

高锰奥氏体钢板表面脱皮与裂纹成因分析

郑山发¹, 段才锋², 尚广浩², 张力萍²

¹河南鑫金汇不锈钢产业有限责任公司, 河南 许昌

²长葛市金汇再生金属研发有限公司, 河南 许昌

收稿日期: 2023年10月18日; 录用日期: 2023年12月12日; 发布日期: 2023年12月26日

摘要

高锰奥氏体不锈钢热轧板和冷轧板常见的表面脱皮缺陷对后续产品合格率有着极大的影响。采用金相显微镜、扫描电镜等手段, 观察并分析该脱皮缺陷处的宏观形貌、微观组织及元素成分, 探究脱皮缺陷的形成原因。结果表明, 热轧板脱皮缺陷表面及纵截面存在明显的嵌入型Cr、Mn金属氧化物与保护渣特征元素, 属板坯表面横裂纹原因导致的缺陷。冷轧板裂纹缺陷来源于形成钢带截面Mn元素分布不均的隐性缺陷, 其与连铸环节中包温度偏高造成的板坯中心偏析严重有关。通过降低连铸中间包浇铸温度和优化二冷配水制度, 可有效降低这类高锰钢轧材表面的脱皮和裂纹缺陷比例。

关键词

高锰奥氏体不锈钢, 热轧板, 冷轧板, 脱皮, 裂纹

Analysis on the Causes of Surface Peeling and Cracking of High Manganese Austenitic Steel Plate

Shanfa Zheng¹, Caifeng Duan², Guanghao Shang², Liping Zhang²

¹Henan Xinjinhui Stainless Steel Industry Co., Ltd., Xuchang Henan

²Change Jinhui Recycled Metal R&D Co., Ltd., Xuchang Henan

Received: Oct. 18th, 2023; accepted: Dec. 12th, 2023; published: Dec. 26th, 2023

Abstract

The common surface peeling defects of hot-rolled and cold-rolled high manganese austenitic stainless steel sheets have a significant impact on the subsequent product qualification rate. By using metallographic microscopy, scanning electron microscopy, and other means, the macros-

copic morphology, microscopic structure and element composition of the peeling defect are observed and analyzed, and the causes of the peeling defect are explored. The results indicate that there are obvious embedded Cr and Mn metal oxides and characteristic elements of protective slag on the surface and longitudinal section of the peeling defect of the hot-rolled plate, which belongs to the defect caused by transverse cracks on the surface of the slab. The crack defect in the cold-rolled sheet originates from the hidden defect of uneven distribution of Mn elements in the cross-section of the steel strip, which is related to the severe central segregation of the slab caused by the high temperature of the ladle in the continuous casting process. By reducing the casting temperature of the continuous casting tundish and optimizing the secondary cooling water distribution system, the proportion of peeling and crack defects on the surface of such high manganese steel rolling materials can be effectively reduced.

Keywords

High Manganese Austenitic Stainless Steel, Hot-Rolled Plate, Cold-Rolled Plate, Peeling, Cracking

Copyright © 2023 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

高锰奥氏体不锈钢是节镍型不锈钢家族中的一员, 为了满足冷轧客户冲压时无磁性[1], 进一步提高锰、氮、碳含量, 与常规的节镍型奥氏体不锈钢相比有一定的差异, 导致连铸过程中偏析程度增加和凝固模式改变[2] [3]。这两种变化也是影响产品组织性能、质量和连铸工艺的关键因素。

目前某公司生产的高锰奥氏体不锈钢(JM 系列)在热轧过程中钢带表面频繁出现脱皮现象, 后续冷轧环节也偶尔发生表面裂纹现象, 影响产品质量和正常生产, 严重时被判废或降级使用, 给公司造成较大经济损失。王巍等[4]在研究节镍型奥氏体不锈钢轧板表面脱皮缺陷特征与成因时, 发现生产过程中引入的夹杂物是脱皮形成的原因。吴海林等[5]在研究节镍型不锈钢冷轧表面裂纹时, 发现裂纹处晶界存在大量析出相, 据此推出析出相是导致钢材冷轧形成表面裂纹的主要原因。本文主要针对高锰节镍奥氏体不锈钢频繁出现的热轧板脱皮缺陷和冷轧板表面裂纹情况, 进行较为全面地调查分析研究, 从而找出导致钢带脱皮和裂纹的可能原因, 并结合实际工艺流程提出改进措施。

