

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2020.03.009

# JP-10 燃料燃爆特性及无约束爆炸状态场参数试验研究<sup>\*</sup>

尤祖明<sup>①</sup> 王永旭<sup>①</sup> 张莹<sup>②</sup> 贾晓亮<sup>②</sup> 解立峰<sup>①</sup> 李斌<sup>①</sup>

①南京理工大学化工学院(江苏南京,210094)

②辽宁锦华机电有限公司(辽宁兴城,125125)

[摘 要] 以云爆武器的液态燃料组分筛选为应用背景,基于 JP-10 燃料密度高、综合性能佳以及成本低等特点,开展了爆轰管内 JP-10 燃料的燃爆特性试验研究以及外场无约束空间下 JP-10 燃料的分散效果及爆炸状态场研究。研究发现:在强起爆作用下,JP-10 燃料爆轰管内的爆炸超压约为 0.6 MPa;在无约束条件下,JP-10 燃料抛撒爆炸过程中,其云雾区内超压峰值要高于同体积的乙醚燃料,且爆炸温度峰值达到 1 366.9 ℃,1 000 ℃ 以上高温持续时间是乙醚燃料的 2 倍,说明 JP-10 燃料的高热值特性有利于提高云爆武器的热毁伤效果。

[关键词] JP-10 燃料;爆轰管;无约束;爆炸状态场

[分类号] TQ560.7;TJ014

## Experimental Study on Explosion Characteristics and Unconfined Blast Parameters of JP-10 Fuel

YOU Zuming<sup>①</sup>, WANG Yongxu<sup>①</sup>, ZHANG Ying<sup>②</sup>, JIA Xiaoliang<sup>②</sup>, XIE Lifeng<sup>①</sup>, LI Bin<sup>①</sup>

① School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

② Liaoning Jinhua Mechanical and Electrical Co., Ltd. (Liaoning Xingcheng, 125125)

[ABSTRACT] JP-10 has features of high fuel density, good comprehensive performance and low cost. Based on the background of FAE weapons, especially on the screening of liquid fuels, experiments were carried out to study the explosion characteristics of JP-10 fuel in self-designed detonation tube, as well as the blast parameters in unconfined space. Experimental results show that the peak value of blast overpressure for JP-10 fuel in shock tube is 0.6 MPa. In unconfined space, the blast overpressure in cloud zone for JP-10 fuel is higher than diethyl ether, meanwhile the high temperature duration (over 1 000 ℃) is twice of diethyl ether with a peak value of 1 366.9 ℃. The data obtained indicates that JP-10 fuel, with its high calorific value, will enhance the thermal damage effect of FAE weapons.

[KEYWORDS] JP-10 fuel; detonation tube; unconfined; blast field

### 引言

低沸点、高热值的液态燃料常和高能金属粉末一起构成了固液复合云爆燃料的主体成分。作为一类常见且成本低廉的液态燃料,碳氢燃料倍受推崇,用于国内外多种云爆武器的燃料配方中<sup>[1-4]</sup>。目前,在云爆燃料配方设计过程中,低沸点、易挥发燃料是液态燃料组分的首选<sup>[5]</sup>,常见的如环氧乙烷、环氧丙烷、乙醚等碳氢化合物。但由于碳氢燃料的热值

相对较低,常采用一些热值高的液态燃料作为组分添加剂,以提高云爆燃料的威力。硝基甲烷、硝酸异丙酯等硝基化合物常用于云爆燃料配方<sup>[6]</sup>。

油料(如柴油、汽油、航空煤油等)作为一类常用燃料都具有高热值的特点,是一类潜在的可用于云爆药剂配方设计中的组分。JP-10燃料是航空煤油或航空燃料的一种,目前广泛用于各种导弹(特别是巡航导弹)中,为最成功的高密度烃燃料之一<sup>[7-10]</sup>。由于其高密度、高能量、高安定性的特点,将 JP-10燃料添加到现有云爆药剂的液相体系可

