

文章编号: 1006-9941(2007)05-0451-04

气体发生剂高压燃气驱动液体高速喷雾的试验研究

赵林双, 杜志明

(北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

摘要: 介绍一种气体发生剂高压燃气驱动的高速液体喷洒装置, 利用高速摄影和压力测试系统, 研究了安装螺旋喷嘴的喷洒装置在不同装药量下的喷射初始速度和液体雾化射流的扩展过程。实验结果表明, 气体发生剂装药量大于 50 g 时, 喷洒装置可快速形成稳定的喷雾锥, 随着药量的加大, 喷嘴的雾化效果也显著提高。并发现气/液界面的 Rayleigh-Taylor (RT) 不稳定性会对喷嘴的正常工作带来不良影响。

关键词: 流体力学; 气体发生剂; 螺旋喷嘴; 高速摄影

中图分类号: TJ55; O35

文献标识码: A

1 引言

用气体发生剂燃烧产生的高压气流驱动大量液体形成高压射流或喷雾是一项新技术, 它在军事、消防等研究领域具有重要的实用价值。Ostensen、Rao 等^[1,2]对用炸药爆炸产生的液体射流进行了实验研究和理论分析, 并成功地运用于燃料空气炸弹的燃料抛洒, 但爆炸抛洒液体射流的方向不易控制, 很难形成定向喷洒。施红辉、岸本熏实等^[3-5]采用激波管和高速摄影对喷雾过程进行了深入研究。金志明等^[6]采用一种火药燃气驱动活塞运动的喷射装置, 对液体射流雾化性能进行了研究。杨林等^[7]基于爆炸推进原理提出了一种爆震雾化射流发生装置, 对其工作原理、动力特性进行了分析, 并对装置的灭火机理和灭火效果进行了研究。但他们的研究离真正形成流体技术还有一定的差距。

本工作采用高速摄影与压力测试相结合的方法, 对气体发生剂燃烧产生的高压燃气驱动液体形成喷雾的过程进行了研究。

2 试验方法和设备

2.1 实验装置

液体喷洒雾化实验装置如图 1 所示。它主要由三个部分组成: 第一, 位于底部的长度为 180 mm 的燃气压力缓冲室; 第二, 安装在缓冲室内的气体发生器; 第三, 位于缓冲室上部的长度为 350 mm 装有雾化喷

嘴的贮液室。缓冲室和贮液室均为内径 68 mm 圆管。压力缓冲室和贮液室之间、贮液室与喷口之间均用 150 μm 厚的铝膜片隔开。实验时在液体容器中加满水, 体积约为 1.25 L。工作过程是先由点火装置点燃点火药, 随后气体发生剂迅速全面燃烧, 高温高压气体通过气体发生器喷口迅速排入燃气压力缓冲室, 当缓冲室内压力超过铝膜片的破开压力时, 燃气冲破膜片, 压缩贮液室内的液体, 液体压力也随之迅速升高至雾化喷嘴破膜压力, 冲开喷嘴密封膜片, 液体经雾化喷嘴喷出形成高速雾锥。试验中, 通过压力传感器采集压力信号, 经放大器放大后由高频示波器记录压力信号, 并通过布置在距离喷口 5 m 处的高速摄影仪拍摄雾锥形成过程。

实验选用螺旋喷嘴 (spiral jet spray nozzles, 见图 2)。该喷嘴是一种锥形喷雾喷嘴, 有着畅通的流道设计, 液体通过与连续变小的螺旋线相切和碰撞后, 变成小液滴喷出, 可以最大程度地减少流体阻塞, 在同一条件下可达到最大流量 ($720 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$) 和最大覆盖范围, 已广泛应用于消防灭火和高粘性液体如水煤浆的喷洒雾化。实验中使用的液体发生剂在 50 ms 内就可燃尽, 为避免实验装置外壳长时间承受高压, 要求贮液室内的大部分液体在 100 ms 内排完, 因此需要使用大流量喷嘴。实验选用喷嘴流量为 $525 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ (压力 10 MPa), 喷雾角 120° , 喷嘴流道直径 14 mm。

