

天然气输送管道穿越地下构筑物区域的安全管理研究

王 妍（北京首都机场动力能源有限公司，北京 100621）

摘要：在城市高密度开发背景下，天然气管道频繁穿越地下构筑物区域，因结构复杂、空间受限，风险显著增加。当前安全管理存在识别不全、防护不足、监控滞后等问题。本文通过分析穿越段风险特征，构建全过程安全管理体系，并借鉴典型案例，提出涵盖设计、运行、应急等多环节的协同管理策略，旨在提升城市燃气本质安全水平，强化多元主体联动与信息化支撑能力。

关键词：天然气管道；地下构筑物；穿越段；安全风险；分级评估

中图分类号：TE88

文献标识码：A

文章编号：1674-5167(2025)025-0124-03

Research on Safety Management of Natural Gas Pipeline Crossing Underground Structure Areas

Wang Yan (Beijing Capital Airport Power Energy Source Co.,Ltd., Beijing 100621, China)

Abstract: In the context of high-density urban development, natural gas pipelines frequently pass through underground structures, which significantly increases risks due to complex structures and limited space. The current security management has problems such as incomplete identification, insufficient protection, and lagging monitoring. This article analyzes the risk characteristics of the crossing section, constructs a full process safety management system, and draws on typical cases to propose a collaborative management strategy that covers multiple aspects such as design, operation, and emergency response. The aim is to improve the intrinsic safety level of urban gas and strengthen the linkage and information support capabilities of multiple entities.

Keywords: natural gas pipeline; Underground structures; Crossing section; Security risks; Graded evaluation

在城市高密度开发背景下，天然气输送管道与地铁、人防通道等地下构筑物交叉穿越的情况逐渐增多，这些区域因空间受限、结构复杂、管理分散而成为事故高发区域。近年来的多起泄漏与爆炸事故表明，现行穿越段的安全管理存在风险识别不全、设计防护不足、运行监控手段滞后等问题。面对政策监管趋严与技术提升要求，系统化、科学化的穿越段风险管理体系建设迫在眉睫，成为提升城市燃气本质安全的关键一环。

1 穿越地下构筑物区域的安全风险特征及管理现状

1.1 穿越区域的典型地下构筑物类型与分布特征

城市燃气管道在空间布局上越来越多地与各类地下构筑物交错重叠。常见构筑物类型包括地铁区间隧道、城市综合管廊、地下停车场、人防工程、地下通道和高架桥基下空间。这些构筑物通常集中分布于交通枢纽、商业中心、老旧城区等区域，燃气管道的穿越不可避免。此类区域结构密集、荷载复杂、占地限制严格，穿越管段往往需弯折、多变径、局部暴露，其敷设、支护、隔离等安全技术条件显著不同于普通管道段，具有本质上的风险增量。

1.2 穿越段管道的风险源特征

天然气管道在穿越地下构筑物区域时，其风险源主要源于穿越方式、地质条件、施工工艺及后期支护

结构等多方面因素的叠加。首先，穿越段普遍采用顶管、定向钻或明挖回填等非开挖与开挖相结合的施工方式，在空间受限、结构荷载复杂的环境下，极易形成应力集中区，若未进行充分的结构加固或抗拔设计，易导致管道受压、变形或位移，诱发泄漏风险^[1]。其次，穿越构筑物区域往往存在软弱地层、地下水活动频繁或附属构筑物基础相交的复杂工况，这会加剧管道的外腐蚀和沉降不均现象。例如，当施工过程中未设置有效的排水与隔水结构，或管沟回填密实度不均时，会在管道底部形成积水、气穴或支撑断点，从而引发套管与主干管之间的应力异常、磨损损伤，甚至因振动诱发疲劳裂纹。再次，在施工阶段，交叉作业频繁，尤其是与其他市政设施或地下工程重叠时，若施工方案未进行动态评估和实时调整，极易发生结构碰撞、振动共振或误伤管道的第三方破坏。此外，在穿越区域，管道经常需设置弯头、变径或伸缩节以适应空间路径变化，这些特殊构件在焊接、应力分布与密封结构方面更容易形成薄弱环节。

1.3 现行管理机制存在的薄弱环节

目前，针对穿越地下构筑物的燃气管道管理存在以下几个方面的薄弱点：①风险识别体系不健全。在部分城市或企业中，穿越段未单独划为高风险单元，不具备独立的评估与管理档案，常作为普通段处理，忽视其特殊性。②穿越设计以“避让”为主，技术手

段落后。传统穿越方式如开挖敷设、浅埋排布已难适应高密度空间安全要求。由于穿越段工程量小、难度高，设计上常简化处理或依赖经验，缺乏多专业联审与专属结构设计。③跨单位协同不足。穿越构筑物往往归属不同管理单位（如地铁公司、人防部门等），燃气企业在前期规划、管线排布、应急联动等方面协调不足，容易形成责任盲区。④运行状态感知能力弱。多数穿越段未设立独立监测点位，难以实现数据实时回传与动态趋势分析。遇突发情况时响应不及时，形成“发现慢、处理慢、协调慢”的被动局面。⑤法律与标准缺失交叉细化条款。现行行业标准如《城镇燃气设计规范》《燃气输送与配气工程施工及验收规范》等虽有穿越规定，但对构筑物类别、风险等级与响应机制划分不明，不利于实操层面的落地执行。

