

文章编号:1006-9941(2021)10-0971-06

含微/纳米铝粉燃料空气炸药爆炸特性

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. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

摘要: 利用20 L爆炸装置开展了含微/纳米铝粉燃料空气炸药爆炸特性研究。试验结果表明:微米铝粉中加入5%和10%纳米铝粉后,混合铝粉爆炸压力峰值增幅分别为24.4%和58.5%,最大压力上升速率增幅达到80.6%和103.4%,纳米铝粉含量大于10%对于爆炸效应增加没有明显作用;固液比为30/70的燃料空气炸药,点火能从11.83 J增加到28 J,其爆炸压力从0.28 MPa增大到0.52 MPa,爆炸温度从834 °C增大到1118 °C,表明增大点火能可以提高燃料空气炸药爆炸参数;提高微/纳米铝粉含量,能够有效提高固液型燃料空气炸药爆炸压力和爆炸温度。

关键词: 纳米铝粉;燃料空气炸药;点火能;爆炸特性

中图分类号: TJ55

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2021080

1 引言

随着技术的发展,燃料空气炸药(Fuel-Air Explosive, FAE)燃料从最初的低沸点可爆性有机液体,发展到了目前固液混合类型^[1-2],能量和后勤保障性有了很大提高。与环氧丙烷等典型液体FAE燃料^[3-4]相比,燃料中加入高密度、高体积热、低耗氧量的铝粉后,不仅能显著提高装药密度和装药能量,而且有助于增大抛撒距离,扩大爆炸云团覆盖面积^[5],从而大大增强FAE爆炸毁伤威力。基于这些特点,铝粉以及铝粉与液体燃料混合物的多相云雾点火及爆炸成为中外研究的热点。王敬凯^[6]综述了近年来分子动力学和反应动力学在铝氧、铝水以及铝其他氧化物反应体系中的进展,并对铝粉氧化动力学的机制及关键影响因素进行深入分析。Balakrishnan^[7]以实验数据为基础建立了铝粉粉尘点火经验模型,该模型能够指导铝粒子点火和后燃烧效应的研究。张奇^[8]结合激光衍射仪和粒子图像测速技术,利用20 L圆柱形爆炸装置研究了微

米、纳米铝粉及其混合物粉尘在不同湍流强度下的粒度分布,并揭示了湍流强度对铝粉粉尘点火和爆炸特性的影响,研究结果表明铝粉分布的均匀程度对最大爆炸压力的影响要强于湍流强度,而湍流强度对最大爆炸压力上升速率影响则更大。尉存娟^[9]通过实验证明,对于不同规格的铝粉,存在最佳的点火延迟时间、云雾浓度和粒度使得最大爆炸压力和压力上升速率最大。周卫军^[10]计算了环氧丙烷/铝粉燃料的FAE爆轰参数,综合考虑FAE爆轰参数、有效作用范围、起爆可靠性和铝粉分散相,认为液固混合燃料中铝粉的配比按30%~40%设计是可行的。

已报道的关于含铝FAE燃料的相关文献^[11-18]主要涉及的是微米铝粉,而微米铝粉存在点火感度相对较低的问题,通过引入具有高反应活性特征的纳米铝粉作为添加剂,有可能解决这一问题。而目前关于含纳米铝粉的FAE燃料报道^[19]较少,特别是纳米铝粉比例对FAE爆炸效应的研究尚未见公开报道。本研究以微/纳米铝粉混合物和含纳米铝粉的固液型FAE燃料为研究对象,利用实验室20 L云雾爆炸实验装置^[20],对混合燃料的爆炸参数进行测试,研究了含纳米铝粉FAE燃料的云雾爆炸特征,探讨了点火能、纳米铝粉含量对爆炸压力和温度的影响规律,以期对这类燃料选型、配方设计等提供参考。

