

钢材表面缺陷检测技术研究进展

张晓晨, 赵晓敏, 宋振东, 惠治国, 王刚, 李学东, 刘丽娟

(内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心, 内蒙古 包头 014010)

摘要: 钢材在现代工业体系中占据核心地位, 其表面质量影响产品性能与使用寿命。文章聚焦钢材表面缺陷检测技术研究, 系统梳理了常见的表面缺陷类型及其形成机制。全面剖析了传统检测方法的优劣势, 阐述了以机器视觉和深度学习为代表的新兴检测技术原理、应用成果及面临的挑战, 深入探讨了缺陷修复技术及表面质量控制策略。研究表明, 新兴检测技术显著提升了检测精度与效率, 但在复杂工业环境下的适应性等方面仍需完善。未来, 钢材表面缺陷检测技术将朝着多技术融合、智能化、标准化方向发展, 以满足不断提升的工业生产需求。

关键词: 钢材表面缺陷; 检测技术; 修复技术; 质量控制

中图分类号: TG115

文献标识码: B

文章编号: 1009-5438(2026)02-0018-04

Research Progress on Detection Technologies for Surface Defects of Steel

Zhang Xiaochen, Zhao Xiaomin, Song Zhendong, Hui Zhiguo,
Wang Gang, Li Xuedong, Liu Lijuan

(Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010,
Inner Mongolia Autonomous Region, China)

Abstract: The steel is the core in modern industrial system and its surface quality influences performances and service life of products. In this paper, it is focused on the research on detection technologies for surface defects of steel, systematically introduced common types of surface defects and their formation mechanisms, comprehensively analyzed advantages and disadvantages of traditional detection methods, elaborated the principles, application results and challenges facing of emerging detection technologies represented by machine vision and deep learning as well as deeply discussed the defect repair technologies and surface quality control strategies. The research showed that the detection precision and efficiency were significantly improved with the emerging detection technologies, but they need to be improved from such aspects as adaptability in complicated industrial environment. In the future, the detection technologies for surface defects of steel will be developed towards the directions of multi-technology fusion, intelligence and standardization to meet the increasing industrial production requirements.

Key words: surface defects of steel; detection technology; repair technology; quality control

钢材作为工业生产的基础性材料, 以其高强度、良好的韧性和优异的可加工性, 广泛应用于工程建设、机械制造、汽车生产、航空航天、军工产品等关键

领域^[1,2]。在建筑行业, 大型建筑结构和桥梁的安全性直接依赖于钢材的质量; 在汽车制造业中, 钢材的性能影响着汽车的整体性能与安全性; 航空航天

领域对钢材的质量要求更是达到了严苛的标准,任何细微的表面缺陷都可能引发严重的安全后果。

然而,在钢材生产流程中,受原材料品质、复杂轧制工艺、设备运行状态及多变生产环境等多因素耦合作用,其表面极易产生各类缺陷。这些缺陷不仅会破坏钢材的外观完整性,更会显著劣化其使用性能并缩短服役寿命。因此,深入开展钢材表面缺陷检测技术研究,对于提升钢材质量、保障工业产品性能、推动相关产业高质量发展具有重要的现实意义^[3]。

1 钢材表面缺陷类型及形成机制

1.1 常见表面缺陷类型

钢材表面缺陷种类繁多,常见的包括裂纹、夹杂、划痕、氧化铁皮等。裂纹缺陷呈现为不规则的线状缝隙,可分为纵向裂纹、横向裂纹和网状裂纹等;夹杂是指钢材内部混入的外来杂质,如非金属夹杂物;划痕是由于钢材表面与其他物体摩擦产生的线性痕迹;氧化铁皮则是钢材在高温环境下与氧气发生反应形成的氧化层^[4]。

1.2 缺陷形成机制

不同类型的表面缺陷形成机制各异。山东莱钢生产的16Mn轧制成中厚板后,板面常出现沿轧向变形压扁的网状微裂纹。取样抛光后,裂纹网状特征更明显,裂纹内嵌氧化铁,周围有高温氧化原点。经硝酸酒精浸蚀,裂纹附近有沿原奥氏体晶界分布的棕黄色富集相,电子探针分析表明其含铜,而正常部位无铜。由此可知,该裂纹因铜结晶器被铸坯磨损致铜元素富集产生。

