第 25 卷 第 1 期
2011 年 2 月

高 压 物 理 学 报
CHINESE JOURNAL OF HIGH PRESSURE PHYSICS

Vol. 25, No. 1
Feb., 2011

文章编号：1000-5773(2011)01-0073-06

爆炸作用驱动液体抛撒初始阶段数值仿真*

徐豫新[1]，王树山[1]，韩宝成[1]，刘 永[2]

(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. 中国兵器工业规划研究院，北京 100053)

摘要：针对灭火战斗部引战配合设计，研究爆炸作用驱动液体(水基灭火剂)抛撒初始阶段的特性。依据典型灭火战斗部的结构建立数值仿真模型，采用 LS-DYNA 软件进行仿真计算，分别获得了加载系数(驱动装药与液体的质量比)对壳体破裂时间和壳体破裂初期液体/空气界面运动速度的影响规律，以及液体/空气界面后续的运动特性。进行了同条件下爆炸驱动水基灭火剂抛撒实验，得到了不同加载系数条件下壳体破裂初期液体/空气界面的运动速度。实验结果与数值仿真结果吻合良好，表明所采用的数值仿真方法具有正确性和有效性，对相关问题的研究具有重要参考价值。

关键词：爆炸力学；水基灭火剂；爆炸驱动抛撒；数值仿真

中图分类号：O389 **文献标识码**：A

1 引 言

通过爆炸作用驱动液体进行分散在军事和民用领域具有广泛的应用背景[1-5]，如燃料空气炸药(FAE)和灭火剂等液体的爆炸驱动抛撒。因此，对液体爆炸驱动抛撒过程的研究具有十分重要的工程实用价值。液体爆炸驱动抛撒的物理过程十分复杂：壳体破裂前驱动装药一般已完成爆轰反应，在液体中产生强冲击的高压气泡；壳体破裂瞬时，由于稀疏波的作用使得液体并携带爆轰产物产生高速喷射和飞溅；随着液体扩散范围的增大和压力的降低，爆炸作用的影响越来越小，扩散速度急剧下降。其中，壳体破裂瞬时的液体喷射速度是决定液体抛撒作用范围最主要因素之一。由于这一过程历时短、力学环境复杂，理论分析十分困难，实验研究也存在一定的局限性，因此数值仿真是研究该类问题的一种有效手段[6-7]。

2 典型灭火战斗部结构

灭火战斗部的结构一般由壳体、(水基)灭火剂、驱动装药及上、下端盖 5 部分组成。选取典型结构进行研究，所获得的结果具有通用性。所研究结构的壳体长 240 mm，厚为 3 mm，材料为 35CrMnSi，外表面均匀刻制 8 条 V 型预裂槽，以期实现(水基)灭火剂抛撒均匀性的有效控制，刻制槽深为 1 mm，底部锥角为 60°；两端端盖厚度为 5 mm，材料为 45 钢；中心驱动装药为通长 PENT 导爆索(装药量为 12 g/m，单根直径为 3 mm)，导爆索长度为 240 mm，其余部分完全填充密度为 1.08 g/cm^3、粘度为 1.79 mPa·s、表面张力为 17.5 mN/m 的(水基)灭火剂，具体结构如图 1 所示。

