

天然气管道腐蚀穿孔成因分析

杨锦辉（中国石油青海油田分公司采气三厂，甘肃 敦煌 736202）

李恒亮 芦文涛（中国石油青海油田分公司采气一厂，青海 格尔木 816000）

摘要：天然气管道关乎国计民生，地区经济和人们的安全，而且天然气管道在长时间服务期间要应对一个常见而严峻的问题：天然气管道在长期运行中面临腐蚀穿孔的严峻问题。可能导致泄漏、火灾或爆炸等安全事故，造成重大人员伤亡、财产损失及环境破坏。本文系统分析了天然气管道腐蚀穿孔的危害，并从外部环境腐蚀（如土壤特性、杂散电流等）、内部介质腐蚀（如硫化氢、二氧化碳、液态水等）以及材料与结构因素（如焊接缺陷、应力腐蚀等）三方面探究其成因，进而提出优化设计选材、强化防护措施及加强监测检测等综合对策，以提升管道安全性和可靠性。

关键词：天然气管道；腐蚀穿孔；成因

中图分类号：TE988.2 文献标识码：A 文章编号：1674-5167(2025)025-0127-03

Analysis of Causes for Corrosion Perforation in Natural Gas Pipelines

Yang Jinhui (No. 3 Gas Production Plant, PetroChina Qinghai Oilfield Company, Dunhuang Gansu 736202, China)

Li Hengliang, Lu Wentao (No. 1 Gas Production Plant, PetroChina Qinghai Oilfield Company, Golmud Qinghai 816000, China)

Abstract: Natural gas pipelines are vital to national welfare, regional economies, and public safety. However, during prolonged operation, they face a common yet severe issue: corrosion perforation. This can lead to leaks, fires, or explosions, resulting in significant casualties, property damage, and environmental harm. This paper systematically examines the hazards of corrosion perforation in natural gas pipelines and explores its causes from three perspectives: external environmental corrosion (e.g., soil characteristics, stray currents), internal medium corrosion (e.g., hydrogen sulfide, carbon dioxide, liquid water), and material and structural factors (e.g., welding defects, stress corrosion). Furthermore, it proposes comprehensive countermeasures, including optimized design and material selection, enhanced protective measures, and improved monitoring and inspection, to enhance pipeline safety and reliability.

Keywords: natural gas pipeline; corrosion perforation; causes

要全面认识天然气管道产生腐蚀穿孔的根由，按照这个思路制定出切实有效的防范办法，这在保证能源传输安全可靠，防止经济亏损，延长基础设施使用年限方面有很强的实用价值，管道被腐蚀的现象很繁杂，其形成和成长受众多因素错综关联的影响，从外面来看，土壤环境的化学属性和电化学特性，干扰用的杂散电流，周围的空气水体环境等都起到作用；从里面看，输送的能源当中杂质成分如何，液相水存在与否，由此而来的电化学反应，微生物活动，流动状况等等；管道自身材料的质量状况，焊接工艺的好坏，不同金属结合，具体构造安排的种种细节都会对强度造成应力状况；附加保护层老化的状况以及电化学保护体系效能是否完备也会影响到问题的发生；甚至还有设计施工运行管理过程中一些小的失误，这些地方都有可能导致或者促进腐蚀现象发生直到最后出现穿洞。

1 天然气管道腐蚀穿孔的重要性

1.1 安全威胁

天然气管道一旦腐蚀穿孔就会造成天然气泄漏，

天然气管道内的高压天然气会持续地从破裂处泄露出来，泄漏的天然气以甲烷为主，天然气属于易燃易爆的气体，泄漏后的气体在相对密闭或者通风不良的地下空间、管沟或者是建筑物中聚集到爆炸极限的范围内，一旦遇上电火花、静电火花、电气短路、明火以及金属碰撞火花等火源，就很容易引发猛烈的爆炸。爆炸会带来冲击波和高温火焰，冲击波会损坏周围的设备与建筑，高温火焰会对现场工作人员和周围人员的生命安全构成极大的威胁。天然气泄漏后，如果在开放空间里扩散，遇到火源，就会产生大面积燃烧的火球或者是喷射火，这样的火势同样非常危险，可以很快地点燃周围可燃物，造成火灾的蔓延。并且还会直接导致局部空间的氧气浓度降低，增加人员的窒息风险。事故不仅直接威胁到操作维护人员，对管道沿途的居民区、公共场所的公共活动区域也会造成较大的安全威胁。

