

桥梁钢结构材料及焊接质量检测与病害分析

任浩 毕俭耀 赵明月

华航检测认证(青岛)有限公司 山东 青岛 266000

摘要: 随着大跨度桥梁工程建设的快速发展,桥梁钢结构的质量管控与安全运维愈发关键。系统梳理了桥梁钢结构的常用材料类型、核心性能指标与选用原则,阐述了焊接质量检测的技术体系与规范流程,深入分析了钢结构及焊接接头的常见病害类型、成因与发展规律,为桥梁钢结构全生命周期的质量管控与病害防治提供了系统的技术参考与理论支撑。

关键词: 桥梁钢结构;焊接质量;无损检测;病害防控

引言:随着我国交通基础设施建设的持续升级,大跨度桥梁对结构承载能力与服役耐久性提出了更高要求。桥梁钢结构凭借高强度、高韧性、施工周期短等核心优势,已成为大跨度桥梁的主流结构形式。焊接作为钢结构加工安装的核心工序,其质量直接决定结构的安全储备与服役寿命。当前钢结构桥梁服役过程中,材料劣化、焊接病害等问题频发,亟须明确材料管控、质量检测与病害防控的核心技术要点,为工程实践提供系统支撑。

1 桥梁钢结构概述

桥梁钢结构是以钢材为核心受力构件的桥梁结构形式,凭借钢材各向同性、质地均匀的固有特性,其工作状态与计算图示假定高度契合,具备高强度、高刚度的核心优势,可有效减小梁高与结构自重。构件多采用工厂预制、工地拼接的模式,加工精度高且不受季节影响,能大幅缩短施工周期,同时便于后期检修、更换与回收利用;随着技术迭代,新型高强度钢材与耐候钢的应用不断普及,搭配先进防腐、防火工艺,有效改善了钢材易锈蚀、耐火性不足的短板;三维数字孪生模型等技术的融入,进一步优化了结构设计与性能验算,推动其向轻量化、绿色化、智能化方向发展,其优异的跨度适应性与结构韧性,使其成为大跨度桥梁的优选结构形式,兼顾了结构安全性、施工便捷性与长期耐久性^[1]。

2 桥梁钢结构材料基础

2.1 桥梁钢结构常用材料类型

桥梁钢结构常用材料类型以金属材质为核心,涵盖碳素结构钢、低合金高强度钢、不锈钢及耐候钢等类别。碳素结构钢因含碳量适中,具备良好的塑性与焊接性能,适用于受力均匀的构件制造;低合金高强度钢通过添加锰、钒等合金元素提升强度与韧性,在保证轻量化的同时增强承载能力;不锈钢凭借铬、镍等元素形成致密氧化膜,具

备优异耐腐蚀性,适用于潮湿或腐蚀性环境;耐候钢通过铜、磷等元素合金化,在自然气候中形成稳定保护层,减少维护成本。各类材料均需满足力学性能、加工工艺及耐久性要求,通过严格化学成分控制与热处理工艺优化,确保桥梁结构安全可靠与长期稳定。

2.2 桥梁钢结构材料核心性能

桥梁钢结构材料核心性能聚焦于力学特性与耐久性指标的平衡优化;强度表现为屈服强度与抗拉强度的协同作用,确保结构在极限荷载下不发生破坏;韧性通过冲击功与断裂韧性体现,保障材料在低温或冲击荷载下不易脆断;耐腐蚀性依赖合金元素配比与环境适应性,延缓锈蚀速率以延长使用寿命;焊接性能涵盖熔融金属流动性、热影响区硬度控制及焊缝抗裂性,直接影响施工效率与结构完整性。疲劳性能评估材料在循环荷载下的损伤累积规律,通过表面处理与残余应力调控提升抗疲劳寿命;各性能指标需通过标准化试验验证,结合材料微观组织分析与工艺优化,实现桥梁结构在复杂工况下的安全可靠与性能稳定^[2]。

