DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.08.023

连铸板坯表面夹渣缺陷的成因及控制

赵建平,吕海富,王　帅,刘　鑫
(唐山钢铁集团有限责任公司,河北 唐山 063000)

摘　要:对连铸生产的板坯表面夹渣缺陷的产生原因进行了对比研究。结果表明,夹渣缺陷主要由连铸过程中结晶器卷渣造成的。通过采取防止水口面氧化、减少结晶器液面波动、防止浸入式水口堵塞、选择合理的水口浸入深度、优化保护渣和覆盖剂性能、合理控制拉速、减小结晶器振幅、选择合适的结晶器水量、优化职工操作等措施,最终使夹渣率由3.9%降至1.5%,取得良好的控制效果。

关键词:板坯;连铸机;夹渣;夹渣率

中图分类号:TG246　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2020)08-0793-05

Causes and Control of Slag Inclusion Defects on Continuous Casting Slab Surface

ZHAO Jianping, LYO Haifu, WANG Shuai, LU Xing
(Tangshan Iron & Steel Group Co., Ltd., Tangshan 063000, China)

Abstract: The causes of slag inclusion defects on slab surface produced by continuous casting were studied. The results show that the slag inclusion defects are mainly caused by mould slag entrainment during continuous casting. By adopting to prevent the nozzle surface oxidation, reduce mold level fluctuation and prevent the submerged nozzle clogging, choose reasonable nozzle immersion depth, optimization of protecting slag and covering agent performance, reasonable control of drawing speed, reduce the crystallizer amplitude, choosing the right and the optimization of the worker of the crystallizer water measures, eventually make slag rate from 3.9% to 1.5%, achieve good control effect.

Key words: slab; continuous casting machine; slag inclusion; slag inclusion rate

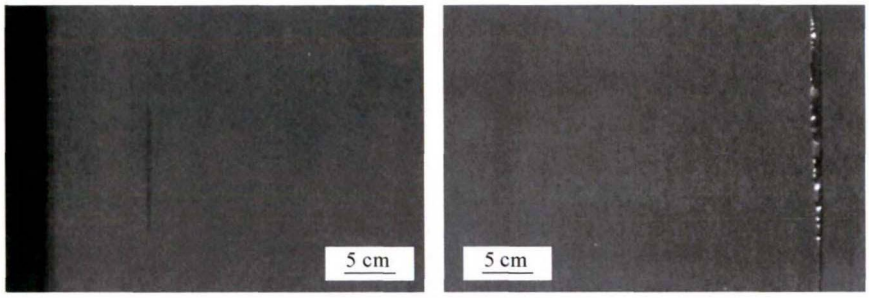
国内外学者一般认为,连铸板卷表面夹渣缺陷主要是结晶器保护渣、中间包覆盖剂、钢包渣等形成的CaO-MgO系复杂氧化物、Al_2O_3絮状物以及钢液脱氧形成的氧化产物卷入坯壳[1-3]。影响的主要因素有:结晶器液面波动、浸入式水口结构、保护渣黏度、钢包和中间包下渣等[4-6]。但由于国内外各钢铁公司的设备、工艺不同,夹渣缺陷的产生原因也不相同。

唐钢1700线生产的低碳低硅铝镇静钢作为冷轧基料,广泛应用于建筑、机械、汽车等行业。而由于板卷表面存在夹渣缺陷,造成热轧和冷轧过程中形成小白条、鼓包、起皮等缺陷,是困扰该产线板卷质量提升的难题。王占国[7,8]等对该连铸机生产的铸坯表面夹渣缺陷的产生原因进行过研究,并采取改进浸入式水口结构、优化保护渣性能、优化喂铝和钙线控制、降低渣中[FeO]含量,在一定程度上减少了缺陷。板卷夹渣率(夹渣率=(有夹渣缺陷的板卷重量/产量)×100%)为3.9%,随着公司产品结构的调整,高端家电板、汽车板等对板卷表面质量要求越来越高,板卷夹渣率高是困扰产品转型升级的瓶颈。因此,本文通过对生产的板卷表面夹渣缺陷产生原因研究,制定有效措施,以期减少缺陷,满足高品质板卷的生产要求。