收稿日期:2021-04-10;修回日期:2021-05-20

网络出版日期:2021-07-14

作者简介:方伟(1982-),男,副研究员,主要从事混合炸药研究。

e-mail: davidfangw@126.com

通信联系人:赵省向(1963-),男,研究员,主要从事混合炸药研究。

e-mail: Zsx58@sina.com

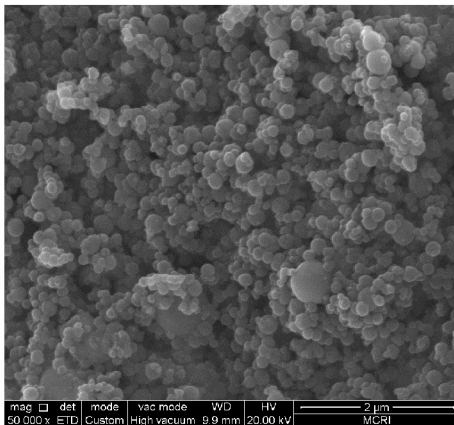
引用本文:方伟,赵省向,张奇,等.含微/纳米铝粉燃料空气炸药爆炸特性[J].含能材料,2021,29(10):971-976.

FANG Wei, ZHAO Sheng-xiang, ZHANG Qi, et al. Explosion Characteristics of Fuel-air Explosive Containing Micro/Nano-aluminum Powder[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2021, 29(10):971-976.

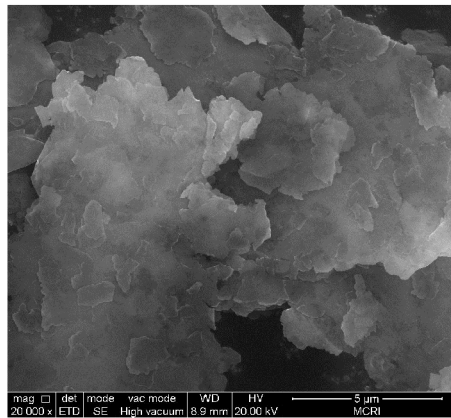
2 实验部分

2.1 实验材料

实验材料:纳米铝粉(nano-Al),活性铝含量85%, d_{50} 为100 nm,形貌见图1a,西安近代化学研究所;微米铝粉(micro-Al),活性铝含量88%,不规则片状,直径约为18 μm ,厚度小于1 μm ,形貌见图1b,鞍钢铝粉厂;液体碳氢烷烃,纯度98.5%,密度 $0.94 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,西安近代化学研究所;液体硝酸酯,工业级,张家口市华威化工有限公司。其中,液体碳氢烷烃和液体硝酸酯按照质量比40/60混合,制成液体混合燃料。



a. nano-aluminum powders



b. micro-aluminum flakes

图1 铝粉形貌

Fig.1 Morphology of aluminum powders

2.2 实验装置

实验在容积为20 L的圆柱形云雾爆炸装置中进行,实验装置如图2所示。整个系统由爆炸罐、点火系统、测试系统构成。爆炸罐采用壁厚为10 mm的不锈钢制成,罐体内部高度和直径分别为312 mm和

300 mm,爆炸罐两侧各连接一套压缩空气脉冲喷入装置,分别用于液体燃料和粉体的喷洒,在爆炸罐内形成燃料-空气混合云雾;点火系统采用电极点火方式,点火能量能够精确调节和控制;测试系统由数据采集系统、压力传感器、温度传感器、信号调理器等构成,用于爆炸压力、温度变化历程的准确测量。

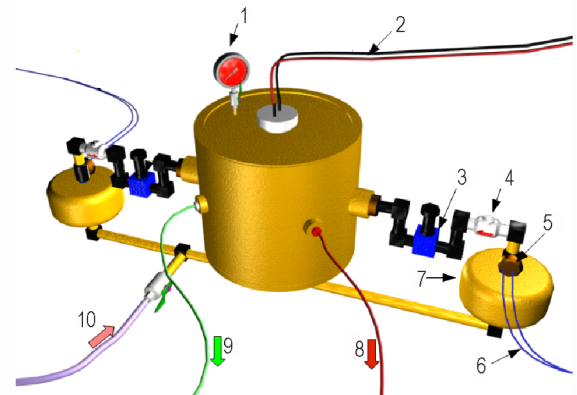


图2 实验装置示意图

1—压力表,2—点火电极,3—储料盒,4—电磁阀,5—单向阀,6—同步控制,7—高压气罐,8—压力测试,9—温度测试,10—充气管

Fig.2 Schematic diagram of the experimental device

1—pressure gage, 2—electrode, 3—sample container, 4—solenoid valve, 5—check valve, 6—control system, 7—air reservoir, 8—pressure transducer, 9—temperature sensor, 10—gas tube

