

钢桁梁桥高强螺栓施工质量控制

曹 浩 李 鹏

陕西煤业化工建设(集团)有限公司路桥分公司 陕西 西安 710021

摘 要: 高强螺栓连接是钢桁梁桥核心受力构造,其施工质量直接决定桥梁结构稳定性与服役寿命。本文依托现行路桥施工规范,阐述高强螺栓连接工作机理与施工技术标准,从材料、设备、人员、环境四方面剖析质量影响因素,梳理施工全流程质控要点,总结欠拧、滑移等常见质量缺陷及成因,制定针对性防控整改措施,构建长效质控体系,为钢桁梁桥高强螺栓标准化施工提供技术参考。

关键词: 钢桁梁桥; 高强螺栓; 施工质量控制

引言: 钢桁梁桥凭借跨度大、承载力强、结构轻便的优势,广泛应用于公路与铁路交通工程中。高强螺栓连接作为桥梁节点的关键连接形式,承担着传递结构荷载、均匀分散节点应力的重要作用。当前施工中易受工艺、环境、操作等多重因素影响,频发各类质量缺陷,埋下结构安全隐患。为规范施工流程、把控施工质量,本文系统性开展高强螺栓施工质量控制研究,助力提升钢桁梁桥施工安全性与耐久性。

1 钢桁梁桥高强螺栓施工基础理论与技术要求

1.1 高强螺栓连接工作机理

(1) 摩擦型与承压型高强螺栓受力原理差异。摩擦型螺栓依靠被连接板件间的摩擦力传递荷载,允许板件间相对滑移,以摩擦面抗滑移系数及预拉力为核心指标;承压型螺栓则兼有摩擦传力和螺杆孔壁承压、螺杆抗剪的传力途径,极限承载力更高,但变形较大,不宜承受动力荷载。(2) 螺栓预紧力传递及钢桁梁节点受力特性。施加扭矩使螺杆弹性伸长,通过螺母将预紧力传递给被连接板,使板间产生正压力;预拉力在节点内沿拼接板、节点板路径均匀扩散,形成整体摩擦传力体系,有效降低应力集中。(3) 扭矩系数与预拉力的关联控制机理。扭矩 T 与预拉力 P 满足关系 $T=K \cdot D \cdot P$ (K 为扭矩系数, D 为螺栓公称直径), K 值受螺纹摩擦、支承面摩擦及垫圈状态综合影响,必须通过轴力计标定,严格控制 K 值的标准差,保证预拉力可控。

1.2 高强螺栓施工规范与技术标准

(1) 公路、铁路钢桁梁桥高强螺栓施工现行规范。主要依据《公路桥涵施工技术规范》(JTG/T3650)、《铁路钢桥制造规

范》(Q/CR9211)及《钢结构高强度螺栓连接技术规程》(JGJ82),对扭矩法、转角法施拧及终拧检测作出明确规定。(2) 螺栓材质、规格及连接副配套技术要求。采用高强度螺栓连接副(螺栓、螺母、垫圈)应同批配套供应,材质一般为20MnTiB或35VB,性能等级10.9S或8.8S,规格、长度、丝扣须与设计匹配。(3) 施工环境及工序合规性标准。施拧环境温度宜为 $-5^{\circ}\text{C} \sim +35^{\circ}\text{C}$,相对湿度不大于85%,雨天、雪天禁止露天施拧;工序须经初拧、复拧、终拧三个阶段,终拧后24小时内完成扭矩检测^[1]。

