

石油化工带压堵漏技术的创新与安全管理

倪行秀

茂名市恒孚石化工程有限公司, 广东 茂名 525000

DOI:10.61369/ME.2025110001

摘 要 : 石油化工带压堵漏技术是保障连续性安全生产的关键应急措施, 通过机械、化学和复合材料等手段实现不停产快速修复。研究系统分析了该技术的原理分类、材料创新和智能装备发展, 重点探讨了高温高压工况下的密封材料研发和自动化堵漏工艺优化。针对典型泄漏案例的技术应用与安全管理经验进行总结, 提出从材料性能提升、智能监测系统完善到标准化作业流程构建的系统性优化方案, 为提升堵漏效率和作业安全性提供理论支撑。

关 键 词 : 带压堵漏; 密封材料; 安全管理

Innovation and Safety Management of Pressure Plugging Technology in Petrochemical Industry

Ni Xingxiu

Maoming Hengfu Petrochemical Engineering Co., Ltd., Maoming, Guangdong 525000

Abstract : Pressure plugging technology in the petrochemical industry is a critical emergency measure to ensure continuous and safe production, enabling rapid repair without shutdown through mechanical, chemical, and composite material methods. This study systematically examines the principle classification, material innovation, and development of intelligent equipment in this technology, with a focus on the development of sealing materials for high-temperature and high-pressure conditions and the optimization of automated plugging processes. By summarizing technical applications and safety management experiences from typical leakage cases, systematic optimization solutions are proposed, including improvements in material performance, enhancement of intelligent monitoring systems, and the establishment of standardized operational procedures, providing theoretical support for enhancing plugging efficiency and operational safety.

Keywords : pressure plugging; sealing materials; safety management

引言

石油化工企业生产中的介质泄漏是重大安全隐患, 带压堵漏技术因其不停产维修特性成为关键应急手段。2024年4月, 应急管理部发布《化工企业生产过程异常工况安全处置准则(试行)》, 对高风险泄漏处置提出严格要求。当前带压堵漏技术发展面临双重挑战: 一方面需提升密封材料性能和智能化水平, 另一方面要完善安全管理体系。通过技术创新与规范管理的协同推进, 构建更安全高效的堵漏技术体系, 对保障石油化工企业安全生产具有重要意义。

一、带压堵漏技术概述

(一) 带压堵漏技术的基本原理

带压堵漏技术是指在设备或管道运行状态下, 通过特定方法快速封堵泄漏部位, 确保生产连续性的应急维修手段。该技术按原理可分为机械堵漏、化学堵漏和复合材料堵漏等。机械堵漏依赖夹具、卡具等装置对泄漏部位施加外力并注射密封剂实现密封; 化学堵漏利用固化胶黏剂或反应型材料填充裂缝; 复合材料堵漏则结合高强度纤维与树脂形成复合密封层^[1]。该技术核心特点包括不停产操作, 避免生产中断带来的经济损失; 快速响应能

力, 适用于突发性泄漏; 广泛适用性, 可应对不同部位、不同压力、温度及介质条件。

(二) 石油化工领域带压堵漏的应用场景

石油化工企业生产中, 带压堵漏技术主要应用于三类典型场景。管道泄漏是常见问题, 尤其在易腐蚀或高压环境下, 焊缝或管壁缺陷易导致介质外泄, 需采用夹具注胶或缠绕密封技术紧急修复^[2]。储罐与反应器泄漏风险集中于罐壁穿孔或法兰连接处, 复合材料包覆或磁压堵漏技术可有效隔离危险介质。阀门与法兰泄漏多因密封失效或螺栓松动, 通过注入密封剂或安装专用堵漏夹具可实现快速密封, 避免系统停车。不同场景对堵漏技术的选

