

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2021.04.006

圆台形 FAE 装置抛撒初期燃料运动特性研究^{*}

何 超 栗保华 施长军 许志峰 王世英
西安近代化学研究所(陕西西安,710065)

[摘 要] 为研究圆台形燃料空气炸药(FAE)装置燃料抛撒运动特性,利用 ANSYS/LS-DYNA 软件对燃料初始抛撒过程进行了数值模拟,得到了不同位置处的燃料抛撒初速,分析了中心抛撒药结构对燃料抛撒的影响,并进行了实验验证。结果表明:圆台形 FAE 装置不同位置处的燃料抛撒初速与截面比药量有关,燃料抛撒初速随截面比药量的增加而增加;相较于等直径中心抛撒药,采用变直径中心抛撒药时截面比药量一致性更好,有利于减小不同位置处燃料抛撒的速度差。

[关键词] FAE 装置;圆台形;燃料;抛撒药

[分类号] TJ55

Fuel Movement Characteristics of Cone-Shaped FAE Device at the Initial Stage of Spreading

HE Chao, LI Baohua, SHI Changjun, XU Zhifeng, WANG Shiyong
Xi'an Modern Chemistry Research Institute (Shaanxi Xi'an, 710065)

[ABSTRACT] In order to study the motion characteristics of fuel dispersal in cone-shaped FAE device, the process of initial fuel dispersal was numerically simulated by ANSYS/LS-DYNA software, the initial velocity of fuel dispersal at different positions was obtained, and the influence of central dispersal structure on the fuel dispersal was analyzed. The results show that the initial velocity of fuel dispersal at different positions of the cone-shaped FAE device is related to the specific charge amount of the cross section, and the initial velocity of fuel dispersal increases with the increase of the specific charge amount of the cross section. Compared with the uniform diameter center dispersal, the consistency of the specific charge amount of the cross section is better when the variable diameter center dispersal is used, which is conducive to reducing the difference of the fuel dispersal velocity at different positions.

[KEYWORDS] FAE device; cone shape; fuel; dispersant

引言

燃料空气炸药(FAE)是一种强的爆炸源,由于在相同质量条件下能释放出比一般高能炸药大得多的能量,因此受到武器研制者的极大关注^[1-2]。有关燃料抛撒及云雾形成的规律性研究,一直是国内外学者研究的热点^[3-5]。FAE 的形成主要通过 FAE 装置实现,由于其形成过程的快速性和复杂性,纯粹用理论分析很难描述,需要依靠数值模拟和实验手段加以研究。李建平等^[6]采用 ANSYS 模拟燃料抛撒初期壳体变形速度、分布规律及破裂形式,并通过实验验证了计算模型的准确性;郭俊等^[7]数值模拟了

端盖的材料与厚度对燃料抛撒的影响,提出材料的屈服强度和厚度越大,越有利于燃料的抛撒;王晔等^[8]研究了加强杆结构对燃料抛撒的影响,结果表明,采用加强杆结构可提高燃料抛撒速度;王永旭等^[9]通过实验研究了扇形壳体结构 FAE 装置云雾的发展和变化特征,结果表明,燃料在各个方向上的运动速度存在差异,导致最终云雾形状不规则。

针对 FAE 装置,以往研究大多基于圆柱外形,少量涉及扇形壳体结构,而针对圆台外形 FAE 装置的研究却鲜有报道。本文中,针对弹体设计需求,对圆台形 FAE 装置燃料抛撒初始过程进行了数值模拟及实验研究,分析圆台形 FAE 装置抛撒初期燃料运动特性及其影响因素,以为圆台形云爆战斗部

^{*} 收稿日期:2020-03-12
第一作者:何超(1988 -),硕士,工程师,主要从事云爆战斗部研究工作。E-mail:hfhc1988_2008@163.com

