

## 铸坯喷丸工艺对430铁素体不锈钢卷板表面质量的影响

李鹏飞<sup>1,2</sup>, 翟俊<sup>1,2</sup>, 杨永杰<sup>1,2</sup>

(1 太原钢铁(集团)有限公司 先进不锈钢材料国家重点实验室, 太原 030003;

2 山西太钢不锈钢股份有限公司 技术中心, 太原 030003)

**摘要:** 430 钢连铸板坯经喷丸处理后可以去除连铸坯表面原始铁鳞与保护渣残留, 铸坯平均振痕深度降低 0.13 mm。喷丸处理铸坯经加热炉加热后生成的氧化铁皮结构与基体存在明显界面, 在热轧与酸洗过程容易去除, 避免了夹渣与氧化残留造成的冷板表面粗糙条纹类缺陷, 酸洗板表面粗糙度由 3.15  $\mu\text{m}$  降低至 2.78  $\mu\text{m}$ , 冷板粗糙度由 0.047  $\mu\text{m}$  降低至 0.041  $\mu\text{m}$ , 冷板表面质量接近修磨工艺。430 不锈钢铸坯喷丸工艺可替代修磨工艺。

**关键词:** 铸坯喷丸; 430 铁素体不锈钢; 表面质量; 粗糙度

## Effect of Casting Slab Shot Blasting Process on Surface Quality of 430 Ferritic Stainless Steel Rolled Coil Plate

Li Pengfei<sup>1,2</sup>, Zhai Jun<sup>1,2</sup>, Yang Yongjie<sup>1,2</sup>

(1 State Key Laboratory of Advanced Stainless Steel Materials, Taiyuan Iron & Steel (Group) Co., Ltd., Taiyuan 030003; 2 Technology Center of Shanxi Taigang Stainless Steel Co., Ltd., Taiyuan 030003)

**Abstract:** After shot blasting of 430 steel cast slab, the original scale and residual mould fluxes on the surface of casting slab can be removed, and the vibration mark depth of casting slab can be reduced by 0.13 mm. After the shot-blasting, the slab is heated by a heating furnace, there is an obvious interface between the iron scale and the substrate, which is easy to remove during hot rolling and pickling to avoid the defects of rough stripes on the surface of the cold plate caused by slag inclusion and oxidation residue, as a result show that the surface roughness of pickling plate decreased from 3.15  $\mu\text{m}$  to 2.78  $\mu\text{m}$ , and that of cold plate decreases from 0.047  $\mu\text{m}$  to 0.041  $\mu\text{m}$ , surface quality of cold rolled plate in casting slab shot blasted shows that it is close to the slab grinding process. Shot blasting process of 430 stainless steel billet can replace grinding process.

**Material Index:** Casting Slab Shot Blasting; 430 Ferritic Stainless Steel; Surface Quality; Roughness

不锈钢连铸坯表面深振痕、夹渣、凹陷、铁皮残留等缺陷直接影响冷板表面质量, 易造成冷板夹杂、线状粗糙等缺陷, 影响用户使用<sup>[1]</sup>。430 铁素体不锈钢是中铬铁素体不锈钢的代表钢种, 其具有热膨胀系数小、导热系数大、耐氯化物腐蚀能力强及冷加工性能好等优点, 广泛应用于建筑装饰、家用电器、厨房用具及工业设施等行业<sup>[2-3]</sup>。

430 不锈钢冷轧板生产工艺流程为冶炼、连铸、修磨、热轧、罩式炉退火、酸洗、冷轧、连续退火酸洗, 形成最终冷轧板<sup>[4]</sup>。针对 430 不锈钢冷轧板表面常见粗糙类缺陷, 目前主要在连铸工序后增加铸坯修磨工艺, 去除铸坯表面缺陷和原始铁皮, 但修磨工艺投资较高, 占地面积较大, 铸坯单面修磨厚度在 0.8~3.5 mm, 金属损耗率在 1.7% 左右<sup>[5-7]</sup>。为降低生产成本, 提高生产效率, 国内外部分不锈钢生产

