天然气钻井作业环境的安全与环保应急管理

姜文涛
中石化胜利石油工程有限公司　山东　东营　257100

摘　要：天然气钻井作业环境复杂，安全风险与环境污染问题交织并存，应急管理面临严峻挑战。本文从天然气钻井工艺流程出发，梳理钻井作业安全风险与环保应急管理基础理论，分析钻井作业主要环境污染类型及风险成因，指出绿色钻井现存短板。在此基础上，剖析当前安全管理制度、环保管理体系与应急管理体系的运行现状及突出问题，提出构建全过程安全风险防控体系、优化环境保护管控体系、完善全方位应急管理体系及推进智慧化建设等优化策略，为天然气钻井作业安全环保应急管理能力提升提供参考。

关键词：天然气钻井；作业环境；安全生产；环境保护；应急管理

引言：天然气钻井作业处于高风险、高污染的生产环节，作业环境涉及地下高压气层、有毒有害气体、易燃易爆物质及大量化学药剂，一旦失控极易引发井喷、火灾、中毒及环境污染等复合型事故。随着我国天然气勘探开发向深层、超深层及复杂地质区域推进，钻井作业面临的安全环保压力持续加大。应急管理作为防范事故扩大、减轻灾害后果的最后防线，其体系建设水平直接关系到人员安全、生态安全和能源供应稳定。本文旨在系统分析钻井作业环境风险特征与应急管理现状，探索安全环保一体化应急管理的优化路径。

1 天然气钻井作业环境及风险基础理论

1.1 天然气钻井工艺流程概述

天然气钻井是通过钻头破碎岩石、形成井眼并下入套管固井的系统工程，其工艺流程具有环节多、连续性强、技术密集等特点。主要流程包括：钻前准备，涉及井位勘察、道路修建和井场布置；钻进作业，通过钻头破碎岩层并循环钻井液携带岩屑；固井作业，下入套管并注入水泥浆封固井壁；完井作业，连通井筒与气层；测试放喷，评价气井产能。钻进过程中，钻井液循环携带岩屑并平衡地层压力，是保障安全的核心手段。不同地质条件下，钻井工艺参数差异显著，深层气井还需应对高温高压、酸性气体等特殊工况。整个工艺流程任一节点失控均可能引发连锁反应，因此对工艺操作的连续性和协同性要求极高。

1.2 钻井作业安全风险基础理论

钻井安全风险源于井筒压力失衡、设备失效、人为失误及地质不确定性等多重因素，具有复杂性、突发性和连锁性特征。风险理论强调“人—机—环—管”四要素耦合作用，事故往往由多重因素叠加触发，单一因素通常不足以直接导致灾难性后果。井喷是最高等级安全风险，其演化遵循“井涌—井喷—失控”的渐进规律，若在井涌阶段未能及时控制，将迅速升级为井喷甚至失控，造成灾难性后果。硫化氢中毒、火灾爆炸、井壁失稳等风险同样具有突发性和严重危害性。风险辨识、评估与控制构成安全管理的理论主线，为构建分级管控和隐患排查双重预防机制提供理论依据[1]。

1.3 钻井作业环保与应急管理相关理论

环保管理以污染预防、源头控制和全过程管理为核心原则，强调钻井废弃物减量化、资源化和无害化。应急管理理论涵盖预防、准备、响应、恢复四个阶段，强调“预防为主、防救结合”。安全与环保应急管理具有内在统一性，事故往往同时产生安全与环境的双重后果，因此一体化管理理论日益受到重视，为构建协同应急体系提供理论支撑。

2 天然气钻井作业环境污染问题与环境风险分析

2.1 钻井作业主要环境污染类型

钻井作业环境污染类型多样，贯穿钻井全过程。钻井液及岩屑污染最为突出，其中含有重金属、石油类物质及多种化学添加剂，若随意排放或泄漏，可能对土壤和地下水造成持久性污染。废水污染涵盖钻井废水、洗井废水和生活污水，具有 COD 高、悬浮物浓度大、成分复杂等特点，处理难度较大。废气污染主要来自柴油机排放和测试放喷燃烧，产生氮氧化物、颗粒物和二氧化碳等，对区域大气环境造成影响。噪声污染方面，钻机、柴油机等设备运行噪声可达 100 分贝以上，对作业人员和周边居民形成声环境干扰。此外，井场建设占用

