文章编号：1000-5773(2013)05-0731-07

冷激波灭火系统中激波对扑灭油盆火焰影响的研究*

蒋耀港[1,2]，马宏昊[1]，沈兆武[1]，范志强[1]，汪　泉[1]

（1.中国科学技术大学近代力学系，安徽合肥　230027；
2.四川省安全科学技术研究院，四川成都　610045）

摘要：为了研究冷激波灭火弹爆炸后形成的激波对扑灭油盆火焰的影响，首先采用纹影实验装置，观察小尺寸下不同灭火介质爆炸抛洒后的激波现象和激波强度；然后采用数值模拟的方法，模拟弱激波在气/液界面处的传播情况；最后采用高速摄影机拍摄冷激波灭火系统扑灭油盆火的实验过程，并对比分析各张图片同等位置处高色阶随时间的变化情况。通过实验发现，灭火介质爆炸抛洒后能形成激波，但激波强度较弱；当弱激波通过气/液界面时，液面上方会形成马赫反射，液面出现扰动，激波强度随距离的增加而不断衰减；前期高色阶百分比的变化弱于后期色阶百分比的变化。因此在比药量较小的冷激波灭火系统中，激波对扑灭油盆火焰的影响弱于介质抛洒。

关键词：冷激波灭火系统；纹影实验；高速摄影

中图分类号：O389　　**文献标识码**：A

1　引　言

灭火弹由于能够适应复杂地形环境，实现高、远距离灭火，因此作为一种新型的消防设备，在消防行业具有较大的应用前景。目前关于灭火弹的应用研究已有很多文献可查，但关于其灭火机理的研究却很少。由现有灭火实验发现，灭火弹的灭火机理主要有3个方面：激波灭火、介质灭火以及激波与介质的相互作用[1]。其中激波灭火的研究始于20世纪90年代初，俄罗斯托木斯克国立大学的Grishin等[2]从实验、模拟和实际观察等方面，对激波与林冠火相互作用做了研究；20世纪90年代末国防科技大学常熹钰等[3]通过实验与数值模拟发现，激波可以扑灭林冠火；2004年南京理工大学江强[4]和靳建明[5]等研究了激波对火焰面燃烧稳定性的影响。但上述研究针对的都是纯激波与固体火焰面或气体火焰面的相互作用，而对激波与液体火焰的相互作用却未见报道。为此，本工作通过实验与数值模拟的方法，研究冷激波灭火弹中激波与油盆火焰的相互作用。

2　纹影实验

纹影实验装置如图1所示。爆炸箱采用45钢焊接而成，尺寸为300 mm×300 mm×300 mm，壁厚为10 mm，爆炸箱前、后两面均采用150 mm×150 mm×10 mm的钢化玻璃。为了拍摄到激波现象，采用OPTRONIS CR1000高速摄影机，拍摄频率为10^4 s^{-1}。爆炸抛洒装置如图2所示，灭火介质空腔内径为6.8 mm，外径为7.1 mm，长度根据装填质量而定。实验时将爆炸抛洒装置竖直固定在实验箱顶部中心处，纹影视场高120 mm，宽11.5 mm。

* **收稿日期**：2011-11-08；**修回日期**：2012-03-28
基金项目：国家自然科学基金面上项目(51174183)；安徽省教育厅优秀青年人才基金(2010SQRL057ZD)
作者简介：蒋耀港(1983—)，男，博士，主要从事冷激波灭火系统的研究. E-mail：jiangyg6@mail.ustc.edu.cn

