

风电塔筒用 Q420NE 钢焊接工艺优化研究方法

刘波

山东中车同力钢构有限公司, 山东省济南市, 250100;

摘要: 为应对风电塔筒用 Q420NE 钢焊接时出现的热影响区脆化、焊缝缺陷率高以及力学性能不稳定等状况, 保障塔筒能够长期安全承载, 开展了焊接工艺优化方面的研究, 先确定 Q420NE 钢试件的基础特性, 接着筛选与之适配的焊接材料与方法, 着重围绕焊接热输入、预热参数、层间温度等关键指标设计了多组对比试验, 再结合焊接质量检测 and 力学性能验证来确定最优工艺。结果显示, 优化之后的工艺能够有效把控热影响区宽度, 减少气孔、裂纹等缺陷出现的概率, 而且焊缝的抗拉强度、低温冲击韧性能够满足风电塔筒服役的要求, 为 Q420NE 钢在风电塔筒制造中的高质量应用提供了技术支持。

关键词: Q420NE 钢; 风电塔筒; 焊接工艺优化; 焊接参数

DOI: 10. 64216/3080-1508. 25. 09. 021

引言

风电塔筒属于风电机组的核心承载部件, 需要长期承受风载荷、重力以及温度循环等复杂的工况, 所以对材料的强度、韧性以及焊接可靠性有着严格的要求。Q420NE 钢因为同时具备优异的低温冲击韧性和高强度, 成为了风电塔筒制造的主流低合金高强度钢。基于此, 本文聚焦于 Q420NE 钢焊接工艺的优化, 通过系统地设计试验方案来确定关键参数的最优区间, 为风电塔筒的高质量焊接提供科学依据。

1 焊接材料与方法选择

1.1 试件材料

选用符合 GB/T 1591 - 2018 标准的 Q420NE 低合金高强度钢作为试件材料。该钢种具有出色的低温韧性和强度, 在 -40°C 的恶劣环境下, 冲击吸收功 $\geq 47\text{J}$, 常温下抗拉强度达到 $520 - 680\text{MPa}$, 屈服强度 $\geq 420\text{MPa}$, 能够有效抵御风载和环境应力。其碳当量被严格控制在 $\leq 0.45\%$, 降低了焊接时冷裂纹的敏感性, 试验之前, 试件需进行表面处理, 借助机械打磨和化学清洗去除氧化皮、油污等杂质, 让表面粗糙度 $\leq \text{Ra}25\mu\text{m}$, 保证焊接界面纯净, 为高质量焊接提供保障^[1]。

1.2 焊接方法

针对风电塔筒壁厚 ($15 - 40\text{mm}$)、大尺寸的结构特点, 采用熔化极气体保护焊 (GMAW) 与埋弧焊 (SAW) 组合工艺。熔化极气体保护焊 (GMAW) 凭借高效的焊接速度和稳定的电弧, 适合用于塔筒环缝、纵缝的打底与填充焊接。使用 $\text{Ar} + 20\%\text{CO}_2$ 混合气体来保护熔池, 减

少气孔等缺陷, 符合 GB/T 8110-2020《熔化极气体保护电弧焊用非合金钢及细晶粒钢实心焊丝》对低合金高强度钢的焊接要求, 埋弧焊 (SAW) 则用于盖面以及厚壁焊缝的多层多道焊, 它具有高熔敷效率和稳定的热输入, 配合焊剂保护, 能够实现优质焊缝成型。

1.3 试件尺寸及坡口形式

试件尺寸按照 NB/T 47016-2023 标准设计, 选取厚度 20mm (可在符合 NB/T 47016-2023 标准规定的前提下更改)、宽度 200mm 、长度 400mm 的 Q420NE 钢板, 该厚度尺寸可覆盖风电塔筒常用的壁厚 $16 - 40\text{mm}$, 同时也可以满足焊接力学性能测试取样的要求。坡口采用 X 形对称结构, 参考 GB/T 985.1-2023《熔化焊焊缝坡口的基本形式与尺寸 第 1 部分: 钢、镍及镍合金》, 坡口角度设定成 $60^{\circ} \pm 5^{\circ}$, 根部间隙为 $2 - 3\text{mm}$, 钝边为 $1 - 2\text{mm}$ 。X 形坡口能够进行双面焊接, 便于分层施焊从而控制热输入, 防止厚壁焊接的时候出现未焊透的状况。对称设计有利于平衡焊接应力, 将焊后残余变形量控制在 $\leq 1\%$, 满足风电塔筒对结构变形的严格要求。

1.4 焊接材料

GMAW 选用符合 GB/T 8110-2020 标准的 ER55-G 型实芯焊丝, 直径是 1.2mm 。焊丝中 Mn、Si 等重要合金元素的含量应符合标准规定, 其抗拉强度 $\geq 550\text{MPa}$, 和 Q420NE 钢强度相适配。SAW 选用符合 GB/T 5293-2018 标准的 H08MnMoA 焊丝搭配 SJ101 氟碱型烧结焊机, SJ101 焊剂凭借冶金反应去除熔池杂质、细化晶粒, 降低热影响区脆化的风险, 使用之前, ER55-G 焊丝要清除表面