在夹杂缺陷方面,高强度船板钢在检测时,经酸洗后板面出现微裂纹,硝酸酒精浸蚀发现裂纹附近有灰白色浮凸相。截面试样显示裂纹深1.0~1.3 mm,附近及延伸处有相同浮凸相,电子探针分析其砷含量为7.22%,远超正常部位。这是由于烧结用的硫酸渣和铁粉中砷含量超标,高温下形成低熔点砷富集层渗透晶界,热轧时导致热脆裂纹^[5,6]。

划痕缺陷在带钢生产中较为常见。2022年湛江钢铁统计显示,冷轧缺陷中表面擦划伤数量居首,占缺陷总量18%,其中酸洗产品的面擦伤占比约48.41%。热轧卷卷取擦伤沿横向分布于边部,由点状划伤组成。酸洗板上的划伤沿宽度方向分布,点划伤轻但更密集。

氧化铁皮缺陷在热轧钢板中较为普遍。由于板

坏本身氧化铁皮严重或板坯加热时产生严重的氧化铁皮,在粗轧前没有去除干净,轧制时压入板面。二次氧化铁皮压入则是在精轧时将二次氧化铁皮压入钢材表面而形成的^[7,8]。

2 钢材表面缺陷检测技术

2.1 传统检测方法

2.1.1 人工目视检测

人工目视检测是凭借肉眼和简单工具对钢材表面逐一审视的原始方法,灵活性高,能直观判断缺陷类型和位置。但这种方法检测效率低,难以适应现代大规模工业生产,且结果受主观因素影响大。

2.1.2 接触式检测方法

接触式检测主要有涡流和超声波检测。涡流检测基于电磁感应,钢材表面缺陷导致涡流分布异常、检测线圈阻抗变化,以此识别缺陷。涡流检测对表面及近表面缺陷灵敏度高、速度快,但对形状复杂钢材适应性差,易受材质等干扰。超声波检测利用超声波传播特性,遇到缺陷时通过发生反射来判断缺陷信息,对于形状复杂或表面不平整的钢材难以检测^[9]。宝钢应用Eddyfi涡流检测系统对厚度0.3 mm的硅钢片进行表面缺陷检测,可以检测到0.1 mm×0.1 mm的划痕,但在检测镀铝硅钢片时,缺陷的检测准确率下降。鞍钢使用相控阵超声检测仪对20~100 mm厚钢板检测时,可识别Φ2 mm的孔型缺陷,但在检测T型焊缝区域的缺陷时,针对微裂纹的漏检率为31%。

2.1.3 非接触式光学检测方法

非接触式光学检测主要包括激光扫描和结构光检测。激光扫描是发射激光束,通过测量反射光获取三维轮廓来检测缺陷,其检测精度高、速度快,适合在线检测,但设备成本高、环境要求苛刻。结构光检测是向钢材表面投射特定结构光,通过分析变形光条纹识别缺陷,其检测精度较高,对复杂形状钢材适应性好,但对于光照敏感、系统标定复杂的情况检测范围有限。武钢部署的激光轮廓仪可识别深度≥0.15 mm的凹坑,但在高温环境下检测误差增大。本钢自研的结构光检测系统对镀锌板微划痕检测准确率达89%,但当环境光强度超5000 lx时,检测速度明显下降。

2.2 新兴检测技术

2.2.1 机器视觉检测技术

机器视觉检测技术是近年来新兴且应用广泛的

检测技术,通过 CCD 或 CMOS 相机采集钢材表面图像,经过预处理、特征提取和缺陷识别实现检测。其优势为速度快、精度高、客观性强,可实时在线检测。但在实际应用中面临挑战:复杂光照影响图像质量和钢材表面纹理,背景噪声干扰识别,不同钢材需大量参数调整和模型训练,增加了开发维护成本^[10]。攀钢集团冷轧板检测系统采用 4 台工业相机与红外光源对 SPCC 冷轧板在线检测。其图像处理算法融合 Gabor 滤波器与 Otsu 阈值分割技术,夹杂缺陷检测准确率达 94.3%。2023 年数据显示,该系统漏检率已从 22% 降至 6.8%,但在油污覆盖场景下,其对划痕的识别率仅 67%。河钢集团热连轧检测系统配备线阵 CCD 相机与多光源分时照明装置,可识别 Q235B 热轧带钢上尺寸为 0.2 mm × 0.5 mm 的氧化铁皮压入缺陷,引入 LBP(局部二值模式)与 SVM(支持向量机)算法后,系统平均检测准确率达 91.7%。但当带钢速度超过 10 m/s 时,检测误差率上升至 11.5%。

