DOI: 10.3901/JME.2015.20.128

球化孕育处理工艺对下贝氏体铸铁组织特性及力学性能的影响

孙 挺¹ 宋仁伯¹ 李亚萍¹ 杨富强¹ 吴春京¹ 王知颖²

(1. 北京科技大学材料科学与工程学院 北京 100083;

2. 北京钢研高纳科技股份有限公司 北京 100094)

摘要: 采用真空中频感应炉, 通过改变球化孕育处理工艺获得具有不同形态石墨的铸造试样, 将铸件加热到 860 °C 保温 2 h, 使用 20 °C 的硝酸钠、亚硝酸钠饱和溶液将其连续冷却至室温, 并在 250 °C 低温回火 2 h 后空冷, 获得具有不同形态石墨的下贝氏体基体组织。研究了球化孕育处理工艺对石墨球化效果的影响, 以及石墨形态对热处理显微组织和力学性能的影响。结果表明: 球化处理温度及时间对铸铁中的镁吸收率有显著影响, 超过 1 500 °C 时, 镁烧损加剧, 当球化处理温度为 1 450 °C, 镁吸收率达到 64.2%; 孕育剂添加工艺也是影响铸铁中石墨的形态和分布的重要因素, 当一次孕育和二次孕育添加量分别为 0.8% 和 1.2% 时, 石墨的形态以球状为主, 尺寸细小且分布均匀, 石墨的球化率为 93%, 球化级别达到 2 级, 尺寸级别为 9 级; 另外, 均匀分布的球状石墨有利于提高热处理后下贝氏体铸铁的综合力学性能。

关键词: 球化孕育处理; 石墨形态; 连续冷却; 下贝氏体; 力学性能

中图分类号: TG143

Influence of Nodularizing and Inoculation Treatment on the Microstructure Characteristic and Mechanical Property of Lower Bainite Cast Iron

SUN Ting¹ SONG Renbo¹ LI Yaping¹ YANG Fuqiang¹ WU Chunjing¹ WANG Zhiying²

(1. School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083;

2. Beijing CISRI-GAONA Materials & Technology Co., Ltd., Beijing 100094)

Abstract: Casting samples contained different forms of graphite are obtained by different nodularizing and inoculation treatments in vacuum mid-frequency induction furnace. The lower bainite cast irons are prepared after continuous cooling in nitrate and nitrite mixed media and tempering at 250 °C for 2 h. The influence of nodularizing and inoculation treatment on spheroidization effect is confirmed. The relationships between microstructure characteristic, mechanical property and graphite forms are investigated. Results show that : The temperature and time of spheroidizing treatment have a significant effect on the absorptivity of Mg, the evaporation loss of Mg is intensified as the temperature exceeds 1 500 °C, and the absorptivity of Mg reaches up to 64.2% as spheroidizing treatment temperature of 1 450 °C is used; Meanwhile, there is also obvious influence of inoculation treatment on the form and distribution of graphite, as the addition of post inoculation increases up to 1.2%, the graphite is spheroidized adequately. The spheroidization rate of graphite is 93%, and the grain size reaches up to grade 9; In addition, the comprehensive mechanical property of lower bainite cast iron after heat treatment is improved for the small size and uniform distribution of spheroidal graphite.

Key words: nodularizing and inoculation treatment; graphite morphology; continuous cooling; lower bainite; mechanical property

0 前言

我国一直以来是铸造大国, 铸铁年产量占全世界的 40%, 高居世界榜首^[1]。2013 年我国的铸铁件产量达到 3 810 万 t, 其中球墨铸铁占了 30%。球墨铸铁是 20 世纪 50 年代发展起来的一种高强度铸铁

