

文章编号: 1006-9941(2011)03-0310-05

液体灭火弹动态抛撒区域工程计算方法

韩宝成¹, 雷红飞², 徐豫新¹, 王树山¹

(1. 北京理工大学 爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081; 2. 中国兵器科学研究院, 北京 100089)

摘要: 针对液体灭火弹引战配合设计, 研究液态灭火剂动态抛撒面积与炸高的关系。基于液体灭火弹引战配合优化中的工程需求, 进行战斗部静态作用和模拟样弹动态抛撒试验, 根据试验现象分析灭火剂静、动态作用及抛撒过程, 在物理简化基础上, 提出液体灭火弹动态抛撒区域工程计算的数学方法, 通过不同炸高条件下液体抛撒面积的计算获得灭火剂动态抛撒面积与炸高的关系曲线, 计算结果与实验吻合良好。

关键词: 爆炸力学; 灭火弹; 动态抛撒; 抛撒面积**中图分类号:** TJ55; O389**文献标识码:** A**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.03.015

1 引言

液体灭火弹是一类特殊功效和用途的新型弹药, 以液态灭火剂为主要装填物和毁伤元素, 依靠中心爆管装药爆炸驱动液态灭火剂抛撒, 用于扑灭水中、岸滩、阵地前沿的燃油火障, 为突击登陆作战开辟通路^[1-3]。基于“以高效液态灭火剂为战斗部装填物和毁伤元素、通过中心爆管实现抛撒和壳体外表面设置预裂槽保证抛洒均匀”的战斗部基本结构^[3], 引战配合的优化设计是提高战斗部灭火效能的根本途径, 对于引战配合的核心问题在于: 引信探杆长度和战斗部加载系数 β (驱动装药与液体的质量比)的优化设计, 即灭火剂初始抛撒高度与径向抛撒速度之间的匹配。针对上述问题, 灭火弹动态抛撒区域的计算是引战配合优化设计的前提条件。爆炸作用驱动液体进行抛撒、分散的控制技术多年来一直是国内外研究的热点^[4-8], 但已有文献多集中于壳体破裂后液体的运动过程, 研究液体的初次破碎、二次破碎和云雾形成与变化等, 对液体抛撒面积及壳体破裂时间的分析少有报告, 无法满足具体实践需求。以具体工程实践为背景, 进行战斗部静态作用和模拟弹动态抛撒试验, 依据试验现象进行物理模型简化, 建立了灭火弹动态抛撒区

域工程计算的数学方法。

2 战斗部静态作用试验

2.1 实验方案

首先, 进行战斗部垂直和带落角(落角: 60°)安放静爆实验。战斗部静爆实验布置, 如图 1 所示, 将灭火战斗部放于支架上, 战斗部头部向下距地面上油盘高度为 H , 实验油盘位于战斗部一侧, 周向 180° , 径向半径最小 L_1 , 最大 L_2 , 高速摄影立于另一侧, 高速摄影观察爆炸驱动灭火剂抛撒特性。油盘内燃料依据典型目标特性, 选择油层厚度为 5 mm 左右, 如图 2 所示。



图 1 模拟弹安放状态

Fig. 1 Experimental set-up



图 2 实验油盘

Fig. 2 Oil-dish in the experiments

收稿日期: 2010-05-19; 修回日期: 2010-07-07

作者简介: 韩宝成(1971-), 男, 博士后, 研究方向为爆炸驱动。

e-mail: baochenghan@hotmail.com

通讯作者: 王树山(1965-), 男, 教授, 博士生导师。

e-mail: wangshushan@bit.edu.cn

2.2 实验结果

根据上述试验方案进行战斗部垂直安放引爆实验 3 发和带落角安放引爆实验 4 发(其中战斗部赤道面与地面夹角为 60° 、 120° 各两发),通过高速摄影获得灭火剂抛撒灭火过程,部分结果如图 3 所示。通过分析可以看出在灭火剂抛撒初期,壳体首先沿应力槽破裂,灭火剂为一整团液体高速喷射而出,沿战斗部径向运动速度

