

碳钢热轧中厚板一次氧化铁皮形成机制-剥离性能和工艺改善

黄 华¹ 徐李军¹ 时朋召²

(1 钢铁研究总院连铸技术国家工程研究中心,北京 100081;2 江西理工大学冶金与化学工程学院,赣州 341000;)

摘 要 Q235B 钢(∕% :0.18C,0.20Si,0.34Mn,0.015P,0.005S,0.07Cr)230 mm 铸坯轧成的 30 mm 板上出现(10~40)mm×(3~10)mm 深 1~3 mm 氧化皮压入缺陷。分析了一次氧化铁皮缺陷形成机制与高压水除鳞作业中高温剥离性,并提出工艺优化措施:(1)通过优化加热工艺,使高压水除鳞时铸坯表面温度应保证在 1 170 ℃ 以上;(2)优化后高压水系统喷水压力由 18 MPa 提高至 20 MPa,流速由 161.2 m/s 提高至 170.0 m/s,使打击力由 116.3 N 提高至 122.7 N。26 炉次的试验及生产实践结果表明,工艺优化后氧化铁皮压入导致的封锁率控制在 2% 以下,显著改善了氧化铁皮压入缺陷。

关键词 Q235B 钢 中厚板 一次氧化铁皮 高压水除鳞 剥离性

Formation Mechanism-Removability of Primary Scales of Carbon Steel Hot-Rolled Heavy-Medium Plate and Process Improvement

Huang Hua¹, Xu Lijun¹ and Shi Pengzhao²

(1 National Engineering Research Centre for Continuous Casting Technology, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081; 2 School of Metallurgical and Chemical Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000)

Abstract The depressed defects of scales with dimension (10~40)mm×(3~10)mm and depth 1~3 mm occur at 30 mm plate hot-rolled from 230 mm casting slab of steel Q235B (∕% : 0.18C, 0.20Si, 0.34Mn, 0.015P, 0.005S, 0.07Cr). The primary scale formation mechanism and removability at high temperature in high-pressure water descaling operation are analyzed and the measures to optimize the process are forward including (1) with optimizing heating process to insure the casting slab surface temperature being more than 1 170 ℃ for high-pressure water descaling; (2) with optimized high-pressure water parameters i. e. increasing spray-water pressure from 18 MPa to 20 MPa and flow velocity from 161.2 m/s to 170.0 m/s, in order to increasing the impact force from 116.3 N to 122.7 N. The test and commercial production results by 26 heats show that after process optimization the closing off rate of slab caused by rolled-in scales reduces to less than 2%, it is obvious to improve the rolled-in scales defects.

Material Index Steel Q235B, Heavy and Medium Plate, Primary Scales, High-Pressure Water Descaling, Removability

热轧中厚板表面质量缺陷,阻碍了产品档次的提升并造成严重的经济损失;产生的缺陷需要经过后续的修磨处理,不仅增加了钢板的成本,缺陷严重的还要改判、降级;其中氧化铁皮压入是引起表面质量缺陷的主要成因之一^[1]。本文以天津钢铁集团有限公司(天钢)炼钢厂 3#板坯连铸机生产的铸坯为例,分析了自 2016 年 5 月中旬至 6 月底中厚板的缺陷情况,其中氧化铁皮压入缺陷造成单浇次封锁率在 20%~40%,个别炉次封锁率高达 60% 以上。因此,理解氧化铁皮形成机制、掌握不同钢种氧化铁皮有效剥离工艺参数是十分必要的。

1 表面质量缺陷

图 1 为普碳钢 Q235B 中厚板氧化铁皮压入缺陷宏观形貌,其中 Q235B 化学成分如表 1 所示。出炉坯料(mm)230×1 600×7 000,出炉辊道速度

1.5~2.0 m/min,出炉温度为 1 050 ℃,精轧后坯料(mm)30×2 000×10 000。精轧后坯料上、下表面均出现如图 1 所示的缺陷,该缺陷长 10~40 mm,宽 3~10 mm,深度 1~3 mm,形状类似于纺锤,且其发生的位置与宽度没有关系,在任何位置都有可能,但大多数靠近板宽度 1/4 位置。

