



La-Ce 稀土对 Q345D 钢夹杂物和冲击性能的影响

罗 钢¹, 隋亚飞¹, 刘 彭¹, 梁 亮¹, 徐李军^{2,3}

(1 湖南华菱涟源钢铁有限公司技术中心, 娄底 417000; 2 中达连铸技术国家工程研究中心有限责任公司, 北京 100081; 3 中国钢研科技集团有限公司数字化研发中心, 北京 100081)

摘 要:通过现场试验,分析了 La-Ce 稀土处理对 Q345D 结构钢夹杂物、连铸可浇性和钢种性能的影响。结果表明, RE 在 Q345D 结构钢中的合金收得率为 21.5%;与未添加 RE 的炉次相比,脱硫率提高了 37.5%,单位夹杂物密度从 80.16 个/mm²,降低至 60.78 个/mm²;La-Ce 稀土处理前钢液中夹杂物主要是 MgO-Al₂O₃-CaO 复合夹杂,La-Ce 稀土处理对小尺寸(D≤5 μm)夹杂物的改性作用较为明显,小尺寸夹杂物改性为(La-Ce-S)和(La-Ce-Al-S-O)稀土类夹杂物;La-Ce 稀土处理可以明显降低钢中 MnS 类夹杂物的纵横比,使 MnS 类夹杂物在轧制后的形貌更接近椭圆形,而没有长线性,这是 Q345D 结构钢横向冲击功提高 20%的主要原因。

关键词:La-Ce 稀土处理; Q345D 结构钢; 横向冲击功; 夹杂物改性; 精炼; 洁净度

DOI:10.20057/j.1003-8620.2023-00253 **中图分类号:**TF142.3

Effect of La-Ce Rare Earth on Inclusions and Impact Properties of Q345D Steel

Luo Gang¹, Sui Yafei¹, Liu Peng¹, Liang Liang¹, Xu Lijun^{2,3}

(1 Technology Center, Hunan Valin Lianyuan iron and steel Co., Ltd., Loudi 417000, China; 2 Zhongda National Engineering & Research Center of Continuous Casting Technology Co., Ltd., Beijing 100081, China; 3 Material Digital R&D Center, China Iron and Steel Research Institute Group Co., Ltd, Beijing 10081, China)

Abstract: The effects of La-Ce rare earth treatment on inclusions, continuous casting castability and steel properties of Q345D structural steel were analyzed by field test. The results showed that the alloy yield of RE in Q345D structural steel was 21.5%. Compared with the heats without RE addition, the desulfurization rate increased by 37.5%, and the unit inclusion density decreased from 80.16/mm² to 60.78/mm². The inclusions in molten steel before La-Ce rare earth treatment were mainly MgO-Al₂O₃-CaO composite inclusions. The modification effect of La-Ce rare earth treatment on small size (D≤5 μm) inclusions was more obvious. Small size inclusions were modified into (La-Ce-S) and (La-Ce-Al-S-O) rare earth inclusions. La-Ce rare earth treatment can significantly reduce the aspect ratio of MnS inclusions in steel, so that the morphology of MnS inclusions after rolling was closer to ellipse without long linear, which was the main reason for the increase of transverse impact energy of Q345D structural steel by 20%.

Key Words: La-Ce Rare Earth Treatment; Q345D Structural Steel; Transverse Impact Energy; Inclusion Modification; Refine; Cleanliness

钢铁领域多年来对稀土(RE)在钢中的应用研究从未间断,关于将 RE 加入钢中的研究最早可以追溯到 1920 年的美国^[1],随后 RE 钢在全世界范围内得到广泛研究。RE 在钢中的主要作用:(1)脱氧和脱硫,从而提高钢液的洁净度;(2)对非金属夹杂物改性;(3)可以实现微合金化^[2-3]。诸多研究表明,钢中添加稀土元素,可以提升钢材的机械强度、韧性、耐腐蚀性能以及焊接性能等^[4-9]。根据钢中所加稀土含量的多少,一般可以分为稀土处理钢(稀土含量一般 0.01% 以下)和稀土合金钢(稀土含量一

般在 0.01% 以上)^[2]。当钢水中含有较多的稀土元素时,连铸的可浇性会变差^[10-12],因而,稀土合金钢一般采用结晶器喂稀土丝的方法生产^[13],但是,此方法尚未完全解决稀土在钢中分布不均匀的问题^[14]。同时,钢中加入较多稀土会显著增加生产成本。相比而言,稀土处理钢所加稀土量有限,成本较小,可以直接在钢包中加入,稀土元素在钢中分布均匀,对连铸影响较小,有利于工业化生产。近几年,关于稀土钢的应用研究多集中在稀土处理钢方面。康健等^[15]在 LF 处理过程中向 HRB400E 螺纹

