

УДК 533.231

ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЗДУШНОГО ВЗРЫВА НОВОГО КОМПОЗИТНОГО ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА TiH_2 /ГЕКСОГЕН

Б. Сюэ, Х.-Х. Ма, Чж.-У Шень

Китайский университет науки и технологии, 230026 Хэфэй, Аньхой, Китай, hhma@ustc.edu.cn

Изучается взрывчатая смесь гексогена и гидрида титана (TiH_2). Были выполнены воздушные взрывы зарядов с различным содержанием порошка TiH_2 . Результаты показали, что пиковое избыточное давление, длительность положительной фазы импульса давления и удельный импульс увеличивались с ростом содержания TiH_2 от 10 до 20 % по сравнению с флегматизированным гексогеном. Наибольший их рост — 6, 9 и 23 % соответственно — наблюдался при 20%-м содержании TiH_2 . Размер частиц порошка гидрида титана также оказывал влияние, при одинаковом содержании гидрида титана заряд со средним размером частиц TiH_2 4.6 мкм показал более высокие значения трех отмеченных выше параметров, чем порошок с размером частиц 45 мкм. Тем не менее зависимость между скоростью детонации и содержанием TiH_2 была линейной с отрицательным коэффициентом пропорциональности, а размер частиц TiH_2 слабо влиял на нее. Твердые продукты взрыва композитного состава TiH_2 /гексоген анализировались методами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии. При этом в продуктах обнаружен TiO_2 , который, по-видимому, возник при окислении TiH_2 .

Ключевые слова: гидрид титана, гексоген, композитные взрывчатые вещества, воздушный взрыв, размер частиц.

DOI 10.15372/FGV20150414

ВВЕДЕНИЕ

Взрывчатые вещества (ВВ) широко используются в военном деле и гражданском строительстве. К настоящему времени созданы сотни индивидуальных ВВ, но на практике большинство из них могут применяться только в виде композитных ВВ, что вызвано недостаточной мощностью и безопасностью индивидуальных ВВ. Простым и эффективным способом увеличения мощности ВВ является добавление высокоэнергетических материалов [1, 2].

Гидрид титана широко используется в различных областях, в том числе в качестве пенообразователя, в системах хранения водорода, для соединения керамики с металлом. Наличие водорода в титане может привести к образованию таких гидридов, как TiH_2 , TiH , $TiH_{0.71}$ и т. д. [3]. В последнее время большой интерес вызывает TiH_2 в качестве добавки к твердым ракетным топливам, что связано с высокой концентрацией в нем водорода, а также его уникальными механическими и термодинамическими свойствами [4]. В [5] сообщается,

что теплота сгорания тонкоизмельченного порошка TiH_2 с массовым содержанием водорода 3.9 % составляет 21.5 МДж/кг, что выше, чем у гексогена (9.4 МДж/кг). Можно предположить, что добавка TiH_2 значительно увеличивает мощность ВВ, если TiH_2 будет высвобождать всю энергию в процессе взрыва. В исследованиях [6, 7] было показано, что критическая температура воспламенения смеси гидрида титана (TiH_n , $n = 0.15 \div 2$) и перхлората калия ($KClO_4$) превышает 500 °С и почти совпадает с температурой воспламенения $KClO_4$. Это означает, что гидрид титана может безопасно сосуществовать с сильным окислителем, таким как $KClO_4$, а это важное условие для долгосрочного и безопасного хранения ВВ. В [8] сообщалось, что выделение продуктов (водорода) при разложении пиротехнического состава TiH_2 и $KClO_4$ составляло всего лишь 0.011 % при более чем 20-летнем сроке хранения, т. е. гидрид титана имеет хорошую совместимость с окислителем и долго сохраняет стабильность.

Все эти характеристики делают гидрид титана хорошим компонентом для применения в ракетных топливах и пиротехнических составах, а также, по-видимому, для разработки ВВ

© Xue Bing, Ma Hong-Hao, Shen Zhao-Wu, 2015.

Modern Mechanics Department, USTC, Hefei, Anhui, P. R. China.

большой мощности, поскольку механизм реакций последних сходен с механизмами реакций, протекающих в ракетных порохах и пиротехнических составах. Тем не менее исследований в области добавок к ВВ проведено немного. В данной работе в качестве добавки к композиционным ВВ на основе гексогена применялся гидрид титана. Проведена серия воздушных взрывов с целью оценить эксплуатационные качества TiH_2 и его эффективность как компонента для создания ВВ высокой мощности. Рассматривалось также влияние содержания TiH_2 и размера частиц.

