

化工车间粉尘爆炸风险防控措施实践与改进

钟昌继

江苏久拓工程科技有限公司连云港分公司

DOI:10.12238/etd.v6i8.17076

[摘要] 为深入探究化工车间粉尘爆炸风险防控措施,以及其实践层面的改进策略,仔细剖析粉尘爆炸基本原理、触发条件,还有风险评估方法后,提出粉尘收集处理优化、抑爆系统应用、物理化学隔离以及应急响应等一系列防控措施。结合具体且具有代表性的案例展开深入分析,对防控措施的实际实施效果进行全面评估,精准识别现有措施存在的不足,进而提出技术改进与管理优化等方面的改进方向以及具体可操作的措施。数据显示,若能科学地实施各项防控措施,粉尘爆炸事故的发生率会显著下降,车间的安全水平也会随之提升。研究得出的结论,能够给化工行业粉尘爆炸风险防控工作送去科学指引,推动安全生产技术不断向前发展。

[关键词] 粉尘爆炸风险; 防控措施; 实践改进; 安全评估

中图分类号: TQ086 **文献标识码:** A

Risk Prevention and Control Measures for Dust Explosion in Chemical Workshops: Practice and Improvement

Changji Zhong

Jiangsu Jiutuo Engineering Technology Co., Ltd. Lianyungang Branch

[Abstract] To thoroughly investigate risk prevention and control measures for dust explosions in chemical workshops and explore improvement strategies in practical implementation, this study analyzes the fundamental principles of dust explosions, their triggering conditions, and risk assessment methods. A series of prevention and control measures are proposed, including optimized dust collection and treatment, application of explosion suppression systems, physical and chemical isolation, and emergency response protocols. Through in-depth analysis of specific and representative cases, the actual implementation effectiveness of these measures is comprehensively evaluated, existing shortcomings are accurately identified, and improvement directions along with actionable measures—covering both technical enhancements and management optimizations—are proposed. Data indicate that the scientific implementation of these prevention and control measures can significantly reduce the incidence of dust explosion accidents and elevate the overall safety level of workshops. The conclusions drawn from this research provide scientific guidance for dust explosion risk prevention and control in the chemical industry, promoting the continuous advancement of safety production technologies.

[Key words] Dust Explosion Risk; Prevention and Control Measures; Practical Improvement; Safety Assessment

引言

粉尘爆炸风险防控,作为化工安全管理中至关重要的一环,其深层次本质是依托粉尘爆炸动力学原理构建的灾害预防技术体系。粉尘爆炸需满足粉尘浓度处于爆炸极限范围、存在有效点火源及氧气浓度达标等关键条件^[1],其破坏效应呈现链式反应特征,包括初始爆炸引发的二次爆炸及压力波传播效应^[2]。现有研究多聚焦于单一防控技术优化,如抑爆系统响应时间控制^[3]或惰性气体浓度阈值设定,但缺乏对防控措施系统集成与动态优化的理论框架。化工车间生产环境呈现出工艺连续性显著、

粉尘产生源分布广泛、设备密闭性要求极为严格等特点,这些特点使得传统静态防控策略难以满足动态风险变化的实际需求。由此,搭建一个基于风险动态评估的防控措施改进模型,是提升化工车间本质安全水平的重要办法。

1 粉尘爆炸风险识别

1.1 粉尘爆炸的基本原理

粉尘爆炸,作为化工领域里一种极为典型的灾害形式,发生机制与粉尘自身物理化学特性以及和空气混合比例的动态变化紧密相连。根据爆炸力学理论,粉尘颗粒的粒径分布、比表面积

