

文章编号:1006-9941(2023)08-0763-10

高能液固混合燃料配方优化及毁伤分析

杨仲坤¹,夏洋峰²,安高军²,徐曦萌²,王永旭¹,张丹¹,解立峰¹,李斌¹

(1. 南京理工大学 化学与化工学院, 江苏 南京 210094; 2. 军事科学院 系统工程研究院, 北京 100071)

摘要: 为筛选优化高能燃料空气炸药(FAE)的配方组分,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,通过EXPLO5计算软件比较了不同配比FAE的爆炸压力和爆炸温度,并在无约束条件下进行了液体和液固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,并量化评估了各体系的热毁伤、超压毁伤的效果。结果表明,石油醚、环氧丙烷与硝酸异丙酯混合的混合液体FAE,在石油醚质量占比55%~70%条件下,爆轰性能上表现较优。液固混合FAE中液固比例为1:1条件下具有较良好的爆轰性能,并在无约束云雾分散实验中表现出最佳的云雾分散状态。两种体系的FAE配方在1 kg的二次起爆药量下云雾爆轰可以稳定反应,能达到爆轰状态,且在毁伤能力均具有较优效果。

关键词: 液固燃料;燃料空气炸药;EXPLO5;云雾爆轰;毁伤

中图分类号: TJ55;O381

文献标志码: A

DOI: 10.11943/CJEM2023054

0 引言

液体燃料分散到敞开环境中所形成的蒸汽云或气溶胶存在潜在的被引爆的危险,由此引发爆炸事故被称为蒸汽云爆炸,是石油化工行业燃料生产、加工、储存和运输过程中最严重的事故之一^[1-2]。在军事上,燃料空气炸药(fuel air explosive, FAE)的体积爆轰、作用范围大、时间长,使其毁伤效果具有独特优势^[3-4]。

目前关于FAE的研究主要以实验和数值仿真手段为主。刘庆明等^[5]在无约束条件下对液体燃料和铝粉的混合燃料云雾爆轰过程进行了研究,将超压分布分为云雾爆轰区与冲击波传播区。Held等^[6]提出了TNT当量的计算方法,张玉磊^[7]和张陶^[8]研究讨论了测试方法、装药质量和抛撒方式等对爆炸场威力的影响,包括云雾区内和云雾区外的峰值超压变化状态。王晔等^[9]对动态云雾的爆轰过程进行了测试,对超压场分布进行了研究。云雾分散方面的研究主要采用数

值仿真方法进行,丁珏等^[10]采用一维气相运动模型和二维多相流模型共同分析了液体燃料云雾分散的过程,得到了燃料质量和云雾半径等参数随时间的变化规律。田园等^[11]通过TVD(Total Variation Diminishing)和MacCormack方法模拟分析了云雾形态对爆轰压力场的影响,结果表明扁平形状云雾有利于达到最佳的毁伤效果。这些研究主要集中于FAE的爆炸场参数及燃料抛撒成雾状态的分析,针对FAE燃料组成的分析研究较少。

石油醚、乙醚和环氧丙烷等典型燃料具有较宽泛的爆炸极限和高毁伤能力,在云爆燃料中应用广泛^[12]。Liu等^[13]研究了环氧丙烷和空气混合物的爆炸范围和能量输出。Bai等^[14]对乙醚和环氧丙烷的爆炸下限进行了研究。FAE燃料成分过于单一可能是限制FAE爆轰威力的主要因素之一,若能筛选优化燃料组分配方,在一定程度上提升其毁伤威力,将会极大促进云爆武器的发展。

EXPLO5是一种计算含能材料爆轰参数的计算机程序,基于化学平衡、稳态爆轰模型^[15]。该程序使用Becker-Kistiakowsky-Wilson(BKW)状态方程,基于维里状态方程的排斥势表示气态爆轰产物的状态^[16]。EXPLO5是含能材料合成、配方优化和数学建模中重要的工具^[17-18]。White、Johnson和Dantzig^[19]应用自

收稿日期:2023-03-15;修回日期:2023-06-05

网络出版日期:2023-08-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11802136)

作者简介:杨仲坤(1997-),男,博士研究生,主要从事云雾爆轰方向研究。e-mail: yangzhongkun@njust.edu.cn

通信联系人:李斌(1984-),男,副研究员,主要从事新能源技术和多相爆轰方向研究。e-mail: libin@njust.edu.cn

引用本文: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 Zhong-kun, XIA Yang-feng, AN Gao-jun, et al. Formula Optimization and Damage Analysis of High Energy Liquid-solid Hybrid Fuel[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2023, 31(8):763-772.

由能最小化技术表达了爆轰产物的平衡状态,并运用自由能最小化方法在设定的环境温度和环境压力条件下计算平衡组成和热力性质,同时结合CJ(Chapman-Jouguet)爆轰理论计算爆炸压力和爆炸温度等。

为此,本研究利用EXPLO5参数软件,对石油醚、乙醚和环氧丙烷等典型液体燃料,液体敏化剂和金属铝粉复配而成的液体FAE以及液固FAE配方进行爆炸参数的计算,并通过外场无约束云雾爆轰实验,分析云雾分散和爆轰过程及爆轰参数,以评估毁伤效果,筛选较优的液体和液固FAE的配方组分。

1 高能FAE最优配方的计算模拟

1.1 计算模型的建立

为筛选FAE配方组分,研究采用EXPLO5软件进行数值计算。研究认为含能材料爆炸是一个不可逆的过程,在这一过程中含能材料转化为气态和固体的产物,故而选用模型为等容模型^[20]。定容条件下(等容)爆炸产物的热力学性质的计算基于如下假设:在含能材料的爆炸过程中不会对周围产生热损失(即绝热),在产物中建立了化学平衡状态。由于反应过程中所释放的能量大部分是使反应后的气体产物从环境温度升至爆炸温度,较少部分会传递给周围环境,且爆炸是瞬间完成,损失的能量极少,故假设含能材料的爆炸为绝热过程。

研究基于自由能最小化方法,应用White、Johnson和Dantzig三种方法计算了爆炸产物的平衡组成,建立了描述产物平衡状态的数学方程组。采用修正牛顿最速下降法^[16]求解方程组。气体产物的状态在软件中选用理想气体状态方程。爆炸产生的热量应用Hess定律计算^[19],并根据热力学第一定律计算等容爆炸温度,将等容条件下放出的热量用来增加产物的内能。采用维里状态方程^[16]计算爆炸产生的压力:

$$\frac{pV}{nRT} = 1 + \frac{nB(T)}{V} + \frac{n^2C(T)}{V^2} \quad (1)$$

式中, p 是压力,Pa; V 是气体混合物所占的体积, m^3 ; n 是气体的物质的量,mol; R 是摩尔气体常数, $J \cdot (mol \cdot K)^{-1}$; T 是温度,K; $B(T)$ 、 $C(T)$ 是气体混合物的第二和第三维里系数。其中,第二维里系数 $B(T)$ 与相互作用能直接相关:

$$B(T) = \frac{2\pi N_A}{3kT} \int_0^\infty r^3 \frac{d\varphi(r)}{dr} \exp\left(-\frac{\varphi(r)}{kT}\right) dr \quad (2)$$

