

# 基于热分析技术的灰铸铁缩陷倾向预测

刘继波<sup>1</sup>, 廉贞松<sup>1</sup>, 李永亮<sup>1</sup>, 孙帆<sup>1</sup>, 乔进国<sup>1</sup>, 李孝艳<sup>2</sup>, 鲍俊敏<sup>1</sup>

(1. 潍柴(潍坊)材料成型制造中心有限公司, 山东潍坊 261199;

2. 潍柴动力股份有限公司, 山东潍坊 261061)

**摘要:** 利用热分析技术, 研究了不同孕育条件下灰铸铁的热分析曲线的变化情况, 以及不同曲线对应铸件的金相和缩陷倾向。结果表明: 在相同原铁液情况下, 增加随流孕育量可提高热分析曲线的共晶最低温度 $TEU$ 和共晶最高温度 $TER$ , 减小初晶-共晶温度差 $\Delta T_2$ ; 当孕育量大于0.2%, 初晶-共晶温度差 $\Delta T_2$ 在60~66 °C之间, 缩陷倾向 $K$ 值减小到0.04~0.07, 此时铸件缩陷倾向较小, 在 $K$ 值低于0.07时, 内渗豆消失;  $TEU$ 提高到1 143.8 °C以上时, D型过冷石墨基本转变为A型片状石墨,  $TEU$ 继续提高到1 146.4 °C时, 粗大石墨比例增加。

**关键词:** 热分析; 金相组织; 灰铸铁; 缩陷; 随流孕育; 石墨形态

**中图分类号:** TG24; TG115.25 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 03-0312-06

**DOI:** 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0044

## Prediction of Shrinkage Depression Tendency of Gray Cast Iron Based on Thermal Analysis Technology

LIU Ji-bo<sup>1</sup>, LIAN Zhen-song<sup>1</sup>, LI Yong-liang<sup>1</sup>, SUN Fan<sup>1</sup>, QIAO Jin-guo<sup>1</sup>, LI Xiao-yan<sup>2</sup>, BAO Jun-min<sup>1</sup>

(1. Weichai (Weifang) Material Forming & Manufacturing Center Co., Ltd., Weifang 261199, Shandong, China;

2. Weichai Power Co., Ltd., Weifang 261061, Shandong, China)

**Abstract:** Taking advantage of thermal analysis technology, the variations of the thermal analysis curves of gray cast iron under different inoculation conditions, as well as the metallographic structures and shrinkage depression tendency of castings corresponding to these distinct curves have been investigated. The results indicate that, for the same base iron melt, increasing the amount of in-stream inoculation can raise both the eutectic minimum temperature ( $TEU$ ) and the eutectic maximum temperature ( $TER$ ) in the thermal analysis curve, while reducing the temperature difference between the pro-eutectic crystal and eutectic stages ( $\Delta T_2$ ); When the inoculation amount exceeds 0.2%, the temperature difference of pro-eutectic crystal and eutectic ( $\Delta T_2$ ) ranges from 60 to 66 °C, and the shrinkage depression tendency coefficient ( $K$ ) decreases to 0.04-0.07, corresponding to a low shrinkage depression tendency of the castings, notably, internal infiltration bean defects are completely eliminated when the  $K$  value is below 0.07; When the  $TEU$  is increased to above 1 143.8 °C, the D-type undercooled graphites are basically transformed into A-type flake graphites, and when the  $TEU$  is further increased to 1 146.4 °C, the proportion of coarse graphites is increased.

**Key words:** thermal analysis; metallographic structure; gray cast iron; shrinkage depression; in-stream inoculation; graphite morphology

## 1 灰铸铁的缩陷

灰铸铁铁液在凝固过程中会发生体积变化, 首先是产生液态收缩, 然后在共晶阶段析出石墨和奥氏体分别会导致体积出现膨胀和收缩, 直至灰铸铁完全由液相转变为固相为止。灰铸铁凝固时体积变化的影响因素较多, 包括铁液成分、浇注温度及铸铁凝固后组织等。铸件生产过程中如工艺参数控制不当, 凝固后

容易出现缩孔、表面缩陷及微观缩松等缺陷<sup>[1]</sup>, 其中缩陷缺陷是指铸件凝固后其上表面出现低于设计平面的凹陷, 主要是由于表层铁液凝固后, 内部铁液继续凝固, 液态收缩量过大, 后续共晶阶段石墨析出引起的体积膨胀无法抵消收缩, 最终出现该缺陷。

