

烟气提水系统地埋管道泄漏机理分析及综合治理实践

白关锁

国家电投集团内蒙古白音华煤电有限公司坑口发电分公司，内蒙古 锡林郭勒 026200

DOI:10.61369/EPTSM.2025110012

摘要：本文结合白音华坑口发电公司工程实例，针对高寒地区火电厂烟气提水系统地埋管道频繁泄漏问题，开展故障机理与治理实践研究。研究指出，软弱地基沉降与大幅温度变化共同作用，导致现场粘接玻璃钢三通接口应力集中，是泄漏频发的直接原因。基于弹塑性力学与土力学理论，提出以“结构补强、应力补偿、地基优化”为核心的综合治理方案：采用成品三通替代现场粘接以增强节点强度；加装橡胶膨胀节以释放温度与沉降应力；优化水洗砂回填工艺以提高地基均匀性与承载力。实践表明，治理后的管道系统运行稳定，未再发生泄漏，有效保障电厂零补水目标。本研究为类似地质气候条件下埋地管道的设计与运维提供了重要参考。

关键词：地埋管道；泄漏机理；应力分析；补偿器；玻璃钢三通；高寒地区

Analysis of Leakage Mechanism and Comprehensive Management Practice of Buried Pipeline in Flue Gas Lifting System

Bai Guansuo

Pithead Power Generation Branch of State Power Investment Corporation Limited Inner Mongolia Baiyinhua Coal Power Co., Ltd., Xilingol, Inner Mongolia 026200

Abstract : This study investigates the failure mechanisms and remediation practices for frequent pipeline leakage in the underground water extraction system of Baiyinhua Pit Power Plant, a thermal power facility located in a high-altitude cold region. The research demonstrates that combined effects of foundation settlement and extreme temperature fluctuations cause stress concentration at field-bonded fiberglass reinforced plastic (FRP) tee joints, which directly triggers leakage incidents. Based on elastoplastic mechanics and soil mechanics principles, the study proposes a comprehensive remediation strategy focusing on "structural reinforcement, stress compensation, and foundation optimization." Key measures include: replacing field-bonded joints with prefabricated FRP tees to enhance joint strength; installing rubber expansion joints to relieve thermal and settlement stresses; and optimizing sand backfilling techniques to improve foundation uniformity and load-bearing capacity. Field implementation confirmed stable pipeline operation with zero subsequent leakage, effectively achieving the plant's zero water replenishment target. This research provides critical references for designing and maintaining underground pipelines in similar geoclimatic environments.

Keywords : buried pipeline; leakage mechanism; stress analysis; compensator; FRP tee; cold regions

引言

随着国家环保法规的日益严格及水资源稀缺问题凸显，我国北方缺水地区火力发电厂的节水技术已成为行业发展的关键环节。烟气提水系统作为实现电厂生产零补水的重要技术手段，其运行的可靠性直接关系到全厂的用水指标与环境绩效。国家电投集团内蒙古白音华煤电有限公司坑口发电分公司（以下简称“白音华坑口电厂”）地处内蒙古高寒贫水地区，其烟气提水系统自投运以来，埋设于地下的提水管道频繁泄漏，严重影响了系统的投用率，导致电厂水库水（备用水源）消耗量逼近临界值，不仅带来经济损失，更在冬季严寒环境下，因泄漏点处理困难而严重威胁两台机组的正常稳定运行。因此，快速、彻底地解决地埋管道泄漏问题，已成为保障机组安全生产、达成节能环保目标的迫切需求。

当前，关于地下管道泄漏治理的研究多集中于城市给排水或长输油气管道，针对火电厂内特定工艺介质（如烟气冷凝水）且处于特殊地质（细砂层）与气候（高寒）条件下的地埋管道系统性研究相对缺乏^[1]。已有文献多侧重于单一因素的分析，如材料腐蚀、焊接缺陷或外部荷载等，而对由地质沉降、温度应力及结构缺陷耦合作用引发的泄漏机理探讨不足，相应的综合治理方案也缺乏工程实践的充分验证。