2 穿越地下构筑物区域天然气管道的全过程安全管理体系建设构建

2.1 设计与施工阶段的安全技术措施

①优化穿越路径与方式。在管道选线阶段，企业应联合构筑物权属单位进行多轮技术审查，采用全生命周期方案推演，预测不同路径在 20 年内的风险演化趋势。非开挖技术（顶管、定向钻）应优先使用，并结合地质勘查结果动态调整路径避开关键荷载集中区和水位变异带^[2]。关键路径应在 BIM 平台预布线路、穿越点及支撑结构，便于后期施工模拟和误差预估。②增强结构与冗余设计。对于穿越段应采用“三层防护 + 多级缓冲”结构设计：内层为主输气管，外设 PE 或钢质套管，中部注入柔性填充材料（如膨润土、泡沫混凝土）以缓解应力传导。在套管两端设置限位器、支撑架、抗拔结构，防止位移滑动或应力集中。对于关键节点，建议增设旁通管路或切换接口，保障突发事件下供气不中断。③提升材料与防腐标准。建议在穿越段强制采用高防腐等级材料，如三层 PE 或熔结环氧粉末（FBE）复合防腐层，同时配置阳极保护与远程电位检测系统，预警腐蚀趋势。在套管与主管之间设置“间距传感装置”，实时感知套管与主管间的位移、积水、气体渗漏等状态，进一步提升运行阶段的信息透明度。④建设专项风险评估报告与设计评审机制。设计前期应委托第三方安全技术机构编制《穿越地下构筑物天然气管道专项安全风险评估报告》，报告内容应包括风险识别、风险等级划分、影响范围、缓解措施与残余风险等级。企业内部设计图审会应强制邀请构筑物管理单位、安全主管、第三方专家联合评审，提升设计阶段的安全闭环质量。

2.2 运行维护与监控管理机制

①精细化巡检机制。建议建立“穿越段专属运行

维护制度”，设置专岗责任人 + 特定巡检频次 + 动态巡检路线。巡检记录系统需支持“语音 + 图像 + 表单”多源数据同步采集，自动关联至风险台账。应在冬夏换季、高地下水期、地铁施工期等时间节点加强重点区域的特别巡检。②智能传感与远程监控系统部署。穿越段应安装复合型智能监测设备，集成压力波动识别、腐蚀电流分析、燃气泄漏检测、井盖开启报警于一体，并设置信号集中器，接入 SCADA 平台。重要构筑物下方管段可布设多点分布式光纤传感系统（DTS），对温度或应力突变做出早期响应^[3]。后台系统应支持动态波动趋势预测算法，提前识别潜在设备退化。③“互联网 + 运维”平台构建。平台应集成运行状态、风险等级、施工记录、监测数据、GIS 地图于一体，实现穿越段的“数字孪生”管控。支持基于 AI 的告警分类与应急路径规划功能，一旦系统判定为高风险状态，可自动启动处置流程、通知值班人员、推送关键数据至管理层移动端 App，实现信息同步多部门联动。④异常状态闭环处置机制。异常告警须由平台自动生成“处置单”，并通过工单系统指派至对应巡检人员。事件响应应按“5 分钟确认、30 分钟响应、2 小时闭环”的标准进行，超时系统自动升级告警级别。处置完成后应自动归档数据至穿越段运行档案中，便于后期评估复盘。

2.3 应急预案与联合响应机制

①穿越段专属应急预案制定。预案应基于场景模拟模型构建，涵盖燃气泄漏、地下结构破坏、化学爆炸、地质沉降等典型突发事件。采用模块化预案结构，每类情景附带联络清单、物资清单、技术支持清单。建议使用沙盘推演结合虚拟现实系统（VR）开展预案培训，提升演练实效性。

②应急资源配置。在穿越段周边 200m 范围内应设“应急响应点”，配备便携泄漏检测仪、防爆手电、正压呼吸器、应急通信终端、封堵气囊等设备。针对夜间及节假日需设置应急值守人员，在平台异常告警后可立即出发处理，避免响应空窗。

③联合响应机制。依托城市应急指挥平台，构建“燃气企业—城建单位—公安交警—交通枢纽—周边社区”联合响应机制，通过事前签订应急联动协议，明确各部门职责及响应边界，特别是地铁通风断电、封闭调度等行动机制必须前置流程与联系人表^[4]。

④应急响应效果评估。每次演练或实际响应后应开展多维度评估，包括响应时效性、处置精准度、协调配合度、舆情控制效果等方面，并输出改进建议，纳入下轮预案修订与培训内容，实现“应急体系闭环演进”。

