

稀土硅铁对消失模铸造的45钢合金组织性能的影响

王佳一 李鑫 满宁 樊江磊 魏世忠

(郑州轻工业大学机电工程学院, 郑州 450002)

摘要 采用消失模铸造工艺生产45钢铸件,分析了稀土硅铁合金添加量对铸件微观组织与力学性能的影响。结果表明,稀土硅铁合金的加入提高了熔体的形核率,且铸件平均晶粒尺寸随稀土硅铁含量增加明显细化。同时,稀土元素的引入有效改善了铸件应力分布状态,降低了应力集中程度。随稀土硅铁含量的增加,铸件的平均硬度及力学性能均显著提升。

关键词 消失模铸造;45钢;稀土硅铁;微观组织;力学性能

中图分类号 TG249.6

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.Y20250013

Influence of Rare Earth Silicoferrite on Microstructure and Properties of 45 Steel Fabricated by Lost Foam Casting

WANG Jiayi, LI Xin, MAN Ning, FAN Jianglei, WEI Shizhong

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002)

Abstract: The influence of rare earth silicoferrite alloy on microstructure and mechanical properties of 45 steel castings fabricated by lost foam casting was investigated. The results indicate that the addition of rare earth silicoferrite alloy significantly improves the nucleation rate of melt, and average grain size of casting is significantly refined with the increase of alloy addition. Meanwhile, the introduction of rare earth elements effectively enhances the stress distribution state of castings, reducing the degree of stress concentration. With the increase of rare earth silicoferrite content, the average hardness and mechanical properties of castings are significantly improved.

Key Words: Lost Foam Casting, 45 Steel, Rare Earth Silicoferrite, Microstructure, Mechanical Properties

45号钢作为典型的中碳合金钢,其优异的强度、韧性、良好的耐磨性以及出色的加工性能,在机械制造领域,尤其是船舶、建筑等工业中得到广泛的应用^[1-3]。然而,在铸件生产过程中,冷却速度的空间差异性和材料的相变特性导致铸件内部出现显著的组织不均匀性,进而影响力学性能^[4-5],严重制约了45号钢在关键承力部件中的应用。目前,研究者提出了控制冷却速率、调整合金成分以及添加晶粒细化剂^[6]等优化方案,以期改善铸件的组织均匀性^[7]。然而,在实际工业生产中,精确控制冷却速率和调整合金成分往往面临技术难题和经济成本的双重限制,这使得晶粒细化剂的应用成为最具可行性的解决方案之一。

稀土元素作为有效的晶粒细化剂,在改善合金微观组织和提升力学性能方面展现出独特优势^[8]。研究表明,稀土硅铁的添加能够显著细化铸件的晶粒尺寸,改善夹杂物形态,并提高材料的综合力学性能^[9-10]。然

而,目前关于稀土硅铁对铸件组织性能影响的研究仍存在明显不足,关于稀土硅铁添加量(特别是0.15%与0.35%,质量分数,下同)对铸件组织和性能的定量影响尚未明晰,严重制约了稀土微合金化技术在铸件生产中的推广应用。

基于此,本研究以45号钢为对象,采用消失模铸造工艺^[11-12]制备不同稀土硅铁含量(0%, 0.15%和0.35%)的45号钢铸件。通过系统的微观组织表征和力学性能测试,深入研究稀土硅铁含量对铸件组织演变规律和力学性能的影响,旨在为稀土微合金化技术在铸件生产中的应用提供理论依据,为开发低合金高强度优质钢材提供参考。

1 试验材料与方法

采用工业纯铁块(98.634%,质量分数,下同)、高纯石墨块(0.46%)、商用稀土硅铁合金粉末制备了不同稀

收稿日期:2025-05-28;修订日期:2025-07-11

基金项目:河南省自然科学基金资助项目(252300421576);河南省科技攻关资助项目(242102230069,252102231029);郑州轻工业大学博士科研基金资助项目(2024BSJJ003)

第一作者:王佳一,男,2001年出生,硕士研究生,E-mail:1598422952@qq.com

引用格式:王佳一,李鑫,满宁,等. 稀土硅铁对消失模铸造的45钢合金组织性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2026,46(7):1101-1106.

WANG J Y, LI X, MAN N, et al. Influence of rare earth silicoferrite on microstructure and properties of 45 steel fabricated by lost foam casting [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2026, 46(7): 1101-1106.

