DOI: 10.3969/j.issn.1000-6826.2023.06.3001

高压锅炉管用钢中夹杂物的分析及控制

Analysis and Control of Inclusions in Steel for High Pressure Boiler Tubes

供稿|孔保建，张龙，李可伟，赵延安，许进 / KONG Baojian, ZHANG Long, LI Kewei, ZHAO Yanan, XU Jin

内容导读

为解决炼钢厂高压锅炉管用钢管坯非金属夹杂物超标问题，从转炉终点氧含量控制、精炼顶渣渣系、钙处理以及连铸留钢操作等工艺进行了数据分析和优化调整，结果表明在转炉终点氧的质量分数≤0.04%，采用合适的精炼渣系（w(CaO)=55%~60%，w(Al_2O_3)=20%~25%，w(SiO_2)=9%~13%，碱度 R=4~6，w(MnO)+w(FeO)≤0.6%），分段式轻钙处理以及连铸留钢渣 3.8~4.3 t 的情况下，生产的连铸坯中非金属夹杂物合格率由 2022 年的 92% 提高至 98%，有效解决了高压锅炉管用钢非金属夹杂物超标问题，提高了铸坯内部质量，提升了产品的市场竞争力。

高压锅炉管用钢属于合金结构钢[1]，主要用来制造超高压锅炉的过热器管和主蒸汽管等[2]，需要具备足够的抗塑性变性能力、抗强氧化性以及耐高温和应力腐蚀性能，钢中非金属夹杂物的控制水平决定了成品钢管的使用性能及寿命[3]。因此，高压锅炉管的生产工艺控制及判定标准均要严于其他钢种[4]，其冶炼工艺流程及设备为：2 座 50 t 转炉（LD）→3 座 50 t 钢包精炼炉（LF）→1 座双工位 50 t 真空炉（VD）→R8 弧形连铸机。南钢棒材厂生产的 15CrMoG 因为 A 类 MnS 夹杂物超标，造成了钢材开裂的情况[5]。孙丽媛等[6] 研究了 12Cr1MoVG 钢在精炼过程中夹杂物的演变规律，得出真空循环脱气精炼（RH）发生吸气和耐材侵蚀是造成夹杂物超标的原因。非金属夹杂物超标的钢坯，尤其是薄壁管和极薄壁管（壁厚/外径≤5%），在下游管厂穿管过程中容易出现探伤报警、内折、分层和外折现象。同时随着钢管市场下行，许多钢管厂家为提高市场竞争力，将穿管工艺从以前的冷拔 2 道改为冷拔 4 道，也会产生同样的质量问题。这就意味着必须提高钢坯的质量才能满足下游管厂的需求，减少因产品质量带来的巨额赔付，因此分析高压锅炉管用钢中夹杂物的类型及产生原因，改进关键的工艺控制技术对产品质量的提升及降本增效都有重要意义[7]。

夹杂物超标现状

长强钢铁日常生产的高压锅炉管用钢牌号

作者单位：江苏长强钢铁有限公司炼钢厂，江苏　泰州　214500

为 20G、SA-210C、12Cr1MoVG 和 15CrMoG，具体化学成分见表 1。如图 1 所示，轧制圆直径为 60 mm，在其外表面到中心的中间位置的径向截面处截取 20 mm×10 mm 的试样 1 和试样 2。采用扫描电镜对管坯成品试样 1 和试样 2 中夹杂物的形貌及成分进行分析，结果如图 2~3 所示。根据最新评定标准 GB/T 5310—2017：试样 1 中夹杂物呈条状，宽度超过 15 μm，属于 B 类夹杂物超标；试样 2 中夹杂物呈球状，直径超过 53 μm，属于 DS 类夹杂物超标。两个试样中夹杂物的化学成分主要为 Al、O、Ca、S、Mg 和 Si，同时对非金属夹杂物进行面扫描分析，结果如图 4~5 所示，试样 1 中夹杂物为钙铝酸盐（$CaO–Al_2O_3$），试样 2 中夹杂物为铝酸钙包裹镁铝尖晶石的复合夹杂物（$CaO–Al_2O_3–MgO$）。

表 1　高压锅炉管用钢化学成分表（质量分数）　%

牌号	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Al
20G	0.20	0.25	0.45	0.025	0.0005				0.010
SA-210C	0.22	0.25	0.90	0.025	0.0005				0.010
12Cr1MoVG	0.11	0.25	0.55	0.025	0.0005	0.95	0.28	0.18	0.010
15CrMoG	0.15	0.25	0.55	0.025	0.0005	0.90	0.44		0.010

