

文章编号: 1001-1455(2003)01-0091-05

强冲击波作用下液体抛撒的实验研究*

吴德义, 杨基明

(中国科学技术大学力学与机械工程系, 安徽 合肥 230027)

摘要: 通过强冲击波作用下液体抛撒的系列实验, 总结分析了抛撒液体尺寸、爆炸装药量、抛撒液体性质等对液体抛撒运动过程、抛撒半径及液体抛撒作用时间的影响, 发现强冲击波作用下液体抛撒速度随时间呈指数衰减, 不同的实验参数对衰减系数将产生一定影响。

关键词: 爆炸力学; 爆炸抛撒; 抛撒速度; 抛撒半径; 爆炸抛撒作用时间

中图分类号: O383 国标学科代码: 130°35 文献标志码: A

1 引言

液体抛撒在军事工程、爆炸灾害防治、工农业生产等方面有广泛的应用^[1]。分析强冲击波作用下液体抛撒运动的特点, 确定液体抛撒半径、抛撒作用时间的影响因素等有重要的理论研究和工程实用价值。国内外学者在爆炸抛撒方面开展了很多的研究, 包括针对爆炸抛撒的过程寻求合理的物理数学描述^[1-5], 从稳定性的角度揭示抛撒雾化机理^[2-6], 以及通过相似性对尺度效应进行规律性概括^[7]等。本文中通过实验室规模的模型实验, 探索了对爆炸抛撒起关键作用的诸多因素, 如爆炸装药量、液体量、液体性质等对液体抛撒速度、抛撒半径以及作用时间的影响, 并在总结规律的基础上寻求具有实用和学术参考价值的工程估算方法。

2 实验设计

液体在强冲击波作用下获得初速度后向周围空气中运动, 由于液体表面张力、粘性、空气阻力等的共同作用, 在抛撒和雾化的同时, 其运动速度逐渐降低, 同时散布在一定范围的空气中。液体抛撒初期(近场阶段)的最大速度主要由液体密度、液体容器直径、爆炸装药量的大小确定, 空气阻力由液滴尺寸和运动速度确定, 因此最终影响液体抛撒的因素是液体表面张力 σ 、液体密度 ρ 、液体粘性系数 μ 、液体容器直径 D 、中心爆炸装药量 Q 等。本文中实验的内容力求体现这些因素对液体抛撒过程的影响。

实验模型如图 1 所示, 液体由直径可变的 PVC 管盛装, 置于上下盖板之间。上下盖板为 30mm 厚的钢板, 由粗螺栓定位, 因此爆炸抛撒过程中两盖板间隙可视为不变, 从而保证抛撒沿径向发展。爆炸抛撒过程用 Speedcam 高速 CCD 相机(拍摄速度 1000 ~ 10000 幅/s, 最高分辨率 512×512 像素)拍摄, 实验中拍摄频率选为 1000 幅/s 以保证最高分辨率。

实验条件如表 1 所示。对物性相近而密度不同的盐水和进行对比实验, 分析密度变化对液体抛撒的影响; 在液体为水, 爆炸装药量为 1g, 液体容器直径分别为 5、7.5、10、14cm 时进行对比实验, 分析液体量的变化对液体抛撒的影响; 液体直径为 5cm, 装药量为 1g, 液体对比为水、酒精、柴油和汽油时进行对比实

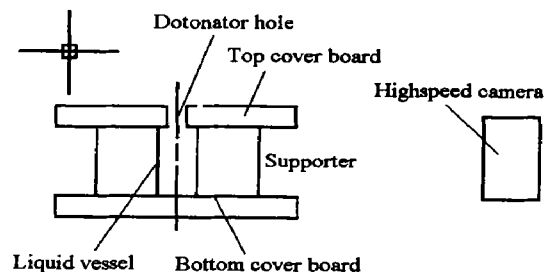


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Experimental set-up

* 收稿日期: 2002-01-22; 修回日期: 2002-05-10

作者简介: 吴德义(1966—), 男, 博士研究生, 讲师。

验,分析液体物理性质的变化对液体抛撒的影响;在液体相同,装药量不同时,比较爆炸装药量的变化对液体抛撒的影响;在爆炸装药量为 1g,液体为水,液体筒直径为 14cm 时进行对比实验,验证液体抛撒的可重复性。

