热轧双相钢DP600氧化物缺陷分析与控制

张秀飞,白海瑞,郭冬青

(内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心,内蒙古 包头 014010)

摘 要: 针对包钢2 250 mm热连轧生产线热轧DP600的表面红色氧化物缺陷,进行了缺陷形貌、成分的检测和分析。Si含量高容易引起FeO难以去除,残留的FeO的在轧制过程中压入基体,是造成氧化物缺陷的主要原因。工业试验结果表明,采用加入微量磷元素、减少钢坯的加热时间、除磷机前短暂待温等措施,可明显减少红色氧化物,改善表面质量。

关键词: 氧化物缺陷; 双相钢; DP600

中图分类号: TG335.5+6 **文献标识码**: B **文章编号**: 1009-5438(2018)01-0054-04

DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2018.01.018

Analysis and Control of DP600 Scale Defects on Hot Rolled Dual-phase Steel

ZHANG Xiu-fei, BAI Hai-rui, GUO Dong-qing

(*Technical Center of Inner Mongolia Steel Union Co. Ltd. of Baotou Steel (Group) Corp., Baotou* 014010, *Nei Monggol, China*)

Abstract: Morphology and composition of red scale defects on hot rolled DP600 surface produced in 2 250 mm hot rolling production line are tested and analyzed. High contents of Si makes it difficult to remove FeO and residual FeO is pressed into matrix, which is the main reason for red scale defects. The industrial test results show that adding phosphorus microelement, reducing heating time of billet and shortly staying at temperature before phosphorus removal machine can significantly reduce red scale and improve surface quality.

Key words: scale defect; dual-phase steel; DP600

近年来国内汽车的消费和产量大幅增长,对高强度汽车用钢需求加大,对其成形性能也提出更高的要求。双相钢以其高强度和高成形性能,应用于制造汽车加强板、车轮、底盘、保险杠、车体各种框架等构件[1-2]。高强双相钢的使用可减轻汽车重量的20%~30%,符合汽车材料轻量化、高性能、安全环保节能的发展主题,逐渐成为汽车轻量化的首选钢种之一[3]。作为汽车零部件材料,双相钢的表面质量要求极为严格。近期,包钢在2 250 mm热连轧生产线上进行了DP600的工业试制,本文对试制过程中出现的氧化物缺陷进行了分析与改进。

1 主要试制工艺

1.1 化学成分

双相钢DP600的化学成分要求见表1。双相钢的主要合金元素有C、Si、Mn、Cr等,对双相钢组织、性能控制有重要作用。C主要用于形成所需数量的马氏体和保证钢的强度,同时影响焊接性能等。Si

* **收稿日期**: 2017-07-27

作者简介: 张秀飞(1977-),男,山东省临沂市人,硕士,工程师,现从事板带材产品研发工作。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

可以扩大 Fe－C 相图的 α 区，使临界区的温度范围加宽，促进碳原子从铁素体中进入奥氏体，改善双相钢的工艺性能，有利于保持双相钢强度、延伸性等性能的稳定和重现性。Mn 是典型的奥氏体稳定化元素，显著提高钢的淬透性，并起到固溶强化和细化铁素体晶粒的作用，可显著推迟珠光体转变以及贝氏体转变。Cr 显著提高钢的淬透性，不仅能强烈推迟珠光体转变和贝氏体转变，而且扩大了“卷取窗口”[4]。

表 1　DP600 化学成分(质量分数)　%

C	Si	Mn	P	S	Cr
0.06～0.10	0.20～0.60	≤1.70	≤0.090	≤0.015	≤0.70

1.2　轧制工艺

根据 DP600 的性能要求，结合包钢 2250 热连轧生产线的设备能力和生产条件，主要加热、轧制、冷却工艺见表 2。

表 2　主要加热、轧制、冷却工艺

板坯厚度/mm	出炉温度/℃	均热时间/min	在炉时间/min	终轧温度/℃	冷却方式	卷取温度/℃
230	1200	30～60	160～280	840±20	两段式冷却	≤150

