

· 试验研究 ·

F45MnVS 非调质钢中硫化锰夹杂物特性控制的研究

白瑞娟^{1,2}, 刘成松¹, 谭雷红^{1,2}, 张 华¹, 倪红卫¹

(1 武汉科技大学省部共建耐火材料与冶金国家重点实验室, 武汉 430081; 2 河南济源钢铁(集团)有限公司, 济源 459000)

摘 要: 分析了改进前 120 t LD-LF-RH-240 mm × 240 mm CC 工艺生产 F45MnVS 非调质钢中硫化物夹杂形貌、尺寸、数量密度等特性。通过采取以下改进措施: (1) 转炉出钢过程脱氧铝锭加入用环绕钢液冲击区域分时段、分批次方式; (2) 使用不含有 MnS 夹杂物的低碳低硫锰铁等合金辅料; (3) LF 精炼过程 S 线喂入分批次加入等。试验结果表明: 改进工艺后, LF、RH、中间包、铸坯以及轧材所有钢中硫化物夹杂的尺寸均有所降低, 铸坯边缘、铸坯 1/4 处以及铸坯中心的大尺寸 (> 5 μm) 夹杂物数量密度分别由改进前的 35、83、51 个/mm² 下降至改进后的 24、57、39 个/mm², 降幅分别达到 31.43%、31.33%、23.53%。改进后轧材中细系和粗系夹杂物评级均有所改善, 夹杂物长宽比为 0~3 的比例由改进前的 63.07% 增加至改进后 71.23%。

关键词: 非调质钢 F45MnVS; MnS 夹杂; 工艺改进; 洁净度

Control of MnS Inclusion Characteristics in F45MnVS Non-Quenched and Tempered Steel

Bai Ruijuan^{1,2}, Liu Chengsong¹, Tan Leihong^{1,2}, Zhang Hua¹, Ni Hongwei¹

(1 The State Key Laboratory of Refractories and Metallurgy, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081; 2 Henan Jiyuan Iron & Steel (Group) Co., Ltd., Jiyuan 459000)

Abstract: Morphology, size and number density of MnS inclusions of F45MnVS non-quenched and tempered steel produced by 120 t LD-LF-RH-240 mm × 240 mm CC process before improvement are analyzed. By adopting improvement measures including: (1) the aluminum ingots for deoxidation are intermittently added into the molten steel in batches surrounding the impact zone during LD tapping; (2) low carbon and low sulfur ferromanganese without MnS inclusions being employed as alloy materials; and (3) added sulfur wire into the furnace ladle in batches during LF refining. The experimental results show that based on the optimized production processes, the MnS inclusion sizes in steel during the production of LF, RH, Tundish, continuous casting bloom and the rolled products are all effectively reduced. Compared with the routine production processes before improvement, the number density of large scale inclusions (> 5 μm) in the position of edge, 1/4 and center of the casting bloom decreases from original 35, 83 and 51 per mm² to 24, 57 and 39 per mm² after the optimization, respectively. The decrease amplitude reaches 31.43%, 31.33% and 23.53%, respectively. The ratings for the thin and thick inclusions in the steel products after rolling have been improved. The ratio of the inclusions with the length-width ratio in the range of 0~3 to the total inclusions increases from 63.07% before improvement to 71.23% after improvement.

Material Index: F45MnVS Non-Quenched and Tempered Steel; MnS Inclusion; Process Improvement; Cleanliness

非调质钢,是指在中、高碳钢中加入微量 V、Nb、Ti 等合金元素而形成的一种新型钢种,可以直接在轧制、锻造或正火状态下使用,免除了对零部件的“调质处理”,省去了能耗高的淬火、回火等工序,具有节能环保、降低成本等优点,因此,得到了广泛应用^[1-2]。河南济源钢铁公司(下称济钢)生产的 F45MnVS 易切削非调质钢,主要用于生产汽车连杆、曲轴等轴类零件,通过在钢中生成 MnS 夹杂物来促进钢基体切削加工过程切屑的形成,改善钢材

及零件的切削性能,然而,轧制过程中 MnS 夹杂物常常延伸成条带状,造成钢的力学性能各向异性,极大地影响了产品质量^[3-4]。为改善 F45MnVS 易切削非调质钢中长条型 MnS 夹杂物造成的质量问题,对各生产工序的钢水和铸坯洁净度进行深入研究,有针对性地提出相应工艺改进措施,促使 MnS 夹杂物细微化,寻求从根本上控制 F45MnVS 易切削非调质钢中 MnS 夹杂物特性的解决方法。

本研究结合济钢第一炼钢厂 F45MnVS 易切削

基金项目:国家自然科学基金项目(52074198)

