

纳米陶瓷粉体对 HT250 微观组织和热疲劳的影响

于笋¹, 杨军², 陈美玲²

(1. 广西玉柴机器股份有限公司, 广西玉林 537005;

2. 大连交通大学材料科学与工程学院, 辽宁大连 116028)

摘要: 研究了在 HT250 中加入 0.1% 纳米陶瓷粉体对其显微组织和热疲劳的影响, 结果表明: (1) 纳米陶瓷粉体作为液态 HT250 的外来异质形核的核心, 起到孕育作用, 促进石墨化, 使石墨变得细小且分布均匀, 长度减小, 对基体的割裂作用减弱; 珠光体体积分数增加且得到细化, 片间距减小, 基体连续性得到改善; (2) 添加 0.1% 纳米陶瓷粉体后, HT250 的导热系数下降, 平均下降 4.6%; (3) 与未添加纳米陶瓷粉体的 HT250 相比, 添加 0.1% 纳米陶瓷粉体后, 热膨胀系数下降, 平均下降 8.6%; (4) 添加 0.1% 纳米陶瓷粉体后, HT250 的热疲劳性能明显提高 17%。

关键词: 灰铸铁; 纳米陶瓷粉体; 显微组织; 热疲劳性能

Influence of Nano-Ceramic Powder on Microstructure and Thermal Fatigue Property of HT250

YU Sun¹, YANG Jun², CHEN Mei-ling²

(1. Yuchai Machinery Co., Ltd., Yulin 537005, Guangxi;

2. School of Materials Science and Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, Liaoning)

Abstract: The influences of adding 0.1% nano-ceramic powder into HT250 on its microstructure and thermal fatigue property were investigated. The results showed: (1) as the extraneous heterogeneous nuclei of the liquid gray iron, the nano-ceramic powder had inoculation effect that promoted graphitization and thereby made the graphite more finer and distributing more uniformly, the graphite length reduced, therefore, the matrix-dissevering effect of the graphite was weakened; the pearlite content increased, the pearlite inter-layers distance was reduced, therefore the matrix continuity was improved; (2) after adding 0.1% nano-ceramic powder, the thermal conductivity coefficient of the gray iron decreased by 4.6% averagely; (3) compared with the gray iron without nano-ceramic powder addition, the thermal expansion coefficient of the gray iron with 0.1% nano-ceramic powder addition decreased by 8.6% averagely; (4) after adding 0.1% nano-ceramic powder, the thermal fatigue property of the gray iron increased obviously by 17%.

Key words: gray iron; nano-ceramic powder; microstructure; thermal fatigue property

灰铸铁凭借其良好的铸造性能、成本低等优点, 广泛应用于汽车发动机缸体和气缸盖的生产, 其中气缸盖结构最为复杂, 工作过程中需要承受高温燃烧及冷热循环冲击, 工作环境极其恶劣, 它的可靠性很大程度上决定发动机的可靠性, 但由于灰铸铁有散热性能差、抵抗热疲劳的能力差等缺点, 容易导致气缸盖产生裂纹缺陷, 进而导致气缸盖的失效^[1]。因而, 对灰铸铁高温工作性能的研究尤为重要。

纳米陶瓷粉体是一种典型的强共价键性陶瓷粒子, 具有高强度、高弹性模量、耐热、耐磨、耐

作者简介: 于笋(1957—), 男, 材料技术高级专家, 正高级工程师, 主要从事材料研究工作, E-mail: yusun757@163.com。

高温以及成本低等优点，作为颗粒增强体常被用在金属基复合材料的制备中^[2-4]。

为了研究灰铸铁的热疲劳性能，采用添加纳米陶瓷粉体的方法，以普通灰铸铁为试验材料，在生产条件下制备添加纳米陶瓷粉体的灰铸铁试样，从显微组织、导热系数、热膨胀系数等方面对添加陶瓷粉体前后灰铸铁热疲劳性能进行了分析。

