

不同铸造工艺对氧化物弥散强化 (ODS) 钢组织影响

谭希林^{1, 2}, 李宝治^{1, 2}, 高云保^{1, 2}, 李景明^{1, 2}, 赵 岭^{1, 2},
王 宇^{1, 2}, 曹 衡^{1, 2}, 董文博¹, 王增睿^{1, 2}

(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)

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, 简化ODS钢的制备流程, 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, 系统研究了不同制备方法对ODS钢显微组织、物相组成及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: 四种方法制备的ODS钢基体均主要由铁素体 (α -Fe) 相构成; 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。本研究明确了不同制备方法的优劣及适用场景, 为低成本短流程ODS钢的制备工艺选择与优化提供了试验依据和理论支撑, 对推动ODS钢在先进核能、航空航天等高端装备领域的应用具有重要意义。

关键词: 氧化物弥散强化钢; 液态金属法; 氧化物冶金; 氧化钇; 铸造工艺; 微观组织; 颗粒弥散

中图分类号: TG142.1; TG244 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 08-0936-07

DOI: 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0120

Effects of Different Casting Processes on the Microstructure of Oxide Dispersion Strengthened (ODS) Steel

TAN Xi-lin^{1, 2}, LI Bao-zhi^{1, 2}, GAO Yun-bao^{1, 2}, LI Jing-ming^{1, 2}, ZHAO Ling^{1, 2},
WANG Yu^{1, 2}, CAO Heng^{1, 2}, DONG Wen-bo¹, WANG Zeng-rui^{1, 2}

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

Abstract: To explore the preparation process of cost-effective and high-efficiency oxide dispersion-strengthened (ODS) steel and simplify its preparation procedure, the trial production of the Y₂O₃-dispersed ODS steels was carried out using four distinct methods: direct casting, confluent stirring, mold-bottom embedding, and vacuum expendable pattern casting (V-EPC) infiltration. The effects of different preparation methods on the microstructure, phase composition, and Y₂O₃ particle dispersion state of the ODS steels were systematically studied by optical microscopy (OM) and scanning electron microscopy (SEM), and the preparation mechanisms were also analyzed. The results indicate that all of the matrices of the ODS steels prepared by the four methods primarily composed of ferrite (α -Fe) phases; the direct casting method enables Y₂O₃ particles to enter the matrix but suffers from significant deficiencies in particle size and distribution uniformity; in contrast, the V-EPC infiltration method yields ODS steel with smaller average Y₂O₃ particle size, more uniform distribution, and superior dispersion effect. This research clarifies the advantages and limitations of different preparation methods and their applicable scenarios, providing experimental evidence and theoretical support for the selection and optimization of low-cost, short-process ODS steel production, and holding significant importance for advancing the application of ODS steel in high-end equipment fields such as advanced nuclear energy and aerospace.

Key words: oxide dispersion strengthened steel; liquid metal method; oxide metallurgy; yttrium oxide; casting process; microstructure; particle dispersion

基金项目: 辽宁省科技计划联合计划 (2024-MSLH-512)。

收稿日期: 2026-04-16 收到初稿, 2026-07-03 收到修订稿。

作者简介: 谭希林 (2000-), 男, 硕士生, 主要研究方向为氧化物弥散强化钢。E-mail: 1113642572@qq.com

通信作者: 王增睿, 高级工程师, 博士。E-mail: 174853022@qq.com

引用格式: 谭希林, 李宝治, 高云保, 等. 不同铸造工艺对氧化物弥散强化 (ODS) 钢组织影响 [J]. 铸造, 2026, 75 (8) : 936-942.

Tan Xilin, Li Baozhi, Gao Yunbao, et al. Effects of different casting processes on the microstructure of oxide dispersion strengthened (ODS) steel [J]. Foundry, 2026, 75 (8) : 936-942.

