DOI: 10.11883/bzycj-2017-0101
文章编号: 1001-1455(2018)05-1130-07

20 L 近球形容器中微米级铝粉的爆炸特性*

陈晓坤[1,2],张自军[1,2],王秋红[1,2],邓 军[1,2],李海涛[1,2],徐青峰[1,2]
(1.西安科技大学安全科学与工程学院,陕西 西安 710054;
2.西安科技大学安全科学与工程学院陕西省煤火灾害防治重点实验室,陕西 西安 710054)

摘要: 采用 20 L 近球形粉尘爆炸实验系统,探究微米级铝粉在不同点火延迟时间、粉尘粒径及粉尘浓度下的爆炸特性规律。结果表明:当点火延迟时间在 20～120 ms 范围内,铝粉最大爆炸压力和最大爆炸压力上升速率先增大后减小,随铝粉粒径增大,最佳点火延迟时间增大;在任一点火延迟时间下,粒径大于 8.12 μm 的铝粉最大爆炸压力随粉尘粒径的减小呈增大的变化趋势;粒径大于 8.12 μm 的铝粉,在 80～440 g/m^3 粉尘浓度范围内,铝粉最大爆炸压力和最大爆炸压力上升速率先增大后减小,且铝粉粒径越小,对应的最猛烈爆炸粉尘浓度越低。

关键词: 铝粉爆炸;点火延迟时间;粒径;粉尘云浓度;最大爆炸压力
中图分类号: O381;X932 **国标学科代码**: 1303510 **文献标志码**: A

铝是工业中应用最广泛的有色金属结构材料,在颜料、油漆、烟花、冶金和飞机、船舶制造业中被大量应用。然而,铝粉的生产、运输、储存和应用过程中都会出现较多的粉尘,如果管理或操作出现失误,铝粉粉尘浓度达到爆炸极限范围时,碰到火星或一定大小的静电能量就会发生铝粉燃烧爆炸事故。此外,铝粉爆炸同其他煤粉、面粉、木粉等可燃粉尘爆炸一样,初始爆炸产生的冲击波会使原先沉积的粉尘扬起,被之前产生的火焰引燃,发生连续的、更加严重的二次爆炸。因此,充分了解铝粉爆炸过程的危害性,加深对铝粉爆炸原因和规律的认识,并采取一定的防范措施,预防、控制和减轻铝粉尘带来的危害,是十分必要的。

目前,已有了许多有关铝粉爆炸的理论和实验研究。李延鸿[1]通过研究粉尘爆炸的基本特征,提出粉尘爆炸的本质是气体爆炸。赵江平等[2]认为热爆炸是造成粉尘爆炸的原因,通过合理假设将均温系统应用到粉尘爆炸过程中,推出热爆炸的判断依据,验证了该理论的合理性。Kwon 等[3]、Gromov 等[4]通过对超细铝粉在空气中燃烧生成氮化铝过程的分析,并对不同燃烧条件对铝粉燃烧反应生成产物结构和组成成分的影响进行分析,深入探究了超细铝粉燃烧过程的发生机理。此外,许多研究表明,铝粉爆炸特性受点火延迟时间[5-7]、粉尘粒度[8-10]、粉尘浓度[11-14]和湍流度[15-16]等因素的影响。

本文中,针对以微米级铝粉,测试点火延迟时间、粉尘粒径和粉尘浓度对铝粉爆炸特性参数的影响,有助于深入了解和掌握铝粉尘的爆炸规律,还能为工业生产中铝粉防爆抑爆提供一定的基础数据。

1 实验样品及装置

1.1 实验样品

实验样品为微米级铝粉,实验前将实验样品放入恒温干燥箱中,在温度为 50 ℃、真空条件下连续干燥 6 h。采用 COULTER-LS230 激光粒度分析仪对实验中所用的 4 种铝粉样品颗粒进行测定,样品颗粒粒度分析结果如图 1 所示。

从图 1 中可以看出,4 种铝粉样品的平均粒径为 17.98、10.98、8.63 和 8.12 μm。

* **收稿日期**: 2017-03-30; **修回日期**: 2017-07-21
基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(51504190);国家重点研发计划项目(2016YFC0800102);陕西省国际科技合作与交流计划项目(2016KW-070)
第一作者: 陈晓坤(1961—),男,教授,博士生导师; **通信作者**: 王秋红,wangqiuhong1025@126.com。