1　缺陷形貌特征

板卷表面夹渣缺陷按形貌可分两种:一种呈黑线状,如图1(a)所示,长度5~40 cm,分布于板卷表层,横向分布多集中在板卷边部0~25 cm位置,该种缺陷占全部夹渣缺陷的70%,可见缺陷含有Na等保护渣成分,为连铸过程保护渣卷入造成的,扫描电镜结果如图2所示。第二种呈翘皮状,如图1(b)所示,长度在40 cm以上,嵌入或半嵌入板卷内部,在板卷表面分布无规律,该类夹渣缺陷占比30%。该类夹渣缺陷中,保护渣卷入占60%,脱氧产物、覆盖剂卷入、轧制过程侧导板刮蹭等原因占比40%。由此可见,由连铸结晶器卷渣造成的板卷夹渣缺陷占全部夹渣缺陷的88%,防止连铸过程中结晶器卷渣是减少夹渣缺陷的关键。

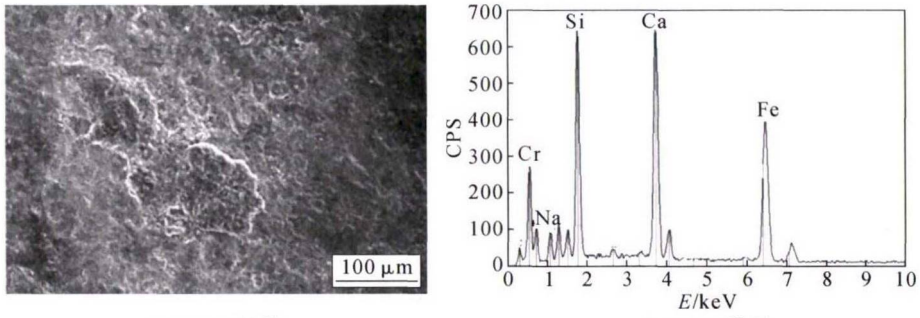
收稿日期:2020-05-25
作者简介:赵建平(1978-),河北唐山人,硕士,高级工程师.主要从事连铸铸钢冶炼方面的工作.电话:18000630526,E-mail:541949803@qq.com



(a)第一类夹渣缺陷　　(b)第二类夹渣缺陷

图 1 夹渣缺陷形貌

Fig.1 Morphology of slag inclusion defects in hot rolled coils



(a)SEM形貌　　(b)EDS结果

图 2 夹渣缺陷的 SEM 形貌和的 EDS 分析结果

Fig.2 SEM image and EDS analyses of slag defects

结晶器卷渣的产生机理可分为 4 种[9]：①剪切卷渣，即弯月面附近，由于形成驻波而产生的结晶器内壁卷渣；②漩涡卷渣，由于水口堵塞、水口对中不良、水口面氧化以及水口内壁侵蚀冲刷等原因，导致水口两侧流股的速度、方向不对称，产生偏流，形成漩涡，造成的保护渣卷入；③弯月面扰动，氩气流量过大等原因，使水口周围的氩气泡引起钢-渣界面扰动，使保护渣卷入坯壳；④液面结壳卷渣，浇注温度过低时，保护渣凝结成絮状渣团，引起的夹渣缺陷。

由此可见，结晶器卷渣主要与结晶器液面波动、水口使用状况、钢液流动状态以及保护渣融化状态等因素有关。对于唐钢板坯连铸机，在所有的夹渣缺陷中，水口面氧化、板间氩气流量大等生产工艺参数不合理，导致结晶器液位波动而产生的夹渣缺陷占比 38%，其次是浸入水口插入深度不合理、浇注温度、拉速设定不合理等原因，影响保护渣融化而形成的夹渣缺陷占 18%，保护渣、覆盖剂等物料影响占 17.5%。此外，结晶器振幅和频率、结晶器水流量以及职工操作等，都是影响夹渣的因素，这些因素导致的夹渣缺陷共占 26.5%。

2 控制措施

2.1 防止水口面氧化

板坯连铸机经常发生水口面氧化现象，水口面氧化后，氩气在上下水口间分布不均匀，成股进入结晶器，导致结晶器液面局部位置剧烈波动，产生夹渣缺陷，液面局部位置剧烈波动，如图 3 所示，从而产生夹渣缺陷。一旦发生水口面氧化，板卷夹渣率可达 7.3%以上，这是影响铸坯质量的重要因素。造成唐钢板坯连铸机水口面氧化的原因主要有 4 个：①水口面尺寸精度差，容易在快换水口时发生板间夹钢，使水口背压无法满足保护浇注的要求；②氩气管路跑、漏气，使到达水口面起保护浇注作用的氩气量减小；③板间氩气流量设定不合理，不能对钢液和水口面起到良好的保护效果；④由于水口材质原因，部分品牌水口的板面耐氧化性差。