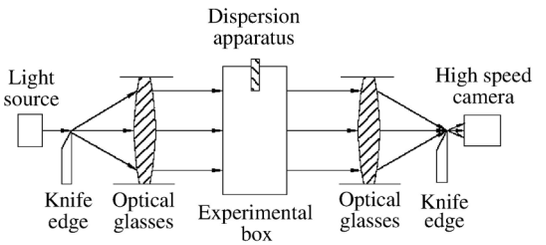


图 1 纹影实验装置

Fig. 1 Schlieren experimental device

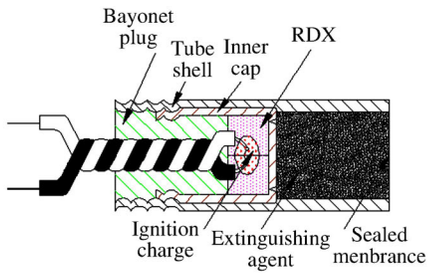


图 2 灭火介质爆炸抛洒装置

Fig. 2 Extinguishing medium explosion dispersion device

实验采用碳酸氢钠粉体和水作为两种不同的灭火介质，实验参数见表 1，粉体表观密度为 1.1 g/cm^3，水的密度为 1 g/cm^3。以点火时刻为零时刻，实验结果如图 3 所示。从图 3 的 1 号(1-1、1-2)和 2 号(2-1、2-2)粉基爆炸抛撒纹影实验图片中可观察到激波现象(黑线位置)；而在 3 号(3-1、3-2)和 4 号(4-1、4-2)水基爆炸抛洒纹影实验图片中，即使增大比药量，也未能观察到激波现象。这是因为水具有不可压缩性，且水的波阻抗远大于空气的波阻抗，因此在图 3 的 3 号和 4 号纹影实验图片中没有观察到激波现象。但根据对 1.36 kg FAE 抛洒初期的研究发现[6]，FAE 爆炸时会向空中传入冲击波，冲击波速度为 455 m/s；而粉基灭火介质颗粒间存在大量孔隙，冲击波在粉体内传播时会不断压缩颗粒间的孔隙空气，使粉体介质爆炸抛撒后能在空中观察到激波现象。根据窗口尺寸比率和拍摄频率，可以计算出 1 号实验的激波速度约为 443 m/s，2 号实验的激波速度约为 473 m/s。因此冷激波灭火弹爆炸后会在空气中形成激波，但激波强度较弱。

表 1 纹影实验参数

Table 1 Parameters of schliere experiment

No.	Extinguishing medium	The mass of RDX m_{RDX}/(mg)	The mass of extinguishing medium m_{medium}/(mg)	$\frac{m_{RDX}}{m_{medium}}$
1	Sodium bicarbonate powder	22	200	0.110
2	Sodium bicarbonate powder	23	200	0.115
3	Water	42	254	0.165
4	Water	53	182	0.291

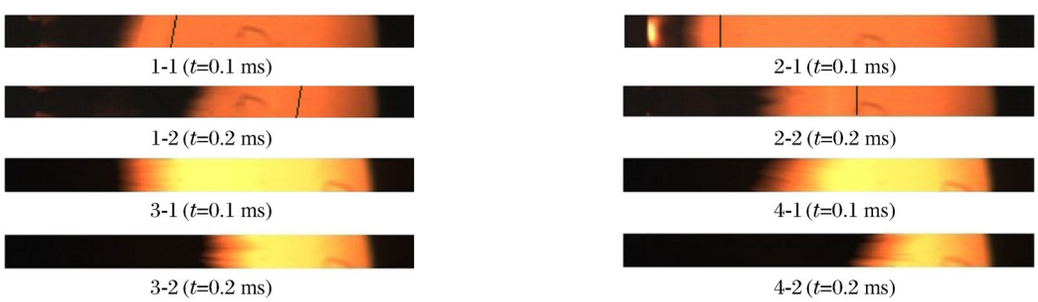


图 3 纹影实验结果

Fig. 3 Schliere experimental results

3 数值模拟

为了研究弱激波在油面上方的传播规律和气/液交界面处各物质的运动情况，进行如下简化：(1) 忽略弱激波对油盆火焰燃烧基元反应的影响，即不考虑油面燃烧；(2) 简化灭火弹激波形成装置，通过量纲分析，以小药量代替激波发生器；(3) 以水介质代替油介质。模型结构如图 4 所示，轴对称模型，