2. 试验材料与方法

2.1. 试验材料

试验材料来自酸洗后出现脱皮缺陷的高锰奥氏体不锈钢热轧板与冷轧板, 厚度分别为 20 mm 和 0.4 mm, 高锰奥氏体不锈钢钢带化学成分见表 1, 其生产流程为 EAF→AOD 炉→LF→CCM→热轧→固溶酸洗→冷轧。

Table 1. Main chemical composition of high manganese austenitic stainless steel

表 1. 高锰奥氏体不锈钢主要化学成分

C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu/Mo	N
0.15~0.20	16.0~17.00	0.30~0.60	≤0.01	≤0.05	11.0~12.0	≥0.80	0.25~0.30	0.18~0.20

2.2. 检测方法

本报告采用的检测方法见表 2。

Table 2. Analysis content and detection methods

表 2. 分析及检测方法

分析内容	检测方法	检测仪器
宏观形貌观察	肉眼	
金相	GB/T 13298-2015, GB/T 6394-2017	德国蔡司 AXIO
微观形貌观察	JB/T 6842-1993 《扫描电子显微镜试验方法》	德国蔡司 EVO-MA15

3. 试验过程及结果

3.1. 热轧酸洗板表面脱皮样品分析

不锈钢热轧板脱皮缺陷的宏观形貌如图 1 所示, 可见脱皮缺陷在热轧板上呈山峰状或舌状, 不规则地沿轧向分布, 长度多在 20~40 mm 左右, 根部宽约 10 mm, 肉眼可见脱皮与基体分离的缝隙。取样过程如图 2 所示。



Figure 1. Surface peeling sample of hot-rolled pickling plate

图 1. 热轧酸洗板表面脱皮样品

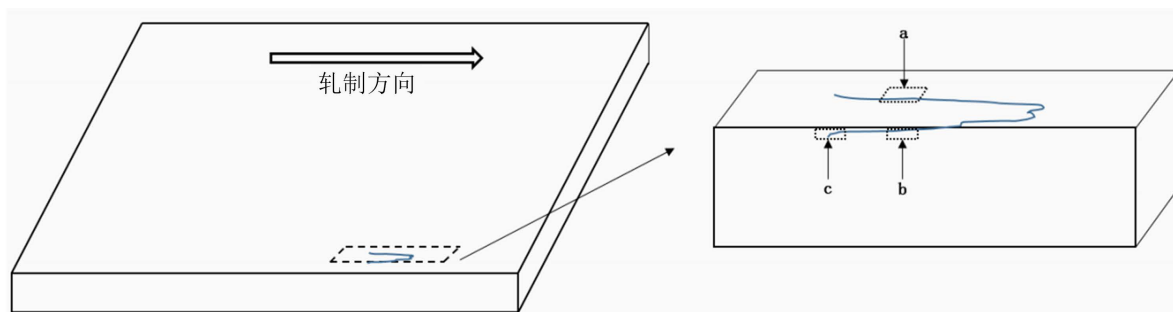


Figure 2. Sampling diagram for surface peeling defects of stainless steel hot-rolled plates

图 2. 不锈钢热轧板表面脱皮缺陷取样示意图

为了探究脱皮缺陷的产生原因,对上述缺陷表面与纵截面进行电镜分析,其显微形貌如图 3 所示,能谱检测结果如表 3。脱皮缺陷表面形貌图 3(a)显示:脱皮与基体分离面凹凸不平,凹凸部位的化学成分存在偏差,凹坑处成分与钢种成分相近,而凸起的亮色颗粒处 Fe 元素含量低于正常基体,同时含有较多的 Cr、Mn 元素,且 O 元素含量偏高,推测其为二次氧化后的产物。而在图 3(b)截面能谱分析结果可知,起皮缺陷处夹杂物是由 Mn、Fe、Cr、O 三种主要元素且伴有少量的 Si、Ca、Na、Mg 等组成的硅酸盐和结晶器保护渣的复合夹杂。实际生产中此类夹杂物大多数是由振痕中残留的保护渣与氧化皮之间发生多元反应而形成的。通过夹杂物成分结合实际生产工序,确定该脱皮是连铸板坯的表面横裂纹造成的。

