

L555M 高级别管线钢两种典型表面裂纹缺陷的对比分析

裴庆涛^{1,2} 李斌² 马林²

1 北京科技大学材料科学与工程学院

2 邯鄲钢铁集团有限公司

DOI:10.32629/etd.v7i8.21649

[摘要] L555M管线钢在近期生产过程中主要会出现红送裂纹与铸坯纵裂衍生裂纹两类缺陷。为精准辨别两种缺陷、明确缺陷防控重点,笔者基于近期L555M管线钢表面裂纹检测数据,从裂纹成因、宏观样貌、微观特征三个核心维度,对红送裂纹与铸坯纵裂导致的带钢裂纹进行系统对比分析,梳理两种缺陷的本质差异,明确缺陷辨别关键指标,为生产过程中两种裂纹缺陷的快速识别、精准判断提供可靠的技术支撑。研究表明,红送裂纹与铸坯纵裂衍生裂纹在成因机制、宏观形态、微观结构及元素组成上存在显著区别,可通过裂纹走向、深度、微观断口特征及能谱元素分布实现精准辨别。

[关键词] 红送裂纹; 铸坯纵裂; 表面缺陷; 对比分析; 缺陷辨别

中图分类号: TG115.28 **文献标识码:** A

Comparative analysis of two typical surface crack defects in L555M high-grade pipeline steel

Qingtao Pei^{1,2} Bin Li² Lin Ma²

1 School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Science and Technology

2 Handan Iron and Steel Group Co., Ltd.

[Abstract] In recent production processes, L555M pipeline steel has experienced two types of defects: red delivery cracks and longitudinal cracks derived from casting billets. In order to accurately identify two types of defects and clarify the focus of defect prevention and control, based on recent surface crack detection data of L555M pipeline steel, the author conducted a systematic comparative analysis of strip steel cracks caused by red delivery cracks and longitudinal cracks in castings from three core dimensions: crack causes, macroscopic appearance, and microscopic characteristics. The essential differences between the two types of defects were sorted out, and the key indicators for defect identification were clarified, providing reliable technical support for the rapid identification and accurate judgment of the two types of crack defects in the production process. The research results indicate that there are significant differences in the formation mechanism, macroscopic morphology, microscopic structure, and elemental composition between red sending cracks and longitudinal cracks derived from cast billets. Accurate identification can be achieved through crack direction, depth, microscopic fracture characteristics, and energy spectrum element distribution.

[Key words] Red send crack; Longitudinal cracking of cast billet; Surface defects; Comparative analysis; Defect identification

引言

随着我国油气管道建设向高压、大口径、长距离方向发展,对管线钢性能要求日益严苛,L555M作为当前国内重点工程最高强度级别管线钢,具备高强度、高韧性、良好焊接性能及抗腐蚀性等优点,广泛应用于陆上长输管线、海底管线等核心工程^[1]。考虑到管线钢服役过程中需承受复杂内压、外载荷

及恶劣环境侵蚀,表面质量直接决定服役可靠性,而表面裂纹作为最危险的缺陷类型之一,若生产中未及时识别处理,会在服役中持续扩展,最终导致管道破裂,引发安全事故与经济损失。

近期,公司在进行L555M管线钢批量生产过程中,连续两次出现表面裂纹偶发情况,严重影响生产效率与产品质量。经检测分析,近期表面裂纹主要来源于两方面:铸坯红送过程产生的红

送裂纹, 以及铸坯纵裂在后续轧制中衍生的带钢裂纹。两种裂纹虽均表现为表面开裂, 但成因机制不同, 防控与处理方法差异显著, 若无法精准辨别, 易导致防控措施针对性不足, 造成成本浪费与交付延误。

目前, 国内外学者针对管线钢表面裂纹的研究多集中于单一缺陷的成因与防控^[2-3], 针对L555M管线钢两种裂纹的系统对比研究较少, 缺乏明确辨别指标与方法, 无法满足现场快速识别需求。基于此, 本文结合检测数据, 对两种裂纹进行全面对比分析, 梳理裂纹差异并建立宏观和微观辨别方法, 为工艺方案控制要求和现场识别提供理论指导。