半径为1 m，高 17 cm，水层厚度为 0.5 cm，外边界为无反射边界，中间炸药采用 High_Explosive_Burn 材料方程和 JWL 状态方程，上部空气和下部水采用 Null 材料方程和 Linear_Polynomial 状态方程，底部油盆采用 Johnson_Cook 材料方程和 Grüneisen 状态方程，各物质材料参数见表 2[7]。

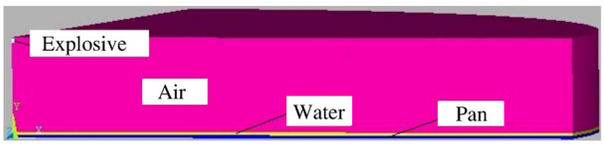


图 4 模型结构

Fig. 4 Model structure

表 2 材料参数

Table 2 Material parameters

Material	ρ/(g/cm^3)	D/(m/s)	p_{CJ}/(GPa)	A	B	R_1	R_2	ω	E_0	V_0
Explosive	1.26	6 540	14	5.731	0.201 6	6	1.8	0.28	0.071 9	1
Material	ρ/(g/cm^3)	C_0/(10^{-6})	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	E_0/(10^{-6})	V_0
Air	0.001 29	−1	0	0	0	0.4	0.4	0	2.5	1
Water	1	0	0.021 8	0.066 9	0.115	0	0	0	839.5	1
Material	ρ/(g/cm^3)	G/(GPa)	A/(10^{-3})	B/(10^{-3})	N	c	m	T_m/(K)	T_r/(K)	C/(m/s)
Pan	7.83	77	7.92	5.1	0.26	0.014	1.03	1 793	294	4 569
Material	S_1	S_2	S_3	r	A	E_0	V_0	C_p/(10^{-5})		
Pan	1.49	0	0	2.17	0.46	0	1	0.477		

为了进行对比研究，分别选取 $z=0$，$y=1$ cm，$x=0.1$，0.2，0.3，0.4，0.5，0.6，0.7，0.8，0.9 和 1.0 m处的下部水介质单元和上部空气介质单元，$z=0$，$y=16$ cm，$x=0.15$，0.20，0.30，0.40，0.50，0.60，0.70，0.80，0.90 和 1.00 m 处的空气介质单元，作压力和速度随时间的变化曲线，分别如图 5、图 6、图 7、图 8、图 9 和图 10 所示，压力随时间的变化过程如图 11 所示。

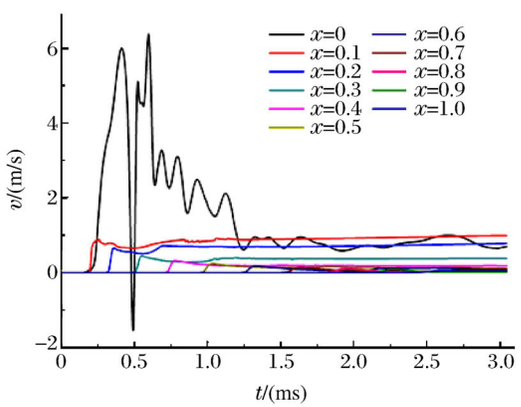


图 5 水介质单元速度曲线

Fig. 5 The velocity curves of water element

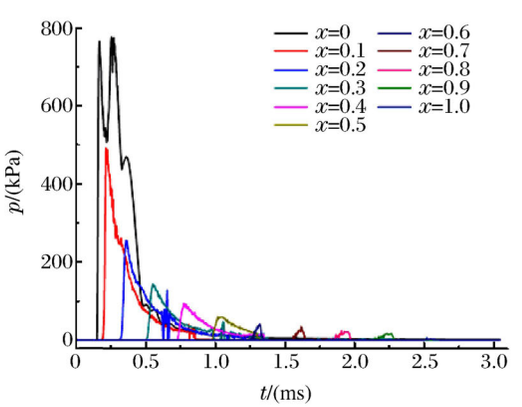


图 6 水介质单元压力曲线

Fig. 6 The pressure curves of water element

由压力曲线和压力等高线可知：液面上方(0.15 m)入射波超压为 136 kPa，根据空气冲击波波阵面上超压与激波速度的关系，可以计算出激波速度为 485 m/s，近似等于纹影实验所形成的激波强度；激波到达液面上方时发生反射加载；随着水平距离的增加，激波强度不断衰减，激波入射角不断增大，从而在液面上方形成马赫反射。由速度曲线可知：气/液界面出现扰动[8-9]，使液体的表面积增大；各测点峰值 速度随距离的增加而不断衰减；由于马赫反射的存在，使反射区内峰值速度衰减较慢，到达1m的距

