

文章编号: 1003-1480 (2021) 02-0032-05

微/纳米铝粉粉尘爆炸特性研究

方伟¹, 赵省向¹, 张奇², 金大勇¹

(1. 西安近代化学研究所, 陕西 西安, 710065; 2. 北京理工大学, 北京, 100081)

摘要: 利用 5L 爆炸装置开展了铝粉粉尘爆炸实验, 研究了两种不同规格微/纳米铝粉在不同点火能量、粉尘浓度下的爆炸特性。研究表明: 点火能量增大, 铝粉爆炸极限范围变大, 相同的点火能量下, 纳米铝粉比微米铝粉具有更大的爆炸极限范围; 两种铝粉均在浓度为 500g/m³、约 1.2 倍化学当量比浓度时具有最大的爆炸压力和压力上升速率峰值; 微米铝粉中加入 10% 左右的纳米铝粉, 可以获得最大爆炸压力和压力上升速率, 分析认为纳米铝粉的加入改善了体系的反应活性, 提高了粉尘爆炸剧烈程度。

关键词: 铝粉粉尘; 点火能量; 爆炸极限; 爆炸压力; 压力上升速率

中图分类号: TQ560.7 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2021.02.009

Study on the Explosive Characteristics of Micro/Nano-Aluminum Dust

FANG Wei¹, ZHAO Sheng-xiang¹, ZHANG Qi², JIN Da-yong¹

(1. Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an, 710065; 2. Beijing University of Science and Technology, Beijing, 100081)

Abstract: In order to investigate explosive characteristics of micro/nano-aluminum dust, a series of experiments were carried out to reveal the influences of dust particle size, ignition energy and dust concentration on explosion parameters of aluminum dust, by use of a 5L dust explosion experimental system. The results show that with the increase of ignition energy, the explosion limit range of micro/nano-aluminum dust are increased, and the nano-aluminum has a larger explosive limit range than micro-aluminum dust. Both aluminum powders get the peak value of maximum explosion pressure and pressure rise rate when the dust concentration at 500g/m³, about 1.2 times the chemical equivalent. The maximum explosion pressure and pressure rise rate can be obtained by adding 10% or so nano-aluminum into the micro-aluminum powder. It is concluded that the addition of nano-aluminum improves the reactivity of the system and increases the explosion intensity of the dust.

Key words: Aluminum dust; Ignition energy; Explosive limit; Explosion pressure; Pressure rise rate

微/纳米铝粉具有较高的能量和反应活性, 分散于空气中易发生点火和形成铝粉-空气两相爆轰反应, 因而在燃料空气炸药 (FAE) 中具有很高的应用潜力。由于铝粉颗粒的形状、尺寸, 以及分散状态等性质对燃烧和爆炸反应性能有重要影响^[1], 国内外研究者对不同颗粒形状、粒度的铝粉在不同氛围下的点火反应机制进行了多方面研究。Balakrishnan^[2]以实验

数据为基础建立了铝粉粉尘点火的经验模型, 研究了片状、球状铝颗粒在爆炸冲击作用下的点火机制和燃烧行为。Kwon^[3]和 Gromov^[4]通过对铝粉燃烧反应生成产物结构和组成成分进行分析, 探究了超细铝粉燃烧过程的发生机理。ZHOU Jing 等^[5]采用热分析手段研究了含纳米铝粉液固型燃料空气炸药的主要组分在无氧条件和密封环境下的热行为, 分析了纳米铝粉

收稿日期: 2020-10-28

作者简介: 方伟(1982-), 男, 副研究员, 主要从事混合炸药研究。

对FAE主要组分热行为的影响。尉存娟^[6]研究了点火延迟时间、浓度和粒度对铝粉-空气混合物的最大爆炸压力和压力上升速率的影响。周卫军^[7]计算了环氧丙烷/铝粉燃料的FAE爆轰参数,结果表明适当增加铝粉含量能显著提高FAE的爆轰性能。但已有文献对特定规格铝粉粉尘爆炸特性的研究报道较少。

