DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2024.4145

304 不锈钢 No.1 表面黑带缺陷研究与控制实践

王徐皇,李剑颖,王　鑫
(印尼广青镍业有限公司 制造技术部,印度尼西亚 苏拉维西 94974)

摘　要:针对 304 奥氏体不锈钢 No.1 表面的黑带缺陷,使用 SEM 及 EDS 进行了微观形貌及成分分析,结合结晶器内流场行为,明确了该缺陷的来源为渣钢卷混。在 304 不锈钢生产实践中,通过在连铸工序控制浸入式水口选型、限定水口插入深度、稳定拉坯速度等措施稳定了钢液浇铸过程中结晶器内的液面,有效降低了卷渣几率;并在后续工序中加强了铸坯表面质量检验、优化了除鳞工艺等,进一步降低了黑带缺陷整体降级率。最终,304 不锈钢 No.1 黑带缺陷发生率整体由改善前的 15.0%降低至 3.0%以下。

关键词:不锈钢;连铸工艺;黑带缺陷;卷渣;浸入式水口

中图分类号:TG245　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2024)12-1181-08

Lamination Defects Research and Control Practice on the No.1 Surfaces of 304 Stainless Steel

WANG Xuhuang, LI Jianying, WANG Xin
(Manufacturing Technology Department of PT Indonesia Guang Ching Nickel and Stainless Steel Industry, Sulawesi Tengah 94974, Indonesia)

Abstract: Scanning electron micrope (SEM) and energy dispersive spectroscopy (EDS) were used to analyse the microstructural morphology and composition of lamination defects on the No.1 surface of 304 austenitic stainless steel. Combined with the study of the flow behavior inside the crystallizer, the defect was identified as being caused by slag coiling during the casting process. In the production of 304 stainless steel, measures such as controlling the selection of the submerged entry nozzle, limiting the insertion depth, and stabilizing the casting speed in the continuous casting process are implemented to stabilize the level of molten steel in the crystallizer, effectively reducing the likelihood of slag coiling. In subsequent processes, the surface quality inspection of the cast slabs is enhanced, and the descaling process is optimized, further lowering the overall downgrading rate caused by lamination defects. Ultimately, the occurrence rate of lamination defects on No. 1 304 stainless steel decreases from 15.0% to below 3.0%.

Key words: stainless steel; continuous casting process; lamination defect; slag coiling; submerged entry nozzle

304 奥氏体不锈钢兼具良好的机械加工性能和焊接性能,同时耐蚀性能出色[1-4],是目前世界范围内应用最广泛的不锈钢钢种之一[5-6]。某厂生产的 304 奥氏体不锈钢板坯由“炼钢–连铸”工序产出,经加热后轧制成不锈钢黑皮钢带,随后经固溶–酸洗工艺制得 304 不锈钢 No.1 中间产品。该产品表面频繁出现长条状“黑带”缺陷,导致降级率居高不下,严重时高达 15.0%。黑带缺陷降级率为特定周期内因黑带降级的钢卷质量占该周期总产量的比例,该值能较好地显示该周期内的黑带缺陷对 304 不锈钢钢卷表面质量的影响。

黑带缺陷的存在破坏了不锈钢基体的连续性,使不锈钢表面存在电位差,易形成腐蚀源,严重影响了不锈钢的耐蚀性;将 No.1 中间产品作为冷轧原料时,在轧制过程中,随着钢带延展,黑带缺陷会被同步压延拉长,形成长条状缺陷,同时损害冷轧辊辊面从而引起次生缺陷,严重影响冷轧成品卷的整体表面质量;当产线以极薄规格生产冷轧产品时,由于缺陷与基体的延展性不一,易发生局部应力集中,进而造成轧制过程中不锈钢钢带出现穿孔甚至断带等现象,引发生产安全事故;黑带缺陷亦为下游客户投诉的主要缺陷之一。因此,当 No.1 中间产品出现黑带

收稿日期:2024-08-07

作者简介:王徐皇,1980 年生,工学学士.主要从事不锈钢与普碳钢生产工艺技术研究方面的工作.Email: wxuh2008@163.com

引用格式:王徐皇,李剑颖,王鑫.304 不锈钢 No.1 表面黑带缺陷研究与控制实践[J].铸造技术,2024,45(12):1181-1188.
WANG X H, LI J Y, WANG X. Lamination defects research and control practice on the No.1 surfaces of 304 stainless steel[J]. Foundry Technology, 2024, 45(12): 1181-1188.

中国知网　https://www.cnki.net

缺陷时，固溶酸洗工序会对其作返洗消缺或质量降级处理，但这也造成了生产成本和质量成本的严重浪费。在此境况下，黑带缺陷的改善迫在眉睫。

目前，业内已有多位专家对黑带缺陷的成因进行了深入分析。陆海飞等[7]对 304 热轧带钢表面黑带缺陷进行了微观成分分析，结果表明，黑带缺陷具备连铸保护渣典型特征成分，是由于连铸保护渣卷入经轧制后而形成的。张磊等[8]认为，结晶器液面波动是卷渣的根源。赵春宝等[9]指出，液面不稳定主要与不合理的浸入式水口(简称“水口”，submerged nozzle, SEN)插入深度、拉速波动明显等因素有关。吴颖东等[10]的水模型实验结果表明，在一定范围内，随着水口插入深度的增加，液面波动程度和卷渣频率均呈降低趋势；随着拉速增大，水口附近的波动先减小后增大，窄边附近的波动逐渐增强，卷渣频率逐渐增大。由此认为黑带缺陷很有可能来源于钢液浇铸过程中结晶器内发生的卷渣，控制钢液波动程度可能对卷渣有一定的控制效果。

