

钢结构桥梁焊接变形控制与校正工艺研究

左 磊

中交路桥建设有限公司钢结构分公司 北京 101100

摘 要：钢结构桥梁因自重轻、跨越能力强、施工周期短而广泛应用于大跨度工程，焊接作为其核心连接方式，在局部高温热循环作用下不可避免地产生残余应力与焊接变形。变形问题直接影响桥梁的几何线形、安装精度、结构承载力和耐久性，尤其在厚板、高强度及复杂截面构件中更为突出。本文系统分析了钢结构桥梁焊接变形的类型及其热-力学机理，从材料、结构、工艺和约束四个方面梳理了关键影响因素，进而提出涵盖设计预防、焊前准备、工艺优化和过程监控的全过程变形控制策略，并详细论述了火焰校正、机械校正及热-机械联合校正等工艺方法及其适用条件。研究认为，焊接变形治理应构建“防控为主、校正为辅”的层级化工艺体系，将控制措施前置设计与准备阶段，校正作为必要补救手段，以实现几何精度与结构性能的协同保障。

关键词：钢结构桥梁；焊接变形；变形控制；火焰校正；工艺优化

引言

钢结构桥梁因高强度重量比及工厂化优势成为交通基建主流。焊接技术虽提升连接效率，但其局部快速热循环导致非均匀温度场与塑性变形，冷却后产生残余应力及宏观变形。针对主梁、横隔板等构件，焊接易引发翼缘角变形、腹板波浪度超标及轴线偏移，降低安装精度，改变初始受力状态并削弱疲劳抗力。随着跨度增大、板厚增加及高强度（如 Q420q、Q500q）广泛应用，材料淬硬倾向和热输入敏感性增强，控制难度加剧。传统施工依赖工人经验进行事后校正，缺乏系统规划，效率低且易引入材料损伤或新应力。因此，亟需从焊接变形物理本质出发，建立贯穿设计、制造和安装全过程的控制与校正技术体系，以解决当前管理困境，保障结构安全与质量。

1 钢结构桥梁焊接变形的类型与机理

1.1 焊接变形的典型形态

钢桥构件以板单元和型钢组合为主，焊缝形式涵盖对接、角接和 T 形接头，焊缝长度大、板厚差异显著。常见的焊接变形可归纳为六类：纵向收缩变形，即沿焊缝轴线方向的缩短，对长构件影响尤为突出；横向收缩变形，垂直于焊缝方向的压缩，是引起板件错边和间隙变化的主因；角变形，因厚度方向温度分布不均导致板件绕焊缝轴线转动，常见于单面坡口对接和角焊缝；弯曲变形，当焊缝位于构件中性轴一侧时，偏心收缩引起整体弯曲，如工字形梁翼缘与腹板焊接后的旁弯；扭曲变形，由焊缝顺序不当或不对称加热导致绕纵轴的扭

转，修正难度最大；波浪变形，薄腹板在纵向压缩应力作用下失稳形成的凹凸起伏，影响外观和局部稳定性。不同桥型（板梁桥、箱梁桥、桁架桥）对各类变形的敏感程度不同，但均需以制造验收规范（如《铁路钢桥制造规范》Q/CR9211）的允许偏差为控制目标。

1.2 变形产生的热-力学机理

焊接变形的根源在于热输入的非均匀性和材料热-力学行为的耦合。焊接热源移动时，局部金属迅速升温至熔点以上，周围区域则形成陡峭的温度梯度。高温区材料因膨胀受周围冷态金属的约束而产生压缩塑性应变；冷却过程中，熔化金属凝固收缩，且高温区固相冷却收缩受到已凝固焊缝和母材的制约，最终在焊缝及热影响区形成残余拉伸应力，而远离焊缝区域则产生压缩残余应力。这一残余应力场的不平衡即产生宏观变形^[1]。从力学本质上讲，变形是构件内塑性应变累积的空间分布不均造成的，其大小取决于热循环峰值温度、高温停留时间、冷却速率以及材料的屈服应力和热膨胀系数。对于相变强化钢，固态相变引起的体积变化也会干预残余应力的形成，使变形规律更为复杂。

2 焊接变形的主要影响因素

2.1 材料特性因素

母材和填充金属的热物理性能直接决定温度场分布和塑性应变累积。热膨胀系数高的钢材在相同温升下产生更大的膨胀应变，增大收缩量；导热系数影响热扩散速度，导热慢则热量集中，加剧温度梯度。此外，钢材的屈服强度随温度升高而降低的幅度、高温蠕变行为以

