

• 试验研究 Experimental Research •

DOI: 10.16410/j.issn1000-8365.2021.06.001

# 纳米 TiC-TiB<sub>2</sub> 颗粒对球墨铸铁铸态组织和力学性能的影响

王丙旭<sup>1</sup>, 胡子瑞<sup>1</sup>, 邱丰<sup>2</sup>, 胡明<sup>1</sup>, 崔威威<sup>1</sup>, 杨金林<sup>1</sup>, 张宇<sup>1</sup>

(1. 浙江理工大学机械与自动控制学院, 浙江 杭州 310018; 2. 吉林大学材料科学与工程学院, 吉林 长春 130022)

**摘要:** 使用含有预制内生纳米 TiC-TiB<sub>2</sub> 颗粒的铝基中间合金制备新型球墨铸铁, 研究了双相纳米颗粒对球墨铸铁铸态组织和力学性能的影响。结果表明, 纳米颗粒加入后, 铸态组织中石墨球的球化率提高 15.9%, 平均直径减小 35.8%, 单位面积内数量增加 66.3%。基体组织中, 铁素体含量上升, 珠光体层片结构得到明显细化。力学性能测试中, 纳米颗粒增强球墨铸铁的硬度未发生明显变化, 屈服强度提升 5.2%, 拉伸强度提升 3%, 伸长率提升 32.1%, 冲击韧度提升 50.4%。断口形貌分析中, 发现纳米颗粒的加入能够促进塑性形变, 带有河流状花纹的解理平面消失, 石墨球周围出现大量撕裂棱和微小韧窝, 断裂机制由脆性断裂转变为韧性断裂。

**关键词:** 纳米 TiC-TiB<sub>2</sub> 颗粒; 球墨铸铁; 铸态组织; 力学性能; 细化机制

中图分类号: TG143.5; TG113

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2021)06-0439-07

## Effects of TiC-TiB<sub>2</sub> Nanoparticles on Microstructure and Mechanical Properties of As-cast Graphite Ductile Irons

WANG Bingxu<sup>1</sup>, HU Zirui<sup>1</sup>, QIU Feng<sup>2</sup>, HU Ming<sup>1</sup>, CUI Weiwei<sup>1</sup>, YANG Jinlin<sup>1</sup>, ZHANG Yu<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

**Abstract:** A new type of ductile cast iron was prepared by aluminum base master alloy containing prefabricated endogenous nano-TiC-TiB<sub>2</sub> particles. The effect of dual-phase nano-particles on the as-cast microstructure and mechanical properties of ductile cast iron was studied. The results show that with the addition of nanoparticles, the spheroidization rate of graphite spheres in the as-cast microstructure increases by 15.9%, the average diameter decreases by 35.8%, and the number of graphite spheres per unit area increases by 66.3%. In the matrix, the content of ferrite increases, and the lamellar structure of pearlite is obviously refined. In the test of mechanical properties, the hardness of ductile cast iron reinforced by nanoparticles has no obvious change. The yield strength, tensile strength, elongation and impact toughness of ductile cast iron are increased by 5.2%, 3%, 32.1% and 50.4%, respectively. In the fracture morphology analysis, it is found that the addition of nanoparticles could promote the plastic deformation, the cleavage plane with river pattern disappeared, and a large number of tearing edges and tiny dimples appeared around the graphite spheres. The fracture mechanism change from brittle fracture to ductile fracture.

**Key words:** TiC-TiB<sub>2</sub> nanoparticles; graphite ductile iron; as-cast microstructure; mechanical properties; refining mechanisms

球墨铸铁因其优异的力学性能被广泛应用于汽车、农机、船舶和基础设施建设等行业<sup>[1-6]</sup>。随着相关领域的飞速发展, 高性能机械零部件的研发急需高强韧性的球墨铸铁作为支撑。目前, 除了合金强化、热处理强化和析出强化等传统的钢铁材料强韧

化方法以外, 通过纳米颗粒调控金属材料组织为提升球墨铸铁的力学性能提供了一个新方向<sup>[7-13]</sup>。

当前纳米颗粒调控组织技术主要应用于铝合金材料, 关于颗粒增强铸铁的研究工作很少有人开展。王金国<sup>[14]</sup>等通过向熔融铁液中加入经表面改性处理的 TiC 颗粒成功制备了新型球墨铸铁。实验结果表明, 少量 TiC 颗粒的加入能够增加单位面积内石墨球数量、减小石墨球直径并提高球化率, 同时基体组织中 铁素体含量上升, 晶粒得到细化; 力学性能方面, TiC 颗粒增强球墨铸铁的韧塑性在屈服强度和抗拉强度没有明显下降的情况下大幅度增加, 其伸

收稿日期: 2021-03-29

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目(LQ21E010007); 浙江省教育厅科研项目(20020058-Y)

作者简介: 王丙旭(1992—), 吉林长春人, 博士, 副教授。研究方向: 颗粒增强铁基材料、合金组织调控及强韧化、钢铁耐磨材料和 ADI 研究。电话: 15201225854,