较快,底部液体-空气界面速度大于顶部,当灭火剂快速扩散到一定程度,周边开始出现破碎,灭火剂与空气界面模糊,径向运动速度迅速下降,重力的作用逾显突出,在重力作用下灭火剂沉降到燃油表面并累积到一定程度,导致空气被隔绝而产生灭火作用。对于战斗部带落角安放引爆情况,通过试验可看出落角对灭火剂的飞散速度影响不大,但对灭火剂的飞散区域有较大影响。

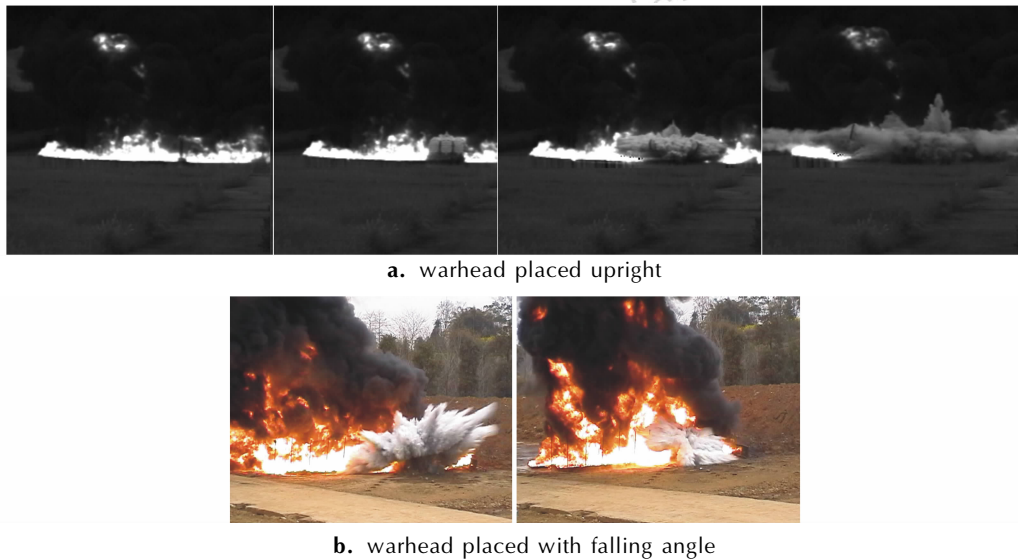


图 3 灭火剂分散形态

Fig. 3 Dispersed format on the extinguisher

根据高速录像结果,获得灭火剂-空气界面运动距离随时间的变化关系曲线,将距离关于时间求导,可获得灭火剂-空气界面运动速度随时间的变化

$$v_{JM} = \frac{dx}{dt} = v_0 \cdot e^{(t/0.02195)} \quad (1)$$

式中, v_{JM} 和 v_0 分别为界面速度和初始速度, $m \cdot s^{-1}$; t 为界面运动时间, ms 。

3 模拟弹动态抛撒试验

3.1 实验方案

在静爆试验基础上,进行动态抛撒试验 3 发,进一步分析灭火剂的抛撒特性。动态飞行试验中采用足

尺战斗部结构,中心爆管装药为 TNT,抛撒药剂为红色模拟药剂,加载系数 β 取值为 7.71% ;引信探杆长度选用 H_A ,进行实弹发射灭火弹,根据外弹道推算,在预估落点外 150 m 处架设高速摄像(分辨率为 $1000\text{ 帧} \cdot \text{s}^{-1}$)对战斗部落地及开舱、抛撒的整个过程进行同步拍摄。

3.2 实验结果

试验过程中,3 发灭火弹引信正常发火,模拟弹落地状态如 4 所示,战斗部开舱如图 5 所示,根据高速摄像分析从引信发火到战斗部开舱时间不大于 1 ms ,战斗部着角不大于 30° ,地面灭火剂抛洒范围见表 1,模拟灭火剂抛洒效果如图 6 所示。



