

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2025.5103

胶囊式缓释孕育对厚大断面球墨铸铁组织和力学性能的影响

刘新明^{1,2}, 许文东^{1,2}, 郝奕涵^{1,2}, 苏世龙^{1,2}, 李广龙^{1,2}, 曲迎东^{2,3}

(1. 沈阳工业大学 材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110870; 2. 辽宁省轻质高性能金属材料专业技术创新中心, 辽宁 沈阳 110870; 3. 沈阳航空航天大学 材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110136)

摘要: 厚大断面球墨铸铁在凝固过程中, 因中心区域冷却速度缓慢, 易导致石墨球数量减少、碎块状石墨及缩孔缺陷的形成, 显著削弱其力学性能。为解决这一问题, 提出一种新型胶囊缓释孕育工艺, 通过胶囊缓释孕育, 延缓孕育剂释放优化石墨形态和增加石墨数量。采用包内冲入球化孕育和缓释孕育复合工艺制备三组试样(HDQT-0、HDQT-0.1、HDQT-0.3), 对比分析了孕育方式对石墨形态及力学性能的影响。结果表明, 胶囊型缓释孕育工艺显著提升了厚大断面中心区域的石墨球密度从 72 个/mm² 增至 100 个/mm², 球化率从 70.86% 增至 81.52%, 石墨平均直径从 20.51 μm 降至 18.74 μm 。通过增加的石墨形核核心, 达到细化基体晶粒和均匀碳扩散路径的目的, 有效抑制了碎块状石墨的生成。力学性能测试显示, 抗拉强度与伸长率分别提升 8.45%(367~398 MPa) 和 29.82%(15.02%~19.5%)。

关键词: 球墨铸铁; 缓释孕育; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG255

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2025)06-0558-06

Influence of Capsule Type Slow Release Inoculation on the Microstructure and Mechanical Properties of Heavy section Ductile Iron

LIU Xinming^{1,2}, XU Wendong^{1,2}, HAO Yihan^{1,2}, SU Shilong^{1,2}, LI Guanglong^{1,2}, QU Yingdong^{2,3}

(1. School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Technology School, Shenyang 110870, China; 2. Technical Innovation Center for Lightweight and High Performance Metal Materials of Liaoning Province, Shenyang 110870, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract: During the solidification of heavy section ductile iron, the slow cooling rate in the central region tends to reduce the number of graphite nodules, form fragmented graphite, and cause shrinkage defects, significantly weakening its mechanical properties. To solve this problem, a novel capsule-based slow-release inoculation process was proposed. Through capsule-type slow-release inoculation, the release of inoculants is delayed to optimize the graphite morphology and increase the number of graphite nodules. Three groups of samples (HDQT-0, HDQT-0.1, and HDQT-0.3) were prepared via a composite process combining in-ladle impingement spheroidization inoculation with slow release inoculation. The effects of inoculation methods on the morphology and mechanical properties of graphite were comparatively analysed. The results reveal that the capsule-based slow-release inoculation process significantly increases the graphite nodule density in the central region of heavy sections from 72/mm² to 100/mm², improves the nodularity rate from 70.86% to 81.52%, and reduces the average graphite diameter from 20.51 μm to 18.74 μm . By increasing the number of graphite nucleation sites, the process refines the matrix grains and homogenizes the carbon diffusion pathways, effectively suppressing the formation of fragmented graphite. Mechanical property tests indicate that the tensile strength and elongation increase by 8.45% (from 367 MPa to 398 MPa) and 29.82% (from 15.02% to 19.5%), respectively.

Key words: ductile iron; slow release inoculation; microstructure; mechanical properties

收稿日期: 2025-06-05

基金项目: 国家自然科学基金(52204394); 兴辽英才计划(XLYC2403071); 沈阳市科技人才专项(RC230930)

作者简介: 刘新明, 1998 年生, 硕士生。研究方向为球墨铸铁工艺优化及热处理。Email: 15040956021@163.com

通信作者: 曲迎东, 1975 年生, 博士, 教授。研究方向为高性能球墨铸铁绿色铸造先进技术。Email: quyingdong@163.com

引用格式: 刘新明, 许文东, 郝奕涵, 苏世龙, 李广龙, 曲迎东. 胶囊式缓释孕育对厚大断面球墨铸铁组织和力学性能的影响[J]. 铸造技术, 2025, 46(6): 558-563.

