

城镇燃气工程管道腐蚀防护与建设安全运行保障技术

李 娜（泰安泰山港华燃气有限公司，山东 泰安 271000）

摘要：本文聚焦城镇燃气工程管道腐蚀防护与建设安全运行保障技术，分析管道电化学、化学、微生物三类腐蚀的形成机制与影响因素，梳理防腐涂层、阴极保护、材质优化等腐蚀防护技术，探讨建设阶段管控、运行监测预警、应急处置等安全保障技术。研究表明，结合科学腐蚀防护技术与全生命周期安全管理，能有效降低管道腐蚀及事故风险，保障燃气供应安全，为城镇燃气基础设施安全建设运营提供参考。

关键词：城镇燃气工程；管道腐蚀防护；建设安全运行；保障技术

中图分类号：TE88

文献标识码：A

文章编号：1674-5167(2025)029-0136-03

Corrosion protection and construction Safety Operation Guarantee technology for urban gas Engineering pipelines

Li Na(Tai'an Taishan Gas Co., LTD,Tai'an Shandong 271000,China)

Abstract: This paper focuses on the corrosion protection and construction safety operation guarantee technologies of urban gas engineering pipelines, analyzes the formation mechanisms and influencing factors of three types of pipeline corrosion: electrochemical, chemical, and microbial, sorts out corrosion protection technologies such as anti-corrosion coatings, cathodic protection, and material optimization, and discusses safety guarantee technologies such as construction stage control, operation monitoring and early warning, and emergency response. Research shows that combining scientific corrosion protection technology with full life-cycle safety management can effectively reduce the risk of pipeline corrosion and accidents, ensure the safety of gas supply, and provide a reference for the safe construction and operation of urban gas infrastructure.

Key words: Urban gas engineering; Pipeline corrosion protection; Build safe operation; Guarantee technology

城镇燃气是城镇能源供应的核心，其管道安全涉及居民生活、工业生产和公共安全。随着管道敷设里程增长，服役环境日益复杂，腐蚀成为缩短管道寿命、引发泄漏爆炸事故的主要原因，造成经济损失和安全风险，工程建设质量控制、运行监测预警等也影响系统安全。所以，深入研究管道腐蚀防护技术，形成完备的建设安全运行保障体系，是城镇燃气行业必须解决的问题，对于推动基础设施高质量发展，提高公共安全水平具有重要意义。

1 城镇燃气管道腐蚀类型与影响因素

城镇燃气管道的腐蚀现象按照腐蚀机理可以分为电化学腐蚀、化学腐蚀和微生物腐蚀三类。不同腐蚀类型的形成机制和影响因素存在很大差别。电化学腐蚀是指管道处在潮湿土壤、地下水等电解质环境里，管道材质同周围介质形成原电池，致使金属离子持续溶解所引发的腐蚀，其腐蚀速率同土壤电阻率、含水率、pH值等要素相关联。土壤电阻率越低，含水率越高，电化学腐蚀就越严重。化学腐蚀则是管道金属同非电解质介质（比如燃气里的硫化氢、二氧化碳等酸性气体）直接发生化学反应，形成可溶性盐或者疏松氧化物，破坏管道金属结构，这种腐蚀主要由燃气成分、温度、压力等要素决定^[1]。

燃气里酸性气体含量越多，管道运行时温度和压

力越高，化学腐蚀的风险就越大。微生物腐蚀是由于土壤或者管道内的一些微生物（硫酸盐还原菌、铁细菌等）的代谢活动引起的腐蚀，微生物在生长繁殖时会产生一些酸性代谢产物，从而改变周围的介质化学性质。同时微生物会在管道表面附着形成生物膜，促进管道局部腐蚀，腐蚀程度与土壤中微生物的种类、数量、营养物质含量等因素有关。