作者简介:罗 钢(1973—),男,本科,高级工程师; **E-mail:**lg@lysteel.com; **收稿日期:**2023-12-13

通信作者:徐李军(1978—),男,博士,教授级高级工程师; **E-mail:**ljxuah@sina.com

钢中加入 0.003 2% 的稀土元素,可以使钢中 S 含量降低 77.8%,使稀土钢中夹杂物改性为稀土硫化物和稀土铝氧化物,有利于提高螺纹钢的综合性能。魏巍等^[16]在轴承钢中加入 0.01%~0.03% 的稀土元素,可以实现 3 炉连浇,脱氧、脱硫效果得到一定提高,夹杂物尺寸、数量、占比明显降低,夹杂物形状、成份得到有效控制,轧材低倍组织更致密。王世军等^[17]发现,耐磨钢添加 0.000 9% 的稀土后,钢的冲击性能明显改善,稀土处理使钢的耐磨损性能与耐腐蚀性能明显提升。Geng 等^[18]通过 RH 工序向低合金高强钢(HSLA)中加入 0.002 3% 的稀土,钢中钙铝氧化物夹杂改性为含稀土的铝氧化物和硫氧化物夹杂,并且在随后的钙处理过程中稀土类夹杂物也不会继续改变。

虽然当前关于稀土处理工业应用研究较多,但是需要指出的是,稀土处理在实际生产中的应用并没有预想中的广泛,全面正常使用稀土处理的钢种并不多^[19-21]。对此,我们通过工业试验研究了低合金结构钢的稀土处理效果,分析了连铸可浇性和材料性能的影响,为工业化应用提供参考。

1 试验材料及方法

Q345D 钢属于典型的低合金结构钢,其主要成分见表 1。某钢厂通过向 Q345D 结构钢中加入纯度为 99.5% 的 La-Ce 稀土合金(La:Ce=1:2),研究 La-Ce 稀土合金对钢中夹杂物改性和横向冲击性能的影响^[1]。

某钢厂采用 200 t 转炉(BOF)→210 t 精炼(LF)→R9.5 m 连铸(CC)→加热→轧制的工艺路线生产 Q345D 结构钢,工艺流程如图 1 所示。转炉出

钢后加入铝锭进行铝脱氧,使精炼渣中(T.Fe%)≤1%,随后加入石灰进行造渣脱硫,在完成钢水脱氧脱硫处理后,在 210 t 钢包中加入 10 kg La-Ce 稀土合金进行 La-Ce 稀土处理,并保证软吹时间不少于 8 min,再对钢水进行钙处理,镇静时间不少于 10 min,以确保试验炉次的正常软吹和镇静时间。精炼结束后,把钢包拉至中间包旋转台进行连铸浇注。

Q345D 结构钢取样位置如图 1 所示,样品号 LF1、LF2、LF3、LF4、CC 和 HR 分别代表稀土处理前、稀土处理后、钙处理后、LF 出站、中间包处取钢水试样和热轧板试样。采用电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-MS)测定钢液中的 RE 含量,相对标准偏差±5%。钢液中其他元素的化学成分采用直读光谱仪进行测定。钢液试样通过自动金相制样系统(德国 Brilliant220-Opal410-Saphir550-Rubin520)进行镶样和磨样,自动磨样机磨至 2 000 目,然后再采用 2.5 μm 的抛光剂对标准金相钢样的表面进行抛光。采用具有扫描电子显微镜(SEM)和 X 射线能谱仪(EDS)功能的扫描电子显微镜(EVO18-Incasteel, Zeiss Co.)对钢中非金属夹杂物特征进行分析。采用夹杂物自动分析系统(EVO18-INCAsteel,蔡司公司)结合扫描电子显微镜(SEM)和 X 射线光谱(EDS)能量分散技术对样品中的夹杂物的尺寸进行统计分析,夹杂物的最大直径定义为夹杂物的大小。为了自动夹杂物分析系统测试结果的准确性,选择夹杂物尺寸>1 μm 的进行分析,这是因为激发直径<1 μm 的夹杂物周围环境中的电子会扩散到钢中,从而影响最终的测试结果。取热轧卷试样分析材料的性能指标和最终的夹杂物形态。

2 试验结果与分析

2.1 稀土含量的变化

Q345D 钢稀土处理加入 La-Ce 稀土合金

表 1 Q345D 钢的主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical composition of Q345D steel %

C	Si	Mn	P	S	Als	Ti
0.15 ~ 0.17	0.10 ~ 0.20	0.40 ~ 0.50	≤ 0.030	≤ 0.012	0.02 ~ 0.05	0.038 ~ 0.050