<sup>\*</sup> 收稿日期:2019-10-09  
第一作者:尤祖明(1985 - ),男,博士,主要从事云爆武器方向的研究。E-mail:316986821@qq.com  
通信作者:李斌(1984 - ),男,博士,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

能会起到提高现有云爆药剂爆轰威力的功效。

本文中,以 JP-10 燃料为研究对象,利用自行设计的立式爆轰管进行炸药直接起爆条件下 JP-10 燃料的燃爆特性参数研究;同时通过外场试验的方式获得其无约束爆炸状态场参数。所得结果能够为云爆燃料液相组分配方设计提供参考。

1 试验部分

1.1 试验样品

JP-10 燃料和乙醚(某类云爆药剂配方中常用的液相组分)的基本物理性质参数见表 1。

表 1 试验样品的物理性质参数

燃料	密度(20℃)/ (g·cm <sup>-3</sup> )	沸点/ ℃	闪点/ ℃	净热值/ (MJ·kg <sup>-1</sup> )
JP-10	0.91	185.0	56	42.1
乙醚	0.71	34.6	-45	37.2

1.2 试验方法和装置

针对 JP-10 燃料燃爆性能的研究主要分为两个方面:首先,在实验室内通过自制的立式爆轰管研究 JP-10 燃料的燃爆特性;以此为基础,在外场试验中对无约束条件下 JP-10 燃料的爆炸状态场进行测试,综合评估其用于云爆药剂配方设计中的可能性。

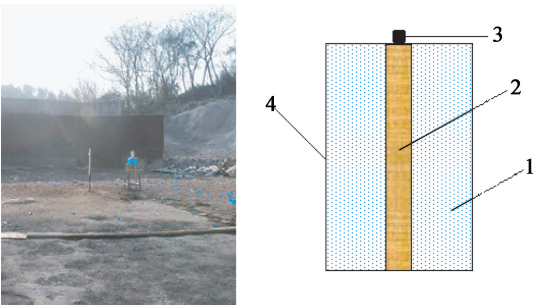
1.2.1 立式爆轰管试验

利用南京理工大学汤山科研试验中心的立式爆轰管系统<sup>[11]</sup>(图 1)开展 JP-10 燃料燃爆性能试验研究。此系统主要由立式爆轰管主体、燃料雾化系统、

点火系统和测试系统组成。其中,爆轰管的长度为 5 400 mm、内径为 200 mm,沿长度轴线方向每隔 350 mm 对称布置两套燃料雾化装置,共计 28 套,形成一整套燃料雾化系统。

1.2.2 外场无约束燃料抛撒点爆试验

为模拟云爆药剂抛撒及云雾爆轰时的真实效果,在外场条件下开展无约束条件下燃料抛撒点爆试验,试验布置如图 2 所示。将云爆弹弹体放置在架子上,中心离地面 1.25 m,架子固定在地面上。以壳体中心位置为爆心,炸高为 1.25 m,二次起爆药柱距离爆心 1.50 m,二次起爆药柱为 160 g TNT 药柱。在爆心沿直线位置布置压力传感器,距爆心 20.00 m 处布置高速录像机和红外热成像仪,分别记录燃料抛撒爆轰全过程以及燃料爆炸温度场。



