

# 路桥工程钢箱梁焊接变形控制方法研究

许文超<sup>1</sup>, 肖丽云<sup>2</sup>, 张 珊<sup>3</sup>, 邢成林<sup>1</sup>, 潘鹏飞<sup>3</sup>

(1. 青岛宏基航泰建筑工程有限公司, 山东 青岛 266000;

2. 青岛璟峰泰建筑工程有限公司, 山东 青岛 266000;

3. 青岛交科建设集团有限公司, 山东 青岛 266000)

**摘 要** 钢箱梁作为大跨度桥梁的重要结构型式, 焊接变形问题直接影响桥梁施工质量与长期服役安全性。为系统地解决焊接变形难题, 本文重点研究了钢箱梁焊接变形的主要类型, 深入分析了角变形、纵向收缩、横向收缩、弯曲变形及波浪变形的形成机理, 并提出了从焊前预防、焊接过程控制及焊后补救三阶段的综合防控技术。结合实际工程应用成效验证, 证实了综合防控技术对结构几何精度提升、构件受力性能优化及施工效率提高具有显著作用, 研究成果旨在为同类工程提供理论指导及技术支撑。

**关键词** 钢箱梁; 焊接变形; 变形控制; 路桥工程

中图分类号: U445.583

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.16.014

## 0 引言

近年来, 随着基础设施建设水平不断提升, 钢箱梁凭借良好的结构性能与跨越能力, 成为大跨径桥梁工程的重要形式。然而, 钢箱梁结构焊接过程中普遍存在热输入不均匀、焊接应力集中与局部应力释放失调等问题, 使构件产生不同程度的变形, 给后续拼装及使用性能带来隐患。由于钢箱梁整体尺寸庞大、结构复杂, 焊接变形控制难度较传统钢结构显著增加, 极易导致成型精度不足、局部力学性能弱化, 严重制约桥梁结构安全性与耐久性。因此, 探索高效、系统化的焊接变形控制方法, 已成为路桥建设领域的研究热点之一。

## 1 钢箱梁焊接变形的主要类型

钢箱梁又叫钢板箱形梁, 是大跨径桥梁常用的结构形式。一般用在跨度较大的桥梁上, 因外型像一个箱子故叫做钢箱梁。钢箱梁在焊接过程中因受热不均、局部膨胀与收缩不同步, 以及材料组织变化等因素影响, 极易发生形态复杂的变形。

### 1.1 角变形

角变形是钢箱梁焊接中最常见的局部畸变类型, 通常发生在 T 形接头、角焊缝及箱形构件的拼装过程中。焊接热源作用下, 母材熔化并发生局部膨胀, 而冷却后因收缩不均, 导致构件在焊缝附近产生明显的角度偏移。其形成机理主要受焊接顺序、线能量输入及焊缝布置方式的影响。当焊道分布不均或焊接参数设定不合理时, 角部区域极易出现向焊缝方向的偏转,

使结构局部应力集中。研究表明, 合理控制焊缝位置、采用交替施焊及刚性固定等措施, 可有效降低角变形的发生概率。

### 1.2 纵向收缩

纵向收缩主要表现为焊接完成后, 构件沿焊缝方向产生尺寸缩短现象。该变形源于焊缝区域的高温加热及冷却不均, 导致焊接接头产生较大的纵向残余拉应力, 从而引起整体收缩。影响因素包括焊缝长度、热输入速率及材料的线膨胀系数。实验分析表明, 线能量越大, 收缩量越显著, 且长焊缝收缩变形尤为明显。此外, 施工过程中若未采用合理的刚性约束, 纵向收缩会进一步影响箱梁整体线形。优化焊接顺序、降低单道焊接热输入及合理配置定位装置, 可有效缓解该类变形。