Email: bingxuwang@zstu.edu.cn

长率提升 19.1%，室温冲击韧度提升 31.1%，低温冲击韧度提升 21.8%。Kaleicheva J [15] 等使用经 EFFTOM-NICKEL 表面改性处理的单相 TiN 颗粒和双相 TiN-TiCN(30%TiN+70%TiCN)颗粒制备增强球墨铸铁，发现单相和双相纳米颗粒均能明显减小石墨球尺寸，但对石墨球形貌未产生较大影响。在滑动磨损测试中，纳米颗粒增强球墨铸铁的耐磨性相较于空白样品提升 55%~69%。赵宇[16]等将表面改性纳米 SiO<sub>2</sub> 颗粒加入到熔融铁液中，球墨铸铁组织中石墨球球化率提升，单位面积内数量增加，平均尺寸减小。拉伸性能方面，纳米 SiO<sub>2</sub> 颗粒的添加实现了对球墨铸铁抗拉强度和延伸率的同步提高。

目前颗粒增强金属材料的制备方法可以分为外加法和内生法两种[17-22]。外加法是直接将陶瓷颗粒加入到金属熔体中，再通过机械搅拌或超声波振动的方式进一步提高陶瓷颗粒的分散程度。但是陶瓷颗粒具有较高的表面能，同时与金属熔体之间的比重差较大，上浮、团聚和偏聚是有待解决的难点问题，团聚和偏聚后的大尺寸颗粒团不仅会减弱陶瓷颗粒对金属材料力学性能的正向作用，甚至会产生负面影响。内生法是指外加元素能够通过熔盐制备法、自蔓延高温合成法或双熔体反应法等方法在金属基体中自然生成微米级或纳米级陶瓷颗粒[23-25]。相比于外加法而言，内生法能够有效提高熔体中陶瓷颗粒的分散程度，但是其最大弊端在于反应物过量和反应条件对金属材料组织和性能的有害影响。

为更好地解决纳米颗粒难加入和难分散等问题，本研究将外加法和内生法结合使用以制备含有预制内生纳米 TiC 和 TiB<sub>2</sub> 颗粒的铝基中间合金，再通过向铁液中加入中间合金实现对纳米颗粒的引

入，从而制备颗粒增强球墨铸铁，并在此基础上研究了双相纳米颗粒对球墨铸铁铸态组织、硬度、拉伸性能和冲击韧度的影响。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

#### 1.1.1 预制内生纳米 TiC-TiB<sub>2</sub> 颗粒铝基中间合金

本研究采用自蔓延燃烧合成法制备含有预制内生纳米 TiC-TiB<sub>2</sub> 颗粒的铝基中间合金，主要步骤如下：首先，将铝粉、钛粉和 B<sub>4</sub>C 粉按照 72:18:7 的质量比例放入高能球磨机活化 48 hr，球磨机转速设置为 50 r/min，正反转变换时间设置为 10 min；其次，用铝箔纸包覆已混合均匀的粉体并置于压模模腔中，利用小型液压机将其压制成圆柱形压块，液压力设置为 70 kN，所得压块直径为 28 mm，高度为 30 mm。然后，用石墨纸包覆粉体压块，放置于压坯烧结原位反应的石墨模具中，再一并放入 HVHP-II 高真空热爆-热压炉中，炉内抽至真空并保持压力低于 10 MPa，然后将炉内温度升至 500 °C，保温 10 min，继续升温至 900 °C，保温 10 min，之后对粉体压块施加 50 MPa 的轴向压力并保持 25 s。最后，关闭加热系统，保持炉内真空状态，使得粉体压块随炉冷却至室温。用于制备铝基中间合金的粉体原料的基本特性如表 1，制备过程如图 1(a)，铝基中间合金 XRD

表1 铝基中间合金制备原料基本特性

Tab. 1 Characteristics of raw materials utilized in the preparation of Al master alloy