针对缩陷缺陷, 在工艺上常常采用增加补缩冒口, 提高碳当量及提高砂型强度等措施进行改进, 这

**基金项目:** 企业工艺研究项目“铁水热分析预判灰铁缩松倾向的应用研究 PS2023411”。

**收稿日期:** 2025-10-10 收到初稿, 2025-12-21 收到修订稿。

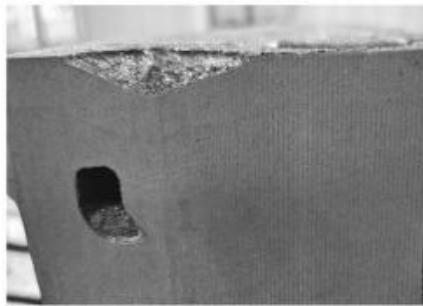
**作者简介:** 刘继波 (1977-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事铸造方面工作。电话: 0536-2200071, E-mail: liujib@weichai.com

**引用格式:** 刘继波, 廉贞松, 李永亮, 等. 基于热分析技术的灰铸铁缩陷倾向预测 [J]. 铸造, 2026, 75 (3): 312-317.

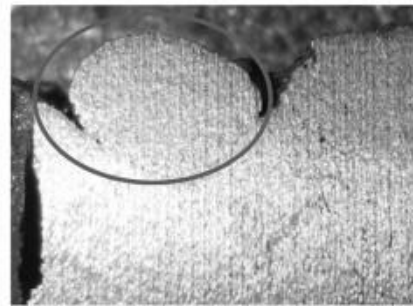
LIU Jibo, LIAN Zhensong, LI Yongliang, et al. Prediction of depression tendency of grey cast iron by thermal analysis [J]. Foundry, 2026, 75 (3): 312-317.

些措施对解决缩陷有一定效果,但同时会带来成本提高及铸件性能降低等问题。需要注意的是,在缩陷表面,经常会伴随出现内渗豆<sup>[2]</sup>,如图1所示。内渗豆成分接近共晶成分,在凝固后期,表层已经完成凝固,而铸件内部最后凝固的铁液受到石墨化膨胀带来的压力被挤压到缩陷表面而形成,这说明铸件液态收缩量

过大,铸件整体宏观尺寸降低较大,导致最后共晶凝固的铁液未能充分发挥补缩铸件的作用,反而被挤到铸件表面形成缺陷。因此,通过控制工艺参数,改变铁液液态凝固收缩量,充分发挥共晶凝固的膨胀作用,从而减轻或消除缩陷缺陷,在理论上是可行的。



(a) 铸件表面缩陷



(b) 内渗豆形态(圈内所示)

图1 铸件上表面缩陷和内渗豆形态

Fig. 1 The shrinkage depression and internal infiltration bean morphologies on top surfaces of castings

## 2 热分析技术及铸铁收缩预测的应用

热分析技术是基于铁液凝固过程中的冷却曲线的分析技术,在铸铁生产中已经有广泛应用,如检测铁液的碳硅含量、预测石墨形态、预测孕育效果甚至力学性能等<sup>[3-6]</sup>。在利用热分析技术预测铸铁收缩倾向方面,也有较多研究,例如利用热分析曲线上的不同特征点作为液淬的温度点,研究灰铸铁凝固时不同阶段的收缩程度<sup>[7-8]</sup>;研究球墨铸铁热分析曲线上再辉温度与铸件收缩面积和收缩体积的关系<sup>[9-10]</sup>;Toshitake Kanno等对热分析曲线进行微分处理,得到一阶微分曲线,利用凝固最后阶段的一阶微分曲线上的极值点判断铸铁收缩倾向的大小<sup>[11]</sup>;某些商用热分析软件也可对铸铁收缩倾向进行预测,如Elkem主要利用凝固过程中初晶与共晶开始、共晶开始与共晶最高点、共晶最高点与共晶结束点等三个阶段不同面积比例来预测宏观缩孔和微观缩松的发生概率,而国内汇丰热分析仪则是利用初晶点和共晶开始点的差值来判断缩孔倾向,又利用再辉度的大小来判断缩松倾向<sup>[12-13]</sup>。