的优化设计提供参考依据。

1 圆台形FAE装置

圆台形FAE装置主要由前盖、壳体、燃料、中心抛撒药、后盖、中心管组成。燃料为液-固型,装填质量为200 kg;壳体所用材料为铝合金,壁厚4 mm,为提高燃料分散的均匀性,在其外壁加工有轴向应力槽。装置为圆台外形,小端直径350 mm,大端直径580 mm,总长度1 100 mm,中心抛撒药起爆点位于小径端。在圆台外形基础上,根据中心抛撒药的不同设计了两种结构(图1)。结构A,中心抛撒药采用等直径装药,抛撒药直径65 mm;结构B,中心抛撒药采用变直径装药,小端直径48 mm,大端直径80 mm。两种结构中心抛撒药的质量均为4 kg。

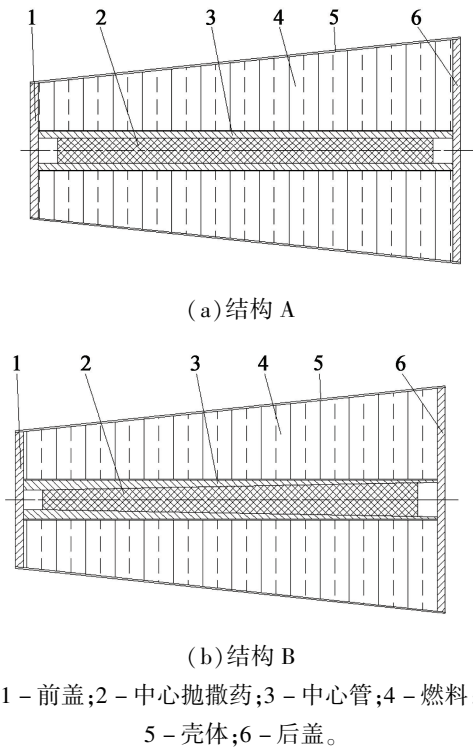


图1 圆台形FAE装置结构图

2 数值模拟

2.1 模型及计算方法

FAE装置为圆台形,具有轴对称性质,故建立1/4体模型进行求解。模型主要由前盖、壳体、燃料、中心抛撒药、后盖和空气组成,对两种结构分别建模计算(图2)。运用流固耦合算法进行计算,采用单点积分的ALE多物质单元。中心抛撒药、燃料

及空气采用Euler网格,壳体及前、后盖采用Lagrange网格。

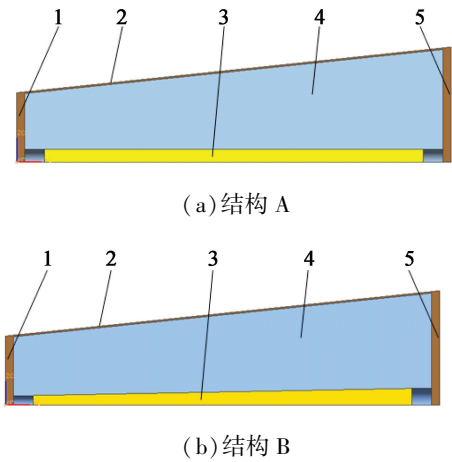


图2 计算模型

Fig.2 Calculation model

2.2 材料模型及参数

2.2.1 中心抛撒药

中心抛撒药为高能炸药,采用High_Explosive_Burn模型及JWL状态方程,其形式为

$$p=A(1-\frac{\omega}{R_1V})e^{-R_1V}+B(1-\frac{\omega}{R_2V})e^{-R_2V}+\frac{\omega E_0}{V}。$$
(1)

式中: p 为爆轰产物的压力,Pa; V 是相对体积,初始值为1; E_0 是单位体积炸药的内能,J/m³; A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 为JWL状态方程参数。主要计算参数见表1。

表1 中心抛撒药模型计算参数

Tab.1 Calculation parameters of central dispersant model

A / GPa	B / GPa	R_1	R_2	ω	E_0 / (J·m ⁻³)
374	7.33	4.15	0.90	0.3	7.0×10 ⁹

2.2.2 燃料

燃料用水代替,采用Mat_Null材料模型,状态方程采用Gruneisen,其形式为

$$p=\frac{\rho_0C^2\mu[1+(1-0.5\gamma_0)\mu-0.5a\mu^2]}{\left[1-(S_1-1)\mu-S_2\frac{\mu^2}{\mu+1}-S_3\frac{\mu^3}{(\mu+1)^2}\right]^2+}+(\gamma_0+a\mu)E_0$$
(2)

