

9.5 mm 热轧带钢 SPHC 氧化铁皮控制技术及应用

殷 胜^{1,2} 卞 皓³

(1 西北工业大学材料学院, 西安 710072; 宝钢股份梅钢公司 2 技术中心热轧产品研究所;
3 热轧厂生产技术室, 南京 210039)

摘 要 钢厂生产实践表明, 厚度 9 mm 以下薄规格热连轧带钢表面质量较好, 厚度 9 mm 以上厚规格热连轧带钢表面氧化铁皮较厚, 且结构疏松, 较厚氧化皮易在钢卷开卷过程脱落, 压入钢卷表面造成凹坑缺陷; 疏松的氧化铁皮易在钢卷储存过程中从空气中吸潮, 造成钢卷点锈, 继而产生麻点缺陷。分析了钢的氧化过程, 氧化皮形成机理和弯曲过程受力情况, 提出氧化铁皮厚度和结构的控制工艺。9.5 mm SPHC 钢($\% : 0.02 \sim 0.06\text{C}, \leq 0.10\text{Si}, 0.20 \sim 0.50\text{Mn}, \leq 0.035\text{P}, \leq 0.035\text{S}, \geq 0.01\text{Al}$) 热轧卷的生产试制表明, 通过将加热温度从 1 200 °C 降至 1 180 °C, 精轧出口温度和速度由 860 °C 和 5.0 m/s 分别提高至 880 °C 和 6.5 m/s, 卷取温度由 600 °C 降至 520 °C, 卷后单独堆放等工艺措施, 使带钢的氧化铁皮厚度由改进前的 10.093 ~ 18.94 μm 降至 6.613 μm , 生产现场基本无氧化皮脱落现象, 酸洗后表面凹坑明显减少。

关键词 低碳钢 SPHC 9.5 mm 带卷 氧化铁皮 控制技术

Control Technology of Iron Scale of 9.5 mm Hot-Rolled Strip Steel SPHC and Application

Yin Sheng^{1,2} and Bian Hao³

(1 School of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072;
2 Institute for Hot-Rolled Products, R&D Center, 3 Production Technology Department,
Hot Rolling Mill, Meisteel Co, Baosteel, Nanjing 210039)

Abstract Production practice at steel works shows that the surface quality of hot-rolled strip with thickness less than 9 mm is better but the surface iron scale of hot-rolled strip with thickness more than 9 mm is thick easily to come off during uncoiling process and press-in surface led to dent defect, and its structure is loose easily to absorb moisture from air led to rust spot and mottled spot defects. The oxidation process, forming mechanism in process and forced condition in uncoiling of iron scale are analyzed, and the control technology of iron scale thickness and structure is put forward. The results pilot production of 9.5 mm hot-rolled strip coil of steel SPHC ($\% : 0.02 \sim 0.06\text{C}, \leq 0.10\text{Si}, 0.20 \sim 0.50\text{Mn}, \leq 0.035\text{P}, \leq 0.035\text{S}, \geq 0.01\text{Al}$) show that with the process measures including decreasing heating temperature from 1 200 °C to 1 180 °C, increasing outlet temperature and rolling speed of finishing rolling respectively from 860 °C and 5.0 m/s to 880 °C and 6.5 m/s, decreasing coiling temperature from 600 °C to 520 °C, and single-stocking of coil, the scale thickness of steel strip decreases from original 10.093 ~ 18.94 μm to 6.613 μm , the iron scale come off phenomenon is no-occurrence at production situ and the surface dent defects of strip after pickling decreases markedly.

Material Index Low Carbon Steel SPHC, 9.5mm Strip Coil, Iron Scale, Control Technology

钢厂生产实践表明, 厚度 9 mm 以下薄规格热连轧带钢表面质量较好, 厚度 9 mm 以上厚规格热连轧带钢表面因氧化铁皮较厚且结构疏松, 表面质量不佳。

较厚氧化铁皮易在钢卷开卷过程脱落, 压入钢卷表面造成带钢表面凹坑缺陷; 疏松的氧化铁皮易在钢卷储存过程中从空气中吸潮, 造成钢卷点锈, 继而产生麻点缺陷, 这些都严重影响了带钢表面质量。

1 研究思路

1.1 钢的氧化过程

由 Fe-O 二元相图可知^[1], 铁的氧化经过下列阶段: 在 200 °C 以前, 缓慢生成 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 薄氧化膜,

