

粉尘爆炸危险性评估及防控技术研究进展

张 恒

浙江吉润梅山汽车零部件有限公司 浙江宁波

【摘要】工业领域粉尘应用增多，粉尘爆炸威胁生产安全。阐述粉尘爆炸原理，其依赖可燃粉尘、助燃剂、点火源与合适浓度条件。危险性评估涵盖定性的检查表法、危险与可操作性研究，定量的道化学火灾爆炸指数法、事故树和事件树分析，以及综合的层次分析法与模糊综合评价法。防控技术从工艺优化减少粉尘、通风除尘控浓度、消除点火源及泄爆抑爆隔爆等方面着手。通过系统梳理研究进展，为工业预防粉尘爆炸、保障生产安全提供理论与实践参考。

【关键词】粉尘爆炸；危险性评估；防控技术；爆炸条件；安全保障

【收稿日期】2025 年 6 月 13 日

【出刊日期】2025 年 7 月 11 日

【DOI】10.12208/j.jer.20250332

Research progress on dust explosion hazard assessment and prevention technology

Heng Zhang

Zhejiang Jirun Meishan Automotive Components Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang

【Abstract】 The use of dust in industrial applications has increased, posing a significant threat to production safety through dust explosions. This paper explains the principles of dust explosions, which depend on combustible dust, oxidizers, ignition sources, and appropriate concentration conditions. Hazard assessment methods include qualitative checklists, hazard and operability studies, quantitative methods such as the Dow Fire and Explosion Index, accident tree and event tree analysis, and comprehensive approaches like the Analytic Hierarchy Process (AHP) and fuzzy comprehensive evaluation. Prevention technologies focus on optimizing processes to reduce dust, controlling concentrations through ventilation and dust removal, eliminating ignition sources, and implementing explosion relief and isolation measures. By systematically reviewing research advancements, this paper aims to provide theoretical and practical references for preventing dust explosions and ensuring production safety in the industrial sector.

【Keywords】 Dust explosion; Hazard assessment; Prevention technology; Explosion conditions; Safety assurance

引言

现代工业快速发展，粉尘在众多生产环节广泛存在。但频繁发生的粉尘爆炸事故，给人员生命、财产安全和工业可持续发展带来巨大冲击。准确评估粉尘爆炸危险性，研发并应用高效防控技术，是降低事故风险、保障工业稳定运行的关键。深入探究粉尘爆炸危险性评估及防控技术研究进展，对解决工业生产安全问题具有重要的现实意义。

1 爆炸原理解析

粉尘爆炸的本质是一场发生在微观与宏观之间的剧烈氧化风暴。可燃粉尘作为这场风暴的“燃料”，其化学属性与物理形态扮演着决定性角色。有机粉尘如煤粉、面粉等，因富含碳氢元素，在遇到合适条件时极易与氧气发生剧烈反应；而金属粉尘如铝粉、镁粉，虽

化学性质稳定，但在细微颗粒状态下，其巨大的比表面积使得表面原子活性激增，与空气中的氧气接触时如同埋下了无数“微型炸弹”。颗粒粒径更是关键变量，当粉尘粒径小于 75 微米时，单位质量的粉尘与氧气接触面积呈指数级增长，这种纳米级别的“接触革命”，为后续的连锁反应提供了物质基础。

粉尘云的形成过程如同一场精密的化学反应预演。在工业生产中，物料破碎、研磨、筛分等工序会持续释放粉尘，当这些粉尘在气流作用下悬浮于空气中，便形成了具有潜在爆炸性的粉尘云。粉尘浓度需处于特定的爆炸极限范围内才能发生爆炸：浓度过低时，可燃粉尘颗粒分散，无法形成连续的反应链；浓度过高则会因氧气供应不足而抑制反应。这个微妙的浓度平衡点，恰似点燃爆炸的“导火索”^[1]。而常见的点火源，无论是

电气设备产生的电火花,还是机械摩擦产生的高温,都能瞬间提供足以突破粉尘表面活化能的能量,成为引爆这场微观战争的“扳机”。

爆炸发生时的连锁反应机制堪称自然界的“暴力美学”。当点火源触及粉尘云,表面分子率先发生氧化反应,释放出的热量迅速传递给周边粉尘,使其温度急剧升高并气化。气化后的可燃气体与氧气进一步混合,形成更易反应的气固两相体系,燃烧速度呈几何级数增长。这种“点燃-气化-再燃烧”的循环过程,如同多米诺骨牌般迅速蔓延,在极短时间内释放出巨大能量^[2]。爆炸产生的冲击波与高温火焰不仅会直接破坏设备,还会扬起沉积粉尘,形成二次爆炸,使事故危害呈指数级扩大。理解这一复杂过程,是破解粉尘爆炸风险的第一道密码。

