

油气储运管道爆炸荷载计算及安全防控措施分析

管西玲（山东莱克工程设计有限公司，山东 东营 257000）

摘要：我国的油气储运管道正处于高速发展时期，管道的运输介质属于易燃易爆品，若运输过程中存在不规范行为，出现事故的概率较高。本文以造成油气储运管道失效致险的主要因素为切入点，对油气储运管道爆炸荷载作出计算，分析了具体的安全防控措施，以期促进油气储运管道的安全稳定发展。

关键词：油气储运管道；爆炸荷载；安全防控

0 前言

油气储运管道是国家重要的基础设施和民生工程，是油气上下游衔接协调发展的关键环节，是现代能源体系的重要组成部分。油气管网的安全、平稳、高效运行，对于保障能源的安全稳定供应具有重要作用。管网的输送有利于扩大清洁能源使用，带动相关产业发展，提升经济整体运行效率效益。

但是由于油气储运管道输送的介质以天然气和油品为主，具有易燃易爆的特点，一旦出现安全事故，会对人们的生命安全造成威胁，经济损失巨大，因此加强对油气储运管道的安全监管和防控，具有十分重要的现实意义。

1 油气储运管道产业发展前景概述

当前，油气产业的发展环境发生了深刻变化。2020年9月，总书记明确提出“双碳”战略目标。实现双碳目标对油气管网建设提出新要求，必然推动我国油气行业进入高质量发展的新时期。预计“十四五”末，油气供应保障需求仍将不断增强，进口LNG接收能力大规模提升。油气行业的结构调整和高质量发展需要油气储运管道行业的强力支撑。

《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》中提出：“推进能源革命，加快全国干线油气管道建设，建设智慧能源系统”。2021年10月，总书记视察黄河入海口城市东营时提出：“能源的饭碗必须端在自己手里”等系列重要指示。能源安全对油气储运管网安全防控及运营提出新要求。

2022年4月，国家能源局组织召开全国油气管道规划建设和保护工作会议，会议提出加快油气管道建设意义重大，油气管道是产业高质量发展的重要支撑，是保障能源安全的必然要求，并提出各管道企业、地方管道保护主管部门要以《管道保护法》为遵循，坚决落实企业管道保护主体责任，坚决做好管道保护工

作，推动油气管道安全防控工作再上新台阶。

2 造成油气储运管道失效致险的主要因素分析

油气储运管道运输对环境质量改善、运输结构优化、推动新旧动能转换等提供有力支撑，可大量减少公路油品运输车辆，减少一氧化碳、碳氢化合物、氮氧化合物和固体颗粒物。

以某市管输6000万t原油和1500万t成品油为例，采用管道运输可以替代运输车辆近250万车次/a，可减少一氧化碳排放4500t、二氧化碳排放6000t、碳氢化合物排放1375t、氮氧化合物6000t和固体颗粒物62t，可有效保护大气环境及道路交通，减少道路安全隐患。

油气储运管道以埋地敷设方式进行输送，具有隐蔽性和安全性的特点。但管道可能因第三方破坏、自然灾害、应力腐蚀、二氧化碳腐蚀、土壤腐蚀、杂散电流腐蚀、材料缺陷和焊口缺陷等因素引起管道泄漏或断裂，遇到点火源发生火灾爆炸事故，对周边环境及人员、财产造成巨大损失。

根据中国石油天然气股份有限公司管道分公司对外公布的调研数据，造成油气储运管道失效致险的最核心因素为社会危险有害因素，由于人类的正常经济活动，在进行修路、建筑等地面活动及地下施工时，可能与管道发生交叉作业，施工时可能造成管道破坏；管道的违章占压，也是近年来难以处理的危险因素，部分在管道附近甚至管道上方修建公路、房屋、建筑的行为，既构成了对管道基础的破坏，引起基础下沉，又增加了管道的负荷，造成管道弯曲变形甚至损坏；油气储运管道所铺设的区域有部分地区的整体经济发展情况较为薄弱，管道监管不到位等，导致部分不法分子为了获取利益不惜铤而走险，但伴随着我国对于此方面的法律条例不断完善，对保护油气储运管道的宣传力度不断加大，以及国民经济的进一步发展，这一致险因素的比重可以得到有效控制。

3 油气储运管道爆炸荷载计算

爆炸的基本含义为当可燃物和空气混合达到一定浓度时,遇明火就会发生爆炸。在极短的时间内快速出现大量高压高温气体,其所产生的超压冲击波对周围区域的人员与建筑物造成毁灭性打击。并且随着爆炸过程的深化,爆炸压力的增加速度逐渐加快,一直会持续到最大爆炸压力的产生。