继而生成双层氧化膜 $\text{Fe}_3\text{O}_4 + \gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, 氧化动力学服从对数速率定律, 属于低温氧化阶段; 在 200 ~ 400 °C, 发生相变, $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 发生相变转变成 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, 形成 $\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ 双层结构; 在 400 ~ 570 °C, 在 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 层之下, Fe_3O_4 层长大为较厚膜层; 当温度 > 575 °C, 在 Fe_3O_4 之下, 开始生成 FeO。氧化膜由 $\text{FeO} + \text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ 三层结构组成。

由上可知, 常温下典型氧化铁皮结构由最外层 Fe_2O_3 、中间层 Fe_3O_4 层和靠近基体侧 FeO 层组成。

1.2 氧化铁皮弯曲过程受力分析

对氧化铁皮弯曲过程受力分析^[2], 可知: 钢板弯曲过程中, 氧化铁皮外侧受拉应力、氧化铁皮内侧

受压应力;离中性层越远,无论拉应力还是压应力,均呈变大趋势。

氧化铁皮越厚,在弯曲过程中试样内外表面氧化铁皮所承受的变形越大,因此氧化铁皮容易脱落。

1.3 理想的氧化铁皮

外层氧化铁皮是结晶构造的 Fe_2O_3 ;中间层是致密、无孔和裂缝、成玻璃状端口的磁性氧化铁 Fe_3O_4 ;内层是疏松、多孔的细结晶组织 FeO 。

铁的不同氧化产物与钢基体附着力是不一样的,附着力越大,破坏应力越大。 FeO 、 Fe_3O_4 、 Fe_2O_3 的破坏应力分别为 0.4、40、10 MPa。在变形时, Fe_3O_4 含量较高的氧化铁皮可承受一定程度的塑性变形,因此,当钢中氧化铁皮结构为 Fe_3O_4 时或共析 Fe_3O_4 和 Fe 结构时,氧化铁皮脱落较少。

要使带钢表面氧化铁皮在弯曲过程(开卷)不脱落,理想的氧化铁皮应为:(1)氧化铁皮厚度越薄越好;(2)氧化铁皮中 Fe_3O_4 比例越高越好。梅钢公司厚规格氧化铁皮控制目标:氧化铁皮厚度 $\leq 10 \mu m$;氧化铁皮中 $Fe_3O_4 \geq 70\%$ 。

1.4 关键热轧工艺参数

热连轧带钢从加热炉出来后,经过粗轧和精轧阶段除鳞,精轧出口带钢表面除少量 3 次氧化铁皮外,1 次氧化铁皮和 2 次氧化铁皮都已被去除,带钢表面氧化铁皮主要是在出精轧后层流冷却过程和卷取过程中产生。

要控制氧化铁皮厚度和结构,必须对精轧过程、层流冷却方式和卷取进行控制。

1.4.1 氧化铁皮厚度控制

氧化铁皮厚度可用公式来预测^[3]:

$$X_{FeO} = \frac{1 + M_{Fe}/M_O}{\rho_{FeO}} k_e \exp\left(-\frac{Q_{氧化铁皮}}{RT}\right) \sqrt{t}$$

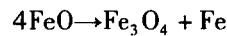
式中: X_{FeO} -氧化铁皮厚度; M_{Fe} 、 M_O -Fe 和 O 的相对原子量; ρ_{FeO} -FeO 的密度; k_e -常数; $Q_{氧化铁皮}$ -激活能; R -理想气体常数; T -加热温度; t -加热时间。氧化铁皮的实际厚度比计算得到的氧化铁皮厚度大。这是因为氧化相的热膨胀性比钢大。

从氧化铁皮厚度公式可知,要想获得薄的氧化铁皮,必须控制带钢的加热温度和时间,加热温度越低、加热时间越短,氧化铁皮厚度越薄;热轧精轧速度越快越好。

层流冷却方式,为使带钢尽快进入低温区,可采用前段冷却模式。在带钢收卷后,应放置在通风处,使带钢温度尽快降低,达到减少氧化的目的。

1.4.2 氧化铁皮结构控制

570 °C 以下时富氏体中 FeO 不稳定^[4],并且分解,变成 Fe_3O_4 和 Fe ;当温度进一步降低到 300 °C 以下时,这种转变将趋近于 0。



