

X 射线检测技术在输水金属管道焊接检验中的应用

于大力, 蒋志刚, 曹志勇

(山东省水利工程试验中心有限公司, 山东 济南 250220)

【摘要】在现代水网建设工程中,各种用途和各种形式的输水金属管道焊接处,难免会产生一些体积型缺陷(气孔、夹渣等)、面积型缺陷(未焊透、未熔合等)或外观缺陷(错边、咬边等)。针对前述焊缝质量缺陷通过 X 射线检测技术均能够发现并且对其进行定性、定量的判定和存档追溯。文章简要介绍了目前 X 射线检测存在的问题、相应对策及检测实例。

【关键词】水网建设;输水工程;金属管道;焊缝检测;无损探伤;X 射线探伤

【中图分类号】TG457.6

【文献标志码】A

【文章编号】1009-6159(2026)-07-0047-04

Application of X-ray Inspection Technology in Weld Inspection of Metallic Water Pipelines

YU Dali, JIANG Zhigang, CAO Zhiyong

(Shandong Testing Center of Water Conservancy Project Co., LTD., Jinan, Shandong 250220, China)

Abstract: In the construction of modern water supply network projects, weld joints of metallic water pipelines with various types and service conditions inevitably contain volumetric defects (porosity, slag inclusion, etc.), planar defects (incomplete penetration, lack of fusion, etc.) and surface defects (mismatched edge, undercut, etc.). X-ray inspection technology can detect the above weld defects and realize qualitative & quantitative evaluation together with file archiving and traceability. This paper briefly introduces the existing problems, corresponding countermeasures and engineering cases of current X-ray inspection.

Key words: Water network construction; Water Conveyance Project; Metallic pipeline; Weld inspection; Non-destructive testing; X-ray flaw detection

近年来,随着山东省水网建设的快速发展,各种用途和各种形式的金属输水管道及其数量也与日俱增,各式各样的金属输水管道在制造和衔接过程中,各种类型的焊接技术(电弧焊、气体保护焊等)也得到了广泛应用。为确保焊接处熔深与熔合质量,控制其内部致密性,消除应力集中,保证几何尺寸精度,焊缝质量检测便成为确保管道系统结构完整和安全运行的核心环节,其重要性不言而喻。

目前常用的无损检测技术包括磁粉、渗透、超声和 X 射线等。磁粉检测技术仅适用于铁磁性材料的表面及近表面缺陷检测,而且对被测物表面清洁度要求比较苛刻。渗透检测技术也只能识别表面开口缺陷,且前期处理工作繁重;超声检

测技术则高度依赖操作人员经验,而且需要将被测焊缝的两侧打磨至金属面层,一旦打磨不干净,就会影响检测结果。相比之下 X 射线检测技术既适用于体积型缺陷(气孔、夹渣等)检测,又可用于面积型缺陷(未焊透、未熔合等)检测,同时也能用于外观缺陷(错边、咬边等)检测,而且对现场检测环境以及工件表面处理要求相对宽松,其影像直观可视,可提供永久性视觉证据,便于缺陷定性、定量判定和存档追溯,虽然有一定的辐射危险,但通过采取适当的防护措施可极大降低辐射带来的危害,又因其独特的技术优势,所以在水网输水金属管道焊缝缺陷检测中具有

收稿日期:2026-02-15

作者简介:于大力(1988—),男,工程师

不可替代的作用,得到了工程界的高度认可。

1 输水金属管道焊缝质量检测方法

输水金属管道或构件因形状、尺寸和用途的不同而不同,且多埋于地下或设置于水工建筑物之中,因此现场焊缝检测的方式方法也不相同。近年来,通过深入研讨和现场应用,逐渐形成了一套较为切合水利工程特点的水利金属管道焊缝(环缝)检测技术系统,简介如下。

当管径大于或等于 700 mm 时,宜采用单壁单影中心周向曝光的方式进行管道焊缝检测,即将 X 射线机架设在管道的中央位置,胶片贴在管道外侧,然后根据射线检测的技术要求、管道壁厚、管径大小,调整好相应的 X 射线透照参数进行检测。这种 X 射线透照的方式,可以一次性检测整条焊缝,缩短了检测时间,提高检测效率。

当管径在 100~700 mm 范围之内时,宜采用双壁单影的方法,首先仅对一侧管壁成像,这样能够准确标记检测的位置;然后依次对整条管道进行多次曝光,即可实现金属管道焊缝 100%检测。