式中: p 为压力,Pa; E_0 是单位体积炸药的内能,J/m³; $\mu=\rho/\rho_0$, ρ_0 为燃料初始密度, ρ 为扰动后的密度; C 为燃料中声速,取1 650 m/s; S_1 、 S_2 、 S_3 为 V_p - V_s 曲线的斜率; γ_0 为Gruneisen指数,取0.35; a 是体积修正系数,取1.393 7。主要计算参数见表2。

表 2 燃料模型的计算参数

Tab.2 Calculation parameters of fuel model

$\rho_0/$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	S_1	S_2	S_3	$E_0/$ ($\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$)
1.0	1.92	-0.09	0.23	2.65×10^5

2.2.3 壳体及前、后盖

壳体及前、后盖材料均为铝合金,选用 Plastic_Kinematic 材料模型,模拟壳体及前、后盖在爆炸过程中发生的弹性变形、塑性变形以及破裂等过程。主要计算参数见表 3。表 3 中, ρ 为密度, E 为弹性模量, ν 为泊松比, σ_s 为屈服应力, E_t 为屈服段模量, δ 为失效应变变量。

表 3 壳体及前、后盖模型的计算参数

Tab.3 Calculation parameters of model of
shell、front cover and rear cover

$\rho/$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	$E/$ GPa	ν	$\sigma_s/$ GPa	$E_t/$ GPa	δ
2.7	60	0.3	0.262	1	0.6

2.2.4 空气

空气采用 Mat_Null 模型,状态方程采用线性多项式,形式为

$$p = c_0 + c_1\mu + c_2\mu^2 + c_3\mu^3 + (c_4 + c_5\mu + c_6\mu^2)E_0。$$

(3)

式中: $c_0、c_1、c_2、c_3、c_4、c_5、c_6$ 是常数; E_0 是比内能, J/m^3 ; $\mu = 1/V - 1$, V 是相对比容,初始值取 1。主要计算参数见表 4。

表 4 空气模型的计算参数

Tab.4 Calculation parameters of air model

c_0	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	$E_0/$ ($\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$)
0	0	0	0	0.4	0.4	0	2.5×10^5

2.3 模拟计算

为获取燃料抛撒初速,在不同位置选取 3 个观测点,如图 3 所示。观测点 1# 靠近小径端,距离小径端轴向距离 100 mm;观测点 2# 位于轴向中间部位,距离小径端轴向距离 550 mm;观测点 3# 靠近大径端,距离小径端轴向距离 1 000 mm。通过读取观测点

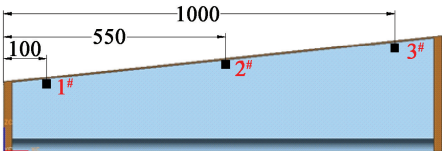


图 3 观测点位置示意图(单位:mm)

Fig.3 Location of observation points(unit:mm)

处速度,可获得轴向不同位置处燃料抛撒初速。

图 4 为结构 A 观测点抛撒速度随时间的变化关系。燃料抛撒总体呈先加速、后减速的趋势。0 ~ 1 ms 内,观测点速度由大到小排序为 $v_{1\#}$ 、 $v_{2\#}$ 、 $v_{3\#}$ 。观测点 1# 抛撒初速为 641 m/s;观测点 2# 抛撒初速为 576 m/s;观测点 3# 抛撒初速为 436 m/s;观测点 1# 与观测点 3# 抛撒初速差为 205 m/s。