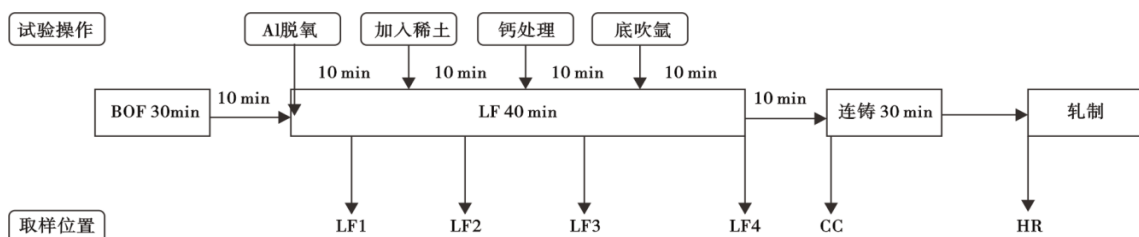


图 1 La-Ce 稀土处理试验操作与取样位置

Fig. 1 La-Ce Rare earth treatment experiment operation and sampling location

10 kg,加入稀土前后钢液化学成分变化见表2,REQ345D为经过La-Ce稀土处理的热轧板样品,Q345D为常规工艺生产的热轧板样品,冶炼全流程钢中稀土含量如图2所示。从表2的结果可以看出,RE在加入到钢液以后钢中的 $w[S]$ 从0.0048%降低到0.003%,脱硫率提高了37.5%。说明RE在Q345D钢中有一定的脱硫能力。图2的结果显示刚加入稀土后钢液中稀土含量最高,随后逐渐降低趋于稳定,钢水中 $w[La-Ce]$ 约0.002%,热轧板样品中 $w[La-Ce]$ 约0.001%。在热轧板样品中,发现La-Ce稀土元素(RE)的含量明显低于铸坯样品。这可以归因于精炼和连铸过程中的钢水搅拌作用,使稀土类夹杂物进入钢包精炼渣、中间包覆盖剂和结晶器保护渣中,导致钢液中稀土类夹杂物被去除^[7]。因此,覆盖剂和保护渣对钢液有一定的净化作用。最后,按铸坯样品中稀土含量计算稀土收得率为43%,按热轧板样品中稀土含量计算收得率为21.5%。

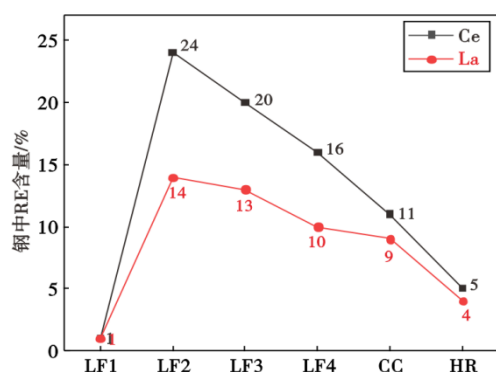


图2 Q345D结构钢中冶炼轧制全流程稀土含量变化
Fig. 2 The change of rare earth content in Q345D structural steel during the whole smelting and rolling process

2.2 夹杂物的演变

2.2.1 钢液中夹杂物

从加稀土前到中间包,不同阶段钢液中的夹杂物形貌和化学组成如图3所示,对应的夹杂物元素组成见表3。从图3中可以明显看出,La-Ce稀土处理前的LF1试样中的典型夹杂物为 $MgO-Al_2O_3-SiO_2-CaO$ 复合夹杂和 MnS 。加入La-Ce稀土后的LF2~LF4试样中钢中大尺寸夹杂物的元素组

成没有变化,小尺寸 MnS 和 Al_2O_3 类夹杂物变为(La-Ce-S)和(La-Ce-Al-S-O)稀土类夹杂物。钙处理后的LF3样品中的大尺寸复合氧化物夹杂逐渐演变为 Al_2O_3-CaO 低熔点氧化物,小尺寸夹杂主要是 $MgO-Al_2O_3-CaO-CaS$,La-Ce-Al-S-O的复合物和 MnS ,此时的稀土类夹杂物主要是RE元素与 MnS 和 Al_2O_3 类夹杂发生化学反应生成的产物。在CC和RH样品中可以观察到纯稀土类夹杂物,如图3中(e2)和(f2)所示。说明La-Ce稀土处理可以将小尺寸的 MnS 和 Al_2O_3 类夹杂物改性为(La-Ce-S)和(La-Ce-S-O)稀土类夹杂物。

2.2.2 热轧板样品中夹杂物

对经过La-Ce稀土处理的Q345D钢热轧板样品中的典型夹杂物进行面扫,得到Q345D钢热轧板样品中典型复合稀土类夹杂物的元素分布图如图4所示。从图4中可以看出,典型复合稀土类夹杂物的核心为 $MgO-Al_2O_3$ 尖晶石,外围包裹了一层La-Ce-Al-O类复合物,最外层是 CaS 夹杂。