作者简介:白瑞娟(1976-),女,硕士生; E-mail:zhgbrj@163.com; 收稿日期:2022-03-30

通讯作者:刘成松(1986-),男,博士,副教授,博士生导师; E-mail:liuchengsong@wust.edu.cn

非调质钢的生产工艺,通过现场取样和分析检测,对 F45MnVS 生产过程中钢水和铸坯的洁净度进行了系统检测和分析,对各工序下钢中 MnS 夹杂物的形貌、尺寸、数量密度等特性进行了统计分析,确定了影响钢水和铸坯中 MnS 夹杂物特性的主要因素,并针对性的以夹杂物细微化为目标进行了工艺改进,将改进前后的试验结果作了对比分析,验证了工艺改进措施的可靠性和可行性。

1 全流程取样试验研究方法

1.1 生产工艺路线

目前,济钢生产 F45MnVS 易切削非调质钢的工艺路线为:120 t 转炉→LF(碱度 4~7,出站后喂入硫线)→RH(真空后喂入氮锰线、纯钙线)→连铸→入坑缓冷→加热→轧制→入坑缓冷。(1)转炉采取全程吹氮模式,出钢 1/3 时加入电石、铝锭、碳粉,再加入合金,随后加入造渣剂,出钢过程保证钢包全程吹氩;(2)LF 精炼造白渣,微调合金成分,出站时喂 S 线;RH 破空后根据分析样 S 含量进行补喂 S 线,真空后使用氮锰线增氮,确认成分合格后进行钙处

理,钙含量为 0.001%~0.002%;(3)连铸机断面尺寸为 240 mm×240 mm,过热度为 20~35℃,拉速为 0.85~0.9 m/min,钢包到中间包采用全程吹氩保护长水口浇铸,中间包到结晶器采用浸入式水口保护浇铸。

1.2 试验方法和取样方案

本研究选取了同一个浇次中 3 炉钢进行全流程取样分析,试验钢 F45MnVS 的化学成分如表 1 所示;全流程钢样取样方案如表 2 所示,分别在转炉终点、LF 和 RH 过程、中间包以及连铸等不同工位进行了系统取样。试验结果为 3 炉钢的平均值。

1.3 试样分析方法

钢样的化学成分采用常规的化学分析方法,钢中全氧含量采用红外吸收法 GB/T 11261-2006 进行检测分析。利用砂纸和抛光膏对钢样进行磨样和抛光,钢中非金属夹杂物采用金相法和扫描电镜等手段进行检测。

2 改进前各工序试验结果与分析

2.1 钢水、铸坯和轧材 T. O. 含量变化

表 1 F45MnVS 易切削非调质钢的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of F45MnVS non-quenched and tempered steel/%

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	V	T. O.	Cu
0.42~0.49	0.30~0.60	1.00~1.50	≤0.035	0.035~0.075	≤0.30	≤0.30	0.06~0.13	≤0.002	≤0.30

表 2 LD-LF-RH-CC 工艺流程钢样取样方案

Table 2 Steel sampling scheme during LD-LF-RH-CC production processes

工位	取样点	钢样代码
转炉	转炉终点	LD
	进站	LF1
LF	一次调成分后	LF2
	二次调成分后	LF3
	精炼出站前 2 min	LF4
	LF 出站喂入硫线后 2 min,靠近透气砖处	LF5
	LF 出站喂入硫线后 3 min,远离透气砖处	LF6
	进站后 1 min,靠近透气砖处	RH1
RH	进站后 1 min,远离透气砖处	RH2
	真空 10~15 min 后	RH3
	真空完毕后	RH4
	喂入氮锰线、钙线后 2 min	RH5
	软吹 10 min 后	RH6
	出站前 2 min	RH7
	中间包	钢包重 120~130 t
钢包重 90~100 t		TD2
铸坯	对应炉次的铸坯样 2 流、4 流	CCS2、CCS4

钢中全氧含量包括自由氧和结合氧。自由氧指溶解于钢液中的溶解氧,结合氧则指存在于钢中各类氧化物中的氧^[56]。一般用钢中全氧 T. O. 来评价

钢水洁净度水平,本试验中 F45MnVS 钢常规生产各工序中钢水全氧含量变化如图 1 所示。

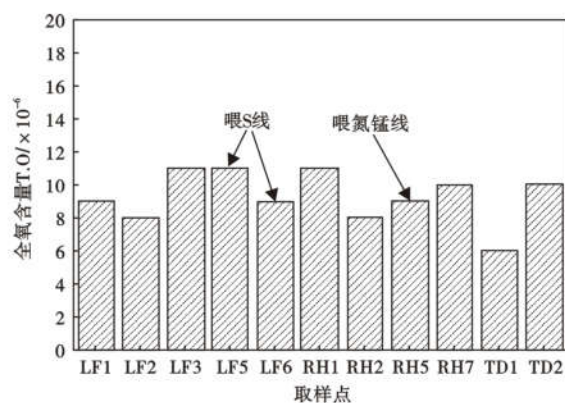


图 1 改进前 F45MnVS 钢常规生产各工序中钢水全氧含量 T. O. 变化

Fig. 1 Variation of T. O. in F45MnVS steel during routine production processes before improvement

