

中文引用格式:赵开功. 我国粉尘爆炸事故知识图谱统计分析[J]. 中国安全科学学报, 2026, 36(1): 35-41.

英文引用格式:ZHAO Kaigong. Statistical analysis of knowledge graph of dust explosion accidents in China[J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(1): 35-41.

我国粉尘爆炸事故知识图谱统计分析*

赵开功 高级工程师

(国家能源投资集团有限责任公司 安全环保监察部, 北京 100011)

中图分类号:X928.7

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.01.0866

资助项目:应急管理部重点科技计划项目(2024EMST121201); 国家能源集团化工生产安全管控系统建设项目(10032998FF200002)。

【摘要】 为系统探究我国粉尘爆炸事故的时空规律、致因机制与防控策略,通过融合知识图谱技术与统计分析方法,分析我国1990—2024年粉尘爆炸事故相关文献和事故案例;采用CiteSpace可视化软件构建知识图谱,识别粉尘爆炸事故的时空分布特征与致因逻辑链;建立“危险源-设施-管理-应急”4层防控体系框架,并通过典型案例验证其有效性。结果表明:粉尘爆炸风险呈现“类型分化”与“地域迁移”的特征,具体表现为金属粉尘频发、煤尘高致死率、粮食粉尘易引发高次生伤害等,且事故热点呈现从东部向中西部地区转移的趋势。粉尘清理不当和除尘系统缺陷是核心致灾因素,人员违章操作和非防爆设备使用是主要触发条件,且致因结构存在显著的粉尘类型差异性。实施差异化和精准化防控策略是提升粉尘爆炸事故防控效能的关键手段。

【关键词】 粉尘爆炸事故; 知识图谱; CiteSpace; 防控体系; 统计分析

Statistical analysis of knowledge graph of dust explosion accidents in China

ZHAO Kaigong

(Safety and Environmental Supervision Department, CHN Energy Investment Group Co., Ltd., Beijing 100011, China)

Abstract: This study aims to systematically explore the temporal and spatial patterns, causal mechanisms, and prevention and control strategies of dust explosion accidents in China. Knowledge graph technology combined with statistical analysis was used to analyze the relevant literature and accident cases of dust explosion accidents in China from 1990 to 2024. A knowledge graph was constructed using CiteSpace visualization software to analyze the spatiotemporal distribution characteristics and the accident causality chain of dust explosion accidents. A four-layer prevention and control system framework of "hazard source-facility-management-emergency" was constructed, and its effectiveness was verified by typical cases. It is found that the risk of dust explosion shows the characteristics of "type differentiation" and "geographical migration", with frequent occurrence of dust, high fatality of coal dust and high secondary injury of grain dust explosions. The accident hotspots are showing a trend of shifting from the eastern to the central and western regions. Inadequate dust cleaning and defective dust removal systems are central causes, while operational violations and use of non-explosion-proof equipment are main triggering conditions, and the causal structure varies significantly with dust types. The implementation of differential

and precise prevention and control strategies is the key means to improve the prevention and control efficiency of dust explosion accidents.

Keywords: dust explosion accident; knowledge graph; CiteSpace; prevention and control system; statistical analysis

0 引言

粉尘爆炸是工业领域典型的灾难性事故类型,在煤矿、金属加工、粮食加工等涉尘行业中高发,具有突发性强、破坏连锁性显著的特点,是威胁工业安全生产的重要隐患^[1-2]。近年来,知识图谱技术因其在呈现复杂关联、挖掘潜在规律方面的优势,被广泛用于系统揭示粉尘爆炸事故的复杂致因与演化规律。

诸多学者利用知识图谱技术开展了研究,如JI Wei等^[3]基于CiteSpace软件,对自动驾驶车辆交通事故开展知识图谱分析,揭示了事故预防技术的研究热点与发展趋势。LUO Qi等^[4]利用CiteSpace,针对建筑工人冒险行为,作研究进展与热点分析,强调了多因素耦合对行为形成的系统性影响。邓韞璇等^[5]收集我国地铁施工事故报告,构建了基于地铁事故的知识图谱,揭示了风险因素与事故之间的内在联系。许慧等^[6]整理建筑火灾事故数据,构建知识图谱形成知识库,并开展风险分析,发现火灾高发的时间、地域等特征。GE Huimin等^[7]运用文献计量与知识图谱方法系统梳理了驾驶风险识别的研究脉络。李长明等^[8]运用云模型理论,多维度分析煤矿粉尘监测等智能化系统建设项目。上述研究为粉尘爆炸事故的知识图谱构建提供了方法借鉴,然而,多数研究侧重于单一维度的风险因素识别或研究热点梳理,对事故发生的时间演进规律、空间分布差异及人员伤亡关联机制的揭示不够深入,且当前还缺乏针对粉尘爆炸这一典型工业事故的专项知识图谱研究。

