

文章编号: 1006-9941(2017)02-0167-06

敏化方式对 MgH₂ 型储氢乳化炸药爆轰性能的影响

程扬帆^{1,2}, 汪泉^{1,2}, 龚悦¹, 沈兆武², 汤有富¹, 袁和平¹, 钱海¹

(1. 安徽理工大学化学工程学院, 安徽淮南 232001; 2. 中国科学技术大学工程科学学院, 安徽合肥 621900)

摘要: 为了研究敏化方式对 MgH₂ 型储氢乳化炸药爆轰性能的影响,进行了两种储氢乳化炸药的水下爆炸和猛度测试实验。借助实验数据和理论分析,研究了 MgH₂ 型储氢乳化炸药作功能力与猛度之间的关系,并对用比冲量表示炸药猛度的理论进行了修正。结果表明,在物理敏化和化学敏化的 MgH₂ 型储氢乳化炸药中, MgH₂ 粉末分别起到含能添加剂和化学发泡剂的作用。与化学敏化相比,物理敏化的 MgH₂ 型储氢乳化炸药比冲击波能、比气泡能和总能量分别下降了 11.98%、5.38% 和 8.66%,但其猛度(铅柱压缩量)却提高了 5.15 mm,说明敏化方式对 MgH₂ 型储氢乳化炸药的作功能力和猛度具有显著影响。

关键词: 乳化炸药; 储氢材料; 敏化; 水下爆炸; 爆轰性能

中图分类号: TJ55; O381

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.02.013

1 引言

乳化炸药是一种油包水型含水工业炸药,具有安全、防水、环保和稳定性好等优点,因而在工程爆破领域得到了广泛应用^[1]。然而,传统乳化炸药也存在着爆炸威力低^[2-4]和压力减敏问题^[5-6],严重影响了爆破效果和施工安全。为了改善乳化炸药的性能,本课题组研制出了 MgH₂ 型储氢乳化炸药^[7],并取得了一系列的研究成果^[8-14],受到国内外炸药领域专家学者的广泛关注。

乳化炸药的主要成分是乳化基质和敏化剂,乳化基质自身没有雷管感度,它必须通过敏化剂敏化后才能被起爆。按敏化剂的类型,可将乳化炸药的敏化方式分为物理敏化和化学敏化。敏化方式对乳化炸药的性能有很大影响。Loureiro 等^[15]研究了不同敏化剂对铜-铝板爆炸焊接效果的影响;吴红波等^[16]研究了不同敏化方式下乳化炸药的耐低温性能;宋锦泉等^[17]研究了敏化方式对乳化炸药爆速的影响;Nie

等^[18]研究了气泡敏化和玻璃微球敏化乳化炸药的动压减敏特性;刘磊等^[19]研究了不同敏化材料的乳化炸药抗深水静压的性能。在 MgH₂ 型储氢乳化炸药的配方设计和优化过程中发现,敏化方式对其爆轰性能具有显著的影响,并且传统猛度理论不能合理地解释储氢乳化炸药的实验结果,因此有必要对其机理进行深入研究。

本研究拟通过水下爆炸和猛度测试等实验,深入研究敏化方式对 MgH₂ 型储氢乳化炸药爆轰性能的影响,并通过理论计算和分析,探讨储氢乳化炸药的作功能力和猛度之间的关系。

2 乳化炸药样品的制备

2.1 原材料

本实验所用的玻璃微球平均粒径为 55 μm,堆积密度为 0.25 g·cm⁻³,美国 3M 公司; MgH₂ 的平均粒径为 20 μm,堆积密度为 1.45 g·cm⁻³,纯度为 98%,美国 Alfa Aesar 公司;乳化基质的密度为 1.42 g·cm⁻³,配方见表 1。

