

人员集中场所抗爆评估关键技术研究

张浩成 者 倩 葛丹瑶

中国化学赛鼎宁波工程有限公司 浙江 宁波 315048

摘要: 化工企业因物料泄漏引发的蒸气云爆炸事故对人员集中场所构成严重威胁,抗爆评估技术是当前化工安全领域的重要研究方向。本文系统梳理了化工企业人员集中场所抗爆评估的关键技术链条,从爆炸威胁场景辨识、爆炸荷载确定、人员伤亡风险定量分析到评估标准与流程构建,建立了适用于化工安全领域的全流程评估方法体系。研究明确了化工企业中央控制室、办公楼、外操室等人员集中场所的脆弱性特征与典型蒸气云爆炸场景设计方法,对比分析了TNT当量法与TNO多能法在化工爆炸荷载计算中的适用条件,提出了抗爆评估标准框架与标准化评估流程,并建立了基于GB/T37243-2019超压影响分级的人员伤亡风险定量评估模型。研究成果可为化工园区人员集中场所的抗爆评估与防护设计提供技术参考。

关键词: 人员集中场所; 爆炸风险; 抗爆评估

引言: 近年来,石油化工企业因物料泄漏引发的蒸气云爆炸事故时有发生,中央控制室、办公楼、外操室等人员集中场所面临严峻的爆炸威胁。随着国家对化工企业抗爆安全重视程度的提升及GB/T50779-2022等标准的陆续出台,既有建筑物抗爆能力核查与新建项目抗爆评估已成为行业亟待解决的重要课题。依据GB50984-2014,人员集中场所指固定操作岗位上人员工作时间达40人·小时/天以上的场所;GB/T50779-2022将其界定为“有人值守建筑物”。本文围绕“威胁辨识—荷载确定—结构评估—人员风险—标准构建”技术主线,系统研究化工人员集中场所抗爆评估关键技术,以期提升该类场所爆炸安全防护能力提供方法支撑。

1 人员集中场所爆炸威胁场景与风险辨识

1.1 人员集中场所分类与脆弱性特征

依据GB50984-2014《石油化工工厂布置设计规范》,人员集中场所指固定操作岗位上人员工作时间达40人·小时/天以上的场所,涵盖综合楼、化验楼、中央控制室、外操室、门卫等设施。其中,中央控制室与综合楼内人员密度高、连续作业时间长,一旦发生爆炸事故后果极为严重;化验楼内部仪器设备密集,玻璃器皿及试剂储存增加了爆炸次生灾害风险;各场所脆弱性主要体现在:建筑结构形式多样,部分老旧的综合楼与化验楼砌体结构抗爆能力先天不足;连续作业场所人员疏散条件受限;控制室内精密电子设备对爆炸冲击波振动极为敏感,即便主体结构未发生倒塌,设备损坏也可能导致全厂控制系统瘫痪,次生风险不容忽视。脆弱性分析应综合结构抗爆能力、人员暴露时长与密度、疏散条件、关键设备重要性建立分级标准,为后续评估奠定

基础^[1]。

1.2 爆炸威胁场景构建

威胁场景构建应基于化工装置区安全态势,综合物料危险特性、工艺条件、历史事故案例及点火源判定进行系统分析。爆炸危险源主要为涉及甲类、乙类及以上易燃易爆介质的场所,涵盖液化烃、可燃气体及闪点低于60℃的可燃液体等物料的生产、储存与输送设施,常见介质包括氢气、液化石油气、天然气、石脑油等甲类物质,以及一氧化碳、氨和闪点介于28℃至60℃的可燃液体等乙类物质。存在爆炸性粉尘环境的场所同样构成重要危险源,如涉及硫磺粉尘、铝粉、镁粉等可燃性粉尘的粉碎、包装及输送区域。点火源判定需根据明火设备、电气火花、静电放电、高温表面及撞击火花等潜在点火源的分布特征进行系统识别,结合各类点火源的出现概率与空间分布确定点火概率模型。爆炸场景类型包括蒸气云爆炸、沸腾液体扩展蒸气爆炸及粉尘爆炸等,场景设计采用“概率场景”与“设计基准场景”相结合,前者基于危险源辨识与泄漏频率分析确定事故参数组合,后者选取极端合理场景作为评估基准,明确爆炸源位置、当量及作用方式。

1.3 爆炸危险源与点火源辨识方法

风险辨识旨在系统识别爆炸危险源、点火源分布及潜在事故情景,遵循“危险源识别—点火源判定—泄漏场景分析—暴露后果初判”的递进逻辑。危险源识别聚焦于评估对象周边涉及甲类、乙类及以上易燃易爆介质的工艺装置、储罐区及输送管道,重点梳理介质危险特性、储存总量、操作温度与压力等关键参数,划定潜在泄漏源空间分布。点火源判定应根据明火设备、电气设

