

# 碳对蠕墨铸铁蠕化率及 热分析曲线特征值的影响

殷凤帅<sup>1</sup>, 刘金海<sup>1</sup>, 李国禄<sup>1</sup>, 范艳林<sup>1</sup>, 刘长起<sup>2</sup>, 李银国<sup>2</sup>

(1.河北工业大学材料与工程学院, 天津 300132; 2.天津撒布朗斯探测仪器有限公司, 天津 300400)

**摘要:** 铁液中的碳含量对蠕墨铸铁凝固热分析曲线特征值有较大影响, 本文主要研究碳含量对这些特征值以及蠕墨铸铁蠕化率的影响。熔炼铁液时改变碳含量来制备蠕墨铸铁, 现场采集微伏信号值并绘制热分析曲线, 通过 Matlab 软件求导获得热分析曲线上各个特征值, 用 Imagej 软件测得蠕墨铸铁的蠕化率。结果表明: 随着碳含量的增加, 特征值 TAL 呈降低趋势, TEU 和 TER 先升高后趋于平缓,  $\Delta T_r$  先降低后趋于平缓, 蠕化率明显得到提高。

**关键词:** 蠕墨铸铁; C 含量; 热分析; 特征值; 蠕化率

## 1 前言

蠕墨铸铁作为一种缺陷形式和球墨铸铁一同被发现。显微金相表明石墨形态介于片状及球状石墨之间, 头部较圆。深度腐蚀后观察石墨在立体空间内相互连接。由于石墨的独特形状, 蠕墨铸铁也表现出独特的性能。在室温条件下, 蠕墨铸铁的热传导性能为灰铸铁的 3/4。然而与灰口铁和铝合金相比, 蠕墨铸铁的抗拉强度高 75%、弹性模量提高 40%, 而疲劳强度提高了将近一倍。因此可以在保证高耐用性的前提下降低主要磨损部位的重量。另外, 蠕墨铸铁可以改进发动机缸体尺寸稳定性以减少活塞磨损进而降低耗油量。基于上述原因, 蠕墨铸铁将成为下一代高性能增压发动机材质的首选材料。伴随着全球汽车工业的发展, 特别是中国汽车业的飞速发展, 预计未来几十年蠕墨铸铁将在汽车行业稳定、快速发展。

但是, 蠕墨铸铁的生产稳定性比灰铸铁和球墨铸铁要困难的多, 因为, 蠕墨铸铁蠕化率的蠕化范围比较窄。蠕化元素必须控制在一个合理的范围内, 才能获得合适的蠕化率的蠕墨铸铁, 蠕化元素的残留量过多或过少都会使得蠕化处理失败, 俗称“卡两头”。另外, 蠕化率对铁液的很多参数敏感, 除了活性蠕化元素含量之外, 孕育状况、铸件壁厚、化学成分、冷却速度等均影响蠕化率。

本文主要通过实验研究化学成分中的碳含量对蠕墨铸铁蠕化率的影响, 并观察热分析曲线来研究不同碳含量对热分析曲线的影响, 以及蠕化率与热分析曲线上特征值的一些对应关系。

## 2 实验方法及条件

实验所用热分析设备为天津撒布朗斯探测仪器有限公司开发的 TSP-3610 四通道数据采集仪, 该仪器采集的信号单位为微伏值, 比温度信号要更精确和稳定。热分析样杯为树脂砂制成, 壁厚 5mm。样杯中心安放直径为  $\Phi 0.5\text{mm}$  的 K 型热电偶。熔炼在 50kg 中频感应电炉中进行, 蠕化处理采用包底冲入法。采用稀土镁合金和 75SiFe 作为蠕化剂和孕育剂。蠕化处理温度在 1450~1500℃ 之间, 浇注温度为 1350~1370℃。实验过程中每炉次蠕化剂和孕育剂的加入量保持不变, 分别为 0.5% 和 0.6%, 蠕化处理浇注后的试样化学成分见表 1。

不同成分的铁液经蠕化处理后浇注热分析试样, 用 TSP-3610 四通道数据采集仪采集并记录不同成分铁液的冷却曲线, 从靠近热分析试样顶端位置取样磨金相以便与得到的热分析冷却曲线更好的对应。

