

钢桁架装配焊接残余变形分析

姜锡东 陆国华 展鸿图

浙江交工港航分公司 浙江杭州 310051

摘要: 钢桁架焊接残余变形是影响工程质量和安全的关键问题之一。本文从焊接热力学原理出发, 深入分析焊接参数、结构约束条件以及装配工艺对残余变形的影响规律, 探讨焊接过程中热应力分布与变形机制。同时, 总结工程实践中常用的反变形法、顺序优化、刚性固定等控制措施, 旨在为施工人员提供科学、实用的技术指导, 以提高钢桁架焊接质量, 降低工程风险。

关键词: 钢桁架; 焊接变形; 工艺优化; 工程控制

引言

钢桁架结构因其轻量化、高强度等优点, 广泛应用于大跨度建筑和桥梁工程中。然而, 焊接作为其主要连接方式, 易产生残余变形, 直接影响工程质量和安全。焊接过程中, 局部高温加热和冷却导致的热应力分布不均, 使构件产生收缩、弯曲和角变形等问题。这些变形不仅影响尺寸精度, 还可能降低结构承载能力, 甚至引发应力集中和疲劳破坏。因此, 研究焊接残余变形的形成机理及控制方法具有重要意义。

目前, 国内外学者对焊接残余变形的研究主要集中在理论分析、数值模拟和实验验证三个方面。热弹塑性理论为焊接变形的分析提供了理论基础, 而有限元模拟技术则成为预测变形分布的重要工具。然而, 由于钢桁架结构的复杂性和焊接工艺的多变性, 实际工程中仍存在许多问题亟待解决。例如, 焊接参数的选择、装配顺序的优化以及施工环境的差异, 都会对残余变形产生显著影响。基于此, 本文从焊接热力学原理出发, 结合工程经验, 系统分析焊接参数、结构约束及装配工艺对残余变形的影响规律, 并总结工程中常用的控制措施, 以期为施工人员提供切实可行的技术参考, 推动钢桁架焊接技术的进一步发展。

一、焊接残余变形的形成原因

(一) 热应力作用

焊接残余变形的形成主要源于焊接过程中的热应力作用。在焊接时, 焊接热源对局部区域进行高温加热, 使金属材料迅速熔化并膨胀。由于周围冷金属的刚性约束, 加热区域的膨胀受到限制, 产生压缩应力。随着焊接热源的移动, 加热区域逐渐冷却并收缩, 但由于周围材料的约束, 收缩过程中会产生拉应力。这种不均匀的

热循环导致焊接区域及其附近产生塑性应变, 最终形成残余应力。当残余应力超过材料的屈服强度时, 就会引发构件的变形, 主要表现为收缩变形、角变形和弯曲变形。例如, 焊缝的纵向收缩会导致构件长度缩短, 而横向收缩则可能引起角变形或弯曲变形。这些变形不仅影响构件的尺寸精度, 还可能降低结构的整体性能, 因此控制热应力是减少焊接残余变形的关键。

(二) 结构特性影响

钢桁架的结构特性对其焊接残余变形具有显著影响。首先, 钢桁架通常由细长杆件和复杂节点组成, 杆件的高细长比使其在焊接过程中更容易发生弯曲变形。其次, 节点区域焊缝密集, 焊接热输入叠加效应明显, 导致局部温度梯度增大, 进一步加剧了残余应力的积累和变形的不均匀性。此外, 钢桁架的杆件之间通过焊接连接形成刚性节点, 这种约束条件限制了焊接区域的自由收缩, 使得变形形式更加复杂。

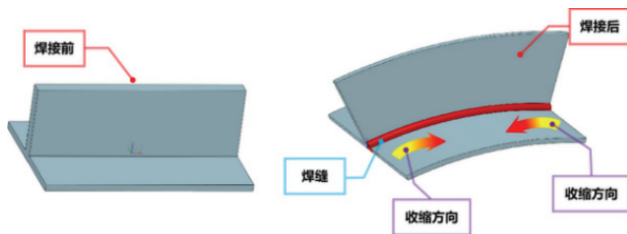


图1 钢结构焊接变形示意

二、影响残余变形的关键因素

(一) 焊接工艺参数

焊接工艺参数是影响钢桁架焊接残余变形的关键因素。首先, 焊接电流和电压直接决定了焊接热输入的大小。电流或电压过高会导致热输入过大, 使焊接区域温度急剧升高, 冷却后产生更大的收缩变形; 而电流或电压过低则可能影响焊缝质量。其次, 焊接速度也对变形

有显著影响。焊接速度过慢会使热源在局部区域停留时间过长,导致热量积累,加剧温度梯度和残余应力;而焊接速度过快则可能使焊缝熔深不足,影响连接强度。此外,焊接层数和道次的选择也至关重要。多层多道焊可以通过分散热输入减少单次焊接的热影响区,从而降低变形量。