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^[1-3]。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^[4-5]。

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^[6]。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, 通过机械合金化实现 Y_2O_3 颗粒的均匀弥散, 再经烧结致密化成形, 具有制备工艺稳定、颗粒分散效果好等优点^[7-8]。真空电弧熔炼-原位反应 (VAR-ISR) 法则通过熔炼过程中原料的原位化学反应生成 Y_2O_3 颗粒, 可减少颗粒团聚, 提升颗粒与基体的结合强度, 但反应过程控制难度较大^[9-10]。选择性激光熔化 (SLM) 作为一种新兴的增材制造技术, 凭借快速凝固和逐层堆积的特点, 能够制备复杂形状的ODS钢部件, 同时细化晶粒, 但存在熔池凝固不均、易产生孔隙和残余应力等问题^[11-12]。

传统粉末冶金工艺存在流程长、成本高、规模化受限等问题, 液态金属法以近净成形、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。湿混合-熔炼协同工艺可有效降低杂质污染, Kim等将硝酸钇溶液与316L不锈钢粉末湿混合后熔炼, 试样中的氧化物粒径细化至20 nm, 屈服强度提升18%^[13]。真空电弧重熔 (VAR) 技术为氧化物稳定弥散提供热力学条件, Borts团队通过阴极电极填充氧化钇纳米粉, 经VAR工艺使颗粒分布均匀度提升45%, 晶粒尺寸从80 μm 细化至35 μm ^[14]。前驱体辅助铸造 (PACT) 与电弧熔丝增材制造 (WAAM) 聚焦大尺寸构件制备, PACT工艺通过氧化物前驱体原位反应生成高密度纳米含Y氧化物, Fe-Cr基ODS钢800 $^{\circ}C$ 蠕变强度较传统铸造钢提升3倍; WAAM技术已成功制备500 mm $\times$ 300 mm $\times$ 200 mm厚壁构件^[15]。氧载体辅助熔炼则解决直接添加 Y_2O_3 的团聚问题, Lee等引入 TiO_2 作为氧载体, 原位生成15~30 nm的Y-Ti-O粒子, 室温抗拉强度提升40%^[16]; 国内学者通过成分调控, 使氧化物留存率提升25%, 显微硬度达HV320^[17]。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。

尽管现有研究已对粉末冶金法制备ODS钢的工艺与性能进行了大量探讨, 但针对通过不同铸造工艺制备ODS钢的系统性对比研究仍较为匮乏, 关于不同铸造工艺下纳米 Y_2O_3 颗粒的形成机制、弥散规律及对材料性能的调控机制尚未完全明确, 导致难以根据实际应用需求合理选择制备工艺^[18-19]。特别是对于液态金属法这类传统制备技术, 其工艺参数优化、氧化钇颗粒在熔体中的生成与弥散机制, 以及与传统工艺的性能差异等仍需深入研究; 同时, 氧化物冶金理念与ODS钢制备工艺的深度融合、不同氧化钇添加方法对材料组织性能的调控规律等, 也有待进一步厘清。此外, 如何通过液态金属法工艺优化实现ODS钢制备, 仍是当前研究的重点与难点。

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铸造法) 四种具有代表性的方法制备 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试验支撑。

1 试验材料与方法

1.1 试验方法

(1) 直接浇注法制备ODS钢。查阅文献可知, 氧化物密度较低, 在向钢液添加过程中容易上浮, 本试验设计使用金属型铸型加强冷却, 使钢液快速凝固, 氧化物在凝固过程中留在钢中而不是上浮到钢液表面。

本试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, 使氧化钇粉与钢液在浇口处混合并一同进入到金属型腔, 等待冷却后打箱取出试样, 最终得到 $\phi 90$ mm $\times$ 300 mm的ODS钢圆柱试样。

(2) 混流搅拌法制备ODS钢。考虑氧化物与钢液润湿性差, 接触角大于 90° , 氧化物颗粒不易与钢液结合, 通过设计混流流道, 让钢液对冲形成漩涡, 加强氧化物颗粒与钢液的搅拌。本试验在直接浇注法的基础上, 采用特制的经过流道设计的3D打印浇口杯, 以强化钢液与 Y_2O_3 粉体的混合效果。将纳米级 Y_2O_3 粉体预置于定制浇口杯内, 浇口下方匹配与直接浇注法中相同的金属型圆柱锭模具; 中频炉熔化碳钢后出钢浇注, 浇注时打开 Y_2O_3 粉体下方隔板使其落下并与钢液接触后混匀。待钢锭完全冷却后脱模取出, 得到与直接浇注法相同尺寸的试样。

(3) 型底包埋法制备ODS钢。氧化物与钢液界面

能非常高,氧化物颗粒在与钢液混合后容易因与流道壁结合而在流道偏聚析出,因此更换一种搅拌方式,让氧化物与钢液在型腔内部混合均匀,避免氧化物从钢中损失。本试验为防止氧化物上浮,加强氧化物与钢液结合,将粒径20~50 nm Y_2O_3 粉体与1 000目铁粉进行机械混合后,经球磨工艺制备成复合粉体。用厚度为0.01 mm的钢纸把复合粉体包裹成大小均匀的小球,均匀预置于金属型圆柱锭模具内腔底部。采用自上而下的浇注方式将钢液注入预置小球的型腔,直至完全充型。待钢锭完全冷却后脱模取出得到试样。