本文选择具有较高反应活性的片状铝粉和纳米铝粉为研究对象,利用其比表面积大、弥散悬浮能力强的特点,排除点火延迟时间和局部浓度变化影响因素,实验研究不同点火能量条件下铝粉粉尘爆炸极限,以及铝粉及其混合物粉尘的爆炸压力输出情况,为燃料空气炸药燃料选型、配方设计等提供参考。

1 实验部分

1.1 实验样品

实验材料包括片状铝粉(Aluminum flakes)和纳米铝粉(Nano-Aluminum powder)。片状铝粉的活性铝含量为85%,形状为不规则片状,形貌见图1(a),片层直径约为18 μm,片层厚度为纳米级。纳米铝粉为球形,活性铝含量为82%,平均粒径约为100nm,形貌见图1(b)。按照纳米铝粉质量分数为5%、10%、15%的比例分别将两种铝粉混合均匀,得到铝粉混合物样品。

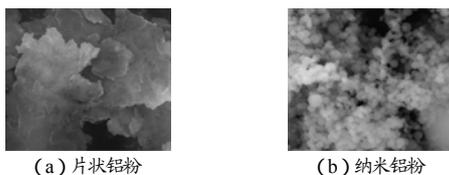


图1 铝粉形貌
Fig.1 Morphology of aluminum powders

1.2 爆炸极限测量

爆炸极限测试在5L圆柱形爆炸实验装置中进行,实验装置主要由点火系统、控制系统、采集系统、喷粉系统和5L的圆柱形爆炸容器组成,点火系统采用常规电容储能放电,使用中心点火方式。点火电极为钨电极,曲率半径0.5mm,电极间距3mm。5L爆炸容器内径199mm,高160mm。装置构成如图2所示。压力传感器采用奇石乐(Kistler)公司生产的211M0160型压电式传感器,最大量程为6.895MPa。

数据采集系统选用美国国家仪器(NI)公司生产的NI PXI 5922高速数字化仪,分辨率为0.5~15MS·s⁻¹,存储深度8MB/channel。

实验时,将样品分成两等份分别放入左右两边的储料盒中,设定空气压力泵气动压力为0.8MPa,对火花放电装置中的储能电容进行充电,调节好点火能量测试系统和爆炸参数测试系统,通过电磁阀控制高压空气脉冲,将储料盒内的燃料喷入罐体形成燃料空气炸药云雾,开启点火开关,对云雾进行电火花点火,同时触发爆炸参数测试系统,记录爆炸罐内压力变化情况。铝粉喷洒后点火延迟时间设为60ms后,点火能量设定为15J和40J,当容器内压力变化超过7%即判定为爆炸反应发生,否则为未发生。实验从高浓度开始,浓度逐渐减小,浓度较高时,可适当增大实验浓度间隔步长,浓度接近爆炸极限时减小浓度间隔,以保证爆炸极限测试误差小于10g·m⁻³。