图 3 浸入式水口板面氧化导致的结晶器液面波动

Fig.3 Fluctuation of crystallizer liquid level caused by immersion nozzle surface oxidation

板坯连铸机水口面尺寸精度方面存在如下问题：①水口面厚度精度差，不同水口的板面厚度最多可相差 1 mm，使快换水口时，容易发生板间夹钢，导致上、下水口间有缝隙，引发水口面氧化；②部分浸

入式水口的板面不平整，水口面耐材局部位置凸出，水口使用后，会直接造成上、下水口面间有缝隙，导致水口面氧化；③部分水口板面底部钢壳不平整，使快换水口时与快换机构垫块间产生的阻力大，影响快换缸速度，容易发生板间夹钢，引发水口面氧化。针对以上问题采取的具体措施如下：①提高水口面精度，使不同水口的板面厚度偏差在0.05 mm以内；②水口出厂前对耐材面进行检查、打磨，确保耐材面平整；③水口出厂前将板面底部钢壳磨平，防止钢壳与快换机构垫片接触部位凹凸不平，造成受力不均，换水口时发生板间夹钢，导致水口面氧化。

氩气管路跑、漏气，造成板间氩气压力不足，也是导致唐钢板坯连铸机水口面频繁氧化的重要原因。氩气管路跑漏气的主要原因是氩气管接头的结构设计不合理，接头连接点多，容易漏气，并且接头安装在包壁位置，吊包、座包、翻包时容易刮碰导致漏气。为解决该问题，设计了中间包三路氩气管路固定装置，该装置由支撑座、变径接头、硬通风管、软管四个部分构成，如图4所示。改进前后的实际连接情况如图5所示，与原装置相比，新装置采用了连接点少的变径直角接头代替传统的直角接头，并且接头焊接在支撑座内部，减少了漏气概率。同时，新装置固定在包底，防止了吊包、座包以及翻包时刮碰导致的漏气。

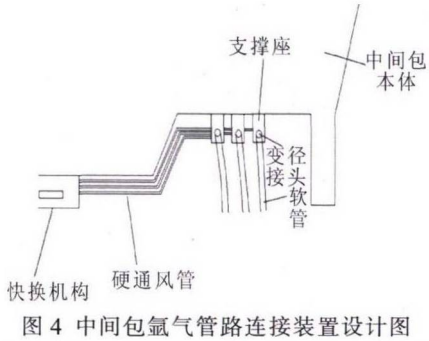


图4 中间包氩气管路连接装置设计图
Fig.4 Tundish argon pipeline connection design

板间氩气流量的大小也会影响水口面氧化，实践表明，板间氩气背压低于0.01 MPa，氩气对水口面的保护作用下降，水口面容易氧化，板间氩气背压超过0.025 MPa时，结晶器液面波动加剧，凝固前沿容易冲破液渣层，直接与粉渣层接触，产生夹渣缺陷，使铸坯夹渣率达4.5%以上。浇钢过程中板间氩气背压控制在0.01~0.025 MPa，有利于夹渣的控制。

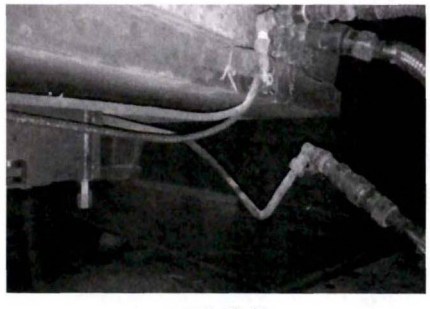
此外，水口面氧化与水口材质也有关，原板坯连铸机使用的浸入式水口板面石墨含量为7%，浇注6.5 h后表面氧化较为严重，换水口后表面刮痕深度平均达1.5 mm，当水口2板面的石墨调整为5%，同时将Al_2O_3由68%提高至71%，在提高水口面耐氧化性的同时保证了强度。测量换水口后表面刮痕深度表明，同样使用6.5 h后的水口面表面刮痕深度由平均1.5 mm减少至0.5 mm，水口面耐氧化性明显提高。