先前的研究主要聚焦于结晶器内流场行为对黑带缺陷形成的影响，提出了一些黑带成因理论，但与生产实际联动有限，对控制生产工艺参数以减少黑带缺陷的方法在实际应用中的效果鲜有提及。本文以 304 不锈钢 No.1 中间产品为研究对象，使用蔡司 ZEISS EVO18 扫描电子显微镜(SEM)对黑带缺陷进行了高分辨观察，并配合能谱仪(EDS)对缺陷位置及正常位置的成分进行了分析对比，明确了黑带缺陷来源于钢液浇铸过程中结晶器内发生的卷渣；结合生产实际，对连铸、热轧和退洗工序进行了调整。连铸工序采用倾角 0°、侧孔尺寸55 mm×70 mm 的水口，插入深度控制在 150~155 mm，拉坯速度限定为 1.20~1.30 m/min；热轧工序加强铸坯质量检验和表面清洁度管理，优化除鳞工艺；退洗工序适当降低产线速率，并将混酸一段的 HF 浓度控制在 23.0~30.0 g/L。将以上生产工艺固化，经过多次生产测试，最终，整体黑带降级率被控制在了 3.0%以内。

1 黑带缺陷

黑带缺陷整体沿轧制方向呈粗糙长条状伸展，宽约 2.0~3.0 cm，长度不等；颜色分布不均，或黑或灰，明暗不一；表面凹凸不平，可见短小鳞片状夹杂物嵌于内，手触有毛刺感，其在 304 不锈钢 No.1 表面的宏观形态如图 1 所示。

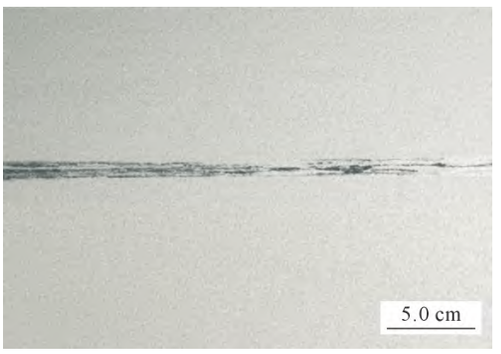

图 1 黑带缺陷宏观形貌
Fig.1 Macroscopic morphology of black band defects

采用蔡司 ZEISS AxioLab.A1 光学显微镜观察 304 不锈钢 No.1 表面正常位置及黑带缺陷位置，形貌如图 2 所示，可以发现正常位置晶粒边界清晰(图像部分模糊是由于钢带表面凹凸不平引起的对焦不良)；而缺陷位置出现大片似岩状物质，几乎看不到完整的晶粒，由此可以推测黑带缺陷可能源于外来物质，并且影响带钢表面正常的晶粒结构。

使用 SEM 对黑带缺陷表面进行观察，其形貌如图 3 所示。将缺陷位置与正常基体位置的形貌进行对比，可以发现正常位置的晶粒边界清晰，而缺陷位置有一层形状不规则的物质或覆盖、或混杂于钢带表面。分别对黑带缺陷表面及截面进行微观形貌观察，结果如图 4 所示，并对样品不同区域进行化学成分测定，各谱图成分结果如表 1 所示。经分析可知：

(1)3#、6# 和 11# 位置成分与 ASTM-A240 标准中 304 成分(表 2)高度相似，可以被认为是基体成分。

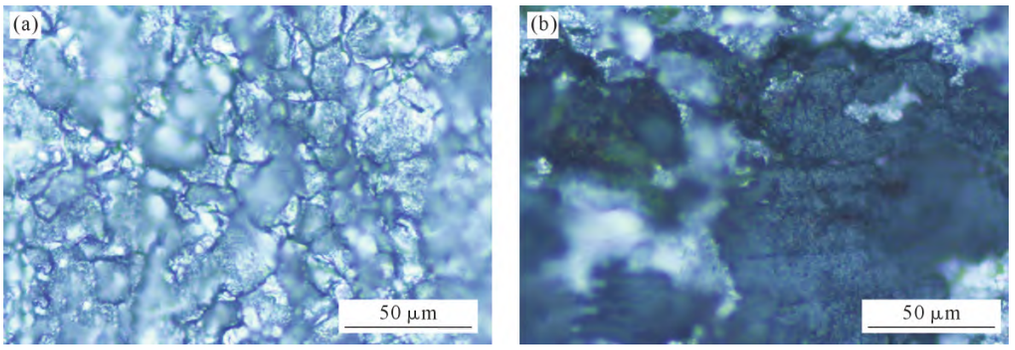

图 2 304 不锈钢 No.1 表面正常位置及黑带缺陷 OM 照片：(a) 正常位置；(b) 缺陷位置
Fig.2 OM images of the No.1 surface of 304 stainless steel under a metallographic optical microscope: (a) normal position; (b) defect position

中国知网 https://www.cnki.net

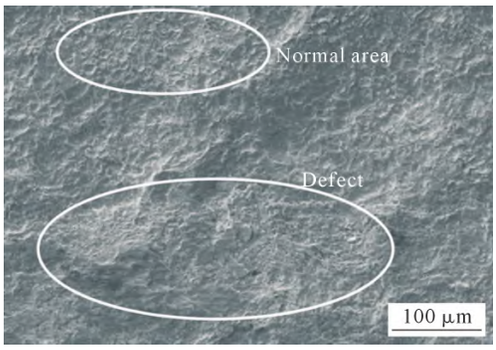

图 3 黑带缺陷微观形貌

Fig.3 Microscopic morphology of lamination defects

(2)黑带缺陷表面(1#、2#、4# 与 5# 位置)成分较基体(3# 和 6# 位置)的 C、O、Mg、F、Al、Si、Ca、K 和 Na 元素有明显富集，主要存在形式为 C、CaF_2、MgO、Al_2O_3、SiO_2、CaO、K_2O 和 Na_2O，这些都是保护渣典型成分(表 3)。

