。

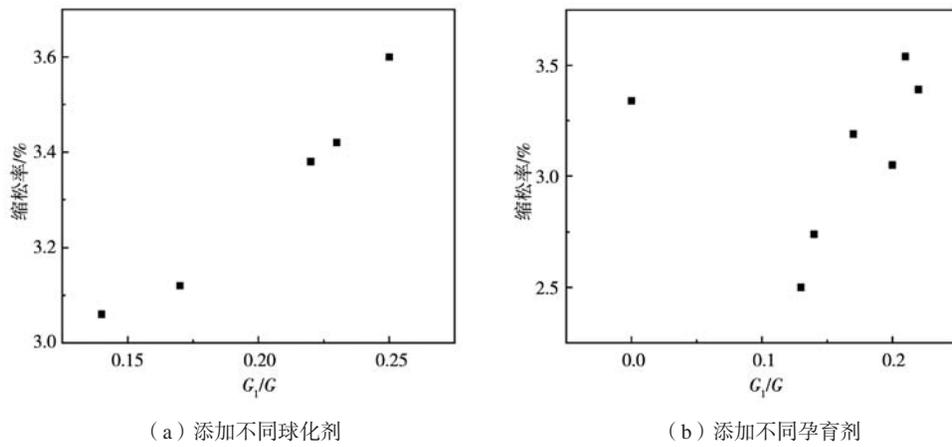


图8 不同 G_1/G 值与球墨铸铁热分析试样凝固组织收缩倾向之间的关系

Fig. 8 Relationships between different G_1/G values and shrinkage tendencies of solidification structures of the ductile iron thermal analysis specimens

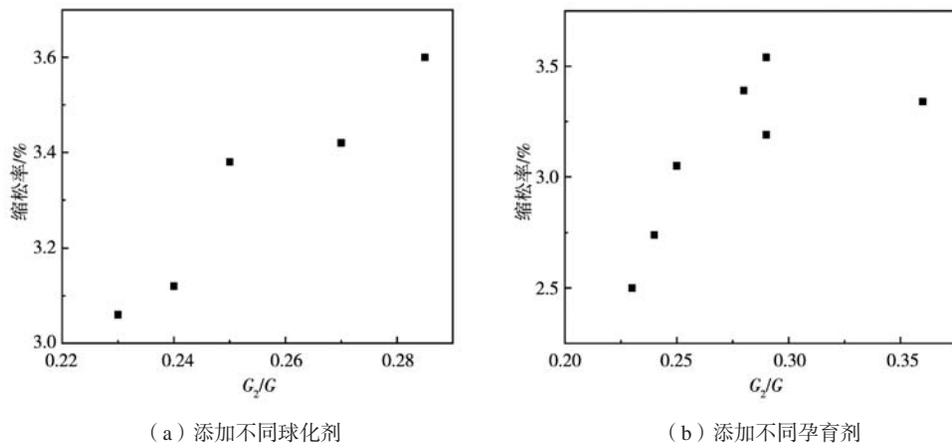


图9 不同 G_2/G 值与球墨铸铁热分析试样凝固组织收缩倾向之间的关系

Fig. 9 Relationships between different G_2/G values and the shrinkage tendencies of solidification structures of the ductile iron thermal analysis specimens

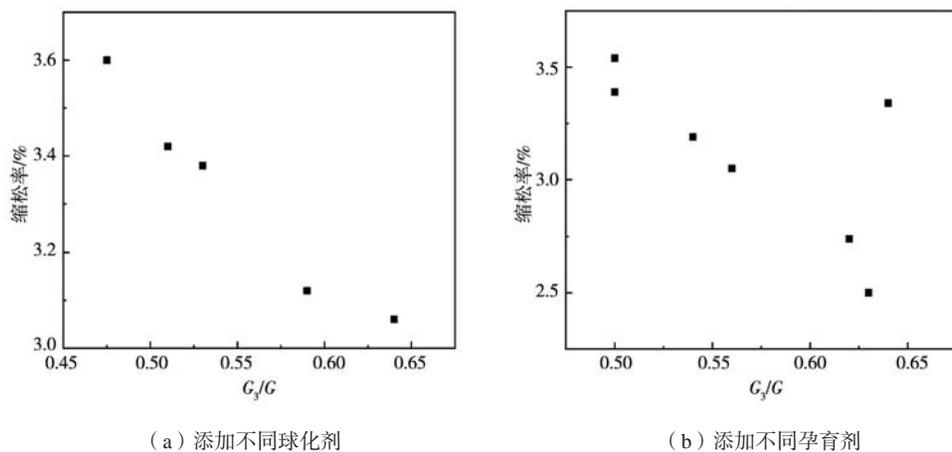


图10 不同 G_3/G 值与球墨铸铁热分析试样凝固组织收缩倾向之间的关系

Fig. 10 Relationships between different G_3/G values and the shrinkage tendencies of solidification structures of the ductile iron thermal analysis specimens

