

# Sn对蠕墨铸铁组织与抗热疲劳性能的影响

陈海军<sup>1,2</sup>, 陈丹<sup>1</sup>, 吴素珍<sup>1</sup>, 桑玮玮<sup>1</sup>, 李建<sup>2</sup>

(1.河南工程学院机械工程学院, 河南郑州 451191; 2.驻马店中集华骏铸造有限公司, 河南驻马店 463000)

**摘要:** 研究了Sn含量对汽车制动鼓用蠕墨铸铁中蠕墨数量、形态、基体组织以及抗热疲劳性能的影响规律。结果表明, Sn可以明显改变蠕铁中的珠光体含量, 对蠕化率无明显影响, 可以改变蠕铁热疲劳性能。Sn含量为0.06% (质量分数, 下同) 时, 珠光体含量最高为95%, 片层间距为0.07 μm。Sn含量增加时, 石墨轴比率逐渐上升, 石墨变得细长且分叉增多。在20~600 °C循环条件下, 含0.06%Sn时蠕铁的热疲劳裂纹长度最短, 抗热疲劳性能最好。

**关键词:** 蠕墨铸铁; Sn; 热疲劳

**中图分类号:** TG143.49 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2015) 01-0005-04

## Influence of Sn on the Microstructures and Thermal Fatigue Resistance of Vermicular Graphite Cast Iron

CHEN Hai-jun<sup>1,2</sup>, CHEN Dan<sup>1</sup>, WU Su-zhen<sup>1</sup>, SANG Wei-wei<sup>1</sup>, LI Jian<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Henan Institute of Engineering, Zhengzhou 451191, Henan, China;

2. Zhumadian CIMC Huajun Casting Company, Zhumadian 463000, Henan, China)

**Abstract:** The influence of Sn on the graphite quantity, graphite morphology, matrix structure and thermal fatigue resistance of the vermicular graphite cast iron used for automobile brake drum was investigated. The results show that Sn can change the pearlite content and thermal fatigue resistance, the effect of vermicular rate is not evident. The cast iron with 0.06% (mass fraction, similarly hereinafter) Sn has the highest pearlite content 95%, interlayer spacing 0.07 μm. The axial ratio and forking of graphite rise and graphite becomes slight when Sn content increases. The thermal fatigue resistance of compacted graphite iron with 0.06% Sn is the best under 20-650 °C of thermal cycles condition.

**Key words:** vermicular graphite cast iron; Sn; thermal fatigue resistance

蠕墨铸铁的铸造性能接近灰铸铁, 而力学性能和热稳定性又接近球墨铸铁, 且壁厚敏感性比球墨铸铁和灰铸铁都要小, 是一种比较理想的材料<sup>[1]</sup>。蠕铁在刹车片、内燃机铸件等方面应用很广, 这些零件往往在交变温度下工作。合金元素添加种类及含量对蠕墨铸铁基体组织、石墨形态以及抗热疲劳性能影响很大<sup>[2-4]</sup>。本文中主要研究了添加合金元素Sn对蠕墨铸铁基体组织、石墨形态以及抗热疲劳性能的影响。

## 1 试验方法

熔炼试样成分见表1。将称量好的原料依照一定的顺序放入1 000 kg中频炉中熔化, 熔化完毕待温度升至1 290 °C时用试样勺伸入炉中一定深度舀取熔液检验成分, 成分合格后再将温度升至1 500 °C。将铁液倒入堤坝包内烫包, 经反复多次至浇包呈暗红色 (温度达到600 °C左右) 时为止。

蠕化剂加入量为0.40%, 孕育剂加入量为0.5%。

将称量好的蠕化剂 (RE3.4, Mg5.9, Si4)、孕育剂 (Si65, Ca11, Ba5)、铁豆依次加入堤坝包靠近中频炉一侧。蠕化剂加入应趋于均匀撒开, 不能成堆且被完全均匀覆盖。将铁液冷却至1 347 °C后以一定的速度倒入浇包内远离中频炉一侧, 观察蠕化剂反应情况。待反应完, 液面平稳后, 浇注Y型试块, Y型试块型内分别加入0.02%、0.04%、0.06%、0.08%、0.10%的Sn, 然后对Y型试块取样。

表1 试样的化学成分

Table 1 Chemical compositions of specimen  $w_B/\%$

C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Al	Ti	Mg	Ce
3.5	2.32	0.69	0.029	0.018	0.032	0.024	0.011	0.045	0.03	0.005