2.3 桥梁钢结构材料选用原则

桥梁钢结构材料选用需综合平衡力学性能、耐久性 & 环境适应性。强度需与设计荷载精准匹配,避免过度保守或不足导致材料浪费或结构风险;韧性应适应温度变化与冲击荷载,通过低温冲击试验验证脆性转变温度,防止低温脆断;耐腐蚀性需结合环境湿度、盐分及污染物浓度,选择合金元素配比,延缓锈蚀速率;焊接性能需确保焊缝强度与母材等强匹配,控制热输入以减少热影响区脆化;疲劳性能需评估荷载循环次数与应力幅,通过表面喷丸强化或残余压应力调控提升抗疲劳寿命。各项原则需通过试验验证与理论分析,实现材料性能与结构需求的高度契合,保障桥梁长期安全可靠。

2.4 桥梁钢结构材料性能影响因素

桥梁钢结构材料性能受化学成分、加工工艺、环境条件及表面处理等多重因素协同调控。化学成分中,碳含量直接影响硬度与焊接性,锰、钒等合金元素可提升强度与韧性;加工工艺通过热轧、冷轧及热处理优化微观组织,热处理能细化晶粒增强力学性能,冷轧则提高表面光洁度与尺寸精度。环境条件方面,温度波动引发热胀冷缩应力,高温加速蠕变进程;湿度超标促进电化学腐蚀,腐蚀介质加速锈蚀速率。表面处理如喷丸强化引入残余压应力,提升抗疲劳性能;涂层防护形成物理屏障,延缓锈蚀扩展。各类因素需通过试验验证与理论分析实现精准调控,确保材料在复杂工况下保持安全稳定与长期耐久性,满足桥梁结构高性能需求。

3 桥梁钢结构焊接质量检测技术

3.1 焊接质量检测基本要求

焊接质量检测需立足科学性与系统性双重维度,检测方法应依据焊缝类型、材料特性及环境条件动态匹配,如超声检测凭借声波反射特性精准捕捉内部缺陷,磁粉检测通过磁场变化灵敏识别表面裂纹;检测人员须通过专业考核与持续培训保持技能领先,确保操作规范与结果解读精准;检测设备需建立定期校准与维护机制,保障精度稳定可靠;检测环境需严格调控温湿度及振动因素,避免环境干扰导致结果偏差;检测数据需实现全流程记录与可追溯管理,通过多维度数据交叉验证焊缝质量等级。各环节需严格遵循技术规范与标准流程,形成检测过程标准化、结果可靠化的闭环体系,最终保障桥梁钢结构焊接质量满足安全耐久核心需求,为结构长期稳定运行奠定坚实基础^[3]。

3.2 外观检测技术

外观检测以目视检查为核心手段,需在充足均匀光照条件下全面观察焊缝表面形态,精准识别咬边、气孔、裂纹、未熔合等典型缺陷类型;焊缝尺寸需通过焊缝尺、卡尺等专业量具精确测量,确保余高、宽度、坡口角度等参数严格符合设计规范;表面清洁度要求无油污、锈蚀、焊渣残留,避免掩盖潜在缺陷影响检测准确性;检测人员需经过系统专业培训,掌握缺陷特征识别与等级判定标准,形成标准化操作能力;检测过程需详细记录缺陷位置、类型、尺寸及分布情况,形成完整可追溯的质量档案。通过目视与量具双验证模式,确保焊缝外观质量满足结构安全与耐久性要求,为后续无损检测提供可靠基础依据,形成外观与内部检测的有机衔接。

