

Q355C拉伸分层原因分析与控制

陈昊¹, 杨治争¹, 洪霞², 易勋³, 严敏³

¹宝武中央研究院(青山), 湖北 武汉

²武钢有限公司制造管理部, 湖北 武汉

³宝武集团鄂城钢铁公司, 湖北 鄂州

收稿日期: 2021年11月1日; 录用日期: 2021年11月30日; 发布日期: 2021年12月7日

摘要

通过取Q355C拉伸分层试样进行分析, 发现层间的片层状MnS及其复合夹杂物是造成拉伸分层及延伸不合的直接原因, 而铸坯的内部裂纹和严重中心偏析是MnS夹杂产生的根源, 通过采用以提高铸机精度为核心, 包括成分和轧制工艺等优化在内的系列措施, 当辊缝和扇形段接弧 ± 0.5 mm范围内的合格率达到90%以上时, 延伸合格率达到100%。

关键词

拉伸分层, 夹杂物, 偏析, 辊缝, 扇形段接弧

Cause Analysis and Control of Q355C Tensile Layering

Hao Chen¹, Zhizheng Yang¹, Xia Hong², Xun Yi³, Min Yan³

¹Baosteel Central Research Institute (Qingshan), Wuhan Hubei

²Manufacturing Management Department, Wuhan Iron and Steel Co., Ltd., Wuhan Hubei

³Echeng Steel of Baowu Group, Ezhou Hubei

Received: Nov. 1st, 2021; accepted: Nov. 30th, 2021; published: Dec. 7th, 2021

Abstract

Q355C tensile layering samples are analyzed, and it is found that the lamellar MnS and its composite inclusions between layers are the direct causes of tensile layering and unqualified ductility, and the internal crack and serious central segregation of slab are the basic causes of MnS inclusions. Through a series of measures focusing on improving the precision of caster and including the optimization of composition and rolling process, when the qualified rate of roll gap and caster

sector connection within ± 0.5 mm reaches more than 90%, the qualified rate of ductility reaches 100%.

Keywords

Tensile Layering, Inclusions, Segregation, Roll Gap, Caster Sector Connection

Copyright © 2021 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

Q355 属于屈服 355 MPa 级的低合金钢种, 是国内单品种产量最大的结构钢品种之一, 广泛应用于桥梁、船舶、工程结构、机械等领域, 是国内各大板材产线普遍批量生产的钢种。鄂钢公司是宝武集团重要的宽厚板生产基地之一, Q355 系列低合金钢是鄂钢的主要量产钢种之一。鄂钢基于 130 t 转炉冶炼 - LF 炉外精炼 - 单流板坯连铸 - 4300 mm 轧机轧制流程生产 Q355C 中厚板, 成品厚度 20~25 mm, 板拉延伸率要求 $\geq 20\%$, 某阶段生产中, 集中出现延伸率、拉伸试样严重分层的情况, 造成成材率明显下降。

本文针对 Q355C 延伸率不合、拉伸断口分层的缺陷, 结合金相、扫描电镜等方法进行了组织、层间物质的检测和分析工作, 开展了相应的工艺优化工作, 使此类缺陷得到了完全控制。

2. 现状

使用拉伸试验机对 Q355C 板拉试样进行拉伸检测时, 发生延伸不合的试样基本都存在断口分层现象, 对应关系非常明显, 此类分层缺陷严重影响钢材内部质量, 是造成该类性能不合的主要原因。该钢种批次延伸率 $\geq 20\%$ 的合格率从正常情况下的 99% 以上右降至 90% 以下。Q355C 的成分如表 1 所示。典型的延伸不合试样分层宏观形貌如图 1、图 2 所示。

Table 1. Chemical composition of Q355C steel (wt, %)

表 1. Q355C 钢的化学成分(质量分数, %)

C	Si	Mn	P	S	Ti	Als	Fe
0.16~0.18	0.25~0.30	1.00~1.20	≤ 0.020	≤ 0.015	0.015~0.025	0.015~0.025	Bal.