鉴于此,笔者拟采用知识图谱技术,统计分析我国1999—2024年的粉尘爆炸事故案例,揭示粉尘爆炸事故研究的发展趋势,明晰事故发生的时间分布、空间特征、人员伤亡情况以及事故诱因,阐明其发生的内在规律,以期为制定针对性的粉尘爆炸事故预防与控制策略提供参考。

1 粉尘爆炸事故计量与统计分析

1.1 研究方法 with 工具

基于文献计量学方法,从文献发表数量、关键词共现图谱、关键词聚类等多个维度,使用CiteSpace

可视化软件进行知识图谱构建和分析。以中国知网数据库中的文献作为文献来源,以关键词粉尘爆炸和粉尘爆炸事故检索,时间跨度为1990年1月1日—2024年12月31日,共检索到相关文献1286篇。对文献进行初步筛选和去重清洗,共取得有效文献882篇。

为保证图谱的清晰性与代表性,在CiteSpace的参数设置上进行如下配置:时间切片设置为1990—2024年,单个时间切片长度设置为1年;阈值为每个切片中排名前50的文献;算法选择为关键词共现分析,采用其软件内置算法;采用对数似然比(Log-Likelihood Ratio, LLR)算法提取聚类标签。聚类结果的合理性通过模块值(Q值)和平均轮廓值(S值)进行评判。其中,Q值衡量网络社区划分的质量, $Q>0.3$ 认为聚类结构显著;S值衡量聚类内部的一致性,S值越接近1,表明聚类成员同质性越高。文中得到的聚类图谱Q值为0.737,S值为0.9595,表明聚类结构显著,结果信度较高。采用Freeman中介中心性算法计算关键词的中心度,用以衡量一个关键词在整个共现网络中的重要性程度,其值越高,表明该关键词对连接不同研究主题的作用越大。

1.2 关键词共现图谱分析

对粉尘爆炸的关键词进行共现图谱统计,词频数值越高表明该相关研究方向越是焦点,词频排名前10的关键词见表1。从表1中可以看出,粉尘爆炸领域的研究主题呈现高度集中性,其中,粉尘爆炸出现213次,作为核心关键词占据绝对主导地位,与爆炸(38次)粉尘(38次)共同构成基础研究框架。高频关键词煤尘爆炸(26次)和铝粉爆炸(5次)的频次差异,反映了行业风险关注度的不均衡性,煤矿安全仍是主要研究场景^[9-10],而铝粉等高危金属粉尘的研究仍需加强^[11]。次级关键词中,预防措施^[12](12次)和抑爆^[13](15次)等高频词表明防控技术是当前研究的重点方向。

文献中关键词节点之间连线越密集,表示其代表的研究领域关联程度越高,各关键词间通过线条形成区域的交叉越多,表示涉及的关键词联系越多。通过关键词共现网络的关键词频率得到研究热点。

表 1 高频关键词统计(前 10)

Table 1 Top 10 high-frequency keywords statistics		
高频关键词	频次	中心度
粉尘爆炸	213	0.67
爆炸	38	0.57
粉尘	38	0.18
煤尘爆炸	26	0.16
预防	20	0.09
抑爆	15	0.1
爆炸压力	14	0.09
爆炸下限	13	0.08
预防措施	12	0.09
事故树	9	0.37
铝粉爆炸	5	0.03

