

文章编号: 1006-9941(2012)05-0605-05

光电干扰箔片抛撒与扩散试验研究

黄蓓, 王浩, 王帅, 郭锦炎

(南京理工大学能源与动力工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 采用两种状态箔片(直径 49.5 mm, 厚 0.15 mm, 1 g; 直径 47 mm, 厚 0.05 mm, 0.5 g)研究了光电干扰箔片抛撒与云团扩散问题。设计了试验模型、试验方案并提出网格图层的数字图像处理方法。通过抛撒各阶段云团发展状态的高速数字图像记录和参数统计, 清晰地反映了装填密集度较高情况下的箔片出舱、分离、扩散动态过程。提取单个箔片运动轨迹, 显示出箔片的速度衰减与沉降特性。对散布云团结构进行统计分析, 结果表明大数量箔片抛撒在气流作用下由尾部开始分离扩散, 并出现集束段断层, 各集束段时序扩散, 形成锥形云团, 首尾融合。在此基础上建立了锥体云团膨胀模型, 有效描述出大数量箔片云团膨胀过程及其发展形态。

关键词: 兵器发射; 箔片; 光电干扰; 抛撒; 扩散

中图分类号: TJ55; V211.71

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2012.05.019

1 前言

新一代无源光电干扰系统通过抛撒大数量光电介质, 在空中形成干扰云团, 模拟载机的光谱特性和运动特性, 对导弹及电子跟踪设备达到诱骗效果, 系统要求快速分离形成干扰云团并且延长滞空时间。类似于箔片的薄平物体, 其质量轻、厚径比小, 具有独特的气动力特性, 滞空能力强^[1], 对系统干扰效能要求有很好的适应性, 故面源式的光电干扰系统受到广泛关注。箔片的分离扩散过程也是系统的工作过程, 决定了干扰效能, 是系统设计的关键技术之一。区别于多相射流流场, 箔片的抛撒仅提供其初始速度, 箔片与流场相对运动的气动力耦合以及箔片间的相互干扰作用, 是多体分离并形成扩散云团的主要原因。物体密集度较高时, 不仅存在多体的相对运动及气动力干扰问题, 甚至可能产生物体间的碰撞接触等直接相互作用, 分离过程复杂, 涉及到非定常流场变化、湍流作用等, 描述此类流场特性难度较大。目前对于干扰云团扩散运动特性的相关研究均是定性的分析^[2-3], 并没有对抛撒扩散过程从细节到整体的精确描述。本试验引入活塞

式抛撒结构, 有效控制抛撒初速及抛撒初始取向, 针对大数量箔片的抛撒分离问题, 提出集束段和锥体云团模型, 发展了抛撒动态分离过程试验研究技术和数据处理方法。

2 试验模型及试验方案

2.1 抛撒试验模型

设计地面静态抛撒试验系统, 依靠火药燃烧释放燃气推动舱体内材料抛离母体, 抛撒机构如图 1 所示。根据系统特点并结合内弹道计算, 合理设计系统结构尺寸及装填参数^[4]。试验采用两种状态箔片装配, 以对比不同材质及尺寸的箔片分离扩散状态。材料 1 箔片直径 49.5 mm、厚度 0.15 mm, 单片质量 1 g; 材料 2 箔片直径 47 mm、厚度 0.05 mm, 单片质量 0.5 g。

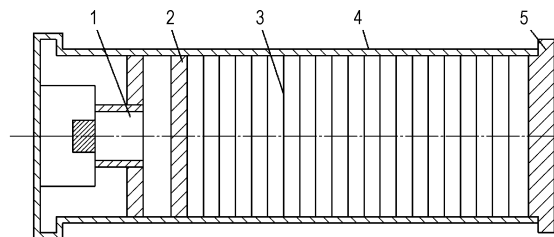


图 1 活塞式抛撒机构示意图

1—燃烧室, 2—活塞, 3—箔片集束, 4—母弹壳体, 5—端盖

Fig. 1 Schematic drawing of the piston dispersing device

1—powder chamber, 2—piston, 3—foil cluster, 4—shell, 5—cover

收稿日期: 2011-09-06; 修回日期: 2011-12-09

作者简介: 黄蓓(1984-), 女, 博士研究生, 主要从事兵器发射理论与技术研究。e-mail: huangbei1984@163.com

通讯联系人: 王浩(1961-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事兵器发射理论与技术研究。e-mail: wanghao@mail.njust.edu.cn