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 组织及力学性能变化

从图1中试验结果来看, Sn含量的改变对于蠕化率的影响并不大, 蠕化率保持在85%。Sn含量较低时,

基金项目: 河南工程学院博士基金(0485/D2012010)。

收稿日期: 2014-07-24收到初稿, 2014-09-05收到修订稿。

作者简介: 陈海军 (1974-), 男, 博士, 副教授, 主要从事热加工方面教学和科研。E-mail: nac0115@sina.com.cn

石墨端部比较圆滑，尖角比较少。

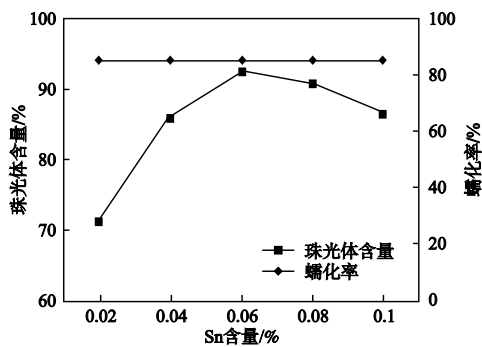
晶界偏聚方程可由下式表示：

$$C = \frac{C_0 \exp(\Delta E/RT)}{1 + C_0 \exp(\Delta E/RT)} \quad (1)$$

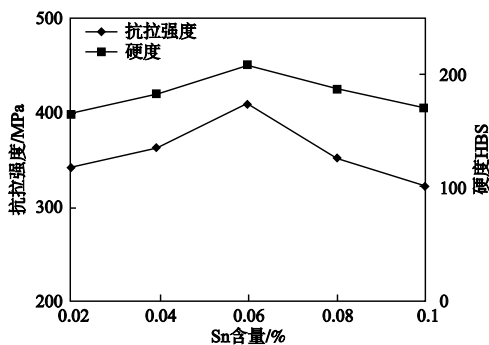
式中： $C$ 及 $C_0$ 分别表示晶界区和晶格内的溶质浓度，无量纲； $\Delta E$ 为畸变能差，J/mol； $T$ 为温度， $^{\circ}\text{C}$ ； $R$ 为常数。

Sn在 $\gamma$ -Fe中的固溶度较小，晶界偏聚富集系数大于10，在 $\gamma$ -Fe中的晶界偏聚的趋势将会较大。随着Sn含量增加过多，偏聚增加，奥氏体中成分过冷增加，影响了初生奥氏体析出。初生奥氏体的形态会影响蠕虫状石墨的形态，使其分支增加，端部变尖，长角且分叉。随着Sn含量的上升，蠕虫状石墨的轴比率逐渐上升，石墨变得细长(图2)<sup>[5-8]</sup>。

试样的基体组织都是珠光体+铁素体。随着Sn含量上升，珠光体含量逐渐上升。随着珠光体含量进一步增加，珠光体含量趋于稳定。



(a) Sn含量对组织的影响



(b) Sn含量对力学性能的影响

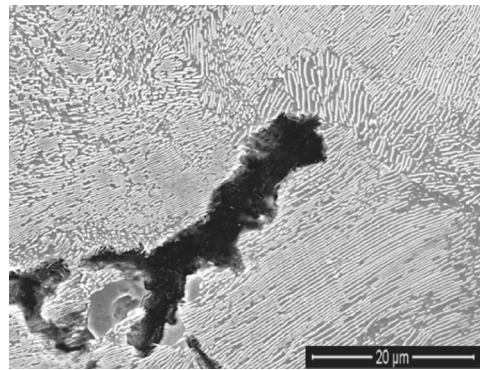
图1 Sn对蠕铁组织及力学性能的影响

Fig. 1 Influence of Sn on structure and mechanical properties of vermicular cast iron