缩陷缺陷主要发生于铁液液态收缩阶段,如利用热分析技术,得到液态凝固曲线特征点与缩陷发生概率及严重程度的对应关系,则可以在铸件浇注前根据预测结果对工艺参数进行调整,从而减少该缺陷。

## 3 试验方法

### 3.1 试验设备与材料

采用天津汇丰探测装备公司的HF-12T型的台式热

分析仪测量得到铁液热分析曲线(时间-温度曲线),样杯使用H-3QG圆柱样杯,热电偶为K分度号,测量精度为0.1℃,检测时使用取样勺从浇包内取铁液倒入样杯。进行热分析检测同时浇注收缩试块,尺寸为 $\Phi 120\text{ mm} \times 210\text{ mm}$ 。

所用铁液为冲天炉-电炉双联熔炼铁液,冲天炉为35 t/h长炉龄富氧水冷式,铁液由冲天炉熔化后进入80 t有芯感应电炉进行保温,然后出铁液至浇包进行浇注。在铁液进入浇包过程中进行随流孕育,孕育剂使用粒度为2~10 mm的硅钡,加入量为0~0.5wt.%。孕育完成后从浇包内取样进行热分析。铁液原始成分和孕育剂成分分别如表1和表2所示。

表1 铁液原始成分  
Tab. 1 Original composition of molten iron  $w_B/\%$

C	Si	Mn	S	P	Cu	Cr	Fe
3.30	1.60	0.75	0.07	0.025	0.20	0.16	余量

表2 孕育剂成分  
Tab. 2 Inoculant composition  $w_B/\%$

Si	Ba	Ca	Al	Mn	Cr	Fe
65~75	2~6	1~3	0.5~2.0	≤0.6	≤0.6	余量

### 3.2 试验表征方法

使用热分析方法得到铁液凝固过程中的各关键温度点,如图2所示,其中TL为初晶温度,TEU为共晶最低温度,TER为共晶最高温度,TS为共晶结束温度,各

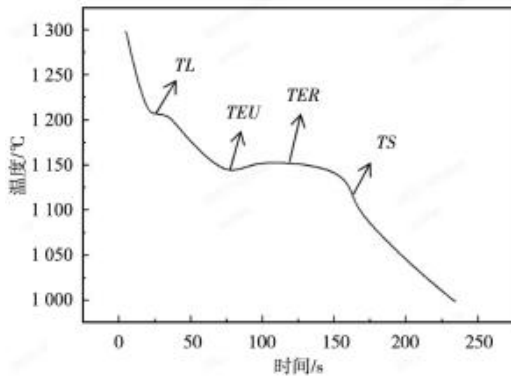


图2 铸铁冷却的温度-时间曲线

Fig. 2 Temperature-time curve of cast iron cooling

特征温度点均利用对应一阶微分曲线的极点和零点确定<sup>[4]</sup>, 定义再辉温度  $\Delta T_1 = TER - TEU$ , 初晶-共晶温度差为  $\Delta T_2 = TL - TEU$ 。

对热分析试块中心部位取样, 使用800目砂纸打磨试样并抛光, 利用光学金相显微镜观察铸件中心部位金相情况, 成分检测使用直读光谱仪和红外碳硫仪。

铸件缩陷倾向定义如下:  $K = h/H$ ,  $h$ 和 $H$ 的含义如图3所示, 其中 $h$ 为凹陷深度,  $H$ 为铸件高度, 即 $K$ 值越大, 铸件缩陷倾向越大。

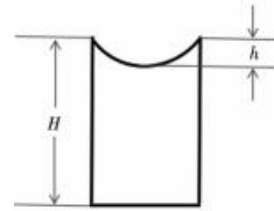


图3 铸件缩陷倾向定义

Fig. 3 Definition of shrinkage depression tendency in casting

## 4 试验结果及分析

### 4.1 热分析结果

孕育可以显著改变铁液的冷却曲线, 通过调整孕育量得到了不同成分的试块及相应的不同特征温度点的冷却曲线, 结果如表3和表4所示。试块具体成分见表3, 由于试块采用相同成分的原始铁液, 试块成分除Si含量随着孕育量增加而提高外, 其余成分基本保持一致。

由表4可以得到, 在相同原铁液条件下, 随着孕育量增加, 初晶温度 $TL$ 逐渐降低, 主要是由于孕育剂溶解后铁液碳当量提高, 理论上每增加0.1%孕育量, 碳

表3 不同孕育量下试块的成分含量  
Tab. 3 Composition contents of test blocks under different inoculation amounts