表 1 蠕化处理后不同铁液的化学成分

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

试样	C	Si	Mn	S	P	Mg	Ce
A1	3.67	2.5	0.233	0.015	0.038	0.014	0.021
A2	3.57	2.5	0.219	0.015	0.039	0.015	0.022
A3	3.5	2.5	0.222	0.015	0.039	0.014	0.022
A4	3.28	2.5	0.216	0.013	0.031	0.015	0.023
A5	3.17	2.5	0.210	0.013	0.033	0.015	0.022

### 3 结果与讨论

本课题实验主要研究碳含量对特征值 TAL、TEU、TER、 $\Delta Tr$  的影响, 研究这些特征值的变化时, 直接将热分析仪器所测得的微伏值作为这些特征值的单位。因为微伏值比温度值数值大很多, 一般高出一个数量级, 这样可以使得数据分析结果更加精确, 更容易发现实验结果中出现的一些规律和现象, 从而能够更好地分析实验数据得出更为准确的结论。通过 Matlab 软件求导获得热分析曲线上各个特征值。制备金相试样, 用 Imagej 软件测得蠕墨铸铁的蠕化率, 表 2 是实验所得数据。

表 2 实验所得数据

试样	C (%)	Si (%)	TAL ( $\mu v$ )	TEU ( $\mu v$ )	TER ( $\mu v$ )	$\Delta Tr$ ( $\mu v$ )	蠕化率 (%)
A1	3.67	2.5	—	46483	46685	202	88.2
A2	3.57	2.5	46754	46480	46692	212	84.2
A3	3.5	2.5	46995	46488	46708	220	79.7
A4	3.28	2.5	47000	46391	46673	282	71.6
A5	3.17	2.5	48263	46172	46478	306	62.5

表中“—”表示过共晶成分, 无 TAL 值

#### 3.1 碳含量对蠕墨铸铁蠕化率的影响

图 1a 至图 1e 为其他因素都相同的条件下, 随着含碳量的变化, 蠕墨铸铁的金相石墨组织的变化。图 1f 为碳含量对蠕墨铸铁蠕化率的影响。从图中可以看出, 随着碳含量的增大, 蠕墨铸铁中蠕虫状石墨明显增加, 球状石墨明显减少。从图 1f 可以看出, 随着碳含量的增大, 蠕化率呈明显的增高趋势。传统的观点认为高的碳当量容易促进球状石墨的形成, 本实验得出的结果恰恰相反, 在处理蠕墨铸铁时, 含硅量和加入的孕育剂和蠕化剂相同的情况下, 含碳量越高越能促进蠕虫状石墨的形成和生长。这是因为镁元素在铁液中不会溶解, 与铁液中的碳有一定的结合能力, 所以在蠕化处理过程中镁元素会在石墨和铁液的边界处富集, 随着碳量的增加, 析出的石墨含量增多, 单位体积的界面增多, 镁元素分布在这些界面之间, 使得在凝固过程中镁能均匀的分布在基体中, 促进了蠕虫状石墨的生长, 提高了蠕化率。而不会造成局部镁元素的富集, 造成球状石墨的形成而导致蠕化率降低。

随着碳含量的增加, 使得铁液中结晶形核核心增多, 铁液结晶形核所需驱动力减小, 铁液的过冷倾向减小, 根据螺型位错界面生长速度  $R = \mu \Delta T^2$ , 过冷度越小, 石墨在 C 向上生长速度减小, 抑制了球状石墨的生长, 从而使得蠕虫状石墨的增多。