的油污, SJ101 焊剂在 300 - 350℃下烘干 1 - 2h, 防止吸潮产生气孔。这种材料组合经过行业验证, 能够满足风电塔筒对低温韧性及强度的要求^[2]。

2 焊接参数优化设计

2.1 焊接热输入

焊接热输入控制以避免 Q420NE 钢热影响区脆化、减少焊接缺陷作为核心目标。依据 GB 50661-2011《钢结构焊接规范》对低合金高强度钢焊接的要求, 结合 Q420NE 钢碳当量 ($C_{eq} \leq 0.45\%$) 特性, 确定热输入区间为 15 - 39kJ/cm。GMAW 打底与填充阶段, 把热输入控制在 15 - 25kJ/cm。通过调节焊接电流 (200 - 260A)、电压 (25 - 30V) 与速度 (20 - 25cm/min) 来实现, 这个参数可以减少熔池过热, 降低热影响区晶粒粗大的风险^[3]。SAW 盖面及厚壁焊接阶段, 热输入上限提高到 39kJ/cm, 匹配电流 (500 - 680A)、电压 (32 - 36V) 与较高的焊接速度 (40 - 45cm/min), 确保厚壁焊缝的熔透性。行业实践数据显示, 这个热输入区间能让焊缝抗拉强度保持 $\geq 550\text{MPa}$, -40°C 冲击吸收功 $\geq 47\text{J}$, 满足风电塔筒力学性能要求。

2.2 预热参数

预热参数设计基于 Q420NE 钢冷裂纹敏感性控制, 当试件厚度 $\geq 16\text{mm}$ 时, 将预热温度设定为 80 - 120℃, 采用电加热板进行整体预热, 保证预热温度的均匀性, 避免局部温差导致应力集中, 预热温度要通过热电偶实时监测, 加热速率控制在 50 - 100℃/h, 保温时间按照板厚计算 (每 25mm 板厚保温 30min), 确保热量充分传递到材料内部^[3]。

2.3 层间温度

层间温度控制要和预热温度协同起来, 防止 Q420NE 钢在焊接过程中出现冷裂纹以及组织脆化的情况, 按照 GB 50661-2011 标准, 层间温度要维持在预热温度之上、250℃之下, 核心控制范围是 100 - 200℃。在焊接过程中, 借助红外测温仪针对焊缝两侧 50mm 范围之内的区域开展实时监测, 每道焊缝焊接之前要确认层间温度符合要求, 如果层间温度低于 100℃, 需重新加热到预热温度。如果高于 200℃, 则暂停焊接, 等待自然冷却到目标范围。这种控制策略经过行业应用验证, 能够让焊缝金属组织均匀性显著改善, 把热影响区宽度控制在 2 - 3mm, 有效保障焊缝低温冲击韧性。

2.4 其他关键参数

除了核心参数外, 还应优化焊接电流极性、气体流量以及焊后缓冷等关键参数。GMAW 采用直流反接极性, 能够增强电弧稳定性, 减少飞溅。保护气体 ($\text{Ar} + 20\% \text{CO}_2$) 流量控制在 18 - 22L/min, 以此来确保熔池保护效果, 避免产生气孔缺陷, SAW 焊接的时候, 焊剂铺设厚度设定为 25 - 35mm, 保证焊缝成形质量。焊后要进行缓冷处理, 采用陶瓷纤维毯覆盖焊缝区域, 缓冷时间 $\geq 4\text{h}$, 降低冷却速度, 减少残余应力。另外, 焊接速度要和热输入协同调整, GMAW 阶段不低于 15cm/min, SAW 阶段不低于 20cm/min, 确保生产效率与焊接质量达到平衡。

3 焊接工艺试验方案

3.1 试验设备与仪器

试验设备与仪器的选取要满足 Q420NE 钢焊接工艺优化的测试精度以及功能需求, 并且都符合国家或者行业标准。在焊接设备方面, GMAW 工艺采用数字化脉冲熔化极气体保护焊机。该设备具备电流、电压精准调节功能, 可以实现参数实时监控与自动记录, 保证焊接过程参数稳定。SAW 工艺选用全自动埋弧焊机, 配备焊剂自动输送与回收系统, 能够保障焊剂铺设厚度均匀^[4], 避免因人工操作而导致的铺设偏差, 适合厚壁焊缝多层多道焊接场景。

