文章编号：1000-5773(2013)04-0592-07

粉系冷激波灭火弹内壁处压力研究*

蒋耀港，马宏昊，沈兆武，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：为了研究冷激波灭火系统壳体破碎和灭火介质爆炸抛洒初期的运动规律，首先需要了解冷激波灭火弹内壁处的压力峰值情况。根据量纲分析、力学结构及爆炸实验，研究了不同尺寸、不同药量下粉系冷激波灭火弹内壁处压力的变化规律。结果表明：粉系冷激波灭火弹内壁处的压力峰值与装药量和弹体直径有关；内壁处压力波形为矩形，当弹体内径为 104 mm 时，内壁高压持续时间大于 100 μs，当弹体内径为 220 mm 时，内壁高压持续时间大于 200 μs；同等弹体直径下，粉系灭火介质的比药量比水系灭火介质的比药量大。由于介质压缩能耗较大，建议采用更细的纳米级粉体或预压缩的粉团作为粉系冷激波灭火弹的灭火介质。

关键词：冷激波灭火弹；压力测试；灭火介质

中图分类号：O381 **文献标识码**：A

1 引 言

针对特殊火场火灾（如高楼火灾、森林火灾），各种新的灭火思想和消防设备应运而生，如激波灭火。早在 1976 年，在前苏联的《爆炸安全规程》中就已提到利用激波扑灭林火的方法[1]，但激波灭火的真正研究始于 20 世纪 90 年代初，俄罗斯的 Grishin 等人[2]从实验、模拟、实际观察等方面对激波与林冠火的相互作用进行了研究；20 世纪 90 年代末常熹钰等人[3]通过实验与数值模拟，发现激波可以扑灭林冠火；2006 年沈兆武等人[4-6]提出了冷激波灭火的思想，该方法既具有激波灭火速度快的优点，又降低了激波的危害（弱激波、无复燃）。冷激波灭火方法是通过发射或投放冷激波灭火弹，进而扑灭特殊火场火灾。冷激波灭火弹由抛洒药、灭火介质和弹壳等组成。灭火介质主要有水基灭火介质和粉系灭火介质。水基灭火介质的主要成分是水，关于水的冲击波特性研究已有很多文献可查[7]，可以通过理论计算得到水系冷激波灭火弹内壁处的压力，但是有关灭火粉体的冲击波特性研究却未见报道。目前，对于粉体的冲击波特性研究主要集中在粉末冶金的爆炸压合[8]和粉尘爆炸[9]等方面，而对于灭火粉体的研究主要集中在灭火效果方面[10]。为了进一步研究粉系冷激波灭火弹壳体破碎和介质爆破抛洒前期的运动规律，为圆柱壳结构设计、冷激波灭火弹的比药量选择等提供理论依据和数据支持，有必要对粉系冷激波灭火弹内壁处压力变化规律进行研究。

2 量纲分析

为了有效地分析冷激波灭火弹内壁处压力峰值的变化规律，抓住本质，减少实验次数，需要对灭火弹中各相关物理量进行量纲分析。炸药在粉系介质内爆炸后，影响粉系冷激波灭火弹内壁压力 p 的主要物理量有：(1) 炸药的装药密度 ρ_e、装药直径 d_e 和爆速 D；(2) 粉系介质的初始压力 p_0，初始密度 ρ_{p0}

* **收稿日期**：2011-10-30；**修回日期**：2012-03-12

基金项目：国家自然科学基金(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研究. E-mail：jiangyg6@mail.ustc.edu.cn

通讯作者：马宏昊(1980－)，男，副教授，主要从事爆破技术研究. E-mail：hhma@ustc.edu.cn

和初始声速 c_0;(3) 弹体直径 d_p;(4) 壳体密度 ρ_s 和声速 c_s。因此

$$p = \varphi(\rho_e, d_e, D, p_0, \rho_{p0}, c_0, d_p, \rho_s, c_s) \tag{1}$$

由量纲理论 π 定理可知

$$\frac{p}{\rho_{p0} c_0^2} = \varphi\left(\frac{\rho_e}{\rho_{p0}}, \frac{D}{c_0}, \frac{p_0}{\rho_{p0} c_0^2}, \frac{d_p}{d_e}, \frac{\rho_s}{\rho_{p0}}, \frac{c_s}{c_0}\right) \tag{2}$$