为了研究热轧板样品中非金属夹杂物的形态和尺寸之间的关系,分析了热轧板样品中非金属夹杂物形态和尺寸之间的关系,将热轧板样品镜面抛光表面上的非金属夹杂物的最大直径定义为其尺寸,结果如图5所示。从图5中可以看出,经过La-Ce稀土处理的Q345D钢热轧板样品(图中标记为REQ345D)的洁净度与常规工艺生产的Q345D钢热轧板试样(图中标记为Q345D)相比有明显的改善,单位夹杂物数量从 80.16 个/ mm^2 ,降低至 60.78 个/ mm^2 ,夹杂物粒径 $>2\sim 5\mu m$,去除效果最明显。样品中夹杂物的成分分布如图6所示,可以看出,稀土类夹杂物尺寸一般都在 $5\mu m$ 以下,未经过La-Ce稀土处理的热轧板样品主要的夹杂物是 $MgO-Al_2O_3-CaO-CaS$ 复合夹杂。说明La-Ce稀土处理对大尺寸($D > 5\mu m$)夹杂物的改性能力有限。通常,其他钢种La-Ce稀土处理后的夹杂物平均尺寸降低、小尺寸夹杂物数量增多^[6],本文的研究为夹杂物尺寸均减少。这是因为La-Ce稀土处理后钢水经过了8min的软吹净化后,大尺寸的夹杂物上浮去除。随后再经过钙处理和软吹净化,小尺寸夹杂物被改性后碰撞长

表2 加入La-Ce稀土前后热轧板的成分变化(质量分数)

钢号	C	Si	Mn	P	S	Als	Ti	La	Ce
REQ345D	0.16	0.12	0.44	0.012	0.003 0	0.035	0.045	0.000 4	0.000 5
Q345D	0.15	0.09	0.41	0.012	0.004 8	0.036	0.047	0.000 1	0.000 1

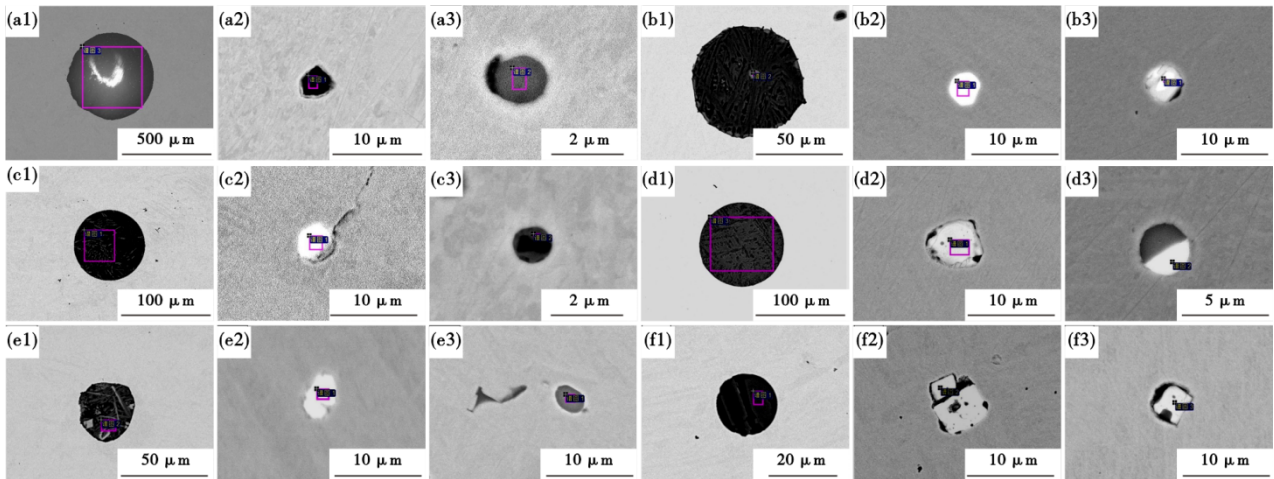


图3 La-Ce 稀土处理 Q345D 结构钢中夹杂物的演变:(a)稀土处理前 LF1 试样,(b)稀土处理后 LF2 试样,(c)钙处理后 LF3 试样,(d)LF 精炼出站 LF4 试样,(e)中间包 CC 试样,(f)热轧板 RH 试样

Fig. 3 Evolution of inclusions in La-Ce rare earth treated Q345D structural steel: (a) LF1 sample before rare earth treatment, (b) LF2 sample after rare earth treatment, (c) LF3 sample after calcium treatment, (d) LF refining LF4 sample, (e) CC sample for tundish, (f) hot rolled plate RH sample

表 3 稀土处理钢液中夹杂物的成分(质量分数)

