

不同铸造制备方法对氧化物弥散强化 (ODS) 钢组织影响的研究

谭希林^{1,2}, 李宝治¹, 高云保¹, 王宇^{1,2}, 曹衡^{1,2}, 王增睿^{1,*}

(¹ 中国机械总院集团沈阳铸造研究所有限公司, 辽宁 沈阳 110022; ² 高端装备铸造技术全国重点实验室, 辽宁 沈阳 110022)

*通讯作者: 王增睿, 男, 高级工程师, 博士。E-mail: 174853022@qq.com

摘要: 为探究高效低成本的氧化物弥散强化 (ODS) 钢的制备工艺, 本研究探究分别采用直接浇注法、混流搅拌法、型底包埋法及真空实型铸造法 (V-EPC 铸渗法) 四种铸造方法试制 Y₂O₃ 弥散分布的 ODS 钢。通过光学显微镜 (OM) 和扫描电子显微镜 (SEM) 等测试手段, 系统研究了不同铸造制备方法对 ODS 钢显微组织及 Y₂O₃ 颗粒弥散分布状态的影响, 并探讨 ODS 钢制备机制。结果表明: 直接浇注法可以使 Y₂O₃ 颗粒进入基体中, 但颗粒尺寸与分布均匀性存在显著不足; 真空实型铸造法制备的 ODS 钢中 Y₂O₃ 颗粒平均尺寸较小, 分布较均匀, 弥散效果更优。本研究明确了不同铸造制备方法的优劣, 为低成本短流程 ODS 钢的制备工艺优化提供了实验依据和理论支撑。

关键词: 氧化物弥散强化钢; 液态金属法; 氧化物冶金; 氧化钇;

Study on the Effects of Different Casting Preparation Methods on the Microstructure of ODS (Oxide Dispersion Strengthened) Steel

TAN Xi-lin^{1,2}, LI Bao-zhi¹, GAO Yun-bao¹, WANG Yu^{1,2}, CAO Heng^{1,2} and *WANG Zeng-ru¹

(1. State Key Laboratory of Advanced Casting Technologies, Shenyang 110022, Liaoning, P. R. China; 2. Shenyang Research Institute of Foundry Co., Ltd. CAM)

Abstract: To explore the preparation process of high-efficiency and low-cost oxide dispersion strengthened (ODS) steel, this study investigated the trial production of Y₂O₃ dispersed ODS steel using four casting methods: direct pouring, mixed flow stirring, mold bottom embedding, and vacuum exhaust pattern casting (V-EPC casting infiltration method). Through optical microscopy (OM) and scanning electron microscopy (SEM), the effects of different casting preparation methods on the microstructure of ODS steel and the dispersion state of Y₂O₃ particles were systematically studied, and the preparation mechanism of ODS steel was explored. The results showed that the direct pouring method could allow Y₂O₃ particles to enter, but there were significant deficiencies in particle size and distribution uniformity. The ODS steel prepared by the vacuum exhaust pattern casting method had smaller average Y₂O₃ particle size, more uniform distribution, and better dispersion effect. This study clarified the advantages and disadvantages of different casting methods and provided experimental evidence and theoretical support for the optimization of the preparation process of ODS steel.

Keywords: Oxide dispersion strengthened steel; Liquid metal method; Oxide metallurgy; Yttrium oxide;

文章版权由第 17 届亚洲铸造会议及中国机械工程学会铸造分会所有

1 前言

氧化物弥散强化 (ODS) 钢作为一种新型高性能结构材料, 凭借纳米氧化物颗粒的弥散强化作用及优异的高温稳定性、抗辐照性能和抗腐蚀性能, 成为先进核能系统、航空航天发动机热端部件等极端服役环境的关键候选材料。^[1] 纳米氧化钇 (Y_2O_3) 因化学稳定性高、与铁基体相容性好, 且能通过钉扎位错、阻碍晶粒长大等方式显著提升材料的力学性能, 是 ODS 钢中最常用的强化相之一。ODS 钢的制备工艺直接决定了纳米 Y_2O_3 颗粒的弥散分布状态、基体晶粒尺寸及内部缺陷含量, 进而显著影响材料的最终性能。^[2]

