

完井作业有毒有害气体监测现状及防护措施优化

吴若天

中石化经纬有限公司 河南 郑州 450001

摘要: 完井作业是油气勘探开发关键环节,作业时易有硫化氢等有毒有害气体泄漏,威胁人员安全、设备运行及生态环境。本文结合现场实际,分析当前有毒有害气体监测技术应用现状,涵盖常用技术原理、特点及系统性能;探讨工程控制等防护手段应用情况;明确防护体系在系统性、协同性等方面存在的核心问题。针对性提出监测技术、防护措施及管理优化策略,为提升监测与防护水平、降低事故风险、保障作业安全提供理论与实践参考。

关键词: 完井作业;有毒有害气体;气体监测;防护措施

引言:油气勘探开发向深层复杂地层延伸,完井作业工况变差,关键环节有毒有害气体泄漏风险大增。硫化氢等气体毒性强、扩散快、隐蔽性高,泄漏易引发事故,造成人员伤亡、经济损失及生态破坏。国家法规和行业标准对完井作业安全要求提高,监测与防护是安全管控核心,但实际作业中存在监测技术适配不足等问题,安全隐患未除。系统分析现状、排查问题、优化策略,对强化安全管控、推动行业安全高质量发展意义重大,本文将展开深入研究。

1 完井作业有毒有害气体监测技术现状分析

1.1 常用监测技术原理与特点

当前完井作业有毒有害气体常用监测技术分便携式与在线连续监测两类,基于不同原理,适配不同场景,各有特点。便携式监测技术以电化学传感器、催化燃烧传感器为核心,通过传感器与目标气体发生化学反应,将气体浓度转化为电信号并显示结果,常用设备有便携式气体检测仪等。它体积小、重量轻、携带方便、操作简单,能移动监测,适用于现场巡检、临时作业点及应急监测,可快速捕捉局部气体浓度变化、发现泄漏点。不过,它续航时间有限、监测范围窄,还需定期校准,难以全区域、全天候连续监测;在线连续监测技术主要采用红外吸收法、激光光谱法,利用目标气体对特定波长光线的吸收特性计算浓度,核心设备有固定点监测仪等。它可24小时连续监测,范围广、精度高,能实时传输数据,便于管理人员掌握动态、及时预警。但设备投资大、安装调试复杂,对供电和环境适应性要求高,复杂工况易故障,维护难度大。目前现场多协同应用两种技术,兼顾灵活性与全面性,提升监测效果^[1]。

1.2 监测系统性能评估

完井作业有毒有害气体监测系统性能从监测精度、响应时间、稳定性、环境适应性四个核心维度评估,复杂

工况下性能有提升空间。监测精度上,在线连续监测系统精度高,对硫化氢等气体,监测误差可控制在 $\pm 5\%$ 以内,能精准反映浓度变化;便携式设备精度受环境影响大,误差普遍 $\pm 10\%$ 左右,高湿度、高粉尘现场偏差更明显。响应时间方面,在线系统响应快,1-3秒可捕捉变化并预警;便携式设备稍长,3-5秒,基本满足应急需求,但对硫化氢等气体响应速度有待提升。稳定性上,在线系统因固定安装、供电稳定,连续运行较好,故障率5%-8%,主要是传感器老化等;便携式设备因频繁移动、电池供电,稳定性差,故障率12%-15%,常见电池续航不足等。环境适应性上,多数系统能适应一定温湿度范围,但在高粉尘、高振动、强腐蚀的完井作业环境,设备性能易受影响,难以长期稳定运行。

2 完井作业有毒有害气体防护措施现状分析

2.1 工程控制与工艺防护

工程控制与工艺防护是完井作业有毒有害气体防护的核心,通过优化工艺、设置设施,从源头减少气体泄漏,降低人员接触风险,已广泛应用并取得成效。工程控制上,通风换气采用机械与自然通风结合,在作业井场、密闭空间设通风机排出泄漏气体,机械通风效率高、可控性强,是主流方式,但部分区域通风布局不合理,有通风死角。气体隔离借助密封装置、隔离挡板等,将易泄漏设备、区域与操作区隔离,如用密封垫、胶加强井口等部位密封,但密封装置易老化损坏,需定期维护。优化完井作业工艺可源头控漏,如用无固相完井液、优化固井工艺,减少钻井液分解产生气体;射孔作业采用负压射孔技术,降低地层气体喷溢风险。部分现场设气体回收装置,对泄漏的可燃有毒气体回收处理,减少污染与安全风险,不过该装置投资高,仅大型作业现场应用多,中小型应用少。

