

油气长输管道抢修技术研究

冯永衡 (国家石油天然气管网集团有限公司兰州维抢修中心, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 针对油气长输管道事故点上突发、线性扩散、跨域联动的特点, 本次研究系统梳理了六类油气长输管道抢修关键技术, 并对其进行了详细介绍和分析, 为快速处理油气长输管道安全风险事故奠定基础。结果表明: 通过快速定位、分段隔离、窗口化作业、旁通保供、数据闭环的组合, 可显著缩短发现、确认、隔离时间, 降低次生灾害链风险, 提高在弱通信、道路受阻条件下的到场效率与可施工性, 并实现抢修过程可追踪和可复盘。

关键词: 长输管道; 智慧抢修; 隔离切断; 旁通保供; 数字孪生

中图分类号: TU973 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 010-0139-03

Research on Emergency Repair Technology for Long-Distance Oil and Gas Pipelines

Feng Yongheng (Lanzhou Emergency Repair Center, State Oil and Gas Pipeline Network Group Co., Ltd., Lanzhou Gansu 730000, China)

Abstract: In response to the characteristics of sudden occurrences, linear diffusion, and cross-domain linkage in oil and gas long-distance pipeline accidents, this study systematically reviews six key technologies for emergency repairs in oil and gas pipelines, providing detailed introductions and analyses. It lays the foundation for rapid handling of safety risk incidents in oil and gas long-distance pipelines. The results indicate that by combining rapid positioning, segmented isolation, windowed operations, bypass supply, and data closed-loop systems, the time for discovery, confirmation, and isolation can be significantly reduced. This approach mitigates secondary disaster chain risks, enhances on-site efficiency and constructability under weak communication and road obstruction conditions, and enables traceability and post-incident review of the repair process.

Keywords: Long-distance pipelines; Smart emergency repairs; Isolation and shut-off; Bypass supply assurance; Digital Twin

油气长输管道具有线路长、跨区域、多地貌、多环境耦合等典型特征, 一旦发生泄漏、第三方破坏、地质灾害诱发失稳或站场关键设备故障, 极易造成大范围停输、环境污染与次生安全风险。与一般工业管道相比, 长输管道事故具有点上突发、线性扩散、跨域联动的显著属性, 抢修工作不仅要在最短时间内完成止输、隔离、控险、修复、恢复的闭环, 还要在有限信息、复杂工况和多约束条件下实现决策最优与执行可靠。面向长输管道的抢修技术研究, 已从传统的工艺修复与组织保障问题, 演进为涵盖风险研判、现场入场、资源调度、工艺窗口控制与智能化支撑的一体化系统工程^[1]。在数字化转型背景下, 智能与智慧抢修正成为油气管道应急能力升级的核心方向, 抢修技术研究的重点正从单一修复工艺扩展到感知、研判、决策、执行、复盘的全链条智慧化体系构建。在此背景下, 本次研究结合油气长输管道事故的定义与类型, 开展油气长输管道抢修技术研究, 为提升长输管道在复杂灾害场景下的应急响应速度与处置质量奠定基础。

1 油气长输管道事故的定义和类型

1.1 油气长输管道事故的定义

油气长输管道事故通常是指在原油、成品油、天

然气等介质通过长距离、高压、大口径管道输送过程中, 由于管体本体失效、附属设施故障或外部环境扰动等原因, 引发的介质非计划泄放、输送功能丧失或运行状态异常, 并可能进一步造成火灾爆炸、中毒窒息、环境污染、停输停供及社会影响等后果的事件。首先其对象具有长输特征, 线路跨区域、穿越地貌与敏感点多, 事故影响呈线性扩散与跨域联动, 其次是事故不仅包含破裂泄漏这类显性事件, 也包含因压力异常、阀室与站场关键设备失效导致的停输、降输与系统失稳等功能性事件, 最后是事故过程往往具有多因素耦合和次生灾害链特征, 例如泄漏后形成可燃云团、遇点火源导致爆燃或喷射火, 或进入地下空间造成窒息与爆炸风险, 或在水中扩散造成生态破坏。由此可见, 长输管道事故还具有隐蔽性强、发现与定位难、处置窗口短的特点, 尤其在复杂地形与极端天气下, 现场入场、隔离切断、放空置换、控险修复等环节更容易受到道路、通信、供电与作业安全条件的限制, 使事故从技术问题演化为系统性风险事件^[2]。