LIU X M, XU W D, HAO Y H, SU S L, LI G L, QU Y D. Influence of capsule type slow release inoculation on the microstructure and mechanical properties of heavy section ductile iron[J]. Foundry Technology, 2025, 46(6): 558-563.

球墨铸铁凭借优异的铸造性能、良好的综合力学性能及低廉的制造成本,被广泛应用于形状复杂的厚大铸件制造^[1-3]。然而,在厚大断面球墨铸铁的凝固与冷却过程中,显微组织调控面临较大挑战,厚大铸件中心区域因冷却速度缓慢,易出现石墨球数量减少、碎块状石墨缺陷,易导致球墨铸铁材料性能的降低^[4-6]。同时,基体中缩松缩孔缺陷也会降低材料机械强度^[7-9]。

针对厚大断面铸件中心石墨衰退问题,合金化和优化孕育工艺是改善石墨衰退的主要手段,且圆整的石墨球可显著降低缩松缩孔的数量^[10]。Mourad等^[11]研究表明由于Sb包围石墨球,阻止了C原子从基质向基核的扩散,对增加成核率和抑制石墨球的恶化起着重要作用。蒋立鹏等^[12]在厚大断面铁素体球墨铸铁件中,添加适量的元素Bi可与铸铁中的微量元素形成微合金化合物,这些化合物的晶体结构与石墨晶格具有较高的匹配度,能够进一步提升异质形核效率,细化石墨球,增加石墨球数量,改善石墨球的形态,同时抑制碎块状石墨的产生。而在优化孕育剂和孕育工艺方面,Yamamoto等^[13]通过对比常规孕育(FeSi基)与复合孕育(FeSi+Bi/Ca/Sr)的效果,发现复合孕育处理通过“异质形核-界面调控-干扰元素钝化”多机制协同可有效提升厚大断面球铁中心石墨数量及圆整度,实现组织均匀性与力学性能的同步提升。徐振宇^[14]针对孕育剂颗粒分布对孕育衰退的抑制作用的研究表明,同一孕育剂条件下,大颗粒分数少的组分,处理瞬时孕育效果较好,但小颗粒分数越多,作用质点数越多,孕育剂对铁液的不平衡扰动扩散消失也较快,即孕育衰退也较快。故合适颗粒分布和二次孕育可有效阻碍孕育衰退。Asenjo等^[15]通过实施型内孕育工艺来改善厚大断面球墨铸铁件的石墨形态。研究表明,采用型内孕育可显著改善厚大断面球墨铸铁中心部位的石墨状况,铸件中心处的石墨球数量增加且圆整度提高。由此可见,孕育剂的缓慢释放可有效提升厚大断面球墨铸铁的孕育效果,从而增加石墨球数量和改善石墨形态。但其都难以完全消除中心区域石墨畸变,尤其是厚大断面中心处石墨衰退问题。

本研究采用胶囊缓释孕育的方式,利用铁箔制备胶囊壳体,孕育剂置于“胶囊”内部,在浇注过程中将孕育胶囊置于内浇口内完成孕育剂的缓慢释放。分析了该工艺对厚大断面球墨铸铁中心区域石墨球数量、石墨形态的调控作用,并进一步讨论其对力学性能的影响,为厚大断面球墨铸铁中心部位的石墨结构调控提供理论依据与工程实践参考。

1 实验材料与方法

1.1 试样制备

本研究将包内冲入球化孕育与缓释孕育相结合,以梯度厚度胶囊铁箔孕育载体开展研究,该孕育载体采用非等厚铁皮结构设计,两侧铁箔厚度均为0.05 mm,中间部位则分别设置0.1和0.3 mm 2种厚度规格。铸件如图1所示,在内浇口处设置陶瓷过滤网,使其能在内浇口中缓慢释放孕育剂,以防止梯度厚度椭圆铁箔孕育载体冲入铸件。在过滤网前于图1a红色框位置放置梯度厚度椭圆铁箔孕育载体,其形状如图中蓝色胶囊状,蓝色代表铁箔。铸件尺寸为长120 mm、宽120 mm和高170 mm,其模数为22.2 mm。研究过程中制备了3种对比试样,分别命名为HDQT-0、HDQT-0.1和HDQT-0.3。HDQT-0采用包内球化孕育工艺,球化剂与孕育剂含量分别设定为1.2%和0.5%,并在内浇口处另放0.1%的孕育剂;HDQT-0.1和HDQT-0.3则采用包内冲入球化孕育与胶囊缓释孕育协同作用的复合工艺,其中包内球化孕育的球化剂与孕育剂含量保持1.2%和0.5%不变,在内浇添加的0.1%的孕育剂被梯度厚度胶囊铁箔孕育载体包裹。HDQT-0.1试样梯度厚度胶囊铁箔孕育载体的中间铁箔厚度为0.1 mm,HDQT-0.3则将中间铁箔厚度调整为0.3 mm。

