

环卫设施项目有限空间作业安全监管技术规范研究

任 帆

上海环境卫生工程设计院有限公司 上海 200000

【摘要】：本文针对随着城市环卫终端处置设施规模扩大而导致的其内部有限空间作业高危险性及传统监管方式存在实时性不足、主动性不强等问题难以有效遏制事故发生的现状，本研究旨在针对生活垃圾焚烧厂、填埋场及餐厨（厨余）处理厂等典型设施的有限空间作业构建一套融合智能感知与全流程管控的安全监管技术规范体系，通过分析环卫有限空间特有风险与监管现状，设计集实时监测、智能预警与闭环管理于一体的技术框架，并据此制定覆盖作业前、中、后全周期的标准化监管流程与配套要求，以智能技术赋能政府第三方监管，形成可操作的技术规范，为提升环卫行业有限空间作业安全管理的系统化、精准化水平提供系统性解决方案。

【关键词】：有限空间作业；安全监管；智能技术；技术规范；环卫设施

DOI:10.12417/2705-0998.25.23.054

引言

作为城市环境基础设施重要组成部分的生活垃圾焚烧厂、填埋场及餐厨（厨余）处理厂等环卫终端处置设施承担着废弃物无害化及资源化处理的关键任务，其在生产运行过程中涉及的大量如厌氧消化罐、渗滤液调节池、烟气净化系统等密闭或半密闭区域均属于具有出入口狭窄、通风不良、内部环境复杂多变等特点的典型有限空间，此类空间因极易积聚有毒有害气体、产生缺氧环境或存在淹溺、爆炸等潜在风险而导致作业安全风险极高。近年来行业内有限空间作业安全事故时有发生所暴露出的传统安全管理模式存在的明显短板，即传统监管高度依赖人员经验与现场旁站而难以实现全过程、实时化风险监控，使其在风险预警及时性、应急处置有效性以及管理追溯精确性方面面临严峻挑战，在此背景下政府积极推行旨在提升监管效能的第三方专业监管模式，而如何将现代信息技术与安全管理实践深度融合以构建一套科学、系统、高效的安全监管技术规范体系则成为当前环卫行业安全生产领域亟待解决的重要课题。

1 环卫设施有限空间作业风险与监管现状分析

1.1 环卫设施有限空间的类型与作业特点

环卫终端处置设施作为城市环境运行的关键环节，其内部结构复杂，包含了多种性质迥异的有限空间。这些空间根据其功能与形态主要可分为工艺密闭设备、地下构筑物以及特殊地上空间三大类^[1]。工艺密闭设备是生产的核心，例如餐厨（厨

余）处理厂的厌氧消化罐，物料在其中发酵产气，内部充满易燃易爆的甲烷和剧毒的硫化氢。生活垃圾焚烧厂的余热锅炉管道和烟气净化塔罐，则可能存在高温高压和一氧化碳残留风险。环卫设施有限空间的类型与作业特点深刻反映城市环境基础设施运行中的高风险本质，这些空间不仅因功能差异呈现独特物理形态，更在作业过程中暴露复杂安全挑战；作为核心生产单元的工艺密闭设备，其内部环境往往处于动态变化之中，如厌氧消化罐在物料发酵阶段产生大量易燃易爆气体，要求作业人员进入前进行持续通风和多重气体检测，以应对可能突然升高的硫化氢或甲烷浓度，而烟气净化塔罐内部残留的化学物质和高温高压条件则要求作业时严格遵循能量隔离程序，防止烫伤或中毒事件；地下构筑物如渗滤液调节池通常位于地下深处，空间狭窄且通风条件极差，作业时不仅面临有毒气体积聚风险，还可能因池壁结构老化或外部荷载导致坍塌事故，故清淤作业需搭配机械通风和实时结构监测，以确保人员安全。

1.2 有限空间作业主要危险源与事故致因

环卫设施有限空间作业潜藏的危险源是一个多因素交织的复杂系统，其事故致因机理深刻揭示了传统安全管理模式的脆弱性。气体危害始终是首要且最致命的威胁，有机物在厌氧环境下分解代谢会持续释放出硫化氢、甲烷、氨气、一氧化碳等混合气体，这些气体或具有剧毒性，或具有窒息性，或具有爆炸性，且其浓度随温度、搅拌作业等因素动态变化，形成难以预测的气团环境，环卫有限空间主要危险源识别如表1所示。

表 1 环卫有限空间主要危险源识别表

有限空间类型	典型作业活动	主要危险源	可能后果
厌氧消化罐	内部清理、设备检修	硫化氢中毒、甲烷爆炸、缺氧窒息	急性中毒死亡、爆炸冲击伤害、窒息昏迷
渗滤液调节池	清淤作业、水泵维修	硫化氢等重气体积聚、池壁坍塌、淹溺	中毒窒息、被掩埋、溺水身亡
垃圾贮坑	抓斗检修、墙壁维护	甲烷聚集、粉尘爆炸、高处坠落	窒息、爆炸、坠落伤亡
烟气净化塔罐	更换喷嘴、除垢作业	残留二氧化硫/一氧化碳、化学灼伤、高温	中毒、灼伤、中暑休克