1.2 油气长输管道事故的类型

从类型划分看, 油气长输管道事故可按致因、失效部位与后果形态进行综合分类。按致因机制, 常见

类型包括腐蚀失效事故、材料与施工缺陷事故、第三方破坏事故、运行管理与工况异常事故以及自然灾害与极端天气诱发事故^[3]。按失效形态与后果，可归为泄漏类、破裂类、燃爆与中毒类、环境污染类以及功能中断类。

工程实践中，同一事件往往呈现致因、失效、后果链式叠加，例如第三方损伤导致泄漏，泄漏扩散叠加低温大风形成可燃云团并触发燃爆，或洪水冲刷致管道悬空后产生应力集中引发破裂并造成河道污染，因此在事故类型判定时通常需要同时描述诱因、失效部位与后果形态，才能为应急决策与抢修方案选择提供有效依据。

2 油气长输管道抢修技术研究

2.1 应急控制与隔离切断技术

应急控制与隔离切断技术的核心目标是以最短时间实现控险、稳态、可修，把事故从失控扩展态迅速拉回到可管理状态，其关键在于快速判明事故性质与影响范围、精确定隔离边界并实施有效泄压置换。在长输管道场景中，通常依托 SCADA、阀室电动执行机构与站场连锁逻辑，按就地优先、远程协同、分段隔离的原则执行紧急切断。通过远程关断上下游关键阀门，控制泄漏源补给与扩散，结合管道分段容积、压力等级、介质性质与地形敏感点，制定分段泄压、放空或置换策略，避免盲目放空造成二次风险。

为适应极端天气与通信不稳定场景，现代应急控制更强调边缘自治和智能联动，在阀室端布置边缘网关与本地规则引擎，断网条件下仍能依据压力突降、声学特征、可燃气体浓度等多参量触发就地声光报警、阀门半自动/自动关断、数据缓存与事件留痕，同时利用分布式光纤声波、压力波瞬变分析、视频 AI 等手段快速定位异常区段，缩短发现、确认、隔离时间窗口^[4]。进入现场处置阶段，还需将隔离切断与警戒区划定、火源管控、可燃云团扩散研判、人员入场路径评估同步开展，形成切断阈值、停输策略、放空窗口、复压条件的成套决策。

2.2 管体修复工艺技术

管体修复技术是指对事故或缺陷进行结构恢复和密封恢复，其目的是在满足强度、严密性和寿命要求的前提下，尽快恢复管体输送能力，并将后续失效概率降低到可接受水平。根据缺陷类型和处置窗口，管体修复技术可分为机械夹具修复、复合材料包覆修复、焊接补强和切割更换管段等。对孔蚀穿孔、局部泄漏、短裂纹等可控缺陷，一般优先采用全包覆修复夹具、压力密封卡箍等机械化方案，具有快修复、对环境依赖性较小、易在短时间停输期内完成封堵与加固等优

点。对腐蚀减薄、面状缺陷或需要提高承载能力的部位，可采用复合材料缠绕包覆或包覆形成外加固层，但该工艺对表面处理、固化温湿度和施工洁净度敏感，雨雪低温天气需要采用防潮棚、局部加热和固化监测，以保证粘结和强度满足要求^[5]。对结构性损伤、长裂纹、显著变形或破裂段，通常采用切割更换管段焊接连接，辅以无损检测和压力试验，该种方式可靠性最高，但工期长、资源消耗最大。

