

中文引用格式:邓振立,覃国据,唐运坚,等. 铅锌精矿粉尘云爆炸强度和爆炸下限试验研究[J]. 中国安全科学学报,2025,35(12): 64-69.

英文引用格式:DENG Zhenli, QIN Guojun, TANG Yunjian, et al. Experimental study on explosion intensity of dust cloud in lead and zinc concentrate powder[J]. China Safety Science Journal, 2025,35(12):64-69.

铅锌精矿粉尘云爆炸强度和爆炸下限试验研究^{*}

邓振立¹高级工程师,覃国据¹,唐运坚^{**1}高级工程师,李晓泉^{2,3}副教授,韦宁颖^{2,3}

(1 广西中金岭南矿业有限责任公司,广西 来宾,545902;2 广西大学 资源环境与材料学院, 广西 南宁,530004;3 广西大学 广西高校矿物工程重点实验室,广西 南宁 530004)

中图分类号:X932

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.12.1385

基金项目:国家自然科学基金资助(52264014);广西自然科学基金资助(2020GXNSFAA297037)。

【摘要】 为预防选矿后高含硫量的精矿矿仓发生粉尘云燃烧爆炸事故,以盘龙铅锌矿铅精矿和锌精矿为例,利用 20 L 球开展不同质量浓度的粉尘爆炸强度和爆炸下限试验,获得铅、锌精矿粉尘云的最大爆炸压力、爆炸下限、爆炸指数值等主要参数。结果表明:铅精矿和锌精矿粉尘云最大爆炸压力分别为 0.335 和 0.251 MPa,均发生在精矿粉尘云质量浓度为 1 000 g/m³ 时,质量浓度爆炸下限分别为 160~170 和 210~220 g/m³,爆炸风险性均为低风险,铅精矿粉尘云爆炸风险性和危害性高于锌精矿;得出精矿粉尘云颗粒被点燃、炸裂至发生链式反应的爆炸机制。为精矿矿仓预防精矿粉尘云爆炸提供实测及理论依据。

【关键词】 铅精矿; 锌精矿; 粉尘云; 爆炸强度; 爆炸下限

Experimental study on explosion intensity of dust cloud in lead and zinc concentrate powder

DENG Zhenli¹, QIN Guojun¹, TANG Yunjian¹, LI Xiaoquan^{2,3}, WEI Ningying^{2,3}

(1 Guangxi Zhongjin Lingnan Mining Co., Ltd., Laibin Guangxi 545902, China; 2 School of Resources, Environment and Materials Science, Guangxi University, Nanning Guangxi 530004, China; 3 Guangxi Colleges and Universities Key Laboratory of Minerals Engineering, Guangxi University, Nanning Guangxi 530004, China)

Abstract: In order to prevent dust cloud combustion and explosion accidents in the high sulfur content concentrate warehouse after beneficiation, lead concentrate and zinc concentrate of Panlong Lead Zinc Mine were taken as examples. Tests on explosion intensity and the lower explosion limit at different mass concentrations were conducted using a 20 L balls. Main parameters, including the maximum explosion pressure, explosion lower limit, and explosion index of the lead zinc concentrate powder dust cloud, were obtained. The results show that maximum explosion pressures of lead concentrate and zinc concentrate dust clouds were 0.335 and 0.251 MPa, respectively, both occurring when the mass concentration of the dust cloud was 1 000 g/m³. The lower explosive limits of mass concentration are 160-170 and 210-220 g/m³,

* 文章编号:1003-3033(2025)12-0064-06; 收稿日期:2025-07-10; 修稿日期:2025-09-22

** 通信作者:唐运坚(1985—),男,广西都安人,本科,高级工程师,主要从事现场安全管理方面的工作。E-mail: 345383200@qq.com。

respectively, indicating low explosion risk. The explosion risk and hazard of dust clouds in lead concentrate are higher than those in zinc concentrate. The explosion mechanism of concentrate dust cloud particles being ignited, exploded, and subjected to a chain reaction is obtained. These findings provide an experimental and theoretical basis for preventing dust cloud explosion of concentrate in the concentrate warehouse.