2.2 试验方案

针对箔片集束分离扩散流场特性,根据研究内容和试验目的制定了如下试验方案:采用两种材料箔片装填,相同装药条件下分别静态抛撒不同材质箔片,数字图像记录箔片集束分离过程运动状态、箔片云团扩散过程、箔片云团沉降过程、箔片云团截面膨胀过程;记录落点散布状态,以研究箔片云团散布结构。由于本试验设计为静态抛撒试验,为获得箔片抛撒散布运动状态,需要尽量排除外界扰动因素,故选择无风条件下的开放空间,发射轴向允许最大距离为40 m,纵向距离大于5 m。

2.3 测试系统及数据处理方法

数字图像采集系统用于实时记录箔片集束抛撒分离、扩散过程运动状态,并依据所拍摄的图像进行数据处理和分析。为分别获得箔片集束分离阶段、扩散阶段、沉降阶段以及截面膨胀状态,采用3台高速摄像机进行记录,位置分别为舱口、云团主平面、云团径向截面。舱口位置高速摄像机拍摄幅数为2000帧,云团主平面高速摄像机拍摄幅数为1000帧,云团径向截面高速摄像机拍摄幅数为1000帧。

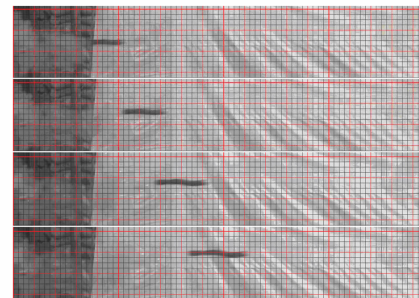
箔片由 $30 \sim 40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的初始速度以轴向 0° 发射角抛撒出舱。将沿抛撒轴线方向的铅垂面定义为主平面,以主平面参数作为主要依据分析云团形成过程状态。在预估箔片集束运动经过的中心位置处拍摄标尺,将拍摄记录的每幅图片与标尺按相应的长度比例关系绘制网格图层,以描述物体的运动状态。由于箔片集束轴向运动距离较大,云团截面拍摄存在视角误差,按照初始位置标尺并不能准确描述截面膨胀参数,故根据主平面铅垂方向数据及时间同步,绘制不同时刻的截面标尺网格,获得径向截面数据。跟踪读取特征箔片不同时刻质心位置,描述流场中单个箔片的运动及姿态响应。通过对箔片集束分段跟踪,得出不同集束段的运动发展状态。

3 结果与讨论

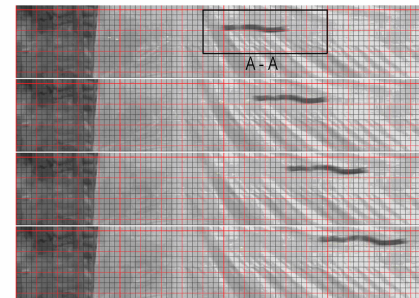
试验图像记录显示,大数量箔片的抛撒散布过程经历了直线形箔片集束、“S”形箔片集束、圆锥形箔片云团和沉降的发展过程。本文将此过程划分为出舱、分离和扩散沉降三个阶段进行分析探讨。重复多发试验,选取能够反映箔片集束分离扩散特性的一组数据列出进行分析,并统计了多发重复试验的散布特性参数进行对比。

3.1 出舱阶段

图2为箔片集束出舱阶段运动状态照片。可以看出,集束由尾部燃气推动出舱,在舱口仍然保持紧密串连状态运动,此时整体长度约为0.3 m。随着向前推进,集束松散拉长,尾部箔片开始减速分离,整体形成断层分段,每段拉伸大于0.2 m后,开始出现错位断裂,故将0.2 m定义为集束段特征长度,此长度与箔片材料特性等因素有关。将图2中A-A处放大,划分集束段如图3所示,从尾部开始将整体集束划分为三段集束段。由试验结果,尾部集束段拉伸松散更为明显,头部集束段仍然保持紧密贴合。



