



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2405150

引用格式:刘文杰,李小东,亢澎霖,等.低浓度条件下含能颗粒对固液混合燃料燃爆特性的影响[J].科学技术与工程,2025,25(17):7165-7172.

Liu Wenjie, Li Xiaodong, Kang Penglin, et al. Effect of energetic particles on combustion and explosion characteristics of solid-liquid mixed fuel under low concentration conditions[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(17): 7165-7172.

## 武器技术

# 低浓度条件下含能颗粒对固液混合燃料燃爆特性的影响

刘文杰,李小东,亢澎霖,曹卫国,王晶禹

(中北大学环境与安全工程学院,太原 030051)

**摘要** 为了研究含能颗粒在固液混合燃料燃爆反应中的影响机制,使用20 L球形云雾燃爆特性试验系统,对不同质量分数含能物质的固液燃料-空气分散体系的燃爆特性进行研究。在低浓度条件下,试验测量得到爆炸压力、最大压力上升速率、反应时间及不同燃料爆炸下限,根据固液分散微粒结合方式,分析含能颗粒对固液混合燃料燃爆特性的影响。结果表明:在环三亚甲基三硝胺(1,3,5-trinitroperhy-dro-1,3,5-triazine,RDX)/铝粉混合燃料体系中,爆炸压力和最大压力上升速率随RDX质量分数的增加先增大后减小,最大值分别为1 516.17 kPa和1 16.17 kPa/ms;针对RDX/铝粉/硝基甲烷混合燃料体系,RDX的加入导致爆炸压力不断减小,降幅达到427.99 kPa,当RDX质量分数低时,RDX对混合燃料燃烧爆炸起抑制作用。同时发现混合燃料反应时间变化规律与最大压力上升速率变化规律完全相反。

**关键词** 含能颗粒;质量分数;爆炸压力;爆炸下限;燃烧持续时间

中图法分类号 TJ55 O381; 文献标志码 A

## Effect of Energetic Particles on Combustion and Explosion Characteristics of Solid-Liquid Mixed Fuel under Low Concentration Conditions

LIU Wen-jie, LI Xiao-dong, KANG Peng-lin, CAO Wei-guo, WANG Jing-yu

(School of Environment and Safety Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**[Abstract]** In order to study the influence mechanism of energetic particles on the combustion and explosion reaction of solid-liquid mixed fuel, a 20 L spherical cloud combustion and explosion characteristics test system was used to study the combustion and explosion characteristics of solid-liquid fuel-air dispersion systems with different mass fractions of energetic substances. Under low concentration conditions, the explosion pressure, maximum pressure rise rate, reaction time and explosion lower limit of different fuels were measured. Based on the combination of solid-liquid dispersed particles, the impact of energetic particles on the combustion and explosion characteristics of solid-liquid mixed fuel was analyzed. The results show that in the 1,3,5-trinitroperhy-dro-1,3,5-triazine(RDX)/aluminum powder mixed fuel system, the explosion pressure and maximum pressure rise rate first increase and then decrease with the increase of RDX mass fraction, with the maximum values being 1 516.17 kPa and 116.17 kPa/ms respectively. For RDX/aluminum powder/nitromethane mixed fuel system, the addition of RDX causes the explosion pressure to continuously decrease, reaching 427.99 kPa. When the RDX mass fraction is low, RDX inhibits the combustion explosion of the mixed fuel. At the same time, it was found that the change pattern of mixed fuel reaction time is completely opposite to the change pattern of maximum pressure rise rate.

**[Keywords]** energetic particles; quality score; explosion pressure; lower explosion limit; burning duration

含能颗粒一般泛指火炸药粉尘。例如环三亚甲基三硝胺(1,3,5-trinitroperhy-dro-1,3,5-triazine,RDX)粉尘本身含氧,是一种活性粉尘,其爆炸输出能力远高于一般工业粉尘(铝粉)。铝粉作为高性能金属材料,常用于航天燃料、推进剂和炸药中以

改善性能<sup>[1-4]</sup>。铝粉的最小点火能和最小点火温度相对较低,在空气中的最高绝热火焰温度可达3 790 °C<sup>[5-7]</sup>。而片状铝粉比表面积大,具有更高的反应活性,其氧化既可以发生在铝热剂中,也可以发生在粉尘爆炸中<sup>[8]</sup>。硝基甲烷是一种典型液体炸

收稿日期:2024-07-10 修订日期:2025-03-11

第一作者:刘文杰(1900—),男,汉族,山东东营人,博士,讲师。研究方向:爆炸力学,含能材料。E-mail:20210047@nuc.edu.cn。

投稿网址:www.stae.com.cn

药<sup>[9]</sup>,在富氧条件下硝基甲烷与 O<sub>2</sub> 反应,燃烧释放热量,在无氧条件下发生热分解反应。与固体燃料相比,液体燃料更容易反应完全,通过优化燃料液、固体组分配比,提升混合燃料燃烧爆炸特性,以满足固液混合燃料在工业和军事领域的应用。在云爆领域,RDX 粉尘、铝粉和硝基甲烷可作为燃料空气炸药 (fuel-air explosive, FAE) 的添加成分,因此研究含能颗粒对铝粉和铝粉/硝基甲烷燃料燃烧爆炸特性的影响是非常有必要的。