2.3 实验方法

按照 $500 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的宏观浓度(即放入储料盒内的燃料质量除以罐体体积)进行实验,由于储料盒内燃料残余,罐体内实际燃料浓度经测试约为 $340 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$,略高于化学当量浓度。实验时,称量样品并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0.8 MPa,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20 L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,获得点火云雾中的压力、温度变化曲线。

3 结果与讨论

3.1 高活性铝含量对混合铝粉云雾爆炸压力的影响

在宏观浓度为 $500 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$,罐内实际浓度为 $340 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$,点火能为10.24 J试验条件下,测量了纳米铝粉含量分别为0.5%、10%、15%的混合铝粉爆炸压力参数,结

果见表1。

表1 纳米铝粉与微米铝粉混合物爆炸参数

Table 1 Explosion parameters of micro/nano-aluminum mixture

No.	concentration of aluminum dust /g·m ⁻³	nano-aluminum content/%	maximum pressure /MPa	(dp/dt) _{max} /MPa·s ⁻¹
1 [#]	344	0	0.82	1.75
2 [#]	342	5	1.02	3.16
3 [#]	342	10	1.30	3.56
4 [#]	343	15	1.16	3.12

从表1可见,在纳米铝粉含量为0%~10%范围内,混合铝粉的爆炸压力峰值和爆炸压力最大上升速率 $(dp/dt)_{\max}$ 均随着高活性铝含量的升高而增大。纯微米铝粉爆炸压力峰值和最大上升速率为0.82 MPa和1.75 MPa·s⁻¹,加入纳米铝粉5%和10%后,爆炸压力峰值分别提高到1.02 MPa和1.30 MPa,增幅分别为24.4%和58.5%,最大压力上升速率增幅达到80.6%和103.4%,说明纳米铝粉的加入显著提高了混合铝粉的爆炸强度和剧烈程度。当纳米铝粉含量升高到15%时,其爆炸最大压力和压力上升速率并未增大,反而有减小的趋势,表明在该体系下,纳米铝粉最佳含量约为10%,纳米铝粉含量大于10%对于爆炸效应增加没有明显作用。

对于纳米铝粉的促进作用,其原因可能是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。加入纳米铝粉,能够在保证能量不降低的前提下,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,随着纳米铝含量的提高,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之间,高活性纳米铝含量有一个最佳比例范围。

3.2 点火能对燃料空气炸药爆炸参数的影响

以含10%纳米铝粉的铝粉混合物为固体组分,以40/60的液体混合燃料为液体组分,利用20 L爆炸实验装置,在宏观浓度为500 g·m⁻³,罐内实测浓度约为

340 g·m⁻³条件下,测量了固/液组分质量比分别为30/70、50/50、60/40的燃料空气炸药在不同点火能量下的爆炸超压和温度变化曲线,结果见图3和图4。