假定粉体初始状态不变,对于指定炸药,装药密度 ρ_e 和爆速 D 也不变,则(2)式可简化为

$$\frac{p}{\rho_{p0} c_0^2} = \varphi\left(\frac{d_p}{d_e}, \frac{\rho_s c_s}{\rho_{p0} c_0}\right) \tag{3}$$

对于特定壳体材料,壳体密度 ρ_s 和声速 c_s 不变,并假定炸药的装药量为 Q,则(3)式可化为

$$\frac{p}{\rho_{p0} c_0^2} = \varphi\left(\frac{d_p}{\sqrt[3]{Q/\rho_e}}\right) = \varphi\left(\frac{d_p}{\sqrt[3]{Q}}\right) \tag{4}$$

即

$$p \propto \varphi\left(\frac{d_p}{\sqrt[3]{Q}}\right) \tag{5}$$

由(5)式可见,对于指定炸药和壳体,在相同装药密度下,粉系冷激波灭火弹内壁处的压力主要与装药量 Q 和弹体直径 d_p 有关。

3　粉体灭火介质的力学结构

粉体由大量的颗粒及颗粒间隙组成。由于颗粒间隙的存在,使粉体在受压时呈现出较大的可压缩性。粉体的单轴压缩应力-应变曲线如图 1 所示[11]。从图 1 中可以看出:在初始压合阶段,粉体具有较大的可压缩性(主要表现为颗粒间的孔隙塌陷、颗粒重排和颗粒破碎等),在较小的压合应力下即可达到较大的相对压缩应变;随着压合应力的不断增大,粉体介质的抗压强度逐渐增大,相对压缩应变逐渐减小,即相对密度逐渐增大。

现有灭火粉体主要有 $NaHCO_3$ 粉体、$KHCO_3$ 粉体、磷酸铵粉体以及各粉体的混合体,其中 $NaHCO_3$ 粉体的扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscopy,SEM)图像如图 2 所示[12]。

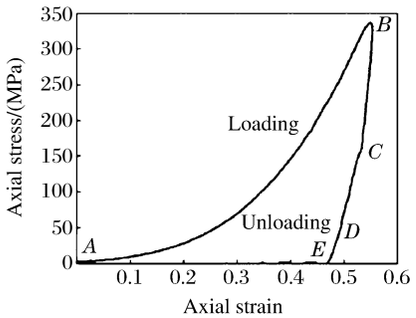


图 1　粉体单轴压缩应力-应变曲线

Fig. 1　Uniaxial compression stress-strain curve of powder

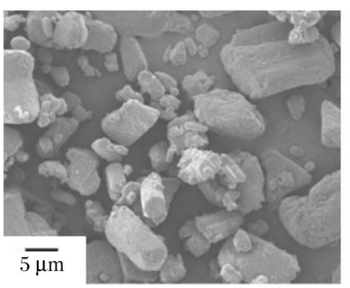


图 2　$NaHCO_3$ 粉体的 SEM 图像

Fig. 2　SEM image of the $NaHCO_3$ powder

$NaHCO_3$ 灭火粉体中存在大量孔隙,冲击波在灭火粉体中传播时,冲击波超压会不断破碎、压合激波前方的粉体颗粒,导致粉体颗粒不断重排,密度随之增大;由于颗粒破碎、孔隙塌陷、颗粒重排等需要消耗大量能量,因此冲击波能量和压力峰值随着传播距离的增加而不断衰减。

4　实　验

在研究弹内抛洒药点火后所形成的冲击波在弹壳内粉体中的传播规律及弹壳壳壁结构的动态响应时,由于壳壁结构较薄,在整个研究过程中应力波在壳壁内多次来回反射,因此可以假定壳壁属于刚塑性壳壁。当冲击波传播到内壁面时,会在内壁面处形成反射超压。为了测定冷激波灭火弹内壁处的反