2.2 气体发生剂选择

烟火气体发生剂是一种能以快速化学反应 (燃烧) 方式产生大量气体的烟火药剂, 本实验采用北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室开发的新型非叠氮化物类气体发生剂^[8]。该气体发生剂的火药力: $359.29 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$; 余容: $4.24 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{kg}$; 燃烧温度 (1 atm): 1185 K。

收稿日期: 2006-09-27; 修回日期: 2007-08-06

作者简介: 赵林双 (1972 -), 男, 博士研究生, 从事火工烟火技术研究。
e-mail: zhaolinshuang@sohu.com

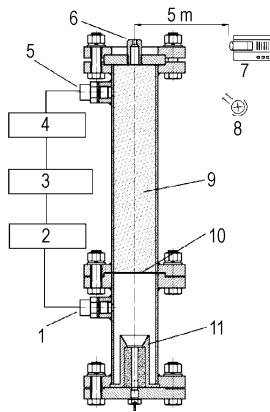


图1 气体发生器驱动水喷雾实验装置

- 1—压力传感器, 2—放大器,
3—数字示波器, 4—放大器, 5—压力传感器,
6—水雾喷嘴, 7—高速摄影仪, 8—光源,
9—水, 10—铝膜, 11—气体发生器

Fig. 1 Apparatus of using gas generator to drive water spray

- 1—pressure transducer, 2—charge amplifier,
3—digital oscilloscope, 4—charge amplifier,
5—pressure transducer, 6—atomizer nozzle,
7—high speed camera, 8—lamp house, 9—water,
10—aluminium film, 11—gas generator



图2 螺旋喷嘴

Fig. 2 Spiral jet spray nozzles

2.3 实验仪器

示波器: 美国泰克 TDS5104B 数字示波器, 最大采样频率 1 GHz; 压力传感器: AK-4 (中国航空气动力技术研究院), 静态标定系统误差小于 0.5%, 采样频率大于 10 kHz; 高速摄影仪: KODAK EKTAPRO-EM 高速运动分析仪; 气体发生器及喷洒设备自制。

3 实验结果与讨论

3.1 不同装药量对喷洒效果的影响

实验中选用 5 种不同的气体发生剂装药量 (30 g, 40 g, 50 g, 70 g, 90 g), 每种装药量进行两种喷洒方式实验: (1) 喷口垂直于地面向上喷洒, 目的是在最不利

利于液体喷出的情况下测得喷洒器中残余的液体量; (2) 喷口平行于地面水平喷洒, 目的是测量液体的水平喷洒距离。第一种喷洒方式测得的贮液室压力曲线如图 3 所示。喷射时间、水平喷射距离、喷口初始速度等参数见表 1。水平喷射距离为第二种喷洒方式获得, 其他均在第一种喷洒方式下获得。

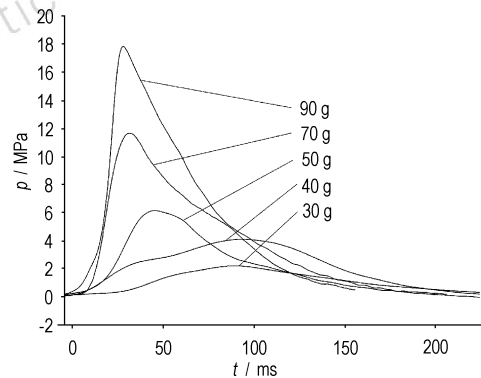


图3 贮液室液体压力曲线

Fig. 3 Liquid pressure vs time in reservoir

从图 3 中可以看到, 在装药量为 30 g、40 g 的情况下, 贮液室达到最大压力所需的时间较长, 压力曲线较平缓, 喷洒时间较长。随着装药量的加大, 贮液室达到最大压力所需时间明显缩短, 压力上升曲线变得很陡, 这些变化更有利于喷嘴在喷洒初始阶段即形成雾化较好的喷雾锥。气体发生剂燃速遵循指数函数公式^[9]: $r = u_0 + u_1 p^n$, 式中 u_1 是由实验确定的常数称为燃速常数, n 则称为燃速指数, 气体发生器燃烧室内压力的增加会使燃速大幅度增加, 燃烧时间缩短, 表现在压力曲线上就是达到最大压力的时间迅速减少, 压力上升曲线变陡。