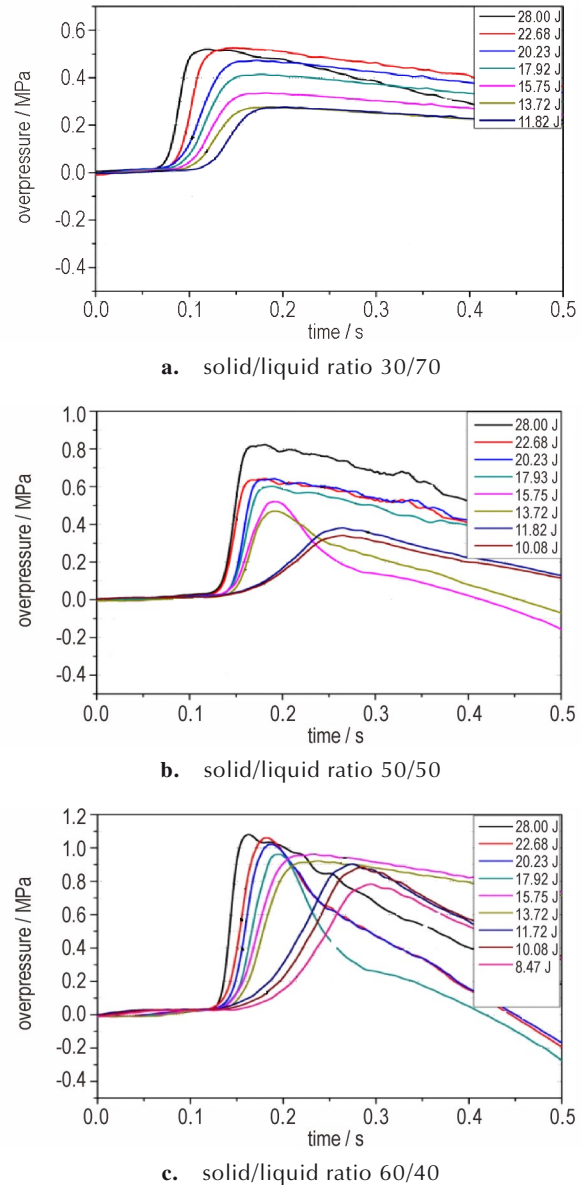


图3 不同点火能量下不同固/液比燃料空气炸药爆炸超压

Fig.3 Overpressure of fuel-air explosive with different solid/liquid ratio in varying ignition energies

由图3a可见,固/液比为30/70的燃料空气炸药在点火能为11.82 J时的爆炸弛豫时间(从点火开始到压力明显开始上升的时间)约为0.106 s,随着点火能的增大(11.82, 13.72, 15.75, 17.92, 20.23, 22.68, 28.00 J),爆炸弛豫时间不断减小,当点火能增大到28.00 J时,爆炸弛豫时间约减小为0.066 s,相应的,燃料空气炸药的爆炸温度上升时间也明显变短。固/液