(a) 外场场地布置 (b) 云爆弹装药结构  
1 - 燃料;2 - 中心分散装药;  
3 - 雷管和传爆药柱;4 - 云爆弹壳体。

图 2 外场试验

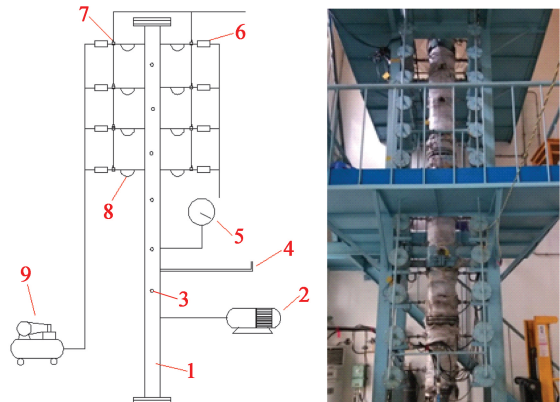
Fig. 2 Field experiment

2 结果与讨论

2.1 立式爆轰管试验

利用立式爆轰管开展 JP-10 燃料的燃爆性能试验研究。起爆能量固定为 1 个雷管加 5 g C4 塑性炸药。在这个起爆能量的条件下,轻质碳氢燃料(C5、C6 以下)都能直接达到爆轰状态;但对于传统油料(柴油、煤油等)来说,根据之前的研究结果,由于油料组分中重组分相对较多,其燃爆压力和燃爆速度趋于稳定后与轻质碳氢燃料相比仍有较大差距,说明传统油料很难直接达到爆轰状态。

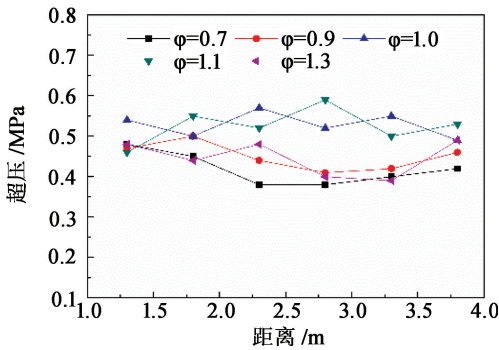
试验在不同当量比的 JP-10 燃料与空气混合物的条件下进行,当量比  $\varphi$  分别为 0.7、0.9、1.0、1.1 和 1.3。燃爆性能通过燃爆压力和燃爆速度两个参数进行表征。不同当量比条件下的燃爆压力和燃爆速度随爆轰管上测点距离的变化趋势如图 3 所示。由图 3 可以看出,在 JP-10 燃料与空气的当量比处于 1.0 ~ 1.1 区间时,JP-10 燃料的燃爆压力和燃爆速



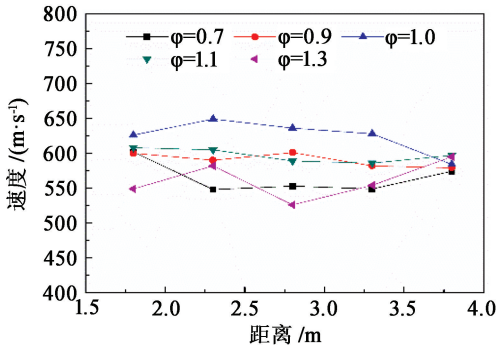
(a) 结构图 (b) 实物图  
1 - 激波管;2 - 真空泵;3 - 测量孔;4 - 预混气  
进气口;5 - 真空表;6 - 高压储气罐;7 - 防爆  
电磁阀;8 - “U”形管;9 - 空气压缩机。

图 1 立式爆轰管

Fig. 1 Vertical detonation tube



(a) 燃爆压力



(b) 燃爆速度

图3 燃爆压力和速度随测试距离的变化  
Fig.3 Explosion pressure and velocity changing with test distance

度要比当量比小于 1.0 或者大于 1.1 时明显提高,最大超压约 0.6 MPa,最大增量能超过最低值的 50%。说明与其他液相燃料试验结果一致,当量比对燃料的燃爆压力和燃爆速度影响明显。随着测试点距离(即测试点与爆源的间距)的增加,在不同当量比的工况下,JP-10 燃料与空气混合体系的燃爆压力和燃爆速度变化都不明显,相比之下更趋于稳态。这说明在强起爆条件下,JP-10 燃料与空气混合体系已达到最佳的燃爆效果,虽然燃料仍能自持发生反应,但燃爆参数已变化不明显,尚未达到爆轰的状态。这也印证了试验前对试验结果的预测。

