

冶金行业铝粉爆炸危险性评估及防控技术分析

卓开凯

宁波乾业安全科技有限公司 浙江宁波

【摘要】冶金行业中，铝粉因自身特性在生产、储存及运输等环节存在爆炸风险，严重威胁人员安全与生产稳定。本研究聚焦铝粉爆炸危险性，深入剖析其爆炸机理与引发因素，涵盖粉尘特性、点火源及环境条件等方面。详细阐述多种危险性评估方法，包括基于理论模型与实验测试等手段。防控技术层面，从工艺优化、设备改进到安全管理措施均有涉及。通过综合分析，旨在为冶金行业铝粉安全使用提供系统、有效的指导，降低爆炸事故发生可能性，保障行业安全发展。

【关键词】冶金行业；铝粉爆炸；危险性评估；防控技术；安全管理

【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.20250344

Technical analysis of explosion risk assessment and prevention technologies for aluminum powder in the metallurgical industry

Kaikai Zhuo

Ningbo Qianye Safety Technology Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang

【Abstract】In the metallurgical industry, aluminum powder poses explosion risks during production, storage, and transportation due to its inherent properties, severely threatening personnel safety and production stability. This study focuses on the explosion risks of aluminum powder, thoroughly analyzing its explosion mechanisms and triggering factors, including dust characteristics, ignition sources, and environmental conditions. It also elaborates on various risk assessment methods, such as theoretical models and experimental tests. On the prevention and control technology front, it covers process optimization, equipment improvements, and safety management measures. Through comprehensive analysis, this work aims to provide systematic and effective guidance for safe aluminum powder usage in the metallurgical industry, reducing the likelihood of explosion accidents and ensuring sustainable industry development.

【Keywords】Metallurgical industry; Aluminum powder explosion; Risk assessment; Prevention and control technologies; Safety management

引言

在冶金行业蓬勃发展的当下，铝粉作为重要原料广泛应用。其易燃易爆特性引发的爆炸事故时有发生，造成了严重的人员伤亡与财产损失。铝粉爆炸不仅对生产设施产生巨大破坏，还会对周边环境造成污染，影响社会稳定。深入研究铝粉爆炸危险性评估方法，探寻高效防控技术，对保障冶金行业安全生产、促进可持续发展具有紧迫且重要的现实意义。如何精准识别铝粉爆炸风险，采取切实可行的防控手段，成为行业亟待解决的关键问题。

1 铝粉爆炸的原因剖析

铝粉作为一种高活性金属粉末，其爆炸危险性源于独特的物理化学属性。铝粉颗粒直径通常处于微米

级，这种极小的粒径使得其比表面积呈指数级增长。每单位质量的铝粉暴露在空气中的表面积可达普通铝制品的数百倍，大量处于表面的铝原子因缺少内层原子的电子屏蔽，呈现出极强的化学活性。当与空气中的氧气接触时，这些表面原子会自发发生氧化反应，瞬间释放大量热能。这种氧化反应不仅在常温下持续进行，而且一旦环境条件适宜，氧化速度会急剧加快。

铝粉爆炸的触发需要满足三个必要条件：可燃粉尘、助燃剂与点火源。作为可燃性粉尘，铝粉与空气混合后，会形成高度分散的粉尘云。当粉尘浓度处于爆炸极限范围内时，每个铝粉颗粒都成为潜在的反应单元。以生产车间为例，若通风系统故障或设计不合理，铝粉在机械加工、研磨等工序中产生的粉尘无法有效排出，

便会在车间内逐渐积聚^[1]。此时,即使是极微弱的能量,如人体衣物摩擦产生的静电火花、设备电路老化引发的微小电弧,都足以瞬间点燃粉尘云中的铝粉颗粒。

生产、储存和运输全链条中存在诸多潜在风险因素。在生产环节,机械设备的设计缺陷和操作失误是引发爆炸的主要诱因。研磨设备若采用传统的开放式结构,铝粉在研磨过程中极易外溢,形成悬浮于空气中的粉尘云。操作人员如果未严格按照规范流程开启和关闭设备,或者在设备运行时进行违规检修,都会增加粉尘泄漏的概率。在储存阶段,铝粉对环境湿度极为敏感。若仓库防潮措施不到位,铝粉会与水发生缓慢的化学反应,生成氢气和氢氧化铝。氢气作为易燃易爆气体,与空气混合后同样具有爆炸风险,并且其爆炸极限范围更广,进一步加剧了储存环节的危险性^[2]。运输过程中的风险则主要来自物理冲击和环境变化。车辆行驶过程中的颠簸、急刹车,以及装卸过程中的碰撞,都可能导致铝粉包装破损,粉尘泄漏。运输途中的高温、潮湿等极端天气条件,也会加速铝粉的氧化和化学反应,提升爆炸隐患。