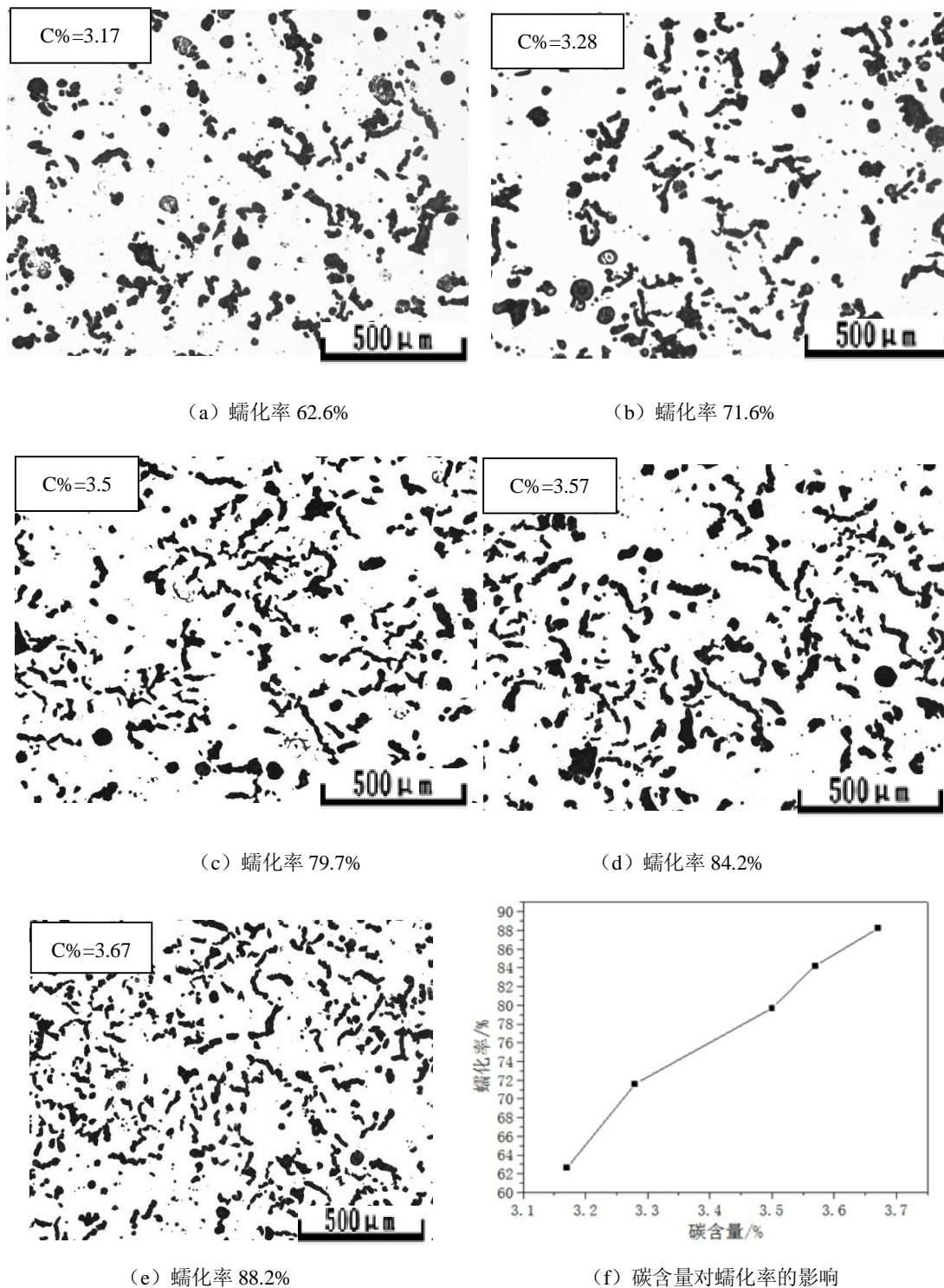


图1 碳含量对蠕墨铸铁石墨组织及蠕化率的影响

### 3.2 碳含量对特征值 TEU 的影响

图2为铁液保持其他因素不变,具有不同碳含量时,特征值 TEU 的变化趋势。特征值 TEU 是共晶最低温度,随着碳含量的升高,特征值 TEU 表现为先上升明显,当碳含量到达碳当量共晶成分左右后趋于平缓的趋势。

产生如此的变化规律,是因为碳元素是最主要的石墨化元素,保持含硅量一定时,一方面,随

随着碳含量的增加，碳原子的活度增大，共晶石墨化倾向趋于增大，在铁液共晶结晶阶段，铁液共晶结晶形核所需要的驱动力减小；另一方面，碳含量的增加引起碳原子活度增大后，使得共晶结晶阶段石墨结晶形核核心增多，也进一步降低铁液共晶结晶阶段共晶结晶形核所需驱动力的减小。在这两方面的共同作用下，铁液的过冷倾向减小，具体表现为特征值 TEU 的升高。铁液成分到达共晶成分左右，铁液共晶结晶形核时，所需要的驱动力变化不是很大，基本不变，故特征值 TEU 趋于平缓。

