

# 原铁液硅对蠕墨铸铁热分析曲线特征值及蠕化率的影响

侯捷铭<sup>1</sup>, 刘金海<sup>1</sup>, 范艳林<sup>1</sup>, 田丙山<sup>2</sup>, 刘长起<sup>2</sup>, 李寅国<sup>2</sup>

(1. 河北工业大学材料科学与工程学院, 天津 300130;

2. 天津撒布浪斯探测仪器有限公司, 天津 300132)

**摘要:** 铸造过程铁液中的硅含量对蠕墨铸铁凝固的热分析曲线特征值有重大影响, 本次试验通过改变硅含量来观测其对蠕墨铸铁凝固过程中各特征值的影响。通过样杯中的 k 型热电偶得到铁液凝固过程中温度的连续变化, 并将其导入 MATLAB 中求导得到各特征值。用 Imagej 软件检测各炉次试样蠕化率。试验结果表明, 随着硅含量的增加 TEU 升高, TER 基本不变,  $\Delta T_r$  下降, 蠕化率降低。

**关键词:** 蠕墨铸铁; Si 含量; 热分析; 蠕化率; 铁素体

## 1 前言

蠕墨铸铁是一种具有良好综合性能的工程材料, 在汽车零部件、炉窑部件、玻璃模具、液压件的应用上有明显的技术和经济效果。蠕墨铸铁与灰口铸铁相比, 抗拉强度提高了约 75%, 弹性模量增加近 40%, 疲劳强度几乎是灰口铸铁的 2 倍。在目前生产的蠕墨铸铁中, 由于蠕化率受活性蠕化元素含量, 孕育好坏, 铸件壁厚, 冷却速度等诸多因素的影响。使蠕化率控制存在一定难度。就不可避免地存在一定量的球状石墨, 而且随着球状石墨所占比率的提高, 蠕墨铸铁的强度和硬度增加, 而铸造性能、切削加工性能、热传导性能会下降。发动机的重要部位曲轴轴承处, 在高温和高燃烧压力的作用下, 会受到更大的机械载荷和热载荷双重作用, 引发较大的机械应力和热应力。所以, 制造发动机缸体、缸盖的蠕墨铸铁除了应具有较高的力学性能外, 还应具有良好的铸造性能、切削加工性能和热物理性能。因此蠕墨铸铁的蠕化率应保证在 80% 以上, 而且要绝对避免片状石墨的生成, 否则力学性能会下降 25%~40%。要实现蠕墨铸铁的大规模稳定生产, 就必须解决蠕化率较难控制的问题。因此, 我们在蠕墨铸铁的生产过程中通过对特征值的检测来预测铁水凝固后的蠕化率对提高成品率有重要意义。

本文通过在试验中改变化学成分中硅的含量, 观察蠕墨铸铁凝固过程中各特征值、组织、蠕化率与硅含量的对应关系。

## 2 试验方法及条件

本次试验采用稀土镁合金作为蠕化剂, 以 SiFe75 作为孕育剂。蠕化剂加入量 0.5%, 孕育剂加入量 0.6%, 铸件的其他化学成分见表 1。熔炼在 100kg 中频感应电炉中进行, 蠕化处理采用包底冲入法, 蠕化处理温度在 1450℃ 到 1500℃ 之间, 浇注温度为 1350℃ 到 1370℃ 之间。不同 Si 含量的铁液分别浇入壁厚 5mm, 中心安放直径  $\Phi 0.5\text{mm}$  的 K 型热电偶的样杯中, 样杯容量 150g。TSP-3610 四通道数据采集仪采集数据, 并记录下样杯中铁液的凝固曲线, 再用 MATLAB 分析曲线得到各特征值点。

表 1 蠕化处理后不同炉次的铁液化学成分

(w<sub>B</sub>/%)

| 试样 | C    | Si   | Mn   | S    | P    | Mg    | Ce    |
|----|------|------|------|------|------|-------|-------|
| 1  | 3.53 | 2.12 | 0.16 | 0.03 | 0.03 | 0.012 | 0.020 |
| 2  | 3.5  | 2.22 | 0.16 | 0.03 | 0.03 | 0.014 | 0.020 |
| 3  | 3.44 | 2.33 | 0.16 | 0.03 | 0.03 | 0.011 | 0.021 |
| 4  | 3.36 | 2.66 | 0.17 | 0.03 | 0.03 | 0.013 | 0.022 |
| 5  | 3.37 | 2.79 | 0.17 | 0.04 | 0.03 | 0.016 | 0.024 |

