

让高强钢表面更“干净”——TRIP钢退火铁皮缺陷控制

Cleaning up the Surface: How to Control Oxide Scale on Cold-rolled and Annealed TRIP Steel

供稿|白玉朋, 栗建辉, 张帅, 张煜 / BAI Yupeng, LI Jianhui, ZHANG Shuai, ZHANG Yu

内容导读

本文对高 Si、高强相变诱导塑性钢 (TRIP 钢) QP980 冷轧退火后表面的氧化铁皮缺陷开展分析研究。铁皮缺陷的微观分析表明, 除 O、Fe 元素外, 还有一定的 Si 元素, 因此推断铁皮的产生原因是 Si 元素富集。铁皮缺陷产生的根源为热轧工序, 形成于卷取后钢卷的冷却过程。依据生产现状, 从 Si 含量和热轧卷取温度 2 个方面展开分析验证, 发现降低 Si 含量和热轧卷取温度有利于减少表面铁皮缺陷。但受产品特性和生产工艺的约束, Si 含量和热轧卷取温度不能无限制降低, 需结合产品特性和产线能力, 寻找表面质量和工艺要求的平衡点, 从而降低铁皮缺陷的发生率和降级率。

相变诱导塑性钢 (TRIP 钢) 是一种先进的钢种, 能冲制出形状复杂的零件, 具有优异的塑性。与其他冲压用钢材相比, TRIP 钢兼具良好的加工硬化和烘烤硬化性能。采用 TRIP 钢制造车身零件, 不仅可以减小钢板厚度从而减轻汽车的质量, 而且能提高其疲劳强度和抗撞性能, 对节约能源、减少排放和提高安全性有显著效果^[1-2]。宝钢、鞍钢等企业通过成分优化与工艺创新, 在常规连退产线实现 TRIP 钢量产, 突破专用产线限制, 宝钢 QP1500 钢种的全球首发标志着中国在超高强 TRIP 钢领域达到国际领先水平^[3-4]。唐山钢铁集团有限责任公司 (以下简称唐钢) 某产线在生产热轧 QP980 钢 (抗拉强度 > 980 MPa 的高强度退火 TRIP 钢) 时, 出现了批量因氧化铁皮残留导致产品降级的问题, 产品合格

率不足 70%。因此, 有效解决退火产品铁皮问题迫在眉睫。

QP980 表面铁皮分布及微观分析

退火产品表面铁皮缺陷的分布规律

唐钢退火产品检验使用的是西门子表面检测设备, 根据其检测结果, 铁皮缺陷的分布规律如下: (1) 宽度方向: 铁皮主要存在于钢带中间位置, 边部无缺陷。(2) 长度方向: 铁皮在钢卷长度方向的中间位置至后半部分较严重, 钢带的头部 100 m、尾部 100 m 无明显缺陷。(3) 上下表面: 主要集中在钢带的上表面, 下表面偶尔有少量缺陷。退火产品的铁皮形貌如图 1 所示, 方框区域内为铁皮缺陷。

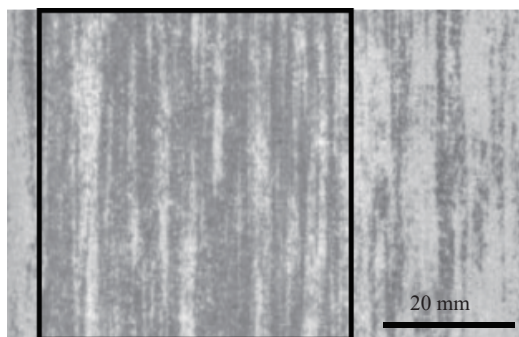


图1 退火工序铁皮缺陷图像

缺陷微观分析

为保证缺陷识别的准确性，取缺陷样品进行分析，制作缺陷截面样品，利用显微镜放大 500 倍扫描，可以观察到缺陷形貌为覆盖在基体上、呈破碎片状或板条状的形态^[5-7]。缺陷微观形貌如图 2 所示，图中方框内区域为铁皮组织，方框上方为镶嵌料，下方为钢基体。