Keywords: lead concentrate; zinc concentrate; dust cloud; explosion intensity; lower explosive limit

0 引言

在工业生产过程中可能产生大量可燃性粉尘,当粉尘云浓度达到爆炸下限就具备了粉尘爆炸的可能性,若不加以控制,极易诱发粉尘爆炸事故^[1-2]。常规状态下的稳定性可燃材料,形成可燃性粉尘云,则具备了爆炸性^[3]。最大爆炸压力和爆炸下限均为粉尘爆炸特性参数^[4],最大爆炸压力反映粉尘爆炸的做功能力,即危害性,爆炸下限体现粉尘爆炸的敏感性,因此,研究粉尘爆炸强度和爆炸下限是防治粉尘爆炸的基础和试验依据。

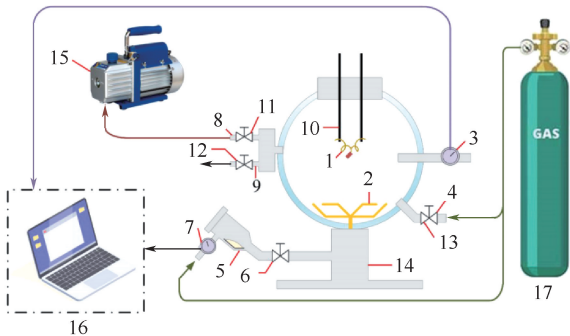
自然状态下,许多金属矿石以硫化矿的形式存在,如硫化铅、硫化锌、硫化铜、黄铁矿等^[5],矿堆有自燃发火可能,选矿后的精矿含硫量更高,自然发火危险性更大^[6],在精矿铲装或清扫作业时会产生大量粉尘,以气溶胶的形式长时间悬浮在矿仓空气中^[7],当粉尘云质量浓度达到爆炸下限^[8-9],遇到可引燃的能量时,具备了精矿粉尘云燃烧爆炸的条件^[10-12],极易造成粉尘云爆炸事故,危害性极大。

基于此,笔者拟以盘龙铅锌矿选矿后的铅精矿和锌精矿为例,利用 20 L 球开展粉尘云爆炸强度和爆炸下限试验,获取铅、锌精矿粉尘云的最大爆炸压力、爆炸下限、爆炸指数值等主要参数,并分析爆炸机制,以期为预防精矿粉尘云爆炸事故提供参考。

1 粉尘云爆炸试验设备及步骤

1.1 粉尘云爆炸试验设备

试验使用的仪器为特殊条件下气体/粉尘爆炸参数试验装置(简称 20 L 球)(图 1),主体为 20 L 双层不锈钢球型爆炸容器,夹层为水,用以保持试验时的恒温状态。爆炸容器底部安装有孔状粉尘喷嘴,通过管路和气动阀与粉尘仓相连。辅助系统包括有高速进样阀组、精密配气系统、真空系统、数据接收设备、高压气瓶等。



1-化学点火头;2-回弹喷嘴;3-压力传感器;4-气密性检测进气阀;5-粉尘仓;6-进尘阀;7-压力传感器;8-抽真空管路;9-排气管;10-点火电极;11-抽真空阀;12-排气阀;13-爆炸室充气阀;14-设备底座;15-真空泵;116-数据接收系统(PC);17-压缩空气。