土硅铁含量(0%, 0.15% 和 0.35%)的45号钢,其成分分别见表1和表2。通过消失模铸造法,采用EPS泡沫模型(密度为 25 kg/m^3)浸涂铝矾土基涂料(厚度为 $1.0 \sim 1.2 \text{ mm}$),干燥后填入石英砂并振动紧实。采用中注式浇注系统,浇注温度为 1600°C ,收缩率约为 5.2% ,收缩质量(体积)为 32.44 kg ,浇注出3个铸件,分别加入不同含量的稀土硅铁,浇注完成后自然冷却脱模。

表1 45号钢的化学成分

Tab.1 Chemical composition of 45 steel %								
w_B								
C	Si	Mn	Mo	Al	Cr	Ni	Cu	Fe
0.46	0.199	0.606	0.001	0.000 1	0.065	0.033	0.012	98.634

表2 稀土硅铁的化学成分

Tab.2 Chemical composition of rare earth silicoferrite %			
w_B			
Si	RE	Ca	Fe
50.35	30.2	2.5	16.95

从铸件心部至中部再到边面依次取样,见图1,分别用红、蓝、黑依次代表心部、中部、边部。使用DK7720快走丝电火花线切割机从合金铸件上切取试样制成金相试样,采用热镶嵌法对试样进行镶嵌。镶嵌后的试样依次经180、400、800、1 000、1 500、2 000及3 000目的砂纸进行逐级打磨。在抛光机上使用绒布配合粒度为 1.5 、 1.0 和 $0.5 \mu\text{m}$ 的金刚石抛光膏抛光至试样表面无划痕。每次更换砂纸或抛光介质前后,均使用无水乙醇对试样进行清洗,以彻底去除表面残留磨粒。采用王水腐蚀试样,利用BM-4XAI金相显微镜(OM)进行组织观察,结合ImageJ软件利用截点法统计

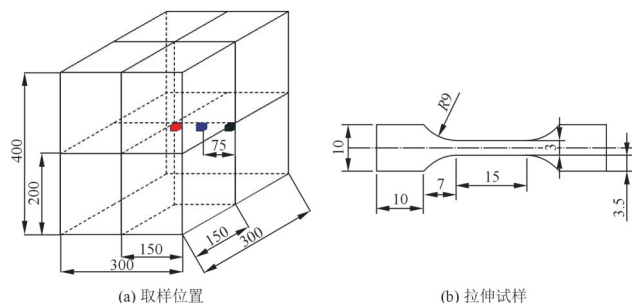


图1 铸件取样位置和拉伸试样的示意图

Fig.1 Sampling position of casting and Schematic diagram of tensile specimen

晶粒尺寸。采用Phenom XL扫描电镜(SEM)及能谱分析(EDS)进行断口形貌及组织观察分析。使用DNS-100型电子万能试验机测试合金拉伸性能,试样尺寸示意图见图1b,厚度为 1.4 mm ,应变速率为 0.001 s^{-1} ,每组试样测3次结果取平均值。采用威尔逊600MRD-DE834洛氏硬度测量仪对试样进行硬度测试,加载载荷为 60 N ,保压时间为 12 s ,每个试样测试12次,取平均值。

2 稀土硅铁含量对铸件微观组织的影响

不同含量稀土硅铁和45号钢合金铸件不同位置的显微组织形貌见图2~图4。可以发现,随稀土硅铁含量增加,铸件从心部至边部各区域的晶粒细化程度均显著提高。这主要归因于稀土元素(如La、Ce、Pr等)在钢铁凝固过程中的多重作用机制。从热力学角度分析,稀土元素的添加能够显著改变Fe-C相图特征,降低液相线温度并扩大固液两相区温度范围。研究表

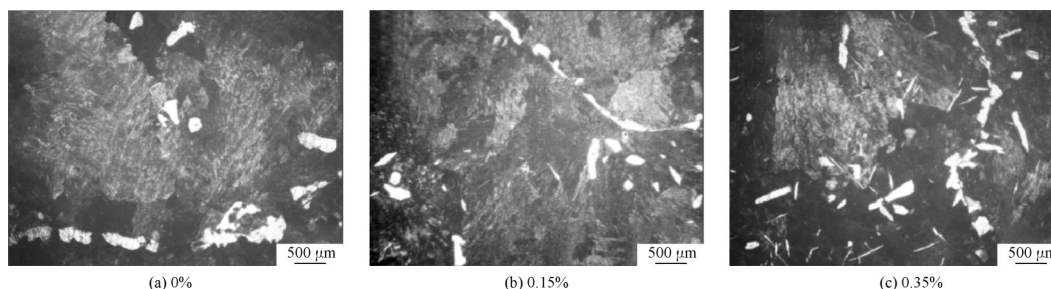


图2 不同含量稀土硅铁铸件心部微观组织

Fig.2 Microstructure of castings at the core with different rare earth silicoferrite contents

