文章编号:1006-9941(2019)09-0773-06

短切碳纤维爆炸分散特征及云团参数变化规律实验研究

刘志龙,王玄玉,姚伟召,董文杰,白海涛 (陆军防化学院,北京 102205)

摘 要: 针对短切碳纤维爆炸分散过程设计了实验平台,根据爆炸分散不同时期的特点及要求,利用两台高速摄像机同时拍摄,分别以5万帧/s和2000帧/s的帧率记录了壳体破裂过程和云团宏观膨胀过程。通过对爆炸分散全过程序列图像的测量分析,获得了 壳体破裂、云团分散成形特征,建立了爆炸分散云团直径、高度和膨胀速度随时间变化曲线。四种相似结构弹体在相同装填参数条 件下爆炸分散的高速摄像记录与分析表明,短切碳纤维爆炸分散过程主要经历了壳体破裂、射流喷出、云团膨胀和湍流混合四个阶 段,且分散过程遵循相似的规律,初始云团直径分别与弹体直径、碳纤维装填量的3次方根呈线性关系,初始云团高度与弹体高度呈 二次多项式关系。

关键词:短切碳纤维;高速摄像;爆炸分散;云团
 中图分类号: TJ55; TJ06
 文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2018365

1 引言

短切碳纤维作为一种新兴的烟幕无源干扰材料, 具备优良的毫米波干扰性能,同时能够对红外产生干 扰作用[1]。由于其在烟幕无源干扰技术领域中的应用 研究较少,尚未能充分发挥材料自身优异的电磁衰减 性能。烟幕云团特征与云团参数变化规律是短切碳纤 维爆炸分散研究的重要内容,也是提高烟幕弹药效能 的重要途径之一。短切碳纤维尺寸小,长径比大,易断 裂,难装填,纤维间具有较大的团聚粘附力[2],从而面 临装填使用、分散成云等技术难题,要想实现其在烟幕 无源干扰光电对抗领域的应用,必须借助强大的外力 进行有效分散,并形成具有良好空中悬浮特性、类似气 溶胶的短切碳纤维云团才能充分发挥材料自身优异的 电磁衰减性能。分散时应控制和减小分散过程中的理 化作用对碳纤维界面特性、几何特性和吸波性能的影 响,一般的机械抛撒和燃烧作用难以克服碳纤维轴间 的粘附力实现快速有效分散。

收稿日期:2018-12-26;修回日期:2019-02-24 网络出版日期:2019-05-15 作者简介:刘志龙(1984-),男,博士,主要从事烟火技术研究。 e-mail:Liuzlong_nbc@sina.com。

目前国内外在短切碳纤维爆炸分散云团特征分析 及规律试验研究方面鲜有文献报道,美国专利[3] 曾公 布了通过爆炸分散形成的碳纤维云团能够有效干扰毫 米波探测器,但至今未形成相应的武器装备。国内目 前在烟幕技术领域针对短切碳纤维的研究主要集中在 材料表面改性和毫米波衰减性能测试方面,关于短切 碳纤维装填使用、云团分散特征与形成机制、分散规律 等问题尚未得到有效解决。在其他介质材料爆炸分散 机理和云团变化规律研究中,针对液体燃料空气炸药 (FAE)的研究较多^[5-11],对固体颗粒尤其是纤维状细长 颗粒的研究较少。其中,陈浩等^[8]基于 Truegrid 与 Autodyn 混合仿真对烟幕初始云团最大半径进行了数 值模拟,并与高速摄像法得到的试验数据进行验证;蒋 治海等[9]采用高速分幅照相技术对炸药爆炸驱动不同 壁厚抛散装置的壳体变形、裂纹产生,液体射流形成及 其发展过程进行了试验研究;任晓冰^[10]、陆晓霞^[11]等 利用闪光X射线照相机和高速摄像机对液体爆炸分散 中壳体破裂前作用过程进行了实验研究,分析了液体 爆炸分散过程中界面破碎机理以及壳体对起爆后早期 抛撒流场特征的影响。上述研究表明,对于爆炸分散 这种高速瞬态过程的研究,主要方法是利用闪光X射 线照相机或高速摄像设备记录过程中的高速数字图 像,并通过不同的数字图像处理方法对宏观和细观过

引用本文:刘志龙,王玄玉,姚伟召,等.短切碳纤维爆炸分散特征及云团参数变化规律实验研究[J].含能材料,2019,27(9):773-778. LIU Zhi-long, WANG Xuan-yu, YAO Wei-zhao, et al. Experimental Study on Explosive Dispersion Characteristics and Variation Laws of Cloud Parameters of Short Carbon Fibers[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*,2019,27(9):773-778.