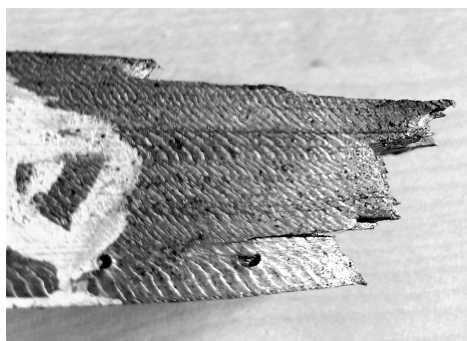


Figure 1. Side layering morphology of tensile abnormal fracture sample

图 1. 拉伸异常断裂试样侧面分层形貌



Figure 2. Near surface morphology of tensile abnormal fracture sample

图 2. 拉伸异常断裂试样近表层形貌

从图 1、图 2 可以看出，拉伸断裂处分层面在钢板厚度方向上都有分布，层间裂纹从断裂处向基体部延伸，形成多处脆性平台区，断开处主要呈脆断特征，分层表面粗糙，与相邻分层呈完全脱离状态，即开裂沿试样宽度方向完全贯穿。

3. 拉伸分层原因分析

3.1. 拉伸分层试样分析

取图 1 中的典型拉伸分层、延伸不合缺陷试样，通过金相显微镜和扫描电镜结合能谱进行观察分析，结果如图 3~9 所示。

从图 3、图 4 可以看出，无论是试样分层的纵截面，还是层间表面，都有区域分布的类似夹杂物的物质，此类夹杂物呈片层状分布，与钢基结合松散。结合图 5 扫描和能谱成分分析的结果，这些物质为大范围的片层状的 MnS 类夹杂物及 MnS 与 Ti 的硫氧化物的复合夹杂物，此类夹杂物在铸坯中形成和聚集，在轧制过程中被压缩和延展为片层状，片层状 MnS 夹杂物不能与基体充分结合，且两者热膨胀系数相差较大，当受外力导致应变时极易产生分离[1] [2] [3]。这种分离可能出现在轧制和拉伸检验的过程中。轧制形变过程中，在 MnS 与基体的界面可能形成间隙，间隙逐渐长大、汇合即形成宏观裂纹，从而表现为拉伸试样断口分层。

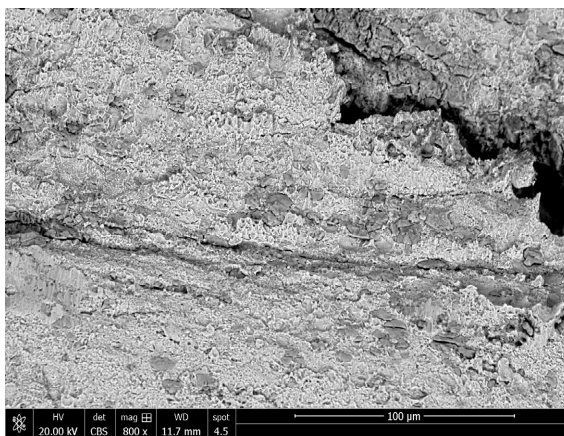


Figure 3. Longitudinal section morphology and inclusions at the end of tensile layering sample

