

УДК 534.222.2

ДЕТОНАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭМУЛЬСИОННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ, СЕНСИБИЛИЗИРОВАННЫХ ГИДРИДОМ МАГНИЯ

Я.-Ф. Чэн, Х.-Х. Ма, Чж.-У Шень

Китайский университет науки и технологии, 230026 Хэйфэй, КНР
cyf518@mail.ustc.edu.cn, zwshen@ustc.edu.cn

Приведены результаты предварительного исследования эмульсионных взрывчатых веществ (ВВ), сенсibilизированных гидридом магния MgH_2 , который выполняет также роль энергетического материала. Эмульсионные ВВ, сенсibilизированные стеклянными микробаллонами и гидридом магния, имеют разные механизмы детонации. При подводном взрыве использование гидрида магния значительно увеличивает избыточное давление за фронтом генерируемой ударной волны, удельный импульс, энергию ударной волны и энергию пузыря продуктов взрыва, причем увеличение избыточного давления и энергии ударной волны достигает 17 и 24 % соответственно. При сенсibilизации эмульсионных ВВ гидридом магния значительно увеличиваются скорость их детонации и бризантность. Безопасность подобных ВВ удовлетворяет необходимым требованиям.

Ключевые слова: эмульсионные ВВ, сенсibilизация, материал, аккумулятор водорода, механика взрыва.

ВВЕДЕНИЕ

Основной компонент эмульсионного взрывчатого вещества (ЭмВВ) — эмульсионная матрица типа «вода в масле». Матрица не способна к детонации, пока она не сенсibilизирована физическим или химическим методом и не превращена в эмульсионное ВВ. Введение сенсibilизатора в эмульсионную матрицу приводит к равномерному распределению искусственных пор по объему матрицы. После прохождения ударной волны по ЭмВВ за счет сжатия воздушных пузырьков образуются «горячие точки» и инициируется взрывное горение с переходом в детонацию [1]. Однако при традиционных методах сенсibilизации стеклянными микросферами или газообразующим реагентом добавляемые материалы только увеличивают число «горячих точек» в эмульсионной матрице, без роста детонационной энергии. С другой стороны, работоспособность традиционных ЭмВВ хорошо известна и их бризантность может даже превышать аналогичную величину для ТНТ. Но, как установлено во взрывных экспериментах под водой, пиковое давление, удельный импульс, энергия генерируемой ударной волны и вы-

деление энергии при взрыве традиционных ЭмВВ относительно малы [2]. Поэтому интерес представляет поиск способов повышения энергии детонации ЭмВВ.

Гидрид магния MgH_2 — один из многообещающих энергетических материалов для сенсibilизации эмульсионной матрицы, поскольку может запастись большое количество водорода. За счет гидролиза водородсодержащего вещества выделяется водород, который в виде мельчайших пузырьков равномерно распределяется по объему эмульсии. При окислении водорода выделяется примерно в три раза больше энергии, чем при сгорании углеводородного сырья, в результате взрывная мощность ВВ может увеличиваться. Продуктом реакции водорода с кислородом является вода, не загрязняющая окружающую среду.

В настоящей работе для повышения детонационных характеристик традиционных ЭмВВ в их состав был введен материал, содержащий водород. Механизм детонации ЭмВВ, сенсibilизированных MgH_2 , изучали во взрывных экспериментах под водой. Установлено, что все параметры ЭмВВ, сенсibilизированных гидридом магния: избыточное давление, удельный импульс, энергия ударной волны и энергия пузыря при подводном взрыве — значительно увеличиваются по сравне-

