

稀土钢工业生产中稀土收得率影响因素分析

张晓峰^{1,2}, 智建国³, 刁望才^{1,2}, 麻晓光^{1,2}

- 内蒙古自治区稀土钢产品研发企业重点实验室, 内蒙古包头 014010;
- 内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心, 内蒙古包头 014010;
- 内蒙古包钢钢联股份有限公司总工室, 内蒙古包头 014010)

摘要: 稀土钢工业化生产过程中涉及稀土收得率问题, 稳定的收得率是稀土钢产品性能稳定的重要保证。通过钢包添加稀土、中间包取样分析, 研究了添加工位、添加量和钢液成分(氧活度、硫含量)对稀土钢稀土收得率的影响。结果表明, 在钢包、中间包、结晶器添加稀土, 稀土收得率依次提高; 在LF钢包离位前添加稀土合金, 添加量越大, 收得率越低; 钢液中氧、硫含量越高, 稀土收得率越低。

关键词: 添加工位; 添加量; 钢液成分; 稀土收得率

中图分类号: TF703

文献标识码: B

文章编号: 1009-5438(2024)01-0024-04

Analysis on Influencing Factors of Yield of Rare Earth in Industrial Production of Rare Earth Steel

Zhang Xiao-feng^{1,2}, Zhi Jian-guo³, Diao Wang-cai^{1,2}, Ma Xiao-guang^{1,2}

- Inner Mongolia Enterprise Key Laboratory of Rare Earth Steel Products Research & Development, Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China;
- Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China;
- Chief Engineer Office of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China)

Abstract: The industrial production process of rare earth steel involves the problem of yield of rare earth and stable yield is the important guarantee for stable performances of rare earth steel products. The effects of addition of position, addition amount and composition of liquid steel (oxygen activity, sulfur content) on yield of rare earth for rare earth steel are studied by adding rare earth in ladle and sampling analysis of tundish. The results showed that the yield of rare earth was increased in turn by adding rare earth in ladle, tundish and crystallizer; the larger the addition amount of rare earth alloy before off-position of ladle furnace, the lower the yield; the higher the contents of oxygen and sulfur in liquid steel, the lower the yield of rare earth.

Key words: addition of position; addition amount; composition of liquid steel; yield of rare earth

当前稀土钢的研究已有大量的文献报道, 钢中 添加适量稀土具有细化晶粒^[1-4]、改质夹杂物^[5-7]

和提高低温冲击韧性^[8-9]及耐腐蚀性^[10-11]等优点。稀土钢的实际应用前提条件是工业化生产,生产过程中涉及稀土收得率的稳定问题,因此研究稀土钢工业化生产中稀土收得率问题具有重要意义。

稀土可以和钢液中氧、硫等元素结合形成含稀土夹杂物上浮去除^[12]。相关文献^[13-16]报道了稀土加入钢液后具有脱氧、脱硫的作用。在工艺和钢液成分稳定条件下,另一个可能影响稀土收得率的因素就是稀土添加量。除此之外,稀土收得率稳定性是稀土钢研究的重要分支,稀土收得率稳定性和工艺稳定性、浇注钢种类别稳定性、稀土添加量稳定性、稀土添加时机等密不可分。在复杂工况下,稀土收得率波动较大,最终留存量变化也较大。