图 4 模拟弹落地

Fig. 4 The falling pose of ammunition



图 5 战斗部开舱

Fig. 5 Extinguisher dispersed



图 6 模拟灭火剂散布结果

Fig. 6 Dispersive outcomes of stimulated extinguisher

表 1 引信工作情况及灭火剂抛撒范围

Table 1 Work status of fuse and dispersed scope of extinguisher

shot	fuse status	impact angle/(°)	dispersed scope/m				distributing status
			portrait	landscape	toeing	average	
1	fire	20	22.1	22.0	25.0	23.0	well-proportioned
2	fire	27	21.1	16.15	22.7	20.0	well-proportioned
3	fire	24	20.3	20.8	24.0	21.7	well-proportioned

4 灭火弹动态抛撒区域计算

4.1 基本假设与物理模型简化

战斗部动态与静态作用的主要差别在于牵连速度和炸高的存在,以及由此需要关注时间历程的影响等,从实际需要和工程上可实现性等方面考虑,对灭火剂动态抛洒过程进行如下物理模型简化:

(1) 弹体运动速度与弹轴之间夹角为零,无攻角;

(2) 引信启动后,经过瞬发度、壳体破裂历程后,灭火剂-空气界面扩散运动过程只受空气阻力影响,在弹体赤道面径向运动速度衰减服从式(1);

(3) 灭火剂-空气界面的水平扩展速度为灭火剂抛洒初速及牵连速度水平分量的合成;

(4) 灭火剂-空气界面扩展及下降运动过程,不考虑惯性力及旋转力矩影响,所受重力恒定;

(5) 灭火剂-空气界面先沿弹体赤道面径向扩展,然后再做下降运动,由牵连速度等造成的灭火剂-空气界面下降速度假设为恒定值。

4.2 灭火剂动态抛撒面积工程计算方法

(1) 开舱时间历程和抛撒初速

根据上述模型简化可知:灭火战斗部开舱时间历程为引信瞬发度(Δt_1)、壳体完全破裂(Δt_2)两者之和,引信瞬发度为引信自身特性,可根据技术指标获得,壳体完全破裂时间历程与加载系数(抛洒装药与液体的质量比)相关,根据文献[8]采用指数递减函数拟合得到壳体完全破裂时间历程随加载系数变化的关系表达式:

$$\Delta t_2 = 0.48 + 13.33 \exp(-\beta/1.96) \quad (2)$$

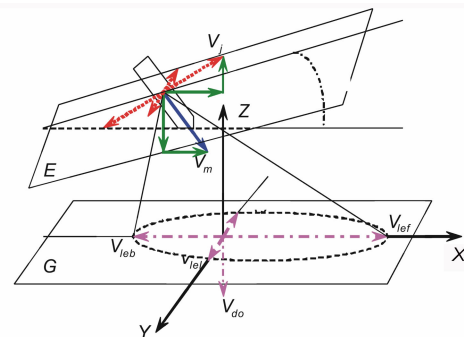
式中, Δt_2 为壳体完全破裂时间历程,ms; β 为加载系数,%。壳体破裂瞬间,稀疏波的作用使灭火剂携带爆炸产物高速喷射和飞溅,初始喷射速度与加载系数相关,根据文献[8],采用指数递增函数拟合得到初始喷射速度随加载系数变化的关系表达式:

$$v_j = 277.05 - 372.63 \exp(-\beta/3.18) \quad (3)$$

式中, v_j 为喷射速度, $m \cdot s^{-1}$ 。

(2) 动态界面扩散速度

根据模型简化可知:灭火战斗部空中解爆后灭火剂-空气界面的水平扩展初始速度为静态抛洒界面速度及牵连速度水平分量的合成,由牵连速度产生的灭火剂-空气界面下降初始速度为牵连速度垂直分量,如图7所示。



