

供热一次网施工中焊接质量控制与无损检测技术应用

周天予

包头市绿源市政公用工程有限责任公司 内蒙古 包头 014030

摘要: 随着我国城市集中供热系统的快速发展, 供热一次管网作为热能输送的关键基础设施, 其安全性和可靠性直接关系到整个供热系统的稳定运行。焊接作为一次网管道连接的核心工艺, 其质量直接影响管道的承压能力、密封性能及服役寿命。本文系统分析了供热一次网施工中焊接质量控制的关键环节, 重点探讨了无损检测 (NDT) 技术在焊缝质量检验中的应用现状、技术特点及发展趋势。提出了推进焊接自动化与智能化装备应用、构建基于数字孪生的智能检测与管理平台、完善标准体系与第三方监管机制的综合策略, 旨在为提升供热一次网焊接工程质量提供理论支持与技术参考。

关键词: 供热一次网; 焊接质量控制; 无损检测; 射线检测; 超声波检测; 焊接工艺评定

引言

集中供热是现代城市能源供应体系的重要组成部分, 具有节能、环保、高效等显著优势。供热一次网作为连接热源厂与换热站之间的主干管网, 通常采用大口径、高参数 (高温高压) 的直埋预制保温钢管, 设计压力一般为1.0~2.5MPa, 介质温度可达130~150℃。在此工况下, 管道焊缝一旦出现缺陷, 极易引发泄漏、爆管等安全事故, 不仅造成能源浪费和经济损失, 更可能危及公共安全。焊接是供热一次网施工中最关键、最复杂的工序之一。据统计, 在供热管网运行故障中, 约70%以上与焊接接头质量问题直接相关。因此, 如何在施工阶段有效控制焊接质量, 并通过科学、可靠的无损检测手段对焊缝进行100%覆盖检验, 成为保障一次网长期安全运行的核心课题。

1 供热一次网焊接质量控制体系构建

1.1 焊接质量控制的重要性

供热一次网多采用螺旋焊管或直缝埋弧焊钢管 (如 Q235B、L245N 等碳钢材质), 其焊接接头需承受内压、土壤应力、热胀冷缩等多重载荷。焊接过程中若存在未熔合、未焊透、气孔、夹渣甚至裂纹等缺陷, 将显著削弱接头的力学性能, 形成应力集中区域, 在长期交变热应力作用下容易诱发疲劳裂纹, 进而导致突发性失效。尤其在北方严寒地区, 低温环境会进一步降低钢材韧性, 使含缺陷焊缝更容易发生脆性断裂。因此, 建立覆盖焊前准备、焊接实施到焊后检验的全过程质量控制体系, 不仅是满足规范要求的基本前提, 更是保障城市供热“生命线”安全运行的根本保障。

1.2 焊接前准备控制

1.2.1 焊接工艺评定与作业指导书编制

焊接工艺评定 (PQR) 是确保焊接质量科学可控的基础环节。依据《承压设备焊接工艺评定》(NB/T47014) 等标准, 施工单位必须针对所用母材、焊材、焊接方法及接头形式开展系统性试验, 验证拟定工艺能否获得满足力学性能和金相组织要求的焊缝。只有通过评定的工艺参数组合, 方可用于编制正式的焊接作业指导书 (WPS)^[1]。该指导书应详细规定坡口形式、预热温度、层间温度控制范围、焊接电流电压、焊接速度、道间清理要求等关键要素, 并作为现场施焊的唯一技术依据, 杜绝凭经验随意操作的现象。

1.2.2 焊工资格认证与动态管理

焊工是焊接质量的直接执行者, 其技能水平与责任心至关重要。所有参与供热一次网焊接的人员必须持有国家市场监督管理总局核发的特种设备焊接操作人员证, 且证书项目覆盖实际施焊位置与方法。施工单位应建立焊工实名制档案, 记录其施焊焊口数量、一次合格率及返修情况, 并实施月度绩效评估。对于连续出现不合格焊口或违反工艺纪律的焊工, 应及时暂停其作业资格并安排再培训, 形成“准入—考核—退出”的闭环管理机制, 从源头保障人力素质。

1.2.3 焊接材料与设备的规范化管理

进场钢管须附带完整的材质质量证明书, 并按批次抽样复验化学成分与力学性能; 焊条、焊丝、焊剂等消耗品应分类存放于干燥库房, 使用前严格按说明书要求烘干 (如 E4303 焊条需 350℃ 保温 1 小时), 并在现场置于恒温保温筒中随用随取, 防止吸潮导致氢致裂纹。同时, 电焊机、预热加热器、红外测温仪等关键设备应建立台账, 定期校准维护, 确保输出参数精准可靠, 为高质量焊接提供硬件支撑。