企业开始采用铸坯喷丸处理工艺。修磨与喷丸工艺具体参数见表 1。本文重点研究铸坯喷丸工艺对 430 不锈钢铸坯及冷板表面质量的影响规律。

### 1 试验材料与方法

选取生产的 10 块 430 不锈钢铸坯进行试验, 铸坯尺寸为 12 000 mm × 1 200 mm × 200 mm, 表 2 为试验用 430 不锈钢化学成分。试验使用专有的铸坯喷丸设备进行喷丸处理, 喷丸机在生产时利用喷丸器中高速旋转的叶轮, 将钢丸以 60~80 m/s 的速度打击在铸坯表面, 以较大的冲击力清除铸坯表面原始氧化铁鳞<sup>[8]</sup>。为对比表面质量差异, 试验铸坯沿拉坯方向 1/3 进行喷丸处理, 1/3 进行修磨处理, 其余 1/3 不做处理, 喷丸处理 20 min, 铸坯表面出现金属光泽后停止喷丸, 入加热炉加热并轧制。

表 1 430 不锈钢铸坯修磨与喷丸基本工艺参数  
Table 1 Basic parameters of grinding and shot blasting of 430 stainless steel casting slab

工艺类型	基本要求	时间/min	金属损耗率/%	特点
铸坯修磨	使用砂轮对铸坯进行修磨,430 不锈钢一般要求使用 16# 砂轮,单面修磨深度 0.85 mm,往复修磨两次	40 ~ 60	1.70	金属损耗率大,生产效率低,但可以完全去除表面振痕、夹渣等缺陷
铸坯喷丸	使用 GB6485-86 高碳钢丸进行处理,丸粒 2.0 ~ 3.0 mm,喷丸机转速控制 1 750 r/min,丸速可达 60 ~ 80 m/s,铸坯修往复喷丸 4 次,以至表面出现金属光泽。	20 ~ 40	0.50	金属损耗率低,生产效率高,投资成本低,但对卷板表面质量的影响需要进一步研究

表 2 430 不锈钢化学成分/%

Table 2 Chemical composition of 430 stainless steel/%

C	Si	Mn	P	S	Cr	V	N
0.026	0.15	0.60	0.000 1	0.000 1	16.32	0.15	0.058

试验过程对喷丸后的铸坯表面振痕深度进行测量,轧制后对热轧酸洗板、冷轧卷板表面粗糙度进行测量记录。使用 SEM 扫描电镜对铸坯表面微观形貌进行分析,检测表面保护渣残留情况,对铸坯经加热炉加热后的高温氧化层结构进行分析对比差异性。

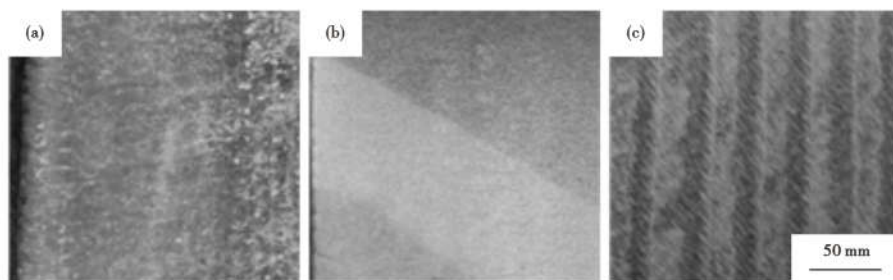


图 1 (a)原始(b)喷丸和(c)修磨试验铸坯表面状态

Fig. 1 Surface state of (a) original, (b) shot blasting and (c) grinding of cast slab

表 3 未喷丸和喷丸铸坯边部振痕深度对比/mm

Table 3 Comparison between non-shot-blasting and shot-blasting cast slab edge vibration mark depth /mm

