

新型扫雷装药爆炸场特性分析及应用*

吴克刚^{1,2}, 王博²

(1. 中南大学资源与安全工程学院, 湖南长沙 410083; 2. 国防科技大学军事基础教育学院, 湖南长沙 410072)

摘要:基于爆破法扫雷爆破筒扫雷作用原理,设计了8.2 kg一次引爆型固态FAE扫雷装置。通过改变起爆位置和设置方式,多次野外近地面爆炸试验,采用反射压力传感器在装药正向与侧向离爆点不同位置进行压力测试,同时在正向测线压力传感器的对应位置设置某型防步兵地雷,得到爆炸场不同位置处的爆炸参数以及防步兵雷扫雷范围。结果表明:水平设置扫雷装药的扫雷范围明显大于垂直设置的装药,最佳炸高约为0.60 m;且其爆炸场正压区作用时间曲线呈“V”形,产物作用范围达63倍装药半径,与等当量的TNT的作用时间有明显的优势;本装置的扫雷范围约为目前扫雷爆破筒爆破扫雷范围的1.8~3.85倍,正向可靠扫雷范围可达其装药半径的77倍,侧向达69倍。由于该装药爆炸作用区域正压作用时间明显加长,因此有利于各种地雷的清除,是一种潜在高效的爆破法扫雷装药。

关键词:爆破法扫雷;固态FAE装药;爆炸场;扫雷

中图分类号:U663 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2021)02-148-07

Analysis and application of explosion field characteristics of new mine clearance charge

WU Kegang^{1,2}, WANG Bo²

(1. College of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Undergraduate School, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Based on the principle of the function of mine clearance by the way of blasting tube, the 8.2 kg solid-state FAE (fuel air explosive) mine clearance device was designed. By changing the initial explosive position and the method of setting up, in the multiple field near ground explosion tests, the stress tests were conducted by adopting reflection pressure sensor to test forward and lateral pressure from different explosive locations, at the same time a certain type of anti-infantry mines in the corresponding burst position of the forward line pressure sensor was set, and the explosive parameters in different location's explosive field and the scope of anti-infantry's mines clearance was obtained. Results show that the clearance range of the horizontal charge was significantly larger than that of the vertical charge, and the optimal blast height was about 0.60 m. Moreover, the acting time curve of the positive pressure zone of the explosion field is of "V" type, and the acting range of the product is up to 63 times of the charging radius, which has obvious advantages over the acting time of equivalent TNT. The mine clearance range of this device is about 1.8~3.85 times of the current mine clearance range of blasting tube blasting, the forward reliable mine clearance range can be 77 times of the charging radius, and the side can be 69 times. Since the positive pressure action time of the explosive zone is significantly longer, so it is beneficial to the clearance of all kinds of mines, and it is a potentially efficient humanitarian mine-clearing charge.

Keywords: explosive method of mine clearance; solid-state FAE charge; explosion field; mine clearance

燃料空气炸药(Fuel Air Explosive, FAE), 一直以来是世界各国研究的热点内容^[1-2]。自20世纪60年代开始,美国和苏联先后研制了型号繁多的燃料空气炸药,并相继在越南、阿富汗、海湾和车臣的多次战争中使用,引起了国际军事研究人员的注意。在2002年的阿富汗战场上,美军投入了与传统的燃料空气炸药原理相似、但杀伤力更强的一次引爆型燃料空气炸药(又称作温压炸弹),进一步吸引了世界的眼球。现今除美国、俄

罗斯外,还有英国、法国、加拿大、印度、南非等国家也在大力开展这类武器的研究,有的已装备部队。

20世纪70年代末80年代初, von Elbe 等利用三氟化氯(Chlorine TriFluoride, CTF)和三氟化溴(Bromine TriFluoride, BTF)等无机氟化物,将之喷入碳氢燃料FAE,形成了一次点火并引发爆炸^[3-4]。Stayles将燃料与起爆的化学催化剂同时抛入大气中而形成一次引爆^[5]。Lee等将二甲基