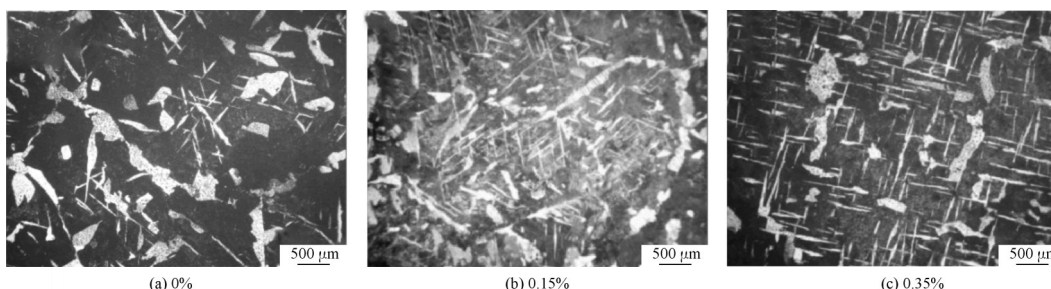


图3 不同含量稀土硅铁铸件中部微观组织

Fig.3 Microstructure of castings at the middle zone with different rare earth silicoferrite contents

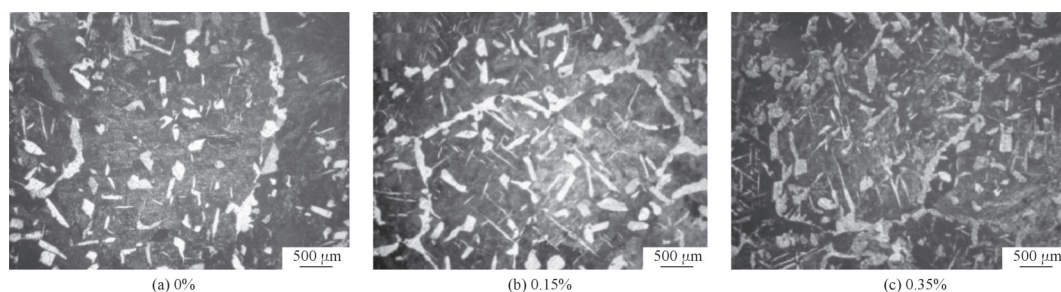


图4 不同含量稀土硅铁铸件边部微观组织

Fig.4 Microstructure of castings at the edge with different rare earth silicoferrite contents

明,稀土元素的加入可使Fe-C合金的共晶点向左下方移动,这种改变有利于增加凝固过程中的形核驱动力^[13]。其次,稀土元素具有优异的异质形核能力,其与钢水中存在的夹杂物相互作用,形成复合夹杂物,这些夹杂物可作为有效的形核基底,显著提高形核率。从动力学角度考虑,稀土硅铁的加入能够与钢水中的其他合金元素(如Mn、Ti、Nb等)形成(RE,M)C、(RE,M)N等复合碳氮化物。这些高熔点化合物在凝固初期即可形成,为晶粒形核提供大量有效基底。此外,稀土元素具有较高的化学活性,能够降低固液界面能,提高形核速率。根据经典形核理论,形核速率 I 可表示为:

$$I = I_0 \exp[-\Delta G^*/(KT)] \quad (1)$$

式中, I_0 为形核常数,为体系内可参与形核的原子团数量; K 为玻尔兹曼常数; T 为钢水的绝对温度; ΔG^* 为形核功,稀土元素的加入可显著降低 ΔG^* 值,从而提高形核速率^[14]。

在晶粒生长阶段,稀土元素通过表面活性效应在晶界偏聚,降低晶界能,抑制晶粒粗化。这种作用在凝固后期尤为明显,可有效阻碍晶粒的异常长大。图5为不同含量稀土硅铁铸件晶粒尺寸对比。可以看出,与未添加硅铁的相比,添加0.15%稀土硅铁可使铸件心部铁素体晶粒尺寸由232.62 μm减小到195.74 μm,中部晶粒尺寸由228.17 μm减小到190.18 μm,边部晶粒尺寸由191.05 μm减小到173.07 μm;添加0.35%稀土硅铁进一步使晶粒尺寸由195.74 μm减小到

