

化工企业密闭空间作业职业危害风险分析与防控策略

叶玉芬 徐丹 姚轶丽

浙江多谱检测科技有限公司

DOI:10.32629/jsse.v4i2.19949

[摘要] 化工企业密闭空间作业因环境封闭、介质危险且内部结构复杂,长期是急性职业中毒与窒息伤亡事故的高发环节。本文针对化工企业密闭空间作业职业危害风险提出强化源头管控以实现真正的物理隔离与彻底清洗置换;夯实技术屏障,推行立体连续监测与流场科学的强制机械通风;筑牢个体防线,精准配置特种呼吸防护与受限环境应急通讯装备;完善管理机制,刚性执行作业票证,并通过强化演练彻底斩断盲目施救链条的防控策略,以期为化工企业化解密闭空间极端风险、提升本质安全水平提供实践指导。

[关键词] 化工企业; 密闭空间; 职业危害

中图分类号: Q949.97 **文献标识码:** A

Occupational Hazard Risk Analysis and Prevention and Control Strategies for Operations in Enclosed Spaces in Chemical Enterprises

Yufen Ye Dan Xu Yili Yao

Zhejiang Dupu Testing Technology Co., Ltd.

[Abstract] Due to the enclosed environment, hazardous media, and complex internal structure, operations in confined spaces within chemical enterprises have long been high-risk areas for acute occupational poisoning and asphyxiation accidents. This article proposes a prevention and control strategy for occupational hazards in such operations. It emphasizes strengthening source control to achieve genuine physical isolation and thorough cleaning and replacement; enhancing technical barriers by implementing three-dimensional continuous monitoring and scientific forced mechanical ventilation of flow fields; fortifying individual defense lines by accurately equipping with specialized respiratory protection and emergency communication devices for confined environments; and improving management mechanisms by rigorously enforcing work permits and thoroughly cutting off the chain of blind rescue through enhanced drills. The aim is to provide practical guidance for chemical enterprises to mitigate extreme risks in confined spaces and enhance their intrinsic safety levels.

[Key words] chemical enterprise; enclosed space; occupational hazard

化工生产装置通常以全密闭、连续化运行为基础特征,物料在受控的管道与容器内完成复杂的物理化学转化。在常规生产状态下,完善的隔绝体系能够有效规避外部环境与危险介质的接触。然而,当装置进入停工检修、清理清淤或异常工况处置阶段时,操作及维修人员不可避免地需要进入塔器、反应釜、储罐、地下管廊等密闭空间内部作业。这类空间由于物理进出口受限、内部通风不良,加之化工物料本身的易燃、易爆、有毒、腐蚀属性,使其成为职业安全与健康防护的“黑匣子”。从历年全国化工行业安全生产事故统计数据来看,密闭空间作业虽在整个检修维修工时中占比不高,但其导致的中毒窒息伤亡人数却长期居高不下,且极易因处置不当演变为群死群伤的恶性事故。

1 化工企业密闭空间的界定与作业特性

1.1 化工密闭空间的典型类型与物理界定

在化工工程语境下,密闭空间并非单纯指代封闭的容器,而是指封闭或半封闭,进出受限,未按固定工作场所设计,自然通风不良,易造成有毒有害、易燃易爆物质积聚或氧含量不足的空间。化工企业的密闭空间按形态与功能可划分为三大类。第一类为工艺反应与储存设备,如精馏塔、合成反应釜、大型储油罐、过滤器及换热器管束,此类空间通常容积庞大,内部结构复杂,存在塔盘、搅拌桨、填料等障碍物。第二类为管网与附属构筑物,如长距离地下管廊、污水池、深井、地沟等,此类空间往往呈现狭长型,存在积水与淤泥沉积。第三类为特定功能性空间,