* 收稿日期:2020-04-26

作者简介:吴克刚(1975—),男,湖北仙桃人,教授,博士研究生,硕士生导师, E-mail:wu_kegang@163.com

锌喷入等摩尔的氧-乙炔混合物,也实现了引爆^[6]。莫斯科化学物理所的 Gelfand 等完成了有机硼化物和液体碳氢化合物同时被抛撒到空气中导致自点火的实验研究^[7]。一次引爆型点火方法逐步完善,不过,由于气态混合物在储存等应用中存在较大的问题,研究者转向固态云爆剂的研究。

第3代 FAE 是固态 FAE^[8],它是在一次引爆型液态和液-固 FAE 基础上发展起来的一种新云爆剂,它的物理性状很稳定,原材料来源广泛,成本低,并且有效克服了前面两代 FAE 易发生沉淀分层,不便于制作加工及储运,因装药分布不均匀,易产生弹的偏心效应等问题,是当今新的 FAE 研究热点。

国内在 20 世纪 90 年代开始,中国科技大学的徐胜利等^[9]、北京理工大学的白春华等^[10-11]、南京理工大学的王伯良等^[12],也大力研究和发了一次引爆型 FAE,燃料空气炸药具有高爆热,正压作用时间长,冲量大,装药利用率高,大体积云雾爆轰杀伤面积大等特点,特别适合于毁伤大范围、大面积的目标,是一种理想的扫雷装药。固态 FAE 作为一种新云爆剂,如何充分利用其爆炸场参数及其威力的特性,将其用于扫雷,并改进设计方案,一直是科研工作者研究的热点。刘庚冉等就固态燃料空气炸药空爆问题进行了实验研究^[13],国内部分学者将对固态 FAE 应用于地雷场也做过一些有益的探索,相关研究表明,在相同空间位置上,固态 FAE 爆炸场超压峰值均高于等质量的 TNT,FAE 爆炸场正压作用时间相对较长,是一种较理想的扫雷装药,但对扫雷装置的研究很少。

本文在文献[12]以及已有的某型扫雷爆破筒装药设计的基础上,通过对爆炸场冲击波峰值超压、正压作用时间、比冲量等重要参数指标来定量分析固态 FAE 近地面爆炸场的特性,结合实际模拟扫雷对比实验,设计某款扫雷装置,寻求固态 FAE 扫雷装置最佳设置情况与扫雷特性的综合平衡。

1 理论基础

目前还没有系统的理论来支撑固态 FAE 爆炸场参数的理论计算,但仍可以参考以往猛炸药爆炸冲击波作用原理^[14]。为了提高扫雷效果,扫雷装药设置成离地一定高度爆炸。爆炸产生的冲击波在空中传播,遇到地面后反射,不同的地面以及冲击波的入射角度,地面

反射的压力是不同的,冲击波参数计算方法也不一样。

如图 1 所示,扫雷装药在空气中 A 点爆炸时不同位置处所发生的情况,图中 R 表示入射波,S 表示反射波。地面 B、C、D、E、F 各点相对于爆炸中心因入射角 ϕ_0 不同,反射压力也不同。当 $\phi_0 = 0$ 时,图中 B 点产生正反射,压力要比自由场的高很多。图中 C、D 两点处,由于入射角满足 $\phi_0 < \phi_{oc}$ (ϕ_0 表示入射角, ϕ_{oc} 表示马赫反射临界角),只发生规则反射。当 $\phi_0 > \phi_{oc}$ 时,图中 E、F 两点处产生马赫反射,反射压力比入射的更高。因此,装药在空气中爆炸时,地表面不同位置处发生各种形式的反射。可以利用冲击波的这种反射特性,使扫雷装药在距离地面合适的高度爆炸,以达到最佳破坏效应。