表 1 实验条件

Table 1 Experimental conditions parameters

序号	液体种类	容器直径/cm	炸药量/g	序号	液体种类	容器直径/cm	炸药量/g
1	盐水	5.0	1	8	水	7.5	3
2	水	5.0	1	9	盐水	7.5	1
3	盐水	5.0	1	10	盐水	7.5	1
4	酒精	5.0	4	11	水	10.0	4
5	柴油	5.0	1	12	水	10.0	1
6	汽油	5.0	1	13	水	14.0	3
7	水	7.5	1	14	水	14.0	1

3 实验结果

强冲击波作用下液体在装药起爆 1~2ms 后即获得最大抛撒速度,开始时抛撒速度随时间衰减较快,随后衰减较慢。图 2 给出了典型的抛撒过程实验照片,其中初始液体直径为 14cm,装药量为 1g,实验液体为水。从测量的数据结果可以看出:液体抛撒的最大初速度随液体容器直径和密度的增大而减小,随爆炸装药量的增大而增大;液体抛撒速度的衰减幅度随装药量的增大而增大,随液体容器直径增大而减小;液体抛撒作用时间随液体容器直径增大而增大,随装药量的增大而减小;表 2 中为序号 13, 14 的实验数据表明实验的可重复性较好。

不同条件下,液体抛撒的最大初速度 v_0 、抛撒半径 r 、作用时间 t 和能量利用系数 k 如表 2 所示;液体抛撒运动速度随时间的变化如表 3 所示。

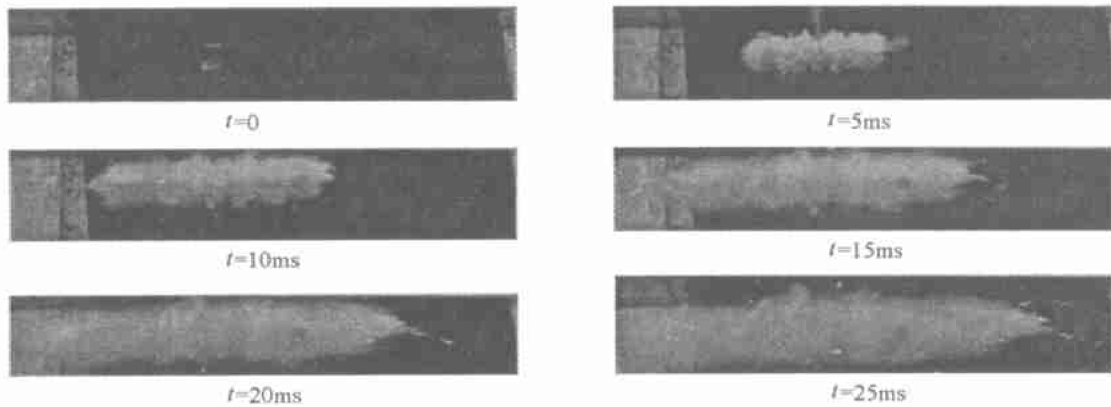
图 2 不同时刻水抛撒运动照片 ($Q=1\text{g}$, $D=14\text{cm}$)

Fig. 2 Water dispersal photographs

表 2 不同实验条件下液体抛撒的最大初速度、抛撒半径和作用时间

Table 2 Maximum velocity, radius and time of explosive dispersals under different conditions