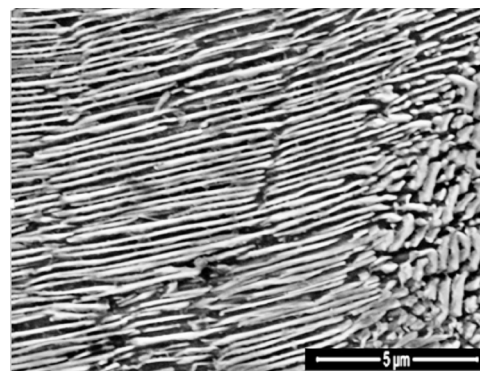
在Sn含量低于0.04%时，珠光体的片层间距变化不大，保持在 $0.03\ \mu\text{m}$ 左右。当Sn进一步上升至0.08%时，珠光体片层间距加大。随着Sn进一步上升至0.1%时，珠光体片层间距继续加大至 $0.17\ \mu\text{m}$ 。这是由于蠕墨铸铁中铁素体的数量取决于碳的扩散能力，而碳的扩散受制于石墨的分枝程度和金属基体，在Sn含量高时，石墨分枝频繁，影响了共析转化过程<sup>[9]</sup>。

## 2.2 热疲劳性能

热疲劳试验采用电炉加热，试样尺寸为 $\Phi 40\ \text{mm} \times 20\ \text{mm}$ ，在试样上加工宽 $0.1\ \text{mm}$ ，深 $1\ \text{mm}$ 的人工裂纹源，加热到 $600\ ^{\circ}\text{C}$ ，加热 $10\ \text{s}$ ；加热后，水冷却，冷却 $5\ \text{s}$ 。水冷后试样最低温度保持在 $20\ ^{\circ}\text{C} \pm 2\ ^{\circ}\text{C}$ 。每循环10次打磨和抛光，使得 $R_a \leq 0.028\ \mu\text{m}$ ，然后用读数显微镜观察并记录裂纹扩展情况。最长的一条裂纹起源于人工裂纹，为主裂纹。在试样表面有很多细小的与主裂纹并不一定相通的较小尺寸长条裂纹以及龟裂状裂纹，条状裂纹附近有很多与之近似平行的波浪状小裂纹，见图3。裂纹主要沿着石墨-基体界面扩展或者穿过石墨，也有少数穿晶型的。测量试样的两个表面上与试样缺口相连接的主裂纹长度时，与主裂纹不相通的裂纹不计算在内。将主裂纹长度减去原始人工裂纹长度，计算出裂纹增长量。



(a) 0.06%Sn蠕墨



(b) 0.06% Sn珠光体

图2 蠕铁扫描电镜组织

Fig. 2 Microstructure of specimen by SEM

从试验结果来看，经过热疲劳试验，试样表面出现裂纹和龟裂；90次热循环后，原来的石墨被烧损，珠光体组织基本消失，但在0.06%Sn的试样中仍然有局部残留极少量珠光体组织；在残留的珠光体组织区域未出现条状裂纹或龟裂。同样试验次数下，0.06%Sn蠕铁的主裂纹长度最短，抗热疲劳性能最好，在产生条状裂纹和龟裂区域的氧含量明显增高。随着试验次数的增加，蠕铁基体的显微硬度呈逐渐下降趋势(图4)，这是由于蠕铁内渗碳体分解造成的。珠光体中的渗碳

体是介稳状态, 在经过热疲劳试验后, 渗碳体分解, 组织被氧化, 铁素体区域扩大。石墨在长时间热疲劳试验过程中不断重复溶入基体和冷却析出的过程, 这造成部分石墨破碎或者脱落。随着试验次数增多, 铁素体区域增多, 石墨脱落增多, 试样强度硬度下降, 裂纹源增多, 后期裂纹扩展明显加快。

试样受到热疲劳时, 反复受到加热冷却, 会在试样内造成较大的循环拉压应力, 开始产生变形和微处断裂。材料抗热疲劳性能的影响因素有很多, 残余应力的大小、抗拉强度和导热系数等也会影响材料的热疲劳性能<sup>[9]</sup>。蠕墨铸铁中石墨形态也会影响抗热疲劳性能。蠕虫状石墨短促, 端部圆钝, 使蠕墨铸铁应力集中系数减小。

石墨应力集中系数K可以用下式表示:

$$K=f\left(\sqrt{\frac{l}{d \cdot \rho}}\right) \quad (2)$$

式中:  $l$ 为石墨长度,  $\mu\text{m}$ ;  $d$ 为石墨间距,  $\mu\text{m}$ ;  $\rho$ 为石墨端部曲率半径,  $\mu\text{m}$ 。