1 L555M管线钢两种表面裂纹缺陷的成因分析

红送裂纹与铸坯纵裂衍生裂纹产生于不同工艺阶段, 成因机制存在本质差异, 明确其成因是缺陷辨别与防控的基础。

1.1 红送裂纹的成因机制

红送裂纹是指连铸坯在生产完成后, 不进行冷却, 铸坯在较高温度下直接装入加热炉, 在加热炉内加热过程中产生的表面裂纹, 核心原因是铸坯入炉温度处于奥氏体(A)-铁素体(F)两相区, 导致高温力学性能下降, 在应力综合作用下发生晶界开裂。

L555M铸坯红送时, 若入炉温度控制不当, 表层温度处于A-F两相区时, 极易发生表层裂纹缺陷, 这主要是铸坯在该相区存在明显组织缺陷: ①铸坯位于该相区时奥氏体晶粒粗大且不均匀, 形成混晶组织降低晶界强度; ②先共析铁素体在奥氏体晶界析出形成连续网膜, 破坏晶界连续性; ③铸坯中碳化物、氮化物等析出物在晶界偏聚, 产生晶界弱化效应^[4]。基于上述情况, 铸坯加热及轧制过程中受到热应力(加热速度过快, 表层与芯部温差大, 热应力和相变应力相叠加)、组织应力与机械应力的综合作用, 强度较低的奥氏体晶界成为典型的应力集中点, 当实际应力超过晶界结合力时形成裂纹源, 并持续扩展成为红送裂纹。此外, 铸坯表面氧化铁皮与基体热膨胀系数差异产生的热应力, 会导致氧化铁皮脱落, 使基体表面失去保护而加剧氧化侵蚀, 进一步促进裂纹产生与扩展。

1.2 铸坯纵裂衍生裂纹的成因机制

铸坯纵裂衍生裂纹是铸坯纵裂在后续轧制过程中, 经塑性变形衍生形成的细小裂纹, 其核心诱因是连铸过程产生的纵裂未及时处理, 在轧制中进一步扩展或变形。

铸坯纵裂主要产生于连铸两个关键阶段: 一是结晶器弯月面区域坯壳初生时, 如果出现结晶器内钢水液面波动过大、保护渣润滑不佳或结晶器振动参数不合理, 连铸坯初生凝固壳厚度不均, 在钢液静压力和凝固过程热应力下薄弱区域出现开裂情况; 二是连铸坯在二冷区进行冷却时, 冷却强度与水量分布不均导致铸坯温度梯度过大, 叠加受到的夹持力、导向力等机械应力, 在综合应力超过凝固壳抗拉强度而产生纵向裂纹^[5]。铸坯纵裂宽度一般为几毫米至几十毫米不等, 冷却后表面可直接观察到纵向凹槽或开裂痕迹, 若连铸坯在下线冷却后未通过切头切尾、打磨等方式进行彻底去除, 纵裂缺陷在轧制过程中会因塑性变

形被拉长、变细, 最终在带钢表面呈现纵向直线状裂纹。该类裂纹与连铸工艺密切相关, 轧制工艺仅影响裂纹形态与分布, 控制铸坯纵裂产生或及时处理, 可显著降低其发生率。

2 L555M管线钢两种表面裂纹缺陷的宏观样貌对比

宏观样貌是现场快速识别裂纹的重要依据, 两种裂纹因成因与形成过程不同, 在宏观形态、走向、深度及分布上存在显著差异, 可实现初步辨别。

2.1 红送裂纹的宏观样貌特征

红送裂纹为铸坯热装热送过程产生的表面浅层缺陷, 核心特征是无固定走向、形态不规则。其宏观特征为: ①裂纹多呈网状、曲折状, 部分为短条状、分叉状, 长度几毫米至几十毫米, 分布无规律(见图1左); ②裂纹深度一般较浅, 多为0.1~1mm, 裂纹不会深入带钢内部; ③裂纹开口宽度一般为0.05~0.2mm, 部分裂纹需借助放大镜观察才能发现; ④裂纹随机分布、无固定位置, 多为单个或少量集中出现; ⑤裂纹表面附着薄薄的深褐色或黑色氧化铁皮, 去除后表面粗糙无光滑面。