Table 3 Composition of inclusions in rare earth treated molten steel

试样号 编号	O	Mg	Al	Si	Ca	S	Mn	Ti	La	Ce	Fe
LF1	a-1	56.30	3.05	16.23	7.03	17.35	-	-	-	-	-
	a-2	43.59	10.08	30.53	-	0.64	-	-	-	-	15.16
	a-3	-	-	-	-	-	17.84	38.52	-	-	43.65
LF2	b-1	47.68	1.65	16.05	1.78	28.55	0.87	-	-	-	3.42
	b-2	10.48	-	-	-	-	8.40	-	27.56	47.88	5.68
	b-3	13.39	-	1.94	-	0.66	6.23	-	29.79	42.46	5.54
LF3	c-1	44.86	-	8.95	11.58	-	-	20.56	11.61	-	2.44
	c-2	13.82	-	4.14	-	3.57	8.12	-	32.45	32.21	5.71
	c-3	15.53	2.14	9.12	-	5.11	1.25	-	-	4.22	62.62
LF4	d-1	45.07	3.10	16.00	1.45	28.70	1.11	-	1.38	-	3.19
	d-2	25.57	-	9.63	-	1.42	-	-	19.07	39.21	5.10
	d-3	11.05	-	-	-	-	7.96	-	33.30	38.46	9.23
CC	e-1	44.19	2.25	20.02	-	25.26	0.54	-	1.00	-	3.96
	e-2	12.83	-	-	-	-	7.73	-	33.29	37.81	8.24
	e-3	-	-	-	-	-	31.73	45.67	0.96	-	21.64
RH	f-1	41.71	-	12.29	0.77	-	-	1.22	41.68	-	2.34
	f-2	24.90	-	-	-	-	-	-	7.41	28.92	40.77
	f-3	26.10	-	10.11	-	4.38	1.19	-	10.91	38.45	8.85

大上浮去除。

2.3 材料性能的影响

Q345D 结构钢使用 La-Ce 稀土处理以后其屈服、抗拉强度和延伸率没有明显变化,有明显改善的性能是横向冲击功。图 7 显示 La-Ce 稀土处理的热轧板横向冲击功比常规热轧板增加了 20%。对比炉次热轧板试样中的夹杂物主要也是 MgO-Al₂O₃-CaO-CaS、TiN 和硫化物。但是,对比试样中含有较

多的细长 MnS 夹杂,如图 8 所示,这是造成热轧板样品横向冲击功增加的主要原因。

2.4 连铸过程的稳定性影响

稀土处理钢水的可浇性是确保稀土处理批量工业化应用的关键。不同 La-Ce 稀土加入量对 Q345D 钢连铸浇注过程塞棒位置的影响结果如图 9 所示,图 9 中红色的数字为同一浇次不同的炉号,草绿色和红褐色波动曲线为浇注过程中塞棒位置的

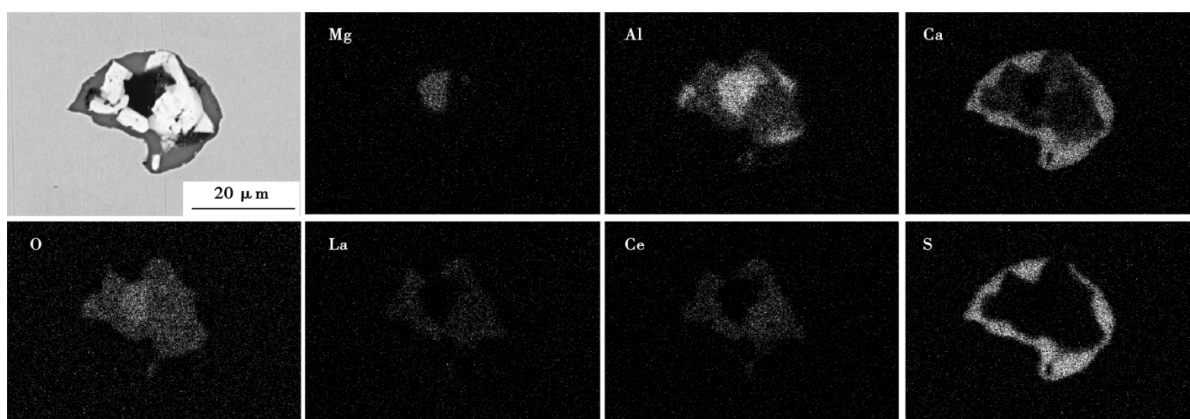


图 4 Q345D 热轧板样品中典型复合稀土类夹杂物元素分布图

Fig. 4 The element distribution diagram of typical composite rare earth inclusions in Q345D hot rolled plate samples

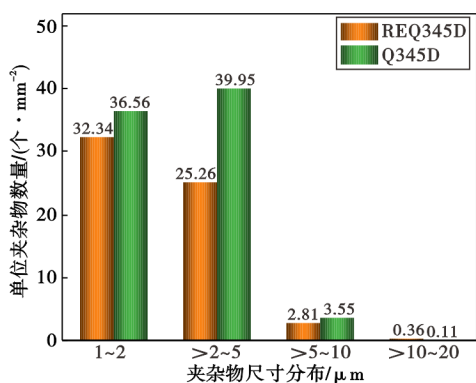


图 5 La-Ce 稀土处理对 Q345D 结构钢中夹杂物数量的影响
Fig. 5 Effect of La-Ce rare earth treatment on the number of inclusions in Q345D steel

变化曲线。从图 9 中可以看出,当连铸浇注过程发生节奏紧张抢接上台、钢水过热度低和中间包液面涨落二次氧化等非正常操作时,稀土含量 $w(\text{La-Ce})$

