

金相显微镜在钢材检测中实践应用

韩洪玲

中车福伊特传动技术(北京)有限公司 北京 101300

摘要: 金相显微镜在钢材检测中作用关键。本文先阐述钢材检测基础操作,涵盖样品制备、显微镜调试与操作规范;接着介绍其在微观及材质、加工过程检测应用,包括组织观察、缺陷检测等;最后探讨操作优化,涉及样品制备工艺、显微镜操作流程及检测效率提升。全面呈现金相显微镜在钢材检测全流程的实践应用。

关键词: 金相显微镜; 钢材检测; 样品制备; 组织观察; 操作优化

引言: 钢材质量关乎众多领域产品性能与安全,金相显微镜作为钢材检测关键工具,能揭示钢材微观组织奥秘。从基础操作到实际应用,再到操作优化,每个环节都影响检测结果准确性。深入探讨金相显微镜在钢材检测中的实践应用,剖析各环节要点与技巧,有助于提升钢材检测水平,为钢材生产、加工及质量把控提供有力支撑,推动钢铁行业高质量发展。

1 金相显微镜钢材检测的基础操作

1.1 钢材检测样品制备

钢材金相检测的样品制备需遵循标准化流程以确保组织结构真实性。切割环节应选取具有代表性部位,采用低速金刚石切割机或线切割设备,避免高速切割产生的热影响区改变原始组织状态^[1]。一般来说,高速切割时热影响区宽度可达0.5-1mm,而低速切割可将热影响区宽度控制在0.1-0.3mm以内。机械研磨阶段需按粒度递进原则操作,依次使用240#至1200#砂纸进行逐级打磨,每道工序需彻底清除前道划痕,研磨压力保持均匀,防止产生塑性变形层。化学抛光过程需根据钢材成分选择适配溶液,碳钢常用4%硝酸酒精溶液,不锈钢则采用王水或草酸溶液,抛光时间通过观察表面反光变化控制,以获得镜面效果且无腐蚀坑为终止条件。电解抛光作为补充手段,适用于复杂形状样品,通过调节电压与电解液成分实现表面平整化,需注意电流密度对抛光速率的影响规律,避免局部过抛。浸蚀环节需根据检测目标选择试剂,显示晶界常用苦味酸-盐酸混合液,观察相组成则采用4%硝酸酒精溶液,浸蚀时间通过实时显微观察确定,以组织清晰可辨且无过度腐蚀为标准,浸蚀后需立即用酒精冲洗并吹干。

1.2 金相显微镜调试与参数设定

显微镜调试需建立系统性流程以确保成像质量。光源系统校准应先调整柯勒照明,通过聚光镜升降旋钮使视场光阑像与物镜通光孔重合,再调节孔径光阑控制数

值孔径匹配度,避免光线过强导致组织细节丢失。物镜转换需遵循低倍到高倍顺序,每次切换后通过微调旋钮恢复清晰成像,特别注意高倍物镜工作距离限制,防止载玻片碰撞物镜前端。高倍物镜的工作距离通常在0.1-0.5mm之间,不同倍率的物镜工作距离不同,例如40倍物镜工作距离约为0.3mm,100倍油镜工作距离约为0.1mm。视场光阑调节需根据检测需求确定,全视场观察时完全打开,局部特征分析时收缩至目标区域边缘,以提升图像对比度。偏光系统调试需插入 $\lambda/4$ 波片,旋转载物台使消光现象出现,确认偏振方向垂直性,对于各向异性钢材检测,需通过旋转检偏器观察双折射效应变化规律。若需进行微分干涉相衬(DIC)观察,需插入诺马斯基棱镜并调节其方位角,使干涉条纹与组织特征方向垂直,以增强立体感。

1.3 检测过程中的操作规范

观察操作需建立标准化流程以保障数据可靠性。载物台移动应采用X-Y轴联动控制,避免单轴快速移动导致组织特征遗漏,对于大范围区域检测需采用蛇形扫描路径。调焦过程需先使用粗调旋钮快速接近焦面,再切换微调旋钮进行精细聚焦,高倍观察时需完全依赖微调机构,防止压碎盖玻片。粗调旋钮的调节精度一般为0.1mm左右,微调旋钮的调节精度可达0.001mm左右。光阑组合调节需遵循"先孔径后视场"原则,先通过孔径光阑控制分辨率与景深平衡,再利用视场光阑优化目标区域成像质量。图像记录应保持参数一致性,曝光时间、增益值等参数需根据样品特性预先设定,对于系列样品检测需采用固定照明条件,确保组织对比度可比性。检测过程中需定期进行系统复位,每完成10个样品观察后,需重新校准光源中心与物镜齐焦性,消除机械漂移对成像精度的影响^[2]。若需进行多物镜连续观察,需在低倍物镜下完成定位后,逐步切换至高倍物镜,避免高倍物镜下直接寻找目标导致效率低下。