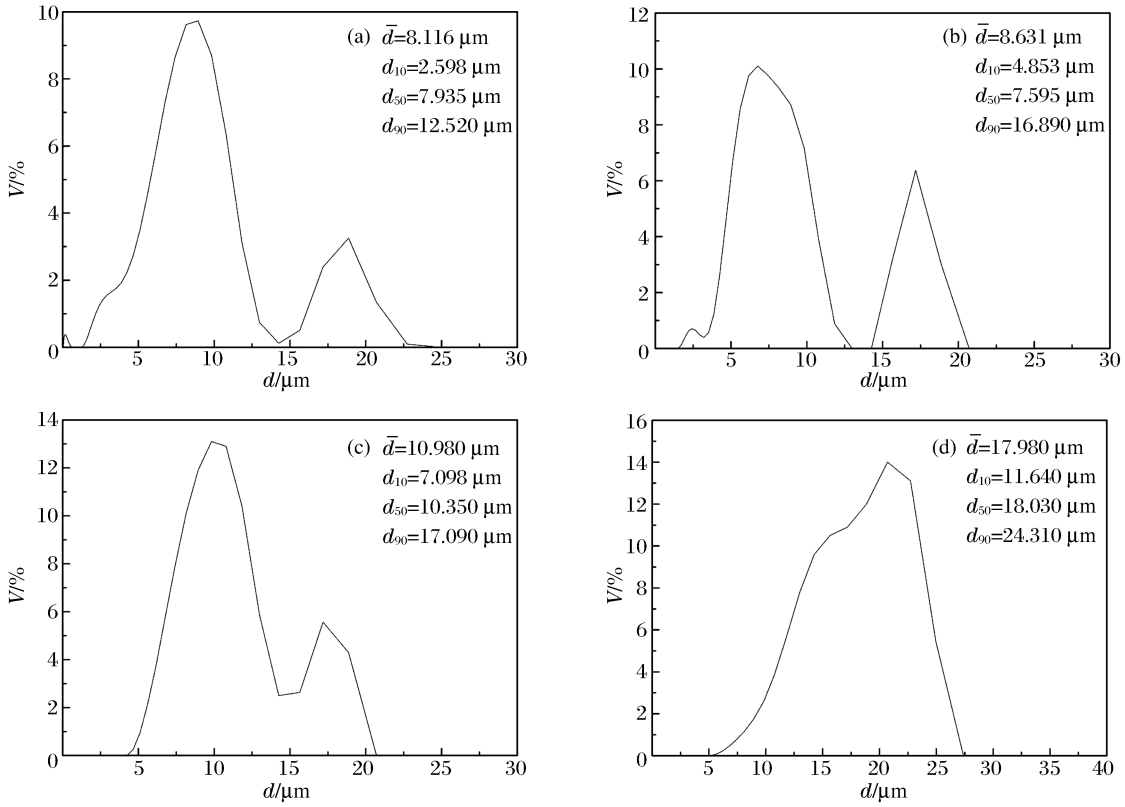


图 1 铝粉粒度微分分布

Fig. 1 Particle size differential volume of aluminum dust

为了测定铝粉的纯度，采用元素分析仪测试得到铝粉样品的元素种类及含量，分别为：w(Al)=99.76%，w(Cu)=0.001 0%，w(Fe)=0.092 2%，w(Si)=0.043 0%。