2.2 管理措施与应急预案

管理措施与应急预案是完井作业有毒有害气体防护的重要保障,能确保监测与防护措施落实,提升应急处置能力。管理措施上,多数油气企业建立安全管理制度,明确监测与防护的岗位职责、操作规范,要求作业前后做好安全交底与总结,作业中加强巡检。还开展人员安全培训,普及气体危害特性、设备操作及防护装备使用知识,但培训实操不足,部分人员操作能力弱。同时,建立设备采购、维护、更换制度,定期校准检修,但部分现场设备维护不及时、更换不规范。多数作业现场制定泄漏应急预案,明确应急组织、处置流程、责任分工,配备应急救援装备,定期开展演练^[2]。但部分应急预案针对性、可操作性差,多为通用模板改编,未结合具体工况、气体类型制定个性化方案,应急演练也流于形式,未模拟真实场景,难以提升人员应急处置能力。

3 当前防护体系存在的主要问题

3.1 防护措施系统性、协同性不足

完井作业有毒有害气体防护体系最突出问题是措施缺乏系统性与协同性,未形成“监测-预警-防护-应急”闭环,防护效果差。监测与防护协同上,二者脱节,监测数据未有效指导防护措施调整,如气体超标时通风系统未及时强化、人员未及时佩戴装备。各防护措施间协同也有问题,工程、工艺、管理及个体防护缺乏统筹,存在重复与缺失并存现象,部分区域过度依赖个体防护,忽视源头管控;有的虽有工程防护设施,但管理不善致无法发挥作用。此外,不同作业环节防护措施衔接差,固井、射孔等环节风险不同,防护措施却未针对性调整,适配性不足,难以全面覆盖隐患。

3.2 PPE舒适性与依从性问题

个体防护装备(PPE)是最后防线,但舒适性与依从性不足影响防护效果。舒适性方面,设计不合理、适配性差,如空气呼吸器重,增加体力负担;防护面罩密封性强致视野受限、呼吸不畅;防护服厚重、透气差,高温高湿下佩戴闷热。依从性方面,因舒适性差,部分人员有侥幸心理,不按规定佩戴使用,如作业前不检查、作业中擅自摘下或未按期更换配件。而且部分装备未个性化适配,尺寸不符、操作不便,进一步降低佩戴依从性,增加人员中毒、窒息风险。

3.3 应急预案可操作性与实战性有待提高

多数完井作业现场有毒有害气体泄漏应急预案可操作性与实战性不足,难应对突发事故。一是针对性不强,多为通用模板改编,未结合现场实际情况,对不同浓度、类型气体泄漏的处置规定不具体,延误处置时机。二是可操作性差,存在大量原则性表述,缺乏具体操作步骤、技

术参数等,如未明确堵漏设备操作方法、救援人员行动路线,影响处置效果。三是应急演练实战性不足,多为提前、流程化演练,未模拟真实场景,未暴露预案问题,也未提升人员应急处置与协同配合能力,事故发生后预案难有效执行,无法快速控制事态。

3.4 新技术、新装备应用滞后

完井作业有毒有害气体监测与防护领域,新技术、新装备应用滞后,依赖传统手段,难适应复杂工况。监测技术上,新型智能化技术应用范围有限,如激光雷达、物联网智能监测系统因成本和技术门槛高,仅少数大型油气田使用,多数中小型现场仍用传统设备,监测效率精度难提升。防护装备方面,新型高效、舒适、轻便装备应用不足,如新型空气呼吸器、透气防护服等因采购成本高、推广不够,现场仍以传统装备为主。应急处置技术上,新型堵漏、气体回收等技术及智能救援设备应用滞后,处置效率低。同时,作业人员对新技术装备了解少、操作能力有限,也限制了其推广应用^[3]。

4 完井作业有毒有害气体监测与防护措施优化策略

4.1 监测技术优化方案

针对当前完井作业有毒有害气体监测技术存在的精度不足、稳定性差、新技术应用滞后等问题,从技术选型、系统升级、设备维护三个方面提出优化方案。一是优化监测技术选型,结合不同作业环节的泄漏风险、工况条件,实现便携式与在线连续监测技术的精准适配。对于井口、管线接头等易泄漏关键点位,采用激光光谱法在线监测设备,提升监测精度与响应速度;对于巡检、临时作业点,选用轻量化、长续航的便携式监测设备,配备电化学与催化燃烧双传感器,降低环境因素对监测精度的影响。同时,引入激光雷达监测技术,实现大范围、无死角监测,精准定位泄漏点。二是升级监测系统,构建物联网智能监测平台,将所有监测设备接入平台,实现监测数据的实时采集、传输、分析与预警,当气体浓度超标时,自动发出声光预警,并同步推送至作业人员手机终端与控制中心,实现早期预警、快速响应。同时,优化监测布点,基于气体扩散规律,结合作业区域布局,合理设置监测点位,消除监测死角,提升监测覆盖面。三是完善设备维护体系,建立监测设备全生命周期管理机制,明确校准、检修、更换的周期与标准,安排专业人员定期对设备进行维护,及时更换老化、损坏的传感器与零部件;加强监测人员专业培训,提升设备操作、校准、维护能力,确保监测设备长期稳定运行,提升监测数据的可靠性。

