

天然气管道放空作业风险分析与安全距离研究

樊宏进 (中石化石油工程设计有限公司, 山东 东营 257000)

摘要: 天然气管道放空作业是检修及应急处置中不可或缺的环节。然而, 在作业开展过程中存在风险隐患。本文首先对放空作业的内涵及核心参数予以界定, 对燃烧爆炸、喷射火、有毒扩散等不同类型的风险开展系统性识别, 剖析作业参数、环境状况、人为因素及设备因素为风险造成的影响; 接着, 搭建基于事故后果模拟的安全距离计算模型; 提出覆盖全流程的风险管控举措, 为天然气管道开展放空作业的安全性提供技术支撑。

关键词: 天然气管道; 放空作业; 风险分析; 安全距离

中图分类号: TE88

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2025) 031-0114-03

Risk analysis and safety distance study of natural gas pipeline venting operation

Fan Hongjin (Sinopec Petroleum Engineering Design Co., Ltd., Dongying Shandong 257000, China)

Abstract: The venting operation of natural gas pipelines is an indispensable part of maintenance and emergency response. However, there are potential risks during the operation. This article first defines the connotation and core parameters of venting operations, systematically identifies different types of risks such as combustion explosion, jet fire, and toxic diffusion, and analyzes the impact of operational parameters, environmental conditions, human factors, and equipment factors on risks. Then, a safety distance calculation model based on accident consequence simulation is established. Finally, risk control measures covering the entire process are proposed to provide technical support for the safety of venting operations in natural gas pipelines.

Keywords: natural gas pipeline; Empty homework; Risk analysis; safety distance

天然气输送管道是能源输送的核心基础设施, 放空操作是管道检修、压力调控及应急事故处理的关键步骤, 需要把管道内部残留的天然气排放到大气中。然而, 天然气易燃易爆、有毒性, 在放空期间如果泄漏扩散或遇到火源, 就容易引发诸如燃烧爆炸、人员中毒等事故, 并且安全间距设置不合理是导致事故范围扩大的重要因素。

本文开展关于风险分析以及安全距离的研究, 其目的在于提高放空作业的安全程度, 确保管道运营以及周边人员财产的安全。

1 天然气管道放空作业基础认知

1.1 放空作业的内涵与分类

天然气管道放空操作是, 借助放空阀及放空管线, 将管道内部的天然气排放到指定区域的操作。其核心目标在于降低管道压力, 并且清除管道内部介质, 从而为检修、更换设备或进行应急处置营造安全条件。依据作业的目的及场景, 能够将它分为两大类, 其一为常规检修放空, 这类放空大多是在对管道开展计划性维护时进行, 例如, 在进行阀门更换、管线防腐层修复前, 需把作业段管道中的天然气放空到常压状态; 其二为应急事故放空, 当管道出现泄漏、超压、堵塞等突发事故时, 为了防止管道破裂或事故进一步扩大, 需迅速放空管道内部天然气, 此时, 作业压力可能高达6-10MPa, 放空量突然增多, 而且持续时间较短, 其风险明显高于常规检修放空。

1.2 放空作业的核心参数

放空作业的关键参数会直接对风险等级及安全距离的计算产生影响, 主要涵盖以下三类情况:

其一为放空量, 指的是单位时间中排放的天然气体积, 放空量越大, 天然气扩散的范围就越广泛, 风险半径也就越大;

其二是放空压力, 管道初始压力会对放空速率起到决定性作用, 压力越高, 天然气喷射速度就越快, 容易形成静电或者冲击气流;

其三是介质组分, 天然气中甲烷的含量通常 $\geq 90\%$, 此外还含有少量的乙烷、丙烷以及硫化氢, 甲烷的爆炸极限处于5%-15%, 当硫化氢的浓度超过10mg/m³时, 会引发人员中毒, 因为组分存在差异, 所以导致燃烧爆炸的风险以及有毒危害的程度不同。

除此之外, 放空管线的管径大小、出口高度高低同样会对介质的扩散情况产生影响: 管径更大, 放空效率就会更高; 如果出口高度 $\geq 10\text{m}$, 天然气就能够更快扩散到大气中, 从而使地面浓度降低, 然而低空放空, 很容易使介质在地面积聚。

2 天然气管道放空作业风险分析

2.1 主要风险类型识别

在天然气管道放空作业中, 存在四类典型风险, 并且各类风险的成因以及危害存在明显差异。

其一为燃烧爆炸风险, 在放空过程中, 天然气一旦泄漏, 便会展开能够燃烧的混合气体, 此时, 如果

遇到明火或静电，就极有可能引发爆炸，爆炸冲击波具有强大的破坏力，能够致使周边建筑物墙体破损，还会对人员造成伤亡。

其二是喷射火风险，当放空管线出口处的天然气直接接触到火源时，就会形成喷射火，火焰长度与放空压力正相关，高温火焰具有很强的杀伤力，不仅能够灼伤人，还会烧毁相关设备，更严重还可能引燃周边植被，引发火灾。