针对含能粉尘爆炸,学者们进行大量研究,表明粉尘云浓度、粒径、湍流强度、初始温度等是影响粉尘爆炸严重程度和敏感性的重要因素<sup>[10-17]</sup>。最低点火温度 (minimum ignition temperature, MIT) 和爆炸参数 (如超压、温度等) 常用来表征粉尘爆炸危险性<sup>[18-20]</sup>。Zhang 等<sup>[21]</sup>考虑了气流速度、粉尘粒径和质量浓度对水平管道内铝粉爆炸行为的影响,得出气流速度对火焰传播特性和爆炸行为有显著影响。Cao 等<sup>[22]</sup>和 Li 等<sup>[23]</sup>通过实验和数值模拟对粉尘爆炸的火焰传播和爆炸强度进行了研究,模拟结果与实验吻合较好,粉尘云浓度与最大爆炸压力呈倒“U”形关系。与单组分燃料相比,固液燃料不仅受环境因素影响,各组分之间相互作用对爆炸威力也有显著影响。Zhang 等<sup>[24-25]</sup>研究了硝基甲烷/环氧丙烷/铝粉和硝基甲烷/正戊烷/铝粉在低温、低压、高相对湿度条件下的爆炸特性,揭示了甲烷对固液混合燃料的促进作用。杨仲坤等<sup>[26]</sup>以石油醚、环氧丙烷和乙醚作为液体燃料,硝酸异丙酯和硝基甲烷作为液体敏化剂,金属铝粉作为固体组分,进行了液体和液固 FAE 配方的云雾爆轰实验,对爆炸场、温度场等参数进行了毁伤效果分析,得出优化后高能燃料配方。硝基甲烷可与其他燃料组分产生协同作用,这一特性也受其他因素影响。Bai 等<sup>[27]</sup>研究了硝基甲烷在不同环境因素下对乙醚-铝粉混合燃料爆炸特性的影响。通过分析最大压力增长速率和气体产物,推导了硝基甲烷在混合燃料爆炸中的作用机理,得出结论,硝基甲烷的自分解

反应能够促进高质量浓度燃料充分反应。Yao 等<sup>[28]</sup>研究了铝粉-乙醚和铝粉-乙醚-硝基甲烷混合物在不同温度和压力条件下的爆炸性能,结果表明环境参数的变化,对铝粉-乙醚-硝基甲烷的爆炸压力和可燃性下限的影响较小。

目前对于多相爆炸中含能颗粒质量分数与爆炸特性关系的分析较少。为此,现采用 20 L 球形爆炸容器,对不同 RDX 粉末质量分数的铝/硝基甲烷和铝燃料-空气混合物的爆炸特性进行测试。通过分析铝/硝基甲烷和铝燃料空气混合物的爆炸压力、最大升压率和爆炸极限,得到 RDX 粉末对铝/硝基甲烷和铝燃料-空气混合物爆炸特性的影响。以期能够为提升固液混合燃料的爆炸特性提供可行的方法,同时对云爆弹的配方设计提供基础数据。

## 1 实验部分

### 1.1 试剂与仪器

实验样品为粉末状 RDX,纯度 98%,平均直径 29.804 μm;铝粉,纯度 99%,平均直径 22.745 μm;硝基甲烷,纯度 99.5%。实验所用原材料均由江南工业集团有限公司提供。

主要实验仪器为 20 L 球形爆炸装置,自制;压力传感器,瑞士奇石乐仪器股份公司,采集频率 1.0 MHz,采集量程 1.38 MPa;多通道电荷放大器,瑞士奇石乐仪器股份公司,16 通道;AVXI-1011 多通道数据采集器,瑞士奇石乐仪器股份公司,12 通道,采样频率为 100 kHz/s ~ 1 MHz/s;可编程逻辑控制器 (programmable logic controller, PLC) 编程控制器,LT-200 编程控制器,福州福光电子有限公司;便携式有害气体检测仪,北京卓安恒瑞科技有限公司。

### 1.2 实验过程

采用 20 L 球形爆炸测试系统研究混合燃料爆炸特性,实验测试系统如图 1 所示。实验系统包括 20 L 球形爆炸容器、高压气罐、样品罐、点火具及压力传感器。20 L 球形爆炸容器壁厚为 15.5 mm,铜

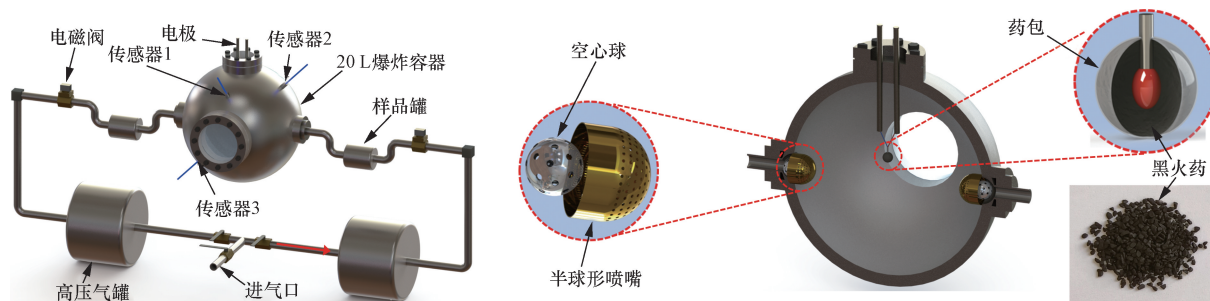


图 1 20 L 球形爆炸测试系统示意图

Fig. 1 20 L spherical explosion test system diagram

质半球型喷嘴位于爆炸容器两侧,喷嘴内嵌空心球,更容易分散燃料;混合燃料放置于样品罐内,样品罐容积为 20.0 mL;进气口通入 0.4 MPa 高压空气并在高压气罐内储存,为燃料分散提供动力,高压气罐容积为 4.0 L;电磁阀控制高压气罐内高压气体流动,气流通过样品罐携带燃料进入半球形喷嘴,燃料分散进入球形爆炸容器;点火具包括药包、点火头及黑火药,将黑火药倒入药包内,点火头置入药包内与其充分接触后连接电极与起爆器;为保证爆炸压力的准确测量,在球形爆炸容器壁面 3 个方向安装传感器,其中传感器 2 与传感器 3 对角安装。通过 PLC 编程控制器控制电磁阀开启时间和点火延迟时间,完成燃料的分散及点火。电磁阀开启 50 ms,确保燃料完全进入球形容器。关闭电磁阀,点火再次延迟 50 ms,燃料在爆炸容器中均匀分散后被点燃。

为探究 RDX 粉尘对铝粉/硝基甲烷爆炸特性的影响,实验首先在  $300 \text{ g/m}^3$  浓度下进行,实验对象为 RDX 粉尘/铝粉混合物和 RDX 粉尘/铝粉/硝基甲烷混合物,保持铝粉和硝基甲烷的质量比为 3:1,研究不同质量分数 RDX 粉尘对混合物爆炸压力的影响;同样在两种混合物中,改变 RDX 粉尘比例,测量不同质量分数 RDX 粉尘条件下混合燃料爆炸下限,RDX 粉尘质量分数如表 1 所示。