及表面能等参数直接影响其可燃性,当粒径小于 $75\ \mu\text{m}$ 时,粉尘悬浮态的燃烧速率显著提升^[4]。粉尘与空气混合时,其比例必须处于爆炸下限(LEL)到上限(UEL)这个范围里,才能形成具有可燃性的混合物,而在这个过程当中,氧气会充当氧化剂参与到链式反应中,释放出大量热能,进而引发压力急剧升高。从热力学视角细致审视,粉尘爆炸会历经预热、分解、燃烧以及膨胀这四个紧密相连的阶段,而在燃烧阶段所产生的冲击波,往往成为致使设备严重受损、人员不幸伤亡的关键“元凶”。

1.2 粉尘爆炸的触发条件

粉尘爆炸发生,需要点火源、粉尘浓度以及氧气含量这三个要素共同起作用、相互配合才行。点火源种类繁多,涵盖机械火花、静电放电、电弧、高温表面以及自燃等类型,在这些点火源中,静电放电凭借能量集中、隐蔽性强的特点,成了化工车间里最为常见的引爆源头。粉尘浓度阈值会受到粉尘自身种类、粒径具体分布情况以及所处环境温湿度的多重影响,比如铝粉爆炸下限数值是 $40\text{g}/\text{m}^3$,再看玉米淀粉,其爆炸下限则为 $35\text{g}/\text{m}^3$,当粉尘浓度超出上限后,会因氧气量不够而使得燃烧过程受到限制。

1.3 粉尘爆炸风险评估方法

定量风险评估(QRA),作为粉尘爆炸风险评估领域里的核心方法,能够借助构建事故场景模型,精准量化爆炸后果的严重程度以及发生概率。QRA借助故障树分析(FTA)与事件树分析(ETA)这两项技术,找出可能引发爆炸的关键路径以及事件发生的先后序列。以除尘系统作为分析对象,FTA能对风机故障、管道出现泄漏、静电不断积累等各类事件的组合发生概率展开剖析,ETA则会针对不同防护措施失去效用时所产生的后果等级予以评估。从工艺流程的独特视角出发,识别各类偏差以及潜在风险。

2 粉尘爆炸风险防控措施

2.1 粉尘爆炸预防措施

粉尘爆炸预防的关键,在于从粉尘产生的源头进行把控,防止粉尘产生与积聚,通过优化粉尘收集系统,选用脉冲布袋除尘器这类高效除尘设备,能将作业环境里的粉尘浓度有效降低,让其远远低于爆炸下限(LEL)。工艺改进方面,通过密闭化生产流程设计,减少物料转运过程中的粉尘逸散,例如采用负压输送技术替代传统机械输送,可降低粉尘扩散风险^[5]。粉尘储存环节的储罐需设计成全封闭式结构,还要配备上呼吸阀以及氮气保护装置,如此一来,能有效防止粉尘与空气混合,进而避免形成爆炸性环境。定期对设备表面及管道内部积聚的粉尘进行清理,防止局部粉尘浓度过高,进而引发二次爆炸事故。

2.2 粉尘爆炸抑制措施

抑爆系统作为粉尘爆炸防控的关键技术手段,能够迅速捕捉爆炸初期信号,并及时启动抑制装置,有效阻断爆炸链式反应的持续蔓延。常见抑爆装置主要有机械式抑爆器以及化学抑爆器这两种,机械式抑爆器借助释放抑爆剂,像碳酸氢钠这类物质,来覆盖火焰前锋,而化学抑爆器是利用化学抑制剂,例如磷酸铵

盐,中断燃烧反应链。惰性气体保护技术运用向密闭空间充入氮气或者二氧化碳的方式,把氧气浓度降低到维持燃烧需要的最小限度之下,进而达到抑制爆炸产生的目的。

2.3 粉尘爆炸隔离措施

物理隔离措施借助搭建防爆墙、设置隔离阀等各类结构,来约束爆炸冲击波和火焰的传播范畴,以此保障相邻区域里设备与人员的安全。防爆墙在进行设计时,必须将爆炸压力波带来的冲击强度纳入考量范围,选用钢筋混凝土或者防爆板来构建,且墙体厚度与强度要达到抗爆设计规范所提出的要求。化学隔离措施借助使用阻燃材料,或者在粉尘中添加阻燃剂的方式,来降低粉尘自身所具有的可燃性以及爆炸性。阻燃材料,像阻燃橡胶、阻燃涂料这类,能够涂覆在设备表面或者铺设在管道内壁,从而有效抑制火焰的传播速度。阻燃剂添加到粉尘中后,能够改变粉尘原本的燃烧特性,让粉尘的点燃能得到提升,或者使燃烧速率有所降低。