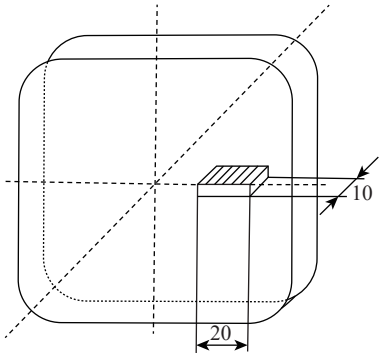

图 1　轧制圆试样取样位置示意图（单位: mm）

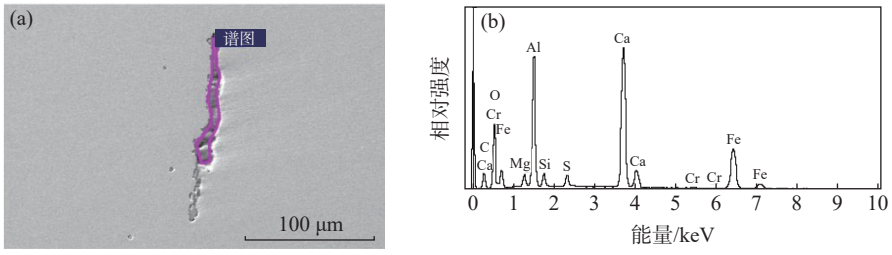

图 2　试样 1 中夹杂物微观形貌 (a) 及能谱分析 (b)

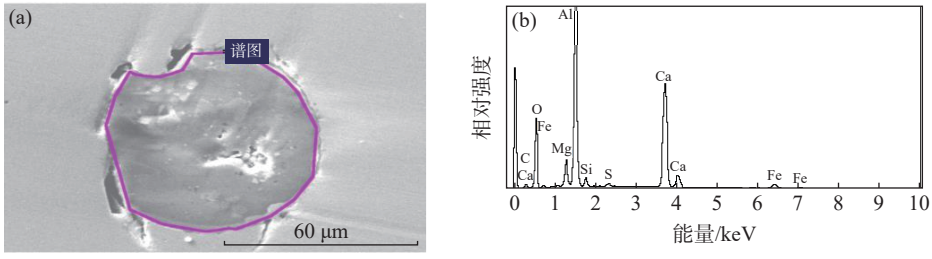

图 3　试样 2 中夹杂物微观形貌 (a) 及能谱分析 (b)

夹杂物控制影响因素

高压锅炉管用钢的冶炼工艺对非金属夹杂物的生成以及去除起着决定性作用[8]，莱钢生产高压锅炉管用钢 15CrMoG 时分析得出钢包底吹流量的大小对大尺寸夹杂物上浮有很大影响[9]，攀钢采用了低铝脱氧工艺及中碱度精炼渣有效控制了高压锅炉管中夹杂物超标问题[10]，针对高压锅炉管用钢的非金属夹杂物超标问题，长强钢铁炼钢厂紧紧围绕转炉终点控制、LF 精炼渣系、LF–VD 钙处理和连铸浇铸等情况展开了全面分析。

转炉终点氧化性

根据多功能定氧仪检测数据得出转炉终点 $w(C)·w(O)=2.8×10^{-7}$，其中终点碳的质量分数为 0.07%，氧的质量分数为 0.04%。转炉吹炼结束炉后出钢过程采用铝块进行沉淀脱氧[11]。由脱氧反应方程式 (1) 可知，当氧含量高时，利于反应正向进行，铝