(4) 真空实型铸造法(V-EPC铸渗法)制备ODS

钢。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,改善钢液对氧化物颗粒的润湿与结合。根据经验,设计了一种新型预埋一体化流道结构,将纳米 Y_2O_3 粉预埋在砂型独立腔室内,腔室下方与流道贯通连接,钢液流动过程将 Y_2O_3 颗粒裹挟进流道从而带入型腔,完全充型后冷却脱模取出得到试样。

为更清晰地说明本研究中四种试验方法,将试验方法和参数进行比较。具体参数与试验示意图如图1所示,四种方法均采用3D打印的砂型浇口杯。

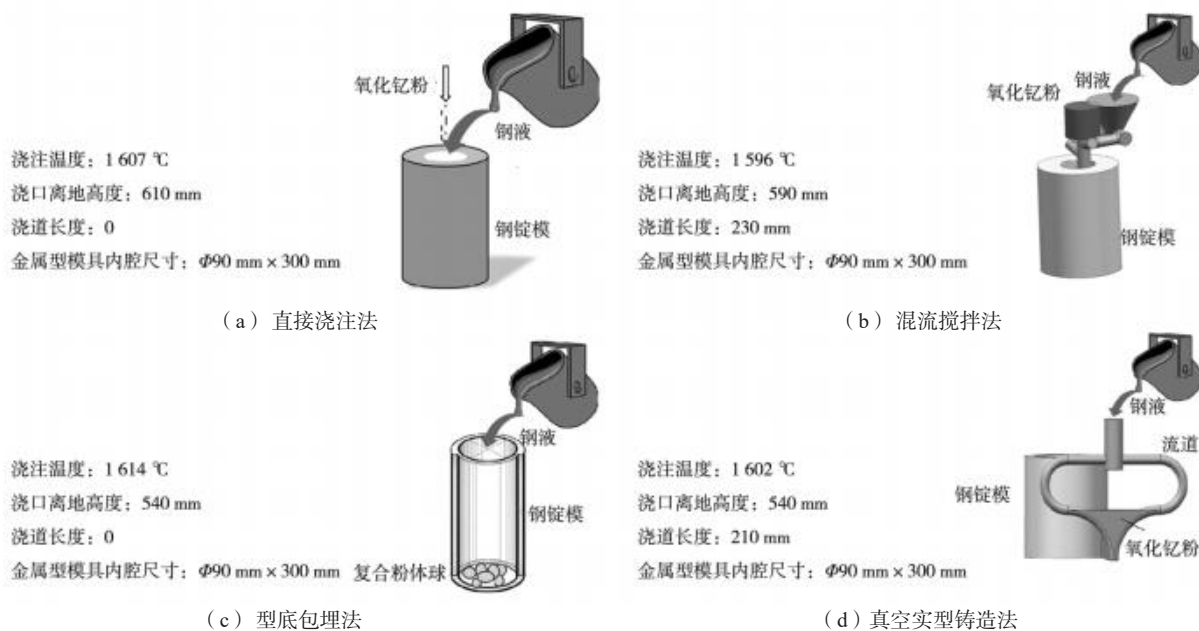


图1 试验方法和参数的比较

Fig. 1 Comparison of the experimental methods and parameters

1.2 试验原料及表征方法

本试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,向试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。

采用ZEISS AXIOVert.A1倒置金相显微镜观察样品表面形貌,采用X射线衍射仪(XRD, Cu K α 辐射, $\lambda=0.154\ 06 \text{ nm}$,扫描范围 $20^\circ \sim 80^\circ$,扫描速

度 $5^\circ/\text{min}$)分析样品的物相组成;采用Zeiss EVO MA25扫描电子显微镜(SEM,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。

2 结果与讨论

2.1 不同制备方法 ODS 钢的物相组成

图2为四种方法制备ODS钢的XRD图谱。由图可知,四种样品的XRD图谱中均出现了明显的 α -Fe相特征衍射峰($2\theta=44.34^\circ$ 、 64.50°),未检测到明显的 Y_2O_3 相特征衍射峰,这可能是由于 Y_2O_3 颗粒尺寸细小、含量较低,且均匀弥散分布于基体中,导致其衍射信号被 α -Fe相的强衍射峰掩盖。此外,XRD图谱中还出现Mn $0.35\text{Fe}0.65$ 相,表明四种制备方法均能实现各组分的