E—equatorial plane on projectile, G—ground, θ —impact angle

图7 动态液体-空气界面的运动速度合成示意图

Fig. 7 Sketch of dynamic synthesis on liquid-air interface movement velocity

根据试验现象分析可知,抛撒初期,灭火剂-空气界面在弹体赤道面径向扩散运动,重力影响较小,根据上述模型简化,推导灭火剂-空气界面在赤道面径向扩散运动运动方程如下:

$$\begin{cases} \frac{dL}{dt} = v_{ie} e^{(t/0.02195)} \\ t = k_0 \left(\frac{H}{v_{d0}} - \Delta t_1 - \Delta t_2 \right) \end{cases} \quad (4)$$

式中, v_{ie} 、 v_{d0} 分别为灭火剂-空气界面水平和垂直方向初始扩散运动速度,可根据实际落角和牵连速度合成得出, $m \cdot s^{-1}$; L 、 H 分别为灭火剂-空气边界水平和垂直方向运动距离,m; t 为灭火剂-空气界面下降时间; k_0 为修正系数,可由试验获得。由此,可得灭火剂在地面的纵向和横向分布距离:

$$X_p = (L_r + L_b) \cos \theta \quad (5)$$

$$X_l = L_l + L_r \quad (6)$$

式中, L_f, L_b, L_l, L_r 为灭火剂-空气界面在赤道面沿四个方位径向扩散运动距离, 可由式(4)~式(6)计算得出。

动态条件下, 灭火剂地面分布为以火箭弹发射纵向为短轴、以横向为长轴的椭圆形分布区域, 因此动态抛洒面积:

$$S_{\text{抛}} = \frac{1}{4} \pi X_p X_L \quad (7)$$

灭火剂地面分布中心漂移量:

$$X_0 = v_d \sin \theta (\Delta t_1 + \Delta t_2) + v_{\text{lef}} t - \frac{1}{2} X_p \quad (8)$$

根据上述计算模型, 针对一定的着角 ($\theta = 24^\circ$) 和牵连速度 ($v_d = 200 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 进行计算, 可以得到固定炸高条件下加载系数与抛撒面积的关系曲线, 如图 8 所示。根据图 8 可知, 对于加载系数 β 取值为 7.71‰ 时, 抛撒面积为 222.8 m^2 , 比动态试验三发均值 208.2 m^2 高出 7.02%, 误差在 10% 之内, 表明灭火剂动态抛洒面积计算模型计算结果可靠, 具有工程应用价值。

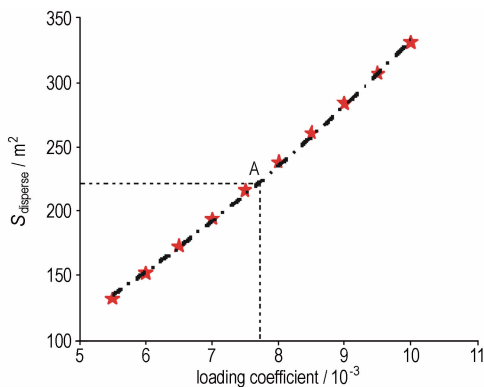


图 8 灭火剂动态抛撒面积与加载系数的关系

Fig. 8 Relationship between dynamic dispersed area of extinguisher and loading coefficient

5 结 论

(1) 通过战斗部静态作用和模拟样弹动态抛撒试验, 可观察到云团状灭火剂沉降到燃油表面并累积到一定程度, 导致空气被隔绝而产生灭火作用, 落角对灭火剂的飞散速度影响不大, 但对灭火剂的飞散区域有较大影响。

(2) 针对灭火弹动态作用过程, 综合考虑牵连速度、着角、炸高及壳体破裂时间历程的, 提出灭火战斗部动态抛撒区域工程计算方法, 通过计算获得灭火剂动态抛洒面积与炸高的关系。

致谢: 感谢 081 基地提供实验帮助。

参考文献:

- [1] 稽振涛, 于丽晶, 王涛. 炸药爆轰作用下液体抛洒药量设计[C] // 中国宇航学会无人飞行器学会战斗部与毁伤效率专业委员会第十届学术年会论文集, 绵阳, 2007: 442-444.
JI Zhen-tao, YU Li-jing, WANG Tao. The design of liquid disperse quantity on dynamite detonation effect[C] // 10th Professional Committee Symposium on Warhead and Damage Efficiency, Mianyang, 2007: 442-445.
- [2] 王海燕. 灭火战斗部终点效应研究[D]. 北京理工大学硕士学位论文. 北京: 北京理工大学, 2007.
WANG Hai-yan. The terminal effects research of the fire-extinguishing warheads[D]. Master's Degree Dissertation of Beijing Institute of Technology. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2007.
- [3] 徐豫新, 王树山, 王海燕, 等. 一种灭火战斗部威力优化的工程设计方法[J]. 兵工学报, 2010, 31(4): 473-476.
XU Yu-xin, WANG Shu-shan, WANG Hai-yan, et al. An engineering optimum design method for fire extinguishing warhead power[J]. *Acta Armamentarii*, 2010, 31(4): 473-476.
- [4] 任晓冰, 陆晓霞, 李磊, 等. 爆炸驱动液体分散的实验与数值模拟研究[J]. 兵工学报, 2010, 31(S1): 93-97.
REN Xiao-bing, LU Xiao-xia, LI Lei, et al. Research on experiment and numerical simulation of explosion drive liquids dispersed[J]. *Acta Armamentarii*, 2010, 31(S1): 93-97.
- [5] 李磊, 崔箭, 董玉才, 等. 液体爆炸分散过程中界面破碎的实验研究[J]. 科学通报, 2009, 54(12): 1693-1700.
LI Lei, CUI Jian, DONG Yu-cai, et al. Experimental investigations to the interfaces breakup during liquid explosive disseminations process[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(12): 1693-1700.
- [6] 丁珏, 翁培奋, 刘家聪. 液体爆炸抛撒初期液环运动破碎的数值研究[J]. 水动力学研究与进展, 2004, 19(2): 219-224.
DING Jue, WENG Pei-fei, LIU Jia-cong. A numerical study on liquid ring motion and fragmentation for the initial process of liquid explosive dispersal[J]. *Journal of Hydrodynamics (Ser A)*, 2004, 19(2): 219-224.
- [7] 丁珏, 陆中兵, 翁培奋. 受限空间内新型抑爆装置爆炸抛撒水雾形成过程的研究[J]. 兵工学报, 2007, 28(11): 1335-1339.
DING Jue, LU Zhong-bing, WENG Pei-fei. Research on the processes of explosive dispersion and formation of water cloud by a new anti-detonation device in limited space[J]. *Acta Armamentarii*, 2007, 28(11): 1335-1339.
- [8] 徐豫新, 韩宝成, 王树山. 爆炸作用驱动液体抛撒初始阶段数值仿真[J]. 高压物理学报, 2010, 25(1): 73-78.
XU Yu-xin, HAN Bao-cheng, WANG Shu-shan. Numerical simulation on initial stage of liquid dispersed under explosively drive[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2010, 25(1): 73-78.

Computational Model of Dynamic Dispersed Area of Liquid Fire-Extinguishing Ammunition

HAN Bao-cheng¹, LEI Hong-fei², XU Yu-xin¹, WANG Shu-shan¹

(1. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. China Academy of Defense Science and Technology, Beijing 100089, China)

Abstract: For the design of fire-extinguishing ammunition, the mathematic relationship between dynamic action area and stand-off distance was presented. Based on the engineering requirements from optimization design of fuse-warhead cooperate on the fire-extinguishing ammunition, the experiments of static action on the warhead and dynamic dispersed on the simulation ammunition were conducted. The processes of static action and dynamic dispersed were analyzed according to the experimental results. A computational mathematics method on dynamic dispersed processes for the fire-extinguishing ammunition was set up, the correlation between dynamic dispersed area of the fire-extinguishing ammunition and the stand-off distance was obtained by calculation. The calculated results agree well with the experimental results.