1.3 钢桁梁桥高强螺栓施工质量影响因素

(1) 材料因素:螺栓、垫圈、螺母质量及摩擦面性能。螺栓表面缺陷、硬度不均、垫圈倾斜、螺母内螺纹粗糙直接影响扭矩系数稳定性;摩擦面除锈等级、粗糙度及抗滑移系数不达标会严重削弱承载力。(2) 设备因素:施拧机具、检测设备精度影响。电动扭矩扳手、手动扭矩扳手须定期标定,扭矩偏差超过 $\pm 5\%$ 严禁使用;轴力计、扭矩检测仪精度不足会导致预拉力误判。(3) 人为因素:施工操作、技术交底及质检专业水平。操作人员未按初拧、终拧顺序执行,或技术交底不到位、质检人员读数记录不规范,均易引发欠拧、超拧或漏拧等质量缺陷。(4) 环境因素:温湿度、雨雪天气对施工质量的影响。高温使螺栓伸长、预拉力下降,低温使摩擦面凝霜、扭矩系数异常增大;高湿及雨雪天气加速螺栓及摩擦面锈蚀,直接降低连接可靠性。

2 钢桁梁桥高强螺栓施工全过程质量控制要点

2.1 施工前期质量控制

(1) 高强螺栓连接副进场验收、复检及储存管理。连接副进场后应核验出厂质量证明文件,包括扭矩系数

检验报告、轴力试验记录及材质合格证,并按批次进行外观尺寸、螺纹精度、表面缺陷及硬度检查。复检须随机抽取不少于8套连接副,在轴力计上实测扭矩系数和预拉力,其结果应满足设计及《钢结构高强度螺栓连接技术规程》要求,扭矩系数平均值与标准偏差须控制在允许范围内。储存时须分类码放于干燥通风的库房内,垫高防潮,避免油污、锈蚀及螺纹损伤;领用执行先进先出原则,开箱后应及时使用,剩余件须重新密封存放。(2)钢桁梁节点摩擦面处理及抗滑移系数检测。摩擦面应采用喷砂或抛丸工艺处理,除锈等级达到Sa2½级,粗糙度宜控制在50~100μm,表面不得有氧化皮、油污、灰尘或水渍。抗滑移系数检测应按每2000吨钢材或每批次制作不少于3组试件,试件与构件同材质、同处理工艺,并在现场环境下进行实测,系数平均值不得低于设计值(一般≥0.45),且单组最小值不低于设计值的90%。检测时需记录环境温湿度,确保摩擦面处于干燥状态^[2]。(3)施拧设备标定、调试及施工方案技术交底。电动扭矩扳手、手动扭矩扳手及检测用扭矩扳手均须在有效标定期内,标定误差不得超过±3%;施拧前应进行空载试运行和扭矩复核,确保机具稳定。施工方案应明确初拧、复拧、终拧各级扭矩值、施拧顺序及检测方法,并制定异常情况处置预案。技术交底须逐级落实到每个操作人员,详细讲解机具使用、标记方法、拧紧节奏及安全注意事项,并留存书面及影像记录。

2.2 施工中期工序质量控制

(1)螺栓对位、穿装施工精度控制要求。穿装前应清理节点板孔边毛刺、焊渣及铁屑,确保孔群洁净;螺栓穿入时应自由对位,严禁强行锤击或撬动穿入,以免损伤螺纹或板孔。穿装方向应全节点统一,螺栓头及垫圈方向须符合设计要求;若遇孔群错位,应采用铰刀修整,扩孔直径不得超过设计孔径的1.2倍,且绝对禁止使用气割扩孔,修整后需清除金属碎屑。(2)初拧、复拧、终拧分级施工工艺及质控标准。初拧扭矩取终拧扭矩的50%,复拧扭矩与初拧相同,终拧可采用扭矩法或转角法。扭矩法施工时,终拧扭矩偏差应控制在±10%以内;转角法须在初拧后准确标记起始零线,按设计转角(通常为60°~120°)施拧,实际转角偏差不得超过±5°。每级施拧后均应用敲击法或色标法逐套检查,确保无漏拧、欠拧,并做好标记转换,防止混淆^[3]。(3)钢桁梁节点螺栓施拧顺序与对称施工控制要点。施拧应严格遵循“从节点中心向四周扩散、对称交叉施拧”的原则,防止板束单侧受力产生翘曲变形,导致预拉力分布不均。对于大型节点,宜划分多个施拧小组同步对称作

