

316L 不锈钢冷轧板表面缺陷分析和工艺改进

庄 迎 王贵平

(山西太钢不锈钢股份有限公司技术中心,太原 030003)

摘 要 316L 不锈钢 0.3 ~ 4.0 mm 冷轧板的冶金生产流程为 180 t EAF-AOD-LF-200 mm 连铸板坯-热轧 2.5 ~ 14.0 mm 板-冷轧。通过对连铸坯、热轧卷以及冷轧板的化学成分、金相和扫描电镜及能谱检测,并对 316L 不锈钢冷轧板表面出现的线状缺陷进行了分析。结果表明,连铸坯表面振痕较深,有凹坑,并且存在深度 $\leq 300 \mu\text{m}$ 微裂纹缺陷;热轧板表面存在线状缺陷,缺陷附近存在大面积的氧化区域;冷轧板缺陷处(S 含量 0.001%, $\text{Cr}_{\text{eq}}/\text{Ni}_{\text{eq}} = 1.58$) 未发现较大尺寸的夹杂物。得出冷轧板线状缺陷来自连铸坯,在加热炉中被严重氧化,最终形成冷轧板表面线状缺陷。通过将铸坯拉速从 1.1 m/min 降至 1.0 m/min,钢水过热度从 45 °C 降至 40 °C,二冷比水量从 1.0 kg/t 降至 0.9 kg/t,铸坯修磨用砂轮由 16# 改为 20# 等工艺措施,冷轧板表面缺陷大幅减少。

关键词 316L 不锈钢 连铸板坯 线状缺陷 冷轧板 表面裂纹 工艺改进

Analysis on Surface Defect of 316L Stainless Steel Cold-Rolled Sheet and Process Improvement

Zhuang Ying and Wang Guiping

(Technology Center, Shanxi Taigang Stainless Co Ltd, Taiyuan 030003)

Abstract The metallurgical production flowsheet for 0.3 ~ 4.0 mm cold-rolled sheet of 316L stainless steel is 180 t EAF-AOD-LF-200 mm casting slab- hot-rolled 2.5 ~ 14.0 mm plate-cold rolling process. The analysis on line scale defects occurred on surface of 316L stainless steel cold-rolled sheet has been carried out by chemical composition analysis, metallography, scanning microscope and energy spectrum examination on casting slab, hot-rolled coil and cold-rolled sheet. Results show that the surface oscillation mark of casting slab is deeper with depressions and there are depth $\leq 300 \mu\text{m}$ micro crack defects; the surface of hot-rolled plate has line defect and there is larger oxidation area around the line defect; no large size inclusion is found at the defects of cold-rolled sheet (S content 0.001% and $\text{Cr}_{\text{eq}}/\text{Ni}_{\text{eq}} = 1.58$), it is obtained that the line scale defects of cold-rolled sheet come from casting slab defects, which are seriously oxidized in heating furnace finally to form the cold-rolled sheet surface line defect. With using the process measures including decreasing slab casting speed from 1.1 m/min to 1.0 m/min, reducing overheating extent of liquid from 45 °C to 40 °C, decreasing secondary cooling water rate from 1.0 kg/t to 0.9 kg/t and changing slab grinding wheel from 16# to 20#, the surface defects of cold-rolled sheet decrease markedly.

Material Index 316L Stainless Steel, Casting Slab, Line Defect, Cold-Rolled Sheet, Surface Crack, Process Improvement

316L 不锈钢是在 304 不锈钢基础上发展的更耐腐蚀的不锈钢,添加了 2% ~ 3% Mo 元素,钼元素的加入使 316L 不锈钢耐稀硫酸、磷酸、各种有机酸、尿素腐蚀及氯化物点蚀性能显著提高^[1],主要用于石油及其化工行业,广泛用于压力容器、交通运输、金属制品、机械制造、装饰、焊管等^[2-3]。316L 不锈钢冷轧板表面质量要求较高,不得有划伤、粗糙、坑疤、条纹等缺陷,在出厂前必须经过严格的表面质量检验。