2.2 无约束燃料抛撒点爆试验

为模拟实际装弹条件下 JP-10 燃料的无约束爆轰特性,在外场试验条件下对 JP-10 燃料与乙醚在等容条件下的抛撒及点爆过程进行了研究。通过对燃料云雾参数的测试、燃料云雾爆轰超压场测试和温度场测试对两种燃料的爆轰特性进行研究。采用内容积为 1L 的弹体,试验时 JP-10 燃料的平均装填量为 910.5 g,乙醚的平均装填量为 708.6 g,装填密度分别为 0.91 g/cm³ 和 0.71 g/cm³。按照步骤对两者的无约束爆轰性能进行测试,燃料成雾效果如图 4 所示。



(a) 乙醚燃料 (b) JP-10 燃料

图4 起爆时刻前两种燃料的成雾效果  
Fig.4 Atomization effects of diethyl ether and JP-10 fuel before initiation

由图 4 可以看出,在爆炸力驱动下,乙醚燃料云雾直径约为 4.1 m,厚度约为 2.2 m;JP-10 燃料云雾直径约为 3.1 m,厚度约为 0.8 m;二者的体积差异较为明显。乙醚作为一种低沸点燃料,在爆炸过程中部分发生相变,但主体形态仍保持完整,形成的液相云雾效果较好;而 JP-10 燃料虽然沸点比乙醚高,但作为一种吸热型燃料,在爆炸力作用下能够大幅吸收炸药爆炸的能量,使其迅速相变成为气态,致使其形成的云雾相比乙醚效果较差。

2.2.1 超压测试

针对每种样品做了 3 次平行试验,超压测试结果见表 2。

表2 超压峰值测试结果  
Tab.2 Test results of peak overpressure

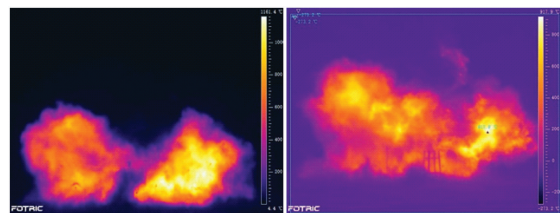
燃料	超压峰值/kPa				
	2 m	3 m	4 m	5 m	6 m
JP-10	103.6	50.66	37.00	23.70	18.09
乙醚	95.10	58.13	47.87	24.02	21.10

由超压测试结果可以看出,在两种燃料云雾区(3 m)之外,一直到对人员有轻伤的毁伤范围(6 m)之内,JP-10 燃料燃爆的超压峰值都要小于乙醚燃爆的超压峰值。这主要是由于在爆炸分散形成云雾的过程中,部分乙醚燃料发生相变,变成气态,乙醚云雾为气液混合体系,气相乙醚组分的存在提高了云雾体系的爆轰敏感性,而液相乙醚组分的存在又保持了整个体系足够的爆轰能量;而 JP-10 燃料作为一种典型的吸热型高密度烃燃料,在爆炸驱动力雾化过程中相变明显,致使其液相组分较少,威力降低,不易于达到完全爆轰的状态,这同样证明了爆轰管里试验的结论。

2.2.2 温度场测试

对两种燃料的爆炸温度场进行了测试,以对比两种燃料的热释放效果。温度场测试结果见图 5 和表 3。由图 5 和表 3 可以看出,在无约束条件下,JP-10





(a) 乙醚燃料 (b) JP-10 燃料

图 5 两种燃料的爆炸温度场

Fig.5 Blast temperature field of the two kinds of fuels

表 3 无约束条件下燃料爆炸温度场参数  
Tab.3 Blast temperature field parameters of fuels  
in unconfined condition

燃料	火球最大 直径/cm	火球最高 温度/℃	高温(大于 1 000℃) 持续时间/ms
JP-10	828.5	1 366.9	240
乙醚	812.7	1 111.3	120