图1 管线钢L555M红送裂纹(左)和铸坯纵裂衍生裂纹(右)宏观样貌

2.2 铸坯纵裂衍生裂纹的宏观样貌特征

铸坯纵裂衍生裂纹呈明显纵向直线状, 走向规整, 沿轧制方向分布, 为连续或不连续直线, 无分叉曲折, 是其最显著的宏观识别标志(见图1右)。其他宏观特征为: ①其深度明显大于红送裂纹, 一般为1~5mm, 部分严重裂纹可深入带钢芯部; ②开口宽度0.1~0.5mm, 部分可直接用肉眼观察; ③裂纹多为批量出现、位置固定, 主要分布在带钢边缘或中部特定区域, 与铸坯纵裂位置一致; ④裂纹长度几十毫米至几百毫米, 部分可贯穿带钢全长; ⑤表面附着较多黑色氧化铁皮, 去除后表面相对光滑, 呈现轧制变形后的平整特征。

2.3 两种裂纹宏观样貌差异汇总

两种裂纹宏观差异主要体现在五方面: 一是走向, 红送裂纹无固定走向、呈网状曲折状, 铸坯纵裂衍生裂纹纵向直线状、走向规整; 二是深度, 红送裂纹0.1~1mm, 铸坯纵裂衍生裂纹1~5mm; 三是开口宽度, 红送裂纹0.05~0.2mm, 铸坯纵裂衍生裂纹0.1~0.5mm; 四是分布, 红送裂纹随机分布、无批量性, 铸坯纵裂衍生裂纹批量出现、位置固定; 五是表面形态, 红送裂纹表面粗糙、氧化铁皮薄, 铸坯纵裂衍生裂纹表面较光滑、氧化铁皮多。

3 L555M管线钢两种表面裂纹缺陷的微观特征对比

宏观观察仅能初步辨别裂纹,对于轻微或隐蔽裂纹需通过微观观察与能谱分析,明确微观结构与元素组成差异,实现精准辨别。本文采用SEM观察微观形貌,EDS检测元素组成,对比两种裂纹微观特征。

表1 两种裂纹宏观差异体现

项目	红送裂纹	铸坯纵裂
走向	无固定走向、网状曲折状	纵向直线状,走向规整
深度	0.1~1mm	1~5mm
开口宽度	0.05~0.2mm	0.1~0.5mm
分布	随机分布,无批量性	批量出现,位置固定
表面形态	表面粗糙、氧化铁皮薄	表面较光滑,氧化铁皮多

3.1 红送裂纹的微观特征

3.1.1 微观形貌特征

将红送裂纹试样置于扫描电镜内,在100倍~1000倍视野范围内进行微观观察,可以看出:①红送裂纹深度约为100 μm,裂纹与表面平行,无向基体内部发展趋势;裂纹断口具有明显高温氧化与晶界偏聚特征,为典型沿晶断裂形貌,裂纹沿奥氏体晶界扩展,路径曲折网状,与宏观特征吻合。②断口无明显解理面、整体粗糙,存在清晰晶界轮廓,表明裂纹产生扩展主要发生在晶界区域。③其内部无连铸型夹杂物,仅伴随氧化铁皮嵌入,氧化铁皮沿裂纹内壁连续分布,无颗粒状聚集,高倍观察显示氧化物呈薄膜状、晶须状或链状,填充晶界缝隙形成沿晶氧化通道,与高温环境下晶界氧化弱化的成因一致(见图2)。