1.2 经济损失

天然气管道因腐蚀穿孔引发泄漏，运营方必须马

上停止输送并开展紧急维修，修复包含开挖、更换受损管段以及重新防腐等步骤，耗费不少管材、设备和人力，在处理事故时往往还得疏散人员、封锁现场、检测环境，这又增添了应急支出，输送中止直接影响到计划供气量缩减，依靠管道天然气的工业用户也许要减产甚至停产，遭遇合同违约赔偿和利润亏损，民用供气中断会波及居民正常生活，泄漏的天然气本来就是待售产品，白白流掉就等于资源价值直接浪费。发生事故之后，运营方要按照法规对遭受影响的地方开展环境复原工作，还可能会因为安全事件被罚款，用户遭遇服务中断或者事故损失也许会提出赔偿请求，很严重的泄漏事故可能会破坏企业的声誉，进而影响到以后的业务拓展机遇，管道本身受到的损坏缩减了其预计使用寿命，要是要提前替换整段管道，花费就会远超出局部修理的金额，这些跟腐蚀穿孔有着直接或者间接联系的多种花费，给管道运营方造成了不小的经济压力。

2 天然气管道腐蚀穿孔的主要成因分析

2.1 外部环境腐蚀

埋在地下的天然气管道一直跟周围的土打交道，土的特性千差万别，这就影响了腐蚀的速度，各个地方的土有不同的导电能力，含水量高低，溶解的盐分浓度大小，酸碱度强弱，这些因素合起来决定土对腐蚀的影响有多强，土里的水分多，给腐蚀提供了一个必要条件，溶解在里面的各种盐分让土变得导电更好，加快了管道的电化学腐蚀，而且有些土壤环境里的小生物活动也不可忽视，其的呼吸代谢之类的可以改变周围的小环境，进而影响金属材料的损耗情况，附近有电气化铁路或者高压输电线路的地方，管道就可能被那些电所扰，泄露出来的直流电或者在管道上感应产生的交流电，这些电在管道上进出，就会在电流要离开管道进入土壤的那部分产生快速的电解腐蚀。暴露在大气之中的那些部分，跨越段或者阀门设施之类，在其表面上会遭遇空气当中夹杂的氧气、水蒸气以及二氧化硫或者盐分颗粒，当空气相对湿度比较大尤其是产生一层水膜的时候，这种现象就会变得显著起来，而管道在河流中间穿过，沼泽地带之中或者地下水位高处经过的时候，金属的表面一直或者有时跟含有氧气的水发生接触，水里头溶解着的那部分氧和离子也同样会造成并支撑这样的变化过程，外部条件十分错综复杂，在其中扮演了一个相当重要的原因。