粉体	粒径/μm	纯度(%)
Al	13	≥99.0
Ti	25	≥99.0
B <sub>4</sub> C	1.5	≥99.0

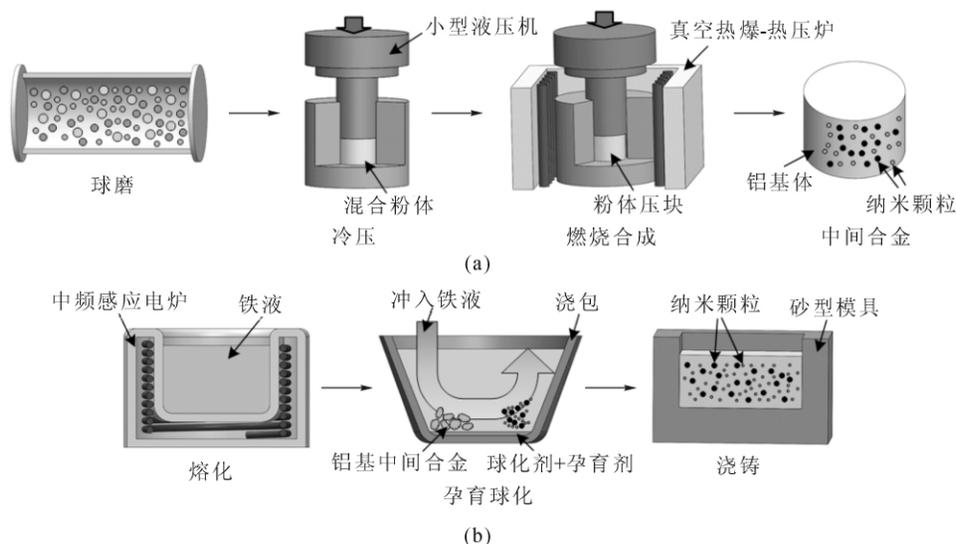


图 1 (a) 含有预制内生纳米颗粒的铝基中间合金制备过程 (b) 纳米颗粒增强球墨铸铁制备过程

Fig.1 (a)Preparation of Al master alloy containing nanoparticles (b)Preparation of nanoparticle reinforced ductile iron

分析和纳米颗粒 FESEM 和 TEM 形貌表征如图 2。

### 1.1.2 颗粒增强球墨铸铁

首先,使用 1 000 kg 中频感应电炉熔化铁液,熔炼温度为 1 530 ℃,升温过程中依次放入高纯生铁、硅铁和废钢。然后,对 500 kg 浇包进行预热处理,在包坑底部均匀覆盖 1.5%的稀土镁合金(球化剂)和 0.5%的 75 硅铁(孕育剂),并将破碎好的铝基中间合金堆覆在孕育剂上,采用冲入法将铁液浇入到试块砂型中,控制出水质量约为 333 kg。最后,待浇包内铁液液面平静后,将铁液浇入到砂型模具中,铁液自然冷却至室温。颗粒增强球墨铸铁的制备过程如图 1(b),化学成分分析如表 2。

### 1.2 微观组织观察

金相样品尺寸为 10 mm×10 mm×10 mm,依次使用 400、800、1 200 和 2 000 目砂纸预磨,再使用金刚石抛光剂进行抛光,随后使用 4%硝酸酒精腐

表2 球墨铸铁化学成分分析 w(%)

Tab.2 Chemical composition of graphite ductile irons

C	Si	Mn	P	S	RE	Mg
3.65	2.52	0.65	0.031	0.012	0.039	0.032
3.60	2.35	0.52	0.030	0.011	0.040	0.035

蚀样品表面,腐蚀时间为 7~10 s,然后使用无水乙醇冲洗并快速吹干。最后使用 VM3000I 倒置金相显微镜观察球铁样品铸态组织,如图 3 所示。组织中石墨球的球化率、尺寸、单位面积数量和铁素体与珠光体的相对含量均为多张图片的统计平均值。

### 1.3 布氏硬度测试

使用 XHB-3000 数显布氏硬度仪(如图 4)对球墨铸铁硬度进行测试。试验压力为 29.4 kN,保压时间为 10 s,测试温度为 18 ℃。每种球墨铸铁的硬度测试重复 3 次,并取平均值。

### 1.4 拉伸性能测试

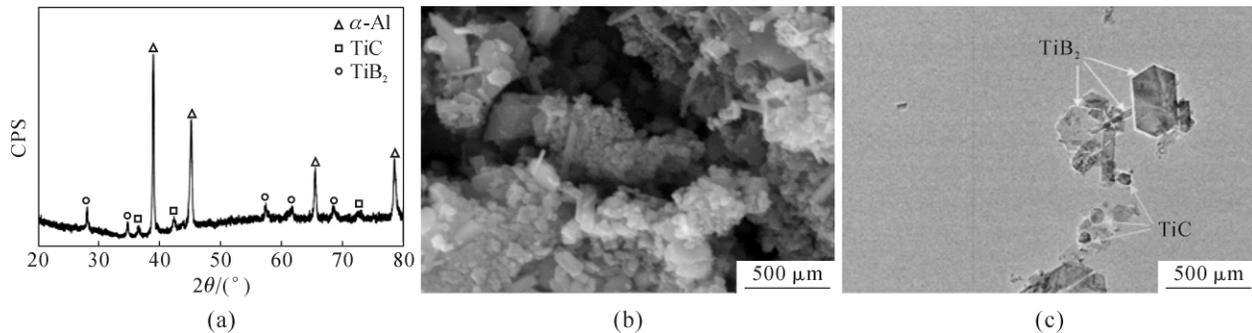


图 2 (a) 铝基中间合金 XRD 分析图谱 (b) 纳米 TiC-TiB<sub>2</sub> 颗粒 FESEM 形貌表征 (c) 纳米 TiC-TiB<sub>2</sub> 颗粒 TEM 形貌表征  
Fig.2 (a) XRD analysis on Al master alloy (b) FESEM analysis on morphology of TiC-TiB<sub>2</sub> nanoparticles (c) TEM analysis on morphology of TiC-TiB<sub>2</sub> nanoparticles