图 1 20 L 球结构^[13]
Fig. 1 20 L ball structure

1.2 粉尘云爆炸试验依据

依据《粉尘云爆炸下限浓度测定方法》(简称 GB/T16425—2018)^[14]开展粉尘云爆炸强度和爆炸下限试验。将最大爆炸压力是否达到 0.15 MPa 作为粉尘云是否发生爆炸的判定标准,将连续 3 次试验压力峰值均小于 0.15 MPa 绝对压力的最高粉尘质量浓度定为 C_1 ,连续 3 次试验压力峰值均等于或大于 0.15 MPa 绝对压力的最低粉尘质量浓度定为 C_2 ,所测粉尘试样爆炸下限质量浓度 C_{min} 则介于 C_1 和 C_2 之间,即 $C_1 < C_{min} < C_2$ ^[14]。

1.3 粉尘云爆炸试验步骤

试验步骤如下:①打开爆炸容器上盖,分别在 2 个电极柱端绞接好点火头的 2 个导线,盖好爆炸容器上盖;②旋开粉尘仓盖,将粉尘样品倒入粉尘仓底部,旋紧粉尘仓盖;③在电脑操作平台调节压力传感器参数,将爆炸容器内的喷粉后压力设为 0.1 MPa;④根据试验内容设置喷粉压力、点火延迟时间等各项参数;⑤对爆炸容器抽真空,粉尘仓充压;⑥电极通电点燃点火头;⑦生成压力-时间曲线;⑧彻底清洗容器和样品仓,为下次试验做准备。具体试验步骤如图 2 所示。

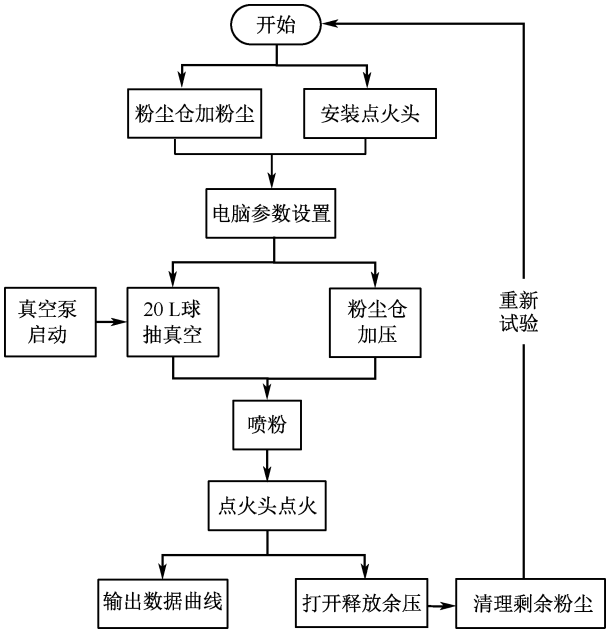


图 2 试验步骤
Fig. 2 Experimental steps

2 粉尘云爆炸试验结果分析

从盘龙铅锌矿选矿厂锌精矿和铅精矿堆中提取试验样品,密度分别为 3.9 和 4.9 g/cm³,主要化学成分见表 1 和表 2,数据来自《广西中金岭南矿业有限责任公司选矿工艺技术优化研究报告》(简称《报告》)。经低温干燥后,在实验室 200 目标准筛下筛出粒径为 75 μm 以下的粉尘颗粒,设置喷粉压力为 2.0 MPa,点火延迟时间为 60 ms。

2.1 爆炸强度分析

不同质量浓度下的精矿粉尘云爆炸压力如图 3 所示,从图 3 看出,精矿粉尘云爆炸曲线分为以下 4 个阶段:

1) 粉尘预混阶段。启动 20 L 球体真空泵,使装置内气压降至预定值,高压粉尘仓喷粉,使 20 L 球内气压至 0.1 MPa,此时粉尘在 20 L 球内进行预混,气溶胶形式悬浮在空气中。

表 1 铅精矿主要化学成分

Table 1 Main chemical components of lead concentrate

成分	Cu	Pb	Zn	Ti	Ag [*]	Fe	Cd	Ni
含量	0.12	57.91	3.55	0.006	206	7.42	0.017	<0.005
成分	Co	Al	Ca	Mg	K	Na	S	C
含量	<0.005	0.13	0.50	0.23	0.065	0.032	19.42	1.09
成分	Mn	P	Sb	As	Hg	SiO ₂	—	—
含量	<0.005	0.53	1.26	1.60	0.003	1.40	—	—