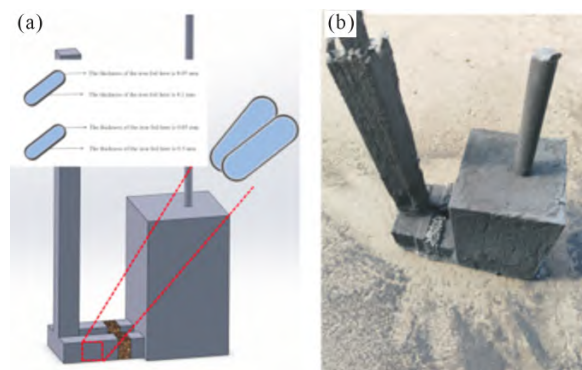


图1 铸件:(a)示意图;(b)成件

Fig.1 Casting: (a) schematic diagram; (b) completed casting diagram

表1为球墨铸铁化学成分,使用中频感应电炉在1540℃的温度下进行熔炼,将1450~1500℃的铁液倒入含有稀土镁合金球化剂(45.03%Si, 0.18%Re, 5.59%Mg, 0.96%Ca, 0.72%Ca, 质量分数,下同)和硅钡钙孕育剂(72.99%Si, 2.29%Ba, 1.73%Ca, 1.15%Al)的浇包进行球化孕育处理,浇入铸型过程中在横浇道放置孕育剂进行非缓释及缓释二次孕育处理。

1.2 材料表征

在厚大球铁铸件中心部位进行组织和性能取

表1 球墨铸铁的化学成分
Tab.1 Chemical composition of ductile iron
(mass fraction/%)

Element	C	Si	Mn	P	S	Mg	Fe
HDQT-0	3.68	2.02	0.18	0.018	0.013	0.045	Bal.
HDQT-0.1	3.67	2.05	0.17	0.018	0.014	0.044	Bal.
HDQT-0.3	3.67	2.04	0.18	0.017	0.013	0.045	Bal.

样,将得到的球墨铸铁试样件进行打磨抛光,并用浓度 4%的 HNO_3 进行腐蚀处理,使用 OLS4100 激光共聚焦显微镜(Olympus, 日本)和 GeminiSEM 300 场发射扫描电子显微镜(ZEISS, 德国)观察微观组织。微观组织拍照位置采用 5 点取样法,对多个微观组织图进行统计分析。并参考 GB/T 9441-2021 对球墨铸铁进行金相检验,通过 Image-Pro-plus6.0 软件对铁素体含量、石墨球数、石墨平均直径、球化率进行统计分析,所有测量分析进行 5 次,取平均值减少误差。试样件用 E45-305 型微机控制电子万能试验机(MTS, 美国)在室温下以 1.5 mm/min 的十字头速度进行拉伸实验,3 种不同的球墨铸铁试样件进行 3 次对照实验,其抗拉强度和伸长率取平均值处理。

2 实验结果及讨论

2.1 显微组织

图 2 展示了不同球墨铸铁试样的石墨组织,观察发现 HDQT-0 试样中石墨球数量较少,且石墨衰退现象较为严重。而进行缓释孕育处理后,HDQT-0.1 和 HDQT-0.3 试样中石墨球数量显著增多,石墨衰退现象明显减轻,同时石墨球也得到细化。

图 3 展示了不同球墨铸铁试样的石墨数据,经胶囊缓释孕育处理后,石墨球数量和球化率均有所提升。石墨球密度由 72 个/ mm^2 增至 100 个/ mm^2 ;球化率从 70.86% 提升至 81.52%。然而,随着梯度厚度胶囊铁箔孕育载体中间厚度的增加,石墨球数量和球化率的增幅趋于平缓。未进行缓释孕育的石墨平均直径为 20.51 μm ,加入后降至 18.74 μm 。缓释孕育提供了大量异质形核点,显著增加石墨球数量。尤其在厚大断面中,缓慢的冷却速度易导致形核核心不足,而缓释孕育能够持续补充形核核心,有效抵消冷却缓慢带来的不利影响。并且缓释孕育更接近凝固时间,减少了孕育剂因长时间高温停留导致的衰退,确保有效形核。从石墨生长机制来看,缓释孕育通过增加形核数量,促使铁液中的碳元素在更多核心之间分配,从而限制了单个石墨球的生长空间,最终实现石墨平均直径的减小^[6]。根据数据变化发现持续增加胶囊壁厚,数据增幅趋于平缓,

