

沙漠区长距离输水管道安装施工关键技术研究

胡 泊

新疆水发建设集团有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

【摘要】：新疆维吾尔自治区作为我国西北边疆的重要生态屏障和水资源战略储备区，其水资源的高效调配与利用直接关系到区域经济社会的可持续发展与生态安全。随着“一带一路”倡议的深入推进及国家水网建设的加速实施，长距离输水工程在新疆沙漠地区（如塔克拉玛干沙漠边缘、古尔班通古特沙漠腹地等）的建设需求日益迫切。然而，沙漠地区独特的自然环境给长距离输水管道的安装施工带来了前所未有的挑战：极端温差导致材料性能剧烈波动、流沙移动引发地基失稳、强风沙尘暴影响焊接质量、地下水位埋深大且水质矿化度高导致腐蚀风险加剧、以及施工后勤保障困难等。

【关键词】：新疆沙漠；长距离输水管道；安装施工；地基处理；焊接工艺；防腐技术；智能监测；防风固沙；全生命周期管理

DOI:10.12417/3083-5526.26.02.022

引言

水是生命之源，也是新疆经济社会发展的命脉。新疆地域辽阔，气候干旱，降水稀少，蒸发量大，水资源时空分布极不均衡。为了解决这一结构性矛盾，国家先后实施了多项跨流域调水工程，如“引额济克”、“阿拉尔供水”等重大项目，其中大量管线需穿越广袤无垠的沙漠地带。这些沙漠区长距离输水管道通常具有线路长（往往数百公里）、管径大、输送压力大、运行周期长等特点，是连接水源区与用水区的“生命线”。

然而，沙漠地区的自然地理环境极为特殊且恶劣。这里昼夜温差可达40摄氏度以上，夏季地表温度可高达70摄氏度，冬季则低至零下30摄氏度，这种剧烈的热胀冷缩效应使得管道材料极易产生疲劳损伤。此外，沙漠地表多为流动或半流动沙丘，沙体结构松散，承载力极低，且受风力作用不断发生迁移，极易造成管道悬空、断裂或地基沉降。强风携带的沙粒对管道外防腐层具有极强的磨损作用，而地下高矿化度地下水则可能通过土壤渗透对管道造成严重的电化学腐蚀。更为严峻的是，沙漠地区人烟稀少，交通不便，施工物资运输困难，大型机械设备进场受限，且缺乏完善的后勤补给体系，给施工组织与安全管理带来了巨大压力^[1]。

尽管近年来我国在长距离输水管道建设方面取得了显著成就，但在沙漠极端环境下的施工技术与质量控制仍存在诸多短板。例如，传统的地基处理方法在流沙中效果不佳，常规焊接工艺难以适应强风环境，防腐层在沙磨作用下易失效，以及缺乏针对沙漠环境的智能化监测系统等问题，严重制约了工程的整体效益。

1 新疆沙漠环境对管道施工的特殊挑战与影响机理

要解决沙漠施工难题，首先必须深刻理解沙漠环境对管道工程作用的物理、化学及力学机制。这不仅是制定技术方案的基础，也是规避风险的先决条件。

1.1 极端气候条件下的材料性能退化与应力集中

新疆沙漠地区属于典型的温带大陆性干旱气候，气温年较

差和日较差极大。这种极端的热循环环境对管道材料的物理性能产生了深远影响。在高温季节，管道受热膨胀，若约束不当，会产生巨大的轴向压应力，导致管道屈曲变形甚至失稳；在低温季节，管道急剧收缩，产生拉应力，加之管材在低温下韧性下降，极易发生脆性断裂。此外，强烈的太阳辐射会导致管道表面温度远高于环境温度，加速高分子防腐材料的老化、龟裂和剥落。风沙的持续冲刷不仅磨损防腐层，还会在管道表面形成微裂纹，成为腐蚀的起始点。同时，昼夜温差引起的交变应力会加速焊缝及热影响区的疲劳损伤，降低管道的整体寿命^[2]。

1.2 流沙地貌下的地基失稳与不均匀沉降

沙漠地区广泛分布着流动沙丘、半固定沙丘及固定沙丘，其表层土体主要由松散的石英砂组成，内摩擦角小，粘聚力几乎为零，承载力极低。在管道敷设过程中，若未采取有效的固沙措施，沙丘在风力作用下会发生迁移，导致管道下方土体流失，形成“掏空”现象，使管道悬空。一旦管道悬空，在自重和内压作用下，局部弯矩剧增，极易造成管体破裂。此外，沙漠地下水位埋深变化大，且存在季节性冻融循环。春季解冻时，沙土含水量增加，强度骤降，易发生液化或侧向滑移；冬季冻结时，水分结冰体积膨胀，破坏土体结构。这种反复的冻融作用和沙土的不均匀沉降，是导致管道接口泄漏、管身开裂的主要原因。