材料, 其综合性能接近于钢。正是基于其优异的性能, 球墨铸铁已成功地用于制造一些受力复杂, 强度、韧性、耐磨性要求较高的零件。目前, 这些球墨铸铁件已经广泛地应用于普通机械、核能、风电、超临界燃气轮机、重型机床、加工中心、高速列车等领域^[2-4]。近年来, 学者针对球墨铸铁做了大量的科研工作, 尤其是力学性能更为优异的下贝氏体球墨铸铁。魏德强等^[5]通过等温淬火得到了性能优良的下贝氏体+马氏体+残留奥氏体组织, 并且认为贝

氏体-马氏体组织中存在的残留奥氏体对磨球的力学性能有着较大的提高。李先芬等^[6]对传统的等温淬火工艺进行了改进,通过两步法等温淬火工艺得到了微观组织更细化、硬度较高、韧性较好的磨球。徐杨等^[7]通过对球铁进行微合金化,采用分级等温淬火工艺,并用金属型铸造代替传统砂型铸造生产抗磨贝氏体球铁,结果表明其性能也较传统工艺下的贝氏体球墨铸铁有较大的改善。可见,目前针对下贝氏体球墨铸铁的热处理工艺及其对组织性能影响已经有了较为深入的研究,但对于铸造原始组织形态对热处理组织的影响还未曾有过较为深入的研究。本试验采用不同的球化孕育工艺获得不同形态的原始铸造组织,测定其石墨的球化率及球化级别,计算各自的镁残余量,研究了球化孕育处理工艺对

镁吸收率的影响;并且研究组织遗传性对下贝氏体球墨铸铁的组织特性及力学性能的影响。

1 试验材料及过程

本试验采用 ZG-0.01 型真空中频感应炉进行熔炼,原铁液的熔炼温度为 1 550 ℃,采用注入法加入总量为 2.2% 的 QRMg8RE3 球化剂,孕育剂为 FeSi72,孕育处理分为单次孕育法和两次孕育法,包内球化孕育处理的温度分别为 1 550 ℃、1 500 ℃、1 450 ℃,浇注温度为 1 400 ℃,具体铸造工艺如表 1 所示。为细化铸态组织的原始晶粒,将金属铸型覆盖在 NaOH 和 KOH 混合物中,从而适当加快铸铁的冷却速度,优化磨球的组织遗传基因^[8]。

表 1 下贝氏体球墨铸铁的铸造工艺

试样编号	熔炼温度/℃	球化孕育温度/℃	球化时间/s	球化剂质量分数(%)	一次孕育剂质量分数(%)	二次孕育剂质量分数(%)
A	1 550	1 550	120	2.2	2.0	0
B	1 550	1 550	90	2.2	1.6	0.4
C	1 550	1 500	90	2.2	1.2	0.8
D	1 550	1 450	90	2.2	0.8	1.2

采用化学检测方法测定四组试样的化学成分,并根据式(1)^[9]计算各自的镁吸收率。对四组试样的铸态显微组织进行观察分析,应用 Image-Tool 图像处理软件,结合多点随机抽样的方式对铸态球墨铸铁未侵蚀的低倍组织进行分析,计算各组球墨铸铁中石墨的球化率、球化级数和晶粒级别。

$$A = \frac{w_{\text{Mg1}}}{Q \times w_{\text{Mg2}}} \quad (1)$$

式中, A 为镁的吸收率; w_{Mg1} 为铁液中的残余镁质量分数; w_{Mg2} 为球化剂的镁质量分数; Q 为球化剂加入量。

然后,将铸件加热到 860 ℃保温 2 h,使用 20 ℃的硝酸钠、亚硝酸钠饱和溶液使试样以较快的前段冷速,较慢的中后段冷速的连续冷却方式,获得下贝氏体和残余奥氏体基体^[10],最后进行 250 ℃低温回火 2 h 后空冷,热处理工艺如图 1 所示。热处理态球墨铸铁的微观形貌、宏观硬度、冲击韧度、断口形貌以及物相分析分别在 Leica DMR 金相显微镜、HSRU-45 型光学表面洛氏硬度计、摆锤冲击试验机、Zeiss EVO18 型扫描电子显微镜中进行。