我国粉尘爆炸事故文献高频关键词分布如图 1 所示。

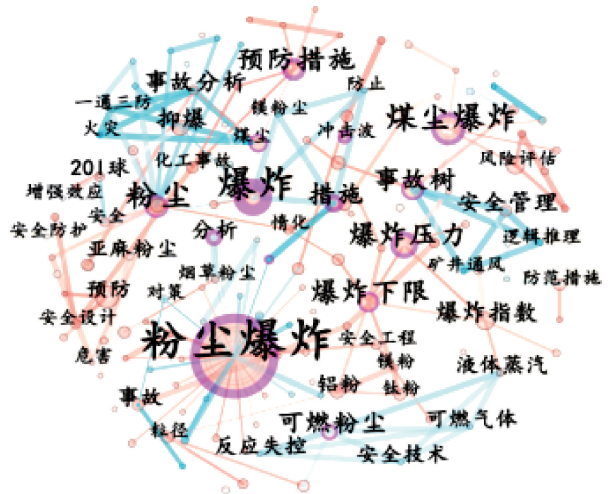


图 1 我国粉尘爆炸事故文献高频关键词分布

Fig. 1 Distribution of high-frequency keywords in research literature on dust explosion accidents in China

从图 1 中可以看出,爆炸防控技术体系以抑爆、预防措施为核心,爆炸压力的高关联性表明:压力参数已成为抑爆装置设计的核心指标,需结合数值模拟优化设备性能。在事故致因与风险评估方面,事故树、爆炸下限等关键词揭示了事故机制研究的深度。

1.3 关键词聚类图谱分析

为了更深层次挖掘粉尘爆炸事故研究的重点内容,在关键词共现的基础上进一步采用关键词聚类的算法对目标文献进行聚类分析。关键词包含粉尘爆炸、爆炸、预防、安全管理、粉尘等 12 个,如图 2 所示。聚类图谱的 Q 值为 0.737, S 值为 0.959 5,可认为聚类结果合理。

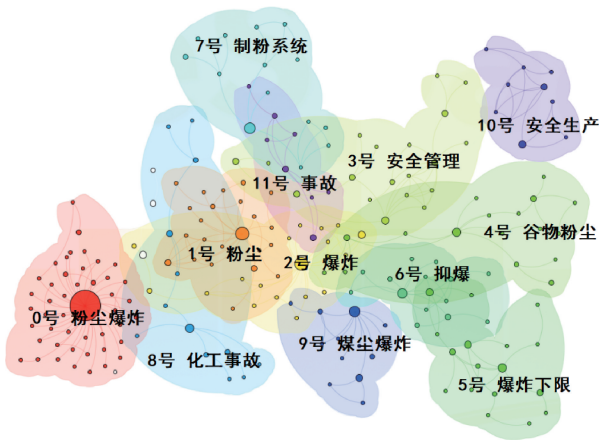


图 2 粉尘爆炸事故关键词聚类

Fig. 2 Clusters of keywords for dust explosion accidents

粉尘爆炸事故的关键词聚类分析揭示了风险形成与防控的复杂关联网络。粉尘类型与特性是风险的基础,谷物粉尘、煤尘、铝粉等不同物质因其物理化学性质差异显著影响爆炸可能性。谷物粉尘因淀粉含量高,在加工中易形成悬浮可燃云,煤尘爆炸因高能量释放和连锁反应成为煤矿主要威胁,铝粉则因低燃点和剧烈反应特性需特殊防护^[14-15],这些粉尘的粒度、比表面积及分散状态直接决定爆炸 5 要素的耦合条件。其中,爆炸指数是量化风险烈度的核心指标,为防爆设计提供依据;爆炸机制与安全管理的交叉映射凸显系统性风险;隐患的积累常源于除尘系统失效、防爆设备缺失等显性问题,而深层症结则指向安全培训虚化、应急预案形式化等体系缺陷;预防与事故的关联则指向分级防控逻辑。

2 粉尘爆炸事故知识图谱统计分析

统计我国 1999—2024 年发生的 106 起粉尘爆炸事故数量及伤亡情况,结果如图 3 所示,由图 3 可知:2000 年前,事故数量较少;随着工业规模扩张,粉尘爆炸风险逐渐暴露;2002 年后,事故数量显著增加。

2.1 粉尘爆炸事故地域分布

图 4 为近 25 年不同省份发生粉尘爆炸事故占比。从图 4 可以看出,粉尘爆炸事故发生的地域多集中于东部沿海经济带,纺织、家具、金属、食品加工等粉尘涉爆行业高度集中。浙江、广东、江苏和山东省事故总和占全国总量的约 50%。