目前, 国内外已开发的纳米 Y_2O_3 增强 ODS 钢制备方法多样, 其中机械合金化-粉末冶金 (MA-PM) 是传统且成熟的工艺。^[3-5] 传统粉末冶金工艺存在流程长、成本高、规模化受限等缺陷, 液态金属法以近净成型、效率高的优势, 成为替代技术的研究热点, 近年国内外学者围绕该方法形成多元技术路径并取得阶段性突破。^[6,7] 湿混合-熔炼协同工艺可有效降低杂质污染; 真空电弧重熔 (VAR) 技术为氧化物稳定弥散提供热力学条件; 氧载体辅助熔炼则解决直接添加 Y_2O_3 的团聚问题。^[8] 综上, 液态金属法已形成多技术路径并行发展的格局, 但氧化物分散稳定性与留存率仍需优化, 未来需进一步深化界面作用机制研究, 为 ODS 钢工程化应用提供支撑。

基于此, 本研究选取直接浇注法、混流搅拌法、型底包埋法及真空实型铸造法 (V-EPC 铸渗法) 四种具有代表性的制备方法制备 Y_2O_3 增强 ODS 钢, 系统研究不同制备方法对材料组织、物相的影响规律, 揭示 Y_2O_3 颗粒的强化机制, 对比分析各制备工艺的优劣, 为高性能 ODS 钢的工艺优化与工程应用提供理论与实验支撑。

2 试验过程

2.1 实验方法

2.1.1 直接浇注法: 氧化物密度较低, 在向钢添加过程中容易上浮, 本实验设计使用金属型铸型加强冷却, 使钢液快速凝固, 氧化物

来不及上浮到钢液表面而凝固在钢中。实验使用中频感应炉将碳钢熔化, 在出钢浇注时从浇口上方倾倒 Y_2O_3 粉末, 氧化钇受重力下落, 与钢液在浇口处混合后进入到金属型腔, 冷却后打箱取出试样, 最终得到 $\Phi 90\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ 的 ODS 钢圆柱试样。

2.1.2 混流搅拌法: 考虑氧化物与钢液润湿性差, 氧化物颗粒不易与钢液结合, 实验设计一种混流流道, 让钢液对冲形成漩涡, 加强氧化物颗粒与钢液的搅拌。本实验在直接浇注法的基础上, 采用特制的 3D 打印浇口杯, 将粒径 20-50nm Y_2O_3 粉体预置于定制浇口杯内, 浇口下方放置相同的金属型圆柱锭模具; 出钢浇注时打开 Y_2O_3 粉体下方隔板使其落下并于钢液接触后混匀。待钢锭冷却后取出试样。

2.1.3 型底包埋法: 虑氧化物与钢液界面能非常高, 易与流道壁结合而在流道团聚析出, 本实验为防止氧化物上浮, 将粒径 20-50nm Y_2O_3 粉体与 1000 目铁粉进行机械混合后, 经球磨制备成复合粉体。用厚度为 0.01mm 的钢纸把复合粉体包裹成大小均匀的小球, 预置于金属型圆柱锭模具内腔底部。采用相同浇注方式将钢液充型完全。待钢锭冷却后取出试样。

2.1.4 真空实型铸造法 (V-EPC 铸渗法): 为降低表面能, 尝试让氧化物颗粒不与空气接触, 由三相界面变为钢液-氧化物两相接触, 去除颗粒表面吸附的气体膜。设计了一种预埋一体化流道结构, 将纳米 Y_2O_3 粉预埋于砂型独立腔室内, 腔室下方与流道贯通连接, 钢液流动过程将 Y_2O_3 颗粒负压吸入流道并带入型腔, 充型后冷却取出试样。

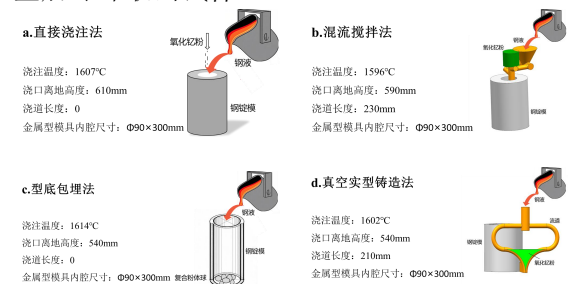


图 1 实验方法比较 (a)直接浇注法; (b)混流搅拌法; (c)型底包埋法; (d)真空实型铸造法

Figure 1 Comparison of experimental methods: (a) direct pouring method; (b) mixed flow stirring method; (c) mold bottom embedding method; (d) vacuum full mold casting method