如图 2 所示,在点火 50 ms 后爆炸容器内压力迅速上升,经过时间差  $\Delta t$  后压力值达到最大, $\Delta t$  为爆炸反应持续时间。初始压力与压力峰值之差  $\Delta P$  为爆炸压力,上升过程中压力的最大斜率 ( $dP/dt$ ) 为最大压力上升速率。当测得升压率  $\Delta P \geq 30 \text{ kPa}$  时,认为燃料发生燃烧爆炸反应。爆炸下限采用二分法测量,测量精度控制在  $5 \text{ g/cm}^3$ 。实验在  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $101.1 \text{ kPa}$  条件下进行。实验结束后收集爆炸容器内气体,测量球形容器内  $\text{CO}$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{NO}$  和  $\text{CO}_2$  浓度。由于容器内气体浓度过高,超出气体检测仪器量程范围,因此对气体稀释后进行测量,计算得出容器内气体体积浓度。

表 1 RDX 粉尘质量分数  
Table 1 RDX dust mass fraction

混合燃料	试验内容	RDX 粉尘质量分数/%
RDX/铝粉	压力测试	0.0,10.0,20.0,30.0,40.0,50.0,60.0,70.0,80.0,90.0,100.0
	爆炸极限测试	10.0,30.0,50.0,70.0,90.0,100.0
RDX/铝粉/ 硝基甲烷	压力测试	0.0,11.1,20.0,33.3,42.6,50.0,66.7,80.9,90.0,100.0
	爆炸极限测试	0.0,20.0,33.3,50.0,66.7,80.0,100.0

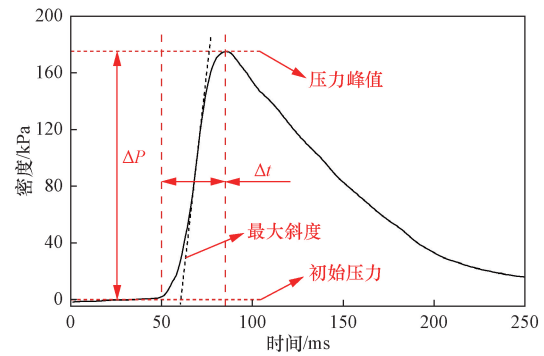


图 2 燃烧爆炸压力曲线

Fig. 2 Combustion and explosion pressure curve

## 2 结果与讨论

### 2.1 爆炸压力

测量不同 RDX 质量分数混合燃料-空气混合物爆炸压力,如图 3 所示。能够看出 RDX 粉尘/铝粉混合燃料的爆炸压力随着 RDX 质量分数的增加先增大后减小,这一结果与文献[29]中得到的结果相同。当 RDX 粉尘质量分数为 0% 时,爆炸压力为  $1\ 007.14 \text{ kPa}$ ,随着 RDX 质量分数的增加爆炸压力略有上升,当 RDX 质量分数达到 40.0% 时,爆炸压力达到最大为  $1\ 156.17 \text{ kPa}$ 。RDX 质量分数增加 40%,爆炸压力增加  $149.03 \text{ kPa}$ ,RDX 质量分数每上升 10%,爆炸压力升高  $37.26 \text{ kPa}$ ,爆炸压力上升缓慢。随着 RDX 质量分数的继续增大,爆炸压力不断减小,当 RDX 质量分数达到 100.0% 时,爆炸压力仅有  $318.20 \text{ kPa}$ 。RDX 质量分数增加 60%,爆炸压力下降  $837.97 \text{ kPa}$ ,RDX 质量分数每增大 10%,爆炸压力降低  $139.66 \text{ kPa}$ ,爆炸压力下降速度较快。造成这一现象的原因是,在 RDX 质量分数较低时 RDX 能够加快反应的进行。RDX 作为含能材料其反应速度快,能够在短时间内释放大量能量,因此当 RDX 质量分数较低时,RDX 可以加速反应。与 RDX 相比铝粉更易点燃,因此,当 RDX 的质量分数

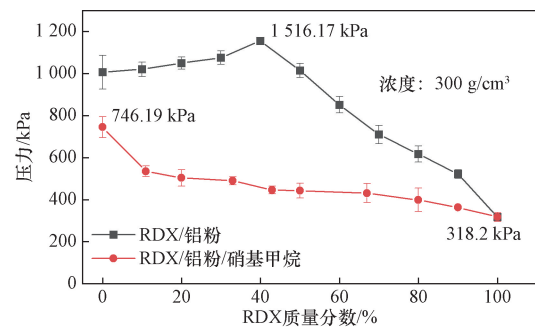


图 3 不同 RDX 质量分数混合燃料爆炸压力

Fig. 3 Explosive pressure of mixed fuel with different RDX mass fractions

较低时,大量铝粉发生燃烧爆炸反应释放的热量引爆 RDX,造成了爆炸压力的升高。但是当 RDX 质量分数较高时,铝粉浓度下降,最初被点燃的铝粉不断减少,导致无法为大量引爆 RDX 提供足够的能量。这就导致参与反应的 RDX 减少。对比 RDX 和铝粉燃烧热  $11.84 \text{ kJ/g}^{[30]}$  和  $31.0 \text{ kJ/g}^{[31]}$ , RDX 质量分数的增加导致混合物完全反应释放的总能量减小,这是导致爆炸压力减小的另一原因。

如图 3 所示,当混合燃料中加入硝基甲烷时,随着 RDX 质量分数的增加爆炸压力不断减小。当 RDX 质量分数为 0% 时,爆炸压力为 746.19 kPa,少量 RDX 的加入使爆炸压力迅速下降, RDX 质量分数为 11.1% 时,爆炸压力为 535.88 kPa;质量分数增加 11.1%,爆炸压力减小 210.31 kPa。当 RDX 质量分数大于 11.1% 时,随着 RDX 质量分数的增大爆炸压力缓慢下降,质量分数增加 88.9%,爆炸压力降低 217.68 kPa。硝基甲烷与铝粉的质量比始终保持在 1:3,硝基甲烷燃烧热为  $11.62 \text{ kJ/g}^{[32]}$ ,因此实验中硝基甲烷与铝粉混合物的燃烧热为  $26.16 \text{ kJ/g}$ ,RDX 的加入导致混合物燃烧热的减小,因此随着 RDX 质量分数的增加爆炸压力不断减小。