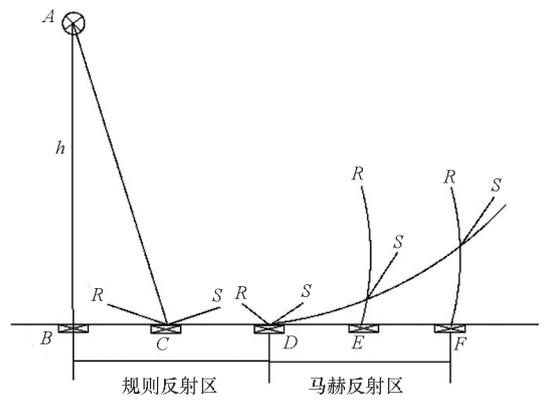


图 1 空中爆炸地面各点反射图

Fig. 1 Reflectance map of ground points of air explosion

对于正反射的压力,需要知道入射压力,其压力与 TNT 球形装药在无限空气介质中爆炸时,空气冲击波峰值超压计算可表示为:

$$\Delta p_m = \frac{0.084}{\bar{r}} + \frac{0.27}{\bar{r}^2} + \frac{0.7}{\bar{r}^3}, 1 \leq \bar{r} \leq 15 \quad (1)$$

式中: $\bar{r} = \frac{r}{\sqrt[3]{C}}$; Δp_m 表示无限空中爆炸时冲击波的峰值超压,单位为 MPa; C 为装药量,单位为 kg; r 为测量点至爆炸中心的距离,单位为 m; \bar{r} 为测量点至爆炸中心的比例距离,单位为 $m/kg^{1/3}$ 。

在无限空气中爆炸时,装药的比例高度需满足:

$$\frac{H}{\sqrt[3]{C}} \geq 0.35 \quad (2)$$

式中, H 为装药中心离地面的高度,单位为 m。

当装药在刚性地面爆炸时,刚性地面完全反射爆炸能量,在这种情况下,取反射系数 2,可得:

$$\Delta p_{mgr} = \frac{0.106}{\bar{r}} + \frac{0.43}{\bar{r}^2} + \frac{1.4}{\bar{r}^3} (1 \leq \bar{r} \leq 15) \quad (3)$$

式中: $\bar{r} = \frac{r}{\sqrt[3]{C}}$, 意义与前面相同; S 为入射波; R 为反射波; Δp_g 为炸药在普通土壤地面爆炸时冲击波的峰值超压, 单位为 MPa。

空气冲击波反射后的压力与冲量的计算如下:

1) 正反射

$$\Delta p_2 = 2\Delta p_1 + \frac{6\Delta p_1^2}{\Delta p_1 + 7p_0} \quad (4)$$

式中, Δp_1 表示入射波超压, Δp_2 表示反射波超压, p_0 表示大气压。

2) 规则反射

$$\Delta p_2 = 10 \sqrt{\frac{C}{r^3}} = 10\bar{r}^{-\frac{3}{2}},$$

$$0.1 \times 10^5 \text{ Pa} < \Delta p_2 < 2.5 \times 10^5 \text{ Pa} \quad (5)$$

式中, Δp_2 表示反射波超压。

3) 马赫反射

经验公式:

$$\Delta p_m = \Delta p_{mgr} (1 + \cos\varphi_0) \quad (6)$$

式中: Δp_m 为峰值超压; Δp_{mgr} 为刚性地面爆炸时空气冲击波的峰值超压。

冲量的实验结果:

$$i = i_{+c} (1 + \cos\varphi_0), \quad 0^\circ \leq \varphi_0 \leq 45^\circ \quad (7)$$

$$i = i_{+c} (1 + \cos\varphi_0), \quad 45^\circ \leq \varphi_0 \leq 90^\circ \quad (8)$$

式中, i_{+c} 为地面爆炸时的冲量, 按 r 取从爆心到该点的直线距离进行计算。

爆炸高度对地面的反射波压力有显著的影响。一方面, 高度增加, 表明离爆心越远, 入射波压力减少; 另一方面, 引起了 ϕ_0 和 ϕ_{0c} 的减少, 使反射波压力增加。炸药在离刚性地面不同高度爆炸, 不同水平距离上产生的地面超压也会不同, 因此, 对一定的反射波压力, 存在一个最有利的爆炸高度, 公式^[15]如下:

$$H_w = 3.2 \sqrt[3]{\frac{C}{\Delta p_2}} \quad (9)$$

式中: H_w 为产生一定反射波压力 Δp_2 时的最有利高度(单位为 m); Δp_2 为破坏目标的反射波压力(以 10^5 Pa 为计量单位); C 为炸药质量(单位为 kg)