* **收稿日期**：2009-12-22；**修回日期**：2010-04-06

作者简介：徐豫新(1982—)，男，博士研究生，主要从事弹药终点效应、非线性动力学仿真技术研究. E-mail：200101403@sina.com

通讯作者：王树山(1965—)，男，教授，主要从事终点效应学、水弹道学研究. E-mail：wangshushan@bit.edu.cn

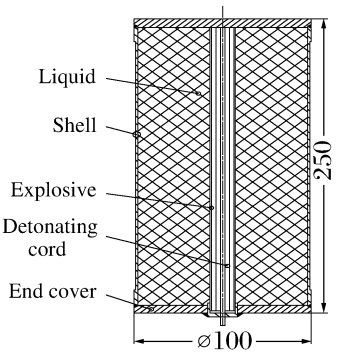


图 1 典型灭火战斗部结构

Fig. 1 Structure of the representative fire extinguishing warhead

3 数值仿真结果

3.1 仿真模型

根据具体战斗部结构，建立 1/4 仿真模型，如图 2所示，模型由炸药、空气、(水基)灭火剂、壳体及上、下端盖 6 部分组成，最小网格单元为 1.0 mm，在空气域上、下端面及外表面添加有边界无反射条件，以有限尺寸仿真模型模拟无限大空气区域。炸药、空气、(水基)灭火剂均采用单点 ALE 多物质体元和 Euler 算法。对于炸药，采用高能炸药燃烧模型和 JWL 状态方程描述炸药反应过程及爆轰产物特性；因爆炸驱动抛撒过程无限空气域的熵值变化很小，接近于等熵过程，状态服从γ-定律，采用多项式状态方程描述空气中压力与初始体积内能的变化关系，设定每单位体积的初始能量，添加大气压力，以反映客观存在的空气阻力；(水基)灭火剂考虑热压对冲击波压力的贡献，采用 Grüneisen 状态方程描述(水基)灭火剂在高压下的压力变化。壳体和端盖均采用单点积分常应变体元和 Lagrange 算法。壳体环向受拉膨胀，发生弹、塑性变形至最终破裂过程具有各向同性特性，采用双线性材料模型即可精确描述壳体破裂的整个过程，空气、(水基)灭火剂部分材料参数列于表 1 中。此外，采用体现 Lagrange 侵蚀的罚函数耦合算法将流体和结构耦合在一起，采用 3×3 个点的四边形网格积分算法在压缩的法线方向进行多物质耦合，设置罚函数系数及渗漏控制罚函数系数分别为 0.1 和 0.05，控制耦合力的大小，并阻止渗漏现象。

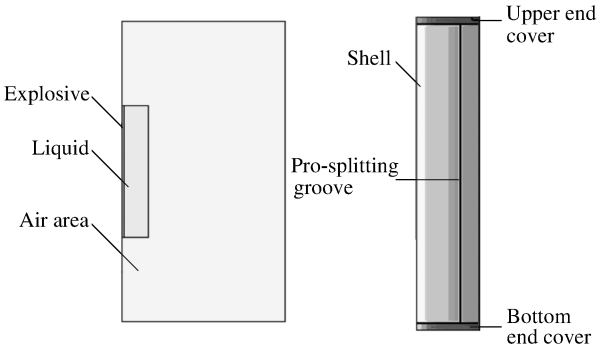


图 2 数值仿真计算模型

Fig. 2 Model on numerical simulation

表 1 空气和(水基)灭火剂部分材料参数

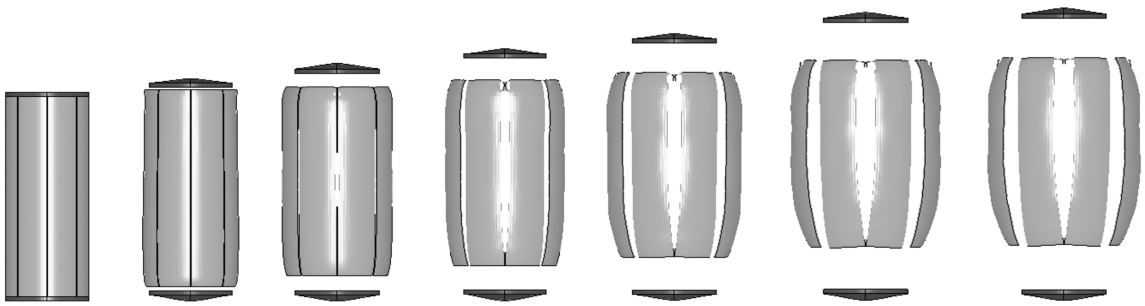
Table 1 Some material parameters on air and (based-water) extinguisher