### 3 试验结果与讨论

本试验主要研究硅含量对蠕墨铸铁凝固过程中特征值 TEU、TER、 $\Delta T_r$ 、蠕化率及铁素体含量的影响。实验中所得到的特征值由热电偶所测得的摄氏度表示。本次试验所得到的各特征值如表 2 所示。

表 2 不同炉次所得特征值

| 试样 | C(%) | Si(%) | TEU(°C) | TER(°C) | $\Delta T_r$ (°C) | 蠕化率(%) |
|----|------|-------|---------|---------|-------------------|--------|
| 1  | 3.53 | 2.12  | 1130.7  | 1143.9  | 13.3              | 81.3   |
| 2  | 3.5  | 2.22  | 1132.4  | 1144.3  | 11.9              | 79.7   |
| 3  | 3.44 | 2.33  | 1135.4  | 1146.3  | 10.9              | 76.3   |
| 4  | 3.36 | 2.66  | 1134.0  | 1143.0  | 9.1               | 74.3   |
| 5  | 3.37 | 2.79  | 1136.0  | 1144.5  | 8.5               | 66.4   |

#### 3.1 硅含量对特征值 TEU 的影响

特征值 TEU 为共晶最低温度，为铁液凝固过程中发生共晶时温度回升前的最低值。其变化规律为随着硅含量的增加，总体上呈上升趋势。各炉次的 TEU 如图 1 所示。其原因是硅在凝固过程中进入晶体的八面体间隙后，减小了八面体间隙的数量，挤占了碳原子的位置，使奥氏体晶格扭曲，提高了碳的自扩散能力，从而成为促石墨化元素，可以使共晶石墨晶核数量更多，使铁液共晶形核所需的驱动力减小。另外，硅所形成的化合物可作为铁液领先凝固相石墨形核的核心，使初生小石墨球数量更多。这也使铁液共晶形核所需的驱动力更小，更早发生共晶，在凝固曲线特征值上表现为 TEU 升高。

特征值 TER 为共晶最高温度，是铁液发生共晶反应后温度回升的最高值。随着硅含量的增加，蠕墨铸铁特征值 TER 稍有上升的趋势但并不明显。各炉次的 TER 如图 1 所示。其原因为：在凝固过程中，硅进入了铁液中晶体的八面体间隙，挤占了碳原子在八面体间隙中的位置，产生晶格畸变，提高了碳的自扩散能力，促进了石墨化的进行，使铁液共晶形核所需的过冷度更低，降低了稳定系理论共晶平衡温度，从而使 TER 降低。但是因为“高硅促球”，随着硅含量的增加球状石墨所占比重增加，而球状石墨生长所需的过冷度更大，这又使得稳定系理论共晶平衡温度升高，从而使 TER 升高。这两种因素结合在一起，最终造成本次试验 TER 上升并不明显。