为 0.001%~0.002% 的钢液在浇注过程中不会出现塞棒曲线的异常波动,而稀土含量 $w(\text{La-Ce})$ 为 0.002%~0.003% 的钢液在浇注过程中出现了塞棒曲线异常波动。在现场试验中还发现当钢液中的稀土含量 $w(\text{La-Ce})$ 接近 0.005% 时,钢液的连浇炉数只有 3 炉次,而当钢液中稀土含量 $w(\text{La-Ce}) < 0.002%$ 时,钢液的连浇炉数可达 10 炉次。La-Ce 稀土处理钢水可浇性差的主要原因:第一是 La-Ce 稀土元素活性较强,容易与浸入式水口基体中的 Al_2O_3 反应,生成物会留存在浸入式水口内壁上;第二是稀土类夹杂物与浸入式水口内壁中的 Al_2O_3 亲和力比较强,容易生成复合型夹杂物,增加浸入式水口结瘤的几率^[10,12]。所以,钢水的洁净度、过热度 and RE 的加入量是控制连铸可浇性的重要手段。因此,对 Q345D 钢进行 La-Ce 稀土处理时,应控制钢液

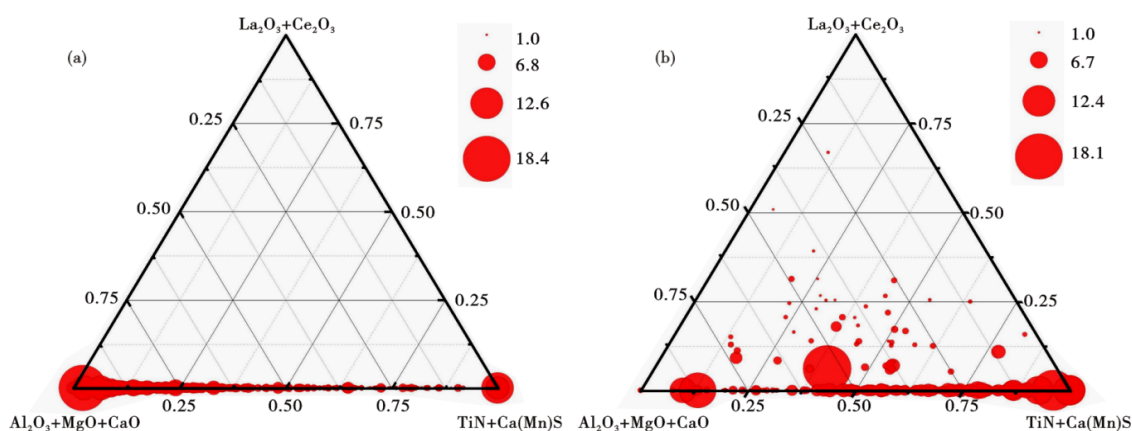


图 6 La-Ce 稀土处理对钢中夹杂物的化学组成和尺寸分布的影响:(a)未 La-Ce 稀土处理 Q345D 结构钢热轧板样品,(b)La-Ce 稀土处理 Q345D 结构钢热轧板样品

Fig. 6 Effect of La-Ce rare earth treatment on chemical composition and size distribution of inclusions in steel: (a) Q345D structural steel hot rolled plate samples without La-Ce rare earth treatment, (b) hot rolled plate samples of Q345D structural steel treated with La-Ce rare earth treatment

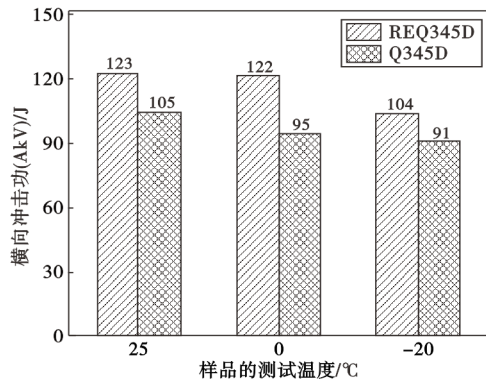


图 7 La-Ce 稀土处理对热轧板样品冲击性能的影响
Fig. 7 Effect of La-Ce rare earth treatment on impact properties of hot rolled plate samples

