

文章编号: 1006-9941(2018)05-0436-05

贮氢玻璃微球敏化乳化炸药的爆炸特性

王波¹, 马宏昊^{1,2}, 沈兆武¹, 杨明¹, 陈海军¹, 王奕鑫¹

(1. 中国科学技术大学 中国科学院材料力学行为和 Design 重点实验室, 安徽 合肥 230026; 2. 中国科学技术大学 火灾科学国家重点实验室, 安徽 合肥 230026)

摘要: 为了提高传统乳化炸药的爆炸威力, 研制了一种贮氢玻璃微球敏化的乳化炸药。利用水下爆炸试验和猛度测试试验, 研究了添加不同含量的贮氢玻璃微球的乳化炸药的爆轰性能。理论计算得到了炸药猛度的比冲量。结果表明, 与普通玻璃微球乳化炸药相比, 贮氢玻璃微球含量为 4% 的乳化炸药的冲击波超压峰值、比冲击波能、比气泡能、总能量分别提升了 14.25%、14.22%、11.11%、12.67%, 猛度(铅铸压缩量)提高了 3.03 mm, 且随着贮氢玻璃微球的含量的增加, 炸药的冲击波参数逐渐降低。贮氢玻璃微球在乳化炸药中起到敏化剂与含能材料的双重作用, 因此贮氢玻璃微球敏化乳化炸药的作功能力与猛度得到显著提高。

关键词: 乳化炸药; 贮氢玻璃微球; 爆轰性能; 敏化; 热点**中图分类号:** TJ55; O389**文献标志码:** A**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2018.05.011

1 引言

乳化炸药作为一种油包水型工业炸药, 因其优良的抗水、安全、爆炸、环保性能而广泛的应用于工程爆破中, 但传统乳化炸药也存在着爆炸威力低的缺点^[1]。为了提高乳化炸药的作功能力, 近年来研制高威力乳化炸药已成为国内外研究热点^[2-4]。向乳化炸药中加入高能物质是提高炸药能量的方式之一。Jolanta^[5]从过期弹药中提取的硝化纤维粉可以取代铝粉的作用, 将硝化纤维粉添加到乳化炸药中可以提升炸药的作功能力, 从而实现废旧资源的再利用; 钱海等^[6]研究了铝粉含量与粒径对乳化炸药的作功能力的影响, 结果表明当铝粉含量为 20% 时, 含铝乳化炸药的爆炸能量达到最大值, 且小粒径的铝粉有助于炸药释放能量; 虽然铝粉会提高炸药的作功能力, 但同时也提高炸药的感度, 降低了炸药的爆压, 且铝粉易氧化, 影响炸药的储存稳定性。龚悦等^[7]对含钛乳化炸药的爆轰性能与热分解性能进行研究, 研究表明含钛乳化炸药(钛粉量为 10%)的猛度提高了 17.6%, 钛

粉较之铝粉和硼粉, 其对乳化炸药的热安定影响作用小; 程扬帆等^[8-10]通过向炸药中添加储氢材料 MgH_2 , 制得储氢型乳化炸药, 并研究了其爆轰性能、抗压减敏机理、敏化方式对炸药作功能力的影响, 结果表明 MgH_2 乳化炸药具有优良的爆轰性能与抗压力减敏能力。但 MgH_2 在乳化炸药弱酸环境中容易水解产生氢气, 影响贮存稳定性。玻璃微球具有低密度, 高流动性、高强度等物理化学性质, 其单位质量的理论贮氢效率为 13%~16%^[11], 是一种可观的贮氢材料, 但目前国内外尚未报道将贮氢玻璃微球用作乳化炸药的敏化剂。

基于此, 本研究通过高压将 H_2 引入到玻璃微球中, 制得贮氢玻璃微球并作为敏化剂加入到乳胶基质中, 得到贮氢玻璃微球敏化乳化炸药。对添加不同含量贮氢玻璃微球的乳化炸药进行水下爆炸试验与猛度、爆数测试, 并与普通乳化炸药的爆轰性能进行对比, 为其在高能乳化炸药的配方设计与应用提供依据。

