

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2017.02.003

二次起爆条件对小型燃料空气炸药爆轰参数的影响^{*}

徐敏潇 刘大斌 吴秋洁
南京理工大学化工学院(江苏南京,210094)

[摘 要] 对装药主要由铝粉和环氧丙烷组成的3 kg级液固燃料空气炸药(FAE)进行静爆场试验,研究了不同二次起爆药(钝化黑索今)质量及多点起爆方式下FAE的爆炸情况,探讨了爆炸超压的变化规律。结果表明,在一定范围内增加二次起爆药质量能提高FAE爆炸超压,二次起爆方式的改变对FAE爆炸超压的影响较小。在二次起爆药质量较小的情况下,FAE抛散形成的云雾中,部分燃料在较低起爆能的激发下无法充分燃烧,甚至不能被点燃,存在爆炸不良效应。二次起爆药质量为120 g时,FAE的爆炸空中超压峰值是二次起爆药质量为60 g时的2.80~6.41倍,此时爆炸场超压趋于稳定。建议采用质量为120 g的起爆药柱作为二次起爆药来进行3 kg级液固型FAE的爆炸试验。研究结果有助于小型FAE试验中二次起爆药质量的选择,促进燃料的高效反应。

[关键词] 燃料空气炸药(FAE);二次起爆药质量;起爆方式;爆炸超压

[分类号] TQ56;O38

Influence of Re-initiation on Detonation Parameters of Small Scale Fuel-air Explosive

XU Minxiao, LIU Dabin, WU Qiuji
School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

[ABSTRACT] A static burst test was carried out on 3 kg liquid-solid fuel-air explosive (FAE) composed of aluminum powder and epoxy propane. Explosion of FAE with different charge (desensitized RDX) weights of the re-initiation and different multi-point initiation mode was studied and change in the explosion overpressure of FAE was also discussed. Test results show that, increasing the weight of re-initiation charge could improve the overpressure of FAE, and changing of multi-point initiation mode has low influence on the overpressure of FAE. Part of fuel in the clouds of FAE could not burn fully under the excitation of low initiation energy, and there are bad effects on explosion. Overpressure peak value of the FAE with 120 g re-initiation charge is 2.80 to 6.41 times of the overpressure peak value of the FAE with 60 g re-initiation charge. It is suggested that charge weight of the re-initiation reached to 120 g in the static burst test of 3 kg liquid-solid FAE. The research would greatly enhance the burning rate of fuel in the explosion test of FAE.

[KEYWORDS] fuel-air explosive (FAE); charge weight of re-initiation; initiation ways; explosion overpressure

引言

燃料空气炸药(fuel-air explosive, FAE)的装药是一种高能燃料,本身可不含氧。FAE与空气混合后,在特定起爆条件下可形成云雾爆轰,具有与常规炸药不同的爆炸特性^[1],其爆炸毁伤主要是云雾爆轰及其冲击波作用。

FAE使用时,在引信点火和中心抛撒炸药的作用下,把燃料抛撒到周围空气中(第一次引爆),燃料迅速扩散,并与空气混合形成爆炸性云雾,然后给

与一定强度的外界能量激发(第二次引爆),使云雾发生爆轰^[2-6]。不同于传统凝固相炸药起爆,当FAE抛撒形成的可爆云雾中,燃料浓度处于该燃料的爆轰极限浓度范围内时,云雾爆轰过程中云雾区内的激发能量须达到或超过该云雾区燃料所需要的临界起爆能才可能发生云雾爆轰;在燃料可爆轰极限浓度外的边缘区,需要的起爆能则趋于无限大,而实际起爆能不可能达到无限大^[7-10]。因此,二次起爆能对FAE的云雾爆轰效果有着显著的影响。在一次起爆条件不变、产生的云雾条件相近的情况下,如何确定二次起爆条件,让燃料充分参与爆轰反

^{*} 收稿日期:2016-09-05
作者简介:徐敏潇(1982-),男,博士研究生,主要从事火炸药研究。E-mail:xuminxiao@163.com
通信作者:刘大斌(1963-),男,研究员,博导,主要从事含能材料方面的研究。E-mail:dabin63@vip.sina.com