нию с ЭмВВ со стеклянными микросферами. Эти ЭмВВ также соответствуют требованиям безопасности. Гидрид магния в эмульсионной матрице играет роль и сенсibilизатора, и энергетического материала. Авторы не обнаружили в литературе сведений о подобном повышении мощности эмульсионных ВВ.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Обычный способ сенсibilизации ЭмВВ — введение в их состав полых стеклянных микросфер (GM). Ранее мы установили, что энергия взрыва ЭмВВ достигает максимума при добавлении микросфер в количестве 4 % (по массе). Теплота и работоспособность взрыва ЭмВВ увеличиваются также при добавлении порошка алюминия [3]. Для выяснения детонационных возможностей ЭмВВ с добавкой MgH_2 мы сравнили ЭмВВ, сенсibilизированные различными материалами, по энергии, выделяемой при подводном взрыве. Чтобы исключить влияние эмульсионной матрицы, количество эмульсии в каждом образце было одинаковым — 50 г. Состав исследуемых композиций приведен в табл. 1. Плотность чистой матрицы (без сенсibilизатора) равнялась 1.31 г/см^3 . Использовался гидрид магния в виде порошка темно-серого цвета с размером конгломератов $1 \div 3 \text{ мкм}$ при размере отдельных зерен около 10 нм . Насыпная плотность гидрида 1.45 г/см^3 .

При проведении взрывных экспериментов под водой необходимо было исключить влияние граничных условий на измеряемую энергию взрыва исследуемых ВВ. При массе заряда менее 350 г его расположение на глубине 2 м удовлетворяет требованиям правильного измерения параметров ударной волны и пузыря продуктов взрыва [4, 5]. Схема постановки экспериментов под водой приведена на рис. 1. Глубина бассейна с водой $H = 5 \text{ м}$, глубина размещения заряда $h = 2.5 \text{ м}$, расстояние между зарядом и датчиком $R = 1.25 \text{ м}$. Для за-

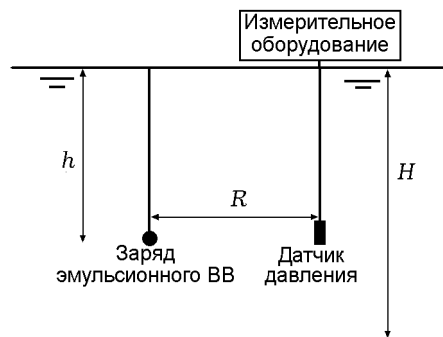


Рис. 1. Схема постановки подводных экспериментов

писи данных использовался цифровой осциллограф Agilent5000A, для преобразования генерируемого заряда в сигнал напряжения — источник постоянного тока типа 482A22. Давление измерялось датчиком РСВ (РСВ Piezotronics Inc., США) типа ICP138A25, точность измерения около 5 %.

Эксперименты проводили со сферическими зарядами диаметром $3.6 \div 4.4 \text{ см}$, массой 50 г. С каждым типом ЭмВВ было выполнено три опыта. На рис. 2 представлены экспериментальные профили давления $p(t)$. Видно, что ЭмВВ, сенсibilизированное гидридом магния, имеет наибольшее значение максимального давления.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Удельный импульс $I(t)$, характеризующий ВВ при подводном взрыве, определяется инте-

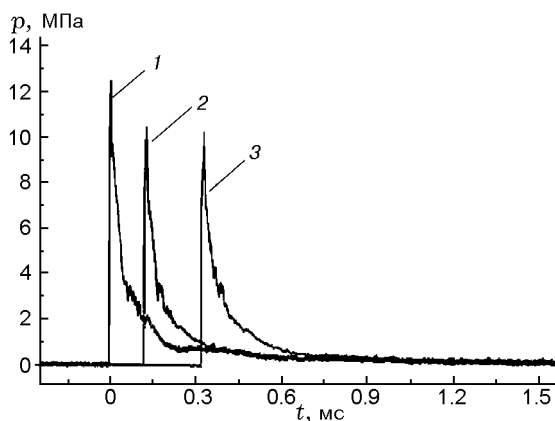


Рис. 2. Зависимость $p(t)$ для ЭмВВ, сенсibilизированных гидридом магния (1), стеклянными микросферами (2), стеклянными микросферами и порошком алюминия (3)

