

文章编号:1006-9941(2021)05-0434-10

## 新型云爆剂液相组分配方设计及毁伤威力

宋先钊<sup>1</sup>,江军<sup>1</sup>,安高军<sup>2</sup>,王永旭<sup>3</sup>,崔赛楠<sup>2</sup>,李斌<sup>1</sup>,解立峰<sup>1</sup>

(1. 南京理工大学化工学院安全工程系, 江苏 南京 210094; 2. 军事科学院系统工程研究院军事新能源技术研究所, 北京 102300; 3. 中国兵器科学研究院宁波分院, 浙江 宁波 315103)

**摘要:** 为探索毁伤威力较优的新型云爆剂液相组分,以聚甲氧基二丁基醚、聚甲氧基二甲醚、正丁醇和仲丁醇为研究对象,以传统典型燃料环氧丙烷为对照,采用压力测试系统、高速录像和红外热成像仪记录相关实验数据,研究了上述5种燃料在以18 g黑索今(RDX)为中心分散药及160 g梯恩梯(TNT)为二次起爆药柱时的云爆特性。试验结果表明,聚甲氧基二甲醚的临界起爆能高于其他3种燃料。热辐射损伤半径大小关系为:环氧丙烷(18.9 m)>仲丁醇(16.6 m)>正丁醇(16.0 m)>聚甲氧基二丁基醚(15.6 m)>聚甲氧基二甲醚(12.0 m)。运用PROBIT方程评估该5种燃料对人和建筑物的毁伤效果,结果表明,丁醇类燃料(正丁醇、仲丁醇)对人和建筑物的毁伤效果优于聚甲氧基醚类燃料(聚甲氧基二丁基醚、聚甲氧基二甲醚),而环氧丙烷的毁伤效果最优。

**关键词:** 燃料空气炸药;液态燃料;毁伤评估

中图分类号: Tj55; O383

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2020223

### 1 引言

燃料空气炸药<sup>[1]</sup>(fuel air explosive, FAE)是通过爆炸抛撒的方式,将燃料分散到空气中,与空气形成爆炸性混合物,在一定条件下使得可燃云雾发生爆轰达到毁伤的目的。其具有爆轰体积大、正压作用时间长等特点,对隐蔽目标和软目标毁伤效果好,能够在较大范围内对人员造成伤害<sup>[2]</sup>。FAE一般分为二次引爆型(DEF AE)和一次引爆型(SEFAE)两种类型<sup>[3]</sup>。

在过去的几十年里,国内外研究者通过实验和数值仿真的手段对其进行了广泛的研究。贵大勇等<sup>[4]</sup>研究了几种典型的云爆剂的威力,得到如下典型液态燃料综合威力性能排序:正己烷>1-戊烯>乙醚>甲基叔丁基醚>环氧丁烷>乙醇>环氧丙烷>丙酮>甲醇>2-硝

基丙烷>硝酸异丙酯>硝基甲烷。Apparao<sup>[5]</sup>根据碳钢壳体破裂后的形态和环氧丙烷燃料液体分散时的形态,得出55 g的硝基胍为分散4.3 kg的环氧丙烷燃料的最佳中心装药质量。饶国宁等<sup>[6]</sup>对液固云爆剂爆炸场参数和威力评价进行了实验研究,结果表明二次云爆剂比一次云爆剂具有更大的超压作用效果。此外,部分学者通过数值仿真的手段研究了燃料云雾爆炸抛撒特点。比如,贾承志<sup>[7]</sup>通过数值模拟的方法对云爆燃料在爆炸抛撒过程中的窜火机理进行了研究,结果表明,对2 kg云爆装置来说,窜火一般发生于装置顶部0.01~0.25 m附近,窜火时间集中在燃料开始分散后1~5 ms。Bang<sup>[8]</sup>等人通过实验和数值计算研究了黏性液体在爆炸力驱动下的Rayleigh-Taylor不稳定性和液体环初始膨胀半径。陈婷婷<sup>[9]</sup>研究了固液混合态云爆剂的物理稳定性,结果表明,铝粉含量越低,混合药剂振动试验和数值仿真结果之间的误差越小。畅博<sup>[10]</sup>对二次引爆型云爆武器爆炸抛撒过程和毁伤作用进行了详细综述,提出还需增强对燃料的爆炸抛撒过程以及云雾爆轰能量与目标耦合的研究。综上所述,之前的研究主要集中在云爆燃料的爆炸抛撒成雾、爆炸场参数的测量以及液固云爆剂,对于云爆剂液相组分来说,仍然以环氧丙烷、硝酸异丙酯、石

收稿日期: 2020-08-17; 修回日期: 2020-10-14

基金项目: 国家自然科学基金资助(11802136);江苏省研究生科研与实践创新计划项目资助(KYCX20\_0250);国家级大学生创新创业训练计划(202010288033Z)

作者简介: 宋先钊(1995-),男,博士研究生,主要从事多相爆轰方向的研究。e-mail: songxianzhao@njust.edu.cn

通信联系人: 李斌(1984-),男,副研究员,主要从事安全技术和多相爆轰方向的研究。e-mail: libin@njust.edu.cn

引用本文: 宋先钊,江军,安高军,等. 新型云爆剂液相组分配方设计及毁伤威力[J]. 含能材料, 2021, 29(5):434-443.

SONG Xian-zhao, JIANG Jun, AN Gao-jun, et al. Design of New Liquid Component of Fuel Air Explosive and Its Damage Power[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2021, 29(5):434-443.

油醚等传统典型液态燃料为主,对于新型云爆剂液相组分的研究较少。此外,传统典型液态燃料具有易燃性和强挥发性等特点,在生产、贮存、运输和使用过程中存在较大的危险性,若能找到较稳定的新型液态燃料,将会降低这种风险。

聚甲氧基二丁基醚<sup>[11]</sup>、聚甲氧基二甲醚<sup>[12]</sup>、正丁醇<sup>[13]</sup>和仲丁醇<sup>[14]</sup>通常作为汽油或柴油的添加剂,或者作为其替代燃料,此类燃料热值较高、清洁环保,并且能提高热效率和改善内燃机的燃烧性能等特点。然而,目前还没有将其运用于云爆武器的报道。为此,本研究以此类燃料为研究对象,以传统典型燃料环氧丙烷为对照,通过外场无约束云爆实验,得到压力场及温度场实验数据,并运用 PROBIT 方程评价此类燃料的