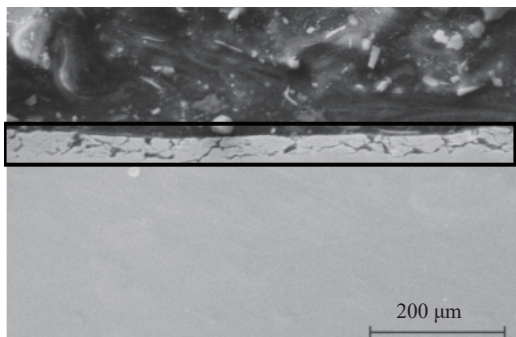


图2 缺陷微观形貌

利用扫描电镜能谱仪设备对缺陷海绵体组织进行分析，发现其成分主要为 O 和 Fe 元素，并含有少量 Si 元素。分析结果如图 3、表 1 所示。

综合上述成分分析结果可以确认，影响退火产

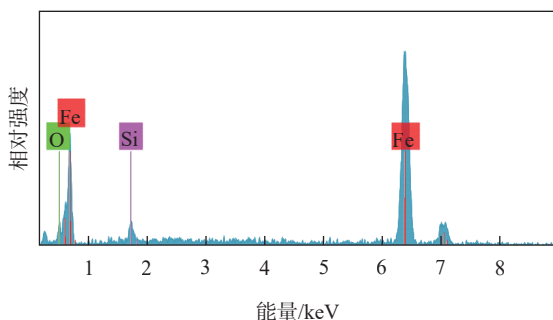


图3 缺陷电镜图谱分析结果

表1 缺陷电镜图谱元素分析结果 %

元素	质量分数	归一化质量分数	原子分数
Fe	71.92	80.81	52.14
O	26.29	17.18	45.28
Si	1.79	2.01	2.58

品表面质量的缺陷为氧化铁皮缺陷，且该缺陷较为特殊，为含 Si 氧化铁皮，属于硅橄榄石，由于氧化铁皮的酸洗效率主要取决于其成分与结构^[8]，这种含 Si 的硅橄榄石结构致密、难以溶解，因此在酸洗工序较难去除^[9-10]。

其他工序铁皮表现

退火产品表面的铁皮受前工序影响，退火前的工序主要有酸洗和热轧。唐钢在这些工序均配置了表面检测设备。酸洗工序配置的表面检测设备由西门子公司提供，位于酸洗出口，通过该设备可以观察到明显的铁皮残留缺陷，与退火产品表面的缺陷形貌相对应。缺陷形貌如图 4 所示。

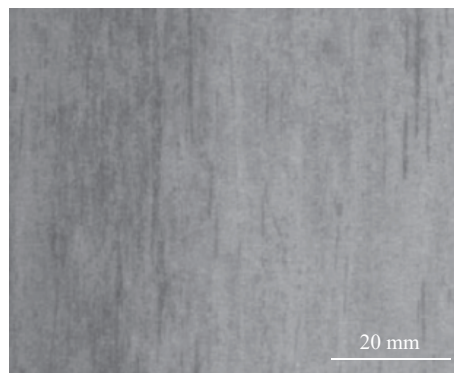


图4 酸洗工序铁皮缺陷图像

热轧工序配置的表面检测设备由伊斯拉公司提供，位于精轧出口。调阅该设备录像，未发现明显的铁皮缺陷。由此初步推断，铁皮缺陷在卷取后成卷冷却过程中生成。

为验证推断，挑选冷轧退火后有严重铁皮缺陷的同批次热轧钢卷，将其开卷平整，观察实物表面质量，发现热轧卷中间位置存在黑条状的铁皮，与冷轧退火产品表面的氧化铁皮缺陷位置相对应。由此可断定，铁皮缺陷是热轧卷取成卷后，在冷却过程中发生 Si 元素析出，从而形成硅橄榄石类型的氧化铁皮。实物照片如图 5 所示。