(3)缺陷截面较浅位置可见若干形状不规则的液滴状夹杂,同样,黑带缺陷截面成分(7#、8#、9# 与 10# 位置)较基体(11# 位置)的 C、O、Mg、F、Al、Si、Ca、K 和 Na 元素也有明显富集。由此可知,黑带缺陷的形成与保护渣的卷混有关[11]。

2 缺陷来源分析

根据以上分析,并结合前人研究结果[10,12-14],可知黑带缺陷的形成机理如下：在钢液浇注过程中,由于钢液表面波动过于剧烈,在剪切力的影响下,保护渣液滴脱离液渣层被卷入钢液界面以下，即发生保护渣卷混行为。随后,渣滴随着钢液一同冷却,经轧制、固溶及酸洗处理后,于钢卷表面形成粗糙的黑色长条状缺陷,即黑带缺陷。

保护渣是一种覆盖于钢液表面的，用于保护浇铸顺利进行的重要材料，其主要化学成分为:CaO、SiO_2、Al_2O_3、MgO、K_2O、Fe_2O_3、FeO、Na_2O、CaF_2、碳粒以及有害成分 P、S 等[15],通常用于钢液连铸生产,可

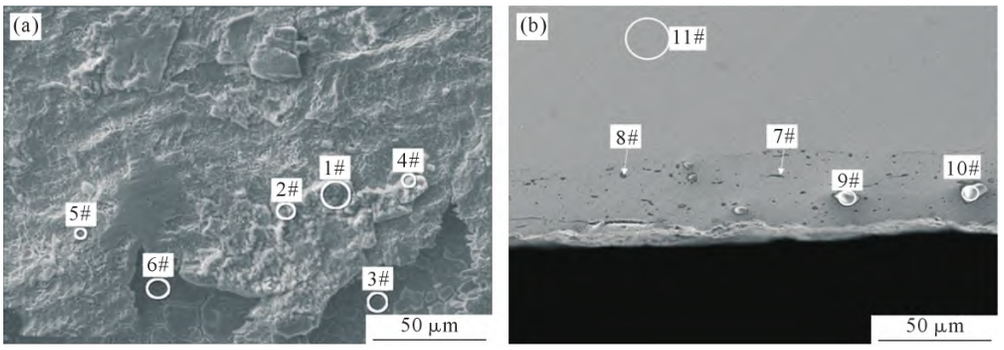

图 4 黑带缺陷 SEM 照片:(a) 表面;(b) 截面

Fig.4 SEM images of lamination defects: (a) surface; (b) cross-section

表 1 黑带缺陷处元素分布

Tab.1 Elemental distribution of lamination defects

(mass fraction/%)

Elemental mass fraction	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#	10#	11#
C	5.20	4.43	-	2.82	21.86	-	5.14	3.02	2.07	2.13	0.90
O	20.66	29.47	-	34.06	2.71	0.09	22.59	15.74	29.41	25.74	-
Mg	0.37	0.69	-	0.55	0.23	-	0.35	0.23	-	0.40	-
F	5.28	4.39	-	5.03	-	-	7.74	4.26	9.78	10.38	-
Al	0.51	0.72	-	0.72	0.45	-	0.45	0.87	-	1.23	-
Si	5.62	5.73	-	6.99	0.25	-	12.64	14.51	14.67	14.42	-
Ca	9.91	8.48	-	8.39	0.14	-	17.67	13.64	41.81	41.66	-
Cr	9.71	14.89	19.93	6.56	13.13	18.43	7.25	5.38	1.45	0.74	18.90
K	0.96	2.18	-	-	3.56	-	-	0.86	-	-	-
Na	1.33	3.32	-	-	2.97	-	0.67	0.65	0.15	-	-
Fe	36.70	22.64	63.83	30.59	39.52	70.30	12.97	13.02	1.43	0.91	70.78
Ni	3.26	3.14	8.21	3.44	9.82	8.90	0.31	-	-	-	7.86

表 2 ASTM−A240 标准中 304 不锈钢成分要求

Tab.2 Composition requirements for 304 stainless steel in ASTM−A240 standard

(mass fraction/%)

Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N
Content	≤0.080	≤0.75	≤2.00	≤0.045	≤0.030	18.00~20.00	8.00~11.00	≤0.100

中国知网 https://www.cnki.net

表 3 连铸用保护渣典型成分

Tab.3 Typical composition of the mold powder for continuous casting

(mass fraction/%)

SiO_2	CaO+ MgO	Al_2O_3	Na_2O+K_2O	Fe_2O_3	C	F
31.0~33.0	34.0~36.0	3.0~4.5	9.5~11.0	1.5~3.0	3.5~5.0	5.5~7.0

有效防止钢液辐射温降,避免钢液与空气直接接触发生二次氧化;熔化后进入初生坯壳与结晶器铜板间起到润滑作用,减小了拉坯阻力,避免粘钢及漏钢;同时还可吸附钢液中上浮的夹杂物,净化钢液成分,并且改善结晶器内传热结构,提高铸坯质量。

通常保护渣在结晶器内分为 3 层结构,即粉渣层、烧结层和液渣层。其中,液渣层又称熔渣层,是由于高温钢液流股冲击保护渣,不断传输热量使其熔化而形成的。被卷入熔池内部形成黑带缺陷的渣滴就是液态保护渣。而卷渣的发生与否同结晶器内钢液的流动行为息息相关。