毁伤效果,最后从中挑选出毁伤效果较优的燃料。实验结果为新型云爆剂液相组分的筛选提供参考。

## 2 实验部分

### 2.1 试验样品

试验选用由军事科学院系统工程研究院军事新能源技术研究所提供的聚甲氧基二丁基醚(BTPOM<sub>n</sub>)、聚甲氧基二甲醚(DMM<sub>2</sub>)、正丁醇(1-butanol)和仲丁醇(2-butyl alcohol)四种燃料作为样品,与传统典型液态燃料环氧丙烷(PO)比较,其基本理化性质见表1<sup>[11]</sup>。表1数据表明,此类燃料热值介于29~36.07 MJ·kg<sup>-1</sup>,传统典型液态燃料环氧丙烷的热值为32.47 MJ·kg<sup>-1</sup>,而石油醚的热值为47 MJ·kg<sup>-1</sup>,该4种燃料热值较高。

表1 试验样品理化性质<sup>[11]</sup>

Table 1 Physical and chemical characteristics of the test samples<sup>[11]</sup>

fuel	density(20 °C) / g·cm <sup>-3</sup>	boiling point / °C	flash point / °C	calorific value / MJ·kg <sup>-1</sup>	mass / g
PO	0.83	34.2	-37	32.47	800.0
BTPOM <sub>n</sub>	0.85	171-253	67	33.25	836.4
DMM <sub>2</sub>	0.96	105	30	29	964.4
1-butanol	0.81	117	35	36.07	784.7
2-butyl alcohol	0.81	99.5	24	35.99	787.2

### 2.2 试验方法和装置

图1展示了容积为1 L的圆柱形壳体的结构示意图。壳体 and 中心装药管内径分别为84 mm和25 mm,高度分别为200 mm和134 mm,均采用壁厚为3 mm的聚氯乙烯(PVC)材料。

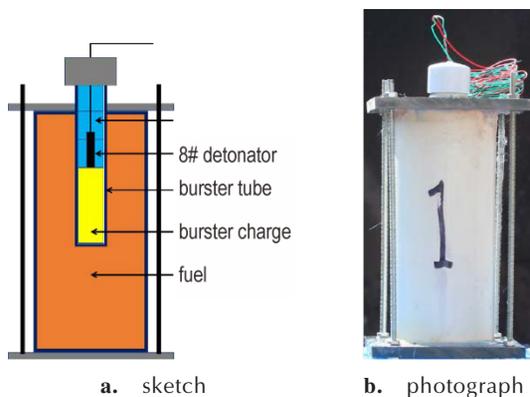


图1 云爆弹壳体示意图

Fig.1 Diagram of the shell of fuel air explosive(FAE)

图2所示为试验布置图。试验样品体积均为1 L。中心分散药为18 g RDX炸药,二次起爆药柱为160 g TNT炸药,均由8#电雷管引爆,点火延迟时间为40 ms。云爆弹弹体与二次起爆药柱均距离地面1.25 m,且两

者之间的水平距离为1.5 m。定义弹体投影于地面的几何中心为爆心,6个地面超压传感器距离爆心的距离分别为1,2,3,4,5 m和6 m。压力数据采集系统、高速录像机(Fastcam Mini UX100,2000 帧/s)和红外热成像仪(FOTRIC A615,30 帧/s)用来记录实验过程并采集相应数据。