图5 铁皮热卷实物图像

铁皮产生现状及原因分析

铁皮缺陷现状

为对比工艺参数的相关性并制定有效措施，以解决退火产品因氧化铁皮导致的降级问题，利用连退产线的表面检测设备，依据退火产品的表面情况对钢卷铁皮缺陷状态进行分级。将铁皮缺陷按缺陷面积分为0、1、2、3四个等级，分级示意图如图6所示，其中方框区域为铁皮缺陷在钢卷上、下表面的分布状态：0级表示无铁皮缺陷，1级表示钢带单

面有少量铁皮缺陷，2级表示钢带单面有大量铁皮缺陷，3级表示钢带双面有大量铁皮缺陷。

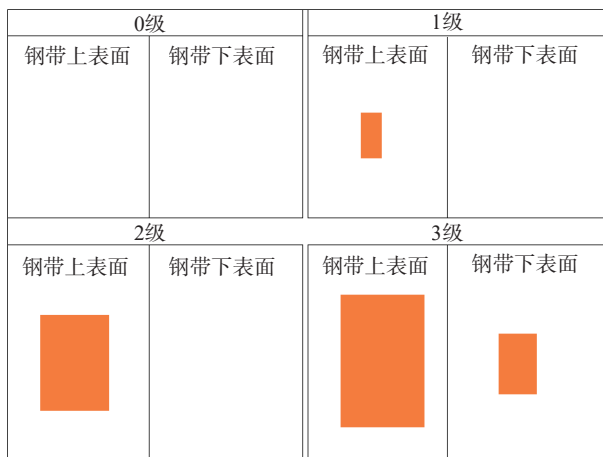


图6 缺陷分级示意图

基于以上分级基准，对退火产品的表面铁皮缺陷进行了评价。按照不同的生产日期抽查表面铁皮缺陷的分布情况，由于评价为2级和3级的产品有降级风险，将统计得到的2级和3级缺陷比例作为现状数据，为后续试验结果提供数据对比基准。具体调查结果见表2。

表2 铁皮缺陷现状调查

生产日期	缺陷严重程度/卷				合计	2级和3级缺陷比例/%
	0级	1级	2级	3级		
2024-06-22	—	—	—	3	3	100
2024-08-07	3	2	9	3	17	71
2024-09-04	9	19	8	2	38	26
2024-09-10	—	1	13	8	22	95
2024-11-08	16	27	37	17	97	56
总计	28	49	67	33	177	56

基于以上调查，将铁皮评价等级为2级和3级的钢卷比例（56%）作为现状数据。在后续进行工艺参数对比、试验验证时，若该比例高于56%视为负向影响，低于56%则视为正向影响。

铁皮产生原因分析

Si元素影响分析

缺陷微观分析结果表明，其主要成分为O、Fe元素，并伴有少量Si元素。由于QP980属于高Si含量的TRIP钢，在热轧及冷却过程中，Si元素与O、Fe结合产生酸洗过程中较难清洗的 Fe_2SiO_4

橄榄石相氧化铁皮^[1]，最终残留于退火产品表面，因此判断铁皮缺陷与Si元素的析出有关。

为验证上述判断，对缺陷位置进行单一Si元素扫描分析，结果如图7所示。图中左侧为缺陷放大10000倍后的显微图像，方框内颜色较深的区域为缺陷，下方为正常基体；右侧为对应的Si元素扫描结果，绿色位置为Si元素分布区域。两侧图像对比可发现，缺陷区域存在明显的Si元素富集。

热轧卷取温度影响分析

氧化铁皮产生的根源为热轧工序。热轧产线的

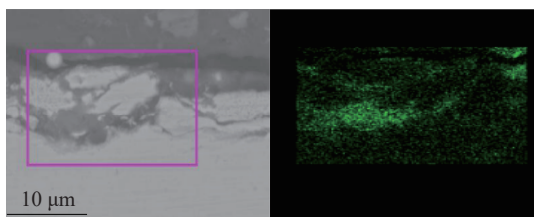


图7 缺陷 Si 元素扫描分析

表面检测设备位于精轧出口，设备未检测到氧化铁皮缺陷，但热轧卷开卷平展后实物可以观察到铁皮缺陷，因此判断铁皮缺陷产生于热轧产线精轧出口后的工序。精轧出口后主要为层流冷却和卷取工序，其中卷取温度是影响带钢冷却过程中氧化铁皮生成及相变的关键可控参数，因此初步判断退火产品表面的铁皮缺陷可能与热轧工序的卷取温度有关^[12]。