CHINESE JOURNAL OF ENERGETIC MATERIALS

含能材料

程进行分析。

在借鉴其他分散介质材料相关研究成果基础上, 本研究利用高速摄像机实时记录短切碳纤维爆炸分散 的完整过程,研究其爆炸分散初期特征和云团成形特 征,分析云团的成长过程经历的主要阶段及影响。分 析了四种相似结构弹体的爆炸分散过程,寻找爆炸抛 撒过程及云团参数所遵循的相似规律,为弹药结构和 装填参数优化设计提供必要的依据,为短切碳纤维弹 的工程实践与应用奠定基础。

2 实验设计

2.1 实验样弹基本参数

实验样弹为圆柱型壳体中心爆管结构,弹体尺寸 采用等比例结构设计。图1为Φ64 mm实验样弹的基 本结构,主要由上盖、壳体和中心管组成,其中壳体材 料为工程塑料,上盖采用螺纹连接的方式,中心爆管装 填抛散炸药黑索今(RDX),电雷管引爆。





图1 实验样弹基本结构(单位:mm)

Fig.1 Basic structure of experimental bomb (unit: mm)

两种短切碳纤维长度分别为1.5 mm和4 mm,按照 1:1的质量比例均匀掺混装填;固定实验样弹的长径比 为1.72,装药比(炸药质量与分散介质质量之比)3%,装 填密度为0.4 g·cm⁻³,短切碳纤维装填量根据装填密度 和有效装填容积计算得出。四种样弹基本参数见表1。

表1 实验样弹基本参数

 Table 1
 Basic parameters of experimental bomb

house number	bomb diame-	bomb height	short carbon fiber		
number	ter/mm	/mm	loading mass/g		
1#	48	82	34		
2#	56	96	58		
3#	64	110	100		
4#	72	124	135		

2.2 实验平台与方法

实验在直径7m的半球形爆炸罐内进行,为了分析短切碳纤维爆炸分散云团形成机制与完整过程,根据爆炸分散不同时期的特点及拍摄要求,利用 MEMRECAM HX-3和HX-7型高速摄像机同时拍摄。 其中,MEMRECAM HX-3型高速摄像机最高帧率 130万帧/s,实验采用5万帧/s的帧率拍摄爆炸瞬间壳 体破裂过程及分散初始阶段过程,对应最大分辨率为 448×328,能够实现在高帧率条件下同时具有较高分 辨率的拍摄要求。MEMRECAM HX-7型高速摄像机 最高帧率20万帧/s,实验采用2000帧/s的帧率记录短 切碳纤维云团形状随时间变化过程,对应分辨率可达 1920×1080,能够很好地记录云团成形过程。

实验平台如图2所示,实验时将弹体竖直悬挂在支架上,弹体中心距离地面2m,高速摄像机镜头与弹体中心 处于同一水平高度,调整高速摄像机视场角并进行对焦, 设置拍摄速度和分辨率,调整画面亮度和对比度等参数 至最佳拍摄效果,利用同步装置对起爆器和高速摄像机 实施同步控制。数据采集处理系统记录爆炸分散过程的 每一帧图像,利用高速摄像机配套HotShot SC Link软件 实现对爆炸分散特征及云团参数的测量与分析。



图2 实验平台示意图



3 实验结果与分析

3.1 壳体破裂及初期分散特征

图 3 为 HX-3 型高速摄像机记录的直径 64 mm 弹

短切碳纤维爆炸分散特征及云团参数变化规律实验研究

体爆炸瞬间部分时刻分幅图像。从图3可清晰观察到短 切碳纤维爆炸分散初期1ms以内的特征以及壳体的破裂 过程。雷管引爆炸药后,爆轰产物迅速压缩中心管形成强 冲击波,在冲击波的强压缩作用下,短切碳纤维被迅速压 实并向外运动挤压壳体;由于外壳的约束作用,碳纤维向 外运动速度迅速减小;冲击波传播到壳体表面时,由于自 由面的影响会产生卸载稀疏波向内传播。在碳纤维的挤 压变形和卸载波的拉伸变形共同作用下,壳体材料达到屈 服强度后开始产生裂纹,破裂首先发生在壳体上下两端, 即壳体与上端盖连接处和壳体底部,且裂纹主要产生在轴 线方向,并自上而下传播扩展。当壳体发生破裂后,短切 碳纤维随爆轰产物从裂纹处溢出,并形成射流,壳体破裂 过程持续约400 μs后完全解体,随后壳体破片和短切碳 纤维在爆轰产物驱动和惯性作用下,继续向外飞散。