2 实验部分

2.1 实验试剂

乳化炸药常用的敏化方式为物理敏化与化学敏化, 物理敏化主要是玻璃微球敏化(Glass Microspheres, GM)敏化。根据已有研究^[12], 乳化炸药中玻璃微球的含量为 4% 时, 乳化炸药的爆炸性能最佳。所用玻璃微球购于美国 3M 公司, 平均粒径(D_{50})为 55 μm , 堆积密度为 0.25 $g \cdot cm^{-3}$; 乳胶基质购于淮

收稿日期: 2017-09-13; 修回日期: 2017-10-28

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51674229, 51374189); 中国科学技术大学重要方向项目培育基金(WK2480000002)

作者简介: 王波(1993-), 男, 硕士研究生, 主要从事贮氢乳化炸药的爆炸性能相关研究。e-mail: wb342625@mail.ustc.edu.cn

通信联系人: 马宏昊(1980-), 男, 副教授, 主要从事爆破器材与工业安全及爆炸力学相关领域研究。e-mail: hhma@ustc.edu.cn

南舜泰化工公司,密度为 $1.45 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,乳胶基质的配方见表1。制备添加玻璃微球含量为4%的乳化炸药,标记为1#样品,制备添加含量分别为4%、5%、6%的贮氢玻璃微球的乳化炸药,分别标记为2#、3#、4#样品。

表1 乳化基质的配方

Table 1 Composition of emulsion matrix

| component | NH_4NO_3 | NaNO_3 | H_2O | $\text{C}_{13}\text{H}_{38}$ | $\text{C}_{24}\text{H}_{44}\text{O}_6$ | $\text{C}_{12}\text{H}_{26}$ |
|--------------|--------------------------|-----------------|----------------------|------------------------------|--|------------------------------|
| mass ratio/% | 75 | 10 | 8 | 4 | 2 | 1 |

2.2 玻璃微球的贮氢过程

玻璃微球充放氢过程是利用微球球壳内外氢气的压力差来实现的。将普通玻璃微球置于高压氢气瓶中,向氢气瓶中充入氢气,压力为5.5 MPa,静压贮存4个月后取出玻璃微球,即可制得贮氢玻璃微球。对于20 g的普通玻璃微球经过静压贮氢后,其质量增加了1 g,故可求得该类型的贮氢玻璃微球的质量贮氢效率为5%。

2.3 水下爆炸试验

水下爆炸试验在直径 D 为5 m,深度 H 为5 m的水下爆炸塔中进行。测试装置包括示波器(Tektronix)、水下压力传感器(PCB, ICP W138A25)、恒流源(482A22),试验装置如图1所示。当在有限水域进行水下爆炸试验时,为了消除水池边界与水池底部对测试的影响^[13],将包含30 g 乳化炸药的球形药包置于水下2.5 m处,PCB压力传感器距离药包分别1 m与1.2 m。试验中,每组样品至少做三组平行试验,并用其平均值表示水下爆炸冲击波参数。

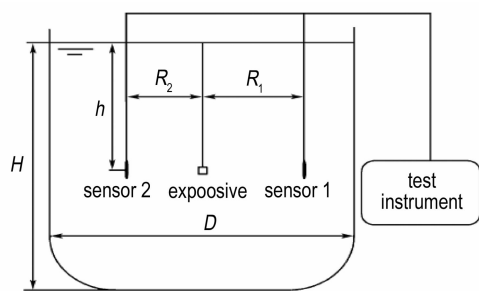


图1 水下爆炸实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the underwater explosion experiment device

2.4 炸药的猛度与爆速测试

猛度与爆速是判断炸药爆炸威力的重要性能,实验在空中爆炸舱中进行。炸药的猛度可用铅柱的压缩

量来度量,其中铅柱的高度为60 mm,直径为40 mm;钢片的厚度为10 mm,直径为41 mm。每次测试的炸药质量为50 g。

炸药爆速采用离子探针法测试,将乳化炸药置于PVC管中,其中PVC管的直径为25 mm,长度为200 mm,探针的间距为40 mm,使用ZBS10多段智能爆速测量仪测量。