射压力的变化情况，设计了如图 3 所示的实验装置。

壳体分为两种：一种是内径 d_p 为 104 mm、壁厚 t_c 为 5 mm、高 H 为 0.6 m 的圆柱形开口钢管，另一种是内径 d_p 为 220 mm、壁厚 t_c 为 8 mm、高 H 为 0.8 m 的圆柱形开口钢管。由于 $H>3d_p$，因此对于中心装药的内壁处压力峰值测试，可以忽略上、下端面的反射效应。实验前，先在管壁内表面对称粘贴 PVDF 压力膜片，然后采用十字架/钢套的中心定位装置，将炸药固定在中心部位，中心装药为柱形装药，最后在钢管内填满 $NaHCO_3$ 灭火粉体（粉体颗粒密度为 2.1 g/cm^3，表观密度约为 1.1 g/cm^3）。示波器的采样率为 200 MHz。

PVDF 压力传感器的测试电路如图 4 所示[13]。PVDF 压力传感器测试电路通过下式将电荷信号转换为压力信号，即

$$p=\frac{Q_{\mathrm{PVDF}}}{KA}=\frac{1}{KA}\int I(t)\,\mathrm{d}t=\frac{1}{KA}\int\frac{U}{R}\,\mathrm{d}t \tag{6}$$

式中：Q_{PVDF}为 PVDF 受压产生的电荷量（单位 C）；A 为 PVDF 的面积，为 36 mm^2；K 为 PVDF 的压电系数，为 2.1 pC/N；U、R 分别为电压和电阻。

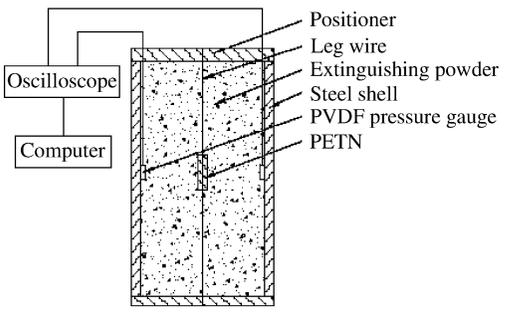


图 3 实验装置

Fig. 3 Experiment apparatus

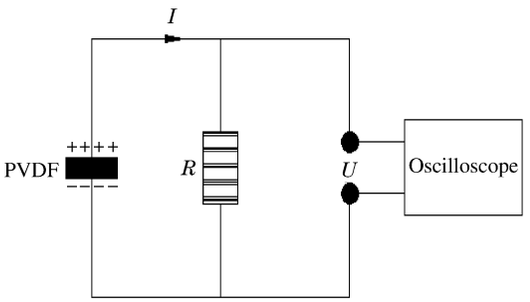


图 4 PVDF 压力传感器测试电路

Fig. 4 Test circuit of PVDF pressure gauge

压力测试得到的典型电压信号和电压积分信号（即压力信号）如图 5 所示。

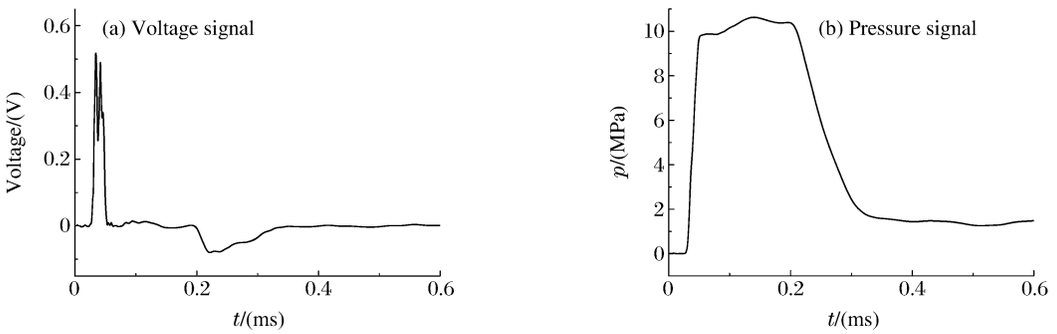


图 5 电压信号和压力信号

Fig. 5 Voltage signal and pressure signal

根据装药量和壳体尺寸的不同，将实验分为 7 组，装药采用 PETN 柱形雷管装药。为了便于比较，把 PETN 柱形装药等效换算成 TNT 球形装药，由文献[14]可知

