

# 大型结构模块现场拼装焊接变形控制

谷天帅

中国船舶集团有限公司第七一三研究所 河南 郑州 450000

**摘要：**随着海洋工程、桥梁建筑等领域的快速发展，大型结构模块现场拼装焊接技术应用日益广泛。本文通过分析焊接热-结构耦合过程，揭示纵向收缩、角变形等多种变形类型的产生机制；从材料、工艺、设计及施工四维度解析变形影响因素。提出以有限元模拟与机器学习为核心的预测技术，结合工艺优化、工装约束及智能监测的综合控制方案，并构建涵盖质量管控、协同管理与安全防控的现场施工体系。

**关键词：**大型结构模块；现场拼装焊接；变形控制技术

## 引言

焊接过程中不均匀的热输入导致的结构变形，严重影响构件尺寸精度与力学性能，甚至威胁施工安全。现有研究虽在变形控制技术上取得进展，但面对复杂结构与多变施工环境，仍存在控制精度不足、多因素协同调控困难等问题。本文深入探究焊接变形机理，系统整合预测、控制与管理技术，旨在为大型结构现场拼装焊接工程提供科学、高效的变形控制策略，推动行业技术革新。

### 1 大型结构模块现场拼装焊接变形的机理分析

焊接过程本质是一个不均匀的局部加热和冷却过程，这是导致结构变形的根本原因。在大型结构模块现场拼装焊接中，电弧或其他热源将焊接区域的金属迅速加热至熔化状态，高温区域金属膨胀受到周围低温金属的约束，产生压应力；冷却时，已熔化的金属凝固收缩，但同样受到周围金属的阻碍，最终在焊缝及附近区域形成残余拉应力，这种应力的不平衡会使结构发生变形。焊接变形类型多样，主要包括纵向收缩、横向收缩、角变形、弯曲变形及扭曲变形。纵向收缩变形是因焊缝纵向的热胀冷缩不一致，导致构件沿焊缝长度方向缩短；横向收缩变形则由焊缝横向的热膨胀和收缩差异引发，造成构件宽度方向的尺寸变化。角变形通常出现在V形、X形坡口焊接中，由于焊缝截面形状不对称，沿板厚方向的收缩不均匀，使得焊接接头发生角度偏转<sup>[1]</sup>。弯曲变形与扭曲变形多由焊缝布置不对称或焊接顺序不当，导致结构整体受力不均所引起。

### 2 现场拼装焊接变形的影响因素

#### 2.1 材料因素

材料的物理与力学性能直接决定了焊接变形的趋势。钢材的热膨胀系数是关键参数，线膨胀系数越大，在焊接热循环过程中产生的热变形越大，冷却后的残余变形也更为显著；高强度钢材因屈服强度高、塑性变形

能力弱，焊接时局部应力集中现象突出，易导致结构整体失稳变形。板材厚度对变形影响显著，薄板焊接时易发生波浪变形，而厚板则因拘束度大，易产生角变形与层状撕裂。不同钢材的热导率、比热容等参数也会改变焊接温度场分布，进而影响变形程度。

#### 2.2 工艺因素

焊接工艺参数是引发变形的直接诱因。焊接方法决定了热源特性：手工电弧焊热输入大、温度梯度高，易产生较大变形；而激光焊、电子束焊等高能束焊接方法热输入小、加热集中，可有效抑制变形。焊接电流、电压与速度直接影响热输入量，大电流、低焊速会加剧局部过热，导致收缩变形增大；焊接顺序与方向对变形影响显著，非对称施焊或不合理的分段焊接易造成应力累积，引发扭曲或弯曲变形；此外，坡口形式决定了焊缝填充量与熔合比，不对称坡口会因收缩不均导致角变形。

#### 2.3 结构设计因素

结构设计的合理性从源头上影响焊接变形。焊缝布局是核心要素，若焊缝集中分布于构件一侧或局部区域，会导致应力不对称，引发整体弯曲；而对称分布的焊缝可使应力相互抵消，减小变形。构件的刚性约束程度也至关重要，刚性大的结构在焊接时变形受限，易产生高残余应力；反之，刚性不足则可能出现过度变形。构件的连接形式（如对接、角接、搭接）和拼装顺序同样影响变形：不合理的拼装顺序会使结构在焊接过程中提前产生约束，导致应力无法释放，最终加剧变形。

#### 2.4 现场施工因素

现场环境与施工条件为焊接变形带来不确定性。环境温度与湿度直接影响钢材性能，低温环境下钢材韧性降低、收缩加剧，高温高湿则可能导致焊接气孔等缺陷，间接影响变形；风速会加速焊缝冷却，改变温度场分布，增大变形风险。施工设备与工装的精度同样关

键,临时支撑的刚度不足或定位偏差,会使构件在焊接时发生位移;焊接操作人员的技能水平差异,如运条手法、电流调节不当,也会导致热输入不均匀,引发局部变形<sup>[2]</sup>。