序号	r/m	t/cm	$v_0/(\text{m/s})$	k	序号	r/m	t/cm	$v_0/(\text{m/s})$	k
1	1.00	25	147	0.66	8	1.40	30	120	0.76
2	1.20	22	170	0.68	9	1.25	30	97	0.65
3	1.37	20	268	0.60	10	2.10	25	196	0.66
4	1.63	20	188	0.65	11	1.00	65	83	0.65
5	1.54	20	200	0.74	12	2.10	48	138	0.60
6	1.68	45	204	0.74	13	2.80	100	70	0.90
7	1.92	25	178	0.56	14	2.60	100	65	0.80

表 3 不同实验条件下液体抛撒运动速度随时间的变化

序号	0~5ms	5~10ms	10~15ms	15~20ms	20~25ms	25~30ms	30~35ms	35~40ms	40~45ms
1	147	63	40	19	15				
2	170	69	46	27	9				
3	268	90	39	16	13				
4	188	84	55	23	8				
5	220	105	38	24	20	11			
6	204	88	38	16	13	13			
7	184	100	50	38	20	13			
8	120	96	62	35	17	10			
9	97	77	36	23	18	12	9		
10	196	100	58	40	33	24	16		
11	83	70	64	44	28	25	21	16	
12	138	93	72	59	37	28	19	9	
13	70	52	48	46	40	38	35	33	28
14	65	49	45	43	37	35	32	30	26

4 实验数据处理

4.1 液体抛撒初速度的估算

爆炸冲击波作用下, 抛撒液体的加速过程是爆轰产物与液体相互作用的复杂过程, 但从能量分配的角度^[4], 液体抛撒初期所获得的最大速度可按下式估算

$$v = \sqrt{2kE/m} \quad (1)$$

式中: k 为能量利用系数, E 为装药爆炸释放的总能量, m 为抛撒液体的质量。据式(1)结合实际测量的 v 值求得能量利用系数 $k=0.6 \sim 0.8$, 不同实验条件下的计算 k 值如表 2 所示, 该结果与文献[4]的结论相符。

4.2 液体运动速度随时间变化规律的回归分析

通过对表 3 所给出的不同条件下液体抛撒速度值随时间变化的实验结果的回归分析发现, 采用式(2)的拟合计算公式能较好地刻画液体的爆炸抛撒过程

$$v = v_0 \exp(\omega t) \quad (2)$$

式中: v_0 为液体抛撒最大初速度, ω 为系数, t 为液体抛撒运动时间, 这里忽略了初始的加速过程。由回归得到的不同实验条件下的 v_0 和 ω 见表 4。

从表 4 中可以看出按式(2)拟合得到的 v_0 和表 2 中的实测值基本相符。

表 4 由实验结果拟合的式(2)、(7)和式(8)中的参数值

Table 4 Calculated parameters in Eqs (2), (7) and (8) based on experimental data

序号	v_0 (m/s)	ω/s^{-1}	r/m	t/ms	序号	v_0 (m/s)	ω/s^{-1}	r/m	t/ms
1	144.6	-141	1.05	21	8	126.4	-85	1.52	35
2	167.5	-150	1.17	20	9	100.7	-88	1.18	34
3	266.7	-204	1.35	15	10	190.3	-109	1.79	28
4	185.7	-140	1.40	21	11	86.8	-46	1.94	65
5	220.2	-154	1.48	20	12	135.1	-63	2.19	48
6	202.4	-190	1.12	16	13	65.2	-25	2.73	122
7	182.6	-118	1.59	26	14	60.6	-25	2.52	121

注: v_0 、 ω 根据式(2)回归得到; r 、 t 分别根据式(7)、(8)计算得到。

4.3 抛撒半径的估算

液体抛撒速度和液体抛撒半径的关系为

$$v = dr/dt \quad (3)$$

将式(2)中的 v 代入式(3), 可得

$$r = c + (v_0 \omega) \exp(\omega t) \quad (4)$$

式中: c 为积分常数。由 $t=0$ 时, r 为液体容器半径 a , 可得

$$c = a - v_0 \omega \quad (5)$$

因此, 最后可得到不同时刻液体抛撒半径

$$r = a - (v_0 \omega) (1 - \exp(\omega t)) \quad (6)$$

$$r = a - v_0 \omega \quad t \rightarrow \infty \quad (7)$$

由此可见, 根据上节中拟合得到的 v_0 和 ω 可以推算出最终的抛撒半径, 据此得出的 r 示于表 4, 对照表 2 的实测值和表 4 的估算值可以看出, 两者比较符合。