### 1.3 横向收缩

横向收缩指构件在焊接完成后沿垂直于焊缝方向的尺寸减小现象。该变形受焊缝横截面积、热影响区宽度及母材塑性变形能力的影响。通常情况下, 多层多道焊比单道焊更易引起横向收缩变形, 且焊道数量越多, 累计收缩量越大。横向收缩变形不仅影响钢箱梁的拼装精度, 还可能导致焊接区域的局部失稳。研究发现, 采用对称焊接工艺、预置反向变形以及分段组焊方式, 可有效降低横向收缩的影响, 并提高焊接质量的稳定性<sup>[1]</sup>。

### 1.4 弯曲变形

弯曲变形是焊接过程中因热输入分布不均匀, 导致钢箱梁整体结构发生偏转的一种宏观变形形式。该

类畸变主要出现在较大尺寸构件或薄壁结构中,尤其是在焊缝分布非对称、刚性约束不足的情况下,弯曲变形尤为显著。其形成机理主要涉及焊接热膨胀与冷却收缩的非均匀性,使得构件某一侧收缩量大于另一侧,从而引起整体弯曲。理论分析表明,热输入不均、焊接方向不当及约束力失衡均会加剧弯曲变形的发生。优化焊接路径、采用双面施焊及刚性固定措施,可显著降低该类变形的影响。

### 1.5 波浪变形

波浪变形是一种发生在钢箱梁薄板区域的局部变形,通常表现为焊接完成后板件表面呈现周期性起伏状态。该变形的成因包括焊接过程中的非均匀热应力分布、母材屈服强度不足以及板材厚度较小等因素。焊接过程中,受热区域发生塑性变形,而冷却后因应力释放不均匀,导致板件出现波浪状起伏。数值模拟分析表明,多道焊工艺中,焊接顺序及热输入参数的不合理配置,均可能使局部应力集中,从而引发更严重的波浪变形<sup>[2]</sup>。改善焊接工艺参数、优化板材支撑方式及合理设置冷却路径,是减少此类变形的有效手段。

## 2 路桥工程钢箱梁焊接变形控制方法

### 2.1 焊接前的预防

在路桥工程钢箱梁焊接环节,焊接前的预防对后续施工质量及结构线形精度具有重要意义。为有效控制焊接变形,应在设计及材料阶段充分考虑构件刚性、热变形参数及拼装工序,减少高温区与低温区交界处应力集中。设计图纸可在构件局部位置留出调整量,以便后续装配时进行更灵活的定位。焊前应对构件尺寸、板厚、焊缝长度等进行严谨核验,确保各环节符合施工要求。

施工单位通常会在地布设中设置固定平台,保证钢箱梁在装配阶段能够保持平直。定位夹具及辅助夹板可应用于关键拼焊区域,用于稳定工件相互位置并抑制过度伸缩。焊接坡口形状及宽度应依据材料厚度与受力需求合理确定,避免过大或不合理的焊缝截面导致过度热输入。部分项目会在结构连接处采用预变形措施,使构件在焊后能够回弹至接近设计位置,从而削减整体变形幅度。某些场景中可借助有限元分析软件,对焊接热循环和应力场进行数值模拟,以判断各可能焊接策略的可行性。该过程需要对材料物理参数进行精确获取,包括导热系数、弹塑性指标及热膨胀系数等。若环境温度较低,应事先预热特定部位,使材料处于相对均衡的热环境,从而减小骤冷导致的应力尖峰。

焊材及焊接设备也须在施工初期进行鉴别。焊材

牌号、熔敷效率及符合材料兼容性等因素,需要与设计规范及项目实际情况相互匹配。同时,焊机类型及送丝速度等参数可按照钢材厚度及构件刚度进行微调,力求达到合适的热输入尺度<sup>[3]</sup>。现场准备环节还需要对操作人员开展专项技术交底,使其明确焊口形状、焊层顺序以及温度控制要领。