本次试验中 4 号试样因碳含量下降严重，因此石墨晶核长大速度略微下降，形核所需的驱动力上升，因此特征值 TEU、TER 略微上升。

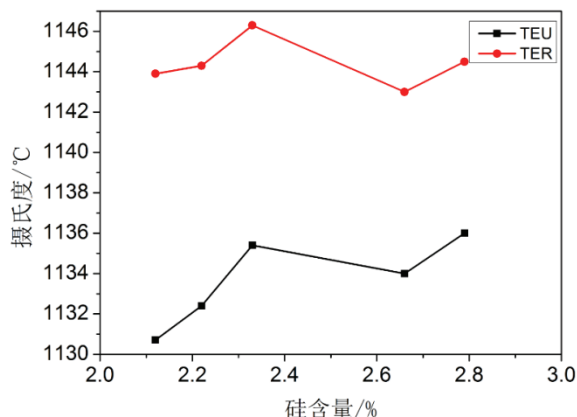
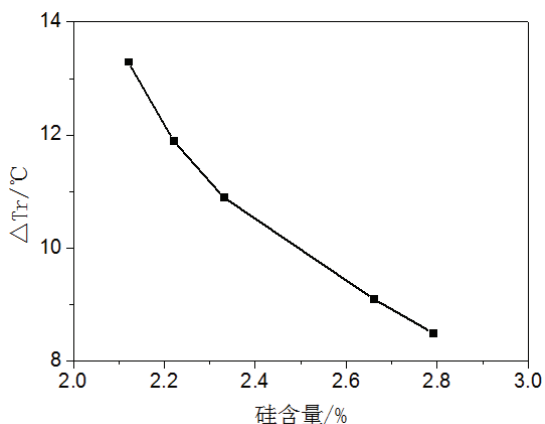
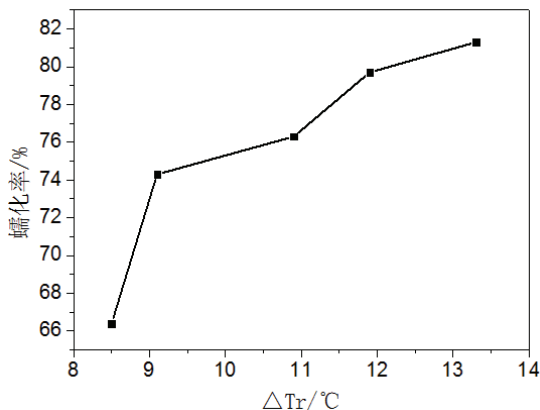


图1 硅含量对特征值 TEU 和 TER 的影响

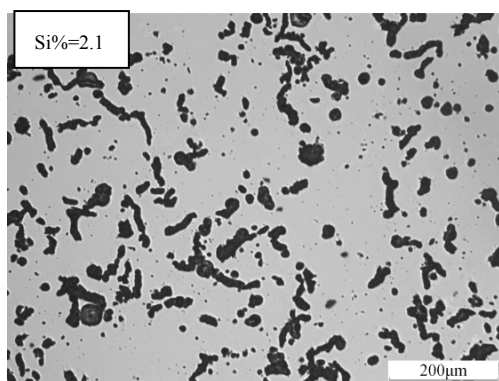
### 3.2 硅含量对特征值 $\Delta T_r$ 的影响

随着硅含量的增加蠕墨铸铁特征值 $\Delta T_r$  呈下降趋势。 $\Delta T_r$  是共晶再辉温度，反应共晶段奥氏体和石墨的析出量，其大小与铁液在共晶结晶时所释放出来的结晶潜热有关。各炉次的 $\Delta T_r$  如图 2 所示。特征值 $\Delta T_r$  降低的原因是硅会提高蠕墨铸铁中球状石墨所占比率。而球状石墨所放出的结晶潜热相对较少，故而特征值 $\Delta T_r$  随着硅含量的增高而降低，而蠕化率随着特征值 $\Delta T_r$  的上升而上升（如图 3 所示）。

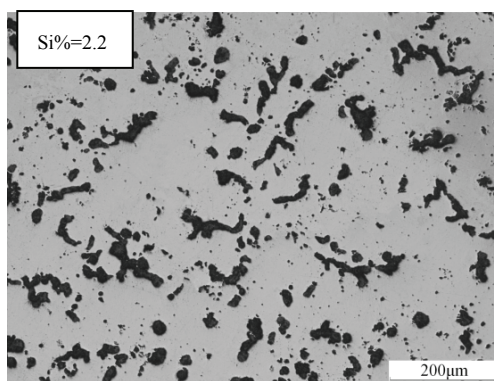
图2 硅含量对特征值 $\Delta T_r$  的影响图3 特征值 $\Delta T_r$  对蠕化率的影响