2.2 内部输送介质腐蚀

管子里流着的天然气自身也许就包含一些腐蚀性质的元素，常见的杂质有硫化氢，二氧化碳，氧气，还有不多的水量或者液态水，如果管壁表面温度低于

气体的露点，水汽就会凝结起来，然后出现在管道底部或是内壁上，变成一片水膜，如果管里头存着的湿气里含有硫化氢，这对金属管线来说非常危险，可能造成钢材出现开裂的可能，由于二氧化碳溶解在水中会变成一种酸类的东西，这种酸会侵蚀管壁上的金属，就算是有很少量的氧气在湿气当中，也会加速锈蚀的速度，管壁里面也或许有着微生物生存的可能，其贴在管壁上，其的生命活动也许会影响到局部的环境状况，参与到或者加大腐蚀的过程之中。气体或者液体的流速状况产生重大影响，高速度或者湍流会冲击管壁，妨碍保护性腐蚀产物层的稳固发展，亦会将已形成的保护层剥除，使得新鲜的金属表面一直曝露于腐蚀环境之中，从而加速金属的损耗情况，在管道内部的不同地方所处的情况存在着差别，比如说在管道低处比较容易积水，管道顶部却会出现冷凝水，像这种地方往往遭受腐蚀的情形更加集中，输送的介质当中包含着一些腐蚀性质的杂质，这些物质还与之携带的液相水联合起来对管道的内壁施加作用，这也是导致管道的内壁发生腐蚀减薄直至被腐蚀穿洞的主要原因所在。

2.3 材料与结构因素

管道采用的金属材料本身具备的特点是决定其能否耐腐蚀的基础，钢材在制造的时候倘若内部存有细微的瑕疵或者不均之处，这些地方常易变成腐蚀的开端。焊接属于把管道对接起来的方式，焊接之处及其周围地带也许由于高温作用而导致材料性质发生变更，焊接操作控制不当有可能引发未彻底融合、边缘被咬去或者出现细微裂痕之类的问题，这种有瑕疵的区块往往对腐蚀较为敏感。当管道系统要对接不一样的金属物件的时候，像钢管和阀门或是其他配件互相连通时，不同的金属在腐蚀环境中各自的电化学性质不相同，二者接触之后便形成一条电流流通的途径，致使其中较易被电解出的金属腐蚀速度加快。管道在安装使用期间经受着各种力量的影响，诸如内部气体压力，土壤所施加的压力，还有由温度波动造成胀缩力量等等。材料内部存在较大的拉伸应力时，又处在像含有硫化氢成分的湿气这样的腐蚀性介质环境里，材料可能发生一种叫做缓慢开裂的现象，这种开裂在压力和腐蚀因素共同影响下有进一步发展并穿透管壁的可能。管道结构自身存在的细节特征，比如形状有变动之处或者连接着其他装置的部分，有时候会成为液体易于积攒或者流过的地方，这类位置也更可能出现局部加速腐蚀的情形。材料本身的质量，焊接情况，不同金属接触，管道受到的应力状态这些与腐蚀穿孔有关联的条件都属于比较重要的内部要素。

3 天然气管道腐蚀穿孔的防护对策

3.1 优化设计与选材

管道项目刚一开始就要细致地做设计规划并选好材料，在后面防止出现腐蚀穿孔这方面的工作，选择管道自身钢材时，必须把未来要运的天然气具体成分和环境情况给考虑到，如果预估天然气里面会有像硫化氢这样的能腐蚀的东西，就得挑选那些有抵抗能力的钢材类型，这类钢材经过特别处理，能让腐蚀介质引起的开裂几率变小，至于管道线路走哪条，也尽量避开那些已经知道的强腐蚀性地方，像高盐碱土壤的地方，杂散电流干扰厉害的地方或者地下水一直很满满的沼泽地这些地方都要避开，这样可以减轻外部因素对管道造成的侵蚀状况，对于管道系统全部的防护计划来说，外边的防锈层和电化学保护办法也是必不可少的一部分。防腐层是隔离管道金属和土壤的第一道防线，其种类需要适应管道运行温度，土壤情况以及施工状况，要有良好的黏附力并持久稳定，电化学保护属于辅助方法，其系统安排得靠准确的计算来做保证，这样能够给整条管道给予足够而且均衡的守护电流，对于那些输送气体质量很难控制湿度或者含有腐蚀性物质的管道来说，在内部加上合适的防护层算是值得考虑的选择，这样做可以直接把管壁金属和腐蚀性的环境隔离开来，降低内壁腐蚀现象出现的几率，设计还要注重一些管道结构上的细节问题，改进地方像形状发生变化的位置，低点的地方排水情形还有附属品的连接点之类的东西，在这方面最好能够避开容易积水或者有涡流形成的地点，这样可以削减局部范围内的损害。