1.3 高矿化度地下水与强风沙的耦合腐蚀效应

新疆沙漠地区地下水资源普遍矿化度高，含有大量的氯离子、硫酸根离子等腐蚀性介质。当管道防腐层出现微小破损时，这些离子会迅速渗透至管壁，引发严重的点蚀和应力腐蚀开裂。特别是在沙漠低洼地带，地下水毛细上升作用明显，容易在管道周围形成高浓度腐蚀环境。与此同时，沙漠常年刮大风，风速大、频率高，携带的大量沙粒对管道外防腐层形成持续的机械磨损。这种“电化学腐蚀 + 机械磨损”的耦合效应，远比单一因素造成的破坏更为严重。传统的防腐层设计往往难以兼顾这两种破坏形式，导致管道在运行初期即出现大面积防腐失效，缩短了工程的使用寿命。

1.4 施工后勤保障困难与作业窗口期短

沙漠地区地广人稀，基础设施薄弱，道路网络稀疏，大型施工设备（如挖掘机、吊车、焊接车）的运输和展开面临巨大困难。许多路段需修建临时便道，增加了工程成本和时间消耗。此外，沙漠地区沙尘暴频发，每年适宜户外施工的有效时间较短，且施工期间常因天气原因被迫停工。强风环境下，露天焊接作业质量难以保证，高空作业安全风险剧增。人员生活物资供应困难，防暑降温、防寒保暖等措施成本高企，这些都对施工组织和管理提出了极高的要求^[3]。

2 沙漠区长距离输水管道地基处理与管沟开挖关键技术

针对沙漠地基松软、流动性强的特点，必须采用特殊的加固与开挖工艺，确保管道基础稳固。

2.1 复合式固沙地基处理与防沉桩技术应用

为抵抗流沙迁移和不均匀沉降，传统换填法往往成本过高且效果有限。目前，推广使用“复合式固沙地基处理”技术，即在管沟底部铺设土工格栅或土工布，上覆级配砂石垫层，形成加筋复合地基，提高整体承载力和抗剪切能力。对于流沙活跃地段，采用“防沉桩”技术，即在管道两侧打入钢桩或混凝土桩，并设置连系梁，形成框架结构，限制沙体的侧向位移。此外，引入“化学固沙剂”或“生物固沙剂”对管沟周边沙土进行固化处理，提高沙土的内聚力和稳定性。在冻土与流沙交错带，还需结合“通风管散热”或“热棒”技术，防止冻土融化导致的沉降。

2.2 机械化非开挖与定向钻穿越技术

在穿越流动沙丘、河流及植被保护区时，传统明挖法会对地表造成严重破坏，且易诱发新的沙害。因此，大力推广“非开挖施工技术”，特别是“水平定向钻”技术。该技术无需开挖长距离管沟，通过导向孔钻进、扩孔和回拖，将管道敷设在地下预定深度，有效避免了地表扰动和沙丘形态改变。对于大口径管道，可采用“顶管法”或“盾构法”，在地下形成稳定的隧道结构，保护管道免受风沙侵蚀和地基沉降影响。同时，利用无人机测绘与三维激光扫描技术，实时监测穿越段的地表形态变化，确保施工精度^[4]。

2.3 管沟开挖与回填的防风抑尘工艺

在管沟开挖过程中，裸露的沙面极易被风吹蚀，造成沟槽坍塌。为此，需采用“分段开挖、分段回填”的工艺，缩短暴露时间。开挖出的土方应分类堆放，并在迎风侧设置挡风墙或草方格沙障。回填时，严禁直接将松散沙土填入，应采用“分层夯实”工艺，每层厚度控制在30厘米以内，并使用小型振动夯机压实。在管顶上方50厘米范围内，应铺设细沙或软土保护层，避免石块直接接触管体。此外，回填后应及时覆盖土工布或喷洒固化剂，防止二次起沙。

3 适应沙漠环境的管道预制、焊接与防腐施工核心技术

焊接与防腐是管道施工的核心环节，在沙漠恶劣环境下，必须采用特种工艺和设备以确保质量。

3.1 移动式自动焊与防风保温一体化技术应用

针对沙漠强风环境，传统手工电弧焊质量难以保证。全面推广“移动式全自动管道焊接机器人”，该设备自带防风棚和保温箱，可在-30℃至50℃的环境温度下稳定工作。焊接机器人能够精确控制焊接电流、电压、送丝速度及行走速度，消除人为操作误差，显著提高焊缝成型质量与一致性。同时，开发“便携式防风保温帐篷”，内部配备加热与通风系统，维持焊接区域的小气候环境，防止焊缝冷却过快产生冷裂纹。对于厚壁钢管，采用“多层多道焊”工艺，严格控制层间温度，并进行焊后热处理，消除残余应力^[5]。