2.2.2 深度学习检测技术

作为人工智能领域的前沿技术,深度学习在钢材表面缺陷检测领域展现出巨大应用潜力。其核心依托卷积神经网络及其衍生模型(如 Faster R-CNN、YOLO 系列等),可实现图像深层特征的自主学习,有效提升检测的精准度与效率^[11,12]。具体而言,Faster R-CNN 通过区域提议网络(RPN)生成候选区域,再经 Fast R-CNN 完成缺陷的分类与定位;YOLO 系列则采用端到端检测模式,将图像划分网格后直接预测缺陷信息。在公开数据集测试中,此类模型的平均精度均值普遍可达 95% 以上,特定场景下更能达到 98% 左右。

不过,深度学习在实际应用中仍存在明显局限:一是对标注数据需求量大,数据获取与标注过程耗时费力;二是计算复杂度较高,需依赖高性能 GPU 支持,导致部署成本增加;三是模型可解释性不足,在高安全要求场景的应用受到限制^[13]。

工业实践中,首钢集团基于 YOLOv5s 模型,在包含 6 类缺陷的 10 万张自建数据集上完成训练,将该模型用于 HRB400E 螺纹钢检测时,平均精度达 96.8%。2024 年数据显示,该技术使不大于 0.1 mm 微裂纹缺陷的检测率从 78% 提升至 92%,但锈迹与裂纹的误判率仍达 9.3%。沙钢集团采用 Faster R-CNN 模型,经 20 万张样本数据集训练后,将其应用于 2 000 mm 宽的 Q390GJD 桥梁钢检测,凹坑

定位误差不超过 0.3 mm,分类准确率达 95.6%,但在处理花纹钢板时,该模型准确率降至 88.2%。南钢集团创新性融合激光三维点云与视觉图像,构建 PointCNN + U-Net 混合模型,对 10 ~ 50 mm 厚的 Q690D 高强钢检测时,可同步获取缺陷的二维纹理与三维形貌特征,使深度超过 0.2 mm 凹坑的检测准确率达 98.1%,较单一视觉检测方法提升 12.3%,但硬件成本相应增加 40%。

3 钢材表面缺陷修复技术

3.1 物理修复方法

物理修复法有磨削、打磨和抛光。磨削用砂轮等去除缺陷层;打磨是用砂纸等摩擦处理;抛光靠抛光轮和抛光粉形成镜面。其操作简单、设备要求低,适合修复表面划痕等缺陷,但可能会导致表面局部过热、影响性能,且效率低,对大面积或深缺陷修复效果差。

3.2 化学修复方法

化学修复方法主要涵盖酸洗、钝化和化学镀。酸洗是采用酸性溶液溶解钢材表面的氧化物与杂质;钝化是通过形成致密的膜提升其耐腐蚀性;化学镀则利用还原剂使金属离子在钢材表面沉积成膜,改善表面性能。化学修复方法能有效去除表面缺陷,保证修复后表面质量均匀,但化学试剂具有腐蚀性,存在环境与安全风险,且化学镀成本高、工艺控制难。在实际应用中,某石化企业 316L 不锈钢储罐内壁因长期接触含氯离子介质出现锈蚀斑痕和蚀坑,采用由硝酸(15% ~ 20%)、氢氟酸(2% ~ 5%)等组成的酸洗钝化剂修复。工人将其均匀涂抹于缺陷处,厚 2 ~ 3 mm,保持 15 ~ 20 min,待锈蚀溶解后冲洗擦干。修复后表面形成均匀的钝化膜,盐雾试验显示耐腐蚀时间从 24 h 提升至 96 h。某汽车零部件制造企业生产的 45# 钢曲轴,因加工磕碰产生划痕、凹坑,采用化学镀镍工艺修复。镀液含硫酸镍、次亚磷酸钠等,pH 值控制在 4.5 ~ 5.0、温度 85 ~ 90 °C,经除油、酸洗后,将曲轴浸入镀液中 1 ~ 2 h,镍离子沉积成膜。修复后镀层厚 20 ~ 30 μm 且分布均匀,硬度提升 2 ~ 3 倍,疲劳试验表明满足性能要求。