2.3 球墨铸铁收缩倾向与球化效果预测数学模型的建立

在分析了加入不同球化剂、孕育剂的球墨铸铁热分析曲线特征值对球化效果和收缩倾向的影响规律后,积累了大量的试验数据如表6所示。

表6 试验数据汇总
Tab. 6 Summary of experimental data

项目	TL	TEU	TER	ΔT	TES	G_1/G	G_2/G	G_3/G	球化率	缩松率	石墨球数
Y1	1 136.431	1 136.430	1 146.861	10.43	1 084.943	0.00	0.36	0.64	68.51	3.34	426.2
Y2	1 143.098	1 137.392	1 143.657	6.27	1 087.423	0.14	0.24	0.62	73.85	2.74	525.6
Y3	1 156.015	1 133.328	1 139.259	5.93	1 076.680	0.13	0.23	0.63	72.02	2.50	489.0
Y4	1 146.299	1 134.517	1 143.241	8.72	1 078.240	0.17	0.29	0.54	71.31	3.19	391.0
Y5	1 147.146	1 131.718	1 138.527	6.81	1 078.308	0.20	0.25	0.56	70.40	3.05	436.2
Y6	1 141.576	1 130.519	1 142.186	11.67	1 079.675	0.22	0.28	0.50	63.94	3.39	391.2
Y7	1 150.767	1 138.658	1 139.971	1.31	1 083.925	0.21	0.29	0.50	76.99	3.54	546.2
Q1	1 150.237	1 138.460	1 142.006	3.55	1 090.341	0.22	0.25	0.53	70.27	3.38	547.4
Q2	1 146.107	1 135.454	1 141.864	6.41	1 082.433	0.23	0.27	0.51	68.88	3.42	531.4
Q3	1 140.799	1 138.793	1 141.645	2.85	1 080.288	0.14	0.23	0.64	71.12	3.06	555.2
Q4	1 139.991	1 131.322	1 138.428	7.11	1 075.492	0.25	0.29	0.48	65.92	3.60	474.0
Q5	1 140.662	1 127.810	1 135.468	7.66	1 074.272	0.17	0.24	0.59	64.65	3.12	490.2

2.3.1 收缩倾向数学模型的建立

利用SPSS软件研究多个特征值因素影响下与收缩倾向之间的相关性,及多个特征值之间的相关性分析。各变量之间的相关性分析结果如表7所示。

表7 相关系数计算结果
Tab. 7 Correlation coefficient calculation results

项目	$G_1/G (G_1)$	$G_2/G (G_2)$	$G_3/G (G_3)$	缩松率
$G_1/G (G_1)$	1			
$G_2/G (G_2)$	-0.389	1		
$G_3/G (G_3)$	-0.834	-0.177	1	
缩松率	0.596	0.577	-0.743	1

从表7中可以看出,与收缩倾向相关性最高的是 $G_3/G (-0.743)$,其次是 $G_1/G (0.596)$,最小的是 $G_2/G (0.577)$ 。通过相关性分析,我们知道了各个特征值与收缩倾向之间的相关系数,但这些变量与收缩倾向是线性还是非线性关系并不清楚,因此,需要通过曲线估计来研究二者之间的关系。其结果如表8所示。

通过对各个变量曲线估算的结果观察可知,考虑到回归方程的简便性,决定在回归收缩倾向的方程选择上, G_1/G 采用三次函数方程, G_2/G 、 G_3/G 采用二次函数方程。

通过以上分析,在SPSS软件中利用多元非线性回

通过SPSS软件进行相关性分析和回归分析,建立数学模型,可以达到在线预测的目的。建立一个精确合理的数学模型,不仅需要大量的数据支撑,同时也需要一个科学严谨的步骤。本试验的回归分析步骤如下:相关性分析→曲线估计→回归分析→数学模型检验。