2　缺陷检测分析

2.1　缺陷形貌

工业试制的 DP600 成品钢带表面出现红色氧化物缺陷，沿轧制方向呈条带状分布，其取样实物如图 1 所示。

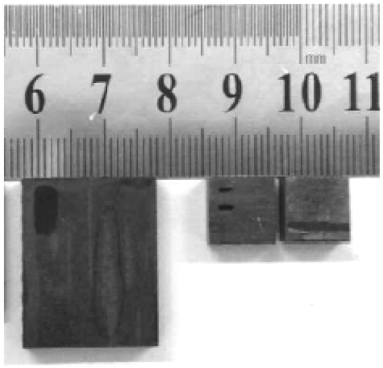


图 1　DP600 表面氧化物缺陷

2.2　缺陷检测

2.2.1　SEM/EDS 分析

使用酒精超声清洗试样后直接进行表面氧化物形貌观察，图 2 是低倍下缺陷位置 SEM 图像，黑色为所做标记，中间白色条带是红色氧化物缺陷位置，缺陷处白色位置为氧化皮部分剥落而成。缺陷边界位置放大如图 3 所示，可以明显看出缺陷处氧化皮部分脱落，形成白色的凹坑。缺陷处白色凹坑与普通位置氧化皮脱落对比来看，缺陷处氧化有一定的深度。

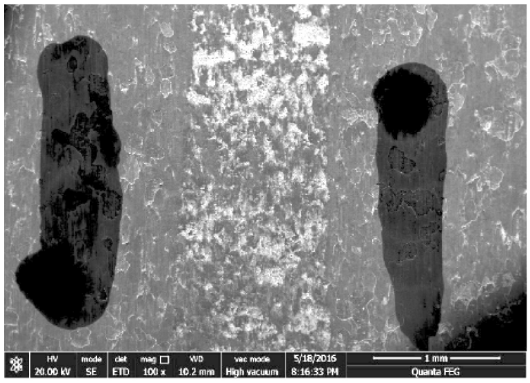


图 2　氧化物缺陷 SEM 照片

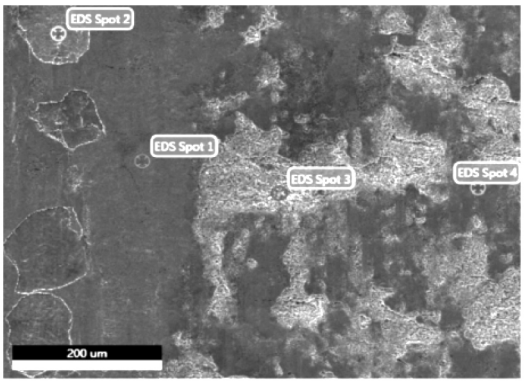


图 3　缺陷能谱分析位置

根据图 3 上不同位置的能谱分析的结果，不同化学元素含量见表 3。点 1 为正常氧化铁皮，点 2 为正常氧化铁皮表面剥落露出的内部氧化铁皮，点 3 为缺陷处白色氧化凹坑，点 4 为缺陷位置灰色处。正常氧化铁皮处表面氧含量分别为 23.63%，内部

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

氧含量13.08%。缺陷处表面氧含量28.66%，内部氧含量仍能达到25.55%。与普通氧化铁皮处相比，缺陷处氧含量略高，除O、Fe外，其它元素含量差异不明显。

表3 不同位置元素含量(质量分数) %

能谱分析位置	O	Fe	Mn	Co	Cr
1	23.63	68.10	0.68	0.79	0.64
2	13.08	81.36	0.78	0.94	0.64
3	25.55	67.67	0.69	0.64	
4	28.66	67.08	0.53	0.74	0.52

截取缺陷试样的横截面进行观察，如图4所示，与正常氧化铁皮处相比，缺陷处氧化物嵌入基体厚度约10 μm。图5为缺陷处线扫描结果，接近表面位置氧元素含量上升，说明表面Fe_2O_3含量升高。