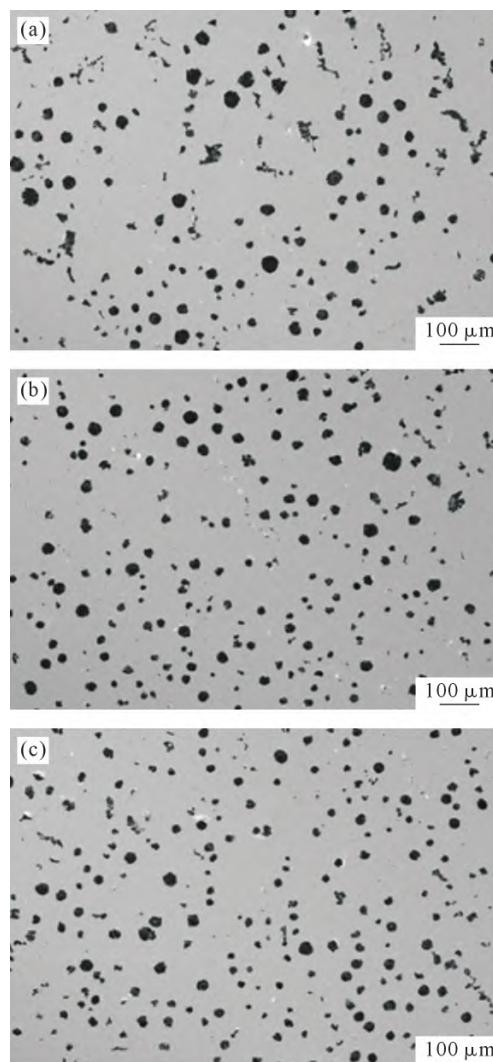


图 2 厚大断面球墨铸铁石墨组织图:(a) HDQT-0;
(b) HDQT-0.1; (c) HDQT-0.3

Fig.2 Graphite microstructure of heavy section ductile iron:
(a) HDQT-0; (b) HDQT-0.1; (c) HDQT-03

并且持续增加壁厚会导致孕育剂部分未熔化,增加铸造缺陷。

图 4 为厚大断面球墨铸铁微观组织。厚大断面球铁组织主要由铁素体和少量珠光体组成,且可观察到随石墨球数量增多,铁素体晶粒呈细化趋势。经缓释孕育处理的铸件中,石墨球数量显著增多,形核率的提升会为基体相提供更多附着形核位点,进而抑制单个晶粒的长大空间,促使基体晶粒尺寸细化^[17]。从碳扩散机制分析,铁液中的碳元素向多个石墨球表面扩散并沉积,会降低基体相中碳的过饱和度,有效抑制晶粒的快速生长,进一步强化了晶粒细化效果^[18]。晶粒尺寸统计如图 5 所示,晶粒尺寸呈持续下降趋势,但 HDQT-0.1 和 HDQT-0.3 的晶粒尺寸相差不多,其趋势呈现平缓。