石墨的强度远低于钢铁材料, 相当于是基体组织中的微裂纹, 石墨形状越尖锐, 长角越多, 应力集中系数越大, 该处更容易成为裂纹源。由于石墨与基体之间结合力较弱, 铁素体和石墨的强度低于珠光体, 裂纹往往沿着蠕虫状石墨与基体组织的边界扩展, 或者沿着铁素体晶界扩展, 少数穿过晶内, 直至最终连接在一起, 最终发展为宏观裂纹。

用热疲劳品质系数可以综合衡量材料本身的力学物理性能对热疲劳寿命的影响。

$$Q \propto \frac{(1-\nu) \cdot R \cdot F_t \cdot \sigma_b}{\alpha \cdot E \cdot \Delta T} \quad (3)$$

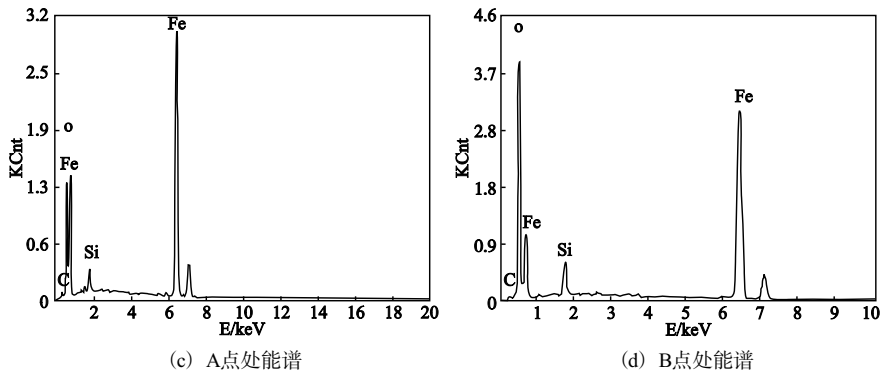
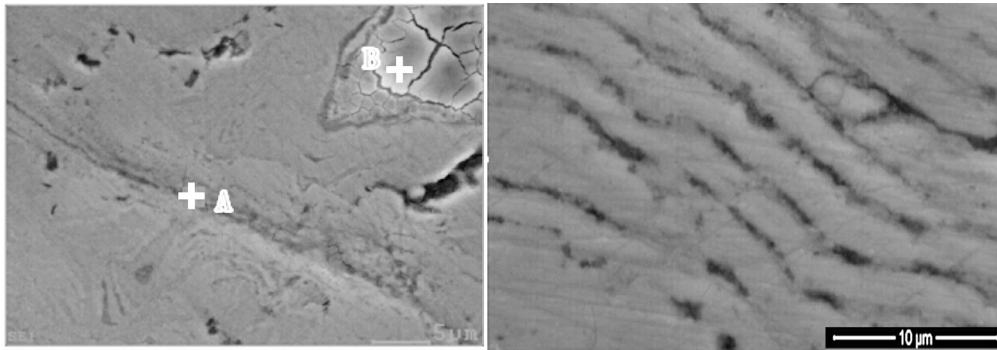


图3 0.06% Sn蠕墨铁热疲劳试样

Fig. 3 Specimen with 0.06% Sn after thermal fatigue test

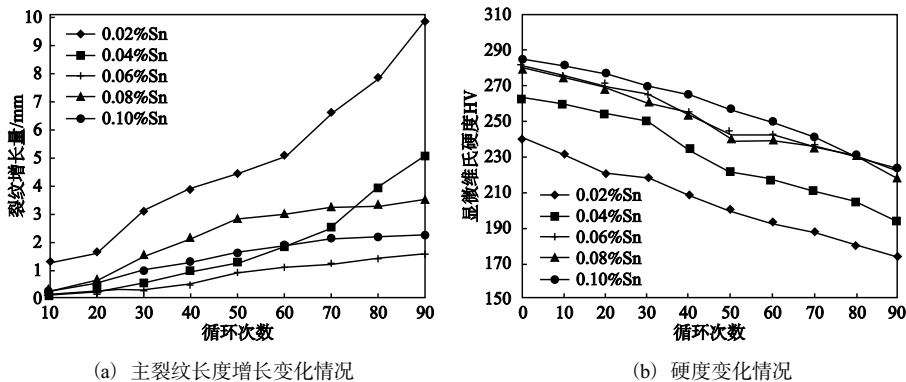


图4 循环次数对蠕墨铸铁热疲劳性能的影响

Fig. 4 Influence of cycle number on the thermal fatigue resistance of vermicular graphite cast iron