图3 爆炸瞬间壳体破裂及短切碳纤维分散初始阶段分幅图像

Fig.3 Frame images of initial stage of shell rupture and short carbon fibers dispersion at the moment of explosion

3.2 云团分散成形特征

图 4 为 HX-7 型高速摄像机记录的 64 mm 弹体短 切碳纤维爆炸分散云团成形过程部分时刻分幅图像。 从图 4 可以看出,受装药结构的影响,爆炸后短切碳纤 维以径向分散为主,云团分布基本保持轴向对称,并呈 扁平椭圆形状。

对爆炸分散序列图像测量分析,以云团径向边界测量值为云团直径,云团轴向边界测量值为云团高度,即可得到不同直径壳体爆炸后云团参数变化过程,包括云团直径随时间变化(*D-t*)曲线、云团高度随时间变化(*h-t*)曲线和云团膨胀速度随时间变化(*v-t*)曲线,如图5所示。从图5可看出,4种弹体爆炸后的云团*D-t、h-t和v-t*曲线变化趋势较为一致,表明短切碳纤维爆炸分散过程遵循相似的规律。

通过对爆炸分散分幅图像特征及云团参数随时间 变化曲线的进一步分析发现,短切碳纤维爆炸分散过 程大致经历了四个阶段:

(1)壳体破裂阶段。此阶段壳体在爆轰压力驱动 下向外膨胀,并在反射稀疏波拉伸剪切作用下应力集 中处首先产生裂缝,随后裂缝自上而下传播扩展,直至 裂纹贯穿整个壳体。该过程持续约0.4 ms后壳体完 全解体破裂形成碎片,碳纤维自壳体裂缝中开始不断 溢出并随破片以一定的初速向四周飞散。

(2)射流喷出阶段。此阶段碳纤维在爆炸冲击波的主导作用下,爆轰产物气体挟带短切碳纤维从壳体裂缝处溢出并形成尖峰树杈状射流,碳纤维主体部分尚未完全分散并呈团状。主要特征为爆炸作用下碳纤维形成射流并加速向外分散,云团膨胀速度达到峰值,对应实验中3ms时刻。

(3) 云团扩展阶段。在爆轰产物驱动和空气阻力 的共同作用下,碳纤维继续向外分散扩展,且分散主要 发生在径向上,前端射流部分运动速度迅速衰减,云团 主体部分由于较大的惯性仍以较高速度向外运动,并 逐渐吞噬覆盖射流形成初始云团的雏形。主要特征是 云团边界膨胀速度从峰值开始急剧下降,并在20 ms时 刻左右出现拐点,云团径向不再有明显扩展,初步形成 较大面积的碳纤维云团。实验数据显示,20 ms时刻云 团直径已经达到初始云团直径的80%以上。



图4 64 mm 弹体短切碳纤维爆炸分散云团形成过程分幅图像

Fig.4 Frame images of explosive dispersion cloud formation process of 64 mm short carbon fibers bomb

(4)湍流混合阶段。随着短切碳纤维分散范围的 增大,气动阻力开始起主导作用,约20ms后云团径向 范围基本不变,轴向范围稍有扩展。云团内部受湍流 作用不断翻滚,云团边界与周围空气不断混合作自由 扩散,使云团分布趋于均匀和稳定,并最终形成初始烟 幕云团。

3.3 初始云团参数与弹体参数的关系

发烟弹爆炸后形成的初始云团通常被看作在大气 中扩散的初始瞬时体源,初始云团参数是初始云团半 径和高度的统称^[12],它是准确估算烟幕云团在大气扩 散过程中浓度时空分布及遮蔽效应尺寸的重要初始条 件。根据实验结果,将100 ms时刻云团半径和高度作 为初始云团参数,并将实验数据与弹体尺寸、装填量进 行了对比分析,结果见表2。分析表2数据可以发现, 在相似的弹体结构和装填参数条件下,随着弹体尺寸 的增大,初始云团参数相应变大,最终云团直径约为弹 体直径的48倍左右,实验数据显示,初始云团直径与 弹体直径呈线性关系,初始云团高度与弹体高度呈二