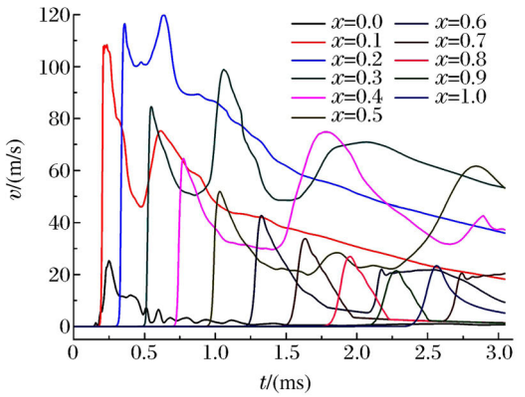


图 7 液面上方空气单元速度曲线

Fig. 7 The velocity curves of air element above liquid

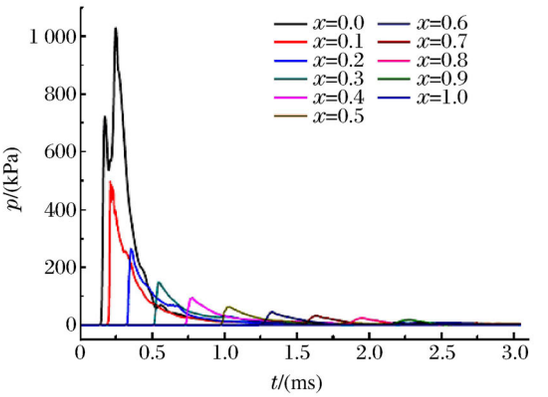


图 8 液面上方空气单元压力曲线

Fig. 8 The pressure curves of air element above liquid

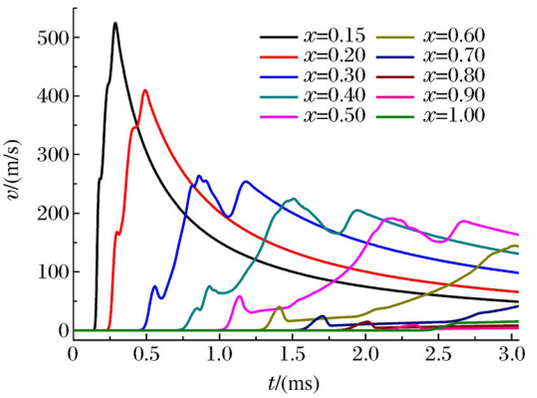


图 9 上部空气单元速度曲线

Fig. 9 The velocity curves of air element

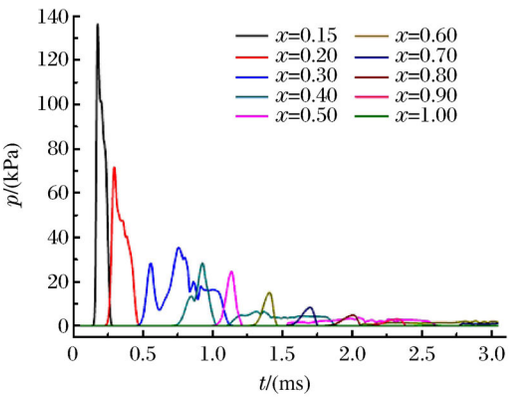


图 10 上部空气单元压力曲线

Fig. 10 The pressure curves of air element

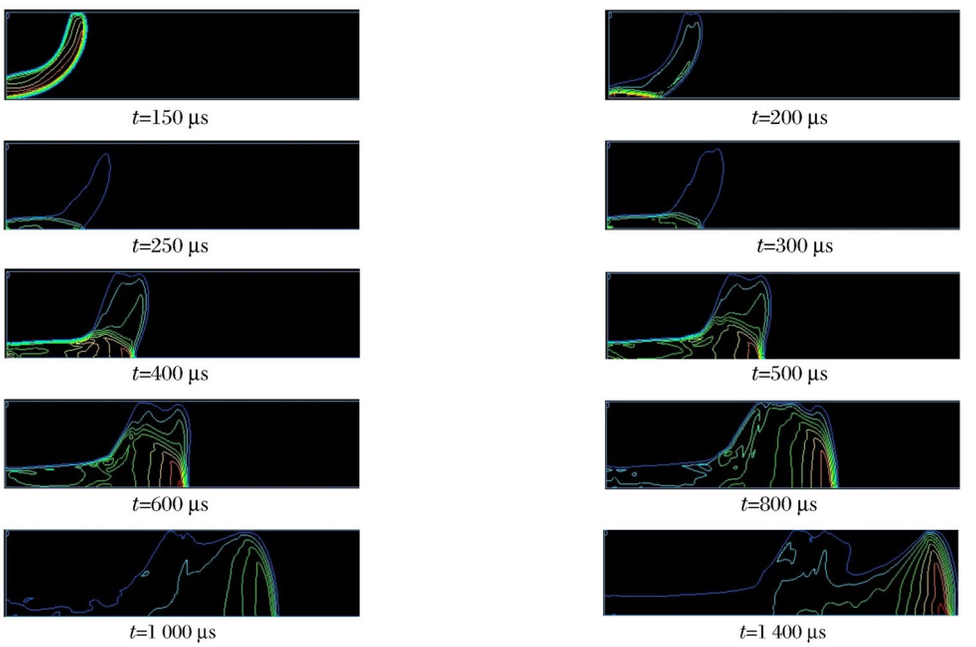


图 11 压力等高线

Fig. 11 The contour of pressure

离处单元的最大速度约为 20 m/s,低于比药量为 0.16%灭火弹介质抛洒所引起的空气运动速度(如图 12 所示,介质前沿以近似 80 m/s 的恒速穿越油盆区域,即介质前沿可燃气体向外运动的速度约 80 m/s)。因此对于 1 m×1 m 的油盆火焰,由于马赫反射的存在,马赫反射区的弱激波所引起的可燃气体运动速度高于同等距离处其它区域所引起的可燃气体运动速度,冷激波灭火弹爆炸形成的弱激波加快可燃气体的运动速度低于介质抛洒所引起的可燃气体的运动速度。