2 形成机理与剥离性

2.1 一次氧化铁皮形成机理

在加热炉内,由于高温长时间氧化,板坯表面生成 1~3 mm 厚的一次氧化铁皮或称为炉生氧化铁皮^[2]。对于碳钢的氧化理论 Wagner 建立了氧化膜生长动力学与氧化膜物理化学性质之间的定量关系,钢的初始氧化速度呈直线分布,氧化反应取决于气体的量;当反应氧化层达到一定厚度后,氧化动力学呈抛物线规律,反应速率由 Fe 原子的扩散控制^[3]。

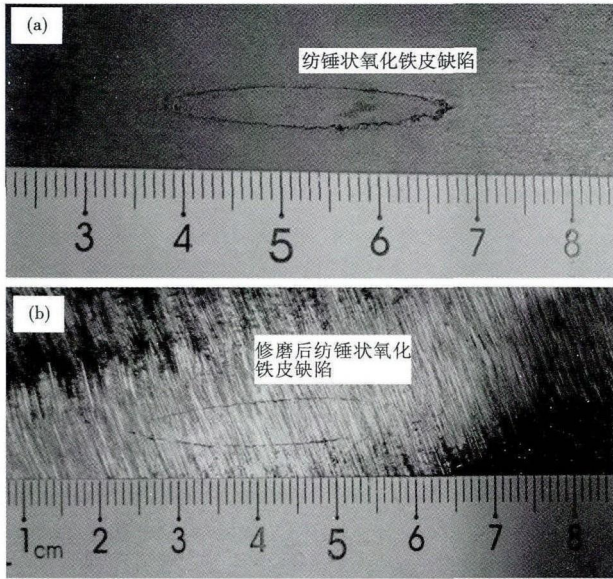


图 1 连铸板坯表面 (a) 修磨前; (b) 修磨后氧化铁皮压入缺陷宏观形貌

Fig. 1 Macro morphology of rolled-in scales defect at surface of casting slab before (a) and after (b) of grinding

表 1 Q235B 钢化学成分 / %

Table 1 Chemical composition of steel Q235B / %

C	Si	Mn	P	S	Cr
0.18	0.20	0.34	0.015	0.005	0.07

中厚板碳钢一次氧化铁皮结构按化学成分从外向内依次可划分为 Fe_2O_3 (赤铁矿)、 Fe_3O_4 (磁铁矿)、 FeO (方铁矿或维氏体), 氧化铁皮 EBSD (Electron Backscattered Diffraction) 分析扫描照片由图 2 可以看出, 外层 Fe_2O_3 较薄, 呈褶皱状, 部分块状鼓起, 为 N 型半导体氧化物, 呈斜方六面体晶系组织, 高于 $1\ 100\ ^\circ C$ 开始部分分解, 高于 $1\ 565\ ^\circ C$ 完全分解; 中层 Fe_3O_4 呈现颗粒蜂窝状, 为 P 型半导体氧化物,

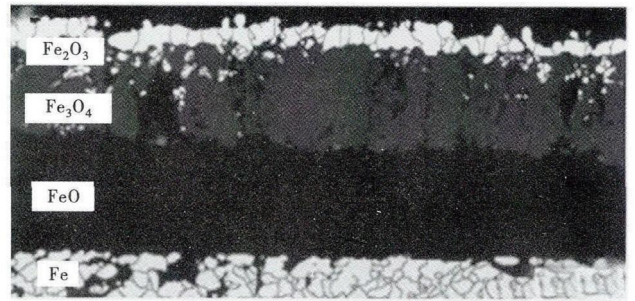


图 2 低碳钢氧化铁皮横截面电子背散射衍射相位图

Fig. 2 Electron backscattered diffraction phase structure figure of cross section of low carbon steel scale