试块	孕育量	C	Si	Mn	S	P	Cu	Cr	Fe
1 <sup>#</sup>	0	3.30	1.60	0.75	0.07	0.025	0.20	0.16	余量
2 <sup>#</sup>	0.1	3.31	1.67	0.74	0.07	0.023	0.19	0.14	余量
3 <sup>#</sup>	0.2	3.29	1.73	0.73	0.07	0.025	0.20	0.15	余量
4 <sup>#</sup>	0.3	3.28	1.79	0.74	0.07	0.024	0.18	0.14	余量
5 <sup>#</sup>	0.4	3.30	1.83	0.75	0.07	0.021	0.22	0.15	余量
6 <sup>#</sup>	0.5	3.29	1.90	0.72	0.07	0.020	0.21	0.15	余量

表4 不同孕育量下铁液的热分析曲线特征点  
Tab. 4 Characteristic points of thermal analysis curves under different inoculation amounts

试块	孕育量/wt.%	初晶温度/°C	共晶最低温度/°C	共晶最高温度/°C	再辉度 $\Delta T_1$ /°C	初晶-共晶温度差 $\Delta T_2$ /°C
1 <sup>#</sup>	0	1 210.4	1 129.7	1 134.1	4.4	84.4
2 <sup>#</sup>	0.1	1 209.8	1 135.8	1 142.7	6.9	74.0
3 <sup>#</sup>	0.2	1 209.1	1 143.8	1 149.0	5.2	65.3
4 <sup>#</sup>	0.3	1 208.3	1 144.6	1 150.2	5.6	61.7
5 <sup>#</sup>	0.4	1 207.3	1 146.4	1 150.8	4.4	60.9
6 <sup>#</sup>	0.5	1 207.1	1 147.0	1 152.3	5.3	62.1

当量提高约0.02%左右, 对应初晶温度降低约2 °C, 但实际上初晶温度 $TL$ 整体降低幅度低于理论值。共晶最低温度 $TEU$ 随着孕育量提高会出现明显提升, 且孕育量低于0.2%时, 每增加0.1%孕育量, 共晶最低温度 $TEU$

可以提升6~8 °C, 提升幅度较大; 当孕育量由0.4%提高到0.5%, 共晶最低温度 $TEU$ 提升至1 146 °C以上后, 共晶最低温度 $TEU$ 仅提升0.6 °C, 可见随着孕育量增加,  $TEU$ 不断提高, 但提升幅度逐渐变小。

共晶最高温度 $TER$ 变化趋势与 $TEU$ 基本一致,随着孕育量提高而逐渐提升,而再辉度 $\Delta T_1$ 呈现先增大后降低并趋于稳定的情况。当铁液未孕育,共晶最低温度在 $1\ 130\text{ }^\circ\text{C}$ 以下时,再辉度较低为 $4.4\text{ }^\circ\text{C}$ ,孕育量为 $0.1\%$ 时,共晶最低温度提高到 $1\ 135\text{ }^\circ\text{C}$ 左右时,再辉度会有明显上升,并达到最高值 $6.9\text{ }^\circ\text{C}$ 。继续增加孕育量,共晶最低温度提高到 $1\ 143\text{ }^\circ\text{C}$ 以上后,再辉度会降低并稳定在 $4\sim 6\text{ }^\circ\text{C}$ 左右。而 $\Delta T_2$ 为铁液发生初晶到开始共晶的温度差,其值随着孕育量的提升有明显降低的趋势,未孕育时 $\Delta T_2$ 为 $84.4\text{ }^\circ\text{C}$ ,孕育量增加到 $0.2\%$ 以上后, $\Delta T_2$ 均在 $60\sim 66\text{ }^\circ\text{C}$ 左右,相对稳定。

因此,共晶最低温度 $TEU$ 、共晶最高温度 $TER$ 和 $\Delta T_2$ 变化较为明显且有规律,初晶温度 $TL$ 和再辉度 $\Delta T_1$ 差异较小,规律性较差。