表 1 乳化基质的配方

Table 1 Composition of emulsion matrix

component	NH ₄ NO ₃	NaNO ₃	C ₁₈ H ₃₈	C ₁₂ H ₂₆	C ₂₄ H ₄₄ O ₆	H ₂ O
mass ratio/%	78	7	4	1	2	8

MgH₂ 属于离子型氢化物,其初始分解温度为

收稿日期: 2016-07-25; 修回日期: 2016-08-27

基金项目: 国家自然科学基金资助(11602001; 51374189; 11502001); 安徽省高校自然科学研究重点项目资助(KJ2015A074); 安徽省自然科学基金青年项目资助(1608085QA15)

作者简介: 程扬帆(1987-),男,博士讲师,主要从事含能材料的起爆和爆轰研究。e-mail: cyf518@mail.ustc.edu.cn

通信联系人: 汪泉(1980-),男,博士副教授,主要从事可燃气体粉尘相关的研究。e-mail: quanwang@aust.edu.cn

300 °C, 遇水会发生水解反应生成氢气。利用溶胶-凝胶法可将 MgH_2 粉末用石蜡包覆起来, 包覆效果如图 1 所示。从图 1 可以清晰地看到, MgH_2 颗粒的表面有一层石蜡膜, 由于石蜡的主要成份是烷烃, 因而可以起到很好的防水作用, 抑制 MgH_2 的水解反应。制备 MgH_2 的原材料 Mg 和 H_2 价格便宜, 在储氢型乳化炸药中 MgH_2 的含量不超过 2%, 因此, 只要解决 MgH_2 的生产工艺问题, 就能够有效地降低炸药成本。前期的实验结果表明^[20], MgH_2 与乳化基质的相容性和储存稳定性符合要求。

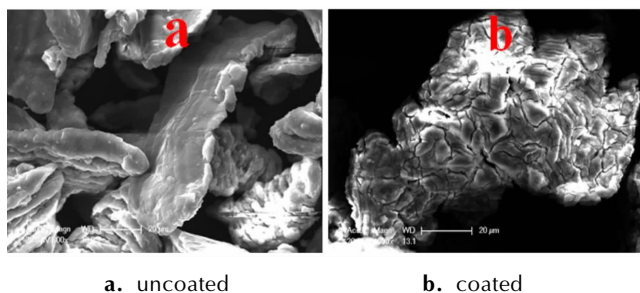


图 1 MgH_2 粉末被石蜡包覆前后的 SEM 图

Fig. 1 SEM pictures of uncoated and coated MgH_2 with paraffin

2.2 敏化炸药

化学敏化的 MgH_2 型储氢乳化炸药: 当未包覆的 MgH_2 粉末加入到乳化基质后, 会和乳化基质中的水发生化学反应生成氢气泡, 从而在乳化基质中引入敏化气泡, 使其具有雷管感度。未包覆 MgH_2 粉末的功能是含能发泡剂。

物理敏化的 MgH_2 型储氢乳化炸药: 将包覆后的 MgH_2 粉末与玻璃微球混合后, 加入到乳化基质中制成乳化炸药, 玻璃微球的功能是在乳化基质中直接引入敏化气泡, 而包覆后的 MgH_2 粉末主要起到含能添加剂的作用。

为了更好地体现不同敏化方式下 MgH_2 型储氢乳化炸药的爆轰性能, 实验将其与传统玻璃微球型乳化炸药进行了比较, 炸药配方如表 2 所示。

表 2 不同乳化炸药的配方设计

emulsion explosives	%			
	emulsion matrix	glass microspheres	uncoated MgH_2	coated MgH_2
MgH_2 chemical sensitization	98	0	2	0
MgH_2 physical sensitization	96	2	0	2
glass microspheres sensitization	98	2	0	0