如图 4(a) 所示,燃料堆积状态下 RDX 粉尘颗粒被铝粉颗粒包裹。在分散过程中,高压气体携带混合燃料通过喷头,燃料分散在 20 L 球形爆炸罐内,形成可燃云雾,RDX 颗粒、铝粉颗粒和硝基甲烷液体分离。但分散过程无法保证所有的颗粒与颗粒、颗粒与液体完全分离,容易产生团聚现象。因此在分散体系中存在图 4 所示的几种情况,图 4(b) 为单独的片状铝粉颗粒,其特点是粒径小,比表面积巨大,易被点燃,燃烧热高,能够释放大量能量;图 4(c) 为单独的 RDX 颗粒,其特点是粒径略大,比表面积小,与铝粉相比较难点燃,反应速度快,能够在极短的时间内释放能量;图 4(d) 为单独的硝基甲烷液滴,硝基甲烷难被点燃,在低浓度条件下可视为惰性物质;图 4(e) 为分散过程中没有分离的集团,由于 RDX 颗粒略大,因此部分铝粉颗粒及硝基甲烷液体包围在 RDX 颗粒表面;图 4(f) 仅在铝粉/硝基甲烷分散体系中大量出现,宏观观察质量比为 3:1 的铝粉/硝基甲烷混合物,其物理形态为粉末状。因此没有完全分离的硝基甲烷液体附着在铝粉颗粒表面。

当混合体系中没有硝基甲烷时,RDX 颗粒仅有铝粉包围,且 RDX 与铝粉均为固体,在分散过程中 RDX 与铝粉容易分离,分散体系中仅存在少量 RDX 颗粒与铝粉颗粒团聚的集团,图 4(e) 所展示的未分离集团数量较少。但加入硝基甲烷后,油状的硝基甲烷液体在颗粒之间起到了黏合作用,图 4(e) 和图 4(f) 所描述的颗粒集团增多,燃料比表面积减小,同时受硝基甲烷的影响颗粒集团更难被点燃,更多的燃料没有参与反应,这就导致了 RDX 浓度质量分数相同时,含硝基甲烷的混合燃料爆炸压力更小。这与图 3 所示规律相同。另一方面,由于硝基甲烷的燃烧热在 3 种物质中最小,这是造成硝基甲烷抑制混合物爆炸的另一原因。

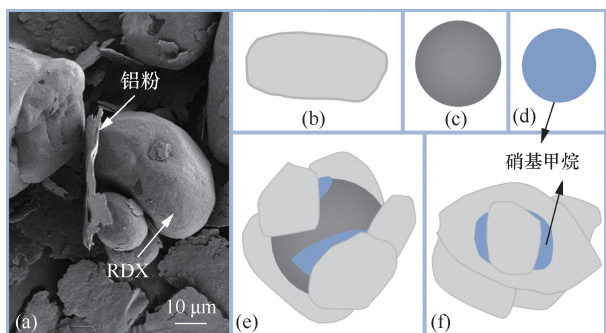
对比图 3 中两条曲线,能够看出当 RDX 质量分数较小时 ( $\leq 40.0\%$ ),随着 RDX 的增加,不含硝基甲烷的混合燃料爆炸压力略有上升,含硝基甲烷的混合燃料爆炸压力不断下降。当混合燃料中不含硝基甲烷时,颗粒的团聚现象较少,爆炸压力的变化规律几乎不受团聚现象的影响。从图 4(e) 中能够看出,颗粒团聚以 RDX 颗粒为核心,因此当混合燃料中含硝基甲烷时,RDX 质量分数的增加会导致团聚现象的增多,更多的燃料没有参与反应,这就造成了随着 RDX 质量分数的增加爆炸压力不断减小的现象。

对比图 3 中两条曲线,能够看出当 RDX 质量分数较小时 ( $\leq 40.0\%$ ),随着 RDX 的增加,不含硝基甲烷的混合燃料爆炸压力略有上升,含硝基甲烷的混合燃料爆炸压力不断下降。当混合燃料中不含硝基甲烷时,颗粒的团聚现象较少,爆炸压力的变化规律几乎不受团聚现象的影响。从图 4(e) 中能够看出,颗粒团聚以 RDX 颗粒为核心,因此当混合燃料中含硝基甲烷时,RDX 质量分数的增加会导致团聚现象的增多,更多的燃料没有参与反应,这就造成了随着 RDX 质量分数的增加爆炸压力不断减小的现象。

## 2.2 爆炸压力上升速率及持续时间

图 5 为不同质量分数 RDX 与铝粉混合物爆炸最大压力及持续时间。由图 5(a) 可知,RDX/铝粉最大压力斜率随 RDX 质量分数的增加先增大后减小。当 RDX 质量分数为 0.0% 时,最大压力斜率较小。随着 RDX 质量分数的增加,最大压力斜率不断增大,当 RDX 质量分数为 40.0% 时,压力斜率达到最大值  $116.17 \text{ kPa/ms}$ 。

随着 RDX 质量分数继续增大,最大压力斜率减小。RDX 质量分数达到 90.0% 后趋于平缓,当 RDX 质量分数为 100.0% 时,最大压力斜率达到最小值  $11.27 \text{ kPa/ms}$ 。由图 5(b) 能够看出,最大压力斜率随 RDX 质量分数的变化趋势与爆炸持续时间的变化趋势完全相反。当 RDX 质量分数小于等于 40.0% 时,随着 RDX 含量的增加,爆炸持续时间略有



(a) 为铝粉/RDX 团聚的 SEM 图; (b) 为铝粉示意图; (c) 为 RDX 示意图; (d) 为硝基甲烷示意图; (e) 为 RDX/铝粉/硝基甲烷团聚示意图; (f) 为铝粉/硝基甲烷团聚示意图