由图 1 可知,钢中全氧含量在整个 LF 和 RH 精炼过程中维持在 10×10^{-6} 左右,LF 工位喂完 S 线以

及RH工位喂完氮锰线后,全氧含量并无明显变化,而在连铸工位,当中间包重为120~130 t时,即浇注前期(TD1)钢液的全氧含量处于一个较低的水平,仅为 6×10^{-6} ,而随着浇注过程的进行,中间包内钢液全氧含量略有增加,造成该现象的原因可能是钢包到中间包保护浇注的密封性不好,存在一定程度的二次氧化现象,或是钢包到中间包存在少量下渣或卷渣现象。但整体上该热轧非调质钢F45MnVS的全氧含量控制比较合理和准确,工艺操作稳定,能够满足F45MnVS钢种全氧含量小于 20×10^{-6} 的脱氧要求。

2.2 各工序夹杂物的数量、尺寸统计分析

图2为常规生产LD、LF和RH流程钢样中夹杂物的数量密度统计结果,图3为常规生产LD、LF和RH流程钢样中夹杂物的尺寸分布统计结果。通过夹杂物自动扫描分析,由于钢液中全氧含量仅为 10×10^{-6} 左右,各工序中绝大部分夹杂物为MnS夹

杂物,比例达到95%以上,因此,在后续的夹杂物特性分析中,均为针对MnS夹杂物的试验结果。由图2(a)和图3(a)可知,转炉氩站到LF调成分喂S线前的过程中,钢中夹杂物数量密度有下降的趋势,由216个/ mm^2 下降至177个/ mm^2 ,且取该钢样品中夹杂物以小尺寸(1~3 μm)类型为主,约占75%。喂完硫线后,夹杂物数量密度明显增加,达到376个/ mm^2 ,且夹杂物的平均尺寸也略有增大,较大尺寸(>3 μm)的夹杂物达到将近50%左右,且靠近透气砖处的夹杂物数量密度比远离透气砖的更高。

由图2(b)和图3(b)可知,真空结束前,RH精炼过程中夹杂物数量密度基本保持稳定,维持在280~330个/ mm^2 ,真空过程中夹杂物的平均尺寸略有下降。喂入氮锰线后,夹杂物的数量并未像喂S线时有明显的提升,仅由282个/ mm^2 增加至330个/ mm^2 ,但夹杂物的整体尺寸略有增加,较大尺寸(>3 μm)的夹杂物由40%增加至70%左右。RH

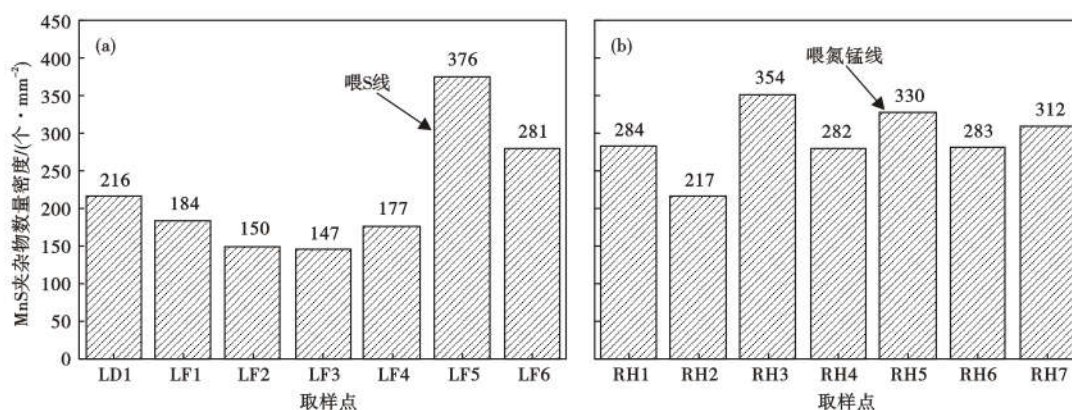


图2 改进前F45MnVS钢常规生产各工序中夹杂物的数量密度:(a)LD和LF;(b)RH

Fig. 2 Number densities of inclusions in F45MnVS steel during routine production processes before improvement: (a) LD and LF; (b) RH