## 4.2 金相组织

不同热分析曲线对应试块的金相结果如图4所示。当铁液在未孕育状态下,共晶最低温度低于 $1\ 130\text{ }^\circ\text{C}$

时,试块基体组织白口化严重,石墨数量较少;2#试样铁液孕育状况较差,共晶最低温度为 $1\ 135.8\text{ }^\circ\text{C}$ 时,试块组织中呈现A型石墨和大量的D型过冷石墨共存的情况,且奥氏体枝晶较为明显;3#和4#试样共晶最低温度提升至 $1\ 143.8\text{ }^\circ\text{C}$ 以上,试块石墨形态得到明显改善,基本得到全部的A型石墨。但是5#和6#试样共晶最低温度达到 $1\ 146.4\text{ }^\circ\text{C}$ 以上后,如图4(e)和(f)所示,尽管石墨形态仍为A型,此时出现更多的粗大石墨,这会严重影响到铸件的力学性能。

## 4.3 收缩倾向

测量不同热分析曲线对应的铸件尺寸,利用铸件收缩倾向定义算式 $K=h/H$ 计算各铸件 $K$ 值,结果如表5所示,收缩试块从中心纵向解剖后情况如图5所示。所有试块的 $H$ 值相差不大,最小值与最大值相差 $6\text{ mm}$ ,考虑到手工造型可能带来的误差,可以认为试块宏观整体尺寸差异较小。

各个试块的 $h$ 值差异较大,因此反应铸件收缩倾向

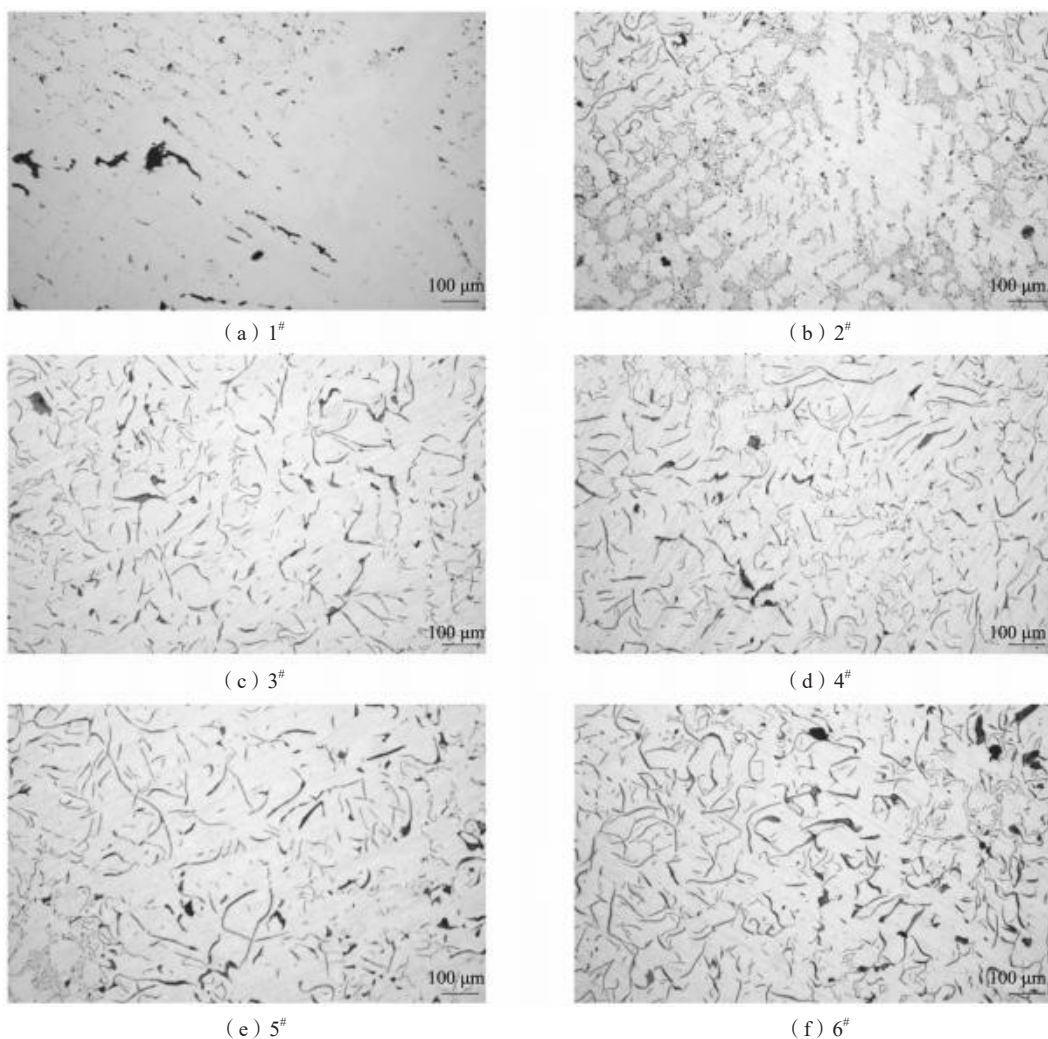


图4 不同热分析曲线对应的金相组织

Fig. 4 Metallographic structures corresponding to different thermal analysis curves