如烘房、隧道式发酵池等。物理界定的核心在于其是否满足“缺氧或有毒气体积聚的物理条件”以及“逃生避险通道受制约的空间特征”。

1.2 化工密闭空间作业的显著危险性特征

与建筑行业的基坑、市政行业的污水井相比,化工密闭空间的危险特性呈现出高度的系统性与衍生性。首先是介质残留的极端危险性。化工物料往往具有高毒性或强腐蚀性,即便经过退料与吹扫,设备内壁挂料、死角残液、法兰垫片处渗漏的微量物料,在作业扰动下即可瞬间达到致死浓度。其次是危害因素的多维耦合。空间内可能同时存在硫化氢中毒、可燃气体爆燃、高温热辐射及触电等多重风险,单一防护手段极易失效。

2 密闭空间作业职业危害风险多维分析

2.1 缺氧窒息与急性中毒风险

缺氧与中毒是密闭空间作业最核心、致死率最高的职业危害。缺氧环境的成因分为两类:一是物理置换,如在设备检修前采用氮气、二氧化碳等惰性气体进行置换保护时,若未彻底抽净或误入,会引起作业人员“闪电式”昏迷死亡;二是生化耗氧,污水池、污泥池底部的有机沉积物在厌氧菌作用下发酵,或金属构件在潮湿环境中生锈氧化,均会大量消耗空间内的氧气,导致氧含量降至19.5%的安全临界值以下。在急性中毒方面,硫化氢是最具代表性的剧毒气体。其比重较空气大,极易沉积于塔底、池底等低洼区域,不仅具有强烈的刺激性与臭味,更高浓度下会直接麻痹嗅神经,导致嗅觉疲劳,并在数秒内阻断细胞呼吸链,引发“电击样”死亡。

2.2 易燃易爆气体与火灾爆炸风险

化工密闭空间内可燃气体或蒸汽的积聚,构成了重大的火灾爆炸隐患。由于空间密闭,可燃气体与空气混合后极难自然扩散,只要局部浓度达到爆炸极限,一旦遇到微小的点火源便会发生空间爆燃。在清理含油储罐或聚合反应釜时,容器内壁残存的挥发性有机溶剂会持续蒸发,形成爆炸性混合物。点火源的隐蔽性是另一大风险点,作业人员穿戴的非防静电劳保服装摩擦产生的静电火花、使用非防爆照明灯具及电动工具产生的电火花、甚至金属工具敲击锈蚀管壁产生的机械火花,在密闭空间内都具备了足够的引燃能量。爆燃产生的超压冲击波不仅会直接摧毁内部结构造成机械伤害,伴随的缺氧燃烧及有毒烟气生成,会进一步加剧人员的窒息与中毒。

2.3 物理因素与交叉作业伤害风险

除了化学性危害,密闭空间内的物理伤害同样不容忽视。化工设备内部往往管线纵横交错、照明条件极差,操作人员在攀爬塔盘或穿越受限孔洞时,极易发生高处坠落事故。更为致命的是机械伤害,在反应釜内检修搅拌桨、在容器内清理转动部件时,若未执行严格的能源隔离,外部人员误启动设备,内部人员绝无逃生可能。此外,密闭空间内使用电焊、气割等动火作业时,局部会产生极高浓度的电焊烟尘与有毒金属氧化物气溶胶,在通风不良的情况下迅速引发急性金属烟热或中毒。

3 密闭空间作业危害事故的深层致因剖析

3.1 能量隔离失效与吹扫置换不彻底

追溯密闭空间事故的工艺源头,能量隔离的失效往往是最初的缺口。部分企业为图省事,在切断物料来源时仅关闭控制阀门,而未按要求抽取盲板。一旦阀门内漏或因系统残压发生串料,有毒气体便会直接灌入作业空间。在吹扫置换环节,常存在“重主体、轻死角”的盲区。对于带夹套、内件复杂或多进料口的设备,若未制定针对性的交叉吹扫方案,死角处残留的剧毒物料或易燃气体无法被有效置换。当作业人员通过人孔进入并开始敲击、清理时,原本被包裹或封存的残留物瞬间释放,导致环境瞬间恶化。