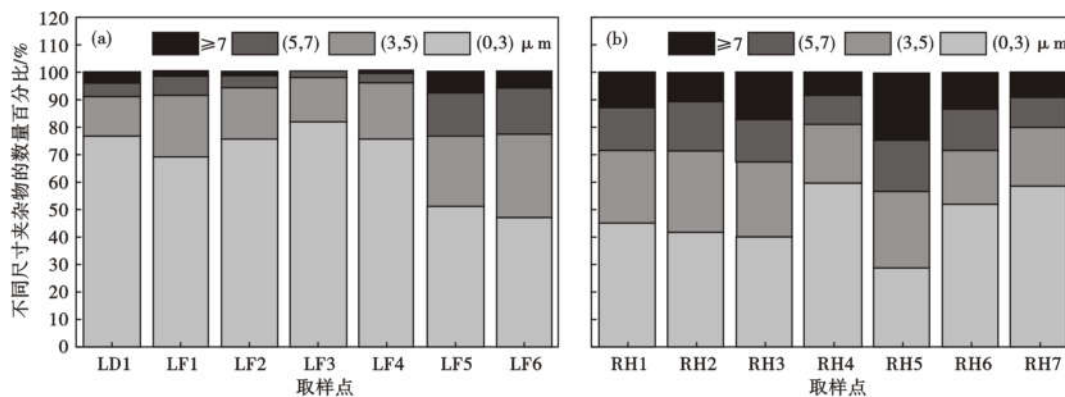


图3 改进前F45MnVS钢常规生产各工序中不同尺寸夹杂物的数量百分比:(a)LD和LF;(b)RH

Fig. 3 Ratio of inclusions with different sizes in F45MnVS steel during routine production processes before improvement: (a) LD and LF; (b) RH

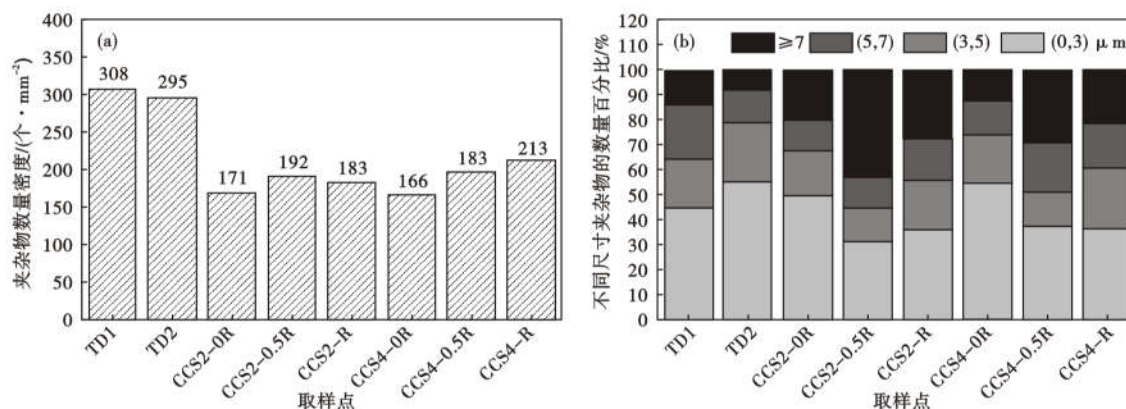


图 4 改进前 F45MnVS 钢常规生产中间包和连铸工序中(a)夹杂物的数量密度和(b)不同尺寸夹杂物的数量百分比
Fig.4 (a) Number densities of inclusions and (b) ratio of inclusions with different sizes in F45MnVS steel during routine tundish and casting production processes before improvement

精炼出站前,由于精炼过程临近结束,更多大尺寸夹杂物逐渐上浮到渣相中,使得钢液中夹杂物平均尺寸有所降低。

图 4 为常规生产中间包和连铸流程钢样中夹杂物的数量密度统计和夹杂物的尺寸分布统计结果。由图 4(a)可见,相比较 RH 工序,中间包钢液中夹杂物的数量密度变化不大,维持在 300 个/mm²左右,而在连铸工位,图中所示 0R、0.5R 和 R 分别代表铸坯表面、铸坯 1/2 半径处和铸坯中心,2 流和 4 流铸坯中夹杂物数量密度降至 200 个/mm²以下,铸坯各个位置的夹杂物数量密度变化不大,相比较而言,铸坯边缘的夹杂物数量密度较低,小尺寸夹杂物数量比例较高,达到 50% 左右,而铸坯中心和 1/2 半径处较大尺寸 (>3 μm) 的夹杂物数量比例较高,达到 70% 左右,如图 4(b)所示。

2.3 各工序典型夹杂物的组成和形貌

(1) LF、RH 和中间包精炼工位典型夹杂物的组成和形貌

LF 精炼过程中,夹杂物类型以 MnS 夹杂物为主。

在喂硫线前大部分 MnS 夹杂物的尺寸在 1 ~ 3 μm,大多为不规则形状。喂硫线后钢液中大于 3 μm 的 MnS 夹杂物数量明显增加,如图 5(a)所示。RH 精炼过程中,钢中非金属夹杂物同样以 MnS 为主。MnS 分为两类,一类为独立析出的单纯 MnS 夹杂物。另一类为 MnS 和 Al₂O₃ 复合夹杂物,如图 5(b)所示,外围浅灰色部分为 MnS,中心深灰色部分为 Al₂O₃,MnS 以 Al₂O₃ 为形核核心,包裹在 Al₂O₃ 上析出。中间包样品中夹杂物同样主要为单颗粒纯 MnS 夹杂物和以 Al₂O₃ 为异质形核核心的 MnS 夹杂物,如图 5(c)所示,黑色相与灰色相 MnS 同时出现时,被 MnS 夹杂物包裹的通常为 Al₂O₃ 颗粒,而位于 MnS 周围的通常为坑洞。