式中, N_A 是阿佛加德罗常数; k 是波尔兹曼常数; T 是

温度,K; r 是分子间距。

1.2 计算模型方法

为比较不同配比条件下FAE的爆轰性能,选用典型云爆燃料作为原料进行计算。石油醚(PE)、环氧丙烷(PO)和乙醚(DEE)三种液体燃料作为主液体燃料组分,硝酸异丙酯(IPN)和硝基甲烷(NM)作为液体敏化剂,铝粉作为高能金属粉,其基本理化性质见表1。计算设定20L的球形密闭容器作为爆炸环境,根据所计算样品组分输入其理化性质和样品各组分质量,通过EXPLO5软件计算后输出得到爆炸压力与爆炸温度,具体计算参数如下:

(1)石油醚、环氧丙烷、乙醚两两复配比例为1:1的液体FAE的爆炸参数;

(2)石油醚、环氧丙烷、乙醚两两不同复配比例的液体FAE爆炸参数;

(3)分别添加硝酸异丙酯和硝基甲烷(质量占比10%)的液体FAE的爆炸参数;

(4)液固比例0~3的液固FAE的爆炸参数。

表1 实验原料的理化性质^[21]

Table 1 Physical and chemical properties of experimental materials^[21]

materials	density (20 °C) / g·cm ⁻³	boiling point / °C	flash point / °C	calorific value / MJ·kg ⁻¹	enthalpy of formation / kJ·mol ⁻¹
PE	0.65	60-90	-30	47	-
PO	0.83	34	-37.2	32.47	-122.6
DEE	0.71	34.5	-45	37.2	-271.2
IPN	1.04	101-102	11	17.6	-230.1
NM	1.14	100-102	35	11.6	-113.1
Al	2.70	-	-	30.22	-

1.3 计算结果与讨论

1.3.1 不同液体燃料组分配比的性能比较

研究通过EXPLO5软件对各液体燃料组分两两复配比例为1:1的液体FAE爆炸性能参数进行计算,得到了各组的爆炸压力和爆炸温度随燃料质量浓度(燃料质量与爆炸容器体积之比)的变化结果,如图1所示。从图1中可以看出,各混合燃料的爆炸压力和温度均随着质量浓度的增加呈现先增大后减小的趋势,大部分燃料在100~140 g·m⁻³质量浓度范围内存在峰值。PE和PO的混合燃料在110 g·m⁻³时爆炸温度达到最大,为2721.8 K,此时爆炸压力达到1.151 MPa。随着质量浓度的增加,爆炸压力缓慢上升,在150 g·m⁻³时达到峰值,为1.182 MPa,相较于爆炸温度下降至

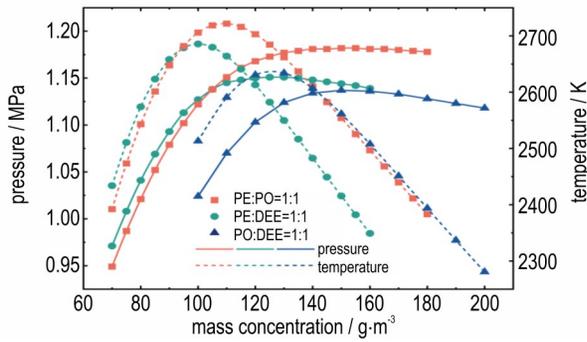


图1 比例1:1的不同燃料组分FAE的爆炸参数
Fig.1 Explosion parameters of FAE for different fuel components with ratio 1:1

2554.0 K,爆炸压力的提升并不明显。PE和DEE以及PO和DEE的混合燃料展现出同样的趋势,爆炸温度分别在 $100\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $130\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 达到峰值,各为2685.6 K和2634.0 K。爆炸压力分别在 $125\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $150\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 达到峰值,为1.151 MPa和1.137 MPa,此时爆炸温度同样下降较多。从图1曲线趋势可以看出,爆炸温度在达到峰值后将会出现突然下降,尽管此时爆炸压力未能达到最大值,但随着质量浓度的增加其升高缓慢,而爆炸温度损失较多,故需要结合爆炸压力和爆炸温度共同分析来评价燃料的性能。从爆炸压力和温度来看,各组混合燃料的大小关系为:PE+PO > PE+DEE > PO+DEE。说明较其他两种混合燃料而言,在复配比例1:1的条件下,PE和PO的液体混合燃料的爆炸性能具有较大优势。

研究通过EXPLO5软件对各液体燃料组分两两复配不同比例的液体FAE爆炸性能参数进行了计算,得到了各组的爆炸压力和爆炸温度随各组分所占质量比的变化结果,如图2所示。从图2a可以看出,随着PE的质量比例增加,爆炸压力和温度均不断升高,在PE质量占比为55%时,爆炸温度达到最大值2723.3 K,爆炸压力此时为1.156 MPa。后续随着PE占比的继续增加,爆炸温度出现下降,而爆炸压力一直缓慢升高。图2b表明,PE和DEE的混合燃料中,PE质量占比的增加也会在一定程度上对爆炸压力产生积极影响。然而随着PE的增加到32%,爆炸温度达到2583.2 K峰值后开始下降,在PE和DEE的混合燃料中更多的影响爆炸温度方面,此时爆炸压力只有1.137 MPa。图2c为PO和DEE的混合燃料的爆炸参数,PO的质量比例的增加极大提升了燃料的爆炸温度,但整体温度最高只有2665.0 K。混合燃料的爆炸压力也随着PO质量占比的增加呈现出先增大后减小的趋势,但压力