在连铸浇注过程中,当钢液经水口流入结晶器时,射流通过侧孔径直流向窄面,此过程中钢液流动前沿面逐渐变宽、流速逐渐降低。钢流在到达窄面后一分为二,形成双辊流(也叫双环流[16]):一流向上升,在到达弯月面后转向,沿保护渣液渣层回流向水口方向,称“上升流”;一股向下降,在到达一定深度后,向结晶器心部回流,称“下降流”。结晶器内流场如图 5 所示[17]。

由水口出发的两侧流股在结晶器内形成上下共四个回流区,上部两个对称的回流区与保护渣液渣层相接触,界面处就是卷渣行为的发生位置。在分析与卷渣相关的钢液流动行为时,主要关注上部两个回流区的涡心所对应的结晶器窄面处的冲击位置和上升流股带来的液面流动速度与波动情况。钢液表面流速过大会造成渣钢界面波动剧烈,容易卷渣[8,10,18];而上升流股冲击深度(对应上部回流区涡心深度)较浅时,上升流股增强,也会引起钢液表面的剧烈波动,增大卷渣风险。

钢液浇注过程中,容易有 3 类卷渣行为发生[19]:表面回流卷渣、漩涡卷渣和由于水口插入深度过浅引起的卷渣。

2.1 表面回流卷渣

浇注过程中,结晶器内钢液的上升流股在冲击弯月面后转向,沿保护渣液渣层流动,用两液面间的界面吸引力带动液渣发生位移,在其下缘处形成鼓包。如果钢液表面流速较大或波动较剧烈,相应的剪切力会将鼓包“剪下”,生成保护渣液滴,留在钢液内部,形成“卷渣”,具体过程如图 6 所示。

2.2 漩涡卷渣

在结晶器上部,两侧上升流股会在钢液表面形成两股相向而行的湍流。湍流流动行为不稳定。如果水口对中不良,两侧湍流不平衡,就无法在水口中心线处相遇,而是在水口一侧形成漩涡,如图 7a 所示。漩涡对液态保护渣存在一定的吸引力,会使液渣鼓包脱落形成渣滴,造成“卷渣”,如图 7b 所示。

2.3 浸入式水口插入深度过浅引起的卷渣

水口插入深度为结晶器液面到水口侧孔中心的距离[16]。水口插入深度过浅时,水口侧孔距保护渣渣层较近。当钢流通过侧孔流入结晶器时,很容易将保护渣带入钢液,形成“卷渣”,形成过程如图 8 所示。在连铸过程中某浇次即将结束时,渣线位置较低也有可能形成类似的卷渣。

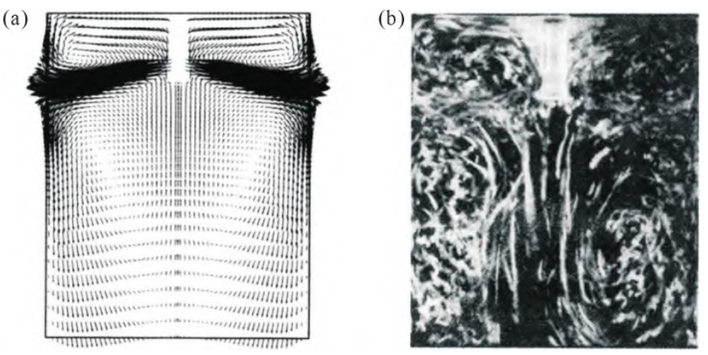

图 5 结晶器内流场示意图:(a) 流场计算结果;(b) 水模型显示流场[17]

Fig.5 Schematic representation of the flow simulation in the crystallizer: (a) results of the flow field calculations; (b) displayed flow simulation using the water model[17]

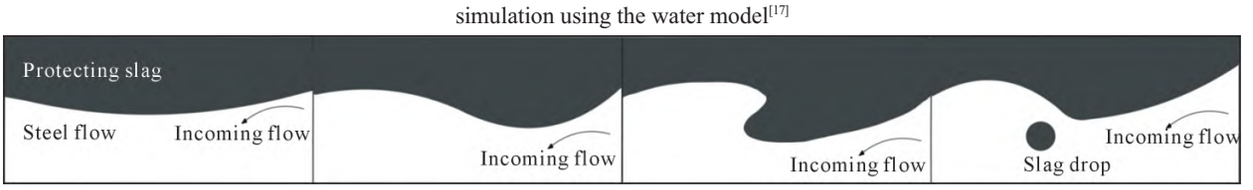

图 6 表面回流卷渣示意图

Fig.6 Schematic diagram of surface reflux

中国知网 https://www.cnki.net

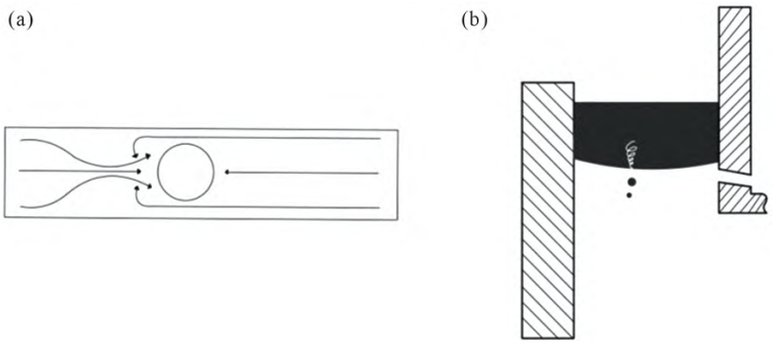

图7 漩涡卷渣示意图:(a) 水口对中不良产生漩涡;(b) 漩涡卷渣

Fig.7 Schematic diagram of the surface vortex: (a) poorly centred spout creating a vortex; (b) vortex slagging