1 试验方法

试验所用纳米陶瓷粉体的主要性能参数如表1所示。试验原材料为HT250，其主要化学成分为： $w(C) 3.20\% \sim 3.50\%$ ， $w(Si) 2.00\% \sim 2.40\%$ ， $w(Mn) 0.60\% \sim 0.90\%$ ， $w(P) \leq 0.20\%$ ， $w(S) \leq 0.15\%$ 。熔炼温度为1550℃，包内孕育（孕育剂为FeSi75，加入量0.15%）。铁液出炉前，将质量分数为0.1%纳米陶瓷粉体置于浇包底，冲入铁液，无需搅拌，保温静置，然后进行砂型浇注，从而得到添加0.1%纳米陶瓷粉体后的灰铸铁试样。

表1 纳米陶瓷粉体的主要性能参数

相结构	晶体结构	密度/ $g \cdot cm^{-3}$	维氏硬度 / $kg \cdot mm^{-2}$	熔点 / $^{\circ}C$	弹性模量 / $\times 10^4 MPa$	抗弯强度 / MPa	断裂韧性 / $MPa \cdot m^{-1/2}$
α	六方晶系	3.15	3 056	2 700	400	34.3	0.15

显微组织是用BX51M金相显微镜观察：在100倍下拍摄石墨形态照片；用4%的硝酸酒精溶液腐蚀约20 s，在500倍下拍摄基体组织照片。

导热系数是用耐驰仪器（上海）有限公司生产的NanoflashTMLFA5000激光闪射导热仪测量，试样尺寸为 $\Phi 12.5 mm \times 2.5 mm$ 的圆片，测试温度范围为25~400℃，升温速率为10 K/min，在Ar的氛围中测量，通过该仪器自带的分析软件，计算得出试样的导热系数，每组试验结果均为2个试样的平均值。

热膨胀系数是用湘潭仪器生产的METzscHDIL402PC水平推杆卧式膨胀仪测量，试样尺寸为 $\Phi 12.5 mm \times 50 mm$ 的圆棒，测试温度范围为35~800℃，升温速率为10 K/min，连续采集温度—线性热膨胀数据，通过自带的分析软件，计算得出平均线膨胀系数。

热疲劳试验用试样为 $\Phi 25 mm \times 3 mm$ 的圆片，方法是采用传统热疲劳试验方法，将试样放置于加热至600℃的马弗炉中保温10 min，再进行水淬，取出试样用吹风机吹干。如此重复，至肉眼观察以试样出现第一道裂纹时的次数来评价此试样的热疲劳性能。

2 试验结果及分析

2.1 显微组织

图1是添加0.1%纳米陶瓷粉体前后HT250中石墨形态的变化情况，可以看出，添加0.1%纳米陶瓷粉体前后的石墨均为A型，未添加纳米陶瓷粉体的HT250中石墨片的分布不均匀，石墨片细长，且存在少量的E型石墨；添加0.1%纳米陶瓷粉体后，HT250中石墨片长度明显减小，分布均匀，使基体的连续性得到改善^[5]。