比为 50/50 和 60/40 的燃料空气炸药的爆炸弛豫时间具有相同的变化规律。

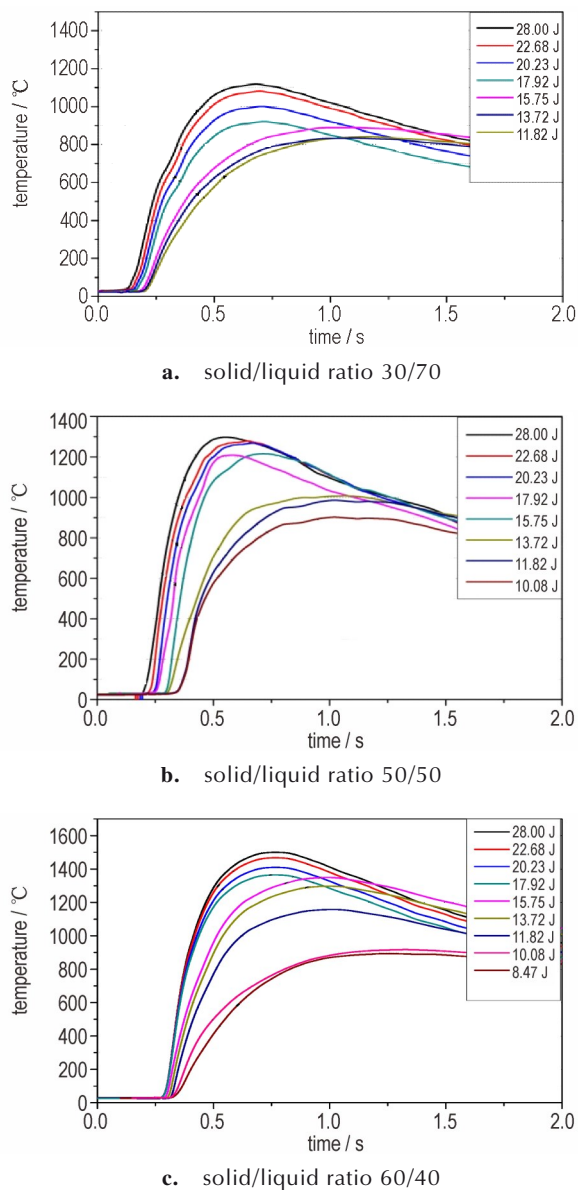


图 4 不同点火能量下不同固液比燃料空气炸药的爆炸温度
Fig.4 Explosion temperature of fuel-air explosive with different solid/liquid ratio in varying ignition energies

不同点火能量下,各种固/液比燃料空气炸药的最大爆炸压力和最大爆炸温度数据见表 2。从表 2 可见,固液比为 30/70 的燃料空气炸药,点火能从 11.83 J 增加到 28 J,其最大爆炸压力从 0.28 MPa 增大到 0.52 MPa,最高爆炸温度从 834 °C 增大到 1118 °C。从表 2 结果还可以看出,随着点火能的增加,固/液比为 50/50 和 60/40 燃料空气炸药的最大爆炸压力和最大爆炸温度同样明显增大。该结果表明,增大点火能有利于提高燃料空气炸药的爆炸参数。

表 2 不同点火能下燃料空气炸药最大爆炸压力和最大爆炸温度
Table 2 Maximum pressure and maximum temperature of fuel-air explosive under different ignition energies

ignition energy/J	maximum pressure/MPa			maximum temperature/°C		
	30/70	50/50	60/40	30/70	50/50	60/40
28.00	0.52	0.82	1.08	1118	1298	1500
22.68	0.52	0.64	1.06	1081	1278	1467
20.23	0.48	0.64	1.02	1001	1268	1410
17.92	0.42	0.6	0.96	921	1216	1365
15.75	0.34	0.52	0.96	889	1210	1350
13.72	0.28	0.48	0.92	841	1008	1298
11.83	0.28	0.38	0.9	834	986	1158
10.08	-	0.34	0.88	-	902	918
8.47	-	-	0.78	-	-	894

表 3 中的数据为不同点火能下,各种固/液比燃料空气炸药最大爆炸压力上升速率 $(dT/dt)_{\max}$ 和最大爆炸温度上升速率 $(dp/dt)_{\max}$,这两个参数反映了炸药体系的爆炸反应剧烈程度。从表 3 可见,点火能从 11.83 J 增大到 28 J,固液比 30/70 燃料空气炸药的 $(dT/dt)_{\max}$ 从 1821 °C·s⁻¹ 增大到 3247 °C·s⁻¹, $(dp/dt)_{\max}$ 从 6.40 MPa·s⁻¹ 增大到 24.25 MPa·s⁻¹,并且固/液比为 50/50 和 60/40 燃料空气炸药的 $(dT/dt)_{\max}$ 和 $(dp/dt)_{\max}$ 具有相同的变化趋势。该结果表明,在本实验点火能范围内,燃料空气炸药的爆炸反应剧烈程度随着点火能的增大而增强。

表 3 不同点火能下燃料空气炸药最大压力和温度上升速率
Table 3 Maximum rise rate of pressure and temperature of fuel-air explosive under different ignition energies

ignition energy/J	$(dT/dt)_{\max}/^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$			$(dp/dt)_{\max}/\text{MPa}\cdot\text{s}^{-1}$		
	30/70	50/50	60/40	30/70	50/50	60/40
28.00	3247	7969	10817	24.25	40.00	60.87
22.68	3146	7221	10576	20.92	31.22	40.94
20.23	2919	7072	10179	11.02	31.20	38.23
17.92	2690	7069	9817	9.58	23.98	29.53
15.75	2112	6096	7088	7.78	16.02	22.35
13.72	1987	4730	6876	6.45	15.66	21.64
11.83	1821	3531	6080	6.40	5.21	12.38
10.08	-	3230	3801	-	4.66	12.11
8.47	-	-	2808	-	-	10.72