基于上述调查结果，采用控制变量法，从降低 Si 含量和降低热轧工序卷取温度 2 个方向开展试验。对比 Si 含量相同、卷取温度不同，以及卷取温度相同、Si 含量不同 2 种情况下表面铁皮缺陷的严重程度，并按照铁皮缺陷分级基准评价 2 级和 3 级铁皮缺陷比例，以验证调查推断。

实验验证

卷取温度变化实验

调整产品成分 Si 含量，控制产品 Si 质量分数为固定值 1.3%，热轧时采用不同的卷取温度，其余工艺不做调整。以热轧可实施的最低卷取温度 620℃ 为基准，每提高 10℃ 设为一个梯度，每个梯度下生产多个试验卷，统计铁皮评价为 2 级和 3 级的钢卷比例，结果如图 8 所示。

由图 8 可以看出，在相同 Si 含量下，当卷取温度低于 680℃ 时，2 级和 3 级铁皮缺陷比例为 0%，

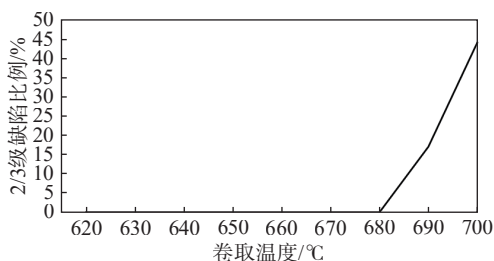


图8 Si 含量相同、卷取温度变化铁皮评价

远低于 56%；当卷取温度高于 680℃ 时，严重铁皮缺陷发生比例骤增。由此判断，热轧卷取温度高于某临界值（约 680℃），存在严重铁皮缺陷钢卷的比例会显著升高。

Si 含量变化实验

在保证产品抗拉强度、屈服强度等性能的前提下，将 Si 质量分数目标基准值设为 1.2%。以此为基础，选取不同 Si 含量的铸坯，在热轧工序中采用相同的卷取温度 680℃，其余工艺不做调整。Si 质量分数每增加 0.05% 设为一个梯度，每个梯度生产多个试验卷，统计铁皮评价为 2 级和 3 级的钢卷比例，结果如图 9 所示。

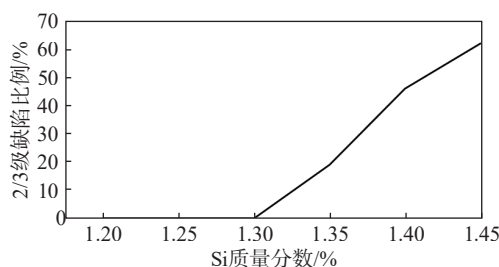


图9 卷取温度相同、Si 含量变化铁皮评价

由图 9 可以看出，在相同卷取温度下，当 Si 质量分数 > 1.3% 时，2 级和 3 级铁皮缺陷比例急剧升高。

由以上实验数据可以看出，卷取温度对铁皮缺陷具有关键影响。在保证产品抗拉强度、屈服强度等性能的条件下，Si 含量对铁皮缺陷也有显著影响。2 个影响因素均为负向影响，即超过临界值后卷取温度越高，铁皮缺陷越严重；Si 含量越高，铁皮缺陷越严重。

实验过程中的问题及实验效果

在实验过程中，降低卷取温度和 Si 含量分别遇到如下问题。

(1) 降低卷取温度：当热轧卷取温度过低时，产品在酸洗工序极易发生轧制断带事故。其原因是酸洗为冷成型加工工序，而此钢种强度高、塑性较差，当卷取温度过低时，更易发生轧制断带问题。