1.2　实验装置

20 L 近球形粉尘爆炸实验系统主要由爆炸罐、点火系统、粉尘分散系统、控制系统、数据采集系统和容器清洁系统组成，实验装置示意图如图 2 所示。其中，用不锈钢材质做的爆炸罐是全封闭式爆炸反应容器。

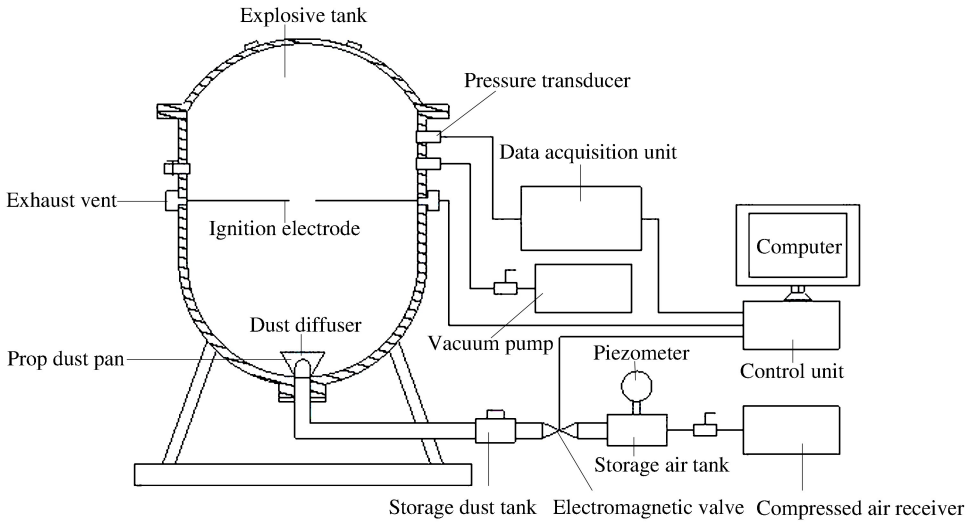


图 2 20 L 近球形粉尘爆炸实验系统

Fig. 2 20 L nearly spherical dust explosion experimental system

实验步骤为:先用真空泵将爆炸罐内压力抽至−60 kPa 真空度,等到数字压力计示数不再变化后,开启电磁阀开关使高压空气将托粉皿中的铝粉喷散开来,在爆炸罐内形成粉尘云,罐内压力达到常压,由于本实验所用粉尘为铝粉,如将它放入储粉罐中,在管道拐角处易形成堆积,造成质量损失,所以将铝粉放入托粉皿中;然后,控制点火电极引燃化学点火头,采集实验数据并处理;最后清理爆炸罐。

2 实验结果与分析

实验环境温度为 18～22 ℃,相对湿度为 35%～50%,实验样品选取平均粒径为 8.12、8.63、10.98 和 17.98 μm 的 4 种铝粉,纯度均高于 99.75%。通过反复测试确定,电磁阀开启时间为 100 ms、吹粉压力为 1 MPa 时,粉尘分散效果较好。选用化学点火头,点火能量为 3 kJ,点火药剂质量为 0.72 g,由锆粉(Zr)、硝酸钡($Ba(NO)_3$)和过氧化钡(BaO_2)按 4∶3∶3 的质量比例配制而成。为确保测试结果的精确性,每组实验重复做 3 次,测试结果取 3 次实验数据的平均值。

2.1 点火延迟时间对铝粉爆炸的影响

实验初始点火能量为 3 kJ,铝粉粒径分别为 8.12、8.63、10.98 和 17.98 μm,质量浓度为 80 g/m^3。点火延迟时间 τ 为 20、40、60、80 和 100 ms 时,对铝粉最大爆炸压力 p_{max} 及最大爆炸压力上升速率 $(dp/dt)_{max}$ 的影响,见表 1 和图 3。

表 1 不同粒径和不同点火延迟时间下铝粉爆炸特性参数

Table 1 Explosion characteristic parameters of aluminum dust under different particle sizes and different ignition delay times

d/μm	τ/ms	p_{max}/MPa	$(dp/dt)_{max}$/(MPa·s^{-1})	d/μm	τ/ms	p_{max}/MPa	$(dp/dt)_{max}$/(MPa·s^{-1})
8.12	20	0.272	41.505	10.98	20	0.228	23.622
8.12	30	0.292	221.599	10.98	40	0.252	36.393
8.12	40	0.271	173.190	10.98	60	0.288	48.402
8.12	60	0.263	65.909	10.98	80	0.237	37.568
8.12	80	0.259	62.776	10.98	100	0.236	35.568
8.12	100	0.243	34.348	17.98	20	0.092	7.656
8.63	20	0.258	40.513	17.98	40	0.116	12.894
8.63	40	0.313	48.676	17.98	60	0.186	20.412
8.63	60	0.311	78.554	17.98	80	0.228	27.482
8.63	80	0.252	69.444	17.98	100	0.316	50.340
8.63	100	0.247	38.574	17.98	120	0.168	22.660