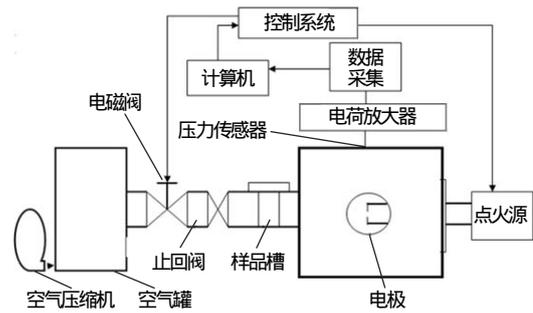


图2 实验装置示意图
Fig.2 Schematic diagram of the experimental device

1.3 爆炸压力测量

铝粉粉尘爆炸压力测试同样在图2所示的5L爆炸实验装置中进行。前期通过探索实验,对喷粉压力等参数进行了优化,用于铝粉喷洒的压缩空气压力为0.8MPa,铝粉喷洒后点火延迟时间设为60ms后,电火花点火能量为固定值15J。实验样品为前面所述的片状铝粉、纳米铝粉,以及两种铝粉按不同比例组成的混合物3种。通过控制喷入爆炸罐中铝粉的质量调节粉尘浓度,片状铝粉和纳米铝粉分别在300g/m³、340g/m³、500g/m³、600g/m³共4种粉尘浓度下进行爆炸超压测量。不同比例混合铝粉爆炸实验在固定浓度下进行,根据单质铝粉样品实验情况,选择两种铝粉粉尘获得最高超压值对应的浓度或附近浓度作为混合铝粉测试浓度。

2 结果与讨论

2.1 铝粉爆炸极限

纳米铝粉和微米片状铝粉在不同点火能量下的爆炸极限试验结果如表1~2所示,15J和40J点火能量下,纳米铝粉爆炸极限范围分别为265~1670g/m³和140~1730g/m³,微米片状铝粉爆炸极限为385~1610g/m³和205~1690g/m³。文献[7]测得的浓度为80g/cm³条件下铝粉爆炸压力,低于本研究获得的铝粉爆炸下限,区别主要在于点火能量不同,文献[7]中的点火能量为3000J,远高于本实验的点火能量,说明点火能量对铝粉爆炸极限测试结果有很大影响。

根据实验数据可以看出,随着点火能量增大,纳米铝粉和微米片状铝粉均表现出爆炸下限降低、爆炸上限升高,可爆炸浓度范围增大的趋势;在相同的点火能量下,纳米铝粉与微米片状铝粉相比爆炸下限更低,爆炸上限更高,说明纳米铝粉更容易发生燃烧爆炸。原因主要是纳米铝粉粒度小,比表面积更大,与空气接触得也更加充分,化学活性更强,更容易进行燃烧爆炸反应,因此具有更大的爆炸极限范围。

表1 爆炸极限试验数据

Tab.1 The explosive limit test data

铝粉	点火能量/J				铝粉	点火能量/J			
	15		40			15		40	
	浓度/(g·m ⁻³)	结果	浓度/(g·m ⁻³)	结果		浓度/(g·m ⁻³)	结果	浓度/(g·m ⁻³)	结果
纳米铝粉	1800	×	1800	×	微米片状铝粉	1800	×	1800	×
	1600		1600			1600		1600	
	1650		1700			1650	×	1700	×
	1670		1750	×		1630	×	1650	
	1680	×	1725			1615	×	1675	
	1000		1735	×		1610		1690	
	800		1730			800		400	
	600		300			600		300	
	400		200			400		200	×
	300		100	×		300	×	250	
200	×	150		350	×	225			
250	×	125	×	375	×	215			
260	×	135	×	385		205			
265		140		-	-	-	-		

注: ✓表示爆炸反应发生; ×表示爆炸反应未发生。

表2 爆炸极限试验结果

Tab.2 Result of explosive limit test

点火能量/J	15		40	
	爆炸下限/(g·m ⁻³)	爆炸上限/(g·m ⁻³)	爆炸下限/(g·m ⁻³)	爆炸上限/(g·m ⁻³)
纳米铝粉	265	1670	140	1730
微米片状铝粉	385	1610	205	1690

2.2 爆炸压力输出

在铝粉的爆炸极限范围内,选取300g/m³、340g/m³、500g/m³、600g/m³共4种粉尘浓度,在喷粉压力0.8MPa、点火延迟时间60ms、点火能量15J条件下,分别开展纳米铝粉和微米片状铝粉的爆炸压力测试,爆炸压力变化曲线分别见图3~4和表3。

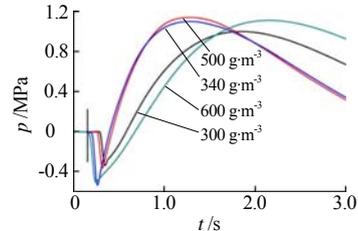


图3 不同浓度纳米铝粉的爆炸压力曲线

Fig.3 Explosion pressure curve of nano-aluminum dust with different concentration