1.3 焊接过程控制

1.3.1 坡口加工与组对精度控制

宜优先采用机械切割或数控坡口机加工，确保坡口角度、钝边尺寸符合WPS要求，表面无氧化皮、油污、水分等污染物。组对时应使用专用卡具或定位焊固定，控制组对间隙在2~3mm之间，错边量不得超过壁厚的10%且最大不超过2mm。严禁采用强力敲击或火焰矫正等方式强行组对，以免在焊前即引入残余应力，增加焊接变形与开裂风险。

1.3.2 预热与层间温度的实时监控

对于壁厚不小于6mm的碳钢管道，或在环境温度低于5℃条件下施工，必须实施焊前预热。预热温度通常设定在100~150℃，可通过电加热带或火焰加热器实现，并使用接触式或红外测温仪多点测量确认^[2]。焊接过程中，每一道焊层完成后应立即测量层间温度，确保其不低于预热温度且不超过250℃。过低易诱发冷裂纹，过高则可能导致热影响区晶粒粗化、韧性下降。温度监控数据应实时记录，作为过程追溯的重要依据。

1.3.3 焊接参数执行与环境适应性调整

现场施焊必须严格遵循WPS规定的工艺参数。推荐采用氩弧焊（GTAW）进行打底焊，因其电弧稳定、保护气体充分，可有效保证根部成形与熔合质量；填充与盖

面可选用焊条电弧焊或半自动焊以提高效率。操作中应保持稳定的运条速度与电弧长度，避免忽快忽慢或电弧过长导致气孔、咬边等缺陷。当遭遇雨雪、大风（风速超过8m/s）或相对湿度高于90%等不利天气时，应立即停止露天焊接，必要时搭设全封闭防风防雨棚，并在棚内采取局部加热措施，确保焊接微环境满足工艺要求。

1.4 焊后处理与标识

为减少氢致延迟裂纹风险，对于厚壁或高强钢管道，建议在焊后立即进行250~350℃的消氢后热处理，持续0.5至1小时，随后缓冷。焊缝表面应打磨平整，清除飞溅、焊瘤等影响外观及后续防腐的杂物。更重要的是，每一道焊缝都应清晰标注焊工代号、焊接日期及唯一焊口编号，实现从材料、工艺到人员的全链条可追溯。这种标识不仅是质量责任落实的体现，也为后期运行维护和事故溯源提供关键信息支撑。

2 无损检测技术在供热一次网中的应用

无损检测是验证焊接质量是否符合标准要求的最终手段。根据《城镇供热管网工程施工及验收规范》（CJJ28）规定，供热一次网焊缝应进行100%外观检查，并按设计要求进行无损检测，通常抽检比例不低于10%，穿越道路、河流等关键部位应100%检测。

2.1 常用无损检测方法比较

表1：无损检测方法比较

检测方法	原理	优点	缺点	适用场景
射线检测（RT）	X/γ射线穿透焊缝，胶片或数字成像	直观、可永久记录、对体积型缺陷敏感	辐射危害、成本高、对裂纹不敏感	重要节点、返修焊口
超声波检测（UT）	高频声波反射识别缺陷	灵敏度高、可定位定量、无辐射	依赖操作者经验、无永久记录（传统）	大壁厚管道、现场快速筛查
磁粉检测（MT）	磁场+磁粉显示表面裂纹	操作简便、成本低、灵敏度高	仅适用于铁磁性材料、仅检表面	焊缝表面及近表面检查
渗透检测（PT）	毛细作用显像表面开口缺陷	适用于非磁性材料、操作简单	仅检表面开口缺陷、污染环境	不锈钢

2.2 射线检测（RT）的应用

射线检测长期以来是供热一次网焊缝质量验收的传统手段，尤其在重要节点或返修焊口的确认中具有不可替代的地位。近年来，随着数字成像技术的发展，计算机射线成像（CR）和数字射线成像（DR）逐步取代传统胶片，不仅提高了图像分辨率和对比度，还大幅缩短了检测周期，减少了化学废液排放。在实施过程中，需根据管径与壁厚合理选择射线源（如Ir-192同位素或便携式X光机），优化焦距与曝光参数，确保底片黑度控制在2.0~4.0之间，像质计灵敏度达到2%以上。评片工作必须由持有RT II级及以上资格的专业人员完成，以保证缺陷

判读的准确性^[3]。尽管如此，RT仍面临辐射防护复杂、检测效率低、对未熔合等危险缺陷检出能力有限等问题，限制了其在大规模快速施工中的全面应用。

2.3 超声波检测（UT）的推广

随着相控阵超声（PAUT）和衍射时差法（TOFD）等先进超声技术的成熟，超声波检测在供热管网中的地位日益提升。PAUT通过电子控制多晶片探头的激发时序，实现声束偏转、聚焦和扫描，可在不移动探头的情况下完成整个焊缝截面的覆盖检测，显著提高检测效率与缺陷检出率，尤其对未熔合、裂纹等面状缺陷具有优异的识别能力。TOFD则利用缺陷尖端产生的衍射波进