注:Ag^{*} 单位为 g/t。

表 2 锌精矿主要化学成分

Table 2 Main chemical components of zinc concentrate

成分	Cu	Pb	Zn	Ti	Ag [*]	Fe	Cd	Ni
含量	0.034	1.25	51.33	0.008	53.8	5.74	0.21	<0.005
成分	Co	Al	Ca	Mg	K	Na	S	C
含量	<0.005	0.15	0.92	0.47	0.074	0.044	31.65	0.64
成分	Mn	P	Sb	As	Hg	SiO ₂	—	—
含量	<0.005	0.14	0.079	0.38	0.03	1.23	—	—

2) 爆炸压力上升速率增加阶段。喷粉后 60 ms 点火头着火点燃附近粉尘云,被点燃的粉尘颗粒成为新的点火源,以球形爆轰波的形式向外传播,直至最大爆炸压力上升速率时,参与燃烧的粉尘颗粒数达到最大值。

3) 爆炸压力上升速率下降阶段。粉尘云爆炸时产生的爆轰波将未燃烧的颗粒向外推出,靠近 20 L 球壁的粉尘颗粒不断地与壁面碰撞,部分颗粒吸附在壁面,无法形成完整的粉尘云球面,使参与燃烧的粉尘颗粒持续减少,达到最大爆炸压力时几乎

没有粉尘参与燃烧了。最大爆炸压力反映了粉尘云爆炸对外做功能力,即爆炸强度。

4) 压力缓慢降低阶段。20 L 球体密闭性非常好,达到最大爆炸压力后没有粉尘颗粒参与燃烧,爆炸压力曲线呈缓慢下降趋势。

爆炸强度特征见表 3,从表 3 可以看出:

1) 最大爆炸压力先增加后降低。质量浓度从 250 g/m³ 增至 1 000 g/m³,最大爆炸压力持续增加,然后下降,说明这 2 种精矿粉尘云空间质量浓度在 1 000 g/m³ 左右时爆炸强度最大,做功能力最强,危

害性最大。

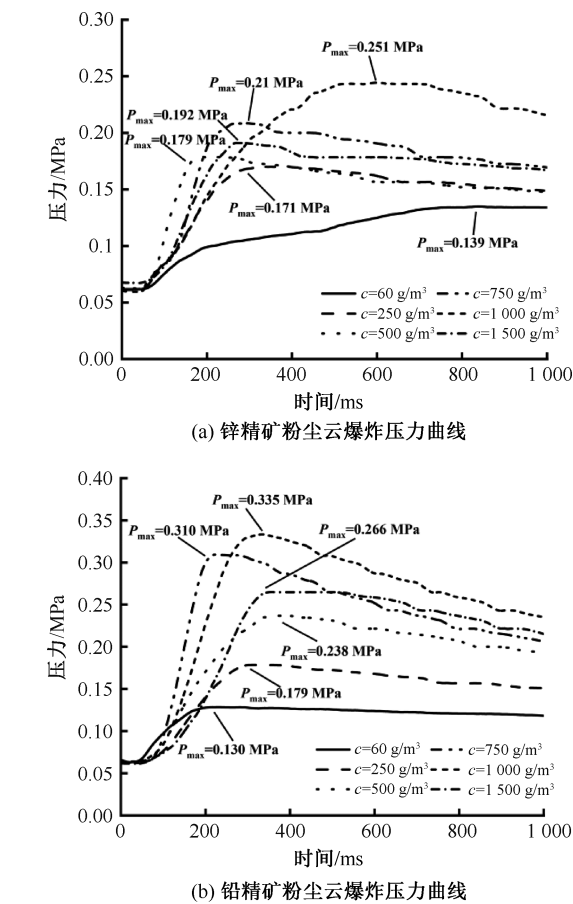


图 3 不同浓度下的精矿粉尘云爆炸压力

Fig. 3 Explosion pressure of sulfur concentrate dust cloud at different concentrations