表2 短切碳纤维爆炸分散实验结果

Table 2	Experimental	results of	f explosion	dispersion	of	short
carbon fil	pers					

bomb	structural size of the bomb		initial param	initial cloud parameters		ratio of cloud param- eters to bomb size		
number	D_0	h_0	т	D	h	D	h	D
	/mm	/mm	/g	/mm	/mm	$/D_0$	$/h_0$	/ ∛ <u>m</u>
1#	48	82	34	2260	710	47.1	8.7	698
2#	56	96	58	2653	1210	47.4	12.6	686
3#	64	110	100	3033	1580	47.4	14.0	662
4#	72	124	135	3560	1690	49.4	14.1	694

Note: D_0 is the bomb diameter. h_0 is the bomb height. m is loading mass for the bomb. D is the diameter of initial cloud. h is the initial cloud height.

次多项式关系,如图6a和图6b所示,相关系数分别为 0.9994和0.9957。随着短切碳纤维装填量的增加,初 始云团参数也呈逐渐增长趋势,对实验数据进一步分 析发现,初始云团直径与碳纤维装填量的立方根存在 线性关系,相关系数为0.9994,如图6c所示。



图 5 云团参数随时间变化关系曲线 Fig.5 Variation curves of cloud parameters with time

4 结论

(1)在实验的弹体结构和装填参数条件下,短切碳 纤维可以有效地分散并能够形成较为稳定的初始烟幕 云团,云团分布基本保持轴向对称,并呈扁平椭圆形状。 分散过程以径向抛散为主,按照时间序列共经历了壳 体破裂、射流喷出、云团扩展和湍流混合四个阶段。

(2)分散各阶段具有不同特征,对碳纤维云团形成 有不同影响。根据实验数据,壳体破裂阶段主要产生 轴向裂纹自上而下扩展,0.4 ms后壳体完全解体,其中

CHINESE JOURNAL OF ENERGETIC MATERIALS





Fig. 6 Relationship between initial cloud parameters and bomb parameters

壳体破裂方向、破碎程度及射流大小方向对云团分散 范围和云团形状有重要影响;射流喷出阶段形成尖峰 树杈状碳纤维射流并加速向外运动,3ms时刻云团膨 胀速度达到峰值;云团扩展阶段是碳纤维沿径向膨胀扩 展的主要阶段,约80%以上扩展在此阶段完成,同时云 团边界膨胀速度从峰值开始急剧下降并在20ms时刻 左右出现拐点;湍流混合阶段受气动阻力和湍流作用, 云团分布趋于均匀和稳定,并最终形成初始烟幕云团。

(3)相似的弹体结构和装填参数条件下,初始云 团直径分别与弹体直径、碳纤维装填量的3次方根呈 线性关系,初始云团高度与弹体高度呈二次多项式关 系,表明短切碳纤维爆炸分散过程遵循相似规律,且云 团参数符合几何相似律,因此,可以通过小型弹体实验 模拟和预测大型弹体爆炸分散后的初始云团参数。

参考文献:

- [1] 刘志龙,王玄玉,董文杰,等.短切碳纤维云团对毫米波/红外复合干扰性能影响[J].含能材料,2016,24(12):1219-1224.
 LIU Zhi-long, WANG Xuan-yu, DONG Wen-jie, et al.Composite interference performance of chopped carbon fiber clouds to millimeter wave and infrared[J].Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao),2016,24(12):1219-1224.
- [2] 刘志龙,王玄玉,胡睿,等.短切碳纤维分散均匀性对毫米波衰减 性能的影响[J].兵器材料科学与工程,2015,38(6):101-104.
 LIU Zhi-long, WANG Xuan-yu, HU Rui, et al.Effect of short carbon fiber dispersion uniformity on millimeter wave attenuation performance [j]. Ordnance Materia I Science and Engineering, 2015,38(6):101-104.
- [3] Rouse William G, Kilgore Connie S, Rhea Ronad E, et al. Millimeter wave screening cloud and method: United States.
 US5148173 [P]. September 15, 1992.
- [4] BAI Hai-tao, WANG Xuan-yu, DONG Wen-jie, et al. Research on attenuation law of expandable graphite to millimeter wave in the three-dimensional space[C]//The 2nd International Conference on Mechanical Automation and Materials Engineering, Qingdao, 2013: 755–758.
- [5] 史远通,张奇.爆炸驱动燃料抛散的非理想化特征[J].含能材料,2015,23(4):330-335.
 SHI Yuan-tong, ZHANG Qi. Non-ideal characteristics of fuel dispersal driven by explosive[J]. Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao),2015,23(4):330-335.
- [6]方伟,赵省向,李文祥,等.爆炸抛散过程中FAE云雾的运动特性[J].含能材料,2015,23(11):1061-1066.
 FANG Wei, ZHAO Sheng-xiang, LI Wen-xiang, et al. Move-