喷洒系统在水平喷洒时, 实测的水平喷射距离随装药量的增大而增大, 但当系统装药量大于 70 g 时, 水平喷射距离增加已经不太明显, 这是因为系统压力增大会使喷嘴的雾化效果明显变好, 雾滴直径也会随之变小, 空气阻力对雾滴的影响变大, 使得喷射距离没有明显的增加。

高压燃气冲破贮液室与压力缓冲室之间的铝膜时, 高压气体冲入液体, 会挤压一部分液体沿着筒壁向缓冲室运动, 当喷射结束后这部分液体会遗留在喷洒器内无法喷出。从表 1 可以看到, 喷洒器内剩余的液体随着装药量的增加而减少。装药量大于 70 g 时, 剩余的液体量已经很少, 不足总装液量的 9%, 完全可以满足实际应用的要求。

表 1 喷洒装置在不同装药量下喷洒的实验数据
Table 1 Experimental data of apparatus water spray

charge quantity /g	maximal pressure in reservoir/MPa	time of obtaining maximal pressure/ms	initial velocity of jet /m · s ⁻¹	spraying		residual liquid volume /mL
				distance ¹⁾ /m	time/ms	
30	2.22	94	12.5	4.8	308	320
40	4.1	98	20.6	5.5	268	245
50	6.15	50	26.8	6	236	215
70	11.6	36	32.6	8	212	105
90	17.8	32.7	36.1	8.7	168	75

Note: 1) the superscript denote the data is obtained under the second experimental method (the nozzle is horizontal). Other data is obtained under the first experimental method (the nozzle is vertical).

3.2 装药量对喷嘴雾化效果的影响

图 4 是喷洒装置在垂直喷洒状态下装药量为 30 g 时喷雾锥形成过程的高速摄影照片 ($f = 500$ 帧/s), 喷嘴射流在喷洒的最初阶段, 雾化现象不是很明显, 能观察到雾锥体分成多层结构, 没有形成实心雾锥, 喷洒进行到 52 ms 时, 才能清晰看到液体射流前锋发生明显变化, 雾化效果逐渐开始变好。图 5 是喷洒装置在 50 g 装药量下喷雾锥的形成过程的高速摄影照片 ($f = 500$ 帧/s), 液体射流在 8 ms 时即可形成雾化效果较好的实心水雾锥。图 6 是喷洒装置在 90 g 装药量下喷雾锥的形成过程的高速摄影照片 ($f = 500$ 帧/s), 液体射流在 2 ms 时雾化效果已经相当好, 在 6 ms 时已形成液滴密度较大的实心雾锥, 喷洒装置在该装药量下, 几乎整个喷洒过程都能形成雾化良好的实心雾锥。Ingebo^[10] 通过对射流喷射过程的摄影研究, 总结出平盘溅射雾化喷嘴雾滴直径计算方法。他推导出液膜在静止空气中碎裂的雾滴平均直径计算公式: $d = d_j / (2.8 \times 10^{-4} Re_j)$, 式中, d_j 为喷嘴直径; $Re_j = \rho_l u_j d_j / \mu_l$ 是喷嘴的雷诺数; μ_l 为液体粘度系数; u_j 为喷嘴流速。