2 试验结果及分析

2.1 球化温度对 Mg 吸收率的影响

为了研究球化孕育工艺对下贝氏体球墨铸铁组织性能的影响,试验设计中, C、Si、Mn、Mo、

图 1 下贝氏体球墨铸铁热处理工艺

Fe 等主要元素的质量分数以及球化剂和孕育剂的总添加量均设定为不变量,球化孕育处理的温度以及一次孕育剂和二次孕育剂分配比例作为变量。表 2 为四组试样的化学组成成分,可见,四组试样的化学成分的主要差别在于镁和稀土 Re 元素的残余量。其主要原因在于镁是一种低沸点金属(沸点为 1 108 ℃),在高温的条件下极易发生汽化,熔炼的温度越高,其汽化越剧烈,导致残余量就减少,而镁残余量的多少往往对球墨铸铁中石墨球化效果起着至关重要的作用;本试验中所采用的球化剂含镁的质量分数为 8%,属于中低镁球化剂,这使得球化孕育处理的温度控制变得尤其重要。试样 A 和 B 的球化孕育处理温度均为 1 550 ℃,但是由于 A 组试样的球化时间为 120 s, B 组织试样的球化时间为 90 s,导致 A 组试样中的镁残余量明显较 B 组试样

中少,其主要原因在于镁在高温下的汽化和烧损;而试样 C 和 D 的球化孕育分别为 1 500 °C 和 1 450 °C,球化时间均为 90 s,因此试样 C、D 中的镁残余量明显较多。图 2 所示为镁吸收率随球化孕育处理温度的变化规律,可见较低的处理温度有利于提高镁吸收率。不过考虑到试验所用的球墨铸铁中含

硅量较高(4.7%左右),铁液的熔点较高(约为 1 380 °C)^[11],同时在球化过程中铁液会继续降温,本试验中铁液的球化温度不能低于 1 450 °C。综合分析可得,在 1 450 °C 时进行球化孕育处理使得球墨铸铁的 Mg 吸收率最佳,可达到 64.2%。

表 2 四组球墨铸铁试样的化学成分(质量分数)

%

试样编号	C	Si	Mn	P	S	Mg _l	Re	Mo	Fe
A	3.5	4.6	3.2	<0.1	<0.04	0.025	0.045	0.015	余量
B	3.5	4.7	3.2	<0.1	<0.04	0.060	0.047	0.014	余量
C	3.5	4.7	3.1	<0.1	<0.04	0.095	0.055	0.014	余量
D	3.5	4.8	3.2	<0.1	<0.04	0.115	0.064	0.015	余量

图 2 不同球化孕育处理温度下的 Mg 吸收率

2.2 球化孕育工艺对铸态组织的影响

图 3 所示为各组试样的铸态显微组织形貌,其中颜色最深的是石墨,围绕着石墨周围的光亮的圆环是铁素体。从图 3 中可以看出,石墨周围的铁素体环的厚度较大,其主要原因为本试验材料中含有较高的硅元素(约 4.7%),硅是强铁素体形成元素,同时也有助于形成石墨。在铁素体周围的灰色组织为对珠光体。另外,不难发现,试验中各组试样的碳元素均已石墨化,但是石墨的形态差异较大,在 1 550 °C 球化处理 120 s 的 A 组试样中,出现了大量的不规则的条带状或块状石墨,其主要原因是在高温铁液中球化时间过长,球化反应十分剧烈,镁的汽化加剧,镁的吸收率低,使得残留的球化元素低于球墨铸铁所要求的数量,如图 3a 所示。B 组试样的球化时间相对 A 组试样较短,所以并未出现亚球化组织,但是由于 1 550 °C 的铁液温度相对过高,球化剂和孕育剂的同时加入使得铁液中出现尺寸较小的石墨,由于缺乏新的石墨形核质点,原始的石墨会继续长大而形成直径较大的球状石墨,在铁液中生长快且不稳定,高温条件下易破裂,形成开花状石墨^[12-13]。因此不难理解过高的球化温度、过低的出炉温度、长时间孕育都将促进开花状石墨的形