3 水下爆炸实验

3.1 实验仪器与测试方法

水下爆炸法是目前用来测试炸药作功能力最常用的方法之一, 具有实验结果重复性好、可靠性高和实验成本低等优点。当在有限水域进行水下爆炸实验时, 应设法减小边界条件对实验结果的影响, 当炸药样品的质量小于 350 g 时, 将其置于水下 2 m 处, 就可以满足对冲击波和气泡脉动的测试要求^[13]。本次实验在水下爆炸塔中进行, 塔高 H 为 5 m, 直径 D 为 5 m, 乳化炸药样品与传感器的距离 R 为 0.7 m, 位于水下距离 h 为 2.5 m, 实验测试系统如图 2 所示。主要测试装置包括: PCB (ICP W138A25 型) 水下爆炸压力传感器、482A22 型恒流源、Agilent 5000A 数字存储示波器。水下爆炸实验中炸药样品质量为 30 g 球形药包, 每种配方至少做 3 发平行实验。

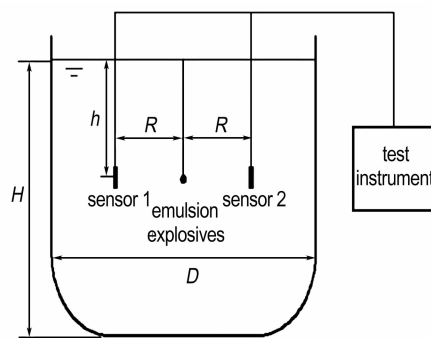


图 2 水下爆炸测试系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of underwater explosion testing system

3.2 冲击波参数的计算

在水下爆炸实验中, 通常用冲击波比冲量、比冲击波能、比气泡能和总能量等爆轰参数来全面表征炸药的作功能力^[14]。

3.2.1 冲击波比冲量

冲击波比冲量是冲击波压力时程曲线对时间的积分^[13], 即:

$$i(t) = \int_0^{\theta} p(t) dt \quad (1)$$

式中, $i(t)$ 为冲击波比冲量, $Pa \cdot s$; $p(t)$ 为冲击波压力随时间变化曲线; θ 为冲击波衰减时间, 一般取冲击波压力从峰值压力 p_m 降低到 p_m/e 所需的时间, μs 。

3.2.2 比冲击波能

根据水下爆炸相似率, 可得到比冲击波能的计算

公式^[8]：

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

式中, E_s 是比冲击波能, $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$; R 是传感器到乳化炸药样品的距离, m ; W 是炸药的质量, kg ; ρ_w 是水的密度, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$; C_w 是水中声速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; θ 为冲击波衰减时间, μs ; $p(t)$ 为冲击波压力随时间变化曲线。

3.2.3 比气泡能

比气泡能可用下式近似计算^[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 是第一次气泡脉动周期, s ; C 是边界效应校正系数, $-0.4464, \text{s}^{-1}$; W 是炸药的质量, kg ; ρ_w 是水的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; ρ_h 是测点处的静水压, Pa 。

3.2.4 总能量

炸药水下爆炸总能量的计算公式^[13]为：

$$E = K_f(\mu E_s + E_b) \quad (5)$$

$$\mu = 1 + 1.3328 \times 10^{-1} p_{C1} - 6.5775 \times 10^{-3} p_{C1}^2 + 1.2594 \times 10^{-4} p_{C1}^3 \quad (6)$$

$$p_{C1} = \frac{1}{4} \rho_0 D^2 \quad (7)$$

式中, E 是总能量, $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$; K_f 为炸药的形状系数, 球形药包取 1.00; μ 为冲击波传播损失系数; p_{C1} 为炸药爆轰 C-1 压力, GPa ; ρ_0 为乳化炸药的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; D 是乳化炸药的爆速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