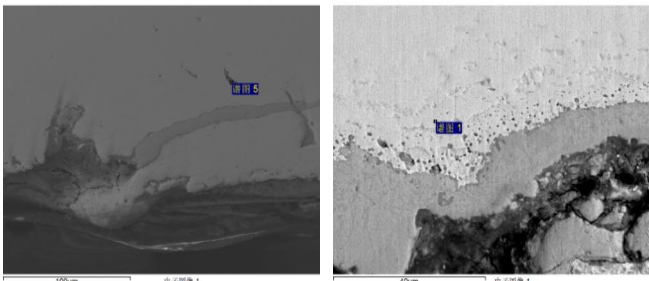


图2 扫描电镜下红送裂纹(左)和铸坯纵裂衍生裂纹(右)微观样貌照片

3.1.2 能谱分析特征

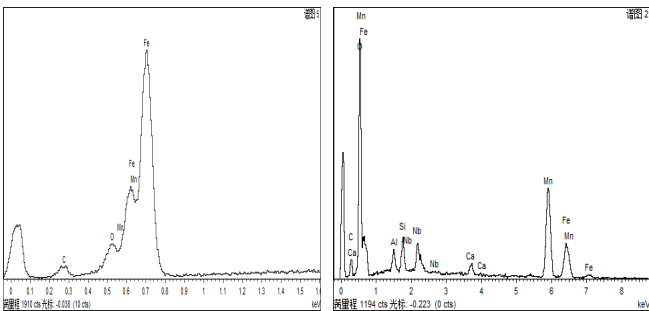


图3 红送裂纹(左)和铸坯纵裂衍生裂纹(右)中氧化物物质点能谱检测结果

利用扫描电镜电子探针对裂缝位置进行EDS检测,能谱结果显示:①红送裂纹内部氧化物物质点主要含Fe、O元素,无Ca、Si、Al等连铸保护渣相关元素,进一步证明其与连铸工艺无关。②常规L555M管线钢中含1.5%~2.0%的Mn元素,Mn元素在高温氧化时会生成Fe-Mn尖晶石(FeO·MnO),因此部分裂纹氧化物物质点中可检测到Mn元素,这是其重要辨别依据之一(见图3)。③裂纹两侧基体元素组成与标准成分一致,无明显元素偏聚,表明裂纹仅导致表面氧化,未改变基体元素分布。

3.2 铸坯纵裂衍生裂纹的微观特征

3.2.1 微观形貌特征

将铸坯纵裂衍生裂纹试样置于扫描电镜内,在100倍~1000倍视野范围内进行微观观察,可以看出:①铸坯纵裂衍生裂纹断口无明显沿晶断裂特征,为混合断裂形貌,兼具沿晶与解理断裂区域,与红送裂纹差异显著。②裂纹路径平直,与宏观走向一致,内壁相对光滑,无网状曲折特征。③裂纹内部除氧化铁皮外,还伴有Ca/Si/Al系保护渣夹杂物,夹杂物呈颗粒状或块状聚集于裂纹根部与内壁,分布不均(见图2)。④高倍视野下可以发现较多氧化物物质点,呈细小颗粒状,弥散分布于裂纹两侧,无连续分布趋势,与红送裂纹的连续氧化通道形成鲜明对比。

3.2.2 能谱分析特征

利用扫描电镜电子探针对裂缝位置进行EDS检测,裂纹附近氧化物物质点除含有Fe、O元素外,可同时检测到Ca、Si、Al等保护渣相关元素(见图3),这是由于铸坯纵裂通常产生于连铸过程坯壳初生阶段,坯壳开裂会导致液态保护渣进入裂纹内部,并随铸坯凝固后形成氧化物夹杂,在后续加热过程中向裂纹两侧扩展形成氧化物物质点。氧化物物质点通常粒径小于1 μm,这是由于氧化性气体扩散不充分,仅为简单点状附着。

4 两种裂纹缺陷的核心差异汇总与辨别方法

4.1 两种裂纹缺陷的核心差异汇总

综合上述分析,两种裂纹核心差异体现在五方面:

(1)成因机制:红送裂纹源于铸坯不冷却直接装加热炉后,在铸坯加热时受A-F两相区组织缺陷与应力综合作用,表层位置出现裂纹,与铸坯装炉温度相关;铸坯纵裂衍生裂纹源于连铸纵裂的轧制衍生,主要是连铸阶段结晶器或扇形段位置凝固壳凝固或温度不均匀导致,与连铸过程控制稳定性相关。