$$w^*=2\eta w d_e^*/L \tag{7}$$

$$d_e^*=\sqrt{w/(\pi\rho_e L)} \tag{8}$$

式中：w^* 为等效装药量（单位 g），w 为实际装药量（单位 g），d_e^* 为等效装药直径（单位 cm），ρ_e 为装药密度（单位 g/cm^3），L 为装药长度（单位 cm），η 为等效装药系数。η 由下式确定[15]

$$\eta=Q_{V,\mathrm{PETN}}/Q_{V,\mathrm{TNT}} \tag{9}$$

式中:$Q_{V,\mathrm{PETN}}$为 PETN 炸药爆热(单位 J/g),取 5 690 J/g;$Q_{V,\mathrm{TNT}}$为 TNT 炸药爆热(单位 J/g),取 4 226 J/g。根据(9)式,可得等效装药系数 η 为 1.35。折合距离 $\bar{d}$ 为

$$\bar{d} = d_{\mathrm{p}} / \sqrt[3]{w^*} \tag{10}$$

式中:$\bar{d}$ 为折合距离(单位 cm/g$^{1/3}$),d_{p} 为壳体内径(单位 cm)。

实验参数列于表 1。

表 1　实验参数

Table 1　Experimental parameters

No.	w/(g)	L/(cm)	ρ_{e}/(g/cm^3)	d_{e}^*/(cm)	d_{p}/(mm)	w^*/(g)	$\bar{d}$/(cm/g$^{1/3}$)
1	1.0	2.6	1.3	0.31	104	0.32	7.61
2	1.5	3.8	1.3	0.31	104	0.33	7.51
3	2.0	2.6	1.3	0.43	104	0.90	5.38
4	1.5	3.8	1.3	0.31	220	0.33	15.90
5	3.0	3.8	1.3	0.44	220	0.94	11.24
6	4.5	3.8	1.3	0.54	220	1.72	9.18
7	6.0	3.8	1.3	0.62	220	2.65	7.95
8	7.5	3.8	1.3	0.70	220	3.71	7.11

5　实验结果与分析

每组实验重复进行 2～3 次,然后由(6)式将电压信号转换成压力信号,并对每组实验中不同 PVDF 所测的峰值压力取平均值,实验结果如图 6 所示,峰值压力列于表 2。可以看出,内壁处的压力曲线类似于矩形波,小罐(壳体内径为 104 mm)的平台高压时间维持在 100 μs 以上,大罐(壳体内径为 220 mm)的平台高压时间维持在 200 μs 以上。由图 6 的局部放大图和图 7 可知,同等距离处,随着装药量 w 的增大,刚性壁面处反射的压力峰值不断增大,压力上升曲线变得越来越陡峭。此外,由图 8 可知,各峰值压力随着折合距离 $\bar{d}$ 的减小而逐渐增大。

表 2　峰值压力

Table 2　The peak of pressure

No.	p/(MPa)	No.	p/(MPa)	No.	p/(MPa)	No.	p/(MPa)
1	24.79	3	63.02	5	7.79	7	17.55
2	26.42	4	3.43	6	10.81	8	33.89