2) 铅精矿粉尘云爆炸危害性更大。可以明显看出,在粉尘云爆炸的爆炸压力、爆炸压力上升速率、爆炸指数等参数上,铅精矿均高于锌精矿;因铅精矿密度大于锌精矿,即同等粉尘质量下,铅精矿粉尘颗粒数更少,颗粒燃烧热量更多,说明其爆炸危害性更大。

3) 爆炸风险性均为低风险。根据欧盟标准 EN1127-1^[15],当爆炸指数值 $\leq 20 \text{ MPa} \cdot \text{m/s}$ 时,属于低风险区域,即这 2 种精矿粉尘云爆炸风险性为低风险。

铅精矿和锌精矿的最大爆炸强度均发生在精矿粉尘云空间质量浓度在 $1\,000 \text{ g/m}^3$ 。其原因可能是:

1) 颗粒间距对火焰传播的影响。依据 GB/T16425—2018,高压粉尘仓喷粉后延迟 60 ms 点火头点火, 60 ms 延迟时间是使粉尘云在 20 L 球内均匀分布,即颗粒间距相近。①粉尘质量浓度低时

表 3 爆炸强度特征					
Table 3 Characteristics of explosion intensity					
精矿	质量浓度/ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	最大爆炸压力 $P_{\max}/\text{MPa}$	最大爆炸压力上升速率 ($\text{d}P/\text{d}t)_{\max}/(\text{MPa} \cdot \text{s}^{-1})$	爆炸指数 $K_{\max}/(\text{MPa} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	是否爆炸
锌精矿	60	0.139	—	—	×
	250	0.171	28.941	7.86	√
	500	0.179	30.644	8.32	√
	750	0.21	35.751	9.70	√
	1 000	0.251	37.453	10.17	√
	1 500	0.192	34.900	9.47	√
铅精矿	60	0.130	—	—	×
	250	0.179	28.941	7.86	√
	500	0.238	35.751	9.70	√
	750	0.310	43.412	11.78	√
	1 000	0.335	44.263	12.01	√
	1 500	0.266	34.048	9.24	√

注:√表示爆炸,×表示未爆炸,下同。

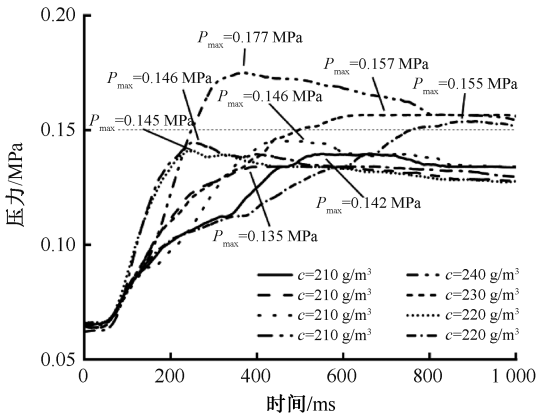
即颗粒少且颗粒间距大,火焰传播损耗变大,当颗粒间距大于火焰传播能力时燃烧中断,不会发生爆炸,即降低空间的粉尘质量浓度是防止粉尘爆炸的有效途径;②粉尘质量浓度高时即颗粒多且颗粒间距小,此时单位体积内颗粒数量多需要更多能量点燃多颗粒,颗粒间距小亦使空间内氧气浓度降低,不利于燃烧。而在精矿粉尘云空间质量浓度在 $1\,000 \text{ g/m}^3$ 时,颗粒间距适合能量传播,这是达到最大爆炸强度的原因。

