

# 天然气长输管道维抢修标准化作业流程的制定与实施

王晓龙 薄喜宇 胡启佳 史宁岗  
国家管网集团北京管道有限公司 北京 102101

**摘要：**天然气长输管道作为国家能源动脉，其安全稳定运行对保障能源供应至关重要。然而，受腐蚀、外力破坏、自然灾害等因素影响，管道泄漏事故频发，亟需建立科学规范的维抢修标准化作业流程。本文基于管道工程学、安全工程学及应急管理理论，系统构建了涵盖事故预警、现场处置、抢修实施、质量验收的标准化作业体系，并通过工程案例验证了其有效性。研究表明，标准化作业可缩短抢修时间，降低二次事故发生率，显著提升管道安全运行水平。

**关键词：**天然气长输管道；维抢修；标准化作业流程；安全管控；应急管理

## 1 引言

天然气长输管道以其高压、大口径、长距离输送的特点，在能源输送中扮演着至关重要的角色。然而，其运行环境复杂多变，地质灾害、第三方破坏、设备老化等多重风险如影随形。据统计，在2018至2024年间，我国天然气管道事故中，腐蚀导致的泄漏占比高达38%，外力破坏占29%，自然灾害占15%。传统抢修模式在面对这些挑战时显得力不从心，响应迟缓、作业不规范、质量不可控等问题频发，导致平均抢修时间长达12至24小时，甚至引发次生灾害。在此背景下，标准化作业流程（SOP）应运而生，它通过将抢修作业分解为可量化、可追溯的标准化步骤，实现了资源优化配置、风险前置管控和作业质量可控，为提升管道应急管理能力提供了有力支撑。

## 2 天然气长输管道维抢修现状分析

### 2.1 典型事故类型及成因

天然气长输管道面临的事故类型多样，成因复杂。腐蚀泄漏是其中之一，土壤腐蚀、杂散电流腐蚀等导致管壁减薄，常见于穿跨越段和老旧管道，如某西气东输管道因土壤腐蚀引发穿孔，泄漏量惊人。第三方破坏同样不容忽视，施工机械撞击、打桩振动等造成管道变形破裂，2023年某省天然气管道因顶管施工导致断裂，甚至引发爆炸事故。自然灾害如地震、滑坡、洪水等地质灾害也会导致管道悬空、断裂，2021年四川泸定地震就造成了3处管道悬空，需紧急加固处理。此外，设备故障如阀门密封失效、调压器故障等也会引发泄漏，某门站调压橇故障导致高压燃气直供用户，造成重大安全隐患。

### 2.2 现有抢修模式存在的问题

当前，天然气长输管道的抢修模式存在诸多弊端。响应机制碎片化，事故报警、资源调配、现场处置等环

节缺乏协同，导致平均响应时间超过2小时，错失最佳抢修时机。作业标准不统一，不同企业抢修规程差异大，关键参数如开挖深度、焊接工艺等缺乏量化标准，使得抢修质量参差不齐<sup>[1]</sup>。安全管控薄弱，现场警戒、气体检测、动火作业等环节存在违规操作，二次事故率高达15%，严重威胁抢修人员生命安全。质量追溯困难，抢修记录不完整，难以实现全生命周期管理，为后续运维埋下隐患。

## 3 维抢修标准化作业流程构建

### 3.1 流程设计原则

维抢修标准化作业流程的设计遵循系统性、风险导向、可操作性和持续改进原则。系统性原则要求覆盖“预警-响应-处置-恢复”全链条，实现各环节无缝衔接，确保抢修作业高效有序进行。风险导向原则基于HAZOP分析识别高风险作业，制定针对性管控措施，将风险降至最低。可操作性原则将作业分解为可量化、可追溯的标准化步骤，并配套可视化操作指南，便于抢修人员执行。持续改进原则建立PDCA循环机制，定期评估流程有效性并优化升级，以适应不断变化的抢修需求。

### 3.2 标准化作业流程框架

#### 3.2.1 事故预警与接警阶段

事故预警与接警是抢修作业的第一步。监测预警系统集成SCADA系统、光纤传感、无人机巡检等技术，实现泄漏自动报警和定位，为抢修人员提供准确的事故信息。接警处置规范要求设立24小时应急指挥中心，接警后3分钟内完成信息核验，并根据泄漏量、压力变化等参数，5分钟内判定事故等级，启动相应应急预案，通知抢修队伍、消防、医疗等资源迅速赶赴现场。

#### 3.2.2 现场处置阶段

现场处置阶段是抢修作业的关键环节。安全管控措

施至关重要，需设置三级警戒区，检测气体浓度，当 $\text{CH}_4$ 浓度 $\geq 5\%\text{VOL}$ 时，禁止使用非防爆设备，确保现场安全。切断气源是首要任务，关闭上下游阀门，通过放散管降压至0.3-0.5MPa，为后续抢修作业创造条件<sup>[2]</sup>。泄漏定位技术多样，地面检测采用激光甲烷遥测仪、检漏液等定位泄漏点；地下检测通过钻孔取样、听音棒探测等方法确定埋地管道泄漏位置；智能定位则利用分布式光纤传感技术实现泄漏点精确定位（误差 $\pm 1\text{m}$ ），提高抢修效率。