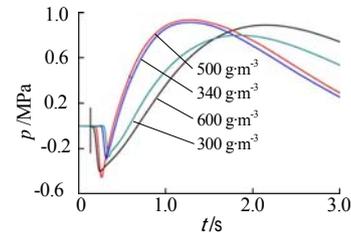


图4 不同浓度微米铝粉的爆炸压力曲线

Fig.4 Explosion pressure curve of micro-aluminum dust with different concentration

表3 铝粉爆炸压力参数

Tab.3 Explosion pressure parameters of aluminum powder

空气中的铝粉浓度/(g·m ⁻³)	纳米铝粉		微米片状铝粉	
	p_{max} /MPa	$(dp/dt)_{max}$ /(MPa·s ⁻¹)	p_{max} /MPa	$(dp/dt)_{max}$ /(MPa·s ⁻¹)
300	0.985	1.75	0.765	1.33
400	1.100	3.33	0.845	3.06
500	1.135	3.55	0.865	3.28
600	1.075	1.41	0.830	1.26

由图3和图4可以看出,在不同浓度下,铝粉爆炸压力均表现出先降低再快速升高的变化趋势,这是因为铝粉需要吸收一定的能量,当自身能量超过活化能后才与空气发生爆炸反应,铝粉吸热过程导致了压力的降低。在理想状态下,铝粉浓度接近化学当量比时爆炸反应最为猛烈,具有最大的爆炸压力和压力上升速率。本实验所用的两类铝粉的活性铝含量范围为82%~85%,当化学当量比为1时,对应的铝粉浓度为400g/m³左右。而从表3数据可以看出,两种铝粉在浓度为500g/m³时的最大爆炸压力和压力上升速率均比浓度为400g/m³时更高。这说明实际爆炸情况与理想状态不完全一致,主要区别可能在于喷洒进入爆炸罐的铝粉浓度并非处处均匀,铝粉在爆炸罐内壁的粘附或自身的沉降均会影响实验结果,铝粉爆炸反应

的最佳浓度一般为理想状态化学当量比浓度的 1.2 倍左右。从实验结果可知,在 $300\text{g}/\text{m}^3$ 和 $600\text{g}/\text{m}^3$ 浓度下,铝粉爆炸最大压力和压力上升速率明显降低,其原因为低浓度条件下,铝粉氧化放热不足以支撑爆炸波前沿快速向未反应区传播,随着铝粉浓度的降低,铝粉的反应表现为爆炸反应速度变慢,传播速度降低,甚至由爆炸反应转为低速燃烧;而在高浓度下,爆炸罐内的氧气含量难以维持和铝粉继续反应,且来不及反应的铝粉会吸收爆炸产生的能量和冲击波,使得化学反应速率减慢,导致反应强度的降低。

从表 3 可以看出, $500\text{g}/\text{m}^3$ 浓度下,纳米铝粉最大爆炸压力为 1.135MPa , $(dp/dt)_{\max}$ 为 $3.55\text{MPa}\cdot\text{s}^{-1}$,均高于微米片状铝粉的 p_{\max} 和 $(dp/dt)_{\max}$ 值,并且在其他浓度条件下,纳米铝粉也具有相对较高的 p_{\max} 和 $(dp/dt)_{\max}$ 值。该结果主要是由于两种铝粉比表面积差异造成的,纳米铝粉的比表面积为 $13.2475\text{m}^2/\text{g}$,微米片状铝粉为 $4.1060\text{m}^2/\text{g}$,在活性铝含量相当条件下,颗粒比表面积越大,氧气就越容易与铝粉粒子表面接触而发生反应,所以 p_{\max} 和 $(dp/dt)_{\max}$ 值越大,反之比表面积越小,氧气与铝粉越难以发生反应, p_{\max} 和 $(dp/dt)_{\max}$ 值也就越小。本文中测得的最大压力上升速率远低于相关文献数据^[8],这主要是由铝粉规格和点火能量等因素不同引起的,铝粉粒度越小,活性越高,点火能量强度越大,均会引起 $(dp/dt)_{\max}$ 值的增加。