城镇燃气管道的三类腐蚀并非独立发生，常相互作用加剧管道损坏，给燃气输送安全带来严重威胁。电化学腐蚀形成的局部破损，会使管道金属暴露面积增加，为化学腐蚀中酸性气体提供更多反应位点，加速金属结构破坏；而微生物代谢产生的酸性物质，又会降低管道周边土壤或内部介质的pH值，提升电解质活性，反过来促进电化学腐蚀速率。因此，在管道防腐设计与维护中，需综合考量三类腐蚀的关联影响，制定针对性防护方案，而非单一应对某类腐蚀问题。

2 城镇燃气管道腐蚀防护技术

2.1 防腐涂层技术

防腐涂层技术是通过在管道表面涂覆一层具有绝缘、阻隔作用的涂层材料，隔绝管道金属与腐蚀介质的接触，以达到防腐目的技术，是城镇燃气管道外防腐的主要技术手段。目前常用的防腐涂层材料主要有聚乙烯防腐层、环氧粉末防腐层、三层聚乙烯(3PE)

防腐层等。聚乙烯防腐层具有较好的柔韧性和耐冲击性以及化学稳定性，适用于土壤条件复杂的、容易发生管道位移的情况，但是对施工过程中涂层厚度控制要求较高，涂层破损会导致局部腐蚀。

环氧粉末防腐层具有附着力强、耐温性好、耐化学腐蚀性好的特点，适用于高温、高湿、强腐蚀性土壤环境，但柔韧性差，在管道运输和施工过程中易产生裂纹。三层聚乙烯（3PE）防腐层把环氧粉末底层的强附着力和聚乙烯外层的柔韧性、耐冲击性融合起来，综合防腐性能优越，被普遍应用到城镇燃气主干管道防腐工程当中。不过它的施工工艺比较繁杂，对施工环境温度、湿度以及涂层固化条件的要求比较高，要借助专门的设备和标准化的操作才能保证涂层的质量^[2]。

2.2 阴极保护技术

阴极保护技术是通过外加电流或者牺牲阳极的方法，使管道金属表面变成电化学腐蚀电池的阴极，从而防止管道金属离子融解，达到减缓或阻止管道腐蚀的目的。主要有牺牲阳极阴极保护和外加电流阴极保护两种方式。

牺牲阳极阴极保护是指将电极电位比管道金属低的金属或合金（如镁合金、锌合金、铝合金等）与管道相连，形成原电池，牺牲阳极材料不断溶解产生电流，向管道提供保护电流，不需要外部电源、施工方便、维护费用低等优点，适用于管径小、管道长度短、土壤电阻率低的支线管道，但保护电流小、保护距离短，阳极材料需要定期更换。

外加电流阴极保护依靠外部直流电源装置，把保护电流通过辅助阳极送入土壤，让管道表面到达保护电位。此技术可调保护电流，保护距离远，适合管径大，管道长度长，土壤电阻率高的主干管道，但要持续耗费电能，而且辅助阳极的设置和维修，保护电位的检测和调节均须专业技术人员来操作，系统运行时还要防止因保护电位过高造成管道氢脆或者涂层剥落。

2.3 管道材质优化技术

管道材质的选择直接关乎管道的抗腐蚀能力，通过改进管道材质来挑选耐腐蚀效果出众的材质，就能从根源上削减管道遭遇腐蚀的风险，当下城镇燃气管道常用材质有钢管，聚乙烯（PE）管等，各类材质的耐腐蚀特性以及适合的应用场景存在差别。钢管具备强度高，耐压性好的优点，适合高压燃气管道，不过钢管自身属于金属材质，比较容易产生电化学腐蚀和化学腐蚀，得要搭配完善防腐涂层以及阴极保护手段加以应用。

近些年来，因为材料技术不断进步，耐腐蚀合金

钢管像不锈钢管，双金属复合管之类的品种被逐渐采用，这类钢管会在金属主体当中加入铬，镍，钼这些合金元素，从而形成稳定氧化层或者改变金属内部结构，大幅改良抗腐蚀性能，适合腐蚀环境较恶劣的场所^[3]。