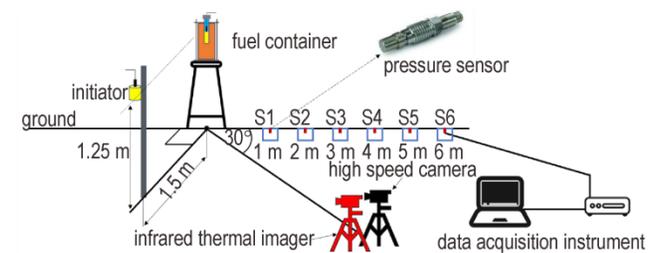


图2 试验布置图

Fig.2 Schematic diagram of experimental setup

## 3 结果与讨论

### 3.1 燃料分散过程及云雾半径变化规律

高速录像记录的各燃料云雾分散最终状态及点爆实验过程如图3所示,燃料云雾形态较规整,为圆饼状,其中聚甲氧基二甲醚燃料云雾厚度最大。图4为

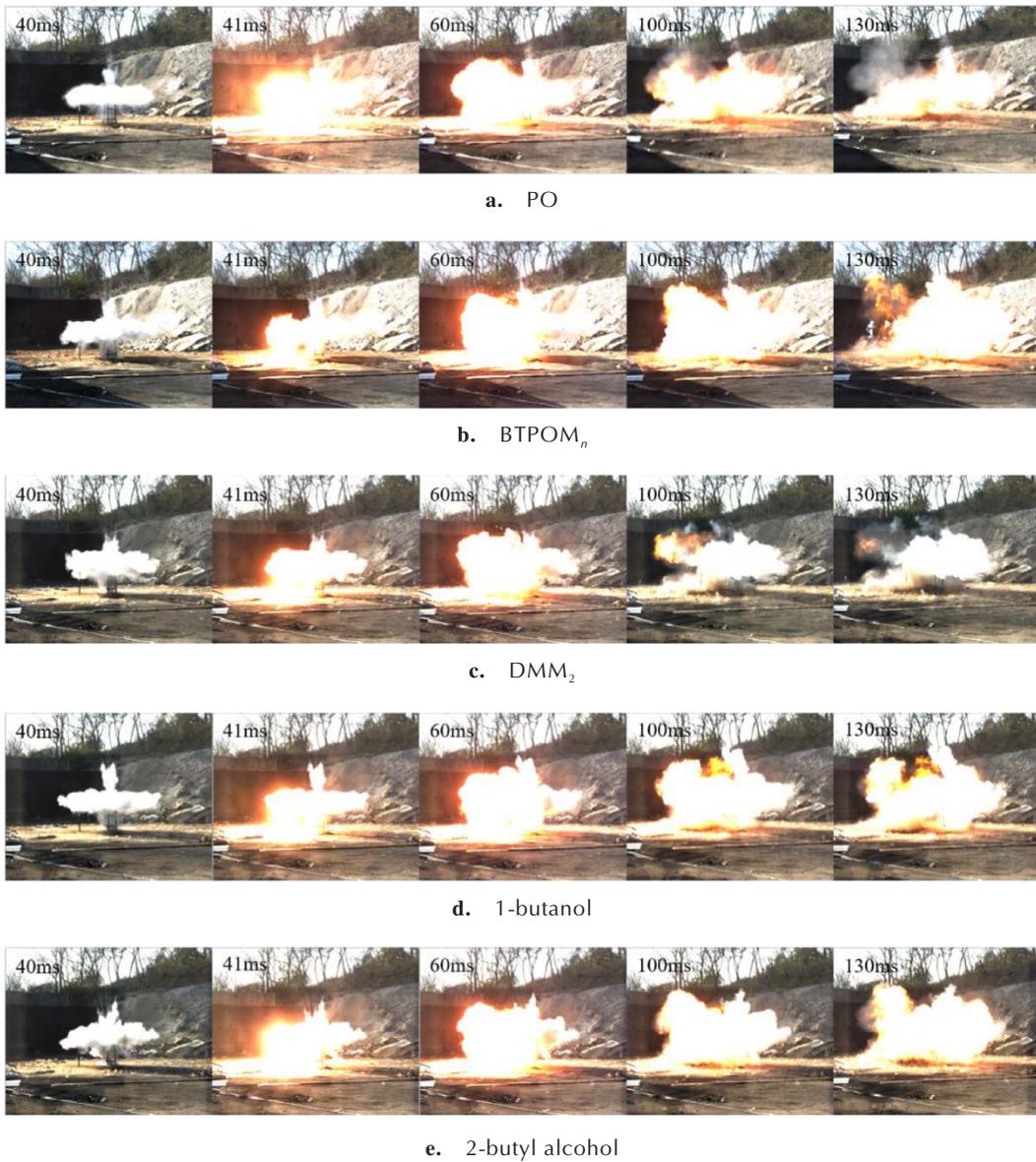


图3 几种燃料云雾分散及爆轰过程

Fig.3 Dispersion and detonation process of the cloud with different fuels

相同时刻下,各燃料云雾直径随时间变化曲线图,得到二次药柱起爆前云雾直径大小关系为:环氧丙烷>正丁醇>仲丁醇>聚甲氧基二甲醚>聚甲氧基二丁基醚,且所有燃料的最终云雾直径在4 m左右,意味着压力测试点S1、S2位于云雾区内,S3、S4、S5、S6位于云雾区外。此外,由于云雾爆轰属于体积爆轰,故对于同种燃料来说,其云雾覆盖面积越大,对目标的毁伤作用越强。二次药柱起爆后,火焰迅速向前传播,引燃燃料液滴和空气组成的爆炸性混合物。从图3可以看出,除了聚甲氧基二甲醚燃料有较多燃料未被引燃外,其余燃料均形成较大火球,且在100~130 ms时,火球直径出现最大值。较其他三种燃料而言,由于燃烧波未

能在聚甲氧基二甲醚燃料云雾中稳定传播,说明聚甲氧基二甲醚的临界起爆能高于其他燃料。

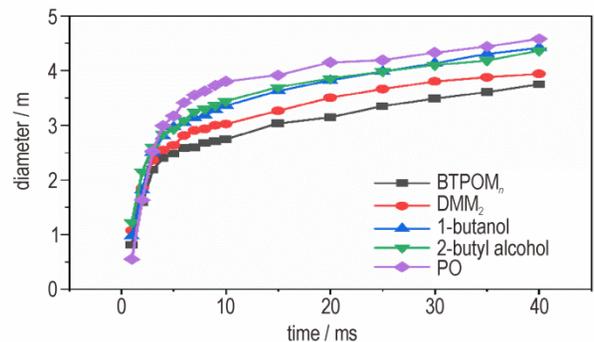


图4 几种燃料云雾直径-时间变化关系

Fig.4 Curves of diameter-time of the cloud with different fuels

### 3.2 超压及冲量变化规律

聚甲氧基二甲醚的典型压力-时间曲线如图5所示。从图5可以看出,爆轰波具有多峰结构,且云雾区内较云雾区外该特点更为明显,这是由于云雾爆轰为非稳态爆轰过程,存在爆轰波的相互碰撞,加之在爆炸抛撒过程中,云雾的浓度分布并不完全均匀,常常表现为内部低、外部高,从而导致各燃料组分的反应速率不同。此外,爆轰产物的后燃反应会导致局部压缩波的形成<sup>[15]</sup>,这亦是形成多波峰结构的原因。云雾区外,爆轰波衰减为冲击波,压力波形显示波后压力单调衰减<sup>[16]</sup>。

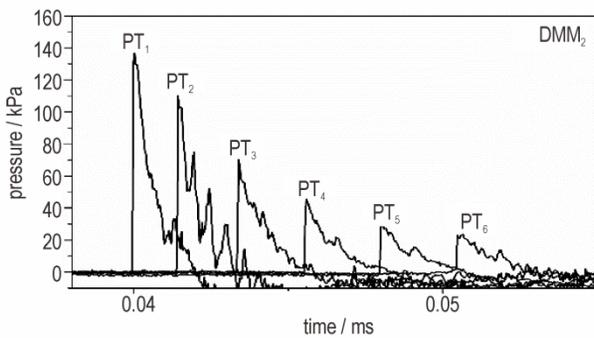


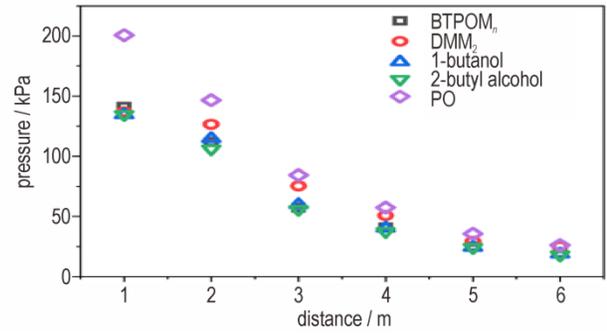
图5 聚甲氧基二甲醚的典型压力-时间曲线

Fig.5 Typical overpressure-time curves of DMM<sub>2</sub>

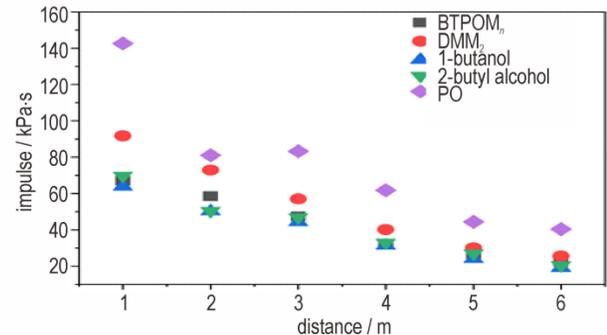
5种燃料的峰值压力-距离散点图及冲量-距离散点图如图6所示。图6a表明,爆轰波峰值压力在云雾区衰减缓慢,在云雾区边缘迅速衰减。5种燃料平均峰值压力大小关系为:环氧丙烷(91.8 kPa) > 聚甲氧基二甲醚(74.0 kPa) > 聚甲氧基二丁基醚(65.9 kPa) > 正丁醇(65.4 kPa) > 仲丁醇(62.8 kPa)。图6b表明,5种燃料平均比冲量大小关系为:环氧丙烷(75.6 kPa·s) > 聚甲氧基二甲醚(52.9 kPa·s) > 聚甲氧基二丁基醚(42.4 kPa·s) > 仲丁醇(41.3 kPa·s) > 正丁醇(38.7 kPa·s)。