图 4 不同颗粒和颗粒团聚图

Fig. 4 Diagram of different particles and particle agglomeration powder/nitromethane agglomeration

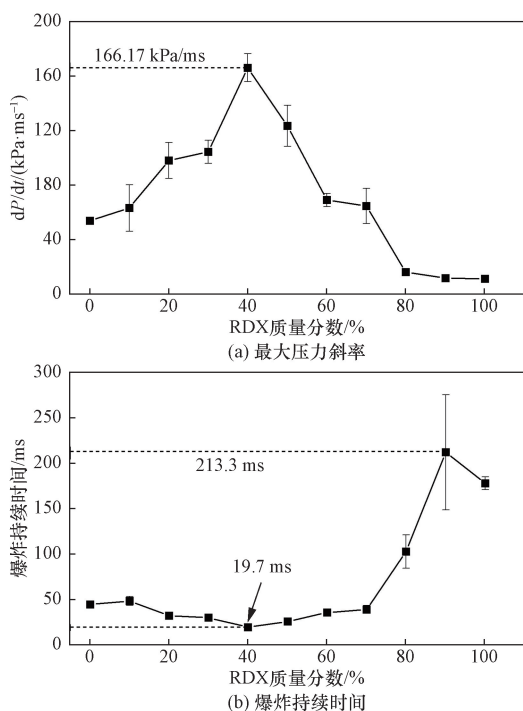


图5 不同质量分数 RDX 与铝粉混合物爆炸最大压力斜率及持续时间

Fig. 5 Maximum explosion pressure slope and duration of mixture of different mass fraction RDX and aluminum powder

减小。在 RDX 质量分数为 40.0% 时达到最小值,爆炸持续时间最小为 19.7 ms。当 RDX 质量分数大于 60.0% 时,爆炸持续时间迅速增加,在 RDX 质量分数为 90.0% 时,燃烧时间最长达到 212.3 ms。

造成这一现象的原因是 RDX 和铝粉的理化性质不同,铝粉易燃但反应持续时间较长,RDX 分解反应时间极短,但不易燃烧,因此会发生分解反应。当 RDX 质量分数较小时,铝粉含量高,点火后大量铝粉发生反应,在短时间内释放大量能量同时消耗大量氧气。混合燃料中少量的 RDX 受到较强刺激。在缺氧条件下,分解反应瞬间发生,释放大量能量。RDX 质量分数的增加导致短时间内释放的能量增多,最大压力斜率不断增大。RDX 在分解过程中释放的热量促进了铝粉反应,导致爆炸持续时间略有减小。而当 RDX 质量分数较大时,随着 RDX 质量分数的增加,铝粉浓度不断减小,点火后最初发生反应的铝粉量减少,导致燃烧爆炸初期释放的能量减少,无法完全将 RDX 引爆。部分 RDX 粉尘未能参与反应,因此在短时间内释放能量减少。同时,铝粉的减少导致燃烧爆炸初期消耗氧气量减少,部分氧气与 RDX 反应,该反应的反应速度比 RDX 的自分解反应慢。受以上两个因素的共同作用,当 RDX 质量分数较大时,随着 RDX 质量分数的增加,最大压力上升速率不断减小,爆炸持续时间总体呈上升趋势。

当混合燃料中含硝基甲烷时,最大爆炸压力斜率与爆炸持续时间随 RDX 质量分数的变化曲线如图 6 所示。由图 6(a)可知,随着 RDX 质量分数的增加,最大压力上升速率先增大后减小,然后缓慢上升。从图 6(b)中能够看出爆炸持续时间的变化规律与最大压力上升速率完全相反。当 RDX 质量分数为 20.0% 时,最大压力上升速率为 45.81  $\text{kPa}/\text{ms}$ ,该条件下燃烧时间最短为 41.0 ms。当 RDX 质量分数小于这一值时,最大压力上升速率随 RDX 质量分数的增大不断变大,爆炸持续时间略有减小。但当 RDX 质量分数大于 20.0% 时,随着 RDX 质量分数的增大,最大压力上升速率不断减小,爆炸持续时间不断增大。在 RDX 质量分数为 50.0% 和 66.7% 时最大压力上升速率达到最小值,均为 10.29  $\text{kPa}/\text{ms}$ 。当 RDX 质量分数为 50.0% 时,爆炸持续时间最长为 305.3 ms。随着 RDX 质量分数的继续增加,最大压力上升速率略有上升,爆炸反应持续时间呈下降趋势。RDX 质量分数在 20% ~ 80% 区间内,最大压力上升速率与 RDX/铝粉混合燃料相比更小。这是由于硝基甲烷的加入增加了分散体系中微粒的团聚现象,铝粉在燃烧爆炸最初阶段释放的能量无法更多的作用到 RDX 上,使得参与反应的 RDX 减少,导致了最大压力上升速

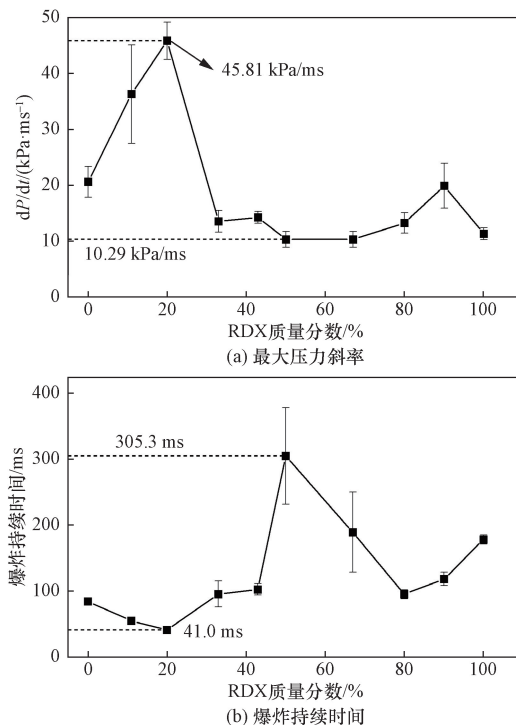


图6 不同质量分数 RDX 与铝粉及硝基甲烷混合物爆炸最大压力斜率及持续时间

Fig. 6 Maximum explosion pressure slope and duration of different mass fraction of RDX with aluminum powder and nitromethane mixture