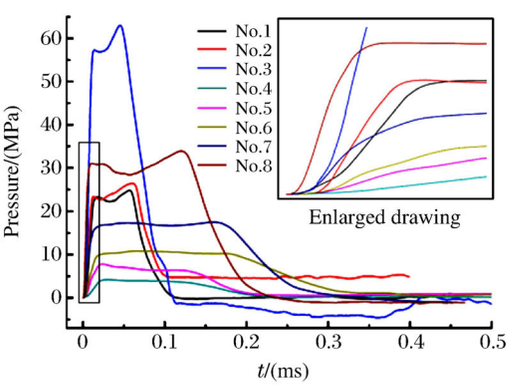


图 6　各次实验的压力时程曲线

Fig. 6　Pressure-time curves

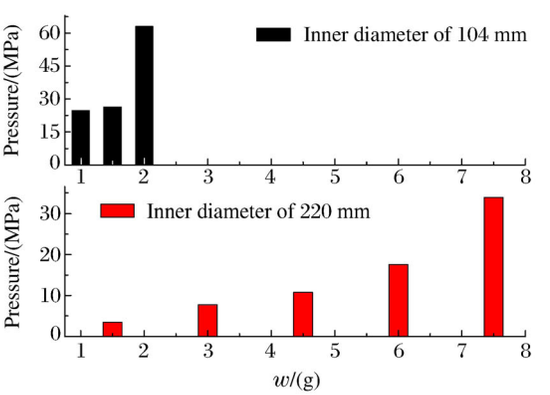


图 7　相同距离处壁面的反射压力

Fig. 7　Reflected pressure at the same distance

对比 11 cm 处有、无约束时的压力时程曲线(如图 9 所示,装药量为 4.5 g),可以看出,入射压力波形(无约束压力波形)近似为三角形,反射压力波形(有约束压力波形)近似为矩形,内壁面处测得的反射压力峰值约为入射压力峰值的 7.5 倍。

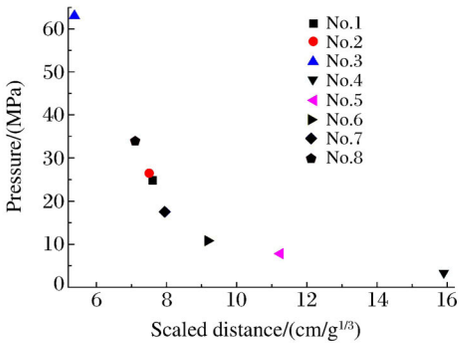


图 8 不同折合距离处的反射压力

Fig. 8 Reflected pressure at different scaled distance

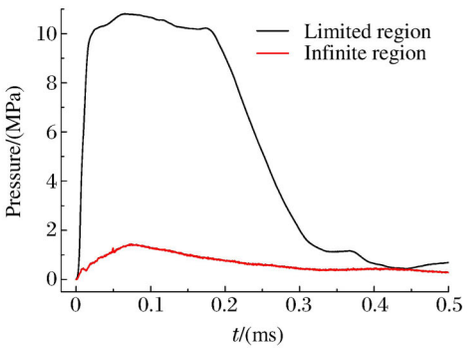


图 9 有、无约束时的压力时程曲线

Fig. 9 Pressure-time curves in limited and infinite region

水介质和空气介质在刚性壁面处的反射超压分别为[7]

$$\Delta p_{r1} = 2\Delta p_1 + 2.5\Delta p_1^2/(\Delta p_1 + 1\,900) \qquad \Delta p_1 \leqslant 120\ \text{MPa} \tag{11}$$

$$\Delta p_{r2} = 2\Delta p_2 + 6\Delta p_2^2/(\Delta p_2 + 0.72) \qquad \Delta p_2 \leqslant 4\ \text{MPa} \tag{12}$$

$$\Delta p_1 = \frac{35.5}{\bar{d}} + \frac{11.5}{\bar{d}^2} - \frac{0.244}{\bar{d}^3} \qquad 0.05 \leqslant \bar{d} < 10 \tag{13}$$

$$\Delta p_2 = \begin{cases} \dfrac{0.619\,38}{\bar{d}} - \dfrac{0.032\,62}{\bar{d}^2} + \dfrac{0.213\,24}{\bar{d}^3} & 0.3 \leqslant \bar{d} < 1.0 \\ \dfrac{0.066\,2}{\bar{d}} + \dfrac{0.405\,0}{\bar{d}^2} + \dfrac{0.328\,8}{\bar{d}^3} & 1.0 \leqslant \bar{d} < 10 \end{cases} \tag{14}$$