2015 年后,粉尘爆炸事故的热点区域呈现出从传统制造业集中的江苏、浙江等东部省份向河北、新疆等中西部能源、资源大省转移的趋势,此变化与国家推动的产业转移和区域经济结构调整政策高度相

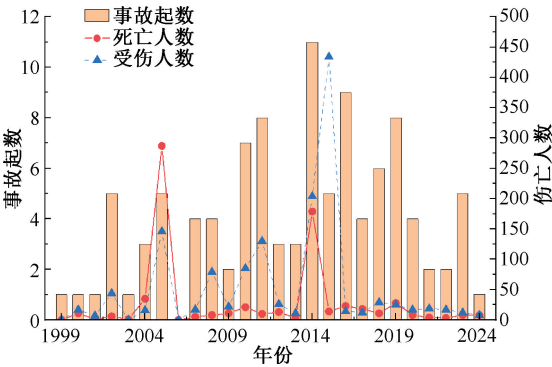


图 3 1999—2024 年粉尘爆炸事故数及伤亡情况

Fig. 3 Number of dust explosion accidents and casualties from 1999 to 2024

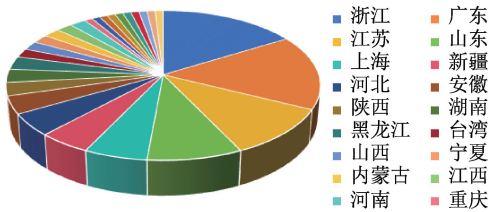


图 4 近 25 年不同省份发生粉尘爆炸事故占比

Fig. 4 Proportion of dust explosion accidents in different provinces over the past 25 years

关。东部地区经过多轮专项整治,安全监管水平和技术防护能力得到提升,同时,中西部地区承接了部分产业转移,煤炭开采、粮食加工、金属冶炼等涉爆产业规模扩大,但其安全管理和风险防控能力未能同步跟上,导致风险随之迁移和积聚。根据风险动态迁移的特性,应实施差异化的、动态调整的区域监管策略。

2.2 不同类型粉尘爆炸事故特征

依据《工贸行业重点可燃性粉尘目录(2015版)》,将粉尘分为金属粉尘、粮食粉尘、煤粉、木材粉尘、其他粉尘 5 类。其中,金属粉尘包括金属抛光、打磨工艺产生铝粉、镁粉等;粮食粉尘包括面粉、淀粉等;煤粉包括来自煤矿开采、洗选工艺的粉尘;木材粉尘包括来自切割、刨削工艺产生的木屑、木粉等;其他粉尘包括硫磺粉尘、硅粉、化学品粉尘等。统计 5 类粉尘导致的伤亡率,结果如图 5 所示。由图 5 可知:粉尘爆炸事故中,致死率最高的为煤粉爆炸,占事故总数 13%的煤粉爆炸导致 55%的死亡人数,单起事故平均死亡 28 人,呈现“低发高致死”特征。粮食粉尘事故数量占比为 20%,受伤人数占比为 48.8%,单起事故平均受伤 31.52 人,远超其他类型,表现为“易发高受伤”特性,高受伤率与爆炸后

火灾、坍塌等次生灾害密切相关。金属粉尘事故数最多,其中,铝镁粉尘爆炸指数高、受热易自燃、且金属颗粒易悬浮形成爆炸性云团,因此,铝镁粉尘事故更加难以防范^[16]。木材粉尘爆炸能量较低,多局限于加工设备内部,伤亡规模较小^[17]。其他粉尘的事故数量占比为 15%。总之,粉尘爆炸风险呈现“类型分化显著、伤亡机制各异”的特征,煤粉的灾难性后果、粮食粉尘的群伤风险、金属粉尘的高频发性是防控重点。