3 结果与讨论

3.1 炸药水下爆轰参数计算

3.1.1 冲击波比冲量

水下爆炸冲击波冲量计算公式^[14]为

$$I(t) = \int_0^{6.7\theta} \Delta p(t) dt \quad (1)$$

式中, $I(t)$ 为冲击波冲量, $\text{kPa} \cdot \text{s}$; $\Delta p(t)$ 为距离爆源 R 处冲击波压力随时间变化曲线, θ 为冲击波衰减时间, μs , 一般为冲击波压力从压力峰值 p_m 衰减到 p_m/e 的时间。

3.1.2 冲击波比冲击波能、气泡能、总能量的计算

水下爆炸比冲击波的计算公式^[14]为

$$E_s = \frac{4\pi R^2}{W\rho_w c_w} \int_0^{6.7\theta} \Delta p^2(t) dt \quad (2)$$

式中, E_s 为比冲击波能, $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$; W 为装药质量, kg ; ρ_w 为水的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; c_w 为声音在水中传播的速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

水下爆炸比气泡能计算公式为^[14]

$$E_b = (\sqrt{1+4CT_b} - 1)^3 / 8C^3 k_1^3 W \quad (3)$$

$$k_1 = 1.135\rho_w^{1/2} / \rho_h^{5/6} \quad (4)$$

式中, E_b 为比气泡能, $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$; T_b 为气泡的第一次脉动周期, s ; C 为实验条件测得的校正系数^[12] $-0.4464, \text{s}^{-1}$ 。

炸药总能量计算公式为^[14]

$$\mu = 1 + 1.3328 \times 10^{-1} p_{C1} - 6.5775 \times 10^{-3} p_{C1} + 1.2594 \times 10^{-4} p_{C1}^3 \quad (5)$$

$$\rho_{C1} = \rho_0 D^2 / 4 \quad (6)$$

$$E = K_f (\mu E_s + E_b) \quad (7)$$

式中, E 为水下爆炸比总能量, $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$; μ 为冲击波损失系数; K_f 为炸药形状参数, 对于球形装药 K_f 取1.00; ρ_0 为炸药的密度, $\text{kg} \cdot \text{cm}^{-3}$; p_{C1} 为 C-J 压力, GPa 。

3.2 水下爆炸实验结果分析

结合式(1)~式(7), 计算得到玻璃微球乳化炸药与贮氢玻璃微球乳化炸药的比冲击波能 E_s 、比气泡能 E_b 、冲击波损失系数 μ 、炸药的总能量 E 。其中表2与

表 3 分别是传感器距爆源 1.2 m 与 1 m 处测得的数据结果(1.2 m 与 1 m 水下爆炸能量输出参数), 四种

乳化炸药在 1.2 m 处水下爆炸的冲击波爆炸压力、比冲击波能时程曲线如图 2 与图 3 所示。

表 2 四种乳化炸药 1.2 m 处水下爆炸能量输出参数

Table 2 Energy output parameters of four kinds of emulsion explosives at the distance of 1.2 m in underwater explosion

| explosive | p_m / MPa | θ / μ s | I / kPa · s | E_s / MJ · kg ⁻¹ | E_b / MJ · kg ⁻¹ | μ | E / MJ · kg ⁻¹ |
|----------------|-------------|--------------------|---------------|-------------------------------|-------------------------------|-------|-----------------------------|
| 1 [#] | 7.71 | 41.43 | 0.4775 | 0.6647 | 2.0469 | 1.61 | 3.1171 |
| 2 [#] | 8.59 | 44.80 | 0.5191 | 0.7452 | 2.2744 | 1.64 | 3.5122 |
| 3 [#] | 8.46 | 44.33 | 0.5052 | 0.7185 | 2.1936 | 1.63 | 3.3648 |
| 4 [#] | 7.93 | 44.70 | 0.4908 | 0.6659 | 2.1148 | 1.60 | 3.1802 |

Note: p_m is the shock peak pressure; θ is the shock wave attenuation time; I is the shock wave impulse; E_s is the shock wave specific energy; E_b is the bubble specific energy; μ is shock wave loss-coefficient; E is total energy.