为了氧化铁皮中 Fe_3O_4 的比例增大,必须使带钢的卷取温度迅速降低到 300 ~ 570 °C^[5],使钢中富氏体发生共析反应。

2 试验材料及研究方法

选择梅钢产品厚度为 9.5 mm 的 SPHC,宽度为 1 450 mm,卷重为 25 t,开展试验,化学成分如表 1,改进前后工艺参数如表 2。

表 1 试验 SPHC 钢的化学成分 / %

Table 1 Chemical composition of tested steel SPHC / %					
C	Si	Mn	P	S	Alt
0.02 ~ 0.06	≤ 0.10	0.20 ~ 0.50	≤ 0.035	≤ 0.035	≥ 0.01

表 2 改进前后的热轧工艺参数

Table 2 Parameters of hot-rolling process before and after improvement

工艺	加热时间/ min	出炉温度/ °C	精轧出口 温度/°C	精轧出口速度/ ($m \cdot s^{-1}$)	层冷方式	卷取温度/ °C	入库管理
改进前	≥ 160	$1\ 200 \pm 20$	860 ± 20	5.0	前段冷却	600 ± 20	无规定
改进后	≥ 160	$1\ 180 \pm 20$	880 ± 20	6.5	前段冷却	520 ± 20	单独堆放

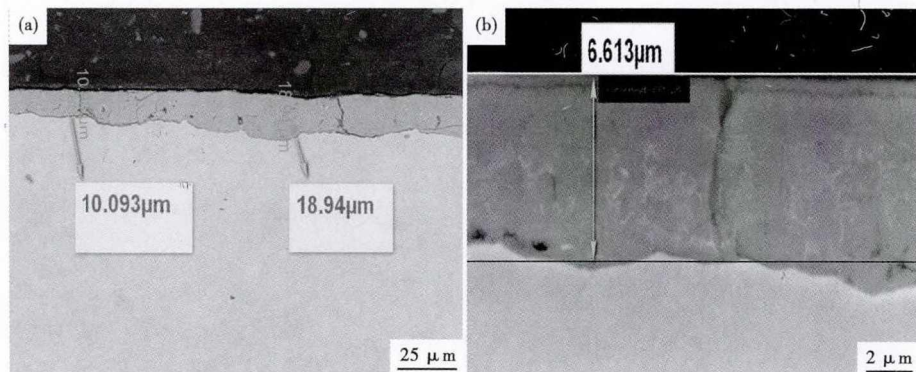


图 1 9.5 mm SPHC 钢热轧带断面的氧化铁皮厚度:改进前 10.093 ~ 18.94 μm (a);改进后 6.613 μm (b)

Fig. 1 Iron scale thickness of section of SPHC 9.5 mm hot-rolled steel strip: (a) before process improvement- 10.093 ~ 18.94 μm ; (b) after process improvement- 6.613 μm

待钢卷冷却到室温后,取样分析。用扫描电镜对氧化铁皮厚度和析出物形貌分析;收集拉伸过程中掉落的氧化铁皮粉末,用 X 射线衍射仪(BRUKR, D8 DISCOVER)对其进行氧化铁皮结构分析;使用冷弯方法(弯曲 90° , 弯心 $d = 1 a$)验证氧化铁皮与基体结合力。

3 试制结果与分析

工艺改进前 9.5 mm SPHC 热轧带钢氧化铁皮厚度不均匀,在 $10.093 \sim 18.94 \mu\text{m}$ (图 1a),工艺改进后氧化铁皮中 $\text{Fe}_3\text{O}_4 \geq 70\%$,氧化铁皮厚度降 $10 \mu\text{m}$ 以下,在 $6.613 \mu\text{m}$ 左右(图 1b);其共析产物形貌和结构分析分别见图 2(a,b);改进后氧化铁皮结合良好,无脱落现象(图 3)。由氧化铁皮弯曲过程受力分析可知,工艺改进后的氧化铁皮弯曲产生的应力小于工艺改进前的氧化铁皮弯曲产生的应力,小的弯曲应力可以减小氧化铁皮破裂风险。

扫描电镜对工艺改进后的氧化铁皮分析,工艺改进后氧化铁皮中存在“菊花状”共析产物(图 2a)。由图 2(b)衍射结果可知,工艺改进后氧化铁皮中 Fe_3O_4 占 88.6%, FeO 占 1.4%, Fe_2O_3 占 4.0%, Fe 占 6.0%。

从图 3 可看出,使用冷弯方法对改进后钢材上表面和下表面的氧化铁皮进行评价,可见钢材上表面、下表面氧化铁皮均无明显脱落,较薄的 Fe_3O_4 氧化铁皮与钢的基体结合良好。

