

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2022.04.002

# 纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 对温压炸药中铝粉爆炸特性的影响\*

张 刚 陈 清 李云秋 李 斌  
南京理工大学化学与化工学院(江苏南京,210094)

[摘 要] 为提高温压炸药配方的威力,根据铝热反应的基本原理,在温压炸药固相组分中添加纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,探究通过诱导铝热反应的方式来提高炸药威力的新途径。利用 20 L 柱形爆炸容器在 10 kJ 点火能量下研究了不同质量比的微米或纳米铝粉与纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 组成的混合体系的爆炸特性。研究发现,随着纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量的增大,Al/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 混合体系的最大爆炸压力和升压速率呈现先增大、后减小的趋势。当纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 质量分数为 5.4% 时,混合体系的最大爆炸压力最大。随后,在此配比下开展了混合体系粉尘浓度对爆炸特性的影响规律研究。结果表明,随着粉尘浓度的增加,最大爆炸压力先增加、后降低,在质量浓度为 400 g/m<sup>3</sup> 时达到峰值。结合理论分析认为,纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的加入能够改善温压炸药固相体系的反应活性,且对铝粉的爆炸剧烈程度有促进和抑制的双面作用。

[关键词] 纳米铝粉; 纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 爆炸特性; 粉尘云; 20 L 柱形爆炸容器; 温压炸药

[分类号] TQ560.7

## Effect of Nano Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on Explosion Characteristics of Aluminum Powder in Thermobaric Explosives

ZHANG Gang, CHEN Qing, LI Yunqiu, LI Bin

School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

[ABSTRACT] In order to improve the power of thermobaric explosives, according to the basic principle of thermite reaction, nano Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> was added to the solid components of thermobaric explosives, and a new way to improve the power of explosive by inducing the thermite reaction was explored. Explosion characteristics of the mixed system composed of micron or nano aluminum powder and nano Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> with different mass ratios were studied using a 20 L cylindrical explosion vessel at 10 kJ ignition energy. It is found that with the increase of the content of nano Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, the maximum explosion pressure and pressure rise rate of Al/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mixed system first increase and then decrease. When the mass fraction of nano Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> is 5.4%, the maximum explosive pressure of the mixed system is the highest. Then, the influence of dust concentration of the mixed system on explosion characteristics was studied at this ratio. Results show that with the increase of the dust concentration, the maximum explosion pressure of the system shows a trend of first increasing and then decreasing, reaching a peak when the mass concentration is 400 g/m<sup>3</sup>. Combined with theoretical analysis, it is believed that the addition of nano Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> can improve the reaction activity of the solid phase system of thermobaric explosives, and it has the double-sided effect of promoting and inhibiting the explosion severity of aluminum powder.

[KEYWORDS] nano aluminum powder; nano Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; explosion characteristics; dust cloud; a 20 L cylindrical explosion vessel; thermobaric explosives

### 引言

作为一种活性金属粉,铝粉被广泛应用于不同行业;但由于其易发生燃烧爆炸,受到工业界和安全专家的广泛关注<sup>[1]</sup>。铝粉的爆炸特性受粉尘浓

度、粉尘颗粒尺寸、粉尘云的分布特性等多种因素影响<sup>[2-5]</sup>。同时,铝粉尘爆炸的反应过程及机理也极其复杂。

近年来,许多学者研究了铝粉在不同条件下的爆炸特性,并将其应用于工业粉尘爆炸防治领域。林柏泉等<sup>[6]</sup>采用 20 L 球形爆炸装置研究了不同粉

\* 收稿日期:2021-11-23  
第一作者:张刚(1982-),男,工程师,主要从事爆炸安全技术研究。E-mail: zhanggang@njust.edu.cn  
通信作者:李斌(1984-),男,博士,副研究员,主要从事多相流、云雾爆轰研究。E-mail: libin@njust.edu.cn