2 铝粉爆炸危险性评估方法

理论模型评估是基于物理化学原理构建的数值模拟体系。计算流体力学(CFD)模型通过求解纳维-斯托克斯方程,结合传热传质理论和化学反应动力学方程,能够对铝粉爆炸过程进行多维度模拟。在构建模型时,需要精确输入铝粉的粒度分布、密度、比热容等物理参数,以及环境温度、压力、风速等外部条件。模型可模拟铝粉从泄漏到形成粉尘云的扩散过程,预测粉尘浓度在空间中的分布情况。通过设定不同点火源的位置和能量,能够分析爆炸火焰的传播路径、速度以及冲击波的衰减规律。这种方法不仅可以直观呈现爆炸发展过程,还能对生产设施布局、通风系统设计等进行优化。通过调整车间内通风口的位置和数量,可有效降低粉尘积聚风险,为前期设计提供科学依据。

实验测试评估依赖于标准化的测试装置和严格的实验流程。粉尘爆炸测试装置通常由密闭爆炸罐、粉尘分散系统、点火系统和数据采集系统组成。实验时,将一定质量的铝粉放入粉尘分散系统,通过高压气体瞬间释放,使铝粉在爆炸罐内均匀分散,形成稳定的粉尘云^[3]。随后,利用高能点火器在特定位置点燃粉尘云,安装在爆炸罐壁上的压力传感器、温度传感器和火焰探测器会实时记录爆炸过程中的压力上升速率、最大爆炸压力、爆炸温度以及火焰传播速度等关键参数。这些数据直接反映了铝粉在不同条件下的爆炸特性。通

过改变实验参数,如粉尘浓度、颗粒粒径、初始温度和湿度等,可以系统研究各因素对爆炸危险性的影响。逐步增加铝粉浓度,观察爆炸压力随浓度的变化趋势,从而确定最危险的粉尘浓度区间。

风险矩阵评估是一种综合定量与定性分析的评估方法。首先,对铝粉爆炸发生的可能性进行分级评估。评估依据包括历史事故统计数据、设备运行状况、人员操作规范程度等因素。对于频繁出现设备故障、员工安全培训不足的企业,其爆炸发生可能性评分较高。其次,评估爆炸后果的严重程度,主要考虑对人员生命安全、财产损失和环境破坏的影响^[4]。人员伤亡数量、设备损毁程度以及污染物扩散范围等指标被纳入评估体系。通过将可能性和后果严重程度划分为不同等级,并构建二维矩阵,将铝粉爆炸风险定位在相应的风险等级区域。对于处于高风险区域的生产环节或场所,需采取强化防控措施,如增加安全巡检频次、安装实时监测设备;而对于低风险区域,则可适当降低管理强度,实现资源的合理分配。

3 铝粉爆炸防控技术措施

工艺优化防控旨在从源头上消除或降低爆炸风险。密闭式生产工艺是核心手段之一,通过将整个生产流程封闭在一个相对独立的空间内,最大限度减少铝粉与外界空气的接触。在铝粉研磨工序中,采用全封闭研磨设备,配合负压吸尘系统,可将研磨过程中产生的粉尘及时收集,防止其逸散到车间环境中。工艺流程的优化同样重要,减少物料的中间转运环节,缩短铝粉暴露在开放环境中的时间。将多个分散的加工工序整合为连续化生产线,使用管道输送替代人工搬运,降低了因物料倾倒、洒落导致的粉尘飞扬风险。湿法工艺则是利用液体介质抑制粉尘产生,将铝粉与水或其他惰性液体混合形成浆料,在保持铝粉活性的避免粉尘与空气直接接触,从根本上消除粉尘爆炸的可能性。

设备改进防控围绕生产、储存和运输各环节的设备展开。在生产设备选型上,优先采用防爆型设备,如防爆电机、防爆配电柜等,这些设备通过特殊的结构设计和材料选择,能够防止内部电火花或高温传递到外部环境。对于旋转机械、输送设备等易产生摩擦和静电的部位,采用防静电材料和良好的接地措施,及时导除设备运行过程中产生的静电^[5]。设备维护保养制度的完善至关重要,定期检查设备的密封性能,更换老化的密封件,确保铝粉不会泄漏。储存设备方面,仓库需配备自动通风系统和湿度控制系统,当环境湿度超过安全阈值时,自动启动除湿设备;采用防爆型照明和通风设