但是成本比较高，制约了广泛推广使用。聚乙烯（PE）管是属于非金属管道，具有很好的化学稳定性，不容易产生电化学腐蚀、化学腐蚀，重量轻、施工方便、维护费用低，可用于中、低压城镇燃气管道。特别是在居民小区、庭院等支管中使用较多，但其强度和耐温性较差，不适用于高压、高温燃气输送，长期服役过程中还容易受紫外线、土壤应力等影响老化、开裂。

3 城镇燃气工程安全运行保障技术

3.1 工程建设期安全管控技术

城镇燃气工程建设阶段的安全管控是管道后续安全运行的基础，要从勘察设计、施工过程、竣工验收三个环节进行严格的技术管控。在勘察设计环节，要进行详细的现场勘察，获得管道敷设路径的土壤性质、地质条件、地下管线分布、周边环境等基础数据，利用专业软件开展管道水力计算、应力分析和风险评价，确定管道敷设方式（直埋敷设、架空敷设、定向钻穿越等）、管径、壁厚、防腐方案。避免把管道敷设在高腐蚀土壤区域、地质灾害易发区、地下管线密集区域，预留足够的安全距离，减少外部环境对管道的影响。

在施工过程中，要严格执行施工技术规范和安全操作规程，加强管道材料进场检验、防腐涂层施工质量、管道焊接质量、沟槽开挖与回填质量的管控。管道焊接要采用全自动焊接技术或者半自动焊接技术，配备专业的焊接质量检测设备（X射线探伤仪、超声波探伤仪）进行焊接缺陷检测，确保焊接合格率。沟槽开挖要根据土壤类型和开挖深度采取支护措施，防止沟槽坍塌，回填土要分层夯实，控制回填土的含水率和压实度，防止管道受力不均造成变形或者防腐涂层破损。

在竣工验收环节，要组织专门的验收队伍，利用压力实验，气密性试验，防腐层检测等手段，针对管道的耐压情况，密封状况，防腐性能展开全面检测，还要检查施工技术资料是否完整，是否规范，验收合格之后才能投入使用^[4]。

3.2 运行阶段监测预警技术

城镇燃气管道运行阶段的监测预警技术属于及时发现腐蚀以及泄漏等安全隐患的必要手段。凭借监测实时或者定期运行情况以及管道状态等，达成风险预测的目的。

当下的监测技术主要包括管道腐蚀监测技术，泄漏检测技术以及压力与流量监测技术等几大方面，在线腐蚀监测包含安装腐蚀传感器，这些腐蚀传感器比如电阻探针，线性极化探针，超声波测厚传感器等，并且在管道上使用时能够及时搜集到关于管道壁厚，腐蚀速率等情况的数据资料并传输给控制中心完成后续分析处理任务，这种在线监测技术适合长时间对主管道重要部位进行监测^[5]。

而离线腐蚀监测方式则会采取定期开挖管道，采样之后交由实验室做深入分析处理工作，亦可以采用诸如智能清管器之类的检测手段来达到对管道内外部腐蚀状况全面检查的效果，其中智能清管器装置着诸如超声波，漏磁检测等模块组件，在管道内部移动时就可以准确探测到有关管道壁厚下降状况，以及存在腐蚀问题或者是焊缝破损的地方位置，但是离线监测方法的周期长些，在线监测就无法即时反馈管道腐蚀的动态信息。

泄漏检测技术有压力波监测技术、声波监测技术、光纤传感监测技术等，压力波监测技术监测管道内压力突变信号来判断是否发生泄漏，响应速度较快，但是易受管道压力波动干扰，声波监测技术安装声波传感器，捕捉管道泄漏产生的特声声波信号，灵敏度高，适合中小口径管道泄漏检测。