2 金相显微镜在钢材微观及材质检测中的应用

2.1 钢材金相组织与形貌观察

金相显微镜通过明场、暗场及偏光成像模式,可清晰呈现钢材微观组织形貌特征。在碳钢检测中,铁素体呈现多边形晶粒结构,珠光体则以层片状分布于晶界处,通过调节显微镜对比度可区分两者边界。合金元素添加会显著改变组织形态,例如铬元素促进马氏体形成,显微镜下可见针状或板条状结构,而镍元素则稳定奥氏体相,使组织呈现等轴晶特征。对于淬火态钢材,残余奥氏体在偏光模式下呈现特殊干涉色,与马氏体形成鲜明对比。形貌观察需结合不同物镜特性,低倍物镜用于整体组织分布分析,高倍物镜则聚焦局部特征,如位错密度或孪晶形态。

2.2 钢材内部夹杂物检测

显微镜配备的偏光系统可有效识别钢材中非金属夹杂物类型。硫化物夹杂在正交偏光下呈现各向异性,通过旋转载物台可观察到明暗交替的干涉色变化;氧化物夹杂则表现为各向同性,始终保持固定亮度。氮化物夹杂因具有高硬度,在抛光过程中易形成微坑,显微镜下呈现边缘锐利的暗斑。夹杂物尺寸分级需通过标准图谱比对,直径小于 $5\mu\text{m}$ 为A类细系夹杂,大于 $10\mu\text{m}$ 则归为C类粗系夹杂。深度检测需采用逐层抛光法,结合显微镜焦深变化确定夹杂物三维分布,对于大尺寸夹杂物,需记录其在厚度方向上的连续性。

2.3 钢材晶粒度及相组成检测

晶粒度测定采用截线法或比较法,前者通过在显微图像上绘制等间距直线,统计与晶界交点数量计算平均晶粒直径,后者则直接与ASTM标准图谱比对确定等级。相组成分析需利用显微镜的偏光功能,奥氏体相在正交偏光下呈现四明四暗消光现象,而铁素体相则因各向同性保持恒定亮度。对于双相钢检测,需调节光源波长至 550nm 附近,利用铁素体与马氏体的吸收系数差异增强对比度。相比例计算采用点计数法,在固定面积内统计不同相的点数占比,需保证统计点数超过200个以降低误差。

2.4 钢材组织缺陷的微观观察

显微镜可揭示多种钢材加工缺陷的微观特征。带状组织表现为铁素体与珠光体沿轧制方向交替分布,通过调节偏光系统方位角可增强其对比度。过烧缺陷在显微镜下呈现晶界局部熔化特征,伴随氧化铝或硅酸盐夹杂物聚集。冷加工产生的滑移带表现为平行排列的细线,其密度与变形量呈正相关,通过电子背散射衍射技术可进一步分析滑移带取向分布。焊接热影响区的组织不均匀性需采用多物镜连续观察,从熔合线到母材方向依次

呈现粗晶区、细晶区和回火区,各区域晶粒尺寸差异可达一个数量级。例如,粗晶区晶粒尺寸可能达到 $100\text{--}200\mu\text{m}$,而细晶区晶粒尺寸在 $10\text{--}20\mu\text{m}$ 左右。

3 金相显微镜在钢材加工过程中的检测应用

3.1 钢材热加工过程中的金相检测

热加工环节的金相检测聚焦于动态再结晶与组织演变规律。轧制过程中,显微镜可捕捉奥氏体晶粒在高温下的动态回复行为,当变形量超过临界值时,原始粗大晶粒被拉长并形成亚晶界,通过偏光成像可清晰观察到亚晶粒的取向差^[3]。锻造温度对组织形态具有决定性影响,在 950°C 以上锻造时,显微镜下呈现均匀等轴晶,而低于 900°C 则导致混晶现象,部分区域保留变形组织。连铸坯的柱状晶生长方向检测需结合低倍腐蚀技术,显微镜观察显示柱状晶与等轴晶交界处的偏析带宽度,该参数直接影响后续轧制开裂风险。热加工后的冷却速率控制通过显微组织验证,空冷条件下获得铁素体-珠光体双相组织,而水冷则生成马氏体与贝氏体混合相,偏光模式下两类组织的消光特性差异显著。

3.2 钢材冷加工过程中的金相检测

冷加工检测聚焦于变形组织与加工硬化程度的相关检测。冷轧板材的显微观察可发现,铁素体晶粒会随加工过程沿轧制方向发生伸长变形,晶界处会形成高密度位错墙,借助电子背散射衍射技术能够分析晶粒取向分布的变化情况。冷拔钢丝的检测需重点关注中心空洞缺陷,显微镜下可观察到空洞边缘存在微裂纹,微裂纹的扩展方向与拉拔轴线形成特定夹角。冷加工产生的滑移带可通过硝酸酒精浸蚀法进行检测,显微图像中可见呈平行排列的细线,线间距会随变形温度的变化而发生相应改变,低温加工条件下滑移带密度会出现明显变化。对于深冲用钢板,需检测特定织构的占比情况,通过菊池线衍射分析可确定晶粒取向的集中程度,该指标会对成型过程中的制耳相关特性产生影响。

