

大型钢结构在焊道分布极其密集、布置不对称情况下的焊接裂纹预防技术的应用与推广

郑爱军 王 义 赵洪刚 郭 龙 何宁宁
中海油能源发展装备技术有限公司 天津 301713

摘 要：重型钢结构重载模块普遍存在焊道集中、排布不对称的构造特征，高拘束工况易积累收缩应力引发焊缝开裂。针对该类构件焊接质量管控难点，本文围绕材质特性、应力生成规律梳理裂纹形成诱因，从焊前预处理、施焊过程管控、焊后缓释处理搭建完整防控路径，配套匹配母材的焊材选型、分层交错施焊、分段温控等实操手段，层层削弱氢致开裂与应力开裂风险，整套工艺可完善复杂钢结构焊接质量管控体系，减少接头缺陷生成。

关键词：大型钢结构；密集非对称焊道；焊接裂纹；焊接工艺；应力控制

引言：钢结构制造行业逐步向大型重载模块方向发展，构件内部筋板拼接区域焊缝排布繁杂，非对称布局带来持续累积的焊接残余应力。高强厚板自身淬硬倾向明显，常规焊接手段难以平衡热输入与应力释放节奏，各类滞后裂纹隐患持续制约构件成型质量。依托焊接冶金与应力传导规律搭建全流程防控工艺，通过分级管控焊接全流程关键节点，能够弱化高拘束结构下的焊缝开裂倾向，适配复杂钢结构批量施工需求。

1 大型钢结构密集非对称焊道焊接裂纹成因与结构特性分析

1.1 密集非对称焊道钢结构结构特性

大型钢结构广泛应用于重型设备模块与大型承载架构的搭建，整体构件体积大、成型刚度高，具备极强的结构拘束性。为满足设备重载承载的使用要求，构件核心受力区域会密集布设各类筋板、支撑连接板，狭小局部范围内集中排布大量焊接接头，形成高密度焊道布局。这类钢结构焊道排布缺乏对称设计规律，各区域焊缝长度、施焊范围、焊缝数量存在明显区别，整体受力分布处于不均匀状态。构件整体为刚性固定结构，焊接过程中金属冷却收缩产生的形变会受到硬性限制^[1]。密集焊道区域会不断积累焊接应力，不对称的结构布局会打乱应力分布节奏，造成局部应力堆积集中，让该类区域成为焊接裂纹的高发薄弱位置。

1.2 厚板高强钢材质焊接工艺特性

大型重载钢结构普遍采用高强厚板钢材，这类钢材添加多种合金元素，机械强度与表面硬度表现优异，塑性、韧性储备处于较低水平。焊接作业的高温热循环会让焊缝接头经历快速升温与急速降温的过程，接头区域极易生成高硬度淬硬组织。这类组织形变能力弱，对应

力冲击的耐受度较差。厚板自身截面厚度大，结构拘束度远高于常规薄板构件，热量传导速率缓慢，大量热能滞留于焊缝及周边热影响区。高温滞留会促使钢材内部晶粒异常粗大，直接降低焊接接头的综合韧性。外部施工约束与内部残余应力共同作用下，焊接接头很容易产生裂纹缺陷。

1.3 密集集中焊道应力产生机理

单一焊缝焊接作业会形成不均匀的热场，金属受热膨胀、冷却收缩的差异化形变，会在构件内部生成基础残余应力。狭小区域集中布置多道焊缝时，各次施焊产生的热场会相互叠加、相互影响。先期成型的焊缝会固化局部结构形态，对后续焊缝的收缩形变产生约束限制。后续施焊产生的应力无法自由释放，会层层堆积在焊缝层间、根部以及板材交接位置。密集焊道的刚性约束环境彻底阻断应力自然释放的路径，堆积应力持续升高，超出焊缝金属的承载强度后，就会引发焊缝开裂失效。

1.4 非对称布置焊道裂纹诱发机制

规整对称的焊道结构可以依靠均匀的形变与应力分布，弱化焊接残余应力带来的负面影响，维持结构整体受力平衡。非对称焊道布局会彻底打破这种平衡体系，不同施焊区域的热输入总量、冷却速率、收缩形变程度均存在明显偏差。焊缝密集区域热输入总量更大，冷却收缩的形变幅度更强。焊缝稀疏区域结构刚度更高，会对相邻密集焊缝的收缩形变形成强硬牵制。应力无法在结构内部均匀扩散，持续汇聚于接头薄弱位置。长期的应力堆积会逐步破坏焊缝金属与热影响区的组织结构，微观缺陷不断拓展延伸，最终成型为可视焊接裂纹，损伤钢结构接头的整体完整性与稳定性。