表5 试块缩陷倾向结果  
Tab. 5 Shrinkage depression tendency results of the test blocks

曲线	H/mm	h/mm	K	备注
1 <sup>#</sup>	203	33	0.16	上表面直径5 mm内渗豆
2 <sup>#</sup>	207	30	0.14	上表面直径11 mm内渗豆
3 <sup>#</sup>	205	12	0.06	无内渗豆
4 <sup>#</sup>	205	15	0.07	无内渗豆
5 <sup>#</sup>	209	14	0.07	无内渗豆
6 <sup>#</sup>	207	8	0.04	无内渗豆

的K值有明显差异。1<sup>#</sup>和2<sup>#</sup>试块K值分别为0.16和0.14，试块表面凹陷程度严重，结合试块的金相结果和热分析曲线可知，对应的铁液孕育情况较差，石墨数量较少，热分析曲线上共晶最低温度低， $TL-TEU$ 温度差值较大，同时试块上表面凹陷处有接近共晶成分的内渗豆出现。因内渗豆为共晶阶段铁液被挤压至表面导致，可以看到因2<sup>#</sup>试块石墨数量更多，共晶膨胀更多，内渗豆尺寸较1<sup>#</sup>试块更大。

随着铁液共晶温度提升和 $TL-TEU$ 温度差值的减

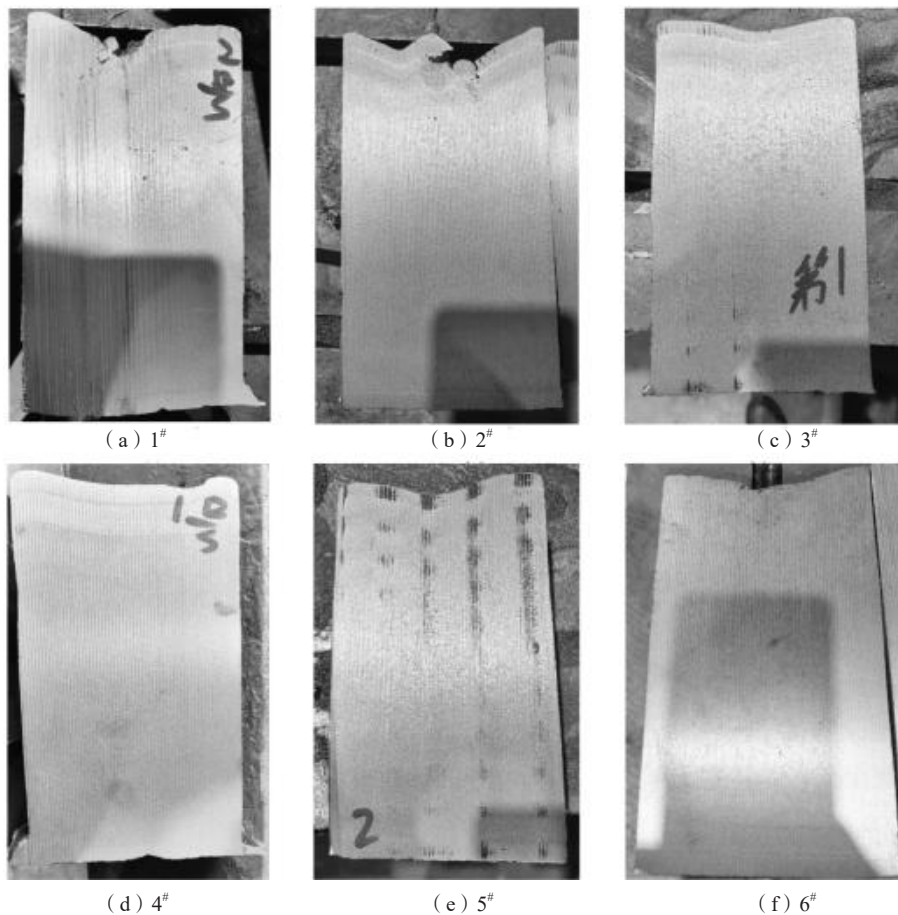


图5 不同热分析曲线对应的收缩结果

Fig. 5 Shrinkage results corresponding to different thermal analysis curves

小，3<sup>#</sup>-6<sup>#</sup>试块K值有减小趋势，即铸件收缩程度减小，但各试块之间差异程度较小，均在0.04~0.07之间，同时上表面均无内渗豆出现。