具有尖晶石型复杂立方结构, 熔点 $1\ 538\ ^\circ C$, 是氧化铁皮中最致密、抗氧化性最佳的氧化物; 内层 FeO 为细小颗粒状, 呈簇状附着在基体上, 其为 P 型半导体氧化物, 有岩盐型的立方晶体结构, 由 $Fe-O$ 相图可以看出, 其熔点 $1\ 377\ ^\circ C$, 于 $570\ \sim\ 575\ ^\circ C$ 是稳定的, 高温下处于亚稳定状态, 高温缓慢冷却转变为 Fe_3O_4 [4-7]。

对图 1 氧化铁皮缺陷进行 EDS 分析, 发现嵌入钢基体中氧化铁皮硅质量分数约为 3.81% , 而 Q235B 钢基体硅含量为 0.201% , 这是由于钢基体的硅极易氧化, 使得内层氧化铁皮与基体界面位置发生硅颗粒富集产生硅酸亚铁 (Fe_2SiO_4) 相, 且该相包围着基体界面处的 FeO 形成钉扎作用, 将内层氧化铁皮牢固粘结在基体上。

2.2 一次氧化铁皮剥离性能

高压水除鳞机 (Hydraulic Scale Breaker, HSB) 除鳞示意如图 3 (a) 所示, 其工作原理是利用高压水的急冷, 氧化铁皮与钢坯体产生温差, 使表面基体材料和氧化铁皮层冷却收缩不同产生的剪切力, 水渗入基体材料和氧化铁皮之间, 产生的蒸汽爆炸等诸

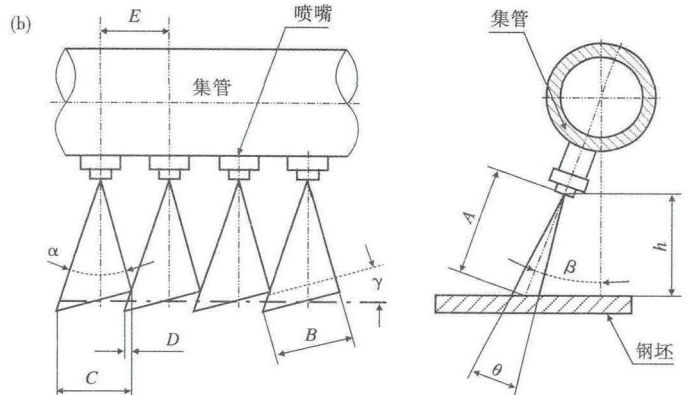
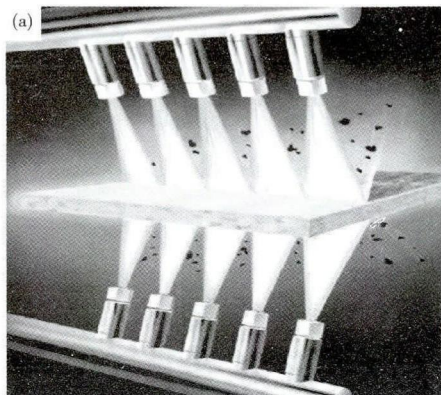


图 3 高压水除鳞 (a) 和高压除鳞喷嘴 (b) 示意图

Fig. 3 Schematics of high-pressure water descaling (a) and nozzle for high-pressure descaling (b)

多综合力的作用下,使氧化铁皮迅速脱离基体,同时高压水按设定方向冲走铁皮^[3]。

研究高压水除鳞影响因素的主要方法是通过除鳞高压水打击钢板的过程进行动力学分析,从定性角度分析喷射角 α 、倾斜角 β 、喷嘴相对喷水轴线的偏转角 γ 、喷射压力 H 、喷射流量 Q 、靶距 h 、相邻两个喷嘴的间隔距离 E 、有效覆盖宽度 B 、重叠量 D 等因素对打击力和除鳞效果的影响^[8]。高压水除鳞喷嘴安装参数如图3(b)所示,各参数间的函数关系如公式(1)、(2)、(3)所示^[9]。

$$H = \rho \cdot Q \cdot C_v \cdot V \quad (1)$$

$$V = k \sqrt{2gh'} \quad (2)$$

$$D = 2 \times \frac{h}{\cos\beta} \times \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \times \cos\gamma - E \quad (3)$$