2.3 混合铝粉粉尘爆炸压力

利用 20L 爆炸实验装置,在铝粉浓度为 $500\text{g}/\text{m}^3$ 、点火能量为 10.24J 条件下,测量了纳米铝粉/微米片状铝粉混合物与空气形成的燃料空气炸药的爆炸压力曲线,纳米铝粉在混合铝粉中的质量分数分别为 0%、5%、10%、15%,测试结果见图 5 及表 4。

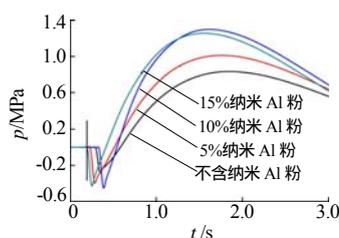


图 5 纳米铝粉与微米铝粉混合物爆炸压力曲线
Fig.5 Explosion pressure curve of micro/nano-aluminum mixture

从图 5 及表 4 可知,在 0~10%含量范围内,随

着高活性铝含量的增加,粉尘爆炸压力上升速率明显变大,爆炸超压峰值也不断增大,含 10%纳米铝粉的超压峰值达到 1.26MPa ,与不含纳米铝粉的 0.82MPa 相比,压力峰值提高了 53.6%左右;纳米铝粉含量增加到 15%,混合铝粉的爆炸压力上升速率和超压峰值并未继续增大,从试验结果看,要获得最大爆炸压力峰值,纳米铝粉的最佳加入比例为 10%左右。

表 4 纳米铝粉与微米铝粉混合物爆炸参数
Tab.4 Explosion parameters of micro/nano-aluminum mixture

浓度/ $(\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	纳米铝粉含量/%	p_{\max}/MPa
1	0	0.82
2	5	1.02
3	10	1.26
4	15	1.16

微米片状铝粉活性铝含量高,拥有更高的总氧化燃烧热值,但由于粒度较大,反应敏感性或反应速度相对较低,氧化反应时间会延长,释放的高能量不会全部引起爆炸超压峰值的提高。高活性纳米铝粉虽然活性铝含量较低,但粒度小、比表面积大、反应敏感性和氧化反应速率高,释放的能量大部分能够引起爆炸压力峰值的提高。将纳米铝粉加入微米铝粉,能够在保持混合体系具有较高热值的同时,利用纳米铝的高反应活性,对体系进行敏化,提高混合铝粉整体氧化反应速率。当高活性纳米铝含量超过一定程度,体系总热值的降低对爆炸压力输出的影响开始显现,随着纳米铝含量继续提高,体系爆炸压力峰值开始降低。因此,在平衡反应敏感性和能量输出性能时,高活性纳米铝含量有一个最佳比例范围。

3 结论

(1) 5L 爆炸罐内,在 15J 和 40J 点火能量下,纳米铝粉爆炸极限范围分别为 $265\sim 1670\text{g}/\text{m}^3$ 和 $140\sim 1730\text{g}/\text{m}^3$,微米片状铝粉为 $385\sim 1610\text{g}/\text{m}^3$ 和 $205\sim 1690\text{g}/\text{m}^3$,随着点火能量增大,铝粉爆炸极限范围变大,相同的点火能量下,纳米铝粉比微米铝粉具有更大的爆炸极限范围;

(2) 两种铝粉均在浓度为 $500\text{g}/\text{m}^3$ 、约 1.2 倍化学当量比浓度时具有最大的爆炸压力和压力上升速率峰值,在相同浓度下,高活性纳米铝粉尘具有较高的爆炸压力和压力上升速率;