(2)宏观样貌:红送裂纹无固定走向、浅而窄、随机分布;铸坯纵裂衍生裂纹纵向规整、深而宽、批量出现。

(3)微观形貌:红送裂纹为沿晶断裂、无保护渣、连续氧化通道、基体无变形;铸坯纵裂衍生裂纹为混合断裂、有保护渣、氧化物物质点、基体有变形。

(4)能谱特征:红送裂纹含Fe、O,部分含Mn,无保护渣元素;铸坯纵裂衍生裂纹含Fe、O及Ca、Si、Al,无Mn元素富集。

(5)工艺关联:红送裂纹与红送工艺相关,铸坯纵裂衍生裂纹与连铸工艺相关。

4.2 两种裂纹缺陷的辨别方法

结合现场检测条件,建立分级辨别方法:

(1)初步辨别(现场快速识别):基于宏观特征,无固定走向、浅而窄、随机分布的为红送裂纹;纵向规整、深而宽、批量出现的为铸坯纵裂衍生裂纹。

(2)精准辨别(实验室检测):SEM观察为沿晶断裂、无保护渣夹杂、存在连续氧化通道,EDS检测氧化物质点无Ca、Si、Al等元素,但部分质点含Mn元素的为红送裂纹;SEM观察为混合断裂、有保护渣夹杂和弥散分布氧化物质点,EDS检测含Ca、Si、Al等元素的为铸坯纵裂衍生裂纹。

5 结论

本文结合近期L555M高级别管线钢表面裂纹检测数据,通过成因分析、宏观观察、微观观察及能谱分析等方法,对红送裂纹与铸坯纵裂衍生裂纹进行了系统对比研究,明确了两种裂纹缺陷的核心差异,建立了科学的缺陷辨别方法,得出以下结论:

(1)两种裂纹的成因机制存在本质差异:红送裂纹源于铸坯红送加热过程中A-F两相区的组织缺陷与应力综合作用,与红送工艺密切相关;铸坯纵裂衍生裂纹源于铸坯连铸纵裂的轧制衍生,与连铸工艺密切相关。

(2)两种裂纹在宏观样貌上具有显著区别:红送裂纹无固定走向、呈网状曲折状,深度浅、开口窄、随机分布;铸坯纵裂衍生裂纹呈纵向直线状,深度深、开口宽、批量出现、位置固定。

(3)两种裂纹的微观特征与能谱组成差异明显:红送裂纹为

沿晶断裂,内部无保护渣夹杂物,氧化物质点呈连续分布,能谱无Ca、Si、Al元素,部分含Mn元素;铸坯纵裂衍生裂纹为混合断裂,内部有Ca/Si/Al系保护渣夹杂物,氧化物质点呈散点状,能谱含保护渣相关元素,无Mn元素。

(4)建立了分级辨别方法:通过宏观样貌可实现初步辨别,通过扫描电镜观察与能谱分析可实现精准辨别,为生产现场缺陷识别提供了可靠的技术支撑。

[参考文献]

[1]王建军,李建明,张宏伟.高级别管线钢表面缺陷成因及防控技术研究[J].钢铁,2020,55(8):102-108.

[2]李红斌,刘敏,王秀兰.L555M管线钢红送裂纹成因分析及工艺优化[J].轧钢,2021,38(3):78-82.

[3]张志强,王丽,赵伟.铸坯纵裂对管线钢表面质量的影响及控制措施[J].连铸,2020,45(5):67-71.

[4]刘建辉,陈明,李丽.管线钢铸坯红送过程中两相区组织演变及裂纹形成机制[J].材料热处理学报,2019,40(11):123-129.

[5]赵军,李娜,张磊.连铸工艺参数对L555M铸坯纵裂的影响研究[J].钢铁研究学报,2022,34(2):156-162.

作者简介:

裴庆涛(1988--),男,汉族,河北省清河县人,研究生在读,高级工程师,研究方向:TMPC热机械轧制钢材。