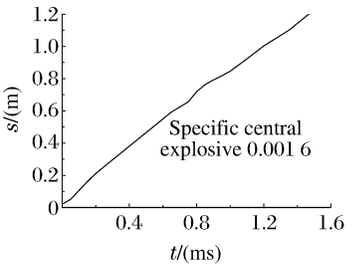


图 12　介质抛洒位移时程曲线

Fig. 12　Displacement-time curve of dispersion medium

4　高速摄影实验

采用图 13 所示的实验装置拍摄冷激波灭火弹扑灭油盆火的过程。油盆尺寸为 1 m×1 m,灭火弹尺寸为∅110 mm×180 mm,抛洒药质量为 3 g,灭火介质为水,比药量为 0.16%,油盆采用 90# 汽油,高速摄像的拍摄频率为 4 000 s^{-1}。油盆点火后,预燃一段时间,等火焰面基本稳定后再起爆冷激波灭火弹,实验过程如图 14 所示。

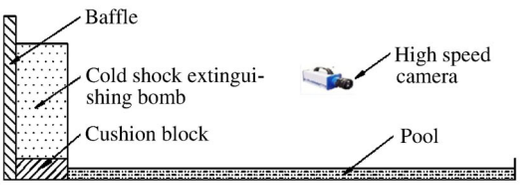


图 13　冷激波灭火实验装置

Fig. 13　Experimental device of cold shock fire extinguishing

零时刻起爆冷激波灭火弹,在 0～3 ms 时间内,火焰面向外折叠,扰动(由壳体高速膨胀运动和抛洒药爆炸所形成的激波引起)向外传播;3 ms 时火焰面回缩,直到 5 ms 时结束;冷激波灭火弹起爆后,灭火介质穿越火场,推动可燃气体到达火焰面,使得火焰面亮度逐渐增大,同时灭火介质逐渐隔断火焰面与可燃汽油;48 ms 后明火被冷激波灭火弹扑灭。