316L 不锈钢冷轧板生产流程为 EAF + AOD + LF + CC + 板坯修磨 + 热轧 + 冷轧,其中 EAF、AOD 和 LF 容量均为 180 t,连铸板坯尺寸(厚 × 宽)以 200 mm × 2 040 mm 为主,热轧板厚度范围为 2.5 ~ 14.0 mm,冷轧板厚度范围为 0.3 ~ 4.0 mm。冷轧板表面缺陷率最高的一类为线状缺陷,常常因此

缺陷导致冷轧板表面不合格,对产品质量及成材率产生较大影响。

1 质量检验

为确定 316L 不锈钢冷轧板表面线状缺陷成因,对不合格冷轧板同线生产的连铸坯表面及皮下质量、热轧黑卷轧向横截面、冷轧板缺陷处及轧向横截面分别进行了金相分析和扫描电镜及能谱分析,同时对成品化学成分进行分析。

1.1 化学成分

纯或亚纯奥氏体不锈钢在凝固过程中不发生或少发生 δ 相变,树枝状晶之间硫的浓度富集使晶间结合力及可塑性极弱,在此条件下,由于固液两相区间很宽,凝固收缩率最高,在振痕波谷产生纵向微裂纹,S 在晶界富集使钢在热轧时发生微裂纹的倾向

也会增加^[4],因此要求 316L 不锈钢含有较低的 S 含量。

同时不锈钢裂纹的敏感性与铬镍当量比有明显的关系,当铬镍当量比在 1.5 以上时裂纹敏感性消失,因为当铬镍当量比大于 1.5 时,在凝固过程中会发生相变,成长中的硫化物被切断、分割成点状硫化物,从而抑制了硫的有害性。

基于以上原因首先将表面质量判定不合格的冷轧板进行成分检测,主要关注钢中 S 的含量及铬镍当量比情况,具体成分如表 1 所示。

由表 1 可知,316L 不锈钢中 S 含量控制在较低水平, $Cr_{当量}/Ni_{当量} = 1.58$,因此首先排除钢液成分与冷轧板线状缺陷的关系。

1.2 连铸坯表面缺陷检验

经过检验后发现 316L 不锈钢连铸坯表面缺陷主要有深振痕(深度在 1.5 mm 附近),振痕紊乱不规则,宽面边部有渣坑等,如图 1(a)所示。

在振痕较深及渣坑处取得试样进行金相分析,发现连铸坯表面有微裂纹缺陷,如图 1(b)所示。

通过大量的取样检测分析,发现 316L 不锈钢连铸坯表面缺陷位置的皮下基本都存在如图 1(b)所示的微裂纹缺陷,针对此缺陷要对连铸坯表面进行修磨,

在修磨时压力过重或连续局部修磨会使裂纹继续扩展。因此通过金相显微镜观察修磨后的连铸坯表面及次表面,仍然存在裂纹缺陷如图 2(a)所示,并且肉眼观察连铸坯表面修磨粗糙不均匀如图 2(b)所示,平均粗糙度 Ra 达 250 μm 。

1.3 热轧黑卷缺陷检测

进一步取未经过酸洗的热轧黑卷试样后发现表面存在线状缺陷,在缺陷横截面处进行扫描电镜观察及能谱分析,如图 3 所示,图 3 中成分(能谱曲线)为(a)点的成分。

由图 3 可以看出,热轧黑卷表面线状缺陷沿着表面向下形成裂纹,并且裂纹周围形成了大面积的氧化区域,成分检测后发现氧化区域含有较高的 Si、

表 1 316L 不锈钢冷轧板缺陷试样化学成分/%

Table 1 Chemical composition of defect sample of 316L stainless steel cold-rolled sheet / %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N
0.02	0.55	1.11	0.020	0.001	16.71	10.14	2.11	0.038