冲击波超压通常作为评价云雾爆轰对于人员的毁伤能力的重要指标,故本研究以  $\bar{r} = r/\sqrt[3]{m}$  为横坐标,峰值超压为纵坐标, $r$ 为测点与爆心的距离, $m$ 为燃料质量,对5种燃料峰值超压数据用最小二乘法进行拟合,得到峰值超压随传播对比距离的变化规律:

$$\Delta p(\text{PO}) = -6.7 \left( \frac{\sqrt[3]{m}}{r} \right) + 1317.8 \left( \frac{\sqrt[3]{m}}{r} \right)^2 - 1157.5 \left( \frac{\sqrt[3]{m}}{r} \right)^3 \quad (1)$$



a. peak overpressure with different distances



b. impulse with different distances

图6 5种燃料的峰值压力-距离散点图和冲量-距离散点图

Fig.6 Plot of peak overpressure with different distances and impulse with different distances

$$\Delta p(\text{BTPOM}_n) = -215.2 \left( \frac{\sqrt[3]{m}}{r} \right) + 1336.0 \left( \frac{\sqrt[3]{m}}{r} \right)^2 - 1006.4 \left( \frac{\sqrt[3]{m}}{r} \right)^3 \quad (2)$$

$$\Delta p(\text{DMM}_2) = -232.0 \left( \frac{\sqrt[3]{m}}{r} \right) + 1523.8 \left( \frac{\sqrt[3]{m}}{r} \right)^2 - 1162.6 \left( \frac{\sqrt[3]{m}}{r} \right)^3 \quad (3)$$

$$\Delta p(1\text{-butanol}) = -244.2 \left( \frac{\sqrt[3]{m}}{r} \right) + 1463.7 \left( \frac{\sqrt[3]{m}}{r} \right)^2 - 1128.1 \left( \frac{\sqrt[3]{m}}{r} \right)^3 \quad (4)$$

$$\Delta p(2\text{-butyl alcohol}) = 10.3 \left( \frac{\sqrt[3]{m}}{r} \right) + 797.6 \left( \frac{\sqrt[3]{m}}{r} \right)^2 - 704.6 \left( \frac{\sqrt[3]{m}}{r} \right)^3 \quad (5)$$

比冲量为压力在时间轴上的积分,反映了冲击波对目标的做功能力,是评价云雾爆轰毁伤能力的重要

参数之一。同理,得到5种燃料比冲量随传播距离的变化规律如下:

$$i^+(\text{PO}) = 366.7\left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right) - 548.7\left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right)^2 + 343.4\left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right)^3 \quad (6)$$

$$i^+(\text{BTPOM}_n) = 17.7\left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right) + 352.2\left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right)^2 - 313.6\left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right)^3 \quad (7)$$

$$i^+(\text{DMM}_2) = -0.7\left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right) + 494.1\left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right)^2 - 404.2\left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right)^3 \quad (8)$$

$$i^+(\text{1-butanol}) = 29.2\left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right) + 266.2\left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right)^2 - 241.8\left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right)^3 \quad (9)$$

$$i^+(\text{2-butyl alcohol}) = 180.9\left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right) - 173.0\left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right)^2 + 63.8\left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right)^3 \quad (10)$$

### 3.3 燃爆速度

通过冲击波到达地面压力传感器的时间差和已知的地面传感器距离二次起爆位置之间的距离,可以计算出冲击波的速度。图7为燃烧波传播示意图和各燃料的燃爆速度随地面传感器与二次起爆位置之间的距离变化曲线。显然,所测得冲击波传播速度显著低于

CJ爆轰理论值( $p_{CJ} \approx 2 \text{ MPa}$ ,  $D_{CJ} \approx 1.9 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ )<sup>[17]</sup>,这是由于圆饼状的云雾区未完全贴合地面,冲击波在空气中由于发散作用而迅速衰减。结果表明,随着距离的增加,燃爆速度逐渐减小,在5~6 m时,环氧丙烷、聚甲氧基二丁基醚、聚甲氧基二甲醚、正丁醇和仲丁醇的燃爆速度分别衰减了28.6%、21.6%、16.5%、19.6%和20.1%。环氧丙烷的云雾区燃爆速度最快,为 $518.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;聚甲氧基二丁基醚次之,为 $498.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;正丁醇传播速度最慢,为 $471.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。而平均燃爆速度大小关系为:环氧丙烷( $430.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) > 聚甲氧基二甲醚( $428.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) > 聚甲氧基二丁基醚( $423.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) > 仲丁醇( $411.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) > 正丁醇( $409.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )。

### 3.4 热辐射威力

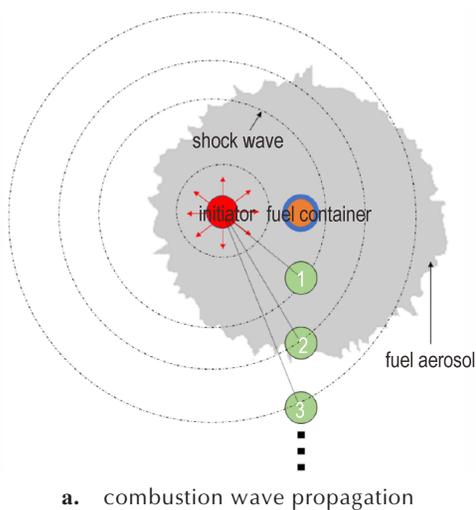
图8为各燃料的典型红外热像图。图9为各燃料不同时刻下最大火球表面温度。表2为各燃料火球表面最高温度及高温持续时间,环氧丙烷的火球表面最高温度仅略高于聚甲氧基二甲醚,然而其 $500 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上的高温持续时间显著大于另外4种燃料。正丁醇、仲丁醇的火球表面最高温度高于聚甲氧基二丁基醚、聚甲氧基二甲醚,这与燃料本身的净热值大小规律保持一致。环氧丙烷和聚甲氧基二甲醚的 $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上的高温持续时间为40 ms,另外3种燃料均为80 ms。正丁醇 $500 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上的高温持续时间最长,达到711 ms,而聚甲氧基二甲醚 $500 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上的高温持续时间最短,仅为113 ms。综合分析认为,正丁醇燃料的持续热毁伤效应最佳,而聚甲氧基二甲醚的持续热毁伤效应最差。聚甲氧基二甲醚的高温持续时间较短是由于燃烧波未能稳定传播,发生淬灭,该结果与前述云雾分散及爆轰过程的高速图像分析一致。

