

文章编号: 1001-1455(2013)01-0067-06

冷激波灭火系统中激波对灭火效果和周边环境的影响^{*}

蒋耀港, 马宏昊, 沈兆武, 程扬帆, 范志强, 汪 泉

(中国科学技术大学近代力学系, 安徽 合肥 230027)

摘要: 为了评估冷激波灭火弹爆炸后形成的激波对灭火效果和周边环境的影响, 建立了一套纹影实验装置。通过纹影实验, 观察了小尺寸下不同灭火介质爆炸抛撒后激波的形成和传播, 并推算了冷激波灭火弹爆炸后油盆边缘附近的波后质点速度。观察发现, 水基灭火介质爆炸抛撒后没有形成激波; 而粉基灭火介质尽管爆炸抛撒后形成激波, 但在油盆边缘附近激波强度较弱, 波后质点速度小。与介质抛撒引起的可燃气体介质运动相比, 激波对加快可燃气体介质运动的影响可以忽略。最后, 通过高速摄影实验验证了激波对灭火效果的影响是可以忽略的。因此, 冷激波系统中, 激波对灭火效果和周边环境的影响是可以忽略的。

关键词: 爆炸力学; 激波; 纹影实验; 冷激波灭火系统; 高速摄影

中图分类号: O381 **国标学科代码:** 1303510 **文献标志码:** A

针对特殊火场火灾(如高楼火灾、森林火灾等), 各种新的灭火思想和消防设备应运而生, 如激波灭火^[1]。对激波灭火的真正研究始于 20 世纪 90 年代初, A. M. 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。张艳等^[3]、常熹钰等^[4]通过实验和数值模拟发现激波可以扑灭林冠火。但激波的高温、高压特性使激波在灭火的同时也会对火场周边造成不同程度的损伤。沈兆武等^[5-6]结合 FAE (fuel-air explosive) 战斗部思想提出了冷激波灭火的方法, 该方法通过把激波能量转化为灭火介质的动能作用于火场区域来实现灭火。M. W. Glass^[7]通过对 FAE 的研究发现, 中心装药爆轰后, 82% 的能量用于液体燃料的动能和内能增加, 18% 的能量用于爆生气体的动能和内能增加, 但不能据此准确推测 FAE 起爆后在空中形成的激波强度。而作为冷激波灭火系统, 灭火介质不仅有水基灭火介质, 还有粉基灭火介质。因此, 为了有效研究冷激波的灭火机理, 必须研究冷激波灭火弹起爆后形成的激波对灭火效果及周边环境的影响。

1 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; 窗口采用 150 mm×150 mm×10 mm 的钢化玻璃; 摄像采用 OPTRONIS CR1000 高速摄影机, 拍摄频率为 10^4 s^{-1} 。爆炸抛撒装置如图 2 所示, 灭火介质装填直径为 6.8 mm, 长度根据装填质量而定。实验时, 爆炸抛撒装置被竖直固定在实验箱顶部中心处, 纹影视场高 120 mm, 宽 11.5 mm。

采用碳酸氢钠粉体和水作为灭火介质, 粉体的表观密度为 1.1 g/cm^3 , 水的密度为 1 g/cm^3 , 其他参数见表 1, m_e 为 RDX 炸药的质量, m_m 为灭火介质的质量。点火时刻为零时刻, 实验结果见图 3。

从图 3(a)~(b) 的粉基灭火介质爆炸抛撒纹影图片中能观察到激波现象, 已用黑线标出; 而图 3(c)~(d) 的水基灭火介质爆炸抛撒纹影图片中, 即使增大比药量, 也未观察到激波现象, 即水基灭火介质爆炸抛撒后未能在空中形成激波。根据窗口尺寸比率和拍摄频率计算得到实验 1 和实验 2 的激波速度分别约为 443 和 473 m/s。

* 收稿日期: 2011-08-19; 修回日期: 2012-01-04

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项目(2010SQRL057ZD)

