

Analysis of Welding Quality Control in the Manufacturing Process of Large-Scale Chemical Steel Structures

Yingyi Mo

China National Petroleum Corporation Sixth Construction Company, Guilin, Guangxi, 541004, China

Abstract

Large steel structures in chemical plants have the characteristics of large size and complex and harsh service environment, and welding quality is the core guarantee for their long-term safe and stable operation. This article analyzes the key characteristic requirements of welding quality (bearing capacity, sealing, corrosion resistance), systematically sorts out the selection and management of raw materials, personnel qualifications and skills, process management and execution

Keywords

Chemical steel structure; Welding quality control; Non destructive testing; Process evaluation; Intelligent monitoring

化工大型钢结构制造过程中的焊接质量控制分析

莫英毅

中国石油天然气第六建设有限公司, 中国·广西 桂林 541004

摘要

化工装置大型钢结构具有尺寸大、服役环境复杂苛刻的特点, 焊接质量是其长期安全稳定运行的核心保障。本文分析了焊接质量的关键特性要求(承载能力、密封性、抗腐蚀性), 系统梳理了原材料选择与管理、人员资质与技能、工艺管理与执行、检测评估等方面存在的控制难点与典型问题。重点提出了全面优化的控制策略, 包括智能化焊接过程监控技术推广、焊接工艺精细化与标准化、全过程无损检测能力强化以及构建焊接质量数字化追溯管理平台。

关键词

化工钢结构; 焊接质量控制; 无损检测; 工艺评定; 智能监控

1 引言

化工行业大型钢结构是支撑现代石油化工、煤化工、精细化工等装置安全运行的核心骨架, 其规模庞大、结构复杂且服役条件极其严苛, 常面临高温高压、强腐蚀介质等挑战。焊接作为钢结构制造过程中最为关键的连接工艺, 其质量好坏直接决定了整体结构的承载能力、密封可靠性与长期使用的耐久性。焊缝区域若存在缺陷或性能不足, 极易成为设备早期失效的薄弱环节, 引发介质泄漏甚至结构坍塌等灾难性事故, 造成巨大经济损失和不可逆的社会环境影响。

2 化工大型钢结构焊接质量的核心要求与控制难点

2.1 焊接质量特性要求

工业大件焊缝焊接质量的特殊性首要表现在需要实现的性能指标方面。一方面, 对于大型工业建筑钢结构, 结构

本身需要承受装载物料质量、内压、风压力、地震等载荷作用, 所以焊缝需要与母材达到相同的静强、疲劳强和冲击韧度要求, 保证结构工作在各种极限条件下的整体稳定性和抗脆断能力; 另一方面, 大型化工建筑钢结构焊接结构均为盛放易燃、易爆、有毒或精制等化工介质的容器, 故焊缝与热影响区绝对不允许有任何贯穿性或可成长为通气通道的局部缺陷存在; 再者, 对于某些工业建筑钢结构来讲, 还需要在高温硫、湿硫化氢硫酸、酸性水等腐蚀环境中服役, 焊缝需要获得良好的化学组分设计、冶金质量以及微观结构形态, 以保证抵抗多种化学腐蚀环境引发的失效倾向; 此外, 对于工业建筑钢结构而言, 还希望其需要在使用过程中可能出现的超温超压等事故条件下需要保持一定的塑性、韧性储备以及承受高温蠕变破坏的能力。

2.2 关键控制难点与典型问题

由于制造过程的质量控制有上述要求, 因此在对各种原料及焊材进行管理时, 母材尤其是高强钢或特种合金钢的化学成分变异、含硫高、含磷高、碳当量高以及污染(铁锈、油脂), 焊材的管理不好受潮或烘焙不到位等原因, 极易引起热裂纹(结晶裂纹)、冷裂纹、气孔和夹渣等在焊接

【作者简介】莫英毅(1997—), 男, 中国广西梧州人, 本科, 助理工程师, 从事石油化工类研究。

过程中引起；某沿海石化工程不锈钢管道焊接曾发生由于焊条没有按规定烘干，焊缝中多见气孔等超标现象，致使返修延误工期。人员资质及技术操作水平是焊工作业过程中质量控制的薄弱点和根本原因。焊工资质不符合要求、培训不到位、经验不足，操作过程中焊接工艺不合理、摆动不稳定、层间清理不清、面对复杂位置处理不当等极易产生未熔合、夹渣、成形质量不良、咬边等缺陷；焊接工艺的管理难度大、规范化程度高。焊评覆盖面不到位，对节点复杂部位或新材料的特点了解不够；大件结构焊接过程不能编制合理的焊接顺序，拘束应力控制不力，导致超过设计允许的结构整体变形量及有害的残余应力累积；预热、后热和层间温度不能准确地控制，极易导致产生更多的冷裂纹和再热裂纹；焊接过程相关工艺参数监控不到位，出现工艺纪律不严或执行不到位造成的质量波动；检测分析的局限性与深入性不到位等。常规检测方式存在盲区，对薄壁小径管对接接头、裂纹型缺陷（尤其是微裂纹）、残余应力场的精确评估等常显得力不从心，制约了对焊缝质量全面、准确、及时的把控能力。