Material	ρ/(g/cm^3)	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	E_0	V_0
Air	0.001 29	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.4	0.0	2.525×10^{-6}	1.0

Material	ρ/(g/cm^3)	C_0/(m/s)	S_1	S_2	S_3	γ_0	A	E_0	V_0
Based-Water Extinguisher	1.08	0.148	2.56	−1.986	0.226 8	0.5	0.0	2.525×10^{-6}	1.0

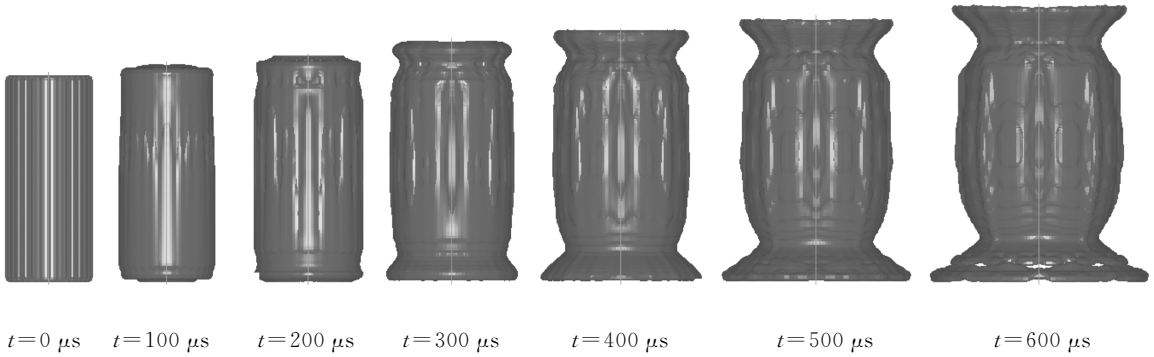
3.2 计算结果

(水基)灭火剂的爆炸驱动抛撒过程计算结果如图 3 所示，从图中可看出，壳体沿 V 型槽导向破裂，灭火剂抛撒具有较好的均匀性。在不同加载系数条件下，壳体完全破裂时间、壳体破裂初期液体/空气界面的速度列于表 2 中，加载系数对壳体完全破裂时间、壳体破裂初期液体/空气界面速度的影响规律如图 4、图 5 所示，壳体破裂后液体/空气界面的运动特性如图 6 所示。从图 4～图 6 可看出，壳体完全破裂所需要的时间随加载系数的增加近似呈指数递减，壳体破裂后爆炸力对(水基)灭火剂运动所起的作用逐渐减弱，而空气阻力对(水基)灭火剂的运动逐渐起主要作用，(水基)灭火剂的运动速度瞬间大幅度降低。



(a) 壳体破裂过程

(a) The process of shell fracture



(b) (水基)灭火剂运动过程

(b) The process of (based-water) extinguisher movement

图 3　(水基)灭火剂抛撒过程(β=7.71)

Fig. 3　The process of (based-water) extinguisher movement dispersed (β=7.71)

表 2　不同装药载荷条件下壳体破裂参数

Table 2　Some material parameters on air and (based-water) extinguisher

Loading coefficient /(‰)	Whole breach time on shell /(μs)	Breach radius /(mm)	Movement speed on liquid-air interface at the shell breach initially phase/(m/s)
4.75	600	12.5	142
5.65	460	12.8	170
7.71	300	12.5	212
10.09	220	12.7	248
12.78	180	12.6	265
15.81	160	12.7	270

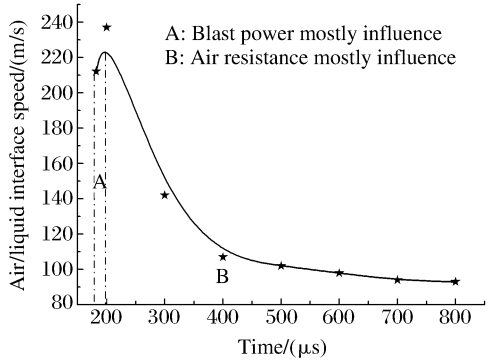


图 4 液体/空气界面速度随时间变化(β=7.71)