作者简介: 蒋耀港(1983—), 男, 博士, 工程师。

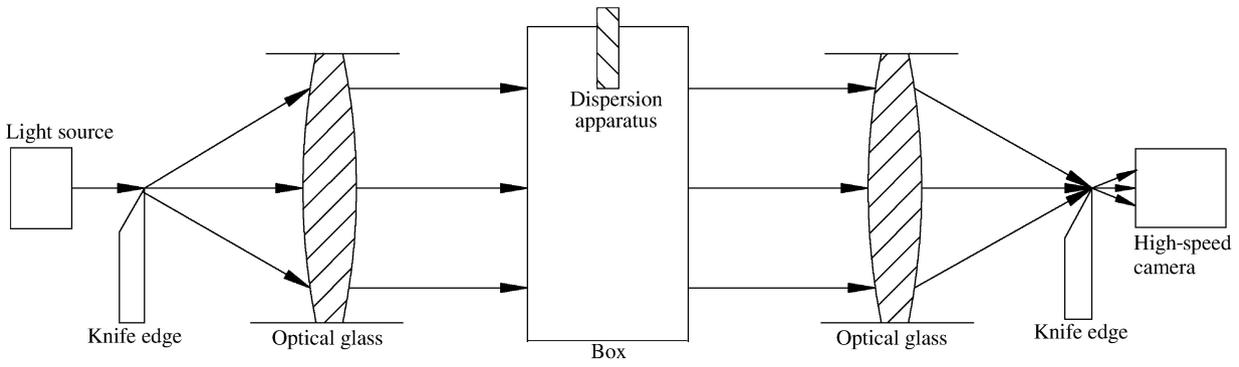


图1 纹影装置

Fig. 1 Schlieren apparatus

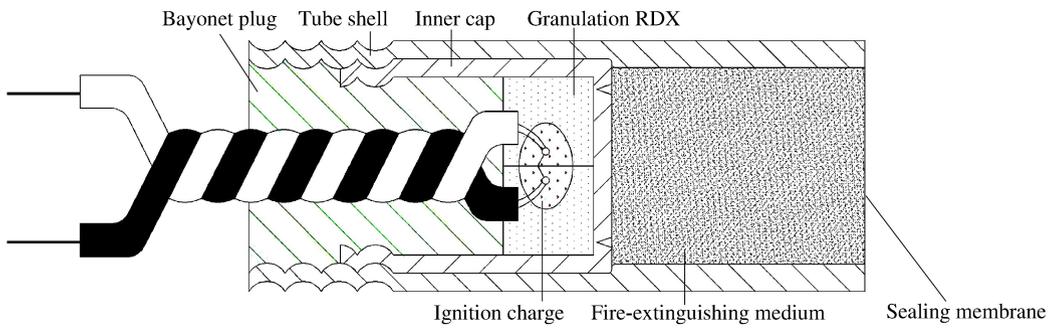


图2 灭火介质爆炸抛撒装置

Fig. 2 An explosion and dispersion apparatus for fire-extinguishing media

表1 纹影实验参数

Table 1 Parameters of schlieren experiment

实验编号	灭火介质	m_e /mg	m_m /mg	m_e/m_m
1	碳酸氢钠粉体	22	200	0.110
2	碳酸氢钠粉体	23	200	0.115
3	水	42	254	0.165
4	水	53	182	0.291

(a) Experiment 1



(b) Experiment 2



(c) Experiment 3



(d) Experiment 4

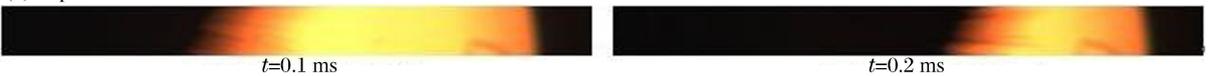


图3 纹影实验结果

Fig. 3 Results of schlieren experiment

2 理论分析

对于水基灭火介质,由于水具有不可压缩性,且水的波阻抗远大于空气的波阻抗,因此在图3(c)~(d)的纹影实验图片中未观察到激波现象;而对于粉基灭火介质,由于其存在大量孔隙^[8],中心装药爆轰后冲击波在粉体内传播,使颗粒破碎、重排等,从而不断压缩颗粒间的孔隙空气,使粉体介质爆炸抛撒后在空气中形成激波。

火焰面处激波强度和波后质点速度分别为:

$$\Delta p = p_1 - p_0 = \rho_0 (v_d - v_0) (v_1 - v_0) \quad (1)$$

$$v_1 = v_d - \frac{v_d - v_0}{K + 1} \left[\frac{2Kp_0V_0}{(v_d - v_0)^2} + K - 1 \right] \quad (2)$$