表8 曲线估计结果
Tab. 8 Curves estimation results

变量	线性	二次	三次	逆	指数	对数
$G_1/G (G_1)$	0.157	0.716	0.786	0.149	0.149	0.286
$G_2/G (G_2)$	0.333	0.638	0.634	0.431	0.329	0.383
$G_3/G (G_3)$	0.552	0.603	0.606	0.572	0.528	0.563

归进行分析,经过整理后,球铁收缩倾向(K)预测模型为:

$$K=28.51 \times G_1+30.15 \times G_1^2-210.7 \times G_1^3-175.63 \times G_2+354.23 \times G_2^2-13.94 \times G_3+20.54 \times G_3^2+21.17 \quad (3)$$

式中: G_1 为前期收缩时间占总凝固时间的比例 G_1/G , G_2 为共晶石墨化膨胀占总凝固时间的比例 G_2/G , G_3 为后期凝固时间占总凝固时间的比例 G_3/G 。

算式中各项系数保留到小数点后两位,该方程的复相关系数 $R^2=0.922$ 。说明模型整体上的相关程度非常高,回归方程整体是显著的。经过对收缩倾向预测的统计学检验可知,由多元非线性回归得到的方程是用来计算收缩率的。实际收缩率与预测结果之间的相对误差如表9所示。

从表9中我们可以看到,最大的相对误差值也只有4.88%,在5%以内。因此可以认为该预测模型能用于预测实际收缩倾向。

表9 收缩倾向实际值与预测值对比
Tab. 9 Comparisons of actual and predicted values of contraction tendencies

序号	实测收缩率/%	预测收缩率/%	相对误差/%
1	3.34	3.343	0.09
2	2.74	2.679	2.21
3	2.50	2.620	4.80
4	3.19	3.173	0.53
5	3.05	3.150	3.28
6	3.39	3.418	0.83
7	3.54	3.558	0.51
8	3.38	3.271	3.22
9	3.42	3.395	0.73
10	3.06	3.010	1.63
11	3.60	3.620	0.56
12	3.12	3.030	2.88

2.3.2 球化率数学模型的建立

建立球化率预测模型的过程与建立收缩倾向数学模型的步骤一致。通过SPSS软件对球化率与这两个特征值相关性进行分析。其结果如表10所示。

表10 球化率相关系数计算结果
Tab. 10 Calculation results of the nodularity rate correlation coefficients

变量	TEU	ΔT	球化率
TEU	1		
ΔT	-0.61	1	
球化率	0.744	-0.693	1

通过上表可知，球化率与特征值TEU、 ΔT 的相关系数确实都比较高，分别为0.744和-0.693。故回归球墨铸铁球化率的特征值可以选用TEU和 ΔT 。通过相关性分析我们知道球化率与特征值的相关程度，接下来对各个变量进行曲线估计。通过SPSS软件进行变量的曲线估计，结果如表11所示。

表11 曲线估计结果
Tab. 11 Curves estimation results

变量	线性	二次	三次	逆	指数	对数
TEU	0.754	0.652	0.554	0.558	0.563	0.531
ΔT	0.832	0.405	0.413	0.465	0.471	0.502

通过SPSS软件对球化率(SG)进行多元线性回归分析。通过对回归结果的分析我们可以得到如下预测算式。表12列出了球化率预测值与真实值的相对误差。

表12 球化率实际值与预测值对比
Tab. 12 Comparisons of actual and predicted values of the nodularity rates

序号	实测球化率/%	预测球化率/%	相对误差/%
1	68.51	68.63	0.18
2	73.85	71.14	3.67
3	72.02	69.14	3.92
4	71.31	69.43	2.03
5	70.40	68.86	2.18
6	63.94	64.89	1.49
7	76.99	74.21	3.61
8	70.27	73.01	3.89
9	68.88	70.04	1.68
10	71.12	73.53	3.38
11	65.92	67.51	2.41
12	64.65	62.18	3.82

$$SG = 0.532 \times TEU - 0.481 \times \Delta T - 530.937 \quad (4)$$

从表中我们可以看到，最大的相对误差值也只有4.88%，在5%以内。因此可以认为该预测模型能用于预测球墨铸铁球化率。

3 结论

(1) 当共晶再辉温度 ΔT 较小时，晶粒生长速率相对较慢，晶粒尺寸分布较窄，球化效果较好；反之，晶粒生长速率相对较快，晶粒尺寸分布宽，球化效果较差。共晶最低温度TEU越大预示着共晶过冷度温度远大于白口共晶温度，因而熔体中的碳形成石墨的倾向越大，石墨球化率越高，球化效果越好。在其他因素相同时，球化率、石墨球数随着TEU的升高而逐渐上升。