应,是 FAE 设计中需要解决的一个重要问题。

当前,国内外对 FAE 的研究主要集中在配方能量、燃料抛散等方面^[11-12],对二次起爆药以及二次起爆条件对 FAE 爆炸参数的影响研究较少。有研究者认为,云雾的稳定爆轰是依靠自身的能量维持的,云雾的起爆药量不应该随燃料的质量而变化;也有研究者提出,在燃料与氧气的化学当量比较低的区域,需要增大起爆药量才能产生足够的能量,才能使燃料云团实现稳定爆轰;当云雾浓度不能维持稳定爆轰时,增大起爆药量相当于多点起爆^[6,13-15]。

本文中,以试验为主,在相同的静爆场试验条件下,对 3 kg 级的液固型 FAE 进行静爆场试验,测试爆炸威力。改变 FAE 的二次起爆药质量及二次起爆方式,采用测试空中冲击波超压和地面冲击波超压的方法测定云雾区的爆炸超压^[16-18],对所测得的超压数据进行分析,研究二次起爆药质量及多点起爆方式对 FAE 爆炸威力的影响。

1 试验部分

1.1 试剂与仪器

1.1.1 原材料及试验装置

采用片状铝粉(200 目,活性 91%)和环氧丙烷(分析纯,质量分数 99.5%)组成的液固型 FAE 云爆装置进行静爆试验,测量距爆心不同距离处的冲击波超压。试验装置壳体为铝质圆柱形,高度为 200 mm,直径为 170 mm,弹壁厚度为 3 mm。装药结构如图 1 所示。

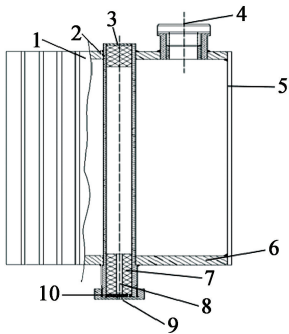


图 1 FAE 爆炸试验装置
Fig. 1 The experimental device of FAE

1.1.2 测试仪器

高频响应自动化数字测量系统主要由石英压电压力传感器(Kister 公司)、电荷放大器(5358 型)、瞬态波存储仪(JV5201 型)及控制系统组成。

1.1.3 试验布置

试验装置托架高 1.5 m。一次起爆药柱为质量 60 g、密度 1.60 g/cm³ 的钝化黑索今;二次起爆药柱为密度 1.60 g/cm³ 的钝化黑索今,质量有 20、30、40、47、60 g 和 70 g 6 种;二次起爆药柱托架高 1.5 m;二次起爆药柱距爆心 2 m;二次起爆延时 40 ms。

二次起爆药柱布置位置:分别以爆心为中心,以互成 45° 的空中及地面传感器两条射线角平分线为对称轴对称布置。两个二次起爆药柱时,药柱与爆心所成直线与两条压力传感器射线所呈 45° 角的角平分线垂直;3 个二次起爆药柱时,3 个药柱与爆心所呈射线间夹角为 120°,其中,一个夹角的角平分线与两条压力传感器射线的角平分线重合。

试验装置燃料:按照环氧丙烷 2.7 kg + 铝粉 0.9 kg 混装燃料装填。

试验时^[19],将爆炸试验装置置于弹架上,以药柱的中心位置为爆心,在以爆心垂直投影点为起点互成 45° 的两条射线上布置压力测试线,两路各 5 个压电式压力传感器。一路布置在地面,以爆心的垂直投影点为起点,第一个传感器距离爆心投影点 2 m,间隔 1 m 依次布置,用于测试地面反射压力;另一路,传感器置于距地面 1.5 m 的固定装置中,保证传感器测试端与药剂爆心处于同一平面,第一个传感器距离爆心 2 m,间隔 1 m 依次布置,用于测试空中超压。不同起爆条件的压力测试系统布点及二次起爆药分布见图 2 和图 3。