行定量分析,对裂纹高度测量精度高,适合评估缺陷的临界状态。相较于RT,UT无电离辐射,更适合在城市密集区域作业;检测速度快,可实时显示结果,便于现场决策;且可与管道自动爬行器集成,实现环焊缝的全自动检测。然而,要充分发挥UT的优势,必须配备经过专项培训的检测人员,使用与实际焊缝结构匹配的校准试块,并建立标准化的操作流程,以减少人为误判。

2.4 综合检测策略

鉴于单一无损检测方法难以兼顾所有缺陷类型与工程需求,推行“互补融合、重点突出”的综合检测策略已成为行业共识。对于普通直管段,可优先采用PAUT进行100%快速筛查,利用其高效率与高灵敏度优势;对PAUT发现的可疑信号或设计明确要求的关键部位(如穿越段、弯头连接处),再辅以DR射线成像进行复核确认,以获得直观图像证据。同时,所有焊缝无论是否进行内部检测,均应100%进行表面检测,铁磁性材料推荐使用磁粉检测,非铁磁性材料则采用渗透检测。未来,随着智能检测装备的发展,可进一步整合PAUT、TOFD与DR数据,构建多模态融合的焊缝质量评估平台,实现从“检出缺陷”向“精准评估+寿命预测”的跨越。

3 存在问题与优化建议

3.1 当前存在的主要问题

尽管行业在焊接质量控制方面取得显著进步,但仍存在若干突出问题。部分施工单位为压缩成本,大量使用流动性强、培训不足的外包焊工,导致焊接质量波动大;受工期压力影响,无损检测常被简化为“走过场”,抽检比例远低于规范要求;传统超声检测高度依赖个人经验,易出现漏检或误判;此外,多数项目仍采用纸质记录,缺乏对焊接参数、检测结果等数据的系统采集与分析,难以实现质量趋势预警与工艺优化。

3.2 优化建议

3.2.1 推进焊接自动化与智能化装备应用

为减少人为因素对焊接质量的影响,应大力推广管道全位置自动焊技术。目前市场上已有成熟的轨道式或爬行式自动焊机,可实现打底、填充、盖面的全自动或半自动操作,焊接参数恒定、热输入可控、成形美观,显著提升焊缝一致性与合格率^[4]。尤其在长距离直管段施工中,自动化焊接可大幅缩短工期,降低对高技能焊工的依赖,是未来发展的必然方向。

3.2.2 构建基于数字孪生的智能检测与管理平台

建议整合BIM、GIS、物联网与人工智能技术,构

建供热管网焊接质量智能管理平台。该平台可实时采集焊接电流、电压、温度、检测图像等多源数据,通过AI算法自动识别缺陷类型与等级,生成电子化检测报告,并与焊口空间位置绑定。管理人员可通过移动端随时调阅任意焊口的全过程质量档案,实现从“被动抽检”向“主动预警”转变,为运维阶段的风险评估提供数据基础。

3.2.3 完善标准体系与第三方监管机制

现行规范对新兴无损检测技术的应用尚缺乏明确指引。建议主管部门加快修订CJJ28等标准,补充PAUT、TOFD、DR等技术的适用条件、验收准则、人员资质及设备性能要求。同时,鼓励建设单位委托具备CMA/CNAS资质的第三方检测机构驻场监督,独立开展焊接工艺审核、过程抽查与无损检测复验,形成“施工自检、监理平行检验、第三方飞检”的多层次质量保障体系,切实提升监管公信力。

4 结语

供热一次网焊接质量直接关乎城市供热系统的安全与稳定。通过建立健全涵盖焊前、焊中、焊后的全过程质量控制体系,并科学应用以超声相控阵、数字射线为代表的先进无损检测技术,可显著提升焊缝一次合格率,降低运行风险。未来,随着智能制造与数字孪生技术的发展,供热管网焊接质量控制将向自动化、智能化、标准化方向持续演进。行业各方应加强技术协同与标准建设,共同筑牢城市供热“生命线”的安全基石。

参考文献

- [1]尹承磊,郭宇强,丁刚,等.长输供热管道焊接工艺探讨[C]//中国市政工程华北设计研究总院有限公司,中国建设科技集团股份有限公司.2021供热工程建设与高效运行研讨会论文集.济南能源工程集团有限公司;济南热力集团有限公司,2021:617-626.
- [2]秦建斌,刘俊杰,崔刚,等.大管径长输供热管道沟下焊接关键技术研究[C]//中国市政工程华北设计研究总院有限公司,《煤气与热力》杂志社有限公司.2025供热工程建设与高效运行研讨会论文集(中).中国建筑一局(集团)有限公司,2025:472-477.
- [3]朴成刚,王建玲,徐伟,等.供热管网非开挖无损检测技术研究现状浅谈[J].区域供热,2021,(01):93-97.
- [4]林爱玲.城市供热管网系统泄漏检测技术研究[J].新城建科技,2024,33(11):90-92.