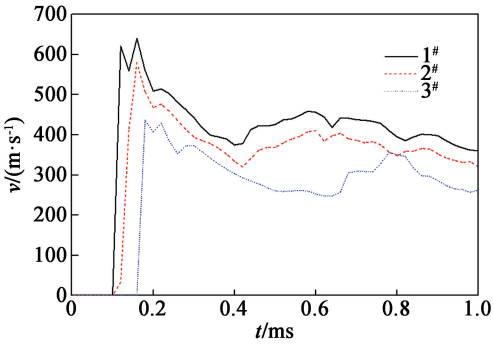


图 4 结构 A 观测点的速度曲线

Fig.4 Velocity curve of observation points at structure A

图 5 为结构 B 观测点处抛撒速度随时间的变化关系。与结构 A 相同,燃料抛撒总体呈现先加速、后减速的趋势。0 ~ 0.4 ms 内,观测点速度由大到小排序为 $v_{1\#}$ 、 $v_{2\#}$ 、 $v_{3\#}$;0.4 ~ 1.0 ms 内,观测点速度由大到小排序为 $v_{3\#}$ 、 $v_{1\#}$ 、 $v_{2\#}$ 。观测点 1# 抛撒初速为 588 m/s;观测点 2# 抛撒初速为 550 m/s;观测点 3# 抛撒初速为 486 m/s;观测点 1# 与观测点 3# 抛撒初速差为 102 m/s。

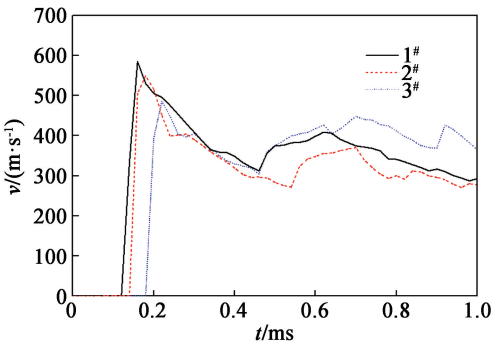


图 5 结构 B 观测点的速度曲线

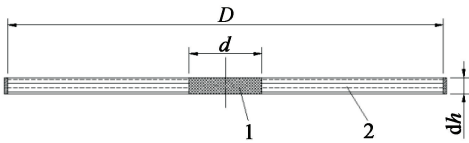
Fig.5 Velocity curves of observation point at structure B

2.4 结果分析

由模拟计算结果可知:采用结构 A 时,观测点间抛撒初速差为 205 m/s,小径端抛撒初速较高;在采用结构 B 时,观测点间抛撒初速差为 102 m/s,抛撒初速差有所减小。

为研究轴向不同部位抛撒初速差产生的原因以及中心抛撒药结构对燃料运动的影响,对不同截面

处的抛撒比药量(中心抛撒药质量与燃料质量的比)进行分析,在观测点所在截面截取单元体,如图 6 所示。单元体由中心抛撒药及燃料组成,高度为 dh ,在 dh 趋近于 0 的情况下,可以忽略装置直径的变化,将单元体近似为圆柱体。



1 - 中心抛撒药;2 - 燃料。
图 6 观测点截面处单元体示意图
Fig. 6 Schematic diagram of unit body
at section of observation point

截面处单元体燃料质量计算公式为

$$M = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \rho_r dh。 \tag{4}$$

式中: M 为截面处单元体燃料质量,kg; D 为截面处燃料直径,m; d 为截面处中心抛撒药直径,m; dh 为单元体高度,m; ρ_r 为燃料密度,kg/m³。

截面处单元体中心抛撒药质量计算公式为

$$m = \frac{\pi}{4} d^2 \rho_p dh。 \tag{5}$$

式中: m 为截面处单元体中心抛撒药质量,kg; ρ_p 为中心抛撒药密度,kg/m³。

将式(5)除以式(4),得出截面比药量为

$$\eta = \frac{d^2 \rho_p}{(D^2 - d^2) \rho_r}。 \tag{6}$$

依据式(6),代入相关参数,计算得出两种结构下不同观测点的截面比药量,如表 5 所示。

表 5 观测点截面比药量计算结果

Tab.5 Calculation results of specific charge
of observation point section

观测点	截面比药量/%	
	结构 A	结构 B
1#	3.2	2.2
2#	2.0	2.0
3#	1.4	1.9

由表 5 可见:结构 A 不同观测点截面比药量差异较大,小径端明显大于大径端;结构 B 不同观测点截面比药量差异较小。分析认为,在抛撒初始阶段,燃料主要依靠中心抛撒药爆轰驱动产生抛撒速度,初始速度的大小主要与抛撒药爆轰驱动力和燃料质量相关;而在抛撒药种类一定的情况下,抛撒药质量越大、燃料质量越小,则燃料的加速效果越明显,也就是说,抛撒比药量越大,抛撒初速越高。轴