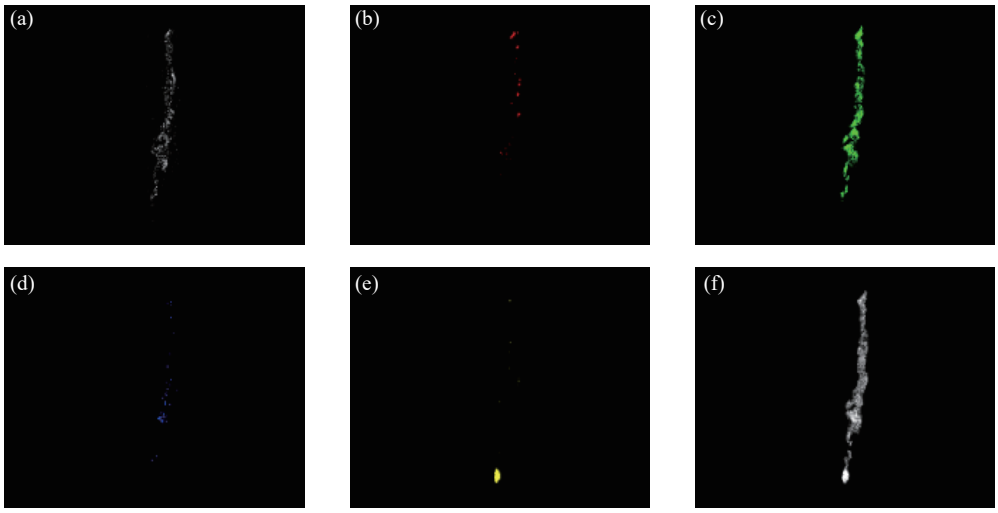

图 4　试样 1 中 $CaO–Al_2O_3$ 夹杂物面扫描分析：(a) O；(b) Mg；(c) Al；(d) Si；(e) S；(f) Ca

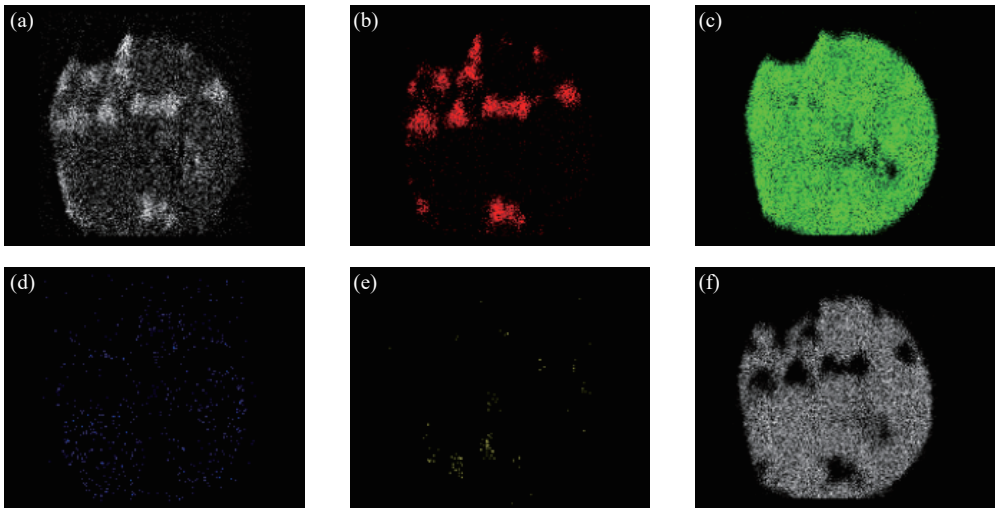

图 5　试样 2 中 $CaO–Al_2O_3–MgO$ 夹杂物面扫描分析：(a) O；(b) Mg；(c) Al；(d) Si；(e) S；(f) Ca

块消耗量大，产生的三氧化二铝系夹杂物多。转炉终点采用一次拉碳法，终点碳质量分数小于 0.07% 的产品合格率为 88.15% 左右，如表 2 所示，当终点碳质量分数大于 0.07% 且不补吹时，高倍夹杂物的合格率高达 95.37%，因此终点氧化性是夹杂物控制的影响因素之一。

$$2Al + 3[O] = (Al_2O_3) \quad (1)$$

表 2　不同转炉终点氧化性下夹杂物合格率对比

倒炉温度/℃	终点碳/%	是否补吹	夹杂物合格率/%	夹杂物类型
1580~1610	0.03~0.07	否	88.15	B类/DS类
1580~1610	0.07~0.12	是（15~30 s）	91.63	B类/DS类
1580~1610	0.07~0.12	否	95.37	B类

LF 精炼顶渣成分

目前生产的高压锅炉管用钢碳的质量分数均控制在 0.25% 以下，属于低碳钢[12]，需要 LF 精炼顶渣具有较好的黏度和足够的吸附性。肖鸿光[13] 研究了不同 LF 精炼渣系对 25Mn 钢 B 类夹杂物控制的影响。表 3 为 2022 年 LF 精炼顶渣成分，计算得二元碱