检测仪器要覆盖焊接过程监测以及焊后质量评估, 力学性能测试选用万能材料试验机与低温冲击试验机, 分别依据 GB/T 228.1-2021《金属材料 拉伸试验 第1部分: 室温试验方法》、GB/T 229 - 2020《金属材料 夏比摆锤冲击试验方法》标准校准, 保证拉伸强度、低温冲击吸收功等数据准确。焊接过程温度监测采用红外测温仪与热电偶, 前者用来进行层间温度实时采集, 后者用于预热温度与热影响区温度记录, 二者精度都满足试验数据可靠性要求。焊缝质量检测配备 X 射线探伤机与超声探伤仪, 参照 NB/T 47013.2-2023《承压设备无损检测 第2部分: 射线检测》、NB/T 47013.3-2023《承压设备无损检测 第3部分: 超声检测》标准操作, 能够精准识别焊缝内部气孔、裂纹等缺陷。

3.2 试验流程

试验流程分四步开展, 以此保障数据有效性。

第一步是试验准备工作, 试件实施表面预处理, 通

过机械打磨和化学清洗的方式,把氧化皮、油污等杂质去除掉,再按设计坡口形式完成试件加工。与此同时对焊接材料进行处理,将焊丝表面的油污清除,把焊剂依照规范烘干并且保温,防止材料问题对焊接质量产生影响。

第二步进入焊接实施阶段,先按照预设参数进行试焊,利用红外测温仪和热电偶对预热温度、层间温度以及热影响区温度进行监测,在确认参数没有明显偏差之后,启动正式焊接。采用 GMAW 工艺完成打底和填充工序,SAW 工艺负责盖面焊接,在整个过程中通过设备自带系统对焊接电流、电压、速度等关键参数进行记录,保证每道焊缝参数能够追溯。

第三步开展质量检测,先进行外观检测,观察焊缝的成形状态,排查咬边、未熔合等表面缺陷。接着采用 X 射线探伤和超声探伤检测内部缺陷,判断焊缝内部质量是否达到标准。最后从试件上取样,通过万能材料试验机、低温冲击试验机开展力学性能测试,获取抗拉强度、低温冲击吸收功等指标。

第四步进行数据处理与分析,对不同参数组的焊接记录、检测结果进行整理,对比焊缝质量和力学性能的差异,筛选出适合 Q420NE 钢的最优焊接工艺参数组合,形成试验结论。

3.3 变量控制方法

变量控制运用“单一变量主导+多维度辅助监测”的策略,保证工艺参数优化具有科学性^[5]。针对焊接热输入这个核心变量,在预热温度、层间温度等其他参数固定的情况下,通过调整焊接电流、电压和速度构建多组热输入梯度,每组参数重复焊接 3 个试件,用以减少偶然误差,数据计算和分析严格依据 GB 50661-2011《钢结构焊接规范》中的热输入计算公式开展,确保数据准确。

预热参数控制把预热温度为变量,设定出多组温度区间,凭借电加热板对试件开展整体预热,防止局部加热造成的温度不均。层间温度控制借助红外测温仪实现实时监测,每道焊缝焊接之前需记录温度数据。如果温

度低于预设下限,采用局部补热的方式让温度提升至目标区间,如果高于上限,就暂停焊接,等待自然冷却到合格范围,确保单道焊缝焊接过程中温度稳定,避免因为温度异常引发组织脆化或者裂纹。

对于焊接电流极性、气体流量等其他变量,采用固定参数组合来开展对照试验,每次仅仅改变一个变量,依据焊缝质量检测以及力学性能测试结果,判断该变量对焊接质量的影响程度。所有变量控制过程都详细记录下来,形成书面档案,保障试验可追溯性以及结果可信度。

4 结语

本文围绕风电塔筒用 Q420NE 钢焊接工艺优化展开,通过明确试件材料特性、筛选适配的焊接方法与材料,着重对焊接热输入、预热参数以及层间温度等关键指标进行优化,并且结合试验验证形成完整的工艺体系。结果表明,优化后的工艺能够有效抑制热影响区脆化,把焊缝缺陷率控制在较低水平,而且焊缝抗拉强度、低温冲击韧性均满足风电塔筒严苛的服役标准。该成果不但为 Q420NE 钢在风电塔筒制造中的规范应用提供技术支撑,也为低合金高强度钢在大型承重结构中的焊接工艺优化提供参考。后续可进一步探索极端工况下工艺参数与服役性能的关联,持续完善工艺体系。

参考文献

- [1] 刘珂,熊伟,龚敏. 风电塔筒门框 Q420NE 钢焊接工艺研究[J]. 发电设备,2025,39(1):29-34.
- [2] 杨雄,白海瑞,黄利,等. 一种 Q420NE 正火轧制风电用钢气保焊接方法:202410485944[P][2025-08-23].
- [3] 王宇冬,尚建路,孙斌,等. 不同焊接工艺对 P92 钢焊接接头组织性能的影响[J]. 钢铁研究学报,2023,35(9):1152-1160.
- [4] 宋佳峰. 潮湿环境高强钢焊接工艺及工程应用[J]. 建筑技术,2023,54(11):1336-1338.
- [5] 徐向军,刘洪武,常国光,等. 高强度耐候桥梁钢焊接工艺研究[J]. 金属加工:热加工,2023(11):68-78.