注: $Cr_{当量}/Ni_{当量} = 1.58$ 。

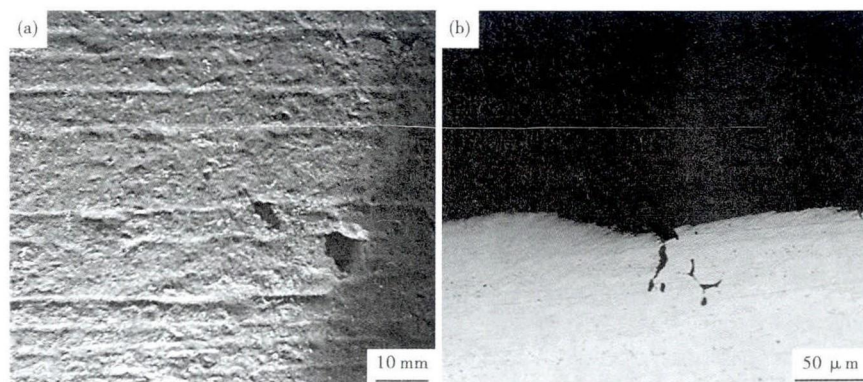


图 1 316L 不锈钢连铸坯表面缺陷(a)和皮下缺陷(b)的形貌

Fig. 1 Morphology of surface defect (a) and subsurface defect (b) of casting slab of 316L stainless steel

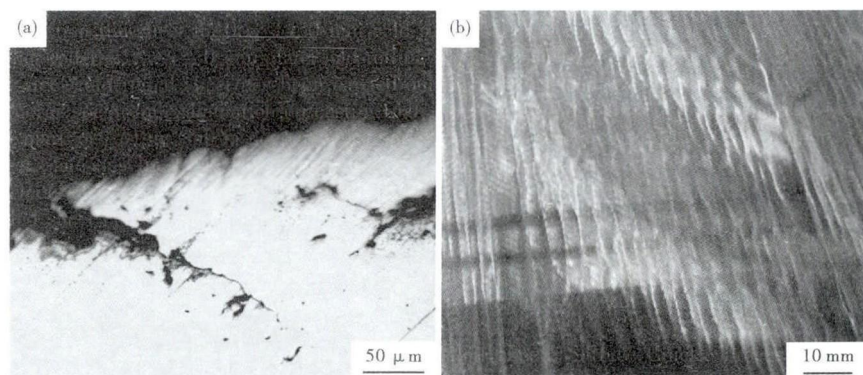


图 2 修磨后 316L 不锈钢连铸坯表面微裂纹(a)和表面粗糙(b)的形貌

Fig. 2 Morphology of surface micro-crack (a) and surface roughness (b) of 316L stainless steel casting slab after grinding

O 元素,由此推断大面积的氧化区域是由连铸坯表面裂纹在铸坯加热炉进行长时间高温加热,炉内氧化性气氛通过裂纹渗入基体与基体内的亲氧物质 Si 结合,在裂纹周围形成大面积的氧化区域,经过轧制导致了热轧黑卷表面线状缺陷,而氧化区域酸洗不净便会遗传至冷轧板,导致冷轧板表面缺陷产生。

1.4 冷轧板表面缺陷检测分析

造成冷轧板表面判定不合格的线状缺陷钢平行于轧向分布,两边部分布较密集,长约 10 mm,宽约 1 mm。对缺陷进行扫描电镜观察与成分检测,图 4 中(a)点用能谱仪分析化学成分,为正常基体组织下的氧化铁成分,未发现有大尺寸夹杂物,如图 4 所示。

冷轧板缺陷与连铸坯表面缺陷分布在位置上存

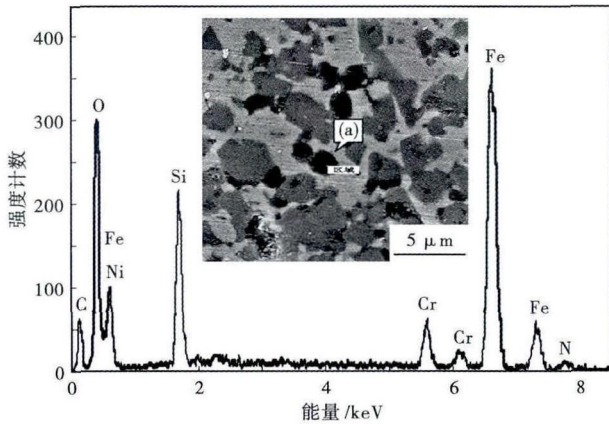


图 3 316L 不锈钢未酸洗热轧卷缺陷扫描电镜观察及能谱分析

Fig. 3 Morphology of defect and energy spectrum analysis of hot-rolled plate coil without acid pickling, 316L stainless steel, SEM