螺旋喷嘴的雾化过程也是射流的喷射过程, 从公式中可以看出雾滴的平均直径同喷嘴喷射速度成正比, 30 g 装药量下喷嘴射流的初始速度是 $12.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 该速度下喷嘴不能形成密实的喷雾锥, 50 g 装药量下喷嘴射流的初始速度是 $26.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 此时喷嘴在初始阶段就可形成较密实的喷雾锥, 实验表明要想在喷洒的初始阶段即获得雾化较好的喷雾锥, 喷嘴的初始速度不应低于 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

图 7 是喷洒装置在 90 g 装药量下喷雾锥喷射后段的高速摄影照片 ($f = 500$ 帧/s), 喷射进行到 120 ms 时雾锥的喷雾角开始变小, 射程开始变短, 到达 136 ms 时上述现象变得更加明显。经过分析发现, 喷嘴喷射状态的改变, 是因为高压气体冲击液体表面产生了气/液相界面上的 Rayleigh-Taylor (RT) 不稳定性^[11] 的缘故。高压气体冲破液膜之后会冲破液体界面, 进入液体内部, 形成气泡, 这样整个喷洒装置内部会分为三个部分: 上部为喷洒液体, 中部为气液混合物, 下部为高压燃气。当气液两相流进入喷嘴时, 混在液柱中的气体使得喷嘴的雾化效果更好, 液滴更小, 这样就使喷嘴发生了上面描述的现象。