表1 试验用碳钢元素成分

Tab. 1 Elemental composition of the carbon steel for the experiment $w_B/\%$

C	Si	Mn	P	S	Cr	Al	Fe
0.3	0.05	0.48	0.014	0.007	0.078	0.023	余量

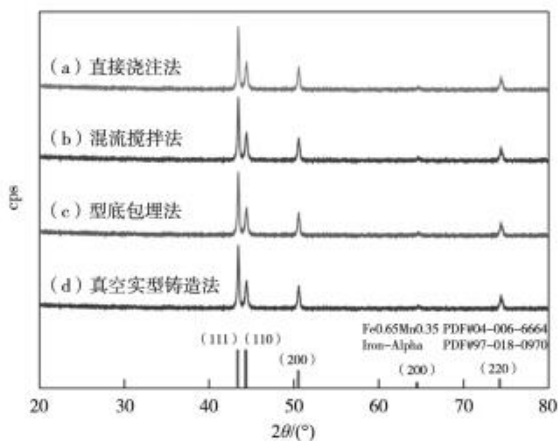


图2 ODS钢的XRD图谱

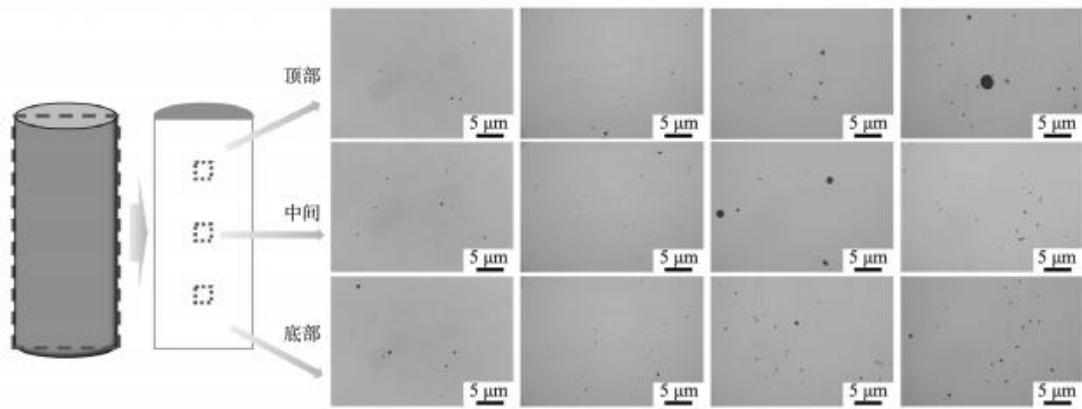
Fig. 2 XRD patterns of the ODS steels

均匀混合与反应, 制备出成分纯净的ODS钢。

2.2 不同制备方法 ODS 钢的微观形貌

图3为四种方法制备ODS钢的金相照片。图3(a)中基体未见明显的裂纹、气孔、严重晶界氧化等缺陷。从放大的细节可见, 图中存在多个直径约为2 μm的球形或类球形颗粒, 为D类夹杂物或DS类夹杂物, 可能是炼钢脱氧过程中残留的内生氧化铝夹杂, 或是加入的氧化钇粉发生团聚形成的大尺寸外生夹杂物。部分圆球形底部虚焦并存在反光, 推断是氧化物粒子

在制样抛光过程中脱落留下的凹坑。图3(b)中显微组织以大面积亮灰色的铁素体相为主。在基体上弥散分布着大量黑色点状、线状及不规则形态的异质析出物, 夹杂物可分为B类夹杂物、A类夹杂物和DS类夹杂物。推测夹杂物的成分, 一部分来源于炼钢过程中脱氧阶段生成的 Al_2O_3 、 SiO_2 和 MnO 等内生氧化物夹杂物, 这类夹杂物因未完全上浮去除而残留于基体中; 另一部分来源于钢液S元素与Mn、Fe等元素反应形成 MnS 、 FeS 等硫化物夹杂物。图3(c)中除观察到上述黑色球状夹杂物及少量脱落凹坑外, 黑色球状夹杂物内部可清晰辨识出灰色不规则形状的内嵌包裹物。该包裹物尺寸为0.5~2 μm, 轮廓不规则、与外层黑色基体形成清晰界面, 且在球状夹杂物中呈随机分布状态。图3(d)中, 第二相颗粒未实现均匀弥散分布, 而是表现出“局部团聚+零散分布”的混合状态。部分颗粒以簇状形式团聚, 局部区域形成由5~10个单颗粒组成的8~12 μm的簇状聚集体, 其余区域为孤立颗粒的随机分散。这一分布特征表明第二相在基体相中的分散均匀性处于一般水平。从尺寸特征分析, 第二相颗粒的等效直径主要集中在1~5 μm范围内, 且颗粒尺寸呈现一定程度的波动性, 最小尺寸可达亚微米级, 最大尺寸约5 μm。同时, 颗粒的几何形态无显著的规则性, 整体呈现不规则的多面体或类球形轮廓。