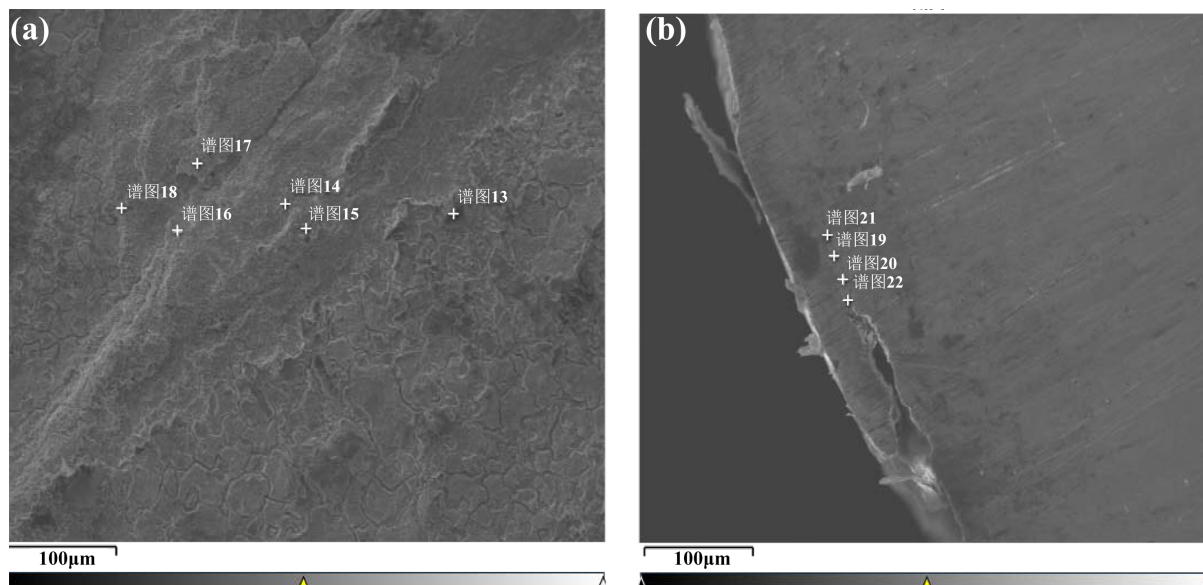


Figure 3. Surface and cross-sectional morphology of peeling defects on hot-rolled stainless steel plates

图 3. 不锈钢热轧板表面脱皮缺陷表面及截面形貌

Table 3. Energy spectrum detection results

表 3. 能谱检测结果

位置	O	Si	Ca	Na	Cr	Mn	Fe
谱图 13	0.75	0.32	—	—	10.82	17.65	70.46
谱图 16	18.32	3.12	2.87	—	15.45	22.99	37.25
谱图 17	30.94	4.03	3.64	—	7.56	24.68	29.15
谱图 20	19.9	7.4	10.3	2.2	14.5	20.34	25.36
谱图 21	17.4	6.1	4.5	1.8	17.5	14.3	38.4

为进一步探寻脱皮形成原因,特意找到此卷钢带对应的连铸板坯低倍样品,对低倍样品内外弧包含的多处振痕进行金相分析,如下图 4 所示,发现部分振痕处确实存在横裂纹,裂纹深度 200 微米,此种横裂纹与振痕共生,在振痕波谷处形成,一般位于宽面,是铸坯在运行过程中受到弯曲(内弧受压,外弧受张力)和矫直(内弧受张力,外弧受压力)作用,此时铸坯刚好处于低温脆性区(小于 900℃),又加上相当于应力集中“缺口效应”的振痕,受到拉伸应力作用的应变量如果超过 0.9%,在振痕波谷处就产生横裂纹。板坯已存在的横裂纹经过加热炉和多道轧制发展为热轧卷表面缺陷,特别是板坯棱部的裂纹从边缘向内延伸并有多个分支的小裂纹状脱皮。振痕处检测的横裂纹进一步表明图 1 形貌的脱皮缺陷为连铸板坯表面横裂纹在热轧过程延伸所致。