### 3 大型结构模块现场拼装焊接变形控制技术

#### 3.1 焊接变形预测与数值模拟技术

##### 3.1.1 有限元模拟方法的应用

有限元分析(FEA)是焊接变形预测的核心手段,通过将结构离散为有限个单元,实现焊接热-结构耦合过程的数值化求解。ANSYS、ABAQUS等通用有限元软件具备强大的多物理场分析能力,可通过瞬态热分析模块模拟焊接热源移动导致的温度场变化,再将热分析结果导入结构力学模块,计算温度梯度引发的应力与变形。其优势在于能够处理复杂几何模型与材料非线性问题,通过设置单元类型、网格密度及接触条件,精确还原焊接过程中材料的相变与塑性变形行为。

##### 3.1.2 关键参数建模策略

热源模型构建是模拟精度的关键。高斯模型适用于电弧挺度较小的焊接方法,通过指数函数描述热源能量密度分布;双椭圆模型则更贴合实际焊接过程,将热源分为前后两个半球体,分别设定不同能量分布参数,可有效模拟电弧压力与熔池流动影响。材料本构关系需考虑温度-应力-应变的耦合特性,高温阶段采用弹塑性模型描述钢材屈服与强化行为,结合相变动力学方程反映奥氏体向铁素体、珠光体的转变。边界条件设置需模拟现场约束状态,包括工装夹具约束、自重作用及临时支撑的刚性约束,确保模型与实际工况一致。

##### 3.1.3 模拟结果验证机制

数值模拟结果需通过现场实测数据进行验证。采用三维激光扫描、应变片测量等技术获取焊接过程中结构的变形数据与应力分布,与模拟结果进行对比分析。通过调整热源参数、网格划分密度及边界条件,修正模型误差,建立符合工程实际的仿真体系。验证过程中需重点关注峰值温度、残余应力分布及关键部位变形量,确保模拟结果能够有效指导工艺优化与工装设计。

##### 3.1.4 预测模型的智能化优化

基于机器学习的预测模型为变形控制提供新路径。BP神经网络通过构建输入层(焊接参数、材料属性)、隐含层与输出层(变形量预测值),利用大量历史数据训练网络权重,可快速预测不同工艺条件下的焊接变形趋势。与传统有限元模拟相比,该方法具备计算效率高、适应性强的特点,尤其适用于多参数耦合场景下的变形预测,可辅助施工人员快速制定工艺方案。

#### 3.2 焊接工艺优化控制技术

##### 3.2.1 焊接顺序的科学规划

合理的焊接顺序可平衡结构应力分布,降低变形风险。对称施焊通过同时进行对称焊缝焊接,使两侧热输入与收缩力相互抵消,适用于具有轴对称结构的模块;分段退焊将长焊缝划分为若干小段,每段逆向焊接,减少焊缝纵向收缩累积;跳焊则通过间隔焊接不同部位焊缝,避免局部热量集中,抑制角变形与波浪变形。这些方法需结合结构形式与焊缝分布进行动态调整,通过模拟分析确定最优施焊路径。

##### 3.2.2 热输入精细化调控

热输入控制是抑制变形的核心环节。采用脉冲焊、激光-MIG复合焊等低热输入焊接工艺,通过高频脉冲电流调节熔滴过渡,减少熔池热输入量;优化焊接参数(电流、电压、焊速),在保证熔合质量的前提下降低热输入。同时,通过多层多道焊替代单道焊,分散焊接热量,控制层间温度,避免局部过热导致的过度变形。

##### 3.2.3 预热与后热温度管理

预热与后热技术通过调节焊接温度场分布,降低残余应力水平。预热可减缓焊缝冷却速度,减小温度梯度,降低淬硬倾向;后热(消氢处理)则通过保温缓冷,促进焊缝中氢的扩散逸出,防止冷裂纹产生。温度管理需结合钢材碳当量与板厚制定工艺参数,通过电加热片、火焰加热等方式实现温度均匀化,抑制因温度不均引发的局部变形。

##### 3.2.4 锤击焊道应力消除

锤击焊道技术通过机械冲击释放焊接残余应力。在焊缝冷却过程中,采用特制锤具均匀敲击焊道,使焊缝金属产生塑性延展,抵消部分收缩应力。锤击力度、频率及覆盖范围需严格控制,避免损伤焊缝金属组织,通常适用于非关键受力部位的变形控制。

#### 3.3 工装与约束技术

##### 3.3.1 刚性固定工装设计原理

刚性固定工装通过外部约束限制构件焊接变形。夹具设计需考虑结构受力特性,采用可调式卡具、定位销等装置固定构件位置;支撑胎架需具备足够刚度,通过有限元分析确定支撑点布局与结构形式,避免工装自身变形影响约束效果。刚性固定可有效抑制角变形与弯曲变形,但需合理设置释放时机,防止约束撤除后产生回弹变形。