2.4 粉尘爆炸应急响应

应急预案制定要充分考量风险评估结果,明确事故分级响应标准、应急组织架构以及具体职责分工。预案内容需将爆炸初期处置、人员疏散行动、医疗救护措施、消防灭火流程等关键环节纳入其中,且要定期开展演练来检验其是否可行。以某化工企业为例,其每年都会开展两次粉尘爆炸专项应急演练活动,在演练中会模拟各种不同场景下的爆炸事故,以此检验应急队伍的快速反应能力以及协同作战水平。应急物资准备涵盖灭火器材,像二氧化碳灭火器、干粉灭火器这类,还有个人防护装备,比如防爆服、呼吸器,以及医疗急救设备等等,这些物资的配置数量还有类型,要依照车间规模以及风险等级来定。除此之外,还需搭建起一套应急物资动态管理机制,安排专人定期检查设备运行状态,保障设备随时能用。

3 粉尘爆炸风险防控措施的实践与改进

3.1 实践案例分析

某化工企业生产车间内,粉尘浓度严重超标,进而引发了一场猛烈的爆炸事故,这场事故带来了极为惨重的人员伤亡以及大量设备的损毁。该车间以生产聚乙烯粉末为主业,其工艺流程囊括了破碎、筛分以及混合等多个关键环节,而这些环节无一例外都潜藏着粉尘逸散的风险。事故调查发现,粉尘收集系统在设计时容量就存在不足,除尘设备长时间一直处于超负荷运转状态,这使得车间内粉尘浓度一直维持在爆炸极限范围里。事故发生之后,该企业迅速采取一系列防控举措:增添高效脉冲除尘器,对通风系统布局精心优化,装上在线粉尘浓度监测装置,还建立起定期清扫制度。措施实施之后,车间内粉尘浓度的平均值从事故发生前的 $35\text{g}/\text{m}^3$ 成功降低到了 $8\text{g}/\text{m}^3$,这一数值低于爆炸下限(通常情况下爆炸下限为 $20\text{--}60\text{g}/\text{m}^3$,具体数值会依据粉尘种类有所不同)。运用HAZOP分析方法,识别出混合环节存在静电积聚风险,随后增设防静电接地装置,静电火花引发事故的几率大幅下降。

3.2 风险防控措施的改进建议

当前化工车间里,粉尘爆炸防控措施存在三个明显不足:技术方面,部分企业依旧依赖传统除尘设备,这些设备对超细粉尘(粒径小于 $10\ \mu\text{m}$)的捕集效率不够高,致使逃逸粉尘可能形成二次爆炸隐患;管理方面,风险评估大多采用定性方法,缺少基于QRA(定量风险评估)的量化数据作为支撑,精准制定防控策略变得困难;人员方面,操作人员对粉尘爆炸机理了解不够,存在违规清扫、没佩戴防尘口罩等行为,人为致灾风险随之增加。

改进方向需紧紧围绕技术层面的升级、管理环节的精细化以及人员综合能力的提升来展开。技术方面,积极推广湿式除尘、电除尘这类高效捕集技术,力求把车间粉尘浓度控制在爆炸下限的50%范围之内;管理层面,搭建“风险分级管控+隐患排查治理”的双预防机制,借助大数据对历史事故数据展开分析,进而优化HAZOP分析节点;人员方面,开展“理论+实操”双轨制培训,保证员工能掌握粉尘爆炸五要素,即(可燃粉尘、氧气、点火源、扩散、封闭空间)的防控关键,目标是让违规操作率降到5%之下。