4.2 防护措施优化方案

针对当前防护措施存在的协同性不足、PPE适配性差、应急预案不完善等问题,从工程防护、个体防护、应急防护三个方面进行优化。(1)优化工程控制与工艺防护,强化源头管控,优化完井作业工艺,采用无固相、低污染完井液,减少钻井液分解产生有毒有害气体;在射孔、试油作业中,采用负压射孔、控压完井等技术,降低地层气体喷溢风险。同时,优化通风系统布局,根据作业区域大小、气体扩散规律,合理设置通风机位置与数量,采用智能通风系统,根据监测数据自动调整通风强度,消除通风死角;加强密封装置、隔离屏障的维护与更换,提升气体隔离效果。(2)优化个体防护装备,提升舒适性与适配性,采购轻量化、透气性好、视野开阔的防护装备,如新型轻量化空气呼吸器、透气型防护服,优化防护面罩设计,防止起雾、结霜,提升佩戴舒适性;根据作业人员体型、作业工况,提供个性化防护装备,确保尺寸适配、操作便捷。同时,加强个体防护装备使用培训,强化作业人员防护意识,规范佩戴、使用流程,建立监督考核机制,确保防护装备落实到位^[4]。(3)优化应急防护,完善应急预案,结合具体作业工况、气体类型,制定个性化应急预案,明确不同泄漏场景的处置流程、操作步骤、技术参数,提升预案可操作性;开展实战化应急演练,模拟真实气体泄漏、人员中毒等场景,提升作业人员应急处置能力与协同配合能力;升级应急救援装备,配备新型堵漏设备、智能急救设备等,提升应急处置效率。

4.3 管理体系建设优化

管理体系是监测与防护措施落地执行的重要保障,针对当前管理体系不完善、责任落实不到位、新技术推广不足等问题,从制度建设、人员管理、技术推广三个方面进行优化。完善管理制度,构建“监测-预警-防护-应急”一体化管理体系,明确各环节的岗位职责、操作规范与考核标准,将监测与防护工作纳入作业人员绩效考核,强化责任落实;建立监测与防护协同机制,实现监测数据与防

护措施、应急处置的联动,当气体浓度超标时,自动启动对应的防护与应急措施,形成闭环管理;加强人员管理,优化培训体系,采用“理论+实操”的培训模式,增加实操培训比重,重点培训监测设备操作、防护装备使用、应急处置等技能,提升作业人员专业能力;定期开展安全警示教育,通过典型事故案例分析,强化作业人员安全防护意识,杜绝侥幸心理;建立人才培养机制,培养复合型安全管理人才,负责监测与防护工作的统筹规划、技术指导与监督检查;加快新技术、新装备推广应用,加大资金投入,逐步引进新型智能化监测设备、高效舒适的防护装备与应急处置技术;开展新技术、新装备专项培训,提升作业人员操作能力;建立新技术应用示范基地,总结应用经验,逐步在所有完井作业现场推广,提升监测与防护的智能化、高效化水平。

结束语:

完井作业有毒有害气体监测与防护,关乎作业人员安全及油气行业高质量发展。本文系统分析监测技术与防护措施现状,明确防护体系在协同性、PPE适配性等方面的问题。针对性提出优化策略,如优化监测技术选型、完善防护措施、健全管理体系等,以提升监测精度与防护效果,确保措施落地。研究成果可为现场工作提供参考,后续可结合不同工况细化策略,持续提升安全管控水平,有效防范有毒有害气体泄漏风险,推动完井作业安全高效开展。

参考文献:

- [1]姚鹏.智能完井技术在深水完井作业中应用[J].石油化工建设,2022,44(2):148-150.
- [2]周朗,龚浩,张林,等.双封隔器段完井管柱在多工况下的安全研究[J].石油机械,2025,53(3):18-24.
- [3]蔡小东,田维.完井-临时封堵管柱一体化工艺的应用[J].江汉石油职工大学学报,2024,37(5):47-49.
- [4]王正,蒋启亮,谢彬,等.分支井完井技术在中国海上油田的应用研究[J].石化技术,2025,32(1):257-259.