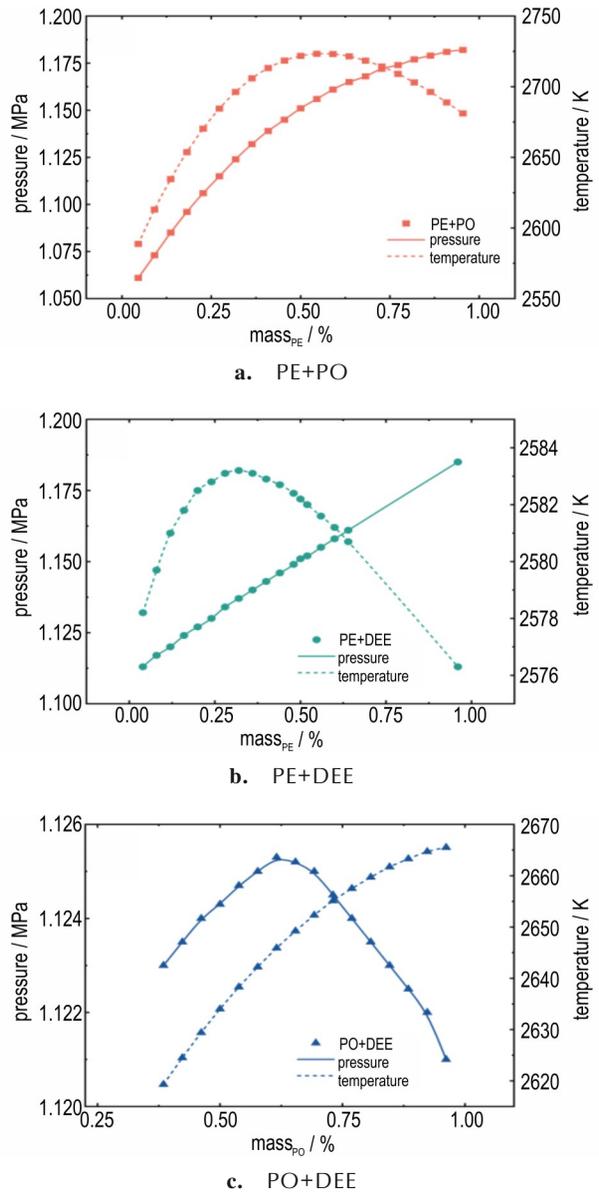


图2 不同复配比例的不同燃料组分FAE的爆炸参数
Fig.2 Explosion parameters of FAE for different fuel components with different compounding ratios

只在1.120~1.125 MPa间变化,且压力较小。从三种液体混合燃料中各组分占比的影响看,PE在一定程度上能增加体系的爆炸压力,而PO也能在爆炸温度方面产生积极作用。PE和DEE以及PO和DEE的混合燃料在改变不同复配比例情况下,爆炸压力和爆炸温度均未能超过PE与PO混合的燃料,且在PE的质量占比为55%~70%范围内,燃料的爆炸温度和压力均能达到较高数值。故将PE与PO混合燃料作为FAE主液体燃料,且PE的质量占比为55%作为后续FAE配方设计研究的基础。

1.3.2 添加液体敏化剂的性能比较

液体敏化剂的添加能明显提高FAE起爆时的感度,并且降低起爆能,增大其爆轰极限范围,在一定程度上提高其爆轰威力。以上述小节计算所得FAE最优主液体燃料配方为基础,即PE与PO且PE质量占比55%的主液体燃料,对添加敏化剂成分(占液体组分总质量10%)后的燃料配方进行爆炸性能的计算。所得计算结果见表2。

表2 添加不同敏化剂的FAE的爆炸参数

Table 2 Explosion parameters of FAE with different sensitizers

liquid fuel	sensitizer	explosion pressure / MPa	explosion temperature / K
	-	1.182	2723.3
PE+PO	IPN	1.145	2724.3
	NM	1.142	2723.1

经过计算,添加硝酸异丙酯和硝基甲烷的液体FAE配方的爆炸压力相较于未添加液体敏化剂的略微减小,但减小幅度不明显,爆炸温度几乎无变化。根据表2的计算结果,二者均可作为液体敏化剂的备选组分,其较大的密度与沸点也可增大抛撒后云雾的浓度,削弱高温环境对FAE性能的影响,增强可适性。但相较于硝基甲烷7.3~63.0%的爆炸极限值,硝酸异丙酯的爆炸极限达到了2%~100%,闪点也较低,只有11℃,这在FAE实际应用中极大地扩展了爆轰极限的范围,在相同起爆能量条件下,可以更容易达到有效和稳定的爆轰状态。因此,研究选择硝酸异丙酯作为FAE配方中最佳液体敏化剂,最佳液体FAE配方为PE、PO和IPN的混合液体,质量占比分别为49.5%、40.5%和10%。

1.3.3 不同液固比例的性能比较

液体FAE中添加高能金属粉可以有效地提高液体燃料的爆炸性能^[22],据此液体FAE配方中加入金属铝粉作为液固燃料中的高能金属粉,以研究金属铝粉对液固燃料性能的影响。相同条件下,通过EXPLO5软件对液体FAE与铝粉复配不同比例的液固FAE爆炸参数进行计算,得到了爆炸压力和爆炸温度随液固比例变化的结果,如图3所示。从图3中可以看出,在一定范围内液固燃料的爆炸压力随着金属铝粉含量占比的增大而升高,随后降低。在液固比例为1:1的条件下,其爆炸压力能达到峰值,为1.506 MPa,爆炸温度为3173.0 K。然而,体系中的爆炸温度始终与金属铝粉含量的占比成正比,金属铝粉的添加极大地提高了体

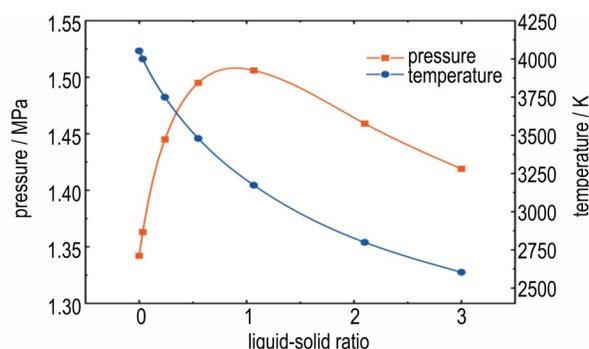


图3 液固FAE的爆炸参数-液固比例变化曲线

Fig.3 Curves of explosion parameters vs. liquid-solid ratio of liquid-solid FAE

系的爆炸温度,最高温度超过4000 K。在FAE中加入适当比例的铝粉,可为液体燃料和空气的反应过程提供额外的能量。尤其在爆炸温度方面,铝粉在液体燃料与氧气反应过程中被点燃,在加热条件下参与反应,铝与氧参与的反应会产生大量的热。根据C-J理论,通常情况下,反应体系的爆热越大,爆炸的压力就越大。然而,过量铝粉会对体系的爆炸压力产生负面影响。根据Cook^[23]的二次反应理论,可能的原因是铝粉的反应温度较高,在反应过程中会在表面生成氧化膜,使金属铝粉无法完全参与整个反应。同时含铝炸药的惰性热稀释理论认为,铝粉本身良好的导热性也使其能消耗和吸收反应过程中产生的热量,从而削弱反应体系中产生的爆炸压力^[24]。