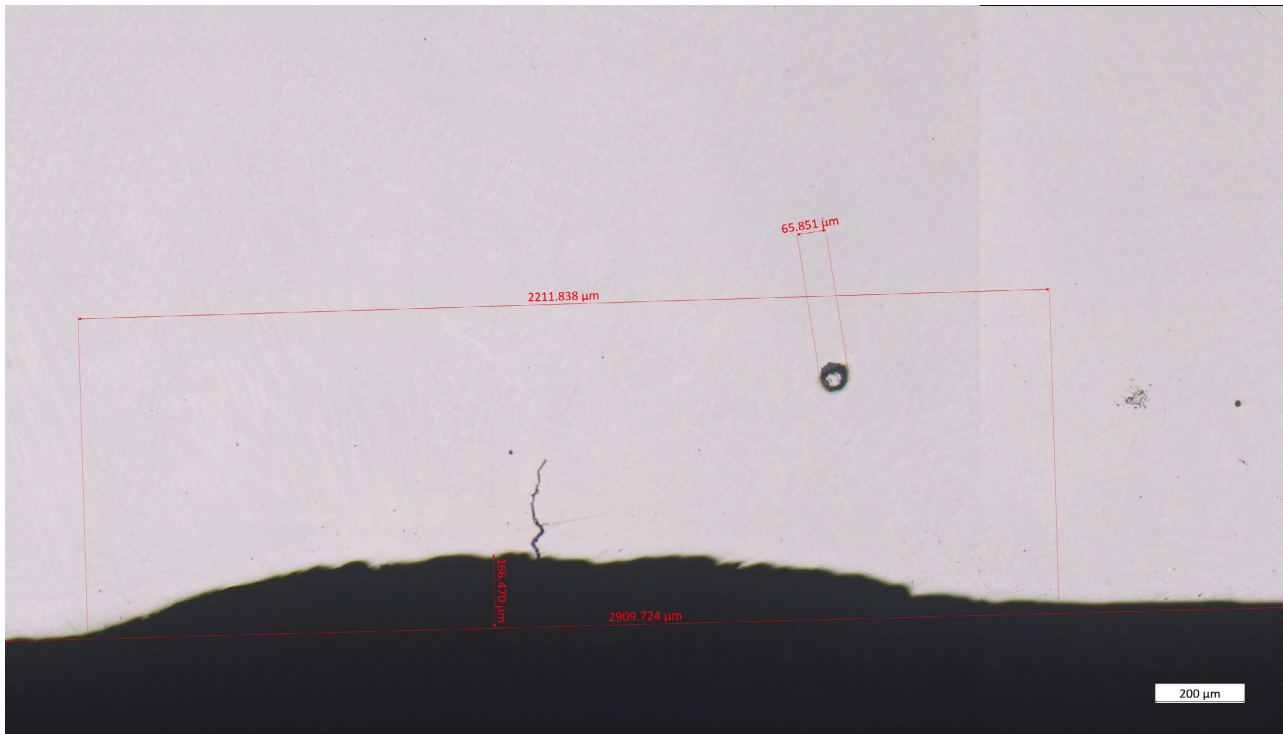


Figure 4. Morphology of transverse cracks at the vibration marks on the surface of the slab
图 4. 板坯表面振痕处横裂纹形貌

3.2. 冷轧板表面裂纹样品分析

针对下图 5 中高锰奥氏体钢冷轧板表面出现的裂纹缺陷，采用光学显微镜观察其微观形貌，结果如图 6 所示。图 6(a)显示表面裂纹大多垂直于表面，没有延伸过程，属瞬间开裂。图 6(b)显示表面裂纹处晶粒组织存在大量析出物。如图 7 所示，对析出物做进一步能谱分析，结果显示析出物中 C、Mn 两元素含量偏高，见表 4；另外查资料，C、Mn 含量偏高的析出物在室温下为硬脆相，相对与基体组织此处较难变形，容易因应力集中而导致裂纹。结合裂纹形貌，表明冷轧板表面裂纹是在冷轧和退火过程中的卷取与开卷操作时，因弯曲和伸展的轻微变形导致的。