分析认为,燃料空气炸药通过电极放电点火的过程属于热刺激爆炸,燃料组分在热作用下发生热分解、氧化反应快速放出气体产物和热量,使爆炸罐内的压力和温度快速上升。点火能量越高,组分原子瞬间吸收的热量越多,缩短了达到活化温度所需时间,使爆炸

反应的时间提前,爆炸弛豫时间变短;同时,点火能的提高增加了点火瞬间参加反应的原子数量,从而增大爆炸反应区能量释放效率,有更多的能量维持爆炸波的传播,爆炸强度和剧烈程度得到增强。

3.3 铝粉含量对燃料空气炸药爆炸参数的影响

通过对表2数据作图,能非常直观地反映出铝粉(Nano-Al/Micro-Al=10/90混合铝粉)含量对燃料空气炸药爆炸最大超压和最高温度的影响趋势,结果见图5和图6。

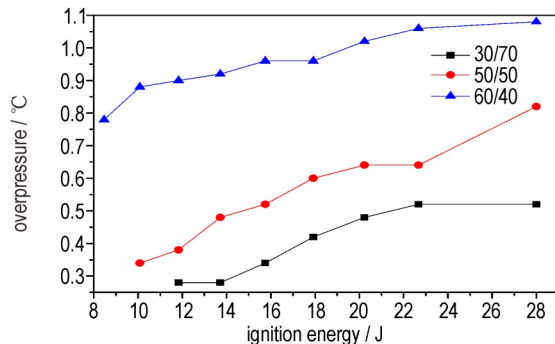


图5 不同固液比燃料空气炸药爆炸超压

Fig.5 Overpressure of fuel-air explosive with different solid/liquid ratio

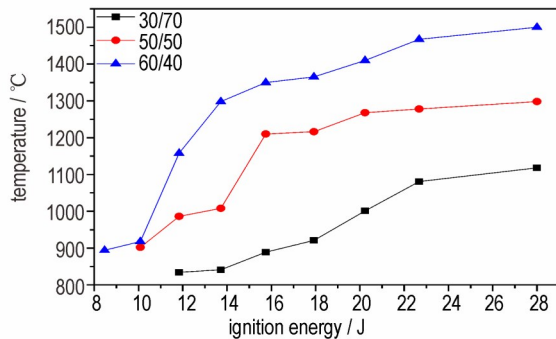


图6 不同固液比燃料空气炸药爆炸温度

Fig.6 Explosion temperature of fuel-air explosive with different solid/liquid ratio

由图5和图6可见,在相同的点火能等条件下,随着铝粉含量的增加,燃料空气炸药的最大超压和最高温度均呈明显增大趋势。譬如,在28 J点火能条件下,固液比30/70燃料空气炸药最大爆炸压力为0.52 MPa,最大爆温为1118 °C,铝粉含量提高到50%和60%后,最大超压分别增大到0.82 MPa和1.08 MPa,最高反应温度分别增大到1298 °C和1500 °C,爆炸压力增幅分别达到57.7%和107.7%,最高温度增幅分别16.1%和34.2%,表明提高铝粉含量能够显著增大燃料空气炸药爆炸参数。

分析认为,相对于液体组分,铝粉颗粒的燃烧热较

高,因此云雾爆炸参数(压力、温度)随着铝粉比例增加而增大。但铝粉为固体颗粒相,相对于液雾,其粒径分布较大,反应活性及反应速率较小,即最大爆炸压力上升速率较小。液体组分中加入铝粉后,体系兼具液雾的高反应性和铝粉的高热值特点,爆炸时液滴先反应,放出的热量促进铝粉反应,铝粉释放出更高的能量进一步加速爆炸反应,使爆炸压力、温度,以及剧烈程度均得到提高。