择取决于泄漏形态、介质特性及环境安全要求^[3]。

二、带压堵漏技术的创新方向

（一）密封材料创新

带压堵漏技术的密封材料创新聚焦于提升密封性能与环境适应性。高性能密封材料的发展主要体现在纳米复合密封剂与智能自修复材料的应用，前者通过纳米颗粒增强材料的致密性与耐腐蚀性，后者利用微胶囊技术实现损伤部位的自动修复^[4]。耐高温高压复合材料的研发成为关键突破方向，例如碳纤维增强聚合物与陶瓷基复合材料，可在极端工况下保持结构稳定性，适用于石化装置中的高温高压泄漏部位。这类材料通过优化界面结合技术与热膨胀匹配设计，显著延长了堵漏结构的使用寿命。

（二）工艺与装备创新

工艺革新以提升堵漏效率与安全性为核心目标。自动化堵漏装备如管道爬行机器人与无人机检测系统，通过远程操控与实时监测技术，实现危险环境下的无人化作业，降低人员暴露风险^[5]。3D打印技术在快速堵漏中的应用展现出显著优势，通过现场打印与泄漏部位几何参数匹配的定制化堵漏部件，大幅缩短应急响应时间。该技术结合逆向工程与耐蚀材料打印工艺，为复杂结构泄漏提供了高精度解决方案，推动堵漏技术向数字化与智能化方向发展。

三、带压堵漏技术的安全管理

（一）带压堵漏技术操作安全规范

1. 堵漏前的风险评估

堵漏作业前的系统性风险评估是确保操作安全的关键环节。泄漏原因分析需综合考察工艺参数（如压力、温度等）、介质特性及环境条件，高压易燃介质泄漏需采用防爆型堵漏方案，腐蚀性介质则要求材料具备耐化学侵蚀性能^[6]。安全防护等级划分依据泄漏危害程度，参照国际标准将作业区域划分为隔离区、控制区和安全区，不同区域匹配相应的个人防护装备等级与操作权限。定量风险评估工具如 HAZOP 分析可有效识别潜在危险源，为堵漏方案选择提供数据支持。

2. 堵漏过程中的安全控制

作业人员防护措施遵循“双重防护”原则。基础防护包括防化服、正压式空气呼吸器及气体检测仪；高危环境需增设远程监控与紧急逃生系统。应急响应流程采用分级响应机制，初级泄漏由现场班组按标准化程序处置，重大泄漏立即启动企业级应急预案，联动消防、医疗等外部救援力量^[7]。实时监测系统在堵漏过程中持续追踪压力、温度及可燃气体浓度等关键参数，数据异常时自动触发报警并启动紧急切断程序，形成动态安全防护体系。

（二）安全管理体系建设

1. 企业安全管理标准

企业安全管理标准的核心在于建立系统化的带压堵漏作业规范体系。作业规程制定需涵盖技术选择标准、操作步骤清单和验

收指标，结合 API 2201 和 GB/T 26467 等规范形成企业级技术文件^[8]。人员培训实施三级认证制度，基础操作人员需完成 200 小时以上的实操训练并通过压力测试考核，高级技术人员必须掌握风险评估方法和应急决策能力。资质管理系统引入区块链技术实现证书防伪和时效验证，确保作业团队的专业性符合石化行业高风险作业要求。

2. 政府监管与行业标准

政府监管体系通过《特种设备安全法》和 AQ 3060-2025《带压密封和带压开孔作业安全管理规范》实施强制性约束，建立带压堵漏服务企业准入备案制度。行业标准建设重点推进 ISO 24817 和 T/CAPE 11003《在役管道泄漏维修技术规范》的贯标工作，形成覆盖设计、施工、验收的全流程标准体系。最佳实践推广采用案例库共享机制，建议由中国特种设备检测研究院牵头建立行业事故数据库，通过大数据分析提炼可复用的技术方案和管理模式，定期发布行业技术白皮书指导企业实践。