铸坯位 置/m	1 号铸坯		2 号铸坯		3 号铸坯	
	未喷丸	喷丸	未喷丸	喷丸	未喷丸	喷丸
1	0.37	0.20	0.16	0.03	0.34	0.36
2	0.38	0.11	0.07	0.16	0.37	0.31
3	0.40	0.04	0.13	0.01	0.44	0.23
4	0.03	0.09	0.11	0.17	0.36	0.20
5	0.02	0.18	0.07	0.11	0.23	0.22
6	0.02	0.26	0.24	0.08	0.21	0.16
7	0.16	0.10	0.05	0.01	0.17	0.16
8	0.02	0.04	0.08	0.14	0.33	0.13
9	0.03	0.09	0.08	0.20	0.26	0.17
10	0.20	0.21	0.06	0.02	0.19	0.13
平均值	0.16	0.13	0.11	0.09	0.29	0.21

## 2 试验结果及讨论

### 2.1 表面质量对比

从图 1 可以看出,铸坯原始表面经喷丸后,表面无氧化皮残留,手感平滑,出现金属光泽,经观察对

比,喷丸后铸坯的表面凹陷情况和边部振痕缺陷的密集程度有明显减轻。原始铸坯经修磨后,铸坯表面为砂轮打磨痕迹,铸坯振痕完全去除。

使用振痕仪对喷丸试验的 1、2、3 号铸坯边部振痕深度进行测量(每间隔 1 m 铸坯测一个点,共测 10 个点,即 10 m 铸坯长度),如表 3 所示。由于铸坯修磨工艺完全去除表面振痕,不再测量。喷丸后铸坯边部振痕均有所改善,边部振痕较未喷丸部位降低 0.13 mm。

由图 2 可见,喷丸后的铸坯对应的酸洗板及冷轧板表面整体色泽均匀性相对较好,未出现明显的线状粗糙、热擦疤、划伤等缺陷,表面质量优于未喷丸铸坯对应卷板,接近修磨部位铸坯对应卷板表面。

使用粗糙度仪对酸洗板及冷轧板表面粗糙度进行检测,喷丸处理酸洗板表面平均粗糙度由 3.15  $\mu\text{m}$  降低至 2.78  $\mu\text{m}$ ,接近修磨部位的 2.71  $\mu\text{m}$ 。经喷丸处理后冷轧板表面平均粗糙度由 0.047  $\mu\text{m}$  降低至 0.041  $\mu\text{m}$ ,接近修磨部位的 0.039  $\mu\text{m}$ 。

### 2.2 微观形貌分析

#### 2.2.1 保护渣残留情况分析

使用 SEM 扫描电镜对喷丸处理后的铸坯表面与原始铸坯表面进行微观形貌分析,EDS 能谱仪进行成分分析,见图 3。原始铸坯表面存在明显的 Na、K、Ca 等保护渣成分残留,由于原始铸坯表面振痕存在,铸坯表面可能存在一定铸坯夹渣缺陷影响后部表面质量<sup>[9]</sup>,而在经喷丸处理后铸坯表面无明显保护渣成分残留。修磨后铸坯由于已完全去除表面振痕,因此不再对表面进行保护渣残留分析。

