

文章编号: 1001-1455(2010)05-0487-06

液体的爆炸抛撒特征*

任晓冰, 李磊, 严晓芳, 陆晓霞, 王金生, 王海燕

(清华大学航天航空学院, 北京 100190)

摘要: 针对液体爆炸抛撒过程设计了实验装置, 利用高速摄像机进行记录。通过研究不同中心装药量和填充液体的抛撒过程, 发现在壳体破裂后, 液体沿裂缝处向外飞散。药量较小时, 液体分散成树枝状形态, 然后破碎成液滴; 药量较大时, 则形成液体环状区。对于不同粘度的液体, 环状区分别由小液滴及已雾化、汽化的液体, 或大液滴、液体丝及液膜等组成, 抛撒过程中其宽度越来越大, 大液滴、液体丝及液膜等也逐渐破碎成细小的液滴。

关键词: 爆炸力学; 爆炸抛撒; 破碎; 液体; 液滴; 粘性

中图分类号: O389

国标学科代码: 130 · 3599

文献标志码: A

1 引言

在液体爆炸抛撒特征的研究中, 主要有中心装药起爆、容器壳体破碎和液体的喷射、分散、破碎等过程。在实验研究方面, 1989年 M. Samirant 等^[1]在实验中用闪光 X 射线照相得到 1 张液体爆炸抛撒过程图像, 被认为是填充液体在爆炸产物气体的膨胀推动下所形成的液体环。而 R. T. Zabelka 等^[2]在 1969 年的研究中, 得到另 1 种爆炸抛撒形态的图像, 这是由爆炸中心向四周喷射射流的流动图像。在理论研究方面, 1990 年 D. R. Gardner^[3]提出了径向膨胀的薄膜线性不稳定模型, 并应用到其计算近场阶段的数值模拟中, 即流场由 3 层流体组成, 内部为爆炸产物气体, 外部为空气, 中间为连续的液体环, 液体的初次破碎过程是爆炸产物气体推动液体环逐渐膨胀变薄时, 由液体环的内外界面不稳定增长所导致。1997 年薛社生^[4]也认为首先是不可压连续液体环的膨胀加速过程, 当速度达到极限时, 根据实验基础, 给出了破裂模型。2001 年丁珏^[5]提出了液体瞬间破碎模型, 认为液体环在膨胀过程中会越来越薄, 当其内聚力小于外部扰动所施加的力时, 液体环就发生破碎。李雷等^[6]设计了水平约束的爆炸抛撒装置, 直接将雷管插入水中进行爆炸抛撒, 利用高速摄影仪进行拍摄, 得到了前沿针刺状液体的变化过程; 也通过激光诱导荧光对通过观察窗口的液体进行拍摄, 拍摄得到的图像显示了抛撒过程中液体的不均匀性, 但由于观察窗口较小, 距爆炸中心较远, 拍摄到的图像显示的是壳体破碎后液体喷出一段时间后的形状, 并未得到壳体破裂时液体的抛撒形状和整体区域内液体的抛撒形状。另外, 由于雷管的点爆炸效应, 对实验图像的辨认带来一定困难, 因此未能很好地认识液体爆炸抛撒近场阶段的运动规律。

针对文献[6]中的不足, 本文中设计竖直放置的液体爆炸抛撒实验方案, 拟通过实验捕捉到液体爆炸抛撒特征发展的一系列图像, 并对不同粘性液体、不同中心装药量等对分散的影响进行比较。

2 实验设计

实验设备主要有爆炸容器、光源、背景板、高速摄影仪、中心装药、雷管和同步装置等。爆炸容器外壳选用厚 0.2 mm 的透明胶片, 上下盖均为厚 8 mm 的铝板。中心装药为纯黑索金填充的导爆索, 外接 8 号雷管引爆。实验在密闭空间内进行, 利用同步装置进行起爆和记录。利用 MotionXtra HG-100K

* 收稿日期: 2009-07-13; 修回日期: 2009-12-15

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(10572149);

国家自然科学基金委与中国工程物理研究院联合基金(NSAF)重点项目(10676120)

作者简介: 任晓冰(1978—), 男, 博士研究生。

型(CMOS)高速摄像机,通过观察窗口进行拍摄,记录整个分散过程,拍摄速度为 $5\,000$ 、 $2\,000\text{ s}^{-1}$ 。

爆炸容器中的液体为水与甘油以不同的体积比组成的混合液,用来考察液体粘性对分散过程的影响。中心装药分别采用 3 、 5 和 11 g/m 的导爆索,用来考察不同装药量对分散过程的影响。