1.2 试验过程

试验中,保持试验装置托架高度、一次起爆药柱的装药量、装药密度和几何尺寸、二次起爆药柱的托架高度、二次起爆延迟时间、传感器的布置方式和试验弹结构固定不变。调整二次起爆药柱的装药质量、个数、空间分布,观察各路压力传感器测得的爆轰超压变化,获得不同二次起爆条件下给定爆炸装置的爆轰压力输出情况。由于二次起爆药柱本身所

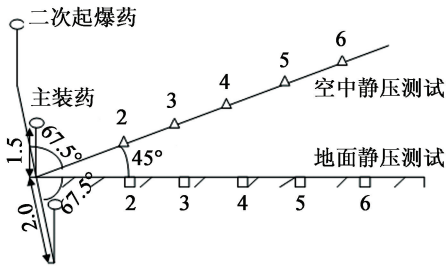


图 2 两点起爆 FAE 静爆试验布置示意(单位:m)
Fig. 2 Layout diagram of two-point initiation in FAE burst field test(unit:m)

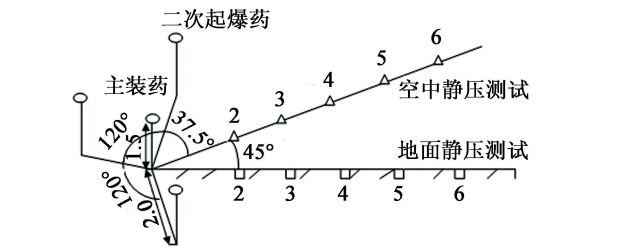


图 3 三点起爆 FAE 静爆试验布置示意(单位:m)

Fig. 3 Layout diagram of three-point initiation in FAE burst field test(unit:m)

产生的冲击波超压会影响测试结果,在对燃料空气炸药爆炸装置试验之前,必须先对二次起爆药柱的影响大小做测试,即先做空白试验。试验方法是在其他条件不变时去掉 FAE 爆炸装置,直接引爆二次起爆药柱,观察各路传感器测量到的爆炸超压。

2 结果与讨论

2.1 二次起爆药柱空白试验超压测试结果

在战斗部研发过程中,一般不希望比较集中而且不对称的二次爆炸发生在爆炸主云团之外^[5]。在二次起爆药柱空白试验中,选用不同质量的钝化黑索今作为二次起爆药柱,将二次起爆药柱均匀对称在云雾区范围内距离爆心 2 m 处,按照 1.1.3 中的分布方式,将二次起爆药柱和传感器进行布置,用 8#雷管同时起爆,测试其爆炸超压。二次起爆药柱的爆炸超压见图 4 和图 5。从图 4、图 5、表 1 和表 2 可以看出,总药量分别为 60、90、120 g 和 140 g 的二次起爆药柱爆炸时,地面及空中各个传感器所测得冲击波超压值随着药柱装药量的增大呈逐渐增大趋势,其中不同质量及分布的二次起爆药柱在距爆心 2 m 处地面冲击波超压最大差值为 0.006 0 MPa,空中冲击波超压最大差值为 0.003 8 MPa。