(二) 装配顺序与约束条件

装配顺序与约束条件对钢桁架焊接残余变形的影响至关重要。首先,焊接顺序的合理安排能够有效平衡焊接过程中的热应力分布。例如,采用对称焊接顺序,可以从结构中部向两端交替施焊,使收缩力相互抵消,减少整体变形。其次,装配时的约束条件直接影响焊接区域的自由收缩。固定端约束较强的区域,焊接后收缩受限,易产生较大的残余应力;而自由端则收缩较为自由,变形相对较小。此外,装配顺序的选择还需考虑结构的刚性分布。通常建议先焊接刚性较大的主杆件,利用其较强的约束作用抑制变形,再焊接次杆件。例如,在桁架结构中,先焊上弦杆后焊下弦杆,可以有效减少下挠变形。因此,合理规划装配顺序与约束条件,是控制焊接残余变形的重要措施。

(三) 材料与结构设计

材料与结构设计也是影响钢桁架焊接残余变形的重要因素。首先,材料的热物理性能直接决定了焊接过程中的温度分布和应力状态。例如,高强钢的热导率较低,焊接时热量不易扩散,导致局部温度梯度增大,残余应力更显著,变形量也更大。其次,结构设计的合理性对变形控制至关重要。对称结构设计能够使焊接收缩力相互抵消,减少整体变形;而非对称结构则容易因收缩不均而产生弯曲或扭曲变形。此外,杆件的截面形状和尺寸也会影响变形行为。薄壁杆件由于刚性较低,焊接时更易发生失稳变形;而厚壁杆件则相对稳定。

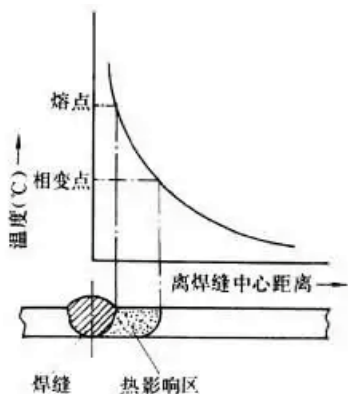


图2 钢桁架焊接区的峰值温度分布和焊接热影响区的形成示意

三、工程中常用控制方法

(一) 工艺优化

工艺优化是控制钢桁架焊接残余变形的重要手段之一。首先,采用低热输入焊接工艺可以有效减少焊接过程中的热影响区,从而降低残余应力和变形。例如,使用小电流、低电压的焊接参数,或采用脉冲焊接技术,能够在不影响焊缝质量的前提下,减少热输入量。其次,多层多道焊是一种常用的工艺优化方法。通过将单道焊缝分为多层焊接,分散热输入,减少单次焊接的热积累,从而降低变形风险。此外,预热和后热处理也是重要的工艺优化措施。预热可以降低焊接区域的温度梯度,缓解冷却过程中的收缩应力;而后热处理则有助于释放残余应力,减少变形。例如,在焊接高强钢时,预热至 150°C ~ 200°C 可显著降低裂纹倾向和变形量。最后,合理选择焊接方法也能优化工艺。例如,气体保护焊(如 CO_2 焊)比手工电弧焊热输入更集中,变形更小。

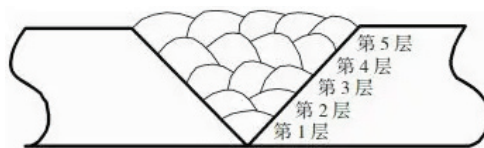


图3 多层多道焊结构示意图

(二) 顺序优化

顺序优化是控制钢桁架焊接残余变形的关键策略之一。合理的焊接顺序能够平衡焊接过程中的热应力分布,减少变形累积。首先,对称焊接顺序是一种常用方法。例如,在焊接桁架节点时,从中部向两端交替施焊,可以使收缩力相互抵消,减少整体变形。其次,跳焊法也是一种有效的顺序优化措施。通过将连续焊缝分为若干段,间隔施焊,避免热量集中,从而降低局部温度梯度和残余应力。例如,在焊接长焊缝时,可采用分段跳焊,每段长度控制在 200mm ~ 300mm ,焊完一段后冷却至室温再焊下一段。此外,焊接顺序还需考虑结构的刚性分布。通常建议先焊接刚性较大的主杆件,利用其较强的约束作用抑制变形,再焊接次杆件。例如,在桁架结构中,先焊上弦杆后焊下弦杆,可以有效减少下挠变形。最后,对于复杂节点,可采用分层焊接顺序,先焊内部焊缝,再焊外部焊缝,逐步释放应力。

(三) 反变形技术

反变形技术是控制钢桁架焊接残余变形的有效方法之一,其核心是通过预置反向变形来抵消焊接过程中产生的变形。首先,反变形技术需要在焊接前对构件的变形趋势进行准确预测。例如,对于长焊缝的纵向收缩变形,可预先在焊缝处设置反向弯曲,使焊后变形回