图 3. 拉伸分层尾端纵截面形貌及夹杂物

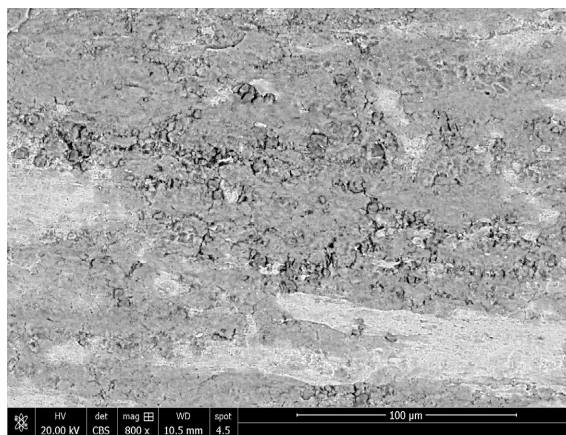


Figure 4. Lamellar inclusions on the inner surface of tensile layering sample

图 4. 拉伸分层层间表面的片层状夹杂物

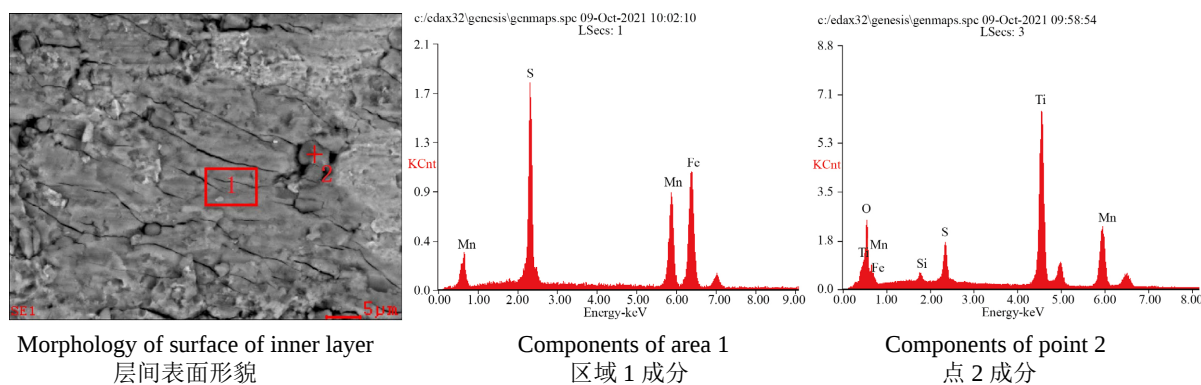


Figure 5. Morphology and components of inclusions between layers of tensile sample with SEM and EDS

图 5. SEM 和 EDS 检测的拉伸试样分层层间夹杂物形貌和成分

而从图 6 和图 7 可以看出, 试样中分层区域一般有极为明显的偏析带存在, 且部分偏析带与正常组织之间有较为明显的界线存在, 而图 8 中显示的部分封层两侧的钢基临分层裂纹边缘有比较明显的氧化脱碳特征, 与图 9 中正常部位相比, 珠光体比例明显偏高, 偏析带内主要为 C、Mn、C 的偏析组织, 形成富 C、富 Mn 的高珠光体条带。在拉伸过程中, 高珠光体含量的偏析带延伸性能与正常基体间有明显差异, 加上图 6 中还出现了两种组织之间的界线特征, 不同组织间的界面能严重偏低, 当施加轧制、拉伸等外力时, 两种组织交界处界线对两边组织不同的延伸趋势阻碍作用很小, 从而产生裂纹, 在轧制过程中表现为内裂, 在试样拉伸过程中则出现分层现象, 导致延伸率不合。

总之, 从试样分析结果看, 严重的偏析带和 MnS 为主的片层状夹杂物是造成拉伸试样分层的直接原因。

3.2. 拉伸分层缺陷的根源分析

从拉伸分层试样的分析结果可以得出片层状 MnS 夹杂物和严重偏析带是造成该类缺陷的直接原因, 而 MnS 夹杂物也有偏析有直接关系, 加之, 图 8 中裂纹两侧的氧化特征, 也属于铸坯中产生、轧制过程中扩展及拉伸中暴露的缺陷[4]。因此, 拉伸分层缺陷的根源确定为连铸环节, 可能的因素包括:

- 1) 钢种成分设计不合理;