3 实验结果与分析

3.1 中心装药量对分散过程的影响

3.1.1 实验结果

在此选出2组实验图像进行对比,第1组为小药量的情形,第2组为大药量情形。

(1)中心装药为 3 g/m 导爆索,壳体直径为 150 mm ,铝板间距为 40 mm ,填充液体为水,实验结果如图1(a)所示。图中3幅图像分别为距起爆闪光 2.33 、 4.00 和 30.00 ms 时的抛撒形态。由前2幅图像可知液体从破碎间隙喷出后,即形成沿外缘呈现基本均匀分布的针刺状形态。第3幅图则显示液体在前端针刺状液体流的牵引下向四周飞散,形成沿径向为主,切向方向又交错相连的树枝状形态,这些液体丝在飞散过程中逐渐变细,进而在表面张力的作用下破碎成小液滴。

(2)中心装药为 11 g/m 导爆索,壳体直径为 145 mm ,铝板间距为 30 mm ,填充液体为水,实验结果如图1(b)所示。图中3幅图像分别为距起爆闪光 1.6 、 4.0 、 5.0 ms 时的抛撒形态。由于此时导爆索线密度为 11 g/m ,爆炸作用猛烈,在 1.6 ms 时已形成前缘有细、密分布的针刺状形态,后缘呈现被爆炸产物推动挤压出暗黑色分界线的环状区。此环状区在运动过程中频繁发出亮光,且越靠近前缘发光频率越高,亮度也越大,表明环状区内的液体可能已非连续态,而是液滴或蒸汽的混合物。环状区宽度逐渐增大,内缘半径也迅速增大,前缘呈现出明显的针刺状形态,并逐渐破碎,中间分布着小液滴和已雾化的液体,明显不同于如图1(a)所示的分布。

(a) Small explosive quantity



2.33 ms

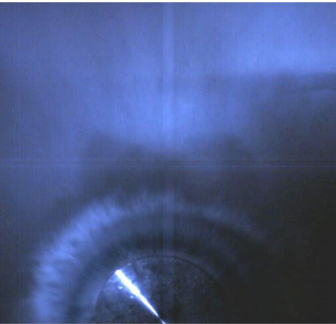


4.00 ms

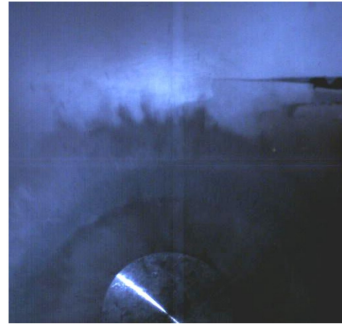


30.00 ms

(b) Large explosive quantity



1.6 ms



4.0 ms



5.0 ms

图1 不同的装药量、距起爆闪光不同时刻液体的抛撒形态

Fig. 1 Explosion-induced dispersal photos of liquid in the cases of different explosive quantities at the different times after explosive explosion

3.1.2 速度变化分析

为得到爆炸抛撒过程中的速度变化规律,将实验图像转化为灰度图像,以一定的灰度阈值将图像二值化,然后提取图像的边界曲线。通过对特定区域上外边界到爆炸中心的距离进行平均,得到平均半径变化曲线(见图 2),然后计算出平均半径的增长速率(见图 3)。

