

建筑钢结构焊接变形控制与现场矫正技术研究

曾令梁

上海建工二建集团有限公司南昌分公司 江西 南昌 330000

摘要：随着我国城市化进程的加速和超高层、大跨度建筑项目的不断涌现，建筑钢结构因其强度高、自重轻、施工速度快等优势，在现代建筑工程中得到了广泛应用。然而，焊接作为钢结构连接的主要方式，在热-力耦合作用下极易引发焊接残余应力与变形，严重影响构件尺寸精度、结构整体稳定性及后续装配质量。本文系统分析了建筑钢结构焊接变形的成因与类型，深入探讨了设计优化、工艺参数调控、装配顺序优化、反变形法、刚性固定法等焊接变形控制策略，并重点研究了火焰矫正、机械矫正、热-机械复合矫正等现场矫正技术的原理、适用条件及操作要点。通过工程案例分析，验证了综合控制与矫正技术的有效性。研究表明，采用“预防为主、矫正为辅”的综合技术路线，结合数字化模拟与智能化监测手段，是实现建筑钢结构高质量、高效率建造的关键路径。

关键词：建筑钢结构；焊接变形；残余应力；变形控制；现场矫正

引言

在21世纪的建筑领域，钢结构以其卓越的力学性能、工业化程度高、施工周期短以及绿色环保等显著优势，已成为大型公共建筑、超高层建筑、桥梁及工业厂房等工程结构的首选。焊接技术作为钢结构制造与安装过程中不可或缺的核心工艺，其质量直接决定了结构的整体安全性和服役寿命。然而，焊接过程本质上是一个高度非线性的瞬态热-力耦合过程。焊接电弧产生的局部高温（可达6000℃以上）使焊缝及热影响区金属发生剧烈的热膨胀，而周围低温区域则对其产生约束，导致不均匀的塑性变形。当焊接热源移开后，材料冷却收缩，但由于先前的塑性变形不可逆，最终在结构内部形成复杂的残余应力场，并伴随宏观几何形状的改变，即焊接变形。焊接变形不仅会降低构件的尺寸精度，影响后续的装配对接，增加现场修整工作量，严重时甚至会导致构件报废，造成巨大的经济损失。更为重要的是，过大的焊接变形会削弱结构的承载能力，改变其受力模式，对结构的整体稳定性和疲劳性能构成潜在威胁。因此，如何有效控制焊接变形，并在变形超出允许公差时进行科学、高效的现场矫正，是钢结构工程领域亟待解决的关键技术难题。

1 建筑钢结构焊接变形的机理与类型

1.1 焊接变形的物理机理

焊接变形的根本原因在于焊接热循环引起的不均匀热膨胀与收缩。具体过程可分为三个阶段：（1）加热阶段：焊缝区域被迅速加热至熔点以上，形成熔池。紧邻熔池的热影响区（HAZ）温度也急剧升高，金属发生热膨胀。由于周围低温母材的刚性约束，这种膨胀受到

限制，从而在高温区产生压应力。当压应力超过该温度下的屈服强度时，材料发生压缩塑性变形。（2）相变阶段（对于某些钢材）：在冷却过程中，部分钢材会发生奥氏体向铁素体、珠光体或马氏体的相变，伴随体积变化，进一步影响残余应力与变形^[1]。（3）冷却收缩阶段：热源移开后，焊缝及HAZ开始冷却收缩。但先前发生的压缩塑性变形无法恢复，导致收缩量不足。这种不充分的收缩受到周围冷金属的强力约束，从而在焊缝及附近区域产生拉伸残余应力，而在远离焊缝的区域产生压缩残余应力，以维持整个构件的内力平衡。这种内力不平衡最终表现为宏观的几何变形。

1.2 焊接变形的类型

根据构件的几何形状、焊缝布置及约束条件，焊接变形主要表现为以下几种基本形式：（1）纵向收缩变形：沿焊缝长度方向发生的收缩。这是所有焊接接头都存在的基本变形形式，通常数值较小，但对于长焊缝或精密构件仍需考虑。（2）横向收缩变形：垂直于焊缝长度方向发生的收缩。这是引起板件角变形和构件弯曲的主要原因，其变形量通常远大于纵向收缩。（3）角变形：由焊缝截面上下或左右的横向收缩不均匀引起，常见于T形接头、角接接头和对接接头（带坡口）。例如，在工字梁的翼缘与腹板焊接时，由于腹板两侧焊缝的先后焊接，导致翼缘向内或向外倾斜。（4）弯曲变形（挠曲变形）：当焊缝布置偏离构件截面中性轴时，由横向收缩力形成的力矩会使整个构件向一侧弯曲。这在焊接H型钢、箱型柱等构件时尤为常见。（5）扭曲变形：这是一种复杂的三维空间变形，通常由焊缝布置不对称、焊接顺序不当或装配误差累积引起。一旦发生，矫正极