除考虑FAE的爆炸参数外,实际应用过程中特殊的二次起爆方式下,FAE燃料的云雾分散过程也会极大影响爆轰威力。由于FAE属于体积爆轰,爆轰波在云雾区内的压力衰减较云雾区外要慢的多,故产生的云雾区范围越大,FAE的毁伤和破坏的能力越大。为了获得液固燃料的最佳云雾分散效果,在1 L的装药条件下共进行了4组云雾分散实验,包括3组典型液固比例的液固燃料和1组纯液体燃料。云雾直径随时间的变化关系如图4所示。从图4中可以看出,各组燃料的云雾直径均在5 ms前迅速扩大,之后增速减缓。这是因为,一开始中心分散药爆炸所产生的爆炸作用力大于空气阻力,燃料被快速向前推动。但随着爆炸产物的增多和膨胀,爆炸作用力逐渐减小,云雾的运动逐渐减慢。随着时间不断增加,各组云雾直径的差异变得越来越明显。相较于纯液体组分,5 ms后液固比例在1:1条件下的燃料云雾直径更大,相反,液固比例为2:1和1:2的燃料云雾直径反而低于纯液体燃料。最终云雾直径的大小关系为:液固比1:1>纯液

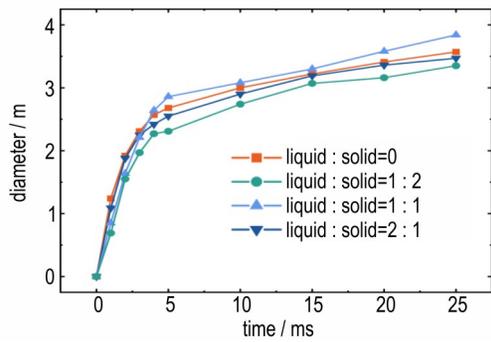


图4 不同液固比的云雾直径-时间变化曲线
Fig. 4 Curves of diameters vs. time of clouds with different liquid-solid ratios

体>液固比2:1>液固比1:2。根据不同液固比例的爆炸性能和云雾分散的综合对比分析,液固比为1:1条件下的液固FAE具有最佳的效果和优势,这在大当量的实验和应用中将表现的更加显著。故选择1:1作为液固FAE配方中的最佳液固比例,最佳液固FAE配方为PE、PO、IPN和铝粉的混合液固燃料,质量占比分别为24.75%、20.25%、5%和50%。

2 燃料云雾分散及爆轰实验

2.1 实验原料与仪器

实验原料选用由数值计算得到的最佳组分,液体组分为PE、PO和IPN,固体组分为铝粉。液体原料为AR级,均由南京中东化玻仪器有限公司提供。金属铝粉规格为FLQ56,由鞍钢实业微细铝粉有限公司提供。

实验仪器由压力采集仪(Elsys, 1 MHz)、压力传感器(PCB113B, 0~3.45 MPa)、高速摄像机(Fastcam Mini UX100, 1000 fps)、航拍无人机(大疆悟Inspire2, 25 fps)和红外热成像仪(Fotric A615, 25 fps)组成,共同采集和记录整个实验过程的相关参数。

2.2 实验样品

根据数值计算结果,对液体和液固2种体系FAE配方的样品弹进行云雾爆轰实验。其中液体FAE由PE、PO和IPN组成(质量占比49.5%、40.5%和10%),装填密度 $0.8 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,装填质量8 kg;液固FAE由PE、PO、IPN和铝粉组成(质量占比24.75%、20.25%、5%和50%),装填密度 $1.1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,装填质量11 kg。

2.3 实验方法

实验选用体积为10 L的圆柱形壳体作为弹体,结构示意图如图5所示。壳体与中心装药管高度分别为350 mm和250 mm,其均由聚氯乙烯(PVC)材料制成,壳体外径和壁厚分别为200 mm和4 mm,中心装

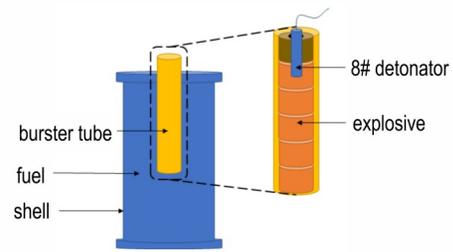


图5 实验弹体的结构示意图
Fig.5 Schematic diagram of experimental projectile

药管外径和壁厚分别为25 mm和2 mm。中心装药管内装填96 g钝化RDX炸药,由8#电雷管起爆。

图6为云爆实验布置示意图。实验弹体直接置于弹架上,二次起爆药为1 kg TNT,弹体中心与二次起爆药均距地面距离1.5 m,二者水平距离为2 m。压力采集系统记录实验的超压场参数,红外热成像仪记录实验的温度场参数,高速摄像机和航拍无人机分别记录水平与垂直方向实验过程图像。其中,压力采集系统采用地面超压传感器对爆炸场冲击波参数进行测定,为保证对云雾区内与云雾区外的冲击波参数的有效测量,选择起爆水平方向共8个测试点,分别距弹体中心到地面的投影距离为1,2,3,4,6,8,10 m和12 m,分别距二次起爆位置的投影距离为3,4,5,6,8,10,12 m和14 m。

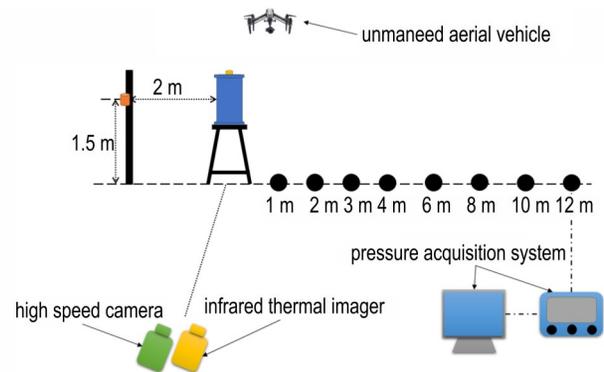


图6 实验布置示意图
Fig.6 Schematic diagram of experimental setup

2.4 实验结果与讨论

2.4.1 FAE 云雾爆轰过程

为量化评估液体和液固FAE配方在实际爆轰过程中的毁伤威力,在外场无约束条件对两体系配方进行云雾爆轰实验。研究通过高速摄像机和无人机记录了液体FAE配方和液固FAE配方的云雾分散和爆轰过程,如图7所示。从图7水平和俯视图的图像中可以看出,燃料在中心分散药爆炸的驱动作用下均未发生窜火现象,形成圆饼状的燃料云雾。燃料云雾直径在80 ms后不再显著增长,液体FAE和液固FAE的云雾