通过以上措施，解决了水口面氧化问题，防止了水口面氧化导致结晶器液面局部位置剧烈波动而产生的夹渣缺陷。

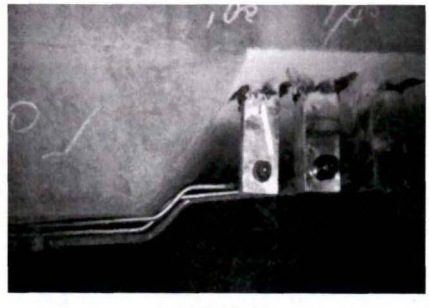
2.2 减少结晶器液位波动

结晶器液面波动是导致结晶器卷渣的根源，造成波动的原因主要如下：①外部干扰，指水口侵蚀扩径，水口渣线漏眼以及塞棒失控等；②拉速突变，指拉速瞬间变化引起钢流不稳定，流股碰撞结晶器窄面引起夹渣；③氩气流量不合理，指中间包三路氩气流量的增加导致结晶器液面波动增加，加大夹渣发生几率；④自动化参数不合理，指自动化参数设定不合理导致塞棒抖动幅度大，使结晶器液位波动大；⑤中间包熔渣结壳，使渣壳与塞棒粘附一起后，影响塞棒动作，导致结晶器液面波动大。

采取措施如下：①合理的涨、降速速率，要求正常情况下，拉速涨、降速率控制在0.05 m/min，防止拉速变化大引起结晶器液位波动，造成卷渣；②合适的中间包三路氩气流量，要求氩气背压控制在0.01~0.02 MPa，如浇钢过程中如结晶器液面波动



(a)改造前



(b)改造后

图5 改进前后的氩气管路
Fig.5 Argon pipeline in tundish before and after improvement

大，将氩气流量逐渐调小，若氩气流量调小后结晶器液面波动仍较大，进行更换水口作业；③合理设定自动化参数，保证结晶器液面平稳；④为控制中间包结壳，一是浇注过程中间包液面保持 8 t 范围波动。二是每炉钢在塞棒、长水口周围添加 2~5 袋稻壳，以避免中间包结壳造成的结晶器液位波动。

2.3 防止浸入式水口堵塞

连铸过程中夹杂物或冷钢在水口内壁絮集，造成水口堵塞，引发“涨、涮杆”现象，这会导致结晶器液位剧烈波动，导致产生夹渣缺陷，严重时可能直接造成水口冻结，导致停浇事故。造成水口堵塞的原因主要如下：①精炼过程中 Ca 处理工艺不合理，Ca/Als 控制范围不合适，导致钢中夹杂物变性不充分。②钢中的[Al]与耐材中的 MgO 发生反应，生成 $MgO \cdot Al_2O_3$。③钢中加入的 Ca 与 S 反应生成的 CaS。④钢液温度低，产生冷钢。通常生产低碳钢中间包内钢液过热度低于 15 ℃，生产中碳钢，中间包内钢液过热度低于 20 ℃，容易在水口内壁絮集冷钢，造成“涨、涮杆”现象。

采取措施如下：①精炼过程中保证 Ca 处理后，静吹时间 8 min 以上，以提高 Ca 处理效果；②连铸工序确保中间包烘烤温度在 1 100～1 200 ℃保温 30 min 以上，防止开浇钢液温降大，水口内部结冷钢；③对于 SPHD 等对表面质量要求高的钢种，采用气洗水口、中间包塞棒吹氩等技术防止水口堵塞；④浇注过程中，生产低碳钢，中间包内钢液过热度控制在 15~30 ℃，生产中碳钢，中间包内钢液过热度控制在 20~35 ℃，以防止钢液温低造成水口内壁结冷钢。以上措施最终使该铸机月平均“涨、涮杆”次数由 4 次降至 0 次，杜绝了“涨、涮杆”引发结晶器液位波动而产生夹渣缺陷。

2.4 合理的水口浸入深度

浇注过程中，在结晶器流场的作用下，靠近结晶器窄边的结晶器液面较水口周围的结晶器液面高，形成高度差，使结晶器表面钢液从窄边向水口方向流动，当水口浸入较浅时，钢液流速过快，剪切作用过强，容易产生卷渣。随着水口浸入深度的增加，涡流涡心位置改变，同时液面波高降低和表面流速降低，使铸坯夹渣率降低，但水口浸入过深，结晶器表面钢液的热量不足，影响保护渣的熔化，不利于夹渣的控制。因此，合理的水口浸入深度对夹渣控制至关重要。