成。如图 3b 所示。对于 C、D 两组试样而言,球化温度相对较低,球化时间适中,所以并未出现不规则的石墨和开花状石墨,其石墨圆度较高,尺寸相对较小,如图 3c、3d 所示。

采用 Image-Tool 图像处理软件,结合体视学中的多点随机抽样的方式对 C、D 两组未侵蚀的低倍

(a) A 组试样

(b) B 组试样

(c) C 组试样

(d) D 组试样

图 3 不同球化处理温度下球墨铸铁的铸态显微组织

组织进行分析^[14]。结果表明: C 组球墨铸铁试样的球化率为 91%, 球化级数为 2 级; D 组球墨铸铁试样的球化率为 93%; 球化级别为 2 级。对比发现, D 组试样中球状石墨的尺寸更为细小, 分布更为均匀, 石墨球平均直径为 $17.3 \mu\text{m}$, 球墨尺寸级别达到 9 级, 这将更加有利于热处理后的力学性能。C、D 两组试样优异的球化效果除了得益于相对较低的球化温度和适中的球化时间外, 更重要的还有两次孕育剂添加比例的设计, B 组试样球化处理的同时加入 1.6% 的一次孕育剂, 虽然起到了对石墨的孕育效果, 但是由于二次孕育量相对较少, 铁液中只有少量新的球墨形核质点, 导致原始的石墨球继续长大, 最后致使开花状石墨的出现, 如图 4 所示; 而 D 组试样的二次孕育剂添加比例相对较大, 在包内一次孕育提供适量的球墨形核质点后, 浇注时进行二次孕育, 进而提供更多的形核质点, 这就减缓了原始石墨球的长大, 并且增加了新生的球状石墨, 这种处理方法明显提高了石墨的球化级别、晶粒级别和均匀度。

2.3 石墨形态对热处理组织及性能的影响

图 5 为四组试验试样的常温冲击韧性(无缺口试样尺寸为 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 55 \text{ mm}$)和宏观硬度的对比, 不难发现, 四组试样的综合力学性能均较传统的铸铁有显著的提升, 尤其是常温冲击韧性, 这是因为在相同热处理工艺下, 四组试样的基体组织均为石墨+下贝氏体+残余奥氏体。研究表明: 当碳质量分数较高时, 下贝氏体在奥氏体/石墨晶界或奥氏体晶内形核并长大, 同时在贝氏体/奥氏体相界面上析出碳化物, 将贝氏体片分割成许多细小的亚单元, 从而形成竹叶状下贝氏体^[15]。碳化物对下贝氏体的分割作用使得下贝氏体成为强度和硬度均较高的强韧相, 以强韧相(下贝氏体)包围石墨, 基体组织为下贝氏体-残余奥氏体, 将有效抑制了石墨-基体界面的开裂及界面裂纹向基体的扩展, 而基体中以强相(下贝氏体组织)提高强度, 以韧相(残余奥氏体)提高韧性, 从而提高了球墨铸铁的强韧性^[16-17]。不

(b) D 组试样的球状石墨

图 4 未侵蚀的石墨形态

过相比之下, C、D 两组试样的力学性能都明显优于 A、B 两组试样。其中 D 组试样的冲击韧性为 $24.3 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$, 宏观硬度为 57.5 HRC, 比 A 组试样分别提高了 $9.7 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$ 和 2.3 HRC。这主要归因于四组试样中石墨形态、尺寸及分布的差异。另外有研究表明^[18-19]: 铸铁的综合力学性能与石墨的数量密切相关。