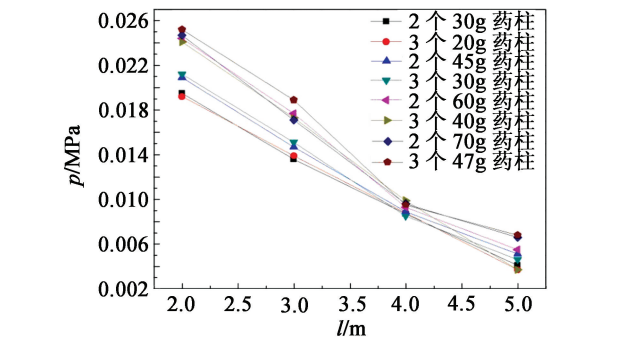


图 4 不同质量二次起爆药柱爆炸的地面冲击波超压

Fig. 4 Ground overpressure of re-initiation booster with different qualities

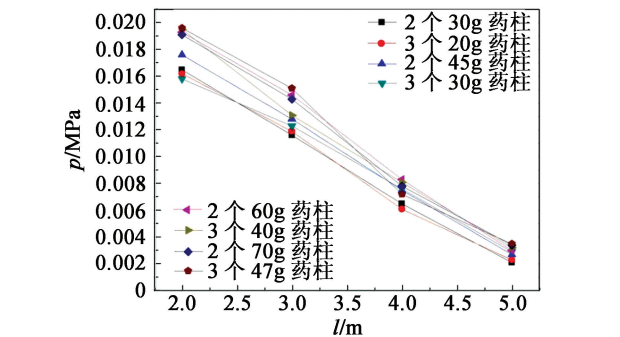


图 5 不同质量二次起爆药柱爆炸的空中冲击波超压

Fig. 5 Air overpressure of re-initiation booster with different qualities

表 1 二次起爆药柱爆炸的地面冲击波超压最大差值

Tab. 1 Maximum difference of ground overpressure in explosion of re-initiation booster

l/m	2	3	4	5
$\Delta p_{\max}/\text{MPa}$	0.006 0	0.005 3	0.001 2	0.003 1

表 2 二次起爆药柱爆炸的空中冲击波超压最大差值

Tab. 2 Maximum difference of air overpressure in explosion of re-initiation booster

l/m	2	3	4	5
$\Delta p_{\max}/\text{MPa}$	0.003 8	0.003 5	0.002 2	0.001 4

2.2 不同二次起爆药质量及分布的小型 FAE 爆炸装置静爆场试验

按照图 2 和图 3 的布置方式,二次起爆药总质量分别为 60、90、120 g 及 140 g,分布方式按两点起爆和三点起爆围绕小型 FAE 爆炸装置进行布置。试验过程中,几种小型 FAE 爆炸装置均正常产生爆轰。爆炸所产生的冲击波超压数据见表 3 及表 4。

表 3 不同二次起爆条件下的地面冲击波超压

Tab. 3 Ground overpressure in different re-initiation ways

二次起爆药	$\Delta p/\text{MPa}$				
	$l=2\text{ m}$	$l=3\text{ m}$	$l=4\text{ m}$	$l=5\text{ m}$	$l=6\text{ m}$
2 个 30 g 药柱	0.252	0.182	0.084	0.075	0.041
3 个 20 g 药柱	0.244	0.158	0.088	0.059	0.052
2 个 45 g 药柱	0.543	0.355	0.287	0.163	0.080
3 个 30 g 药柱	0.551	0.366	0.261	0.167	0.095
2 个 60 g 药柱	0.869	0.556	0.432	0.282	0.151
3 个 40 g 药柱	0.878	0.548	0.456	0.277	0.161
2 个 70 g 药柱	0.871	0.560	0.448	0.291	0.155
3 个 47 g 药柱	0.866	0.552	0.451	0.271	0.150

表 4 不同二次起爆条件下的空中冲击波超压

Tab.4 Air overpressure in different re-initiation ways

二次起爆药	$\Delta p/\text{MPa}$				
	$l=2\text{ m}$	$l=3\text{ m}$	$l=4\text{ m}$	$l=5\text{ m}$	$l=6\text{ m}$
2 个 30 g 药柱	0.190	0.112	0.074	0.048	0.021
3 个 20 g 药柱	0.196	0.123	0.064	0.050	0.035
2 个 45 g 药柱	0.448	0.313	0.249	0.111	0.040
3 个 30 g 药柱	0.456	0.296	0.210	0.107	0.045
2 个 60 g 药柱	0.791	0.511	0.410	0.235	0.103
3 个 40 g 药柱	0.776	0.508	0.399	0.230	0.098
2 个 70 g 药柱	0.793	0.486	0.410	0.225	0.108
3 个 47 g 药柱	0.789	0.552	0.401	0.221	0.111

从表 3、表 4 数据可以看出,不同二次起爆条件的 FAE 爆炸时,在距爆心 2 m 处测得的地面冲击波超压最大差值为 0.634 MPa,空中冲击波超压最大差值为 0.603 MPa。空白试验中测得的二次起爆药柱本身因为质量和分布改变而产生的爆炸超压差值与 FAE 的相比非常小,在距离爆心 2 m 处测得的地面最大冲击波超压差值仅为 FAE 的 0.96%,空中最大冲击波超压差值为 FAE 的 0.63%。可认为二次起爆药自身带来爆炸超压值改变对小型 FAE 爆炸装置的整体爆炸超压测试结果的影响可以忽略。