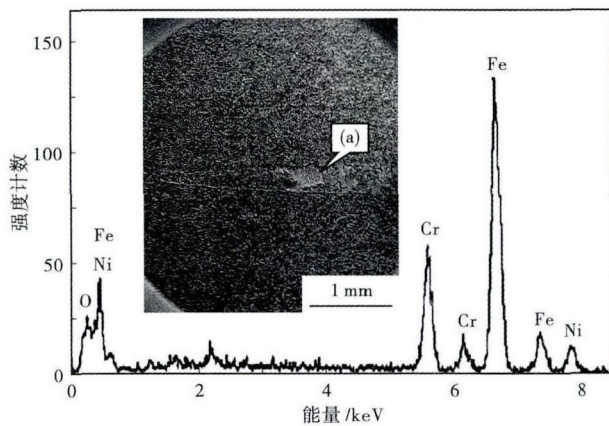


图 4 316L 不锈钢冷轧板缺陷扫描电镜观察及能谱分析

Fig. 4 Morphology of defect and energy spectrum analysis of cold-rolled sheet, 316L stainless steel, SEM

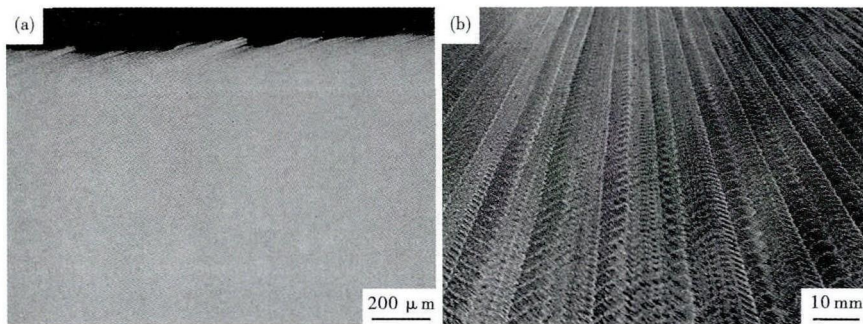


图 5 316L 不锈钢改进修磨工艺修磨后连铸坯(a)皮下和(b)表面形貌

Fig. 5 Morphology of subsurface (a) and surface (b) of casting slab of 316L stainless steel after improving grinding process

对应关系,通过对未酸洗热轧黑卷缺陷分析证明了冷轧板线状缺陷的来源是连铸坯表面微裂纹缺陷。

2 改进措施

2.1 连铸坯表面轻修磨操作

表 2 改进前后 316L 不锈钢连铸坯修磨工艺参数
Table 2 Grinding technology parameters of 316L stainless steel casting slab before and after improvement

工艺参数	砂轮型号	单次磨下量/mm	砂轮横向进给量/mm	砂轮前进速度/(m·s ⁻¹)	修磨类型
改进前	16 [#]	1.5	80	80	90°修磨
改进后	20 [#]	1.0	60	70	45°修磨

由于 316L 不锈钢连铸坯表面的微裂纹缺陷会导致冷轧板线状缺陷的产生,通过检测发现连铸坯表面微裂纹深度一般不超过 300 μm,保证修磨精细化操作的前提下,采用 20[#] 以上砂轮轻修磨便可修磨掉缺陷。修磨工艺参数的改进情况如表 2 所示,连铸坯表面修磨质量改进后的皮下质量如图 5(a) 所示,连铸坯修磨后表面质量如图 5(b) 所示。