为困难,是工程中最需避免的变形形式。(6)波浪变形(失稳变形):在薄板焊接结构中,焊缝的纵向或横向收缩会在板内产生较大的压应力。当压应力超过薄板的临界屈曲应力时,板件会失稳,形成波浪状的鼓曲。

2 焊接变形的预防与控制技术

有效的焊接变形控制应贯穿于钢结构的设计、制造和安装全过程,遵循“预防优于矫正”的原则。

2.1 设计阶段的源头控制

(1)优化焊缝设计:在满足结构强度和刚度的前提下,尽可能减少焊缝的数量、长度和截面积。采用高强度螺栓连接替代部分焊接,或选用轧制H型钢代替焊接H型钢,都是有效的减焊措施。(2)合理布置焊缝位置:尽量将焊缝对称地布置在构件截面的中性轴附近,使各焊缝产生的收缩力矩相互抵消,从而减小整体弯曲和扭曲变形^[1]。(3)选择合适的接头形式:例如,对于厚板对接,采用X形或双U形坡口代替单V形坡口,可以减少填充金属量,从而减小横向收缩和角变形。

2.2 制造与装配阶段的过程控制

2.2.1 制定科学的焊接工艺规程(WPS)

一是控制热输入:在保证焊缝熔透和冶金质量的前提下,采用小电流、高电压、快速焊的工艺参数,以降低单位长度的热输入量,从而减小热影响区范围和变形量。二是选用高效焊接方法:如CO₂气体保护焊、埋弧自动焊等,其热效率高、焊接速度快,有助于减小变形。

2.2.2 采用合理的装配与焊接顺序

(1)对称焊接:对于对称结构,应采用两名焊工从中心向两端同步对称施焊,使变形相互抵消。(2)分段退焊/跳焊:将长焊缝分成若干小段,按特定顺序(如从中间向两端、或跳跃式)进行焊接,可以有效分散热量,避免热量过度集中。(3)先焊收缩量大的焊缝:在复杂构件中,应优先焊接预计收缩量最大的焊缝,使其变形在后续焊接中得到一定程度的补偿。

2.2.3 应用反变形法

在装配时,预先给构件施加一个与预期焊接变形方向相反、大小相当的预变形。焊接完成后,焊接变形与预变形相互抵消,从而获得尺寸合格的构件。此法需要精确的变形预测,常用于批量生产或标准化构件。

2.2.4 实施刚性固定法

利用夹具、胎架、定位焊等手段,对焊件施加强大的外部拘束,强制限制其在焊接过程中的自由变形。此法简单有效,但会显著增大焊接残余应力,对于有抗脆断或疲劳要求的结构需谨慎使用,并在焊后考虑应力释放。

2.2.5 预热与后热处理

适当的预热可以减小焊接区域与周围金属的温差,降低冷却速度,从而减小热应力和组织应力。焊后去应力退火(如炉内整体退火或局部高温回火)能有效松弛残余应力,但成本较高且可能影响材料性能,多用于重要或高拘束度的焊接接头。

3 现场焊接变形的矫正技术

尽管采取了各种预防措施,但在复杂的现场施工环境中,由于环境因素(如风、雨、低温)、大型构件自重、吊装应力以及多工序交叉作业的影响,焊接变形仍难以完全避免。当变形超出《钢结构工程施工质量验收标准》(GB 50205)等规范允许的公差范围时,必须进行现场矫正。

3.1 火焰矫正法

火焰矫正是目前应用最广泛、最灵活的现场矫正技术,尤其适用于大型、重型钢结构的矫正。基本原理是利用氧-乙炔(或丙烷)火焰对构件变形部位的特定区域进行局部、快速加热。被加热区域的金属受热膨胀,但由于周围冷金属的约束,产生压缩塑性变形。随后,该区域在空气中自然冷却收缩。由于先前的压缩塑性变形不可恢复,其最终收缩量小于正常情况,从而在构件内部产生一个与原始焊接变形方向相反的矫正力矩,达到矫正目的^[1]。关键操作要素包括:(1)加热位置:这是火焰矫正成败的关键。基本原则是“加热凸侧”。例如,对于弯曲变形,应在构件凸起的一侧(受拉侧)加热;对于角变形,应在翼缘的内侧(收缩不足侧)加热。(2)加热方式:常见的有点状加热、线状加热和三角形(楔形)加热。点状加热适用于薄板波浪变形;线状加热适用于矫正角变形和局部弯曲;三角形加热影响区大、矫正力强,主要用于矫正厚板或刚性大的构件的严重弯曲或扭曲。(3)加热温度:一般控制在600℃~800℃(钢材呈樱红色)。温度过低,矫正效果不佳;温度过高,可能导致材料过热、晶粒粗化,甚至产生新的变形或裂纹。严禁在蓝脆区(200℃~400℃)进行锤击。(4)冷却方式:通常采用自然空冷。对于低碳钢和低合金钢,严禁浇水急冷,以免产生淬硬组织和裂纹。但对于某些特定的奥氏体不锈钢,可采用水冷以提高矫正效率。优点是设备简单、成本低廉、机动灵活,不受构件大小和场地限制。缺点是对操作者经验依赖性强,矫正过程难以精确量化,易产生二次残余应力,若操作不当可能损伤母材。