从铸坯表面微观形貌看,铸坯喷丸工艺可以直接去除铸坯表面的保护渣等成分残留,避免保护渣在轧制过程压入基体,明显改善 430 铁素体冷板表面的线状粗糙类缺陷。

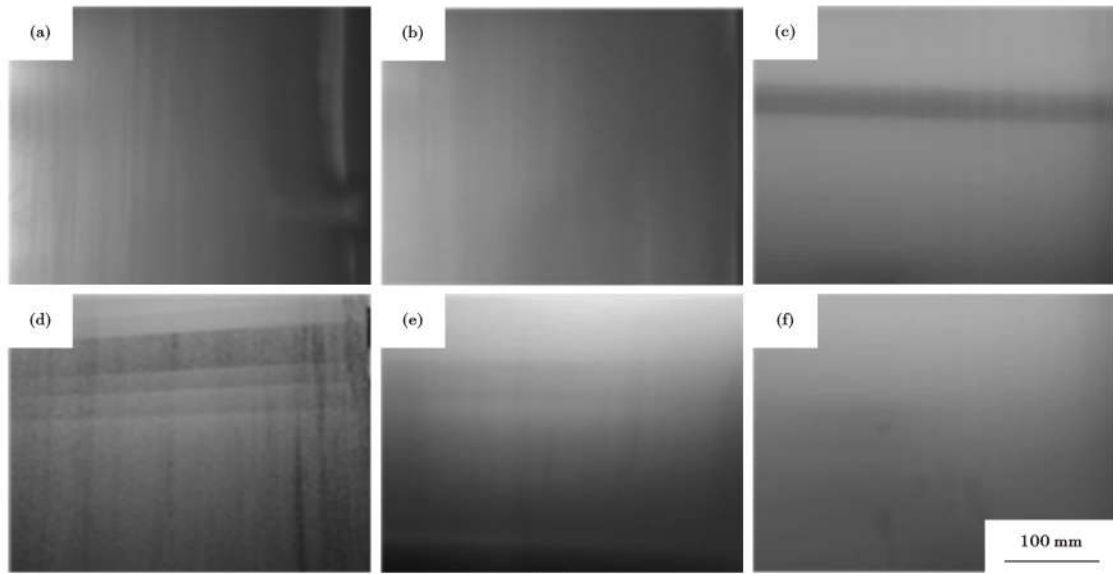


图 2 (a)(d)原始,(b)(e)喷丸和(c)(f)修磨的 430 钢铸坯对应的酸洗板(a)(b)(c)及冷轧板(d)(e)(f)表面情况  
 Fig. 2 Surface condition of pickling plate (a)(b)(c) and cold-rolled plate (d)(e)(f) rolled by corresponding to (a)(d) original, (b)(e) shot blasting and (c)(f) grinding of 430 steel cast slab

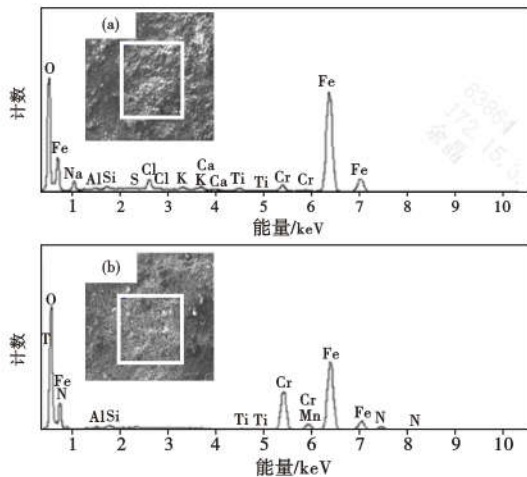


图 3 430 钢 (a) 原始和 (b) 喷丸铸坯表面 SEM-EDS 分析  
 Fig. 3 SEM-EDS analysis of original (a) and shot blasting (b) cast slab surface of 430 steel

2.2.2 高温氧化层结构分析

(1) 铸坯氧化层结构分析

图 4(a) 为未喷丸铸坯经加热后氧化层截面形貌, 其氧化层结构厚度在  $77.5 \mu\text{m}$ , 通过元素 EDS 检测可知, 氧化皮主要为 Fe-Cr 的氧化物, 在氧化皮中层位置 Cr 含量较高, Fe 含量比氧化皮与基体界面低。氧化层内层出现渗入基体式氧化, Fe 含量较高, 而 Cr 含量相对较低, 出现明显的 Si 氧化物富集, 氧化层结构与基体结合相对紧密。这是由于铸坯在加热过程中, Si 在  $1200 \text{ }^\circ\text{C}$  时, FeO 与  $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$  形成低熔点共熔体<sup>[10]</sup>, 此共熔体共晶温度在  $1170 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\geq 1200 \text{ }^\circ\text{C}$  加热时, 在氧化铁皮中产生液相, 浸入基体金属空格空隙, 造成渗入式氧化形貌。

图 4(b) 为喷丸铸坯经加热后氧化层截面形貌, 其氧化皮厚度为  $214.1 \mu\text{m}$ , 相比于未喷丸铸坯, 其氧化层厚度明显增加。通过元素 EDS 检测结果可知, 氧化皮主要为 Fe-Cr 的氧化物, 在氧化皮最外层主要为  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 中间层为  $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ 、 $\text{Cr}_2\text{O}_3$  组成, 在与