当管径小于或等于 100 mm 时,先是通过偏心透照距离公式,确定透照的距离和角度,然后采用双壁双影的方式进行管道焊缝检测,将焊缝的整条影像直接透照在一张底片上。这样的透照方式,可以很直观地观测管道的整条焊缝。

2 存在的问题及对策

2.1 传统检测工艺参数匹配度不足及其解决方案

水网建设工程中,不同的部位使用的管道材质、厚度或尺寸各异。例如:某一工程直埋管道壁厚 18 mm,顶管弯头部位壁厚则为 22 mm,衔接焊缝两侧管道壁厚相差很大,检测时,容易导致底片灵敏度和黑度达不到相关标准要求(如承压设备无损检测(NB/T 47013.2—2015)标准中,检测技术等级为 AB 级时黑度范围为 2.0~4.5)。

针对上述类似问题,建立了《水利管道射线检测工艺库》,按材质、壁厚、管径分类(例如:材质为 Q235B 的管道,壁厚为 20 mm,内径为 1 000 mm),明确对应的管电压(160~200 kV)、曝光时间(3~5 min)、焦距(≥ 600 mm),然后采用无损检测标准与规范推荐的平方反比定律计算曝光量,结合水利工程常用的双壁单影、单壁单

影等透照方法,优化透照几何条件。

2.2 工件表面预处理不规范及其解决方案

如果焊缝两侧焊渣未清除或 20 mm 范围内锈蚀清理不到位(粗糙度 $Ra > 12.5 \mu\text{m}$),会导致散射噪声增加,缺陷影像对比度大幅度下降 15%~20%。针对上述工作表面预处理不到位的情况,按照相应技术要求,采用机械打磨(角磨机配 120 目砂轮片)+喷砂处理(石英砂粒径 0.8~1.2 mm),压力 0.5~0.7 MPa,确保表面清洁度达 Sa2.5 级,粗糙度 $Ra \leq 12.5 \mu\text{m}$ 。对高强钢管道(如 Q690 型钢材),预处理后应在 2 h 内完成检测,以防止二次锈蚀的产生。

2.3 复杂节点透照盲区及其解决方案

水网管道中,V 型弯头(夹角 $0^\circ \sim 40^\circ$)较多,在透照过程中,由于 X 射线检测设备架设在管道中央的位置,其两侧的焦距存在不一致现象,直接影响底片质量(一侧底片黑度不够)。

对上述类似的复杂节点透照盲区,一般采用多角度组合透照的方式,即用“主射+侧射”三向透照($0^\circ \pm 30^\circ$),定向 X 射线机,旋转角度并配合铅制楔形补偿块(厚度 5~10 mm)均衡射线强度。在现场的多次实践中发现(以管道材质为 Q235B 的管道为例,壁厚为 10 mm,内径为 1 000 mm、对接焊缝角度为 30°),采用周向 X 射线机(型号为 XXGHz-3005),单壁单影中心曝光的方式进行检测,由于设备架设在管道中间,受施工环境的影响,两侧的焦距会存在差异,此时使用焦距较远的一侧数值(528 mm)作为检测焦距的固定值。经过现场大量试验发现,当采用 200 kV,透照 0.8 min,冲洗胶片后,也可将小角度(夹角 $0^\circ \sim 30^\circ$)的弯头焊缝进行清晰透照,得到的底片能够满足相关标准黑度 AB 级的要求。

2.4 冷却时间过短及其解决方案

大部分施工单位为加快施工进度、提高经济效益,忽视焊接冷却时间,要求焊接完成后马上进行检测。更有甚者,在焊接完成后,直接在热影响区撒水冷却。这种做法相当于对焊口进行了淬火处理,容易使焊口处的金相组织发生改变,使得其脆性增加,对后续使用埋下了安全隐患,大大降低了管道使用寿命。类似这样的情况,相应对策是用大型风扇或别的通风设备,加快空气流通,使焊接部位温度逐步下降冷却,经现场反复

试验,夏季冷却时间缩短至 6 h 左右为宜。

3 检测实例

3.1 工程简况

某市为解决两个城区之间的供水和灌溉问题,新增设一条材质为 Q235B 型钢材的金属输水管道。管道全长 2.4 km,内径 1 200 mm,顶管段壁厚 22 mm,其余管段壁厚均为 18 mm,焊缝接头形式为对接或角接两种形式。