2) 氧平衡。20 L 试验在常温常压下进行,点火头放置在中心点,点火头点燃其附近的颗粒后,以球面形式向外传播,继续引燃周围颗粒,这个过程需要消耗空间内的氧气,当氧气消耗殆尽时,燃烧自然停止。①粉尘质量浓度低时,20 L 球内氧气充足,全部颗粒燃烧后还有剩余氧气,产生的热量必然少于氧气全部消耗完的情况;②粉尘质量浓度高时,20 L 球内氧气消耗完了,颗粒未完全燃烧,未燃烧的颗粒会吸收大量能量,使得爆炸强度不如完全燃烧情况。而在精矿粉尘云空间质量浓度在 $1\,000 \text{ g/m}^3$ 时,颗粒与氧气几乎全部消耗,是达到最大爆炸强度的原因。

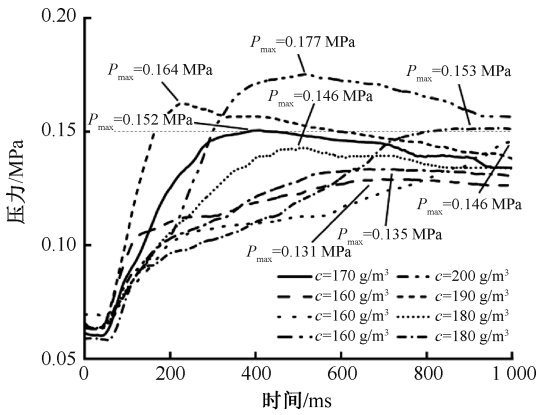
2.2 精矿爆炸下限浓度

分析 2.1 节可知:锌精矿和铅精矿粉尘云的爆炸下限在 $(60, 250) \text{ g/m}^3$ 范围,为得出粉尘云爆炸下限,需进一步缩小粉尘云质量浓度区间,直至确定爆炸下限质量浓度。

依据 1.2 节判断粉尘云是否发生爆炸的标准,图 4 虚线为粉尘云是否爆炸的分界线,可以看出,爆炸压力曲线与图 3 相似,只是最大爆炸压力明显下降,主要原因是 20 L 球内的粉尘云浓度低,粉尘颗粒少,间距增大,使火焰传播困难,超过火焰传播距离时燃烧就停止了,使得爆炸压力明显下降。



(a) 锌精矿粉尘云爆炸下限



(b) 铅精矿粉尘云爆炸下限

图 4 精矿粉尘云爆炸下限

Fig. 4 Lower explosive limit of sulfur concentrate powder dust cloud

精矿粉尘云爆炸下限统计见表 4,可以得出:
①铅精矿爆炸下限 ($160 \sim 170 \text{ g/m}^3$) 明显低于锌精矿 ($210 \sim 220 \text{ g/m}^3$),颗粒更容易被点燃,且燃烧值高,危险性更大。
②最大爆炸压力上升速率和爆炸指数变化不大。

3 粉尘云爆炸危险性比对及其机制

精矿是选矿后细粒湿矿物,通常堆放在精矿仓内,精矿含硫量高,如在翻矿堆或清扫时产生的粉尘云浓度达到爆炸下限,极有可能发生粉尘云爆炸事故,造成更大灾害。盘龙铅锌矿发生过精矿堆自燃现象。

表 4 精矿粉尘云爆炸下限统计

Table 4 Statistics of lower explosive limits of sulfur concentration dust clouds

硫精矿	质量浓度/ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	最大爆炸压力 $P_{\text{max}}/\text{MPa}$	最大爆炸压力上升速率 ($\text{d}P/\text{d}t$) $_{\text{max}}/(\text{MPa} \cdot \text{s}^{-1})$	爆炸指数 $K_{\text{max}}/(\text{MPa} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	是否爆炸
锌硫精矿	240	0.177	30.644	8.32	✓
	230	0.157	30.644	8.32	✓
	220	0.145	—	—	×
	220	0.155	31.495	8.55	✓
	210	0.142	—	—	×
	210	0.135	—	—	×
	210	0.146	—	—	×
	200	0.146	—	—	×
铅硫精矿	200	0.177	30.644	8.32	✓
	190	0.164	33.197	9.01	✓
	180	0.146	—	—	×
	180	0.153	30.644	8.32	✓
	170	0.152	32.346	8.78	✓
	160	0.131	—	—	×
	160	0.146	—	—	×
	160	0.135	—	—	×