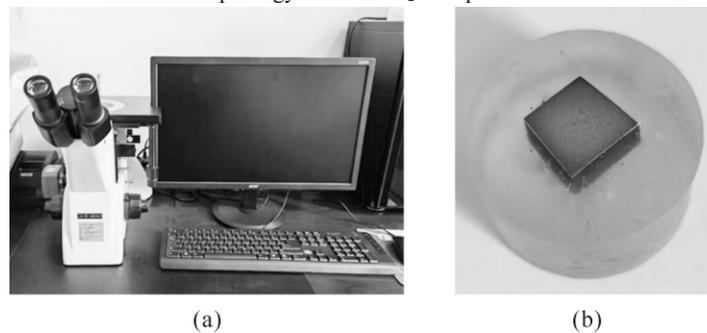


图 3 (a) VM3000I 倒置金相显微镜 (b) 球铁金相样品  
Fig.3 (a) VM3000I optical microscopy (b) Specimen coupons



图 4 XHB-3000 数显布氏硬度仪  
Fig.4 XHB-3000 Brinell hardness tester

使用 Instron-600DX 拉伸机测试球墨铸铁室温拉伸性能。拉伸试样尺寸如图 5。拉伸测试前先使用 1 200 目砂纸打磨试样表面,拉伸速度为 1 mm/min,测试温度为 18 ℃。每种球墨铸铁的拉伸测试重复 3 次,并取平均值。测试结束后,使用 SEM 观察拉伸断面形貌。

### 1.5 冲击性能测试

使用 PTM2752 摆锤式冲击试验机对球墨铸铁室温冲击韧性进行测试,测试依照 GB/T229-2011 标准进行。冲击测试采用 Charpy V 型缺口试样(如图

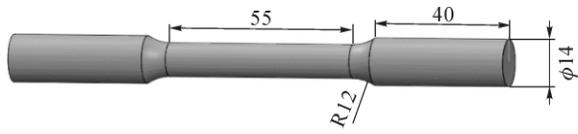


图 5 球铁拉伸试样尺寸  
Fig.5 Dimension of tensile test specimen

6)。冲击测试前,使用 1 200 目砂纸对试样表面进行打磨。测试温度为 18 °C。每种球墨铸铁的冲击测试重复 3 次,并取平均值。测试结束后,使用 SEM 观

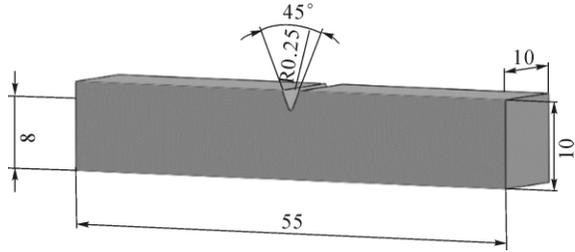


图 6 球铁冲击试样尺寸  
Fig.6 Dimension of Charpy test specimen

察冲击断口形貌。

## 2 试验结果及讨论

### 2.1 铸态组织

球铁铸态组织中石墨球形貌如图 7。未添加纳米颗粒的球铁组织中石墨球球化率为 70.1%, 平均直径为 38.9 μm, 单位面积内数量为 137 个。加入 0.01% 纳米 TiC-TiB<sub>2</sub> 颗粒后, 石墨球球化率提升为 81.2%, 平均直径减小至 25 μm, 单位面积内数量增加至 228 个。同时, 石墨球分布更加均匀。

铸态球铁基体组织的形貌如图 8 所示。基体组织包括铁素体和珠光体。添加纳米 TiC-TiB<sub>2</sub> 颗粒后, 大块的珠光体团簇明显减小, 组织中铁素体含量从 77.5% 增加至 81.7%, 珠光体含量从 22.5% 减少至 18.3%。通过 SEM 进一步观察珠光体层片结构 (如图 9 所示), 发现所加入的纳米颗粒不仅能够细化铁素体和渗碳体层, 也能使层片结构的方向性更

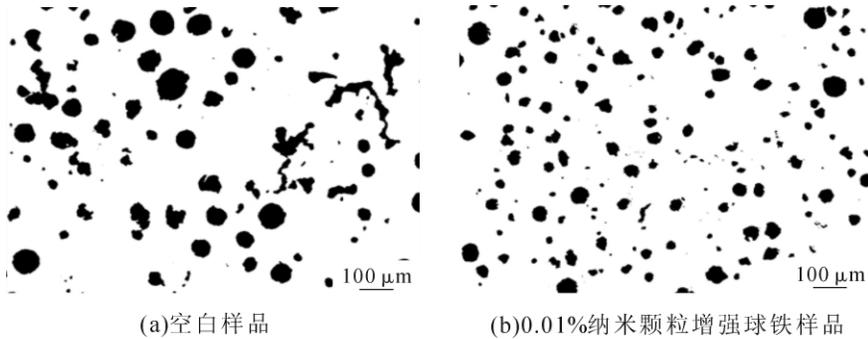


图 7 铸态球墨铸铁石墨球形貌  
Fig.7 Morphology of graphite nodules in the matrix of as-cast graphite ductile irons