式中: H -冲击力/N; ρ -水的密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) (取1 000); Q -管道水流速/($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$); V -喷嘴喷射后水流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); C_v -大气中的流速减速系数,距离200 mm, $C_v = 1$;距离300 mm, $C_v = 0.95$;距离500 mm, $C_v = 0.85$; g -重力加速度/($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) (取9.8); h' -压力水头压力为1 MPa时,喷头距钢板距离102 mm; k -流量系数(取0.85)。

3 氧化铁皮压入缺陷分析与对策

天钢中厚板厂有3个蓄热式步进梁式加热炉,1[#]、2[#]加热炉有效尺寸(长×宽)42.25 m×7.65 m,3[#]加热炉有效尺寸(长×宽)39.71 m×7.66 m,加热坯料出钢温度控制在1 050~1 230 ℃,位于加热炉与粗轧机间的高压水除鳞装置参数如下表2所示。

天钢中厚板高压水除鳞装置是不能进行自动的高度调节,且相邻两个喷嘴的间隔距离是固定不变的。为了验证该Q235B钢氧化铁皮压入缺陷是由于HSB除鳞不净导致的,将经高压水除鳞后的铸坯下线,如图4所示;该出炉坯料厚宽长尺寸(mm)为230×1 600×7 000,出炉辊道速度1.5~2.0 m/min,加热坯料出钢温度1 050 ℃。

普碳钢Q235B钢[Si]在0.2%~0.3%,中村峻之^[9-10]研究表明,[Si]在0.2%以上的钢坯加热后在基体金属与氧化铁皮界面生成层状硅酸亚铁(Fe_2SiO_4),使得氧化铁皮对基体

表2 高压水除鳞装置参数

Table 2 Parameters of high-pressure water descaling device

项目	参数
高压水集管数/个	上2,下2
喷嘴数/个	2×42,2×31
喷嘴前出水压力/MPa	16~23
喷水总量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	400
上喷嘴与板坯角度/°	15
下喷嘴与板坯角度/°	75
侧吹扫喷嘴数量/个	2

金属的附着力增强;福塚淑郎^[11]研究了碳钢在不同加热炉、过热度及氧化铁皮表面温度对一次氧化铁皮剥离性的影响,研究指出由于加热炉距HSB距离的不同,要求钢坯具有不同的出炉温度;孙彬^[1,3]、陈礼清^[2]、于洋^[12]等分析了氧化铁皮的形成机理,并提出加入合金元素Cr、加热炉采用微正压微氧化气氛快速加热、提高HSB打击力等措施抑制氧化铁皮压入缺陷;丁波^[13]研究表明,Q235B、Q345B和SPA-H连铸坯内层氧化铁皮以 Fe_2SiO_4 相呈楔形嵌入钢基体中致使除鳞不尽,可通过优化高压水除鳞系统参数和加热炉工艺改善氧化铁皮剥离性;刘小江^[14]研究了无取向硅钢的氧化热力学、动力学、内氧化与外氧化相互转变的机理,提出了CSP板坯出均热炉经HSB后的温度要高于1 000 ℃,并采用快速轧制提高氧化铁皮剥离性;高朋^[7]、吴兴元^[15]、罗晴^[16]对HSB喷嘴射流流场、温度场及换热系数进行了研究,对喷嘴选型给出了指导建议;叶东东^[17]分析了不同应力状态下带钢的破鳞机理,提出增大张紧力和压下量来提高氧化铁皮的剥离性。