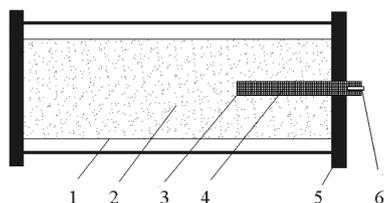
根据上述爆炸作用原理, 在爆炸试验设计时就应考虑炸高对地面爆炸作用的效应。固态 FAE 爆炸特性要求装置设置应充分考虑云雾扩散的作用, 而把炸高作为主要试验参数。

2 实验装置及测试系统

2.1 实验装置

一般的扫雷爆破筒, 采用的炸药是 TNT, 有起

爆结构与主装药结构。本次实验, 采用固态 FAE 为主装药, 装置结构如图 2 所示, 实验用的 FAE 弹体外形设计为圆柱形, 装置外壳及中心药柱外壳均为 PVC 薄壁圆筒, 圆筒壁厚 3 mm, 装置外壳长度为 735 mm, 直径为 104 mm, 中心药柱长度为 480 mm, 直径为 25 mm, 中心管上下端口用薄壁材料封闭固定, 中心药柱位于云爆剂中心, 中心药柱为 RDX, 质量为 300 g, 云爆剂质量为 8.2 kg, 装药密度为 1.343 g/cm^3 。装置外壳两端用钢制支架固定, 采用 8 号电雷管由中心装药一次引爆。试验时, FAE 装置放置在一定高度的底架上以设置相应的炸高。图 2(a) 为固态 FAE 装置结构示意图, 各部名称已标注, 结构尺寸前面已描述, 图 2(b) 为固态 FAE 装置实物, 图为装置离地面一定高度水平放置的情况。



1—装置外壳; 2—云爆剂; 3—中心装药外壳;
4—中心药柱; 5—支架; 6—雷管孔。

(a) 结构图

(a) Structure picture



(b) 实物图

(b) Model picture

图 2 固态 FAE 装置结构图及实物图

Fig. 2 Structure and physical picture of solid FAE device

2.2 测试系统

由 9 个已标定好的美国 PCB PIEZOTRONICS 压电式压力传感器、1 台 KD5010 电荷放大器以及 8860-50-HIOKI 存储记录仪组成了压力测试系统, 当爆轰波或冲击波超压信号传到压力传感器时, 传感器将压力信号转变为电荷信号, 然后经电荷放大器转换为相应的电压信号, 再经数据采集系统采集储存, 由计算机对数据分析处理, 就可以得到相应的压力信号随时间变化曲线, 以及爆轰波的各项参数。压力测试系统构成如图 3 所示。装药中心至各传感器距离如表 1 所示。

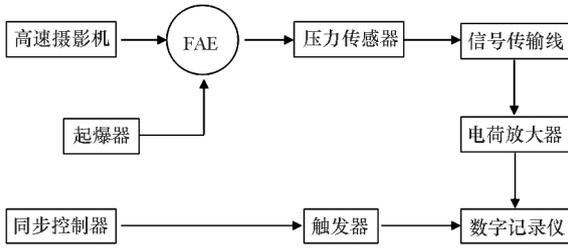


图 3 压力测试系统构成

Fig. 3 Structure of pressure test system

表 1 传感器至装药中心距离

Tab. 1 Distance from sensor to charge's central

传感器	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#
爆心距/m	3.0	3.3	3.6	4.0	5.0	3.3	3.6	4.0	1.75

在地面上,沿着 FAE 的轴向,左方布置 1 个传感器,右方布置 3 个传感器,沿着 FAE 的径向在前方不同位置处布置 5 个传感器,传感器距爆心的距离如图 4 所示。