Таблица 1
Состав исследуемых эмульсионных ВВ

Эмульсионная матрица, %	Добавки, %		
	GM	Al	MgH_2
100	4	0	0
	4	4	0
	0	0	2

гравом давления за фронтом ударной волны по времени [6]:

$$I(t) = \int_0^{5\theta} (p(t) - p(0))dt. \quad (1)$$

Здесь $p(t)$ — давление за фронтом ударной волны, $p(0)$ — начальное давление, которым можно пренебречь, так как оно значительно меньше максимального, θ — время затухания ударной волны, в течение которого максимальное давление уменьшается в e раз. В соответствии с законом подобия при подводном взрыве [7] удельная энергия за фронтом ударной волны записывается в виде

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

Здесь W — количество ВВ, ρ — плотность воды, c_w — скорость звука в воде. Удельная энергия пузыря может быть рассчитана по уравнению [7]

$$E_b = \frac{\sqrt{1 + 4Ct_b} - 1}{8C^3 k_1^3}, \quad k_1 = \frac{1.135\rho^{1/2}}{p_h^{5/6}}. \quad (3)$$

Здесь t_b — время первой пульсации, p_h — гидростатическое давление в точке измерения, C — корректирующий коэффициент, определяемый эмпирическим методом. В экспериментах [7] было получено, что $C = -0.4464 \text{ с}^{-1}$ при $R/R_0 = 60$. Для того чтобы использовать это значение C , мы выбрали расстояние между зарядом и датчиком $R = 1.25 \text{ м}$ при радиусе сферического заряда $R_0 = 0.018 \div 0.022 \text{ м}$.

Полная энергия взрывчатого вещества на 1 кг ВВ при подводном взрыве вычислялась по формуле [7]

$$E = K_f(\mu E_s + E_b). \quad (4)$$

Здесь μ — коэффициент затухания ударной волны при ее движении в воде, K_f — фактор заряда ВВ, равный 1.00 для сферического заряда, 0.02 ÷ 1.10 для несферического.

Экспериментальные значения избыточного давления Δp , времени затухания ударной волны θ и рассчитанные по формулам (1)–(4) характеристики подводного взрыва приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры подводного взрыва эмульсионных ВВ

ЭмВВ	Δp , МПа	θ , мкс	I , Па·с	E_s , кДж/кг	E_b , кДж/кг	E , кДж/кг
Матрица + GM	10.89	39.03	619	1 086	941	2 871
Матрица + GM/Al	10.72	47.05	675	1 130	1 186	3 187
Матрица + MgH ₂	13.12	39.88	720	1 303	1 372	3 762

По сравнению с ЭмВВ типа GM, сенсibilизированных стеклянными микросферами, при взрыве ЭмВВ водородного типа (сенсibilизированных гидридом магния) значительно увеличиваются избыточное давление (на 17 %), удельный импульс и полная энергия ударной волны (на 24 %). Добавление алюминия в ЭмВВ типа GM также приводит к улучшению детонационных характеристик до определенного предела, но в меньшей степени, чем добавление гидрида магния: полная энергия ударной волны увеличивается только на 10.0 %, а избыточное давление уменьшается на 1.6 %.

Рис. 3 показывает, что удельная энергия ударной волны в ЭмВВ водородного типа значительно выше, чем в двух других эмульсионных ВВ, и скорость ее роста также выше. Обратим внимание на то, что на начальной стадии скорость увеличения энергии ударной волны в ЭмВВ типа GM/Al меньше, чем в ЭмВВ типа GM, но конечное значение энергии больш-