由图 5 可以看出,采用 20[#] 砂轮精细化修磨操作,316L 不锈钢修磨后的连铸坯表面经粗糙度仪检测表面粗糙度 Ra 由 250 μm 降低至 180 μm,平整光滑,无微裂纹等缺陷。

2.2 连铸坯质量控制

彻底消除 316L 不锈钢冷轧板表面线状缺陷的根本在于提高连铸坯表面质量,经过观察实际生产的 316L 不锈钢连铸坯,其主要表面缺陷有振痕深、渣坑和微裂纹等。

振痕是结晶器振动不可避免的产物,在负滑脱期间,弯月面初生坯壳受结晶器压力和渣圈的挤压向钢液侧弯曲;在正滑脱期间,初生坯壳受钢水静压力作用又贴向铜壁,钢水溢出到凝固壳前端而形成振痕^[5]。振痕波谷处往往是板坯横裂纹的发源地和渣粒、气泡的聚集地,振痕深度增加,缺陷发生几率增加。结晶器振动形式是影响振痕深度的主要因素,由此可知,采用高频率、小振幅的振动形式,在保证铸坯顺利脱模的情况下尽量减少负滑脱时间是减轻振痕、减少振痕下表面缺陷的有效措施^[6-7]。

316L 不锈钢凝固初期体积收缩较大,坯壳生长不均匀^[8-9],在坯壳薄弱处产生局部应力集中,结晶器内渣膜传热不均造成结晶器与铸坯间润滑不良,导致连铸坯表面凹坑的产生,部分凹坑底部可能会出现裂纹。控制表面凹坑的产生应使结晶器内保持均匀的冷却,主要控制因素是保护渣渣膜的均匀传热^[10],要求薄厚均匀的保护渣渣膜,这与保护

表3 改进前后 316L 不锈钢连铸保护渣特性参数

Table 3 Characteristic parameters of mold flux for 316L stainless steel casting before and after improvement

工艺	粘度/熔点/		渣成分 /%						
	(Pa·s)	℃	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	MgO	Fe ₂ O ₃	CaF ₂
改进前	2.0	1130	35.0	37.0	5.0	10.0	1.0	2.0	10.0
改进后	1.8	1120	32.0	36.0	7.0	10.0	2.0	2.0	11.0

表4 改进前后 316L 不锈钢连铸工艺参数

Table 4 Casting technology parameters for 316L stainless steel before and after improvement

工艺	拉速/ (m·min ⁻¹)	过热度/ ℃	结晶器水量/ (L·min ⁻¹)	结晶器振频/ (次·min ⁻¹)	结晶器振幅/mm	二冷比水量/ (kg·t ⁻¹)
改进前	1.1	45	宽面4600, 窄面480	150	±6	1.0
改进后	1.0	40	宽面4500, 窄面460	165	±5	0.9

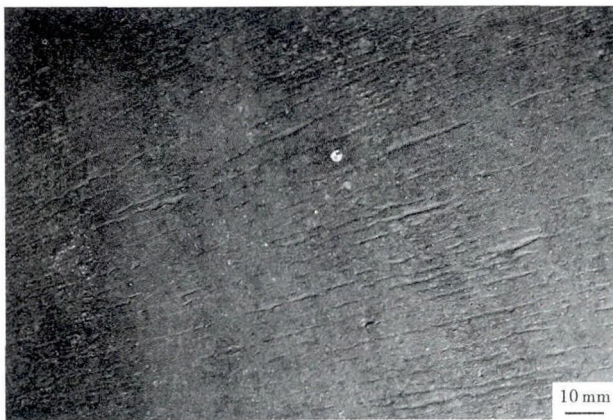


图6 改进工艺后 316L 不锈钢连铸坯表面形貌

Fig.6 Morphology of surface of casting slab of 316L stainless steel after improvement of process

渣的熔点、粘度、消耗量密切相关。

随着铸坯断面尺寸的增加,钢水流量增大,结晶器内流场及温度场的不均匀性增强^[11],产生缺陷的 316L 不锈钢以超宽板坯为主,板坯边部渣金界面温度更易发生不均匀的现象,如果温度过低,保护渣熔