Key words: explosion mechanics; fire-extinguishing ammunition; dynamic dispersed; dispersed area

CLC number: TJ55; O389

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.03.015



技术介绍

1 超重力法净化火炸药硝烟技术

火炸药行业硝化反应等产生的硝烟($\text{NO}_x \geq 10000 \text{ mg/m}^3$)氮氧化物浓度极高(是燃煤烟气的 20 倍)、毒性大、极易对环境造成恶劣影响,目前普遍采用的水或稀硝酸为吸收剂的塔设备的吸收方法,吸收效率低、成本高、达不到排放标准。

基于上,提出超重力净化火炸药硝烟技术,该技术根据硝烟氧化度(摩尔比 NO_2/NO_x)高适合湿法处理的化学组成特点和气-液吸收传质的化工过程特点,提出了超重力湿法处理硝烟的技术方案。该技术以课题组研发的还原吸收剂,采用高传质效率的超重力技术,以工厂硝烟侧线排放的硝烟为处理对象进行了硝烟治理的研究。对超重力装置结构、超重力操作参数、不同的吸收剂、液气比、氧化方式等进行了系统的研究,优化了工艺参数,硝烟排放达到了国家排放标准。

本技术超重力装置取代传统吸收工艺中庞大的塔设备,结构简单,系统紧凑,操作简便,使用与维护成本低,占地面积小,操作弹性大,可大幅度降低处理成本。

2 超重力法回收 HMX 生产过程醋酸溶剂技术

奥克托今是当前已使用的能量水平最高、综合性能最好的单质猛炸药。奥克托今的密度、爆速、爆压和热安定性均优于黑索今,化学安定性甚至好于梯恩梯,以其为基的混合炸药用于导弹、核武器和反坦克弹的战斗部装药,或作为耐热炸药用于深井射孔弹,也用作高性能固体推进剂和枪炮发射药的组分。

醋酐法是现在工业上生产奥克托今普遍采用的方法。在生产过程由于温度的不断升高,大量醋酸从反应容器中挥发出来,造成了车间内外空气的严重污染以及醋酸溶剂的严重浪费。醋酸蒸汽对眼、鼻、喉和呼吸道有很强的刺激性,皮肤接触,轻者出现红斑,重者引起化学灼伤。误服冰醋酸,口腔和消化道可产生糜烂,重者可因休克而致死。目前生产 1 吨 HMX 大约需要 20~30 万元,由于成本较高,限制了它在军事上的广泛应用。而醋酸溶剂的浪费是成本过高的重要因素。

国内外关于醋酸溶剂的回收可以分为两个过程。第一,主要采用传统塔器吸收气相醋酸溶剂。第二,采用萃取、精馏、吸附等方法从液相浓缩醋酸以获得循环使用的高浓度醋酸。过程一的工艺具有设备体积庞大、吸收效率低、开停车不方便等缺点,特别是对于老式 HMX 生产工艺中没有增设净化醋酐工艺,建立高大耸立的吸收塔工艺不论在空间位置上还是在传质效率上都将受到一定的限制。过程二为液相醋酸的浓缩。通过采用不同的萃取剂可以把萃取法分为很多种,但其机理基本相同。萃取法适用于含醋酸浓度高的废水,但目前工业上用的大部分萃取设备在体积、级效率、制造和安装要求、适应性以及费用等方面存在着许多缺点。吸附法适用含醋酸浓度低的废水,其设备庞大,而且还存在着后续的脱附操作,不适合火炸药行业醋酸浓缩的特点。精馏法浓缩醋酸的效率高,浓缩后的醋酸浓度达 95% 以上,但其能耗惊人,经济价值低,对于奥克托今减低生产成本的目标基本没有成效。

以上信息来源: <http://www.ksitri.com>