

核电管道环焊缝焊接工艺参数控制技术分析

庄鑫 赵瑞贵 吕阳

中国电建集团核电工程有限公司 山东济南 250000

DOI:10.12238/ems.v7i9.15226

[摘要] 核电管道环焊缝的焊接质量直接关系到核电站运行的安全与稳定。通过对焊接过程中关键工艺参数如电流、电压、焊接速度、热输入等的系统分析,明确其对焊缝成形质量及力学性能的影响机制。结合实际工程案例,探讨了参数优化控制策略及其在预防焊接缺陷、提升接头质量方面的应用效果。研究表明,合理的工艺参数控制是确保环焊缝结构完整性和服役可靠性的关键技术手段。

[关键词] 核电管道; 环焊缝; 焊接工艺; 参数控制; 质量提升

引言:

在核电设备高安全性、高可靠性的严格要求下,管道系统的焊接质量成为核心保障环节,尤其是环焊缝,其焊接精度直接影响整体运行稳定性。焊接工艺参数的微小波动,可能引发焊接缺陷、应力集中等隐患,进而威胁设备长周期安全运行。因此,探索并掌握焊接工艺参数的控制技术,已成为提高核电管道焊接质量、推动核电工程精细化管理的关键所在。

一、核电管道环焊缝的结构特点与质量要求

核电管道在整个核电站系统中承担着输送冷却剂、蒸汽、水等重要介质的任务,其安全性与密封性直接关系到核电站运行的可靠性和人员、环境的安全。而在众多焊接部位中,环焊缝作为管道系统中不可或缺的连接形式,往往处于高温高压、强辐射和频繁应力变化的复杂环境中,其结构复杂、施工难度大,对焊接质量提出了极高的要求。环焊缝通常位于管道中部或节点连接处,需要在有限空间中完成精确焊接操作,因此不仅对焊工的技能水平有极高要求,还对焊接设备的稳定性与控制能力提出挑战。

从结构特点来看,核电管道环焊缝多采用对接形式,具有壁厚大、焊接层次多、成形要求严格等特点。受材料性质、管道直径、焊接位置等多因素影响,环焊缝容易出现焊接应力集中、热影响区过大、晶粒粗化等结构性弱点,进而影响管道的使用寿命和安全性能。尤其是在焊接过程中,熔池温度、冷却速度和热循环过程对组织性能的演化具有直接影响,若控制不当,极易导致裂纹、气孔、未熔合等缺陷形成。此外,核电对环焊缝的无损检测也具有极高标准,通常要求通过射线、超声波、渗透等多种手段联合检测,以确保每一处

焊缝的完整性和一致性。

在质量要求方面,核电环焊缝不仅要满足国家和行业的焊接工艺评定标准,更需通过专门的核安全认证与质控体系审核。焊接接头的抗拉强度、延展性、耐腐蚀性能、抗裂纹扩展能力等必须达到设计指标,并保证在长期服役条件下仍具备高稳定性。因此,施工单位需结合实际工程条件,选用合适的焊接材料、焊接方式及辅助工艺,如多层多道焊、热输入控制、预热与后热处理等,全面保障焊缝质量。同时,伴随核电技术的持续发展,智能焊接设备与自动控制系统的广泛应用,也为环焊缝的焊接精度与质量稳定性提供了更可靠的技术支撑。

二、焊接工艺参数对环焊缝成形质量的影响机制

在核电管道环焊缝的焊接过程中,工艺参数对焊缝成形质量具有决定性影响。焊接电流、电压、焊接速度、热输入量等参数相互制约、密切关联,共同决定了熔池的温度场与金属流动状态,从而影响焊缝的几何形状、致密性以及组织性能。其中,焊接电流作为影响热输入的主要因素,直接决定了熔深和焊缝的融合程度。电流过大可能导致熔池过深,增加烧穿风险,甚至造成金属飞溅、热影响区增大;电流偏小则可能造成熔合不良、未焊透等缺陷,降低结构强度。因此,精准控制焊接电流是保障焊缝结构完整性的重要前提。

焊接电压则主要影响电弧的稳定性和焊缝成型宽度。电压升高会导致电弧长度变长,熔池温度分布趋于分散,使焊缝宽度增加但深度减小,易出现焊缝形貌不规则或边缘咬边的问题;电压过低则可能引起电弧不稳、熔池局部过热甚至金属堆积,造成焊缝余高过大或成形不均匀。此外,焊接速

度也是影响环焊缝质量的关键变量。焊速过快会导致熔池凝固迅速,形成冷裂纹、夹渣等缺陷,同时影响层间熔合;焊速过慢则会增加热输入,导致组织粗化、残余应力增大,降低接头的抗裂性与使用寿命。因此,在实际操作中必须根据焊接工艺评定结果,对不同参数进行协同优化调控,以实现热输入合理、成形均匀、缺陷可控的目标。