度 R 为 3~5，渣中 Al_2O_3 的质量分数为 25%~30%，MnO+FeO 的质量分数为 0.43%~1.10%，渣面的脱氧效果差，钢渣界面容易发生式 (2) 的反应生成 Al_2O_3 夹杂物[14]。同时由于 LF 精炼处理时间为 25~35 min，为保证精炼炉快速成渣，采用了连铸热态渣回用的方式来造渣。如图 6 所示，冶炼后期精炼顶渣呈玻璃状态，虽然流动性较好，但是炉渣整体偏稀，对钢中夹杂物的吸附效果差，LF 精炼顶渣吸附能力是钢中非金属夹杂物控制的影响因素。

表 3　2022 年 LF 精炼顶渣成分（质量分数）　%

Al_2O_3	MgO	SiO_2	CaO	MnO	FeO
25~30	5~8	11~15	50~55	0.03~0.10	0.40~1.00

$$2[Al]+3(FeO)=[Al_2O_3]+3Fe \quad (2)$$

图 6　LF 精炼顶渣渣样

LF–VD 钙处理

高压锅炉管用钢从脱氧方式上讲，属于铝镇静钢，铝块脱氧后需要通过钙处理对夹杂物进行变性，目的是生成 $12CaO\cdot7Al_2O_3$ 和 $CaO\cdot Al_2O_3$ 等低熔点夹杂物，但钙处理过程会伴生出 $CaO–Al_2O_3$ 系高熔点夹杂物[15–16]，污染钢液，造成钢中非金属夹杂物超标。当前炼钢工艺流程为 VD 破空后采用 30 m 实心纯钙线进行钙处理，对夹杂物超标炉次的成品 Ca 含量和夹杂物类型进行汇总如图 7 所示，Ca 的质量分数在 0.0014%~0.0022% 时，B 类和 DS 类夹杂物超标炉数最多，说明钙处理程度对夹杂物控制有较大影响。

连铸浇铸

对管坯低倍夹杂物的产生机理进行分析，探究非金属夹杂物的来源，验证连铸浇铸情况对非金属夹杂物超标的影响。在 58 炉夹杂超标炉次的管坯上随机取样进行酸洗检验，结果如图 8 所示，其中有 10 炉试样上存在低倍夹杂（见图 8(a) 中标识）。使用显微镜对低倍夹杂试样进行高倍检测同时对试样进行扫描电镜分析，结果如图 9 和表 4 所示，结果显示该夹杂物不含 K 和 Na 元素，排除结晶器内保护渣卷渣；由于中间包正常浇铸液面及转包液面都控制在 750 mm 以上，排除了中间包顶渣的卷渣可能；说明钢包浇铸后期存在大量下渣及卷渣的情况。与此同时连铸浇铸周期只有 21 min，进入中间包内的钢包顶渣会与钢液发生反应产生 Al_2O_3 夹杂物，具体反应方程式见式 (3)，伴生的 Al_2O_3 夹杂与钢液中游离 Ca 会继续发生反应生成钙铝酸盐，同时由于在中间包内上浮时间不足，会与顶渣一起被钢液带入结晶器，在凝固前沿固液界面处被捕捉，造成管坯低倍夹杂和非金属夹杂物超标。