其三是有毒气体扩散风险，天然气中含有的硫化氢是毒性物质，在放空时，如果风速 $\leq 1\text{m/s}$ 并且地形封闭，硫化氢就很容易在地面聚集，当硫化氢的浓度超过 100mg/m^3 时，就会导致人员急性中毒，进而出现呼吸困难、昏迷等症状。

其四是静电危害风险，当天然气高速流经放空管线时，会与管线的管壁发生摩擦，从而产生静电，如果管线没有进行接地处理或者接地情况不佳，静电就会不断积聚，当积聚到一定电压时，就会发生放电现象，从而引燃可燃混合气体，这类风险在干燥的环境下更易发生。

2.2 风险影响因素分析

放空作业过程中的风险，是受到多种因素综合作用的结果，经过仔细分析，可以将这些因素归纳成四大类别。

第一类是作业参数因素，在放空作业中，放空压力的高低以及放空量的大小，对风险等级有显著影响，当放空压力较高，同时放空量较大时，风险等级就会随之升高；另外，如果放空速率过快，会使静电产生的可能性增加，而且还可能引发管道振动，进而导致管线接口处出现泄漏的情况。

第二类是环境因素，当风速 $\leq 2\text{m/s}$ 时，天然气在空气中的扩散速度会变慢，这样就容易形成高浓度的可燃区域；风向可以改变天然气的扩散方向，处于下风向的区域，其风险明显比上风向区域高；在降水天气情况下，虽然能够降低静电风险，但是会对作业人员的视线以及操作的灵活性产生不利影响；如果放空作业是在城区或者居民区周边开展，由于这些区域人员分布密集、建筑物数量众多，一旦发生风险，后果会更严重，而在开阔荒地进行放空作业时，风险扩散的范围较容易控制。

第三类是人为因素，在作业过程中，作业人员如果没有按照规定进行可燃气体浓度检测，就无法及时察觉到气体浓度超标；操作失误可能导致压力突降；有时没有设置警戒区，或者设置的警戒区范围不够大，使无关人员能进入到存在风险区域。

第四类是设备因素，放空阀的密封性能失效会导致

天然气泄漏；放空管线如果出现腐蚀，使得管壁厚度变薄，在高压放空时，就有可能发生管线破裂；如果接地装置故障，会导致静电无法正常导出，这些设备方面的问题，会直接使放空作业面临的风险程度加大。

3 天然气管道放空作业安全距离研究

3.1 安全距离的核心影响因素

安全距离指的是放空作业区域与周边人员、建筑物以及设备之间的最小安全间隔，确定这一距离时，需要考量三类核心要素：其一为事故后果的类型，如果发生燃烧爆炸，安全距离需涵盖冲击波的影响范围；若出现喷射火，安全距离要大于火焰长度；当有毒气体扩散时，安全距离须保证下风向区域的有毒物质浓度低于安全阈值；其二是作业场景存在差异，常规检修放空时，压力较低、放空量较小，安全距离可适当缩短；应急放空时，压力较高、风险较大，安全距离需大幅增加。在城区进行作业，由于人员密集、障碍物众多，安全距离要比开阔地带大；其三是受体敏感性，当周边有学校、医院这类人员密集的场所时，安全距离要额外增加30%，以此防止事故造成大量的人员伤亡；若存在易燃易爆设备，安全距离要保证事故不会引发二次灾害。

3.2 安全距离计算模型构建

将标准与事故后果模拟方法相结合，搭建放空作业安全距离的计算模型，并依据三类不同的事故后果来明确计算逻辑。

其一，燃烧爆炸安全距离的计算运用TNT当量法，首先依据放空量以及天然气的热值来算出爆炸的TNT当量，其计算公式为 $WT=QTQ \times V$ ，其中WT代表TNT当量，单位是kg；Q是天然气热值，大约为 35MJ/m^3 。选取最严格的人员死亡阈值所对应的距离，将其作为燃烧爆炸安全距离。

其二，喷射火安全距离的计算，按照放空压力来确定火焰的长度，计算公式为 $L=2.5 \times P0.8$ ，其中L表示火焰长度，单位是m，P为放空压力。安全距离取火焰长度的1.5倍，以此保证人员不会被火焰灼伤。

其三，有毒气体扩散安全距离的计算，采用高斯扩散模型，根据放空量、风速以及硫化氢浓度，来计算下风向不同距离的浓度，把浓度 $\leq 10\text{mg/m}^3$ 所对应的最远距离，当作有毒扩散安全距离。

3.3 不同场景下安全距离确定

通过将计算模型与行业实践相融合，来确定三类典型场景下的安全距离。其中，第一类是常规检修放空场景，在开阔地带，安全距离 $\geq 50\text{m}$ ；在城区，安全距离要 $\geq 75\text{m}$ ；如果周边存在人员密集场所，那么安全距离要 $\geq 100\text{m}$ 。第二类为应急高压放空场景，

在开阔地带,安全距离应保证 $\geq 100m$;在城区,安全距离需达到 $\geq 150m$;与易燃易爆设备之间的安全距离要 $\geq 120m$ 。第三类是含硫天然气放空场景,无论是常规作业还是应急作业,安全距离都要在原本基础上提高20%。当安全距离被确定下来后,要借助物理隔离手段以及标识提醒的方式明确其范围,同时要依据实时的气象条件变化进行动态调整。