3.2 强化腐蚀防护措施

管道投入运行之后，坚持并巩固既有的腐蚀防护手段，这是日常管理的主要任务。针对覆盖管道外表面的防腐层，要定时展开状态检测，尽快找出涂层破裂之处，剥离或者老化的区域，按照损伤情况开展针对性修理，保证防腐层能够持续起到隔离的作用，阴极保护系统得一直正常运转，定期查看电源设备的工作情形，确保发出的电流正常，用测量装置查出并记录下管道沿线重要地点的守护电位，凭借所获数据判断守护效果可否做到充足且均匀，一旦发现问题就得马上调整系统参数或者修复那些失效的阳极地床，尤其留意防腐层严重破损的地方，还要注意到那些出现屏蔽效应的情况，免得守护电流不能到达这些地方，另外也要防范因为守护电流过大引发过保护现象，从而产生防腐层损害或者管道金属发生氢脆。对管道内部实施防护的时候，严格把控被输送的天然气质量非常关键，彻底执行脱水工艺的要求，最大程度缩减气里含有液态水的程度，必要的情况下还要采取脱除硫化氢，二氧化碳等杂质气体的举措，按照

对管道内部腐蚀情形的评估结果来决定并继续添加合适的缓蚀剂，让其在金属表面长出保护膜，每隔一定时间段就要执行清管作业，除去管内堆积的液体，固态杂质以及腐蚀产物，让管道内部干净干燥，从而减轻腐蚀介质长时间存留于管壁的可能。提升腐蚀防范举措，就得让经营方创建一套完整的保护规程，安排足够的检测设备，培训合格的操作工人，把外防腐层保护，阴极保护体系经营，内腐蚀控制这三项工作融合起来，变成一连串的防护链条，尽可能削减管道内外壁的腐蚀速率。

3.3 加强腐蚀监测与检测

要想及时掌握管道的腐蚀状态变更状况，就要依靠持续开展监测检测活动来实现，在管道某些指定地方安装专门的设备执行在线监测是常用的一种做法，这些设备会直接接触到管道内部的介质或是附着在管壁上，从而能够持续地观测金属损耗速率或者环境腐蚀性的参数发生怎样变化的趋势状况，给判断目前的腐蚀危险水平给予直接的参考根据，在管道里面定时用带有各种探测装置的智能检测装置运行，这是得到全部腐蚀资料的重要手段，这类检测装置带着很多探测器能在输送介质里穿行，详尽记录下管道内壁表面的腐蚀凹陷坑穴，壁厚削减以及裂纹这类缺陷存在的具体位置大小和深浅度情况，进而产出一份完整的管道内部状态检测报告。

4 结语

天然气管道遭腐蚀穿孔这个问题十分严重地威胁着输送安全，由其引发的泄漏事故会造成重大的人员伤亡，财产损失，环境污染而且会带来严重的直接和间接经济损失。从分析来看，天然气管道腐蚀穿孔不是单靠某个因素就能造成的，而是外部环境腐蚀，内部介质腐蚀，管道自身材料与结构上的毛病，防护系统效果不理想，管理操作环节存在漏洞等种种原因共同起作用形成的。要想真正控制住管道内腐蚀穿孔的发展态势，就得把技术和管理紧密结合起来才行，这样才能最大程度地减小穿孔风险，让天然气管道长时间安全运转。

参考文献：

- [1] 马自山. 天然气管道中聚乙烯醇对腐蚀速率的影响 [J]. 聚酯工业, 2025, 38(03):21-23.
- [2] 何伟宏, 林焕明. 石油天然气管道泄漏抢修技术分析 [J]. 当代化工研究, 2025(06):133-135.
- [3] 王权, 邓娇. 天然气管道弯头腐蚀特性研究 [J]. 非常规油气, 2025, 12(02):134-138.
- [4] 贾正东. 天然气管道腐蚀控制措施研究 [J]. 山西化工, 2024, 44(11):191-192+199.
- [5] 苏强. 油气管道腐蚀与防护技术研究 [J]. 石化技术, 2024, 31(12):193-195.