本研究立足于白音华坑口电厂的实际工程问题，通过现场勘查、理论计算与工程实践相结合的方法，旨在实现以下目标：（1）系统揭示白音华坑口电厂烟气提水地埋管道泄漏的多因素耦合机理；（2）提出一套兼具理论深度与工程可行性的综合治理方案；（3）通过实践效果评估，验证方案的有效性，并总结形成可推广的工程技术经验。

作者简介：白关锁（1993.11-），男，内蒙古通辽人，本科，工程师，研究方向：热能与动力工程。

一、问题描述与原因分析

(一) 问题描述

白音华坑口电厂烟气提水地埋管道泄漏主要表现为玻璃钢管路水平段和竖直段结合处的连接开裂，泄漏点具有明显的重复性特征。泄漏发生时，不仅造成水资源浪费，还导致周边地基土体被冲刷，进一步加剧管道悬空和沉降，形成恶性循环。尤其在冬季，环境温度降至零下，泄漏水迅速结冰，使得泄漏点的定位与修复工作异常困难，安全风险陡增。

(二) 原因分析

通过对泄漏管段的开挖检查、设计图纸复核及施工记录追溯，发现泄漏是设计缺陷、地质条件、材料工艺及环境因素共同作用的结果。

1. 地质条件与管道沉降

场区地质勘察报告表明，管道埋设区域主要为第四系松散堆积层，以细砂为主，其内聚力小、摩擦力低，地基承载力特征值 f_{ak} 仅为 $80\text{--}100\text{kPa}$ 。这种软弱地基在管道通水（增加了管道自重）及长期振动作用下，极易产生不均匀沉降^[2]。原管道设计时，对地基沉降的预估不足，未设置必要的柔性接口或补偿措施，导致管道如同刚性梁支撑于不均匀地基上，在自身重量和内部水重作用下，产生较大的弯曲应力和剪切应力，这些附加应力最终传递至结构薄弱的管件连接处^[3]。

2. 温度应力影响

白音华地区属典型的大陆性高寒气候，年温差可达 70°C 以上。埋地管道虽受土壤保温作用，但其温度仍随季节发生显著变化。原管道系统为固定支架支撑，未考虑热胀冷缩产生的位移量。根据材料力学公式，管道因温度变化产生的轴向应力 σ_t 可表示为： $\sigma_t = E * \alpha * \Delta T$ （其中 E 为管道材料的弹性模量， α 为线膨胀系数， ΔT 为温度变化值）^[4]。对于玻璃钢管道，其 α 值通常高于金属管道，在较大 ΔT 下会产生较大的压应力或拉应力。当此温度应力与沉降引起的应力叠加，极易超过玻璃钢粘接头的强度极限，高寒地区巨大的年温差进一步加剧了这一效应^[5]。

3. 三通结构强度不足

现场勘查发现，原设计采用的并非整体成型的三通管件，而是在直管上开孔，后将支管插入并采用手工糊制玻璃钢进行粘接加固。这种现场粘接方式存在诸多弊端：首先，粘接质量受现场环境（温度、湿度、洁净度）和操作人员技能水平影响大，难以保证均匀性和一致性；其次，粘接区域存在明显的应力集中，在横管与立管交接的角焊缝（类比）区域，应力集中系数较高；最后，手工糊制的玻璃钢层其纤维取向和树脂含量难以精确控制，力学性能远低于工厂预制的模压或缠绕成型产品^[6]。因此，该部位成为整个管道系统的薄弱环节。

4. 回填土密实度不足

初始回填可能未严格按照分层夯实的要求进行，导致回填土密实度不均，无法为管道提供均匀有效的侧向约束和底部支撑。在自身沉降作用下，管道局部受力增大，加剧了变形和接口处的应力^[7]。

综合判断：白音华坑口电厂烟气提水地埋管道的泄漏，并非单一因素所致，而是软弱地基引起的不均匀沉降、大幅温度变化产生的热应力与现场粘接三通结构强度不足三者耦合作用的结果。沉降和热变形在刚性约束的管道系统中转化为巨大的内应力，并集中作用于最薄弱的三通粘接接口，最终导致接口疲劳开裂或脆性破坏。