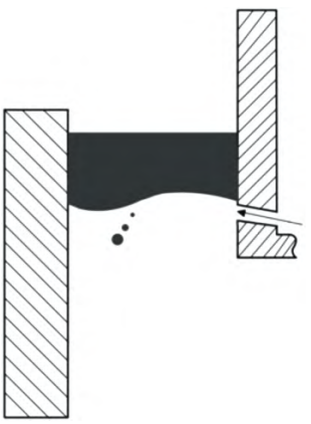

图8 水口插入深度过浅引起的卷渣

Fig.8 Slagging caused by the shallow insertion depth of the submerged entry nozzle

综上,需要控制钢液流动行为来避免卷渣的发生。除此之外,还可以通过在下游工序加强对铸坯表面夹杂物的检验和清理来进一步避免最终产品表面黑带缺陷的发生。

3 控制措施与效果评价

3.1 浸入式水口选型

在连铸生产过程中,钢液经水口注入结晶器内,水口参数如水口倾角与水口侧孔面积大小直接决定了钢液的流动行为。水口倾角影响结晶器内上下4个回流区的涡心位置深度和钢液表面的流速。在整体的连铸生产中,从适应高拉速和液面稳定角度出发,水口倾角向下优于向上。但在生产熔点低且钢液黏度较大的不锈钢时,倾角向下的水口会造成上回流区钢液速度过小,结晶器上部钢液低动能区域大、温度低,保护渣熔化程度降低,即“化渣不良”,润滑效果变差,从而极易导致结晶器壁与坯壳黏结,可能造成拉漏事故。同时,相对于水口倾角向下的水口,使用上倾角水口时,钢液热流密度的峰值位置也会由于冲击点位置的上移随之上移,更易带来窄面位置的渣金界面的活跃。有鉴于此,不锈钢板坯连铸多避免使用侧孔倾角向下水口[16,20]。

水口倾角向上时,随着角度的增大,上部回流区整体上移,钢流对窄面的冲击位置也相应上移;上升流股动能增加,液面流速变大,波动加剧,加速化渣;角度过大时,液面波动过于剧烈,表面回流卷渣风险增大[17,19,21]。

水口侧孔面积大小决定了钢液流速,钢液流速较稳定时,有助于铸坯表面质量的稳定;钢液流速过大时,钢液波动加剧,对保护渣液渣层鼓包的剪切应力相应增大,提高了表面回流卷渣几率[22]。

生产304不锈钢铸坯的过程中,统一限定拉坯速度为1.40 m/min,将水口插入深度控制在140~160 mm范围内,分别使用侧孔尺寸为45 mm×70 mm的0°、5°、8°、15°倾角水口进行对比测试,各水口外观如图9所示;并统计了对应的黑带降级率,结果如图10所示。

经分析发现,在测试过程中,随着水口倾角的增大,黑带降级率都逐步增大,说明随着水口倾角的增大,上部回流区的动量增大,液面流速变大,波动加剧,卷渣几率增大。而0°水口下,两侧液面水平流速大小相称,液面波动更小,可以有效避免卷渣。

在测试中,统一限定拉速为1.40 m/min,水口插入深度控制在140~160 mm内,分别使用侧孔尺寸为45 mm×70 mm、50 mm×75 mm、55 mm×70 mm及55 mm×75 mm的0°水口进行生产,结果如图11所示。发现随着水口侧孔尺寸增大,黑带降级率先明显降低后轻微升高;水口侧孔尺寸为55 mm×70 mm时黑带降级率最低。

在水口中孔大小相同时,如果侧孔过小,则钢流冲出侧孔时动量较大,钢渣液面波动较剧烈,不利于控制卷渣;侧孔过大时,出口钢流容易失去平衡;而侧孔尺寸为55 mm×70 mm时,钢液出口流受到的阻力恰当,钢流冲击深度有限,不会引起钢渣界面的过度活跃,有利于卷渣控制。

综上所述,后续生产过程中将沿用水口侧孔尺寸为55 mm×70 mm的0°水口来控制黑带降级率。

中国知网 https://www.cnki.net

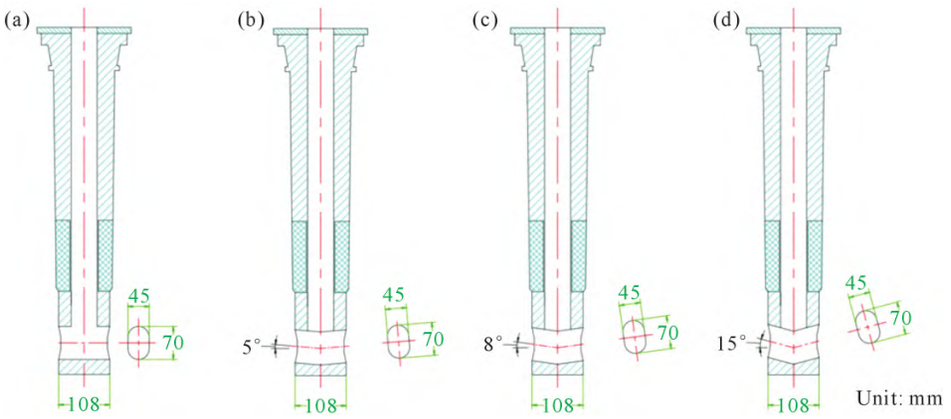

图 9 测试用各水口参数示意图:(a) 0°; (b) 5°; (c) 8°; (d) 15°

Fig.9 Schematic representation of the parameters of each water outlet for testing: (a) 0°; (b) 5°; (c) 8°; (d) 15°