(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

图3 不同方法试制ODS钢的金相照片

Fig. 3 Metallographic photos of the ODS steels produced by different methods

通过标准金相研磨、抛光并使用硝酸酒精腐蚀液进行显微组织检测, 如图4所示, 可以清晰地观察到, 试制的ODS钢的铸态组织整体呈现出典型的等轴铁素体(α -Fe)基体特征。视场内晶界清晰连续, 且未观察到明显的非金属夹杂物沿晶界呈连续网状分布的恶性缺陷。与未添加氧化物颗粒的同成分空白铸锭相比, 添加 Y_2O_3 后的铸态组织在结晶形貌上出现了细化

趋势, 一次枝晶与二次枝晶间距被大幅度压缩。符合异质形核理论。由于 Y_2O_3 陶瓷颗粒的熔点高达2 425 ℃, 在整个浇注与合金凝固区间(约1 300~1 500 ℃), 其始终保持稳定的固态颗粒态。当液态金属降温处于过冷状态、系统自由能满足形核条件时, 大量弥散悬浮的极细小 Y_2O_3 颗粒充当了现成的、无需极高表面能势垒的非自发形核核心。

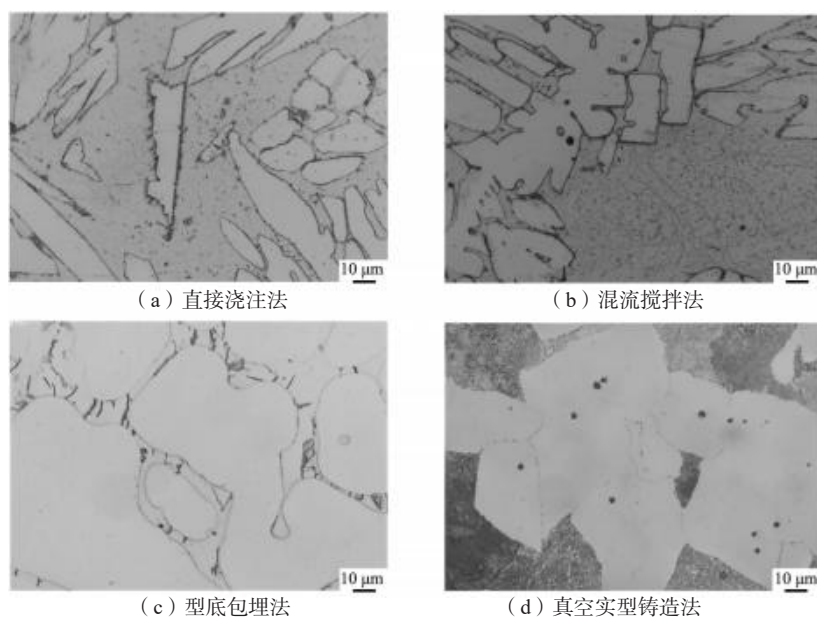


图4 不同方法试制ODS钢的金相照片

Fig. 4 Metallographic photographs of the ODS steels produced by different methods

2.3 不同制备方法 ODS 钢的显微组织与 Y_2O_3 颗粒分布

图5为四种方法制备ODS钢的微观形貌，图6为四种方法制备ODS钢的元素分布。直接浇注法样品中存在着直径超200 μm 的巨型夹杂物，如图5(a)所示。该夹杂物尺寸庞大且结构致密，在制样过程中未发生破碎，据此可排除其为脱氧过程中内生的氧化铝夹杂或氧化钇(Y_2O_3)添加过程中团聚形成的夹杂物，能量色散谱(EDS)分析表明，如图6(a)所示，该夹杂