1.3 现行监管模式存在的问题与挑战

当前环卫设施有限空间作业的安全监管模式在实践中面临着多重现实挑战，其效能瓶颈日益凸显。监管手段对人力资源的过度依赖是一个核心问题，普遍采用的旁站式监督模式要求监管人员全程在场盯守，这不仅在人力成本上难以承受，更关键的是在多点位、高频次的作业现实下无法保证监管的覆盖面与连续性，使得监管行为存在大量盲区与空白时段。监管的时效性严重滞后，现有模式大多侧重于定期的安全检查与事故后的调查追责，本质上是一种被动响应机制，缺乏在事故发生前进行风险态势精准研判以及在作业过程中进行实时干预的有效技术支撑，导致监管无法从事后处置向事前预防和事中控制前移。

2 有限空间作业安全智能监管技术体系构建

2.1 智能监管体系的总体设计原则与框架

构建有限空间作业安全智能监管技术体系，必须立足于系统性、前瞻性与可落地性，其设计需遵循四个核心原则。预防为主原则要求体系能够实现风险的超前预测与预警，推动安全关口前移。实时感知原则强调利用物联网技术实现对作业环境、人员行为与设备状态的毫秒级监测，确保信息的及时性与真实性。闭环管理原则旨在打通作业前、中、后的全流程数据链，形成计划、执行、检查、处理的完整管理闭环，有限空间作业安全智能监管体系架构如图 1 所示。



图 1 有限空间作业安全智能监管体系架构图

智能监管体系的总体设计原则与框架构建需从技术集成与业务协同角度深入考量，核心在于将抽象预防理念转化为可

执行技术路径，确保系统既具备风险预警能力，又能动态适应环卫设施作业环境的复杂性；框架设计采用分层架构，底层依托物联网传感器网络持续采集气体浓度、温度、人员定位等多元数据，中层通过边缘计算节点进行实时数据清洗与初步分析以减少网络传输延迟，上层构建统一数据平台实现多源信息融合与可视化展示，这种架构使预警模型能基于实时数据流动态计算风险指数，及时触发报警并自动启动应急响应程序，如检测到硫化氢浓度异常升高时系统可立即切断相关设备电源并通知监护人员干预。

2.2 关键感知监测技术方案与集成

感知技术的先进性与可靠性是智能监管体系的基石，其设计需覆盖环境、行为与设备三大维度，并实现跨维度的智能联动。环境感知方面，核心是构建“固定监测为主、移动监测为辅、个体监测补充”的三级气体监测网络^[2]。在有限空间出入口、内部重点区域安装本质安全型的固定式多参数气体探测器，持续监测氧气、硫化氢、一氧化碳、甲烷和可燃气体的浓度。作业人员随身佩戴便携式四合一检测仪，作为移动监测点。必要时在作业点临时部署无线扩散式检测仪，形成对危险气体的立体、动态监测网。关键感知监测技术方案与集成的核心价值在于将离散监测数据转化为具有决策意义的风险态势图谱，其技术深度体现于对复杂环境数据的实时融合与智能解析；固定式气体探测器需采用具自校准与故障诊断功能的智能传感器，以应对环卫设施高湿度、高腐蚀性环境对监测精度的长期影响并确保数据持续可靠；移动监测网络依赖低功耗广域物联网技术实现便携式检测仪与人员定位标签的数据同步传输，使系统能动态绘制作业区域内气体浓度分布热力图并精准定位危险气团漂移轨迹；行为感知维度集成超宽带精准定位与 AI 视频分析，在人员异常跌倒或长时间静止时，系统自动关联该区域实时气体浓度数据以判断是否为中毒前兆并触发分级报警；设备状态监测通过振动传感器与智能电流钳实时采集通风机等关键设备的运行参数，一旦监测到风机效能下降且同时气体浓度上升，系统立即联动启动备用通风装置并强制疏散作业人员。

2.3 数据平台与风险预警模型构建

统一数据平台的建设旨在破解信息孤岛，其核心任务是实现多源异构数据的标准化接入、治理、融合与价值挖掘，为风险预警提供高质量的数据燃料。为量化评估作业点的瞬时风险水平，引入综合风险指数模型，其数学表达式为，

$$R = \alpha \cdot f(G) + \beta \cdot g(B) + \gamma \cdot h(L) \quad (1)$$

式 (1) 中，R 代表计算得出的实时综合风险指数，其值越高表示风险越大。f(G) 是环境气体风险函数，其输入 G 为多种气体浓度与氧气含量的实时监测值，该函数通过加权归一化等方式，综合计算有毒、可燃、窒息等多类气体风险的叠加