式中: Δp 为波阵面上的超压(100 kPa); v_0 、 p_0 和 V_0 分别为波前介质速度(m/s)、压强(取100 kPa)和气体质量体积(取0.775 2 m³/kg); v_1 和 p_1 分别为波后介质速度和压强; v_d 为激波速度(m/s); K 为气体的多方指数,取1.4。

假定初始速度 v_0 为零,把实验所得出口处激波速度代入式(1)~(2)可得:波后压强 p_1 为194 kPa,超压为94 kPa,波后质点速度为165 m/s。尽管出口处波后质点速度较大,但是激波在空气中传播时,由于几何耗散,激波强度会随传播距离的增加而急剧衰减,其衰减关系^[9]为

$$\Delta p = \frac{0.975}{R} + \frac{1.455}{R^2} + \frac{5.85}{R^3} - 0.019 \quad (3)$$

$$\bar{R} = \frac{R}{\sqrt[3]{m_e}} \quad (4)$$

式中:100 kPa $\leq\Delta p\leq$ 1 MPa, \bar{R} 为折合距离; m_e 是装药质量,kg; R 是爆心距离,m。

实验中激波速度测点距离抛撒装置5 cm,而以尺寸为1 m \times 1 m的油盆火为例,激波要驱动可燃气体进入火焰面,需要传播约1 m的距离,即折合距离增大20倍,由式(3)可得,爆炸超压衰减95%以上。波后质点速度

$$v_1 = v_0 + \sqrt{\frac{2\Delta p^2 V_0}{2p_0 K + \Delta p(K + 1)}} \approx \Delta p \sqrt{\frac{V_0}{p_0 K}} \quad (5)$$

波后质点速度也衰减95%以上,即此时1 m处的质点速度低于8.25 m/s。实验1中灭火粉体被装填在强约束的管中,装填长度为5 mm,灭火粉体在爆生气体作用下沿管道向外喷射,因此可假设为一维情况;而空中爆炸抛撒是三维情况,需考虑几何耗散,由量纲分析可得

$$\Delta p_0 > \Delta p'_0 \propto \frac{1}{R_0} = 5.6 \quad (6)$$

式中: Δp_0 为抛撒装置出口处的爆炸超压; $\Delta p'_0$ 为球形装药结构下,同等药量、同等距离处的爆炸超压; \bar{R}_0 为实验1中的折合距离。

实验2中冷激波灭火弹中抛撒药采用柱形装药,装药质量 m_e 为3 g,装药密度为1.2 g/cm³,内径 r 为6.8 mm,粉体装填半径为5.2 cm,因此,有^[10]

$$\Delta p_1 < \Delta p'_1 \propto \frac{1}{R_1} = 2.77 \quad (7)$$

式中: Δp_1 为冷激波灭火弹粉体边缘处的爆炸超压; $\Delta p'_1$ 为球形装药结构下,同等药量、同等距离处的爆炸超压; \bar{R}_1 为实验2中的折合距离。

综合式(6)和式(7)可得: $\Delta p_0 > \Delta p_1$ 。因此对于普通冷激波灭火弹(比药量小于0.3%),即使是粉基灭火介质,爆炸抛撒所形成的激波强度也是非常微弱的。当弱激波到达燃烧火焰面时,所引起的波后质点速度(即可燃气体运动速度)低于8.25 m/s。对比介质抛撒所引起的可燃气体运动,如图4所示,介质前沿以近似恒定的速度穿越油盆区域,其速度约为80 m/s,即介质前沿可燃气体向外运动的速度

约为 80 m/s,远大于激波引起可燃气体向外运动的速度。因此冷激波灭火弹爆炸所形成的激波对加快可燃气体的燃烧作用和后续的阻氧作用几乎可以忽略;同时由于激波较弱,其对周边环境的影响也可以忽略不计。

3 验证实验

为了验证上述理论结果,采用图 5 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 $\varnothing 110 \text{ mm} \times 180 \text{ mm}$,抛撒药质量为 3 g,燃料选用 90 汽油,高速摄像的拍摄频率为 $4 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ 。油盆点火后,预燃一段时间,火焰面基本稳定后起爆冷激波灭火弹,灭火过程如图 6 所示。