4.4 液体抛撒时间的计算

从式(4)中可以看出, 液体抛撒后期抛撒半径变化很小, 如果以液体抛撒半径达到拟合关系中最大半径的 95% 时的作用时间为液体抛撒作用时间, 可得液体抛撒时间为

$$t = -3.0 / \omega \quad (8)$$

式中: t 为液体抛撒作用时间, s。由该式推算的液体抛撒时间也列于表 4 中, 对比表 2 和表 4 可以看出采用式(8)进行估算基本上能够反映爆炸抛撒的时间尺度。

5 实验参数变化对液体抛撒影响分析

从上面得到的拟合关系不难发现, 液体抛撒的初速度、速度衰减系数等对宏观抛撒过程起着重要作用。因此有必要讨论初始实验条件对这些因素的影响。

5.1 液体量的变化对液体抛撒的影响

在试验液体为水、装药量为 1g、液体容器直径分别为 5、7.5、10、14cm 四种情况下进行抛撒对比实验, 得出液体抛撒速度随时间变化的回归关系如图 3。结合表 2 和表 4 的结果可以看出, 液体量的变化对液体抛撒的初速度、速度衰减系数、液体抛撒作用时间和液体抛撒半径都产生显著影响, 液体容器直径的增大使抛撒初速度减小, 但同时使液体速度衰减系数的绝对值减小, 综合结果是液体容器直径增大时, 液体抛撒半径和液体抛撒作用时间增大。

5.2 爆炸装药量的变化对液体抛撒的影响

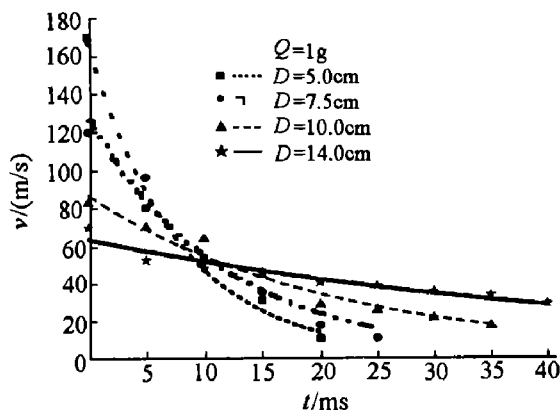


图 3 液体容器直径不同时水的抛撒速度随时间变化
Fig.3 Variation of water dispersing velocity with time under different initial size

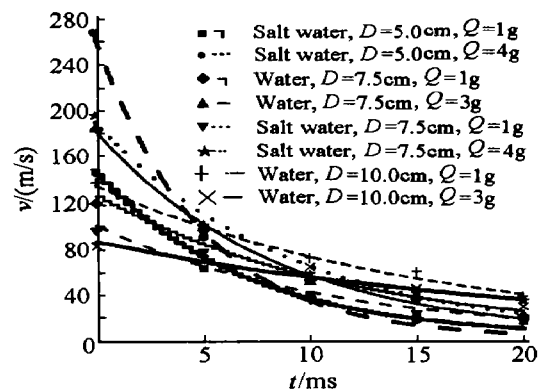


图 4 不同装药量情况下液体抛撒速度随时间变化
Fig.4 Variation of water disperse velocity with time under different mass of explosive

图 4 给出了在装药量不同的情况下, 液体容器直径分别为 5、7.5、10cm 时水和盐水的抛撒对比实验结果。从图中可以看出, 即使液体容器直径或密度不同, 初始爆炸能量的影响也具有共同趋势, 随着装药量的增大, 液体抛撒初速度显著增大, 但同时使抛撒速度衰减系数绝对值增大, 液体抛撒作用时间减小, 结合表 2 和表 4 可得其综合结果使液体抛撒半径增大。