表 3 三种乳化炸药水下爆炸冲击波参数

Table 3 Shock wave parameters of the underwater explosion of three kinds of emulsion explosives

parameters of shock waves	p_k/MPa	$\theta/\mu\text{s}$	$i/\text{Pa} \cdot \text{s}$	t_b/ms	$E_s/\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	$E_b/\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	$E/\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
glass microspheres sensitization	13.63	36.64	694.97	67.20	0.635	1.687	2.712
	13.27	40.84	687.92	68.60	0.597	1.624	2.588
	13.56	37.32	712.73	73.40	0.608	1.659	2.641
average values	13.48	38.27	698.54	69.73	0.613	1.661	2.647
standard deviation	0.156	1.840	10.438	2.655	0.016	0.026	0.051
MgH ₂ chemical sensitization	14.63	37.16	729.78	75.80	0.732	2.118	3.356
	14.74	36.18	761.57	75.50	0.776	2.116	3.429
	14.76	38.04	743.45	76.90	0.745	2.241	3.501
	average values	14.71	37.13	744.93	76.07	0.751	2.158
standard deviation	0.057	0.760	13.021	0.602	0.018	0.058	0.059
MgH ₂ physical sensitization	12.67	44.05	805.60	72.20	0.643	1.968	3.028
	12.93	45.40	797.75	74.80	0.673	2.132	3.242
	12.86	47.57	810.11	72.70	0.668	2.025	3.127
	average values	12.82	45.67	804.49	73.23	0.661	2.042
standard deviation	0.110	1.449	5.1070	1.126	0.013	0.068	0.087

Note: p_k is the shock wave peak pressure, θ is the shock wave attenuation time, i is the shock wave impulse, E_s is the specific shock wave energy, E_b is the specific bubble energy, and E is the shock wave total energy.

3.3 实验结果与分析

将不同敏化方式的 MgH₂ 型储氢乳化炸药与玻璃微球型乳化炸药进行水下爆炸对比实验, 压力时程曲线如图 3 所示。实验结果取三次有效实验数据取平均值, 并计算其标准方差, 计算结果见表 3。

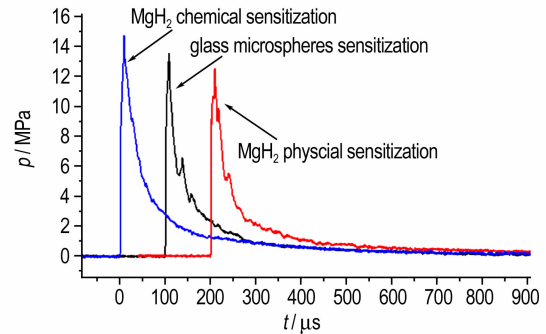


图 3 三种乳化炸药水下爆炸压力时程曲线

Fig. 3 Pressure-time curves of the underwater explosion of three kinds of emulsion explosives

由图 3 和表 3 可知, 与玻璃微球型乳化炸药相比, 化学敏化的 MgH₂ 型储氢乳化炸药的冲击波峰值压力 p_k 提高了 9.12%, 而物理敏化的 MgH₂ 型储氢乳化炸药的峰值压力 p_k 却降低了 4.90%; 对于冲击波比冲量 i , 化学敏化的 MgH₂ 型储氢乳化炸药较玻璃微球型乳化炸药提高了 6.64%, 而物理敏化的 MgH₂ 型储氢乳化炸药提高了 15.17%。

分析认为, 未包覆的 MgH₂ 加入到乳化炸药后, 其主要功能是产生敏化氢气泡, 与玻璃微球敏化的区别

主要在于敏化气泡所含的气体成分不同,玻璃微球中含有 N_2 ,在爆轰过程中主要起到“热点”的作用,而敏化氢气泡在爆轰过程中不仅起到热点的作用,而且氢气还参与爆轰反应,从而使其峰值压力显著提高。从物理敏化储氢乳化炸药峰值压力 p_k 的变化规律来看, MgH_2 粉末(包覆后)在炸药爆轰过程中主要参与 C-J 面之后的燃烧反应,在 C-J 面之前 MgH_2 粉末在高温高压作用下会发生分解并消耗一部分能量,从而使冲击波的峰值压力降低,但是随后分解产物的燃烧反应可以为冲击波提高后续能量,延缓冲击波的衰减,表 3 中物理敏化的 MgH_2 型储氢乳化炸药冲击波衰减时间也证明了这一点,包覆后的 MgH_2 粉末在乳化炸药中起到了含能添加剂的作用。