3.1 精矿粉尘云爆炸强度及危险性比对

从表 1 和表 2 看出,从化学成分来看,锌精矿含硫量明显高于铅精矿,而 2.1 和 2.2 测试结果是铅精矿粉尘云爆炸强度高于锌精矿,爆炸下限低于锌精矿,说明铅精矿粉尘云爆炸危险性和危害性较高,可见:含硫量不是精矿粉尘爆炸危险性的主要因素。《报告》中,6.4.1 铅精矿和 6.4.2 锌精矿的描述为黄铁矿主要以单体形式混入铅精矿中,部分黄铁矿与方铅矿连生的形式产出;黄铁矿大部分与闪锌矿连生的形式混入锌精矿中,少量黄铁矿呈单体形式产出。可见,黄铁矿单体伴生方式是精矿燃烧的主要原因。因此,在矿仓内同时储存 2 种精矿时,应以铅精矿粉尘云爆炸下限为依据制定防爆措施。

3.2 精矿粉尘云爆炸机制

当大量 SO_2 和精矿粉尘悬浮在空气中,达到爆炸下限时,就具备了粉尘云和 SO_2 气体混合爆炸的条件,对人及建构筑物造成极大破坏。其机制可描述为在相对封闭的硫化矿储仓内进行铲装或清扫作业时,使大量硫化矿粉尘和 SO_2 扬起,形成粉尘云和 SO_2 气体混合状态,长时间悬浮在相对封闭的矿仓内,遇到明火或其他足以引燃粉尘颗粒与 SO_2 气体混合状态的能量时,粉尘颗粒被点燃,由于粉尘颗粒受热不均发生炸

裂,形成多个点火源,引燃更多的粉尘颗粒,发生链式反应,引发粉尘云爆炸,使地面上的沉积性粉尘扬起成为悬浮性粉尘云,继而引发多次爆炸,直至所有粉尘燃烧完,不再有粉尘颗粒参与燃烧,爆炸才能停止。

4 结 论

1) 铅精矿和锌精矿粉尘云爆炸下限分别为

160~170 和 210~220 g/m³。

2) 由铅精矿和锌精矿的爆炸指数可知:盘龙铅锌矿的 2 种精矿粉尘云爆炸风险性为低风险。

3) 铅精矿粉尘云爆炸强度高于锌精矿,爆炸下限低于锌精矿,说明铅精矿粉尘云爆炸危险性和危害性较高。

参 考 文 献

[1] 陈刚,张晓蕾,徐帅,等. 我国 2005—2020 年粉尘爆炸事故统计分析[J]. 中国安全科学学报,2022,32(8):76-83. CHEN Gang,ZHANG Xiaolei,XU Shuai,et al. Statistical analysis on dust explosion accidents in China from 2005 to 2020[J]. China Safety Science Journal,2022,32(8):76-83.

[2] 吕鹏飞,谷晓珂,李公方,等. 可燃粉尘热稳定性研究进展[J]. 中国安全科学学报,2023,33(12):92-103. LYU Pengfei,GU Xiaoke,LI Gongfang,et al. Research progress on thermal stability of combustible dust[J]. China Safety Science Journal,2023,33(12):92-103.

[3] YUAN Zhi,KHAKZAD N,KHAN F,et al. Dust explosions: a threat to the process industries[J]. Process Safety and Environmental Protection,2015,98:57-71.

