

J5不锈钢热轧卷气孔脱皮缺陷的成因分析及预防措施

韦凤萍, 石航涛, 石登陆, 潘国能

广西北港新材料有限公司, 广西 北海

收稿日期: 2025年1月13日; 录用日期: 2025年3月4日; 发布日期: 2025年3月12日

摘要

本文介绍了热轧卷气孔脱皮缺陷形貌与产生原因, 针对产生原因结合公司生产实际情况对发生的气孔脱皮进行分析, 发现冶炼原材料潮湿及钢水浇铸温度偏低是影响气孔脱皮的主要因素, 因此, 通过对冶炼原材料进行烘烤及提高连铸浇铸温度等措施, 气孔脱皮缺陷得到明显的改善, J5热轧卷产生气孔脱皮缺陷由1.06%降至0.1%以下, 产品质量得到了显著的提升。

关键词

J5不锈钢, 气孔脱皮缺陷, 浇铸温度

Cause Analysis and Preventive Measures of Porosity Peeling Defect of J5 Stainless Steel Hot Rolling Coil

Fengping Wei, Hangtao Shi, Denglu Shi, Guoneng Pan

Guangxi Beigang New Materials Co., Ltd., Beihai Guangxi

Received: Jan. 13th, 2025; accepted: Mar. 4th, 2025; published: Mar. 12th, 2025

Abstract

This paper introduces the morphology and causes of porosity peeling defect in hot rolling coil. Based on the practical situation of company, the occurrence of porosity peeling is analyzed. It is found that low wet smelting raw materials and molten steel casting temperature are the main factors influencing the porosity peeling. Therefore, by taking measures such as baking of smelting raw material and increasing the continuous casting temperature, the porosity peeling defects have been

significantly improved. The stomatal peeling defect of J5 hot rolled coil was reduced from 1.06% to less than 0.1%, and the product quality was improved significantly.

Keywords

J5 Stainless Steel, Porosity Peeling Defect, Casting Temperature

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

J5 不锈钢因其优异的性能被广泛应用于化工、石油等多个领域。然而,生产过程中出现的气孔脱皮缺陷严重影响产品质量,亟需解决。近年来,国内外学者对不锈钢热轧卷的气孔及脱皮缺陷进行了大量研究。例如,Zhang 等人通过金相显微镜和扫描电镜观察发现,不锈钢热轧卷的脱皮缺陷与钢坯中的皮下气孔密切相关。Li 等人研究了浇铸温度对不锈钢气孔缺陷的影响,发现提高浇铸温度可以有效减少气孔的产生。Wang 等人则指出,冶炼原材料的湿度也是影响气孔形成的重要因素。然而,针对 J5 不锈钢热轧卷的气孔脱皮缺陷,尤其是原材料湿度和浇铸温度的综合影响,目前研究还不够深入。本文通过对 J5 不锈钢热轧卷生产过程中出现的气孔脱皮缺陷进行分析,研究了冶炼原材料湿度和浇铸温度对缺陷的影响,并提出了相应的预防措施。

2. 工艺流程和主要技术条件

J5 不锈钢热轧卷生产工艺流程:红土镍矿→烧结→高炉铁水→AOD 炉冶炼→钢水→LF 炉→连铸→板坯→热轧加热炉→粗轧→精轧→卷取→固溶退火→酸洗→钢带。炼钢产出的 J5 不锈钢连铸板坯首先在热轧步进式加热炉进行加热,加热炉出钢后进行高压水除鳞去除表面氧化皮,然后进入 E1R1 经 5 道次粗轧和精轧(8 机架连轧),轧至目标规格的 J5 不锈钢黑皮卷;热轧黑皮卷拉至固溶产线采用连续退火炉进行退火,随后采用连续酸洗,白皮卷收卷入库[1]。J5 不锈钢化学成分见表 1:

Table 1. Main components of J5 stainless steel (Wt%)

表 1. J5 不锈钢的主要成分(Wt%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	N
0.11~0.16	0.27~0.70	9.0-9.5	≤0.050	≤0.010	13.0~13.6	1.0~1.80	0.2~0.5	0.13~0.17

3. 缺陷描述及分析

J5 不锈钢短粗状脱皮线宏观照片如图 1 所示,脱皮长度在 20~50 mm 左右,宽度在 2~10 mm,深度在 0.1 mm 以内,缺陷分布基本为全宽无规则出现,形貌呈短线型两头尖不规则地沿轧制方向分布,有时似点状或线状逐渐消失,轧制方向上长,在宽度上全宽偶发。