式中:Δp_1、Δp_2 分别为水中和空气中的入射超压(单位 MPa),Δp_{r1}、Δp_{r2} 分别为水中和空气中的反射超压(单位 MPa),$\bar{d}$ 为折合距离(单位 $\text{m/kg}^{1/3}$)。

对比相同折合距离水介质和空气介质在刚性壁面处的反射超压(如图 10 所示),可以看出:随着折合距离的增大,各物质的反射超压减小;由于水的可压缩性较小,而粉体由粉体颗粒和大量空气间隙组成,可压缩性较大,导致水的反射超压大于粉体的反射超压,粉体的反射超压又大于空气的反射超压;随着折合距离的减小,粉体的反射超压增大,且增长趋势逐渐加快,这是因为粉体的入射压力越大,压力过后其相对密度随之增大,抗压强度也迅速上升,可压缩性逐渐减小;同等药量下,水中超压随折合距离的增大而减小,可认为是几何耗散与粘性耗散所致,粉体中/空气中超压随折合距离的增大而衰减可认为是几何耗散、粘性耗散和介质压缩(粉体是孔隙塌陷、颗粒破碎及颗粒重排,空气是分子间间距减小)所致,在忽略粘性耗散的基础上,可近似认为介质压缩是冲击波在粉体和空气中传播的主要耗能机制。

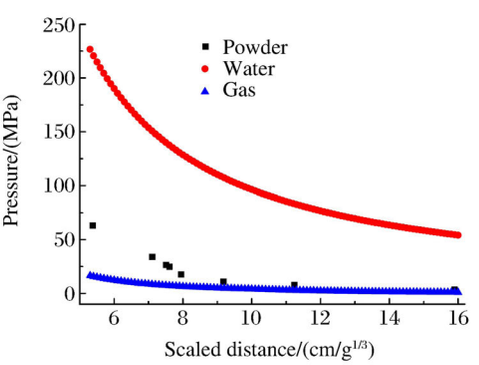


图 10 不同介质的反射超压曲线

Fig. 10 Reflected pressure curves for different medium

由于粉体的可压缩性大于水的可压缩性而小于空气的可压缩性,使得冲击波在粉体内的衰减快于水中冲击波衰减,但慢于空气中冲击波衰减,不断衰减的冲击波能量主要用于粉体颗粒间的孔隙塌陷、颗粒破碎及颗粒重排等;相同折合距离处,水的反射超压远大于粉体,因此对于同等尺寸的冷激波灭火

弹,在考虑壳体破碎的情况下,水系灭火介质的抛洒药低于粉系灭火介质的抛洒药;由于粉系灭火介质与水系灭火介质的密度相当,因此粉系灭火介质的比药量大于水系灭火介质。

6　结　论

粉系冷激波灭火弹内壁处的压力波形为矩形,当弹体内径为 104 mm 时,内壁高压持续时间大于 100 μs,当弹体内径为 220 mm 时,内壁高压持续时间大于 200 μs,且压力峰值均随折合距离的增大而减小;在相同折合距离下,内壁面处粉体介质的反射超压高于空气,而远低于水介质,因此为了达到相同的壳体破碎效果,粉系灭火介质的装药量和比药量均大于水系灭火介质。为了减少冲击波在粉系介质中传播时由于介质压缩所耗散的能量,建议采用纳米级粉体或预压粉团(较小的孔隙率,较大的相对密度)作为粉系冷激波灭火弹的灭火介质,以减小介质压缩的能量损耗,增大灭火效果。研究结果对后续冷激波灭火弹弹壳结构设计、弹壳破碎和介质抛洒雾化研究具有重要意义,为后续研究提供了设计依据和理论支持。

References:

[1] Blasting Safety Regulation [M]. Translated by Institute of Safety Technology, Ministry of Metallurgical Industry. Wuhan, 1983.