当前稀土收得率的研究相对较少,本文较完整介绍了采用连铸方式稀土收得率的影响因素及稀土收得率稳定控制措施。

1 材料和方法

在研究添加工位对稀土收得率的影响时,在钢

包和中间包添加含铈(Ce)30%的铈铁合金,在结晶器采用稀土丝自动喂入,对产品实际稀土含量进行对比。在研究稀土添加量对稀土收得率的影响方面,采用BOF-LF-CC工艺在LF钢包离位前添加含铈30%的铈铁合金进行试验,钢种选择Q355B(典型成分见表1),添加量分别0.0018%、0.0054%和0.0100%。在研究钢液氧活度、硫含量对稀土收得率的影响时,采用BOF-LF-CC工艺在LF钢包离位前添加含铈30%的铈铁合金,分别选择不同活度氧、硫含量的钢种进行试验(具体条件见表2),稀土添加量固定在0.0020%至0.0038%范围内,取中间包钢水稀土含量进行对比。在研究稀土收得率稳定方面,采用BOF-LF-CC工艺下的Q355BV钢种(典型成分见表3)进行对比。以上稀土含量的测定采用电感耦合等离子体质谱仪,依据的标准为BJLH/ZYH-02-034。

表1 Q355B化学成分(质量分数)

C	Si	Mn	P	S	Al ₁	Ca	Cr	Ni	V
0.18	0.14	1.20	0.014	0.007	0.042	0.0017	0.02	0.02	0.0055

表2 下不同条件下氧活度、硫含量(质量分数) %

条件	氧活度	硫含量
条件1	0.0003	0.0030~0.0060
条件2	0.0007	0.0180~0.0250
条件3	0.0040	0.0110~0.0150

表3 Q355BV主要化学成分(质量分数) %

C	Si	Mn	P	S	Al
0.18	0.4	1.34	0.022	0.005	0.007

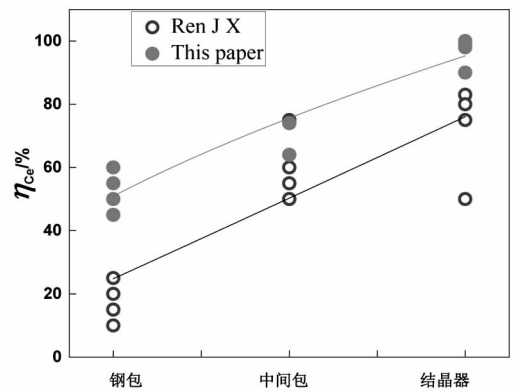


图1 钢包、中间包和结晶器添加稀土后稀土收得率变化

2 试验结果和讨论

2.1 稀土添加工位对稀土收得率的影响

稀土钢工业化试验可分为模铸模式和连铸模式,连铸模式主要以初炼-精炼-连铸设备为基础。本文研究了在钢包、中间包添加稀土合金和在结晶器喂稀土丝情况下稀土收得率,见图1。

从图1可以看出,随着稀土添加工位的后移,稀土收得率上升。结晶器添加稀土稀土收得率在90%~100%,中间包添加稀土稀土收得率在60%~70%,钢包添加稀土稀土收得率在40%~60%。过去也进行过在各工位喂稀土丝试验,规律保持一致^[17]。添加稀土合金和喂稀土丝两者的结

果没有可比性,但是从结晶器喂稀土丝结果可以看出,现在结晶器喂丝的稀土收得率更高,主要是现在钢液洁净度和稳定性都有大幅度提高所致。稀土添加工位对稀土收得率的影响主要受稀土夹杂物上浮时间影响,钢包添加稀土经历一定的钢包软吹时间、上铸机后的静置和浇注时间,而中间包添加稀土直接省略了钢包软吹时间和静置时间,结晶器喂入稀土丝工艺全部省略了以上时间,这是稀土收得率提高的主要原因。当前采用在钢包添加稀土合金的主要原因包括:①更有利于稀土元素在钢中均匀分布;②有利于形成大颗粒稀土夹杂物的上浮去除;③在连铸条件下,不容易堵塞水口;④包钢具有丰富的高纯稀土合金原料。这也是后续集中在钢包工位添加稀土的原因。

2.2 稀土加入量对稀土收得率的影响

从图 2 可以看出在 BOF-LF-CC 工艺下,在 LF 钢包离位前添加稀土合金,稀土收得率随着稀土添加量的增加而降低。在稀土添加量分别为 0.001 8%、0.005 4% 和 0.010 0% 时,稀土收得率分别约为 53%、46% 和 40%。主要原因是随着稀土添加量的增加,吉布斯自由能驱动力增加,夹杂物生成量也会增加,夹杂物也会增大,这是析出夹杂物易于上浮去除的重要原因之一。