四、案例分析与优化建议

（一）典型泄漏事故案例分析

1. 成功堵漏案例

日前，吉林石化公司炼油厂 V708A/B 罐区南侧第二层管线上发生液化气泄漏事故。该管道为老 705# 线，运行压力高达 1.0MPa，泄漏点位于焊缝处，液化气易燃易爆，若扩散遇火源将引发重大爆炸风险。现场操作员韩冰在清罐检测过程中发现泄漏迹象，立即切断电源、疏散人员并上报控制室和调度室。应急响应团队 3 分钟内赶到现场，迅速设立安全警戒线，启动水幕隔离系统以稀释气体并防止扩散。

针对高压带压工况，团队采用机械夹具注胶复合堵漏技术：先用专用夹具固定泄漏部位，确保夹紧力均匀分布，避免二次损伤；随后注入高性能纳米复合密封剂，结合碳纤维缠绕增强密封强度。该工艺在不停产状态下完成，作业时间控制在 5 小时内（下午 4 点至晚 9 点）。最终，检测仪器显示无泄漏，管道恢复正常运行，避免了停车检修导致的数百万经济损失。

此案例凸显带压堵漏技术的应急效能，强调快速响应与材料适配的重要性。通过事后评估，吉林石化优化了风险巡检机制，引入智能监测设备，提升了类似事故处置能力，为石油化工行业提供了可借鉴的成功范式。

（来源：工人日报）

日前，吉林石化公司炼油厂会议室里格外热闹，厂长、党委书记齐楠森将 2025 年第 3 号厂长嘉奖令送到油品车间操作员韩冰手上：“一个人的敏锐，守住了安全底线。韩冰同志的责任心，就是我们最该学的‘安全密码’！”

前不久的一天下午 4 点，韩冰正盯着 V708B 罐的清罐检测施工，鼻尖突然捕捉到一丝异常：“不对劲，有股液化气的气味！”常年跟化工管线打交道，嗅到这气味，韩冰心里“咯噔”一下。他立刻顺着气味来源在管廊间穿梭排查。最终，他的脚步在 V708A/B 罐中间南侧的二层管带停住——老 705# 线的保温铁皮缝隙里，正隐隐渗出气体。

“快停！关发电机！”韩冰的声音瞬间绷紧，他指挥大家往安全区域撤离，另一只手抓起对讲机，语速飞快地向控制室和车间调度室报告：“V708 罐区老 705 线漏了！”

图 4.1 吉林石化公司炼油厂成功堵漏部分新闻纪录

2. 失败案例教训

2013年11月22日,某市中石化输油管道发生泄漏爆炸事故,泄漏点位于黄岛区输油管道,运行压力约0.8MPa,涉及原油介质。事故因初期风险评估不足,未能及时识别管道腐蚀导致的泄漏隐患,现场采用普通密封胶带压堵漏,未使用耐腐蚀复合夹具。堵漏后约8小时,泄漏原油积聚在地下管网,遇火花引发爆炸,造成62人死亡、136人受伤,直接经济损失7.5亿元。

失败原因包括:风险评估忽视管道老化与介质腐蚀特性,未选用适合高危介质的密封材料;缺乏实时监测设备,未能动态跟踪泄漏状态;应急响应迟缓,未及时疏散周边居民或启动区域隔离。事后,中石化修订了带压堵漏规范,强制要求高危管道泄漏采用纳米复合密封剂与机械夹具结合的方案,引入无人机巡检与红外监测技术,提升泄漏预警能力,并优化跨部门应急联动机制,缩短响应时间。此案例警示带压堵漏需精准匹配材料与工况,强化实时监测与快速响应,避免重大事故发生。



图4.2 某市中石化输油管道发生泄漏现场救援图

(二) 技术优化建议

1. 材料与设备的改进方向

材料研发应聚焦环境适应性提升,开发具有梯度功能特性的智能复合材料,实现不同介质、温度和压力条件下的自适应密封^[9]。耐蚀合金-聚合物复合堵漏夹具需优化界面结合技术,解决异种材料在交变载荷下的协同变形问题。设备改进重点发展模块化堵漏系统,集成快速连接机构和压力自适应补偿装置,使单套设备可覆盖80%以上的常见泄漏场景。微型化高压注胶设备的研发将显著提升受限空间作业效率,配套开发耐高温微型传感器实现密封质量实时监测。