153.97 μm,减小了约25%,中部晶粒尺寸由190.18 μm减小到147.65 μm,减小了约25%,边部晶粒尺寸由173.07 μm减小到130.12 μm,减小了约20%。这种晶粒细化效果显著改善了铸件的组织均匀性。

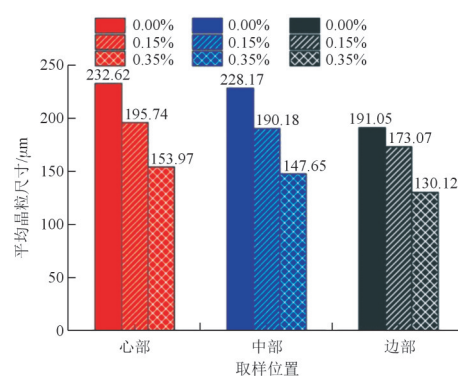


图5 不同含量稀土硅铁铸件晶粒尺寸对比

Fig.5 Grain size comparison of castings with different rare earth silicoferrite contents

通过扫描电镜(SEM)对不同稀土硅铁含量的45号钢心部组织进行微观结构观察,见图6。可以看出,随稀土硅铁含量增加,珠光体组织明显细化。采用ImageJ软件对不少于20个典型珠光体片层进行系统测量统计,结果显示,0.0.15%和0.35%稀土硅铁含量试样平均片层间距分别为(0.96±0.06)、(0.68±0.12)和(0.24±0.08) μm。

图7为0.15%和0.35%稀土硅铁含量试样心部区域Ce元素EDS面扫描分析。结果显示,0.35%稀土硅铁含量试样中Ce局部含量显著高于0.15%含量试样,证实了

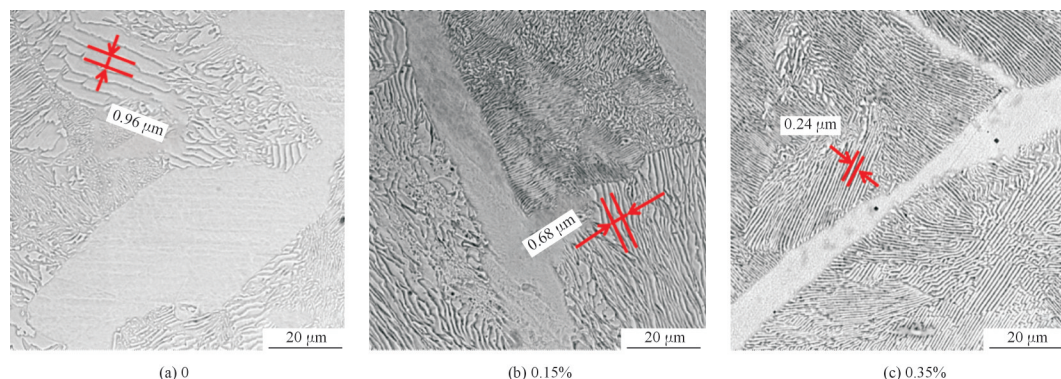


图6 不同含量稀土硅铁铸锭心部SEM组织

Fig.6 SEM microstructure of ingots at the core with different rare earth silicoferrite contents

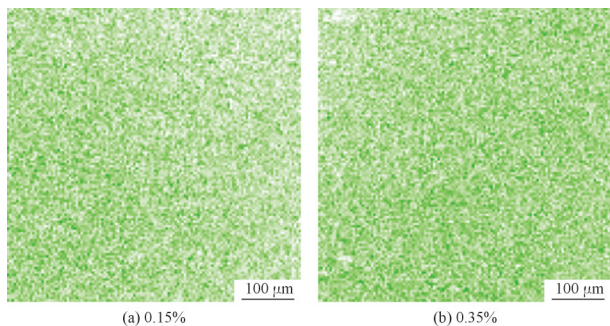


图7 0.15%和0.35%含量稀土硅铁铸锭心部Ce面扫描
Fig.7 Ce mapping of ingots at the core with rare earth silicoferrite content of 0.15% and 0.35%

稀土添加量的提升增大了Ce在基体中的固溶度。

3 稀土硅铁含量对铸件力学性能的影响

3.1 硬度

不同稀土硅铁含量的45号钢合金铸件的洛氏硬度测试结果见图8。可以发现,铸件硬度与稀土硅铁含量呈现显著的正相关关系。当稀土硅铁含量达到0.35%时,铸件心部位置的硬度(HRA)为53.43,较添加0.15%含量稀土硅铁的试样(49.60)提高了约10%,较无稀土硅铁试样(47.82)提高了约13%。这一强化效应主要源于稀土硅铁的多重作用机制。稀土硅铁的添加显著细化了铸件的晶粒尺寸,晶粒细化导致晶界密度增加,这些晶界能有效阻碍位错运动,从而提高材料的强度和硬度^[15]。同时,细晶组织。结果表明,添加0.35%稀土硅铁可使晶粒尺寸减小约35%,相应地提高了材料的硬度。