图 14　冷激波灭火实验过程

Fig. 14　Fire extinguishing process by cold shock extinguishing bomb

高速摄影图片由 0～255 个色阶组成(0 代表黑色,255 代表白色),高色阶所占图片色阶百分比越多,代表此处燃烧越剧烈。选取每张图片同等位置处的 a、b 两个区域(如图 15 所示),考察 a、b 两个区域高色阶所占图片色阶百分比随时间的变化情况(见图 16)。由图 16 可知,在前 5 ms,a 区域和 b 区域的高阶色素(230 以上)百分比变化不大,即扰动对燃烧速率的影响较小,但 b 区扰动的影响高于 a 区;5 ms 后灭火介质推动可燃气体到达火焰面,使得各区域的高阶色素百分比逐渐增大,即各区域燃烧速率逐渐增大;随后灭火介质隔断火焰面与油盆,各区域高阶色素百分比逐渐减小,即燃烧速率逐渐减小,直至火焰熄灭。因此介质抛洒对加快可燃气体燃烧的作用远大于激波的影响,抛洒药上方弱激波对燃烧扰动的影响低于抛洒药下方弱激波对燃烧扰动的影响。

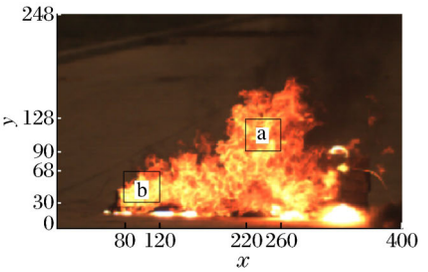
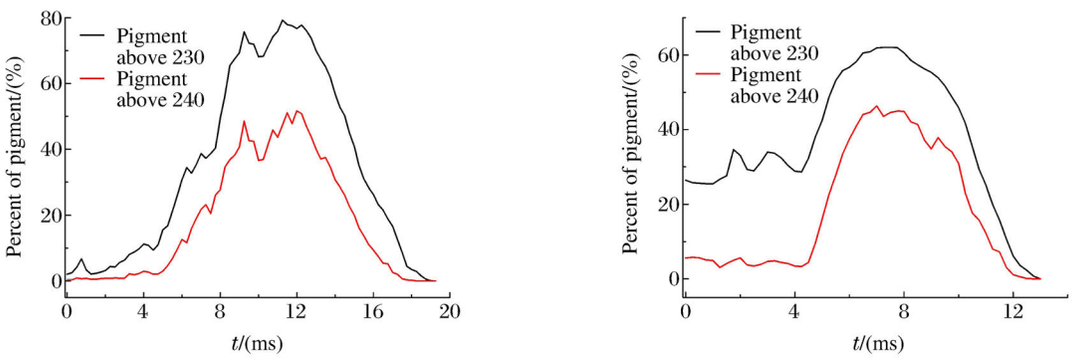


图 15 a 区域和 b 区域位置

Fig. 15 Location of region a and b



(a) Region a (b) Region b

图 16 不同区域色素百分比时程曲线

Fig. 16 Pigment percent time profile of different region

5 结 论

根据数值模拟和实验结果可得出以下结论:

(1) 冷激波灭火弹爆炸后会在空中形成弱激波,弱激波在气/液界面处形成马赫反射,使得反射区内弱激波所引起的可燃气体运动速度高于抛洒药上方弱激波所引起的可燃气体运动速度;

(2) 比药量为 0.16%的灭火弹扑灭 1 m×1 m 的油盆火时,冷激波灭火弹爆炸形成的弱激波对加快可燃气体燃烧(加快灭火)的影响低于介质抛洒对加快可燃气体燃烧的影响。

References:

[1] Jiang Y G, Shen Z W, Ma H H, et al. Study of the mechanism on cold shock wave fire-extinguishing system [J]. Journal of Safety and Environment, 2009, 9(5): 154-157. (in Chinese)
蒋耀港,沈兆武,马宏昊,等. 冷激波灭火系统扑灭明火现象的机理研究 [J]. 安全与环境学报, 2009, 9(5): 154-157.