技术改进层面,对除尘系统展开智能化改造工作,增添压力差监测以及自动反吹功能,有效解决因滤袋堵塞引发的效率降低问题;管理优化角度,引入数字化风险管控平台,能够实时集成粉尘浓度、设备状态、人员定位等多方面数据,达成风险动态可视化效果;培训加强方向,开发VR模拟爆炸场景,使员工在虚拟环境里真切体验事故后果,进一步强化安全意识。同时,参照《化工企业粉尘防爆安全规程》(GB 15577-2018),完善清扫制度,明确清扫频次、工具选择(如防静电刷)及废弃物处理流程,从源头减少粉尘积聚。

3.3 风险防控措施的实施难点与对策

实施过程中,会碰到三大难题:技术方面,超细粉尘捕集与防爆技术要求严苛,部分中小企业难以自行研发;资金方面,高效除尘设备、智能监测系统采购价是传统设备的2倍到3倍,企业投资积极性不高;人员方面,老员工习惯了传统操作,对新技术、新制度心存抵触,使得措施执行难以落到实处。面对技术方面的难题,借助产学研合作引入外部技术力量,比如和高校携手共同研发适用于超细粉尘的复合滤料;资金不够充裕时,申请政府安全专项补贴,或者用融资租赁模式把设备成本分摊开;人员存在抵触情绪时,搭建“培训-考核-激励”机制,把安全操作放进绩

效考核里,给表现突出的人给予奖励。面对跨部门协作方面出现的难题,能成立由总经理亲自挂帅的安全委员会,统一规划清扫、检修计划,清晰划分各部门职责以及时间节点,防止出现相互推诿扯皮情况。构建“PDCA循环”(计划-执行-检查-处理)这一持续改进机制,按季度对各项防控措施展开效果评估工作。监测指标涵盖了多个方面,具体有粉尘浓度达标率、设备故障率以及员工违规操作率等。当察觉到某个特定区域粉尘浓度长时间超出标准范围,需重新开展HAZOP分析,找出新出现的风险点;若设备出现故障的频率不断上升,需检查维护计划有无不合理之处。借助物联网技术,能够达成监测数据的实时上传,再依靠机器学习算法对风险趋势做出预测,进而提前实施干预举措,最终形成“监测-分析-改进”的闭环管理模式。

4 结论

依托粉尘爆炸动力学理论,针对化工车间粉尘爆炸风险,需搭建起一套包含预防、有效抑制、可靠隔离以及应急响应的动态技术防控体系。定量风险评估(QRA)与危险与可操作性分析(HAZOP)的联合应用,可精准识别粉尘浓度超限、点火源失控等关键风险点。实践显示,若运用分级防控策略,像对粉尘收集系统进行优化,让悬浮粉尘浓度降到爆炸下限的50%之内,再搭配惰性气体保护技术,把氧气体积分数控制在12%以内,便能大幅降低爆炸发生的可能性。未来,应着重加强风险监测数据的实时剖析工作,把机器学习算法融入其中,优化防控参数的动态调整方式,从而更好适应化工工艺不断更新所产生的新风险特点。

[参考文献]

- [1]王玮春,王佳思.涂料化工工艺生产中的关键风险识别及综合防控措施研究[J].山东化工,2025(8):256-258.
- [2]魏波.污泥干化粉尘爆炸事故安全防控措施[J].广州化工,2023(1):132-134.
- [3]谢振华.粮食仓储企业粉尘爆炸风险分析及防控措施研究[J].粮食与油脂,2022(2):98-101.
- [4]杨永勋.论工贸行业粉尘爆炸安全风险管控措施[J].区域治理,2022(24):0097-0100.
- [5]王成.化工园区危运车辆安全风险分析及防控措施研究[J].化工安全与环境,2023(12):10-13.