物主要含有 O、Si、Mn、Cr和Y 等元素。结合成分特征与制备工艺分析，推测其形成机制如下：浇口在浇注过程受侵蚀剥落产生的砂粒，或氧化钇添加过程中混入的砂粒进入钢液后，借助钢液的表面张力作用，使体系中的氧化钇颗粒及钢中原有第二相粒子吸附并聚集于砂粒表面；随后，聚集的粒子与砂粒中的二氧化硅(SiO_2)发生界面反应，通过反应-长大过程最终形成含钇复合氧化物相。说明可以通过浇注过程直接添加氧化钇(Y_2O_3)，实现其在钢基体中的有效引入。但实现其在钢液中均匀弥散是铸造制备ODS钢的

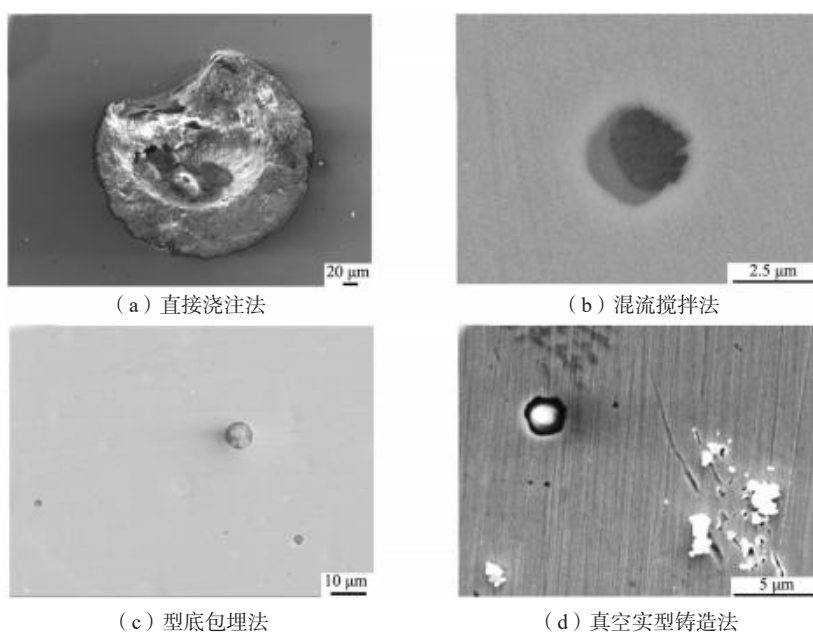


图5 ODS钢的微观形貌

Fig. 5 Microscopic morphologies of the ODS steels

核心技术难题。

混流搅拌法制备的样品中夹杂物为规则球状,如图5(b)所示,根据其颗粒形态推测夹杂物是氧化钇团聚块的可能性不大,是氧化铝夹杂的可能性较大。EDS结果显示,未检测到Y元素分布,如图6(b)所示,球状夹杂物为氧化铝夹杂。

型底包埋法制备的样品截面同样较为致密,光学显微镜下可观察到两类典型形貌特征:其一为尺寸2~8 μm 的球状夹杂物,颗粒边界光滑、形貌规整,无明显团聚现象;其二为直径5~10 μm 的圆形凹坑,凹坑内壁平整、边缘无撕裂痕迹,如图5(c)所示。结合制备工艺分析,该类凹坑应为抛光过程中部分球状夹杂物与基体结合力较弱,受机械力作用脱落所致, Y_2O_3 颗粒团聚形成的夹杂物较为松散,不存在被大量

完整抛掉的情况,EDS分析显示夹杂物区域未检测到Y元素信号,Mn、S、Si和O元素集中分布,推断夹杂物主要成分为MnS与 SiO_2 ,如图6(c)所示。

真空实型铸造法制备的样品截面组织均匀致密,无明显孔隙和裂纹,基体晶粒细小且边界清晰,第二相颗粒未实现均匀弥散分布,而是表现出“局部团聚+零散分布”的混合状态,如图5(d)所示;EDS能谱分析显示,Y元素在基体中均匀分布,未出现明显的富集区域,表明 Y_2O_3 颗粒弥散效果优异, Y_2O_3 颗粒的等效直径约2 μm 。 Y_2O_3 颗粒以离散分布+局部聚集的形式存在,图中可见左侧存在单个独立颗粒,右侧区域存在由2~3个颗粒组成的小尺寸聚集体,但未形成大面积团聚,如图6(d)所示。颗粒未实现全区域均匀弥散,局部区域存在轻微聚集。