结合表2,将集管与喷嘴参数代入公式(1)~(3)得到表3。由表3可以看出,HSB在喷射角为30°、靶距120 mm、集管水压力18 MPa的情况下,

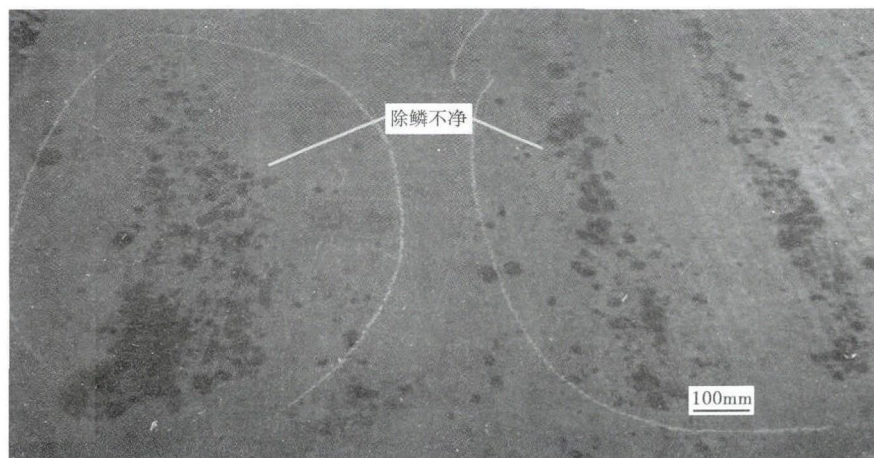


图4 高压水除鳞后连铸板坯表面残留氧化铁皮的形貌

Fig. 4 Morphology of residual scales at surface of casting slab after high-pressure descaling

喷嘴喷射后水流速 161.2 m/s,打击力为 116.3 N,有效覆盖宽度 62 mm,上喷嘴重叠量达到 5.5 mm,下喷嘴重叠量不足为 -4.4 mm。

在前人工作的基础上,提出 Q235B 钢

经 HSB 除鳞其温度应保证在 1 170 ℃ 以上,而对于目前 HSB 集管布局及喷嘴选型不做调整,但将 HSB 供水压力由 18 MPa 提高到 20 MPa,使得喷嘴流速由 161.2 m/s 增大至 170.0 m/s,打击力由 116.3 N 提高至 122.7 N。优化前后高压水除鳞后连铸坯表面情况分别如图 5(a,b) 所示,从图 5 可

以看出,除鳞效果得到显著改善。统计优化工艺后 3 个浇次,共计 26 炉次,因氧化铁皮压入导致的封锁率控制在 2% 以下。

4 结语

(1) 为了提高一次氧化铁皮在 HSB 上的高温剥离性,硅镇静钢铸坯经 HSB 除鳞其温度应保证在 1 170 ℃ 以上,这就要求对不同加热炉采用不同的加

表 3 优化前和优化后高压除鳞装置喷嘴与集管参数

Table 3 Parameters of spray nozzle and collector of high-pressure water descaling device before and after optimization

工艺	除鳞箱集管安装位置	集管数量	喷嘴参数							
			喷射角/°	压力/MPa	压力下流量/(L·min ⁻¹)	压力下流速/(m·s ⁻¹)	靶距/mm	压力下最大打击力/N	有效覆盖宽度/mm	重叠量/mm
优化前	上部	1	30	18	45.7	161.2	120	116.3	62	5.5
	下部	1	30	18	45.7	161.2	120	116.3	62	-4.4
优化后	上部	1	30	20	45.7	170.0	120	122.7	62	5.5
	下部	1	30	20	45.7	170.0	120	122.7	62	-4.4

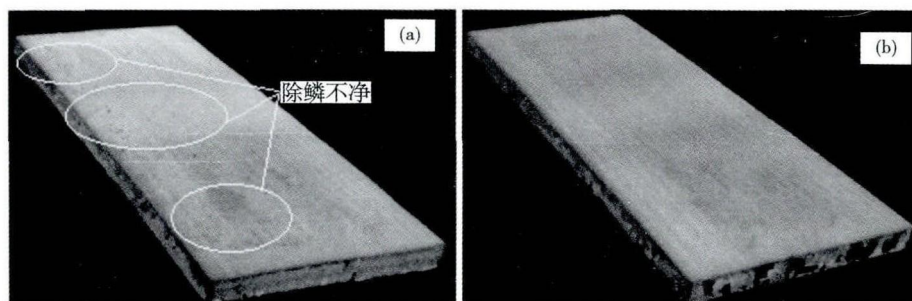


图 5 (a) 优化前和 (b) 优化后经高压水除鳞的连铸板坯表面情况

Fig. 5 Surface conditions of casting slab by high-pressure water descaling before (a) and after (b) of optimization