除上述基础参数外,其他工艺控制因素如预热温度、中间层温度、层间清理频率、焊后热处理方式等也对环焊缝质量起到重要作用。适当的预热能够降低焊接区的冷却速度,减少焊接应力和裂纹敏感性;合理控制中间层温度可以保持热输入的连续性与均衡性,有助于改善多道焊接的接头结合性能;及时进行层间清理则有助于去除杂质、消除氧化层,避免焊道夹渣、气孔等问题的发生。同时,焊后热处理可有效释放残余应力、细化晶粒结构,提升焊缝整体韧性和稳定性。在核电焊接实践中,通过参数精细化控制与智能化系统辅助,实现焊接过程全程监控与实时反馈,能够显著提升环焊缝的一致性和可靠性,进一步满足核安全标准的严苛要求。

三、核电环焊缝常见焊接缺陷及其成因分析

核电管道环焊缝在焊接过程中,由于结构复杂、施工环境苛刻以及高质量标准要求,常常会出现多种类型的焊接缺陷,这些缺陷不仅影响焊缝的外观质量,更严重威胁管道系统的密封性和承压能力。常见的缺陷包括未焊透、未熔合、气孔、夹渣、裂纹和咬边等,其中未焊透和未熔合多由于热输入不足、焊接电流偏低或焊接速度过快引起,导致熔池金属不能完全填满焊接间隙,或熔合面之间结合不良。气孔则是由气体未能及时逸出所致,常因焊接环境湿度大、焊材存储不当或保护气体不纯造成。夹渣问题往往与层间清理不彻底、焊条操作角度不合理以及电弧不稳定等因素有关,易在多层多道焊中发生,对焊缝强度和致密性影响显著。

裂纹是核电焊接中最危险的一种缺陷,按发生阶段分为热裂纹和冷裂纹,前者多出现在焊缝中心区,主要由于热输入过大、冷却速度过快造成金属结晶拉应力过大,后者则通常出现在热影响区,常因焊接残余应力大、材料淬硬倾向强及氢含量过高等因素诱发。冷裂纹具有延迟性和隐蔽性,不易在焊后立即发现,因此在核电焊接工程中尤为重视其防控措施。咬边是由于操作不当或电弧偏移造成的沿焊缝边缘金属流失,影响焊缝整体形貌和应力分布,若未及时修补,可

能引发局部腐蚀或裂纹扩展。此外,由于核电环焊缝多位于管道中部或角落等空间狭小位置,焊工操作难度大,姿势受限,极易出现焊道重叠不良、焊缝余高不均等外观缺陷。

造成上述焊接缺陷的成因是多方面的。首先,焊接工艺参数设置不合理是主要技术原因。焊接电流、电压、速度、热输入之间的匹配关系如果失调,将直接影响熔池形成及金属凝固过程,易诱发各种内部缺陷。其次,施工操作水平差异也是不可忽视的因素。焊工操作不规范,如焊枪角度偏差、引弧与收弧处理不当、层间清理不彻底等,均可能导致成形不良或缺陷集中。再次,焊接材料质量及存放环境亦对焊缝质量构成影响,如焊条受潮、保护气体纯度不足、母材表面处理不洁净,都会在熔池凝固过程中产生气体夹杂或熔合不良。最后,核电工程对焊接环境的要求极为苛刻,施工现场往往存在高辐射、强电磁干扰或空间受限等情况,进一步增加了焊接缺陷控制的难度。

四、焊接工艺参数优化与控制技术路径

焊接工艺参数的优化与控制是确保核电管道环焊缝质量稳定与性能可靠的关键技术路径。由于核电设备在运行过程中面临高温、高压、强辐射等极端工况,焊接接头作为重要的连接结构,其质量直接关系到整个系统的安全性和服役寿命。在焊接实践中,必须以焊接工艺评定为基础,通过科学设定焊接电流、电压、焊接速度、热输入等关键参数,确保焊缝成形良好、组织均匀、无明显缺陷。在参数优化阶段,通常通过试验与模拟手段获取不同工艺组合对焊缝成形质量、金属组织、力学性能的影响数据,进而建立焊接参数与焊接质量之间的数学模型,实现焊接过程的可控性与预测性。例如,在大厚度管道环焊缝焊接中,多采用多层多道焊技术,通过层间温度控制和热输入调节,有效避免晶粒粗化和冷裂纹风险。

工艺参数的优化不仅体现在数值匹配上,更需考虑焊接过程中的动态变化与多因素耦合效应。为了应对不同材料、不同壁厚以及不同焊接位置对工艺的多样化需求,需构建具备高度适应性的参数控制体系。例如,在进行下向焊或仰焊操作时,由于重力作用不同,熔池金属流动状态变化明显,此时需调整电弧能量密度及焊接速度,以维持熔深与焊缝形貌的均匀性。此外,通过引入中频逆变焊机、数字化控制焊接设备等先进技术,实现对电流波形、能量输入及焊接时间