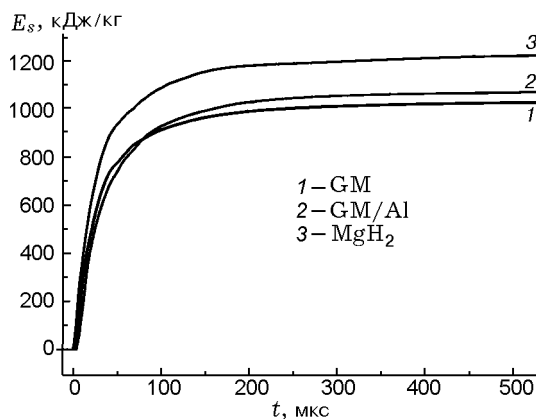


Рис. 3. Зависимость энергии ударной волны от времени различных типов ЭмВВ на расстоянии 1.25 м от точки взрыва

Таблица 3
Состав эмульсионной матрицы

Компонент	Массовый состав, %	Кислородный баланс
NH ₄ NO ₃	75	0.20
NaNO ₃	10	0.47
C ₁₈ H ₃₈	4	-3.46
C ₁₂ H ₂₆	1	-3.48
C ₂₄ H ₄₄ O ₆	2	-2.39
H ₂ O	8	0

ше. Для понимания этого факта необходимо принять во внимание особенности детонации алюминизированных ВВ [8, 9]. Алюминий не участвует в детонационной реакции до плоскости Чепмена — Жуге или участвует, но реакция далека от завершения, и это приводит к разбавлению концентрации реагентов, определяемых кинетикой реакции. Алюминий также поглощает тепло, снижая тем самым энергию в зоне реакции при детонации, что приводит к уменьшению давления детонации и скорости роста энергии ударной волны. Но при последующем сгорании алюминиевого порошка за зоной реакции общая энергия взрыва увеличивается, в результате затухание ударной волны уменьшается.

Из этого анализа следует, что MgH₂ может улучшить детонационные характеристики эмульсионных ВВ: ЭмВВ водородного типа дают значительное повышение избыточного давления и полной энергии ударной волны. Добавление алюминия также может увеличить полную энергию ударной волны, но при этом уменьшается избыточное давление в ней, так как алюминий легко реагирует с кислородом и превращается в твердый оксид Al₂O₃, что значительно снижает эффект от использования алюминия [10].

Предположим, что химическая формула всех составов эмульсионной матрицы имеет вид C_aH_bO_cN_dNa_eMg_fAl_g. В соответствии с данными табл. 3 кислородный баланс эмульсии -0.024. Расчет теплоты взрыва методом [12] с использованием закона Бринкли — Вильсона [11] дает значения 3 297, 3 684 и 3 530 кДж/кг для ЭмВВ типа GM, GM/Al и водородного соответственно.

Как показано в табл. 4, в предположении,

Таблица 4
Сравнение детонационных энергий различных эмульсионных ВВ

Тип ЭмВВ	E, кДж/кг	
	расчет	эксперимент
Матрица + GM	3 297	2 728
Матрица + GM/Al	3 684	3 028
Матрица + MgH ₂	3 530	3 574

что все три типа ЭмВВ детонируют полностью, расчетные значения энергии их взрыва с учетом доли энергии, вносимой добавками MgH₂ и Al, близки друг к другу в соответствии с их составом. Однако экспериментальные результаты, полученные при подводном взрыве, показывают, что только для ЭмВВ водородного типа энергия взрыва близка к расчетному значению, а для двух других типов ЭмВВ она существенно меньше расчетных значений. Это указывает на то, что в случае ЭмВВ водородного типа степень полноты реакции наибольшая среди рассмотренных типов ЭмВВ. Ниже мы обсудим причину этого явления.

Эмульсионная матрица проявляет слабые кислотные характеристики из-за гидролиза аммиачной селитры NH₄NO₃. При попадании порошка гидрида магния в эмульсионную матрицу он вступает в реакцию с ионом H⁺. В результате разрушения структуры гидрида магния получается газообразный водород, который в виде маленьких пузырьков равномерно распределяется в матрице, и она сенсibiliзируется (рис. 4).