3 典型案例的管控经验借鉴

3.1 背景

随着浙江省“多气源一环网”供气格局的推进，金丽温输气管道工程作为南部主干段，承担着完善区域供气网络、提高能源安全的关键任务。项目穿越区域涉及城市主干道、高速公路、铁路、山地、河流、生态保护区等复杂地形，地下构筑物和自然障碍物交错密集，构成了极具挑战性的安全管理场景。

3.2 实施过程

3.2.1 山岭隧道穿越的系统化应用

为应对山区地形复杂、生态敏感、表层施工破坏大的问题，金丽温项目采用了大规模山岭隧道敷设，总计30条、总长度达37.4km。在设计上通过超长隧道（如石门洞隧道4329m）、大坡度斜井、平面折线与纵断面折线结合等方式，有效避让了在建铁路、国家级风景区等高敏感区域。隧道内管道布置采取锚固墩与滑动支墩配合布设方式，确保运行期结构安全与稳定性。同时施工采用多级通风、定向爆破、分段排水与植被保护等技术措施，实现环境友好与施工效率的协同提升。

3.2.2 定向钻穿越提升路径适应性与安全性

在堆土区、地质不稳定或空间受限区域，项目采用定向钻穿越技术作为优选方案。例如在缙云县堆土区段，现场原为空地，后期出现大面积堆土，对传统敷设方式形成制约。设计团队综合评估后采用水平长度近700m的定向钻穿越路径，精准控制入土、出土角度与埋深，有效避让地表障碍，同时降低了占地协调难度。该技术手段在保障施工安全、管道完整性和运维便利性方面体现出显著优势。

3.2.3 穿越段工程的综合管理协调机制

针对穿越工程体量大、类型多、地理分布广的实际情况，项目建设方将管道全线划分为若干穿越单元，每个单元设立专责负责人，实行“一级总协调+二级分段实施+三级现场监管”的分级管理制度，通过设立“穿越段施工专班”，统一协调施工组织、技术交底、安全保障与资料归档，避免因责任模糊导致的工序延误与质量漏洞^[5]。

金丽温工程需频繁与铁路、公路、地方住建、环保、林业等单位打交道。为此，建设单位在项目初期即组建“联络协调小组”，实现施工单位、设计单位、地方政府及相关管辖单位的定期沟通制度，制定了《重点穿越段协调交底流程清单》。穿越前需组织专题联席会议完成设计确认、安全方案交底及突发事件应急对接，有效压缩审批时间，避免现场施工反复调整。项目依托智慧管网管理平台，构建“设计数据—施工

进度—风险点位—监测指标”一体化管理系统。各穿越段的基础参数、技术方案、风险等级、施工进展等信息统一录入数据库，并与GIS地图平台实现动态叠加展示。

3.3 效果分析

3.3.1 提升了本质安全水平

多样化穿越方式有效降低了穿越段事故发生率，特别是在2016年百年一遇台风中，所有采用穿跨越方式的段落保持完好无损，体现出结构布局的抗风险能力。定向钻、桁架、隧道等方式的综合应用显著降低了与地下构筑物的干扰冲突概率。

3.3.2 推动了全流程安全管理闭环

从前期路由选址、设计审查到施工监控、运行保障均设有详实流程，形成“全过程多维耦合”式风险控制。在爆破控制、河道保护、水文重估等方面采取前置应对措施，减少返工与协调成本，保障工程质量与社会稳定。

3.3.3 具有较强的推广价值

金丽温项目的实践经验充分展现了在经济密集区开展天然气管道工程的技术路线与安全管理范式，适用于其他类似城市高密度穿越情境，如长三角、珠三角等区域的天然气主干线规划与实施。

4 总结

天然气管道穿越地下构筑物区域面临高风险、多源耦合的安全挑战。通过优化设计方案、强化施工标准、引入智能监测技术及建立应急响应机制，可有效提升穿越段的安全韧性。典型案例表明，系统化管理模式与联动协调机制具备良好适用性与推广价值，为城市复杂环境下燃气工程的安全运行提供重要参考。

参考文献：

- [1] 赵凯军,曾桐蕊,罗凌云.天然气管道定向钻穿越工程地质评价及工程影响[J].有色金属设计,2022,49(2):93-95.
- [2] 王熠华.天然气长输管道大型穿越工程实施阶段风险管理分析[J].化工管理,2021(15):72-73.
- [3] 吴晓峰.石油天然气管道隧道穿越施工技术探究[J].新型工业化,2021,11(8):121-122.
- [4] 武日成.基于WBS-RBS的天然气管道穿越工程风险管理研究[D].包头:内蒙古科技大学,2021.
- [5] 王晓峰,郑正友,曹洋.浙江大口径天然气长输管道穿越工程建设综述[J].天然气与石油,2020,38(5):1-7.

作者简介：

王妍(1990-)，女，汉族，北京人，本科，中级职称，研究方向：燃气安全管理、生产运行与工程建设、安全风险评估、安全生产标准化等。