[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]. Combust Explo Shock Waves, 1989, 25(6): 724-730.

[3] Zhang Y, Ren B, Chang X Y, et al. Numerical simulation about the process that a shock wave induces the combustible gas deflagrating [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燃的数值模拟 [J]. 国防科技大学学报,2001,23(2):33-37.

[4] Jiang Y G, Shen Z W. Influence of center high explosive charge ratio to the effect of extinguishing by cold shock wave fire extinguishing bomb [C]//New Technology of Blasting Engineering in China Ⅱ. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2008: 875-880. (in Chinese)
蒋耀港,沈兆武. 比药量对冷激波灭火弹灭火效果的影响 [C]//中国爆破新技术Ⅱ. 北京:冶金工业出版社,2008:875-880.

[5] Jiang Y G, Shen Z W, Ma H H. Mechanism and application of cold shock wave fire extinguishing bomb [J]. Fire Safety Science, 2007, 16(4): 226-231. (in Chinese)
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.

[6] 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.

[7] Henrych J. Dynamics of Explosion and Its Use [M]. New York, USA: Elsevier Scientific Pub Co, 1979.

[8] Vogler T J, Lee M Y, Grady D E. Static and dynamic compaction of ceramic powders [J]. Int J Solids Struct, 2007, 44(2): 636-658.

[9] Abbasi T, Abbasi S A. Dust explosions-cases, causes, consequences, and control [J]. J Hazard Mater, 2007, 140(1/2): 7-44.

[10] Klemens R, Gieras M, Kaluzny M. Dynamics of dust explosions suppression by means of extinguishing powder in various industrial conditions [J]. J Loss Prev Process Ind, 2007, 20(4/5/6): 664-674.

[11] Wu C Y, Ruddy O M, Bentham A C, et al. Modelling the mechanical behaviour of pharmaceutical powders during compaction [J]. Powder Technol, 2005, 152(1/2/3): 107-117.

[12] Ni X, Kuang K, Yang D, et al. A new type of fire suppressant powder of $NaHCO_3$/zeolite nanocomposites with core-shell structure [J]. Fire Saf J, 2009, 44(7): 968-975.

[13] Wu X T, Hu S S, Tian J. Stress-measurement method by PVDF gauge and its application to impact test for concrete

[J]. Explosion and Shock Waves, 2007, 27(5): 411-415. (in Chinese)
巫绪涛, 胡时胜, 田 杰. PVDF 应力测量技术及在混凝土冲击实验中的应用 [J]. 爆炸与冲击, 2007, 27(5): 411-415.

[14] Ma H H. Research on the principle and application of the high-safe detonator [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2008. (in Chinese)
马宏昊. 高安全雷管机理与应用的研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2008.

[15] Jin S H, Song Q C. Explosive Theories [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2010: 24-37. (in Chinese)
金韶华, 松全才. 炸药理论 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2010: 24-37.

Study of Pressure on the Inner Wall of Powder Cold Shock-Wave Extinguishing Bomb

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

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

Abstract: In order to study the shell fragmentation and the early motion of extinguishing medium after explosion in the cold shock-wave extinguishing system, the pressure on the inner wall of the cold shock-wave extinguishing bomb must be firstly understood. The change of pressure has been studied by dimensional analysis, mechanical structure, and explosion experiments. It is found that the pressure is related to the charge weight and bomb diameter, and the pressure waveform measured at the inner wall is rectangular. When the bomb diameter is 104 mm, the duration of high pressure is above 100 μs; when the bomb diameter is 220 mm, the duration of high pressure is above 200 μs. In addition, the specific central explosive charge of powder is more than that of water under the same dimension of the cold shock-wave extinguishing bomb to reach better effect of the shell crushing. Owing to the higher energy dissipation during compression, the finer powder and pre-compression powder are suggested as extinguishing medium in powder cold shock-wave extinguishing system.

Key words: cold shock-wave fire-extinguishing bomb; pressure test; extinguishing medium