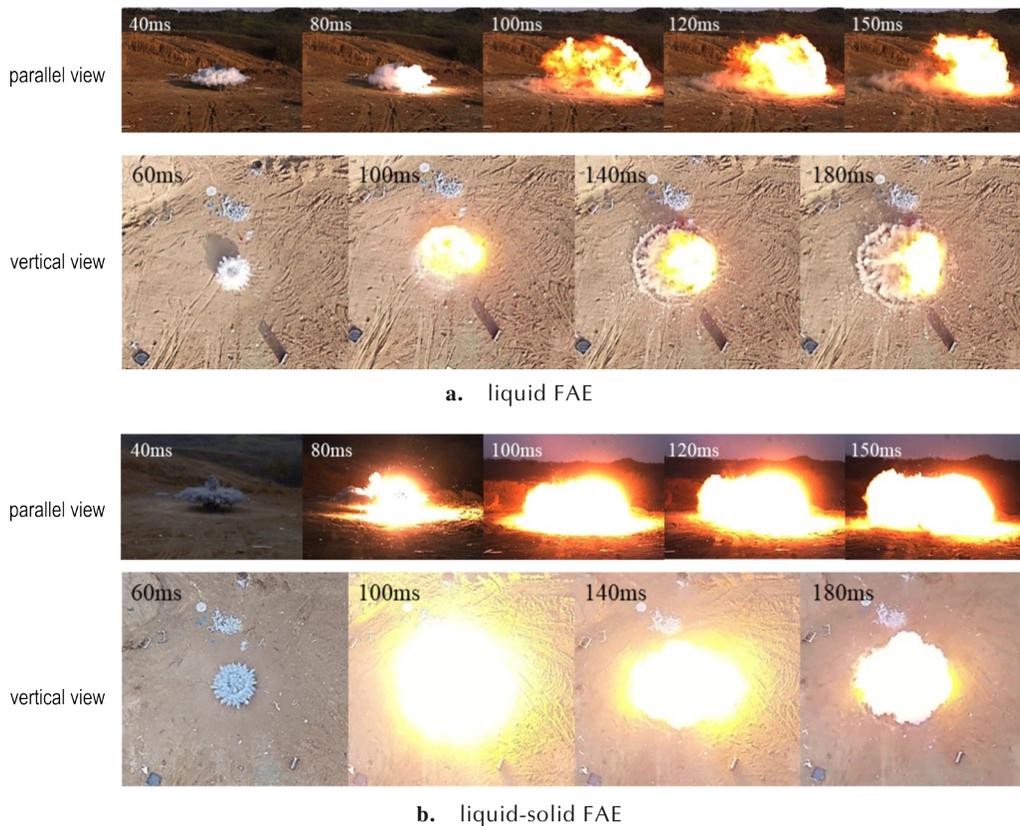


图7 云雾分散和爆轰过程图

Fig.7 Diagram of cloud dispersion and detonation process

直径分别达到7.14 m和8.56 m,云雾厚度也贴近地面位置,云雾状态完整。该时刻云雾为燃料的最佳分散效果,在此条件下进行二次起爆会得到最佳的云雾爆轰效果。无人机由于拍摄帧率的限制,并没有拍摄到俯视角度的二次起爆瞬间以及火焰从起爆位置向未引爆云团传播过程的图像。高速摄像中,二次起爆药爆炸后的图像展示了火焰在云雾中传播的过程,药柱爆炸后引燃周围的燃料云雾并迅速向外传播,进而引爆整个云雾,形成较大火球。

通过对两种体系的FAE配方爆炸形成的火球分析,可以得到火球半径、高度和体积等参数随时间的变化,结果如图8所示。从图8中可以看出,液体FAE云雾爆轰所产生的火球体积较早达到峰值,在100~120 ms时火球的直径和高度达到最大值,火球体积在110 ms时达到峰值,为1073.49 m³。液固FAE云雾爆轰产生的火球体积的峰值比液体FAE出现的较晚,且火球直径和高度在120 ms后仍在增大,火球在150 ms时直径、高度和体积均达到峰值,分别达到16.01 m、7.47 m和2004.06 m³。液固FAE的火球比液体FAE的体积大,持续时间也较长,在热毁伤效应方面具有一

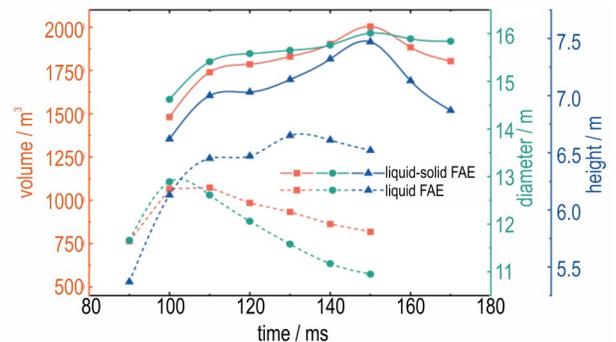


图8 火球参数-时间变化曲线

Fig.8 Curves of fireball parameters vs. time of FAE

定的优势。铝粉的参与产生了大量的热,因为铝粉是在加热条件下被点燃的,故能持续一定的时间,火球体积也就较大,但铝粉在后续反应过程中并不是爆轰反应,只是爆燃或燃烧反应。从图8中还可以看出两种体系FAE在起爆后并未出现燃料未被引燃的现象,说明该起爆条件下,云雾内的反应稳定。

2.4.2 热毁伤分析

通过红外热成像仪,可得到两种体系FAE爆炸火球表面温度随时间的变化关系曲线,如图9所示。通过对图9曲线的分析,液体FAE的最高火球表面温度

为 1789.9 °C, 高温持续时间(超过 1000 °C)^[21] 达到 370 ms, 而液固 FAE 由于铝粉参与反应, 最高火球温度和高温持续时间分别达到 2024.0 °C 和 410 ms。铝粉对于 FAE 爆炸温度方面的提高与数值计算中所得结果保持一致, 两种体系 FAE 最高火球温度的红外热像图如图 10 所示。液体 FAE 因均由纯液体燃料组成, 在热值方面较低, 故火球的表面温度较小, 高温的持续时间也较短。而铝粉较高的熔点和表面形成的氧化膜使其在爆轰过程中的反应变慢, 能量不能迅速释放, 使得高温持续时间变长。这与上述云雾爆轰所产生火球的具体参数分析结果保持一致。

FAE 的毁伤相较于常规凝聚相炸药, 由于更大的

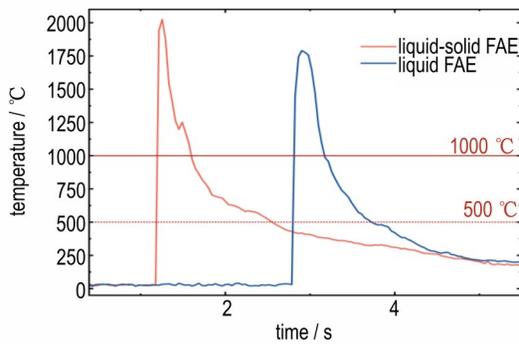


图 9 火球表面温度-时间变化曲线
Fig.9 Curves of surface temperature vs. time of fireball

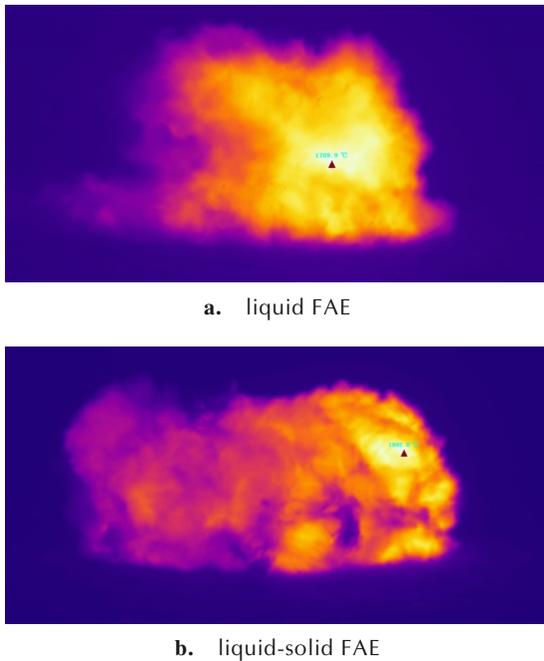


图 10 最高火球温度的红外热像图
Fig.10 Infrared thermogram of fireball with the highest temperature