在二次起爆药总质量相同的情况下,采用两点起爆方式和三点起爆方式的小型 FAE 爆炸装置产生的爆炸超压结果之间无较大差异,说明起爆方式对 FAE 爆炸产生的冲击波超压无显著影响。

而不同二次起爆药质量和分布方式的小型 FAE 爆炸装置之间产生的爆炸超压有较大差异。在 60~120 g 范围内,随着二次起爆药质量的增加,小型 FAE 爆炸装置产生的冲击波超压值呈逐步递增状况,二次起爆药质量为 120 g 和 140 g 的小型 FAE 爆炸装置产生的爆炸超压结果相近。

从上述结果可以看出,小型 FAE 在二次起爆药起爆过后虽然都形成了云雾爆炸,但在二次起爆药质量不同的情况下,爆炸产生的超压值有较大的差别。当二次起爆药质量小于 120 g,随着二次起爆药质量的提高,爆炸超压也随之提高;当二次起爆药质量大于 120 g 时,爆炸超压值趋于稳定,无明显提高;其中,二次起爆药质量为 120 g 的 FAE 爆炸产生的地面冲击波超压和空中冲击波超压分别是二次起爆药质量为 60 g 的 FAE 的 2.90~5.43 倍和 2.80~6.41 倍。这是因为,FAE 不同于普通凝聚相炸药,其抛散形成的燃料云雾中燃料颗粒分布不均匀。在云雾浓度特别高或特别低的区域,燃料在较低的二

次起爆能激发下不能充分地燃烧,甚至不能被点燃,存在爆炸不良反应。即二次起爆药质量是影响小型 FAE 二次起爆爆炸超压的关键因素,而二次起爆药的分布对小型 FAE 二次起爆的爆炸超压影响不大。

3 结 论

1)在 FAE 一次起爆抛洒后,由于抛射情况、环境、温度等的影响,云雾区中的燃料颗粒在空中分布不均匀,在二次起爆药柱药量较小时产生的起爆冲击波能量不足以使云雾爆轰区中浓度较低或浓度较高部分的燃料充分参与爆轰,导致爆炸产生的冲击波超压较低。二次起爆药质量是影响二次起爆型 FAE 爆炸超压的一个重要因素。

2)在一定范围内增加二次起爆药质量可提高燃料能量释放率,提高 FAE 爆炸威力。由 3 kg 级液固型 FAE 静爆场试验可知,在距爆心相同距离时,二次起爆药质量为 120 g 时的爆炸空中超压峰值是二次起爆药质量为 60 g 时爆炸空中超压峰值的 2.80~6.41 倍。二次起爆药质量大于 120 g 时,静爆场超压趋于稳定,继续增加二次起爆药质量,爆炸场超压不再有明显增高。

3)在相同二次起爆药质量的情况下,改变二次起爆药的布置方式,两点起爆和多点起爆对云雾区爆轰超压无较大影响。

参 考 文 献

[1] 史远通,张奇. 爆炸驱动燃料抛撒的非理想化特征[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.

[2] 常双君,刘天生,朱晋生. 燃料空气炸药的爆炸特性研究[J]. 中北大学学报(自然科学版),2006,27(6):508-510.
CHANG S J, LIU T S, ZHU J S. A research on the explosion character of fuel-air explosive[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2006, 27(6): 508-510.

[3] 李斌,解立峰,倪欧琪,等. 燃料液滴云雾爆轰特性研究[J]. 弹道学报,2010,22(2):90-93.
LI B, XIE L F, NI O Q, et al. Study on detonation characteristics of fuel drops cloud[J]. Journal of Ballistics, 2010,22(2):90-93.