图 5 各组试样的冲击韧度和宏观硬度

从微观力学行为角度来讲, 不同形态的石墨会显著影响铸铁的力学性能。图 6a 为 A 组试样的热处理显微组织, 其内部的石墨形态以不规则状为主, 不规则形状的石墨对基体的割裂严重, 在石墨尖角处易造成应力集中, 使得材料的韧性降低^[20]; B 组试样(图 6b)显微组织中的石墨多为开花状石墨, 其致密度低, 尺寸较大, 并且分布十分不均匀, 这将降低材料整体的组织均匀性, 从而对材料的力学性能带来不利影响^[21]。如图 7a、7b 所示, A、B 组试样的冲击断口为脆性断口, 几乎没有断裂韧窝; 由

图 7c、7d 可见 C、D 两组试样的冲击断口处有少量韧窝，这是因为试样中的石墨均为球状石墨，其外形规整、圆润，对金属的分割和应力集中小，与金属基体的咬合情况较好，研究发现，材料内部细小的球状石墨与基体之间有一定的疲劳强度，而并非是通常所认为的毫无结合力的空洞^[22]。因此，在材料断裂时能够吸收可观的冲击能量，有利于提高材料的冲击韧度。

(a) A 组试样

(b) B 组试样

(c) C 组试样

(d) D 组试样

图 6 热处理态显微组织

(a) A 组试样

(b) B 组试样

(c) C 组试样

(d) D 组试样

图 7 冲击断口显微形貌

从石墨形态对局部组织影响的角度来讲，石墨与原始奥氏体界面是下贝氏体转变形核的主要位置，研究表明^[23]：贝氏体转变是以石墨球边界及石墨附近基体中奥氏体晶界为优先形核处；也有学者发现^[24]：球墨铸铁中石墨的周围以贝氏体为主，远离石墨在晶界附近分布少量奥氏体及马氏体，当贝氏体分布在石墨周围，贝氏体的体积分数在相当广泛的范围内，不但提高了球墨铸铁的强度，而且显著地提高了冲击韧度。因此在下贝氏体铸铁中，石

墨的形态及分布均对铸铁的显微组织特性和力学性能有影响。石墨的形态越圆润、分布越均匀, 在其周围形核的下贝氏体数量就越多, 尺寸小而均匀; 同时被下贝氏体包围的残余奥氏体分布也更加均匀。另外, 在材料服役过程中, 随着塑型变量的增大, 伴随着残留奥氏体向马氏体相转变^[25-26], 在此过程中处在贝氏体附近的残留奥氏体能够连续吸收来自周边贝氏体, 降低贝氏体内部的平均位错密度^[27]。这使得贝氏体和残留奥氏体之间形成较高的塑性变形协调能力, 从而进一步提高材料的综合力学性能。

3 结论

(1) 球化处理温度及时间对铸铁中镁吸收率有显著影响, 超过 1 450 °C, 镁的汽化烧损严重, 本试验中最佳的球化处理温度为 1 450 °C, 镁吸收率达到 64.2%。

(2) 石墨形态及分布与孕育剂添加工艺密切相关, 采用 0.8% 一次孕育剂和 1.2% 二次孕育剂的添加方案所获得的石墨形态以球状为主, 尺寸细小且分布均匀; 石墨的球化率为 93%, 球化级别达到 2 级, 石墨的尺寸为 9 级。

(3) 均匀分布的球状石墨有利于提高热处理后下贝氏体铸铁的综合力学性能, 原因有以下两点: 一是细小、圆润形态对金属的分割和应力集中很小, 与金属基体的咬合情况较好, 有一定的结合强度; 二是贝氏体转变以石墨球与奥氏体的界面为优先形核位置。尺寸细小、分布均匀的球状石墨有助于提高下贝氏体和残余奥氏体分布的均匀性, 使下贝氏体球墨铸铁具有优异的塑性变形协调能力。