由上述图表可以看出,在点火延迟时间 τ 在 20～120 ms 范围内,4 种不同粒径铝粉的 p_{max} 和 $(dp/dt)_{max}$ 存在峰值(最大值),8.12 μm 粒径铝粉的 p_{max} 和 $(dp/dt)_{max}$ 为 0.292 MPa、221.599 MPa/s,8.63 μm 粒径铝粉的 p_{max} 和 $(dp/dt)_{max}$ 为 0.313 MPa、48.676 MPa/s,10.98 μm 粒径铝粉的 p_{max} 和 $(dp/dt)_{max}$ 为 0.288 MPa、48.402 MPa/s,17.98 μm 粒径铝粉的 p_{max} 和 $(dp/dt)_{max}$ 为 0.316 MPa、50.340 MPa/s。p_{max} 对应下的点火延迟时间称为铝粉的最佳点火延迟时间,用 τ_j 表示,在峰值两侧 p_{max} 和 $(dp/dt)_{max}$ 表现为左增右减。这种变化趋势的主要原因是:在喷粉压力和电磁阀开启时间一定的条件下,高压气流将铝粉粉尘在罐体中喷散是一个先分散后沉降的过程。当点火延迟时间较短时,由于管路中的高压气流没有将铝粉粉尘在爆炸罐内完全分散开来,铝粉与氧气反应不充分,所以测得的 p_{max} 和 $(dp/dt)_{max}$ 偏低;而当点火延迟时间较长时,由于大多数铝粉粉尘受重力作用影响沉降在爆炸罐底部,导致铝粉质量损失较多,反应物量减少,所以测得的 p_{max} 和 $(dp/dt)_{max}$ 也偏低。此外,由图 3 可以看出,8.12、8.63、10.98 和 17.98 μm 铝粉对应的最佳点火延迟时间 τ_j 分别为 30、40、60 和 100 ms。不同粒径铝粉所对应的最佳点火延迟时间不同,粒径越大,点火延迟时间也越长。这是因为,粉尘粒径越大,比表面积就越小,与氧气反应速率变慢,因此其最佳点火延迟时间增大。

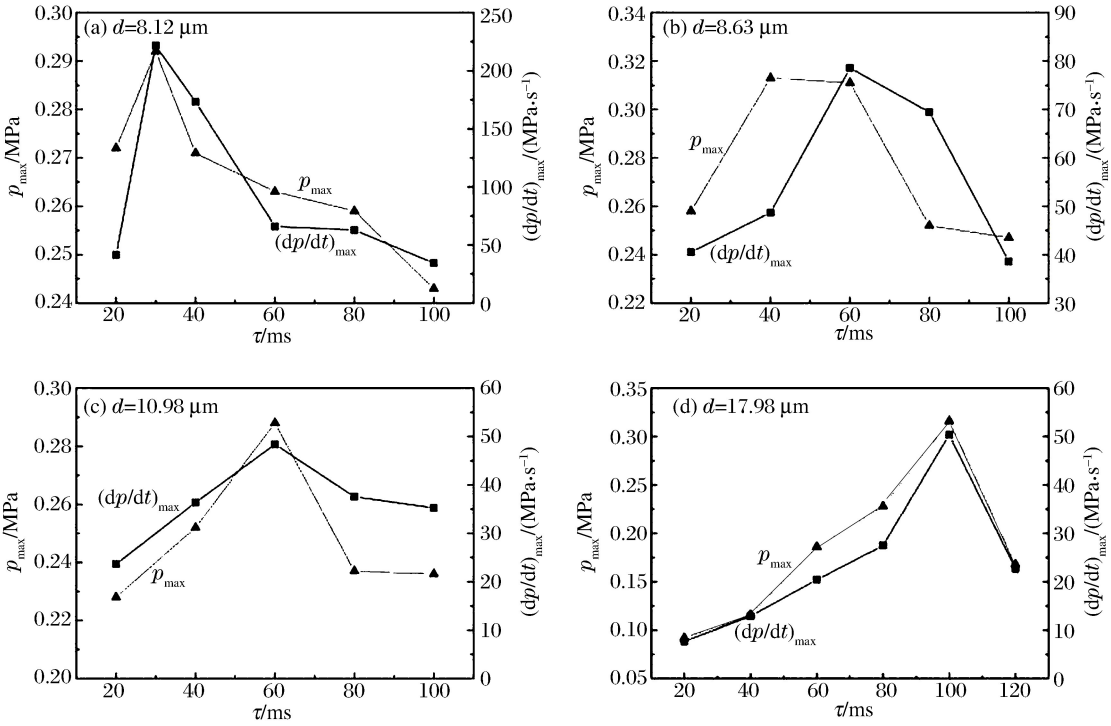


图 3　不同粒径条件下点火延迟时间对铝粉爆炸特性的影响

Fig. 3　Effect of ignition delay time on explosion characteristics of aluminum dust under different particle sizes