[4] 惠君明,刘荣海,葛桂兰. 提高 FAE 威力的研究(I):

- 高能燃料的选择[J]. 南京理工大学学报, 1995, 19(5): 472-476.
- HUI J M, LIU R H, GE G L. Study on increasing the power of FAE(I): selection of high energy fuels[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 1995, 19(5): 472-476.
- [5] 阚金铃. 液固复合云爆剂的爆炸和毁伤特性研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
- KAN J L. Study on the performances of blast and damage of liquid-solid composite fuel-air-explosive [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008.
- [6] 郭学永. 云爆战斗部基础技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.
- GUO X Y. Basic technical research on fuel air explosive warhead[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2006.
- [7] 解立峰, 郭学永, 果宏, 等. 燃料-空气云雾爆轰的直接引爆实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(1): 78-80.
- XIE L F, GUO X Y, GUO H, et al. Experimental study on the direct initiation of detonation in fuel-air sprays [J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(1): 78-80.
- [8] 孙业斌, 惠君明, 曹欣茂. 军用混合炸药[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995: 517-529.
- [9] 王云艳, 张奇. 燃料空气炸药研究中几个问题[J]. 弹箭与制导学报, 2002, 22(3): 150-152.
- WANG Y Y, ZHANG Q. Some problems in research on fuel air explosive [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2002, 22(3): 150-152.
- [10] 沈晓波, 鲁长波, 李斌, 等. 液体燃料云雾爆轰参数实验[J]. 爆炸与冲击, 2012, 32(1): 108-112.
- SHEN X B, LU C B, LI B, et al. An experimental study of detonation parameters of liquid fuel drops cloud [J]. Explosion and Shock Waves, 2012, 32(1): 108-112.
- [11] 贵大勇, 冯顺山, 刘吉平. 高威力 FAE 液态燃料的优化选择[J]. 火炸药学报, 2002(2): 14-16, 25.
- GUI D Y, FENG S S, LIU J P. The optimization selection of liquid fuels for high power FAE [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2002(2): 14-16, 25.
- [12] 贵大勇, 王海福, 冯顺山. 固液装药结构的 FAE 爆炸抛散试验研究[J]. 弹箭与制导学报, 2002, 22(2): 42-44, 49.
- GUI D Y, WANG H F, FENG S S. Experimental study on explosive dispersion of solid-liquid fuels for FAE devices with a special charge structure [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2002, 22(2): 42-44, 49.
- [13] 惠君明, 张正才. 提高 FAE 威力的研究(II): 云雾起爆与爆轰的讨论[J]. 南京理工大学学报, 1995, 19(6): 493-496.
- HUI J M, ZHANG Z C. Study on increasing the power of FAE(II): the discussion of cloud initiation and detonation [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 1995, 19(6): 493-496.
- [14] 郭学永, 惠君明, 解立峰. FAE 云雾成长过程的试验研究[J]. 弹箭与制导学报, 2005, 25(4): 534-536, 539.
- GUO X Y, HUI J M, XIE L F. Experimental study on the process of fuel cloud formation [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2005, 25(4): 534-536, 539.
- [15] 张陶, 惠君明, 郭学永, 等. 燃料空气炸药爆炸场参数的试验研究[J]. 火炸药学报, 2003, 26(2): 13-15.
- ZHANG T, HUI J M, GUO X Y, et al. Experimental investigation of parameters of the FAE blast field [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2003, 26(2): 13-15.
- [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, 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.
- [17] 秦友花, 周听清, 沈兆武, 等. 小药量新型燃料空气炸药爆炸效应的试验研究[J]. 火炸药学报, 2002(3): 7-8.
- QIN Y H, ZHOU T Q, SHEN Z W, et al. Experimental study on unconfined volume explosion effects of low-mass new fuel air explosives [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2002(3): 7-8.
- [18] 陈明生, 李健平, 白春华. 非圆截面云雾爆炸超压场数值模拟[J]. 含能材料, 2015, 23(5): 484-489.
- CHEN M S, LI J P, BAI C H. Simulation of explosion overpressure distribution for non-circular cross-section cloud [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2015, 23(5): 484-489.
- [19] 张玉磊. 三类炸药的爆炸参数与毁伤特性研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2011.
- ZHANG Y L. The study of blast field parameters and damage characteristics of three kinds of explosives [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2011.