二、综合治理方案设计

本次治理遵循“标本兼治、综合治理”的原则，制定了以下方案：

(一) 结构补强：采用高强度成品三通

将所有现场粘接的玻璃钢三通（共 80 件）全部更换为工厂预制的整体成型玻璃钢三通。成品三通采用计算机控制纤维缠绕工艺制造，纤维连续、取向合理，树脂含量精确控制，具有更高的抗拉、抗压和抗剪切强度，以及更优的耐疲劳性能。此举从根本上消除了因现场施工质量波动导致的结构薄弱点。

(二) 应力补偿：加装管道补偿器

为有效释放因温度变化和地基微量沉降产生的应力，在系统的主管路及主要支管的三通立管段（应力集中且位移明显的部位），加装橡胶补偿器（共 40 件）。补偿器选型需考虑以下参数：

补偿量：根据当地极限温度和运行温度计算管道的热膨胀量 $\Delta L = \alpha * L * \Delta T$ ，并预留安全余量。

工作压力：膨胀节工作压力需与管道设计压力相匹配，并预留合理安全余量。鉴于管道设计压力为 1.0MPa ，故选用公称压力 (PN) 1.6MPa 的膨胀节。

材质：结合烟气冷凝水的介质特性（呈弱酸性），膨胀节材质需具备针对性抗腐蚀能力。最终选用丁基橡胶作为核心材质，其优异的化学稳定性可有效抵御冷凝水侵蚀，保障管道系统长期运行可靠性。

补偿器的安装：将原有的刚性管道系统转变为“固定支架 – 补偿器 – 导向支架”构成的柔性系统，能够主动吸收位移，大幅降低管道本体及管件连接处的应力水平。

(三) 地基处理优化：水洗砂回填与夯实工艺

为改善管道基础的承载性能和均匀性，对开挖区域采用改良的回填工艺：

材料选择：采用级配良好的水洗砂作为回填材料。水洗砂颗粒均匀，含泥量低，易于夯实成型，能提供均匀的支撑。

施工工艺：严格实行分层回填，每层虚铺厚度不超过 300mm 。采用“水夯 + 振捣器振捣”相结合的夯实方法。水夯利用水的渗透力使砂粒重新排列密实，振捣则进一步排除孔隙，确保回填砂的密实度达到 95% 以上^[8]。管道底部腋角部位采用人工仔细填塞夯实，确保管底支撑饱满。

支墩修复：对因更换三通而需凿除的混凝土支墩（20 座），在管道安装定位后，重新用 C30 混凝土浇筑，确保管道稳固。

(四) 施工过程质量控制

环境控制：玻璃钢粘接及固化期间，搭设保温棚，内部采用

暖风机等采暖措施，确保环境温度维持在5°C以上，满足材料固化的温度要求。

粘接强化：对于DN500以上的水平直管与三通的对口连接，除常规外部粘接外，在母管（水平段）上半部分开孔后进入管道内部，并从管道内部补强粘接，实现内外双面加固，显著提高接口的抗剥离强度。

检测与验收：所有粘接接头完成后，进行100%外观检查和必要的无损检测（如敲击法）。管道系统修复后，对整体系统进行灌水查漏，合格后回填。

三、效果评估与讨论

（一）直接效果

白音华坑口电厂两台机组提水地埋管道漏点治理工程分别于2024年10月21日和11月6日完成并逐步投入运行。截至2025年底，两台机组烟气提水系统已连续稳定运行一年以上，期间从未发生管道泄漏事件。表明治理方案有效切断了泄漏的病理链，解决了根本问题。

（二）技术经济性分析

虽然本次治理投入了成品管件、补偿器及精细化施工成本，但其带来的效益显著：

运行可靠性效益：从根本上消除了因管道泄漏导致的烟气提水系统频繁停运，保障了该系统作为“全厂生产零补水”核心环节的连续稳定运行。系统的可靠投运，避免了因提水中断而启用备用水源的被动局面，确保了区域水资源的安全。