a. 0 ~ 0.03 s



b. 0.04 ~ 0.07 s

图2 箔片集束出舱阶段运动状态

Fig. 2 Movement of plates cluster in hatch phase

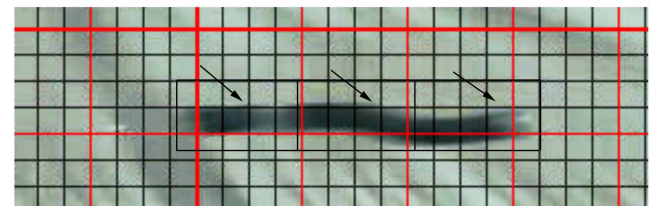


图3 三段集束段划分

Fig. 3 Three parts of cluster

3.2 分离阶段

随着各集束段逐渐拉长,气流涌入箔片间的间隙内,开始出现箔片分离现象,进入了分离阶段,如图4所示。箔片由尾部开始分离,头部集束段在尾部集束段的

分离过程中基本保持整体状态。初始划定的集束段内箔片时序分离扩散,形成了锥形分离云团。锥形云团模型如图5所示,将云团径向截面内上浮与下沉薄片的位移最大值分别定义为云团上边界与下边界,径向截面上下边界的差值定义为云团径向散布直径即锥形云团底面直径,运动过程中整体集束最前端薄片与最后端薄片的轴向位移差值定义为云团轴向散布长度。由于集束内部物质数密度较大,箔片在分离过程中产生明显的碰撞接触现象。不同初始作用力驱动赋予了箔片的初始取向分布,即形成了上浮、侧偏、下沉等分离状态。从试验结果可以看出,初始划分的三个集束段时序启动分离,但各集束段分离过程规律相似,均为松散拉伸至尾部开始分离,并且伴随着箔片间的干扰接触作用。尾部第一集束段基本完全扩散开时,中部第二集束段尾部已开始分离,两集束段锥体云团混合。