在能量方面,与玻璃微球型乳化炸药相比,化学敏化的 MgH_2 型储氢乳化炸药的比冲击波能 E_s 、比气泡能 E_b 和总能量 E 分别提高了 16.64%、29.92% 和 29.54%,而物理敏化的 MgH_2 型储氢乳化炸药的比冲击波能 E_s 、比气泡能 E_b 和总能量 E 分别提高了 7.83%、22.94% 和 18.32%。

前期研究表明,传统的玻璃微球型乳化炸药爆轰不完全,而 MgH_2 能够提高乳化炸药爆轰反应程度^[8],使其能量能够充分释放出来。与玻璃微球型乳化炸药相比,无论添加包覆或未包覆的 MgH_2 粉末,都可以提高乳化炸药的输出能量,其中比气泡能增加尤为显著。对比两种敏化方式的储氢炸药可以发现,化学敏化的 MgH_2 型储氢乳化炸药的比冲击波能、比气泡能和总能量均高于物理敏化的 MgH_2 型储氢乳化炸药,说明化学敏化的 MgH_2 型储氢乳化炸药的作功能力更强。

4 猛度与爆速实验

猛度和爆速是判断炸药威力的重要参数,实验在卧式爆炸仓中进行。炸药猛度测量采用最常用的铅柱压缩实验,用铅柱压缩量的大小来表征炸药的猛度,未压缩铅柱的高度为 60 mm,乳化炸药样品质量为 50 g,实验装置见图 4;炸药的爆速采用离子探针法测量,乳化炸药采用 PVC 管装药,PVC 管的直径和长度分别为 40 mm 和 350 mm,起始探针距离 PVC 端口 80 mm,探针的间距为 50 mm,使用 2BS-110 爆速仪测速,如图 5 所示。乳化炸药猛度和爆速的测试方法参考国标 GB 18095-2000。

三种乳化炸药铅柱压缩前后对比实验结果如图 6 所示,从图 6 可以看出,两种敏化方式的 MgH_2 型储氢乳化炸药的猛度都高于玻璃微球型乳化炸药,其中物

理敏化的 MgH_2 型储氢乳化炸药尤为明显。三种乳化炸药铅柱压缩量和爆速的具体实验结果见表 4,由表 4 可知,物理敏化储氢乳化炸药的猛度高出化学敏化储氢乳化炸药 5 mm 左右的铅柱压缩量,但是其爆速却要小 $260 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。



图 4 乳化炸药猛度测试实验

Fig. 4 Brisance testing experiments of emulsion explosives



图 5 乳化炸药爆速测量实验

Fig. 5 Detonation velocity experiments of emulsion explosives



图 6 不同配方的乳化炸药铅柱压缩实验结果对比

Fig. 6 Experimental results of lead block compression of different formulation emulsion explosives

表 4 三种乳化炸药爆轰性能参数

Table 4 Detonation parameters of three kinds of emulsion explosives

emulsion explosive	density / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	brisance /mm	detonation velocity / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
glass microspheres sensitization	1.24	16.10	4534
MgH_2 chemical sensitization	1.25	19.15	4950
MgH_2 physical sensitization	1.28	24.30	4689

5 分析与讨论

水下爆炸和猛度实验结果表明,与化学敏化的

MgH₂型储氢乳化炸药相比,物理敏化的 MgH₂型储氢乳化炸药作功能力减弱,但其猛度却显著提高,说明乳化炸药的作功能力与猛度大小不一定存在正相关关系。猛度是决定炸药局部破坏的能力,而作功能力是决定炸药总体破坏的能力。目前认为炸药爆炸的直接作用主要取决于爆轰产物的压力和作用时间,即爆轰产物作用于目标的压力和冲量。在不同情况下,压力和冲量所起的作用是不同的,可以用它们来表示炸药的猛度^[21]。