化不利,容易产生铸坯表面缺陷,如结晶器内液面波动过大,会造成卷渣^[12],因此,结晶器内最优的钢液流动状态对生产高表面质量的连铸坯起至关重要的作用,钢液流场受浸入式水口插入深度、形状、拉速等因素影响。

改进前后保护渣成分如表3所示,改进前后的工艺参数如表4所示。

改进连铸工艺参数后生产的 316L 不锈钢连铸坯表面质量如图6所示。

改进连铸工艺参数后生产的 316L 连铸坯表面振痕平稳规律,有少量深度在 0.9~1.0 mm 振痕,大多数振痕深度在 0.6 mm 附近,很少有渣坑振痕紊乱等面缺陷。

目前,316L 不锈钢连铸坯表面进行分级确认,表面质量好的 A、B 级坯可进行无修磨轧制,表面质量差的 C、D 级坯经过 20# 砂轮轻修磨操作,也可避免冷轧板线状缺陷的发生,冷轧板线状缺陷不合格率由 5% 降至 1% 以下。

3 结论

(1) 通过对 316L 不锈钢连铸坯表面、热轧黑卷表面缺陷和冷轧板表面线状缺陷的形貌和能谱分析,冷轧板的线状缺陷来源于连铸坯。

(2) 连铸坯表面微裂纹经过加热炉长时间高温加热,形成大面积氧化区域,经过轧制后遗传至冷轧板表面,导致冷轧板表面线状缺陷产生。

(3) 连铸坯表面渣坑、微裂纹等缺陷,经过 20# 砂轮的精细化修磨后,能保证冷轧板表面质量。

(4) 通过改进连铸生产工艺参数,316L 不锈钢连铸坯表面质量大幅度提高,冷轧板表面质量大幅提升。

参考文献

- [1] 王松涛. 高氮奥氏体不锈钢与 316L 不锈钢的冷变形行为研究[J]. 金属学报, 2007, 43(2): 171-176.
- [2] 丁震, 陈文觉. 316 不锈钢的晶界分布研究[J]. 上海金属, 2006, 28(4): 14-17.
- [3] 侯东坡, 宋仁伯, 项建英, 等. 固溶处理对 316L 不锈钢组织和性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2010, 31(12): 61-65.
- [4] 朱亮, 魏鹏, 侯国清, 等. 奥氏体不锈钢热轧边裂实验研究[J]. 轧钢, 2012, 29(5): 9-13.
- [5] 蔡开科. 连铸坯质量控制[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010: 210.
- [6] 吴巍, 刘浏, 韩志军. 不锈钢连铸工艺的研究[J]. 钢铁, 2004, 39(增刊): 561-565.
- [7] 杨军. 高表面质量不锈钢板坯连铸工艺研究[J]. 钢铁, 2007, 42(9): 24-28.
- [8] 漆鑫, 唐萍, 文光华, 等. 结晶器中弯月面区域保护渣液流场的数学模拟[J]. 特殊钢, 2006, 27(4): 28-30.
- [9] 朱立光, 韩毅华, 赵俊花. 板坯连铸结晶器保护渣性能的高拉速适用性研究[J]. 特殊钢, 2008, 29(4): 1-4.
- [10] 郝占全, 陈庆伟, Carsten Lippold, 等. 不锈钢 1Cr17 板坯连铸过程中保护渣渣层及渣膜的研究[J]. 特殊钢, 2009, 30(3): 16-18.
- [11] 王楠, 宋清诗, 陈敏, 等. 超宽板坯结晶器内流场和温度场的耦合数值模拟[J]. 过程工程学报, 2009, 9(1): 426-431.
- [12] 邢淑清, 白亮, 麻永林, 等. 316 不锈钢板坯连铸结晶器内坯壳厚度模拟[J]. 铸造技术, 2010, 31(7): 910-913.

庄迎(1984-), 女, 博士, 工程师, 2007 年东北大学(本科)毕业, 不锈钢精炼和质量控制。

E-mail: zhuangying@tisco.com.cn

收稿日期: 2016-10-13