热通量准则、热剂量准则、热通量-热剂量准则、热通量-时间准则和热剂量-时间准则作为常见的热辐射破坏准则<sup>[18]</sup>。而热剂量准则更为常用,故本研究选用热剂量准则(Q准则),根据Baker等<sup>[19]</sup>提出的公式,热剂量(Q,  $\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$ )与爆心到测量点的距离(R, m)的关系如(11)式所示:

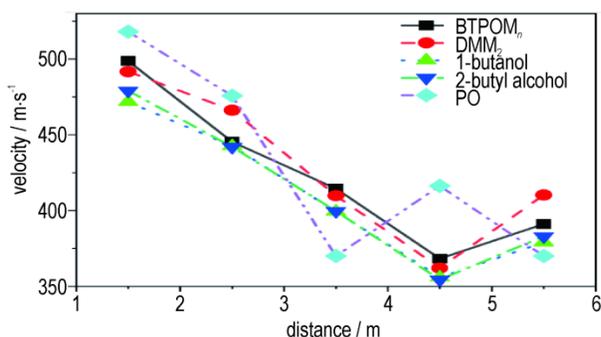
$$\frac{Q}{BGM^{1/3}\theta^{2/3}} = \frac{D^2/R^2}{F + D^2/R^2} \quad (11)$$

其中, BG为常数,其值为20400; M为燃料质量, kg;  $\theta$ 为火焰温度, K; D为火球直径, m; F为常数, 161.7。

Q准则的伤害阈值如表3所示<sup>[20]</sup>。图10为各燃料热剂量随距离分布图,其值由公式(9)计算。结合表3伤害阈值,可以发现,除了聚甲氧基二甲醚,对于



a. combustion wave propagation



b. deflagration velocity vs. distance

图7 燃烧波传播示意图与各燃料燃爆速度-距离变化曲线  
Fig.7 Schematic diagram of combustion wave propagation and the curves of deflagration velocity vs. distance of five fuels

其余燃料,人员在距离火球1 m处死亡,2 m处一级烧伤。表3表明,当火球热辐射值降至 $4.0 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 时,会对人员造成轻微伤害,但不一定会烧伤。直到火球热辐射值低于 $1.6 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 时,人和环境都不再受到火球的热辐射损伤,此时,该区域被视为无热辐射损伤的安

全区,其对应的半径为安全半径,安全半径越大也意味着热辐射损伤半径越大。通过计算得到上述燃料热辐射损伤半径大小关系为:环氧丙烷(18.9 m) $>$ 仲丁醇(16.6 m) $>$ 正丁醇(16.0 m) $>$ 聚甲氧基二丁基醚(15.6 m) $>$ 聚甲氧基二甲醚(12.0 m)。

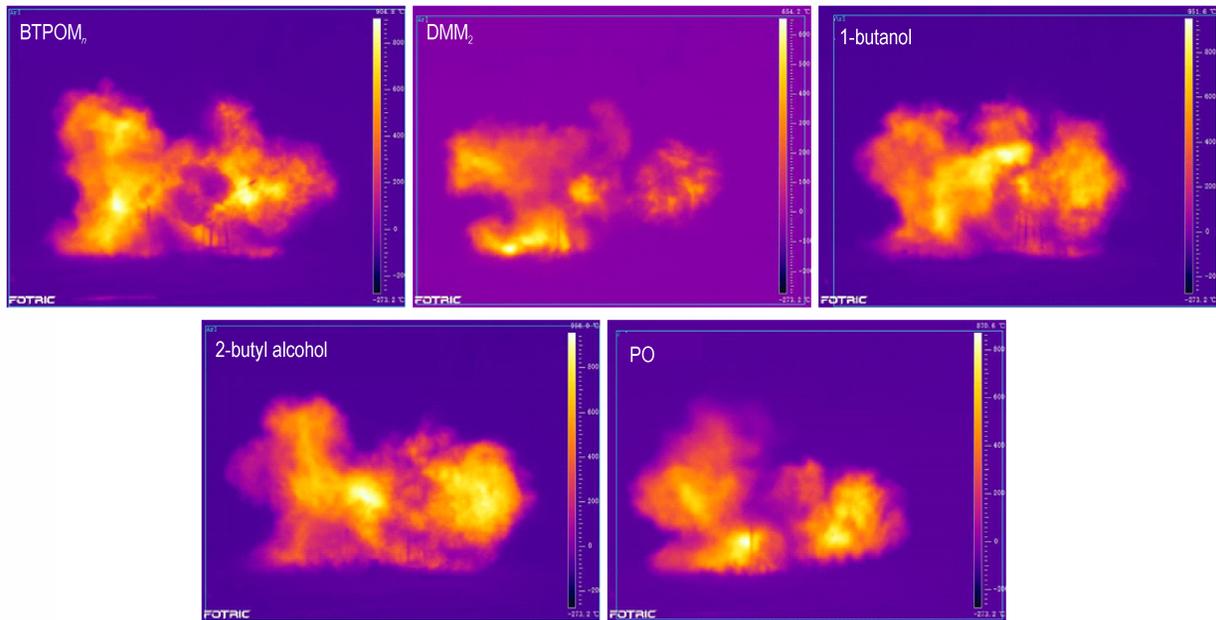


图8 各燃料典型红外热像图片

Fig.8 The typical infrared thermal photo

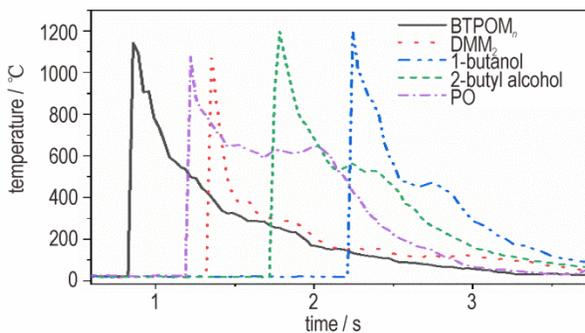


图9 各燃料不同时刻下最大火球表面温度

Fig.9 The maximum surface temperature of the fireball with different time

表2 几种燃料火球表面最高温度及高温持续时间

Table 2 The maximum surface flame temperature and high-temperature duration of the fireball

test sample	maximum surface temperature/°C	duration (>1000 °C)/ms	duration (>500 °C)/ms
BTPOM <sub>n</sub>	1142.1	80	375
DMM <sub>2</sub>	1070.8	40	113
1-butanol	1197.6	80	711
2-butyl alcohol	1198.0	80	301
PO	1077.8	40	1250