表 3 四种乳化炸药 1 m 处水下爆炸能量输出参数

Table 3 Energy output parameters of four kinds of emulsion explosives at the distance of 1 m in underwater explosion

| explosive | p_m / MPa | θ / μ s | I / kPa · s | E_s / MJ · kg ⁻¹ | E_b / MJ · kg ⁻¹ | μ | E / MJ · kg ⁻¹ |
|----------------|-------------|--------------------|---------------|-------------------------------|-------------------------------|-------|-----------------------------|
| 1 [#] | 9.82 | 43.38 | 0.6095 | 0.7408 | 2.0806 | 1.61 | 3.2733 |
| 2 [#] | 11.22 | 43.75 | 0.6653 | 0.8462 | 2.2474 | 1.64 | 3.6352 |
| 3 [#] | 10.87 | 44.84 | 0.6551 | 0.8048 | 2.2026 | 1.63 | 3.5144 |
| 4 [#] | 10.58 | 43.41 | 0.6418 | 0.7764 | 2.1849 | 1.60 | 3.4271 |

Note: p_m is the shock peak pressure; θ is the shock wave attenuation time; I is the shock wave impulse; E_s is the shock wave specific energy; E_b is the bubble specific energy; μ is shock wave loss-coefficient; E is total energy.

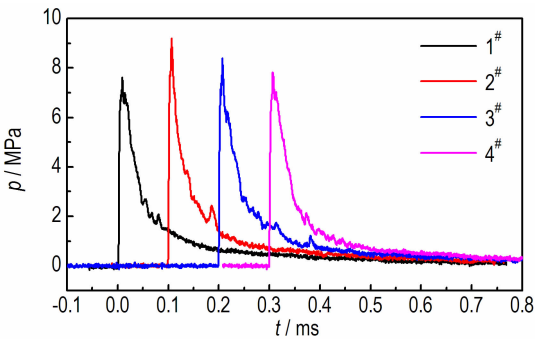


图 2 四种乳化炸药 1.2 m 处水下爆炸冲击波压力时程曲线
Fig. 2 Shock wave pressure-time curves of four kinds of emulsion explosives at the distances of 1.2 m in underwater explosion

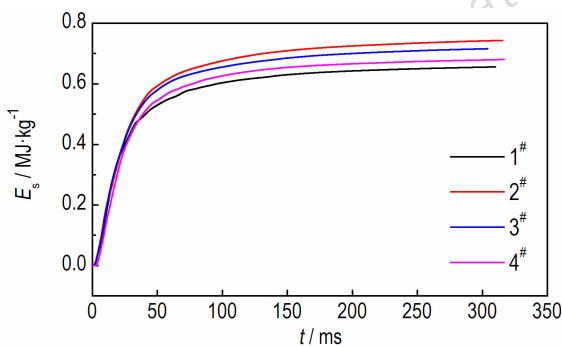


图 3 四种乳化炸药 1.2 m 处水下爆炸的比冲击波能时程曲线
Fig. 3 Shock wave specific energy-time curves of four kinds of emulsion explosives at the distance of 1.2 m in underwater explosion

由表 2 和图 2、图 3 可以看出, 贮氢玻璃微球含量为 4% 的乳化炸药(2[#])在水下爆炸时产生的冲击波压力峰值 p_m , 较普通乳化炸药(1[#])的 p_m 提高了 11.41%, 贮氢乳化炸药的比冲击波能高于普通乳化炸药, 但随着乳化炸药中贮氢玻璃微球含量的增加, 冲击波压力峰值、比冲击波能开始逐渐降低, 4[#] 乳化炸药(贮氢玻璃微球的含量为 6%)的压力峰值较 2[#] 下降了 7.68%。

表 2 显示, 冲量 I 、冲击波能 E_s 、比气泡能 E_b 、都随微球的含量增加呈递减趋势。因为乳化炸药接近零氧平衡, 向乳化炸药中引入氢改变了其原有的氧平衡, 添加含量越多, 其负氧程度越大, 负氧化使得乳化炸药反应不完全, 从而降低其爆轰性能。在水下爆炸的能量方面, 与普通乳化炸药(1[#])相比, 贮氢乳化炸药(2[#])的比冲量 I 提高了 8.71%、冲击波能 E_s 提高了 11.69%、气泡能 E_b 提高了 8.85%、总能量 E 提高了 10.52%。

表 3 是传感器距爆源 1 m 处测得的实验数据, 结果显示: 贮氢乳化炸药(2[#])较普通乳化炸药(1[#])的比冲量 I 、比冲击波能、气泡能 E_b 、总能量 E 分别提高了 8.39%、14.22%、11.11%、12.67%, 且贮氢乳化炸药的爆轰参数变化规律与表 2 所呈现的数据规律一致, 体现了水下爆炸试验结果重复性好的优点。综上所