从缺陷的宏观形貌上看,应是在经过粗轧时来回碾压延伸,最终形成双箭头的形状。通过对现场的钢坯检查发现,在钢坯表面上存在明显的圆形气孔,如图 2 所示,经轧制酸洗后亦形成相同的缺陷,因此,断定短粗状脱皮线是由于钢坯表面气孔造成的[2]。

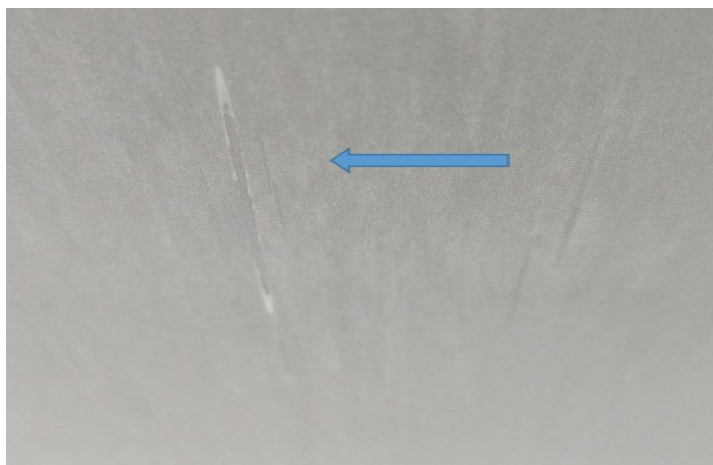


Figure 1. Defects of porosity peeling in J5 stainless steel hot-rolled coil
图 1. J5 不锈钢热轧卷气孔脱皮缺陷



Figure 2. Defect of porosity in J5 stainless steel billet
图 2. J5 不锈钢钢坯气孔缺陷

4. 研究方法

为探究冶炼原材料湿度、钢水浇铸温度及钢水脱氧情况对 J5 不锈钢热轧卷气孔脱皮缺陷的影响,本研究采用控制变量法,分别对这三个因素进行了实验研究。针对冶炼原材料湿度,研究选取了生产过程中常用的高铬合金作为研究对象,通过控制其烘烤程度来模拟不同的湿度条件。

研究将高铬合金分为三组:未烘烤组、标准烘烤组(按照现行工艺在 AOD 炉台附近烘烤)和强化烘烤组(使用热钢坯进行更长时间的烘烤)。采用烘干称重法测定各组样品的含水量。在其他工艺条件保持一致的前提下,分别使用这三组不同湿度的高铬合金进行冶炼,并统计相应生产批次钢卷的气孔脱皮降级率,并对钢坯表面的气孔形貌进行观察和记录。针对钢水浇铸温度的影响,通过调整 AOD 炉出钢温度和 LF 炉加热功率,控制连铸浇铸温度在 1456℃~1495℃ 范围内变化,并以 5℃ 为一个区间进行分组。使用快速测温仪记录每包钢水的实际浇铸温度,并统计不同温度区间内生产的钢卷的气孔脱皮降级率,对钢坯表面的气孔形貌进行观察和记录。在研究钢水脱氧情况的影响时,控制脱氧剂的加入量和时机。同时,利用定氧仪测定钢水中的氧含量。

为了确保结果的可靠性,研究收集了多组数据,并计算了氧含量的平均值和标准差,对数据进行了显著性检验(采用 t 检验),以评估钢水脱氧程度与气孔脱皮缺陷之间的关系。通过对比不同条件下生产的钢卷的气孔脱皮降级率,分析各因素对缺陷的影响程度。

5. 皮下气泡的成因分析

5.1. 冶炼原材料湿度的影响

为了研究冶炼原材料湿度对 J5 不锈钢热轧卷气孔脱皮缺陷的影响,研究对 AOD 冶炼所用的高铬合金进行了不同程度的烘烤处理,并分别统计了相应批次钢卷的气孔脱皮降级率。实验结果如表 2 所示。从表中可以看出,随着高铬合金湿度的增加,气孔脱皮降级率呈明显的上升趋势。未烘烤组的高铬合金,其含水量最高,相应的气孔脱皮降级率也最高,达到了 2.11%。而经过标准烘烤和强化烘烤处理后,高铬合金的含水量显著降低,气孔脱皮降级率也分别下降至 1.06%和 0.42%。

Table 2. Moisture content and porosity degradation rate of high chromium alloys under different baking conditions
表 2. 不同烘烤条件下高铬合金含水量及气孔脱皮降级率