3.2 主要设备

检测设备为 XXGHz-3005 型 X 射线机和 XP-108 型恒温洗片机。

3.3 检测依据和现场检测技术

依据《水利工程质量检测技术规程(SL 734—2016)》和《承压设备无损检测(NB/T 47013.2—2015)》的相关要求,根据设备型号、曝光曲线和现场的实际情况,采用单壁单影中心周向曝光的现场透照方式。正式检测前,预先处理焊缝两侧的飞溅、疤痕等外观缺陷,处理完毕后一般等待 24 h 以后再进行检测,防止冷裂纹的产生。检测时,将 X 射线机架设在管道中心位置。管道外侧贴敷已装入胶片的暗袋,并标记好具体位置,以方便施工人员进行返修处理。为方便检测人员撤离到安全区,须设置适当的检测延迟时间(一般 2 min 左右)。检测人员撤离到安全区后,即打开个人防护剂量,开始检测,并记录检测时间。检测结束后,首先确保射线机冷却完毕,然后切断设备电源,以免发生设备意外启动的情况。

3.4 底片分析与评定

现场对管道焊缝进行 X 射线检测,获得曝光后的胶片,在暗室环境下,通过对胶片的冲洗,获得底片。底片晾干后,首先对底片的黑度进行检测,一般水利工程要求底片黑度达到 AB 级(2.0~4.5)范围之内;然后将底片放在观片灯上,通过观察底片的影像进行评定。

1)夹渣。夹渣是常见的金属管道焊接缺陷,其影像形状往往是不规则的,出现的位置也没有规律。一般发现后应严格按照标准要求进行了评定,如果缺陷长度超过规范要求,就视为不合格。本案例中管道壁厚为 18 mm,规范要求缺陷长度 $\leq 2/3T$ (T 为壁厚)且不超过 30 mm。如图 1 即为夹渣缺陷,夹渣影像长度为 25 mm,超过规范

限值(12 mm),判定为不合格。现场对应底片位置进行返修,后经复检,判定复检后合格。

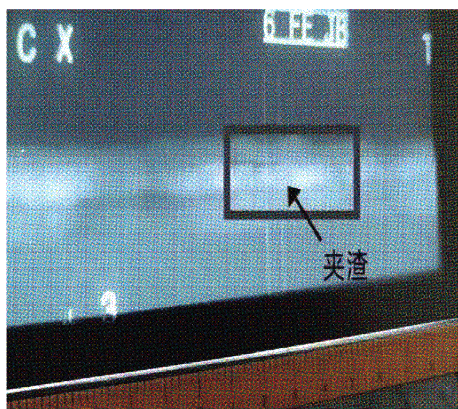


图 1 夹渣缺陷在 x 射线底片上的影像反映

2)未焊透。未焊透是危害较大的焊接缺陷,如图 2 所示,一经发现直接判定为不合格。该类缺陷在 X 射线底片上一般出现在焊缝的中间位置,呈连续或断续的黑线状,其两侧轮廓为钝边痕迹,如图 3 所示。未焊透缺陷须从管道内侧向外侧进行返修处理。