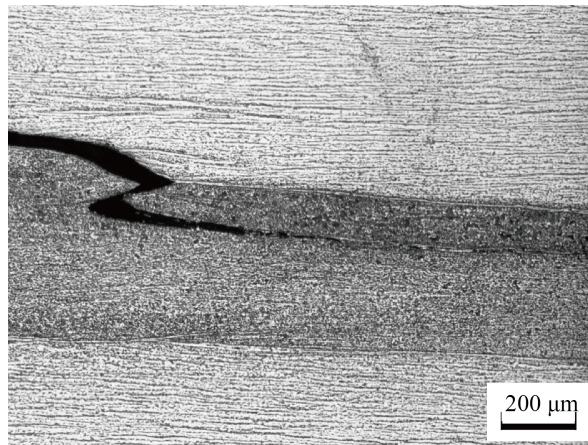


Figure 6. Segregation band in layering area of tensile sample
图 6. 拉伸试样分层区域的偏析带

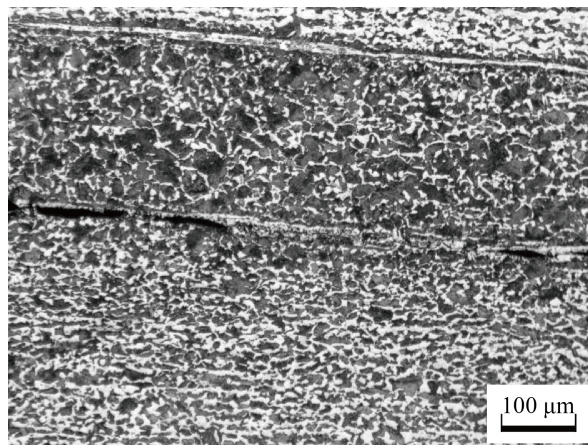


Figure 7. Boundary characteristic between segregation band and normal structure in layering area
图 7. 分层偏析带与正常组织的界线特征

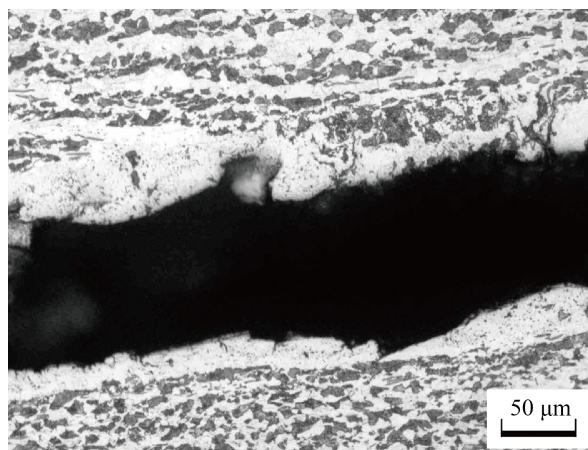


Figure 8. Decarburization and oxidation characteristics on both sides of some layering sample
图 8. 试样部分分层两侧的脱碳氧化特征

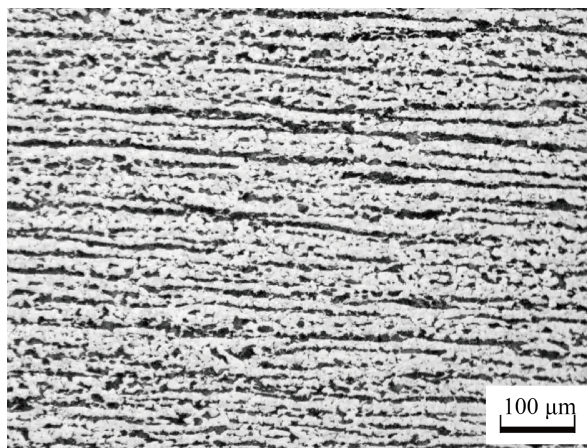


Figure 9. Metallographic structure of normal part
图 9. 正常部位金相组织

2) 连铸工艺和二次冷却模式匹配不良，造成铸坯偏析严重；

3) 铸机状态不佳，特别是矫直段辊缝合格率不足和扇形段接弧不良，拉矫过程中产生应力集中，造成内部裂纹。

从 Q345C 工业化生产实践来看，正常情况下，总体质量水平稳定，铸坯的中心偏析指数一般处于 C1.0 和 C1.5 的水平，力学性能合格率达到 99% 以上，拉伸分层缺陷具有集中发生的特征，即以浇次为单位，集中出现延伸性能异常下降，总体合格率低于 90% 的情况，而这些浇次的连铸工艺与其它浇次基本保持一致，因此可基本排除连铸工艺不合理的情况。