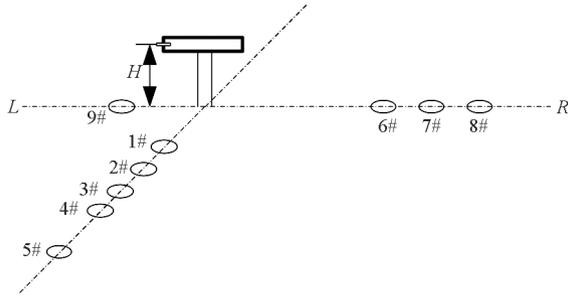


图 4 压力传感器安装位置示意图

Fig. 4 Pressure sensor installation location's picture

光测系统采用 Photron 公司的 FASTCAM SA-Z 高速彩色摄影系统,高速摄影仪在爆炸安全距离外安放,正对爆心,选用 2000 帧/s 的拍摄频率。

3 测试结果与分析

3.1 爆炸场冲击波超压

为比较固态 FAE 处于不同设置状态时近地面爆炸场的特性,野外实验选取 4 种不同设置状态 FAE 爆炸对比实验。为减小实验误差,提高实验的可靠性,典型设置状态进行了二轮实验,并对实验结果取平均值。图 5 为 4 种不同设置状态的云爆弹分别在正面距离爆心 3 m、3.3 m、3.6 m、4 m、5 m 位置等处,以及侧面 3.3 m、3.6 m、4 m 等处分别测得的地面反射峰值超压值 Δp , r 为测点距爆心的距离。

由图 5 可看出,云爆弹爆炸后中远场的峰值超压衰减慢,明显优于等质量的 TNT 装药爆炸超压,可由式(4)、式(5)计算得到。固态 FAE 与等质量的 TNT 相比,前者的峰值超压在 3 m 处为后者的 1.31 ~ 5.67 倍;在 4 m 处为后者的 1.10 ~ 3.49 倍;在 5 m 处为后者的 1.23 ~ 2.95 倍。所得实验结果比文献[12]所得的固体云爆剂平均 TNT 当量为 1.25 的结果大,可能是文献[12]所制备的固体云爆剂具有较强的水下爆炸能量输出特性,而并没有做空气中爆炸能量输出实验。

如图 5 所示,同样的装药条件下,装药径向设置的冲击波作用效果要优于轴向设置的冲击波作用效果,其中在轴向设置的情况下,底端点火爆破效果要优于顶端点火爆破效果。实验表明,对于扫雷装药的设置应采用径向水平设置且最佳炸高约为 0.6 m。因本文主要关心爆炸扫雷范围,图 5 中曲线仅反映了云爆弹爆炸场中远场空气冲击波峰值超压随距离变化的特性,从量测的超压参数与距离衰减结果可以看出区域内并未发生马赫反射。

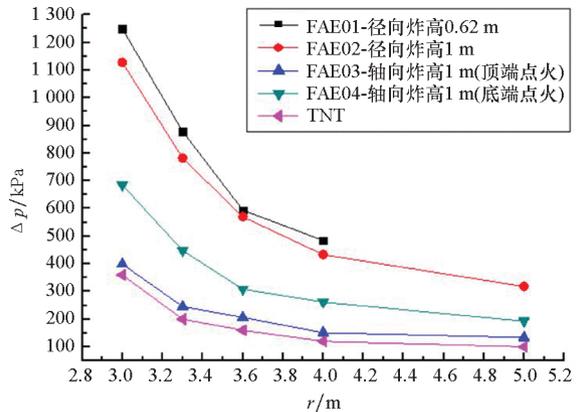


图 5 峰值超压随距离变化曲线

Fig. 5 Variation curve of peak over-pressure with distance

3.2 正压区作用时间

爆炸冲击波的另一个重要特征参数就是正压区作用时间,它是衡量炸药爆炸威力的另一项重要指标,是指某测点位置的压力在炸药爆炸后从峰值超压开始衰减至初始压力 p_0 的时间历程。根据爆炸相似率可求得正压作用时间^[16]:

$$\frac{t_+}{\sqrt[3]{\frac{r}{W_T}}} = 1.35 \left[\frac{r}{\sqrt[3]{\frac{r}{W_T}}} \right]^{1/2} \quad (10)$$