向不同位置处截面比药量的差异必然导致燃料抛撒初速的差异。结构 A 小径端截面比药量明显大于大径端,因此,导致小径端抛撒初速较高,两端抛撒初速差异较大;结构 B 小径端截面比药量与大径端相当,因此,两端抛撒初速差异较小。

3 实验验证

针对结构 A 和结构 B 各开展 1 发抛撒实验以验证模拟计算结果。实验现场布置如图 7,圆台形 FAE 实验装置小端朝下竖直放置于弹架上,通过 8#雷管起爆中心抛撒药,进而实现燃料的抛撒。



图 7 圆台形 FAE 实验装置布置图

Fig. 7 Layout of cone-shaped FAE experimental device

采用高速相机记录燃料爆炸抛撒初始阶段作用过程,高速相机型号为 Fastcam Mini UX100,拍摄速度为 3 000 帧/s。

图 8 为结构 A 燃料抛撒初始过程高速图片。由图 8 可见,燃料抛撒初始阶段呈现上端小、下端大的形态。图 9 为结构 A 轴向不同位置燃料直径随时间的变化关系。由图 9 可见,相同时刻下小径端(下端)扩散直径明显大于大径端(上端)。图 10 为结构 A 燃料抛撒速度随时间的变化。由图 10 可

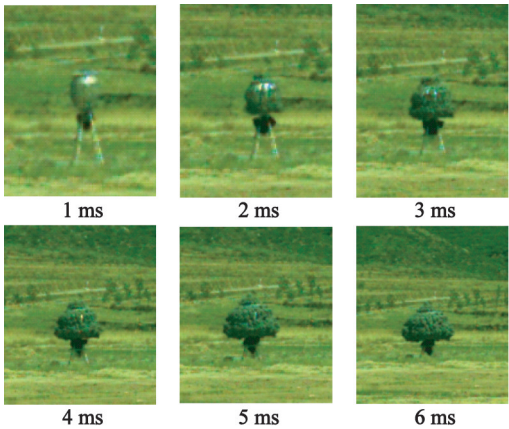


图 8 结构 A 燃料抛撒初始阶段图片

Fig. 8 Initial stage pictures of structure A fuel dispersal

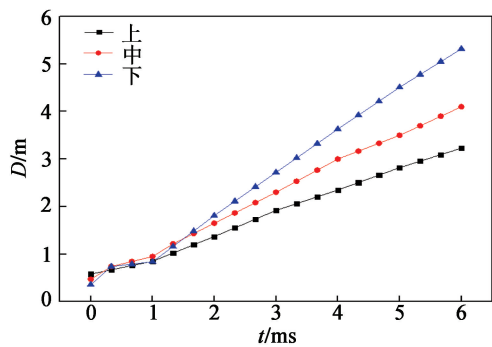


图 9 结构 A 不同位置燃料直径变化情况
Fig. 9 Variation of fuel diameter at different positions of Structure A

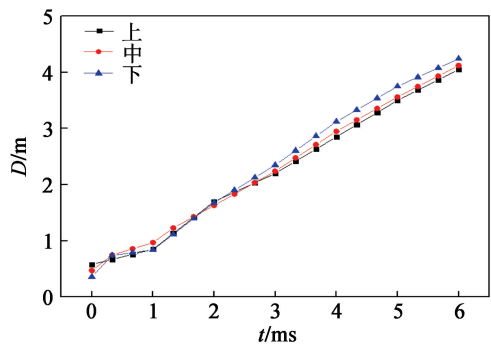


图 12 结构 B 不同位置燃料直径变化情况
Fig. 12 Variation of fuel diameter at different positions of Structure B