2 密集非对称焊道焊接裂纹前置预防工艺体系

2.1 低氢型焊接材料适配选型原则

焊接裂纹的萌生与焊缝内部扩散氢含量存在直接关联, 高强厚钢密集焊道施工场景对焊材性能有着严苛标准。低氢型焊材可有效抑制氢致裂纹的产生, 适配大型钢结构高拘束、高应力的焊接工况。选型工作需要结合母材D36材质力学性能, 匹配同等强度等级的焊材型号, 保证焊缝金属与母材接头力学性能统一。选型过程需优先选择抗裂性能优异、扩散氢含量极低的专用焊材LB52-U, 规避普通焊材在密集焊道应力环境下出现的接头脆化问题^[2]。严格的焊材适配标准, 能从源头降低氢元素富集引发裂纹的可能性, 筑牢前置防控基础。

2.2 焊材烘干与领用规范化工艺要求

焊材存放过程会吸附空气中的水汽, 水分分解产生的氢分会滞留于焊缝内部, 加剧裂纹萌生风险。烘干作业需要设定350-400℃匹配的温度与保温2h时长, 彻底去除焊材内部吸附水分, 最大程度降低焊缝含氢量。烘干完成的焊材需纳入专用保温设备存放, 维持恒定温度环境, 杜绝二次吸潮现象。现场领用执行按需取料的作业标准, 减少焊材暴露在空气当中的时长。规范化的烘干与领用流程, 可稳定焊材使用性能, 消除水汽带来的焊接质量隐患, 适配密集焊道的高标准施工需求。

2.3 焊前母材表面净化处理工艺

母材焊接区域附着的锈蚀、油污、氧化皮、水分等杂质, 会干扰焊接熔池成型, 提升焊缝缺陷与裂纹的发生概率。正式施焊前需要对焊缝两侧磨亮50mm指定范围的母材区域做彻底清理, 打磨去除表层所有杂质, 露出纯净金属基材。清理作业需保证施工范围全覆盖, 不留清理死角, 规避局部杂质残留引发的熔合不良问题。干净的焊接工作面可以保障熔池成型稳定性, 减少杂质带入产生的内部缺陷, 提升焊缝组织致密性, 有效抵御应力作用下的裂纹拓展。

2.4 结构化焊前预热工艺管控要点

焊前预热是改善高强厚钢焊接性能、缓释焊接应力的核心前置工艺。精准70℃预热温度可以减缓焊缝及热影响区的冷却速度, 避免过快降温形成淬硬组织。均匀的热源输入可弱化厚板结构的拘束应力, 促进焊接过程中扩散氢的充分逸出。预热作业需采用全域均匀加热方式, 杜绝局部温度过高或未预热的情况。严格把控预热温度区间与预热范围, 匹配密集非对称焊道的结构受力特点, 改善焊接接头组织状态, 提升母材抗裂能力, 规避低温脆化与应力集中诱发的焊接裂纹。

3 密集非对称焊道精细化焊接施工控制技术

3.1 焊接线能量与焊接规范精准管控

焊接线能量的波动会直接改变焊缝热循环状态, 影响接头组织韧性与应力分布状态。密集非对称焊道施工场景需固定适配的电压、电流与施焊速度参数, 维持稳定的热输入水平。手工焊打底采用电压20-22V、电流90-110A; 药芯焊丝TWE-711填充盖面采用电压22-24V、电流130-160A, 焊丝直径选用1.2mm。过大的线能量会造成焊缝区域晶粒粗大, 降低接头抗裂性能。过小的线能量容易形成未熔合缺陷, 加剧局部应力集中^[3]。稳定的焊接规范可以让各条焊道的热输入保持均衡, 减少非对称结构带来的受力差异, 为后续应力管控提供稳定的施工基础。

3.2 多层多道焊层间工艺控制方法

多层多道焊是改善密集焊道接头性能的常用施工方式。后道焊层的热作用可以优化前道焊层的组织结构, 细化焊缝内部晶粒。单道焊层需要严格控制成型宽度, 单道焊缝的宽度不能超过12mm, 避免单次熔敷金属量过大造成热量堆积。每层焊道完成后开展全面清理作业, 清除层间浮渣与成型缺陷, 同时采用风枪锤击焊缝, 保证后续熔合质量。分层施焊的工艺模式能够逐步优化接头整体性能, 弱化厚板高强钢的淬硬倾向, 提升焊缝整体抗裂水平。

3.3 隔位交错式应力释放焊接顺序工艺

常规连续施焊方式会让局部区域热量持续累积, 残余应力层层叠加, 大幅提升非对称密集焊道的开裂风险。隔位交错式施焊工艺可打乱连续热堆积的形成条件, 预留充足的形变与应力释放空间。通过隔一个筋板焊一个筋板、横竖缝分步作业的方式, 先焊横缝再焊立缝, 每隔一块纵向筋板焊一块, 分散集中区域的焊接应力。分步成型的焊缝结构可以逐步平衡构件整体受力状态, 减少刚性拘束带来的应力蓄积, 从施工流程上降低裂纹萌生概率。组对点焊采用长度50-60mm、间距350mm, 坡口间隙控制2-3mm, 筋板单面坡口角度55-60°并预留过焊孔, 辅助稳定焊接装配基础。