作用范围和更长的作用时间, 其热辐射毁伤在评估毁伤作用方面具有显著意义。Q 准则(热剂量准则)以热剂量作为唯一衡量指标, 适用于作用目标的时间非常短的范围, 最符合 FAE 爆轰的实际状态^[25]。利用 Baker 提出的热辐射能计算模型对两种体系 FAE 的热效应进行分析, 该计算模型如式(3)所示^[26]:

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

式中, Q 为单位面积所收到的热辐射能, $J \cdot m^{-2}$; BG 为常数, 取 2.04×10^4 ; M 为燃料质量, kg ; θ 为火球温度, K ; D 为火球直径, m ; R 为距爆心的距离, m ; F 为常数, 取 161.7。依据式(3)可计算得到 2 种体系 FAE 爆轰产生的热剂量随距离的变化曲线, 如图 11 所示。另外, 热剂量伤害准则一般采用表 3 所示。结合图 11 和表 3 可以得出, 液体 FAE 和液固 FAE 的人员致死半径分别达到 3.23 m 和 4.42 m, 液固 FAE 较液体 FAE 提升了 36.84%; 而且, 其在火球最高温度以及高温持续时间方面分别提升了 13.08% 和 35.42%。以人员伤害效应在皮肤疼痛及以下作为非有效毁伤距离, 即火球热辐射能低于 $65 \text{ kJ} \cdot m^{-2}$, 该范围内环境被视为 FAE 的有效热毁伤区域, 经过计算评估, 液体和液固两种体系 FAE 热毁伤半径分别达到了 10.17 m 和 13.82 m, 液固 FAE 较液体 FAE 提升了 35.89%。液固体系 FAE 云雾爆轰过程中由于铝粉参与反应, 在热毁伤方面具有更优表现。

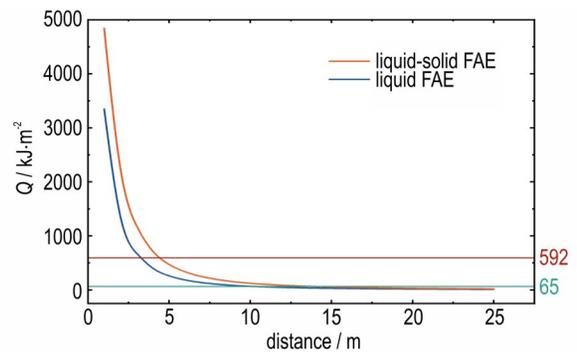


图 11 热剂量-距离变化曲线
Fig.11 Curves of thermal dose vs. distance of fireball

表 3 热剂量伤害准则^[25]

Table 3 Thermal dose injury guidelines^[25]

$Q / \text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$	injury effect	$Q / \text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$	injury effect
1030	ignition of wood	250	second-degree burn
592	death	172	slight wound
392	serious injury	125	first-degree burn
375	third-degree burn	65	skin pain

Note: Q is the thermal radiant energy received per unit area.

2.4.3 超压毁伤分析

为分析两种体系 FAE 配方云雾爆轰所产生的冲击波效应,通过数据采集系统记录了各测点位置的超压,液体 FAE 和液固 FAE 各测试点冲击波峰值超压变化如图 12 所示。从图 12 可以看出,随着测试距离的增加,冲击波峰值压力逐渐降低,这符合冲击波压力衰减的实际情况。从图 12 中还可以看出,云雾区内存在一定的峰值超压的波动,主要是受到云雾区内云雾分散不均匀的影响,在某些测试点出现了些许波动,但不会对整体趋势造成影响。液体 FAE 最大峰值压力为 4467.3 kPa,液固 FAE 前两个测试点的峰值压力由于爆炸时产生的高温和压力传感器的测试量程的影响,超出 5470.1 kPa,然而 3 m 和 4 m 位置处的峰值超压仍然超过 3000 kPa。FAE 中金属铝粉的添加对爆炸压力的提高与数值计算所得结果具有一致性。然而前四个测试点峰值超压显著高于后四个测试位置的峰值超压。根据云雾分散过程的高速图像,可知 FAE 形成的云雾直径在 8 m 左右,故前四个测试点处在燃料覆盖的区域内,即云雾区。液体 FAE 云雾区平均峰值压力达到 3431.8 kPa,然而液固 FAE 的平均峰值压力超过 4393.8 kPa。对于 FAE 的起爆方式,二次药柱起爆后,爆轰形成的爆轰波在云雾内传播,故峰值压力较大且衰减较缓慢,传播到云雾边缘位置后,爆轰波快速衰减并转变成冲击波,在非云雾区范围内峰值压力的衰减趋势就较为明显。对于 FAE,形成的爆轰波在云雾内传播,其分布不服从爆炸相似律,当其衰减转变为冲击波,此时的衰减将符合爆炸相似律。为了定量揭示两种体系 FAE 冲击波峰值超压的衰减趋势,依据爆炸相似律,利用最小二乘法对云雾区外冲击波峰值超压曲线进行拟合,且不会受到燃料分布不均匀的影响,可以得到两种体系 FAE 的峰值超压随距爆心距离的变化规律。

$$\Delta p_L = 820 \left(\frac{\sqrt[3]{w}}{R} \right) - 6130 \left(\frac{\sqrt[3]{w}}{R} \right)^2 + 27964 \left(\frac{\sqrt[3]{w}}{R} \right)^3 \quad (4)$$

$$\Delta p_{LS} = 4141 \left(\frac{\sqrt[3]{w}}{R} \right) - 27952 \left(\frac{\sqrt[3]{w}}{R} \right)^2 + 55308 \left(\frac{\sqrt[3]{w}}{R} \right)^3 \quad (5)$$

式中, Δp_L 和 Δp_{LS} 分别为液体和液固 FAE 的冲击波超压, kPa; w 为燃料质量, kg; R 为距爆心投影的距离, m。式(4)和(5)的拟合曲线的相关性(R^2)分别为 0.999 和 0.998,良好的相关性证明在云雾区外,FAE 的冲击波压力衰减服从爆炸相似律。该拟合曲线的数学模型可在一定条件下预估非测量点或远距离的峰值