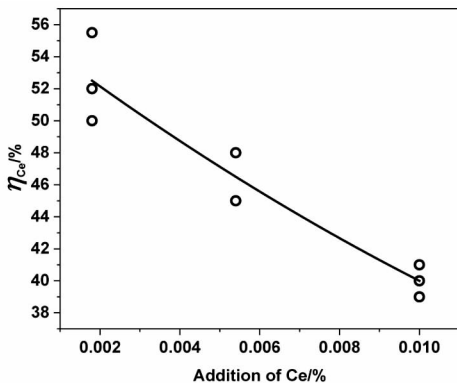


图 2 LF 钢包离位前添加稀土合金下稀土收得率

2.3 钢液中氧活度、硫含量对稀土收得率影响

采用 BOF-LF-CC 工艺研究了不同氧活度、硫含量下的稀土收得率情况,其中稀土加入量固定在 0.002 0% ~ 0.003 8% 之间。从图 3 中可以看出,随着氧活度、硫含量的增加,稀土收得率逐渐降低,分别在钢液氧活度为 0.000 3% (硫含量为 0.003% ~ 0.006%)、氧活度为 0.000 7% (硫含量

为 0.018% ~ 0.025%)、氧活度为 0.004 0% (硫含量为 0.011% ~ 0.015%) 条件下,收得率分别约为 55%、24% 和 1.5%。主要原因是钢液中氧活度、硫含量的增加,提高了钢中氧、硫和稀土结合生成夹杂物的驱动力,快速形成夹杂物并且上浮去除。

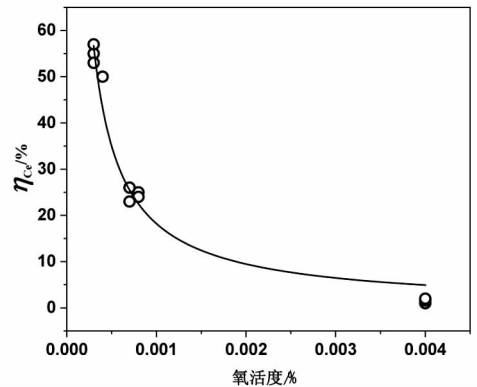


图 3 钢液氧活度对稀土收得率的影响

2.4 稀土收得率的稳定控制

稀土收得率稳定控制关键在于各影响因素的稳定控制。在此,在 BOF-LF-CC 工艺条件下,在控制稀土添加量稳定 ($\omega[Ce] = 0.005 0\%$)、添加时机稳定(其他成分稳定后添加并且添加时机相同)和控制钢种稳定(选择 Q355BV)的情况下进行了若干炉稀土添加试验。在此条件下与常规稀土添加稀土收得率进行对比分析。从图 4 中可以看出,与常规稀土合金添加相比,在上述实施稳定控制条件后,稀土收得率波动范围从 10% ~ 60% 缩小至 40% ~ 60%。