板坯连铸机水口浸入深度为 80~150 mm 范围内，水口浸入深度对板卷夹渣的影响不大，夹渣率保持在 2.0%以内。水口浸入深度低于 80 mm 时，由于结晶器表面钢液流速加快，板卷夹渣率迅速上升，达到 4.98%；水口浸入深度高于 150 mm 时，板卷表面小夹渣缺陷增多。因此，水口浸入深度控制在 80~150 mm 时有利于夹渣的控制。

2.5 选择合适性能的物料

浇注过程中保护渣、覆盖剂等物料直接与钢液接触，因此，物料的理化性能影响着夹渣的发生。

保护渣黏度、表面张力以及液渣层厚度对夹渣有的影响较大。提高保护渣的黏度可降低保护渣流动性，减少卷渣；提高保护渣的表面张力可降保护渣黏附功，减少夹渣；合适的液态渣层厚度在起到良好的绝热保温、润滑作用的同时，也能减少夹渣。

板坯连铸机试验了保护渣性能对夹渣的影响，试验用四种低碳钢保护渣的成分如表 1 所示，四种保护渣的碱度分别为 1.11、0.91、0.91 和 0.93；黏度分别为 1.4、1.2、1.2 和 1.2 Pa·s；熔速分别为 29、22、25 和 27 mm/s，液渣层厚度分别为 8~14、6~10、7~12 和 7~12 mm 使用四种保护渣浇注时板卷夹渣率分别为 1.7%，4.1%，2.8%和 2.1%。这说明，适当提高保护渣的碱度、黏度、熔速，有利于夹渣的控制。

中间包覆盖剂具有吸附夹杂、保护浇注的作用，板坯连铸机使用的两种品牌覆盖剂成分如表 2所示。生产实践表明，使用覆盖剂 Ⅰ 时夹渣率较高，达 5.6%，而使用覆盖剂 Ⅱ 时，夹渣率较低，为 1.8%。为了增强覆盖剂 Ⅰ 的控制夹杂的作用，采用了增加覆盖剂中 CaO 含量的方法，将覆盖剂的 CaO 含量由 25~30%提高至 35~40%，改进覆盖剂成分后，板卷表面夹渣缺陷明显减少，夹渣率控制在 1.9%，达到了与覆盖剂 Ⅱ 相同的控制效果，这说明 CaO 含量的提高，覆盖剂吸附夹杂的能力提高，有利于夹渣的控制。

2.6 合理控制拉速

铸机拉速过低会影响保护渣融化，在板卷表面形成小夹渣缺陷。统计结果表明，生产低碳钢时，拉

表 1 试验保护渣成分 w(%)

Tab.1 Composition of experimental protective slag

	SiO_2	MgO	CaO	Na_2O	Fe_2O_3	Al_2O_3	R_2O	F^-	C%
保护渣 Ⅰ	29.31	5.29	29.90	10.05	0.46	2.33	0.88	5.46	8.87
保护渣 Ⅱ	33.19	3.19	30.73	8.68	1.88	3.86	0.92	4.76	6.54
保护渣Ⅲ	30.29	2.64	28.81	9.72	0.54	4.10	0.91	7.81	8.40
保护渣Ⅳ	31.30	3.08	29.21	9.07	0.64	3.31	0.84	5.37	8.01

表2 试验用覆盖剂成分 w(%)
Tab. 2 Composition of experimental coating agent

	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	C
覆盖剂Ⅰ	26.53	25.13	9.48	8.74	9.83
覆盖剂Ⅱ	34.63	41.30	1.38	6.17	2.76

速≤1.3 m/min 时，板卷表面小夹渣缺陷增多，夹渣率达 10%以上。采取优化铸机拉速控制的方法，即低碳钢，拉速控制≥1.3 m/min；中碳钢，拉速≥1.2 m/min。如特殊原因造成低拉速生产，对应的板卷优先轧制对表面质量要求稍低的钢种。

另外，统计的所有因夹渣、翘皮缺陷降判的板卷中，有拉速波动的占比 14%。并且 90%以上的拉速波动是由于生产节奏影响。因此，优化了炼钢生产组织模式，使铸机恒拉速率由 81.0%提高至 91.5%，保证了拉速稳定。