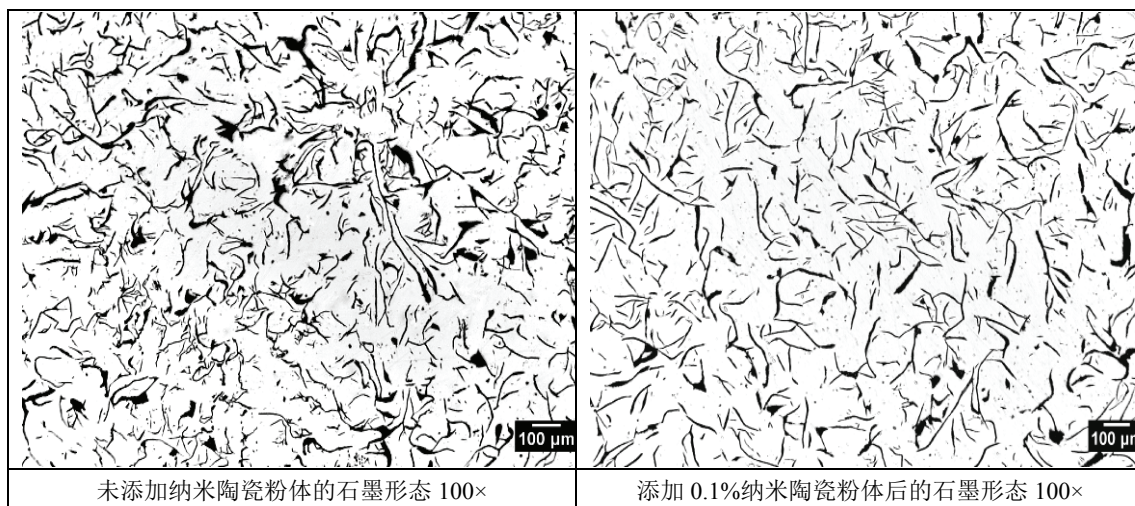


图1 添加纳米陶瓷粉体前后 HT250 的石墨形态

图2是4%的硝酸酒精溶液腐蚀约20s得到的HT250基体组织，可以看出，未添加纳米陶瓷粉体的HT250基体组织中含有少量的铁素体，珠光体片间距较大；添加0.1%纳米陶瓷粉体之后，基体组织均为具有细小的片间距的珠光体，珠光体得到细化。

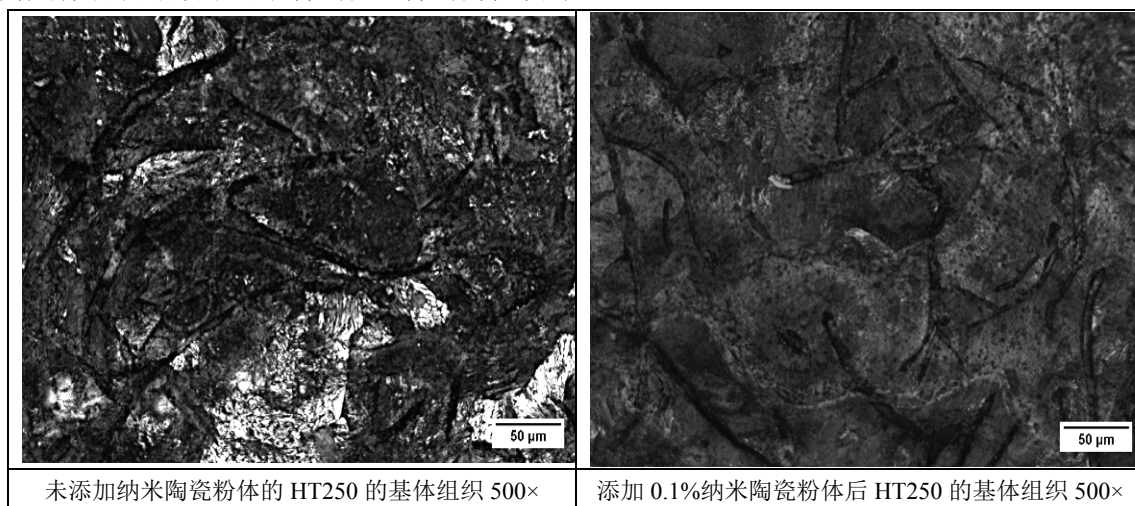


图2 添加 0.1% 纳米陶瓷粉体前后 HT250 的基体组织

2.2 导热系数

图3是添加0.1%纳米陶瓷粉体前后HT250导热系数的变化曲线，在25~400℃的测试温度范围内，无论是否添加纳米陶瓷粉体，HT250的导热系数均随着温度的升高而降低，同一温度添加陶瓷粉体后HT250的导热系数略低于原HT250的导热系数，下降的平均幅度为4.6%。

研究显示，片状石墨分布于共晶团之间相互连接容易形成“高导热通道”，在基体组织中，铁素体的导热性高于珠光体^[6]。由图1可知添加0.1%纳米陶瓷粉体之后，石墨分散均匀，长度减小，使得导热通道减少；由图2可知添加0.1%纳米陶瓷粉体之后，珠光体的体积分数增加，使得HT250的导热性降低。因此，显微组织的改变使得HT250的导热系数下降，进而使得HT250铸件的散热能力下降。