3.2 高性能复合防腐层与现场补口修复技术

为应对高矿化度地下水与风沙磨损的双重腐蚀，推荐采用“三层PE防腐层”或“环氧粉末+聚氨酯泡沫+高密度聚乙烯”复合防腐结构。这种结构具有优异的耐化学腐蚀性、耐磨性和抗冲击性。在施工现场，针对补口部位，采用“热收缩带”或“液态环氧涂料”进行修复，并配合“喷砂除锈”工艺，确保表面清洁度达到Sa2.5级。引入“在线超声波测厚”与“电火花检漏”技术，对每一道焊缝和补口进行100%无损检测，确保防腐层无针孔、无脱落。此外，研发“自修复防腐涂层”，当涂层出现微裂纹时，能自动释放缓蚀剂进行修复，延长防腐层寿命。

3.3 管道应力释放与柔性连接技术

为缓解沙漠地区地基不均匀沉降和温度变化引起的管道应力，应在设计中合理设置“补偿器”与“固定墩”。在施工中，采用“柔性接头”技术，如在弯头处使用球墨铸铁柔性接口，允许一定程度的角位移和轴向位移。对于长距离直管段，每隔一定距离设置“伸缩节”，吸收热胀冷缩量。利用有限元分析软件，模拟管道在不同工况下的应力状态，优化支撑间距和基础刚度，确保管道在极端条件下不发生塑性变形或断裂。

4 沙漠输水管道智能监测预警与全生命周期安全管控

建立智能化的监测预警体系，是实现沙漠管道本质安全的关键。

4.1 基于物联网的全方位感知与沉降监测系统

构建“天-空-地”一体化的监测网络。利用卫星InSAR技术进行大范围地表形变监测，识别潜在的不均匀沉降区；部署无人机定期巡检，获取高清影像数据；在地面关键节点（如跨越段、穿沙段）埋设光纤光栅传感器、倾角仪和渗压计，实时采集管道位移、应力、温度及地下水水位数据。通过5G/北

斗通信网络，将数据实时传输至云端监控中心，利用大数据分析算法，建立管道健康诊断模型，提前预测滑坡、悬空及泄漏风险，实现从“被动抢险”向“主动预防”的转变。

4.2 泄漏检测与应急联动响应机制

采用“分布式光纤声波传感（DAS）”技术，沿管道全长布置光纤，实时监测管道表面的振动信号，精准定位泄漏点位置。结合 SCADA 系统，监测流量、压力变化，一旦发现异常立即报警。建立“多级应急响应中心”，配备专业的沙漠应急救援队伍与装备（如沙漠越野车、无人机、快速堵漏工具）。制定详细的应急预案，定期开展实战演练，加强与地方政府、气象部门的联动，确保在沙尘暴、洪水等突发事件发生时，能够迅速响应、高效处置。

4.3 全生命周期碳足迹管理与绿色施工

在沙漠施工中，应贯彻“绿色施工”理念，最大限度减少对

脆弱生态环境的破坏。优化施工方案，减少临时占地，优先选用环保型施工材料和设备。建立“全生命周期碳足迹追踪系统”，记录从材料生产、运输、施工到运维全过程的碳排放数据，探索低碳施工技术与可再生能源（如太阳能光伏供电）的应用。加强施工后的生态修复，采用“草方格 + 灌木”组合方式恢复植被，构建“管道 + 生态”和谐共生的新格局。

5 结语

新疆沙漠区长距离输水管道安装工程是一项集地质学、流体力学、材料科学、自动控制等多学科于一体的复杂系统工程。面对极端干旱、流沙迁移、强风沙尘及高腐蚀等严峻挑战，传统的施工技术与管理模式已难以满足现代工程建设的需求。本文系统梳理了沙漠环境对管道施工的特殊影响，深入探讨了复合式固沙地基处理、非开挖穿越、移动式自动焊、高性能防腐及智能监测预警等关键技术的创新应用与实践成果。

参考文献:

- [1] 孙岳阳,黄鹏,胡少伟,等.智能建造技术在预应力钢筒混凝土管(PCCP)中的应用研究综述[J/OL].混凝土与水泥制品,1-9[2026-04-24].<https://doi.org/10.19761/j.1000-4637.25090412>.
- [2] 付成龙.长距离大口径球墨铸铁管道压力试验技术[J].安装,2026,(03):77-79.
- [3] 田霄峰,罗兰英,冯鑫.长距离大间隙顶管内穿钢管及注浆填充施工关键技术[J].中国水运,2026,(05):106-108. DOI:10.13646/j.cnki.42-1395/u.2026.05.034.
- [4] 孙小虎,贾瑞旗.PCCP管在输水管线施工中关键技术的研究[J].全面腐蚀控制,2026,40(02):229-231.DOI:10.13726/j.cnki.11-2706/tq.2026.02.229.03.
- [5] 李远洋,王若溪.长距离输水工程中的管道优化设计与施工技术[J].科技与创新,2025,(21):163-165.DOI:10.15913/j.cnki.kjycx.2025.21.048.