参 考 文 献

- [1] 李克锐, 曾艺成, 张忠仇, 等. 我国铸铁生产技术回顾与展望[J]. 铸造, 2012(2): 121-135.
- [2] LABRECQUE C, GAGNE M. Review ductile iron: Fifty years of continuous development[J]. Canadian Metallurgical Quarterly, 1998, 37(5): 343-378.
- [3] SHEIKH M A. Production of carbide-free thin ductile iron castings[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, Mineral, Metallurgy, Material, 2008, 15(5): 552-555.
- [4] LAINO S, SIKORA J A, DOMMARCO R C. Development of wear resistant carbide austempered ductile iron (CADI)[J]. Wear, 2008, 265(1-2): 1-7.
- [5] 魏德强, 薛兴, 恽志东. 低合金贝氏体球墨铸铁磨球热处理工艺参数的确定[J]. 机械工程材料, 2006, 30(7): 59-62.
- [6] 李先芬, 余瑾, 刘兰俊, 等. 两步法等温淬火工艺对等温淬火球铁组织和性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2008, 29(2): 82-85.
- [7] LI Xianfen, YU Jin, LIU Lanjun, et al. Effect of two-step austempering process on microstructure and properties of austempered ductile iron[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2008, 29(2): 82-85.
- [8] 徐杨, 施焕儒, 简建明, 等. 抗磨贝氏体球墨铸铁的研究与应用[J]. 材料热处理学报, 2008, 29(4): 131-134.
- [9] XU Yang, SHI Huanru, JIAN Jianming, et al. Research and application of wear-resistant milling balls of bainite ductile iron[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2008, 29(4): 131-134.
- [10] 孙挺, 宋仁伯, 王旭, 等. 具有性能梯度特性的贝-马-奥球墨铸铁磨球的制备工艺[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(5): 148-153.
- [11] SUN Ting, SONG Renbo, WANG Xu, et al. Preparation technology of function gradient bainite-martensite-austenite ductile cast iron grinding ball[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2014, 35(5): 148-153.
- [12] 郭振廷, 孙雅心, 李蒙. 球化剂含镁量对镁吸收率的影响[J]. 铸造, 2006, 55(6): 623-625.
- [13] GUO Zhenting, SUN Yaxin, LI Meng. Effect of Mg content in nodulizer on the absorptivity of Mg[J]. Foundry, 2006, 55(6): 623-625.
- [14] SUN Ting, SONG Renbo, WANG Xu, et al. Microstructure and phase transformation of wear resistant ductile iron grinding balls by continuous cooling process[J]. Materials Science and Engineering: A, 2015, 626: 375-381.
- [15] 华帅. 原料生铁对球墨铸铁的遗传性影响[J]. 热加工工艺, 2009, 38(7): 38-42.
- [16] HUA Shuai. Influence of pig iron on heredity of nodular cast iron[J]. Hot Working Technology, 2009, 38(7): 38-42.
- [17] 方克明, 白元强. 铸铁中开花状石墨的微观结构[J]. 北京科技大学学报, 1998, 20(2): 152-154.