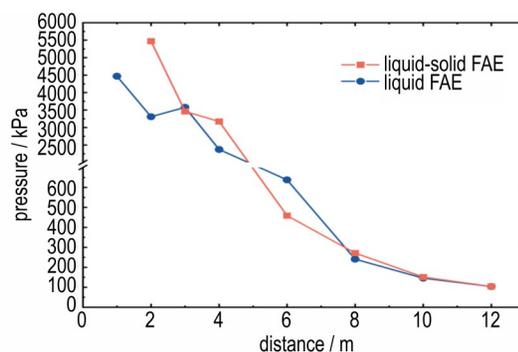


图 12 峰值超压-距离变化曲线

Fig.12 Curves of peak overpressure vs. distance of FAE

超压,从而预评估毁伤效应。

利用压力传感器测试点间已知距离与冲击波到达各压力测试点的时间差,即可计算得到冲击波的传播速度。以两测试点间距离的中点作为该距离范围内冲击波平均传播速度位置,两种体系 FAE 的冲击波传播速度随距爆心距离的变化曲线如图 13 所示。云雾区内冲击波传播速度仍然存在一定的波动,这与峰值超压出现情况一致。冲击波传播速度在整体上保持衰减趋势,随着距离的增加,传播速度逐渐降低。跟据 CJ 爆轰理论值 ($p_{CJ} \approx 2 \text{ MPa}$, $V_{CJ} \approx 1900 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)^[27] 和 Lee 等^[28] 给出的燃烧波不同状态的区分依据:

DDT 和 CJ 爆轰:火焰传播速度接近理论 CJ 爆轰速度;

近似爆轰:火焰传播速度介于介质音速和 CJ 爆轰速度之间;

阻塞火焰:火焰传播速度近似介质音速 (600~1000 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$);

火焰淬熄:火焰无法传播。

云雾区内大部分点的速度均接近理论 CJ 爆轰值,且各测量点峰值超压接近 CJ 值的两倍,说明云雾区内实现了爆轰或近似爆轰状态。这一状态在冲击波传播至云雾边缘处迅速转变,冲击波传播速度的降低使其

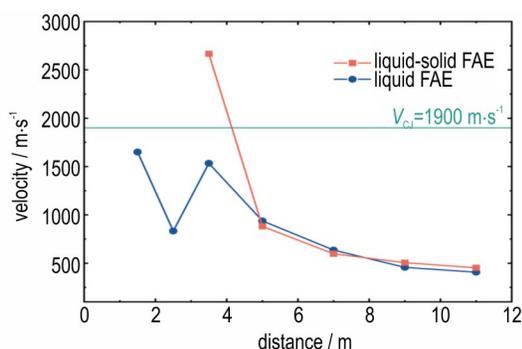


图 13 冲击波传播速度-距离变化曲线

Fig.13 Curves of average velocity vs. distance of FAE

衰减为阻塞火焰状态,液体FAE和液固FAE分别衰减了38.9%和66.9%,这与峰值超压变化展示的趋势相同,云雾边界外将迅速衰减。而且,液固FAE的冲击波传播速度整体上更小,且相较于液体FAE(7 m后),在距离5~7 m间就下降到 $600 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下,衰减为火焰淬熄状态。这说明液固FAE较难达到爆轰状态且更难维持冲击波的传播,这与铝粉的惰性稀释理论一致,铝粉在CJ面之前并不参加化学反应,即使参加了反应,也只是在爆轰产物的膨胀过程中,且铝粉并未完全反应。此外,在冲击波传播过程中,铝粉能吸收波阵面的能量,更大程度降低冲击波压力和传播速度,也就较液体FAE衰减得更早也更难维持。但与数值计算结果相同的是,FAE中铝粉的添加能明显提升云雾区内爆轰压力,液固FAE云雾区内平均峰值压力较液体FAE增加超过了28.03%,在超压毁伤方面,液固FAE仍然具有毁伤优势。同样条件下,提高液固FAE的二次起爆能量将是一种有效的方法。

3 结论

开展了云爆剂典型燃料(石油醚、环氧丙烷、乙醚)、液体敏化剂(硝酸异丙酯、硝基甲烷)和金属铝粉复配的液体FAE和液固FAE配方优化,并分析研究了其在无约束条件下云雾分散和爆轰过程,得到以下结论:

(1)石油醚与环氧丙烷混合而成的液体FAE在爆炸性能上优于其他混合燃料,石油醚质量占比在55%~70%内具有较优效果。

(2)从爆炸性能、装药和实际应用等多方面评估,选择硝酸异丙酯作为最佳敏化剂,液固FAE配方中液固比例为1:1。且液固比为1:1时,液固燃料抛撒形成的云雾具有最大直径。

(3)10 kg级新型液体FAE的爆炸火球体积达到 1073.49 m^3 ,热毁伤半径达到10.17 m,云雾区内最大爆炸压力达到4467.3 kPa;10 kg级新型液固FAE的爆炸火球体积和热毁伤半径分别为 2004.06 m^3 和13.82 m,其云雾区内最大爆炸压力超过5470.1 kPa。

(4)从无约束实验总体来看,优化后的液体FAE和液固FAE配方的云雾爆轰过程可以稳定反应,能达到爆轰状态,在毁伤能力上均具有较优效果;同时对两种体系FAE配方的热毁伤和超压毁伤进行了定量评估,液固FAE在热毁伤、超压毁伤等方面优于液体FAE。