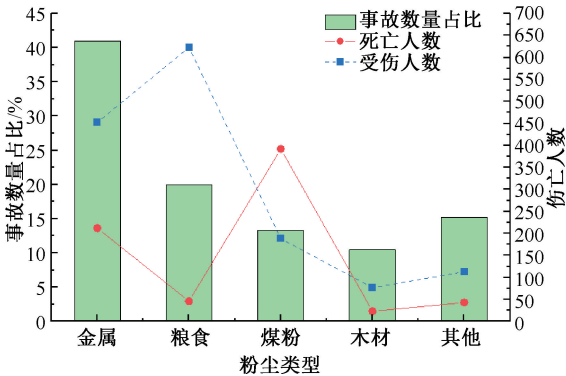


图 5 不同类型粉尘爆炸事故伤亡

Fig. 5 Casualties of different types of dust explosion accidents

2.3 粉尘爆炸事故主要原因分析

粉尘爆炸事故大部分为多因素叠加所致,单一因素致灾占比较少,分析 106 起粉尘爆炸事故原因的出现频次,结果如图 6 所示。从图 6 可以看出,在 106 起事故中原因中,粉尘清理不当(32 起)出现频次最高,除尘系统缺陷次之(28 起),这是 2 大主要致灾因素,反映出粉尘浓度控制失效是核心风险。粉尘清理不当常常是由于企业对粉尘积聚危害重视不足,未落实定期清理制度或方式不当,形成可燃粉尘云;除尘系统缺陷则可能因设计、维护或运行问题导致粉尘收集失效,二者相互关联,形成粉尘浓度升高的恶性循环。人员违章操作与使用非防爆电器设备出现 20 次和 14 次,是粉尘爆炸的重要触发条件,前者反映安全管理和培训漏洞,后者则增加电火花引燃风险。其他原因包括设备故障、环境因素等未知因素,提示存在新兴工艺风险或多因素耦合效应等潜在隐患,需要格外重视粉尘爆炸的诱因的管理。

粉尘的特征参数是粒径和点火源,点火源包含静电、明火、摩擦、放热反应等,统计分析 106 起事故中不同类型粉尘引发粉尘爆炸的点火源,基于贝叶斯分类算法,计算不同类型粉尘爆炸事故点火源出现概率,结果见表 2。

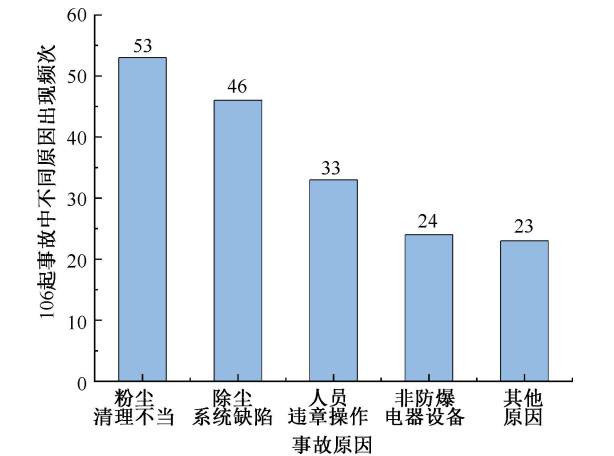


图 6 粉尘爆炸事故原因出现频次

Fig. 6 Frequency of causes of dust explosion accidents

由表 2 可知:金属粉尘爆炸中,电气设备火花占比为 20.9%,摩擦占比为 27.9%,这 2 者是主要点火源。粮食粉尘爆炸中,电焊、气割作业占比为 23.8%,是重要点火源。木材粉尘爆炸中,明火占比为 18.2%,摩擦占比为 36.4%;煤粉爆炸中,爆破占比较高,塑料粉尘爆炸中,静电、摩擦占比较高,说明塑料制造时需要静电格外防护;药物粉尘颗粒细、活性高,对静电极为敏感,静电点火源占比为 100%;化学品粉尘爆炸的点火源为多种点火源并存,化学品生产环境复杂,动火作业、电气设备运行及静电积累等风险叠加,若通风、防爆措施不到位,极易触发爆炸。