述,贮氢玻璃微球对乳化炸药的能量有明显的影响,适当加入贮氢玻璃微球能够提高乳化炸药的冲击波参数和能量,其爆炸性能呈现规律性的变化。

传统的玻璃微球乳化炸药,当冲击波压缩乳化炸药时,会首先压缩乳化炸药中的玻璃微球,待玻璃微球压溃后,其里面的气泡会绝热压缩,气泡周围的压力与温度急剧增加^[15]。对于乳化炸药,爆炸反应释放的能量与乳化炸药的燃烧的表面积成正比^[16]。冲击波掠过贮氢乳化炸药后,首先压缩氢气泡形成“热点”,当热点处的温度高于氢气的爆炸临界值时,氢气发生爆炸生成水蒸气,乳化基质内向破裂进入气泡中^[17],这增加了乳化炸药的燃烧面积。持续的冲击波压缩导致该区域温度升高,热量从高温高压气体不断地传递到乳化基质中,从而形成温度梯度。当温度升高到炸药的爆炸极限时,乳化基质表面发生从固相到气相的转变,完成燃烧转爆轰反应,并为后续反应提供能量。贮氢玻璃微球,既向乳化基质中提供了热点,增大了乳胶基质的燃烧面积,同时氢气又是含能材料,参与炸药的爆轰反应,为乳化炸药的燃烧转爆轰过程提供能量,使乳化炸药爆轰反应更加充分。这也是贮氢玻璃微球型乳化炸药爆轰性能高于普通乳化炸药的主要原因。

3.3 猛度测试结果

为了准确地估计猛度,采用如下公式表示^[18]:

$$\alpha = \frac{\Delta h}{(h_0 - \Delta h)} = \frac{\Delta h}{h_k} \quad (8)$$

式中, Δh 为铅柱的压缩量, mm; h_0 为压缩前铅柱体的高度, mm; h_k 为压缩后铅柱体的高度, mm。其中函数 α 考虑了铅柱体阻力随压缩程度的增加而增加的因素。

对 1[#]、2[#]、3[#]、4[#] 样品进行猛度、爆数测试,表 4 列出了四种乳化炸药的铅柱压缩量、爆速值、密度和 α 值,铅柱压缩前后的对比图如图 4 所示。由表 4 可知贮氢玻璃微球敏化乳化炸药的猛度与爆速均高于普通乳化炸药,其中贮氢乳化炸药(2[#])较普通乳化炸药(1[#])的压缩量提高了 3.03 mm、爆数值提高了 197 m·s⁻¹、 α 值提高了 23.03%。用爆轰产物作用在与传播方向垂直的单位面积冲量(比冲量)来代表炸药的猛度。

理论计算表明,爆轰产物作用在壁上(铅柱上表面)的压力 p 为^[19]:

$$p = \frac{16\rho_0}{27D} \left(\frac{l}{t}\right)^3 \quad (9)$$

由此,作用在铅柱上的比冲量为^[19]:

$$I = \int p dt = \int_{\frac{l}{D}}^{\infty} \frac{16\rho_0}{27D} \left(\frac{l}{t}\right)^3 dt = \frac{8}{27} l \rho_0 D \quad (10)$$

式中, l 为爆轰波传播的距离, m; D 为炸药的爆速, m·s⁻¹; t 为作用时间, s。根据公式(10)计算得到 1[#]、2[#]、3[#]、4[#] 炸药的比冲量分别为 539.75, 562.51, 564.51, 548.12 Pa·s, 贮氢乳化炸药的比冲量均要高于普通乳化炸药的比冲量,这与水下爆炸测试得到的比冲量数据趋势相符合。

表 4 四种乳化炸药的爆炸性能参数

Table 4 Explosion performance parameters of four kinds of emulsion explosives

| explosive | density /g·cm ⁻³ | brisance /mm | velocity /m·s ⁻¹ | α |
|----------------|-----------------------------|--------------|-----------------------------|----------|
| 1 [#] | 1.20 | 15.25 | 4576 | 0.356 |
| 2 [#] | 1.19 | 18.28 | 4769 | 0.438 |
| 3 [#] | 1.16 | 18.16 | 4788 | 0.434 |
| 4 [#] | 1.14 | 17.75 | 4649 | 0.434 |