用爆轰产物的压力表示炸药猛度的理论认为,炸药的局部破坏作用是由于爆轰产物对目标物直接而强烈作用的结果,爆轰产物的压力越大,其破坏能力也越强,对凝聚相炸药的猛度可用下式表示^[21]:

$$p_{Cl} = \frac{1}{4} \rho_0 D^2 \quad (8)$$

式中, p_{Cl} 是炸药爆轰结束瞬间产物的压力, GPa; ρ_0 是炸药的装药密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; D 是炸药的爆速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

若按照公式(8)计算,可得到物理敏化和化学敏化的储氢乳化炸药爆轰结束瞬间产物压力 p 分别为 7.04 GPa 和 7.66 GPa,而实际情况则是物理敏化储氢乳化炸药的猛度远高于化学敏化储氢乳化炸药(见表4),因此该理论不适于解释储氢乳化炸药高猛度的机理。

用作用于接触面上的比冲量表示炸药猛度的理论认为,炸药的爆轰在瞬间完成,可用爆轰产物作用在与传播方向垂直面上的比冲量表示炸药的猛度^[21]:

$$I = \int p S d\tau \quad (9)$$

$$i = \frac{I}{S} = \int p d\tau \quad (10)$$

式中, I 为作用于接触面上的冲量, $\text{N} \cdot \text{s}$; p 为作用于接触面上的压力, Pa; S 接触面的面积, m^2 ; τ 为作用于接触面的时间, μs ; i 为作用于接触面上的比冲量, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

该理论认为炸药的猛度与比冲量的大小成正相关关系。从水下爆炸冲击波参数计算结果(见表3)可知,乳化炸药冲击波比冲量与猛度之间关系符合这一理论,即乳化炸药的比冲量越大,其猛度值也越高。但是,笔者认为该理论也存在一定的不足,不能单纯的从比冲量大小来衡量猛度的大小。以铅柱压缩为例,随着铅柱压缩量 Δh 的增加,铅柱变形的阻力迅速增大,而爆轰产物的压力 p 在不断减小,当 p 减小到与铅柱的变形阻力相等时,铅柱压缩量将不再增加,后续爆轰产物的比冲量对提高炸药猛度没有贡献,因而比冲量

的计算时间不应当是从爆轰开始到结束的时间。

我们将爆轰产物压力等于目标物的变形阻力这一临界压力值定义为 p_c ,爆轰结束瞬间爆轰产物的峰值压力记为 p_k ,用有效比冲量表征炸药猛度理论修正公式应为:

$$i' = \int_0^{\theta'} p d\tau \quad (11)$$

式中, i' 为作用于接触面上的有效比冲量, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; θ' 为爆轰产物压力从 p_k 衰减到 p_c 的时间, μs ; τ 为作用于接触面的时间, μs 。

修正后的有效比冲量表征炸药猛度的公式(11),其比冲量是采用铅柱压缩过程中爆轰压力与时间的积分,排除了铅柱不能继续压缩后爆轰产物的比冲量,因而更加接近实际情况。由表3可知,虽然物理敏化的 MgH₂型储氢乳化炸药冲击波峰值压力小于化学敏化的 MgH₂型储氢乳化炸药,但其冲击波衰减时间却明显大于后者,因而其猛度更高,结合冲击波的比冲量大小,该修正公式能够较好地解释两种储氢乳化炸药出现的猛度现象。

6 结 论

(1)敏化方式对 MgH₂型储氢乳化炸药的有显著影响,与化学敏化方式相比,物理敏化的 MgH₂型储氢乳化炸药比冲击波能、比气泡能和冲击波总能量分别下降了 11.98%、5.38% 和 8.66%,但其铅柱压缩量却提高了 5.15 mm,其猛度显著增强。