Figure 5. Surface crack morphology of cold rolled sheet
图 5. 冷轧板表面裂纹缺陷形貌

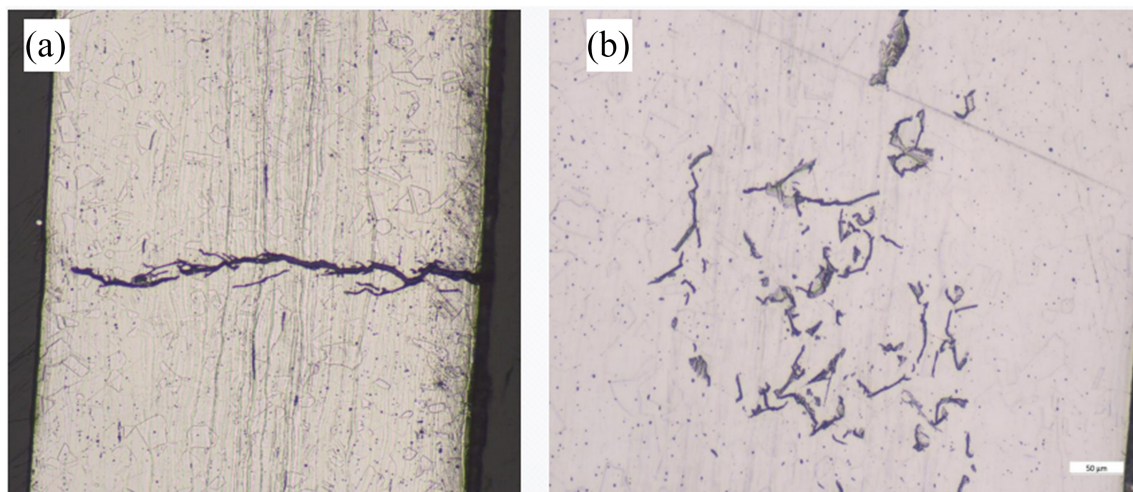


Figure 6. Metallographic morphology of crack defects in cold rolled sheet; (a) Longitudinal section morphology; (b) Cross section morphology

