

# 地下输水管道安装过程中的焊接质量控制与检测技术研究

刘豪东

广东省建筑工程集团股份有限公司 广东 广州 511300

**【摘要】：**地下输水管道在安装过程中，焊接质量对管道的长期稳定性起着至关重要的作用。本文从焊接过程中的质量控制技术入手，分析了影响焊接质量的因素及其检测方法，探讨了通过改进焊接技术与检测手段，能够有效避免焊接缺陷，保证管道的安全性与可靠性。通过多种检测手段，如 TOFD 检测、超声波检测、磁粉检测等，确保焊接接头无缺陷，提高整体管道质量。研究表明，科学的焊接质量控制与检测技术在地下输水管道工程中具有重要的实践意义。

**【关键词】：**地下输水管道；焊接质量；质量控制；检测技术；焊接缺陷

DOI:10.12417/2811-0722.25.12.074

## 引言

地下输水管道作为重要的基础设施之一，其安装质量直接关系到水资源的输送安全和工程的长期稳定运行。在管道安装过程中，焊接接头的质量尤为重要，因为焊接接头往往是管道系统中最容易发生故障的部分。随着技术的发展，焊接工艺和质量控制手段不断完善，但在实际施工过程中，焊接缺陷仍然是影响管道安全的重要因素。因此，焊接质量控制与检测技术的应用显得尤为迫切。加强对焊接过程的监控和检测，不仅能够有效发现焊接缺陷，还能提高施工效率和质量，确保地下输水管道的安全运营。

## 1 地下输水管道焊接过程中的质量控制挑战

地下输水管道的焊接过程是一个复杂且精细的工程，涉及多个环节和因素。珠三角水资源配置工程是国务院批准的《珠江流域综合规划（2012-2030 年）》确定的重要工程，也是全国 172 项节水供水重大水利工程项目之一。主要从西江鲤鱼洲岛出发，输送水资源至广州南沙、东莞和深圳等地，工程核心就是盾构掘进、管道焊接安装、设备安装，总长达 113.2 公里。该工程的焊接质量直接影响着管道的稳定性与安全性，任何微小的焊接缺陷都可能导致管道在使用过程中出现泄漏、腐蚀或甚至断裂等严重问题，因此焊接质量控制面临着诸多挑战。焊接材料的选择和处理是影响焊接质量的一个关键因素。管道焊接通常使用的是钢材，这些材料需要在焊接前经过精确的准备和预处理，以确保焊接过程中不会因材料的硬度、应力和气体含量等变化导致焊接缺陷。材料的质量和焊接参数的适配不当，都可能导致接头处的裂纹、气孔、夹渣等问题，直接影响管道的长期使用性能。

焊接工艺的选择与控制是地下输水管道焊接的重要挑战。不同管道类型、尺寸及工作环境，对焊接工艺有着差异化要求。自动化焊接虽能提升效率与质量，但仍受操作人员技术水平影响，复杂工况下工艺难点尤为突出：钢管采用 Q345C/355C 材质，壁厚 20-26mm、内径 4800mm，外附加劲环后外径 5040mm，而隧洞内径仅 5400mm，钢管与隧洞间隙仅十几公分，无法进入人员与设备，焊接必须实现单面焊双面成型。同时，单元评

定规范要求焊缝一次合格率达 95% 及以上方可评为优秀，进一步加大控制难度。如何保障焊接工艺稳定、规避人为因素影响，是施工核心难点。此外，焊接热影响区控制至关重要，若过热或冷却不当，会导致材料性能下降，影响管道承压能力与耐腐蚀性。这一过程的质量控制，需应对工艺适配、现场环境及操作人员技术水平等多重综合挑战。

## 2 影响焊接质量的关键因素及其控制措施

地下输水管道的焊接质量直接关系到管道的使用寿命和安全性，其影响因素众多，涉及到材料、工艺、环境以及操作人员等多个方面。在这些因素中，焊接材料的选择和性能是影响焊接质量的关键，需满足三大核心要求：焊接材料与钢管材质精准匹配、焊接工艺实现单面焊双面成型、环境条件符合焊接标准。管道钢管材质明确为 Q345C/Q355C，施工选定的焊接方式为气体保护焊，故针对性选择代号 G49A3 的实芯焊丝或代号 T493 的药芯焊丝。不同材质的焊接特性存在差异，焊接材料的成分、硬度、抗拉强度以及耐腐蚀性直接影响焊接后的接头强度和抗裂性能。在施工前应应对焊接材料进行严格的选择和检测，确保其符合规范要求，避免因材料不合格导致焊接问题。

焊接工艺的合理选择与控制也对焊接质量至关重要。最终选定的焊接方式为：背面采用陶瓷衬垫，人工用实芯焊丝二保焊打底，自动焊用药芯焊丝填充、盖面。陶瓷衬垫能有效提升焊缝根部质量，实现双面成型；受隧洞环境限制，焊缝底部缺陷无法背面清根返修，需正面刨除所有焊缝，返修成本高、难度大且易产生新缺陷，因此选用高级焊工人工打底，可极大保障焊缝根部质量。自动焊则具备焊接速度快、质量稳定、外观美观的优势，适用于填充及盖面工序。不同焊接工艺对材料加热、熔化及冷却过程要求不同，焊接参数如电流、电压、焊接速度等需精确控制，任何偏差都可能导致接头性能降低，电流过大或过小会影响熔池稳定性，进而引发焊缝不均匀或裂纹等问题。