ment characteristics of Fuel-air explosive clouds in the explosive dispersal process[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*(*Hanneng Cailiao*),2015, 23(11):1061–1066.

- [7] 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 Xiao-bo,LU Chang-bo,LI Bin, et al. An experimental study of detonation parameters of liquid fuel drops cloud[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2012, 32(1):108-112.
- [8] 陈浩,高欣宝,李天鹏等.烟幕初始云团最大半径数值模拟[J]. 含能材料,2018,26(10):820-827.
 CHEN Hao, GAO Xin-bao, LI Tian-peng, et al. Numerical simulation of maximum radius of initial cloud cluster of smoke screen [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials* (Hanneng Cailiao), 2018, 26(10):820-827.
- [9] 蒋治海,龙新平,韩勇,等.炸药爆炸驱动壳体破裂及液体喷射 过程试验研究[J].含能材料,2011,19(3):321-324.
 JIANG Zhi-hai, LONG Xin-ping, HAN Yong, et al. Experimental studies on shell fracturing and jet forming and developing process driven by detonation[J]. Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao), 2011, 19(3):321-324.
- [10] 任晓冰,李磊,严晓芳,等.液体的爆炸抛撒特征[J].爆炸与冲击,2010,30(5):487-492.
 REN Xiao-bing, LI Lei, YAN Xiao-fang, et al. Dispersion characters of liquid induced by explosion[J]. *Explosion and Shock Wave*,2010,30(5):487-492.
- [11] 陆晓霞,李磊,赵守田,等.壳体约束对液体爆炸抛撒流场特性的影响[J].爆炸与冲击,2016,36(6):803-810.
 LU Xiao-xia, LI Lei, ZHAO Shou-tian, et al. Effects of shell constraints on flow characteristics in an explosive dispersal of a liquid volume [J]. *Explosion and Shock Wave*, 2016, 36 (6): 803-810.
- [12] 姚禄玖,高钧麟,肖凯涛,等.烟幕理论与测试技术[M].北京:国 防工业出版社,2004:97-104.

Experimental Study on Explosive Dispersion Characteristics and Variation Laws of Cloud Parameters of Short Carbon Fibers

LIU Zhi-long, WANG Xuan-yu, YAO Wei-zhao, DONG Wen-jie, BAI Hai-tao

(Institute of NBC Defense , Beijing 102205 , China)

Abstract: An experimental platform was designed for the explosive dispersion process of short carbon fibers. According to the characteristics and requirements of explosive dispersion for different periods, two high-speed cameras were used to record the fracture process of the shell and the macro-expansion process of the cloud using the frame rates of 50,000 frames per second and 2000 frames per second respectively. By measuring and analyzing the sequence images of the whole process of explosive dispersion, the characteristics of shell fracture and cloud dispersion formation were obtained, and the curves of the diameter, height and expansion velocity of explosive dispersion cloud with time were established. Analysis of the high speed video records of the explosive dispersion process of short cut carbon fibers mainly goes through four stages: shell rupture, jet ejection, cloud expansion and turbulent mixing. The dispersion process follows similar laws that, the initial cloud diameter has a linear relationship with the bomb diameter and the cube root of the loading mass of fibers respectively, and the initial cloud height has a quadratic polynomial relationship with the bomb height.

Key words: short carbon fibers; high-speed photography; explosive dispersion; cloudCLC number: TJ55; TJ06Document code: A

(责编: 王艳秀)