图 6. 冷轧板裂纹缺陷金相组织形貌; (a) 纵截面形貌; (b) 横截面形貌

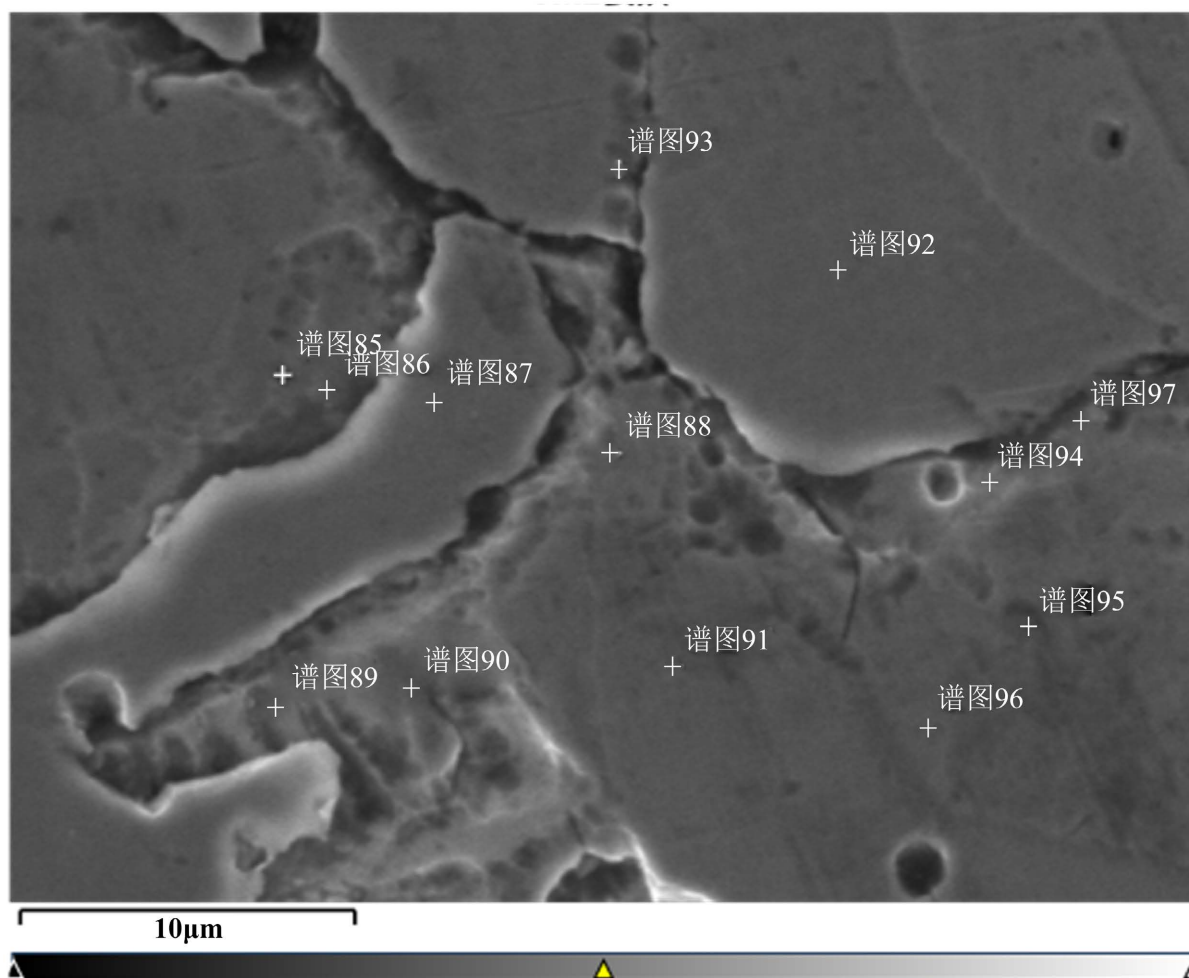


Figure 7. Electron microscopic morphology of the cross section of cracks in cold rolled sheet

图 7. 冷轧板裂纹横截面的电镜形貌

Table 4. Element composition near cracks
表 4. 裂纹附近元素成分

位置	C	Mn
谱图 85	7.7	17.5
谱图 88	4.3	19.2
谱图 90	8.4	17.9
谱图 94	5.6	20.4
谱图 97	2.7	19.6

4. 分析与讨论

由以上分析结果可知，热轧板脱皮缺陷为连铸板坯表面横裂纹在热轧过程延伸形成，根源在于板坯表面横裂纹。冷轧板表面裂纹由钢带芯部的硬脆相析出有关，根据有关文献报道，硬脆相析出是 Mn、C 偏析导致，根源在于连铸中间包温度偏高。

低碳(0.09~0.20% C)高锰(8~17% Mn)钢处于亚包晶区，同时具有高锰含量的特点，连铸过程极易产生裂纹，裂纹产生的原因主要有 2 点：一是高锰钢的导热系数小，为碳素钢的 1/4~1/6，所以铸件在加热及冷却过程中各部位的温差较大，造成相当大的热应力，这是产生热裂的一个重要原因。二是铸坯在凝固过程中温度逐渐降低，热塑性出现变化，Yamanaka 等将断面收缩率 R.A < 60% 的区域定义为脆性区，如下图 8。高锰节镍型奥氏体不锈钢除了具有导热系数小，强冷下易造成表面局部过冷，矫直时进入脆性区外，据相关文献[6] [7]介绍，其高氮含量也易在晶界形成氮化物析出，降低组织间结合力，在铸坯运行过程中，受到外力作用时，又刚好处于低温脆性区的铸坯表面处于受拉伸应力作用状态，如果坯壳所受 $\epsilon_c \geq 1.3\%$ ，在振痕波谷处就会产生横裂纹。