(2) 铸坯中典型夹杂物的组成和形貌

铸坯中夹杂物同样以单颗粒状 MnS 夹杂物为主,与 RH 工位和中间包钢样类似,单颗粒状 MnS 夹杂物主要分为两类,一类为独立析出的单纯 MnS 夹杂物,如图 6(a)和图 6(b)所示;另一类为 MnS 以 Al₂O₃ 为形核核心析出,如图 6(c)所示,值得关注的

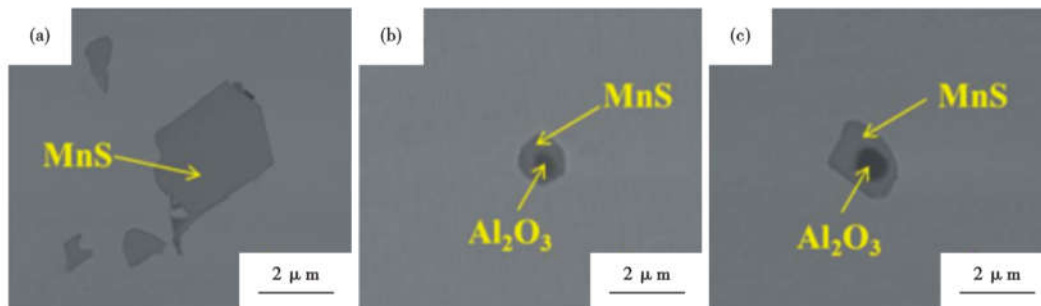


图 5 各工位改进前 F45MnVS 钢中典型夹杂物的组成和形貌:(a) LF,(b) RH,(c) 中间包
Fig.5 Compositions and morphologies of typical inclusions in F45MnVS steel at various processes before improvement:(a) LF, (b) RH, (c) tundish

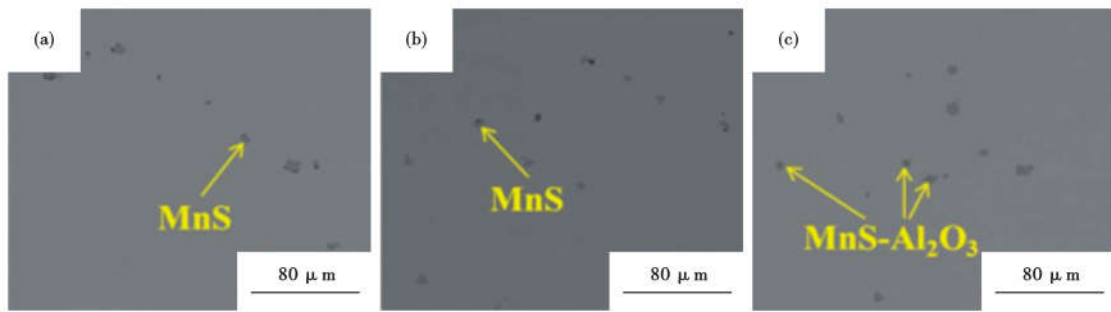


图6 改进前 F45MnVS 钢连铸坯中典型夹杂物的组成和形貌:(a) (b) MnS;(c) MnS-Al₂O₃

Fig.6 Compositions and morphologies of typical inclusions in F45MnVS steel continuous casting bloom before improvement:(a) (b) MnS;(c) MnS-Al₂O₃

是,相比较 RH 和中间包,铸坯中 Al₂O₃ 氧化物周围包裹的 MnS 相厚度更大。

3 改进试验

3.1 试验方案

本次全流程取样试验中,相比较中间包样品,连铸坯中 MnS 夹杂物数量密度虽有所降低,但较大尺寸(>3 μm)颗粒数量密度较大,达不到细小且弥散分布的要求,仍需要对生产工艺过程进行改进,对含硫非调质钢来说,硫化物夹杂控制成为关键,细长条状的硫化物对性能不利,而纺锤状、椭球状硫化物对性能有利。以往研究通常是向钢中加入合金,如稀土、钙元素等^[7-10],使其与硫化物夹杂发生反应来实现其变性,将容易塑性变形的长条状变成不容易变形、硬度较高的纺锤状、椭球状硫化物,然而,由于稀土价格昂贵,会导致钢铁生产成本急剧升高,而 Ca 元素的钢中溶解度较低,不能很好对钢中所有 MnS 夹杂物实现变性处理。由于 S 是影响硫化物特性及钢中组织的重要因素之一,改进试验中针对性地对 S 的加入方式进行改进,选取了同一个浇次中中间 2 炉钢进行改进试验,主要改进措施包括以下三方面:

(1)转炉出钢过程,用于脱氧的铝锭围绕钢液冲击区域分 5~6 批次在钢包不同位置加入,以充分利用钢液下落的重力势能使得脱氧产物 Al₂O₃ 夹杂物弥散分布,减少夹杂物的聚集,以获得更多细小 MnS 夹杂物的形核核心;