2.2 力学性能

图 6 为球墨铸铁试样的拉伸应力-应变曲线。研

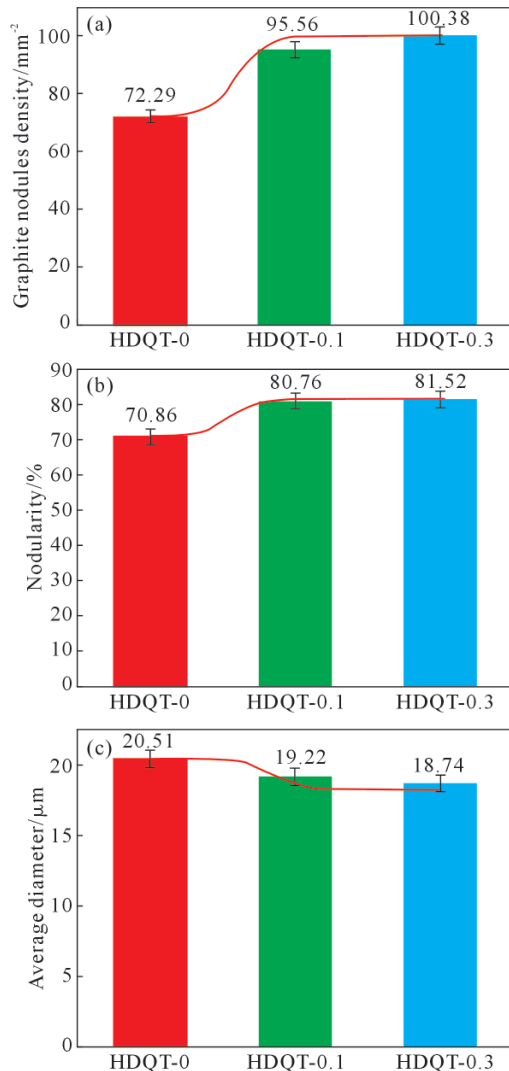


图3 厚大断面球墨铸铁石墨数据:(a) 石墨球密度;(b) 球化率;(c) 平均直径

Fig.3 Graphite data of heavy-section ductile iron: (a) graphite nodule density; (b) nodularity; (c) average diameter

究表明,缓释孕育工艺的引入显著提升了厚大断面球墨铸铁中心区域的力学性能:抗拉强度由 367 MPa 提升至 398 MPa,增幅达 8.45%;伸长率由 15.02% 提高至 19.5%,提升幅度为 29.82%。

球墨铸铁的力学性能与石墨形态密切相关。相

较于碎块状石墨和蠕虫状石墨,圆整的球状石墨可显著提升材料强度。胶囊缓释孕育工艺通过增加厚大断面球铁中心部位的石墨数量并改善其圆整度,实现了强度与塑性的协同提升。此外,石墨的析出可通过析出强化提升抗拉性能,其强化公式^[9]为:

$$\sigma_{p\text{-graphite}} = \left(\frac{0.538Gb f^{1/2}}{r} \right) \ln \left(\frac{r}{2b} \right) \quad (1)$$

式中, σ_p 为沉淀强化; G 为剪切模量(81.6 GPa); b 为伯氏矢量,值为 0.248 nm; f 为石墨球体积分数; r 为石墨球平均直径,nm。

复合孕育工艺可通过细化晶粒提升材料性能,而胶囊缓释孕育通过细晶强化机制进一步优化了球铁的力学性能^[20]。随着梯度厚度胶囊铁箔孕育载体中间部位厚度的增加,试样的抗拉强度和韧性趋于平稳,未呈现持续增长趋势。

图7为拉伸断口形貌图,通过 HDQT-0 拉伸断口(图7a)的表面观察可见,其断口表面存在大量碎块状石墨聚集现象。这类碎块状石墨会对组织产生割裂作用,造成组织连续性破坏。在拉伸载荷施加的情况下,碎块状石墨会成为显著的应力集中源,使得裂纹极易在石墨边缘处萌生,并且能够快速扩展,进而显著加速穿晶断裂的进程^[16]。

这种组织不连续性会对球墨铸铁的力学性能产生显著的负面影响。碎块状石墨的存在阻碍正常的塑性变形机制,局部区域因石墨脱落而形成蜂窝状凹坑;石墨的聚集会减少有效承载面积,降低裂纹扩展所需能量,最终导致球墨铸铁的抗拉强度大幅下降,与具有理想球状石墨组织的球墨铸铁相比,性能出现大幅度下滑。

HDQT-0.1 和 HDQT-0.3 的拉伸断口表面展现出良好的石墨球圆整度,未观察到因碎块状石墨导致的蜂窝状凹坑。球状石墨表面曲率均匀,在拉伸载荷作用下不易形成应力集中点。从撕裂棱上可明显观察到韧窝,且石墨颗粒被韧窝环绕,这表明基体经