焊接操作中的技术因素同样影响焊接质量。操作人员的技术水平、经验及其对工艺的掌握程度决定了焊接质量的最终结

果。即使使用了合适的材料和工艺，如果操作人员未能严格按照操作规范进行操作，焊接接头也难以达到预期的质量标准。焊接过程中，操作人员需要精确掌握焊接温度、速度以及焊丝角度高度等细节，避免过度加热或冷却，防止焊缝产生内应力或裂纹。操作时的细致与谨慎程度直接影响到焊接接头的外观与强度。

环境因素也是不可忽视的影响因素，尤其是在露天或地下的焊接环境中。温度、湿度、风速等都会对焊接过程产生影响。隧洞内虽微风、温度适宜焊接，但经过湖泊或河流区段时，湿度大幅增高，极端情况下可达90%，这极易导致焊接过程中水蒸气产生，形成气孔缺陷。对此，采用针对性措施：焊接前烘干焊接口两侧各150mm范围内的钢板，以蒸发钢材水分；每个焊接工作面增设一台除湿机，降低环境湿度。过高或过低的温度会影响焊接金属的熔化与冷却过程，导致焊接接头的应力分布不均匀，从而产生裂纹或变形。风速过大会导致焊接热源不稳定，影响焊缝的均匀性。在地下输水管道焊接时，需密切关注环境条件，确保焊接过程顺利进行。

管道焊接过程中，所有这些因素必须进行全面控制和优化，才能保证焊接接头的质量。在实际施工中，严格的质量管理制度、科学的焊接方案设计以及高素质的操作人员队伍是确保焊接质量的关键。通过综合运用先进的焊接技术和检测手段，结合现场环境的实际情况，能够最大程度上降低焊接缺陷的发生，确保地下输水管道的稳定运行。

### 3 焊接缺陷的检测技术与应用方法

焊接缺陷的检测是地下输水管道施工中的重要环节，确保焊接质量的关键措施之一。检测技术的选择与应用直接关系到焊接缺陷的发现和修复，进而影响管道系统的安全性与稳定性。焊接缺陷多种多样，常见的缺陷包括气孔、裂纹、夹渣、未熔合、未穿透等，这些缺陷往往难以通过肉眼观察到，因此需要依赖专业的检测技术进行精准检测。一种常用的检测方法是超声波检测技术，它通过超声波在材料中的传播特性来探测焊接接头内的缺陷。超声波检测具有较高的灵敏度，能够发现深度较大的缺陷，尤其适用于对厚壁管道和复杂形状管道的检测。通过超声波信号的反射或透射分析，可以精确定位缺陷的种类、大小及其位置。为了提高检测的准确性，通常需要借助专业的检测设备以及经过培训的操作人员来进行操作，确保能够对潜在的焊接缺陷做出及时反应。

考虑到隧洞内部不具备射线检测条件，TOFD检测技术成为地下输水管道焊接缺陷检测的核心手段之一，配合整体检测方案：焊缝整体采用UT（超声波）、MT（磁粉）检测，关键部位即纵环缝“T”字接头处重点实施TOFD检测。TOFD检测凭借精准的缺陷定位能力，可清晰识别焊接内部的气孔、裂纹、未熔合等缺陷，成像直观且检测深度覆盖全面，尤其适配隧洞复杂工况下的关键焊缝检测。其操作流程适配狭小作业空

间，无需复杂设备部署，同时检测结果准确性高，能为焊缝质量判定提供可靠依据，有效弥补单一检测方法的局限性。

液体渗透检测技术也是一种常见的表面缺陷检测方法，它通过在焊接接头表面涂布渗透液，利用缺陷的毛细作用将液体引入裂纹或气孔中，之后通过显像剂显示缺陷的位置。液体渗透检测技术操作简单，成本较低，适用于较小的表面缺陷检查，尤其对微小裂纹和表面气孔的检测效果较好。对焊接缺陷的检测不仅要依靠上述技术，还需要结合多种手段进行综合分析，确保检测结果的准确性。尤其在地下输水管道这种高风险的基础设施中，任何疏漏都可能带来巨大的安全隐患。在实际应用中，采用多种检测方法的组合方案往往能够提高检测的全面性与精确度。

### 4 优化焊接质量控制的技术路径与实践

优化焊接质量控制的技术路径需要从多个方面入手，涉及焊接工艺、材料选择、操作流程、现场管理等多个环节。焊接工艺的合理优化是提高焊接质量的关键，实践中通过三种焊接方式对比实验明确最优方案：纯人工焊、纯自动焊、人工打底+自动焊填充盖面，每种方式各焊接5条20mm厚的环缝（约80米长），以一次合格长度、一次合格率、缺陷深度等数据为核心对比指标，具体结果如下表1所示：