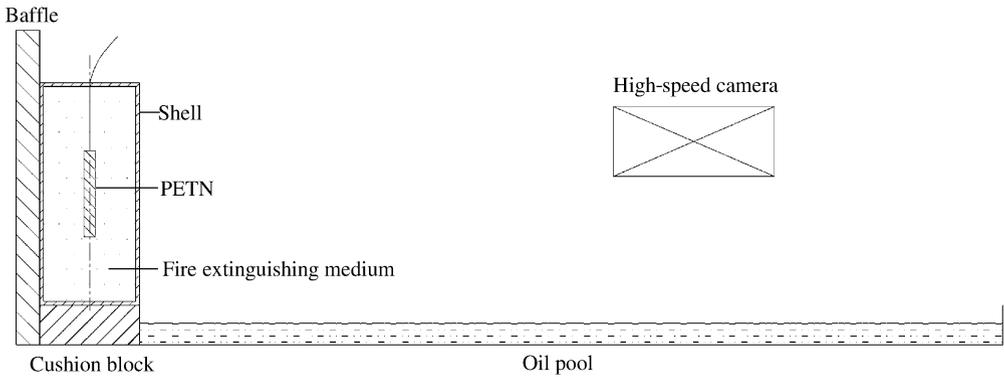


图 5 冷激波灭火实验装置

Fig. 5 Experimental apparatus for cold shock wave extinguishing fire

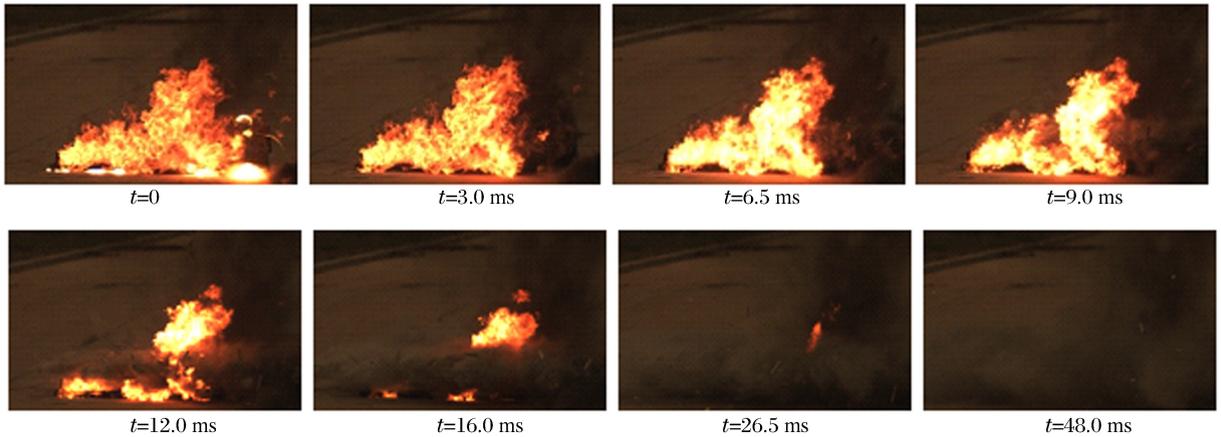


图 6 冷激波灭火实验过程

Fig. 6 Fire-extinguishing process by cold shock wave extinguishing bomb

以冷激波灭火弹起爆时刻为零时刻, $0 \leq t < 3 \text{ ms}$, 火焰面向外折叠, 由壳体高速膨胀运动和抛撒药爆炸所形成的激波引起的扰动向外传播; $t = 3 \text{ ms}$, 火焰面开始回缩, 直到 $t = 5 \text{ ms}$ 结束; 冷激波灭火弹起爆后, 灭火介质穿越火场, 推动可燃气体的火焰面, 使火焰面亮度逐渐增大, 同时灭火介质逐渐隔断火焰面和汽油; $t = 48 \text{ ms}$ 后, 明火被冷激波灭火弹扑灭。