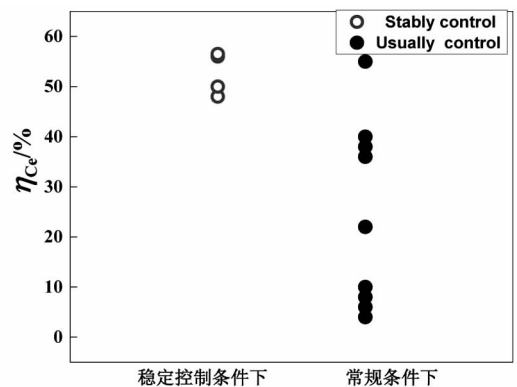


图 4 稳定控制措施实施前后稀土收得率情况

关于稀土添加稳定控制问题,结合上述分析影

响收得率的因素,在控制工艺稳定、钢液成分稳定和添加稀土合金时机稳定条件下,可以较为稳定控制稀土收得率,从而控制钢中稀土含量稳定,实现稀土钢性能的稳定。

3 结论

(1)在钢包、中间包添加稀土合金,在结晶器喂稀土丝,稀土收得率随添加稀土添加工位后移依次提高。

(2)在BOF-LF-CC工艺下,稀土添加量越高,稀土收得率越低。

(3)钢液氧活度、硫含量越高,稀土收得率越低。

(4)通过稳定控制各个环节,可以提高稀土收得率的稳定性,实现钢中稀土含量稳定控制。以Q355BV为例,通过稳定控制后,在稀土合金添加量为0.005 0%条件下,稀土收得率波动范围从10%~60%缩小至40%~60%。

参 考 文 献

- [1] Y Nuri, T Ohashi, T Hiromoto, et al. Solidification Microstructure of Ingots and Continuously Cast Slabs Treated With Rare Earth Metal[J]. Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, 1982,22(6):399-407.
- [2] T Ohashi, H Fujii, Y Nuri, et al. Effect of Oxides on Nucleation Behaviour in Supercooled Iron[J]. Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, 1977,17(5):262-270.
- [3] 田永君,吴浩泉,郭景海,等. 稀土夹杂物对Fe-C合金中初生奥氏体非均质形核的影响[J]. 中国稀土学报,1988,6(4):45-48.
- [4] Ji Y P, Li Y M, Zhang M X, et al. Grain Refinement Mechanism of the δ -Ferrite in Steels Through Cerium Addition[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2020,51(4):1707-1718.
- [5] C Pan, X Hu, P Lin, et al. Evolution of Inclusions after Cerium and Titanium Addition in Aluminum Deoxidized Fe-17Cr-9Ni Austenitic Stainless Steel[J]. ISIJ International, 2020,60(9):1878-1885.
- [6] Gao J Z, Fu P X, Liu H W, et al. Effects of Rare Earth on the Microstructure and Impact Toughness of H13 Steel[J]. Metals, 2014,5(1):383-394.
- [7] Xie J P, Wang A Q, Wang W Y, et al. Effects of Rare Earths on Toughness of 31Mn2SiRE Wear-Resistance Cast Steel[J]. Journal of Rare Earths,2006,24(1):401-404.
- [8] Li M Q, Ma C, Liu D M. Influence of Light Rare Earth on Toughness of Welded Seam of LAHS Steel[J]. Journal of Rare Earths,2003,21(1):77-80.
- [9] Ånmark, Niclas, Karasev A, et al. The Effect of Different Non-metallic Inclusions on the Machinability of Steels[J]. Materials, 2015,8(2):751-783.
- [10] 岳丽杰. Cu-P-RE耐候钢中稀土行为作用及机理的研究[D]. 沈阳:东北大学,2006.
- [11] 李涛,仇伟健,金自立,等. 稀土对CSP工艺下SPCC钢耐海洋大气腐蚀性能的影响[J]. 材料热处理学报,2013,34(12):91-95.
- [12] 杜挺. 稀土元素在金属材料中的一些物理化学作用[J]. 金属学报,1997,33(1):69-77.
- [13] 张庆登. 稀土合金在钢中加入方法的综述[J]. 特殊钢,1987(2):32-37.
- [14] 张庆登,方竞跃. 电炉钢包喷吹稀土硅钙混合粉剂的试验研究[J]. 稀土,1985(1):25-29.
- [15] 韩云龙. 用包内压入法向钢中加入稀土[J]. 钢铁,1982(9):36-40.
- [16] 周兰聚. 我国钢中稀土加入工艺的进展[J]. 山东冶金,1996,18(2):11-14.
- [17] 任新建,陈建军,王云盛. 连铸稀土加入工艺试验[J]. 稀土,2003,24(5):22-25.