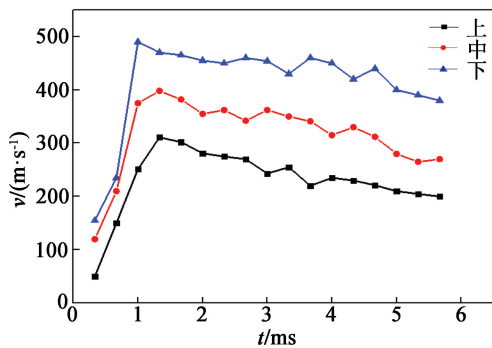


图 10 结构 A 燃料抛撒速度-时间曲线
Fig. 10 Velocity-time curves of Structure A

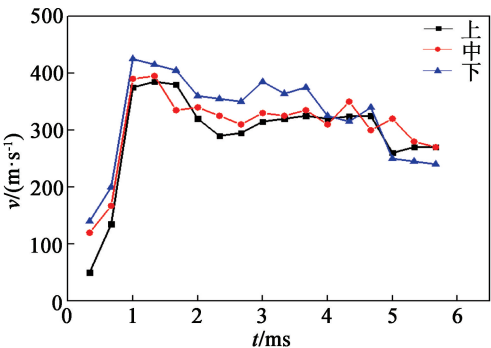


图 13 结构 B 燃料抛撒速度-时间曲线
Fig. 13 Velocity-time curves of Structure B

见,结构 A 不同位置处燃料抛撒速度差异明显,下端抛撒速度明显高于上端,两端最大抛撒速度的差值为 179 m/s。

图 11 为结构 B 燃料抛撒初始过程高速图片。由图 11 可见,燃料抛撒初期形态近似圆柱形,上下端燃料直径无明显差异。图 12 为结构 B 轴向不同位置燃料直径随时间的变化关系。由图 12 可见,小径端燃料直径与大径端相当。图 13 为结构 B 燃料

抛撒速度随时间的变化。由图 13 可见,结构 B 不同位置处燃料抛撒速度差异较小,下端最大抛撒速度略高于上端,两端最大抛撒速度的差值为 51m/s。

通过以上实验结果可知,结构 A 小径端(下端)燃料抛撒速度较高,两端燃料扩散直径及抛撒速度差异明显;结构 B 两端燃料扩散直径无明显差异,不同位置燃料抛撒速度差异较小,实验结果与数值模拟计算结果基本吻合。

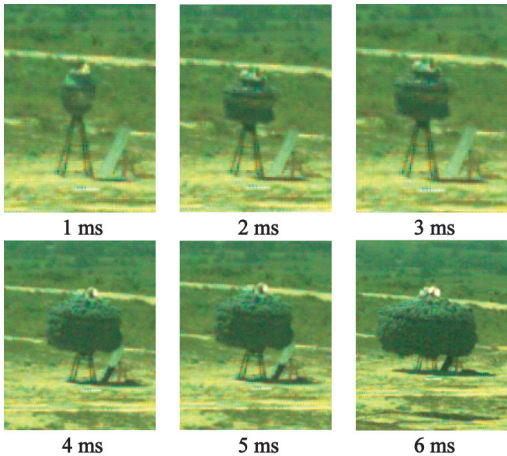


图 11 结构 B 燃料抛撒初始阶段图片
Fig. 11 Initial stage pictures of Structure B fuel dispersal

4 结论

基于圆台形 FAE 装置燃料抛撒初始过程的数值仿真及实验验证,对等直径抛撒药和变直径抛撒药两种结构进行了研究,得出如下结论:

- 1) 圆台形FAE装置不同位置处的燃料抛撒初速与截面比药量有关,燃料抛撒初速随截面比药量的增加而增加。
- 2) 相较于等直径中心抛撒药,采用变直径中心抛撒药时截面比药量一致性更好,有利于减小不同位置处燃料抛撒速度差。

[J]. 弹箭与制导学报,2009,29(2):126-129.

PIAO Z G, XU S M. Characteristic researching for pyrotechnic composition BB pellet[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2009, 29(2):126-129.

[3] 钱小华. 热气溶胶灭火剂配方的优化实验[J]. 火工品, 2017(6):49-53.

QIAN X H. Optimization experiment of the formulation of aerosol fire extinguishing agent [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2017(6):49-53.

[4] 江泉南. S 型热气溶胶灭火剂出口温度抑制的研究[D]. 南京:南京理工大学, 2014.

JIANG X N. Study on the outlet temperature control of S-type condensed aerosol extinguishing agent[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2014.