3.3 无损检测技术

无损检测通过非破坏性手段实现焊缝内部质量评估,超声波检测利用高频声波在介质中的反射特性,精

准识别厚板焊缝内部气孔、夹杂及裂纹缺陷,通过声波传播时间与幅度变化定位缺陷位置与尺寸。射线检测采用X射线或 γ 射线穿透焊缝成像,直观显示未焊透、熔合不良等内部结构缺陷,形成可视化缺陷图像;磁粉检测基于铁磁性材料磁场特性,通过磁场吸附磁粉显示表面及近表面裂纹,灵敏捕捉细微缺陷;涡流检测利用电磁感应原理分析焊缝导电性能变化,识别表面及亚表面缺陷。各技术需结合材料特性、焊缝类型及检测需求综合选用,通过标准化操作与数据分析确保检测结果准确可靠,形成多技术协同的焊缝质量评估体系,为桥梁钢结构焊接质量提供科学依据。

3.4 焊接质量检测流程

焊接质量检测需构建系统化操作流程,检测前需全面确认焊缝类型、材料特性及环境条件,制定针对性检测方案。外观检测作为首道工序,通过目视与量具验证焊缝尺寸精度及表面缺陷状态,形成初步质量判断;随后开展无损检测环节,根据焊缝特性选择超声、射线或磁粉等技术,识别内部及表面隐蔽缺陷;检测数据需实时记录并标注位置、类型、尺寸等信息,形成完整可追溯的质量档案;最终通过多维度数据综合分析评估焊缝质量等级,判定是否符合设计规范与安全耐久要求。各环节需严格把控操作标准与数据精度,形成检测流程科学严谨、结果可靠的闭环管理体系,为桥梁钢结构焊接质量提供可靠保障,确保结构长期稳定运行^[4]。

3.5 焊接质量检测结果判定

焊接质量检测结果判定需基于缺陷类型、尺寸、位置及分布特征进行量化评估,缺陷按严重程度分为允许存在、需修复、不可接受三类,如气孔、夹渣需根据直径、数量及分布密度判定是否超标;裂纹、未熔合等危害性缺陷无论尺寸大小均视为不可接受,需彻底清除并重新焊接;判定依据需结合设计规范、材料特性及检测数据,通过多维度分析确保结果客观准确;最终判定结论需明确焊缝质量等级,如合格、修复后合格或不合格,形成清晰的质量判定标准。判定过程需严格遵循技术标准与数据分析规范,避免主观判断影响结果准确性,保障检测结果的科学性与权威性,为桥梁钢结构施工质量控制提供直接依据,确保结构安全耐久性满足设计要求。

4 桥梁钢结构及焊接病害分析

4.1 钢结构材料常见病害类型

钢结构材料病害以腐蚀、疲劳损伤及变形为核心表现形态。腐蚀多因环境介质侵蚀引发,如沿海区域高浓度氯离子渗透导致局部点蚀,或工业氛围中硫、氮化合物加速

均匀减薄；其发生程度与湿度、盐分分布及污染物浓度呈正相关，需通过电化学检测与表面形貌分析精准评估。疲劳损伤源于重复荷载作用，在焊缝、螺栓连接等应力集中区域形成微观裂纹并逐步扩展，最终引发脆性断裂；其发展速率受荷载频率、应力幅值及材料疲劳极限共同影响，需结合应力谱分析与断口形貌观察追溯成因。变形则由制造误差、荷载超限或温度效应诱发，如焊接残余应力导致局部屈曲，高温蠕变引发长期塑性变形；需通过三维扫描与应变监测量化变形程度，为结构安全性评估提供依据，保障桥梁全生命周期耐久性。