[2] Grishin A M, Kovalev Y M. Experimental study of the effect of explosions of solid explosives on the front of crown forest fire [J]. Sov Phys-Dok, 1989, 34: 878-881.

[3] Zhang Y, Ren B, Chang X Y, et al. The numerical simulation of the combustible gas deflagration induced by shock [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2001, 23(2): 33-37. (in Chinese)

张　艳,任　兵,常熹钰,等.激波诱导可燃气体爆轰的数值模拟研究 [J].国防科技大学学报,2001,23(2):33-37.

[4] Jiang Q. The experimental and theory research on flame instabilities induced by shock-flame interactions [D]. Nanjing:Nanjing University of Science and Technology,2004. (in Chinese)
江　强.火焰在激波诱导下稳定性问题的实验和理论研究 [D].南京:南京理工大学,2004.

[5] Jin J M. The numerical simulation and experimental validations on flame instabilities induced by shock-flame interactions [D]. Nanjing:Nanjing University of Science and Technology,2004. (in Chinese)
靳建明.火焰在激波诱导下稳定性问题的数值模拟与实验验证 [D].南京:南京理工大学,2004.

[6] Ding J. Theoretical model and numerical simulation of explosive dispersals of liquids [D]. Nanjing:Nanjing University of Science and Technology,2001. (in Chinese)
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.

[7] Tian J. The shock wave attenuation and anti-detonation property of aluminum foam [D]. Hefei:University of Science and Technology of China,2006. (in Chinese)
田　杰.泡沫铝的冲击波衰减和抗爆震特性研究 [D].合肥:中国科学技术大学,2006.

[8] Xu S L,Yue P T,Han Z Y. Study on the fuel air mixing induced by a shock wave propagating into a hydrogen-air interface [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2001,22(4):404-410. (in Chinese)
徐胜利,岳鹏涛,韩肇元.激波在异种气体中传播及诱导的剪切混合研究 [J].应用数学和力学,2001,22(4):404-410.

[9] Wang T,Bai J S, Li P. Two dimensional numerical simulation of gas/liquid interface instability [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics,2008,22(3):298-304.
王　涛,柏劲松,李　平.二维气/液界面不稳定性数值模拟 [J].高压物理学报,2008,22(3):298-304.

Study of the Interaction between Shock and Pool in Cold Shock Extinguishing System

JIANG Yao-Gang[1,2], MA Hong-Hao[1], SHEN Zhao-Wu[1],
FAN Zhi-Qiang[1], WANG Quan[1]

(1. *Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei* 230027, *China*;
2. *Sichunan Academy of Safety Science and Technology, Chengdu* 610045, *China*)

Abstract: In order to evaluate the influence of shock wave formed by the explosion of cold shock extinguishing bomb on the extinguishing effect, shock wave formed by explosion dispersion of different extinguishing mediums was observed by schlieren experiment apparatus. The propagation law of shock on the interface between air and fluid was studied by numerical simulation, and finally the process of pool fire suppression by cold shock extinguishing system was photographed by high speed photography. Comparative analysis to the percent of high color stage at the same position of each image were made. It was found that the shock wave was formed after extinguishing medium dispersion, but its strength is weak. The mach reflection in the air and disturbance on the liquid surface were found when the shock wave propagated through interface of air and liquid, the strength of shock gradually attenuated with the increase of distance. The percent of high color stage in the earlier stage was weaker than in the later. So the influence of shock wave on the extinguishing effect was weaker than medium dispersion in cold shock extinguishing system.

Key words: cold shock extinguishing system; schlieren experiment; high speed photography