土地、破坏地表植被，可能造成水土流失和野生动物栖息地破碎化，生态扰动问题不容忽视。

2.2 钻井作业环境风险成因分析

钻井作业环境风险成因复杂，具有多因素耦合特征。地质条件不确定性是首要成因，钻遇异常高压层、裂缝发育带或浅层气时，易发生井漏、井喷等事故性排放，导致污染物短时间内大量外泄。钻井液体系选择不当或循环系统故障，可能造成钻井液渗漏或溢流，污染周边土壤和水体。废弃物处理设施不完善或运行不规范，使污染物未能得到有效处置。偏远井场分布分散，环境监管难度大，违法行为不易及时发现。部分作业人员环保意识不足，操作随意性大。极端天气等外部因素也可能引发突发性环境事件。此外，深层钻井采用的高温高压工况加速设备老化失效，增加了污染物失控概率，环境风险随之显著上升。

2.3 绿色钻井现存短板

当前绿色钻井实践仍存在明显短板，制约着钻井作业环境绩效的提升。清洁生产技术推广不均衡，大型企业应用较好，部分中小企业仍在使用高污染钻井液体系，源头减排效果有限。废弃物资源化利用率偏低，岩屑回用和废水回注比例不高，大量废弃物仍依赖终端处置。环保投入与生产效益的矛盾突出，中小企业受资金制约，环保设施配备不足或运行不正常[2]。绿色钻井标准体系尚不健全，缺乏统一的评价指标和考核机制，企业绿色转型缺乏明确指引。环境监测覆盖不全，部分井场监测点位少、频次低，难以实现实时精准管控，环境风险发现和处置存在滞后性。

3 天然气钻井安全与环保应急管理现状及存在问题

3.1 现有安全管理制度与落实情况

钻井企业普遍建立了安全生产责任制、井控管理制度、作业许可制度及安全培训体系，明确了各岗位安全职责和操作规范。HSE 管理体系在大型企业中得到较好落实，形成了较为完善的文件体系和考核机制。但部分基层井队存在制度执行流于形式、安全检查走过场等问题，安全责任层层传导中易出现衰减，现场违章操作仍时有发生。安全投入在不同企业间差异较大，中小型钻井队伍在设备更新、人员培训和防护装备配备等方面保障能力相对薄弱，制度要求与实际执行之间存在明显落差，安全管理的精细化水平仍有较大提升空间。

3.2 现有环保管理体系运行情况

环保管理体系以环评审批、排污许可和全过程环境管理为核心，多数企业编制了环保应急预案，配备了废弃物处理设施，建立了环境监测和台账记录制度。但实际运行中，环保管理常让位于生产进度，尤其在钻井任务紧张时期，环保措施执行力度明显下降。环境监测数据未能充分发挥预警作用，部分井场监测频次不足、指标覆盖不全。废弃物处置委托第三方时监管链条长、风险点多，转移过程中存在台账不完善、去向不明等问题，环保管理的系统性和有效性有待增强。

3.3 应急管理体系现状

钻井现场普遍制定了井喷、硫化氢泄漏等专项应急预案，配备了防喷器、气体监测报警和正压式呼吸器等应急装备，部分企业建立了专职应急救援队伍，定期组织应急知识培训和装备操作训练。但预案演练频次不足、场景单一，多以桌面推演为主，缺乏实战化检验。应急指挥体系在实战中协调不畅，指令传递和资源调配效率不高。安全应急与环保应急分属不同部门，信息共享和联合响应机制尚未有效建立，难以应对同时具有安全与环保双重属性的复合型事故[3]。

3.4 当前安全环保应急管理存在的突出问题

突出问题表现为：预案针对性不强，未能充分结合井位特征和周边敏感目标，模板化现象普遍；安全与环保应急协同缺失，部门分割导致难以应对复合型事故；应急资源保障薄弱，偏远井场物资储备和救援力量不足，响应时间较长；智慧化水平偏低，风险预警和辅助决策能力有限，先进技术装备应用不广；法规标准体系尚不完善，安全与环保监管分属不同部门，监管合力不足，责任追究机制有待健全。

4 天然气钻井安全与环保应急管理优化策略

4.1 构建全过程安全风险防控体系

应建立覆盖钻前、钻进、完井全周期的风险防控机制，将安全管理关口前移、重心下沉。钻前阶段，需开展精细地质风险评估，充分利用地震资料、邻井数据和地质建模成果，精准识别高压气层、有毒气体分布及复杂地层构造，为井身结构设计和钻井液体系选择提供依据。钻进阶段，应强化井控管理，严格落实坐岗观察和压力监测制度，确保井筒压力平衡始终处于受控状态；同时加强设备巡检维护，防范因设备失效引发的安全风险。完井阶段，须严格执行测试放喷程序，合理选择放喷时机和方式，做好点火控制和气体扩散监测。在此基础上，推行“一井一策”风险管控方案，针对不同井位的地质特征和作业条件制定差异化措施。建立风险分级管控和隐患排查治理双重预防机制，明确各级风险管控责任人和管控措施，实行隐患登记、整改、销号闭环管