Fig. 4 The change of liquid/air interface velocity with time(β=7.71)

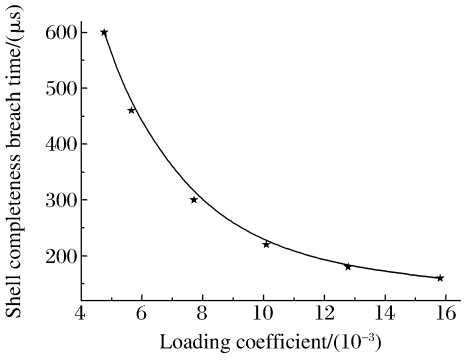


图 5 壳体完全破裂时间随加载系数变化

Fig. 5 The change of broken time of shell with loading coefficient

4 实验及结果分析

4.1 实验方案

为进一步验证仿真计算结果的正确性和有效性,进行了(水基)灭火剂的爆炸驱动抛撒实验。实验中将弹体垂直放于支架上,头部离地面高度为 0.5 m,底端引爆装药,并同步启动高速摄影,通过高速摄影机观察爆炸驱动灭火剂抛撒初始阶段的运动特性,实验方案如图 7 所示。

4.2 实验结果

实验共分 6 组进行,每组通过装填不同根数导爆索调整装药量,每组进行 3 发实验,在实验过程中采用高速摄影机进行同步拍摄,拍摄速率为 10 万帧/秒,摄影镜头与爆破中心相距100 m,部分抛撒过程(β=7.71)如图 8 所示,灭火剂抛撒底部速度较快,起爆一段时间后,部分(水基)灭火剂沿预裂槽喷射而出,又经历一段时间后,壳体完全开裂,(水基)灭火剂整体喷射而出,(水基)灭火剂在空中飞行一段距离后开始破碎、雾化,灭火剂与空气界面模糊。根据高速摄影结果,取(水基)灭火剂初始喷射而出时的界面速度为破裂初期液体/空气界面的速度,对不同装药情况下的实验均值与数值仿真结果进行对比,如图 9 所示,从图中可看出实验结果与数值仿真结果吻合良好,说明上述数值仿真模型可有效反映爆炸驱动液体抛撒过程的实际情况,计算结果具有有效性和正确性。

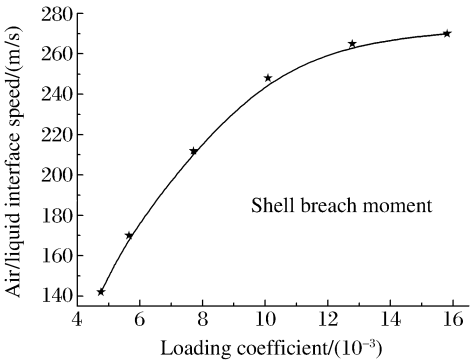


图 6 液体/空气界面速度随加载系数变化

Fig. 6 The change of liquid/air interface velocity with loading coefficient

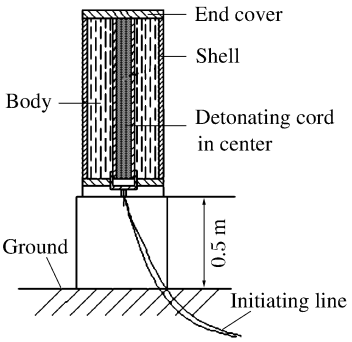


图 7 爆炸驱动抛撒实验方案示意图

Fig. 7 Sketch map of experiment project on liquid with loading coefficient dispersed under explosively drive



$t=0\ \mu s$　　$t=20\ \mu s$　　$t=200\ \mu s$　　$t=300\ \mu s$　　$t=600\ \mu s$

图 8　典型高速摄影图片($\beta=7.71$)