2.2　粉尘粒径对铝粉爆炸的影响

点火能量为 3 kJ，铝粉粒径分别为 8.12、8.63、10.98 和 17.98 μm，粉尘质量浓度为 80 g/m³，点火延迟时间为 20、40、60 和 80 ms 时，粒径对铝粉爆炸特性参数变化规律的影响，见表 1 和图 4。

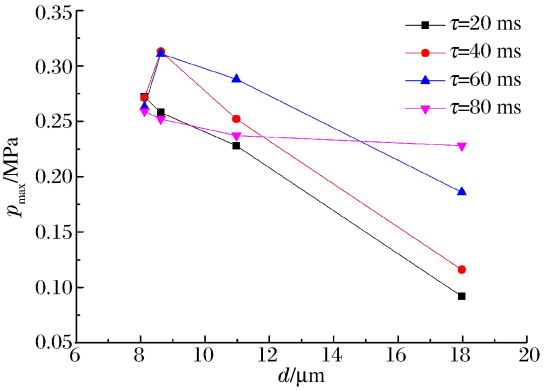


图 4　粉尘粒径对铝粉爆炸特性的影响

Fig. 4　Effect of dust particle size on explosion characteristics of aluminum dust

从上述图表可以看出，粒径大于 8.63 μm 的铝粉，在 20、40、60 和 80 ms 等 4 种点火延迟时间下，铝粉 p_{max} 随粉尘粒径的增大而减小。这是由于粒径越大，颗粒比表面积越小，氧气就越不容易与粉尘粒子表面接触而发生反应，产生的热量就越少，所以 p_{max} 减小。反之，铝粉粒径越小，分散度越大，比表面积越大，氧气与铝粉越容易发生反应，产生的热量越多，所以 p_{max} 增大。而从点火延迟时间为 40 和 60ms 的两条曲线可以看出，粒径 8.12 μm 铝粉的 p_{max} 较 8.63 μm 铝粉偏低，这是由于粒径小到一定程度，颗粒发生团聚而导致。还发现，粒径 8.12 μm 铝粉在 4 种点火延迟时间下的 p_{max} 分别为 0.272、0.271、0.263、0.259 MPa，之间差值较小，说明铝粉粒径减小到一定程度时，点火延迟时间对铝粉 p_{max} 的影响作用减弱。此外，从图 4 可以看出，随着粒径的增大，不同点火延迟时间下最大爆炸压力下降幅度不同，即从 20 ms 至 80 ms，下降幅度减小，粉尘粒径的增大对 p_{max} 的影响作用减弱。

2.3　粉尘浓度对铝粉爆炸的影响

点火能量为 3 kJ，铝粉粒径分别为 8.12、8.63、10.98 和 17.98 μm 时，点火延迟时间分别为 30、40、60 和 100 ms，即各自粒径铝粉对应最佳点火延迟时间。改变粉尘云浓度范围从 80 g/m³ 到 440 g/m³，不同粉尘云浓度下铝粉的 p_{max} 和 $(dp/dt)_{max}$ 的变化规律，见表 2 和图 5。

表 2 不同粉尘浓度下铝粉爆炸特性参数

Table 2 Explosion characteristic parameters of aluminum dust under different dust concentrations

d/μm	τ/ms	ρ/(g·m^{-3})	p_{max}/MPa	$(dp/dt)_{max}$/(MPa·s^{-1})	d/μm	τ/ms	ρ/(g·m^{-3})	p_{max}/MPa	$(dp/dt)_{max}$/(MPa·s^{-1})
8.12	30	60	0.181	53.529	10.98	60	80	0.288	48.402
8.12	30	80	0.292	221.599	10.98	60	120	0.290	74.342
8.12	30	120	0.346	120.130	10.98	60	160	0.355	104.891
8.12	30	160	0.358	110.658	10.98	60	220	0.354	88.289
8.12	30	220	0.343	85.847	10.98	60	280	0.290	33.147
8.12	30	280	0.300	71.626	10.98	60	360	0.219	34.150
8.12	30	360	0.298	62.837	10.98	60	440	0.207	22.583
8.63	40	80	0.313	48.676	17.98	100	80	0.316	50.340
8.63	40	120	0.390	50.904	17.98	100	120	0.334	70.238
8.63	40	160	0.377	104.524	17.98	100	160	0.338	60.415
8.63	40	220	0.375	75.044	17.98	100	220	0.404	60.243
8.63	40	280	0.357	48.920	17.98	100	280	0.350	54.210
8.63	40	360	0.329	44.923	17.98	100	360	0.327	38.616
8.63	40	440	0.298	40.472	17.98	100	440	0.271	26.856