表1 三种焊接方式质量对比表

焊接方式	一次合格长度（米）	一次合格率（%）	缺陷深度（mm）	缺陷长度（米）	主要缺陷种类
纯人工焊	62.3	77.9	3.0-17.0	17.7	气孔、夹渣
纯自动焊	71.5	89.4	15.0-20.0	8.5	未熔合
人工+自动焊	78.6	98.3	0-5.0	1.4	气孔

通过数据可视化对比，人工打底+自动焊填充盖面的综合质量最优，可精准控制参数波动，减少人为因素影响，同时通过焊接过程实时监控和反馈系统，出现异常时及时调整，避免焊接缺陷发生。

焊接材料的选择对焊接质量至关重要。合理搭配可提升焊接接头强度与耐腐蚀性，减少缺陷产生，选择时需结合管道工作环境、承受压力及温度变化综合评估，确保与母材精准匹配。材料质量检测同样关键，通过金相分析、硬度测试、化学成分分析和力学性能检测等科学手段，能及时发现潜在问题，避免材料缺陷引发焊接隐患。三种焊接方式适配效果差异明显：纯人工焊焊缝根部质量有保障，但高级焊工稀缺、成本高，且参数不稳定、外观欠佳；纯自动焊参数稳定、整体质量与外观较好，却存在根部质量波动大、返修难度大及成本高的问题；人工打底+自动焊填充盖面则兼具两者优势，根部质量高、整体稳定、外观美观，且人工成本低、综合合格率最高。操作流程

优化是质量控制的重要环节。施工前焊接工人需接受严格技术培训,熟练掌握工艺规范与自动焊设备操作技巧;焊接过程中需严格遵循流程,规范化操作每一步,避免产生不合格焊缝。

现场管理同样是优化焊接质量的关键。施工现场的环境条件对焊接质量有很大影响,尤其是在温度、湿度较大或者风速较高的环境下,焊接质量容易受到影响。应根据环境条件采取相应的防护措施,如使用遮挡物防风,调节焊接时的温度,确保焊接过程中温度的均匀性和稳定性。通过科学的现场管理,不仅可以优化焊接工艺,还能提高施工效率,减少质量问题的发生。优化焊接质量控制的技术路径,离不开先进检测手段的应用。实时在线检测技术的引入使得焊接缺陷能够及时发现并修复,避免了缺陷的积累和扩大。多种检测方法的结合,如超声波检测、TOFD检测、磁粉检测等,可以对焊接接头进行全面评估,从而提高焊接质量的可控性和可靠性。

## 5 综合评估焊接质量控制与检测技术的效果

工程施工质量的系统性提升是技术应用效果的直接呈现。焊接材料与管道母材的精准适配、工艺方案的优化调整及环境因素的针对性管控,让焊接接头质量形成稳定管控体系。焊接缺陷类型大幅简化,仅残留少量低风险缺陷,裂纹、未熔合等可能影响结构安全的高危缺陷得到根本遏制,降低了返修时间与经济成本,提高了施工速度。焊接接头的力学性能与耐腐蚀

性能完全满足管道运行的工况要求,焊缝成型规整,内部组织均匀,整体质量符合工程标准规范,直观印证了质量控制技术的实践价值。

管道长期运行的安全保障与综合效益构成效果评估的核心内容。多种检测技术的协同应用构建了全方位的缺陷管控网络,核心检测技术对关键焊接部位的精准探伤,搭配全面覆盖的辅助检测手段,实现了隐蔽缺陷的无遗漏识别,从源头规避了后期运行中缺陷扩大引发的安全隐患。同时,科学的质量控制体系减少了焊缝返修的频次,降低了材料损耗与工期延误的风险,优化后的焊接工艺在保障质量的同时兼顾了施工效率,为地下输水管道的长期稳定运行奠定了坚实基础,充分彰显了技术应用的综合价值。

## 6 结语

焊接质量控制与检测技术是地下输水管道工程安全稳定的核心保障。通过材料精准匹配、工艺优化调控、环境适配管控及多元检测技术协同,有效破解了施工中的技术难题,遏制了高危焊接缺陷,筑牢了管道运行的质量根基。未来,可依托智能化技术升级,推动焊接参数实时调控与检测数据深度分析的融合,进一步提升质量管控的精准度与效率,为地下输水管道工程的高质量发展提供更坚实的技术支撑。

## 参考文献:

- [1] 李建军,张华.地下管道焊接质量控制技术的研究与应用[J].焊接技术,2022,51(1):12-16.
- [2] 陈鹏飞,王宁.地下输水管道焊接缺陷检测方法与技术进展[J].无损检测,2023,45(5):42-47.
- [3] 高飞,刘晓东.焊接缺陷检测技术在管道工程中的应用[J].管道工程,2021,39(4):57-62.
- [4] 赵丽娜,孙俊杰.自动化焊接技术在地下输水管道中的应用[J].焊接学报,2023,44(2):76-80.
- [5] 陈志伟,李青.超声波与X射线检测技术在地下输水管道焊接中的应用对比[J].质量与可靠性,2022,38(6):101-106.