光纤传感监测技术利用光纤的传感特性，敷设沿管道的光纤传感器，对管道温度、振动、应变进行分布式监测，可同时监测管道泄漏和第三方破坏，监测范围广。但是成本高，技术复杂，压力与流量监测技术在管道沿线安装压力传感器、流量传感器，实时监测管道内燃气压力与流量变化，当压力或流量出现异常波动时，及时发出预警信号，便于运营单位调整运行参数或排查故障，保证管道运行压力与流量在安全范围内。

3.3 应急处置机制构建

城镇燃气管道运行时，即便执行了完备的腐蚀防护与监测举措，依旧会被极端天气、第三方破坏、设备老化等情况引发泄漏，爆炸等安全事故，创建起科学的应急处理机制极为关键。应急处理机制包含应急预案编制，应急资源储备，应急应对与处理，事后恢复与评价这四个主要部。

应急预案编制要联系管道铺设处人口密集度，环境敏感度，潜在危险种类等要素，制订出符合实际状况的应急处置预案，明确应急组织架构，人员职责划分，应急反应流程，应急处置办法，应急救援路线，而且要定时开展应急演习，优化应急处理团队的合作作战水平，应急资源储备应存留足够的应急救援装置，

应急物资，应急通讯设备，例如泄漏检测仪器，封堵装置，消防器材，防爆工具，燃气泄漏遏制剂，防护用具，急救药品之类，还要创建起应急资源调度体系，保证应急资源在事故爆发之后迅速调集到位。

应急响应和处置要遵循“快速响应、科学处置、以人为本”原则，事故发生后，马上启动相应级别的应急预案，组织人员疏散、交通管制，用专业设备检测泄漏处和泄漏量，依照泄漏情况执行关闭阀门、封堵泄漏口、稀释燃气浓度等办法，阻止事故进一步扩大，做好消防救援准备，以防发生火灾、爆炸事故。事后恢复和评价要在事故处置结束之后，及时对管道予以修理或者更换，经检测合格才能恢复供气。还要组织事故调查，剖析事故原因，评判应急处置成果，总结经验教训，修正完善应急预案和安全管理制度，避免再次发生类似事故^[6]。

4 结论

城镇燃气管道腐蚀防护与建设安全运行保障需多技术协同、全流程管控。针对多样腐蚀类型，需依据服役环境选择防腐涂层、阴极保护、材质优化等组合技术；安全保障需覆盖勘察设计、施工、运行、应急全生命周期，通过严格建设管控、完善监测预警与高效应急处置防控风险。唯有融合腐蚀防护与安全管理，构建全生命周期保障体系，才能提升管道抗腐蚀与安全运行水平。未来需要依托材料与信息技术，研发应用新型防腐材料与智能监测技术，进一步强化燃气系统安全保障能力。

参考文献：

- [1] 尹志彪,曹育军,邹健,等.城镇燃气埋地钢质管道防腐蚀现状[J].腐蚀与防护,2024,45(10):97-103+121.
- [2] 于玉良,宁玉鑫.在役埋地城镇燃气管道风险评估指标体系的构建与思考[J].城市燃气,2024(10):15-19.
- [3] 单武迪.城镇燃气管道防腐技术与维护管理[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(05):173-175.
- [4] 张凤桐,杨洪渊.城镇燃气管道隐患治理探讨[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(02):25-27.
- [5] 王峰,卢俊文,周璐璐,等.城镇燃气管道腐蚀检测案例分析[J].管道技术与设备,2023(02):51-54.
- [6] 王亮,尹安,郭勇,徐清刚,杨超,汪海波.城镇钢质燃气管道外防腐常见问题及治理措施[C]//山东石油学会.2015年中国腐蚀控制技术大会暨管道检测技术交流会.天津:管线与技术杂志社,2015:20-22.

作者简介：

李娜 (1982—)，女，汉族，山东昌邑人，大学本科，研究方向：燃气工程安全。