尘浓度下微米级铝粉的爆炸特性,发现铝粉的最大爆炸压力和压力上升速率随粉尘浓度的增加呈抛物线变化,质量浓度 500 g/m<sup>3</sup> 为最适爆炸浓度。方伟等<sup>[7]</sup>利用 5 L 爆炸装置研究了纳米铝粉和微米铝粉混合时的爆炸特性,发现在微米铝粉中加入质量分数 10% 左右的纳米铝粉能有效地提高最大爆炸压力和压力上升速率等爆炸性能。

因高热值、低成本的优势,铝粉还常常与金属氧化物复合制成铝热剂,用于冶金、焊接及军事领域。王毅等<sup>[8]</sup>利用溶胶-凝胶法得到核壳结构的 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al 纳米复合铝热剂,单位质量放热量达到 1 648 J/g,能量性能远优于传统铝热剂。Cheng 等<sup>[9]</sup>使用自组装溶剂混合技术研究了 Al/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合物的热反应性,发现使用自组装技术增加了铝粉和 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的接触面积,提高了铝粉与 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的热反应性;同时推断得出,界面接触面积比反应物尺寸更重要。Thakur 等<sup>[10]</sup>使用物理混合法制备了混合添加多层结构石墨烯的纳米铝粉和 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 混合物,发现纳米石墨烯均匀分散在样品中,增加了反应物的接触面积;铝热样品 Al/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 中,石墨烯的质量分数从 0 增加到 12% 是相应放热焓从 71 J/g 增加到 1 537 J/g 的原因。

但目前,将铝热反应用于炸药配方设计中的研究很少。以提高温压炸药基础配方的威力为目标,在铝粉尘云中加入纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,研究纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 对铝粉爆炸性能的影响规律,为温压炸药配方的改进提供基础实验数据支持。

1 实验部分

1.1 样品的制备

微米铝粉、纳米铝粉和纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 均由佛山市顺德宇红纳米科技有限公司厂提供,纯度均在 98% 以上。其中,纳米铝粉的粒径范围为 20 ~ 80 nm;微米铝粉的粒径范围为 1 ~ 5 μm;纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的粒径范围为 150 ~ 300 nm。

按照表 1 中的配方,采用物理混合法配制样品 1<sup>#</sup>~8<sup>#</sup>。样品 9<sup>#</sup>为纯纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。其中,纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的比例确定依据了铝热剂设计经验和炸药配方的成分配比要求。混制好的样品如图 1 所示。图 1 中,从左到右,随着样品中纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 比例的增加,粉末颜色也随之变深。

1.2 实验系统及装置

实验系统主要由点火系统、时间控制系统、配气及喷粉系统、数据采集系统以及 20 L 柱型爆炸罐组

成,如图 2 所示。

表 1 样品配方(质量分数)

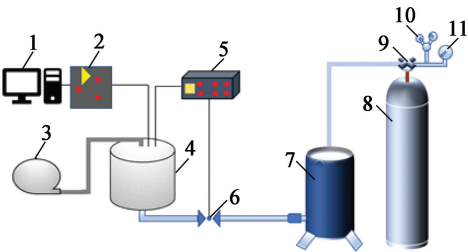
Tab. 1 Compositions of samples (mass fractions)

样品编号	微米铝粉	纳米铝粉	纳米 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%
1 <sup>#</sup>	62.9	37.1	0	
2 <sup>#</sup>	62.5	36.9	0.6	
3 <sup>#</sup>	62.0	36.6	1.4	
4 <sup>#</sup>	61.1	36.1	2.8	
5 <sup>#</sup>	60.3	35.6	4.1	
6 <sup>#</sup>	59.5	35.1	5.4	
7 <sup>#</sup>	57.9	34.2	7.9	
8 <sup>#</sup>	56.4	33.3	10.3	
9 <sup>#</sup>	0	0	100.0	



图 1 制备好的不同配方的样品

Fig. 1 Samples prepared with different compositions



1 - 数据采集单元;2 - 放大器;3 - 真空泵;4 - 爆炸容器;  
5 - 点火延时器;6 - 电磁阀;7 - 储气瓶;8 - 高压空气瓶;  
9 - 高压球阀;10 - 减压阀;11 - 压力表。