烘烤条件	含水量	气孔脱皮降级率(%)
未烘烤	高	2.11
标准烘烤	中	1.06
强化烘烤	低	0.42

进一步地,研究对不同湿度条件下生产的钢坯表面气孔进行了观察。未烘烤高铬合金冶炼的钢坯表面存在大量的圆形气孔,且气孔尺寸较大。而使用烘烤后高铬合金冶炼的钢坯,其表面气孔数量明显减少,尺寸也更小。这些结果表明,冶炼原材料的湿度是影响气孔脱皮缺陷的关键因素之一。潮湿的原材料在冶炼过程中会带入大量的水分,水分在高温下分解产生氢气和氧气,增加了钢液中气体的含量。在钢水凝固过程中,过饱和的气体来不及析出,从而在钢坯表面形成皮下气泡,最终导致热轧卷的气孔脱皮缺陷。

5.2. 钢水浇铸温度的影响

研究统计了不同浇铸温度下 J5 不锈钢热轧卷的气孔脱皮降级率,结果发现浇铸温度对气孔脱皮缺陷的影响较为显著。当浇铸温度较低时(1456℃~1460℃),气孔脱皮降级率高达 2.31%。随着浇铸温度的升高,降级率整体呈现下降趋势。当浇铸温度高于 1475℃时,降级率基本降至 0.61%以下。值得注意的是,在 1466℃~1470℃区间,降级率出现了小幅度的回升,这可能是由于该区间内其他因素(例如,原材料的波动或操作的不稳定)的影响所致,需要在后续的生产过程中进一步观察和控制。

浇铸温度较低时,钢水的流动性较差,不利于钢液中气体和夹杂物的上浮排出[3]。同时,较低的浇铸温度会导致钢坯表面快速凝固,形成致密的凝固层,阻碍了内部气体的析出,从而形成皮下气泡。提高浇铸温度可以提高钢水的过热度,改善钢水的流动性,延长钢水在结晶器内的停留时间,有利于气体和夹杂物的上浮。此外,较高的浇铸温度可以减缓钢坯表面的凝固速度,使气体有更长的时间逸出,从而减少皮下气泡的形成。

5.3. 钢水脱氧情况的影响

为了分析钢水脱氧情况对气孔脱皮缺陷的影响,研究对生产过程中的钢水进行了取样分析,并统计了不同氧含量条件下的气孔脱皮降级率。实验结果显示,存在气孔脱皮缺陷的钢水氧含量平均值为 25.6

ppm，标准差为 3.2 ppm；而无气孔脱皮缺陷的钢水氧含量平均值为 26.1 ppm，标准差为 2.8 ppm。经过 t 检验，两组数据的 P 值为 0.78，大于 0.05，表明两组数据之间没有显著性差异。从数据分析结果来看，在本研究的条件下，钢水的氧含量与气孔脱皮缺陷之间没有明显的关联性。这可能是由于研究所采用的脱氧工艺能够将钢水的氧含量控制在一个相对较低的水平，从而消除了氧含量对气孔脱皮缺陷的影响[4]。

6. 改进预防措施

根据以上分析结果可知，J5 气孔脱皮的主要影响因素为冶炼原材料潮湿及钢水过热度偏低，针对影响因素制定了以下措施：

(1) 提高 J5 不锈钢浇铸温度，控制温度提升至 1475℃ 以上。

(2) 原料入炉前进行烘烤干燥，主要原材料备到 AOD 炉台附近位置进行烘烤如图 3，一部分原材料使用热钢坯进行烘烤图 4，优先使用干燥原材料，防止受潮原料直接进入 AOD 炉冶炼。



Figure 3. The material is baked on the AOD stove table
图 3. 原料在 AOD 炉台烘烤



Figure 4. Raw materials are baked using hot steel billets
图 4. 原料使用热钢坯进行烘烤

(3) LF 炉确保每包钢水连铸前的软吹、镇静时间，软吹时间、镇静时间不得小于 10 分钟，以保证气

泡有足够的上浮时间。

工艺优化后,炼钢连铸浇铸温度对比改进前有较明显的提升,从图 5、图 6 可以看出,改进后浇铸温度中位数从改进前的 1470℃ 提升到了 1478℃,LF 炉镇静时间中位数 12 min,软吹时间 11.5 min,基本都在 10 min 以上。

(4) 由于热轧时氧化铁树皮印刷缺陷是由冷轧板材表面遗传而来的,所以在热轧时发现氧化铁树皮印刷缺陷后,应适当延长酸洗时间,去除氧化铁树皮,以便在冷轧过程中,由于金属的三维流动,特别是金属的厚度流动方向,基板上印刷后形成的氧化铁树皮凝块可以起到修复作用,使缺陷得到修复、焊接,最终消除。热轧铁氧化物皮被压入钢板后,酸洗量较小,因为残余铁氧化物皮在室温下没有可塑性,不会与基板一起塑性变形。这可能会导致氧化铁皮肤深层包裹的缺陷,影响钢板表面的质量。