(2)不使用目前使用的含有大颗粒 MnS 夹杂物的合金辅料,如高碳锰铁、硅锰合金、金属锰等,更换为低碳低硫锰铁,用于调整 Mn 含量,采用硅铁合金调整 Si 含量;

(3)LF 精炼过程 S 线一次性加入方式更改为分 5~6 批次加入,每次加入单批次 S 线后静置 20 s,待 S 元素在钢液中溶解并弥散分布后再加入下一批

次 S 线,从而改善钢水中 S 及 MnS 的均匀性。

3.2 试验结果

(1)改进前后 LF-RH-TD 工序夹杂物特性对比

改进后试验结果数据为 2 炉钢的平均值,图 7 所示为改进前后 LF-RH-TD 工位钢中所有夹杂物数量密度和大尺寸(>5 μm)夹杂物数量密度数据统计。由图 7(a)可知,改进前后在喂 S 线 LF5 钢样中所有夹杂物数量密度变化不大,分别为 376 个/mm² 和 358 个/mm²,随着精炼过程的进行,改进后钢样中所有夹杂物数量密度逐渐增大,尤其是 RH 精炼过程喂完氮锰线后,夹杂物数量密度增加至 470 个/mm²,相比较而言,采用常规工艺的夹杂物数量密度仅为 312 个/mm²。由图 7(b)可知,尽管采用改进工艺时,钢中夹杂物数量密度有显著增加,但相比较常规工艺,大颗粒尺寸(>5 μm)夹杂物的数量密度整体呈降低趋势,中间包钢样中,改进前后 >5 μm 夹杂物的数量密度由 41.2 个/mm² 降至 15.0 个/mm²,降幅达 63.6%;此外,改进前后所有夹杂物的平均直径由 2.01 μm 降至 1.47 μm,降幅为 26.5%。

(2)改进前后铸坯中夹杂物特性对比

图 8 所示为改进前后铸坯中典型夹杂物金相形貌图,由图 8 可知,改进前后铸坯边缘(CCS2-0R)、铸坯 1/4 处(CCS2-0.5R)以及铸坯中心(CCS2-R)的夹杂物尺寸均得到不同程度的细小化,大尺寸夹杂物数量减小。

图 9 所示为改进前后铸坯中所有夹杂物数量密度和大尺寸(>5 μm)夹杂物数量密度数据统计。由图 9(a)可知,铸坯边缘(CCS2-0R)、铸坯 1/4 处(CCS2-0.5R)的所有夹杂物数量密度分别由改进前的 171、192 个/mm² 增加至改进后的 201、224 个/mm²,而铸坯中心(CCS2-R)的夹杂物略有降低,由

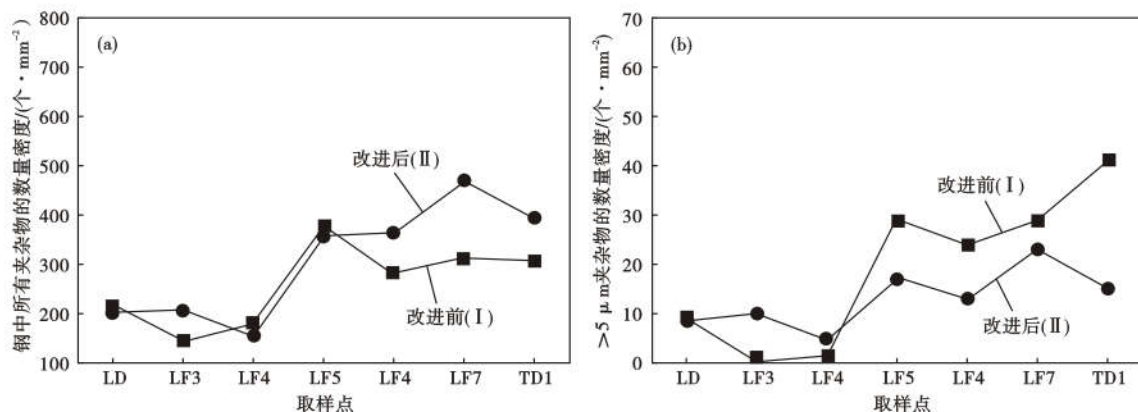


图 7 改进前(I)后(II) LF-RH-TD 工位钢中(a)所有夹杂物数量密度和(b)大尺寸(>5 μm)夹杂物数量密度数据统计
Fig. 7 (a) Number densities of all inclusions and (b) larger (>5 μm) inclusions in steel LF-RH-TD production processes before (I) and after (II) the improvement