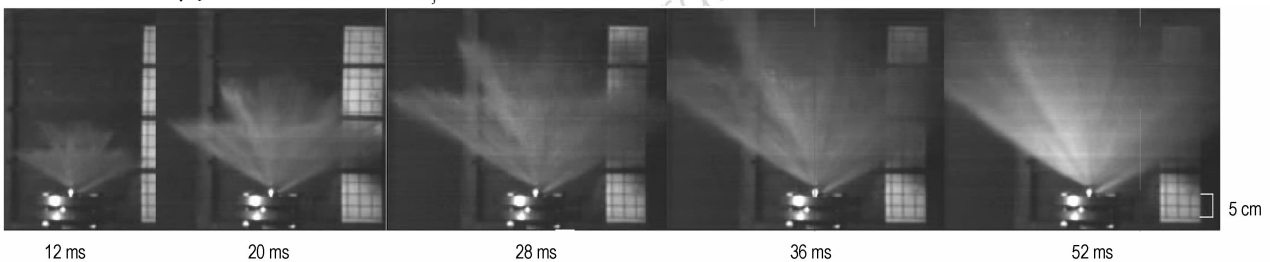


图 4 30 g 药量喷洒装置喷雾锥形成过程

Fig. 4 Photographs of atomizer cone with 30 g charge

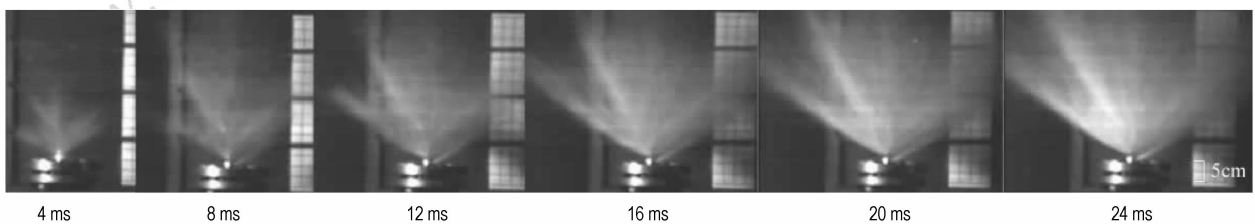


图 5 50 g 药量喷洒装置喷雾锥形成过程

Fig. 5 Photographs of atomizer cone with 50 g charge

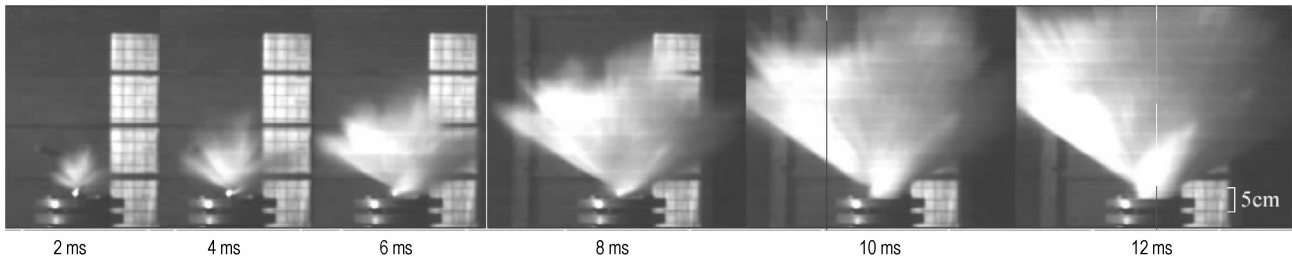


图6 90 g 药量喷洒装置喷雾锥形成过程

Fig. 6 Photographs of atomizer cone with 90 g charge

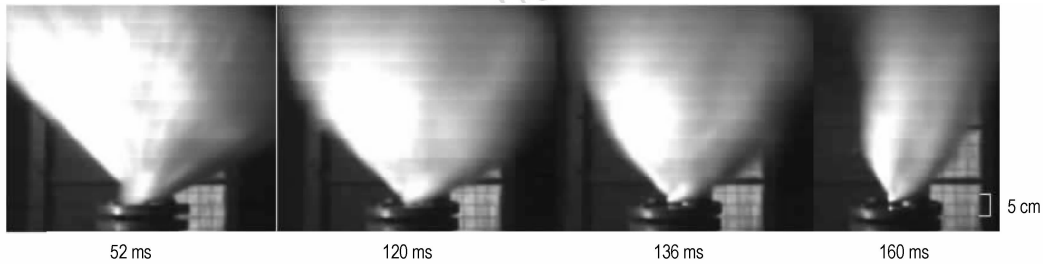


图7 90 g 药量喷洒装置喷射末段喷雾锥变化过程

Fig. 7 Photographs of end portion of the spraying progress with 90 g charge

4 结 论

(1) 使用气体发生剂高温燃气驱动液体喷洒可产生大流量分散均匀的水雾云团。

(2) 在本实验条件下,50 g 以上的装药量都可以快速生成稳定的喷雾锥。

(3) 加大装药量能增加喷雾的速度和水平射程,缩小平均液滴直径。

(4) 气/液界面产生的 Rayleigh-Taylor 不稳定性现象,影响喷嘴的正常工作状态,使得喷雾锥减小,喷射距离减小。

参考文献:

- [1] Ostensen R W, Editor. Compendium on fuel-air-explosives [R]. SAND 86-2537,1987.
- [2] David R Gardner. Near-field dispersal modeling for liquid fuel-air-explosives[R]. SAND 90-0686,1990.
- [3] 施红辉,岸本熏实. 瞬态加速液柱的流体力学问题研究[J]. 爆炸与冲击,2003,23(5): 391-396.
SHI Hong-hui, Kishimoto Masami. Fluid mechanics in the transient acceleration of a liquid column [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2003,23(5): 391-396.
- [4] SHI Hong-hui, WANG Xiao-liang, Itoh M, et al. Acceleration of water column and generation of large flow rate water spray by shock tube [J]. *JSME International Journal Ser B*,2001,44(4): 543-551.
- [5] SHI Hong-hui, WANG Xiao-liang. Hydrodynamic shock tube for quick transportation of spray with large flow rate [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*,2001,40(11): 6668-6674.
- [6] 金志明,栗保明,余永刚. 高速液体受限射流扩展状态研究[J]. 爆炸与冲击,1998,18(3): 193-197.
JIN Zhi-ming, LI Bao-ming, YU Yong-gang. Investigation of divergence form of confined high speed liquid jets [J]. *Explosion and Shock Waves*,1998,18(3): 193-197.
- [7] 杨林,唐川林,张风华,等. 爆震雾化射流用于灭火的可行性研究 [J]. 中国安全科学学报,2003,13(7): 12-15.
YANG Lin, TANG Chuan-lin, ZHANG Feng-hua, et al. Feasibility study on a new fire extinguishing technology with a detonation mist jet [J]. *China Safety Science Journal*,2003,13(7): 12-15.
- [8] 王宏社. 富氮基烟火气体发生剂研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2005.
WANG Hong-she. Study on nitrogen-rich based gas generating pyrotechnic compositions [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2005.
- [9] 李昼堂. 火药与内弹道 [M]. 北京: 国防工业出版社,1988.
- [10] Ingebo D. Atomization of liquid sheets in high pressure air-flow [R]. NASA TM-83731,1984.
- [11] Zhou Y. A scaling analysis of turbulent flows driven by Rayleigh-Taylor and Richtmyer-Meshkov instabilities [J]. *Physics Fluids*,2001,13(2): 538-543.