式中: t_+ 为正压区作用时间,单位为 ms; W_T 为测点的峰值超压所对应的 TNT 当量,单位为 kg; r 为测点至爆炸中心的距离,单位为 m。

图 6 为 4 种装药相同,炸高设置和起爆方式不同的固态 FAE 与 TNT 在不同位置处的正压作用时间,其中 TNT 的正压作用时间由式(10)计算得到。由图 6 可以看出,比较固态 FAE 与 TNT 的正压区作用时间,固态 FAE 的正压区作用时间明显长于 TNT 炸药,前者的正压区作用时间在 3 m 处是后者的 1.33 ~ 4.27 倍;在 4 m 处是后者的 1.11 ~ 1.37 倍;在 5 m 处是后者的 1.21 ~ 3.15 倍。

固态 FAE 的爆轰过程与高能炸药 TNT 完全不同,燃料粒子在初始装药爆轰后一边抛撒成雾,一边由内向外被激发云雾爆轰,爆轰范围远远超出其原来装药边界。因此,在水平设置的固态 FAE 爆轰区域的近区由于云雾爆轰的原因,正压作用时间反而较大,呈“V”形。这是固态 FAE 爆轰区别于常规炸药的明显特点,然而垂直设置的固态 FAE 的增加正压作用时间增加量有限,如图 6 所示。另外从正压作用时间的曲线可以看出,在 3.3 m 处,装置水平与垂直设置时,正压区作用时间都呈下降趋势,形成较为明显的拐点。分析原因,可能是在中心装药爆炸后,前驱冲击波使固态 FAE 抛撒开,携裹着 FAE 中的高能炸药与燃料气体及爆轰产物迅速向外扩展,并将 FAE 中的高能炸药引爆,爆轰产物到达一定范围后,速度减缓,燃料气体在外界不断加入的氧气作用下进一步发生剧烈的爆轰反应,为前驱冲击波持续提供能量。前期爆轰产物的作用范围在 3.3 m 左右,对比装置中的装药半径,相当于装药半径的 63 倍。

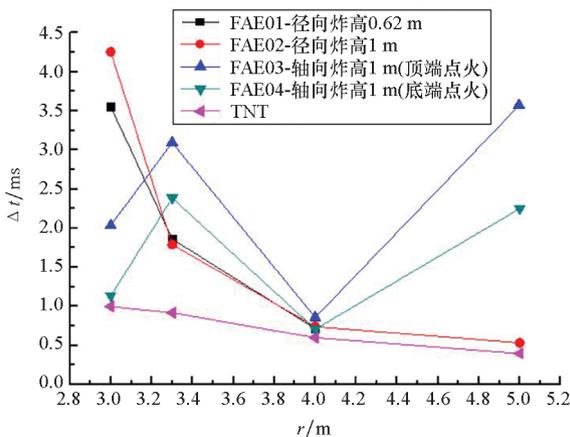


图 6 不同位置处的正压作用时间

Fig. 6 Positive pressure acting time in different location

3.3 比冲量

炸药爆炸作用是个瞬态过程,其作用效应还与比冲量有关^[17]。固态 FAE 爆炸场的比冲量可

由实验测得的超压曲线与正压区作用时间直接计算确定,而 TNT 的冲量可以参考式(7)和式(8)进行计算。

固态 FAE 与等质量 TNT 在不同位置处的比冲量值见图 7。由图 7 可以看出,对比固态 FAE 与 TNT 的比冲量,前者的比冲量在 3 m 处为后者的 1.31 ~ 4.5 倍;在 4 m 处为后者的 1.33 ~ 1.63 倍;在 5 m 处为后者的 1.74 ~ 2.12 倍。可以看到,固态 FAE 的比冲量在中远场明显大于等质量 TNT,可见固态 FAE 具有中远场超压高及正压区作用时间长的特点。