式中： $\nu$ 为泊松比，无量纲； $R$ 为导热系数， $W/(m \cdot ^\circ C)$ ； $F_t$ 为应力松弛系数，无量纲； $\sigma_b$ 为抗拉强度，Pa； $\alpha$ 为热膨胀系数； $E$ 为弹性模量，Pa； $\Delta T$ 为温度差， $^\circ C$ 。

添加了Sn后，对弹性模量、导热系数等改变很小，主要改变的是基体组织，0.06%Sn时珠光体含量达到峰值。随着Sn含量的上升，珠光体含量上升， $\sigma_b$ 增加，热品质系数上升。随着Sn含量进一步升高，石墨分叉长角变多，应力集中系数上升，而 $\sigma_b$ 开始下降，这些因素的综合影响导致 $Q$ 在0.06%Sn时到达峰值，然后呈下降趋势。

### 3 结论

在蠕墨铸铁中加入Sn可以明显改变珠光体的数量及形态、石墨形态，以及抗热疲劳性能。

(1) 随着Sn含量的上升，珠光体含量呈先上升至峰值而后下降的趋势。Sn含量0.06%时，珠光体含量最高为92.7%，片层间距为0.07  $\mu m$ ，硬度和强度分别为HBS 208和410 MPa。

(2) Sn对于蠕虫石墨的形态也有影响，随着Sn含量的提高，蠕虫状石墨轴比率逐渐上升，石墨的分叉也越多。

(3) 经过一定次数热循环，试样表面开始产生条状裂纹和龟裂。在产生条状裂纹和龟裂区域的氧含量明显增高。随着试验次数增加，试样硬度逐渐下降。

(4) Sn含量0.06%时，在20~600  $^\circ C$ 循环条件下，同样试验次数下主裂纹扩展最短，抗热疲劳性能最好。0.06%Sn的试样中仍然有局部残留极少量珠光体组织；在残留的珠光体组织区域未发现条状裂纹或龟裂。

#### 参考文献：

- [1] 杨忠, 陶栋, 郭永春, 等. 多元低合金化对蠕墨铸铁组织与性能的影响 [J]. 铸造, 2014, 63 (2): 35.
- [2] Hideo Nakae, Masayuki Fukami, Takayuki Kitazawa, et al. 硅、铈、铈和锡对块状石墨形成的影响 [J]. 铸造, 2011, 60 (1): 43.
- [3] 陈向强, 吴文远, 莫德勒图, 等. 富钨蠕化剂对铸铁中的石墨形态和组织的影响 [J]. 有色矿冶, 2008, 24 (2): 41.
- [4] 车广东, 刘向东. 不同钒含量对低铬合金铸铁组织和性能的影响 [J]. 铸造, 2011, 63 (1): 25.
- [5] Tsujikawa M, Kagamine K, Kenaga A I, et al. Influence of graphite morphology on dry sliding wear of flake graphite cast irons [J]. International Journal of Cast Metals Research, 2008, 21 (1): 76-80.
- [6] Shy Yihhsun, Hsu Chenghsun, Lee Shenchih. Effects of titanium addition and section size on microstructure and mechanical properties of compacted graphite cast iron [J]. Materials Science and Engineering, 2000, A278: 54-60.
- [7] Lin Pengyu, Zhu Yongfu, Zhou Hong, et al. Wear resistance of a bearing steel processed by laser surface remelting cooled by water [J]. Scripta Materialia, 2010, 63: 839-842.
- [8] Tong Xin, Zhou Hong, Zhang Wei, et al. Thermal fatigue behavior of gray cast iron with striated biomimetic non-smooth surface [J]. Journal of materials processing technology, 2008, 206: 473-480.
- [9] Zimba J, Samandi M, Yu D, et al. Unlubricated sliding wear performance of unalloyed austempered ductile iron under high contact stresses [J]. Materials and Design, 2004, 25: 431-438.
- [10] Guo Qingchun, Zhou Hong, Wang Chengtao, et al. Effect of medium on friction and wear properties of compacted graphite cast iron processed by biomimetic coupling laser remelting process [J]. Applied Surface Science, 2009, 255: 6266-6273.

(编辑: 潘继勇, [pjy@foundryworld.com](mailto:pjy@foundryworld.com))

(选自《铸造》2015年第1期)