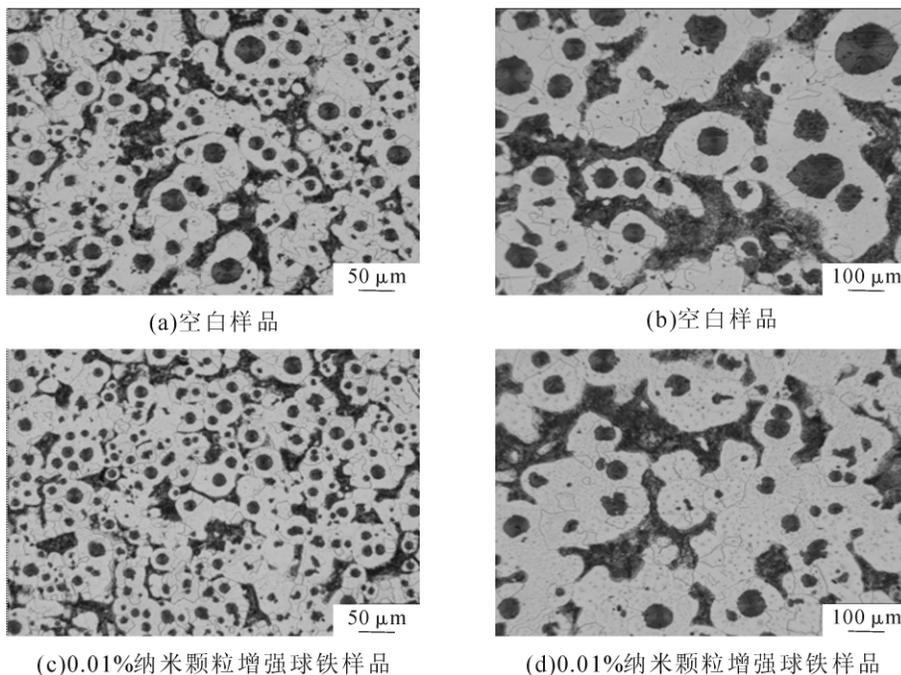


图 8 铸态球墨铸铁铁素体和珠光体组织形貌  
Fig.8 Morphology of ferrite and pearlite of as-cast graphite ductile irons

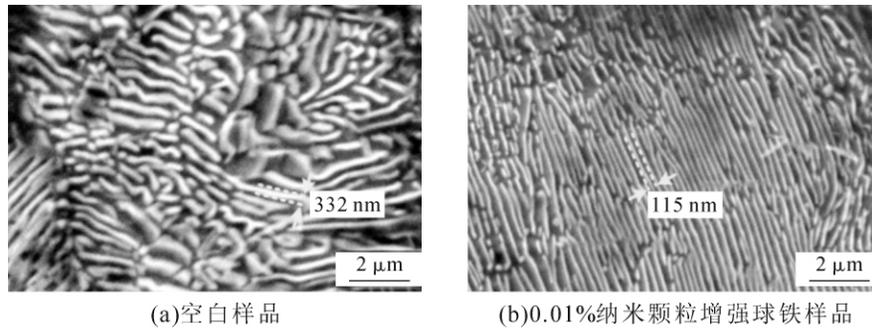


图 9 加入纳米颗粒和未加纳米颗粒铸态球铁珠光体组织比较

Fig.9 Comparison of pearlite for as cast ductile iron with and without addition of nanometer reinforced particles

为清晰。

球铁液固相变过程中,尺寸相对较大的 TiB<sub>2</sub> 纳米颗粒因其所需过冷度较小优先成为石墨球和奥氏体异质形核核心,从而提高形核效率。同时在较小的过冷度条件下,石墨球的生长速度缓慢,有利于形成尺寸较小且球化率较高的石墨球。奥氏体形成过程中,尺寸较小的 TiC 纳米颗粒被吸附在液固界面,阻碍液固界面推移,抑制奥氏体生长,对奥氏体起到细化作用。细化的初生奥氏体对铸态组织中珠光体层片结构有着正向作用,使铁素体和渗碳体片层变薄,方向性提高。细化机制如图 10 所示。

### 2.2 力学性能

纳米 TiC-TiB<sub>2</sub> 颗粒对球墨铸铁的硬度影响很小。如图 11(a),添加 0.01% 纳米 TiC-TiB<sub>2</sub> 颗粒后,

球墨铸铁的硬度从 156.9 HBW 提升至 159.5 HBW,提升 1.7%。拉伸性能测试中,相较于空白样品,纳米颗粒增强球墨铸铁的屈服强度从 301.4 MPa 提升至 317.2 MPa,拉伸强度从 463.0 MPa 提升至 476.8 MPa,伸长率从 15.1% 提升至 20.0%,如图 11 (b)所示。冲击性能测试中,空白样品的冲击韧度为 8.43 J/cm<sup>2</sup>,纳米颗粒增强球墨铸铁的冲击韧度为 12.68 J/cm<sup>2</sup>,相比提高了 50.4%,如图 11(c)所示。

### 2.3 断口形貌

拉伸和冲击测试试样断口形貌如图 12。空白样品断口的宏观形貌没有出现明显的塑性变形,表面裸露的石墨球数量较少。从图 12(a)和(c)中可以看出,基体上存在明显的河流花样,并伴有位向不同且高低不一的解理台阶和解理面,是典型的脆性断裂