表3 热剂量准则的伤害阈值

Table 3 Damage values of the heat-guide line

Q/kJ·m <sup>-2</sup>	damage effect
1030	ignite the wood
592	death
392	heavy injury
375	third-degree burn
250	second-degree burn
172	light injury
125	first-degree burn
4	minor injury
<1.6	no effect

### 3.5 对人和建筑物的毁伤评估

蒸汽云爆炸后,爆炸产生的冲击波、高温热辐射,以及缺氧造成的窒息作用,是对周围人员、设备造成伤害的主要原因<sup>[21]</sup>。蒸汽云爆炸冲击波的毁伤效果通常采用TNO多能模型<sup>[22]</sup>进行计算。通常来说,有两种毁伤评价标准,其中一种是某些超压-冲量组合与预期破坏程度相关联的表<sup>[23]</sup>,另一种是运用PROBIT方程<sup>[24]</sup>,将爆炸参数与遭受一定程度损坏的暴露人口百分比相关联。由于PROBIT方程广泛应用于毁伤评

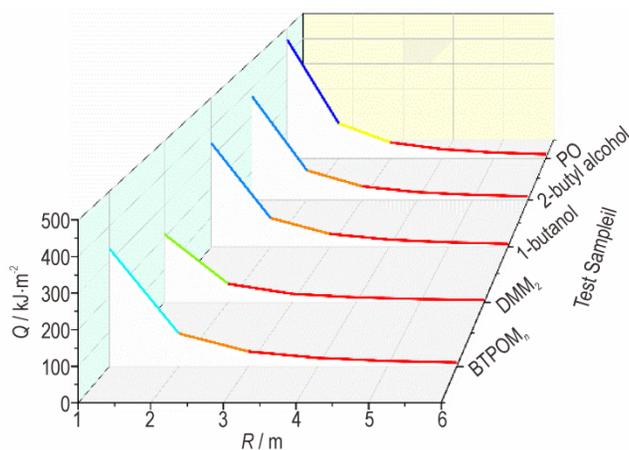


图10 热剂量-距离分布图

Fig.10 Heat energy with different distances

表4 对人毁伤的PROBIT方程

Table 4 PROBIT equations of explosion damage on humans

type of damage	PROBIT equations	references
eardrum rupture	$Y_1 = -12.6 + 1.524 \ln P_s$	[23, 25, 28]
death due to head impact	$Y_2 = 5 - 8.49 \ln \left( \frac{2430}{P_s} + \frac{4 \times 10^8}{P_s \times i} \right)$	[18, 23, 25, 28]
death due to whole body impact	$Y_3 = 5 - 2.44 \ln \left( \frac{7.38 \times 10^3}{P_s} + \frac{1.3 \times 10^9}{P_s \times i} \right)$	[18, 23, 25, 28-29]
death due to lung haemorrhage	$Y_4 = 5 - 5.74 \ln \left( \frac{4.2 \times 10^5}{P_{ei}} + \frac{1694}{i} \right)$	[18, 23, 25, 28-29]

表5 爆炸对建筑物的毁伤的PROBIT方程

Table 5 PROBIT equations of explosion damage on buildings

type of damage	PROBIT equations	references
minor damage (broken windows, displacement of doors and window frames, tile displacement, etc.)	$Y_5 = 5 - 0.26 \ln \left[ \left( \frac{4600}{P_s} \right)^{3.9} + \left( \frac{110}{i} \right)^5 \right]$	[18, 23, 25, 28]
major structural damage (cracks in walls, collapse of some walls)	$Y_6 = 5 - 0.26 \ln \left[ \left( \frac{17500}{P_s} \right)^{8.4} + \left( \frac{290}{i} \right)^{9.3} \right]$	[18, 23, 25, 28]
collapse (building partially or totally demolished)	$Y_7 = 5 - 0.22 \ln \left[ \left( \frac{40000}{P_s} \right)^{7.4} + \left( \frac{460}{i} \right)^{11.3} \right]$	[18, 23, 25, 28]

表6为依据表4中所列PROBIT方程预估本次实验爆炸对人的毁伤结果。结果表明,在距离爆心1 m处,对于环氧丙烷、聚甲氧基二丁基醚、聚甲氧基二甲醚、正丁醇和仲丁醇燃料,分别有84%、67%、66%、65%和65%的人口遭受鼓膜破裂的伤害。然而,表6中的数据显示,在距离爆心1 m之外,所有燃料均不会造成人员因头部、全身撞击和肺出血而死亡。值得注意的是,因头部和全身撞击而死亡这两种类型的损伤都是人体移动撞击刚性物体而发生的。

依据表5中所列PROBIT方程预估本次实验爆炸

对建筑物的毁伤结果见表7。表7结果表明,与对建筑物造成大的损伤(墙体裂缝和部分墙体塌陷)和倒塌相比,对建筑物造成较小的损伤(窗户破损、门窗框位移和瓷砖位移等)发生在更远的位置,即使在距离爆心6 m处,环氧丙烷能造成9%的建筑物遭受这种伤害,而其他4种新型燃料均能造成3%左右的建筑物遭受这种伤害。在距离爆心1 m处,正丁醇燃料对建筑物造成大的损伤百分数最大,达到74%,这说明正丁醇燃料对建筑物的毁伤效果最佳,进一步说明丁醇类燃料毁伤效果优于聚甲氧基醚类燃料。

$$Y = A + B \cdot \ln F = A + B \cdot \ln [f(P_s, i)] \quad (12)$$

式中,  $A$  和  $B$  为与伤害类型有关的常数;  $F$  是伤害程度的函数 ( $F$  可能是超压 ( $P_s$ ) 或者是超压和冲量的组合)。