不同性质粉尘的爆炸事故的主导原因存在显著

表 2 粉尘爆炸事故点火源出现概率

Table 2 Probability of ignition sources for dust explosion accidents

点火源	不同粉尘类型下点火源出现概率/%										
	纺织	硅粉	化学品	金属	粮食	硫磺	煤粉	木材	其他	塑料	药物
爆破	—	—	—	—	—	—	28.6	—	—	—	—
不明	50.0	100.0	—	25.6	38.1	50.0	—	18.2	33.3	—	—
车辆火花	—	—	—	—	—	—	7.1	—	—	—	—
电焊、气割作业	—	—	20.0	2.3	23.8	50.0	14.3	9.1	—	—	—
电气设备火花	—	—	20.0	20.9	14.3	—	14.3	9.1	—	—	—
堆积过热自燃	—	—	—	—	4.8	—	—	—	—	—	—
静电	—	—	20.0	7.0	4.8	—	—	—	33.3	50.0	100.0
明火	—	—	—	—	9.5	—	7.1	18.2	—	—	—
摩擦	—	—	20.0	27.9	4.8	—	21.4	36.4	33.3	50.0	—
热表面	50.0	—	20.0	—	—	—	7.1	9.1	—	—	—
受潮过热	—	—	—	16.3	—	—	—	—	—	—	—

差异。在金属粉尘事故中,抛光打磨设备违规检修、作业后未及时清理和“使用非防爆电器设备”是占比最高的 2 大直接触发条件,这凸显出“人因管理”漏洞是金属加工领域的主要短板。员工安全意识淡薄、违规操作频发,加之企业为降低成本而使用普通电器,构成了金属粉尘爆炸的典型场景。在粮食粉尘事故中,除尘系统缺陷则是最突出的致灾因素。系统设计不合理、风机功率不匹配、管道积尘严重,均反映出“工程防护”措施的缺失。煤尘爆炸事故多发生在井下,主要由瓦斯爆炸等事故引发的次生灾害,或井下违规爆破作业导致。

此外,不明点火源占比较高,反映出日常管理中存在隐患未被识别,纺织类粉尘、硅粉、粮食等粉尘类型中;不明点火源占比适中,表明部分企业对生产环境中的潜在火源排查不足,缺乏有效的监测与预警机制。

3 粉尘爆炸事故趋势分析及防控体系构建

3.1 事故趋势分析

基于上述趋势与 106 起事故案例的统计分析,对未来粉尘事故趋势作出以下预测,在地域分布上,事故热点呈现从东部沿海(如江苏、浙江)向中西部能源资源大省(如河北、新疆)迁移的态势,反映出产业转移过程中的风险动态迁移规律。在粉尘类型方面,金属粉尘尤其是铝镁粉尘仍是主要风险源;同时,新材料等新兴风险源亟待先行性研究。在事故致因方面,粉尘清理不当、除尘系统缺陷等传统问题表现突出,但多因素耦合引发的系统性风险将进一步加剧。

3.2 构建危险源-设施-管理-应急 4 层防控体系

在深度剖析事故致因链的基础上,构建危险源—设施—管理—应急 4 层系统性防控体系框架。危险源层(基础层)核心是识别与控制可燃粉尘本

身;设施层(关键层)核心是依靠工程技术消除点火源和防止粉尘积聚;管理层(核心层)核心是通过制度约束人的行为和完善管理体系;应急层(底线层)核心是最大限度减轻事故后果,见表 3。

表 3 4 层防控体系框架

Table 3 Four-layer prevention and control system framework

防控层级	核心内容	实施细节
危险源管控	粉尘特性与浓度控制	①建立企业可燃粉尘清单,明确粉尘的爆炸特性参数(如粉尘爆炸特性常数、最大爆炸压力、最小爆炸质量浓度、最小点火能量等);②实施粉尘源头控制,采用湿法作业、密闭输送等工艺减少粉尘扩散;③严格划分粉尘爆炸危险区域
设施保障	除尘与防爆设备	①设计与安装有效的除尘系统,包括采用抗爆、隔爆设计,规范管道风速等;②在爆炸危险区域全面使用防爆电气设备;③规范设备维护,防止机械摩擦、过热产生点火源;④安装有效的静电导除与接地装置;⑤根据风险评估结果,合理选用泄爆、抑爆、隔爆、抗爆等防护装置
管理体系	制度与培训	①制定并严格执行粉尘清理制度,确保作业场所无积尘;②建立动火作业、有限空间作业等高风险作业审批程序;③加强员工安全培训与警示教育,杜绝违章操作;④建立隐患排查治理长效机制,定期开展风险辨识评估
应急处置	预警与救援	①制定具有针对性和可操作性的粉尘爆炸专项应急预案;②配备符合要求的应急器材,消防设施,个人防护装备等;③定期组织应急演练,确保员工熟悉报警、疏散、初期扑救和医疗急救流程;④建立与周边企业和公共应急力量的联动机制