(2) 前期收缩时间比例 G_1/G 越大，被测铁液的缩孔率越大；石墨化膨胀时间比例 G_2/G 越大，则被测铁液缩松率越大；从共晶温度最高点(TEU)到共晶结束温度(TEU)的凝固过程，后期收缩时间比例越小则被测铁液缩松率越大。

(3) 通过SPSS回归分析软件建立了曲线特征值与收缩倾向、球化率关系的数学模型，可用于准确预测球化率和收缩倾向。

参考文献:

- [1] 吕献丰, 王立波, 李海成, 等. 低合金球墨铸铁活塞材料的显微组织及其摩擦磨损性能研究 [J]. 热加工工艺, 2023, 52 (6): 53-58.
- [2] 王立涛, 田君, 李兵. 机械设计基础 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2014.
- [3] 白明雪, 朱协彬, 陈志浩, 等. 大型球墨铸铁件表面缺陷产生原因及防止措施 [J]. 铸造技术, 2018, 39 (3): 569-572.
- [4] 李茂真. 基于热分析技术的球墨铸铁收缩倾向与球化效果预测研究 [D]. 天津: 河北工业大学, 2017.
- [5] CHISAMERA M, STAN S, RIPOSAN I, et al. Thermal analysis of inoculated grey cast irons [J]. Annals of the Rheumatic Diseases [2023-12-19]. DOI: 10.1136/annrheumdis-2014-eular. 5783.
- [6] 陈红喜. 一种低镁球化剂的制备方法: CN201911362222.7 [P]. [2023-12-19].
- [7] 杨长林, 杨根仓, 刘峰, 等. 热分析在Fe-B合金深过冷凝固过程中的应用 [J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38 (10): 1745-1748.
- [8] 尹志明. 二次瞬时孕育, 调整终硅量对铸态铁素体球墨铸铁的影响 [J]. 机械工程师, 2008 (11): 137-138.
- [9] ISO. Microstructure of cast irons-part4: test method for evaluating nodularity in spheroidal graphite cast irons: ISO 945-4: 2019 [S]. Switzerland: ISO copyright office, 2019.
- [10] 宋洪达. 蠕墨铸铁力学性能的热分析预测 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2021.
- [11] 艾士民. 蠕墨铸铁热分析特性及凝固过程研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2022.
- [12] GÓRNY M. Thermal analysis of ductile iron in thin walled casting [J]. Archives of Foundry Engineering, 2007, 7 (4): 69-72.
- [13] 马建华. 铸铁缩孔、缩松的热分析测量与预防 [C]// 第二届国际环渤海经济区铸造论坛文集. 天津, 2010.
- [14] 谭昌发, 田迎新. 铸铁件缩孔和缩松缺陷防止方法及应用实例 [J]. 现代铸铁, 2012, 32 (1): 61-64.

Microstructure Performance Prediction of Ductile Iron Based on Thermal Analysis Technology

YANG Xiang-jie^{1,2}, LI Kun^{1,2}, YANG Ming-hao^{1,2}, DENG Bo-yan^{1,2}, LIU Qin-biao^{1,2}, YE Han^{1,2}

(1. School of Advanced Manufacturing, Nanchang University, Nanchang 330031, Jiangxi, China; 2. Key Laboratory of High Performance Precision Forming in Jiangxi Province, Nanchang 330031, Jiangxi, China)

Abstract:

The influence rules of the characteristic values of the thermal analysis curves of ductile irons on the shrinkage tendency and nodularization effect after adding different new nodularizers and inoculants were investigated respectively through univariate experiments, and the relationship mathematical models between the curve eigenvalues, shrinkage tendency and nodularity rate were established by SPSS regression analysis software. The investigation results show that when other factors are the same, the larger the eutectic reglow temperature ΔT , the faster the eutectic reaction speed, the fewer the average graphite sphere number, and the worse the nodularization level. The nodularity rate and graphite spheroid number gradually increased with the increase of the eutectic minimum temperature TEU. The longer the time occupied by the previous shrinkage time ratio G1/G, the greater the shrinkage rate of molten iron to be measured. The longer the graphitization expansion time ratio G2/G, the greater the dispersed shrinkage rate measured. In addition, a mathematical model of curve eigenvalue, shrinkage tendency and nodularity rate is established, which can accurately predict the nodularity rate and shrinkage tendency.

Key words:

ductile iron; thermal analysis technology; shrinkage tendency; nodularization effect; metallographic image processing