备,防止电气火花引发爆炸。运输设备则需选用专门设计的防爆运输车辆,车辆配备防静电接地装置和粉尘泄漏报警系统,确保运输过程安全可控。

安全管理防控是保障铝粉安全生产的重要防线。企业需建立健全安全管理制度体系,明确各岗位的安全职责和操作规范。通过定期组织安全培训,提高员工对铝粉爆炸危险性的认知水平,使其掌握正确的操作方法和应急处理技能。培训内容不仅包括理论知识讲解,还应结合实际案例分析和模拟演练,让员工直观感受爆炸事故的严重性和应对方法^[6]。制定严格的操作规程,对铝粉生产、储存、运输等各个环节的操作步骤进行详细规定,禁止任何违规操作行为。加强生产现场的安全检查,建立日常巡检和专项检查相结合的制度。日常巡检主要关注设备运行状态、粉尘积聚情况等;专项检查则针对重点部位和关键环节,如除尘系统、防爆设施等进行深入排查。及时发现并消除安全隐患,确保生产环境始终处于安全可控状态。

4 防控技术应用效果与展望

在实际工业应用中,铝粉爆炸防控技术已展现出显著成效。众多铝粉生产企业通过实施工艺优化和设备改进措施,有效降低了爆炸事故发生概率。采用密闭式生产工艺和高效除尘系统后,车间内的铝粉粉尘浓度大幅下降,减少了粉尘云形成的可能性。防爆设备的应用杜绝了因设备故障引发的点火源问题,进一步提升了生产安全性。严格的安全管理制度使员工安全意识显著增强,操作行为更加规范,人为因素导致的事故隐患明显减少^[7]。某大型铝粉生产企业在完成工艺升级和设备改造后,连续多年未发生重大爆炸事故,生产效率和经济效益也得到同步提升,证明了防控技术的有效性和实用性。

未来,铝粉爆炸防控技术将朝着智能化和创新化方向发展。智能化监测技术的应用将实现对生产全过程的实时监控和精准预警。通过部署大量传感器,对铝粉生产、储存和运输过程中的粉尘浓度、温度、压力、湿度等参数进行实时采集,并利用物联网技术将数据传输至中央控制系统。一旦监测数据超过预设阈值,系

统将立即发出警报,并自动启动应急处置程序,如关闭相关设备、启动通风系统等。借助大数据分析和人工智能算法,对历史数据进行深度挖掘,预测潜在风险,实现风险的超前防控^[8]。在新型材料和工艺研发方面,科研人员将致力于开发更高效的防爆材料,这些材料不仅具备优异的防爆性能,还能降低设备成本和维护难度。新的生产工艺将不断涌现,通过优化反应条件、改进加工方法,进一步降低铝粉的爆炸危险性,为冶金行业的安全生产提供更可靠的技术支撑。

参考文献

- [1] 张浩宇,徐豫新,王跃文,等.铝粉含量对 RDX 基含铝炸药空中爆炸能量输出特性的影响[J/OL].兵工学报,1-13[2025-07-30].
- [2] 韩磊,方展翔,叶腾钊,等.爆炸冲击下氟壳铝释能特性试验研究[J].北京理工大学学报,2025,45(05):444-452.
- [3] 赵江平,张舒淇,钟兴润,等.增材制造用铝及铝硅合金粉尘的爆炸特性[J].爆炸与冲击,2025,45(05):172-182.
- [4] 周聪.惰性介质对铝粉爆炸的抑制研究[J].山西化工,2025,45(04):156-157+175.
- [5] 陈飞翔,张国凯,何勇,等.温压炸药隧道内爆炸结构约束对冲击波及爆炸火团的影响规律[J/OL].爆炸与冲击,1-17[2025-07-30].
- [6] 邢婧,毕跃,崔瀚.铝粉遇水燃烧爆炸危险性的实验研究[J].黑龙江科技大学学报,2022,32(02):185-188.
- [7] 刘韦光.基于粗糙集与模糊数学的金属粉尘爆炸危险性评估模型的建立[J].电气防爆,2021,(02):14-17+21.
- [8] 李知衍,司荣军,李润之.混合金属粉尘爆炸最小点火能量影响因素研究[J].中国安全生产科学技术,2020,16(09):127-132.

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/>