3.2 机械矫正法

机械矫正主要依靠外力(压力或拉力)使变形部位产生反向的塑性变形来实现矫正。常用设备与方法包括:

(1) 压力机矫正: 将小型构件置于液压机或油压机下, 通过模具施加压力进行矫正。适用于工厂内小型、规则构件的批量矫正。(2) 千斤顶矫正: 在现场, 利用螺旋千斤顶、液压千斤顶配合支撑架, 对大型梁、柱的弯曲变形进行顶压矫正。操作时需缓慢、均匀加载, 并辅以测量监控。(3) 锤击法: 用木锤、铜锤或专用风铲对变形区域进行适度锤击, 使其延展以抵消收缩。此法仅适用于塑性好、厚度较薄的低碳钢, 且需极其谨慎, 避免造成表面损伤或加工硬化^[4]。优点是矫正过程相对直观, 易于控制矫正量。缺点是对于大型、重型或复杂空间结构, 施加足够且均匀的外力非常困难; 可能在构件上留下压痕或造成局部屈曲; 同样会引入新的残余应力。

3.3 热-机械复合矫正法

该方法将火焰加热与机械外力相结合, 利用加热软化金属、降低其屈服强度的特性, 再施加相对较小的外力即可实现高效、精准的矫正。如在矫正大型箱型柱或H型钢的严重弯曲时, 可先在凸侧用火焰加热一个区域使其软化, 然后在两端用千斤顶施加压力, 协同作用完成矫正。这种方法比单纯的火焰矫正更可控, 比单纯的机械矫正所需外力更小。优点是矫正效率高, 所需外力小, 对构件损伤风险低。缺点是操作相对复杂, 需要协调加热与加压两个工序。

4 工程应用案例分析

某大型会展中心项目主桁架为大跨度空间管桁架结构, 最大跨度达120米。在工厂分段制作过程中, 某根主弦杆($\Phi 500 \times 20\text{mm}$)在环向对接焊后产生了约L/1500的弯曲变形(L为构件长度), 超出了规范L/1000的要求。

4.1 问题分析

变形主要由环焊缝的周向收缩不均引起, 加之构件自重导致下挠。

4.2 解决方案

首先利用有限元软件(如ANSYS或Midas)建立焊接热-力耦合模型, 模拟焊接过程, 预测变形趋势和量值, 为矫正方案提供依据。现场矫正采用火焰矫正法。在弦

杆弯曲凸起(上拱)的顶部区域进行加热。采用三角形加热法, 加热区域呈倒三角形, 底边宽约200mm, 高度约300mm。严格控制在 $700 \pm 50^\circ\text{C}$, 用测温笔监控。每完成一次加热-冷却循环后, 用全站仪测量挠度值, 直至变形控制在L/1200以内。经过两次精准的火焰矫正操作, 弦杆的直线度完全满足安装要求, 顺利完成了高空对接。此案例表明, 将数字化模拟技术与传统火焰矫正工艺相结合, 能够显著提升现场矫正的科学性和成功率。

5 结语

建筑钢结构的焊接变形是复杂系统性问题, 有效管控需全链条协同。本文研究得出: 预防是根本, 通过优化结构设计、合理制定焊接工艺、采用科学装配焊接顺序以及应用主动控制技术, 能从源头抑制变形产生; 矫正需精准, 火焰矫正是现场首选, 但依赖对变形机理的理解与实践经验, 机械矫正和热-机械复合矫正可作补充; 技术融合是趋势, 将传统工艺与现代信息技术深度融合是未来方向, 如基于数字孪生的仿真可精准预测变形与优化工艺, 结合物联网和人工智能的智能监测系统能实时感知并动态调整参数, 机器人自动化焊接与矫正可保证工艺一致性与产品质量稳定。总之, 构建集“智能设计—精准制造—动态调控—高效矫正”于一体的综合控制体系, 是推动我国钢结构产业转型升级的关键。

参考文献

- [1]陈龙, 乔久齐, 李树鹏. 建筑钢结构安装焊接变形控制技术[C]//广西网络安全和信息化联合会. 第十届工程技术管理与数字化转型学术交流会论文集. 江西省富煌构有限公司, 2025: 280-282.
- [2]邓宗梁. 超高层建筑钢结构焊接变形控制技术研究与应用[J]. 中国住宅设施, 2025, (12): 67-69.
- [3]张国英. 建筑钢结构安装中焊接变形的控制方法[J]. 中国建筑金属结构, 2024, 23(12): 22-24.
- [4]陈亮. 建筑钢结构安装焊接变形控制技术研究[J]. 科学技术创新, 2023, (12): 118-121.