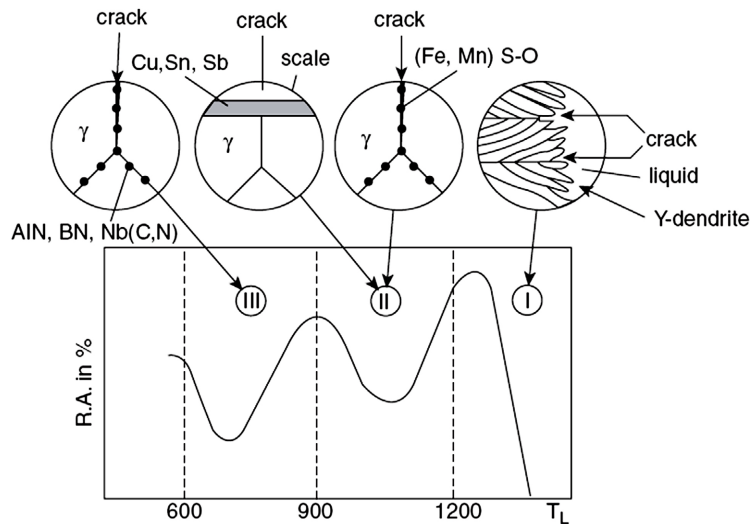


Figure 8. Brittle zone of steel at different temperatures
图 8. 钢在不同温度下的脆性区域

C 和 Mn 元素在凝固时平衡分配系数低，在凝固过程中不断在液相富集，最后残留在树枝晶间，后续板坯在热轧加热炉和热轧卷在退火炉中长时间加热，均不能使元素扩散均匀，在退火后的极冷过程形成硬脆相。如图 9 在高锰钢热轧退火钢带中存在大量条带状组织，此处 C、Mn 含量偏高。

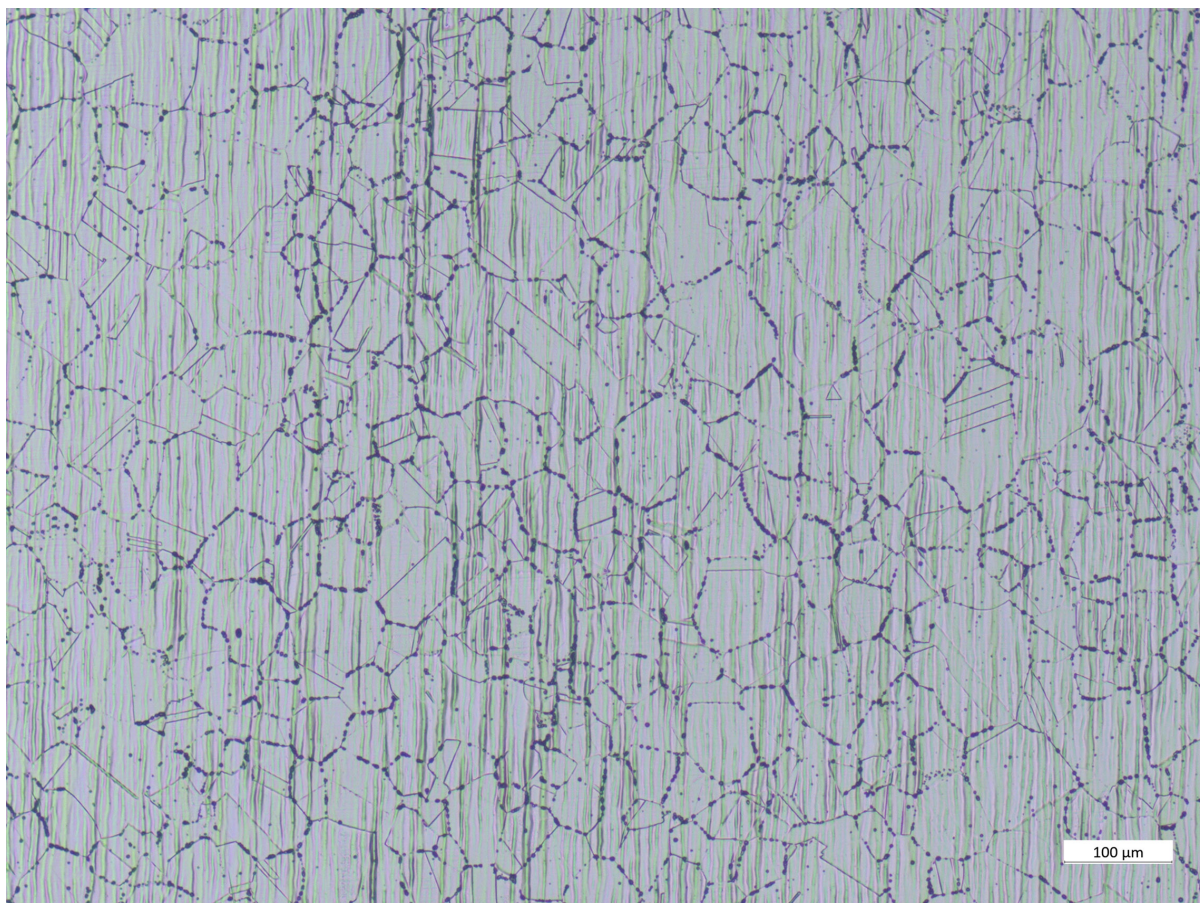


Figure 9. Annealing structure of high manganese steel hot rolled strip
图 9. 高锰钢热轧带退火组织