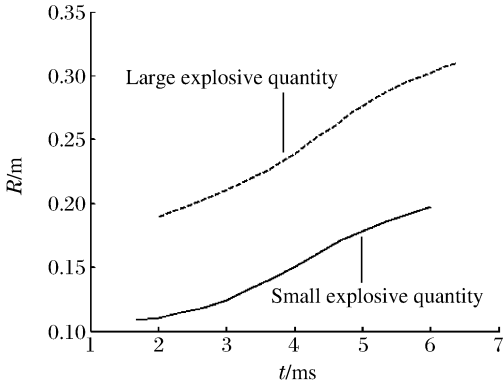


图 2 平均半径的变化曲线

Fig. 2 Variation of average radius with time

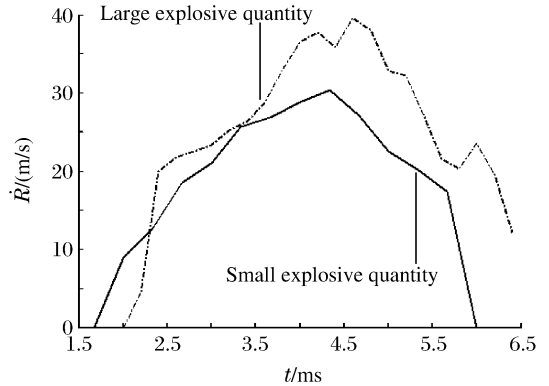


图 3 平均半径的增长速率

Fig. 3 Growing rate of average radius

由图 2~3 可知,在爆炸抛撒过程中,主液体区的运动都是先加速后减速。加速是因为爆炸作用力为主时的推动所致,减速是因为爆炸作用力降低、气动阻力为主时所致。由于第 2 组实验中的炸药量是第 1 组的 3 倍多,所以平均半径和速度都大于第 1 组的平均半径和速度。

3.2 液体粘性对爆炸抛撒特征的影响

3.2.1 实验结果

为了研究液体粘性对爆炸抛撒特征的影响,调整水和甘油的体积比,得到不同粘性的液体。实验中装液壳体直径均为 115 mm,壳体壁厚均为 0.2 mm,约束板间距均为 30 mm,导爆索线密度均为 5 g/m,共进行了 4 组实验。

(1)液体皆为水时,爆炸抛撒过程如图 4(a)所示,拍摄时间分别距起爆闪光 4、8、12 ms。

(2)液体中水与甘油的体积比为 5 : 5 时,爆炸抛撒过程如图 4(b)所示,拍摄时间分别距起爆闪光 4、8、12 ms。

(3)液体中水与甘油的体积比为 3 : 7 时,爆炸抛撒过程如图 4(c)所示,拍摄时间分别距起爆闪光 4、8、12 ms。

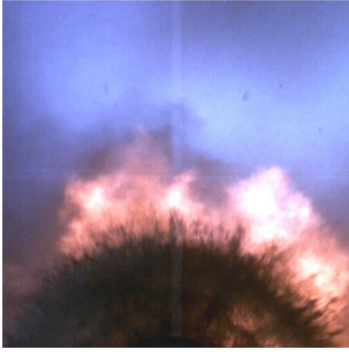
(4)液体为纯甘油时,其爆炸抛撒过程如图 4(d)所示,拍摄时间距起爆闪光 4、8、12 ms。

在图 4(a)中可以看出,虽然填充液体皆为水,但由于此时导爆索线密度为 5 g/m,大于 3 g/m,所以抛撒形态没有出现如图 1(a)中所示的树枝状交叉分布,而是主液体环状区。又因为导爆索线密度小于 11 g/m,所以其环状区的内边缘没有出现如图 1(b)中所示的明显暗黑色分界线,而是有很多针刺分布,且此环状区内的液滴直径也明显大于图 1(b)所示。

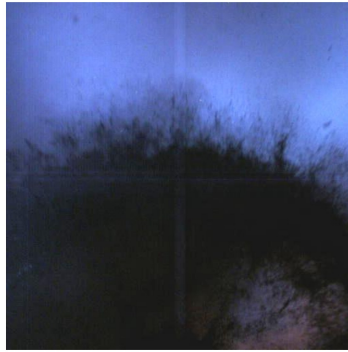
当水与甘油的比例为 3 : 7 时,粘性系数增大,抛撒过程起始阶段,主液体环状区的内外边缘均有很多针刺物,且在抛撒初期的内边缘与约束铝板间有连续的丝缕状液体存在,如图 4(b)所示。而当水与甘油的比例为 5 : 5,粘性系数更大,可明显看出主液体环状区内外边缘的针刺状液体相比于图 4(b)中更多,环状区更宽,速度减小,抛撒初期内边缘与约束铝板间的连续丝缕状液体更多,如图 4(c)所示。

当为纯甘油时,粘性系数更大,如图 4(d)所示。可明显看到在环状区的前缘部分有很多均匀、细、密分布的针刺状液体,在后缘部分也分布着细丝和针刺状液体,在抛撒初期的内缘与约束铝板间连续的丝缕状液体也更多,在环状区内大部分甘油没有完全破碎成液滴,而是以大面积的液体薄膜和丝带状存在。在爆炸产物气体的推动下,环状区的宽度逐渐增加,而内缘与约束铝板间连续的细丝状液体也逐渐破碎成直径较大的液滴。