5.3 液体性质变化对液体抛撒的影响

不同种类液体抛撒速度随时间的变化关系如图 5 所示。对比实验 1(盐水)与实验 2(水),在液体其它性质相近的情况下,密度变化时,对抛撒初速度产生较为显著的影响,但对液体抛撒的衰减速度 ω 影响不显著,因而对液体抛撒的时间影响也不显著;对比实验 2(水)和实验 4(酒精)可以看出,在考虑密度变化对液体抛撒初速度影响后,表面张力的变化对液体抛撒各参数的影响都不显著;比较实验 4(酒精)与实验 5(柴油)可以看出,即使对其它物性明显不同的液体,在密度、表面张力基本相同的情况下,抛撒的差别并不显著。

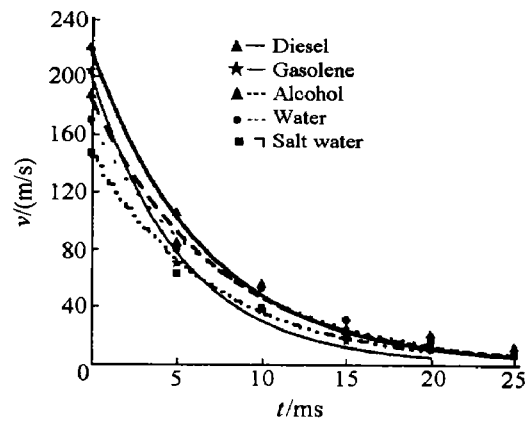


图 5 不同种类液体抛撒速度随时间变化

Fig.5 Variation of dispersing velocity with time for different type of liquids

6 结 论

强冲击波作用下液体抛撒速度随时间呈指数关系衰减,液体容器直径和爆炸装药量对液体抛撒最大初速度、速度衰减系数、抛撒半径以及液体抛撒作用时间产生显著影响。相对来说,液体本身的物理性质对速度衰减系数以及液体抛撒的作用时间等影响不太显著。

参考文献:

- [1] 丁 . 液体的爆炸抛撒理论及全过程的数值模拟[D]. 南京: 南京理工大学, 2001.
- [2] Gardner D R. Near-field dispersal modeling for liquid fuel-air-explosive[R]. SAND90-0686, 1990.
- [3] Gardner D R, Glass M W. A Coupled near - field, far - field dmispersal modeling for fuel - air - explosives [R] . SAND90-0687, 1990.
- [4] Glass M W. Far-field dispersal modeling for fuel-air-explosive Devices[R]. SAND90-0528, 1990.
- [5] Zabelka R J, Smith L H. Explosively dispersed liquids[R]. AD-863268, 1969.
- [6] 蔡庆军. 液体轴对称抛撒, 破碎和雾化的实验室研究[R]. 合肥: 中国科学技术大学, 1999.
- [7] 薛社生, 刘家骢, 秦承森, 等. 燃料爆炸抛撒成雾的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2001, 21(4): 272-276.
XUE She-sheng, LIU Jia-cong, QIN Cheng-sen, et al. Experimental and numerical inverstigation on explosive dispersal and cloud forming[J]. Explosion and Shock Waves, 2001, 21(4): 272-276.

Experimental investigation on liquid dispersal induced by explosions

WU De-yi, YANG Ji-ming

(Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, Anhui, China)

Abstract: Experimental investigations were carried out for liquid dispersal induced by explosions. The interests were focused on the dependences of explosive dispersal process, such as maximum dispersing velocity, dispersing radius etc., on the initial size of liquid vessel, mass of explosive and so on. It was found that the dispersing velocity decreases exponentially with time, in which the coefficient depends on initial experimental conditions.

Key words: mechanics of explosion; explosive dispersal; dispersing velocity; dispersing radius