燃料/空气云雾和乙醚/空气云雾的爆炸火球直径相近。表明虽然 JP-10 燃料的相变明显,但气相组分的存在同样保证了 JP-10 燃料具有足够的爆炸毁伤范围,这点可以从表 2 的超压测试 results 中二者超压数据相差不大得到验证。但是,JP-10 燃料的爆炸最高温度比乙醚提高 23%,且 1 000 ℃ 以上的高温持续时间要提高 1 倍,说明在外场无约束条件下 JP-10 燃料能够比乙醚释放出更多的热能,有利于提高云爆药剂的热毁伤能力。

3 结论

以改进云爆武器配方为背景,分别在实验室和外场条件下对 JP-10 燃料和乙醚进行了对比试验,获得结论如下:

- 1)在爆轰管试验中,针对不同当量比的 JP-10 燃料与空气混合物进行系统研究,试验结果表明,在强起爆条件下,JP-10 燃料很难达到爆轰状态,最大爆炸压力在 0.6 MPa 左右,说明其较难单独作为云爆药剂的配方组分。
- 2)在外场无约束条件下的点爆试验中,在云雾区范围内,JP-10 燃料的爆炸超压要高于乙醚;但在云雾区外,乙醚的爆炸超压都要高于 JP-10 燃料;这是由于 JP-10 燃料是吸热型燃料,在爆炸力驱动下更易吸能发生相变,致使其爆轰威力降低所致。
- 3)在温度场测试结果中,JP-10 燃料的爆炸最高温度和高温持续时间要明显好于乙醚,说明其可以增加云爆药剂的热毁伤威力。

参 考 文 献

[1] 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, 23(4):360-370.  
LIU Q M, BAI C H, LI J P. Study on blast field characteristics of multiphase fuel air explosive[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2008, 23(4):360-370.

[2] LIU G, HOU F, CAO B, et al. Experimental study of fuel-air explosive [J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2008, 44(2):213-217.

[3] LI Y H, SONG Z D, LI Y Z, et al. Theoretical analysis and numerical simulation for the spill procedure of liquid fuel of fuel air explosive with shell[J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2010, 45(7):699-703.

[4] 史远通,张奇. 爆炸驱动燃料抛散的非理想化特征[J]. 含能材料,2015,23(4):330-335.  
SHI Y T, ZHANG Q. Non-ideal characteristics of fuel dispersal driven by explosive [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2015, 23(4):330-335.

[5] 白春华,梁慧敏,李建平,等. 云雾爆轰[M]. 北京:科学出版社,2012.

[6] YANG M, CHEN X F, WANG Y J, et al. Comparative evaluation of thermal decomposition behavior and thermal stability of powdered ammonium nitrate under different atmosphere conditions [J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, 337:10-19.

[7] GOH H, GEIPEL P, HAMPP F, et al. Regime transition from premixed to flameless oxidation in turbulent JP-10 flames [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2013, 34(2): 3311-3318.

[8] PEELA N R, KUNZRU D. Thermal cracking of JP-10: kinetics and product distribution [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2006, 76(1/2): 154-160.

[9] BURDETTE G W, LANDER H R, MCCOY J R. High-energy fuels for cruise missiles [J]. Journal of Energy, 1978, 2(5):289-292.

[10] HUDZIK J M, ASATRYAN R, BOZZELLI J W. Thermochemical properties of exo-tricyclo [5. 2. 1. 0 (2, 6)] decane (JP-10 jet fuel) and derived tricyclodecyl radicals [J]. The Journal of Physical Chemistry A, 2010, 114(35): 9545-9553.

[11] 尤祖明,祝逢春,王永旭,等. 模拟高原环境条件下 C5-C6 燃料的爆轰特性研究[J]. 爆炸与冲击,2018, 38(6):1303-1309.  
YOU Z M, ZHU F C, WANG Y X, et al. Detonation characteristics of C5-C6 fuels under simulated plateau-condition [J]. Explosion and Shock Waves, 2018, 38(6):1303-1309.