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. Mechanism and experimental study of high volatile liquid mass transfer rate[J]. *Acta Armamentarii*, 2020, 41(6): 1123-1130.
- [2] ZHANG B, PANG L, SHEN X, et al. Measurement and prediction of detonation cell size in binary fuel blends of methane/hydrogen mixtures[J]. *Fuel*, 2016, 172: 196-199.
- [3] 白春华,梁慧敏,李建平,等.云雾爆轰[M].北京:科学出版社,2012.
BAI Chun-hua, LIANG Hui-min, LI Jian-ping, et al. Cloud detonation[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [4] 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.
- [5] 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(04):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(04): 360-370.
- [6] HELD M. TNT—equivalent[J]. *Propellants, explosives, pyrotechnics*, 1983, 8(5): 158-167.
- [7] 张玉磊,苏健军,姬建荣,等.超压测试方法对炸药TNT当量计算结果的影响[J].火炸药学报,2014,37(3):16-19.
ZHANG Yu-lei, SU Jian-jun, JI Jian-rong, et al. Effect of overpressure test method on calculated results of TNT equivalence [J]. *Chinese Journal of Explosive & Propellants*, 2014, 37(3): 16-19.
- [8] 张陶,於津,惠君明.爆炸抛撒方式对FAE云雾爆轰特性及威力影响的实验研究[J].弹箭与制导学报,2010,30(1):137-140.
ZHANG Tao, YU Jin, HUI Jun-ming. Experimental study of explosive dispersion form of the influence on FAE of cloud explosion on characteristic and power [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2010, 30(1): 137-140.
- [9] 王晔,白春华,李建平.动态云雾形成及爆轰场特性[J].含能材料,2017,25(6):466-471.
WANG Ye, BAI Chun-hua, LI Jian-ping. Formation and blasting field characteristics of moving cloud detonation [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2017, 25(6): 466-471.
- [10] 丁珏,刘家骢.液体燃料云团形成过程的数值仿真[J].兵工学报,2001(04):481-484.
DING Jue, LIU Jia-cong. Numerical simulation for the formation of liquid fuel air cloud [J]. *Acta Armamentarii*, 2001(04): 481-484.
- [11] 田园,王仲琦,林海燕.云雾形态对爆轰压力场影响的数值模拟研究[J].安全与环境学报,2013,13(4):182-187.
TIAN Yuan, WANG Zhong-qi, LIN Hai-yan. ERP study on the human error in delayed matching-to-sample task paradigm [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2013, 13(4): 182-187.
- [12] WEI H, GUO Y, YANG F. Densities and viscosities of exo-tetrahydrodicyclopentadiene plus n-butanol and exo-tetrahydrodicyclopentadiene plus n-pentanol at temperatures of (293.15 to 313.15) K [J]. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 2010, 55(2): 1049-1052.

- [13] LIU L, ZHANG Q. Flame range and energy output in two-phase propylene oxide/air mixtures beyond the original premixed zone[J]. *Energy*, 2019, 171: 666–677.
- [14] BAI C, LIU N, ZHANG B. Experimental investigation on the lower flammability limits of diethyl ether/n-pentane/epoxypropane-air mixtures [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2019, 57: 273–279.
- [15] SUČESKA M. Calculation of detonation parameters by EXPLO5 computer program[C]//1st International Symposium on Explosion, Shock Wave and Hypervelocity Phenomena. ESHP, 2004: 325–330.
- [16] KESHAVARZ M H, KLAPOTKE T M, SUČESKA M. Energetic Materials Designing Bench (EMDB), Version 1.0[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2017, 42(8): 854–856.
- [17] STIMAC B, SKRLEC V, DOBRILOVIC M, et al. Numerical modelling of non-ideal detonation in ANFO explosives applying Wood-Kirkwood theory coupled with EXPLO5 thermochemical code[J]. *Defence Technology*, 2021, 17(5): 1740–1752.
- [18] KLAPOTKE T M, SUČESKA M. A computational study on the detonation velocity of mixtures of solid explosives with non-explosive liquids [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2021, 46(3): 352–354.
- [19] WHITE W B, JOHNSON S M, DANTZIG G B. Chemical Equilibrium in Complex Mixtures[J]. *The Journal of Chemical Physics*, 1958, 28(5): 751–755.
- [20] 张培理, 宋哲, 张德洋, 等. 汽油蒸气与异辛烷定容爆炸压力的当量比等效[J]. *当代化工*, 2020, 49(6): 1013–1016.
ZHANG Pei-li, SONG Zhe, ZHANG De-yang, et al. Equivalent ratio equivalence for the explosion pressure of gasoline-air and isooctane-air mixture [J]. *Contemporary Chemical Industry*, 2020, 49(6): 1013–1016.
- [21] SONG X Z, ZHANG J, ZHANG D, et al. Dispersion and explosion characteristics of unconfined detonable aerosol and its consequence analysis to humans and buildings [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021, 152: 66–82.
- [22] 徐敏潇. 新型高能合金在燃料空气炸药中的应用研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.
XU Min-xiao. Research on the fuel-air-explosives containing high energetic alloys[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2017.
- [23] COOK M A, FILLER A S, KEYES R T, et al. Aluminized explosives [J]. *The Journal of Physical Chemistry*, 1957, 61(2): 189–196.
- [24] 黄亚峰, 赵省向, 李文祥, 等. 纳米铝粉在炸药中的应用概述 [J]. *山西化工*, 2011, 31(3): 28–31.
HUANG Ya-feng, ZHAO Sheng-xiang, LI Wen-xiang, et al. Review on the application of nano-aluminum powder in explosive[J]. *Shanxi Chemical Industry*, 2011, 31(3): 28–31.
- [25] 仲倩. 燃料空气炸药爆炸参数测量及毁伤效应评估[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
ZHONG Qian. Research on measurement of explosion parameters and evaluation damage effect of Fuel Air Explosive [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012.
- [26] BAKER W E, COX P, KULESZ J, et al. Explosion hazards and evaluation[M]. Elsevier, 2012.
- [27] CHUE R S, CLARKE J F, LEE J H. Chapman-Jouguet deflagrations [J]. *Proceedings of the Royal Society: Mathematical and Physical Sciences (1990-1995)*, 1993, (441): 1913.
- [28] LEE J H, KNYSTAUTAS R, CHAN C K. Turbulent flame propagation in obstacle-filled tubes [J]. *Symposium (International) on Combustion*, 1985, 20(1): 1663–1672.

Formula Optimization and Damage Analysis of High Energy Liquid-solid Hybrid Fuel

YANG Zhong-kun¹, XIA Yang-feng², AN Gao-jun², XU Xi-meng², WANG Yong-xu¹, Zhang Dan¹, XIE Li-feng¹, LI Bin¹

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Institute of Systems Engineering, Academy of Military Science, Beijing 100071, China)

Abstract: To select and optimize the formulation components of high-energy Fuel Air Explosive (FAE), petroleum ether, propylene oxide, and ethyl ether (liquid fuel), isopropyl nitrate and nitromethane (liquid sensitizer), and metallic aluminum powder (solid component) were used as the research objects. The explosion pressure and explosion temperature of FAE with different composition ratios was investigated by EXPLO5 calculations. The cloud burst experiments of liquid and liquid-solid FAE formulations were also conducted under unconstrained conditions, and the parameters such as explosion field and temperature field were analyzed for the damage effect. The results show that the mixed liquid FAE, composed of petroleum ether (mass accounted for 55%–70%), propylene oxide, and isopropyl nitrate, shows a better detonation performance. The liquid-solid mixture of FAE with a liquid-solid ratio of 1:1 has a better detonation performance and shows the best cloud dispersion state in the unconstrained cloud dispersion experiment. Two systems of FAE formulations in the 1 kg of secondary detonation charge under the cloud burst can be a stable response to achieve the detonation state. They all have superior results in terms of destructive capacity. Also, the effects of heat damage and overpressure damage were quantified and evaluated for each system.

Key words: liquid-solid fuel; fuel air explosive; EXPLO5; cloud detonation; damage

CLC number: TJ55; O381

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2023054

Grant support: National Natural Science Foundation of China (No.11802136)

(责编: 姜梅)