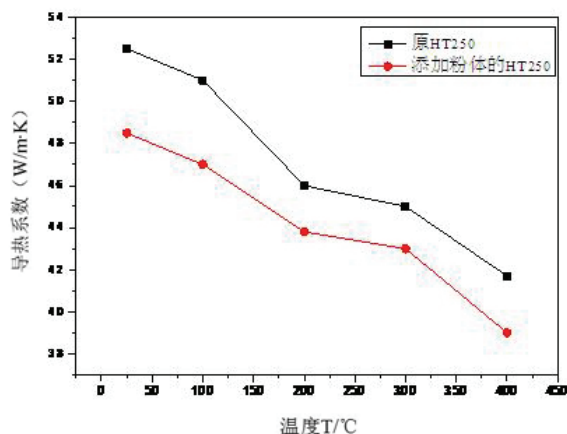


图3 添加0.1%纳米陶瓷粉体对 HT250 导热系数的影响

2.3 热膨胀系数

由图4可知, 无论是否添加纳米陶瓷粉体, HT250的热膨胀系数均随温度的升高而呈增大趋势。从35 °C升温至300 °C的过程中, 热膨胀系数急剧增大; 之后热膨胀系数曲线相对平稳, 增加缓慢; 继续升温至近727 °C共析转变温度, 发生相变, 热膨胀系数又急剧增大, 而后有所下降, 相变结束后热膨胀系数又随着温度的升高而增大。添加0.1%陶瓷粉体后, HT250的热膨胀系数有所下降, 下降的平均幅度为8.6%。这说明添加金属添加剂后, HT250的热稳定性得到提高。

金属的热膨胀是由于原子间作用力的非对称性引起。从显微组织上分析可知, 添加0.1%纳米陶瓷粉体以后, 石墨片的数量增多, 石墨片细化。这是因为在铸铁溶液中陶瓷粉体作为异质形核剂, 增加了石墨的核心, 促进了石墨细化。这使得铁原子晶格中固溶的C原子减少, 铁原子间作用力的非对称性降低, 温度升高时, 使热膨胀减少, 则热膨胀系数降低^[7]。