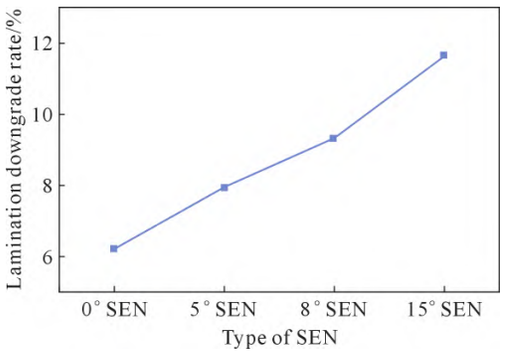

图 10 侧孔尺寸为 45 mm×70 mm 的水口对 304 不锈钢黑带降级率的影响

Fig.10 Effect of the entry nozzle with side hole dimensions of 45 mm×70 mm on the degradation rate of lamination defects for 304 stainless steel

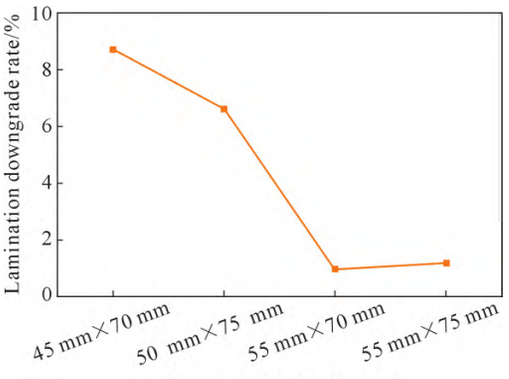

图 11 0°水口侧孔尺寸对黑带降级率的影响

Fig.11 Effects of the side hole size of the 0° submerged entry nozzle on the degradation rate of lamination defects

3.2 浸入式水口插入深度调整

水口插入深度决定了上部回流区所处范围大小:水口插入深度增加,回流区所处范围增大,导致钢液表面流流速减小,液面波动平缓;如若水口插入深度过深,结晶器表面热流减小,保护渣熔化效果不佳,液渣层较薄,也容易在结晶器弯月面处形成卷渣。水口插入深度减小,回流区所处范围减小,液面流速增大,对弯月面扰动剧烈,卷渣的可能性随之升高[17]。

在 304 不锈钢铸坯生产过程中，统一限定拉速为 1.40 m/min,使用水口侧孔尺寸为 55 mm×70 mm 的 0°水口，仅在 140~165 mm 范围内调整水口插入深度(步长为 5 mm),进行批量生产测试,结果如图 12 所示。

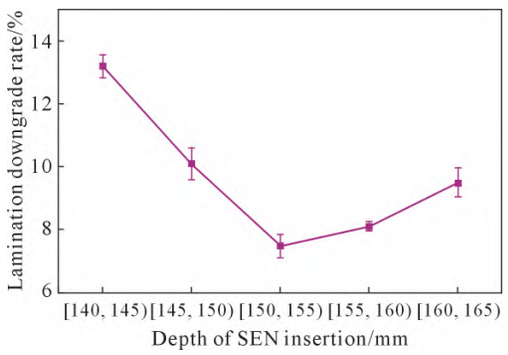

图 12 水口插入深度对黑带降级率的影响

Fig.12 Effects of the submerged entry nozzle insertion depth on the degradation rate of lamination defects

分析发现,随着插入深度的逐渐增加,黑带降级率先降低后升高；水口插入深度处 150~155 mm 范围内时,黑带降级率最低,说明此插深下,既避免了因为水口插入深度过浅引起卷渣，也降低了因深度过大造成熔池内钢液活跃,带来卷渣的可能。

3.3 拉坯速度控制

拉坯速度直接影响由水口流出的钢液量，拉坯速度较快时,通钢量大,上升流股的动能提升,液面湍动加剧,增大了卷渣的可能性;反之,液面较平缓,有助于卷渣的控制[13]。于生产 304 不锈钢铸坯的过程中,将水口插入深度控制在 150~155mm 范围内,统一使用水口侧孔尺寸为 55 mm×70 mm 的 0°水口，将拉坯速度分别设置为 1.20、1.25、1.30、1.35 和 1.40 m/min,进行了生产测试,结果如图 13 所示。

分析发现,随着拉速的提升,黑带降级率随之明显升高，说明拉速的提升带来了更加严重的液面波动,卷渣几率急剧上升。根据此结果,在实际生产中,将拉坯速度控制在 1.20~1.30 m/min 内为佳,具体参

中国知网 https://www.cnki.net

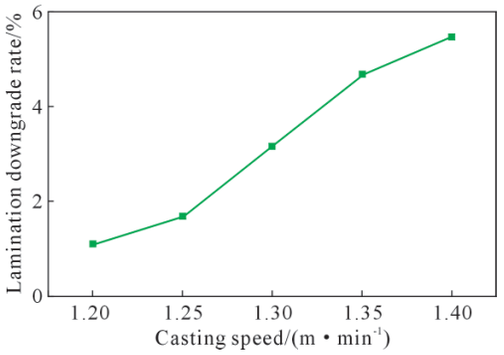

图 13 拉坯速度对黑带降级率的影响

Fig.13 Effect of the casting speed on the degradation rate of lamination defects

数根据板坯宽度的不同来设定。

3.4 下游工序消减缺陷

生产过程中发现，在热轧工序中，对入炉的板坯表面进行严格检验，用吹扫及钢刷等装置对钢坯表面进行清理；出炉后对其进行双排喷嘴高效除鳞和增加除鳞道次(图 14)以获得表面洁净无异物的铸坯都可有效防止产品在后续过程中形成黑带缺陷。