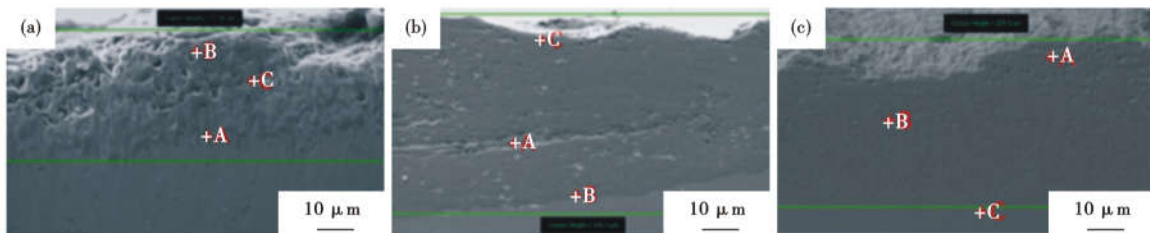


图 4 加热炉加热后铸坯氧化层结构: (a) 未喷丸; (b) 喷丸; (c) 修磨  
 Fig. 4 Structure of oxide tayer of billet heated by heating furnace: (a) no-shot peened; (b) shot peened and (c) grinding

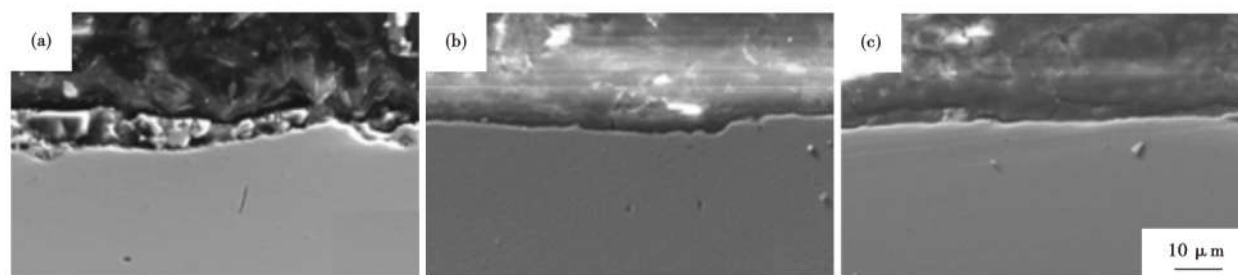


图 5 由(a)原始,(b)喷丸和(c)修磨的 430 钢铸坯生产的热轧板酸洗后断面的氧化物残留  
Fig. 5 Oxidation residue at pickled hot rolled plate 430 steel original (a), shot blasting (b) and grinding (c) of cast slab

基体交界处没有明显的 Si 氧化物富集。

图 4(c)为修磨铸坯经加热后的氧化层截面形貌,其氧化皮厚度为  $205.9 \mu\text{m}$ ,氧化层厚度与喷丸铸坯部位相当。通过元素 EDS 检测,氧化皮主要为 Fe-Cr 的氧化物,在氧化皮最外层其主要为  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  和  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,中间层为  $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ 、 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,在与基体交界处没有明显的氧化物。

铸坯喷丸过程在钢砂的打击力作用下使铸坯表面原始氧化铁皮破碎,部分基体裸露在表面,在加热炉加热时基体直接参与氧化反应,因此生成的氧化层厚度相对较厚,结构致密。对比修磨铸坯氧化层结构,其氧化层厚度基本一致,氧化层与基体界面均相对平整。对比未喷丸铸坯氧化层结构,喷丸后铸坯氧化层与基体间存在明显的界面,与基体间的结合力相对较差,在热轧除鳞过程中氧化铁皮容易去除,避免了在轧制过程氧化铁皮破碎压入基体造成冷板表面缺陷。