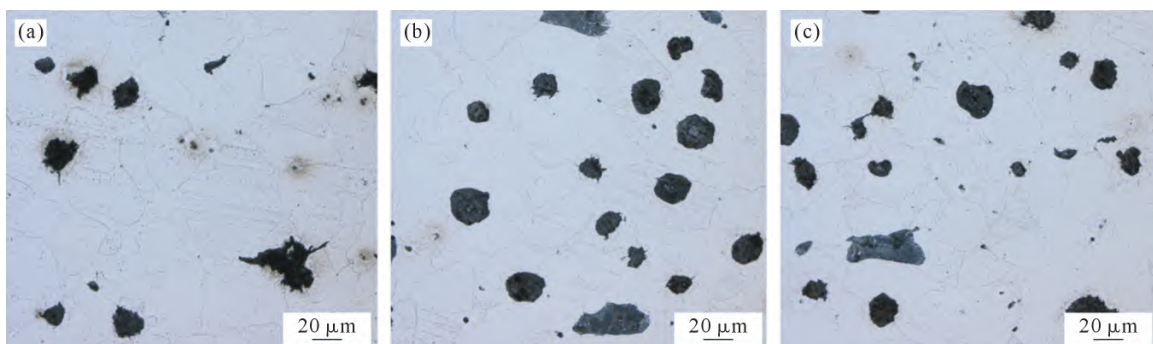


图4 厚大断面球墨铸铁微观组织:(a) HDQT-0; (b) HDQT-0.1; (c) HDQT-0.3

Fig.4 Microstructure of heavy section ductile iron: (a) HDQT-0; (b) HDQT-0.1; (c) HDQT-0.3