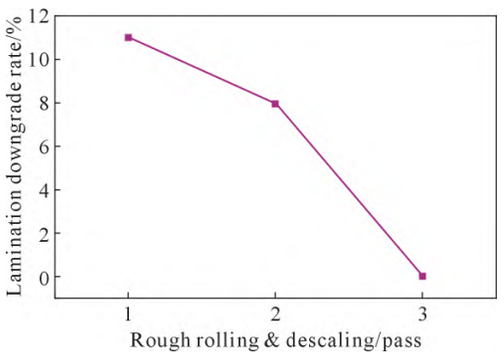

图 14 粗轧除鳞道次对黑带降级率的影响

Fig.14 Effect of the number of roughing descaling passes on the degradation rate of lamination defects

除此之外，在退洗工序中，如图 15 所示，适当降低产线速率可在钢带表层夹杂物或黏着物被酸洗去除同时，增强抛丸机械除鳞效果，提升缺陷去除能力，使最终产品黑带降级率明显降低。与此同时，提高混酸一段的 HF 酸浓度至 23.0 g/L 以上也可帮助控制黑带降级率，测试数据如图 16 所示。另外，考虑到使用高浓度氢氟酸提高了安全生产风险，降低了酸槽使用寿命，同时带来成本的急剧升高，故还需将混酸一段的 HF 酸浓度控制在 30 g/L 以下。

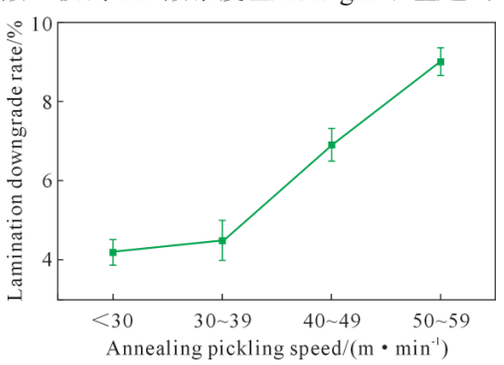

图 15 退洗产线速率对黑带降级率的影响

Fig.15 Effect of the annealing pickling speed on the degradation rate of lamination defects

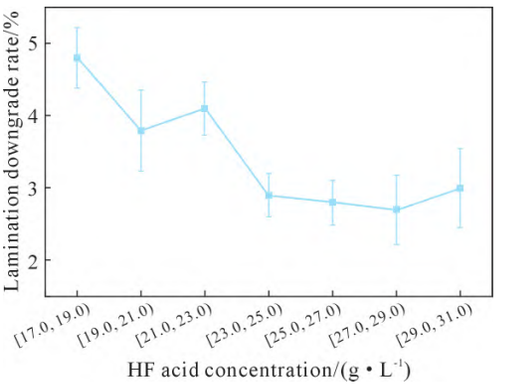

图 16 混酸一段的 HF 酸浓度对黑带降级率的影响

Fig.16 Effect of the HF acid concentration on the degradation rate of lamination defects during the first segment of the mixed acid section

4 结论

黑带缺陷主要来源于钢液浇注过程中，由于结晶器内钢液表面波动过于剧烈而发生的保护渣卷混行为，譬如表面回流卷渣、漩涡卷渣和由于水口插入深度过浅引起的卷渣。钢渣卷混发生后，板坯经轧制、固溶及酸洗处理，形成的钢卷表面即存在粗糙的长条状“黑带”缺陷。

实际生产中可通过控制钢液液面波动情况来避免钢渣卷混，同时在下游工序加强对铸坯表面夹杂物的检验和清理来进一步避免最终产品表面黑带缺陷的发生，具体措施如下：

(1)连铸工序选择倾角为 0°、侧孔尺寸为 55 mm×70 mm 的浸入式水口，将水口插入深度控制在 150~155 mm，拉坯速度控制在 1.20~1.30 m/min。

(2)热轧工序严格检验入炉铸坯质量，加强铸坯表面清洁度管理，同时优化除鳞工艺。

(3)退洗工序适度降低产线速率及将混酸一段的 HF 酸浓度控制在 23.0~30.0 g/L 范围内；

经过工艺固化，本文 304 不锈钢 No.1 黑带缺陷发生率整体由改善前的近 15.0%降低至 3.0%以下。

参考文献：

[1] 陆世英. 不锈钢概论[M]. 北京：化学工业出版社，2013.
LU S Y. Introduction to stainless steel[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2013.

[2] 贾凤翔. 不锈钢加工技术[M]. 北京：化学工业出版社，2013.

[3] 贾凤翔，侯若明，贾晓滨. 不锈钢性能及选用[M]. 北京：化学工业出版社，2013.

中国知网 https://www.cnki.net

[4] 顾纪清. 不锈钢应用手册[M]. 北京：化学工业出版社，2008.

[5] LO K H, SHEK C H, LAI J K L. Recent developments in stainless steels[J]. Materials Science and Engineering R: Reports, 2009, 65 (4-6): 39-104.

[6] PRAMANIK A, BASAK A K. Stainless steel: Microstructure, mechanical properties and methods of application[M]. New York: Nova Science Publishers, 2015.

[7] 陆海飞，蒋发立，徐佳林，田伟光. 304 不锈钢热轧带钢黑带缺陷分析[J]. 连铸，2019, 44(6): 55-60.
LU H F, JIANG F L, XU J L, TIAN W G. Analysis of black strip defect of 304 stainless steel hot rolled strip[J]. Continuous Casting, 2019, 44(6): 55-60.