4 结论

(1) 20 L密闭爆炸罐试验条件下,微米铝粉中加入5%和10%纳米铝粉,体系爆炸压力峰值增幅分别为24.4%和58.5%,最大压力上升速率增幅达到80.6%和103.4%,云爆剂体系纳米铝粉最佳含量约为10%,纳米铝粉含量大于10%对于爆炸效应增加没有明显作用。

(2) 本研究条件下,固液比为30/70的燃料空气炸药,点火能从11.83 J增加到28 J,其爆炸压力从0.28 MPa增大到0.52 MPa,爆炸温度从834 °C增大到1118 °C,随着点火能的增大,固液比为50/50和60/40燃料空气炸药的爆炸压力和温度同样明显增大。表明增大点火能有利于提高液固型燃料空气炸药爆炸参数。

(3) 本研究条件下,与30%铝粉含量的燃料空气炸药相比,铝粉含量增加到50%和60%,体系最大爆炸压力分别增大了57.7%和107.7%,最大爆炸温度分别增大了16.1%和34.2%,表明增大微/纳米铝粉含量,能够有效提高燃料空气炸药爆炸压力和爆炸温度。

参考文献:

- [1] Zhou Wei-jun, Wang Shao-long, Wang De-wu. Study of the influence of aluminium powder on the detonation performance of fuel-air explosive [J]. *Tactical Missile Technology* January. 2008(1):14-16.
- [2] 杨睿,王正宏,王伯良,等. 含铝固液混合燃料老化性能研究. 爆破器材, 2016, 45(1):34-38.
YANG Rui, WANG Zheng-hong, WANG Bo-liang, et al. Aging properties of solid-liquid mixed fuels containing aluminum [J]. *Explosive Materials*, 2016, 45(1): 34-38.
- [3] 贵大勇,冯顺山,刘吉平. 高威力FAE液态燃料的优化选择[J]. 火炸药学报, 2002(2): 14-16, 25.
GUI Da-yong, FENG Shun-shan, LIU Ji-ping. The optimization selection of liquid fuels for high power FAE [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2002(2): 14-16, 25.
- [4] 沈晓波,鲁长波,李斌,等. 液体燃料云雾爆轰参数实验[J]. 爆炸与冲击, 2012, 32(1): 108-112.
SHEN Xiao-bo, LU Chang-bo, LI Bin, et al. An experimental study of detonation parameters of liquid fuel drops cloud [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2012, 32(1):108-112.