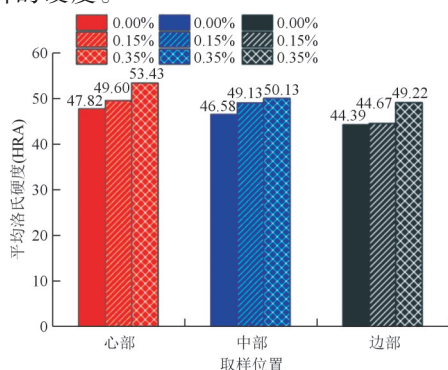
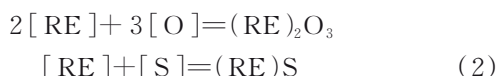


图8 不同含量稀土硅铁铸件洛氏硬度对比
Fig.8 Rockwell hardness comparison of castings with different rare earth silicoferrite contents

从净化作用角度考虑,稀土元素与钢水中的O、S等杂质元素发生如下反应:



这些高熔点稀土化合物(如 RE_2O_3 、 $(\text{RE})\text{S}$ 等)的密度低于钢水,易于上浮至钢水表面形成渣相,从而显著

降低了钢中杂质含量^[16]。试验结果显示,添加0.35%稀土硅铁可使钢中O含量降低约60%,S含量降低约50%^[17]。这种净化作用有效改善了钢的纯净度,减少了杂质对力学性能的不利影响。此外,稀土元素能够改变夹杂物的形态和分布特征。稀土元素的加入使MnS等脆性夹杂物由长条状转变为球状^[18],且分布更加均匀。这种形态转变可显著降低应力集中系数,提高材料的承载能力。根据夹杂物应力集中理论,球状夹杂物的应力集中系数 K_t 可表示为:

$$K_t=1+2(a/b) \quad (3)$$

式中, a/b 为夹杂物的纵横比。稀土处理使 a/b 趋近于1,显著降低了 K_t 值,从而提高了材料的硬度和强度。

3.2 力学性能

不同稀土硅铁含量的45号钢应力-应变曲线见图9,力学性能数据见表3。可以发现,铸件的应力-应变行为均表现出典型的弹塑性变形特征,力学性能随稀土硅铁含量增加而显著提高。图10为不同含量稀土硅铁铸件心部力学性能对比。可以看出,稀土硅铁含量增加,试样强度提高,而伸长率依次为8.5%、10%和15.17%,添加稀土硅铁(0.15%与0.35%)的试样伸长率比不添加稀土硅铁(0%)的高,且与自身强度成反比,即抗拉强度越高,伸长率越低,这主要归因于稀土硅铁的多重强化机制。

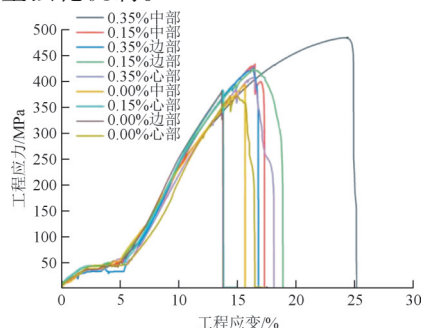


图9 不同含量稀土硅铁铸件应力-应变曲线
Fig.9 Stress-strain curves of castings with different rare earth silicoferrite contents

表3 不同稀土硅铁含量铸件的力学性能

Tab.3 Mechanical properties of castings with different rare earth silicoferrite contents

试样	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%
0.00% 心部	373	342	8.5
0.00% 中部	395	388	6.0
0.00% 边部	380	376	7.0
0.15% 心部	380	367	15.2
0.15% 中部	434	410	19.8
0.15% 边部	424	372	10.3
0.35% 心部	410	377	10.0
0.35% 中部	493	412	13.5
0.35% 边部	424	391	9.5