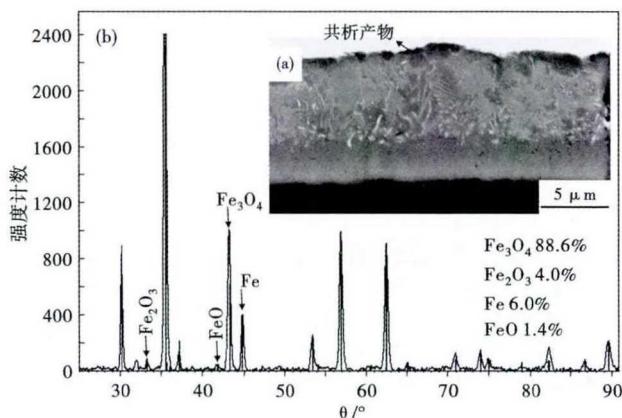


图 2 工艺改进后 9.5 mm SPHC 热轧带钢氧化铁皮共析产物(白色菊花状)的形貌(a)和结构分析氧化铁皮 Fe_3O_4 - 88.6%, FeO - 1.4%, Fe_2O_3 - 4.0%, Fe - 6.0% (b)

Fig. 2 Morphology of iron scale eutectoid products (white chrysanthemum type) of SPHC 9.5 mm hot-rolled steel strip after process improvement (a); and structure analysis of iron scale Fe_3O_4 - 88.6%, FeO - 1.4%, Fe_2O_3 - 4.0%, Fe - 6.0% (b)

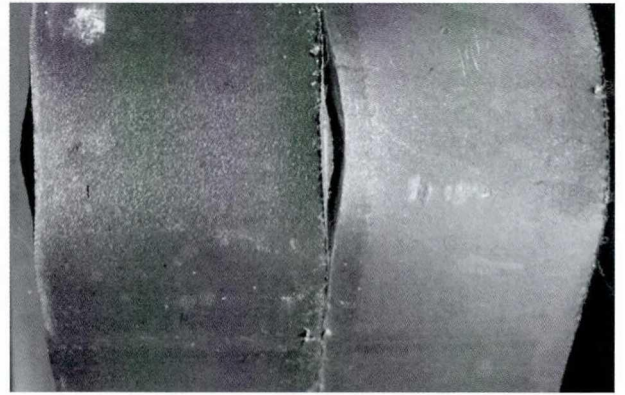


图 3 工艺改进后 9.5 mm SPHC 热轧带钢弯曲试样的形貌
Fig. 3 Morphology of bended specimen of SPHC 9.5 mm hot-rolled steel strip after process improvement

经过用户开卷使用,新工艺下厚规格热连轧表面质量较前期明显改善,生产现场基本无氧化铁皮脱落现象,酸洗后表面凹坑现象显著减少;发往南方的用户表面锈蚀质量的数量明显减少,工艺改进后明显提高了带钢的产品质量。

4 结论

(1)提高厚规格热连轧钢板表面质量关键在于控制氧化铁皮厚度和氧化亚铁比例,最佳表面质量对应的氧化铁皮厚度 $\leq 10 \mu\text{m}$;氧化铁皮中 $\text{Fe}_3\text{O}_4 \geq 70\%$ 。

(2)厚规格热连轧钢板表面质量控制关键因素为加热温度、在炉时间、精轧速度、层冷方式、卷取温度,加热温度越低越好,在炉时间越短越好,精轧速度越快越好,卷取温度必须低于 570°C 。

参考文献

- [1] Birks N, Meier G H. Introduction to High-Temperature Oxidation of Metals [A]. London: Edward Arnold, 1983: 96-102.
- [2] 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.
- [3] Torrcsa M, Colas R. A Model for Heat Conduction Through the Oxide Layer of Steel during Hot Rolling[J]. Material of Process and Technology, 2000, 105(3): 258-263.
- [4] 孙彬, 曹光明. 热轧高强度钢氧化铁皮演变规律的研究[J]. 钢铁, 2010, 45(11): 53-57.
- [5] 刘振宇, 于洋, 郭晓波, 等. 板带热连轧中氧化铁皮的控制技术[J]. 轧钢, 2009, 26(1): 5-9.

殷胜(1980-),男,硕士(2004年南京理工大学),高级工程师,2002年南京理工大学(本科)毕业,产品研发。

E-mail: yinsheng@baosteel.com

收稿日期: 2017-06-16