3.3 案例分析与实践验证

以 2014 年江苏省昆山中荣金属制品有限公司“8·2”特别重大铝粉尘爆炸事故^[18-19]为例,该事故暴露了 4 层防线的全面失守,具体如下:

- 1) 危险源失控。企业未辨识铝合金粉尘这一核心危险源,对其爆炸危险性一无所知。
 - 2) 设施缺陷。除尘系统严重缺陷:风管未设置必要的隔爆装置,除尘器本体未设计泄爆口,且本体结构不抗爆;电气设备不防爆;车间内电器、电缆、开关均未采用防爆型;无任何爆炸防护措施。
 - 3) 管理缺陷。厂房设计与布局违反多项标准;粉尘清理制度形同虚设,车间内设备、地面积尘异常严重;安全教育培训流于形式,员工长期在极度危险的环境中作业。
 - 4) 应急失效。企业缺乏最基本的应急准备,未制定有效可行性应急预案,事故发生后现场混乱,加剧了人员伤亡。
- 该事故是 4 层防控体系全面失守的必然结果,如果在 4 层防线的任何一层采取有效措施,如完善除尘系统、加强清理管理、使用防爆电器等,均可阻

断事故链,避免事故发生。

4 结 论

- 1) 我国粉尘爆炸风险呈现显著的行业与地域异质性。金属粉尘事故频率最高,主要集中于东部沿海制造业集群;煤尘爆炸虽发生频率较低,但致死率极高,多发生于中西部能源产区,且常与瓦斯爆炸形成复合灾害。2015 年后,粉尘爆炸事故热点呈现从东部向中西部产业承接地转移的“风险动态迁移”趋势。
- 2) 粉尘清理不当与除尘系统缺陷为核心致灾因素,人员违章操作与非防爆设备使用为主要触发条件,致因结构存在明显的粉尘类型差异性。金属粉尘事故主因是“人因管理”漏洞(违章操作、非防爆设备),而粮食粉尘事故则突出表现为“工程防护”失效(除尘系统缺陷)。
- 3) “危险源-设施-管理-应急”4 层防控体系,对于预防粉尘爆炸事故具有一定的有效性,可为工业安全生产粉尘爆炸事故预防和应急救援辅助决策提供参考。

参 考 文 献

[1] 苑春苗,孙凯文,李刚,等. 瓦斯煤尘及其混合物着火爆炸特性研究进展[J]. 矿业安全与环保, 2024, 51(6): 42-53.