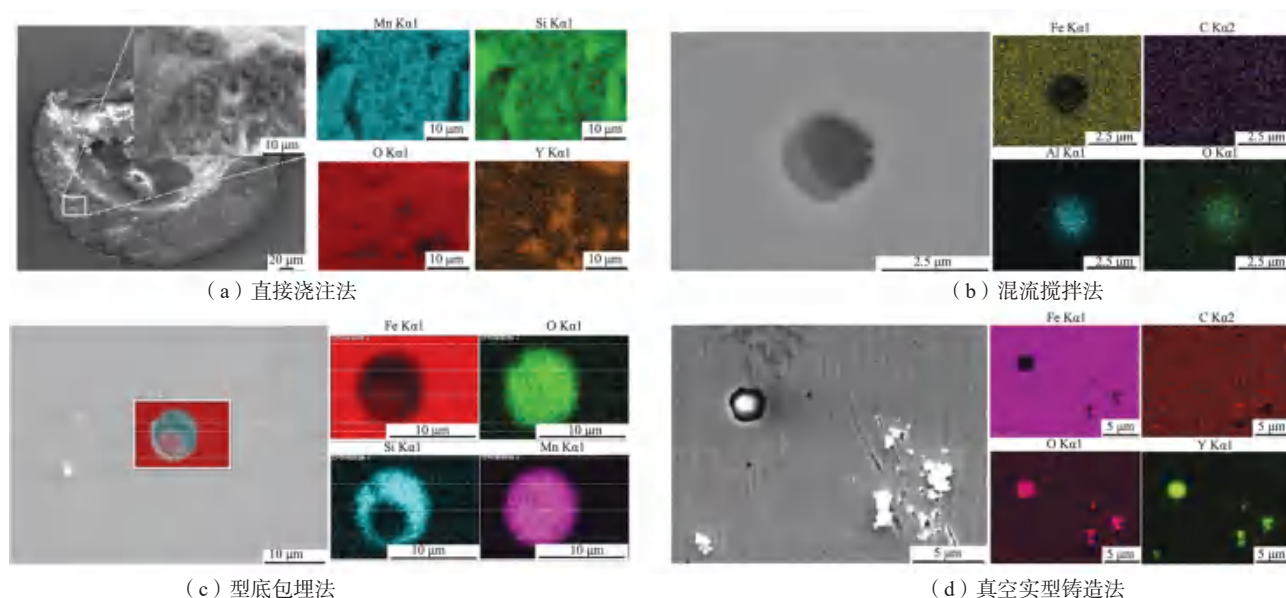


图6 ODS钢中元素分布

Fig. 6 Element distributions of the ODS steels

2.4 制备方法对 ODS 钢的影响机制

综合以上试验结果,分析不同制备方法对ODS钢的晶粒尺寸、 Y_2O_3 颗粒的尺寸与分布状态及内部缺陷的影响。

Y_2O_3 与钢液之间的界面能非常高,润湿性极差,氧化物颗粒易团聚、难分散。这是铸造法制备ODS钢最大的难题。直接浇注法在浇注过程中直接将 Y_2O_3 粉末加入钢液,证实了铸造法直接添加 Y_2O_3 的可行性,Y元素成功进入基体。但试验中出现大型复合夹杂物(直径>200 μm)。机制在于浇注过程中混入浇注环境中的砂粒充当了异质核心,钢液表面张力促使 Y_2O_3 颗粒及其他夹杂物吸附、聚集在砂粒表面,发生界面反应形成含钇复合氧化物。混流搅拌法利用搅拌方式使 Y_2O_3 与钢液混合,最终样品中未检测到Y元素分布。

搅拌过程可能未能有效将 Y_2O_3 颗粒分散并保留在钢液中。型底包埋法将含 Y_2O_3 的粉末预先置于型腔底部,通过钢液浇注时的冲击和流动使其卷入。Y元素同样未被检测到,表明 Y_2O_3 并未有效分散在基体中。单纯依靠浇注冲击力难以将型底的粉末打散并均匀分布到整个钢液中,且粉末可能被钢液表面氧化膜或早期凝固层阻隔,无法有效结合。真空实型铸造法在局部创造真空环境,Y元素在基体中均匀分布, Y_2O_3 颗粒呈现“离散分布+局部聚集”的混合状态,存在由2~3个颗粒组成的小尺寸聚集体,但无大面积团聚。颗粒等效直径约2 μm ,弥散效果优异。