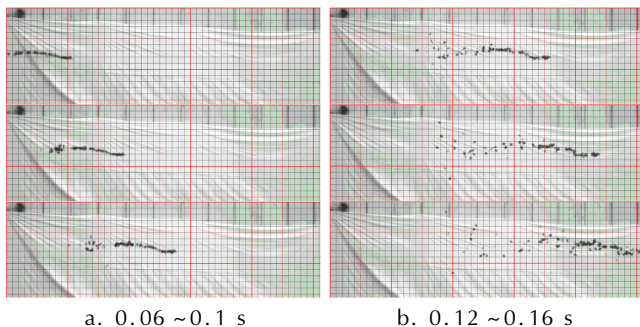


图4 箔片多体分离阶段运动状态

Fig.4 Movement of multi-plates in separating phase

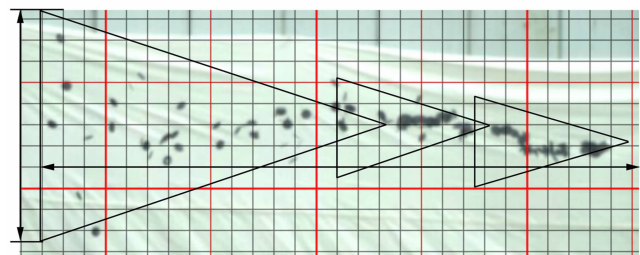


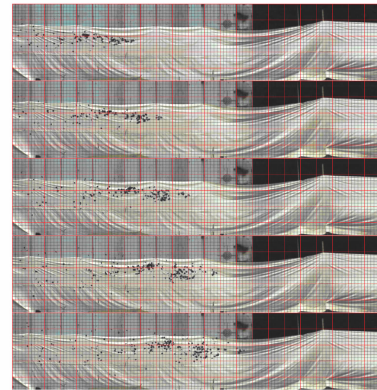
图5 锥形云团模型

Fig.5 The cone-shaped cloud model

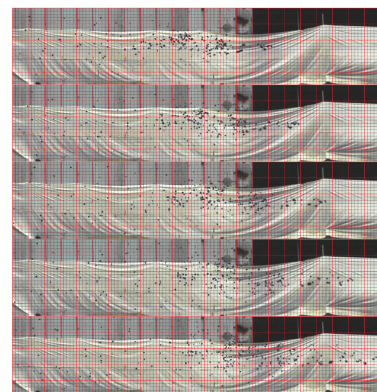
3.3 扩散沉降阶段

箔片集束经过分离阶段,形成基础锥形云团,图6记录了云团扩散阶段的发展变化情况。视场范围为12.5 m,进入视场后,尾部第一集束段已完全分离形成云团,第二集束段与第三集束段逐渐分离扩散,形态基本相似,均是由尾部开始形成锥体。在扩散过程中,各集束段头部的箔片减速较慢,追赶上前端集束段尾部并混合。部分先扩散开的箔片轴向速度减小至零,

表现为滞空停留,箔片开始沉降。



a. 0.16 ~ 0.24 s



b. 0.26 ~ 0.34 s

图6 箔片云团扩散沉降过程

Fig.6 The dispersing and sedimentation phases of plate cloud

3.4 云团截面发展状态

根据不同时刻主平面铅垂方向运动参数及时间同步,以不同比例参数绘制标尺网格描述箔片云团截面膨胀过程(图7)。从截面看,箔片由于初始分离取向的不同,呈中心向四周扩散。分离0.2 s时云团截面最大半径约0.7 m,0.3 s时云团截面最大半径约1 m。统计截面半径平均膨胀速度约为 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

3.5 箔片抛撒试验统计数据对比

针对箔片分离扩散过程运动发展状态,根据试验高速录像处理图片,统计了散布云团尺度、特征位置箔片分离轨迹、落点数据等参数进行分析对比。

(1) 出舱阶段箔片集束拉伸变化长度

根据集束出舱阶段拉伸特性,按照特征尺寸将整体集束分为了三个集束段,分别选取各集束段中部的箔片作为跟踪对象,读取集束段运动过程中的轴向坐标如图8所示。统计出舱阶段各集束段的轴向平均运动速度为:尾部第一集束段 $30.715 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,中部第二集束段 $36.43 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,头部第三集束段 $38.57 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