(a) The volume proportion of water to glycerin is 1 : 0



4 ms

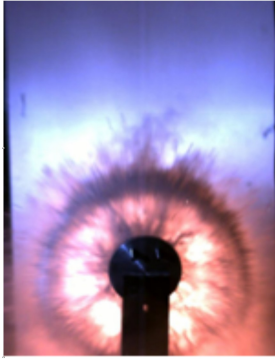


8 ms

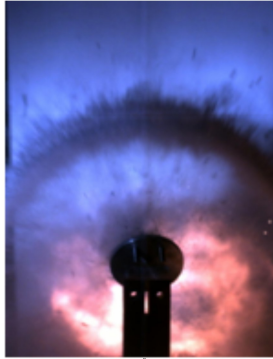


12 ms

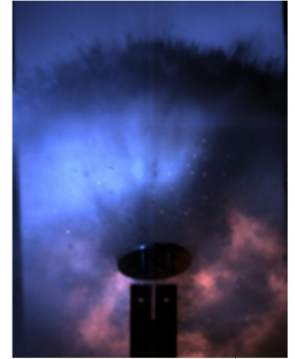
(b) The volume proportion of water to glycerin is 5 : 5



4 ms

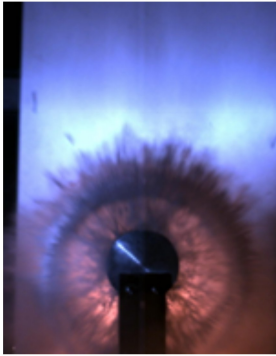


8 ms

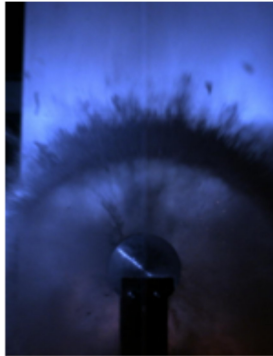


12 ms

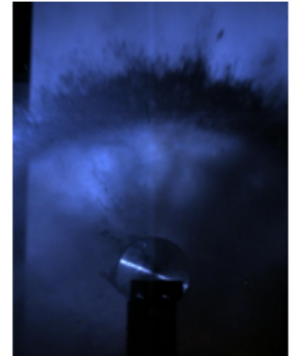
(c) The volume proportion of water to glycerin is 3 : 7



4 ms



8 ms

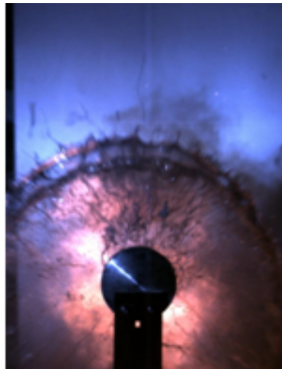


12 ms

(d) The volume proportion of water to glycerin is 0 : 1



4 ms



8 ms



12 ms

图4 不同粘性的液体的爆炸抛撒形态

Fig. 4 Explosion-induced dispersal photos of liquid with different viscosity at the different times after explosive explosion

经分析,环状液体区内边缘与约束铝板间连续丝缕状液体的成因主要是由于壁面处液体向外运动时受到内壁摩擦作用,使得流速降低,进而被拉伸成丝缕状,如同图 1(a)中小药量爆炸抛撒时的情形。当粘性系数越大,摩擦作用越明显,于是连续的丝状液体也越多,持续的时间也越长,最后在表面张力作用下破碎形成较大直径的液滴。外缘的针刺状液体丝则主要是壳体破裂时,液体向外喷射形成的射流。

另外在图 5 中,列出了 2 组爆炸抛撒后附着在约束铝板边缘的壳体碎片情形。由此可以看出壳体在受到爆炸冲击作用时,将沿轴向破裂成一条条的裂片,最后只有与约束铝板粘连的部分会存留下部分长条状裂片,裂片宽度约 2 mm,液体首先在这些裂隙处向外喷射,形成前缘的针刺、细密状射流。



图 5 壳体破裂后形状

Fig. 5 Broken shell images

3.2.2 速度变化分析

为分析不同粘性液体的爆炸抛撒的差异,对距起爆闪光点 3~6 ms 内的爆炸抛撒图像进行处理,得到边界曲线,然后对其进行平均,得到此时间段内平均半径的平均增长速度与混合液中水的比例的关系,如表 1 所示,其中 β 为甘油与水的体积比, \dot{R} 为平均半径增长的平均速度, \dot{R}_m 为平均半径增长的最大速度。

表 1 不同配比液体的速度变化

Table 1 Velocity variety of liquid with different volume proportion between glycerin and water