效应。 $g(B)$ 是人员行为风险函数,输入 B 为视频 AI 识别出的各类违规行为的数量与等级,函数将其量化为行为风险值。 $h(L)$ 是位置与状态风险函数,输入 L 为人员定位信息。 α, β, γ 为动态权重系数,其赋值并非固定,而是通过机器学习模型基于不同有限空间类型的历史事故数据、作业规程进行训练得出,并能随作业阶段动态调整。

2.4 监管业务流程的智能化应用设计

智能监管技术的生命力在于对传统业务流程的重塑与赋能,其应用设计需紧密贴合作业与监管的实际场景,实现流程再造与效率变革。在作业前的审批与准备阶段,系统提供全电子化的作业许可管理模块^[3]。申请人必须在线填写标准化的作业计划,系统自动关联该有限空间的历史数据与风险库,生成风险告知卡。作业许可的签发必须以一系列智能化前置条件满足为前提,例如系统自动验证该作业点近期的气体检测合格记录、核对作业人员特种作业资质证书的有效性、并需监护人上传安全措施落实情况的影像证据,通过技术手段将安全措施从“软要求”变为“硬约束”。

3 基于全流程管控的安全监管技术规范设计

3.1 作业前准备与许可的规范化流程

作业前的准备与许可环节是安全管控的首要关口,其规范化流程旨在通过系统性的步骤与强制性的技术校验,确保所有风险措施在人员进入前均已落实。该流程起始于详尽的现场风险辨识与评估,需明确作业内容、识别危险有害因素并制定对应的控制措施。随后必须进行全员安全交底,确保每位作业人员理解风险与职责^[4]。物理隔离与能量隔离必须彻底,如上锁挂牌、管道盲板抽堵,并采用强制通风确保空气流通,有限空间作业许可电子化审批流程如图 2 所示。



图 2 有限空间作业许可电子化审批流程图

3.2 作业过程中的监测控制与应急处置规范

作业过程是风险动态变化的阶段,规范必须确立以实时监

测与智能预警为核心的持续监护机制。现场监护人的核心职责从传统的“旁站看守”升级为“主动监控与指挥”,其必须熟练掌握智能监管终端的使用,持续观察作业人员状态与设备运行情况,并时刻关注监管平台推送的实时环境数据与预警信息。

3.3 作业后评估与档案管理的要求

作业结束并不意味着管理闭环的完成,必须进行系统性的评估与档案归档,以支撑管理的持续改进。评估工作需在作业结束后及时开展,内容不仅限于确认现场清理与人员清点,更应基于智能系统记录的全过程数据,复盘分析本次作业的风险控制有效性,例如检查气体浓度的波动是否在预期之内、预警响应时间是否达标、安全设备运行是否可靠。这种基于数据的事后评估能够客观地发现规程与执行中的薄弱环节。

3.4 人员培训与能力建设的配套规范

技术体系与流程规范的效能最终取决于人的执行能力,因此必须建立与智能监管模式相匹配的、分层分类的人员培训与能力建设规范^[5]。培训对象应明确划分为作业人员、监护人员、管理人员及应急救援人员,并设计差异化的课程体系。作业人员培训重点在于危害认知、个人防护用品使用、自救互救技能及对基本报警信号的响应。

4 结语

本文针对环卫终端处置设施有限空间作业的高风险特性与监管难题,系统分析传统模式局限性并创新性构建集智能感知、实时预警与闭环管理于一体的技术体系,同时设计与之匹配的全流程管控技术规范。通过将物联网、人工智能与业务流程深度融合,推动安全监管从事后响应向事前预防、事中控制模式转变,实现对气体环境、人员行为、设备状态的数字化透视与智能化研判。所提出的规范体系为政府第三方监管与企业自主管理提供可操作、可验证的技术路径与管理工具,在有效遏制盲目施救、管控措施流于形式等突出问题的同时,通过数据积累驱动安全管理持续优化,对提升环卫行业整体安全生产治理能力具有重要理论价值与实践指导意义。

参考文献:

- [1] 余三友.品牌冶金企业有限空间作业质量安全管理实践与创新——基于动态评估的风险防控路径研究[J].中国品牌与防伪,2025,(10):186-188.
- [2] 程程,张爱玲,潘文峥,等.筑牢安全防线探索有限空间作业监管的“破局”之路[J].中国安全生产,2025,20(07):8-27.
- [3] 张远,杜向阳,盛丽丽.工贸重点企业有限空间专家指导服务实践探析[J].安全与健康,2024,(05):60-63.
- [4] 程程,张爱玲,泮畔,等.深入一线精准指导全面加强有限空间安全监管[J].中国安全生产,2023,18(09):10-27.
- [5] 山东济南:推行“上锁设柜”安全措施持续强化有限空间安全监管[J].湖北应急管理,2023,(08):69.