热制度。

(2) HSB 喷嘴工作环境差,建议定期进行打击试验,防止因喷嘴老化、喷嘴间出现干涉等因素致使除鳞时打击力弱、除鳞不净的现象发生。

(3) HSB 喷嘴和射流对一次氧化铁皮高温剥离性影响明显,因此,必须对不同规格铸坯制定相应的除鳞工艺,实现工艺规程的精细化,达到有效除鳞的目的。

参考文献

[1] 孙彬,刘振宇,王国栋. 热轧钢板典型压入式氧化铁皮的分类及其形成机理[J]. 东北大学学报(自然科学版),2010,31(10):1417-1420.

[2] 陈水利,查显文,陈礼清. 热轧中厚板氧化铁皮控制技术[J]. 东北大学学报(自然科学版),2011,32(7):960-964.

[3] 孙彬. 热轧低碳钢氧化铁皮控制技术的研发与应用[D]. 沈阳:东北大学,2011.

[4] Yu Xianglong, Jiang Zhengyi, Zhao Jingwei, et al. Microstructure and Microtexture Evolutions of Deformed Oxide Layers on a Hot-Rolled Microalloyed Steel[J]. Corrosion Science,2015,90:140-152.

[5] Guan Chuang, Li Jun, Tan Ning, et al. Reduction of Oxide Scale on Hot-Rolled Steel by Hydrogen at Low Temperature[J]. Science Direct,2014,39:15116-15124.

[6] Wu Hui-bin, Wang Di, Zhang Peng-cheng, et al. Influence of Alloying Elements on Oxidation Behavior of Steels and Microstructure of Oxide Scales[J]. Science Direct,2016,23(3):231-237.

[7] 高朋. 中厚板连铸坯高压水除鳞换热系数研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2015.

[8] 王志民,马起先. 700 mm 热轧带钢高压水除鳞系统的设计[J]. 冶金设备,2010,(1):138-143.

[9] 中村峻之,佐藤始夫,福塚淑郎. 厚板スケールの性状とデスクレーピング性について:厚板スケールの剥離性に関する研究第3報(帯板・形鋼および厚板圧延,加工,日本鉄鋼協会第97回(春季)講演大会)[J]. 鉄と鋼,1979,65(4).

[10] Fukutsuka Toshiro, Nakamura Takayuki, Sato Moto, et al. Study on the Descaling of the Steel Slabs before Hot Rolling[J]. Tetsu-to-Hagane,1980,66(10):1512-1521.

[11] 福塚淑郎,中村峻之,川上平次郎. 炭素鋼のスケールの機械的剥離性を決める要因について[J]. 日本金属学会会報,1980,19(4):231-238.

[12] 于洋,唐帅,郭晓波,等. 热轧卷板氧化铁皮形成机理及控制策略的研究[J]. 钢铁,2006,41(11):50-52.

[13] 丁波,丁美良,关建辉,等. 连铸坯表面氧化铁皮除不尽原因及对策[J]. 钢铁,2013,48(6):50-53.

[14] 刘小江. 热轧无取向高温氧化行为及其氧化铁皮控制技术的研发与应用[D]. 沈阳:东北大学,2014.

[15] 吴兴元. 高压水除鳞流场及除鳞温度场的数值分析[D]. 重庆:重庆大学,2009.

[16] 罗晴. 高压水除鳞系统水击防护及喷嘴性能研究[D]. 重庆:重庆大学,2012.

[17] 叶东东,陈建钧,王忠建. 不同应力状态下带钢的破鳞机理[J]. 钢铁研究学报,2016,28(1):64-70.

黄华(1985-),男,硕士(2012年燕山大学),工程师,2009年山东科技大学(本科)毕业,连铸坯质量和缺陷控制研究。E-mail:huanghua118@163.com

收稿日期:2016-10-26