- FANG Keming, BAI Yuanqiang. Microstructure of the exploded graphites in cast iron[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 1998, 20(2): 152-154.
- [13] 魏家鹏, 潘宏歌. 球墨铸铁石墨开花问题的分析与处理[J]. 热加工工艺, 2009, 38(23): 95-96.
- WEI Jiapeng, PAN Hongge. Analysis and processing of graphite blooming of ductile iron[J]. Hot Working Technology, 2009, 38(23): 95-96.
- [14] 刘国权, 王浩, 肖翔, 等. 经典电视学: 基本功能、独特应用与标准化应用[J]. 中国电视学与图像分析, 2012, 17(4): 293-300.
- LIU Guoquan, WANG Hao, XIAO Xiang, et al. Classical stereology: Basic capabilities, state-of-art applications and standardization[J]. Chinese Journal of Stereology and Image Analysis, 2012, 17(4): 293-300.
- [15] 俞德刚, 朱钰如, 陈大军, 等. Fe-C 合金贝氏体铁素体的相变基元与类马氏体形貌贝氏体的形成[J]. 金属学报, 1994, 30(9): 385-393.
- YU Degang, ZHU Yuru, CHEN Dajun, et al. Bainitic transformation units and formation of martensite-like bainite in Fe-C alloys[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1994, 30(9): 385-393.
- [16] WANG Y, ZHANG K, GUO Z, et al. A new effect of retained austenite on ductility enhancement in high strength bainitic steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, 552(30): 288-294.
- [17] 刘东雨, 方鸿生, 白秉哲, 等. 无碳化物贝氏体/马氏体复相钢的强韧性[J]. 机械工程学报, 2003, 39(8): 27-31.
- LIU Dongyu, FANG Hongsheng, BAI Bingzhe, et al. Strength and toughness of a carbide free bainite-martensite steel[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(8): 27-31.
- [18] ABEDI H R, FAREGHI A, SAGHAFIAN H, et al. Sliding wear behavior of a ferritic-pearlitic ductile cast iron with different nodule count[J]. Wear, 2010, 268(3-4): 622-628.
- [19] AKHLAGHI F, ZARE-BIDAKI A. Influence of graphite content on the dry sliding and oil impregnated sliding wear behavior of Al 2024-graphite composites produced by in situ powder metallurgy method[J]. Wear, 2009, 266(1-2): 37-45.
- [20] 侯起飞, 杨娟, 王刘利, 等. 石墨形态和氧化夹杂对灰铸铁力学性能的影响[J]. 铸造技术, 2010, 31(3): 302-304.
- HOU Qifei, YANG Juan, WANG Liuli, et al. Effect of graphite morphology and oxide inclusion on mechanical properties of gray cast iron[J]. Foundry Technology, 2010, 31(3): 302-304.
- [21] 魏传颖, 钱进, 王劲松. 球墨铸铁开花状石墨的防止[J]. 现代铸铁, 2010, 30(3): 79-81.
- WEI Chuanying, QIAN Jin, WANG Jinsong. Prevention of exploded graphite of nodular iron[J]. Modern Cast Iron, 2010, 30(3): 79-81.
- [22] 吴维青. 奥氏体-贝氏体球墨铸铁中石墨与基体界面的疲劳强度[J]. 钢铁研究学报, 2004, 16(5): 56-58.
- WU Weiqing. Fatigue strength of graphite-matrix interface in austempered ductile iron[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2004, 16(5): 56-58.
- [23] 刘宗昌, 袁长军, 计云萍, 等. 贝氏体铁素体的形核[J]. 材料热处理学报, 2011, 32(10): 74-79.
- LIU Zongchang, YUAN Changjun, JI Yunping, et al. Study on nucleation of bainite ferrite[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2011, 32(10): 74-79.
- [24] ZHOU R, JIANG Y, LU D, et al. Development and characterization of a wear resistant bainite/martensite ductile iron by combination of alloying and a controlled cooling heat-treatment[J]. Wear, 2001, 250(1-12): 529-534.
- [25] SUN Ting, SONG Renbo, YANG Fuqiang, et al. Wear behavior of bainite ductile cast iron under impact load[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 2014, 21(9): 871-877.
- [26] 吴化, 姜颖, 尤申申, 等. 超级贝氏体组织中残余奥氏体的 TRIP 效应研究[J]. 机械工程学报, 2014, 50(22): 69-75.
- WU Hua, JIANG Ying, YOU Shenshen, et al. Study on TRIP effect of retained austenite in super-bainite microstructure[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(22): 69-75.
- [27] LAMBERS H G, CANADINC D, MAIER H J. Evolution of transformation plasticity in austenite-to-bainite phase transformation: A multi parameter problem[J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, 541: 73-80.
-
- 作者简介: 孙挺, 男, 1986 年出生, 博士研究生。主要研究方向为材料加工工艺及组织性能控制。
E-mail: suntingsj@163.com
- 宋仁伯(通信作者), 男, 1970 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为材料加工工艺及组织性能控制。
E-mail: songrb@mater.ustb.edu.cn