Для качественного описания процесса детонации рассмотрим механизм формирования «горячих точек» из частиц гидрида магния, которые однородно распределены по объему матрицы. Для простоты рассмотрим сферический элемент как модель матрицы с введенными частицами сенсibiliзатора (см. рис. 4). «Горя-

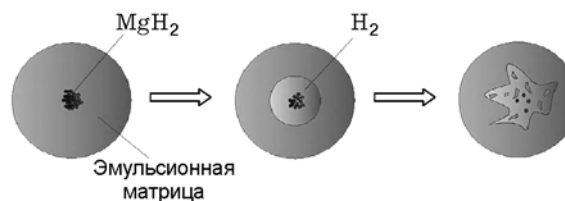


Рис. 4. Процесс детонации композитного ЭмВВ водородного типа

Таблица 5

Параметры, характеризующие взрывные возможности различных ЭмВВ

Тип ЭмВВ	Плотность, г/см ³	Бризантность, см	Скорость детонации, м/с	Чувствительность к трению, Н	Тепловая чувствительность, К
GM	1.21	16.1	4 434	>358	>503
GM/Al	1.24	16.2	4 389	>358	>503
MgH ₂	1.29	19.1	5 552	>358	>503

чие точки», согласно вязкопластическому механизму их инициирования в твердых гетерогенных ВВ [13], создаются ударными волнами, сжимающими пузырьки водорода, в результате чего температура «горячих точек» все время увеличивается. Эмульсионная матрица начинает гореть, когда температура внутри пузырьков водорода превышает температуру инициирования матрицы. Затем водород в пузырьках взрывается и эмульсионная матрица разрушается вблизи пузырька. Вследствие взрыва водорода пузырьки заполняются паром. Температура внутри пузырьков продолжает расти из-за выделения дополнительной энергии, что поддерживает интенсивность волны сжатия, которая в свою очередь приводит к повышению давления газа в пузырьке. Однако увеличение температуры на поверхности «горячей точки» происходит неравномерно: в некоторых точках поверхности давление ударной волны близко к давлению газа внутри пузырька, хотя в других точках это не так, и этот дисбаланс механической деформации пузырьков также приводит к интенсификации взрывного превращения эмульсионной матрицы внутри пузырька. Температура в «горячей точке» продолжает расти, и скорость горения матрицы также увеличивается. Химическая реакция вокруг пузырьков похожа на классическую реакцию поверхностного горения, и тепло передается от областей с высокой температурой и высоким давлением к эмульсионной матрице. Формируется интенсивный градиент температуры. В результате вблизи поверхности пузырька конденсированная фаза матрицы переходит в газовую, что и завершает переход от горения к детонации и подпитывает энергией взрыв последующих слоев ЭмВВ, так что детонационная реакция продолжается. Имплотация эмульсионной матрицы внутрь пузырька увеличивает площадь горения эмульсионной матрицы, что приводит к большей полноте реакции ВВ, и мощность взрыва ЭмВВ повышает-



Рис. 5. Фотографии крешеров из свинца, осажденных взрывом ЭмВВ типа GM, GM/Al и водородного типа (слева направо)

ся.

Ключевые проблемы, интересующие исследователей, — работоспособность ВВ и безопасность обращения с ним. Поэтому мы измерили скорость детонации и бризантность трех типов ЭмВВ и провели опыты по тестированию безопасности работы с ЭмВВ. Для измерения скорости детонации ЭмВВ их помещали в пластиковую трубку с внутренним диаметром 48.5 мм и внешним 50.5 мм, длиной 600 мм. Бризантность измеряли при помощи методики свинцовых крешеров диаметром 40 мм, длиной 60 мм. В каждом опыте использовалось по 50 г ЭмВВ.