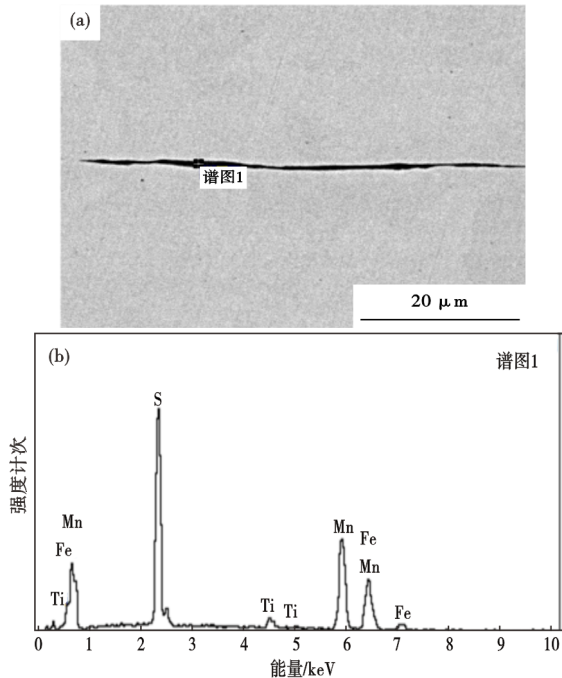


图 8 Q345D 样品中的典型 MnS 夹杂(a)和 ESD(b)
Fig. 8 Typical MnS inclusions (a) and ESD (b) in Q345D sample

中 La-Ce 稀土含量为 0.001%~0.002%，此时的钢液连铸可浇性不受任何影响。

低合金结构钢冲击功会受到夹杂物形态的影响，其中 MnS 夹杂塑性好，轧制后容易延伸为较长尺寸，出现在断口的解理面处，破坏了基体的连续性，不仅增大钢材横纵向性能差异，而且恶化断裂过程的冲击功吸收，显著影响结构钢的横向冲击功。有文献研究发现，RE 元素能有效抑制钢中 MnS、Al₂O₃ 和 TiN 等夹杂物的形成。所生成的稀土类夹杂物，形貌为近似球状。在冲击试验中，冲击载荷较小使得细小的椭圆状或近似球状的稀土类夹杂物与基体之间不会产生明显的应力集中，只有

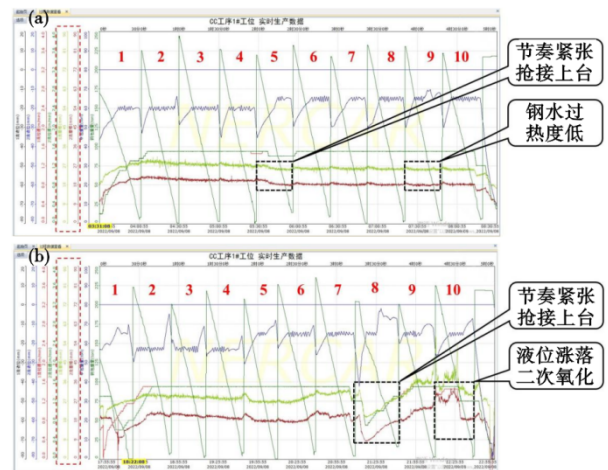


图 9 Q345DLa-Ce 稀土处理对连铸塞棒变化曲线的影响：
(a) $w[\text{La-Ce}] = 0.001\% \sim 0.002\%$ ，(b) $w[\text{La-Ce}] = 0.002\% \sim 0.003\%$

Fig. 9 Effect of Q345D La-Ce rare earth treatment on the change curve of continuous casting plug rod: (a) $w[\text{La-Ce}] = 0.001\% \sim 0.002\%$ ，(b) $w[\text{La-Ce}] = 0.002\% \sim 0.003\%$ 。

在更高的应力下夹杂物才可能会与基体发生分离，裂纹在扩展过程中遇到弥散细小的稀土类夹杂物时，会使裂纹尖端的应力减小，增大裂纹扩展阻力。当裂纹绕过此类夹杂物时，裂纹的扩展途径增加，裂纹扩展功增加，显著提高钢的低温韧性。

图 10 比较了不同处理工艺下 Q345D 钢热轧板样品中 MnS 夹杂的尺寸，La-Ce 稀土处理的热轧板样品，其主要成分为 MnS 的夹杂物纵横比明显低于常规工艺，说明微量的 La-Ce 稀土处理可以有效控制长条型 MnS 夹杂物的形成，使 MnS 类夹杂物在轧制后的形貌更接近椭圆形，而没有长线形。同时，由于钢中夹杂物改性效果有限，大尺寸夹杂物并没有变化，轧制过程夹杂物随机体在宽度方向上没有变化，因此热轧板样品的纵向冲击功没有明显的改善。

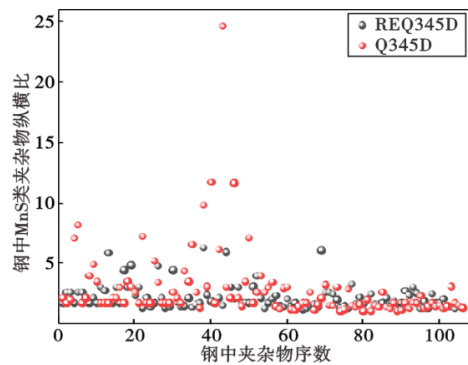


图 10 La-Ce 稀土处理对钢中 MnS 类夹杂物纵横比的影响
Fig. 10 Effect of rare earth treatment on aspect ratio of MnS inclusions in steel