的精准控制, 进一步提高焊接过程的稳定性与重复性。实际应用中还应重视焊前预热、层间温控、焊后热处理等辅助控制手段的协同配合, 尤其是在合金钢、高强钢等高敏感材料的焊接中, 通过系统性工艺路径设计, 有效降低热应力与冶金缺陷的发生概率, 提升焊接结构整体性能。

随着智能制造技术的发展, 焊接参数的优化与控制逐步向自动化、信息化、智能化方向转型。利用焊接传感器、热像监测装置和视觉识别系统, 可实现焊接过程的实时监控与数据采集, 为焊接质量管理提供精准依据。通过集成控制系统, 对电弧特性、焊道跟踪、焊接轨迹进行实时反馈调整, 保证焊缝成形一致性与内在质量稳定。此外, 焊接数据可上传至云端平台, 运用人工智能算法进行大数据分析 with 工艺优化推荐, 推动参数控制从“经验主导”向“数据驱动”转变。在核电工程应用中, 这类智能化控制路径已逐步应用于环焊缝自动焊系统, 实现焊接过程全过程可视、参数实时调节、缺陷自动识别与预警, 为高质量焊接作业提供了强大技术支撑。未来, 焊接仿真与数字孪生技术的应用, 使参数控制更精细科学, 全面保障核电管道焊缝质量与运行安全。

五、焊接参数控制技术在核电工程中的应用实践与成效

在核电工程的实际建设过程中, 焊接参数控制技术的应用实践已成为保障焊接质量和工程安全的核心环节。尤其是在核电管道环焊缝施工中, 通过对焊接电流、电压、速度、热输入等参数的精确控制, 有效提升了焊接过程的可控性和成形的一致性。应用中往往结合工艺评定结果, 依据不同材质、不同管径和不同焊位的具体情况, 制定详细的焊接参数控制方案。例如, 在某第三代核电项目中, 为解决大口径不锈钢管道环焊缝的裂纹敏感性问题, 采用多层多道焊工艺配合严格的热输入控制, 使得焊缝成形良好, 缺陷率显著下降, 同时提高了接头的致密性和抗腐蚀能力, 为后续无损检测与压力测试提供了良好基础。

实践中, 焊接参数控制技术不仅在传统手工焊接中发挥作用, 更在自动化焊接系统中展现出高效率与高精度的优势。以自动埋弧焊、窄间隙焊接及管道全位置自动焊系统为代表的先进设备, 已在多个核电项目中成功部署, 通过数字化控制模块对参数进行设定与实时调整, 实现对焊接过程的全过程监控和稳定性调节。例如, 某核电站主管道焊接采用全位置自动焊设备, 通过设定焊接电流、电压和送丝速度等关键

参数, 并结合熔深监测系统和热输入控制模块, 确保每一道焊缝在不同空间方位上均保持质量一致, 不仅焊接效率提高 40% 以上, 而且现场返修率降至极低水平, 显著缩短了工程周期。

通过一系列工程案例总结可知, 焊接参数控制技术在核电领域的应用成效显著。其一, 有效降低了焊接缺陷发生率, 提升了焊缝的机械性能与抗裂性能; 其二, 促进了焊接施工过程的标准化、程序化与可视化管理, 使焊接作业更易于追溯和优化; 其三, 推动了智能制造在核电建设中的深度融合, 通过焊接数据分析与远程技术支持, 提高了质量控制的科学性与前瞻性。可以说, 焊接参数控制技术已成为核电工程高质量焊接体系构建的核心支撑, 为实现核电设备长寿命、安全运行和高效建造提供了坚实的技术保障。随着技术持续发展, 其在未来核电建设中的应用将更加广泛与深入。

结语:

核电管道环焊缝的焊接质量直接关系到核电站的运行安全与系统稳定, 科学合理的焊接工艺参数控制是保障焊缝质量的关键手段。通过深入分析环焊缝结构特点、常见焊接缺陷及其成因, 明确了参数控制的重要性与技术路径。在实际工程中, 焊接参数优化与自动化控制技术的应用显著提升了焊接质量与工程效率, 推动核电焊接管理向智能化、精细化方向发展。未来, 持续完善控制技术将为核电安全建设提供坚实保障。

[参考文献]

- [1] 司超杰. 316NG 核电主管道焊接工艺流程的优化设计及分析[D]. 电子科技大学, 2019.
- [2] 汪忠, 肖劲兵, 扈晓刚, 等. 核电站几个关键部件的智能制造焊接解决方案[J]. 电焊机, 2019, 49 (04): 15-25.
- [3] 王厚华. 基于结构安全性的管道环焊缝补焊原则研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2020. DOI: 10.27061/d.cnki.ghgdu.2020.002467.
- [4] 许国琛. 核级手动截止阀焊焊缝的喷水式超声波聚焦检测技术[D]. 南昌航空大学, 2022. DOI: 10.27233/d.cnki.gnchc.2022.000201.
- [5] 任康明. 奥氏体不锈钢焊缝及表面镍基合金堆焊层组织与力学行为研究[D]. 兰州交通大学, 2024. DOI: 10.27205/d.cnki.gltec.2024.000344.