此外,由在侧向布置的传感器可发现,在 3.6 m 处的比冲量也能达到 267.82 kPa · s,这表明采用固态 FAE 装药爆炸后,由于云雾扩散作用,侧向的扫雷效果也不错。

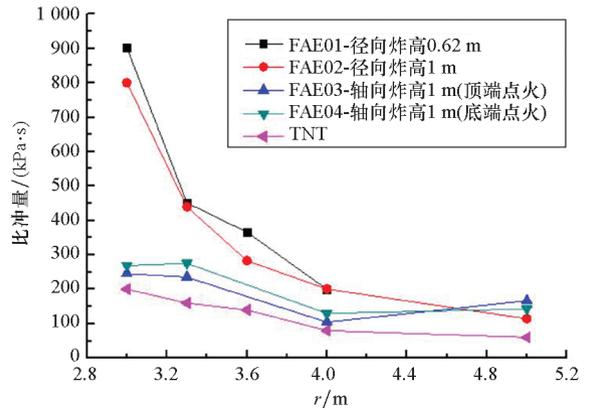


图 7 不同位置处的比冲量

Fig. 7 Specific impulse in different location

3.4 扫雷应用分析

爆破法扫雷的爆破筒间距通常设为 4 m,通过爆炸冲击波的叠加作用,可以扫除爆破筒垂直轴向 2 m 范围的普通防步兵地雷。在本实验中,单发固态 FAE 的扫雷范围如图 8 所示,最远处 5 m 埋设了某防步兵地雷,图 8(a)中用红色标示出埋雷位置,爆炸后,图 8(b)最远处的地雷均被触发,达到了 5 m 范围。若分别将固态 FAE 和常规炸药 TNT 用于扫除某常见防步兵地雷(设该雷诱爆冲量为 78.5 Pa · s^[17]),按此常见某型防步兵地雷诱爆冲量标准,可推算出固态 FAE 和装药为 TNT 的某型扫雷爆破筒的最大扫雷半径与最大扫雷面积,如表 2 所示。由表 2 可知,对扫除某型防步兵地雷来说,固态 FAE 的最大扫雷面积是装药为 TNT 的某型扫雷爆破筒的 1.80 ~ 3.85 倍。



(a) 装药爆炸前地雷埋设状态

(a) Landmine laying before charge explosion



(b) 装药爆炸后地雷状态

(b) Mine state after charge explosion

图8 固态FAE扫雷实验

Fig. 8 Solid-state FAE mine clearance experiment

表2 防步兵地雷的最大扫雷半径及最大扫雷面积

Tab.2 The maximal mine clearance radius and maximal mine clearance area

装药(8.2 kg)	防步兵地雷	
	r_{\max}/m	S_{\max}/m^2
TNT	2.21	17.68
径向炸高 0.62 m	5.08	68.10
径向炸高 1 m	4.87	55.50
轴向炸高 1 m(顶端点火)	3.86	35.50
轴向炸高 1 m(底端点火)	3.39	31.86

4 结论

1)由 8.2 kg 一次引爆型固态 FAE 与等质量 TNT 近地面不同设置的静爆对比实验可知,水平 0.6 m 左右炸高的爆炸作用效果最好。所测得的

爆炸场各参数明显优于等量的 TNT 爆炸参数。

2)在水平设置的固态 FAE 爆轰后近区的正压作用时间反而长,整个正压作用时间与距离的关系呈“V”形,这是固态 FAE 爆轰区别于常规炸药的明显特点,然而垂直设置的固态 FAE 增加正压作用时间的增加量有限。另外,从正压作用时间的曲线可以看出,爆轰产物的作用范围可达 3.3 m 左右。相当于装药半径的 63 倍。

3)按某常见的防步兵地雷的诱爆冲量标准,固态 FAE 扫雷效率约为等质量 TNT 的 1.80 ~ 3.85 倍,且利用固态 FAE 正压区作用时间较长的特点对扫除各种防步兵地雷非常有益。

参考文献(References)