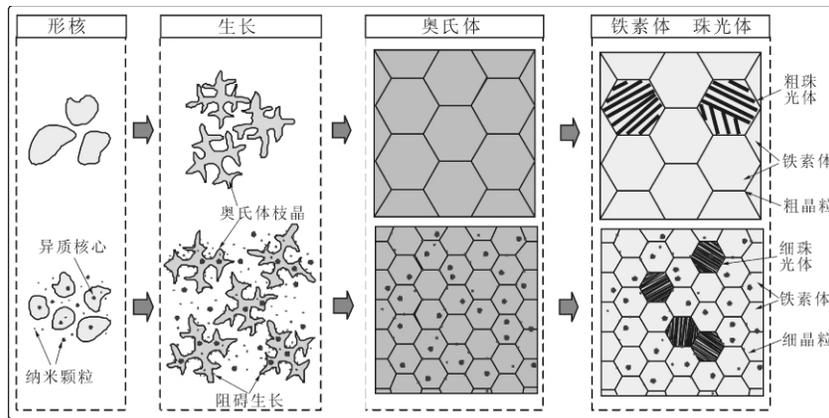


图 10 TiC-TiB<sub>2</sub> 纳米颗粒对微观组织的细化作用

Fig.10 Refining effects of TiC-TiB<sub>2</sub> nanoparticles on microstructure

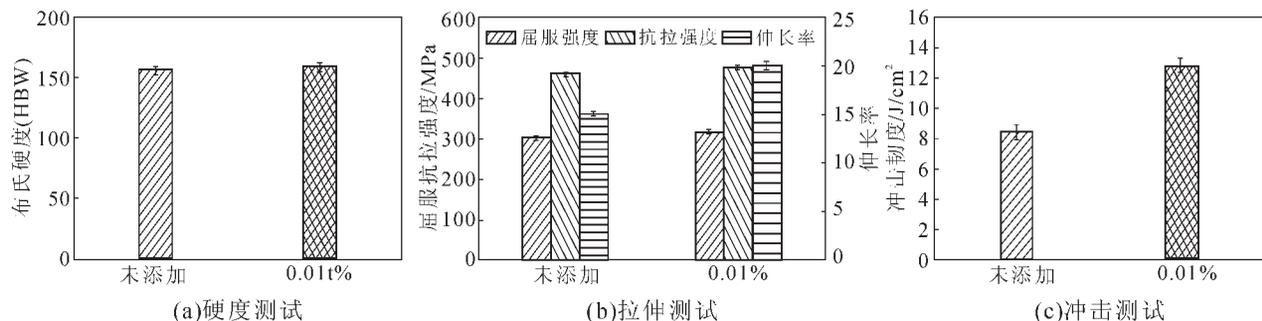


图 11 加入纳米颗粒和未加纳米颗粒铸态球铁力学性能比较

Fig.11 Comparison of mechanical properties for as cast ductile iron with and without addition of nanometer reinforced particles

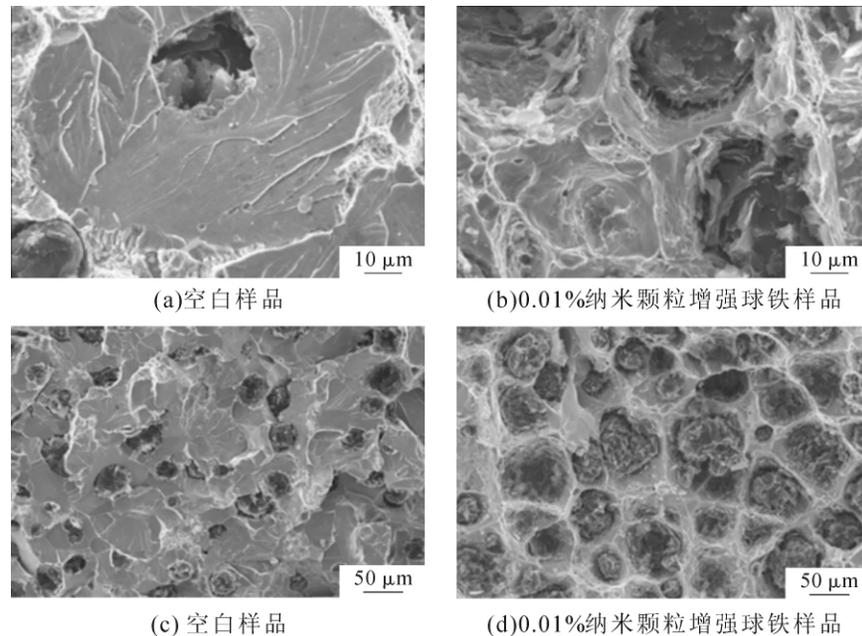


图 12 拉伸和冲击球铁试样断口形貌分析

Fig.12 SEM images of fracture surfaces of graphite ductile iron specimens after tensile and impact tests