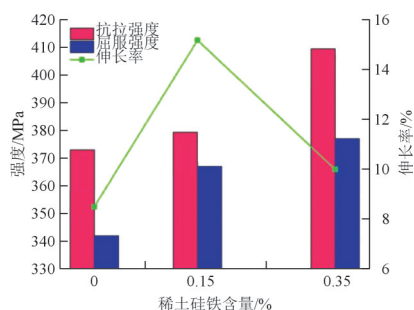


图10 不同含量稀土硅铁铸件心部力学性能对比

Fig.10 Mechanical properties of castings at the core with different rare earth silicoferrite contents

3.2.1 细晶强化机制分析

当稀土硅铁含量从0.15%增加至0.35%时,45钢各部位晶粒尺寸呈现显著减小趋势,其中心部晶粒尺寸由195.74 μm 减小至153.97 μm 。根据经典Hall-Petch关系,晶粒细化对屈服强度(σ_b)的贡献可定量表述为^[19]:

$$\sigma_b = \sigma_0 + k d^{-0.5} \quad (4)$$

式中, σ_0 为基础强度,取120 MPa; k 为材料常数,0.5 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$; d 为晶粒直径。计算结果显示,较0.15%含量的试样,0.35%含量的试样细晶强化机制为其贡献25.2 MPa,这证实了细晶强化是材料性能提升的重要机制。从微观机制来看,晶界密度的增加导致位错塞积群应力场增强,需要更高的外应力才能驱动位错运动。此外,心部理论屈服强度 $\sigma_b = 120 + 0.5 \times (153.97 \times 10^{-6})^{-0.5} \approx 392$ MPa,实测值为377 MPa,理论值与实测值的差异表明稀土元素偏聚导致局部软化。

3.2.2 相变强化效应研究

0.35%含量稀土硅铁试样较0.15%含量试样心部珠光体片层间距的缩减揭示了相变强化的作用。珠光体片层间距(λ)对强度的贡献采用Embury-Fisher模型^[20]:

$$\Delta\sigma_p = K\lambda^{-1} \quad (5)$$

式中, K 取5.5 $\text{MPa}\cdot\mu\text{m}$,计算得出0.35%含量试样较0.15%含量试样相变强化贡献的增量为4.1 MPa。

3.2.3 固溶强化机制

稀土硅铁合金通过Si和Ce固溶强化和纳米析出强化产生附加的强化效果,根据Fleischer模型^[21]:

$$\Delta\sigma_{ss} = M\alpha Gb \sqrt{c_{Si}\epsilon_{Si}^3 + c_{Ce}\epsilon_{Ce}^3 + c_{Ca}\epsilon_{Ca}^3} \quad (6)$$

式中, M 为泰勒因子,3.06; α 为常数,0.2; G 为剪切模量,80 GPa; b 为柏氏矢量,0.248;根据稀土硅铁成分, c_i 为溶质浓度(c_{Si} 为0.2%, c_{Ce} 为0.03%); ϵ_i 为错配度(ϵ_{Si} 为0.13, ϵ_{Ce} 为0.23),Ca实际固溶度<0.001%故舍去,计算得到 $\Delta\sigma_{ss}$ 为18.4 MPa。

3.2.4 多机制耦合模型验证

建立综合强化模型对0.35%含量试样心部性能进

行计算,多机制耦合表达式为:

$$\sigma_{0.35\%} = \sigma_{0.15\%} + \Delta\sigma_y + \Delta\sigma_p + \Delta\sigma_{ss} \quad (7)$$

式中, $\sigma_{0.15\%}$ 为0.15%含量抗拉强度; $\Delta\sigma_y$ 为细晶强化; $\Delta\sigma_p$ 为相变强化; $\Delta\sigma_{ss}$ 为固溶强化,计算可知 $367 + 25.2 + 4.1 + 18.4 + \epsilon$ (ϵ 来自RE偏聚软化,取-37.7 MPa)=377。综合表明,添加0.35%稀土硅铁可使心部晶粒尺寸减小约30%,提高了材料的屈服强度。其次,稀土元素通过细晶强化、相变强化和固溶强化机制提高了材料的力学性能。稀土元素在 α -Fe中的固溶度虽然有限,但仍可产生显著的固溶强化效果。此外,稀土元素对夹杂物的形态控制也显著改善了材料的力学性能。稀土元素的加入使MnS等脆性夹杂物由长条状转变为球状,且分布更加均匀。这种形态转变可显著降低应力集中系数,提高材料的延展性。值得注意的是,稀土元素还能够优化碳化物的分布特征。研究表明,稀土元素的加入促进了碳化物的均匀析出,减少粗大碳化物颗粒的形成。这种微观组织的改善有效降低了应力集中,提高了材料的力学性能^[22]。