- [1] 王志军,尹建平. 弹药学[M]. 北京:北京理工大学出版社,2005.
WANG Zhijun, YIN Jianping. Ammunition [M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 2005. (in Chinese)
- [2] 贾飞. 云爆剂抛撒对二次起爆型云爆弹威力的影响研究[D]. 南京:南京理工大学,2014.
JIA Fei. Study on the influence of cloud explosive agent dispersion on the power of secondary initiation cloud explosive bomb [D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [3] VON ELBE G. Chemical initiation of FAE clouds[R]. AD A061899 (AFOSR - TR - 78 - 1479), 1978.
- [4] VON ELBE G V, MCHALE E T. Chemical initiation of FAE clouds [R]. AD A096415 (AFOSR - TR - 81 - 0255), 1981.
- [5] STAYLES D C. Method of generating single-event unconfined fuel-air detonation; US 4463680[P]. 1984 - 08 - 07.
- [6] CARNASCIALI F, LEE J H S, KNYSTAUTAS R, et al. Turbulent jet initiation of detonation [J]. Combustion and Flame, 1991, 84(1/2): 170 - 180.
- [7] GELFANDB E, TSYGANOV S A, SLUTSKII V G, et al. Dispersion and self-ignition characteristics of boron organic compounds behind shock waves [J]. International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion, 1993: 196 - 202.
- [8] 许会林,汪家骅. 燃料空气炸药[M]. 北京:国防工业出版社,1980.
XU Huilin, WANG Jiahua. Fuel air explosive[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1980. (in Chinese)
- [9] 徐胜利,刘家聪,刘荣海,等. 燃料空气炸药(FAE)装置爆炸场研究[J]. 实验力学,1995,10(3): 203 - 209.
XU Shengli, LIU Jiacong, LIU Ronghai, et al. Investigation on explosion of a fuel air explosive device [J]. Journal of Experimental Mechanics, 1995, 10(3): 203 - 209. (in Chinese)
- [10] 张奇,白春华,刘庆明,等. 一次引爆型燃料空气炸药装置结构的实验研究 [J]. 兵工学报, 2001, 22(4): 560 - 562.
ZHANG Qi, BAI Chunhua, LIU Qingming, et al. Experimental investigation of explosion effects of fuel air explosive by various device structures [J]. Acta Armamentarii, 2001, 22(4): 560 - 562. (in Chinese)

- [11] 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 Ye, BAI Chunhua, LI Jianping. Influence of shell structure on dispersing velocity of fuel-air mixture[J]. Acta Armamentarii, 2017, 38(1): 43-49. (in Chinese)
- [12] 刘伟. 固体云爆剂的配方优化及性能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
LIU Wei. Formulation optimization and performance study of solid cloud explosive[D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [13] 刘庚冉, 周凯元, 曹保榆, 等. 固态燃料空气炸药空爆实验研究[J]. 实验力学, 2007, 22(5): 489-494.
LIU Gengran, ZHOU Kaiyuan, CAO Baoyu, et al. Experimental study on the blast effect of the solid fuel air explosive in free air[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2007, 22(5): 489-494. (in Chinese)
- [14] 张国伟, 韩勇, 苟瑞君, 等. 爆炸作用原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
ZHANG Guowei, HAN Yong, GOU Ruijun, et al. Principle of explosion action[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [15] 叶序双. 爆炸作用基础[M]. 南京: 解放军理工大学工程兵工程学院, 2001: 316-317.
YE Xushuang. Basis of explosion[M]. Nanjing: PLA Polytechnic University Engineering, 2001: 316-317. (in Chinese)
- [16] ZHANG Q, BAI C H, DANG H Y, et al. Critical ignition temperature of fuel-air explosive[J]. Defence Science Journal, 2004, 54(4): 469-474.
- [17] 谢立军. 固态燃料空气炸药近地面爆炸场威力特性分析及扫雷应用[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2009, 10(增刊): 52-56.
XIE Lijun. Power characteristics of solid FAE's blast field near ground and its application in mine sweeping[J]. PLA University of Technology (Natural Science Edition), 2009, 10(Suppl.): 52-56. (in Chinese)