由以上可知，当铁液孕育不良，铁液凝固过程中共晶最低温度低， $TL-TEU$ 温度差值大，此时铁液液相收缩大，试块表面会出现严重缩陷的情况。当中心铁液最后发生共晶凝固时会把铁液挤压至表面形成内渗豆，且共晶石墨数量较多时内渗豆也会增大。当铁液孕育较好，共晶最低温度提升至1 143.8 ℃以上， $TL-TEU$ 温度差值减小至60~66 ℃后，试块表面缩陷减小且

不再有内渗豆，尽管此时石墨析出充分，但由于表面缩陷很小，液相收缩少，共晶铁液有足够流动空间，因此不会出现内渗豆。

## 5 结论

(1) 灰铸铁铸件表面缩陷倾向可通过热分析曲线进行预测，共晶最低温度 $TEU$ 大于1 143.8 ℃，共晶最高温度 $TER$ 大于1 149.0 ℃，初晶-共晶温度差 $\Delta T_2$ 在60~66 ℃，缩陷倾向K值减小到0.04~0.07，此时铸件缩

陷倾向较小,内渗豆 $K$ 值低于0.07时消失。

(2) 通过增加铁液的孕育量,可以显著改变热分析曲线特征点,进而改变铸件的缩陷情况。

(3) 共晶最低温度 $TEU$ 提高到1 143.8 °C以上时,

D型过冷石墨基本转变为A型片状石墨, $TEU$ 超过1 146.4 °C时,铸件粗大石墨比例明显增加,在提高 $TEU$ 降低缩陷倾向时,需要同时考虑石墨形态变化带来的影响。

#### 参考文献:

- [1] KWEON E S, ROH D H, KIM S B, et al. Computational modeling of shrinkage porosity formation in spheroidal graphite iron: a proof of concept and experimental validation [J]. International Journal of Metalcasting, 2020, 14 (3): 601-609.
- [2] 黄志光. 铸件内在缺陷分析与防止 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [3] STEFANESCU D M, SUAREZ R, KIM S B. 铸铁熔炼热分析技术发展九十年 [J]. 铸造, 2021, 70 (2): 231-247.
- [4] 白宇轩, 叶寒, 顾嘉, 等. 基于热分析技术的球墨铸铁球化率和收缩特性预测 [J]. 铸造, 2024, 73 (7): 975-981.
- [5] 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.
- [6] 刘泽宇. 基于双室热分析的蠕铸铁液质量快速评价与缩松倾向预测方法 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2023.
- [7] 安国庆. 原铁液冶金质量评价及其对灰铸铁组织和性能影响 [D]. 天津: 河北工业大学, 2019.
- [8] TOKAREV A A, BOLDYREV D A, KULAKOV B A, et al. Control of compacted graphite iron production process by using the thermal analysis system [J]. Materials Science Forum, 2022, 6217: 319-325.
- [9] BRADLEY F J, FUNG C A. On thermal analysis for shrinkage prediction in commercial ductile iron castings [J]. Canadian Metallurgical Quarterly, 2013, 30 (4): 251-260.
- [10] 王宏鑫, 徐振宇, 张丽, 等. 球墨铸铁相对导热热分析试样凝固特性研究 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2022, 27 (6): 58-63.
- [11] TOSHITAKE K, YUKI I, ILGOO K. Prediction of graphite nodule count and shrinkage tendency in ductile cast iron, with 1 cup thermal analysis [J]. International Journal of Metalcasting, 2017, 11 (1): 94-100.
- [12] 马建华. 热分析技术在铁液质量控制中的应用 [J]. 现代铸铁, 2009, 29 (4): 84-88.
- [13] 张笑笑, 杨忠, 史国庆, 等. Si对蠕墨铸铁金属基体合金微观组织及导热的影响 [J]. 热加工工艺, 2023, 52 (19): 46-52.