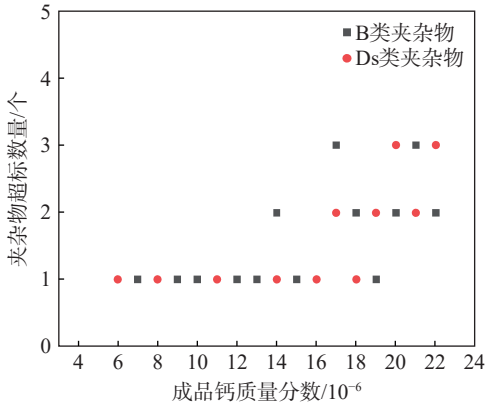

图 7　高压锅炉管非金属夹杂物类型分布图

$$3/2(SiO_2)+2[Al]=[Al_2O_3]+3/2[Si] \quad (3)$$

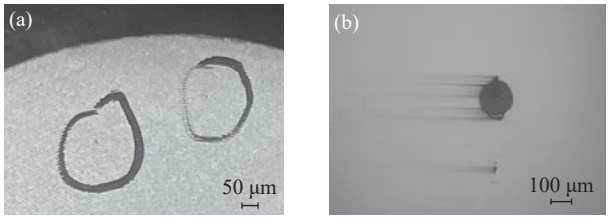

图 8　管坯夹杂低倍 (a) 及高倍 (b) 组织图

工艺改进内容及方法

针对高压锅炉管用钢非金属夹杂物超标的分析结果，炼钢厂结合生产节奏和工装条件等情况对生

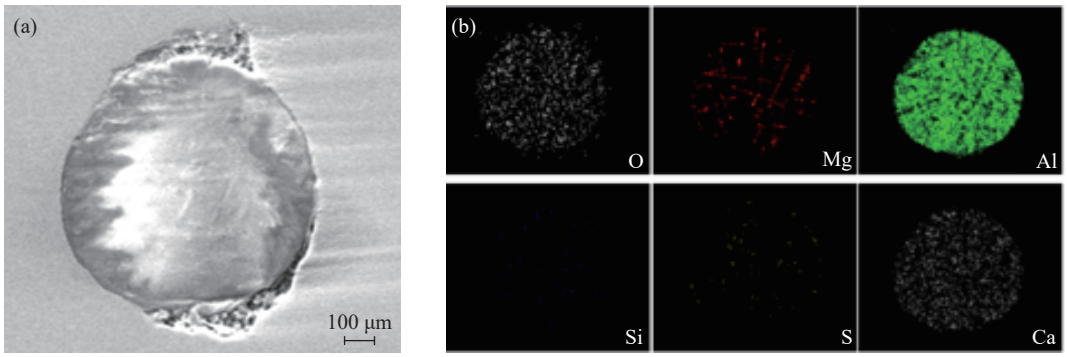

图 9　低倍夹杂中非金属夹杂物组织形态及面扫描分析：(a) 夹杂物形态图；(b) 面扫描分析图

表 4　夹杂物成分（质量分数）　%

C	O	Mg	Al	Si	S	Ca	Fe
0.10	43.95	5.80	18.96	2.31	1.10	26.45	1.33

产工艺，即转炉（LD）—钢包精炼（LF）—真空脱气（VD）—连铸（CC），4 个环节进行了针对性的调整，具体措施如下。

降低转炉终点氧化性

如表 5 所示，建立转炉终点控制标准，改变以往一次拉碳的终点控制方式，采用高拉补吹的方式，保证吹炼终点氧枪压枪枪位控制在液面以上 700~800 mm 并保持 25 s 以上，控制终点碳质量分数合格率在 90% 以上，最终转炉出钢溶解氧质量分数控制在 0.04% 以内，降低了铝块的消耗，减少了脱氧产物 Al_2O_3 夹杂的生成，从源头上解决非金属夹杂物超标问题。

表 5　高压锅炉管转炉终点控制标准

碳质量分数/%	磷质量分数/%	温度/℃
≥0.07	≤0.0010	1580~1610

调整 LF 精炼渣系

精炼炉采取回用热态精炼渣工艺后，前期成渣速度快，后期炉渣容易变稀成玻璃渣。因此降低 LF 精炼顶渣中 Al_2O_3 含量，提高 CaO 含量，调整后渣样呈玻璃带白棱状，如图 10 所示，炉渣黏度及对非金属夹杂物的吸附能力大大提高。同时还通过使用铝粒、电石和硅铁粉在渣面进行持续性扩散脱氧，保持顶渣的低氧化性，避免顶渣向钢液传氧，阻止非金属夹杂物的产生，调整后 LF 顶渣具体成分见表 6。

图 10　LF 精炼顶渣渣样

表 6　LF 精炼顶渣成分（质量分数）　%

Al_2O_3	MgO	SiO_2	CaO	MnO	FeO
20~25	≤6	9~13	55~60	≤0.10	≤0.50

调整 LF–VD 过程钙处理

高压锅炉管用钢成品铝的质量分数控制为 0.010%~0.015%，VD 炉抽完真空后铝损失 0.015%~0.025%，该过程产生大量 Al_2O_3 夹杂，经过钙处理变性后生成钙铝酸盐，通过 VD 炉软吹促进高熔点夹杂物碰撞长大并上浮被去吸附[17]。改变原来 VD 出站喂钙线的单一模式，采用 LF–VD 分段钙处理，开浇炉总用量由原来的 50 m 减为 35 m，连浇炉钙线总量由原来的 30 m 减为 15 m，具体钙线喂入量见表 7。如图 11 所示，非金属夹杂物主要组成为 MgO–CaO–Al_2O_3，钙处理调整前夹杂物数量为 2508 个，钙处理调整后数量为 886 个。由于 LF 出站喂入钙线后通过 VD 的高真空强搅拌，一方面钢液中游离的 Al_2O_3 已经变性完全，另一方面能确保生成的钙铝酸盐基本上浮；同时考虑开浇前期不可