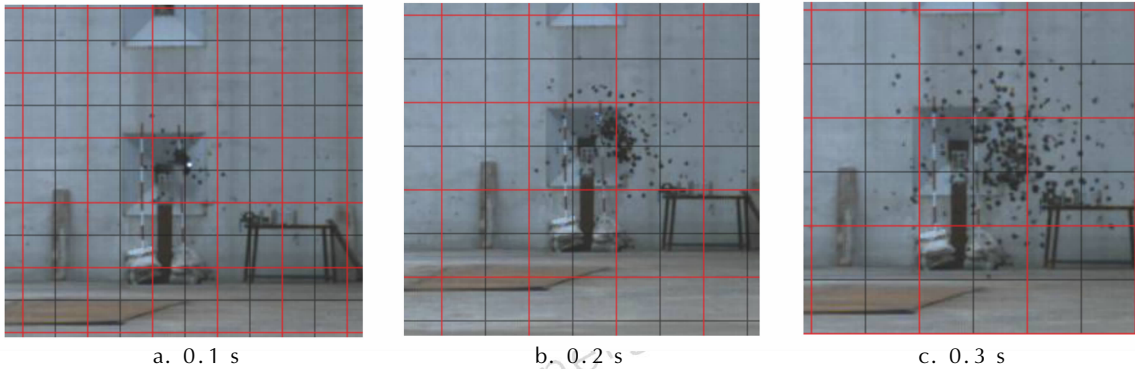


图7 截面扩散过程

Fig.7 The dispersion of cloud section

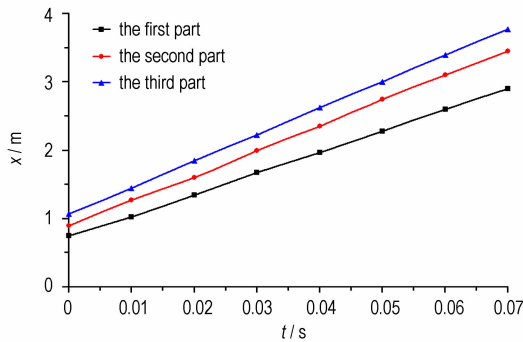


图8 不同集束段轴向坐标变化

Fig.8 Axial coordinate of different parts

(2) 尾部单个箔片运动轨迹

为研究箔片分离运动特性,由尾部分离箔片中提取出单个未受到多体碰撞干扰的箔片,记录其轨迹如图9所示。箔片进入视场时刻定义为轨迹记录的起始时刻,此时位置定义为原点。由轨迹图看,箔片在x方向即轴向位移较大,但在0.1s后速度衰减很快,最终x方向位移增量很小,表现为滞空停留。而y方向即铅垂方向运动则是线性变化,轨迹曲线斜率为箔片在y方向上的沉降速度,0.06s后箔片在y方向上表现为匀速沉降。

(3) 锥形云团描述

定义材料1箔片整体集束完全进入拍摄视场且尾部开始分离时刻为锥形云团发展过程记录初始时刻,此时整体集束轴线位置为铅垂方向初始位置。根据试验图片读取材料1箔片云团的第一集束段与第二集束段在融合前的锥体云团上下边界最大值。采用材料2箔片装填抛撒,整体集束没有出现明显断层,故将整个材料2箔片云团作为一个锥体,并读取其边界最大值。绘制出云团锥底膨胀尺度曲线如图10所示。

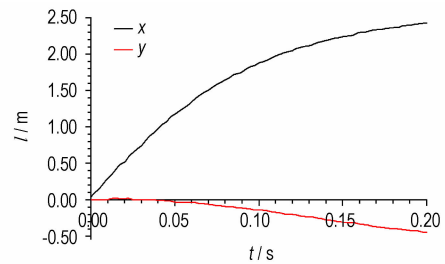


图9 箔片运动轨迹

Fig.9 The trajectory of plate

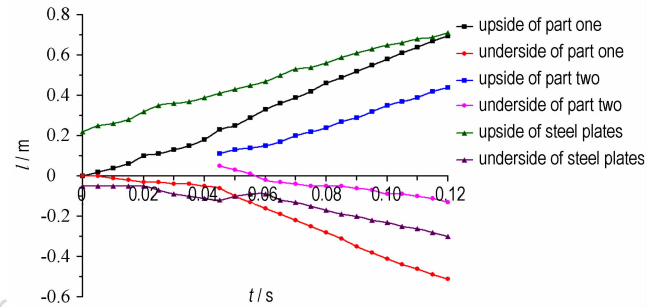


图10 锥形云团边界最大值变化

Fig.10 Cone-shaped cloud boundary statistical value

由边界最大值变化曲线可以看出,材料2因为质量较轻,沉降速度小,上浮尺度大于材料1,下沉尺度却更小。而同样的材料1箔片抛撒,位于尾部的第一集束段上浮和下沉尺度均大于位于中部的第二集束段,且扩散速度大于第二集束段。第二集束段的启动分离时刻比第一集束段滞后约0.045s,第三集束段分离起始时刻约为0.08s。由试验图片看,第一集束段头部与第二集束段尾部在0.075s时混合,即此时第一集束段头部追上第二集束段尾部扩散的箔片,两个锥形云团开始混合。初始划分出的中部第二集束段与头部第三集束段在分离扩散过程中拉伸生成了新的

段层,即第二集束段与第三集束段的交界段内发展出新的集束段。由锥体膨胀参数及轴向运动参数,即可建立散布云团模型。锥顶高度 $h_c = v_a t$, 式中, v_a 为集束段轴向运动速度, t 为时间; 锥体底面为一椭圆面, 椭圆长轴由集束段上下边界值确定 $a_c = (l_u - l_d) / 2$, 式中, l_u 为上边界最大值, l_d 为下边界最大值, 椭圆短轴由截面膨胀速度确定 $b_c = v_r t$, 式中, v_r 为径向截面膨胀速度。

(4) 落点数据

地面发射架的发射高度为 1.4 m, 记录箔片抛撒沉降至 1.4 m 的落点数据, 为云团结构分析提供参考。分别选取材料 1 和材料 2 抛撒落点散布记录各一组进行说明, 表 1 为两组落点统计数据对比。同样装药条件下, 材料 1 抛撒初速大于材料 2, 并且扩散起始位置相比材料 2 滞后。材料 2 质量轻于材料 1, 其滞空性能更好, 故主体云团沉降时间更长。不同材料的主体云团落点距母弹舱口位置有约 3 m 的差距, 材料 1 落点覆盖范围更大, 但两种材料抛撒云团径向截面散布最大半径均为 3 m。