备、静电放电、高温表面及撞击火花等点火源分布特征进行系统排查,结合其出现频率与空间位置建立点火概率分布模型,依据泄漏扩散模拟结果判定可燃蒸气云是否处于可爆范围内。泄漏场景分析选取不同孔径的连续泄漏和瞬时泄漏作为典型工况,初步判定人员集中场所是否位于潜在爆炸影响区域内。辨识结果形成危险源清单与点火源分布图,为爆炸荷载确定提供基础输入。

2 爆炸荷载确定与荷载场模拟技术

2.1 外部爆炸荷载计算方法

化工蒸气云爆炸荷载计算是建筑外立面及主体结构抗爆评估的基础。主流计算方法包括TNT当量法、BST法、TNO多能法及CFD模拟法。TNT当量法基于能量等效原理,利用Henrych或Mills公式确定峰值超压与冲量,参数获取便捷,适用于初步筛查。BST法通过引入反应物活性等级、火焰速度等级及障碍密度修正燃烧速度,能较好反映蒸气云爆炸物理过程。TNO多能法将爆炸等效为多级能量释放模型,根据受限程度划分爆源强度等级,求解冲击波衰减曲线确定荷载,对复杂工艺区域刻画更具针对性。CFD法通过求解三维可压缩方程精确捕捉爆炸波传播,考虑地形、设备布局等实际边界影响^[2]。迎爆面中心承受最高反射超压,背爆面主要承受负压,工程计算应结合规范查取设计荷载,异形立面或复杂环境需借助数值模拟精细化分析。

2.2 内部爆炸荷载计算方法

内部爆炸因能量受围护结构约束,形成反射叠加和准静态压力效应。密闭空间内爆炸荷载由早期冲击波荷载(历时毫秒级、峰值高、衰减快)和后期准静态压力(持续数百毫秒至数秒、压力均匀)组成。TNT当量法可用于内部爆炸峰值超压快速估算,需结合房间容积与泄压面积修正。TNO多能法适用于室内受限空间,通过确定不同障碍物布局下的燃烧强度等级及爆炸压力-冲量曲线,反映内部爆炸特征。泄爆条件是关键变量,泄压墙或泄爆窗可显著降低准静态压力峰值,泄爆面积应满足规范最低要求。爆炸物位置影响壁面反射和荷载分布形态,地面贴临、中心悬浮或贴墙等不同工况的反射叠加效应差异显著,计算中应予充分考虑。

2.3 复杂场景下爆炸荷载数值模拟

化工装置区工艺单元密集、设备布局紧凑、管道纵横交错,蒸气云爆炸荷载的传播受复杂受限空间和障碍物分布的显著干扰。CFD模拟通过求解三维可压缩Navier-Stokes方程,结合湍流与燃烧模型,精确捕捉冲击波在装置区内的传播、反射、绕射和汇聚效应。设备密集区域受群反射与夹持作用,局部荷载增强可达开阔场

的2至3倍;管廊区管道结构形成分割与耗散,荷载空间分布极不均匀。关键技术包括计算域与边界条件设置、近场毫米级网格收敛性分析、燃烧模型与状态方程适配可燃气体组分。可基于大量CFD模拟建立简化预测模型。建议将TNT当量法或TNO法与CFD交叉验证,确保荷载取值可靠性与工程适用性。

3 爆炸作用下人员伤亡风险评估

3.1 爆炸对人员的直接伤害机理

化工蒸气云爆炸对人员伤害主要源于冲击波超压作用,根据GB/T37243-2019表G.3超压对建筑的影响可推断人员伤亡阈值。当峰值超压达到3.0kPa时,建筑物门窗玻璃破碎产生飞溅碎片,对近距离人员造成次级碎片打击伤害;超压升至6.9kPa时,轻钢结构建筑出现变形,室内人员面临抛掷与倒塌压埋风险;超压达21kPa时,钢筋混凝土结构出现裂缝,人员伤亡概率显著上升。基于Bowen曲线和Richmond肺损伤准则建立峰值超压-冲量联合概率伤亡模型。次级爆炸伤取决于碎片速度、质量及撞击部位,以碎片穿透动能是否超过人体局部耐受极限为判据。各类伤害准则综合运用,取最不利条件作为风险计算输入参数^[3]。

3.2 人员密度与疏散耦合分析

化工人员集中场所的人员分布具有显著的岗位化特征。中央控制室实行24小时轮班值守制度,每班次通常配置4~8名操作人员;外操室在装置运行期间每班次6~12人,交接班时段人员密度瞬时增大;综合楼与化验楼为常规工作制,工作日白天人员密度可达每百平方米15~25人,夜间及节假日仅少数值班人员;特殊门卫每班2人及以上全天候在岗。采用基于智能体的疏散模拟方法,集成建筑信息与人员行为模型,模拟冲击波传播时间线与人员反应时间线的交互。关键输出包括人员逃离时间与冲击波到达时间差、通道堵塞后通行能力衰减。化工爆炸冲击波到达时间通常在毫秒至数秒之间,远低于人员反应与疏散启动时间,疏散基本不可行,因此抗爆设计的核心策略应为“就地防护”而非“疏散撤离”。