(5) 优化铸造工艺,使熔融钢在结晶器中形成良好的流场和流动状态,提高铸件质量。此外,我们还致力于减少结晶器中液位波动,特别是在换水期间,控制换水时间和液位波动范围以稳定流场,从而减少脱落缺陷的发生。最后,通过优化对中间包装生产过程的控制,我们确保大包装的更换时间在给定的范围内,中间包装中的液位保持在足够的深度,以防止渣荡。这些措施的综合应用使我们能够更有效地控制热轧卷的脱落缺陷。

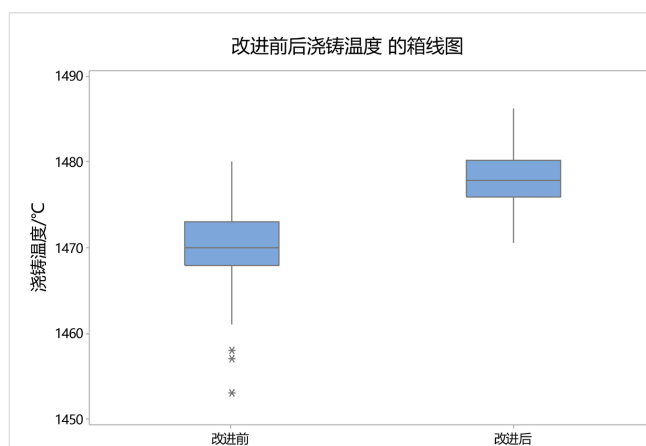


Figure 5. Improved continuous casting temperature box diagram

图 5. 改进后连铸浇铸温度箱线图

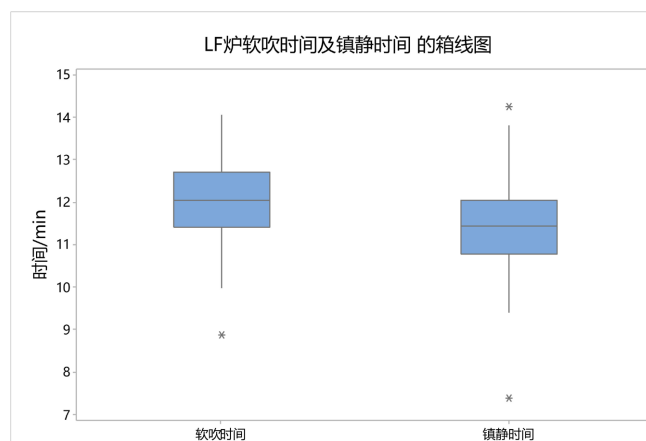


Figure 6. Improved LF soft blowing time and sedation time box plot

图 6. 改进后 LF 软吹时间与镇静时间箱线图

通过以上措施的实施, J5 不锈钢气孔脱皮有了较明显的改善, 气孔脱皮降级率从 1.06% 降至 0.1% 以下, 缺陷改善效果显著。

7. 结论

(1) 短粗状脱皮线缺陷是由于钢坯存在皮下气泡, 加热炉完全氧化烧失, 经过粗糙来回碾压延展后形成的双箭头形状的气孔脱皮。

(2) 通过对合金原料烘烤、提高浇铸温度及保证 LF 炉的镇静、软吹时间等措施实施, 有效改善了钢坯皮下气孔问题, J5 不锈钢气孔脱皮缺陷比例降至 0.1% 以下, 产品质量得到了显著的提升。

(3) 翘皮缺陷具有明显的特征, 与抬起的物体有关, 这使得它相对容易识别。然而, 对其原因的分析相对复杂。现场视察员必须具备全面分析不同类型翘皮形态特征、位置分布特征和颜色, 以便作出正确的判断。同时, 现场检验人员必须及时准确地确定缺陷原因, 这对有效控制实际生产具有重要意义。

参考文献

- [1] 李志栋, 韦成贵, 杜俊涛. 06Cr18Ni5Mn7Cu3N 奥氏体不锈钢带脱皮缺陷的成因分析及预防工艺措施[J]. 特殊钢, 2014, 35(2): 27-29.
- [2] 耿明山, 王新华, 张炯明, 王万军, 刘志明. 连铸坯表面气孔缺陷研究[J]. 钢铁, 2010, 45(1): 46-50.
- [3] 黄晋, 张友寿, 夏露, 李四年. 铸钢件气孔形成机理分析及预防措施[J]. 铸造技术, 2006, 7(27): 665-667.
- [4] 王雁, 秦书洋, 张庆军, 朱立光, 马军红. 冷轧板翘皮表面缺陷研究[J]. 铸造技术, 2017, 37(7): 1643-1645.