3.2 气体检测手段落后与动态监测缺失

气体检测是进入密闭空间前的“探路石”,但实际执行中却常沦为形式。一方面是检测方法的静态化与单一化。部分班组仅使用便携式气体检测仪在人孔处进行单点检测,忽视了密闭空间内气体的热力学分层现象——较轻的可燃气体聚集在顶部,较重的硫化氢沉积在底部,中间可能存在缺氧层。缺乏由上至下、多点位的立体检测,无法反映空间内部的真实全貌。另一方面是动态监测机制的缺失。许多企业将“检测合格”作为一次性通行证,进入后便不再进行环境监控。然而,随着清理作业的推进、底层污泥的翻动或外部气温的升高,空间内的气体浓度处于动态变化之中,缺乏连续实时监测与声光报警联动,等同于让作业人员蒙眼涉险。

3.3 作业人员认知盲区与盲目施救惨剧

人为因素的失范在密闭空间事故中占据极大比重。一线操作人员对化工物料的理化性质及致毒机理往往缺乏深刻认知,容易将初期中毒症状误判为劳累或中暑,未能及时发出撤离信号,从而错过最佳的避险窗口。更为沉痛的教训在于“盲目施救”。当首位作业者倒下后,同班组的工友在极度惊恐与急于救人的心理驱使下,往往丧失理智判断,在未佩戴任何呼吸防护装备、未评估现场气体浓度的前提下,凭借本能冲入危险区域,最终导致中毒伤亡人数呈几何级数扩大。这种群体性无防护施救,是密闭空间事故演变为重大灾难的最核心人为致因。

3.4 现场监护形同虚设与审批制度走过场

制度层面的悬空是事故发生的温床。受限空间作业票证制度本应是安全把关的利器,但在基层执行时常被异化为“填表游戏”。存在代签漏签、作业地点与票证不符、安全措施打勾而不落实等现象。最为薄弱的环节在于监护人制度的失效。部分监护人由同班组人员兼任,在作业期间擅自离开岗位去干其他杂活,或者在监护位置玩手机,未能保持与内部作业人员的持续联络。当内部发生突发险情时,监护人无法第一时间发现并启动外部救援程序,错失了利用外部机械牵引或强制送风进行初步干预的黄金时间。

4 化工企业密闭空间作业系统化防控策略

4.1 强化源头管控,严格落实物理隔离与彻底清洗置换

化工企业必须建立刚性的“上锁挂牌”能量隔离标准。在切断进出料阀门后,必须在靠近设备的法兰处拆除管段或插入

符合压力等级的金属盲板,实现真正的物理断开,并对盲板进行台账化编号管理。针对置换清洗,应实施“一空间一方案”的定制化策略。根据设备内部结构及残留物料性质,科学选择蒸汽蒸煮、高压水射流清洗或化学中和等手段。对于含有聚合物的设备,需先进行局部机械清理再行蒸煮;对于含有硫化铁等自燃性物质的容器,必须采取钝化处理或保持湿润状态,严防清理过程发生自燃引发次生灾害。

4.2 夯实技术屏障,实施全过程连续监测与强制机械通风

在人员进入前,必须采用泵吸式多气体检测仪,按照从上至下的顺序,对空间顶部、中部、底部进行阶梯式检测,停留时间需满足仪器响应要求。人员进入后,必须将具备无线传输功能的气体传感器部署在作业点周边,数据实时回传至中控室或外部监护终端,实现全天候动态监控。机械通风是改善空间微环境的核心工程手段。必须严禁使用纯氧通风,防止引发剧烈氧化。通风机的布置需遵循流体力学的科学规律,送风管应深入空间底部或作业点的上风向,排风口设置在下风向,形成贯穿式的置换气流,避免产生气流短路或死角涡流。对于极其狭长或结构复杂的管廊,应计算通风换气次数,确保在合理时间内将有害气体浓度稀释至安全限值以内。