特征。而纳米颗粒增强球铁的冲击断口宏观形貌上有着明显的塑性形变,从图 12(b)和(d)中可以看出石墨球周围出现大量呈封闭状态的撕裂岭,撕裂岭上还密集分布着细小的韧窝,因此可以认定其断裂机理为韧性断裂。

### 3 结论

(1)使用含有预制内生纳米 TiC-TiB<sub>2</sub> 颗粒的铝基中间合金制备新型球墨铸铁,铸态组织中石墨球球化率提升 15.9%,平均直径减小 35.8%,单位面积内数量增加 66.3%。基体组织中铁素体含量上升,珠光体整体尺寸减小,铁素体和渗碳体片层变薄。

(2)力学性能测试中,纳米颗粒增强球墨铸铁的硬度基本保持不变,屈服强度提升 5.2%,拉伸强度提升 3%,伸长率提升 32.1%,冲击韧度提升 50.4%。断口中带有河流状花纹的解理平面消失,石墨球周围产生大量塑性形变,形成撕裂岭和微小韧窝,断裂机制由脆性断裂转变为韧性断裂。

#### 参考文献:

[1] MANDAL S, Maity A. Austempered ductile iron material for the design of agricultural machinery [J]. Mechanical Engineering, 2013, 60: 16140-16145.

[2] 王成刚,苏涛,王怀林.等温淬火球墨铸铁(ADI)及其在汽车上的应用[J].汽车工艺与材料,2003(11): 5-7.

[3] LEFEVRE J, HAYRNEN K. Austempered materials for powertrain applications[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2013, 22: 1914-1922.

[4] 朱世杰,王利国,杨凯军,等.球墨铸铁曲轴等温淬火工艺的研究[J].铸造技术,2005,26(9): 760-762.

[5] 冯志明,郭亚辉,王云飞,等.一种曲轴用铸态球墨铸铁 QT800-6 材料的制备[J].铸造,2018,67(10): 880-882.

[6] 张新宁.石墨球对系列冲击温度下球墨铸铁断口作用机制[J].钢铁,2019,54(9): 110-115.

[7] 邱丰,佟昊天,沈平,等.综述:SiC/Al 界面反应与界面结构演变规律及机制[J].金属学报,2019,55(1): 87-100.

[8] ZHOU Y, YANG S, LI J, et al. Effects of heat-treatment temperature on the microstructure and mechanical properties of steel by MgO nanoparticle additions[J]. Materials, 2018, 11(9): 1707.

[9] 王慧远,李超,李志刚,等.纳米增强体强化轻合金复合材料制备及构型设计研究进展与展望 [J].金属材料,2019,55(6): 683-691.

[10] GAO X, YANG S, LI J, et al. Effects of MgO nanoparticle additions on the structure and mechanical properties of continuously cast steel billets [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2016,47: 461-470.

[11] SUI Y W, CHEN X, WANG R, et al. Wear behavior of in-situ TiC particles reinforced aluminum matrix composite [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2017,32(3): 552-556.

[12] 周霞,刘霄霞.石墨烯纳米片增强镁基复合材料力学性能及增强机制[J].金属学报,2020,56(2): 240-248.

[13] SONG M, ZHANG M, ZHANG S, et al. In situ fabrication of TiC particulates locally reinforced aluminum matrix composites by self-propagating reaction during casting [J]. Materials Science and Engineering A, 2008,473(1-2): 166-171.

[14] 王金国,任帅,闫瑞芳,等.TiC 颗粒对铸态球墨铸铁组织和力学性能的影响 [J].吉林大学学报(工学版),2019,49(6): 2010-2018.

[15] KALEICHEVA J, MISHEV V, TONGOV M. Investigation on tribological behavior of ductile cast irons with nanosized particles [C]. Proceedings of the 12th International Scientific and Practical Conference. 2019, 3: 82-87.

[16] 赵宇.纳米 SiO<sub>2</sub> 对铸态球铁微观组织及力学性能的影响[D].沈

(下转第 455 页)

致使蠕变性能下降。

### 3 结论

(1)随着预拉伸变形量的增大,FGH96 合金试片表面各位置处的残余应力均呈现逐渐降低趋势;且预拉伸应变越大,残余应力降幅越大。在相同预拉伸应变条件下,试片侧面的残余应力降幅较大,这与预拉伸过程中试片面内应变场显示试片边缘处应变较大的结果相一致。

(2)不同预拉伸应变 FGH96 合金晶粒尺寸和  $\gamma'$  相无明显差别。低预应变条件下,未能观察到位错切割二次  $\gamma'$  相;当预应变达到 2.5% 时出现少量位错切割二次  $\gamma'$  相,且出现层错现象;随着预拉伸应变增大,位错在晶界处塞积程增大趋势,形成位错缠结。

#### 参考文献:

- [1] 张国庆,张义文,郑亮,等. 航空发动机用粉末高温合金及制备技术研究进展[J]. 金属学报, 2019, 55(9): 1133-1144.
- [2] POLLOCK T M, TIN S. Nickel-based superalloys for advanced turbine engines: chemistry, microstructure and properties[J]. Journal of Propulsion and Power, 2006, 22(2):361-361.
- [3] REED R C. The superalloys: fundamentals and applications[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [4] JIANG R, SONG Y D, REED P A. Fatigue crack growth mechanisms in powder metallurgy Ni-based superalloys-A review[J]. In-