##### 3.3.2 反变形技术实施方法

反变形技术基于模拟预测的变形方向与量值,在焊接前对构件施加反向预变形。通过计算热变形量,采用

机械弯曲、火焰加热矫正等方式使构件产生初始变形,待焊接收缩后恢复至设计形状。预变形量需综合考虑材料特性、焊接工艺及结构约束条件,通过试焊验证与参数调整确保精度。

### 3.3.3 液压同步支撑系统应用

液压同步支撑系统为大型模块提供动态约束能力。通过分布式液压千斤顶与位移传感器联动,实时监测并调整支撑力,补偿焊接过程中的不均匀变形。该系统适用于超大型结构的整体拼装,可实现多自由度变形控制,有效解决传统刚性支撑无法适应动态变形的问题。

### 3.3.4 临时支撑拆除时序控制

临时支撑拆除顺序直接影响残余变形量。拆除前需通过应力监测评估结构稳定性,采用分步卸载、对称拆除策略,避免应力集中释放引发二次变形<sup>[3]</sup>。结合有限元模拟分析拆除过程中的应力重分布,制定科学的拆除方案,确保结构最终形态符合设计要求。

## 4 拼装焊接现场施工管理与安全保障措施

### 4.1 焊接变形控制的质量管理体系

焊接变形控制的质量管理需贯穿施工全流程,从工艺制定到验收交付,形成闭环管理。(1)制定标准化焊接工艺规程(WPS),明确焊接方法、参数范围、施工顺序等核心要求,并通过工艺评定(PQR)验证其可行性。例如,针对不同钢材类型与板厚组合,需开展试焊实验,确定最优热输入参数与焊接顺序,确保工艺对变形的抑制效果。(2)人员管理层面,对焊接操作人员进行专项培训,重点强化变形控制相关技能,如对称施焊、分段退焊等工艺的规范操作。同时建立持证上岗制度,通过实操考核确保人员具备相应技术能力。在工序验收环节,采用“三检制”(自检、互检、专检),利用全站仪、三维激光扫描等设备对焊接构件的尺寸、形位公差进行检测,严格控制变形偏差在设计允许范围内。

### 4.2 多方协同的现场施工管理

大型结构模块焊接涉及设计、施工、检测等多部门协作,需建立高效的协同管理机制。(1)设计阶段,结构工程师需与焊接工艺师深度配合,通过优化焊缝布局、减少不对称结构设计,从源头降低变形风险;同时,设计人员应提供详细的变形控制技术要求,为施工方案制定提供依据。(2)施工过程中,建立以项目经理为核心的协调小组,定期召开进度协调会,明确各部门职责与工序衔接要求。焊接班组需提前与检测团队沟通

检测时间节点,确保变形监测与焊接施工同步进行;工装设计团队需根据现场实际情况及时调整支撑方案,保障约束效果。

### 4.3 焊接变形相关的安全风险防控

焊接变形控制过程中的安全风险主要源于结构失稳、高空作业及受限空间作业等以下场景。(1)针对结构失稳风险,需在焊接前对工装支撑系统进行承载力验算,并设置应力监测点实时预警;拆除临时支撑时,严格按照既定时序分步卸载,避免应力集中释放引发坍塌事故。(2)高空作业安全方面,需完善安全防护设施,如设置全封闭操作平台、防坠落安全网及生命线系统;作业人员须佩戴安全带并高挂低用。对于受限空间焊接,需严格执行“先通风、再检测、后作业”制度,配备气体检测仪实时监测氧气、可燃气体及有害气体浓度,同时设置专人监护,确保紧急情况下人员快速撤离。(3)现场需加强焊接设备与用电安全管理,定期检查焊机接地、电缆绝缘性能,防止触电事故;配备消防器材,设置防火隔离带,预防焊接火花引发火灾<sup>[4]</sup>。通过制定应急预案并开展定期演练,提升施工人员对变形失控、坍塌、火灾等突发情况的应急处置能力,最大限度降低安全风险。

## 结束语

本研究通过多维度分析与技术整合,形成了大型结构模块现场拼装焊接变形控制的完整技术体系。明确了变形产生的本质原因与关键影响因素,提出了融合数值模拟、工艺优化及智能工装的控制方法,并建立了完善的施工管理与安全保障措施。研究成果已在实际工程中验证其有效性。随着智能化、数字化技术的发展,焊接变形控制将向自动化预测、自适应调控方向迈进,结合新材料与新工艺,进一步提升大型结构焊接质量与施工效率,满足工程建设更高标准需求。

## 参考文献

- [1]刘非.大型结构模块现场拼装焊接变形控制[J].电焊机,2020,50(8):71-77+I0006,I0007.
- [2]吴晔华,陈鹏,刘一搏,等.核电SC结构模块拼装焊接变形量仿真研究[J].金属加工(热加工),2020(6):29-32.
- [3]王了一,孙国庆.核电CA01结构模块焊接变形控制[J].设备管理与维修,2020(11):144-146.
- [4]刘林广.模块化钢框架外套筒焊接连接节点抗震性能研究[D].山东:青岛理工大学,2024(01):13-14.