业,每组按既定顺序负责各自区域;每日收工前应对已拧螺栓进行统一颜色标识,并记录施拧进度,避免次日重复或遗漏。

2.3 施工后期验收质量控制

(1)高强螺栓施工外观质量检查标准。终拧完成后应对全部螺栓进行目视检查,确认螺栓头、螺母及垫圈无裂纹、滑丝或机械损伤,外露螺纹应保持2~3扣完整丝扣。螺栓头与垫圈、垫圈与板面应密贴,采用0.3mm塞尺进行抽查,塞入深度不大于20mm即为合格;同时检查终拧标记线是否整齐连续,无异常错位或偏移^[4]。(2)扭矩、预拉力抽样检测及合规性判定。终拧后48小时内完成扭矩抽检,抽检比例不少于节点螺栓总数的5%且不少于10套。扭矩法检测时,实测扭矩值与设计终拧扭矩偏差应不超过±10%;转角法检测时,实测转角与设计转角偏差不得超过±5°。若发现不合格,应加倍抽检该节点;若仍不合格,则须对该节点全部螺栓重新初拧、复拧和终拧,并再次检测,直至全部合格。(3)施工资料整理、报验流程质量管控。施工过程中应同步记录每批螺栓进场复检报告、摩擦面抗滑移系数试验结果、施拧扭矩原始记录、检测数据及不合格品处理记录。竣工资料须按单位工程分类组卷,涵盖施工方案、技术交底、设备标定证书、隐蔽工程验收单及影像资料等,严格履行“自检、互检、专检”三检制,经监理工程师签认后归档,确保施工全过程质量可追溯、责任可落实。

3 钢桁梁桥高强螺栓施工常见质量缺陷分析及防控措施

3.1 高强螺栓施工常见质量缺陷类型

(1)欠拧、超拧、漏拧等施拧工艺缺陷。欠拧导致预拉力不足,节点摩擦传力能力低下;超拧易使螺杆颈缩甚至断裂,或在螺纹处产生疲劳裂纹;漏拧则完全丧失连接功能,尤其在大型节点中易发生在隐蔽部位或施拧顺序末端,严重影响节点整体受力均匀性。(2)螺栓丝扣损伤、锈蚀、垫圈错位等安装缺陷。穿装时强行锤击或孔群对位偏差造成丝扣刮伤、乱扣;存放不当或施工周期长导致螺栓表面浮锈;垫圈倒角方向装反、倾斜或偏位,使预拉力传递路径改变,螺杆产生附加弯矩,削弱连接副实际承载能力。(3)摩擦面滑移、节点连接松动等结构性缺陷。摩擦面油污、浮锈或抗滑移系数不足,在运营荷载作用下板间发生相对滑移变形;螺栓预拉力因垫圈蠕变、温度变化或振动荷载逐渐松弛,造成节点板束缝隙增大,整体刚度下降,严重时引发结构异常振动。

3.2 质量缺陷成因深度分析

(1) 材料不合格及储存养护不当引发的缺陷。部分连接副出厂扭矩系数离散性大、硬度偏低或表面脱碳, 不满足 10.9S 级性能要求; 进场复检抽样不规范或检测项目缺项, 未能剔除不合格批次; 仓储时未按批号分区、垫高防潮, 致使螺栓受潮锈蚀、润滑膜失效, 直接干扰扭矩-预拉力转换关系的稳定性。(2) 施工工艺不规范、机具精度不足导致的问题。操作人员擅自省略复拧工序或将初拧扭矩随意提高, 破坏分级施拧的力学合理性; 电动扳手长期未进行扭矩标定, 实际输出偏差超过 $\pm 5\%$; 施拧未遵循“中心向外、对称交叉”的顺序原则, 造成板束单侧受压变形, 相邻螺栓相互影响, 终拧后预拉力离散率成倍增长。(3) 检测流程不严谨、质量管控体系不完善造成的隐患。扭矩抽检比例不足, 或仅选择节点外围易检测部位而忽略核心区域; 检测人员读数方法错误、未按标准进行温度修正; 对于不合格数据缺乏闭环追溯机制, 质量问题被简单掩盖, 无法从源头杜绝同类缺陷重复发生。