及马氏体相变起始温度,均会影响压缩塑性应变的形成与回复。高强度桥梁钢往往具有较高的淬透性,冷却时相变体积效应显著,若相变与热收缩叠加,可能改变最终变形趋势。

2.2 结构刚度与焊缝布置

构件自身刚度是抵抗变形的内在能力。板厚越大、加劲肋布置越密、截面惯性矩越大,则约束越强,焊接变形量相应减小。然而,刚度增大同时意味着内应力水平升高,可能增加层状撕裂风险。焊缝的数量、长度、位置和分布形式对变形累积效应影响显著。密集平行的纵向加劲肋焊缝会叠加横向收缩,导致翼缘板严重角变形;不对称的焊缝布置(如仅在单侧施焊)容易产生弯曲变形。设计时若忽视焊缝对称性原则,即使工艺参数合理,变形仍难以控制。

2.3 焊接工艺参数与方法

焊接热输入量(单位长度焊缝输入的热能)是核心影响指标,热输入越大,高温区宽度和峰值温度越高,塑性区范围扩大,收缩变形加剧。具体参数包括焊接电流、电弧电压和焊接速度,三者共同决定线能量^[2]。此外,多层多道焊时层间温度的控制直接影响热循环累积效应,层间温度过高相当于增加等效热输入,增大变形。焊接方法(埋弧焊、气体保护焊、药芯焊丝电弧焊等)因其能量密度和加热效率不同,对变形的倾向亦有差异,例如埋弧焊热输入大但熔深大,可能减少道数,需综合权衡。

2.4 外部约束与装配条件

焊接夹具的刚性和定位焊的强度会约束焊件的自由变形,从而影响最终残余变形量。刚性固定虽能减少角变形和波浪变形,但增大了残余应力,可能引发冷裂纹。装配间隙不均匀或错边,会改变焊缝截面积和热输入实际分布,导致变形方向不可预测。预弯或预垫的反变形措施,其预设量需与构件实际刚度匹配,否则效果适得其反。

3 焊接变形的全过程控制策略

3.1 设计阶段的预先防控

变形控制应向前延伸至设计端。优化焊缝布置时,应优先采用双面对称坡口代替单面大坡口,使厚度方向的加热趋于对称,减少角变形。对于多道纵向加劲肋,宜采用间断焊缝或减小焊脚尺寸以降低总热输入量。在满足受力要求的前提下,合理选择板厚匹配和接头形式,避免厚度突变引发拘束度过高。此外,设计阶段应明确反变形预置量,并在施工图上标注,为制造提供依据。

3.2 焊前准备与反变形措施

反变形法是最有效的主动控制手段,即在组装时对构件施加与焊接变形方向相反的初始变形,使焊后变形相互抵消。反变形量需根据同类工艺试验或经验公式确定,并考虑弹性回弹。刚性固定法通过临时加强板、压重或夹具限制构件位移,适用于厚度较小、易发生波浪变形的腹板焊接,但需注意固定解除后可能产生回弹变形,故常与反变形联合使用。预热与后热控制,适当的预热能降低温度梯度,减缓冷却速度,使塑性应变分布更为均匀,但预热范围不宜过大以免增加热累积,层间温度应严格控制在工艺评定限值内。

3.3 焊接工艺参数的优化

降低热输入是控制变形的核心方向,但需兼顾熔透性和生产效率。在保证焊缝成形和质量前提下,优先选用较小的焊接电流和较高的焊接速度。采用多层多道焊时,应采用窄焊道、薄焊层技术,每层厚度控制在3~5mm,避免采用大摆动或宽焊道。焊接顺序与方向的优化尤为关键:对于对称截面(如工形梁),应采用双焊枪对称施焊或分段交叉施焊;对于长直焊缝,采用分段退焊法(将焊缝分成若干段,每段从中间向两端焊接)可使收缩分布在多个区段而非集中一处;对于箱形梁,遵循“先内后外、先纵后横”的原则,并交替施焊以平衡热循环。

3.4 焊中动态监控与调整

实时监测焊接过程中的变形趋势可及时干预。采用激光位移传感器或应变片监测关键测点的位移变化,当变形超预警值时,可暂停焊接,调整后续焊接顺序或增加临时约束。自动化焊接设备因焊接速度和参数恒定,可减少人为操作变异性,有利于变形一致性控制^[3]。同时,应记录每道焊缝的工艺参数,建立可追溯的工艺档案,为后续同类构件参数调优提供数据基础。

4 焊接变形的校正工艺

即便采取周密的控制措施,钢桥构件仍可能因制造公差或意外因素产生超标变形,需进行校正。校正工艺应遵循“不损害材料性能、不降低疲劳强度、不引入新裂纹”的原则,依据变形类型、程度和构件刚度选择合适方法。

4.1 火焰校正法

火焰校正利用局部加热产生的热压缩塑性变形来矫正原有变形,是最常用且适应性强的方法。其原理为:用氧-乙炔或氧-丙烷火焰在变形部位的凸起侧或需要收缩的区域进行局部加热,高温区材料膨胀受周围冷金属约