理。通过信息化手段实现风险动态跟踪和预警，确保安全风险始终处于可识、可控、可防状态，真正实现全过程、全方位、全覆盖的安全风险闭环管理。

4.2 优化钻井作业环境保护管控体系

应坚持绿色低碳发展理念，从源头减排、过程控制和末端治理三个环节系统优化环境保护管控体系。源头减排方面，应推行清洁生产，优先选用环保型钻井液体系，推广水基钻井液和可降解添加剂，减少有毒有害物质使用；优化井身结构设计，降低钻井液消耗量。过程控制方面，需完善废弃物分类收集、贮存和处置设施，对钻井液、岩屑、废水等分类管理，提高资源化利用率，推广岩屑回用、废水回注等成熟技术。建立井场环境实时监测系统，对废水排放、废气浓度、噪声强度实施动态管控，确保各项指标符合环保标准。末端治理方面，应强化第三方处置单位监管，严格资质审查和过程跟踪，健全环保台账和转移联单制度，确保废弃物去向可追溯[4]。同时，将环保绩效纳入企业考核体系，建立环保信用评价和奖惩机制，形成激励约束并重的管控格局，推动钻井作业环境保护从被动应对向主动防控转变。

4.3 完善全方位应急管理体系建设

应围绕“预防为主、防救结合”的原则，构建覆盖事前、事中、事后的全方位应急管理体系。预案编制方面，应根据井位地质条件、周边环境敏感目标和气象水文特征，编制差异化应急预案，建立“一井一案”应急响应方案，明确不同事故情景下的响应流程、处置措施和责任分工。指挥体系方面，应构建安全环保一体化应急指挥体系，打破部门壁垒，实现信息共享、资源统筹和联合响应，确保复合型事故得到协同高效处置。资源保障方面，应按照分级储备、区域联动原则，合理布局应急物资储备点和专业救援力量，确保关键装备配备充足、状态完好，建立应急物资信息化管理系统，实现快速调配。能力建设方面，应推行“双盲”实战演练，不预先通知时间、地点和场景，真实检验应急响应能力，及时发现预案和处置中的薄弱环节。制度保障方面，应健全应急管理法规标准，明确企业主体责任和监管要求，强化监管合力与责任追究，形成闭环管理的应急管理长效机制。

4.4 智慧化安全环保应急管理建设

应充分利用物联网、大数据、人工智能等新一代信息技术，推动钻井安全环保应急管理向数字化、智能化转型。感知层建设方面，应在井场部署多类型传感器，实时采集井筒压力、气体浓度、设备状态、气象条件等数据，构建全覆盖的智能感知网络。平台层建设方面，应构建钻井智能应急管理平台，实现风险实时监测、智能预警和趋势预测，利用机器学习算法对历史事故数据和实时监测信息进行深度分析，提升风险识别的精准度和预警的提前量。应用层建设方面，应建立应急资源可视化调度系统，将应急物资、救援队伍、避险场所等信息集成于一张图，提升响应效率和指挥决策水平；开发事故情景模拟和辅助决策模块，对井喷、硫化氢泄漏等典型事故进行推演，支撑科学指挥。装备应用方面，应推广无人机巡查、机器人抢险、远程操控等先进装备，减少人员直接暴露于危险环境。通过智慧化建设，全面提升钻井应急管理的感知能力、决策能力和处置能力。

结束语

天然气钻井作业安全与环保应急管理是一项复杂的系统工程。本文从风险理论出发，分析了钻井作业环境污染类型与风险成因，揭示了绿色钻井的现存短板，剖析了安全、环保及应急管理的现状与突出问题，并提出了全过程风险防控、环保管控优化、全方位应急体系完善及智慧化建设等策略。研究表明，推动安全与环保应急管理一体化、智慧化转型，是提升钻井作业应急能力的必然选择。未来应进一步健全法规标准，强化技术支撑，促进钻井行业安全绿色高质量发展。

参考文献

[1] 窦文鹏. 石油与天然气钻井井控技术措施 [J]. 石化技术,2025,32(8):318-320.

[2] 吴建, 田志召, 魏晓强. 石油天然气钻井工程风险量化技术 [J]. 化工管理，2024(15)：81-83.

[3] 冉文付, 李丁川, 丁华, 等. 高含硫天然气藏同步钻采交叉作业风险识别与评估 [J]. 石油工业技 [3] 术监督,2024,40(4):40-45.

[4] 赵咏刚. 深海钻井作业中的风险识别与事故预防技术研究 [J]. 中国资源综合利用,2025,43(4):57-59.