2 评估方法梳理

定性评估方法是粉尘爆炸风险识别的“放大镜”。检查表法以其系统性与直观性成为基础工具,它将生产流程拆解为数百个检查条目,从原料储存区的防尘措施到设备检修时的粉尘清理规范,每个细节都被纳入风险排查范围。这种“地毯式”检查如同给生产系统做一次全面体检,能快速识别明显的安全隐患。危险与可操作性研究(HAZOP)则更具深度,通过对工艺参数的“假设性扰动”,模拟温度、压力、流速等变量偏离正常值时的潜在后果。专家团队围绕工艺流程展开头脑风暴,如同侦探般从蛛丝马迹中挖掘隐藏的风险,为工艺改进提供精准的“手术方案”。

定量评估方法为风险判定装上了“数字标尺”。道化学火灾爆炸指数法以物质的潜在能量为起点,结合工艺过程中的特殊危险因素,通过严谨的数学模型计算出表征破坏力的指数值。这个数值不仅能直观反映事故潜在危害,还能帮助企业进行风险分级管理^[3]。事故树分析则采用逆向思维,从已发生的爆炸事故入手,像拆解机械钟表般逐层剖析导致事故的逻辑链条,找出每个环节的关键因素;事件树分析则反其道而行之,从初始事件出发,推演可能出现的各种后果及其概率,为制定应急预案提供科学依据。

综合评估方法实现了定性与定量的“珠联璧合”。层次分析法(AHP)通过构建多层次指标体系,将复杂的评估问题分解为可操作的子项,利用专家经验为每个指标赋予权重,建立起主观判断与客观数据的桥梁。模糊综合评价法则巧妙处理了风险评估中的不确定性,将“高风险”“中等风险”等模糊概念转化为精确的数值区间^[4]。两者结合后,既能发挥定性分析的灵活性,

捕捉难以量化的管理漏洞,又能通过数学运算提升评估结果的客观性。这种融合方法如同给风险评估配备了“显微镜”与“望远镜”,既能看清局部细节,又能把握整体态势,为企业提供更科学全面的决策依据。

3 防控技术构建

生产工艺优化是粉尘爆炸防控的“源头治理”策略。密闭化生产系统通过将物料输送、加工等环节封装在封闭空间内,从根本上切断粉尘与空气的接触路径。以面粉加工行业为例,传统开放式研磨设备会产生大量扬尘,而新型全封闭磨粉机组通过负压输送与密封轴承技术,将粉尘泄漏量降低至近乎为零。自动化升级则进一步减少了人为操作带来的风险,智能控制系统能根据物料特性自动调整设备运行参数,避免因操作不当导致的粉尘异常逸散。设备选型的精细化同样关键,选用低扬尘的粉碎设备、防泄漏的输送装置,如同为生产系统穿上了“防尘铠甲”,从源头上削弱爆炸发生的物质基础。

在现代工业生产中,通风除尘系统扮演着至关重要的角色,它构成了粉尘浓度控制的“铜墙铁壁”。全面通风系统就像是给车间安装了一个巨大的换气扇,通过不断地引入新鲜空气,有效地稀释了车间内的粉尘浓度,从而为工人的健康和安全提供了基础保障。而局部通风系统则像是一台精准的吸尘器,它在粉尘产生的源头附近进行捕集,有效地防止了粉尘的扩散,确保了工作环境的清洁。这些系统共同作用,为车间提供了一个相对安全的生产环境。不同类型的除尘设备各有其独特的优势和作用^[5]。布袋除尘器就是其中的佼佼者,它依靠滤材的拦截作用,能够高效地捕捉到极其细微的粉尘颗粒,仿佛为车间的空气设置了一道“滤网关卡”,确保了空气的清洁。旋风除尘器则利用离心力的原理,将粉尘从气流中分离出来,就像是一场微观世界的“龙卷风”,将粉尘颗粒卷走,从而净化了空气。静电除尘器则通过高压电场的作用,使粉尘颗粒带上电荷,然后吸附至极板上,实现了粉尘与空气的“隔空分离”,这种技术在处理大量粉尘时尤为有效。