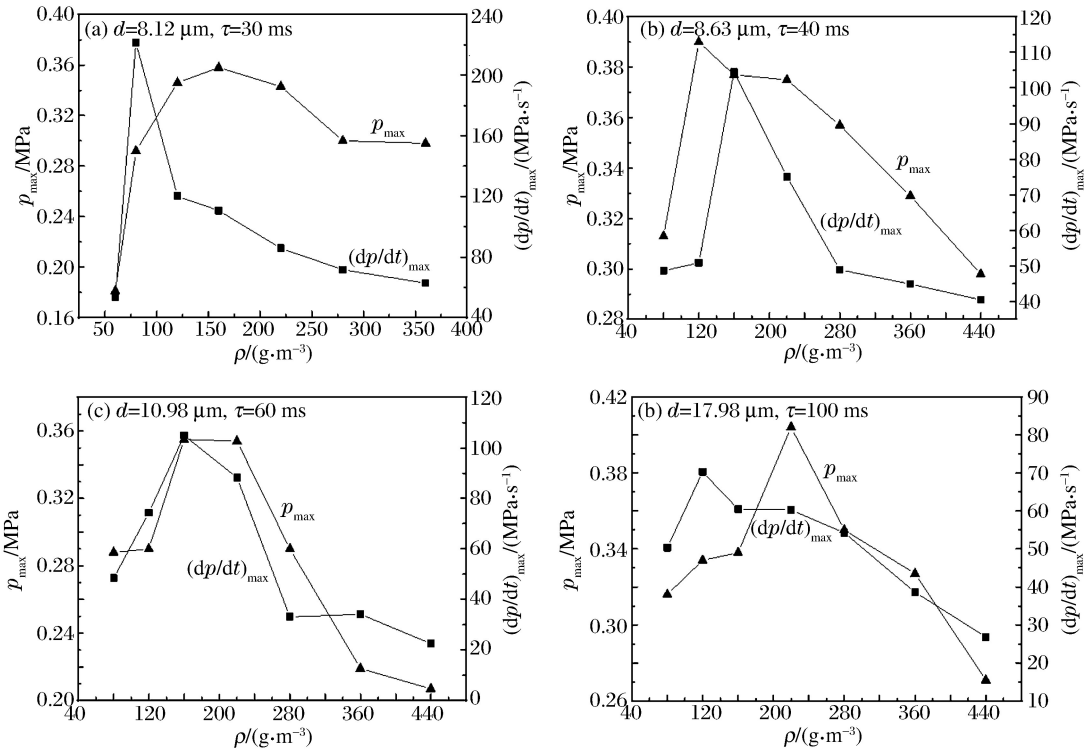


图 5 粉尘浓度对铝粉爆炸特性的影响

Fig. 5 Effect of dust concentration on explosion characteristics of aluminum dust

从上述图表可以看出，粉尘质量浓度在 80～440 g/m^3 范围内，4 种粒径铝粉的 p_{max} 和 $(dp/dt)_{max}$ 均存在峰值(最大值)，8.12 μm 粒径铝粉的 p_{max} 和 $(dp/dt)_{max}$ 为 0.358 MPa、221.599 MPa/s，8.63 μm 粒径铝粉的 p_{max} 和 $(dp/dt)_{max}$ 为 0.390 MPa、104.524 MPa/s，10.98 μm 粒径铝粉的 p_{max} 和 $(dp/dt)_{max}$ 为 0.355 MPa、104.891 MPa/s，17.98 μm 粒径铝粉的 p_{max} 和 $(dp/dt)_{max}$ 为 0.404 MPa、70.238 MPa/s。