2.2 实验原料及表征方法

本实验所用基体原料为工业碳钢，具体成分如表 1 所示。强化相原料为 Y_2O_3 粉末（纯度 $\geq 99.9\%$ ，平均粒径 20 nm）。根据 ODS 钢的经典成分设计，向实验用碳钢中添加质量分数 0.3% 的 Y_2O_3 作为强化相，采用电子天平（精度 0.1 mg）准确称量原料。本实验采用 ZEISS AXIOVert.A1 倒置金相显微镜观察样品表面形貌，采用 Zeiss EVO MA25 扫描电子显微镜（配备 EDS 能谱仪）观察样品中 Y_2O_3 颗粒的弥散分布状态、尺寸及截面组织元素分布。

表 1 实验用碳钢元素成分(质量分数, %)

Tab. 1 Elemental composition of carbon steel for experiment (mass fraction, %)

元素	C	Si	Mn	P	S	Cr	Al	F
含量	0.3	0.05	0.4	0.01	0.007	0.07	0.02	3
								余

3 试验结果及分析

3.1 不同制备方法 ODS 钢的微观形貌

图 2 为四种方法制备 ODS 钢的金相照片。直接浇注法中存在多个直径约为 $2\mu m$ 的球形或类球形颗粒，可能是脱氧过程中残留的内生氧化铝夹杂或氧化钒团聚物。混流搅拌法中显微组织以铁素体相为主，基体上弥散分布着大量黑色点状、线状及不规则形态析出物，推测为内生氧化物及硫化物夹杂物。

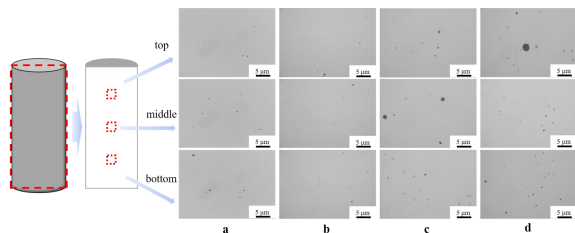


图 2 不同方法试制 ODS 钢的金相照片 (a) 直接浇注法; (b) 混流搅拌法; (c) 型底包埋法; (d) 真空实型铸造法

Figure 2 Metallographic photographs of ODS steel produced by different methods: (a) direct pouring method; (b) mixed flow stirring method; (c) mold bottom embedding method; (d) vacuum full mold casting method

型底包埋法中可清晰辨识出内嵌包裹物，尺寸 $0.5\text{--}2\mu m$ 。真空实型铸造法中，第二相颗粒表现出“局部团聚+零散分布”的混合状态，颗粒等效直径集中在 $1\text{--}5\mu m$ 范围内。

3.2 不同制备方法 ODS 钢的显微组织与 Y_2O_3 颗粒分布

图 3 为四种方法制备 ODS 钢的微观形貌，图 4 为元素分布。直接浇注法样品中存在直径超 $200\mu m$ 的巨型夹杂物，EDS 分析表明其含有 O、Si、Mn、Cr、Y 等元素，推测是由砂粒充当异质核心引发的聚集反应所致。混流搅拌法中夹杂物主要为氧化铝，未检测到 Y 元素。型底包埋法中球状夹杂物未检测到 Y 元素信号，主要为 MnS 与 SiO_2 。真空实型铸造法截面组织均匀致密，EDS 能谱分析显示 Y 元素在基体中均匀分布， Y_2O_3 颗粒弥散效果优异（等效直径约 $2\mu m$ ），呈现离散分布加微小聚集的特征。

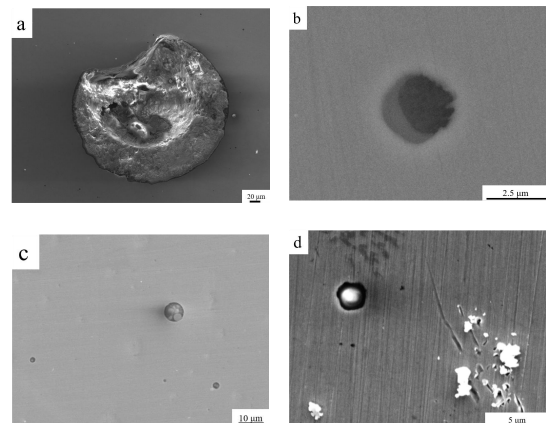


图 3 ODS 钢的微观形貌(a)直接浇注法; (b) 混流搅拌法; (c)型底包埋法; (d)真空实型铸造法
Figure 3 Microscopic morphology of ODS steel (a) Direct pouring method; (b) Mixed flow stirring method; (c) Mold bottom embedding method; (d) Vacuum full mold casting method