图 2 实验系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental system

在 20 L 柱形爆炸容器中进行金属粉尘体系的燃爆特性研究。20 L 爆炸罐内径 247 mm、高 411 mm,由 304 不锈钢制成。点火方式为化学点火头点火。化学点火头 2.4 g,由过氧化钡、硝酸钡和铅粉以质量比 3 : 3 : 4 组成,能量为 10 kJ。

配气系统主要由 40 L 高压空气瓶以及 10 L 储气瓶组成。高压空气瓶中的压缩空气通过减压阀以设定好的压力压入储气瓶。储气瓶通过高压管与电磁阀相连。当电磁阀打开时,空气以稳定的压力携

带试样皿上的粉尘向四周扩散,在爆炸容器内形成一定浓度的粉尘云。

时间控制系统采用 DHY-6 点火延时器,可设置喷粉持续时间以及点火延迟时间。

数据采集系统由 PCB 公司的压力传感器、放大器以及数据采集卡组成。

1.3 实验步骤

首先,检查实验装置的密闭性。将装置抽真空至不大于 667 Pa 的真空度,然后停泵;5 min 后,压力计压力示数下降不大于 267 Pa,则认为真空度符合要求,可以开始实验。

实验时,在试样皿上均匀平铺待测样品。将化学点火头固定在电极指定位置,盖上法兰并拧紧螺丝,保证其气密性。抽真空,打开空气瓶阀门并将减压阀调至 0.4 MPa,使储气瓶压力也为 0.4 MPa。将压力测试系统设置为等待状态,记录此时压力传感器的初始压力,关闭各阀门。通过高压放电点火器点火,记录并保存实验数据。每次实验后,排出混合气体,并用湿度低于 30% 的清洁空气冲洗实验装置,尽量避免残余物对下次实验造成影响。

2 实验结果与讨论

2.1 不同粉尘的爆炸参数

首先,分别对微米铝粉 T1、纳米铝粉 T2、纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粉尘以及纳米铝粉和微米铝粉混合粉尘 4 组样品进行单独实验。同时,进行化学点火头的空白爆炸实验。4 组样品在喷粉压力 0.4 MPa、喷粉时间 280 ms、点火延迟时间 10 ms、点火能量 10 kJ、粉尘质量浓度均为 100 g/m<sup>3</sup> 条件下进行爆炸压力测试。为保证结果的准确性,最大爆炸压力  $p_m$  选用 3 组可靠实验的平均值,如图 3 所示。

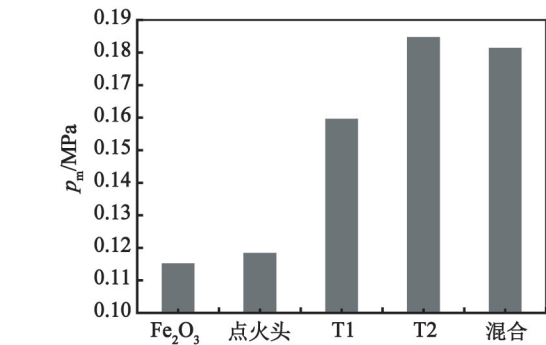


图3 不同物质的最大爆炸压力

从图 3 可以看出,在 20 L 柱形爆炸容器中,相同条件下,纳米铝粉的最大爆炸压力明显高于微米

铝粉的最大爆炸压力,且最大爆炸压力与粒径的减小呈二次相关。这是因为粉尘浓度、粒径和比表面积等因素对铝粉爆炸有很大影响,压力最大上升速率随着颗粒尺寸的减小而呈指数增长,随着颗粒直径的减小,铝粉火焰传播速率加快,燃烧机制由扩散控制模式转变为动力学控制模式。实验结果表明,使用物理混合法将纳米铝粉与微米铝粉按质量比 37.1 : 62.9 混合均匀后,最大爆炸压力明显大于纯微米铝粉的最大爆炸压力,且略小于纳米铝粉的最大爆炸压力。相比相同条件下的纯微米铝粉,最大爆炸压力提高了 13.6%。这是因为,纳米铝粉具有高反应活性,对爆炸体系进行了敏化,提高了粉尘的爆炸剧烈程度。

纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的实验压力小于化学点火头压力。因为纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 本身是不可燃物质,同时会吸收点火头产生的能量变为自身的热量。

2.2 纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 添加剂对铝粉爆炸特性的影响

在本次实验中,理论上的粉尘压力随时间的变化应分为 4 个阶段:喷粉分散阶段、粉尘自由分散阶段、压力上升阶段和压力衰减阶段。实验开始时,样品在高压气体的带动下分散成粉尘云,经过短暂的点火延时期后,容器内的静态压力会达到 1 个大气压左右。随后点火,粉尘云被引爆,形成爆炸冲击波并向周围释放出大量能量,压力快速上升,直至达到爆炸压力峰值。随着粉尘云和氧气含量的下降,反应逐渐减弱,容器内压力下降。

在喷粉压力 0.4 MPa、点火延迟时间 10 ms、点火能量 10 kJ 条件下,样品 1<sup>#</sup>~8<sup>#</sup> 的最大爆炸压力  $p_m$  及最大升压速率  $(dp/dt)_m$  见图 4。

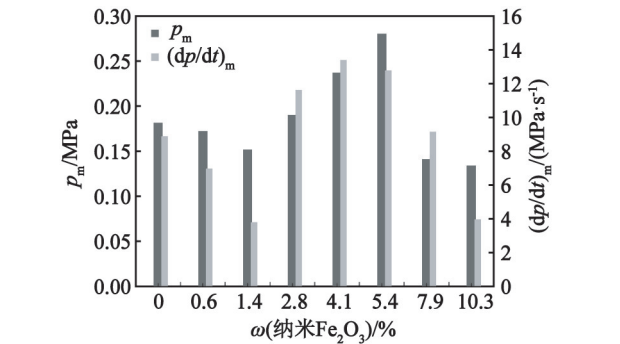


图4 不同样品的最大爆炸压力及最大升压速率

Fig. 4 Maximum explosion pressure and maximum pressure rise rate of different samples

Al/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 铝热剂中的铝粉和 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 在紧密复合时点燃会放出巨大热量。但在本次实验中,吹散在空气中的铝粉与纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 并没有实现充分的接触,因此燃烧机理不同于常规 Al/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 铝热剂或

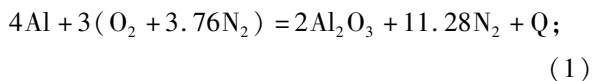


Al/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合物。从图 4 中可以看出,在加入少量纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (质量分数 0.6% 和 1.4%) 时,相比于纯铝粉的最大爆炸压力略低,起到了很小的抑制爆炸的作用。随着纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量的增加,样品的最大爆炸压力有明显上升,在样品 6<sup>#</sup> (纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 质量分数 5.4%) 的测试工况时,最大爆炸压力达到最高值;但随着纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量的继续增加,最大爆炸压力急剧下降。这是因为,低含量纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的混合物虽然形成粉尘云,但并没有达到常规铝热剂那样足够充分的接触,在这种条件下,纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 浓度的增加相当于增加了粉尘云的热阻,热量难以有效地在粉尘云中渗透。随着纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量增加,在形成粉尘云后增加了两种颗粒的碰撞与接触,即粉尘中一部分的化学反应等同于 Al/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 铝热剂的化学反应。但达到最佳粉尘浓度后,继续增加纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的比例,由于它本身为不可燃物质,就起到了惰化的效果。纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒具有较大的比表面积,相比铝粉具有在短时间内更快地吸收大量热量的能力。没有参与铝热反应的纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 通过在短时间内吸收铝粉爆炸产生的热量,在降低爆炸严重程度方面发挥了重要作用。另一种引起压力下降的原因是,颗粒间产生了团聚现象,而这种团聚现象是由静电引力、范德华力等较微弱的力引起的软团聚现象。通常可以通过一些化学作用或施加机械能等方式消除。本次实验的喷粉过程中会施加一定的机械能,这种外界力不会完全消除这种团聚现象。在团聚现象下发生的铝热反应远远小于正常情况下释放的能量,而通常的铝热反应可以在短时间内放出大量热量并显著提升爆炸性能。