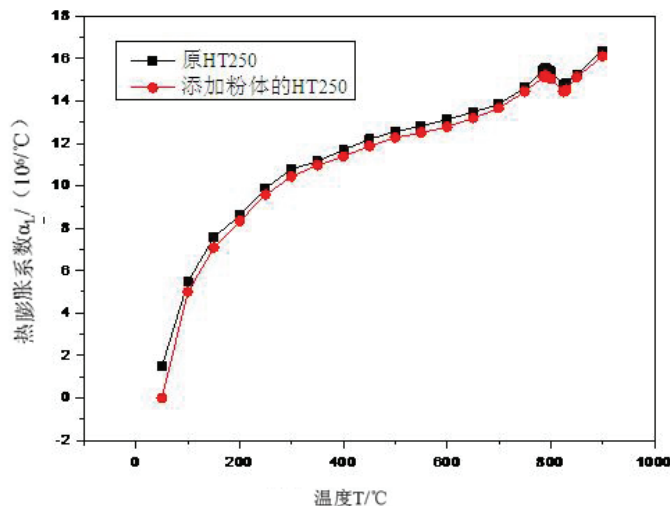


图4 添加0.1%纳米陶瓷粉体对 HT250 热膨胀系数的影响

2.4 热疲劳性能

热疲劳性能是衡量材料可承受热负荷的能力, 其表达式为

$$Q \propto \frac{\lambda \sigma}{E \alpha_L} \quad (1)$$

式中: λ 为导热系数 (W/m·K); σ 为材料的强度 (MPa); E 为弹性模量 (GPa); α_L 为线膨胀系数 (1/K)。

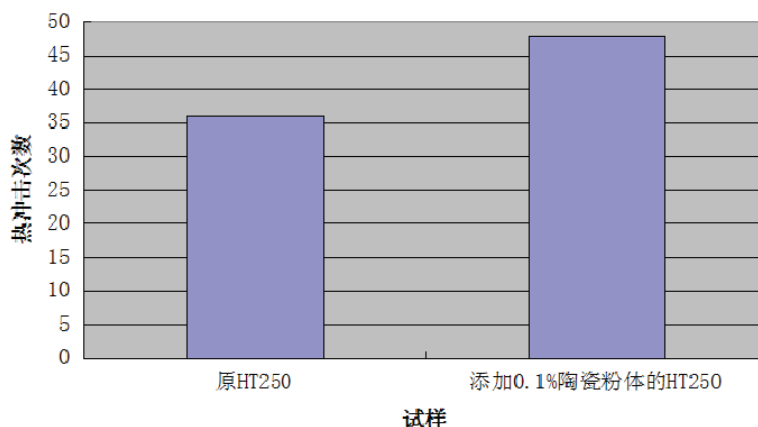


图5 添加0.1%纳米陶瓷粉体对HT250热疲劳性能的影响

在一般情况下,高导热系数、高强度、低弹性模量、低线膨胀系数的材料,其热疲劳的能力越高^[8]。

由图5可知,HT250在添加0.1%纳米陶瓷粉体后热疲劳的性能提高17%。根据上述分析,添加0.1%纳米陶瓷粉体以后,HT250的导热系数下降、热膨胀系数下降,且热膨胀系数下降的幅度较大。从显微组织中看出,添加0.1%陶瓷粉体后石墨数量增多、分布均匀、端部钝化、长度减小,且基体中珠光体增多、连续性得到改善,这使得HT250的强度提高、弹性模量下降^[9];另外,石墨和基体的改变使得HT250在经过反复热冲击时裂纹源产生的几率降低,且裂纹扩展变得缓慢^[10-11]。经过对各因素的综合分析,可以认为添加0.1%纳米陶瓷粉体提高了HT250的热疲劳性能。

3 结论

(1) 纳米陶瓷粉体作为液态HT250的外来异质形核的核心,起到孕育作用,促进石墨化,使石墨变得细小且分布均匀,长度减小,对基体的割裂作用减弱;珠光体体积分数增加且得到细化,片间距减小,基体连续性得到改善。

(2) 添加0.1%纳米陶瓷粉体后,HT250的导热系数下降,平均下降4.6%。与未添加纳米陶瓷粉体的HT250相比,添加0.1%纳米陶瓷粉体后,热膨胀系数下降,平均下降8.6%。

(3) 添加0.1%纳米陶瓷粉体后,HT250的热疲劳性能明显提高17%。

参考文献:

- [1] 赵群宪,王光见,孙志瑞,等.灰铸铁发动机缸体常见铸造缺陷及解决措施[J].现代铸铁,2014,(01):44-46.
- [2] 刘君武,丁厚福,郑治祥.SiCp/Fe 复合材料断口分析[J].理化检验—物理分册,2003,39(04):184-187.
- [3] 樊振军,汪翔,刘君武,等.SiC 颗粒对烧结铁基复合材料性能的影响[J].合肥工业大学学报,2001,24(06):1079-1082.
- [4] 朱正吼,陈其善.铸造 SiC/钢基复合材料中粒子分布特点[J].热加工工艺,1995,(02):8-9.
- [5] 杨军,高宏,翟玉春.用改性纳米 SiC 粉体强化灰铸铁性能的研究[J].现代铸铁,2009,(03):28-30.
- [6] 郭广文,马惠霞,张健.铸铁的热物性测定及其与显微组织的关系[J].理化检验—物理分册,2005,41:13-16.
- [7] 黄小全,杨相寿.SG 变质剂提高灰铸铁的热物理性能[J].铸造,1991,(12):13-17.
- [8] 朱洪波,闫永生,孙小亮,华勤,翟启杰.Nb 对灰铸铁热疲劳性能的影响[J].现代铸铁,2011,(2).
- [9] 曲泽茂,原晓雷.提高灰铸铁弹性模量的研究[J].现代铸铁,2013,(4).
- [10] 孙小捞,贾利晓,温广宇,等.石墨形态对铸铁热疲劳性能的影响[J].中国铸造装备与技术,2006,(04):13-15.
- [11] 陈飞帆,卢德宏,蒋业华,等.石墨形态对铸铁热疲劳性能影响的研究[J].铸造技术,2010,31(12):1576-1579.