p_{max}对应的粉尘浓度为铝粉的最猛烈爆炸粉尘浓度，在此浓度两侧 p_{max}和$(dp/dt)_{max}$表现为左增右减。分析这种变化趋势的原因：当粉尘浓度小于最猛烈爆炸粉尘浓度时，爆炸罐内反应所需的氧气较为充足，使得化学反应速度加快，产生高温高压，所以 p_{max}和$(dp/dt)_{max}$与粉尘浓度成正相关；当粉尘质量浓度等于最猛烈爆炸浓度时，此时氧气与铝粉发生化学反应的比例近似等于化学当量比，两者恰好完全反应，放出的能量最多，p_{max}和$(dp/dt)_{max}$都达到最大；当粉尘质量浓度大于最猛烈爆炸粉尘浓度时，粉尘质量浓度进一步增加，爆炸罐内的氧气含量难以维持和铝粉继续反应，且没有反应的粉尘会吸收爆炸产生的能量和冲击波，使得化学反应速率减慢，所以铝粉粉尘 p_{max}和$(dp/dt)_{max}$与粉尘浓度成负相关。同时得到，铝粉粒径差异导致它所对应的最猛烈爆炸浓度不同，8.12、8.63、10.98、17.98 μm 铝粉所对应的最猛烈爆炸粉尘浓度分别为 160、120，160 和 220 g/m^3，粒度越小的粉尘，最猛烈爆炸粉尘浓度也越小。而 8.12 μm 粒径铝粉由于粒径较小，易发生团聚现象，导致其最猛烈爆炸粉尘浓度增大。

3　结　论

(1)当点火延迟时间在 20～120 ms 范围内，铝粉最大爆炸压力和最大爆炸压力上升速率随着点火延迟时间的增长呈先增大后减小的变化趋势。随着铝粉粒径的增大，最佳点火延迟时间也增大，不同粒径铝粉所对应的最佳点火延迟时间不同，8.12、8.63、10.98 和 17.98 μm 铝粉所对应的最佳点火延迟时间分别为 30、40、60 和 100 ms。

(2)点火延迟时间分别为 20、40、60 和 80 ms 时，在 4 种点火延迟时间下，粒径大于 8.12 μm 的铝粉最大爆炸压力与粉尘粒径关系成负相关，而 8.12 μm 铝粉由于粒径较小，易发生团聚，导致最大爆炸压力偏低。随着点火延迟时间增长，粉尘粒径的增大对最大爆炸压力的影响作用减弱。

(3)粒径大于 8.12 μm 的铝粉，在 80～440 g/m^{3}质量浓度范围内，最大爆炸压力和最大爆炸压力上升速率呈先增大后减小的变化趋势。铝粉粒径不同时，对应的最猛烈爆炸粉尘浓度不同，8.12、8.63、10.98 和 17.98 μm 铝粉最佳爆炸浓度分别为 160、120、160 和 220 g/m^3，铝粉粒径越小，最猛烈爆炸粉尘浓度越小，而 8.12 μm 铝粉由于粒径较小，易发生团聚，所以测得的最猛烈爆炸粉尘浓度偏低。

参考文献：

[1] 李延鸿. 粉尘爆炸的基本特征[J]. 科技情报开发与经济，2005，15(14)：130-131.
LI Yanhong. Basic characteristics of dust explosion[J]. Sci-Tech Information Development with Economy, 2005, 15(14):130-131.

[2] 赵江平，王振成. 热爆炸理论在粉尘爆炸机理研究中的应用[J]. 中国安全科学学报，2004，14(5)：80-84.
ZHAO Jiangping, WANG Zhencheng. Application of thermal explosion theory in the study of dust explosion mechanism[J]. China Safety Science Journal, 2004, 14(5):80-84.

[3] KWON Y S, GROMOV A A, ILYIN A P, et al. The mechanism of combustion of superfine aluminum powders [J]. Combustion and Flame, 2003, 133(4):385-391.

[4] GROMOV A, VERESHCHAGIN V. Study of aluminum nitride formation combustion by superfine aluminum powder combustion in air[J]. Journal of the European Ceramic Soeiety, 2004, 24(9):287-288.

[5] 谭汝媚，张奇，张博. 点火延迟时间对铝粉爆炸特性参数的影响[J]. 爆炸与冲击，2014，34(1)：17-22.
TAN Rumei, ZHANG Qi, ZHANG Bo. Effects of ignition delay time on characteristic parameters of aluminum dust explosion[J]. Explosion and Shock Waves, 2014, 34(1):17-22.