(3) 微米铝粉中加入 10%左右的纳米铝粉, 可以获得最大爆炸压力和压力上升速率, 分析认为主要原因是高反应活性的纳米铝粉对爆炸体系进行了敏化, 提高了粉尘的爆炸剧烈程度。

参考文献:

- [1] 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): 219-225.
- [2] K Balakrishnan,A L Kuhl, J B Bell,V E Beckner.An empirical model for the ignition of explosively dispersed aluminum particle clouds[J]. Shock Waves,2012(22): 591-603.
- [3] KWON Y S, GROMO 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 Society, 2004, 24(9): 287-288.
- [5] ZHOU Jing, AN Jing, et al.. Thermal behaviors of the main components in nana-based fuel air explosive[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2017, 40(3): 31-35.
- [6] 尉存娟, 谭迎新. 铝粉-空气混合物爆炸压力影响因素研究[J]. 火工品, 2009(2): 31-34.
- [7] 周卫军,王少龙,等.铝粉对 FAE 爆轰性能影响的研究[J]. 战术导弹技术,2008(1):14-16.
- [8] 陈晓坤,张自军,等.20L 近球形容器中微米级铝粉的爆炸特性[J].爆炸与冲击,2018,38(5):1 130-1 136.
- [9] Supri A. G., Ismail H., Shuhadah S. Effect of polyethylene-grafted maleic anhydride (PE-g-MAH) on properties of low density polyethylene/eggshell powder (LDPE/ESP) composites [J]. Journal of Macromolecular Science: Part D - Reviews in Polymer Processing, 2010, 49(4): 347-353.
- [10] Tan S. J., Supri A. G., Teh P. L..Effect of PE-g-MAH as compatibilizer on properties of ldpe/nr/whf composites[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013(284-287): 87-93.
- [11] Yang J N, Nie S B. Effects of calcium sulfate whisker on the mechanical property, morphological structure and thermal degradation of poly (lactic acid) composites[J]. Polymer Degradation and Stability, 2017(144): 270-280.
- [12] 陈雄胜.导爆管性能测试研究[J].爆破器材,2015,44(3):48- 50.
- [13] Kissinger HE. Reaction kinetics in differential thermal analysis [J]. Anal Chem, 1957, 29(11): 1 702-1 706.
- [14] Carrasco F, Pagès P, Gámez-Pérez J, et al.. Kinetics of the thermal decomposition of processed poly(lactic acid)[J]. Polym Degrad Stab, 2010, 95(12): 2 508-2 514.

《火工品》期刊再次入选《中文核心期刊要目总览》

据《中文核心期刊要目总览》2020 版编委会通知：《火工品》期刊入选《中文核心期刊要目总览》2020 年版（第 9 版）之武器工业类核心期刊。

《中文核心期刊要目总览》由北京大学出版社出版，书中按《中国图书馆分类法》列出了 74 个学科的核心期刊表，并逐一对核心期刊进行了著录。本次对于核心期刊的评价仍采用定量评价和定性评审相结合的方法。定量评价指标体系采用了被摘量（全文、摘要）、被摘率（全文、摘要）、被引量、他引量（期刊、博士论文）、影响因子、他引影响因子、特征因子、论文影响分值、论文被引指数、互引指数、获奖或被重要检索系统收录、基金论文比（国家级、省部级）、Web 下载量、Web 下载率 16 个评价指标，选作评价指标统计源的数据库及文摘刊物达 48 种，统计到的文献数量共计 142 亿余篇次，涉及期刊 13 764 种。参加核心期刊评审的学科专家 1 万多位。经过定量筛选和专家定性评审，从我国正在出版的中文期刊中评选出 1 990 种核心期刊。

《火工品》期刊在此衷心感谢长期关注和支持本刊发展的专家、作者以及读者！

本刊将继续为大家做好服务，努力提供更好的平台，共同促进火工烟火行业的大发展。

《火工品》编辑部