2.7 结晶器振幅选择

浇注过程中液态熔渣从渣圈与弯月面初生坯壳间的通道流入，在结晶器振动时，会使渣圈与弯月面初生坯壳接触，将弯月面顶弯，导致保护渣不能正常流入，形成振痕。当振痕过深时，在振痕深处容易形成夹渣缺陷。为减少夹渣缺陷，将板坯连铸机振幅由 4.0 mm 降至 3.5 mm，在减小振痕深度的同时，降低液态渣道对坯壳的压力，可以减少保护渣的嵌入。

2.8 结晶器水量选择

受季节影响，冬季板坯连铸机结晶器进水温度 19~25 ℃，夏季结晶器进水温度 25~34 ℃。冬季结晶器进水温度较夏季低 8 ℃左右。由于水温低，导致结晶器冷却强度大。另外，结晶器角部为二维冷却，使结晶器角部过度冷却，影响保护渣的融合，容易使板卷边部产生夹渣缺陷。因此，冬季板卷夹渣率达 5.2%以上。

采取降低结晶器冷却强度的方法，即冬季将结晶器宽、窄面水流量由 250、27 m^3/h降至 215、25 m^3/h，该方法有效的解决了结晶器角部形成冷钢问题，消除了冬季结晶器角部冷却强度大而导致的板卷边部夹渣问题，使夹渣率控制在 2%以内。

2.9 优化捞渣操作

捞渣时钎子触碰钢液、搅动液面，也会产生夹渣缺陷。因此，对捞渣操作要求如下：第一，添加保护渣前，检查结晶器内渣条情况，没有成型的渣条，不需要捞渣；第二，捞渣时动作要轻，不能接触钢液，以免产生大的翘皮缺陷；第三，添加保护渣和捞渣条时，要注意使用的工具应避开液位探头，液面误操作导致结晶器液位波动，也会产生夹渣缺陷。

2.10 实施效果

以上措施实施后，板坯连铸机夹渣现象得到了有效解决，板卷夹渣率由 3.9%降至 1.5%，板卷降判率由 0.25%降至 0.10%，满足了酸洗板、家电板等对表面质量要求高的产品生产要求。

3 结论

(1)连铸结晶器卷渣是造成板卷表面夹渣缺陷的主要原因。

(2)通过减少水口面氧化、减少结晶器液面波动、防止浸入式水口堵塞、选择合理的水口浸入深度、优化物料性能、合理控制拉速、减小结晶器振幅、选择合适的结晶器水量、优化捞渣操作等措施，可以使板卷夹渣率由 3.9%降至 1.5%。

参考文献：

[1] 李向奎，张丙龙，陈玉鑫，等. 冷轧板表面夹杂渣缺陷成因及控制[J]. 中国冶金，2015，25(12)：54-58.

[2] 李建文，高福彬，刘红艳. 低碳钢铸坯表面“夹渣”生产控制实践[J]. 连铸，2015，40(4)：65-68.

[3] 邓小旋，季晨曦，王胜东，等. 冷轧薄板线状缺陷的工艺控制[J]. 中国冶金，2017，27(4)：55-60.

[4] 孟庆玉，马强. 连铸大方坯夹渣缺陷的改进措施 [J]. 连铸，2017，42(3):25-29.

[5] 刘延强，杨敏铭，单伟，等. 热轧卷表面线状缺陷分析[J]. 中国冶金，2016，26(7)：48-53.

[6] 罗高强，唐萍，文光华，等. 梅山 2 号板坯连铸低碳钢铸坯质量研究[J]，钢铁，2007，42(8)：39-43.

[7] 王占国，李梦英，马永红，等. 低碳低硅铝镇静钢热轧板卷表面夹渣缺陷分析与控制[J]. 河北冶金，2015, 231(3):14-21，26.

[8] 张洪波，李梦英，杨杰，等. 低碳低硅铝镇静钢热轧板卷表面夹渣的控制技术[C].第二届全国连铸工艺技术学术会议，2013 年.

[9] 刘曙光，赵建平，王帅，等. 浅谈如何减少低碳低硅铝镇静钢时结晶器卷渣[J]. 连铸，2019, 44(1): 14-17.

杭州文特机电有限公司

热处理炉、加热炉、工业自动化工程、环保节能工程、机电设备的设计、制造、加工、安装、技术开发、技术咨询、技术服务。工业自动化设备、仪器仪表、工业炉窑配件、计算机等的生产、批发、零售。

地址：杭州市西湖区万塘路 262 号 6 号楼 5-65 室
厂址：长兴县林城镇午山岗开发区
联系人：丁为兵
电话：15088362822
传真：0572-6087688
邮箱：dwb150@163.com