3.3 拉伸断口形貌分析

根据应力-应变曲线可以发现,材料刚开始出现了屈服平台,在达到最大应力点后应力急剧下降,这表示材料失去了承载能力。图11为拉伸断口宏观形貌。可以看出,45号钢的拉伸断口呈现出明显的韧性断裂特征。断口表面较为粗糙,呈现出纤维状和剪切唇的形貌,断口边缘有明显的塑性变形痕迹,表明材料在断裂前经历了显著的塑性流动。这种形貌特征与典型的韧性断裂行为一致,即材料在断裂前发生了较大的塑性变形。图12为不同稀土硅铁含量铸件拉伸断口微观形貌。可以看出,断口表面存在大量韧窝,形貌多为等轴状或拉长状,其尺寸和深度分布较为均匀。韧窝的形成机制与材料在拉伸过程中微孔洞的形核、长大和聚合有关。在拉伸应力作用下,材料内部的夹杂物或第二相粒子与基体界面处产生应力集中,导致微孔洞的形核。随应变的增加,微孔洞逐渐长大并相互连接,最终形成韧窝结构。韧窝的形貌和分布反映了材料的塑性变形能力和断裂韧性,且韧窝周围观察到少量撕裂棱,撕裂棱的形成与局部应力集中和剪切变形有关,这是韧性断裂的特征。此外,还可以观察到断口处出现解理台阶和二次裂纹,且断口呈河流花样,这表明材料在断裂过程中存在局部脆性断裂的成分,因此材料属于韧脆断裂结合。

综上,添加稀土硅铁的45号钢合金铸件试样的拉伸断口形貌表现出韧脆断裂结合的特征,包括宏观上的纤维状断口和剪切唇,以及微观上的韧窝、撕裂棱、解理台阶和二次裂纹。这表明材料在断裂前经历了显著的塑性变形及局部脆性变形,其断裂机制以微孔洞



图11 拉伸断口宏观形貌

Fig.11 Macroc morphologies of tensile fracture

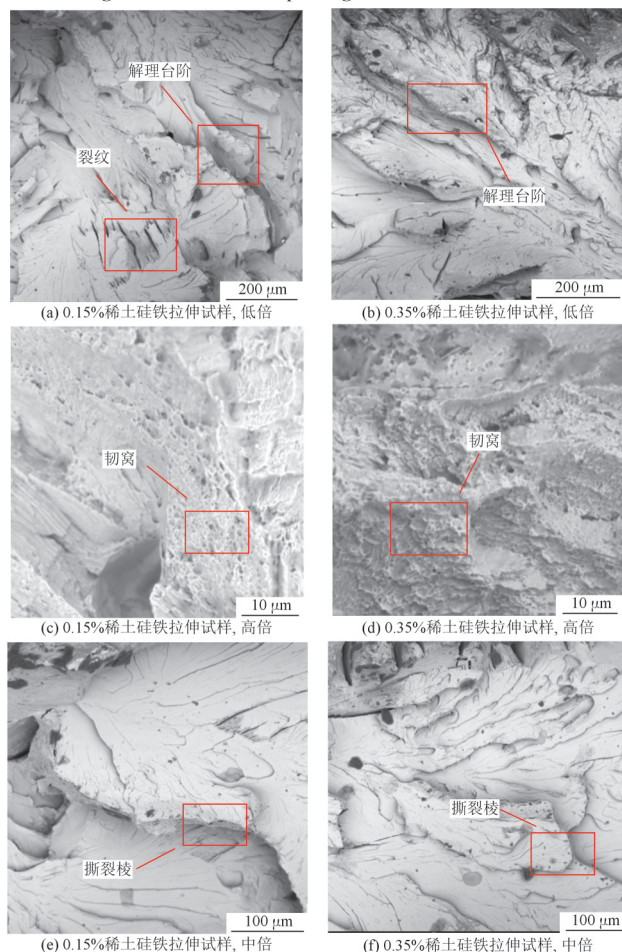


图12 不同含量稀土硅铁铸件拉伸断口形貌

Fig.12 Tensile fracture morphologies of castings with different rare earth silicoferrite contents
的形核、长大和聚合为主。