3.3 针对性质量防控与整改措施

(1) 原材料全过程管控及进场复检强化措施。严格执行“先检后用”原则, 每批连接副均进行扭矩系数和预拉力复检, 不合格批次全数退回; 仓储实行分区定置管理, 设置温湿度监控, 使用前逐套检查螺纹及垫圈状态, 确保安装材料零缺陷。(2) 标准化施工工艺落地及现场动态管控方法。编制图文并茂的施工作业指导书, 将终拧扭矩值、转角值、施拧顺序图标注于现场展板; 每台扳手配备扭矩实时显示屏, 施拧数据同步记录; 设专职质检员全程旁站, 对每颗螺栓初、复、终拧三道标记进行颜色区分并拍照存档。(3) 缺陷问题返工整改流程及闭环管控机制。发现欠拧、超拧或漏拧后, 立即对该节点全部螺栓拆卸并重新更换新连接副, 从初拧开始重新施工; 对摩擦面滑移节点, 需拆解清理摩擦面并重新处理至抗滑移系数达标后方可组装施拧; 所有返工过程均需留存文字记录及影像资料, 经监理确认后闭合整改档案^[5]。

3.4 施工质量长效管控体系构建

(1) 施工人员专项培训与技术考核机制。上岗前组织理论考试与实际操作考核, 涵盖扭矩系数原理、机具操作规范及缺陷识别技能, 合格后方可持证上岗; 每季度开展技能复训与案例复盘, 持续提升人员质量意识与操作水平。(2) 施工全过程精细化、常态化质检体系。建立“班组自检、工序互检、专职专检”三级质检制度, 制定标准化检查清单, 每道工序完成后必须签认方可转入下道; 配置独立检测小组, 实施随机抽查与重点节点全检相结合的检测模式, 确保质量监管无盲区。(3) 恶劣环境施工专项质保保障方案。遇雨雪、大风或相对湿度 $> 85\%$ 天气时, 立即停止露天施拧作业, 对已施工部位采取防水布覆盖保护; 气温低于 -5°C 时搭建保温棚并辅以局部加热措施, 确保作业面温度满足规范要求; 高温季节将施拧时段调整至早晚低温段, 并加密扭矩系数现场校核频次, 全力保障极端工况下施工质量稳定性。

结束语

高强螺栓施工质量控制是钢桁梁桥工程建设的核心环节, 贯穿施工前期、中期、后期全流程。本文通过梳理施工技术要求, 明确各工序质控重点, 分析典型质量缺陷成因并提出防控对策, 搭建了全方位的施工质控体系。唯有严格落实材料管控、标准化施工、精细化检测及长效管理机制, 才能有效规避施工隐患, 保障钢桁梁桥节点连接质量, 为桥梁长期安全稳定运营筑牢基础。

参考文献

- [1] 刘军, 王浩宇. 大跨度钢桁梁桥高强螺栓施工质量控制关键技术 [J]. 桥梁建设, 2023, 53(04): 112-118.
- [2] 陈明, 李阳. 钢桁梁高强螺栓预紧力衰减机理及施工管控对策 [J]. 铁道建筑, 2024, 64(02): 245-249.
- [3] 谢海波, 朱玮峻, 张璧. 钢桥高强螺栓施工缺陷智能检测与质量评价方法 [J]. 中外公路, 2024, 44(04): 171-176.
- [4] 赵鑫. 复杂工况下钢桁梁桥高强螺栓施拧工艺优化研究 [J]. 施工技术, 2022, 51(20): 98-102.
- [5] 周凯. 钢桁梁桥高强螺栓连接施工质量通病及防控措施 [J]. 工程质量, 2025, 33(05): 156-160.