### 3.2.3 抢修实施阶段

抢修实施阶段是恢复管道正常运行的核心。开挖作业规范要求开挖深度距管底1m以上，坡度不小于1:0.75，设置安全平台和逃生通道，确保抢修人员安全。对深度超过3m的沟槽，采用钢板桩或液压支护，防止沟槽坍塌。管道修复技术多样，换管法适用于管道断裂、严重腐蚀等，切除破损段后采用对口焊接或卡箍连接；焊接工艺要求坡口角度 $60^\circ \pm 5^\circ$ ，点焊长度为壁厚的2-3倍，焊缝余高 $\leq 2\text{mm}$ ；套袖修复法适用于局部腐蚀缺陷，套袖长度为管径的1.5-2倍，与原管壁间隙 $\leq 1\text{mm}$ ；管卡修复法作为临时措施，采用A型或B型管卡封堵泄漏点，压力 $\leq 4\text{MPa}$ 。PE管道抢修需考虑环境温度和大风天气等因素，环境温度 $< -5^\circ\text{C}$ 时，采用电热熔套筒或热熔对接，焊接压力增加10%-15%；大风天气（风速 $> 5\text{m/s}$ ）时，搭建防风棚并预热管材，确保焊接质量。

### 3.2.4 质量验收阶段

质量验收阶段是确保抢修质量的重要环节。压力试验包括强度试验和严密性试验，强度试验压力为设计压力的1.5倍，稳压4小时无泄漏；严密性试验压力为设计压力的1.1倍，24小时压降 $\leq 1\%$ 为合格<sup>[3]</sup>。无损检测采用RT或UT检测焊接接头，Ⅱ级片合格率100%；套袖修复部位进行磁粉检测，缺陷深度 $\leq 0.5\text{mm}$ 。防腐验收要求三层PE防腐层厚度 $\geq 3\text{mm}$ ，电火花检测电压15kV无击穿；阴极保护电位 $\leq -0.85\text{V}$ （相对于Cu/CuSO<sub>4</sub>参比电极），确保管道防腐效果。

## 3.3 关键作业标准化模板

### 3.3.1 动火作业SOP

动火作业是抢修作业中的高风险环节。其SOP包括风险评估、气体检测、动火审批、动火实施和焊后检测等步骤。风险评估采用HAZOP分析，识别可燃气体、氧气浓度等风险，设置警戒区并配备消防器材。气体检测使用便携式检测仪，每15分钟检测一次，确保 $\text{CH}_4$ 浓度 $< 1\%\text{VOL}$ ， $\text{O}_2$ 浓度19.5%-23.5%。动火审批需填写动火作业许可证，经安全、技术部门审核，监护人全程在场。动

火实施采用氩弧焊打底，手工电弧焊盖面，焊接电流 $\leq 200\text{A}$ ，电压 $\leq 28\text{V}$ 。焊后检测进行外观检查和100%RT检测，缺陷返修不超过2次，确保焊接质量。

表1 动火作业SOP

步骤	操作内容	技术要求	安全措施
1	风险评估	HAZOP分析，识别可燃气体、氧气浓度等风险	设置警戒区，配备消防器材
2	气体检测	使用便携式检测仪，每15分钟检测一次	$\text{CH}_4$ 浓度 $< 1\%\text{VOL}$ , $\text{O}_2$ 浓度19.5%-23.5%
3	动火审批	填写动火作业许可证，经安全、技术部门审核	监护人全程在场
4	动火实施	采用氩弧焊打底，手工电弧焊盖面	焊接电流 $\leq 200\text{A}$ , 电压 $\leq 28\text{V}$
5	焊后检测	外观检查+100%RT检测	缺陷返修不超过2次

### 3.3.2 阀门更换SOP

阀门更换是抢修作业中的常见任务。其SOP包括阀门隔离、盲板封堵、阀门拆除、新阀安装和试压验收等步骤。阀门隔离关闭上下游阀门，泄压至0MPa，并挂“禁止操作”警示牌。盲板封堵在阀门两侧加装8字盲板，盲板厚度 $\geq \text{DN}/20+2\text{mm}$ 。阀门拆除使用液压扳手拆卸螺栓，人员站在上风侧。新阀安装对中误差 $\leq 1\text{mm}$ ，螺栓对称紧固，扭矩值符合设计要求。试压验收进行强度试验，压力1.5倍设计压力，稳压30分钟无泄漏，确保阀门更换质量。

表2 阀门更换SOP

步骤	操作内容	技术要求	安全措施
1	阀门隔离	关闭上下游阀门，泄压至0MPa	挂“禁止操作”警示牌
2	盲板封堵	在阀门两侧加装8字盲板	盲板厚度 $\geq \text{DN}/20+2\text{mm}$
3	阀门拆除	使用液压扳手拆卸螺栓	人员站在上风侧
4	新阀安装	对中误差 $\leq 1\text{mm}$ ，螺栓对称紧固	扭矩值符合设计要求
5	试压验收	强度试验压力1.5倍设计压力	稳压30分钟无泄漏