3.1 TNO 爆炸模型建立

爆炸产生的冲击波是导致管道及工艺装置外建筑物损毁和人员伤亡的主要原因,为了研究爆炸冲击波对周围的影响程度,以目前国内常用的 TNO 模型计算发生蒸气云爆炸事故产生的后果。TNO 爆炸模型是一种典型的多能法,通过设定比例缩放爆炸预测模型,将蒸汽云假设为半球形状,在中心位置点火,在进行大量的实验验证以及构建不同的数值模拟数据,进而可以得到一组爆炸强度曲线,在此基础上对障碍和无障碍空间的蒸气云爆炸特征进行分析。

3.1.1 确定爆炸强度

使用 TNO 多能法,首先选择爆炸强度的等级,取十以内的任意整数。在将爆炸强度等级确定出来以后,要以正比例距离为基准在爆炸波特性曲线图中找出与其对应的无量纲峰值超压强和无量纲正压力的具体持续时间,以便估算出爆炸波超高压强。爆破波动波形与爆破强度等级之间是成正比例关系的。以甲烷为例,确定爆炸强度的数值为 $890.8 \times 62.5 = 55675 \text{ kJ/kg} = 890.8 \text{ kJ/mol}$ 。当爆炸强度等级在 7-10 时,油气储运管道的点火能量及对周边的影响较强;当爆炸强度在 1-3 等级时,点火能量及对周边的影响较弱。

3.1.2 计算爆炸云团

可燃成分云团中的有害物含量主要是根据可燃物质的暴露方式和传播途径来确定,所以在测算爆炸性云团数量时,先假设在油气储运管道中所泄漏的是全部气体或液化气体,都能够充分产生可燃性云团。油气储运管道输送介质中气体的爆炸性极限为 5%-15%,在气体处于较为强烈的爆炸性状态下时,其爆炸性含量的平均值约为 9.5%。算出爆炸源半径之后,要通过测量与爆破源大小相同的半球形面积来得到准确数值。爆炸源半径的计算公式为 $V = Q/0.095 = 1/2 \times 4/3 \pi r^3$ 。

3.2 爆炸压力传播规律

3.2.1 爆炸超压和气体浓度的关系

当油气储运管道的运输介质泄露后,与空气形成

混合气体,可燃气体浓度达到一定的数值后,则具备了爆炸发生的必然条件,这个浓度数值范围也就是爆炸极限。甲烷在空气条件下的爆炸数值范围是 5%-15%,为了研究爆炸超压与气体浓度之间的关系,本文以甲烷为例,设定相关的试验参数。首先假设环境处于无风条件下,当管道出现泄露后,泄漏点中心以半球形向外扩散,假定可燃气体云内部浓度呈均匀状态分布。其次设定半球形气云的中心区域是爆炸中心,爆炸周围区域的地面与建筑物表面都具有良好的绝热条件,并且足够的光滑;第三设定温度为 20℃;在假定上述条件后,进行模拟计算。对甲烷空气混合气体的不同体积分数来开始数值模拟,起爆点处于球心位置,通过观察不同的距爆心距离位置的可燃气体云爆炸最大压力值和甲烷浓度之间的变化情况。当甲烷体积分数在不断增加时,峰值超压也会在一定范围内呈增加趋势,之后甲烷浓度继续增加,峰值超压则不再加大,而是开始呈下降趋势。所以由此可以看出,甲烷空气混合气体最危险的体积分数是 9.5%,若在此时爆炸,强度是最大的,对周围区域的人员与建筑物伤害最大。

3.2.2 爆炸波超压和气云半径的关系

通过分析开敞空间内的不同半径值的半球形甲烷空气混合气体,来明确爆炸波超压和气云半径之间的关系。当可燃气体云的半径逐渐加大时,爆炸波的最大超压也会随之有所提高,当半径在 100m 时,最大超压的数值可以达到 40kPa。以油气储运管道爆炸冲击波超压产生的破坏程度为基本准则,当可燃气体云的爆炸半径在 10m,将会导致建筑物的玻璃呈破碎状态;半径在 20m 时,建筑物的墙体结构出现裂纹;当半径超出 60m 时,建筑物的钢混屋面出现起裂,对人体所造成的损伤程度为中等。

3.2.3 爆炸波超压衰减规律

当可燃气体云处于同等的半径条件下,相对距离的不同也会对最大超压产生不同的影响。仍设定甲烷体积分数是引发油气储运管道爆炸强度最大的 9.5,通过模拟作用能够得知,爆炸波最大超压的衰减规律。当可燃气体云产生起爆反应后,爆炸最大超压的影响是呈快速增长趋势,当到达最大峰值后快速下降,下降趋势逐渐趋于平稳。在气云区内,爆炸中心位置产生的冲击波最大超压会随着传播距离而加大,当气云和空气的混合状态达到初始界面值后,加大状态停止。当爆炸冲击波在空气中完全反应后,燃烧能量补充趋