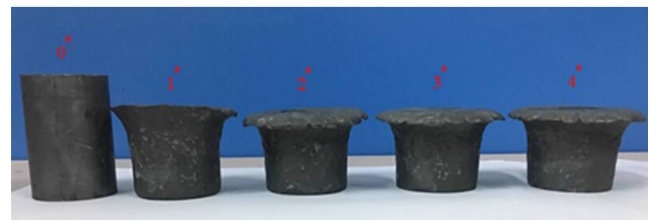


图 4 铅柱压缩前后对比图

Fig. 4 Contrast picture of lead cylinder before and after compression

4 结论

(1) 通过高压贮氢技术制得贮氢玻璃微球,该类型的玻璃微球的质量贮氢效率为 5%,其在乳化炸药中起到了敏化剂和含能材料的双重作用,从而改善了乳化炸药的爆轰性能。

(2) 贮氢玻璃微球对乳化炸药的爆炸性能影响显著,与普通玻璃微球乳化炸药相比,贮氢玻璃微球敏化的乳化炸药(贮氢玻璃微球的含量为 4%)的比冲量 I 、冲击波能 E_s 、气泡能 E_b 、总能量 E 分别提高了 12.44%, 12.44%, 11.11%, 12.67%。且随着贮氢玻璃微球的含量的上升,贮氢型乳化炸药的水下爆炸能量输出参数呈现递减的趋势。

(3) 贮氢玻璃微球含量为 4% 的乳化炸药较普通乳化炸药的爆速与猛度均有提升,其中猛度(铅柱压缩量)提高了 3.03 mm、爆速提升了 4.63%。

参考文献:

- [1] 汪旭光. 乳化炸药[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993.
WANG Xu-guang. Emulsion explosives[M]. Beijing: Metallurgy industry Press, 1993.
- [2] Valery G, Babak V G, Stébé M J. Highly concentrated emulsions: physicochemical principles of formulation[J]. Journal of dispersion science and technology, 2002, 23(1-3): 1-22.
- [3] 叶志文, 吕春绪, 刘大斌. 新型高能乳化炸药的制备及性能[J]. 火炸药学报, 2011, 34(6): 41-44.
YE Zhi-wen, LÜ Chun-xu, LIU Da-bin. Preparation and properties of new high strength emulsion explosives[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2011, 34(6): 41-44.
- [4] 张现亭, 杜华善, 王作鹏. 高威力乳化炸药研究[J]. 煤矿爆破, 2005(4): 6-9.
ZHANG Xian-ting, DU Hua-shan, WANG Zuo-peng. A study on high power emulsion explosive[J]. Coal Mine Blasting, 2005(4): 6-9.
- [5] Jolanta Biegańska. Using nitrocellulose powder in emulsion explosives[J]. Combustion Explosion & Shock Waves, 2011, 47(3): 366-368.
- [6] 钱海, 吴红波, 邢化岛, 等. 铝粉含量和粒径对乳化炸药作功能力的影响[J]. 火炸药学报, 2017, 40(1): 40-44.
QIAN Hai, WU Hong-bo, XING Hua-dao, et al. Effect of aluminum content and particle size on the power of emulsion explosives[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2017, 40(1): 40-44.
- [7] 龚悦, 何杰, 汪旭光, 等. 钛粉对乳化炸药爆轰性能和热分解特性的影响[J]. 含能材料, 2017, 25(4): 304-308.
GONG Yue, HE Jie, WANG Xu-guang, et al. Influence of titanium powder on detonation performances and thermal decomposition characteristics of emulsion explosive[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2017, 25(4): 304-308.
- [8] Ya F Cheng, H H Ma, Zh W Shen. Detonation characteristics of emulsion explosives sensitized by MgH_2 [J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2013, 49(5): 614-619.
- [9] Yangfan Cheng, Honghao Ma, Rong Liu, et al. Explosion power and pressure desensitization resisting property of emulsion explosives sensitized by MgH_2 [J]. Journal of Energetic Materials, 2014, 32(3): 207-218.
- [10] Yangfan Cheng, Honghao Ma, Rong Liu, et al. Pressure desensitization influential factors and mechanism of magnesium hydride sensitized emulsion explosives[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2014, 39(2): 267-274.
- [11] 张占文, 唐永建, 王朝阳, 等. 空心玻璃微球高压贮氢技术[J]. 化工学报, 2006, 57(7): 1677-1681.
ZHANG Zhan-wen, TANG Yong-jian, WANG Chao-yang, et al. High pressure hydrogen storage in hollow glass microspheres [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2006, 57(7): 1677-1681.
- [12] 程扬帆, 马宏昊, 沈兆武. 氯化镁储氢型乳化炸药的爆炸特性研究[J]. 高压物理学报, 2012, 27(1): 45-50.
CHENG Yang-fan, MA Hong-hao, SHEN Zhao-wu. Detonation characteristics of emulsion explosives sensitized by MgH_2 [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2012, 27(1): 45-50.
- [13] 周俊祥, 于国辉, 李澎, 等. RDX/Al 含铝炸药水下爆炸实验研究[J]. 爆破, 2005, 22(2): 4-6.
ZHOU Jun-xiang, YU Guo-hui, LI Peng, et al. Experiment study of the aluminized explosives RDX/Al explosion Under water[J]. Blasting, 2005, 22(2): 4-6.
- [14] Bjarnholt G, Holmberg R. Explosives expansion works in underwater detonations[C]//Proceedings of 6th Symposium (international) on Detonation. San Diego, 1976: 54-550.
- [15] 程扬帆, 汪泉, 龚悦, 等. 敏化方式对 MgH_2 型贮氢乳化炸药爆轰性能的影响[J]. 含能材料, 2017, 25(2): 167-172.
CHEN Yang-fan, WANG Quan, GONG Yue, et al. Effect of sensitizing methods on the detonation performances of MgH_2 based storage emulsion explosives[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2017, 25(2): 167-172.
- [16] Zhou-Ping Duan, Li-Jing Wen, Yan Liu, et al. A pore collapse model for hot-spot ignition in shocked multi-component explosives[J]. International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation, 2010, 11(Supplement): 19-24.
- [17] Medvedev A E, Fomin V M, Reshetnyak A Y. Mechanism of detonation of emulsion explosives with microballoons[J]. Shock Waves, 2008, 18(2): 107-115.
- [18] Л П Орлов. 爆炸物理学上册[M]. 孙承伟, 译. 北京: 科学出版社, 2011.
Л П ОРЛОВ. Explosion physics[M]. SUN Cheng-wei translated. Beijing: Science Press, 2011.
- [19] 张宝铎, 张庆明, 黄风雷. 爆轰物理学[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2001.

Detonation Performance of Emulsion Explosives Sensitized by Hydrogen Storage Glass Microspheres

WANG Bo¹, MA Hong-hao^{1,2}, SHEN Zhao-wu¹, YANG Ming¹, CHEN Hai-jun¹, WANG Yi-xin¹

(1. CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China; 2. State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: To improve the explosion power of traditional emulsion explosives, a kind of emulsion explosive sensitized by hydrogen storage glass microspheres was developed. The detonation performances of emulsion explosives with different contents of hydrogen storage glass microspheres were studied by underwater explosion test and brisance test. The specific impulse of explosive brisance was obtained by theoretical calculation. Results show that compared with emulsion explosives with ordinary glass microspheres, the shock wave overpressure peak, shock wave specific energy, bubble specific energy, total energy of the emulsion explosives with 4% hydrogen storage glass microspheres increase by 14.25%, 14.22%, 11.11% and 12.67%, respectively, and its brisance (lead cylinder compression value) increases by 3.03 mm. The shock wave parameters of explosive decrease gradually with increasing the content of hydrogen storage microspheres. The hydrogen storage glass microspheres play a dual role of sensitizer and energetic material in the emulsion explosive. Therefore, a significant increase in the work capacity and brisance of the emulsion explosives sensitized by hydrogen storage glass microspheres is obtained.

Key words: emulsion explosives; hydrogen storage glass microspheres; sensitization; detonation performances; hot-spot**CLC number:** TJ55; O389**Document code:** A**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2018.05.011