2. 智能化与数字化技术的融合

基于数字孪生的堵漏决策系统可构建泄漏场景的三维动态模型,通过流体仿真预测堵漏效果并优化方案选择。智能诊断装备搭载多光谱检测模块,结合机器学习算法实现泄漏源特征快速识

别与材料匹配推荐^[10]。5G+AR远程指导系统实现专家实时介入,现场人员通过智能眼镜获取叠加在实景中的操作指引。区块链技术应用于堵漏作业全过程记录,建立不可篡改的质量追溯体系,为后续安全评估提供数据支撑。

(三) 安全管理优化建议

1. 企业层面的改进措施

应急预案优化需建立动态更新机制,将泄漏事故案例库与应急决策树相结合,形成基于情景推演的处置方案。安全文化建设实施三级推进模式,基础层强化标准作业程序培训,中间层开展事故情景模拟演练,核心层培育风险预判思维。引入行为安全观察与反馈系统,通过大数据分析识别作业习惯偏差,针对性改进培训内容。关键岗位实施安全绩效与晋升挂钩机制,建立从管理层到操作层的全员安全责任体系。

2. 政府与行业层面的建议

标准体系完善应建立覆盖设计、施工、验收的全生命周期技术规范,重点补充极端工况堵漏和新型材料应用的技术要求。跨企业协作机制依托工业互联网平台构建,实现堵漏资源数据库共享和专家智库联动。建立区域性应急资源共享中心,统一调配特种堵漏设备和专业人才。行业协会牵头制定堵漏服务企业能力评估标准,推行分级认证制度,促进行业服务能力整体提升。政府监管部门应建立堵漏服务企业黑名单制度,对重大事故责任方实施市场准入限制。

五、总结

带压堵漏技术的发展依赖于材料创新与工艺优化的协同推进,高性能密封材料和自动化装备的应用显著提升了堵漏效率和可靠性。安全管理体系的完善同样至关重要,风险评估、应急响应及标准化建设的系统化实施有效降低了作业风险。未来技术发展将向智能化与绿色化方向深入,数字孪生、智能诊断及自修复材料的应用有望实现堵漏过程的精准预测与自主决策,同时环保型堵漏材料的研发将减少二次污染。当前研究在极端工况下的材料耐久性测试及多因素耦合作用机制方面仍存在不足,后续需开展长期服役性能评估及跨学科协同研究,以推动带压堵漏技术向更高安全性和可持续性发展。

参考文献

- [1] 邓志彬,袁宗明,杨振声,等.带压堵漏技术及其在油库中的应用[J].油气储运,2010,29(3):2.
- [2] 程世权,邵建新,吕瑞典,等.带压堵漏技术的研究现状与应用[J].石油和化工设备,2012(3):3.
- [3] 胡立.带压堵漏技术的研究现状及应用[J].石油化工腐蚀与防护,2012,29(5):3.
- [4] 周宇.炼化设备带压堵漏的安全措施[J].青海石油,2010(3):3.DOI:CNKI:SUN:QHSA.0.2010-03-026.
- [5] 赵毅,钟荣强,邓志彬.管道带压堵漏技术及其在油库中的应用[J].管道技术与设备,2010(3):3.
- [6] 樊素芹.浅谈带压堵漏技术[J].广州化工,2011,39(20):3.
- [7] 李淑红.带压堵漏技术的应用[J].江西煤炭科技,2011(4):2.
- [8] 陈瑜捷.带压堵漏技术的应用与探讨[J].科技创新与应用,2014(11):2.
- [9] 禹光辉.石油化工生产中带压堵漏技术的应用[J].科技展望,2017,027(024):167.
- [10] 刘兴端.化工装置中带压堵漏技术的应用[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2021(1):105-105107