基于以上认识，为解决振痕处横裂纹问题，“低温脆性区”是连铸必须注意的一个建点，矫直区之前要高于这个温度区间，采用降低扇形段 5~7 段的水量，如下表 5，降低冷却强度，提高铸坯的表面温度，避开脆性区间。

Table 5. 160 thick billet secondary cooling water distribution (ultra weak cooling)
表 5. 160 厚坯二冷配水(超弱的冷却)

拉速 (m/min)	水量(m ³ /h)														总水量 (m ³ /h)	比水量 (l/kg)
	1N	11O	21O	31O	4I	4O	5I	5O	6I	6O	7I	7O	81O			
0.90	1.4	3.9	8.98	7.5	1.8	2.0	1.2	1.3	0.9	1.3	0.8	1.4	0.0	32.86	0.60	
1.00	1.6	4.5	10.0	8.5	2.1	2.3	1.4	1.6	1.1	1.6	1.2	2.0	0.0	38.36	0.63	
1.10	1.8	5.1	11.1	9.4	2.5	2.7	1.6	1.8	1.3	1.8	1.5	2.7	0.0	43.88	0.65	
1.20	2.0	5.7	12.4	10.2	2.8	3.1	1.90	2.08	1.5	2.1	1.8	3.2	0.00	49.23	0.67	
1.30	2.3	6.3	13.4	11.	3.1	3.5	2.1	2.4	1.7	2.4	2.1	3.6	0.0	54.58	0.69	

为减缓敏感元素 Mn 的偏析，结合连铸环节中包容量和过程钢水温降，决定在现有工艺基础上降低钢水浇注时的过热度，根据高锰钢液相线温度 1410℃，建议连浇炉次采取过热度 20℃~25℃，即中包温度 1430℃~1435℃；

5. 总结

通过对高锰不锈钢热轧板脱皮缺陷和冷轧板裂纹试样的组织形貌与成分分析,揭示了节镍型高锰奥氏体不锈钢产品脱皮与裂纹缺陷的成因,结论如下:热轧板脱皮缺陷为连铸板坯表面横裂纹在热轧过程延伸形成的,根源在于板坯矫直过程中因表面温度偏低而在振痕波谷处产生横裂纹所致。冷轧板表面裂纹由钢带芯部的硬脆相析出有关,根源在于连铸中间包温度偏高,导致敏感元素 Mn 的偏析较重,退火过程中形成硬脆相。

根据对缺陷样品的机理分析,在连铸环节采取降低扇形段 5~7 段的水量和中间包浇铸温度,板坯表面裂纹消失, Mn 元素偏析程度减轻,后续高锰钢热轧带脱皮率由 2.1% 降到 0.3%,冷轧表面裂纹缺陷也不再出现。

参考文献

- [1] 赵峻,朱俊峰,隋凤利,等.一种高锰奥氏体无磁钢变形抗力模型的建立与验证[J].安徽工业大学学报,2015,32(1):7-11.
- [2] 房菲,等.合金元素及凝固模式对含氮不锈钢氮含量的影响[J].北京科技大学学报,2014,36(8):1052-1059.
- [3] 刘国平.节镍奥氏体不锈钢凝固模式及氮的影响[J].炼钢,2009,25(3):60-63.
- [4] 王巍,等.节镍型奥氏体不锈钢轧板表面脱皮缺陷特征与成因[J].中国冶金,2022,32(6):139-146,154.
- [5] 吴海林,等. $M_{23}C_6$ 析出相对节镍型奥氏体不锈钢冷轧表面裂纹的影响[J].中国冶金,2020,30(4):51-56.
- [6] 蔡开科.连铸坯表面裂纹的控制[J].鞍钢技术,2004(3):1-8.
- [7] 尚广浩,王文杰,张力萍,等.节镍型奥氏体不锈钢冷轧带折弯开裂原因分析及控制措施[J].材料科学,2022,12(7):701-708.