### (2) 酸洗板氧化残留分析

图 5(a)为原始铸坯部位经热轧退火酸洗后的酸洗板表面氧化物残留情况,在酸洗处理的断面形貌图上,观察到基体外层有残留物质存在,其厚度为  $2.73 \sim 6.15 \mu\text{m}$ ,结合元素 EDS 检测结果,基体外侧残留物质主要为 Fe-O 的化合物以及 Fe-Si-O 的化合物。由于未喷丸铸坯在氧化过程形成 FeO 与

$\text{Fe}_2\text{SiO}_4$  低熔点共熔体增加了除鳞难度,因此,在酸洗后的酸洗板表面发现 Fe-Si-O 的化合物。

分析喷丸部位铸坯经热轧退火酸洗后的断面形貌,结果见图 5(b),可以看出表面无明显氧化物残留,界面平整。

修磨部位铸坯经热轧退火酸洗后的断面形貌见图 5(c),修磨处理部位表面无明显氧化物残留,界面平整,与铸坯喷丸基本一致。

喷丸和修磨处理均能去除铸坯原始表面铁鳞,且在加热后生成的氧化层与基体存在明显的界限,在后续除鳞和酸洗过程中容易去除。

## 3 结论

(1) 430 钢铸坯喷丸后可去除铸坯表面保护渣成分残留及原始氧化铁皮,铸坯平均振痕深度降低  $0.13 \text{ mm}$ ;铸坯在加热炉中生成的氧化铁皮更加致密,与基体存在明显的界限,在热轧除鳞及酸洗过程中容易去除。

(2) 未喷丸铸坯经加热炉加热后出现渗入式氧化层结构,酸洗后表面仍存在 Fe-Cr-Si 的氧化物残留,在后续轧制过程中压入基体易造成粗糙类缺陷。

(3) 喷丸处理后铸坯经轧制酸洗后,酸洗板表面粗糙度由  $3.15 \mu\text{m}$  降低至  $2.78 \mu\text{m}$ ,冷板粗糙度由  $0.047 \mu\text{m}$  降低至  $0.041 \mu\text{m}$ ,可代替修磨工艺。

## 参考文献

- [1] 王文学,王雨,迟景灏. 不锈钢连铸坯表面缺陷与对策[J]. 钢铁钒钛, 2006(3): 63-68.
- [2] 杨连宏,李龙蛟,刘雅政,等. 430 铁素体不锈钢的热变形行为[J]. 金属热处理, 2011, 36(12): 78-79.
- [3] 程鹤辉,贺东风,田乃媛. 我国不锈钢发展现状及展望[J]. 特殊钢, 2007, 28(3): 50-52.
- [4] 董庆,崔娟,孔令波,等. 铁素体不锈钢生产工艺研究[J]. 河北冶金, 2017(9): 8-10+26. DOI: 10. 13630/j. cnki. 13-1172. 2017. 0903.
- [5] 张红令,李建军,毛敬华,等. 浅析不锈钢铸坯表面处理工艺[J]. 连铸, 2015, 40(4): 51-53. DOI: 10. 13228/j. boyuan. issn1005-4006. 20150032.
- [6] 杨军,顾学红,邵世杰,等. 含铁铁素体不锈钢连铸坯质量解析及工艺对策[J]. 钢铁, 2010, 45(4): 94-97. DOI: 10. 13228/j. boyuan. issn0449-749x. 2010. 04. 007.
- [7] 魏天斌. 热轧氧化铁皮的成因及去除方法[J]. 钢铁研究, 2003(4): 54-58.
- [8] 崔万飞,赵波. 抛丸工艺在钢铁线材表面处理上的应用[J]. 金属制品, 2021, 47(1): 17-20.
- [9] 赵建平,吕海富,王帅,等. 连铸板坯表面夹渣缺陷的成因及控制[J]. 铸造技术, 2020, 41(8): 793-797. DOI: 10. 16410/j. issn1000-8365. 2020. 08. 023.
- [10] Yang Yu-Ling, Yang Cheng-Hsien, Lin Szu-Ning, et al. Effects of Si and its Content on the Scale Formation on Hot-Rolled Steel Strips [J]. Materials Chemistry and Physics. 2008 (2). 566-571