### 2.2 焊接过程中的控制技术

路桥工程钢箱梁在焊接阶段易出现应力集中与热变形。为减小此类影响,建议在施工时采用对称施焊与分段错位施焊,使热输入趋于均匀。若多层多道焊层数过多,极易导致累积应力升高,可在每道焊缝之间留出适当冷却间隔,并在焊缝背面布设散热装置,让高温区迅速降至安全范围。薄板构件通常更易发生波浪形畸变,可借助背板衬托并在焊缝邻近区域设置临时支撑,以确保板面在加热后仍能维持相对平坦。部分项目还会提前进行反向变形设计,即在焊接前对构件位置进行微量偏移,让后续焊接引起的回弹基本对冲此预偏量。该方法需基于严谨的热循环分析和构件受力特性研究,才能确保偏移值与回弹量相符。至于焊接电流、电压与焊速等工艺参数,要针对板材厚度、接头形式及施工环境进行动态调整,避免热输入忽高忽低,保障焊缝质量并减轻残余变形。

跳焊是应对长焊缝高温集聚的一项做法。其核心思路是在若干部位先施焊短段,然后在不同区域逐步衔接,使整条焊缝的热应力分布更加离散,从而降低纵向和横向收缩的叠加风险。该工艺对施工组织与焊道标识要求较高,需在每个阶段明确焊道起止位置与衔接顺序,方可避免漏焊或交叉错位。为确保过程可控,许多工程采用在线监测手段。红外测温仪可追踪焊缝及母材表面的温度波动,数据采集系统能将实测值与既定阈值比对,让施工人员适时调整焊接速度或补焊支撑。若观测到板面出现局部翘曲或应力集中迹象,还能立即变更焊缝走向或修改定位夹具的布置方式,防止变形逐步扩大。

当焊缝成形完成后,需要利用超声波冲击对焊趾部位实施短暂振击,让微裂纹趋于闭合,并使该区域的应力分布趋于平衡。振动时效也能借助机械振动促使残余应力向周边迁移,从而减轻局部畸变。一些工程会结合现场温度与构件刚度特征,选择适当的振动频率及时间,以取得更加理想的减应力效果。

### 2.3 焊接后的补救措施

路桥工程钢箱梁完成焊接后,若检测到局部畸变或残余应力集中,可尝试机械矫正。液压机与专用矫正设备能为受损区域提供外力,使结构缓慢回到较为

理想的线形。该过程应先评估构件厚度及内部应力分布,防止矫正中产生二次撕裂。火焰矫正可矫治小幅度凸起与角部变形,但需控制火焰温度与加热范围,避免金属组织出现软化或裂纹。

当整体线形存在明显偏移,可引入振动时效技术<sup>[4]</sup>。在特定频率与振幅条件下施加振动,使过高的残余应力向周边区域重分配,并缓和局部应力峰值。结合红外或超声探伤能观察应力变化趋势,检验实施效果是否与预期吻合。对于波浪状薄板,可轻压波峰并在背面配合支撑结构,让板材在矫正后保持平顺。若浪形范围较广,还需依据数值模拟结果查明焊缝热输入不平衡、刚性约束不足等根源,再采取相应的补焊或重熔工艺,让材料再度加热并缓解波峰凸起。

焊缝缺陷也是需要关注的重点。一旦发现显微裂纹或未熔合,建议使用碳弧气刨打磨消除瑕疵,然后进行补焊以确保焊缝连续与强度达标。现场人员应对焊后处理环节进行仔细检测,包括尺寸复测与探伤检验,排查修复点是否满足设计精度。某些强度等级较高的钢材可能需要在完成补焊后进行后热处理,使组织结构在较均匀温度区间内再次平衡,减少内部残余应力的残留。