3 焊接质量控制的关键环节与问题分析

3.1 原材料控制与前期准备

前工序确保焊材和母材的质量。母材应按设计和规范要求验收化学成分和力学性能试验报告，特别是碳当量和影响材料的焊接性与裂纹敏感性的金属的夹杂物等含量是否合格。焊材应存放在干净、干燥、整洁的环境中，焊条、焊剂应按厂方和焊材工艺规程要求及时烘干，烘干温度和时间要做好记录，随取随用，用过的焊条应按规定重新烘干使用或废除。焊前母材和焊接表面的打磨、清理也很关键，要清理焊道和两侧各一定范围内的油污、铁锈、氧化皮和水份以及其它可能阻碍焊接过程顺利进行并降低焊缝质量的污物，装配间隙、错口量（错口）、坡口角度的尺寸应严格参照焊接工艺卡的要求，这是获得良好熔合和成形焊道的前提。焊前预热是提高焊缝的抗裂能力的有效方法。

3.2 焊接工艺管理及过程执行

焊接作业规程为焊工作业的基本依据，焊接工艺编制必须以焊接工艺评定为依据，其评定范围应能够覆盖实际产品接头类型、材料、厚度组合、焊接位置及热输入的要求，具体包含接头图、坡口形式、焊接方法、填充金属规格型号、具体焊接工艺参数范围、层道布置、预热和后热要求、保护气体流量、焊渣清理要求等具体作业要点。焊接过程尽可能实施稳定焊接参数运行，对重点焊缝进行焊接参数监控记录并进行分析，为具体产品焊工作业工艺执行情况进行质量保证以及质量追溯提供证据支持。复杂或大型结构件焊接时应合理进行整体焊接顺序及焊接方向安排，实施分散热量输入，尽可能对称施焊，有效控制变形及应力的集聚。多层多道焊时严格控制层间温度范围，对层间温度过高导致的金属韧性损失及过低造成冷裂纹发生的机会要进行控制，同时

必须彻底清理前道焊缝表面的熔渣和飞溅物。焊工应严格依据批准的 WPS 作业，对整个焊缝焊接的焊道成形必须进行关注，保证焊道与焊道之间的焊道与坡口的侧面之间良好的熔合^[1]。

3.3 无损检测方法与有效性评估

无损检测是检测焊缝质量的主要手段，最常用的几类检测技术各有侧重：射线检测有利于观察体积型缺陷，但其方向性敏感并存在射线辐射危害问题；超声检测有利于观察裂纹、未融合等面状（横向）缺陷，利于机动检测，但其受操作工技能影响较大，并与检测现场耦合质量相关；磁粉检测和渗透检测适用于观察表面或近表面（浅）裂纹、气孔等开放性缺陷；对于不同的接头形式、受力状态、失效模式风险及其标准规范要求，应当以适宜的无损检测方法和适当的检测时机，合理选择、适当搭配、灵活运用各种无损检测技术。对于残余应力和变形的数值评估和估算，通过应变测量手段和数值模拟手段的综合判断尤为重要^[2]。

4 焊接质量控制的优化策略

4.1 焊接过程智能化监测与控制技术应用

大数据和物联网技术的工业制造产品设备管理。采用大数据和物联网实现智能化设备的管理。在焊机和焊机附近设置高精度传感器，采集焊接电流、电压、送丝电流、保护气流量、焊接热输入（焊接能量密度），建立相应的多传感器融合信息获取技术，对焊缝焊枪（状态如熔池宽度、深度、熔池温度均匀性、稳定性、缺陷倾向如气孔倾向、飞溅倾向）、电弧行为进行多源信息的实时和同步感知和分析，大数据驱动的焊接状态判断模型与缺陷的早期预警人工智能算法和人机协同焊接作业界面设计，根据实时传感分析结果，人工干预或反馈控制装置自动更改（例如自适应调节设备参数）的焊接工艺参数，及时干预，避免焊接缺陷的产生；应大力推广焊接辅助系统，如焊接过程中激光视觉辅助引导与跟踪系统（主要应用在自动化程度高、焊机为轨道式焊机或自动焊接机器人工作站上），提高复杂空间位置焊缝的一致性和熔透的一致性；大数据管理建立企业级大数据平台，对全过程焊接工艺参数大数据的实时在线和离线分析研究（包括海量的数据存储与在线关联分析），大数据知识挖掘的工艺改进、生产质量和设备（生产装备）效能提升的闭环管理。

4.2 焊接工艺精细化评定与标准化管理

从应对新材料、新结构、新服役环境的要求出发，加强研究焊接热行为规律，探索基于材料物理特性和接头力学特性的焊接接头设计优化方法；建立焊接热输入、冷却速度与接头焊缝及热影响区组织（晶粒度、相比例）、性能（韧度、强度）、抗裂特性（冷裂、热裂、再热裂）的精确映射模型，以指导确定合理的工艺参数；解决大厚板、复杂节点结构焊接顺序优化算法及控制有害焊接残余应力与变形的合理措施（如热输入控制、反变形、约束状态调整、温差拉伸）。进