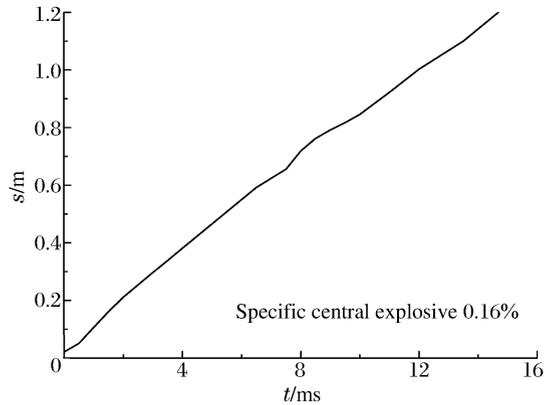


图 4 介质抛撒位移-时间曲线

Fig. 4 Displacement-time profile of dispersion medium

本次高速摄影图片像素为 400×248 ，图像由 0~255 个色阶组成(0 代表黑色，255 代表白色)，其中高色阶色素所占图片色素百分比越多，代表燃烧越剧烈。选取每张图片同等位置处的 A、B 等 2 个区域，如图 7 所示；考察 A、B 等 2 个区域高色阶色素所占图片色素的百分比随时间的变化情况，如图 8 所示。

由图 8 可知， $t < 5$ ms，各区域高阶色素(230 以上)百分比变化不大，即激波对燃烧速率的影响较小； $t \geq 5$ ms，灭火介质推动可燃气体到达火焰面，使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和油盆，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。

由此证明介质抛撒对加快可燃气体燃烧的作用大于激波的影响。因此该实验验证了冷激波灭火弹中激波对灭火效果和周边环境的影响可以忽略的结论。

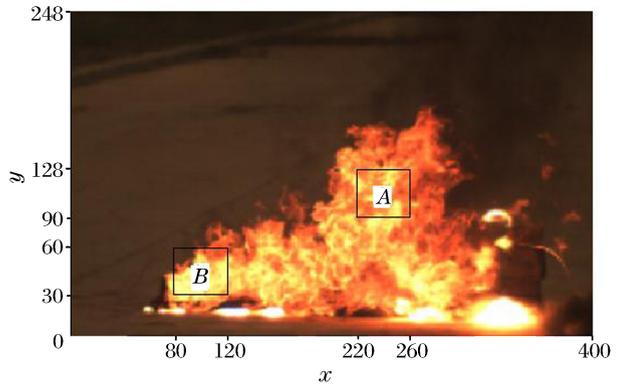


图 7 区域 A 和 B 的位置

Fig. 7 Location of regions A and B

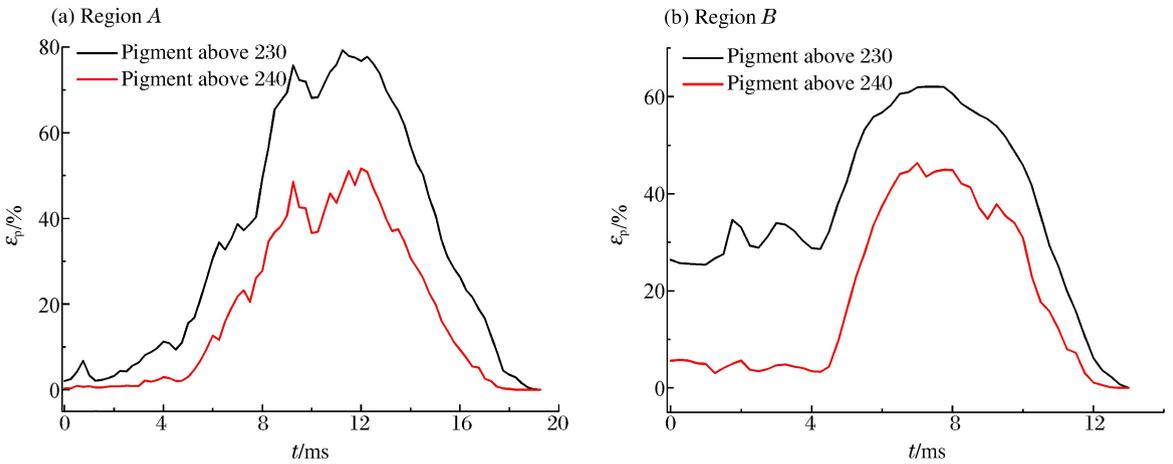


图 8 不同区域色素百分比时程曲线

Fig. 8 Pigment percent-time profiles in different regions

4 结 论

(1) 在 0.3% 的比药量下，粉基冷激波灭火弹爆炸后会在空中形成弱激波，而水基冷激波灭火弹爆炸后只能在空中形成扰动(由壳体高速运动引起)。

(2) 对比灭火介质抛撒加快可燃气体燃烧(加快灭火)的效果，冷激波灭火弹爆炸形成的激波对加快可燃气体燃烧的效果是可以忽略的；同时激波对周边环境的危害也是可以忽略的。因此冷激波灭火系统通过能量转换尽管降低了激波对灭火效果的影响，但同时也降低了激波危害，改善了激波灭火方法。