3.4 焊接过程动态温度管控工艺

焊接温度的动态稳定是控制接头质量的关键。施焊全过程需要持续监测母材与焊道温度, 把控合理的层间温度区间。层间温度不能超过200℃、不低于预热温度。温度数值过高会造成接头过热、力学性能下降。温度数值过低会加快冷却速度, 催生淬硬组织与冷裂纹。动态温控可以维持合理的热循环节奏, 保障扩散氢顺利析出, 稳定焊接接头的综合力学性能。施焊选用350型焊枪, 依靠适配喷嘴贴近焊缝根部, 稳定熔池保护效果, 减少温度波动带来的缺陷。

3.5 焊缝层间应力释放处理工艺

每层焊道成型后可通过规范的机械处理方式辅助释放内部应力。适度的风枪锤击处理能够让焊缝金属产生微量塑性延展,抵消部分残余收缩应力。作业过程需把控锤击力度与覆盖范围,均匀作用于焊道表层,避免局部过度敲击产生新的损伤。常态化层间应力处理可以持续降低焊缝内部应力水平,提升密集非对称焊道结构的整体稳定性^[4]。

4 焊后防护处理与推广

4.1 可控式焊后缓冷工艺实施要点

大型钢结构密集焊道施焊结束后,焊缝区域留存大量焊接余热,过快的自然冷却速度会诱发硬化组织生成,大幅提升冷裂纹出现概率。可控式缓冷工艺能够放慢焊缝及热影响区的降温速率,弱化淬硬组织的生成条件。缓冷操作依托保温覆盖材料隔绝外界环境干扰,锁住构件内部余热,让焊接接头温度平稳下降。缓慢的冷却过程可以为内部扩散氢的逸出提供充足时间,减少氢元素滞留造成的组织脆化问题。稳定的降温环境能够优化焊缝金属结晶状态,弱化焊接残余应力,有效提升密集非对称焊道结构的抗裂能力。

4.2 延时结构性应力释放处理工艺

密集非对称焊道成型后,结构内部残余应力无法在短时间内完全消散,短期静置过程中仍存在应力重新分布的情况。即时开展后续封堵与修整作业,容易挤压未稳定的接头结构,催生隐性裂纹缺陷。延时处理工艺预留48h充足静置周期,让内部复杂应力自主消解、逐步均衡。结构应力完成初步释放后,再开展过焊孔封堵、焊缝修整等后续工序。该处理模式可以规避应力未稳状态下的二次结构扰动,彻底消除滞后性焊接裂纹隐患。

4.3 密集非对称焊道焊接工艺标准化构建

结合大型钢结构密集、非对称焊道的施工难点与防控逻辑,可整合前置预处理、过程精细化管控、焊后防护的全流程工艺内容。梳理适配高强厚板材质的焊材选用、温控标准、施焊顺序、应力处理等核心工序,形成统一规范

的施工流程。明确各工序的作业标准、管控重点与执行要求,规避人为操作差异带来的质量波动。标准化工艺体系能够固化裂纹防控技术要点,规范复杂工况下的焊接施工行为,保障同类钢结构焊接质量的稳定性。

4.4 同类大型钢结构施工场景技术推广路径

这套裂纹预防工艺适配大体积、高刚性、焊道布局复杂的大型钢结构施工场景,具备较强的通用性与落地性。可依托项目施工经验,完成工艺要点的梳理与总结,适配不同规格钢结构模块的焊接施工需求。依托现场实操交底、工艺固化存档、专项技能培训等方式,推动成套工艺技术落地应用。持续积累复杂工况施工经验,逐步优化工艺细节,扩大技术适用范围,为各类大型钢结构密集非对称焊道的焊接施工提供成熟的技术支撑^[5]。

结束语

密集非对称焊道钢结构的裂纹防控覆盖焊前、焊中、焊后全流程管控环节,依靠焊材适配、温度管控、交错施焊、延时缓冷多项工艺协同作用,逐层消解焊缝内部残余应力与扩散氢富集问题。整套工艺贴合大型钢结构现场施工条件,能够简化复杂接头质量管控流程,形成标准化施工操作规范,应用于各类重载钢结构模块加工,稳定构件焊接接头综合性能,降低裂纹缺陷带来的施工损耗。

参考文献

- [1]谢鹏,张海军,朱存永,等. 海洋工程钢结构焊接横向裂纹的形成机制与工程防控技术[J]. 山东化工,2026,55(8):68-70.
- [2]刘晓东. 港口钢结构焊接裂纹的影响因素分析与防控策略[J]. 现代制造技术与装备,2025,61(4):138-140.
- [3]党重. 建筑钢结构焊接裂纹机理分析与防治对策[J]. 砖瓦世界,2025(20):19-21.
- [4]阳涟云. 海洋钢结构低碳钢焊接延迟裂纹成因及组织性能分析[J]. 石油和化工设备,2025,28(8):185-189.
- [5]张铖. 装配式钢结构建筑墙板连接节点施工技术研究[J]. 科技资讯,2026,24(3):146-148.