束而产生压缩塑性应变,冷却后该区域纤维长度缩短,从而产生收缩力,牵拉构件回正。根据变形形态,加热方式分为三种:点状加热适用于薄板的波浪变形,按梅花形布置加热点;线状加热适用于弯曲变形,在凸面沿直线或曲线加热,宽度和深度控制收缩量;三角形加热(或称楔形加热)适用于角变形或扭曲,加热区呈三角形,底部在变形最大侧,顶端指向中性轴,利用三角形区域的不均匀收缩实现扭转矫正。火焰校正的关键工艺参数包括加热温度(一般控制在 600~800℃,不超过相变温度 A_{c1} 以避免淬硬或过烧)、加热速度、加热区域尺寸、冷却方式(自然空冷或浇水强制冷却,后者可加大收缩效果但需谨慎用于高强钢以防脆化)。校正过程中需用水平尺、直尺或激光测量仪反复监测变形量,实行“少量多次”原则,避免过校。必须强调的是,火焰校正不适用于超低碳贝氏体钢或调质高强钢的大范围加热,因可能破坏其调质强化状态,应严格限制加热温度和次数,并在校正后进行硬度或金相抽检。

4.2 机械校正法

机械校正依靠外力使构件发生反向塑性变形来抵消焊接残余变形。常用工具包括液压千斤顶、压力机、撑杆或拉伸装置。对于工字形梁的翼缘角变形,可采用翼缘矫正机(通过滚压或挤压)使翼缘边缘产生塑性延伸,从而调平角度。对于整体弯曲的梁,可在支点间施加反向集中载荷,进行静力加压矫直。机械校正方法见效快、不涉及高温,但受限于构件形状和设备能力,且易产生局部压痕或冷作硬化,需控制加载位置和力值,防止失稳或屈曲^[4]。另一种方式为锤击校正,在加热后或冷却过程中用木锤或橡皮锤锤击收缩区,帮助释放应力和加速变形,但仅适用于薄板小变形。

4.3 热-机械联合校正

当单独使用火焰或机械方法效果不理想时,可联合使用。例如,在机械加压的同时对局部区域进行加热,降低材料屈服强度,使其更容易产生所需塑性变形,随后冷却定型。联合校正能提高效率,减少加热次数和外力幅值,尤其适用于厚板或高刚度构件的扭曲变形。需注意加热与外力的配合顺序,一般先施加部分外力,再加热,保持外力至冷却结束,以达到最佳矫正效果。

5 控制与校正工艺的系统集成

焊接变形管理不能将控制与校正视为相互独立的工序,而应建立集成化工艺体系。该体系由三个层级构

成:第一层级为预防层,涵盖设计优化、材料选择、反变形预设和工艺评定,目标是使焊接变形在源头上得到约束,确保绝大多数构件一次合格;第二层级为过程控制层,包括焊接参数监控、顺序执行和动态调整,属于制造中的实时干预,将变形控制在允许范围边缘;第三层级为校正层,仅对前两层未能完全达标的构件实施,作为质量补救措施。三者的权重分配应明确:预防与控制承担 90% 以上的变形管理任务,校正仅作为最后手段。过度依赖校正不仅增加人工和能耗成本,还可能降低结构可靠度。为此,制造厂应编制针对不同桥型的《焊接变形控制工艺手册》,将焊缝编号、顺序图、反变形量推荐值、加热规范等固化为标准化文件,并对焊工和校正工进行专项培训。此外,随着传感器和数字孪生技术的发展,未来可构建焊接变形在线预测与自适应控制系统,通过实时采集温度、应变数据驱动工艺参数自整定,进一步缩小变形离散性,提升校正工艺的针对性和效率。

6 结语

钢结构桥梁焊接变形治理需从“焊后被动修正”转向基于机理认知的全链条主动控制。本文分析了变形类型及热-力学机理,明确了设计、材料、工艺和约束的作用规律,提出了涵盖设计预防、反变形预设、参数优化及过程监控的前置控制策略,并阐述了火焰、机械及热-机械联合校正的原理与适用条件。核心观点主张构建层级分明、互为补充的控制与校正系统,坚持“防控为主、校正为辅”,通过工艺标准化与精准化实现几何精度与结构性能的协调统一。随着桥梁制造向智能化、数字化转型,应融入数值模拟预测、传感器实时反馈及机器学习参数优化等技术,打破经验依赖,推动控制与校正由定性走向定量。未来研究应关注高强钢及耐候钢的变形敏感性差异,以及多种校正工艺对疲劳性能的长远影响,为钢桥全寿命周期安全提供坚实工艺基础。

参考文献

- [1] 刘建平,陈浩. 高强钢厚板焊接变形控制技术研究进展 [J]. 焊接技术,2022,51(6):1-7.
- [2] 王立君,张海涛. 钢结构焊接残余应力与变形预测方法综述 [J]. 建筑结构学报,2023,44(2):215-223.
- [3] 赵明,孙伟. 火焰校正工艺参数对低合金钢力学性能的影响 [J]. 热加工工艺,2024,53(4):112-117.
- [4] 陈振华,李国栋. 桥梁钢箱梁焊接顺序优化及变形控制 [J]. 公路工程,2023,48(3):78-84.