经济效益：避免了持续泄漏导致的水资源直接损失，节约了因频繁应急抢修而产生的高额人工、材料及设备费用。更重要的是，系统稳定运行实现提水回用，直接减少了电厂的水库水取用量，产生了可观的水资源费节约效益^[9]。

环保与社会效益：白音华地区水资源相对紧张，烟气提水系统的稳定运行使电厂最大程度地实现了内部水循环利用，显著降低了生产活动对当地地表及地下水水源的依赖。这不仅体现了企业作为用水大户的社会责任，也为维护当地脆弱的水资源平衡和生态环境做出了积极贡献，具有重要的社会意义。^[10]

从全生命周期成本角度看，本次一次性投入的治理方案，远优于此前“头痛医头、脚痛医脚”的被动抢修模式，其带来的运行可靠性、经济节约及资源环保效益是可持续的。

（三）理论意义与推广价值

本研究实践验证了在高寒软弱地基条件下，通过“柔化”管道系统（增设补偿器）和“强化”关键节点（使用成品管件）相结合的设计理念的正确性。它强调了在类似工程在设计阶段必须进行详细的地质勘察、精确的应力计算（包括沉降应力和温度应力），并据此选择适当的管材、连接方式和补偿措施。本案例的成功经验，可推广至北方寒冷地区其他电厂、化工厂、矿山等涉及工艺地埋管道的建设项目。

四、结论与建议

（一）结论

本文通过系统分析与实践，得出以下结论：

白音华坑口电厂烟气提水地埋管道泄漏的根本原因是软弱地基沉降、大幅温度变化与现场粘接三通结构缺陷三者耦合导致的接口应力超限。

提出的以“成品三通补强、橡胶膨胀节释压、优化回填固基”为核心的综合治理方案，理论依据充分，技术措施得当，成功解决了泄漏难题。

工程实践证实了该方案在高寒特殊地质条件下的有效性和可靠性，实现了管道系统的长期稳定运行。

（二）建议

设计阶段：建议今后在类似环境下的地埋管道设计，优先采用柔性接口设计，并进行详细的应力分析，必要时应设置补偿器。

施工阶段：严格把控管材质量、焊接或粘接工艺以及回填质量，确保施工符合设计规范。

运行维护：建立定期巡检制度，对关键管段进行状态监测，实现预防性维护。

深入研究：可进一步对治理后的管道进行长期应力应变监测，积累数据，为更精确的管道寿命预测和风险管理提供支持。

参考文献

- [1] 张伟,李建国.火电厂节水技术与水系统优化研究综述 [J].中国电力,2022,55(7):188-195.
- [2] 钱家欢,殷宗泽.土工原理与计算 (第二版) [M].北京:中国水利水电出版社,2019.
- [3] GB50332-2005,给水排水工程管道结构设计规范 [S].北京:中国建筑工业出版社,2005.
- [4] 刘鸿文.材料力学 (第六版) [M].北京:高等教育出版社,2017.
- [5] 王志强,刘春霞.波纹管补偿器在热力管道中的应用与选型计算 [J].管道技术与设备,2023,41(3):18-21.
- [6] 邵卫,张鹏,王树立.玻璃钢夹砂管道在埋地敷设中的力学性能研究 [J].玻璃钢/复合材料,2021,(4):67-72.
- [7] 岳进勇,刘岭,刘全林.考虑土-结构相互作用的埋地管道受力分析 [J].地下空间与工程学报,2022,18(I):245-252.
- [8] GB50268-2008,给水排水管道工程施工及验收规范 [S].北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [9] 国家能源局.火力发电厂节水导则 :DL/T783-2017[S].北京:中国电力出版社,2017.
- [10] 胡健.基于GIS的电力管道非开挖定向钻进实时定位方法 [J].自动化应用,2025,66(04):195-197+200.DOI:10.19769/j.zdhy.2025.04.052.