参考文献：

[1] 冶金工业部安全技术研究所. 苏联统一爆破安全规程[M]. 武汉：冶金工业部安全技术研究所，1983：284.
 [2] Grishin A M, Kovalev Y M. Experimental and theoretical investigation of the effect of an explosion on the front of crown forest fires[J]. Combustion, Explosion and Shock Waves, 1989, 25(6): 724-730.
 [3] 张艳, 任兵, 常熹钰, 等. 激波诱导可燃气体爆燃的数值模拟研究[J]. 国防科技大学学报, 2001, 23(2): 33-37.
 Zhang Yan, Ren Bing, Chang Xi-yu, et al. Numerical simulation about the process that a shock wave induces the

- combustible gas deflagration[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2001,23(2):33-37.
- [4] 常熹钰,易仕和,罗俊荣,等. 激波喷出过程和在林带中的传播[J]. 爆炸与冲击,2000,20(4):373-378.
Chang Xi-yu, Yi Shi-he, Luo Jun-rong. et al. Shock ejection from a tube and propagation in forest belt[J]. Explosion and Shock Waves, 2000,20(4):373-378.
- [5] 蒋耀港,沈兆武. 比药量对冷激波灭火弹灭火效果的影响[C]//刘殿书. 爆破工程新技术 II. 北京:冶金工业出版社, 2008:875-880.
- [6] 蒋耀港,沈兆武,马宏昊. 冷激波灭火弹的灭火机理及应用研究[J]. 火灾科学,2007,16(4):226-231.
Jiang Yao-gang, Shen Zhao-wu, Ma Hong-hao. Mechanism and application of cold shock wave fire extinguishing bomb[J]. Fire Safety Science, 2007,16(4):226-231.
- [7] Glass M W. Far-field dispersal modeling for fuel-air-explosive devices[R]. SAND-90-0528, 1990:18-19.
- [8] Ni Xiao-min, Kuang Kai-qian, Yang Dong-lei, et al. A new type of fire suppressant powder of zeolite nanocomposites with core-shell structure[J]. Fire Safety Journal, 2009,44(7):968-975.
- [9] Henrych J. The dynamics of explosion and its use[M]. New York: Elsevier Scientific Pub. Co., 1979:126-128.
- [10] 马宏昊. 高安全雷管机理与应用研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2008:81-82.

Influences of shock wave in cold shock wave extinguishing system on fire extinguishing effect and surrounding environment^{*}

Jiang Yao-gang, Ma Hong-hao, Shen Zhao-wu,
Cheng Yang-fan, Fan Zhi-qiang, Wang Quan

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

Abstract: A schlieren apparatus was established to experimentally evaluate the influences of the shock wave formed by the explosion of the cold shock wave extinguishing bomb on the extinguishing effect and the surrounding environment. The shock waves formed by the explosion and dispersion of the different extinguishing media and the corresponding propagations were observed based on the above-mentioned schlieren apparatus. And the particle velocity behind the shock wave front at the edge of the oil pool after the explosion of the cold shock wave extinguishing bomb was calculated. Observation shows that the water-based fire-extinguishing medium can not form shock wave; and the powder-based fire-extinguishing medium can form shock wave, but its strength is weak and the particle velocity is low at the edge of the oil pool. Compared with the movement of the combustible gas induced by the medium dispersion, the movement of the combustible gas induced by the shock wave may be neglected. Finally, the above conclusion was verified by a high-speed photographic experiment. So for the cold shock wave fire-extinguishing system, the influences of the shock wave on the extinguishing effect and the surrounding environment are neglectable.

Key words: mechanics of explosion; shock wave; schlieren experiment; cold shock wave fire-extinguishing system; high-speed photography

^{*} Received 19 August 2011; Revised 4 January 2012

Supported by the National Natural Science Foundation of China (51174183)

Corresponding author: Jiang Yao-gang, jiangyg6@mail.ustc.edu.cn