3 结论

通过现场试验,研究了La-Ce稀土处理对Q345D钢的钢液洁净度、横向冲击性能和连铸可浇性的影响。得到以下结论:

(1)在LF精炼过程中进行La-Ce稀土处理,RE的金属收得率为21.5%。La-Ce稀土处理可以降低Q345D结构钢中S含量,与未进行RE处理的炉次相比脱硫率提高了37.5%。

(2)La-Ce稀土处理可以明显提高钢液的洁净

度,钢中单位面积夹杂物数量从80.16个/mm²,降低至60.78个/mm²,夹杂物减少的尺寸>2~5 μm。La-Ce稀土处理对此类夹杂物的改性效果较好,小尺寸夹杂物改性为(La-Ce-S)和(La-Ce-Al-S-O)稀土类夹杂物。

(3)La-Ce稀土处理使Q345D结构钢的横向冲击功提高了20%,这是因为La-Ce稀土处理可以明显降低钢中MnS类夹杂物的纵横比,使MnS类夹杂物在轧制后的形貌更接近椭圆形。

参考文献

- [1] Li D Z, Wang P, Chen X Q, et al. Low-oxygen rare earth steels [J]. *Nature Materials*, 2022, 21: 1137-1143.
- [2] 冯士超,潘秀兰,王艳红,等. 稀土处理钢发展现状[J]. *鞍钢技术*, 2012(5):6-9.
- [3] 张 建,朱兆顺. 稀土在钢中的应用[J]. *金属材料与冶金工程*, 2008, 36(5): 56-60.
- [4] Song S H, Xu Y W, Chen X M, et al. Effect of rare earth cerium and impurity tin on the hot ductility of a Cr-Mo low alloy steel [J]. *Journal of Rare Earths*, 2016, 34(10): 1062-1068.
- [5] Guo Y, Sun S F, Song S H. Effect of minor rare earth cerium addition on the hot ductility of a reactor pressure vessel steel [J]. *Results in Physics*, 2019, 15: 102746.
- [6] 龙 琼,伍玉娇,凌 敏,等. 稀土元素处理钢的研究进展及应用前景[J]. *炼钢*, 2018, 34(1):57-64.
- [7] 李声延,孙乐飞,吕瑞国,等. LaCe稀土在桥梁钢中的应用[J]. *稀土*, 2023, 44(2): 110-119.
- [8] 邹 涛,王 鹏,董艳伍,等. Ce-Mg合金加入对GCr15轴承钢夹杂物和凝固组织的影响[J]. *特殊钢*, 2022, 43(6): 1-7.
- [9] 王 凯,王振宇,谢志彬,等. 电渣重熔M42高速钢稀土孕育处理工艺实践[J]. *特殊钢*, 2021, 42(6): 37-39.
- [10] 梁 伟,李 晶,陆 斌,等. 稀土高强钢水口结瘤的形成机理分析[C]. *中国稀土学会2021学术年会论文摘要集*. 成都, 2021: 469.
- [11] 温 禄,赖朝彬,罗迪强,等. 钇基稀土处理钢对Al-C质耐材水口结瘤的工业实验研究[J]. *有色金属科学与工程*, 2018, 9(5): 84-89.
- [12] 陆 斌,张 帅. 一种稀土处理钢在浇注过程中防止絮钢的方法: CN110172543B[P]. 2021-03-16.
- [13] 赵成林. 稀土元素在钢水中的作用机理及加入技术研究[J]. *鞍钢技术*, 2017(1): 20-24.
- [14] 湛智勇,李茂峰,郭美强,等. 一种稀土钢的生产方法, CN116274905 A [P/OL]. 2023-06-23.
- [15] 康 健,于彦冲,孟晓亮,等. 稀土处理HRB400E钢洁净度研究[J]. *连铸*, 2020, 45(3): 38-42.
- [16] 魏 巍,李 虹,郭旭东. 稀土在轴承钢生产中的应用[J]. *稀土*, 2020, 41(3): 139-145.
- [17] 王世军,闫强军,靳建锋. 稀土对NM450钢耐磨损性能与耐腐蚀性能的影响[J]. *冶金与材料*, 2022, 14(1): 71-72.
- [18] Geng R M, Li J, Shi C B. Evolution of inclusions with Ce addition and Ca treatment in Al-killed steel during RH refining process [J]. *ISIJ International*, 2021, 61(5): 1506-1513.
- [19] 杨 健,李婷婷. 稀土处理的无取向硅钢夹杂物控制研究进展[J]. *钢铁*, 2022, 57(7): 1-15.
- [20] 隋亚飞,李慈颖,刘 彭,等. RH脱硫对无取向电工钢中夹杂物的影响[J]. *炼钢*, 2019, 35(2): 34-38.
- [21] 武利平,刘 妍,智建国,等. 稀土Ce对C-Mn低温钢强韧性的影响机制[J]. *稀有金属材料与工程*, 2022, 51(12): 4561-4569.