### 3.4 硅含量对蠕墨铸铁蠕化率的影响

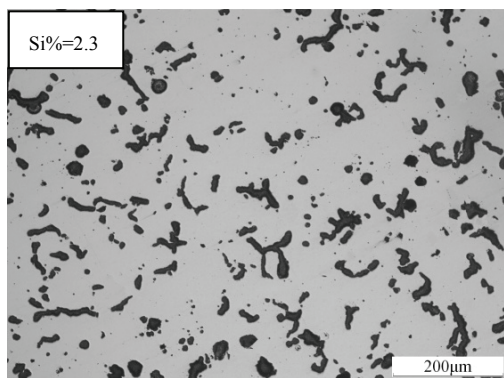
由实验可知随着硅含量的增加蠕化率呈下降趋势。各炉次金相组织变化如图 4 所示。这种现象的原因是硅与氧的结合能力较强。硫和氧能增加铁液中石墨生长的表面自由能，使石墨生长时的表面张力变小，使石墨更易于沿 a 轴生长，这就抑制了球状石墨形成，破坏了球状石墨的圆整度。硅能与硫和氧反应生成  $\text{SiO}_2$  和  $\text{SiS}$ ，进而促进球状石墨生成。 $\text{SiO}_2$  和  $\text{SiS}$  能够作为晶核核心，造成成分过冷，使共晶团增多，进一步促进球状石墨的形成，降低蠕墨铸铁的蠕化率。



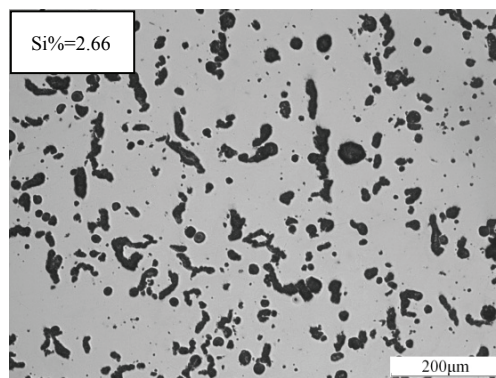
(a) 蠕化率 81.3%



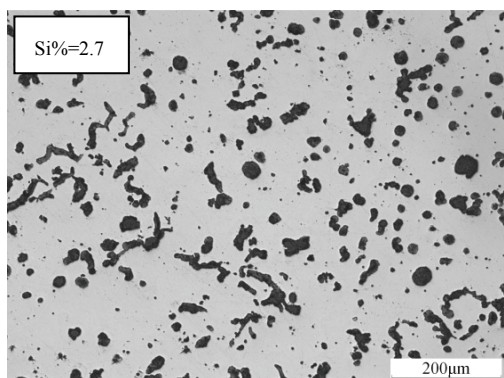
(b) 蠕化率 79.7%



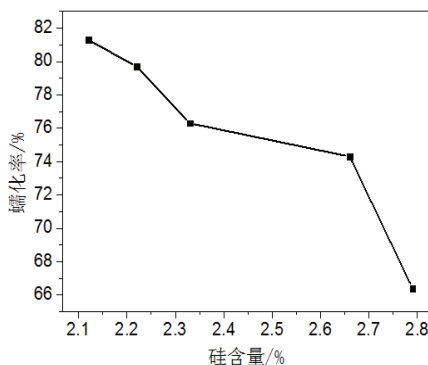
(c) 蠕化率 76.3%



(d) 蠕化率 74.3%



(e) 蠕化率 66.4%



(f) 硅含量对蠕化率的影响

图4 硅含量对蠕墨铸铁石墨组织与蠕化率的关系

## 4 结论

本次试验做了硅含量对蠕墨铸铁热分析曲线特征值、蠕化率及基体影响的研究, 得出以下结论:

- (1) 随着硅含量的提高, 蠕墨铸铁中蠕虫状石墨数量减少, 球状石墨数量增多, 蠕化率降低。
- (2) 随着硅含量的增加, 蠕墨铸铁的特征值 TEU 大体上呈上升趋势, 特征值 TER 稍有上升的趋势但并不明显, 特征值  $\Delta Tr$  呈下降趋势。

### 参考文献:

- [1] 陈位铭, 金胜灿. SinterCast 蠕墨铸铁的大规模生产[J]. 汽车工艺与材料, 2005, 5: 20-23.
- [2] 周荣. 硅促进可锻铸铁石墨化机理的探讨[J]. 现代铸铁, 1993, 1: 3-6.
- [3] 王春祺. 硫和铸铁孕育的关系[J]. 现代铸铁, 1993, 1: 41-54.

- [4] 邱汉泉. 蠕墨铸铁及其生产技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010: 67-70.
- [5] Steve Dawson. Compacted Graphite iron-A New Material for Highly Stressed Cylinder Blocks and Cylinder Heads [J]. Internationales Wiener Motorensymposium, 2007, 28.