(2) 降低 Si 含量：Si 含量过低时，产品性能不稳定。尽管退火产品上检测的性能值勉强符合标

准要求,但用户在使用过程中,多次反馈 Si 含量较低的产品出现冲压开裂问题,说明其实际使用性能并不稳定。

虽然降低 Si 含量和降低卷取温度均对改善氧化铁皮缺陷有效,但将 Si 质量分数降低到 1.2% 后,无法保证产品的抗拉强度、屈服强度等力学性能的稳定性。因此,控制 Si 质量分数目标值为 1.3%,但此时严重铁皮缺陷的发生率仍较高。为控制缺陷,进一步通过降低卷取温度来调整。将卷取温度目标值控制在 680 °C 后,严重铁皮缺陷发生率显著降低。在 Si 含量和卷取温度综合调整后,最终将严重铁皮缺陷的发生比例降低至 0%,氧化铁皮造成的降判品比例降低至 0%。

结束语

冷轧退火 QP980 高强 TRIP 钢表面铁皮缺陷在热轧成卷后产生,产生原因为 Si 元素富集。

铁皮缺陷的关键控制点为调整热轧卷取温度和产品 Si 含量。卷取温度和 Si 含量越低,表面铁皮缺陷越少。且在本研究条件下,降低卷取温度对铁皮缺陷的改善效果较降低 Si 含量更为显著。

由于生产工艺和钢种特性的制约,不能无限地降低卷取温度和产品的 Si 含量,因此需结合生产实际和产线特点,对两者进行协同优化。通过控制 Si 质量分数目标值为 1.3%,卷取温度目标值为 680 °C,实现了表面质量和生产工艺、钢种性能特性的相对平衡,既能保证生产过程、产品性能的稳定,又能降低铁皮缺陷的发生与降级比例。

参考文献

- [1] 姚贵升. 塑性变形诱导相变钢 TRIP 钢的性能和应用. 汽车工艺与材料, 2006(9): 13
- [2] 李春诚, 刘宏亮, 杨波, 等. δ -TRIP 钢的研究进展——轻量化高强钢新星: δ -TRIP 钢如何助力汽车节能减排?. 金属世界, 2025(4): 15
- [3] 袁志鹏, 牛超, 束祺成. QP 和 DP 钢面内成形性能与边部成形性能对比研究. 精密成形工程, 2024, 16(6): 115
- [4] 沈刚, 张吴忌, 刘仁东, 等. TRIP780 及 DP780 钢成形性能的影响因素研究. 上海金属, 2022, 44(4): 61
- [5] 左远鸿, 栾崧琳, 由宇. 供冷轧低碳钢氧化铁皮形成因素分析及控制措施. 金属世界, 2024(5): 68
- [6] 池文海. 热轧带钢表面氧化铁皮的类型及影响因素. 冶金与材料, 2023, 43(11): 7
- [7] 张猛, 郭立合, 王超, 等. 热轧钢板氧化铁皮与基体结合强度技术解析与测量方法探秘. 金属世界, 2025(3): 96
- [8] 李海东, 李岩, 钟莉莉. 热轧带钢表面氧化铁皮及其酸洗行为分析. 轧钢, 2024, 41(6): 25
- [9] 刘杰慧, 刘小军, 连帅梅. SAPH440/400 热轧酸洗板红色氧化铁皮成因分析. 理化检验: 物理分册, 2014, 50(8): 613
- [10] 吴园园, 张珂, 洪慧敏, 等. 硅钢高温氧化铁皮的显微结构表征. 冶金分析, 2014, 34(10): 25
- [11] 李国强. Si 元素对碳钢表面氧化铁皮组织和耐腐蚀性能的影响研究[学位论文]. 沈阳: 沈阳大学, 2016
- [12] 刘晓凤, 孙彬, 王建明, 等. 热轧时钢铁材料高温氧化铁皮的研究进展. 热加工工艺, 2018, 47(1): 10

作者简介: 白玉朋(1994—), 男, 河北省唐山人, 河钢唐钢钢轧系统技术人员。2016年毕业于华北理工大学材料成型及控制工程专业, 主要研究方向: 全流程缺陷形貌演变及缺陷关键控制点。著有《双相钢铸坯微裂纹在冷轧的表现及控制》《柳叶状氧化铁皮的形貌演变及控制方法》等多篇论文。通信地址: 河北省唐山市路北区钢城春邑; E-mail: 731196522@qq.com。