[6] 袁旌杰，伍毅，陈瑜，等. 点火延迟时间对粉尘最大爆炸压力测定影响的研究[J]. 中国安全科学学报，2010，20(3)：65-69.
YUAN Jinjie, WU Yi, CHEN Yu, et al. Effect of ignition delay time on measurement of maximum explosion pressure of dusts[J]. China Safety Science Journal, 2010, 20(3):65-69.

[7] 尉存娟，谭迎新，路旭，等. 点火延迟时间对铝粉爆炸压力的影响研究[J]. 中北大学学报，2009，30(3)：257-260.
YU Cunjuan, TAN Yingxin, LU Xu, et al. Effect of the ignition delay time on the explosion pressure of aluminum dust[J]. Journal of North University of China, 2009, 30(3):257-260.

[8] 李庆钊,王可,梅晓凝,等.微米级铝粉的爆炸特性及其反应机理研究[J].工程热物理学报,2017,38(1):119-225.
LI Qingzhao, WANG Ke, MEI Xiaoning, et al. Investigation on explosion characteristics and reaction mechanism of micro-aluminum powder[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2017,38(1):119-225.

[9] VIGNES A, MUNOZ F. Explosion characteristics of micronand nano-size aluminum powers[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2014,27(2):55-64.

[10] CASTELLANOS D, CARRETO-VAZQUEZ V H, MASHUGA C V, et al. The effect of particle size polydispersity on the explosibility characteristics of aluminum dust[J]. Powder Technology, 2014,254(3):331-337.

[11] 任瑞娥,谭迎新.浓度对铝粉爆炸特性的影响研究[J].消防理论研究,2014,33(4):375-376.
REN Rui'e, TAN Yingxin. Study on the effect of concentration on explosion characteristics of aluminum powder [J]. Fire Theory Research, 2014,33(4):375-376.

[12] LIN B Q, LI W X, ZHU C J, et al. Experimental investigation on explosion characteristics of nano-aluminum powder-air mixtures[J]. Combustion, Explosion and Shock Waves, 2010,46(6):678-682.

[13] CASHDOLLAR K L, ZLOCHWER I A. Explosion characteristics of nano-aluminum powder-air mixtures in 20 L spherical vessels[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2007,20(4/5/6):337-348.

[14] 陈玲.铝粉爆炸特性的实验研究和数值模拟[D].辽宁大连:大连理工大学,2011.

[15] SARLI V D, RUSSO P, SANCHIRCO R, et al. CFD simulations of dust dispersion in the 20 L vessel: Effect of nominal dust concentration[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2014,27(1):8-12.

[16] KALEJAIYE O, AMYOTTE P R, PEGG M J, et al. Effectiveness of dust dispersion in the 20 L Siwek chamber [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2010,23(1):46-59.

Explosion characteristics of micro-sized aluminum dust in 20 L spherical vessel

CHEN Xiaokun[1,2], ZHANG Zijun[1,2], WANG Qiuhong[1,2],
DENG Jun[1,2], LI Haitao[1,2], XU Qingfeng[1,2]

(1. *College of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an* 710054, *Shaanxi, China*;
2. *Shanxi Key Lab of Prevention and Control of Coal Fire, College of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an* 710054, *Shaanxi, China*)

Abstract: In order to investigate explosion characteristics of micro-sized aluminum dust, a series of experiments were carried out to reveal the influences of ignition delay time, dust particle size and dust concentration on explosion parameters of aluminum dust using a 20 L nearly spherical dust explosion experimental system. The results show that: when the ignition delay time was within 20—120 ms, the maximum explosion pressure and maximum rate of pressure rise of aluminum dust initially increased but then decreased, the optimum ignition delay time increased with increasing particle size. The maximum explosion pressure of aluminum dust with particle size greater than 8.12 μm increased with decreasing particle size. Moreover, when the particle size is greater than 8.12 μm and the dust concentration range is 80—440 g/m^3, the maximum explosion pressure and pressure rise rate of aluminum dust increased at beginning and then decreased, in addition, the smaller the dust particle size, the lower the dust concentration corresponding to the most violent explosion.

Keywords: aluminum dust explosion; ignition delay time; particle size; dust cloud concentration; maximum explosion pressure

(责任编辑 丁 峰)