避免的钢水二次氧化情况，故 VD 出站开浇炉喂 25 m 钙线，连浇炉喂 5 m 钙线，既不影响连铸可浇性，又减少了钙处理过程二次氧化产生的夹杂物和钙处理本身产生的非金属夹杂物，大大降低了非金属夹杂物超标的风险。

表 7　LF–VD 钙线喂入量优化前后对比　m

浇次	优化前钙线喂入量		优化后钙线喂入量	
	LF出站	VD出站	LF出站	VD出站
开浇炉	0	50	10	25
连浇炉	0	30	10	5

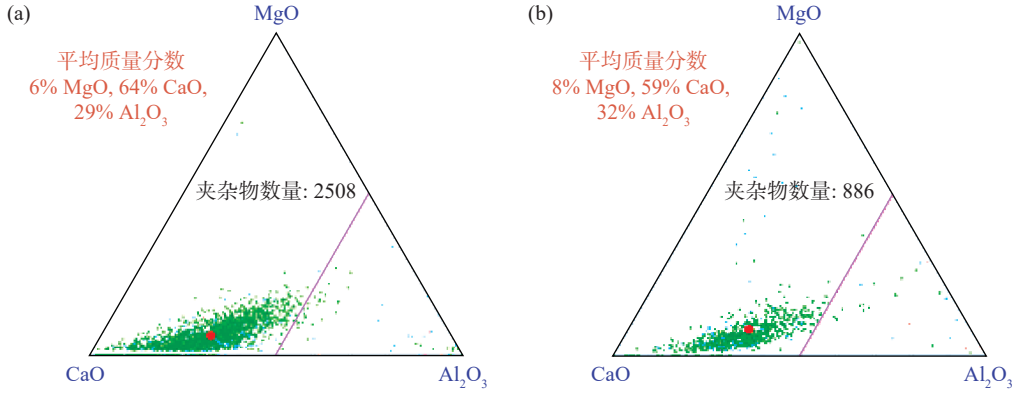

图 11　钙处理调整前后夹杂物数量对比：(a) 钙处理前夹杂物数量；(b) 钙处理后夹杂物数量

连铸留钢操作

针对连铸浇铸过程中下渣及卷渣的情况，在浇铸后期采取钢包留钢操作，夏兆东等[18] 通过研究夹杂物中示踪剂的含量变化来判断卷渣时机，得出 250 t 钢包在 15~18 t 时开始出现卷渣。本文结合目前使用的 50 t 钢包，LF 顶渣渣厚为 120~150 mm，计算得出留钢渣 3.8~4.3 t 能避免钢包浇注后期卷渣行为。调整留钢后高压锅炉管管坯低倍夹杂合格率稳定在 99% 以上，大颗粒 DS 类夹杂物显著降低。

通过上述工艺改进，高压锅炉管用钢管坯 B 类夹杂物控制在 1.0 级以下，DS 类夹杂物控制在 1.5 级以下，总体合格率控制在 98%，具体结果见表 8（非金属夹杂检验根据标准 GB/T 10561—2005 执行）。

表 8　高压锅炉管非金属夹杂物控制情况

炉号	牌号	规格/mm	A类		B类		C类		D类		DS类
			细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系	
7868	SA-210C	60	0.5	0	0	0	0	0	0.5	0	0
			0.5	0	0	0	0	0	0.5	0	0
7867	SA-210C	60	0	0	0	1.0	0	0	0.5	0	0
			0.5	0	0	0	0	0	0.5	0	0
7882	12Cr1MoVG	60	0	0	0	0	0	0	0	0	1.0
			0	0	0	0	0	0	0	0	1.0
7881	12Cr1MoVG	60	0	0	0	0	0	0	0	0	1.0
			0	0	0	0	0	0	0	0	0.5