弹至设计位置。其次,反变形量的确定需结合焊接工艺和结构特性。通常通过经验公式或试焊试验确定预置量,例如,对于Q345钢材的角焊缝,反变形角可预置 $2^{\circ} \sim 3^{\circ}$ 。此外,反变形技术的实施需要借助专用工装夹具。例如,在焊接桁架节点时,可使用可调式夹具预置反变形角度,确保焊接过程中变形方向可控。在实际工程中,反变形技术已得到广泛应用。例如,某体育馆钢桁架工程中,通过预置5mm的反变形量,成功将焊后下挠变形控制在3mm以内,满足设计要求。

(四) 刚性固定法

刚性固定法是控制钢桁架焊接残余变形的常用技术之一,其原理是通过增加结构的局部或整体刚性,限制焊接过程中的自由变形。首先,刚性固定法通常借助夹具、支撑架或临时连接件来实现。例如,在焊接长杆件时,可使用多点夹具固定杆件两端和中部,减少焊接过程中的弯曲变形。其次,刚性固定法的设计需考虑焊接热应力的释放路径。固定点的布置应均匀合理,避免因过度约束导致局部应力集中。例如,在焊接桁架节点时,可在节点周围设置环形夹具,均匀分布约束力,减少角变形。此外,刚性固定法还可与其他变形控制方法结合使用。例如,在采用反变形技术时,配合刚性固定可进一步提高变形控制效果。在实际工程中,刚性固定法已得到广泛应用。例如,某桥梁桁架分段焊接时,通过设置临时支撑架固定分段接口,成功将拼装错位控制在1mm以内。

四、结论与展望

(一) 结论

本文通过对钢桁架焊接残余变形的形成机理及控制方法进行系统分析,得出以下结论:

1.焊接残余变形的形成机理:焊接过程中的不均匀热循环是残余变形的主要来源,热应力分布不均导致收缩、弯曲和角变形等多种变形形式。钢桁架的结构特性(如细长杆件、复杂节点)进一步加剧了变形的复杂性。

2.关键影响因素:焊接工艺参数(如电流、电压、焊接速度)、装配顺序与约束条件、材料特性及结构设计是影响焊接残余变形的主要因素。合理控制这些因素可显著降低变形量。

3.控制方法的有效性:

工艺优化:采用低热输入焊接、多层多道焊及预热后热处理,能够有效减少热影响区和残余应力。

顺序优化:对称焊接、跳焊法及刚性优先的焊接顺序,可平衡热应力分布,降低变形累积。

反变形技术:通过预置反向变形,能够抵消焊接变形,提高尺寸精度。

刚性固定法:借助夹具和支撑架增强结构刚性,限

制焊接过程中的自由变形。

工程实践表明,综合运用上述控制方法,可将钢桁架焊接残余变形量控制在允许范围内,满足工程质量和安全要求。

(二) 展望

尽管现有研究与实践在钢桁架焊接残余变形控制方面取得了显著进展,但仍存在一些亟待解决的问题和未来发展方向:

1.智能化控制技术:随着智能制造技术的发展,焊接机器人、智能传感器及实时监控系统的應用为焊接变形控制提供了新思路。未来可探索基于人工智能的焊接参数自适应优化技术,实现焊接过程的精准控制。

2.多场耦合模拟:现有研究多集中于热-力耦合分析,未来可进一步考虑冶金、相变等多场耦合效应,提高变形预测精度。

3.新材料与新工艺:随着高强钢、复合材料等新材料的应用,焊接变形行为可能发生变化,需开展针对性研究。同时,新型焊接工艺(如激光焊、搅拌摩擦焊)的推广也为变形控制提供了新途径。

4.标准化与规范化:目前焊接变形控制多依赖经验,缺乏统一的标准和规范。未来可结合大量工程数据,制定适用于不同材料和结构的焊接变形控制指南。

绿色焊接技术:在控制变形的同时,需关注焊接过程的能耗与环保问题,开发低能耗、低污染的绿色焊接技术。

总之,钢桁架焊接残余变形控制是一个多学科交叉的复杂课题,未来需要理论研究、数值模拟与工程实践的深度融合,以推动焊接技术的进一步发展,为工程建设提供更高质量的技术支持。

参考文献

- [1]张祥龙,黄传青,王旭,等.正交悬挑大跨度钢桁架节点制作焊接技术[J].焊接技术,2025,54(02):54-59.
- [2]吴顺利,陈维超,徐凌浩.大跨度钢桁架连廊整体提升施工技术[J].建筑施工,2023,45(09):1778-1780+1784.
- [3]王宇宏,江拓,许兴年,等.大跨度桁架焊接变形分析及质量控制[J].建设机械技术与管理,2022,35(04):43-45+56.
- [4]汤信涛.大跨度钢桁架分段安装施工技术探析[J].福建建材,2021,(11):89-91.
- [5]李鹏,王龙,于有为,等.大跨度复杂空间桁架焊接变形控制[J].建筑技术,2019,50(04):476-478.