而对比铸坯低倍组织，发生拉伸分层的浇次，铸坯低倍组织常有微裂纹和较高的偏析指数，如图 10 所示。

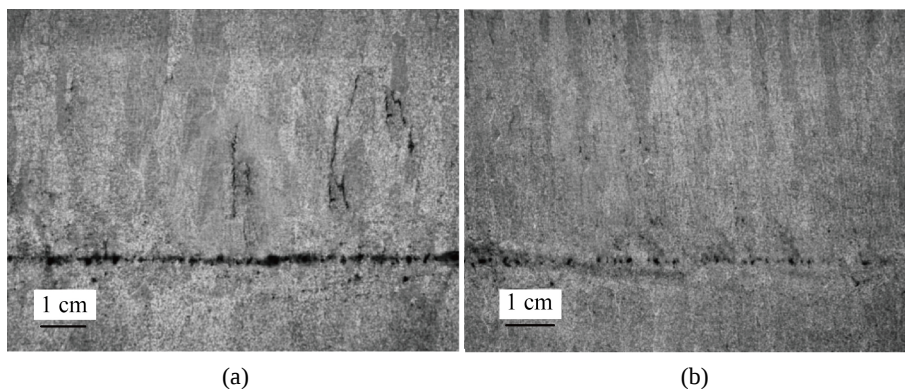


Figure 10. Inner quality of slabs in different casting order. (a) Low magnification morphology of slab in casting order with layering defect; (b) Low magnification morphology of normal slab
图 10. 不同浇次铸坯内部质量。(a) 发生拉伸分层浇次的铸坯低倍形貌；(b) 正常铸坯的低倍形貌

图 10 中，发生拉伸分层家批次的铸坯中偏析指数为 B1.0，比正常铸坯的 C1.0 和 C1.5 偏析严重，在断面上分布有明显可见的裂纹，对相应的因素分析，冶炼成分均合格，而异常浇次对应的铸机辊缝和扇形段接弧状况均有一定波动，当辊缝 ± 0.5 mm 范围内的比例低于 85% 时，开始出现钢板延伸不合的情况，当辊缝 ± 1 mm 范围内的比例低于 90%，延伸不合情况会明显增多，总体延伸合格率将降至 90% 以下。因

此,基本可以确定,铸坯内裂和严重中心偏析是直接根源,而铸机状态是决定性因素。

当铸机精度不良时,在拉矫时铸坯初生凝固坯壳易产生微裂纹,在铸机组辊的压力和凝固末端动态轻压下的压力下,富含 Mn、S、Ti 等溶质元素的低熔点液态物质或者固液两相物沿着柱状晶晶界向铸坯中心或者裂纹内扩散,造成局部偏析带异常组织,而裂纹内的偏析带与正常组织以裂纹边缘为界,形成如图 7 所示的明显边界线。

铸坯加热过程中,部分裂纹有扩张恶化趋势,会造成部分裂纹边缘形成如图 8 的氧化脱碳特征。铸坯出炉轧制时,需在高温下快速大压下,使部分裂纹重新压合,但部分偏析带被压缩形成片层状夹杂物区域,取样拉伸试验过程中即可形成拉伸分层,造成延伸性能不合。

4. 优化措施及实施

结合如前所述的相关分析,采取以下措施来控制拉伸分层及延伸不合的发生率。

1) 将钢液成分中 Mn、S 含量向下限控制,减少 MnS 及 TiS 等的偏析倾向。

2) 提高包括辊缝和接弧等在内的铸机精度,辊缝和接弧 ± 0.5 mm 范围内的合格率达到 90%以上,浇注过程中避免拉速频繁变化,提升典型拉速比例,适当增加二次冷却强度,减轻中心偏析。

3) 减缓加热炉内铸坯温度提升速度,适当增加均热温度,增加初轧前三道次的压下率至 30%。

通过以上综合措施的实施,特别是铸机辊缝开口度 ± 0.5 mm 的合格率达到 90%以上时,Q355C 钢板延伸合格率达到 100%。

5. 结论

Q355C 拉伸试样分层的直接原因是钢板中的片层状 MnS 类复合夹杂物,根源是包括辊缝和接弧等在内的铸机精度不良。通过提高铸机精度,提升浇注稳定性,并适当优化钢液成分和轧制工艺,使拉伸分层和延伸率不合的现象得到有效控制。

参考文献

- [1] 郭峰,郭慧,王晶,等. 钢板拉伸分层断口成因分析及改进措施[J]. 物理测试, 2016, 34(1): 46-49.
- [2] 彭胜,彭其春,范丹萍,等. 耐候钢 Q450NQR1 拉伸试验断口分层原因分析[J]. 物理测试, 2014, 32(1): 36-39.
- [3] 王斌. 中厚钢板分层缺陷的力学性能影响分析[J]. 物理测试, 2015, 33(4): 46-48.
- [4] 杨治争,周有预,袁凡成,等. 连铸窄板坯角部横裂的成因及对策[J]. 钢铁研究, 2007, 35(4): 12-15.