2.3 旁通保供与临输恢复技术

旁通保供与临输恢复的核心诉求，是在事故仍处于处置阶段、永久性修复尚未完成的时间窗口内，想办法把全线停输压缩为局部受影响。做法上不是简单加设备，而是通过临时改造输送路径、补足末端输送能力，尽量维持供能连续性。这类手段在城市门站供气、重点工业用户保障、冬季高峰保供，以及多干线互联的管网系统中尤为常见，因为这些场景对停供的容忍度最低，且通常具备路径切换与分段调控的条件。

工程实施一般从建通道、稳压力、控风险三步走，首先在事故段上下游选定临时接驳位置，设置接驳点并完成跨越连接，常用快速法兰、卡箍式接头、预制短管等实现快速接入，如现场空间受限或地形复杂，可叠加柔性管、移动管汇进行绕行，先把输送通道恢复起来。随后通过运行侧的分段降压、下游储气设施启用、相邻管网互供切换等操作，把系统调整到减量运行但不断供或限量优先保民生的状态。

在天然气系统中，必要时引入移动压缩机组，并配套临时过滤与计量撬装，对末端压力进行补偿，确保用户侧供气稳定。与此同时，临时管线的布设与安全设计必须成套完成，包括支撑固定、跨越道路与水沟的防护、防静电接地、泄漏检测与巡护频次、警戒隔离等，避免临时方案带来新的风险点。在智慧抢修体系下，这一环节最能体现算得清、调得动，基于水力模型与数字孪生平台，可以快速比较不同旁通路径的可供输量、沿程压降和瓶颈位置，进而给出阀位调整顺序、压缩机启停策略、调峰方案与限供优先级，减少现场反复试错。再结合道路通行条件、极端天气预报与现场可达性评估，对旁通设备、物资和吊装机械的到场路线与作业窗口进行优化，尽量避免设备到了却无法展开施工的时间损失。

2.4 清管与堵塞故障处置技术

清管与堵塞故障处置的第一步是定位与机理判别，通常会把站场的压力曲线、上下压差变化、沿线压差分布、阀室前后差压等数据先拉通看趋势，必要时结合瞬变分析、声学特征等信息辅助判断，尽快圈定异常区段并初步判断是卡清管、结蜡、沉积还是

相态问题。第二步是稳态控制，目的不是马上通，而是先把风险边界建立起来，天然气管道多采用分段降压、放空卸载、惰化置换等方式降低能量水平，为后续反推、缓推创造安全条件，原油或成品油管道则更强调温度与黏度的联动控制，通过调泵速、控流量来避免剪切升温带来的不利效应，同时防止再沉积加重堵塞。第三步才进入疏通与恢复，根据现场条件和故障性质组合选用措施，清管器反推或分段缓推、变工况的脉冲推送、热洗循环、针对性的化学剂注入，若仍无法恢复或存在结构损伤隐患，再考虑开挖取出、处理并更换受损部件。在极端低温、含水偏高或压力温度接近水合物生成区的情况下，处置难度会明显上升，重点就不再是推得动，而是别反复堵。这时需要把相态风险作为主线来管控，通过模型或在线计算先划出压力和温度的安全窗口，再配合局部保温加热、降压解堵以及抑制剂等措施，把工况稳定在不易再生成的区域内，避免刚解开又二次成堵。

2.5 极端天气与复杂地形入场与现场保障技术

极端天气与复杂地形入场与现场保障技术解决的是抢修第一性问题，即到得了现场、站得住脚、干得成工序、守得住安全。长输管道多穿越山区沟谷、河流冲沟、沙漠戈壁与冻土带，一旦叠加暴雨洪涝、滑坡泥石流、冰雪低温、大风沙尘等灾害条件，常出现道路中断、边坡二次失稳、涉水涉泥、通信失联与供电不足等典型困难，使传统依赖公路与固定通信电源的抢修组织显著失效。因此该类技术通常以入场可达性评估、路线与方式选择、现场基础保障、作业安全控制为主线，入场前通过气象预报、地灾监测、河道水位与道路通行信息开展分级研判，形成多套路线与备选进入方式，并配置模块化装备以适应地面承载与场地受限。