表4和表5展示了几组由Fernando<sup>[25-26]</sup>提出的合适的PROBIT方程。对参考文献[22]的  $R$ - $Y$  数据进行拟合得到式(13),该式适用于受影响人口或建筑物的百分数为5%到95%时的  $R$  值。

$$R = -3.25 \cdot Y^3 + 48.76 \cdot Y^2 - 206.60 \cdot Y + 270.35 \quad (13)$$

表6 爆炸对人员在室外的毁伤后果

Table 6 Damage consequence analysis for outdoor humans

test sample	distance from the explosion's centre/m	main damage on humans ( <i>R</i> )
		eardrum rupture/%
BTPOM <sub>n</sub>	1	67
	2	54
	3	19
	4	7
	5	3
	6	0
DMM <sub>2</sub>	1	66
	2	61
	3	32
	4	14
	5	2
	6	2
1-butanol	1	65
	2	56
	3	21
	4	6
	5	3
	6	0
2-butyl alcohol	1	65
	2	51
	3	18
	4	5
	5	3
	6	0
PO	1	84
	2	69
	3	39
	4	19
	5	4
	6	2

表7 爆炸对建筑物的毁伤后果分析

Table 7 Damage consequence analysis to buildings

test sample	distance from the explosion's centre/m	main damage on buildings ( <i>R</i> )		
		minor damage /%	major structural damage/%	collapse /%
BTPOM <sub>n</sub>	1	27	63	0
	2	21	95	0
	3	14	0	0
	4	4	0	0
	5	2	0	0
	6	2	0	0
DMM <sub>2</sub>	1	41	17	0
	2	31	47	0
	3	20	0	0
	4	9	0	0
	5	3	0	0
	6	2	0	0
1-butanol	1	25	74	0
	2	16	0	0
	3	11	0	0
	4	3	0	0
	5	2	0	0
	6	4	0	0
2-butyl alcohol	1	29	55	0
	2	16	0	0
	3	13	0	0
	4	4	0	0
	5	2	0	0
	6	3	0	0
PO	1	63	3	22
	2	36	31	0
	3	37	27	0
	4	24	0	0
	5	12	0	0
	6	9	0	0

### 4 结论

为了探索新型燃料在云爆武器上的应用,以聚甲氧基二丁基醚、聚甲氧基二甲醚、正丁醇和仲丁醇为研究对象,以环氧丙烷为对照,得到如下结论:

(1)对高速图像分析得知,燃烧波未能在聚甲氧基二甲醚燃料云雾中稳定传播,发生淬灭,说明聚甲氧基二甲醚的临界起爆能+ - 高于聚甲氧基二丁基醚、正丁醇和仲丁醇。

(2)采用热剂量准则分析得到5种燃料热辐射损

伤半径大小关系为:环氧丙烷(18.9 m) > 仲丁醇(16.6 m) > 正丁醇(16.0 m) > 聚甲氧基二丁基醚(15.6 m) > 聚甲氧基二甲醚(12.0 m)。

(3)运用PROBIT方程评估燃料对人和建筑物的毁伤效果,总体来看,丁醇类燃料毁伤效果优于聚甲氧基醚类燃料,而环氧丙烷燃料毁伤效果优于4种新型燃料。

### 参考文献:

[1] 刘文杰,白春华,刘庆明,等.高挥发性液体传质速率机理和实验研究[J].兵工学报,2020,41(6):1123-1130.  
LIU Wen-jie, BAI Chun-hua, LIU Qing-ming, et al. Mecha-