β	$\dot{R}/(\text{m/s})$	$\dot{R}_m/(\text{m/s})$
1 : 0	18.098 3	19.721 0
5 : 5	24.905 8	25.939 3
3 : 7	28.203 1	29.819 4
0 : 1	35.592 7	36.917 8

由此可知,当液体的粘性系数增加时,不仅抛撒形态会发生变化,抛撒速度也会逐渐减小。这主要是因为随着粘性系数的增大,抛撒过程中液体逐渐从以小液滴为主的分散形态转变为以大液滴、液膜、液片或液体丝为主的分散形态,故所受到的空气阻力将会增加。另外由于甘油的密度比水的密度大,同体积液体的质量也会增加,所以也将导致抛撒速度逐渐减小。

4 结 论

在本文的实验中,中心装药量与抛撒液体质量的比值,即比药量较小,如第 1 组实验中仅为 0.17×10^{-3} ,而在文献[4]中 FAE 武器的比药量一般都在 0.01 左右,需要在以后的实验中提高比药量,但通过小比药量实验,可以逐步掌握液体爆炸抛撒特征,揭示液体爆炸抛撒过程的一些重要现象,如:

(1)当壳体破裂后,液体从裂缝处喷出,形成以针刺状形态为前缘的主液体区,整个抛撒过程呈现先加速后减速的趋势。

(2)对小药量情况,主液体区前缘针刺状形态逐渐分散为交叉树枝状形态,并在抛撒过程中充满整个抛撒场,当液体粘性增加时,分散的树枝状形态会趋于集中。

(3)对大药量情况,主液体区在爆炸产物气体的推动下形成有明显内缘的环状带向外飞散。当液体粘性系数较小时,环状带内的液体直接以离散的小液滴或已雾化的状态出现;当粘性系数增大时,则以大液滴、液膜或液体丝等状态为主的形态出现,且在抛撒早期,由于约束铝板壁面的粘滞作用,环状带的

内缘也会出现针刺状液体,甚至与铝板相连。在抛撒过程中,主液体环状带并非逐渐膨胀变薄,而是被逐渐拉伸变宽、变稀疏,其间分散的液体也逐渐都破碎成小液滴。

(4)为液体爆炸抛撒过程的数学建模,提供了更符合真实情况的思路。因为在液体爆炸抛撒过程中,自壳体破裂后,液体并非以连续液体环的形式出现,而是以离散态喷出,如交叉树枝状、液滴、液膜和液体丝等,所以此过程应以多相流混合过程为主,而非以连续液体扰动破碎或膨胀变薄破碎为主。

现有工作仅是对液体爆炸抛撒特征的初步认识,仍需继续深入研究。

参考文献:

- [1] Samirant M, Smeets G, Baras C, et al. Dynamic measurements in combustible and detonable aerosols[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1989,14(2):47-56.
- [2] Zabelka R J, Smith L H. Explosively dispersed liquids (Part 1): Dispersion model[R]. AD0863268,1969.
- [3] Gardner D R. Near-field dispersal modeling for liquid fuel-air explosives[R]. SAND-90-0686,1990.
- [4] 薛社生. 液体燃料的爆炸抛撒研究[D]. 南京:南京理工大学,1997.
- [5] 丁珏. 液体的爆炸抛撒理论模型及全过程数值模拟[D]. 南京:南京理工大学,2001.
- [6] 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.

Dispersion characters of liquid induced by explosion^{*}

REN Xiao-bing, LI Lei, YAN Xiao-fang, LU Xiao-xia,
WANG Jin-sheng, WANG Hai-yan

(*School of Aerospace, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

Abstract: An experimental device was designed to investigate the process characters of liquid explosion dispersion. The liquid dispersion process was recorded by using a high-speed camera. The several cases were taken into account, which included different explosive quantities and different viscosity liquids. It is found that as soon as the container is broken, the liquid disperses through the splits. In the case of small explosive quantity, the liquid dispersion pattern looks like an intercross tree, then breaks into small droplets. In the case of larger explosive quantity, the liquid dispersion pattern looks like an annulus. The liquid annulus consists of small droplets, vaporized liquid, atomized liquid, or liquid sheet, ligaments and big droplets, depending on the viscosity of the liquid. The width of the liquid annulus increases in the dispersion process, and the liquid sheet, ligaments and big droplets can break into small droplets.

Key words: mechanics of explosion; explosion dispersion; break-up; liquid; droplet; viscosity

* Received 13 July 2009; Revised 15 December 2009

Supported by the National Natural Science Foundation of China (10572149,10676120)

Corresponding author: REN Xiao-bing, renbing202@sohu.com