[8] 张磊，张鹏，冯飞，张超凡. 板坯卷渣的机理及控制措施[J]. 山西冶金，2023, 46(1): 225-227.
ZHANG L, ZHANG P, FENG F, ZHANG C F. Mechanism and control measures of slab slag entrainment[J]. Shanxi Metallurgy, 2023, 46(1): 225-227.

[9] 赵春宝，陈永艳，徐金岩，王岩，梁冠冬. 利用高黏度保护渣解决低碳钢铸坯表面夹渣缺陷[J]. 宽厚板，2018, 24(2): 11-14.
ZHAO C B, CHEN Y Y, XU J Y, WANG Y, LIANG G D. Solution to resolve surface slag inclusion defect of low carbon steel slab by means of high viscosity casting powder[J]. Wide and Heavy Plate, 2018, 24(2): 11-14.

[10] 吴颖东，刘中秋，全明杰，李宝宽. 连铸结晶器内钢/渣界面波动及卷渣行为的实验研究[J]. 材料与冶金学报，2020, 19(1): 13-19, 64.
WU Y D, LIU Z Q, QUAN M J, LI B K. Experimental study on the mechanism of slag entrainment at the slag/metal interface in continuous casting[J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2020, 19(1): 13-19, 64.

[11] 刘红艳，卜二军，李冠楠，王一洲. 连铸保护渣卷入引起夹杂缺陷的特征及预防[J]. 河北冶金，2015(9): 11-15.
LIU H Y, BU E J, LI G N, WANG Y Z. Characteristic of inclusion defect caused by drawn casting powder in continuous casting and its prevention[J]. Hebei Metallurgy, 2015(9): 11-15.

[12] 金友林，包燕平，刘建华，安航航. 不锈钢板坯连铸结晶器内钢/渣界面行为模拟及卷渣分析[J]. 北京科技大学学报, 2009, 31(5): 618-624.
JIN Y L, BAO Y P, LIU J H, AN H H. Simulation on steel/slag interfacial behavior and analysis of slag entrapment in a stainless steel slab continuous casting mold[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2009, 31(5): 618-624.

[13] 田伟光，徐佳林，李伟. 不锈钢钢卷边缘黑带缺陷改善[J]. 科技风，2015(3): 12-13.

[14] 陆靖洲，潘伟明，窦坤，王万林，周乐君. 板坯连铸过程结晶器水口优化数值模拟[J]. 连铸，2024(1): 18-25.
LU J Z, PAN W M, DOU K, WANG W L, ZHOU L J. Numerical simulation of mold nozzle optimization in slab continuous casting process[J]. Continuous Casting, 2024(1): 18-25.

[15] 钟云涛，李强. 保护渣在连铸机中的应用[J]. 连铸，2013(4): 9-13.
ZHONG Y T, LI Q. Application of mold powder in continuous casting machines[J]. Continuous Casting, 2013(4): 9-13.

[16] 雷琳琳，常运合，罗衍昭，季晨曦，朱晶亮，肖红，张家泉. 浸入式水口及其对板坯连铸结晶器流动行为的影响[J]. 连铸，2023(6): 1-16, 40.
LEI L L, CHANG Y H, LUO Y Z, JI C X, ZHU J L, XIAO H, ZHANG J Q. Submerged entry nozzle and its effect on mold flow behavior of slab casting[J]. Continuous Casting, 2023(6): 1-16, 40.

[17] 雷洪，张红伟. 结晶器冶金过程模拟[M]. 北京：冶金工业出版社，2014.

[18] 张宁，雷洪，刘承军，姜茂发. 连铸结晶器内液面波动及卷渣行为的物理模型研究[J]. 连铸，2010(1): 30-33, 37.
ZHANG N, LEI H, LIU C J, JIANG M F. Physical model research on slag entrapment and surface disturbance in the continuous casting mold[J]. Continuous Casting, 2010(1): 30-33, 37.

[19] 雷洪，许海虹，朱苗勇，干勇，刘新，倪满森，刘家奇. 高速连铸结晶器内卷渣机理及其控制研究[J]. 钢铁，1999, 31(8): 20-23.
LEI H, XU H H, ZHU M Y, GAN Y, LIU X, NI M S, LIU J Q. Mechanism and control of slag entrapment in high casting mold[J]. Iron & Steel, 1999, 31(8): 20-23.

[20] 陈登明，王宏丹，杨治立. 板坯连铸结晶器内钢液的三维流场数值模拟[J]. 热加工工艺，2011, 40(7): 69-72.
CHEN D M, WANG H D, YANG Z L. Numerical simulation of 3-D flow field of molten steel in slab continuous casting mould[J]. Hot Working Technology, 2011, 40(7): 69-72.

[21] 邓南阳，金友林. 304 不锈钢板坯连铸结晶器水口结构优化的数值模拟[J]. 特殊钢，2010, 31(3): 10-13.
DENG N Y, JIN Y L. Numerical simulation on optimization of nozzle structure for 304 stainless steel slab concasting mold[J]. Special Steel, 2010, 31(3): 10-13.

[22] 肖太平，倪红卫，孔勇江，吴扬，张华. 水口扩张角对 230 mm×1 300 mm 板坯结晶器流场及氩气泡行为的影响[J]. 特殊钢，2015, 36(2): 13-16.
XIAO T P, NI H W, KONG Y J, WU Y, ZHANG H. Influence of nozzle divergence angle on argon bubble behavior and flow field in mould for 230 mm×1 300 mm slab[J]. Special Steel, 2015, 36(2): 13-16.

中国知网 https://www.cnki.net