率减小,爆炸持续时间增大。这也是造成图 3 中 RDX 质量分数在 20% ~ 80% 范围内时,爆炸压力较低的原因。

### 2.3 爆炸产物

实验在常压下进行,计算得到 20 L 球形罐内氧气的量为 3.0 g。高压气体进入罐体,罐内压力升高 20 kPa,携带燃料一同进入罐内的空气中包含氧气 0.59 g。表 2 为 3 种燃料在不同条件下反应的气体产物(仅列出所检测的气体)。铝的燃烧爆炸并不能产生气体,且需 O<sub>2</sub>。但 RDX 和硝基甲烷在有氧和无氧条件下均能够发生爆炸,同时释放大量的气体,由表 2 能够看出 NO 和 CO 仅能在无氧条件下产生<sup>[30-32]</sup>。

图 7 和图 8 展示的均为不同条件下的气体产物浓度。对比相同条件下 CO<sub>2</sub>浓度和 NO<sub>2</sub>浓度,CO<sub>2</sub>浓度较高,这是因为实验使用点火具内含 3.2 g 黑火药,黑火药爆炸产生 CO<sub>2</sub>气体,因此 CO<sub>2</sub>浓度升高。对单点火具进行爆炸测试开展空白对照组实验,得

表 2 RDX 与硝基甲烷气体产物对比  
Table 2 Comparison of RDX and nitromethane gas products

燃料	有氧反应	无氧反应
铝粉	无	无
RDX	NO <sub>2</sub> 、CO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub> 、CO <sub>2</sub> 、NO、CO
硝基甲烷	NO <sub>2</sub> 、CO <sub>2</sub>	CO

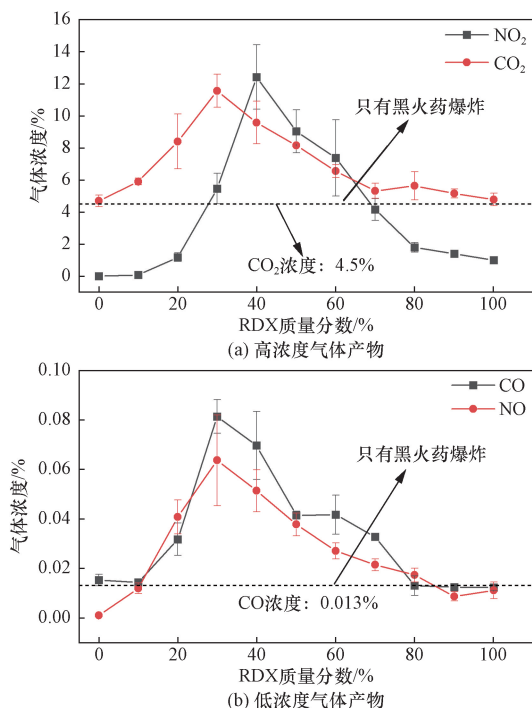


图 7 RDX/铝粉混合燃料爆炸后气体产物  
Fig. 7 RDX/aluminum powder mixture gas product after explosion

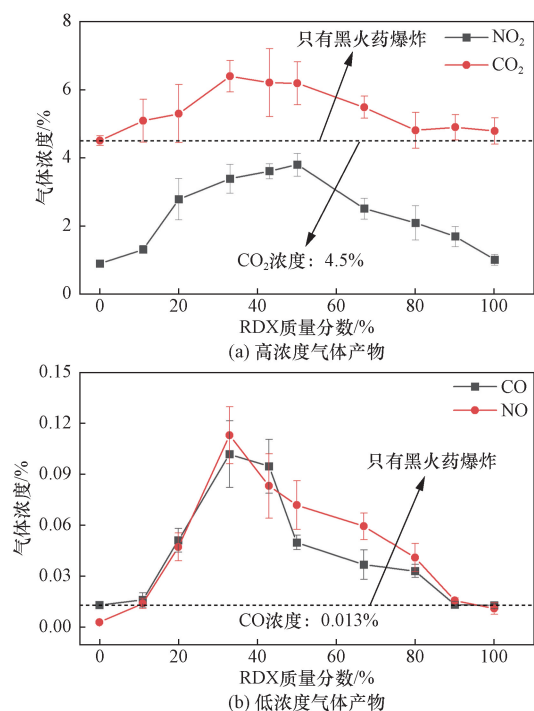


图 8 RDX/铝粉/硝基甲烷混合燃料气体产物浓度  
Fig. 8 RDX/aluminum powder/nitromethane mixed fuel gas product concentration

到气体产物浓度:CO<sub>2</sub>为 4.5%,CO 为 0.013%。对比 CO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、CO 和 NO,CO<sub>2</sub>和 NO<sub>2</sub>的浓度远大于 CO 和 NO,这是由于 RDX 和硝基甲烷发生有氧或无氧反应时均产生 CO<sub>2</sub>和 NO<sub>2</sub>,但 CO 和 NO 仅能在无氧反应中产生。

从图 7 和图 8 中能够很明显地看出,各气体产物浓度受 RDX 质量分数影响的变化趋势相同,随着 RDX 质量分数的增加各气体产物浓度先增大后减小。由于铝的燃烧无气体产物生成,因此气体产物浓度的大小能够直接反映参与反应的 RDX 和硝基甲烷的多少;同时由于 NO 和 CO 仅在 RDX 和硝基甲烷发生无氧分解反应时产生,因此 NO 和 CO 的浓度能够反映 RDX 和硝基甲烷发生无氧分解反应量的多少。当 RDX 质量分数小于 30.0% 时,混合燃料中参与反应和发生无氧分解反应的 RDX 和硝基甲烷不断增多。当 RDX 质量分数在 30.0% ~ 40.0% 时,参与反应和发生无氧分解反应的 RDX 和硝基甲烷的量处于较高水平。随着 RDX 质量分数继续增加,参与反应和发生无氧分解反应的 RDX 和硝基甲烷不断减少。这一现象能够为 2.2 节中最大压力上升速率变化规律的解释提供依据。