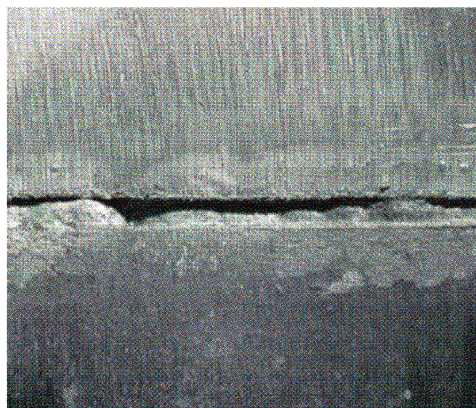


图 2 未焊透现场实拍照片

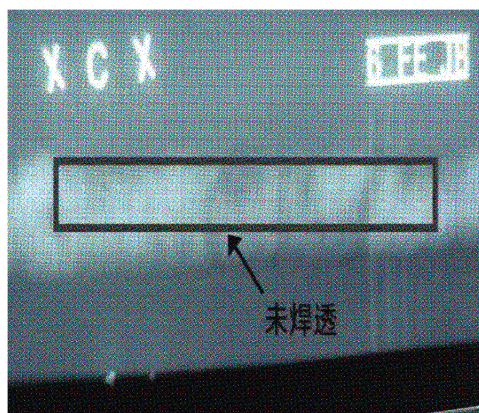


图 3 未焊透缺陷在底片上的反映

3)咬边。咬边是外观型缺陷,多发生在焊缝

与母材的交接处,出现在根部的称为根部咬边。咬边缺陷在底片中一般出现在焊道的两侧,呈黑色不规则条形波浪状,一般两端无尖角,如图4所示。工作中须注意咬边与未焊透和未熔合的影像区分:未焊透的影像一般发生在焊缝的中间位置,其影像呈直线状;未熔合的影像虽然也是条形,但其一侧比较规整,另一侧则为不规则状。根据《承压设备无损检测(NB/T 47013.2—2015)》Ⅲ级要求,铜、镍、钢制压力管道,管道外径大于100 mm时,咬边最大深度小于壁厚的20%,且最大深度 ≤ 2 mm,在任意3T长度范围内不大于T(T为管道厚度);总长度不大于100 mm。本案例中管道壁厚18 mm,缺陷长度104 mm,104 mm大于8 mm且大于100 mm,故该底片处焊缝判定为不合格。

3.5 返修与处理

对于质量不合格的焊缝,应根据焊接缺陷的位置以及尺寸等情况,对其进行补焊或重新焊接。整个返修过程,应有相关技术人员旁站监督指导。返修完成后,按照规范要求进行复检,以确保焊缝返修后质量合格。

4 结 语

水网建设过程中,金属输水管道的应用面

(上接第46页)目,持续优化项目实施方案,切实提升项目的针对性与实操性。再次,聚焦库区内生动力匮乏问题,调整扶持结构配比,要加大产业类项目投入占比,构建政府扶持与移民自主发展相结合的长效机制。最后,依托肥城本土红色资源优势,推动形成“工业制造+文旅服务+冷链物流+轻工加工+现代农业”的多元产业格局,实现村集体增收与群众致富双赢。

4.3 规范项目管理,健全长效管护机制

严格落实移民项目规范化建设管理制度,健全项目全流程监管体系,全面优化基础设施配套建设质量。在项目实施阶段,严守工程安全、建设质量与施工进度底线,落实全过程动态监管,同步联动财政、审计部门下沉一线督导,保障项目规范运行、资金合规使用。创新构建“政府+移民村+移民”三方协同管护模式,由政府把控工程建设质量,验收合格项目整体移交给村集体管理,

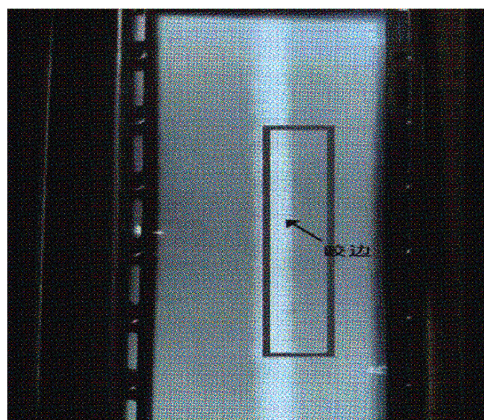


图4 咬边缺陷在x射线底片上的反映状况

广、量大、样式多,为确保管道焊接质量,X射线检测技术因其适应性广,便于缺陷定性、定量判定和存档追溯,已经成为管道焊缝质量检测工作不可或缺的重要技术手段。本文根据输水金属管道建设工作中常出现的焊接缺陷类型,系统归纳总结并形成了一套基本成熟的X射线检测技术,并附有工程实例,为类似工程及同行相关技术人员提供参考。

参考文献

- [1] 郭冠华,熊鸿建.中国射线检测技术现状及研究进展[J].仪器仪表学报,2016,37(8):1683-1695.

(责任编辑 赵其芬)

指导各村制定规范化管护制度、明确管护责任与流程,实现基础设施常态化、长效化运维。

4.4 健全帮扶机制,筑牢库区稳定根基

持续优化库区基层治理体系,常态化畅通移民诉求反馈渠道,固化“领导包保、主动下访”的工作机制。常态化开展入户走访、民情回访,通过面对面政策宣讲、谈心交流,精准解答移民群众政策疑惑,全面摸排梳理群众诉求,靶向化解移民生产生活急难愁盼问题。创新推行“村干部+村民+移民”的结对帮扶模式,通过“一对一”精准帮扶、“手把手”技能传授,帮助移民快速适配本地生产生活模式,提升移民自主发展能力与归属感。通过精细化、暖心化的基层帮扶服务,持续凝聚移民群体向心力,夯实库区干群基础,有效维护移民安置区社会和谐与长治久安。

(责任编辑 崔亚男)