- [5] 方伟,赵省向,李文祥,等. 爆炸抛撒过程中FAE云雾的运动特性[J]. 含能材料, 2015, 23(11):1061-1066.
FANG Wei, ZHAO Sheng-xiang, LI Wen-xiang, et al. Movement characteristics of fuel-air explosive (FAE) clouds in the explosion dispersal process [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2015, 23(11): 1061-1066.
- [6] 王敬凯,陈捷,睢贺良,等. 微纳铝粉的氧化动力学研究进展[J]. 含能材料, 2021, 29(3):251-266.
WANG Jing-kai, CHEN Jie, SUI He-liang, et al. Review on micronano aluminum oxidation kinetics [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2021, 29(3): 251-266.
- [7] Balakrishnan K, Kuhl A L, Bell J B, et al. An empirical model for the ignition of explosively dispersed aluminum particle clouds[J]. *Shock Waves*, 2012, 22(6):591-603.
- [8] LIU Xue-ling, ZHANG Qi. Influence of turbulent flow on the explosion parameters of micro- and nano-aluminum powder-air mixtures[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, (299): 603-617.
- [9] 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.
YU Cun-juan, TAN Ying-xin. Study on factors influencing the explosion pressure of aluminum dust-air mixture [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2009(2): 31-34.
- [10] 周卫军,王少龙,王德武. 铝粉对FAE爆轰性能影响的研究[J]. 战术导弹技术, 2008(1):14-16.
ZHOU Wei-jun, WANG Shao-long, WANG De-wu. Study of the influence of aluminum powder on the detonation performance of fuel-air explosive [J]. *Actical Missile Technology January*, 2008(1): 14-16.
- [11] 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 Qing-zhao, WANG Ke, MEI Xiao-ning, et al. Investigation on explosion characteristics and reaction mechanism of micro-aluminum powder [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2017, 38(1): 119-225.
- [12] 林柏泉,梅晓凝. 基于20 L球形爆炸装置的微米级铝粉爆炸特性实验[J]. 北京理工大学学报, 2016, 36(7): 661-667.
LIN Bai-quan, MEI Xiao-ning. Explosion characteristics of micro-aluminum powders in 20 L spherical vessels [J]. *Transaction of Beijing Institute of Technology*, 2016, 36(7): 661-667.
- [13] 李席,王伯良,韩早,等. 液固复合FAE云雾状态影响因素的试验研究[J]. 爆破器材, 2013, 42(5):23-26.
LI Xi, WANG Bo-liang, HAN Zao, et al. Experimental study on influencing factors of the cloud status of liquid-solid fuel-air explosive [J]. *Explosive Materials*, 2013, 42(5): 23-26
- [14] Vignes A, Munoz F. Explosion characteristics of micron and nano-size aluminum powders [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2014, 27(2):55-64.
- [15] 文虎,杨玉峰,王秋红,等. 矩形管道中微米级铝粉爆炸实验[J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(5): 993-998.
WEN Hu, YANG Yu-feng, WANG Qiu-hong, et al. Experimental study on micron-sized aluminum dust explosion in a rectangular pipe [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(5): 993-998.
- [16] 王海洋,谢立峰,饶国宁,等. 气-液-固三相体系云雾爆轰特性的实验研究[J]. 高压物理学报, 2014, 28(6): 671-679.
WANG Hai-yang, XIE Li-feng, RAO Guo-ning, et al. Detonation characteristics of RDX-liquid fuel-air three-phase system [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2014, 28(6): 671-679.
- [17] 邢晓玲,赵省向,李文祥,等. 燃料空气炸药中铝粉与液相的反应特性[J]. 火炸药学报, 2016, 39(6): 55-57.
XING Xiao-ling, ZHAO Sheng-xiang, LI Wen-xiang, et al. The reactivity between aluminum powder and liquid phase of fuel-air explosives [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2016, 39(6): 55-57.
- [18] 谭汝媚,张奇. 环氧丙烷蒸气-铝粉-空气杂混合物的爆炸特性研究[J]. 高压物理学报, 2014, 28(1): 48-54.
TAN Ru-mei, ZHANG Qi. Research on the explosibility of gaseous epoxypropane aluminum dust-air hybrid mixtures [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2014, 28(1): 48-54.
- [19] ZHOU Jing, AN Jing. Thermal behaviors of the main components in nano-based fuel air explosive [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2017, 40(3): 31-35.
- [20] LIU Xue-ling, ZHANG Qi, WANG Yue. Influence of particle size on the explosion parameters in two-phase vapor-liquid n-hexane/air mixtures [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2015, (95): 184-194.

Explosion Characteristics of Fuel-air Explosive Containing Micro/Nano-aluminum Powder

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

(1. Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China; 2. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: A 20 L explosion device was used to study the explosion characteristics of fuel-air explosive containing micro/nano-aluminum powder. Results indicated that when adding 5% and 10% nano-aluminum to micro-aluminum, the maximum pressure of mixed powder increased by 24.2% and 58.5%, respectively. The maximum rate of pressure rise increased by 80.6% and 103.4%. The nano-aluminum would not have any contribution to the explosion effect while its content was more than 10%. For the fuel with a solid/liquid ratio of 30/70, while the ignition energy increased from 11.83 J to 28 J, the explosion pressure consequently increased from 0.28 MPa to 0.52 MPa, meanwhile the explosion temperature increased from 834 °C to 1118 °C, indicating that the explosion parameters of FAE could be improved by increasing the ignition energy. Increasing the content of micro/nano aluminum powders could effectively increase the explosion pressure and temperature of FAE.

Key words: nano-aluminum; fuel-air explosive; ignition energy; explosion characteristics

CLC number: TJ55

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2021080

(责编:王艳秀)