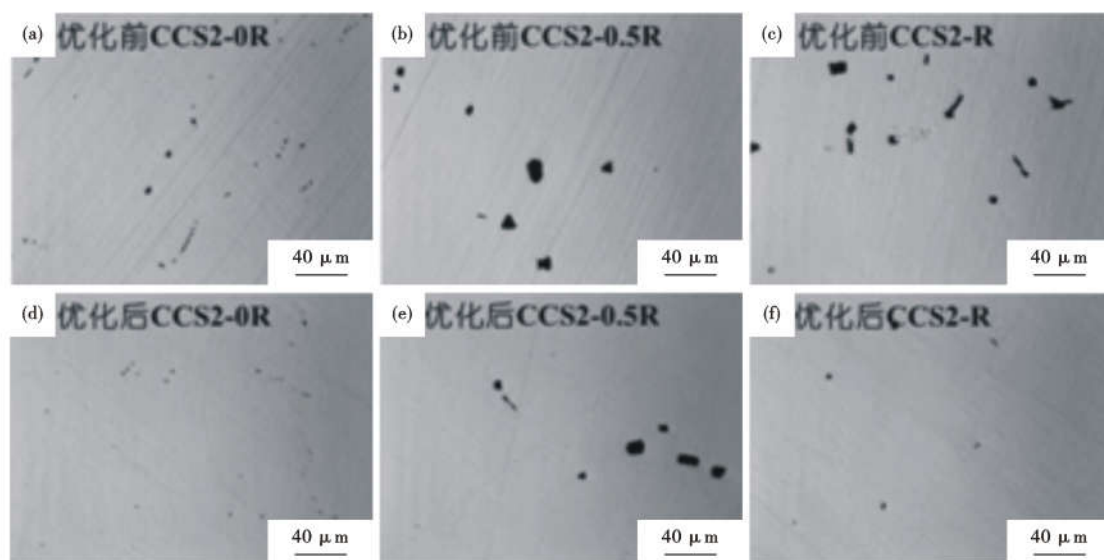


图 8 改进前(a)(b)(c)后(d)(e)(f)的 F45MnVS 钢铸坯中典型夹杂物形貌图

Fig. 8 Morphologies of typical inclusions in F45MnVS steel cast bloom before (a)(b)(c) and after (d)(e)(f) the improvement

改进前的 183 个/mm² 下降至改进后的 155 个/mm²。相比较常规工艺,改进后铸坯中大颗粒尺寸 (>5 μm) 夹杂物的数量密度整体呈降低趋势,铸坯边缘 (CCS2-0R)、铸坯 1/4 处 (CCS2-0.5R) 以及铸坯中心 (CCS2-R) 的大颗粒尺寸夹杂物数量密度分别由改进前的 35、83、51 个/mm² 下降至改进后的 24、57、39 个/mm², 降幅分别达到 31.43%、31.33%、23.53%。改进试验整体上的效果良好,对于减小 F45MnVS 非调质钢中硫化物夹杂尺寸,实现其细小化和弥散化,具有较好的促进作用。

(3) 改进前后轧材中夹杂物特性对比

将上述改进前后 F45MnVS 非调质钢的铸坯轧制成直径为 Φ52 mm 的圆钢,轧制比均为 6.8,采用

金相显微镜和扫描电镜对这 2 组样品进行夹杂物长宽比统计分析。观察改进前后轧材中典型夹杂物得出,改进后钢中夹杂物评级细系和粗系均有所改善。

对改进前后 F45MnVS 非调质钢轧材中夹杂物长宽比及其比例进行了统计分析,如图 10 所示。相比较常规工艺的轧材中夹杂物,改进工艺的轧材中夹杂物长宽比在 0~3 的比例由 63.07% 增加至 71.23%,而长宽比在 >3~5、>5~10、>10~15 以及 >15 的比例均有所下降,分别由 20.22%、13.34%、2.13%、1.24% 下降至 18.74%、8.86%、1.17%、0%。轧材中夹杂物的长宽比结果与铸坯中夹杂物尺寸和数量密度的变化趋势保持一致,夹杂物逐渐向细小化和弥散化转变。

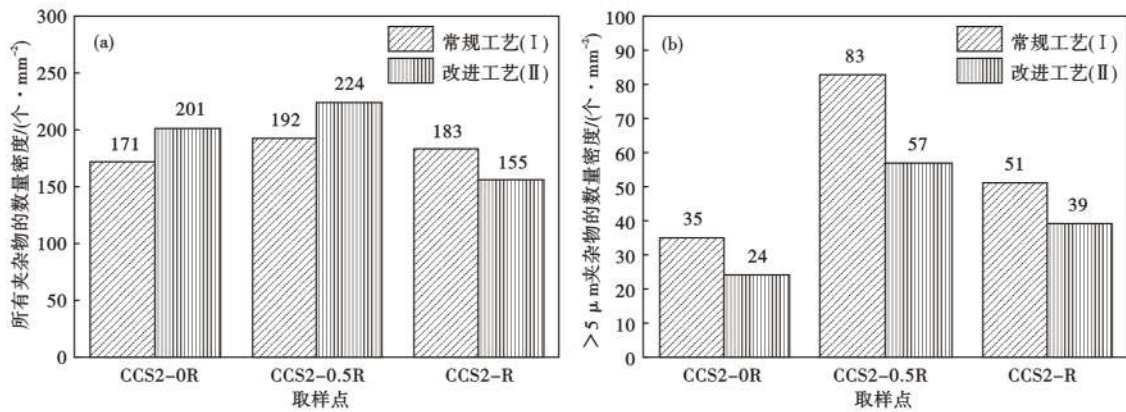


图 9 改进前 (I) 后 (II) F45MnVS 钢铸坯中 (a) 所有夹杂物数量密度和 (b) 大尺寸 (> 5 μm) 夹杂物数量密度数据统计
Fig. 9 Statistics of number densities of all inclusions (a) and larger (> 5 μm) inclusions (b) in F45MnVS steel cast bloom before (I) and after (II) the improvement