3.3 人员伤亡风险定量评估

将建筑物破坏分析与人员分布数据综合集成。依据GB/T37243-2019表G.3超压对建筑的影响分级,建立超压值与建筑物破坏程度的对应关系:3kPa以下为玻璃破损、6.9kPa为轻钢结构变形、21kPa以上为钢筋混凝土结构严重破坏。结合各区域人员密度计算预期伤亡人数,倒塌区死亡率90%以上,重度破坏区30%~70%,轻度破坏区轻伤率80%。对爆炸当量、泄漏位置等不确定参数采用蒙特卡洛模拟给出伤亡期望及区间。个体风险与群体

风险为核心指标,参照ALARP原则设定可接受标准,超限时提出削减措施并重新评估。通过多场景风险排序识别高风险区域及时段,为安全管理提供决策依据。

4 人员集中场所抗爆评估标准与流程建议

4.1 既有标准规范体系梳理

化工人员集中场所抗爆评估标准以GB/T50779-2022《石油化工建筑物抗爆设计标准》为核心依据,该标准于2022年12月1日实施,同时替代原GB50779-2012《石油化工控制室抗爆设计规范》,适用范围由控制室扩展至所有石油化工建筑物。针对控制室等特定功能建筑,SH/T3006-2024《石油化工控制室设计规范》于2025年1月1日实施,要求控制室抗爆通过爆炸安全性评估确定,与GB/T50779-2022形成配套。GB/T37243-2019附录G提供了超压对建筑影响的参考数据,适用于确定不同超压级别下的建筑物破坏程度,是人员伤亡风险评估的重要依据。GB50984-2014明确了人员集中场所定义,构成评估对象认定的基础。

4.2 抗爆评估标准框架建议

化工人员集中场所抗爆评估标准框架宜参考SH/T3237-2025《石油化工建筑物抗爆评估技术标准》总体架构,结合人员集中场所特殊性补充完善。框架由总则、术语与符号、基本规定、爆炸安全性评估、爆炸荷载确定、建筑设计要求、结构设计要求、既有建筑物评估与加固、人员伤亡风险评估及评估报告编制等章节构成。总则明确适用范围为新建、改扩建石油化工建筑物抗爆设计及既有建筑物评估加固。基本规定明确:新建有人值守建筑物不宜布置在入射超压大于48kPa的区域;设计爆炸荷载作用下允许局部构件塑性变形但不应影响整体稳固性。爆炸荷载应依据爆炸安全性评估确定^[4]。既有建筑物不满足时制定加固方案。人员伤亡风险评估应作为独立章节纳入标准框架。

4.3 抗爆评估标准化流程

参照SH/T3237-2025规定,抗爆评估流程包括以下步骤:场所资料收集;依据GB50984-2014认定人员集中场所并确定评估等级;开展爆炸安全性评估,完成可信事故场景辨识与爆炸荷载确定;参照GB/T37243-2019附录G确定建筑物预期破坏程度;按GB/T50779-2022开展结构抗爆性能评估;基于表G.3计算人员伤亡风险;制定防护措施与优化方案;编制评估报告;报告审查与应用。各步骤数据传递清晰、逻辑衔接顺畅。评估结论应明确建筑物抗爆能力是否满足要求,不满足时提出加固改造建议,作为安全管理与抗爆加固的决策依据。

结束语

本文针对化工企业人员集中场所抗爆评估需求,构建了覆盖威胁场景辨识、爆炸荷载计算、结构性能评估、人员伤亡风险定量分析及评估流程的全链条方法体系。研究表明,GB/T50779-2022已确立化工建筑物抗爆设计核心框架,TNT当量法与TNO多能法在工程筛查与精细化评估中各有适用,CFD模拟可有效揭示装置区受限空间对爆炸荷载的增强效应。人员伤亡评估应结合GB/T37243-2019超压影响分级与岗位化人员分布特征,采取“就地防护”为核心的安全策略。所提评估流程可为化工园区既有建筑物抗爆能力核查与新建项目抗爆设计提供系统化技术支撑。

参考文献

- [1]高利军.论化工火灾、爆炸场所控制室改造[J].内蒙古石油化工,2021,47(5):46-48.
- [2]王志虎,刘莘妮,史普安,等.石油化工建筑物爆炸安全性评估的探讨[J].化工设计,2026,36(2):34-37.
- [3]周爱华,修子豪,毕家慧.化工园区内丙烯蒸气云爆燃特性与事故后果分析[J].安全与环境学报,2025,25(12):4720-4731.
- [4]吴岩.石化装置既有建筑物抗爆改造工程应用[J].石化技术,2024,31(8):33-34,267.