爆炸防护技术是应对突发险情的“最后防线”。泄爆设计通过在设备上设置特殊的泄压装置,当爆炸压力达到预设值时,泄爆板瞬间开启,如同给爆炸能量打开“安全阀门”,将冲击波导向安全区域。抑爆系统则像反应敏捷的“灭火卫士”,安装在管道或设备内的传感器一旦检测到爆炸初期的火焰或压力骤升,抑爆剂便会在毫秒级时间内喷射而出,迅速扑灭火焰、抑制爆炸发展^[6]。隔爆设施如阻火器、隔爆阀等,犹如阻

断爆炸传播的“防火墙”，通过物理隔断或化学抑制，阻止爆炸火焰和压力在管道系统中蔓延，避免引发二次爆炸。这些技术相互配合，形成了从预防到应急的完整防护体系。

4 研究趋势展望

工业生产场景的复杂性正倒逼粉尘爆炸防控技术加速迭代。传统评估方法在面对动态变化的生产环境时，往往暴露出响应滞后、适应性不足的问题。人工智能技术的引入为风险评估带来了革命性突破：基于深度学习的算法能够实时分析传感器采集的海量数据，从温度、湿度、粉尘浓度等多维信息中捕捉细微的异常波动，如同给系统装上了“智能预警大脑”。物联网技术则构建起设备间的“神经网络”，实现对生产全流程的实时监控与远程管理。这些技术的融合，使风险评估从被动响应转向主动预测，让安全管理模式从“亡羊补牢”升级为“未雨绸缪”。

智能化防控设备将成为未来技术发展的核心方向。自适应除尘系统通过集成浓度传感器与智能控制系统，能够根据实际粉尘浓度自动调节风机转速与清灰频率，在保证除尘效率的同时降低能耗，实现“按需运行”。智能抑爆装置则具备环境感知与自主决策能力，可根据爆炸强度和传播方向动态调整抑爆剂喷射策略，确保在最短时间内抑制爆炸^[7]。这些设备如同具备“思考能力”的安全卫士，能够在无人干预的情况下快速响应危险状况。新材料的研发也将为防控技术注入新活力，纳米涂层材料可赋予设备表面超疏尘特性，自修复密封材料能自动填补设备缝隙，从材料层面提升系统的本质安全性。

跨学科融合正在开辟粉尘爆炸防控的新赛道。将流体力学与燃烧学结合，能够更精准地模拟粉尘爆炸的传播规律，为防护设计提供理论支撑；借助材料科学的突破，开发出兼具防爆与散热功能的新型复合材料，可应用于电气设备外壳和管道系统。生物学与工程学的跨界合作，催生了仿生除尘技术——模仿荷叶表面的微纳结构设计除尘滤网，利用自然原理实现高效自清洁^[8]。这些跨领域的创新成果，不仅推动了理论研究的深化，更在实际应用中展现出巨大潜力。未来，随着

5G、区块链等技术的深度融入，粉尘爆炸防控将形成“智能感知-精准评估-动态防控”的完整生态，为工业安全构筑起坚不可摧的数字防线。

5 结语

当前已明确粉尘爆炸原理，形成多元评估方法与综合防控技术体系。定性、定量及综合评估方法为风险判断提供依据，工艺优化、通风除尘、点火源控制与爆炸防护等技术协同保障生产安全。未来，需针对复杂场景，深化微观机理研究，完善评估模型；加快人工智能、物联网等技术融合，推动防控设备智能化；加强跨学科合作，开发新型材料与技术，构建更高效的粉尘爆炸防控体系。

参考文献

- [1] 于立富,李航,张福群,等.抛光镁铝合金粉尘爆炸风险评估[J].安全与环境学报,2024,24(11):4154-4161.
- [2] 许开立,陈西萌,刘博.乌龙茶叶粉尘爆炸特性实验研究[J].东北大学学报(自然科学版),2024,45(07):1057-1064.
- [3] 孙凯.矿井粉尘安全评价及防治措施优化研究[J].山东煤炭科技,2024,42(06):72-78.
- [4] 李为,汪圣华,钱健龙,等.阿卡波糖粉尘爆炸特性及危险性分析研究[J].中国安全生产科学技术,2024,20(05):123-129.
- [5] 司恭.化工行业涉爆粉尘风险现状分析与建议[J].化工安全与环境,2024,37(05):79-81.
- [6] 葛双优.金属 3D 打印工艺火灾爆炸危险性分析与评价[J].中国设备工程,2024,(07):19-22.
- [7] 崔裕洋,林军.不同粒径对苯二甲酸粉尘爆炸特性研究[J].安全与健康,2023,(11):55-58.
- [8] 刘晓妍,杨瑞霞,李晓泉,等.微米级锌粉的爆炸危险性[J].中国粉体技术,2023,29(05):33-39.

版权声明：©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