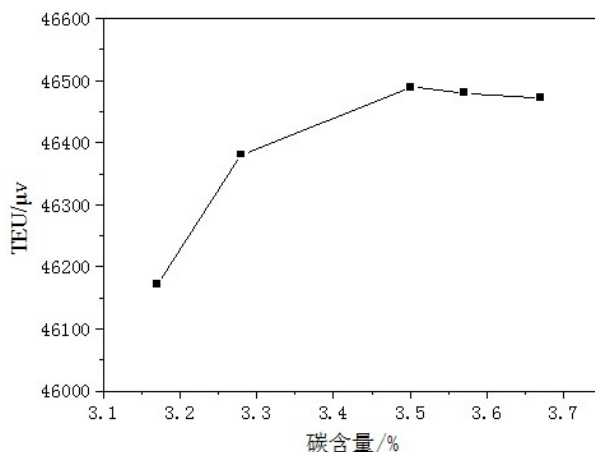


图2 碳含量对特征值 TEU 的影响

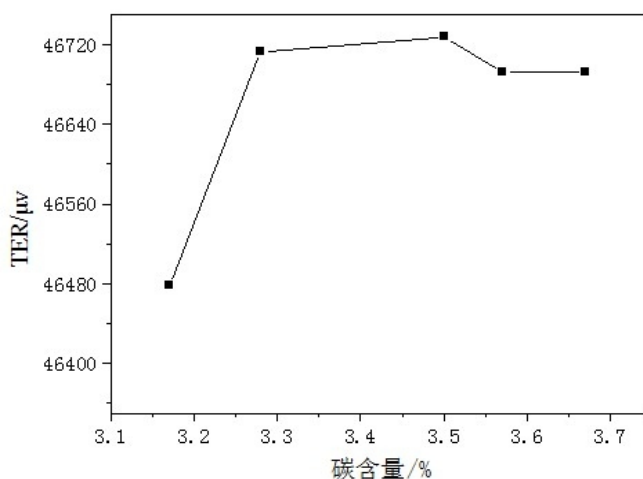


图3 碳含量对特征值 TER 的影响

### 3.3 碳含量对特征值 TER 的影响

图3为保持其他因素（其他化学成分、蠕化剂等）不变，碳含量变化对特征值 TER 变化规律的影响。特征值 TER 是共晶最高温度，随着碳含量的升高，特征值 TER 也呈明显上升趋势，当碳含量达到3.6%左右以后，特征值 TER 较大且变化不是很明显，趋于平缓。

之所以碳含量对特征值 TER 有这样的影响规律，是因为：在碳含量较低时，在蠕墨铸铁铁液共晶结晶阶段，奥氏体与蠕虫状石墨两相的生长情况是石墨的析出使得其周围铁液贫碳，促进了奥氏体的析出，而奥氏体的析出又使得其周围铁液富碳，又促进了石墨的析出，两者是互相促进生长的关系。在此过程中，奥氏体生长速度高于蠕虫状石墨生长速度，使得石墨被限制在由奥氏体组成的铁液通道之中，析出奥氏体的量影响甚至决定着蠕虫状石墨的生长速度。当铁液中的含碳量越低时，共晶过冷度越大，共晶过冷度越大，奥氏体的析出量越大，对蠕虫状石墨的生长速度阻碍越大，蠕虫状石墨的生长速度越慢，则特征值 TER 越小。

然而当碳含量达到碳当量近共晶成分左右时, 根据其他化学元素计算可得此时铁液的化学成分已经达到共晶成分附近, 共晶过冷度较小, 奥氏体析出量就减少, 对蠕虫状石墨的生长阻碍越小, 蠕虫状石墨生长速度越小, 则特征值 TER 变化较小, 此时, 特征值 TER 已达到最高值。

### 3.4 碳含量对特征值 $\Delta Tr$ 的影响

图 4 为碳含量的变化对特征值  $\Delta Tr$  的影响规律。特征值  $\Delta Tr$  是共晶再辉温度, 随着碳含量的增加, 特征值  $\Delta Tr$  呈现降低趋势, 当碳含量达到铁液化学成分在共晶成分左右时, 特征值  $\Delta Tr$  变化较小, 趋于平缓。将微伏值换算成温度值时, 特征值  $\Delta Tr$  变化在  $7\sim 8^{\circ}\text{C}$  范围左右。