表 1 落点统计数据对比

Table 1 Statistic data about dispersion

| materials | velocity /m · s ⁻¹ | startup point of dispersion/m | duration of descent/ms | dispersion area/m | dispersion radius of radial section/m |
|-----------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------|-------------------|---------------------------------------|
| 1 | 37 | 5 | 1200 | 8 ~ 21 | 3 |
| 2 | 30 | 2 | 1400 | 4 ~ 12.3 | 3 |

4 结 论

布撒系统将擦齐的箔片集束抛撒至空中, 经历直线形箔片串、“S”形箔片串、圆锥形箔片云团和沉降的

发展过程。本试验对整个过程进行了数字图像记录与测量, 提出网格图层方法处理数字图像, 不仅获得了细致的云团发展状态, 并且提取出单个箔片分离过程和运动轨迹。根据多次试验的统计数据, 清晰地反映了云团结构参数及发展历程。箔片集束在气流作用下从尾部开始扩散, 并出现集束段断层, 由尾部膨胀形成锥形云团, 所建立的云团模型有效描述出大数量箔片云团膨胀过程及其形态。为进一步研究箔片分离机理、多体干扰、散布特性提供了依据, 也可作为壳片分离、破片飞散等方面的研究参考。

参考文献:

- [1] Andersen A, Pesavento U, Wang Z J. Unsteady aerodynamics of fluttering and tumbling plates[J]. *Fluid Mech*, 2005, 541: 65 - 69.
- [2] 陈乃光. 光电干扰箔片云团运动规律的仿真研究[J]. 航天电子对抗, 2008, 24(5): 20 - 23.
CHEN Nai-guang. Moving characters simulation of foils cloud used in optics-electronic counter measure[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2008, 24(5): 20 - 23.
- [3] 韩朝, 赵国志, 杨志强, 等. 箔条抛撒运动特性研究[J]. 火工品, 2005(1): 5 - 8.
HAN Chao, ZHAO Guo-zhi, YANG Zhi-qiang, et al. Study on the kinematics characteristic of chaff release[J]. *Initiator & Pyrotechnics*, 2005(1): 5 - 8.
- [4] 黄蓓, 王浩, 张丁山, 等. 光电干扰箔片抛撒内弹道研究与数值仿真[J]. 弹道学报, 2010, 22(4): 73 - 77.
HUANG Bei, WANG Hao, ZHANG Ding-shan, et al. Study on interior ballistics and numerical simulation of jammer with foils[J]. *Journal of Ballistics*, 2010, 22(4): 73 - 77.
- [5] 张洋, 王元, 王丽. 沙粒蠕移运动速度测量及其统计分析[J]. 实验流体力学, 2011, 25(2): 96 - 100.
ZHANG Yang, WANG Yun, WANG Li. Statistical study on the velocity of aeolian creeping sands using high-speed digital photography[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2011, 25(2): 96 - 100.

Dispersing Experiment for Separation and Dispersion of Multi-plates

HUANG Bei, WANG Hao, WANG Shuai, GUO Jin-yan

(School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: For the issue of foils' separation and dispersion, a dispersing experiment was carried out by using two materials (diameter of 49.5 mm, thickness of 0.15 mm, 1 g; diameter of 47 mm, thickness of 0.05 mm, 0.5 g). The experimental model, testing scheme were established and gridding method about digital picture was introduced. The high-speed digital photos were analyzed combined with statistical parameters. The dynamic process was displayed fairly consisting of cast, separation and dispersion with a mass of foils. The trajectory with velocity decrease and descent movement of plate was obtained. The dynamic characteristics of dispersing cloud were statistically analyzed. The results reveal the mass of foils separated from the tail of cluster due to the aerodynamic. The cluster separates into several parts which disperse scheduling. Each part shows a cone shape based on which a cone-shaped cloud dispersing model was established. The model described the expansion and movement of cloud effectively.

Key words: armament launch; plate; electronic interference; separation; dispersion

CLC number: TJ55; V211.71

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2012.05.019