Каждое ЭмВВ тестировали три раза, средние значения результатов приведены в табл. 5. Из этой таблицы и рис. 5 следует, что бризантность и скорость детонации ЭмВВ водородного типа выше, чем у двух других ЭмВВ. Безопасность всех трех типов ЭмВВ удовлетворяет необходимым требованиям. Результаты показывают, что ЭмВВ водородного типа могут быть использованы на практике, их чувствительность к трению низка, а взрывные параметры существенно выше.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые в качестве модификатора плотности в эмульсионном ВВ использован материал, содержащий водород. При добавлении в эмуль-

сионную матрицу он играет роль и сенсibiliзатора, и энергетического материала, что открывает новую область применения водородсодержащих соединений.

Введение гидрида магния в состав ЭМВВ способствует повышению его мощности. По сравнению с ЭМВВ со стеклянными микробаллонами при использовании ЭМВВ водородного типа увеличиваются избыточное давление (на 17 %), удельный импульс и полная энергия ударной волны (на 24 %).

ЭМВВ водородного типа характеризуются отличными физико-химическими и детонационными свойствами: скорость детонации достигает 5550 м/с, бризантность 19.1 мм, что значительно лучше аналогичных характеристик ЭМВВ со стеклянными микросферами. Подобные ЭМВВ могут иметь хорошие перспективы в практических приложениях.

Работа поддержана Национальным фондом естественных наук Китая (№ 51174183, 51134012).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Medvedev A. E., Fomin V. M., Reshetnyak A. Yu.** Mechanism of detonation of emulsion explosives with micro balloons // *Shock Waves*. — 2008. — V 18. — P. 107–115.
2. **Wang X.** *Emulsion Explosives*. — Beijing: Metallurgical Industry Press, 1994.
3. **Liqing L.** Use of aluminum in perforating and stimulating a subterranean formation and other engineering applications. — U.S. Pat. N 20030037692. — 2003. — http://ip.com/pat_app/US20030037692.
4. **Swisdak M., Jr.** *Explosion Effects and Properties. Pt 2: Explosion Effects in Water* // *Research Rep. NCWC*. — AD-A056694. — 1978.
5. **Cole R. H.** *Underwater Explosions*. — Princeton: Princeton Univ. Press, 1961.
6. **Thompson S.** Delivery of emulsion explosives. — U.S. Pat. N 20030159610. — 2003. — <http://ip.com/patapp/US20030159610>.
7. **Bjarnholt G.** Explosives expansion works in underwater detonations // *Proc. of 6th Symp. on Detonation*. — 1976. — P. 540–550.
8. **Cooper P. W.** Extending estimation of C-J pressure of explosives to the very low-density region // *Proc. of the 18th Intern. Pyrotechn. Symp.* — Breckenridge, 1992.
9. **Щукин Ю. Г., Кутузов Б. Н., Татищев Ю. А.** *Промышленные взрывчатые вещества на основе утилизируемых боеприпасов*. — М.: Недра, 1998.
10. **Биганска И.** Использование нитроцеллюлозного пороха в эмульсионных взрывчатых веществах // *Физика горения и взрыва*. — 2011. — Т. 47, № 3. — С. 132–134.
11. **Afanasenkov A. N., Litvinov Yu. M.** Completeness of detonation of mixed explosives. Pt I: Detonation characteristics of mixtures of ammonium nitrate and hexogen // *J. Min. Sci.* — 2000. — V. 36, N 6.
12. **Пепекин В. И., Губин С. А.** О теплоте взрыва промышленных и бризантных взрывчатых веществ // *Физика горения и взрыва*. — 2007. — Т. 42, № 2. — С. 100–107.
13. **Kim K.** Development of a model of reaction rates in shocked multicomponent explosives // *Proc. of 9th (Intern.) Symp. on Detonation*. — 1989. — P. 593–603.

*Поступила в редакцию 20/VI 2012 г.,
в окончательном варианте — 20/VIII 2012 г.*