(2)对比两种敏化方式的 MgH₂型储氢乳化炸药爆轰性能发现,乳化炸药作功能力的强弱与猛度大小不存在必然的正相关关系,作功能力强的乳化炸药猛度不一定大。

(3)利用爆轰产物作用于目标的有效比冲量大小能够较好地解释两种储氢乳化炸药猛度的规律,其理论计算的积分区间应选择爆轰产物压力从峰值压力 p_k 衰减到临界压力 p_c 的时间。

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: Metallurgical Industry Press, 1993.
- [2] 叶志文, 吕春绪. 高能乳化炸药的制备及性质[J]. 火炸药学报, 2006, 29(6): 6-15.
YE Zhi-wen, LÜ Chun-xu. Preparation and properties of high energy emulsion explosive[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2006, 29(6): 6-15.
- [3] Jolanta Bieganińska. Using nitrocellulose powder in emulsion explosives[J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2011,

- 47(3): 366–368.
- [4] 梅震华, 钱华, 刘大斌, 等. 军民两用乳化炸药的制备[J]. 火炸药学报, 2012, 35(1): 32–34.
MEI Zhen-hua, QIAN Hua, LIU Da-bin, et al. Preparation of emulsion explosive for military-civil[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2012, 35(1): 32–34.
- [5] 陈东梁, 孙金华, 颜事龙, 等. 动压下组分结构变化与乳化炸药减敏关系研究[J]. 含能材料, 2006, 14(4): 302–305.
CHEN Dong-liang, SUN Jin-hua, YAN Shi-long, et al. Relationship between structure changes and desensitization of emulsion explosives under dynamic pressure[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2006, 14(4): 302–305.
- [6] Matsuzawa T, Murakami M. Detonability of emulsion explosives under dynamic pressure[J]. *Journal of the Industrial Explosives Society(Japan)*, 1982, 43(5): 317–322.
- [7] 马宏昊, 程扬帆, 沈兆武, 等. 氢化镁型储氢乳化炸药[P]. CN102432407A.
Honghao Ma, Yangfan Cheng, Zhaowu Shen, et al. Magnesium hydride type hydrogen-stored emulsion explosive [P]. Patent number: CN102432407A.
- [8] Yangfan Cheng, Honghao Ma, Zhaowu 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, Zhaowu Shen. Explosion power and pressure desensitization resisting property of emulsion explosives sensitized by MgH_2 [J]. *Journal of Energetic Materials*, 2014, 32: 207–218.
- [10] Yangfan Cheng, Honghao Ma, Zhaowu Shen. Pressure desensitization influential factors and mechanism of magnesium hydride sensitized emulsion explosives[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2014, 39, 267–274.
- [11] Yangfan Cheng, Honghao Ma, Zhaowu Shen. A new type of functional chemical sensitizer MgH_2 for improving anti-pressure ability of emulsion explosives[J]. *Shock Waves*, 2016, 26(2): 213–219.
- [12] 程扬帆, 马宏昊, 沈兆武. MgH_2 对乳化炸药压力减敏影响的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2014, 34(4): 427–432.
CHENG Yang-fan, MA Hong-hao, SHEN Zhao-wu. Experimental research on the pressure desensitization of emulsion explosives sensitized by MgH_2 [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2014, 34(4): 427–432.
- [13] 程扬帆, 马宏昊, 沈兆武. 新型敏化载体对乳化炸药爆炸威力及减敏性影响[J]. 煤炭学报, 2014, 39(7): 1309–1314.
CHENG Yang-fan, MA Hong-hao, SHEN Zhao-wu. Effects of new type of chemical bubbles carriers on emulsion explosive's property [J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(7): 1309–1314.
- [14] 程扬帆, 马宏昊, 沈兆武. 储氢材料在乳化炸药中的应用研究[J]. 含能材料, 2013, 21(2): 268–272.
CHENG Yang-fan, MA Hong-hao, SHEN Zhao-wu. Research on hydrogen storage materials applied in emulsion explosives [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2013, 21(2): 268–272.
- [15] Loureiro A, Mendes R, Ribeiro J B. Effect of explosive mixture on quality of explosive welds of copper to aluminum[J]. *Materials and Design*, 2016, (95): 256–267.
- [16] 吴红波, 申夏夏, 王道阳, 等. 敏化方式对乳化炸药耐低温性能的影响[J]. 火炸药学报, 2014, 37(6): 58–61.
WU Hong-bo, SHEN Xia-xia, WANG Dao-yang, et al. Effects of sensitizing methods on low temperature resistance of emulsion explosive[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2014, 37(6): 58–61.
- [17] 宋锦泉, 汪旭光, 刘涛. 敏化方式对乳化炸药爆速的影响[J]. 有色金属, 2000, 52(4): 4–8.
SONG Jin-quan, WANG Xu-guang, LIU tao. Influence of sensitive methods on detonation velocity of emulsion explosives [J]. *Nonferrous Metals*, 2000, 52(4): 4–8.
- [18] Nie S. Pressure desensitization of a gassed emulsion explosive in comparison with micro-balloon sensitized emulsion explosives [C] // In: Proceedings of Thirteen Annual Symposium on explosives and Blasting Research, Las Vegas, Nevada, USA, 1997, 2–5.
- [19] 刘磊, 汪旭光, 杨溢, 等. 不同敏化材料的乳化炸药抗深水压力性能的实验研究[J]. 爆破, 2010, 27(2): 10–13.
LIU Lei, WANG Xu-guan, YANG Yi, et al. Experimental study on compression resistance characteristic of emulsion explosives with different sensitizer in deep water [J]. *Blasting*, 2010, 27(2): 10–13.
- [20] 程扬帆, 颜事龙, 马宏昊, 等. 溶胶-凝胶法包覆储氢材料 MgH_2 的性能研究[J]. 火炸药学报, 2015, 38(4): 67–70.
CHENG Yang-fan, YAN Shi-long, MA Hong-hao, et al. Study on the properties of hydrogen storage material MgH_2 coated by sol-gel method [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2015, 38(4): 67–70.
- [21] 金韶华, 松全才. 炸药理论[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2010.