- ternational Journal of Fatigue, 2020,141:105887.
- [5] RAISSON G. Evolution of PM nickel base superalloy processes and products[J]. Powder Metallurgy, 2013, 51(1):10-13.
- [6] RIST M A, JAMES J A, TIN S, et al. Residual stresses in a quenched superalloy turbine disc: Measurements and modeling [J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 2006, 37(2):459-467.
- [7] 汪煜,邹金文,王仁智,等. 一种粉末冶金高温合金涡轮盘热处理残余应力分析[C]. 中国高温合金年会, 2007:538-541.
- [8] KARADGE M, GRANT B, WITHERS P J, et al. Thermal relaxation of residual stresses in nickel-based superalloy inertia friction welds [J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 2011, 42(8): 2301-2311
- [9] FOSS B J, GRAY S, HARDY M C, et al. Analysis of shot-peening and residual stress relaxation in the nickel-based superalloy RR1000[J]. Acta Materialia, 2013, 61(7): 2548-2559.
- [10] 毕中南,秦海龙,董志国,等. 高温合金盘锻件制备过程残余应力的演化规律及机制[J]. 金属学报, 2019, 55(9): 1160-1174.
- [11] 郑捷简,邓勇. 燃气轮机转子轮盘超速及预应力试验[J]. 燃气轮机技术, 2006(3): 8-12.
- [12] 盛德恩. 高速旋转零件的预应力处理 [J]. 机械制造, 1994(7): 9-11.
- [13] SHEN G S, COOPER N, OTTOW N, et al. Integration and Automation of Residual Stress and Service Stress Modeling for Superalloy Component Design[C]. Superalloys2012, 129-134.
- [14] 刘绍伦,谢济洲,刘湘生. 预应力对 GH33A 合金低周疲劳及裂纹扩展性能的影响[J]. 航空学报. 1987, 8(5): A267-A273.
- [15] 侯静泳,蔡肇云,屠一鹤. TC-11 钛合金高低周复合疲劳及损伤累积研究[J]. 航空动力学报, 1992, 7(2): 135-138.

(上接第 444 页)

- 阳: 沈阳工业大学, 2019.
- [17] QIU F, LIU T, ZHANG X, et al. Application of nanoparticles in cast steel: an overview[J]. China Foundry, 2020,17(2): 111-126.
- [18] 李小琳,王建国,贺春林,等. 外加纳米 SiC 颗粒对 Q235 钢组织与硬度的影响[J]. 铸造. 2009, 58(3): 229-231.
- [19] 雷毅,刘志义,李海. 低碳钢中添加 ZrO<sub>2</sub> 粒子获得超细晶粒的研究[J]. 兵器材料科学与工程. 2004(2): 3-5, 8.
- [20] 王井玲,邢书明. Mg<sub>2</sub>Si/Al 内生颗粒增强复合材料的研究进展[J]. 材料导报. 2018, 32(32): 406-409, 434.
- [21] 李英民,刘桐宇,任玉燕. 不同成分 Al-Mg<sub>2</sub>Si 复合材料相成分变化规律[J]. 中国有色金属学报. 2018, 28(12): 2531-2538.

- [22] YANG H, WANG Z, CHEN L, et al. Interface formation and bonding control in high-volume-fraction (TiC-TiB<sub>2</sub>)/Al composites and their roles in enhancing properties [J]. Composites Part B-Engineering, 2021,209: 108605.
- [23] 李月明,汪丹,廖润华,等. 熔盐法制备片状 CaBi<sub>4</sub>Ti<sub>4</sub>O<sub>15</sub> 晶粒的研究[J]. 材料导报. 2010,24(3): 33-35, 51.
- [24] 朱春城,李幸红,徐强,等. 自蔓延高温合成法制备 TiB<sub>2</sub>/TiC 复合陶瓷[J]. 材料工程. 2002(2): 13-15.
- [25] 陈玉勇,舒群,安阁英,等. 熔体反应法制备 Al-4.5Cu/TiB<sub>2</sub> 复合材料的热力学[J]. 材料研究学报. 2000(S1): 68-74.

## 《铸件均衡凝固技术及应用实例》

《铸件均衡凝固技术及应用实例》由西安理工大学魏兵教授编著。共 8 章: 1 铸铁件均衡凝固与有限补缩; 2 铸铁件冒口补缩设计及应用; 3 压边浇冒口系统; 4 浇注系统大孔出流理论与设计; 5 铸件均衡凝固工艺; 6 铸钢、白口铸铁、铝、铜合金铸件的均衡凝固工艺; 7 浇注系统当冒口补缩设计方法; 8 铸件填充与补缩工艺定量设计实例。全书 320 页, 特快专递邮购价 280 元。

邮购咨询: 李巧凤 029-83222071, 技术咨询: 13609155628