- YUAN Chunmiao, SUN Kaiwen, LI Gang, et al. Research progress on ignition and explosion characteristics of gas and coal dust and their mixtures[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2024, 51(6): 42-53.
- [2] 邹天宇, 杜勋军, 张彤. 粉尘爆炸与防控措施[J]. 电气防爆, 2023(5): 28-30.
- ZOU Tianyu, DU Xunjun, ZHANG Tong. Dust explosion and countermeasures[J]. Electric Explosion Protection, 2023(5): 28-30.
- [3] JI Wei, YUAN Quan, CHENG Gang, et al. Traffic accidents of autonomous vehicles based on knowledge mapping: a review[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2023, 10(6): 1 061-1 073.
- [4] LUO Qi, WANG Sihan, HUANG Jianling, et al. Research progress in construction workers' risk-taking behavior and hotspot analysis based on CiteSpace analysis[J]. Buildings, 2024, 2024; DOI:10.3390/buildings14123786.
- [5] 邓毓璇, 陆莹, 迟泽勋, 等. 基于知识图谱的地铁施工安全事故原因及安全对策分析[J]. 项目管理技术, 2025, 23(2): 97-104.
- DENG Yunxuan, LU Ying, CHI Zexun, et al. Analysis of the causes and safety countermeasures of subway construction safety accidents based on knowledge graph[J]. Project Management Technology, 2025, 23(2): 97-104.
- [6] 许慧, 蒋玟, 薛红, 等. 基于知识图谱的建筑火灾事故智能分析[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(12): 94-99.
- XU Hui, JIANG Mei, XUE Hong, et al. Intelligent analysis of building fire accidents based on knowledge graph[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(12): 94-99.
- [7] GE Huimin, BO Yunyu, ZANG Wenkai, et al. Literature review of driving risk identification research based on bibliometric analysis[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2023, 10(4): 560-577.
- [8] 李长明, 赵开功, 张晓蕾, 等. 煤矿智能化项目风险评价云模型及其应用[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(5): 168-174.
- LI Changming, ZHAO Kaigong, ZHANG Xiaolei, et al. Cloud model and its application for risk evaluation of coal mine intelligent project[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(5): 168-174.
- [9] 罗振敏, 刘荣玮, 程方明, 等. 煤尘爆炸的研究现状及发展趋势[J]. 矿业安全与环保, 2020, 47(2): 94-98.
- LUO Zhenmin, LIU Rongwei, CHENG Fangming, et al. Research status and development trend of coal dust explosion[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2020, 47(2): 94-98.
- [10] 江丙友, 洪汉, 苏明清, 等. 密闭管道内瓦斯爆炸卷扬沉积煤尘爆炸传播特性[J]. 煤炭学报, 2024, 49(4): 1 941-1 951.
- JIANG Bingyou, HONG Han, SU Mingqing, et al. Characterization of explosion propagation of coal dust deposited by gas explosion convolutions in closed pipelines[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(4): 1 941-1 951.
- [11] 王林元, 吕瑞琪, 邓洪波. 不同粒径镁铝合金粉尘爆炸与抑爆特性研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2017, 13(1): 34-38.
- WANG Linyuan, LYU Ruiqi, DENG Hongbo. Study on characteristics of explosion and explosion suppression for Magnesium-Aluminum alloy dust with different particle size[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2017, 13(1): 34-38.
- [12] 张二强, 张礼敬, 陶刚, 等. 粉尘爆炸特征和预防措施探讨[J]. 中国安全生产科学技术, 2012, 8(2): 88-92.
- ZHANG Erqiang, ZHANG Lijing, TAO Gang, et al. Preliminary study on characteristics and preventive measures of the dust explosion[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2012, 8(2): 88-92.
- [13] 陆继锋, 李方, 刘吉庆. 非煤粉尘抑爆领域文献计量分析[J]. 消防科学与技术, 2022, 41(10): 1 464-1 468.
- LU Jifeng, LI Fang, LIU Jiqing. Bibliometric analysis in the field of non-coal dust explosion suppression[J]. Fire Science and Technology, 2022, 41(10): 1 464-1 468.
- [14] 钟圣俊, 苗楠, 刘洪洋. 铝镁金属抛光工艺粉尘爆炸事故分析与防护[J]. 现代职业安全, 2014(10): 26-29.
- [15] 王宝兴, 经建生, 高云升. 黑龙江七台河东风煤矿矿难是瓦斯爆炸引起的煤尘爆炸[J]. 消防技术与产品信息, 2006(4): 45-47.
- [16] 吴华伟, 周翔. 木材加工企业粉尘防爆的现状与对策探讨[J]. 安全与健康, 2018(3): 42-45.
- [17] 郑万波, 吴燕清, 梁爱春, 等. 煤矿粉尘事故风险管理体系的应用研究[J]. 能源与环保, 2017, 39(7): 11-16.
- ZHENG Wanbo, WU Yanqing, LIANG Aichun, et al. Application study on dust accident risk management system in coal mine[J]. China Energy and Environmental Protection, 2017, 39(7): 11-16.
- [18] 潘超, 李刚, 李思琦, 等. "8·2" 昆山事故铝粉爆炸猛度实验研究[J]. 消防科学与技术, 2017, 36(3): 309-312.
- PAN Chao, LI Gang, LI Siqi, et al. Experimental study on the explosion violence of aluminum powder in Kunshan "8·2" accident[J]. Fire Science and Technology, 2017, 36(3): 309-312.
- [19] 杨玲. 昆山8·2铝粉尘爆炸事故的思考[J]. 安全, 2015(4): 54-55.

作者简介: 赵开功 (1981—),男,山东济宁人,博士,高级工程师,主要从事应急救援、职业健康、安全信息化和安全生产理论与技术方面的工作。E-mail:smilelevel@163.com。