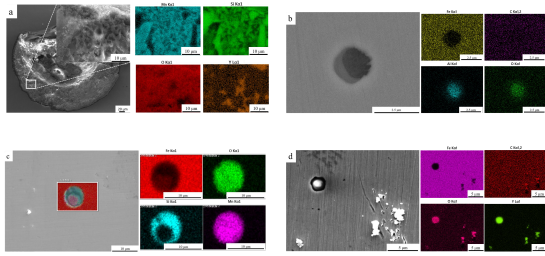


图 4 ODS 钢的元素分布(a)直接浇注法; (b) 混流搅拌法; (c)型底包埋法; (d)真空实型铸造法
Figure 4 Element distribution of ODS steel (a)

Direct pouring method; (b) Mixed flow stirring method; (c) Mold bottom embedding method; (d) Vacuum full mold casting method

3.3 制备方法对 ODS 钢的影响机制

Y_2O_3 与铁基钢液之间的界面能非常高,润湿性极差,易团聚。直接浇注法证实了直接添加的可行性,但砂粒污染易导致巨型夹杂。混流搅拌法和型底包埋法均未能有效将 Y 元素保留在基体中。真空实型铸造法在局部创造真空环境,显著改善了润湿性,使 Y_2O_3 颗粒实现了优异的弥散效果,具体机制对比见表 2。

表 2 制备方法对 ODS 钢的影响机制对比

Table 2 Comparison of the influence mechanism of preparation methods on ODS steel

制备方 法	核心机 制	对 Y_2O_3 分 布的影响	主要问题/缺陷
直接浇 注法	直接添 加	Y 元素存 在, 但易聚 集	砂粒污染导致巨 型复合夹杂物, 分布极不均匀
混流搅 拌法	机械搅 拌	Y 元素缺失	未能有效引入 Y, 反而引入氧化铝 夹杂
型底包 埋法	预置粉 末+冲击 卷入	Y 元素缺失	颗粒与基体结合 力弱, 易脱落, 未实现弥散
真空实 型铸造 法	真空环 境铸造	Y 元素均匀 分布, 弥散 效果最佳	存在由 2-3 个颗 粒组成的微观轻 微聚集, 未达完 全单颗粒弥散

4 结果或结论

(1) 本实验采用铸造的方式实现了 Y_2O_3 颗粒在钢中分散, 但铸造法面临着 Y_2O_3 难以在钢液中的均匀弥散的核心挑战, 氧化物颗粒易形成大尺寸团聚。

(2) 氧化钇能否实现在钢中弥散分布的重点不在于冷却速度或是搅拌强度, 而是 Y_2O_3 与钢液/钢基体之间的界面能。

(3) 真空实型铸造法通过隔绝空气, 让体系从“气-液-固”三相界面, 变成“钢液-氧化物”两相界面, 能够显著改善润湿性、促进结合, 有利于氧化物在钢液中稳定分散。

参考文献:

- [1] 陈禹希, 陈东旭, 张峻巍. ODS 钢研究进展及其在核电领域的应用现状 [J]. 材料科学与工艺, 2019, 27 (3) : 29-34.
- [2] Doate-Buendia C, Kürnsteiner P, Stern F, et al. Microstructure formation and mechanical properties of ODS steels built by Laser Additive Manufacturing... [J]. Acta Materialia, 2020, 206:116566.
- [3] 徐帅, 陈灵芝, 曹书光, 等. 先进核能系统用 ODS 钢的显微组织设计与调控研究进展 [J]. 材料导报, 2019, 33 (1) :12.
- [4] Liang T, Liu J, Zhan C, et al. Effect of Yttrium Oxide on Microstructure and Oxidation Behavior of Cr/FeCrAl Coatings... [J]. Materials, 2025, 18, 1821.
- [5] 赵冕, 张鹏, 徐俊杰, 等. 一种基于机械合金化高效制备 ODS 钢的方法及其产品: CN202210305940.6 [P]. 2026-06-09.
- [6] 谢锐, 吕铮, 王晴, 等. 纳米 Y_2O_3 含量对 9Cr-ODS 钢微观组织及力学性能的影响 [J]. 材料导报, 2022 (z2) : 348-354.
- [7] González M, Das K, Pokorn J, et al. Comparative study of ODS steels produced by PPS and SPS [J]. Materials & Technologies/ Materiali in Tehnologije, 2025, 59 (5) .
- [8] 王政, 冯越, 张元祥. 合金成分对熔炼法制备 ODS 钢的影响 [J]. 沈阳工业大学学报, 2022, 44 (4) : 397-402.