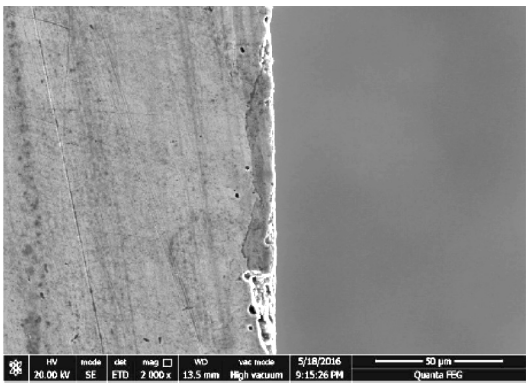


图4 氧化物缺陷处侧面

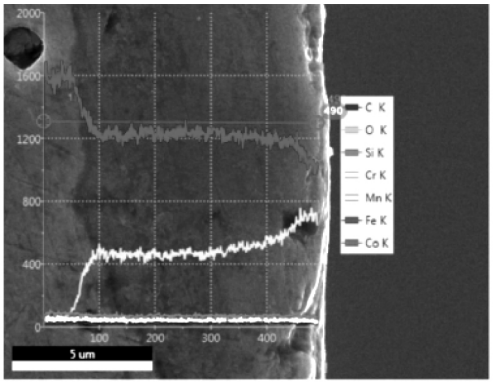


图5 氧化物缺陷侧面线扫描

2.2.2 XRD物相分析

在缺陷和基体位置表面进行XRD微区物相分析，微区扫描的谱线如图6所示。

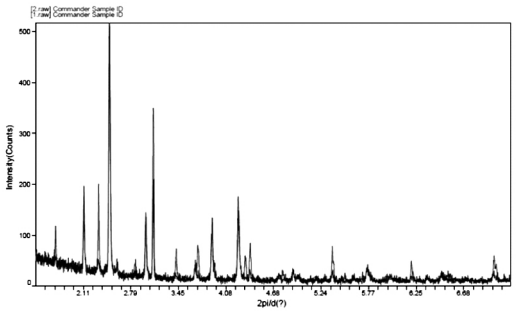


图6 缺陷(1)与基体(2)谱线对比

由图6可见，两个谱线峰的位置基本相同，区别是谱线峰的强度有差异。说明两处物相基本相同，只是含量有差异。物相含量计算公式[4]使用式(1)、式(2)(w_X：物相X的质量分数；I_X：物相X峰值强度相对值；K_X：物相X的RIR值。)，物相分析结果见表4。缺陷位置和正常位置的氧化铁皮成分差异较大，缺陷位置Fe_2O_3的含量明显高于正常表面。Fe_3O_4的颜色为黑色，Fe_2O_3的颜色为红色，说明缺陷处发红的直接原因是Fe_2O_3含量高。

$$w_X = -\frac{I_{Xi}}{K_A^X \sum_i^N = A\frac{I_i}{K_A^i}} \tag{1}$$

$$K_A^X = \frac{K_X}{K_A} \tag{2}$$

表4 正常表面与缺陷表面物相分析 %

位置	F	Fe_2O_3	Fe_3O_4
缺陷表面	9.60	45.30	45.10
正常表面	18.60	20.60	60.80

2.3 缺陷原因分析

SEM、EDS、XRD的检测结果表明，氧化物缺陷有一定的深度，为压入氧化铁皮缺陷，缺陷处发红的原因是Fe_2O_3的含量高。图7显示了高Si钢红色氧化铁皮形成机理，在Si含量较高的钢中，由于Si的扩散能力较强，在加热炉中长时间加热过程中会在氧化铁皮层和基体之间形成铁橄榄石(Fe_2SiO_4)。Fe_2SiO_4在1 173 ℃以上时以液态形式出现，在1 173 ℃呈熔融状态以楔形侵入鳞与铁质中，鳞与铁质界面就形成了错综复杂的特殊结构的鳞层，使与基体接触的FeO难以去除。残留的FeO和Fe_2SiO_4在轧制过程中产生压入式氧化铁皮，充分氧化后形成红色的Fe_2O_3[5]。Si是控制双相钢铁素体/马氏体比例的重要元素，其含量高于一般钢种，

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

从缺陷的形貌特征与检测的结果来看，与上述生成机理一致。

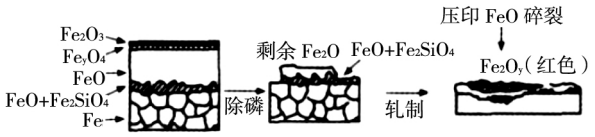


图 7　高 Si 钢红色氧化铁皮形成机理

3　改进措施及效果

加热温度、加热时间、除鳞机的压力工作状态都会对表面氧化物缺陷的形成造成影响。从生产过程来看，除鳞机的工作水压保持 220×10^6 Pa 左右，同一生产计划的其他相邻钢种未出现严重的红色氧化物缺陷。所以，表面质量改进的重点集中到 DP600 自身的生产工艺优化上。