3.3 焊接修复方法

焊接修复方法可有效处理钢材表面裂纹、孔洞等缺陷。小裂纹和孔洞常用手工电弧焊、氩弧焊进行修复;对于大缺陷或高质量要求场景,则采用埋弧

焊、激光焊等自动化技术。焊接前需清理、预热缺陷部位,不过焊接会产生热影响区,可能改变钢材组织性能,需进行焊后热处理,且该方法对操作人员技能要求高,质量易受人为因素影响。在实际应用中,对于出现纵向裂纹的16MnR压力容器筒体,采用E5015焊条进行手工电弧焊修复,焊前将裂纹打磨成V型坡口,经丙酮清洗后预热至150~200℃,焊接时要控制焊接电流、电压等参数,焊后要进行退火处理,经超声波检测修复区无缺陷,抗拉强度达520 MPa,满足安全使用要求。对于大面积磨损的H13高强模具钢使用埋弧堆焊工艺修复,选用专用焊丝与焊剂,通过控制焊接参数、焊前预热、多层堆焊和焊后回火处理,修复后表面硬度、平整度良好,模具的使用寿命恢复至新制的85%。对核电用A508-3钢出现的横向裂纹采用电子束焊接修复,对加工的U型坡口进行超声波清洗,在高真空环境下焊接后高温回火,经检测无缺陷,拉伸、冲击试验达标,满足核电用钢严苛要求。

4 钢材表面质量控制策略

4.1 生产过程控制

钢材生产质量把控需从源头抓起。严格筛选铁矿石、废钢等原材料,确保其成分和性能达标;冶炼时精准调控炉温、炉渣成分与冶炼时间;连铸过程优化凝固条件,控制冷却和凝固速率;轧制时合理调整轧制力、速度等参数。同时,借助完善的生产监控系统实时监测关键参数,及时消除质量隐患,保障钢材表面质量。

4.2 检测与修复协同管理

建立检测与修复协同管理机制是提升钢材表面质量的关键。将先进检测与高效修复技术结合,依据检测结果定制修复方案。检测系统发现钢材表面缺陷后,即刻传递信息至修复部门,修复人员按缺陷情况选用适配方法处理。修复后再检测,确保质量达标。通过闭环管理,可提高缺陷处理效率,降低次品率。此外,强化人员沟通协作,定期开展技术培训,助力提升团队专业能力与工作效能。

5 结束语

本文探讨钢材表面缺陷检测技术,分析常见缺陷类型及形成机制。传统检测方法存在效率、精度

等不足,新兴机器视觉与深度学习检测技术虽带来革新,但仍有挑战性。物理、化学、焊接等修复方法各有优劣势。通过加强生产过程控制,建立检测与修复协同管理机制,可有效提升钢材表面质量。

参 考 文 献

- [1] 董磊,王健,张琦. 中国钢铁工业生态化的实现路径[J]. 冶金能源,2025,44(1):3-8.
- [2] 赵磊. 中国钢铁行业绿电应用策略分析[J]. 中国钢铁业,2025(1):27-32.
- [3] 单攀蓉,蒋玉梅,张才杰,等. 钢材生产中质量问题的溯源与控制[J]. 冶金与材料,2023,43(7):154-156.
- [4] 赵晓虎. 超低碳钢冷轧卷“头部黑线”缺陷分析与控制[J]. 河北冶金,2024(8):75-79.
- [5] 王凌越. DH32高强度船板钢纵向裂纹的分析[J]. 福建冶金,2024,53(6):39-42.
- [6] 胡锦涛,任英,张继,等. MnS夹杂物诱发钢材点蚀综述[J]. 中国冶金,2022,32(11):18-31.
- [7] 龙连,韦耀环,王伟胜,江学德,韦毅. 热轧钢带端部表面结疤缺陷的成因分析及工艺优化[J]. 2025(1):31-34.
- [8] 刘向明,王伟,陈立平,等. 滑轨钢边部细线缺陷产生原因[J]. 理化检验(物理分册),2025,61(1):37-40.
- [9] 罗衍昭,刘柏松,唐德池,等. 基于液位波动特征对汽车板表面卷渣缺陷分析[J]. 钢铁研究学报,2025,37(1):69-76.
- [10] 李琼. 无损检测技术在钢材强度检测中的应用[J]. 住宅与房地产,2021(34):194-195.
- [11] 冷岳峰,刘正,徐宝祯,等. 改进Faster R-CNN的钢材表面缺陷检测[J]. 机械科学与技术,2025,44(1):75-83.
- [12] 王瑞仪,徐沛航,任杰. 基于深度学习的钢材表面缺陷检测算法研究[J]. 电脑编程技巧与维护,2025(2):129-131.
- [13] 陈云朋,周诗洋,陈勇勇,等. 人工智能技术在钢材带状碳化物检测中的应用[J]. 河北冶金,2025(1):76-81.