[5] 贾雷,于瑶,潘靖,等. 基于非贮压干粉灭火装置产气剂的性能研究[J]. 火工品, 2019(3):55-57.

JIA L, YU Y, PAN J, et al. Study on performance of gas

generating agent based on non pressure-accumulated powder fire equipments [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2019 (3):55-57.

[6] 胡春红. 酚醛树脂的复合改性研究进展[J]. 化工管理, 2016(32):63.

[7] 庄维伟,牛鹏宇,庄弘炜,等. 手持式灭火弹产气剂装药设计与试验研究[J]. 消防科学与技术, 2015, 34(11):1499-1502.

ZHUANG W W, NIU P Y, ZHUANG H W, et al. Charging design and experimental research on gas generant of an handheld fire extinguishing bomb[J]. Fire Science and Technology, 2015, 34(11):1499-1502.

[8] 譙娟,温晓燕,贾林,等. 火药试验方法的发展现状和扩充建议[J]. 中国标准化, 2018(增刊 1):233-236.

QIAO J, WEN X Y, JIA L, et al. Development status and suggestings for expansion of test method of propellant [J]. China Standardization, 2018(suppl. 1):233-236.

(上接第 34 页)

3)模拟结果与实验结果基本吻合,可为圆台形 FAE 装置的优化设计提供参考依据。

参 考 文 献

[1] 薛社生,刘家骢,秦承森,等. 燃料爆炸抛撒成雾的实验与数值研究[J]. 爆炸与冲击, 2001, 21(4):272-276.

XUE S S, LIU J C, QIN C S, et al. Experimental and numerical investigation on explosive dispersal and cloud forming[J]. Explosion and Shock Waves, 2001, 21(4):272-276.

[2] 王德润,沈兆武,周听清,等. 液态燃料爆炸抛撒及云雾形成的实验研究[J]. 流体力学实验与测量, 2004, 18(4):15-19.

WANG D R, SHEN Z W, ZHOU T Q, et al. Experimental study on explosive dispersion and cloud formation of liquid fuel[J]. Experiments and Mesurements in Fluid Mechanics, 2004, 18(4):15-19.

[3] SINGH S K, SINGH V P. Extended near-field modeling and droplet size distribution for fuel-air explosive warhead [J]. Defense Science Journal, 2002, 51(3):303-314.

[4] SALLAM K, DAI Z, FAETH G M. Liquid breakup at the surface of turbulent round liquid jets in still gases[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2002, 28(3):427-449.

[5] 惠君明. FAE 燃料抛撒与云雾状态的控制[J]. 火炸药学报, 1999, 22(1):10-13.

HUI J M. FAE fuel throw and control of cloud state[J]. Chinese Journal of Exlposives & Propellants, 1999, 22(1):10-13.

[6] 李建平,白春华,郭昭平. 云爆装置初始作用过程数值模拟[J]. 弹箭与制导学报, 2009, 29(5):123-125, 132.

LI J P, BAI C H, GUO Z P. Numerical simulation of the initial interaction process of FAE device[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2009, 29(5):123-125, 132.

[7] 郭俊,余文力,王少龙,等. 端盖对 FAE 燃料抛撒影响的数值模拟[J]. 四川兵工学报, 2013, 34(6):65-67.

GUO J, YU W L, WANG S L, et al. Numerical simulation on influence of cover to spill of liquid fuel of FAE [J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2013, 34(6):65-67.

[8] 王晔,白春华,李建平. 弹壳体结构对燃料装药抛撒速率影响的数值模拟研究[J]. 兵工学报, 2017, 38(1):43-49.

WANG Y, BAI C H, LI J P. Influence of shell structure on dispersing velocity of fuel-air mixture[J]. Acta Armamentarii, 2017, 38(1):43-49.

[9] 王永旭,解立峰,贾晓亮,等. 300 kg 装药 FAE 燃料爆炸抛撒成雾的实验研究[J]. 爆破器材, 2020, 49(2):23-28.

WANG Y X, XIE L F, JIA X L, et al. Experimental study on 300 kg charge of FAE clouds by explosion dispersal[J]. Explosive Materials, 2020, 49(2):23-28.