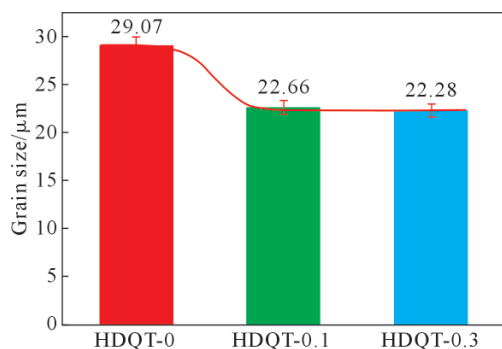


图5 不同球墨铸铁试样晶粒尺寸

Fig.5 Grain sizes of different ductile iron samples

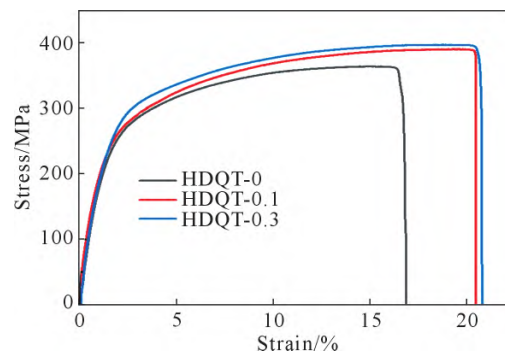


图6 球墨铸铁试样应力-应变曲线

Fig.6 Stress-strain curves of ductile iron samples

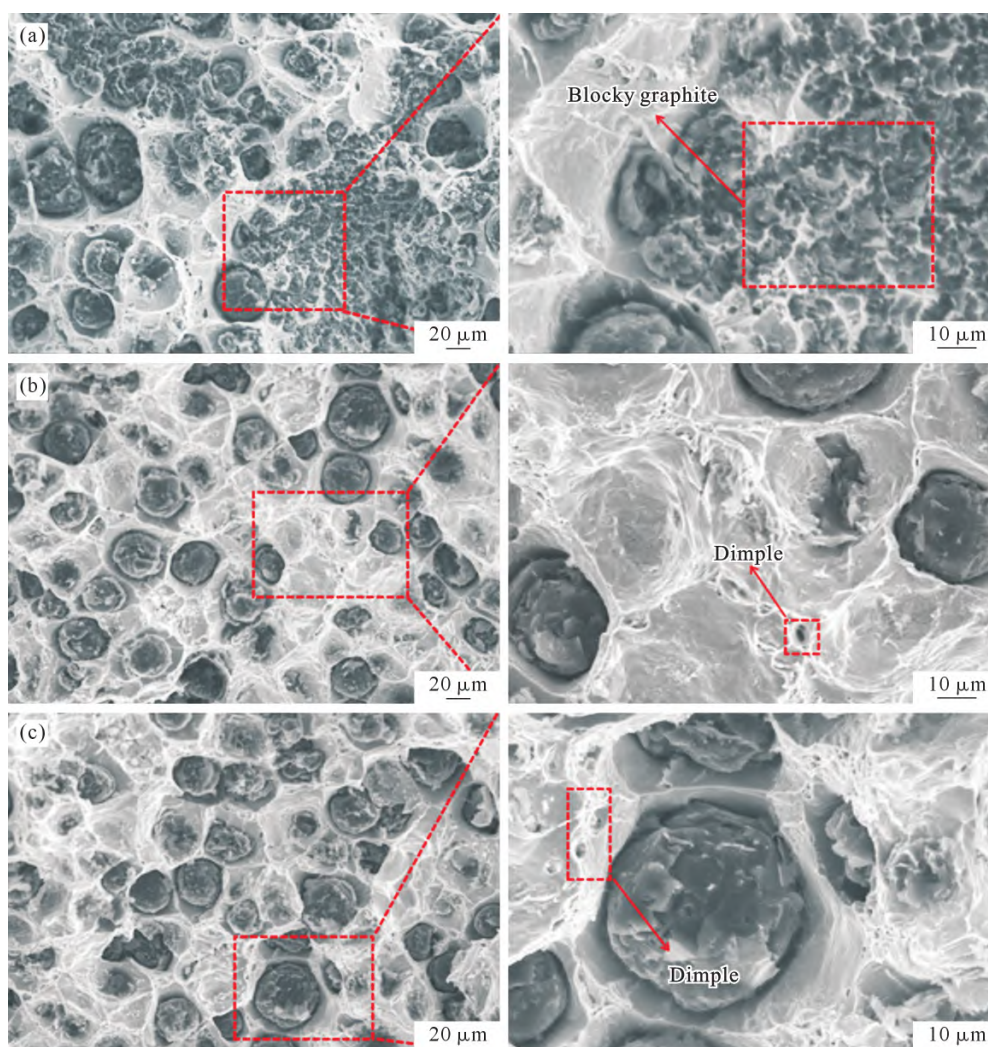


图7 不同球铁试样拉伸断口形貌:(a) HDQT-0; (b) HDQT-0.1; (c) HDQT-0.3

Fig.7 Tensile fracture surfaces of different ductile iron samples: (a) HDQT-0; (b) HDQT-0.1; (c) HDQT-0.3

历了显著的塑性流动过程。

3 结论

(1)铁箔缓释载体结合陶瓷过滤网设计,避免了孕育剂过早失效,延长了有效形核时间,克服了厚大断面冷却缓慢导致的形核不足问题。

(2)缓释孕育通过梯度胶囊释放孕育剂,持续提供异质形核核心,石墨球密度由 72 个/mm² 增至

100 个/mm²,球化率从 70.86%增加到 81.52%,并抑制碎块状石墨生成。石墨平均直径从 20.51 μm 减小到 18.74 μm 表明碳元素分配更为均匀。

(3)胶囊型缓释孕育载体铁箔厚度为 0.3 mm 时,试样的抗拉强度与伸长率分别达到 398 MPa 和 19.5%,与未进行胶囊缓释孕育相比提高 8.45%和 29.82%,圆整石墨有效抑制了裂纹萌生,基体塑性显著增强。

参考文献:

- [1] 王以春,张淑云,张晓博. 碳含量对高牌号球铁铸造性能和力学性能的影响[J]. 铸造技术, 2010, 31(9): 1140-1142.
WANG Y C, ZHANG S Y, ZHANG X B. Effect of carbon content on mechanical properties and cast abilities of high grade ductile iron[J]. Foundry Technology, 2010, 31(9): 1140-1142.
- [2] 张伯明,王继祥. 高 Si 球墨铸铁的新发展[J]. 现代铸铁, 2013, 33(5): 49-58.
ZHANG B M, WANG J X. Recent development of high silicon nodular iron[J]. Modern Cast Iron, 2013, 33(5): 49-58.
- [3] 瞿铁,刁晓刚,魏伟,沈闯. 厚大断面球墨铸铁齿轮铸件的研制[J]. 铸造, 2023, 72(3): 315-319.
QU T, DIAO X G, WEI W, SHEN C. Study on the heavy section ductile iron gear casting[J]. Foundry, 2023, 72(3): 315-319.
- [4] 马敬仲, 曾艺成. 厚大断面球墨铸铁件生产中若干问题的探讨(1)[J]. 现代铸铁, 2020, 40(1): 1-5.
MA J Z, ZENG Y C. A discussion on some problems in heavy section nodular iron production(I)[J]. Modern Cast Iron, 2020, 40(1): 1-5.
- [5] 陈琳. 风电用厚断面铁素体基球墨铸铁的组织控制与性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.
CHEN L. Study on microstructure and mechanical properties of heavy section ferritic ductile iron applied for wind power casting [D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [6] 谭玉华,张风军,赵红. 厚大断面球铁件工艺控制[J]. 铸造技术, 2016, 37(5): 1048-1049.
TAN Y H, ZHANG F J, ZHAO H. Process control of large and thick cross section ductile castings[J]. Foundry Technology, 2016, 37(5): 1048-1049.
- [7] 冯志明,薛文璞,冯银平,张沈洁,王小培,左毅. QT500-7 球墨铸铁行星架断裂原因[J]. 理化检验-物理分册, 2025, 61(4): 55-58.
FENG Z M, XUE W P, FENG Y P, ZHANG S J, WANG X P, ZUO Y. Fracture cause of QT500-7 ductile iron planetary carrier [J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Physical Testing), 2025, 61(4): 55-58.
- [8] TENAGLIA N, BOERI R, RIVERA G, MASSONE J. Study of shrinkage porosity in spheroidal graphite cast iron[J]. International Journal of Cast Metals Research, 2016, 29: 112-120.
- [9] 郑锐,张伟光,刘浩辉,吴择言. 垂直线生产球墨铸铁行星架的铸造工艺设计[J]. 铸造工程, 2024, 48(6): 39-42.
ZHENG R, ZHANG W G, LIU H H, WU Z Y. Casting process for the vertical line producing ductile iron planetary carrier[J]. Foundry Engineering, 2024, 48(6): 39-42.
- [10] BORSATO T, FERRO P, BERTO F, CAROLLO C. Fatigue strength improvement of heavy-section pearlitic ductile iron castings by in-mould inoculation treatment [J]. International Journal of Fatigue, 2017, 102: 221-227.
- [11] MOURAD M M, W L HADAD S, IBRAHIM M M, NOFAL A A. Effect of processing parameters on the mechanical properties of heavy section ductile iron[J]. Journal of Metallurgy, 2015, 2015(1): 931535.
- [12] 蒋立鹏,曲迎东,李荣德. 元素 Bi 对厚大断面球墨铸铁低温冲击性能的影响[J]. 铸造技术, 2016, 37(9): 1908-1910, 1918.
JIANG L P, QU Y D, LI R D. Effect of Bi additions on low temperature impact properties of heavy section ductile iron[J]. Foundry Technology, 2016, 37(9): 1908-1910, 1918.
- [13] YAMAMOTO S, FUJIKAWA Y, ITOFUJI H, HATATE M, HIRATSUKA S. Influence of inoculation on the mass effect in heavy section ferritic spheroidal graphite cast iron[J]. International Journal of Metalcasting, 2024, 18(3): 1994-2002.
- [14] 徐振宇. 球墨铸铁球化孕育处理动态调控方法及系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2016.
XU Z Y. Dynamic method & system for adjusting and controlling nodularization & inoculation of ductile iron [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2016.
- [15] ASENJO I, LARRANAGA P, SERTUCHA J, SUÁREZ R, GÓMEZ J M, FERRER I, LACAZE J. Effect of mould inoculation on formation of chunky graphite in heavy section spheroidal graphite cast iron parts[J]. International Journal of Cast Metals Research, 2007, 20(6): 319-324.
- [16] 李蒙,于亚征,孟银娜,祝庆. Sb-Ba 复合随流孕育对大断面球铁低温冲击性能的影响[J]. 钢铁研究学报, 2022, 34(2): 175-180.
LI M, YU Y Z, MENG Y N, ZHU Q. Effect of compound stream inoculations with Sb and Ba on low temperature impact properties of heavy section ductile iron[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2022, 34(2): 175-180.
- [17] ZHAO Y, ZHANG W, LI G L, DONG S L, LI R D, SUN W, ZHOU G P, CHEN R R, WANG Q, QU Y D. Effect of nano-sized SiO₂ particles addition on microstructure and mechanical properties of as-cast ductile iron[J]. International Journal of Metalcasting, 2024, 18(2): 1293-1308.
- [18] LIU C, DU Y Z, YING T, ZHANG L D, ZHANG X Y, WANG X, YAN G J, JIANG B L. Effects of graphite nodule count on mechanical properties and thermal conductivity of ductile iron [J]. Materials Today Communications, 2022, 31: 103522.
- [19] LIU M M, LIU Y L, LI H. Deformation mechanism of ferrite in a low carbon Al-killed steel: Slip behavior, grain boundary evolution and GND development[J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 842: 143093.
- [20] VICENTE A D A, MORENO J R S, SANTOS T F D A, ESPINOSA D C R, TENÓRIO J A S. Nucleation and growth of graphite particles in ductile cast iron [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 775: 1230-1234.

(责任编辑: 宫文婧)