### 2.3 系统粉尘浓度对爆炸参数的影响

相同条件下,样品 6<sup>#</sup> 的最大爆炸压力最大且升压速率最快。以样品 6<sup>#</sup> 为研究对象,选取 50、100、200、300、400、500 g/m<sup>3</sup> 等 6 种质量浓度的粉尘开展实验。实验条件与前文中实验条件相同。图 5 为样品 6<sup>#</sup> 的爆炸参数  $p_m$ 、 $(dp/dt)_m$  与粉尘质量浓度  $c$  的关系曲线。

分析图 5 曲线可发现:纳米铝粉、微米铝粉和纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的混合粉尘最大爆炸压力随着粉尘浓度的增加而迅速增加;当粉尘质量浓度到达 400 g/m<sup>3</sup> 时,最大爆炸压力最大;且随着粉尘浓度的继续增加,最大爆炸压力逐步减小。铝粉与氧气产生的爆炸反应是链式反应过程,化学反应方程式为:



铝热反应方程式为:

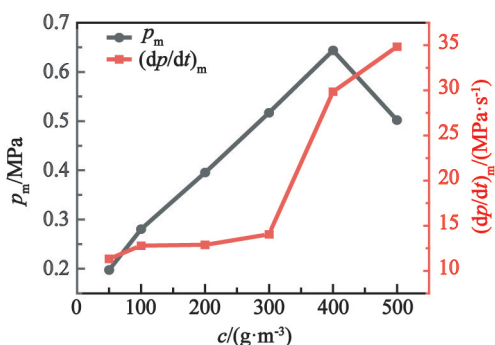
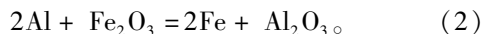


图 5 不同粉尘质量浓度下样品 6<sup>#</sup> 的爆炸参数变化

Fig. 5 Variation of explosion parameters of Sample 6<sup>#</sup> under different dust mass concentrations



根据反应方程式可知,理论上铝粉质量浓度在大于 300 g/m<sup>3</sup> 时达到化学计量比<sup>[11]</sup>。最大爆炸压力和压力上升速率皆达到峰值。通过理论计算,铝粉质量浓度大于等于 400 g/m<sup>3</sup> 时即为过量。实际上,质量浓度在 400 g/m<sup>3</sup> 时,样品的爆炸压力与压力上升速率均比 300 g/m<sup>3</sup> 时大。这是因为铝粉与纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粉尘扩散后,在爆炸容器内的分布并不均匀,铝粉和纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粉尘会黏附在容器内壁或者沉降于容器底部,这都会影响实验结果。

由图 5 可以看出,总体上粉尘爆炸压力上升速率是随粉尘浓度的增加而增加的。这是因为,当粉尘浓度增加,铝粉与纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 在空气中发生反应的概率增大。粉尘云中的铝粉与纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 得到充分反应并在短时间内放出大量热量,而放热速率与压力上升速率呈正相关。所以,粉尘爆炸特性参数与粉尘云中铝粉与纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粉尘之间的接触和碰撞频率有着较大的关系。

## 3 结论

1) 研究了微、纳米铝粉和纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 混合体系的爆炸参数。20 L 柱形爆炸容器内,在 10 kJ 的点火能量条件下,当纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 质量分数在 0.6% 和 1.4% 时,表现出对铝粉爆炸的抑制作用。

2) 纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 随着自身含量的增加,表现出对铝粉爆炸的促进作用。在纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的质量分数为 5.4% 时,最大爆炸压力和最大升压速率达到最大;随着纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量的继续增加,体系最大爆炸压力与最大升压速率减小。

3) 与纯铝粉相比,以纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 作为添加剂,能够有效提高体系的爆炸压力,作为炸药配方在能量释放上具有一定优势。

参 考 文 献

[1] 封雪松,冯晓军,赵娟,等. 铝粉含量和粒度对 HMX 基炸药空爆性能的影响[J]. 爆破器材,2018,47(4): 10-15.