到场后建立临时作业面与安全区，包括便携围堰、排水导流、边坡监测与防护网、夜间照明与警戒隔离，确保人员与设备在不稳定地基与强风雨条件下仍可安全施工，通信与供电方面，采用卫星通信、应急专网保障指挥链路，同时以便携 UPS 构建分级供电，优先保障阀室运行、气体检测、照明、焊接及数据采集等关键负载。在高寒与雨雪条件下，重点落实防冻保温、材料低温适配、人员防滑防坠与动火环境控制，并通过设定停工阈值与撤离条件避免抢修过程被极端天气拖入更高风险。

2.6 智慧抢修技术

智慧抢修技术的本质是将抢修从经验驱动的临时组织升级为数据驱动的闭环工程，以全流程数字化和智能决策实现更快的响应、更准的定位、更优的方案

与更稳的执行，尤其在极端天气、弱通信与多约束并存的场景中体现出决定性价值。其技术体系可概括为感知、研判、决策、执行、复盘五个环节协同。在感知侧融合分布式光纤、压力波瞬变、阀室差压、无人机等多源数据，建立事故识别与精确定位能力，并对扩散趋势、地灾演化与关键资源状态形成实时态势。在研判侧以时空一体化平台与数字孪生模型为核心，将管道水力热力、放空置换、火灾爆炸影响、地灾稳定性与施工窗口等模型耦合，实现对隔离边界、警戒区、动火窗口、旁通能力与修复工艺的快速推演，在决策侧采用规则、模型、多目标优化的方式生成抢修方案与资源清单，明确阀位操作序列、放空参数、人员与装备编组、到场路线、作业顺序以及关键风险控制点，并给出可执行的作业卡控条件。在执行侧通过工单化闭环与移动端协同，将方案拆解为任务链，实时采集进度、风险与质量数据，在复盘侧构建事故与抢修知识库，沉淀典型场景的参数、时效与风险点，实现规则迭代、模型校准与装备配置优化。

3 结论

综上所述，输管道抢修应由单点工艺升级为全链条体系能力，以隔离切断、稳态置换为先导，将现场入场保障、修复工艺与恢复投产纳入同一风险边界内统筹，才能在极端天气与复杂地形下保证到得了、干得成、守得住。抢修技术选型应坚持缺陷等级、工艺窗口、资源可达性三维约束，可控泄漏优先夹具与复合修复，结构性破坏以换管焊接为主，清管与堵塞处置遵循先定位、再稳态、后疏通，并通过保温加热、相态控制与阈值化操作避免二次失稳。

参考文献：

- [1] 李铁兵. 油气长输管道应急机制研究与管理方法探讨[J]. 山东化工, 2024, 53(15): 229-231.
- [2] 白振军. 长输管道换管抢修焊接方法选择探讨[J]. 石油和化工设备, 2022, 25(06): 93-94+109.
- [3] 汪嘉伟, 李召, 周顺荣, 等. 基于数字化管道维抢修应急管理平台的研究[J]. 化工机械, 2021, 48(06): 798-802+838.
- [4] 王洋, 王蕾, 王飞, 等. 长输油气管道应急抢修体系现状及改进探讨[J]. 油气田地面工程, 2021, 40(12): 5-9.
- [5] 李玉忠, 谢楠, 武国栋, 等. 长输管道应急抢修技术现状和发展趋势探讨[J]. 石油工程建设, 2021, 47(03): 1-5.

作者简介：

冯永衡 (1987-), 男, 汉族, 甘肃庆阳人, 工程师, 大学本科, 从事油气管道维抢修与管理工作。