结束语

（1）将转炉终点氧质量分数控制在 0.04% 以下，即将转炉终点碳质量分数控制在 0.07% 以上，并控制补吹次数，能够从源头上减少脱氧产物的数量，提高非金属夹杂物的合格率。

（2）通过保持 LF 顶渣成分，保证渣中 $w(CaO)$ 为 55%~60%，$w(Al_2O_3)$ 为20%~25%，$w(MnO)+w(FeO)\leqslant$ 0.6%，持续渣面脱氧，避免顶渣向钢液的传氧，有

效提高了炉渣的对非金属夹杂物的吸附能力，从而改善钢水纯净度。

（3）结合理论分析，采用 LF–VD 分段钙处理模式，降低了钙线喂入量 15 m/炉，不仅提高了产品质量，也降低生产成本。

（4）留钢渣 3.8~4.3 t 能避免钢包浇注后期卷渣行为。新工艺非金属夹杂物合格率稳定在 98%，产品竞争力大大提高。

参考文献

[1] 龚志翔，张建平，孔晓眉，等. 15CrMoG 钢 ϕ450 mm 管坯连铸二冷工艺的优化. 特殊钢，2004(6)：50
[2] 阳燕，刘建华，包燕平，等. 高压锅炉管用钢 P12 的洁净度分析. 钢铁钒钛，2010，31(4)：62
[3] 艾国安，谷力功，曹俊，等. 高压锅炉管生产现状. 天津冶金，2006(1)：18
[4] 邓通武. BOF–LF–RH–CC 流程高压锅炉管用钢 12Cr1MoVG 的生产实践. 特殊钢，2012，33(5)：35
[5] 武祥斌. 南钢 15CrMoG 管坯圆钢中裂纹的成因分析. 江苏冶金，2006(1)：52
[6] 孙丽媛，李京社，王林珠，等. 12Cr1MoVG 钢精炼过程中夹杂物的演变规律//第十七届 (2013 年) 全国冶金反应工程学学术会议论文集 (上册). 太原，2013：234
[7] 张劲光，董学涛. 轴承钢套圈断裂缺陷分析. 金属世界，2024(3)：49
[8] 葛龙桂，李国忠. 兴澄特钢连铸连轧高压锅炉管用钢坯的质量控制. 特殊钢，2005(3)：61
[9] 吴明洋. 100 t LF Si–Ca 脱氧低铝锅炉管用钢 15CrMoG 夹杂物分析. 特殊钢，2018，39(1)：65
[10] 寄海明. 电站锅炉管用钢 15CrMoG 的生产实践. 特殊钢，2012，33(5)：32
[11] 姚同路，刘浏，李树庆，等. 铝镇静钢夹杂物形态控制工艺研究. 钢铁，2010，45(11)：37
[12] 邸洪双，康向东，王国栋，等. 低碳钢的高温力学性能. 东北大学学报 (自然科学版)，2004(1)：43
[13] 肖鸿光. 油缸用 25Mn 钢 100 t EAF–LF–VD–软吹氩–CC 流程 B 类夹杂物的控制. 特殊钢，2021，42(4)：51
[14] 刘德祥，翟卫江，刘义，等. 南钢管线钢非金属夹杂物去除工艺. 金属世界，2015(4)：69
[15] 蔡小锋，包燕平，林路. 钙处理过程夹杂物演变及热力学分析. 工程科学学报，2016，38(S1)：32
[16] 张宏斌. 冷轧基料 SPHC 烂边缺陷原因分析及控制技术研究. 金属世界，2024(4)：79
[17] 刘德祥，翟卫江，刘义. 南钢管线钢非金属夹杂物控制研究//中国金属学会特钢分会特钢冶炼学术委员会 2014 年全国特钢年会论文集. 天津，2014：341
[18] 夏兆东，邓丽琴，王德永. 梅钢 250 t 钢包浇铸过程旋涡卷渣行为研究. 炼钢，2020，36(3)：44

作者简介：孔保建（1983—），男，江苏省徐州市人，本科，中级工程师，主要研究方向：炼钢生产技术。通信地址：江苏省泰州市江阴靖江工业园区江苏长强钢铁有限公司。E-mail：kongbaojian@xinchj.com。

通信作者：张龙（1994—），男，江苏省无锡市人，硕士研究生，中级工程师，主要研究方向：炼钢生产技术。通信地址：江苏省泰州市江阴靖江工业园区江苏长强钢铁有限公司。E-mail：zhanglong@xinchj.com。