### 3 路桥工程钢箱梁焊接变形控制方法的应用成效

#### 3.1 结构几何精度明显提升

钢箱梁焊接变形控制方法实施后,结构几何尺寸的精度得以明显改善,工程现场的测量数据显示,桥梁焊接完成后整体线形偏差显著降低。某特大跨径钢箱梁桥梁项目采用反向预变形及跳焊工艺,现场检测表明,主梁竖向变形控制精度由原先的 $\pm 15$  mm缩小至 $\pm 5$  mm以内,远超行业规范的相关标准。再如,某市政桥梁在采用局部刚性约束措施后,焊接完成后的横向收缩变形降至2 mm以内,达到设计预期,避免了后期矫正过程中的次生应力产生。这些实践案例证实,有针对性的变形控制措施可切实保证桥梁构件的精度,使施工线形达到预期标准,减少了不必要的返工成本。

#### 3.2 构件受力性能显著优化

焊接变形的有效控制,改善了钢箱梁构件整体的力学行为,特别体现在疲劳性能及结构承载力方面的提升。以某高速公路桥为例,项目应用振动时效技术及超声冲击处理工艺后,钢箱梁焊缝区的残余拉应力平均降低约30%,现场疲劳试验结果表明,构件疲劳寿命相比传统方法提高超过25%。同时,另一座跨江大桥在焊接过程中实施热输入实时监测和焊后热处理工艺后,焊缝区的微观组织趋于稳定,母材与焊接热影响区之间的韧性差异显著缩小,钢箱梁整体抗冲击性能

提高约15%<sup>[5]</sup>。这些实例说明,焊接变形控制技术不仅能保障焊接质量,而且对提高桥梁构件的整体力学性能具有直接促进作用,确保了桥梁的长期服役安全性。

#### 3.3 工程施工组织效率有效提高

钢箱梁焊接变形控制技术的实施,在显著降低变形的同时,也大幅提升了工程施工组织效率,现场施工周期得到有效缩短<sup>[6]</sup>。某跨海大桥工程中,通过优化焊接顺序与预热控制措施,焊接后的变形修复工作量降低了约40%,使施工周期提前了近两个月。此外,一座城市快速路钢箱梁项目应用在线变形监测技术及焊接工艺动态调整策略,工程实施期间,焊缝缺陷率由原先的8%降至2%左右,整体焊接施工效率提高近三成。例如:某大型枢纽立交钢箱梁施工时,现场实时温度监测技术的应用使焊接热输入精准受控,整体构件一次验收合格率提高至97%以上,降低了中间检测环节的反复性。这些成果表明,精细化变形控制手段有效减少了焊后修复的施工时间,并提升了施工现场整体管理效能。

### 4 结束语

本文针对路桥工程钢箱梁焊接变形问题提出了全过程的焊接变形控制技术,分析结果表明:精确预控热输入、刚性定位与约束、优化焊接顺序和补救矫正措施,可显著提升钢箱梁的施工精度和结构受力性能。未来研究中,应进一步探索智能化焊接技术的深度融合,利用实时监测、大数据分析与人工智能技术构建更为精准的变形预测模型,实现钢箱梁焊接变形的主动控制与精确干预。同时,亟需发展适应复杂施工环境的智能焊接装备,推动路桥工程钢箱梁焊接技术向自动化、智能化、精细化方向升级,为未来大型桥梁建设提供更强的技术保障。

### 参考文献:

- [1] 柴飞,刘中,徐向军.钢箱梁桥整体拼装焊接变形控制及补偿方法研究[J].金属加工(热加工),2023(02):51-55.
- [2] 田亚北.超宽钢箱梁节段焊接变形及焊缝疲劳性能研究[D].石家庄:石家庄铁道大学,2024.
- [3] 袁路.钢箱梁焊缝疲劳受力变形分析及加固方法研究[J].焊接技术,2024,53(04):138-141,154.
- [4] 李西亮.黄茅海大桥钢箱梁制作关键技术研究[J].山西建筑,2023,49(22):170-173.
- [5] 陈思.北支江过江通道桥梁钢箱梁现场焊接工艺[J].施工技术(中英文),2022,51(08):71-75.
- [6] 顾江淮.跨线桥钢箱梁安装工程施工技术探讨[J].交通科技与管理,2023,04(20):92-94.