(下转 463 页)

Mechanical Behavior and Constitutive Model of Pressed Aluminized Explosive

CHEN Rong, LU Fang-yun, LIN Yu-liang, WANG Rui-feng

(Department of Applied Physics, Institute of Science, NUDT, Changsha 410073, China)

Abstract: Compressive behaviors of a pressed aluminized explosive with different densities ($1.5, 1.6, 1.7 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) were investigated experimentally by split Hopkinson pressure bars (SHPB) and hydraulic testing machine at different strain-rates (ranged from 0.008 s^{-1} to 800 s^{-1}) respectively. Nonlinear stress-strain curves at different strain rates were obtained. The results show that the mechanical behaviors of the aluminized explosive is obviously rate-dependent, and the corresponding failure stresses become higher if the original density or loading strain rates rise. A constitutive relation was established base on the experimental curves.

Key words: solid mechanics; aluminized explosive; constitutive model; strain rate effect

(上接 446 页)

Characteristic of the Thermobaric Explosive Contained Aluminum Powders

PEI Ming-jing^{1,2}, MAO Gen-wang¹, HU Hua-quan², CHEN Li-qiang²

(1. Northwest Polly University, Xi'an 710072, China; 2. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: A thermobaric explosive containing aluminum powder shaped flake and many physic-chemical parameters' testing courses of the fuel were mainly introduced. The energy contained in fuel was calculated, the energy releasing efficiency of fuel was tested in different environment, and the fireball's expanding characteristic and shockwave's removing process were studied. The results show that the fuel's energy density is $16.11 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ theoretically, about 4 times of TNT-equivalency. The energy releasing rate of the aluminum flakes in the fuel is fast, and the released energy enhances the shockwave immediately when the shockwave is born and spreads. The fuel is safe in using and depositing. The capacity of the fuel's anti-loading is identified well after impact test and shooting test in large caliber fire-guns, and also show that the fuel is safe under the overload by $1.7 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. The fuel's stability is adopt to the large caliber fire-guns' shooting condition.

Key words: applied chemistry; thermobaric fuel; explosion; aluminum flake

(上接 454 页)

High-speed Liquid Jet Driven by Burned Gas of Gas Generating Compositions

ZHAO Lin-shuang, DU Zhi-ming

(State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: A new spray device is presented in the paper. Its power source is burned gas produced by combustion of gas generation compositions. High-speed photography was used in the experiments. Atomization processes of spiral jet spray nozzles is studied under five different charge quantities (30 g, 40 g, 50 g, 70 g, 90 g) of gas generator. Experimental results show, the atomizing effect of jet can be improved with increasing charge quantity of the main propellant grains. When charge quantity of gas generator is more than 50 g, the atomizing effect of jet is preferable.

Key words: fluid mechanics; gas generator; spiral jet spray nozzle; high-speed photography