3.3 钢材热处理后的金相检测

热处理效果验证依赖显微组织特征分析。淬火工艺检测需区分马氏体类型,低碳钢形成板条马氏体,显微镜下呈现束状结构,而高碳钢则生成针状马氏体,伴随明显淬火裂纹。回火温度对组织转变的影响通过显微硬度与组织形态联合判定, 200°C 回火时马氏体开始分解,显微图像显示针状结构边缘模糊化, 400°C 回火则生成回火托氏体,偏光模式下呈现特殊干涉色。调质处理检测需同时评估索氏体含量与晶粒度,显微镜观察显示索氏体层片间距随冷却速率加快而减小,晶粒度等级通过截线法测定,需满足ASTM标准中8级以上要求。渗碳处理

检测聚焦表面碳浓度梯度,显微硬度曲线显示有效硬化层深度,结合金相组织观察确认表层是否形成针状马氏体与残余奥氏体双相组织。

4 金相显微镜钢材检测的操作优化

4.1 样品制备工艺优化

样品制备质量直接影响显微观察的准确性。切割环节需根据钢材硬度选择线切割或砂轮切割,高碳钢应采用低速走丝线切割以减少热影响区,切割后样品边缘需用砂纸逐级打磨至2000目,消除加工变形层^[4]。镶嵌过程针对小尺寸样品采用热压镶嵌法,酚醛树脂固化温度控制在 $180^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$,避免高温导致组织粗化;异形样品则选用冷镶嵌技术,以丙烯酸树脂为基体,添加硫化物填料增强边缘支撑。粗磨阶段选用碳化硅砂纸,压力控制在5N以下,每道工序磨削量不超过 $50\mu\text{m}$,防止引入新划痕。精磨采用氧化铝悬浮液,配合丝绸抛光布,抛光时间根据材料硬度调整,低碳钢需持续3分钟,高合金钢则延长至5分钟。最终浸蚀环节需根据组织类型选择试剂,铁素体-珠光体组织采用4%硝酸酒精溶液,马氏体组织则使用苦味酸-盐酸混合液,浸蚀时间通过秒表精确控制,每10秒观察一次表面反光变化,避免过度腐蚀导致组织模糊。

4.2 显微镜操作流程优化

显微镜校准是保证检测精度的前提。物镜转换需旋转至定位销完全嵌入,避免不同倍率物镜间存在轴向偏差,100倍油镜使用前需在载玻片与物镜间滴加专用浸油,防止光线折射影响分辨率。光源调节应遵循柯勒照明原则,先闭合视场光阑,调节聚光镜高度使光阑边缘与视场重合,再逐步开大光阑至刚好充满视场,这种设置可消除杂散光干扰。对焦过程需先使用低倍物镜粗调,待图像清晰后切换至高倍物镜,通过微调旋钮进行精细聚焦,对于深凹样品,需采用倾斜载物台补偿焦面差异。偏光检测时,起偏器与检偏器应保持正交状态,旋转载物台观察消光现象,马氏体组织在正交偏光下呈现四明四暗特征,而奥氏体则因各向同性保持恒定亮度,通过分析消光方位角可确定晶粒取向分布。

4.3 检测效率提升优化

自动化技术能够有效缩短检测周期。电动载物台搭配预设路径程序,可实现多区域自动扫描,针对晶粒度检测项目,通过设定均匀分布的视场,系统可自动完成图像采集与截线法分析,大幅缩减单样品处理耗时^[5]。图像处理软件集成智能识别模块,依托深度学习算法可区分不同类型的钢材金相组织,替代传统人工比对标准图谱的繁琐流程,减少人工操作带来的冗余步骤。多物镜协同工作模式通过分光器实现同步成像,低倍物镜用于快速定位缺陷区域,高倍物镜可即时切换进行细节观察,通过这种设计有效提升夹杂物检测效率。数据管理系统采用云端存储架构,检测报告可自动生成并关联原始图像,支持关键词检索与趋势分析,为工艺改进提供数据支撑,避免重复检测造成的资源浪费。

结束语

金相显微镜在钢材检测领域的应用广泛且深入,从基础操作到加工过程检测,再到操作优化,各环节紧密相连、相互影响。通过规范操作、精准调试与持续优化,可充分发挥金相显微镜优势,获取准确检测数据。这不仅有助于及时发现钢材问题、改进生产工艺,还能提升钢材质量与性能,满足不同领域对钢材的严苛要求,为钢铁行业稳健发展筑牢根基。

参考文献

- [1]张晔宁.金相显微镜在钢材检测中实践应用[J].冶金与材料,2023,43(2):72-74.
- [2]赵铭.金相显微镜在钢材检测中实践应用[J].电脑爱好者(普及版)(电子刊),2022(10):577-578.
- [3]陈潇.钢材相似显微组织的分析与鉴别[J].冶金与材料,2022,42(1):145-146,148.
- [4]余泽利,房永强,杨军红,等.金相显微镜畸变的测量不确定度评定[J].计量学报,2023,44(11):1673-1679.
- [5]许祥霖,刘杰,李天庆.弧长修正系数对5052铝合金CMT焊接焊缝成形和金相显微组织的影响[J].精密成形工程,2026,18(3):105-114.