## 4 标准化作业流程实施保障

### 4.1 人员培训体系

人员培训是实施标准化作业流程的基础。理论培训开展管道工程、安全法规、应急预案等课程，每年不少于40学时，提升抢修人员理论素养。实操训练建设模拟抢修基地，进行开挖、焊接、检测等实操演练，考核合格率100%，确保抢修人员具备实际操作能力。案例教学分析国内外典型事故案例，总结经验教训，提升风险识

别能力，使抢修人员能够应对各种复杂情况。

#### 4.2 装备配置标准

装备配置是实施标准化作业流程的保障。抢修车辆配备工程抢险车、消防车、救护车等，满足Ⅲ级响应需求，确保抢修资源迅速到位。检测仪器配置便携式气体检测仪、激光遥测仪、防腐层检测仪等，精度等级 $\geq 1.0$ 级，为抢修作业提供准确数据支持。抢修机具配备液压挖掘机、发电机、电焊机等，功率匹配管道参数，确保抢修作业高效进行。

#### 4.3 信息化管理系统

信息化管理系统是实施标准化作业流程的重要支撑。应急指挥平台集成GIS、SCADA、视频监控等系统，实现资源动态调度和作业实时监控，提高抢修响应速度。移动终端应用开发抢修APP，实现作业指导书推送、数据实时上传、隐患闭环管理，方便抢修人员随时获取作业信息和上报作业进度<sup>[4]</sup>。大数据分析建立抢修案例库，通过机器学习优化流程参数，提升决策科学性，为抢修作业提供有力支持。

### 5 工程应用案例

#### 5.1 案例背景

2024年3月，某西气东输管道因第三方施工导致Φ1016mm管道破裂，泄漏量达8000m<sup>3</sup>/h，距离居民区仅200m，情况十分危急。

#### 5.2 标准化作业实施

在响应阶段，应急指挥中心接警后3分钟内启动I级响应，调集3支抢修队、2台消防车赶赴现场，并通过SCADA系统远程关闭上下游阀门，降压至0.4MPa，迅速控制事态发展。在处置阶段，设置半径100m警戒区，疏散周边居民500余人，确保居民生命安全；采用激光遥测仪定位泄漏点，误差 $\pm 0.5$ m，为抢修作业提供准确位置信息。在抢修阶段，开挖深度3.5m，坡度1:1，设置两处逃生通道；切除破损段（长3m），采用全自动焊接工艺更换新管，焊接合格率100%，确保抢修质量。在恢复阶段，进行强度试验，压力18MPa，稳压4小时无泄漏；防腐层修复后电火花检测电压15kV无击穿，恢复管道正常运行。

#### 5.3 实施效果

通过实施标准化作业流程，抢修时间从接警到恢复供气仅用8小时，较传统模式缩短60%，大大减少了停气时间。安全管控方面，未发生二次事故，周边环境监测未检出燃气超标，确保了抢修作业的安全进行。经济效益方面，减少停气损失约500万元，避免环境赔偿费用200万元，为企业和社会带来了显著的经济效益和社会效益。

### 6 结论与展望

#### 6.1 研究结论

本文构建的“预警-响应-处置-恢复”标准化作业流程，实现了抢修作业全链条管控，显著提升了应急响应效率。通过量化关键参数（如开挖深度、焊接工艺、检测标准等），解决了传统作业随意性强、质量不可控等问题，确保了抢修作业的质量和安全性。工程应用表明，标准化作业可缩短抢修时间30%-60%，降低二次事故率50%以上，经济效益和社会效益显著，为天然气长输管道的安全稳定运行提供了有力保障。

#### 6.2 研究展望

未来，天然气长输管道维抢修标准化作业流程的研究将进一步深化。一方面，将深化智能技术应用，研发基于数字孪生的抢修模拟系统，实现作业方案预演和风险预测，提高抢修作业的精准性和安全性。另一方面，将完善标准体系，推动行业标准制定，建立覆盖设计、施工、运维全生命周期的标准库，为天然气长输管道的安全管理提供全面支持。同时，将强化国际合作，借鉴欧美国家管道安全管理经验，提升我国管道应急管理水平，推动天然气长输管道维抢修标准化作业流程的不断完善和发展。

### 参考文献

- [1] 张阳.天然气长输管道抢修与维护技术[J].石化技术,2022,29(02):82-83.
- [2] 贾文江,李刚,芦涛.长输天然气管道换管抢修关键技术及发展趋势探讨[J].油气田地面工程,2022,41(05):65-68.
- [3] 李鲁明.天然气长输管道设备运行维护[J].当代化工研究,2019,(05):164-165.
- [4] 徐佳.长输天然气管道运行的安全风险与对策研究[J].中国石油和化工标准与质量,2025,45(10):38-40.