行基于远高于基本规范要求的宽覆盖、高冗余的焊接工艺评定：采用最低施焊温度下最厚板、最难施焊位置、最苛刻的异种钢接头组合等最不利条件下的试验验证确保工艺的绝对可靠性和适应性。加强焊接工艺文件的动态管控，建立从评定依据、WPS编制、审核批准、现场发放、技术交底、执行监督、完工归档的全过程电子化流程，并与生产过程控制信息系统(MES)衔接，实现唯一正确版本的工艺文件在正确的时间内流向到操作岗位^[9]。

4.3 无损检测能力提升与精准评估

积极引进和转化先进的无损检测方法。推广相控阵超声的电子扫描和声束聚焦方式，大幅提高复杂几何形状焊缝缺陷（特别是裂纹和未熔合）的发现率、定位准确率、定量精度和成像直观性；应用衍射时差法检测焊缝根部部位高效、高精度无损检测方法；发展多通道、电磁超声等多种新技术攻克特殊构型的检测问题。锻造一支高水平的无损检测人才队伍，要严格执行资格认证（执行国家标准和行业更严格要求）、持续专业技能再培训和能力分级（I-II-III级）计划、定期组织操作技能比武（能力验证）、运用基于人工智能的缺陷自动识别和分类技术提高检测图谱判读的精准率和效率以及差异化的个人经验产生的误判率；广泛应用数字化射线，实现射线图像放大、有效存储、远程专家评片和结构化的档案管理。构建焊接接头完整性的综合分析评价体系，综合考虑无损检测结果、材料性能数据、结构应力分析（焊接残余应力的实测或模拟）、服役环境数据和寿命预测模型，对关键焊缝的服役安全性进行更加科学的评价和排序。

4.4 构建焊接质量全流程追溯与管理系统

建设基于一物一码或焊接日志辨认的质量追溯平台：每个焊缝对应一个唯一编码，记录其材料（钢种、炉批号）、焊材（牌号、批号、烘焙记录）、焊工（资格证书）及其工装（设备）、焊接工艺规程（WPS）、在线监控的数据曲线、无损检测（NDT）报告（报告编号、等级）、回转修复记录等，构建公司统一的焊接质量数据集成平台，实现设计—工艺方案—材料—生产制造—质量控制—质量追溯之间的过程互联互通，消除信息孤岛。在平台上开展基于大数据统计过程质量的实时可视化分析和异常自动报警，实现质量问题的根

因追踪、预警和辅助决策；建立基于预测建模的质量趋势分析，实时预报异常变化的系统性质量隐患；建立焊接质量过程的动态检查与优化机制，进行供应商焊接外包分包商的运行表现绩效、焊工技能稳定性、焊机设备状态影响度、焊接工艺规程有效性等考核，系统进行质量结果动态分级；依托知识工程，将沉淀的个人智慧、典型实例、失败分析报告、最佳实践文件化、结构化并存储于焊点数据库，使之可查询、可学习、可推送，作为焊接质量“数据库”服务于持续改善、促进人员赋能，并最终形成以数据为依据、全员参与、持续改善为核心的焊接质量管理文化。

5 结语

化工大型钢结构焊接质量问题，已经从单纯的制造工艺走向了一项涉及到设计、选材、制造、试验、评定乃至服役状态监测的系统性的全方位质量控制管理问题。其结果在很大程度上影响着设备的安全、稳定运行及使用寿命、制造成本等诸多方面。实践经验及技术研究表明确保大型化工装备焊接质量，必须认识到焊接质量问题涉及到材料的性能、工艺的合理、人的因素、设备的控制以及体系等多个方面，某个方面没有问题并不意味着焊接质量没有问题，通过智能化过程监控的技术支撑、技术工艺的细致化和规范化管理、无损检测的装备及能力的现代化更新和构建、基于全流程数字化的过程数据追溯的质量生态系统构建来实现大型化工装备制造关键焊缝质量的最优控制，通过技术的创新及管理的精益相结合，从质量和责任方面实现对各个环节质量的有力支撑，全员责任、体系管控和精准控制，实现每一道焊缝质量的保证，是最终支撑化工行业大型装备精品建造和国家能源化工工程项目本质安全的基础。

参考文献

- [1] 姚凯润,王树强,陈光凯,等.钢结构参数化设计与机器人焊接离线编程应用[J].机械工程与自动化,2024(2):31-33.
- [2] 杨喜忠.加强环焊接工艺改进在海洋钢结构中的应用[J].石油和化工设备,2024,27(10):78-81.
- [3] 张刚,杨立军,田国栋.海洋石油钻井平台钢结构焊接相关问题研究分析[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(9):45-47.