Fig. 8　The pictures on representative high-velocity photograph ($\beta=7.71$)

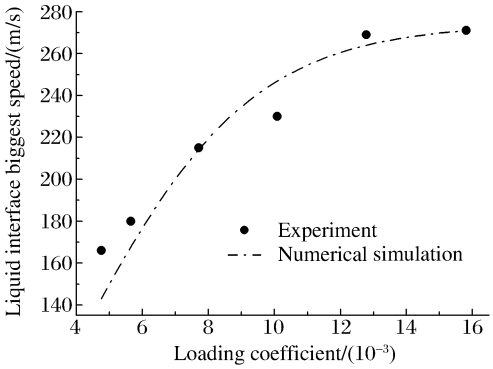


图 9　实验与计算对比

Fig. 9　The comparison between experimental and simulation results

5　结　论

(1) 利用 LS-DYNA 软件,通过建立合理的数值模型,能够反映爆炸驱动液体抛撒初始阶段的物理本质,数值仿真结果得到了实验验证。

(2) 针对灭火战斗部,研究得到了加载系数对壳体破裂时间和壳体破裂初期液体/空气界面速度的影响规律,以及液体/空气界面后续的运动特性,可为相关工程设计提供参考。

References:

[1]　Samirant M. Dynamic Measurements in Combustible and Detonable Aerosols [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1989, 14: 47-56.

[2]　Zabelka R J, Smith L H. Explosively Dispersed Liquid [R]. AD-863268, 1969.

[3]　Gardner D R. Near-Field Dispersal Modeling for Liquid Fuel-Air-Explosive [R]. SAND 90-0686, 1990.

[4]　Ding J, Weng P F, Liu J C. 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): 19-224. (in Chinese)
丁　珏,翁培奋,刘家骢. 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(A 辑), 2004, 19(2): 219-224.

[5]　Wang H Y. The Terminal Effects Research of the Fire-Extinguishing Warheads [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2007: 3-5. (in Chinese)
王海燕. 灭火战斗部终点效应研究 [D]. 北京:北京理工大学, 2007: 3-5.

[6]　Glass M W. Far-Field Dispersal Modeling for Fuel-Air-Explosive Devices [R]. SAND 90-0582, 1990.

[7] Ren X B, Lu X X, Li L, et al. Research on Experiment and Numerical Simulation of Explosion Drive Liquids Dispersed [A]//Proceedings of 9th National Conference on Shock & Impact Dynamics [C]. Jiaozuo, 2009: 452-457. (in Chinese)
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 [A]//2009 年第九届冲击动力学学术会议 [C]. 焦作, 2009: 452-457.

Numerical Simulation on Initial Stage of Liquid Dispersed under Explosion Drive

XU Yu-Xin[1], WANG Shu-Shan[1], HAN Bao-Cheng[1], LIU Yong[2]

(1. *State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*;
2. *Ordnance Industry Planning Project Institute of China, Beijing* 100053, *China*)

Abstract: For fuze-warhead cooperation design on fire extinguishing warhead, characteristics on liquid (based-water extinguisher) dispersed under explosion drive were studied. The numerical simulation model was built based on representative fire extinguishing warhead structure. The numerical simulation was done by LS-DYNA program. The influence rule about loading coefficient (drive charge divide liquid mass) to the breach time on shell, the movement speed on liquid/air interface at the shell breach initial phase, and the movement characteristic on liquid-air interface after shell breach were obtained. With the same simulation condition, the experiment on based-water extinguisher dispersed under explosion drive was done. For different loading coefficients, the liquid/air interface movement speed at shell breach initial phase was gained. The results between experiment and numerical simulation were in good agreement, which indicates that the numerical simulation method was correct and effective. The research outcomes may provide important reference to investigate the relevant problem.

Key words: explosion mechanics; based-water extinguisher; explosion drive dispersed; numerical simulation