(1) 提高加热温度：因为高 Si 钢的温度低于 1 173 ℃时氧化铁皮会与基体紧密，为保证除鳞机工作时板坯表面温度在 1 173 ℃以上，出炉温度从 1 200 ℃提高到 1 230 ℃进行了工业试验。试验结果表明，提高出炉温度后，红色氧化物没有改善，原因可能是出炉温度的提高导致氧化物的厚度增加，增大了除鳞的难度。

(2) 减少加热时间：现场生产的统计规律表明，氧化物缺陷的数量随板坯加热时间的增加而增加。轧制 DP600 时曾遇到由于设备故障导致在炉时间延长到 400 min 以上，在线检测整卷氧化物缺陷数量超过 2 000 个。当板坯加热的在炉时间低于 230 min，在线检测到的氧化物数量少于 50 个，氧化物缺陷明显改善。

(3) 钢中加入微量 P 元素：Si 可促进铁素体的生成，有利于双相钢的铁素体－马氏体两相比例的控制与性能的稳定性，因此双相钢的成分设计需要一定量的 Si。在加热过程中，P 也容易在氧化铁皮和基体的界面上富集，但与 Si 的作用相反，P 明显增加氧化铁皮的碎化程度，使铁皮结构疏松易于剥落[6]。

(4) 在除磷机前短暂待温：经过验证，DP600 板坯出炉后，在除磷机前短暂摆动待温 1 min 左右，再进入除磷工序，可明显减少热轧后钢带的氧化物数量。与不待温钢带相比，经过短暂待温的钢坯生产的 DP600 红色氧化物数量减少约 50%。红色氧化物减少的原因可能是待温使钢坯表面温度降低，减弱了氧化物和基体结合程度，有利于除磷机去除板坯在加热炉内生成的表面氧化物。除磷机前待温会影响生产节奏，如遇到产线故障导致 DP600 板坯在炉时间过长，可作为减少红色氧化物缺陷的补救措施之一。

最终采取的改善 DP600 表面红色氧化物缺陷的主要措施是：缩短板坯在炉时间，目标不超过 240 min；化学成分加入微量 P（质量分数为 0.04%）；如遇生产事故导致在炉时间超过 280 min，在除磷机前待温 1 min。实施改进措施后，DP600 的氧化物缺陷显著减少，表面质量明显改善，达到用户要求。

4　结论

(1) 双相钢 DP600 Si 含量较高，在加热炉生成的内层氧化铁皮 FeO 和 Fe_2SiO_4 与基体结合力强，难以通过除鳞工序去除，在后续轧制过程压入基体，是产生红色氧化物缺陷主要原因。

(2) 提高加热温度对去除红色氧化物缺陷的作用不明显，但通过减少板坯加热时间、化学成分添加少量 P、除磷机前短时待温，可以明显减少 DP600 的氧化物缺陷，改善钢带表面质量。

参　考　文　献

[1] 王利. 汽车轻量化与先进的高强度钢板[J]. 宝钢技术，2003，(5)：53－59.

[2] 王瑞珍，罗海文，董瀚. 汽车用高强度钢板的最新研究进展[J]. 中国冶金，2006，16(9)：1－9.

[3] 康永林. 汽车用双相钢板的开发与研究进展[J]. 汽车工艺与材料，2006，(5)：1－5.

[4] 马鸣图，吴宝榕. 双相钢物理和力学冶金[M]. 北京：冶金工业出版社，2009.

[5] Tomoki FUKAGAWA，Hikaru OKADA，Yasuhiro MAEHARA. Mechanism of Red Scale Defect Formation in Si－added Hot－rolled Steel Sheets[J]. ISIJ International，1994，34(11)：906－911.

[6] 王畅，于洋，王林，等. 碳和磷对热轧带钢氧化铁皮气泡行为的影响[J]. 钢铁研究学报，2016，28(3)：74－79.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net