Effect of Sensitizing Methods on the Detonation Performances of MgH_2 -based Hydrogen Storage Emulsion Explosives

CHENG Yang-fan^{1,2}, WANG Quan^{1,2}, SHEN Zhao-wu², GONG Yue¹, TANG You-fu¹, YUAN He-ping¹, QIAN Hai¹

(1. School of Chemical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: To study the effect of sensitizing methods on the detonation performances of MgH_2 -based hydrogen storage emulsion explosives, the underwater explosion and brisance testing experiments of two kinds of hydrogen storage emulsion explosives were carried out. With the help of experimental data and theoretical analysis, the relationships between the work capability and brisance of MgH_2 -based hydrogen storage emulsion explosives were studied and the theory of using the specific impulse to express the brisance of explosive was adjusted. The results show that in the physical and chemical sensitization of MgH_2 -based hydrogen storage emulsion explosives, MgH_2 powders play the roles of energetic additive and chemical foaming agents, respectively. Compared with the chemical sensitization, the specific shock wave energy, specific bubble energy and total energy of the physical sensitization of MgH_2 -based hydrogen storage emulsion explosives are decreased by 11.98%, 5.38% and 8.66%, respectively, but its brisance (lead block compression value) is increased by 5.15 mm, which means that sensitizing methods have significant impact on the work capability and brisance of MgH_2 -based hydrogen storage emulsion explosives.

Key words: emulsion explosive; hydrogen storage material; sensitization; underwater explosion; detonation performance

CLC number: TJ55; O381

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.02.013