[4] 梁乐乐,李晓泉,王菲,等. 糖粉最大爆炸压力和爆炸下限试验研究[J]. 广西大学学报:自然科学版,2021,46(1):150-158. LIANG Lele,LI Xiaoquan,WANG Fei,et al. Experimental study on maximum explosion pressure and lower explosion limit of sugar powder[J]. Journal of Guangxi University: Natural Science Edition,2021,46(1):150-158.

[5] 田长顺,饶运章,向彩榕,等. 基于 Factsage 的金属硫化矿尘爆炸过程产物分析[J]. 中国安全生产科学技术,2020,16(12):79-84. TIAN Changshun,RAO Yunzhang,XIANG Cairong,et al. Analysis on products in explosion process of metal sulfide ore dust based on Factsage[J]. Journal of Safety Science and Technology,2020,16(12):79-84.

[6] RAO Yunzhang, TIAN Changshun, XU Wei, et al. Explosion pressure and minimum explosible concentration properties of metal sulfide ore dust clouds[J]. Journal of Chemistry,2020;DOI:10.1155/2020/7980403.

[7] 苏港,饶运章,田长顺,等. 基于爆炸参数的硫化矿尘云爆炸风险评估[J]. 有色金属科学与工程,2023,14(1):118-124. SU Gang, RAO Yunzhang, TIAN Changshun, et al. Risk assessment of sulfide ore dust cloud explosion based on explosion parameters[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering,2023,14(1):118-124.

[8] 饶运章,肖春瑜,许威,等. 硫化矿尘云爆炸下限浓度研究[J]. 矿业研究与开发,2020,40(10):123-127. RAO Yunzhang, XIAO Chunyu, XU Wei, et al. Study on the minimum explosive concentration of sulfide ore dust cloud[J]. Mining Research and Development,2020,40(10):123-127.

[9] 徐圆圆,李孜军,徐宇,等. 基于氧化还原分析的硫化矿尘爆炸压力预测[J]. 中国安全生产科学技术,2022,18(7):122-127. XU Yuanyuan, LI Zijun, XU Yu, et al. Prediction on explosion pressure of sulfide mineral dust based on redox analysis[J]. Journal of Safety Science and Technology,2022,18(7):122-127.

[10] 田长顺,饶运章,苏港,等. 磁黄铁矿对黄铁矿粉尘爆炸特性参数的影响[J]. 有色金属科学与工程,2023,14(5):692-699. TIAN Changshun, RAO Yunzhang, SU Gang, et al. Effects of pyrrhotite on explosion characteristic parameters of pyrite dust[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering,2023,14(5):692-699.

[11] 田长顺,饶运章,许威,等. 金属硫化矿尘爆炸反应过程机理分析[J]. 有色金属科学与工程,2020,11(6):78-84. TIAN Changshun, RAO Yunzhang, XU Wei, et al. Mechanism analysis of explosion reaction process of metal sulfide ore dust[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering,2023,14(5):692-699.

[12] 田长顺,饶运章,许威,等. 金属硫化矿尘爆炸研究进展[J]. 金属矿山,2020(4):178-185. TIAN Changshun, RAO Yunzhang, XU Wei, et al. Study progress of metal sulfide ores dust explosion[J]. Metal Mine,2020(4):178-185.

[13] LIANG Siting, LI Xiaoquan, JIANG Juju, et al. Study of explosion characteristics and mechanism of sucrose dust[J]. Processes,2023;DOI:10.3390/pr11010176.

[14] GB/T16425—2018,粉尘云爆炸下限浓度测定方法[S]. GB/T16425—2018,Determination for minimum explosive concentration of dust clouds[S].

[15] EN 1127 - 1: 2019, Explosive atmospheres-explosion prevention and protection-Part 1: basic concepts and methodology[S].

作者简介: 邓振立 (1975—),男,湖南汉寿人,本科,高级工程师,主要从事现场安全管理方面的工作。
E-mail: 739320758@qq.com。