4.3 筑牢个体防线,科学选配特种防护与应急通讯装备

在密闭空间内,普通的过滤式防毒面具因无法防范缺氧环境及高浓度毒气穿透,应被严格限制使用。对于已知存在有毒气体或氧含量不确定的环境,必须强制配备正压式空气呼吸器,并确保气瓶压力处于安全余量之上。对于深度受限、出口狭小的容器,为减轻作业人员负重并延长作业时间,可推广使用移动式长管呼吸器,但必须保证供气源洁净、气量充足,并备有应急气瓶。此外,作业人员必须穿着防静电、防腐蚀的连体工作服,佩戴防坠落全身式安全带,且安全绳的末端必须固定在容器外部的可靠锚点上,由监护人随时保持适度张紧。在通讯保障上,针对金属容器对无线电信号的屏蔽效应,应配置防爆型有线对讲系统或依靠物理绳索拉动的简易信号绳,确保内外信息畅通无阻。

4.4 完善管理应急,刚性执行票证管理与斩断盲目施救链条

受限空间作业票必须作为现场作业的最高指令,未经属地负责人、安全监督人员联合现场确认签字,任何人员不得启封人孔。必须设立专职监护人,监护人需佩戴明显的标识,手持应急物资,在作业期间严禁兼做他事,实行“死盯死守”。针对群死群

伤的顽疾,企业必须将“防范盲目施救”写入安全管理制度及应急处置预案的最高优先级。要通过反复的休克式演练,向全员灌输“未佩戴有效呼吸防护装备,绝对禁止进入受限空间施救”的铁律。明确规定一旦发生人员晕倒,监护人的首要动作是立即启动外部报警程序、利用安全绳尝试外拉、并开启备用强制通风,只有在专业应急救援队伍携带正压式空气呼吸器抵达后,方可实施内部营救,从制度与肌肉记忆层面彻底斩断盲目施救的悲剧链条。

5 结语

化工企业密闭空间作业的职业危害防控,是一场涉及工艺、设备、电气、安全与管理的系统性战役。危害因素的隐蔽性与突发性,决定了任何环节的疏漏都可能导致不可逆的灾难性后果。有效化解这一风险,不能仅仅依赖单一的防护用品配发或空洞的安全口号,而必须从源头能量隔离的物理断开做起,以连续气体监测与科学机械通风为技术依托,以严苛的个体防护为底线保障,最终落脚于刚性的现场监护与杜绝盲目施救的制度执行。唯有将风险分析的成果转化为全链条、无死角的标准化作业程序,让每一名涉险人员对潜在危害保持敬畏、对应急程序形成条件反射,化工企业才能真正驯服密闭空间这头“猛兽”,在保障装置长周期稳定运行的同时,筑牢劳动者生命安全的坚固防线。

[参考文献]

- [1]余健.大型油罐机械清洗风险辨识与防控研究[J].科技资讯,2025,23(24):212-215.
- [2]周伟杰,黄娇容.船舶特涂期间的安全风险识别与管控策略[J].船舶物资与市场,2025,33(12):112-114.
- [3]郎悦,任向红.密闭空间环境空气监测技术研究进展[J].科技资讯,2024,22(4):174-178.
- [4]贾麟,曹永炜.人-机器人协同技术在密闭空间应急救援中的应用研究[J].劳动保护,2025(5):100-103.

作者简介:

叶玉芬(1995--),女,汉族,浙江丽水人,本科,中级职称,研究方向:职业卫生检测与评价。

徐丹(1992--),女,汉族,浙江海宁人,本科,中级职称,研究方向:职业卫生检测与评价。

姚轶丽(1992--),女,汉族,浙江桐庐人,本科,中级职称,研究方向:职业卫生检测与评价。