于停止。与此同时,冲击波超压的逐渐减小,当气云半径为 2m 时,其下降数值可以达到极值的 40%。

4 油气储运管道安全防控措施分析

4.1 提升管道智能化水平,从根本上预防管道出现泄露问题,保证管道本体安全

保证油气储运管道的本体安全可以从源头上预防泄露等安全事故的发生,首先,在油气储运管道施工前,做好相应的安全防范措施,编制工程 HSE 实施方案,报送相关部门审批后方可开工。加强新型智能、节能环保的技术装备的应用,提高管道安全输送效率。加强过程管理,严格执行国家相关法律法规,要最大程度上保证工程的整体施工质量,严格按照施工流程进行施工作业,确保所选用的管材、管道附件及阀门等质量符合国家现行有关标准要求,不合格者严禁使用。管道运行期间严格执行管道巡检制度,加强巡检,定期对易泄露区域进行安全检查,制定合理的应急预案,至少每半年就要组织一次现场演练,并对其进行演练评估,不断完善。对于油气储运管道的安全防控还要科学合理地利用现代化技术手段,通过无人机巡护、远程监测、光纤安全预警等方式加强油气储运管道的安全运行监护。

4.2 防止形成爆炸系统

防止油气储运管道形成爆炸系统,是安全防控的重要措施。避免爆炸气体聚集最行之有效的方法是加强通风,并设置可燃气体泄漏检测和报警系统:在站阀工艺装置区等可能发生可燃气体泄漏的位置设置可燃气体检测和报警系统,检测天然气泄漏情况并及时报警,本着安全可靠、操作平稳、数据准确、科学管理的原则,实现遥测、遥控、遥信;对输气管道运行的全过程进行实时监测,对关键参数实施自动控制;采用具有高可靠性、高稳定性和可维护性的、先进适宜的自动化软、硬件,保证输气管道安全、高效、平稳运行,以确保人身、设备及生产过程的安全可靠。

4.3 规避出现点火源等不安全隐患

当油气储运管道存在点火源等不安全隐患时,是引发爆炸的最直接因素。严禁与工程无关的人员或车辆、设备机具进入,进入划分为防爆区域的车辆应佩戴防火帽,在工艺区内应使用防爆及防静电器具,禁止任何人携带打火机火种进入工艺装置区。另外应对油气储运管道的运输介质流速实现科学化控制,保证油品在运输工艺流程中的流速处于平稳可控状态下,当流速过快时,摩擦力增大,静电荷聚集,出现

爆炸事故的概率也会加大。在油气储运管道的重点区域内还要增设防爆电气装备,防止电气火花所引发的火灾爆炸等重大危险事故。

4.4 对爆炸蔓延采取一定的限制作用

当油气储运管道因泄露问题出现爆炸,此时安全防控的工作重点应当集中在限制爆炸的进一步蔓延,站内设置进站紧急切断 ESDV 阀及紧急放空 BDV 阀,将影响范围控制在最小,切断危险源,尽量避免可燃气体浓度达到极值,在油气储运管道的重点区域设定泄爆区,遵循分区隔离的基本准则,安全灭火装置配备应充足。

5 结论

综上,首先要保证管道本体的安全,提升管道数字化、智能化水平,杜绝由于油气储运管道存在监管盲区或人工操作不当导致的安全隐患,对管道运行全过程进行动态监视与控制,规范施工,加强过程管理,提前制定安全预案,并持续更新;强化油气管道源头管理,设计、施工、监理、运营全生命周期要严格遵循相关法律法规及标准规范,提高运营管理自动控制水平,设计先进、安全、有效的报警、连锁、泄放等预防性紧急停车系统;选用质量可靠的管材和关键设备,保证管道的安全运行;管道沿线设置标志桩和警示牌,保护管道不受外力破坏;严格施工管理,确保施工质量;压实油气管道建设单位管道安全运营主体责任,提高油气管道安全管理水平和质量;建立健全油气基础设施保护和安全生产运营管理长效机制,加强检测与巡查,推进安全隐患治理工作常态化,构建安全检测预警体系,建立上下联动保护机制,编制和完善应急预案,加强应急演练,健全应急预案和突发事件快速响应机制,降低事故影响。

参考文献:

- [1] 吴秀亮. 油气储运中长输管道的安全性提升思考 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2022, 43(01): 84-86.
- [2] 花小红. 油储运中的安全隐患及防范措施探究 [J]. 产业创新研究, 2022(16): 149-151.
- [3] 肖竹韵, 王绪亭, 刘先锋等. 油气储运管道爆炸荷载及安全防护措施研究 [J]. 水道港口, 2022, 43(03): 414-420.

作者简介:

管西玲(1982-), 女, 汉族, 山东日照人, 本科, 中级职称, 研究方向: 油气储运。