4 天然气管道放空作业风险管控措施

4.1 作业前风险管控

在进行作业前,需要从三个方面做好准备,以此从根源上降低潜在风险:其一,要精心编制专项作业方案,在方案中,需清晰明确放空的具体目的、涵盖范围以及各项参数,仔细计算并且准确标注出安全距离,同时制定周全的应急处置预案,该方案要经过技术部门和安全部门的双重严格审批;其二,要全面开展现场排查与细致检测工作,认真检查放空阀、管线及接地装置是否完好,对作业区域的可燃气体浓度和硫化氢浓度进行检测,彻底清除现场火源,将安全距离内的无关人员和障碍物全部移除;其三,要进行人员培训与详细交底,对作业人员开展系统的安全培训,着重讲解操作规程、风险识别的有效方法以及应急技能,只有培训合格后,作业人员才能够上岗作业,在作业开始之前要召开交底会议,明确各个岗位的职责。

4.2 作业中过程管控

在作业过程中,需要进行实时监测把控,以此保证风险可调控,具体内容如下:其一,控制放空速度,要运用“缓缓开启、逐步提升压力”的模式,初始的开启程度要 $\leq 10\%$,等管道内的压力稳定后,再逐渐增大开启程度,这样做是为了防止因为速度过快而产生静电或引发管道振动,在常规检修时,放空速度要控制在每秒5m~10m的范围,紧急放空的速度则不能超过每秒15m;其二,对实时参数进行监测,要安排专门人员每隔五分钟记录一次放空的压力、温度以及流量;每隔十分钟检测一次作业区域以及下风向的可燃气体浓度与硫化氢浓度,如果浓度超出规定标准,要马上暂停作业,加大放空速度或调整放空方向;其三,开展现场的监护管理工作,在警戒区域内要设置两名及以上的监护人员,严禁无关人员进入,要使用对讲机和操作室保持实时信息交流,如果遇到突发状况,要立刻启动应急处理方案,关闭放空阀门,组织人员撤离到安全距离外。

4.3 作业后安全处置

作业完成后,要开展完善的收尾工作,以排除可能存在的残留风险,具体内容如下:其一,针对残留气体开展清除工作,当将管道内的气体放空直至压力

$\leq 0.1\text{MPa}$ 后,要运用氮气或空气对管内残留的天然气进行吹扫,直到管道内可燃气体的浓度达到 $\leq 0.5\%$ 爆炸下限的标准;其二,进行设备的复位以及检查工作,先关闭放空阀,接着拆卸放空管线,随后对阀门的密封性能展开检查,如果发现泄漏状况,就须及时进行维修,同时,还要对接地装置以及检测设备进行维护,从而保证在下次作业时这些设备能够正常使用;其三,解除安全距离限制,只有在确定管道内没有残留的天然气并且现场不存在安全隐患后,才可拆除警戒带与标识,进而解除安全距离限制;其四,开展作业总结与复盘工作,将作业过程中参数的变化、异常现象以及处置措施详细记录,对问题进行分析,以此优化后续的作业方案。吹扫后需用便携式可燃气体检测仪在管道两端、阀门接口处多点复核浓度,确保数据精准。

5 结论

本文借助针对天然气管道放空作业开展的研究,清晰界定了常规检修放空作业以及应急放空作业两类作业的内在含义与核心参数,并且,对燃烧爆炸风险、喷射火风险、有毒扩散风险、静电危害风险这四类风险进行系统性识别,同时剖析了作业参数、环境状况、人为因素、设备状态四大影响因素。以事故后果模拟为基础构建的安全距离计算模型,能够依照不同场景确定科学安全距离,具体而言,在开阔地带进行常规检修放空作业时,安全距离需 $\geq 50m$;在城区开展应急高压放空作业时,安全距离需 $\geq 150m$ 。所提出的“作业前-作业中-作业后”的覆盖全流程的管控举措,能够切实降低各类风险。在未来,可进一步结合数值模拟技术,以此优化安全距离计算的精程度,同时积极推动放空作业的智能化监测工作,从而提升作业安全管控的整体水平,确保天然气管道运营的安全。

参考文献:

- [1] 马剑林,李又绿,王爱玲,等.天然气冷放空模拟及实验研究[J].科技和产业,2024,24(01):252-259.
- [2] 刘博华,苟梦姣,孙小毛,等.城市燃气管网动态放空特性研究及分析软件开发[J].山东化工,2023,52(23):68-71.
- [3] 刘辉,罗怡凯.天然气计量输差的影响因素及解决措施分析[J].中国石油和化工标准与质量,2023,43(22):48-50.
- [4] 田伟力,张泽群,傅庭志,等.浅谈输气管道高后果区的焊道损坏定量风险评估方法[J].焊接技术,2022,51(S1):88-92.
- [5] 白鑫,余硕,闫子凡.天然气管道在线清管作业风险识别及控制[J].化学工程与装备,2022,(11):119-120+127.