- nism and experimental study of high volatile liquid mass transfer rate[J]. *Acta Armamentarii*, 2020, 41(6): 1123-1130.
- [2] 郭学永,解立峰,张陶,等.整体型云爆战斗部静爆实验研究[J].*弹道学报*,2006(4):68-71,75.  
GUO Xue-yong, XIE Lie-feng, ZHANG Tao, et al. Static experimental study on FAE warhead with unitary structure [J]. *Journal of Ballistics*, 2006(4): 68-71,75.
- [3] 李秀丽,惠君明,王伯良.云爆剂爆炸/冲击波参数研究[J].*含能材料*,2008(4):410-414.  
LI Xiu-li, HUI Jun-ming, WANG Bo-liang. Blast/shock wave parameters of single-event FAE[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2008(4): 410-414.
- [4] 贵大勇,刘吉平,冯顺山.几种典型燃料空气炸药威力性能研究[J].*含能材料*,2002(3):121-124.  
GUI Da-yong, LIU Ji-ping, FENG Shun-shan. Research of power performance of several typical fuel-air explosives [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2002(3):121-124.
- [5] Apparao A, Rao C R, Tewari S P. Studies on formation of unconfined detonable vapor cloud using explosive means [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, 254-255: 214-220.
- [6] 饶国宁,周莉,宋述忠,等.云爆药剂爆炸超压测试及威力评价[J].*爆炸与冲击*,2018,38(3):579-585.  
RAO Guo-ning, ZHOU Li, SONG Su-zhong, et al. Explosion overpressure measurement and power evaluation of FAE [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(3): 579-585.
- [7] 贾承志,张奇.云爆燃料分散过程窜火机理的数值模拟[J].*含能材料*,2020,28(3):248-254.  
JIA Cheng-zhi, ZHANG Qi. Numerical simulation on the mechanism of premature-combustion in the process of FAE fuel dispersion [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2020, 28(3): 248-254.
- [8] Bang B H, Ahn C S, Kim D Y, et al. Breakup process of cylindrical viscous liquid specimens after a strong explosion in the core[J]. *Physics of Fluids*, 2016, 28(9): 094105.
- [9] 陈婷婷.固液混合云爆燃料的稳定性研究[D].北京:北京理工大学,2015.  
CHEN Ting-ting. Study on stability of solid-liquid mixed state FAE fuel[D].Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.
- [10] 畅博,王世英.二次起爆型云爆战斗部爆炸抛撒过程及毁伤作用[J].*战术导弹技术*,2016(6):111-117.  
CHANG Bo, WANG Shi-ying. Explosive dispersion process and damage effect of double event fuel air explosion warhead [J]. *Tactical Missile Technology*, 2016(6):111-117.
- [11] 王旭东,熊春华,鲁长波,等.高原环境下柴油机燃用聚醚型含氧燃料热平衡试验研究[J].*兵工学报*,2018,39(8):1473-1478.  
WANG Xu-dong, XIONG Chun-hua, LU Chang-bo, et al. Heat balance experiment of polyether oxygenated fuel for diesel engine in plateau environment [J]. *Acta Armamentarii*, 2018, 39(8):1473-1478.
- [12] 肖潇,郑轶,王云芳,等.聚甲氧基二甲醚(PODE)与柴油的互溶性研究[J].*柴油机*,2015,37(3):24-28.  
XIAO Xiao, ZHENG Yi, WANG Yun-fang, et al. Research on compatibility of PODE and diesel Fuel [J]. *Diesel Engine*, 2015, 37(3):24-28.
- [13] 李临蓬,毛斌,郑尊清,等.汽油、正丁醇掺混柴油对部分预混压燃的燃烧和排放影响[J].*内燃机学报*,2020,38(4):289-297.  
LI Lin-peng, MAO Bin, ZHENG Zun-qing, et al. Effect of gasoline/diesel and n-butanol/diesel blends on combustion and emissions of PPCl [J]. *Transactions of CSICE*, 2020, 38(4): 289-297.
- [14] 李鹏磊.丁醇/柴油混合燃料燃烧及颗粒物排放特性研究[D].长春:吉林大学,2017.  
LI Peng-lei. Study of the combustion and particulate emissions properties of butanol/diesel blends[D].Changchun: Jilin University, 2017.
- [15] 阚金玲,刘家聪.一次引爆云爆剂的爆炸特性——后燃反应对爆炸威力的影响[J].*爆炸与冲击*,2006(5):404-409.  
KAN Jin-ling, LIU Jia-cong. The blast characteristic of SEFAE: Effect of after-burning on blast power[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2006 (5):404-409.
- [16] 刘庆明,白春华,李建平.多相燃料空气炸药爆炸压力场研究[J].*实验力学*,2008(4):360-370.  
LIU Qing-ming, BAI Chun-hua, LI Jian-ping. Study on blast field characteristics of multiphase fuel air explosive[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2008(4):360-370.
- [17] Chue R S, Clarke J F, Lee J H. Chapman-Jouguet deflagrations. *Proceedings of the Royal Society: Mathematical and Physical Sciences (1990-1995)*[J]. 1993, (441):1913.
- [18] 郭学永,李斌,解立峰.温压药剂的热毁伤研究[J].*火炸药学报*,2008(1):16-19.  
GUO Xue-yong, LI Bin, XIE Li-feng. Study on thermal damage of thermobaric explosive [J]. *Chinese Journal of Explosive & Propellants*, 2008(1):16-19.
- [19] Baker W E, Cox P, Kulesz J, et al. Explosion hazards and evaluation[M]. Elsevier, 2012.
- [20] 何志光.FAE爆炸火球热辐射效应研究[D].南京:南京理工大学,2004.  
HE Zhi-guang. Study on the thermal damage of explosive fire-ball in FAE [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2004.
- [21] 苑静,苗欣.蒸汽云爆炸模型在原油储罐火灾事故中的应用研究[J].*安全*,2011,32(5):9-11,14.  
YUAN Jing, MIAO Xin. Application of vapor cloud explosion model in fire accident of crude oil tank [J]. *Safety*, 2011, 32 (5):9-11,14.
- [22] Bosch C J H V D, Weterings R A P M. Methods for the calculation of physical effects-‘Yellow Book,’ CPR 14E[M]. 3. The Hague: Committee for the Prevention of Disasters, 1997: 29-46.
- [23] Lees F P. Preface to second edition[M].Mannan S. Lees’ Loss Prevention in the Process Industries (Fourth Edition). Oxford; Butterworth-Heinemann. 2012: xiii-xiv.
- [24] Finney D. Probit Analysis.3rd ed Cambridge Univ [J]. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 1971, 60(9):1432-1432.
- [25] TNO, Methods for the Determination of Possible Damage-The Green Book-CPR 16E[M]. CIP-data of the Royal Library, The Hague, The Netherlands, 1989.
- [26] Alonso F D, Ferradas E G, Perez J F S, et al. Consequence analysis to determine damage to buildings from vapour cloud explosions using characteristic curves[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 159(2-3):264-270.
- [27] Alonso F D, Ferradas E G, Sancheza T D J, et al. Consequence analysis to determine the damage to humans from vapour cloud explosions using characteristic curves[J]. *Journal*

of *Hazardous Materials*, 2008, 150(1):146-152.

[28] Contini S, Francocci G. Rassegna di modelli per la valutazione degli effetti delle esplosioni negli impianti industriali [J].

*ISEI/IE*, 1993, 2397:93.

[29] Prugh R W. The effects of explosive blast on structures and personnel [J]. *Process Safety Progress*, 1999, 18(1):5-16.

## Design of New Liquid Component of Fuel Air Explosive and Its Damage Power

SONG Xian-zhao<sup>1</sup>, JIANG Jun<sup>1</sup>, AN Gao-jun<sup>2</sup>, WANG Yong-xu<sup>3</sup>, CUI Sai-nan<sup>2</sup>, LI Bin<sup>1</sup>, XIE Lie-feng<sup>1</sup>

(1. Department of Safety Engineering, School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China; 2. Beijing Institute of New Energy Technology, Beijing 102300, China; 3. Ningbo Branch of Chinese Academy of Ordnance Science, Ningbo 315103, China)

**Abstract:** To explore the liquid components of high-potential Fuel air explosive (FAE) with better damage power, taking the traditional typical fuel (propylene oxide) as reference, polymethoxy dibutyl ether (BTPO<sub>m</sub>), polymethoxy dimethyl ether (DMM<sub>2</sub>), 1-butanol and 2-butyl alcohol were selected as research object. A pressure testing system, high-speed camera and infrared thermal image were used to record the experimental data. The cloud explosive characteristics of the 5 fuels with 18g RDX as central burster charge and 160g TNT as secondary explosive were studied. The results indicated that the critical initiation energy of the DMM<sub>2</sub> was higher than that of the other fuels. The relationship of the damage radius of thermal radiation among 5 fuels was as follows: propylene oxide (18.9 m) > 2-butyl alcohol (16.6 m) > 1-butanol (16.0 m) > DMM<sub>2</sub> (15.6 m) > BTPO<sub>m</sub> (12 m). The damage effects of 5 fuels on people and buildings were evaluated by the PROBIT equation, and the results showed that the damage effects of 1-butanol and 2-butyl alcohol were better than those of BTPO<sub>m</sub> and DMM<sub>2</sub>, and the propylene oxide had the best damage effect.

**Key words:** fuel air explosive (FAE); liquid fuel; damage assessment

**CLC number:** TJ55; O383

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2020223

(责编: 王艳秀)