表2对四种不同制备方法对ODS钢的影响机制进行了对比。本研究为ODS钢的低成本制备工艺选择提供了参考。

表2 制备方法对ODS钢的影响机制对比
Tab. 2 Comparison of the influence mechanisms of preparation methods on the ODS steels

制备方法	添加方式	影响机制	Y ₂ O ₃ 弥散效果	主要问题/缺陷
直接浇注法	直接添加	裹渣-团聚耦合失效	Y元素存在，但易聚集	浇口处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	型腔内混流搅拌衰减	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	动能冲击-短程捕获失效	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	负压界面脱气+强湍流剪切破碎	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

3 结论

（1）本试验采用铸造的方式实现了Y₂O₃颗粒在钢中分散，通过真空负压与异型混流浇道的协同作用，有效抑制了颗粒团聚，验证了铸造法实现Y₂O₃颗粒均匀弥散的可行性。

（2）Y₂O₃能否在钢中实现弥散分布，其关键不在

于冷却速度或搅拌强度，而在于颗粒-钢液界面的化学反应和产物，其中钢液表面氧化膜导致颗粒融合。

（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”纯净两相界面，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] 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) : 78-89.

[2] Ozerskoi N, Volokitina E, Razumov N, et al. Mechanical properties of ODS steel fabrication by mechanical alloying and sparking plasma sintering [J]. AIP Conference Proceedings, 2024, 3154: 020029.

[3] 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.

[4] Liang T, Liu J, Zhan C, et al. Effect of yttrium oxide on microstructure and oxidation behavior of Cr/FeCrAl coatings fabricated by extreme high-speed laser cladding process: an experimental approach [J]. Materials, 2025, 18: 1821.

[5] 谢锐, 吕铮, 王晴, 等. 纳米Y₂O₃含量对9Cr-ODS钢微观组织及力学性能的影响 [J]. 材料导报, 2022, 36 (增刊2) : 356-362.

[6] Wang X, Yin Z, Shen X. Research progress of ODS FeCrAl alloys—a review on preparation, microstructure, and properties [J]. Crystals, 2026, 16 (1) : 23.

[7] 华中科技大学. 一种基于机械合金化高效制备ODS钢的方法及其产品: 202210305940.6 [P]. 2022-07-12.

[8] Peng Y, Yu L, Liu Y, et al. Microstructures and tensile properties of an austenitic ODS heat resistance steel [J]. Materials Science & Engineering A, 2019, 767: 138419.

[9] Im H T, Kwak R H, Park S M, et al. Effect of Y₂O₃ content on microstructure and mechanical properties of ODS Ti-6Al-4V alloys fabricated by in situ atomization and SPS [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2025, 38: 1563-1572.

[10] Borts V B, Korotkova M I, Lopata T O, et al. Method of solid-phase welding of austenitic and oxide-dispersion-strengthened steels [J]. Materials Science, 2017, 53 (2) : 165-170.

[11] Zhang S, Li F, Wang Y, et al. Study on forming process and microstructure of FeCrAl-ODS alloy by selective laser melting [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2025, 35: 1369-1376.

[12] 杨国平, 廖洪彬, 张龙, 等. SLM工艺参数对SLMed ODS-CLF-1钢组织和显微硬度的影响研究 [J]. 核聚变与等离子体物理, 2025, 45 (3) : 301-309.

[13] Ho M K, Jin H R, Soo S K, et al. Fabrication and characterization of ODS 316L stainless steels [J]. Journal of Korean Powder Metallurgy Institute, 2009, 16 (2) : 122-130.

[14] Borts V B, Vanzha A F, Korotkova M I, et al. Research opportunities casting of oxide dispersion strengthened (ODS) steels by the method of vacuum arc re-melting [J]. Problems of Atomic Science and Technology, 2014, 92 (4) : 117-124.

[15] Mao X, Jiang Y, Li T, et al. Current progress of innovative manufacturing technologies on ODS steels [C]//ICFRM-21 Proceedings, 2023.

[16] Amin M M, Mahmoud N, Farsad F, et al. Development of an oxide-dispersion-strengthened steel by introducing oxygen carrier compound into the melt aided by a general thermodynamic model [J]. Scientific Reports, 2016, 6 (1) : 38621.

[17] 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) : 397-403.

[18] Wang J, Liu S, Xu B, et al. Research progress on preparation technology of oxide dispersion strengthened steel for nuclear energy [J]. International Journal of Extreme Manufacturing, 2026, 8 (2) : 022003.

[19] 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) : 126.