FENG X S, FENG X J, ZHAO J, et al. Effect of content and particle size of aluminum powder on the air blast property of HMX-based explosive [J]. Explosive Materials, 2018, 47(4): 10-15.

[2] ZHANG S A, ZHANG L G. Effect of non-vacuum storage condition on minimum explosible concentration of aluminum dust [J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2019, 10(3): 219-222.

张世安, 张路刚. 非真空存储条件对铝粉粉尘爆炸下限浓度的影响[J]. 测试科学与仪器, 2019, 10(3): 219-222.

[3] 陈晓坤, 张自军, 王秋红, 等. 20 L 近球形容容器中微米级铝粉的爆炸特性[J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(5): 1130-1136.

CHEN X K, ZHANG Z J, WANG Q H, et al. Explosion characteristics of micro-sized aluminum dust in 20 L spherical vessel [J]. Explosion and Shock Waves, 2018, 38(5): 1130-1136.

[4] 李政阳, 安振涛, 李金明, 等. 铝粉粒径对销毁某未爆弹药影响的试验研究[J]. 爆破器材, 2017, 46(5): 29-32, 37.

LI Z Y, AN Z T, LI J M, et al. Experimental study on the effect of particle size of aluminum powder on destroying some unexploded ordnance [J]. Explosive Materials, 2017, 46(5): 29-32, 37.

[5] 任新联, 王辉, 徐司雨, 等. 铝粉粒度对 RDX 基含铝炸药水中爆炸近场特性的影响[J]. 爆破器材, 2015, 44(6): 29-33.

REN X L, WANG H, XU S Y, et al. The Effect of aluminum particle size on the characteristic of RDX based aluminized explosives underwater close-fired explosion [J]. Explosive Materials, 2015, 44(6): 29-33.

[6] 林柏泉, 梅晓凝, 王可, 等. 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 B Q, MEI X N, WANG K, et al. Explosion characteristics of micro-aluminum powders in 20 L spherical vessels [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2016, 36(7): 661-667.

[7] 方伟, 赵省向, 张奇, 等. 微/纳米铝粉粉尘爆炸特性研究[J]. 火工品, 2021(2): 32-36.

FANG W, ZHAO S X, ZHANG Q, et al. Study on the explosive characteristics of micro/nano-aluminum dust [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2021(2): 32-36.

[8] 王毅, 李凤生, 姜炜, 等. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al 纳米复合铝热剂的制备及其反应特性研究[J]. 火工品, 2008(4): 11-14.

WANG Y, LI F S, JIANG W, et al. Synthesis of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al nanocomposite and research on its thermite reaction [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2008(4): 11-14.

[9] CHENG J L, HNG H H, LEE Y W, et al. Kinetic study of thermal- and impact-initiated reactions in Al-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanothermite [J]. Combustion and Flame, 2010, 117(12): 2241-2249.

[10] THAKUR P, SHARMA V, THKUR N. Study of energy release in Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al nano-thermite with graphene as an additional fuel [J]. Physica B: Condensed Matter, 2021, 610: 412803.

[11] 陈海燕, 姚庆国, 张延松, 等. 微米级铝粉最低着火温度和爆炸特性试验研究[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(11): 96-102.

CHEN H Y, YAO Q G, ZHANG Y S, et al. Experimental study on minimum ignition temperature and explosion characteristics of micron-sized aluminum powder [J]. China Safety Science Journal, 2019, 29(11): 96-102.

[74] PAKDEHI S G, SHIRZADI B. The effect of some amines on ignition delay time of dimethyl amino ethyl azide (DMAZ) and white fuming nitric acid (WFNA) [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2017, 43(2): 162-169.

[73] PAKDEHI S G, SHIRZADI B. Effect of some inorganic nitrate salts on the ignition delay time of DMAZ-IRFNA and DMAZ-WFNA bi-propellants [J]. Central European Journal of Energetic Materials, 2018, 15(1): 162-174.