4 结 论

(1)采用消失模铸造的铸件,未经热处理而自然冷却后脱模,随稀土硅铁含量增加,铸件从心部至边部各区域的晶粒细化程度均显著提高。

(2)稀土硅铁含量增加可细化铸件晶粒尺寸,改善钢水纯净度,改变夹杂物形态和分布特征,45号钢铸件的平均洛氏硬度得以提升。

(3)稀土硅铁多重强化机制使铸件力学性能提升,

拉伸断口分析表明,合金断裂机制为韧脆断裂结合。

参 考 文 献

- [1] 叶延辉,高江雄,杨泊莘,等.槽型几何参数对C型刀片切削45号钢切削力和断屑性能的影响[J].硬质合金,2019,36(6):440-446.
- [2] 蔡铭泽.45号钢表面制备 $n\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{Ni-Co}$ 纳米复合电刷镀涂层及其性能研究[D].辽宁大连:大连交通大学,2024.
- [3] 严海玲.扫描电子束45号钢表面WC-Ni合金化组织与性能的研究[D].广西桂林:桂林电子科技大学,2024.
- [4] 郝新,孙载云,郭敏,等.热控凝固工艺对薄壁变截面铸件凝固组织和力学性能的影响[J].铸造技术,2024,45(3):270-278.
- [5] TENAGLIA N E, FERNANDINO D O, BASSO A D. Effect of Ti addition and cast part size on solidification structure and mechanical properties of medium carbon, low alloy cast steel[J]. International Journal of Italian Group of Fracture, 2022, 16(62):214-224.
- [6] 左恒,汪虎,代卫丽,等.VN/VC细化剂对铝合金细化效果的影响[J].中国铝业,2025,49(1):65-70.
- [7] 郑喜望,殷亚军,吴国清,等.ZTC4钛合金大型复杂铸件组织及性能均匀性[J].精密成形工程,2017,9(4):85-89.
- [8] 甘培原,韦德士,韦世强,等.稀土元素La、Ce对Al-3Si-0.4Cu-1.0Fe压铸铝合金微观组织、力学性能及热导率的影响[J].稀有金属与硬质合金,2023,51(5):50-56.
- [9] 刘政,胡咏梅.稀土细化剂对ZL101半固态组织影响的研究[J].铸造,2008(6):596-599.
- [10] DING W W, XU M, GOU L M, et al. Refinement mechanism of the hypoeutectic Al-7Si alloy by adding a novel La-rich rare-earth grain refiner[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2024, A55(9):214-224.
- [11] TUTUK I, ACAR S, GULER K A. The application of the direct water cooling process on the lost-foam casting technique to improve microstructural and mechanical properties of A356 alloy[J]. International Journal of Metalcasting, 2023, 17(3):2324-2337.
- [12] RAMESH R, MOHAN S, SIVAKUMAR N S, et al. Experimental investigation of lost foam casting process on aluminium[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 50(P5):1134-1137.
- [13] 马世辉,张韧,卢俊如.稀土元素Nd对共晶成分镁铝合金组织的影响[J].铸造,2007(11):1218-1221.
- [14] 魏建峰.钢凝固过程中夹杂物形核—析出模型研究[D].沈阳:辽宁科技大学,2022.
- [15] 陈欢,孙新军,王小江,等.高锰奥氏体低温钢力学性能及Hall-Petch关系的研究[J].材料科学与工艺,2018,26(5):11-18.
- [16] 刘宇航,包燕平,吕子宇,等.稀土钨钼对钢液洁净度提高和钢材性能强化作用研究进展[J].包钢科技,2024,50(4):37-46.
- [17] 秦晨.含稀土元素4Cr5MoSiV1钢夹杂物与组织的研究[D].呼和浩特:内蒙古科技大学,2021.
- [18] 米永峰,姚晓乐,姜涛,等.稀土Ce对V、Ti微合金化钢组织性能的影响研究[J].包钢科技,2024,50(5):49-54.
- [19] MUHOMMAD A W, GAFUR M A, MD. RAKIBUL Q, et al. Effect of bismuth addition on structure and mechanical properties of Ti-9Zn soldering alloy[J]. Materials Sciences and Applications, 2015, 6(9):792-798.
- [20] ZHANG J K, KANG X M, JIAO Q X, et al. Nonlinear mechanical behavior of high volume fraction SiC_p/Al alloy composites materials: Experimentation and numerical simulation[J]. Acta Metall. Sin., 2013, 49(1):10-16.
- [21] FLEISCHER R L. Solution hardening by tetragonal distortions: Application to irradiation hardening in F.C.C. crystals.[J]. Acta Metallurgica, 1962, 10(9):835-842.
- [22] 王洪利,杜思敏,曹美姣,等.微量稀土元素对奥氏体不锈钢21-4N显微组织及碳化的影响[J].钢铁钎焊,2020,41(1):119-124.

(编辑:彭瑾)