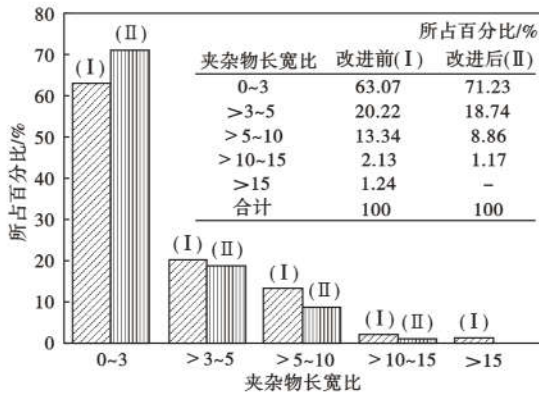


图 10 改进前 (I) 后 (II) F45MnVS 钢轧材中夹杂物长宽比及其所占比例
Fig. 10 Length-width ratio of the inclusions and their proportions in F45MnVS steel rolled products before (I) and after (II) the improvement

4 结论

(1) 按 LF-RH-TD-CC 工艺生产的 F45MnVS 非调质钢中夹杂物绝大部分为 MnS 夹杂物, 包括独立

析出的单纯 MnS 夹杂物和以 Al₂O₃ 为形核核心包裹着 MnS 的夹杂物。

(2) 由于 MnS 夹杂物熔点较高 (1 620 ℃), 外来型 MnS 夹杂物在钢液中存在来不及溶解的可能性, 这部分 MnS 夹杂物极可能成为形核核心, 尺寸进一步增大。因此, 使用不含有 MnS 夹杂物的低碳低硫锰铁等合金辅料, 以及 LF 精炼过程 S 线喂入方式由一次性加入更改为分批次加入。

(3) 工艺改进后, LF、RH、中间包、铸坯以及轧材中所有硫化物夹杂物的尺寸均实现了有效降低。相比较常规工艺, 铸坯边缘、铸坯 1/4 处以及铸坯中心的大颗粒尺寸 (> 5 μm) 夹杂物数量密度分别由改进前的 35、83、51 个/mm² 下降至改进后的 24、57、39 个/mm², 降幅分别达到 31. 43%、31. 33%、23. 53%。改进后轧材中细系和粗系夹杂物评级均有所改善, 夹杂物长宽比为 0~3 的比例由 63. 07% 增加至 71. 23%。

参考文献

[1] 刘洁, 吴丹, 杨秀娟, 等. 非调质钢的研究现状及发展趋势 [J]. 热加工工艺, 2021, 50(23): 1-6 + 10.
 [2] 田俊, 王德永, 屈天鹏, 等. 非调质钢中 MnS 的析出与长大 [J]. 钢铁研究学报, 2020, 32(8): 740-745.
 [3] 邵肖静, 邓小玄, 崔睿, 等. 汽车用高品质非调质钢 YF45MnVS 的热变形行为 [J]. 特殊钢, 2010, 31(6): 56-58.
 [4] 王占花, 惠卫军, 张永健, 等. 硫化物变性处理 45MnVS 非调质钢的高周疲劳性能 [J]. 钢铁, 2021, 56(10): 117-126.
 [5] 刘成松, 李京社, 高晓杰, 等. BOF-LF-CC 工艺生产 SPHC 钢的洁净度 [J]. 钢铁, 2015, 50(2): 27-31 + 80.
 [6] 安杰, 李涛, 李刚, 等. 改善 60t EAF-LF-VD-CC 流程冶炼齿轮钢 FAS3420H 洁净度的研究 [J]. 特殊钢, 2019, 40(2): 49-52.
 [7] 谢啸宇, 顾超, 王敏, 等. 中高硫钢中硫化锰夹杂物控制技术 [J]. 钢铁, 2021, 56(12): 52-61.
 [8] 姚登元, 吴华杰, 陆鹏雁, 等. 钙处理对含硫非调质钢中硫化物形态的影响 [J]. 中国冶金, 2017, 27(4): 11-16.
 [9] 赵梦静, 王峰, 习小军, 等. 钇对 EH36 船板钢夹杂物特性和拉伸性能的影响 [J]. 钢铁, 2019, 54(7): 61-67.
 [10] 陈宇, 张立龙. BG380CL 钢稀土与钙处理的对比研究 [J]. 金属世界, 2016, (5): 32-35.