### 2.4 爆炸下限

测量点火具单独作用时的压力变化,得到燃烧时间及爆炸压力分别为 35 ms 和 172.33 kPa。因此爆炸压力超过 202.33 kPa 时认为燃料发生了燃烧

爆炸反应。实验测量铝粉、RDX 粉尘、硝基甲烷液雾爆炸下限分别为  $74.93$ 、 $226.88$  和  $959.44$   $\text{g}/\text{m}^3$ 。

图 9(a) 为 RDX/铝粉燃料爆炸下限随 RDX 质量分数变化曲线,能够看出,随着 RDX 质量分数的增加,爆炸下限呈上升趋势。由于铝粉爆炸下限比 RDX 小,因此 RDX 质量分数的增加导致了混合燃料爆炸下限上升。当 RDX 质量分数为  $10.0\%$  和  $30.0\%$  时,计算得到爆炸下限浓度条件下,混合燃料中铝粉的浓度分别为  $78.98$   $\text{g}/\text{m}^3$  和  $78.93$   $\text{g}/\text{m}^3$ ,均大于铝粉的爆炸极限。因此在 RDX 质量分数低时,RDX 对铝粉的爆炸起抑制作用。当 RDX 质量分数大于  $30.0\%$  时爆炸下限缓慢上升,当 RDX 质量分数为  $70.0\%$  时,爆炸下限为  $131.59$   $\text{g}/\text{m}^3$ ,仅比 RDX 质量分数为  $40.0\%$  时增加了  $18.84$   $\text{g}/\text{m}^3$ 。但当 RDX 质量分数超过  $70.0\%$  时,随着 RDX 质量分数的增加爆炸下限上升速率加快。

对比图 9(a) 和图 9(b),当 RDX 质量分数相同时,含硝基甲烷混合燃料比不含硝基甲烷混合燃料爆炸下限高,这说明硝基甲烷起到了抑制作用。一方面硝基甲烷的爆炸下限比 RDX 和铝粉的爆炸下限高,另一方面硝基甲烷的加入使得燃料分散体系中的团聚现象增加。根据 RDX 质量分数为  $0.0\%$  和  $100.0\%$  时实验结果,使用勒夏特列定律 (Le Chatelier's law) 预测爆炸下限。对比预测得到的爆炸下限与实验值,能够看出实验值比预测值大,且在

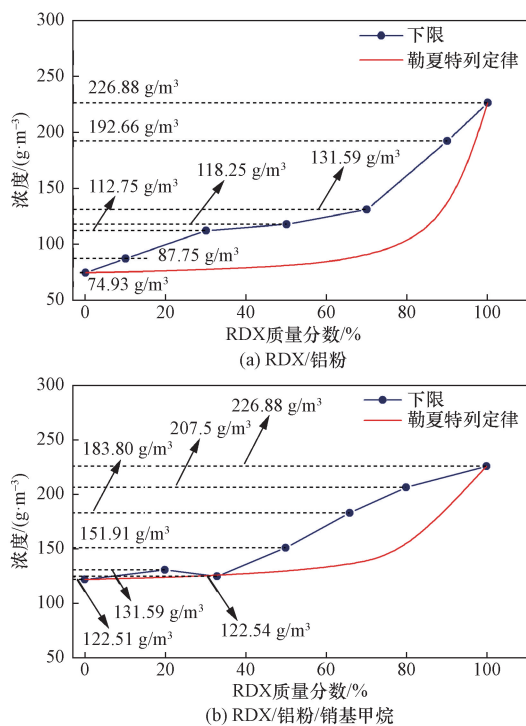


图 9 不同 RDX 质量分数下混合燃料的爆炸下限

Fig. 9 Lower explosive limits for mixed fuels with different RDX mass fractions

RDX 质量分数为  $70.0\%$  附近差距较大。这是由于低浓度条件下 RDX 对铝粉或铝粉/硝基甲烷混合具有抑制作用,同时混合燃料分散过程中团聚现象也会导致这一结果。

### 3 结论

实验研究 RDX 对铝粉和铝粉/硝基甲烷混合燃料爆炸压力、最大压力上升速率及爆炸下限的影响,得到结论如下。

(1) 随着 RDX 质量分数的增加,RDX/铝粉混合燃料爆炸压力先增大后减小,RDX/铝粉/硝基甲烷混合燃料爆炸压力不断减小。

(2) RDX/铝粉混合燃料最大压力上升速率随 RDX 质量分数的增加,先增加后减小;RDX/铝粉/硝基甲烷混合燃料最大压力上升速率随 RDX 质量分数的增加,先增加后减小之后略有增加。燃烧时间的变化规律与最大压力上升速率完全相反。

(3) RDX/铝粉/硝基甲烷和 RDX/铝粉混合燃料爆炸下限,随 RDX 质量分数的增加不断变大,比 Le Chatelier's law 爆炸下限预测值高。

### 参 考 文 献

- [1] Xiong W, Liu Y, Zhang T, et al. Effect of Al-Li alloy on the combustion performance of AP/RDX/Al/HTPB propellant [J]. Aerospace, 2023, 10(3): 222.
- [2] Kan R, Nie J, Song P, et al. Effect of afterburning effect of aluminum powder on shockwave and bubble behavior of CL-20 explosive in deep-water explosion [J]. Journal of Energetic Materials, 2024, 42(1/4): 629-652.
- [3] Xin H, Wang K, Ren H, et al. Comparative study on combustion behavior of aluminum-based alloy fuels and aluminum powder in solid propellants [J]. Metals, 2023, 13(8): 1492.
- [4] 牛国涛, 曹少庭, 牛磊, 等. 纳米铝在炸药中的分散性和成型性 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21(19): 8018-8022. Niu Guotao, Cao Shaoting, Niu Lei, et al. Dispersibility and formability of explosives with nano-aluminum [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(19): 8018-8022.
- [5] Jing Q, Wang D, Liu Q, et al. Ignition sensitivity and explosion behaviors of micron-sized aluminum powder; comparison between flake aluminum powder and spherical aluminum powder [J]. Chemical Engineering Science, 2022, 252: 117502.
- [6] Krietsch A, Rodriguez M R, Kristen A, et al. Ignition temperatures and flame velocities of metallic nanomaterials [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2021, 71: 104482.
- [7] Kim W, Saeki R, Ueno Y, et al. Effect of particle size on the minimum ignition energy of aluminum powders [J]. Powder Technology, 2023, 415: 118190.
- [8] Jing Q, Wang D, Liu Q, et al. Ignition sensitivity and explosion behaviors of micron-sized aluminum powder; comparison between flake aluminum powder and spherical aluminum powder [J]. Chemical Engineering Science, 2022, 252: 117502.