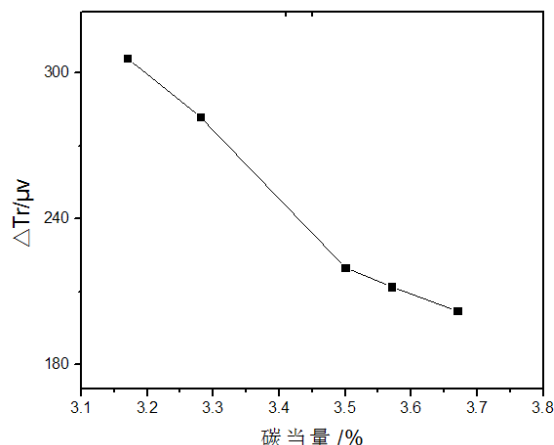


图 4 碳含量对特征值  $\Delta Tr$  的影响

特征值  $\Delta Tr$  的大小与铁液在共晶结晶时所释放出来的结晶潜热有关, 当单变量的碳含量增大时, 特征值 TEU 升高, 共晶结晶阶段所需的驱动力减小, 铁液的过冷倾向变小, 随着结晶潜热的释放, 共晶晶核会有一个返熔现象, 此时晶核形核核心减少, 在共晶结晶阶段的单位时间内释放出来的结晶潜热会较少, 在凝固热分析曲线上的表现就是特征值  $\Delta Tr$  的降低。

而当铁液达到共晶成分左右之时, 碳含量的增大使得铁液中石墨形核核心增多, 共晶潜热的释放量差不多, 在凝固热分析曲线上的表现就是特征值  $\Delta Tr$  变化较小, 趋于平缓。

在蠕墨铸铁生产中, 当碳和硅的含量一定时, 因为添加的蠕化剂含量不同而得到的不同蠕化率的热分析曲线中, 蠕化率越高再辉温度  $\Delta Tr$  会越大, 而通过本次试验可以看出, 在含硅量以及蠕化剂孕育剂的加入量一定时, 增加 C 含量, 在蠕化率增加的同时  $\Delta Tr$  反而呈现降低的趋势。所以在实际的生产过程中不能只依靠  $\Delta Tr$  的大小来预测蠕化率, 还应该考虑铁水的成分等因素的影响。

## 4 结论

本文做了碳、硅含量对热分析曲线特征值影响的研究。熔炼时改变铁液的碳、硅含量, 现场采集微伏信号值并绘制凝固热分析曲线, 然后通过 Matlab 软件进行热分析曲线上特征值的求解, 通过 Imagej 软件测得蠕墨铸铁的蠕化率。得出以下结论:

(1) 随着碳含量的增大, 蠕墨铸铁中蠕虫状石墨明显增加, 球状石墨明显减少, 蠕化率明显增大。

(2) 随着碳含量的升高, 特征值 TAL 是呈明显降低趋势的; 特征值 TEU 和 TER 表现为先上升明显, 当碳当量达到共晶成分左右后趋于平缓的趋势; 特征值  $\Delta Tr$  呈现明显的降低趋势, 即铁液化学成分在共晶成分左右时, 特征值  $\Delta Tr$  变化较小, 趋于平缓。

**参考文献:**

- [1]刘长起, 王学华.热分析仪器使用过程中应注意的问题[J].中国铸造装备与技术.2007(1):15-16.
- [2]马建华.热分析技术对提高铸铁质量的作用[J].金属加工.2008(21):68-72.
- [3]王文江, 袁明忠等.蠕墨铸铁生产中蠕化率的控制[J].现代铸铁.2006(2):50-53.
- [4]易立涛, 刘金海, 李国禄等.衰退对蠕墨铸铁热分析曲线特征的影响[J].现代铸铁, 2011(5):65-69.
- [5]邱汉泉.蠕墨铸铁及其生产技术[M].北京: 化学工业出版社.2010.9:67-70.
- [6]徐明.蠕墨铸铁件的生产与质量控制[J].铸铁设备与工艺.2009(6):50-54.
- [7]盛达.蠕墨铸铁的起源、发展及其熔炼工艺[J].熔炼技术, 2009(5):20-22.
- [8]Steve Dawson. Compacted Grphite Iron-A New Materral for Highly Stressed Cylinder Blocks and Cylinder Heads[J], Internationales Wiener Motorensymposium, 2007(28).