4.2 焊接接头常见病害类型

焊接接头病害以裂纹、气孔、未熔合及夹渣为主要表现形式。裂纹沿焊缝或热影响区扩展，分为热裂纹与冷裂纹两类：热裂纹由高温晶界弱化引发，多见于焊缝金属凝固后期，与硫、磷等低熔点杂质含量相关；冷裂纹则因氢扩散、应力集中及淬硬组织共同作用，常在焊接后数小时至数周内萌生，需通过氢含量检测与残余应力测试分析成因。气孔因熔池气体未完全溢出形成，呈球形或链状分布，降低焊缝致密性；其产生与焊接参数设置、保护气体纯度及操作环境湿度相关，需通过射线检测与金相观察识别。未熔合表现为母材与焊缝金属间未完全熔合，或焊道间存在层状未融合，削弱结构整体性；其发生与焊接电流过小、焊接速度过快或操作技能不足相关，需通过超声检测与宏观检验判定。夹渣由熔渣残留或非金属夹杂物形成，呈片状或条状分布，影响焊缝力学性能；其形成与焊材质量、焊接工艺及清理工艺相关，需通过金相分析与能谱检测追溯来源，保障焊接接头安全可靠^[5]。

4.3 病害产生的主要原因

病害产生涉及材料、工艺、环境及荷载多维度协同作用。材料层面，母材或焊材化学成分偏差、杂质含量超标会降低焊接性能，如硫、磷元素过高引发热裂纹，需通过光谱分析与材料认证确保成分合规性。工艺层面，焊接参数设置不当如电流过大导致热影响区晶粒粗化，操作技能不足如焊缝成型不良引发应力集中，或焊接顺序不合理如局部过热引发变形，均需通过工艺评定与操作培训优化工艺流程。环境因素中，温度波动引发热胀冷缩应力，湿度超标导致氢致冷裂纹，腐蚀介质加速锈蚀进程，需通过环境监测与防护涂层设计降低环境

影响。荷载方面，超设计荷载或循环荷载作用引发疲劳裂纹扩展，长期振动导致焊缝疲劳损伤累积，需通过荷载监测与结构健康监测动态评估荷载效应，从源头降低病害发生风险，保障结构安全耐久性。

4.4 病害发展规律分析

病害发展呈现阶段性特征与多因素耦合效应。初始阶段，微小缺陷如点蚀、微裂纹在环境侵蚀或循环荷载下缓慢扩展，此阶段发展速率受材料均匀性、应力水平及环境介质影响显著，需通过定期检测与应力监测动态追踪缺陷演变。中期阶段，缺陷加速扩展形成宏观裂纹或局部腐蚀坑，如疲劳裂纹在应力集中区快速延伸，腐蚀产物堆积加剧电化学腐蚀速率，此阶段需通过无损检测与腐蚀速率测试量化缺陷尺寸，结合材料性能退化模型预测发展趋势。后期阶段，结构承载能力显著下降，可能出现脆性断裂、局部屈曲或大面积锈蚀穿孔，此阶段失效模式与缺陷类型、材料韧性及荷载特性直接相关，需通过荷载试验与有限元分析评估结构剩余寿命，为提前干预与维修决策提供科学依据，保障桥梁结构安全耐久性。

结束语：桥梁钢结构的服役安全与长期耐久性，依赖于材料性能的精准管控、焊接质量的全过程检测与病害的全周期防控。通过优化材料选用体系、规范焊接检测全流程、明确病害演化规律与成因，可有效提升钢结构桥梁的结构稳定性与服役寿命。未来需结合新型高性能材料与智能化检测技术，进一步完善钢结构桥梁全生命周期质量管控体系，助力交通基础设施的高质量、可持续发展。

参考文献

- [1]冯文.铁路桥梁钢结构焊接质量控制技术研究[J].中国品牌与防伪,2025(2):71-73.
- [2]唐杰.桥梁常用钢材原材料试验检测要点及质量控制措施研究[J].运输经理世界,2025(16):96-98.
- [3]梁向宇.桥梁钢结构节点二氧化碳气体保护焊焊接技术研究[J].工程机械与维修,2025(9):55-57.
- [4]姚云生,王松叶.钢结构桥梁无损检测及加固技术研究[J].交通节能与环保,2025,21(2):206-209.
- [5]张晓彬.无损检测在钢结构焊接质量控制中的应用[J].机械工程与自动化,2025,54(5):151-153.