- [9] Kotomin A A, Dushenok S A, Kozlov A S. Detonability of suspensions of explosives in nitromethane[J]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2024, 60(3): 326-332.
- [10] 刘天奇, 田伟业, 贾瑞衡, 等. 微米级褐煤粉尘爆炸压力试验研究[J]. *消防科学与技术*, 2022, 41(12): 1629-1632.  
Liu Tianqi, Tian Weiye, Jia Ruiheng, et al. Experimental study on explosion pressure of micron-sized lignite dust[J]. *Fire Science and Technology*, 2022, 41(12): 1629-1632.
- [11] Portarapillo M, Trofa M, Sanchirico R, et al. CFD simulation of turbulent fluid flow and dust dispersion in the 1 m<sup>3</sup> explosion vessel equipped with the rebound nozzle[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2022, 76: 104755.
- [12] Ray S K, Mohalik N K, Khan A M, et al. CFD modeling to study the effect of particle size on dispersion in 20l explosion chamber; an overview [J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2020, 30(3): 321-327.
- [13] Portarapillo M, Sanchirico R, Di Benedetto A. Effect of turbulence spatial distribution on the deflagration index; comparison between 20 L and 1 m<sup>3</sup> vessels[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2021, 71: 104484.
- [14] Guhathakurta S, Houim R W. Influence of thermal radiation on layered dust explosions [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2021, 72: 104509.
- [15] Jiang H, Bi M, Zhang T, et al. A novel reactive P-containing composite with an ordered porous structure for suppressing nano-Al dust explosions [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 416: 129156.
- [16] 张云, 贾月, 杨振欣, 等. MgH<sub>2</sub> 粉尘火焰传播过程与热辐射特性[J]. *火炸药学报*, 2023, 46(2): 157-162.  
Zhang Yun, Jia Yue, Yang Zhenxin, et al. MgH<sub>2</sub> dust flame propagation process and thermal radiation characteristics[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2023, 46(2): 157-162.
- [17] 张云, 赵懿明, 许张归, 等. MgH<sub>2</sub> 粉尘爆炸的能量释放特性规律[J]. *火炸药学报*, 2022, 45(6): 898-904.  
Zhang Yun, Zhao Yiming, Xu Zhanggui, et al. Energy release characteristics of MgH<sub>2</sub> dust explosion[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2022, 45(6): 898-904.
- [18] Wang X, Wang Z, Ni L, et al. Explosion characteristics of aluminum powder in different mixed gas environments [J]. *Powder Technology*, 2020, 369: 53-71.
- [19] Han B, Li G, Yuan C, et al. Flame propagation of corn starch in a modified Hartmann tube with branch structure [J]. *Powder Technology*, 2020, 360: 10-20.
- [20] Zhang X, Gao W, Yu J, et al. Flame propagation mechanism of nano-scale PMMA dust explosion[J]. *Powder Technology*, 2020, 363: 207-217.
- [21] Zhang S, Bi M, Yang M, et al. Flame propagation characteristics and explosion behaviors of aluminum dust explosions in a horizontal pipeline[J]. *Powder Technology*, 2020, 359: 172-180.
- [22] Cao W, Qin Q, Cao W, et al. Experimental and numerical studies on the explosion severities of coal dust/air mixtures in a 20-L spherical vessel[J]. *Powder Technology*, 2017, 310: 17-23.
- [23] Li H, Deng J, Shu C M, et al. Flame behaviours and deflagration severities of aluminium powder-air mixture in a 20-L sphere: computational fluid dynamics modelling and experimental validation [J]. *Fuel*, 2020, 276: 118028.
- [24] Zhang C, Bai C, Ren J, et al. The promotion of nitromethane on solid-liquid fuel/air mixtures explosion characteristics under different ambient conditions[J]. *Fuel*, 2022, 322: 124190.
- [25] Zhang C, Bai C, Yao J. Liquid component effect on the dispersion and explosion characteristics of solid-liquid mixed fuel[J]. *Fuel*, 2022, 319: 123806.
- [26] 杨仲坤, 夏洋峰, 安高军, 等. 高能液固混合燃料配方优化及毁伤分析[J]. *含能材料*, 2023, 31(8): 763-772.  
Yang Zhongkun, Xia Yangfeng, An Gaojun, et al. Optimization of high-energy liquid-solid mixed fuel formula and damage analysis [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2023, 31(8): 763-772.
- [27] Bai C, Zhang C, Liu W, et al. Effect of nitromethane on fuel/air explosion characteristics under different ambient conditions [J]. *Combustion and Flame*, 2021, 234: 111632.
- [28] Yao J, Bai C, Zhang C. Explosion performance of Al powder-liquid fuel mixtures under different ambient conditions [J]. *ACS Omega*, 2022, 7(36): 32489-32495.
- [29] 陈网桦, 宋述忠, 胡毅亭, 等. 铝粉及黑索金粉尘爆炸的特性研究[J]. *含能材料*, 2003(2): 91-93.  
Chen Wanghua, Song Shuzhong, Hu Yiting, et al. Research on the characteristics of aluminum powder and RDX dust explosion [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2003(2): 91-93.
- [30] Kiciński W, Trzciński W A. Calorimetry studies of explosion heat of non-ideal explosives[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2009, 96: 623-630.
- [31] Bidabadi M, Fereidooni J, Hosseini S N, et al. Investigation of particle size effect on flame velocity in the combustion of nano/micron-sized aluminum particles in air[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2014, 228(2): 297-304.
- [32] David R. *CRC handbook of chemistry and physics* [M]. Boca Raton: CRC Press, 2005.