1. ЭКСПЕРИМЕНТ

1.1. Взрывчатая смесь

Образцы ВВ изготавливали из коммерчески доступного сырья. Применялся гексоген супертонкой фракции, флегматизированный вос-

ком. Отношение гексогена и воска составляло 95 : 5. Исследовали образцы с содержанием TiH_2 10, 15, 19, 20 %, а также образцы порошков TiH_2 со средним размером частиц 4.6 мкм (12857-Alfa Aesar, рис. 1, *a*) и 45 мкм (TIMP1-BJXRY, рис. 1, *б*). Гидрид титана и флегматизированный гексоген смешивали в сухом виде, пропуская несколько раз через сито с размером ячеек 130 мкм до получения гомогенного состава. Затем смесь насыпали в форму и прессовали в виде цилиндрических зарядов массой 20 г. Диаметр зарядов составлял 25 мм, отношение длины к диаметру равнялось 1.1 ÷ 1.2, что позволяло рассматривать такой заряд как сферический взрывной источник [9, 10]. В маркировке образцов указывались размер частиц и содержание TiH_2 , например: ТН4.6-10 обозначает образец, содержащий 10 % порошка TiH_2 с размером частиц 4.6 мкм.

1.2. Схема эксперимента

Все эксперименты проводили во взрывной камере, заполненной воздухом. Камера диаметром 2.5 м и длиной 5 м располагалась на мягком основании. Заряд подвешивался вертикально в центре камеры и инициировался сверху стандартным детонатором № 8. Сигналы от взрыва регистрировались датчиками давления РСВ-W137A21. Данные записывались и хранились на цифровом осциллографе Tektronix 7401. Датчик представлял собой стабильный чувствительный элемент, размещенный в инваровом кожухе обтекаемой формы с гладкой поверхностью, вдоль которой распространялась ударная волна. Датчик был смонтирован на стальной трубе, которая выходила из камеры через небольшое отверстие и прикреплялась к стойке, зафиксированной на бетонном основании для уменьшения вибрации. Датчик в горизонтальном направлении указывал на центр заряда ВВ. Расстояние от центра заряда до чувствительного элемента составляло 70 см. Для каждой рецептуры ВВ проведено по три опыта. На рис. 2 показана схема взрыва заряда в воздухе.

Скорость детонации свободных (без оболочки) зарядов, сформированных из восьми цилиндрических таблеток диаметром 25 мм и бустера из флегматизированного гексогена, измерялась датчиками короткого замыкания, состоящими из двух изолированных медных проводочек. Схема измерений показана на рис. 3.

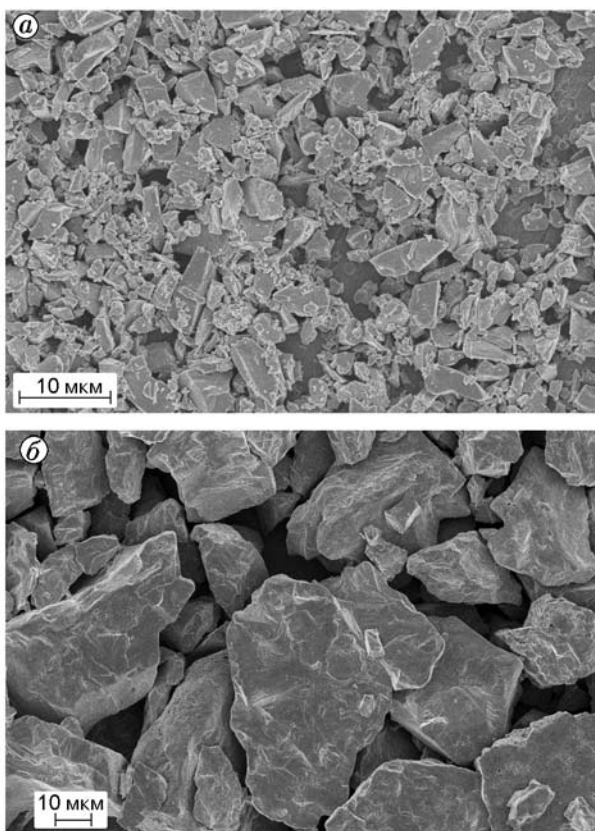


Рис. 1. Изображения частиц TiH_2 , полученные на сканирующем электронном микроскопе:

a — средний размер частиц 4.6 мкм, *б* — 45 мкм



Рис. 2. Схема взрыва заряда в воздухе

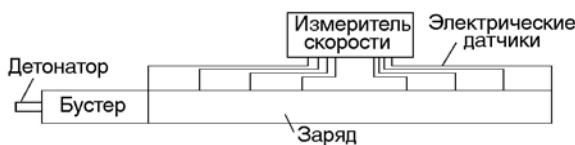


Рис. 3. Схема измерения скорости детонации (диаметр заряда 25 мм)

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

2.1. Обработка данных

Для оценки потенциальной опасности взрывных волн необходимо знание таких параметров, как пик избыточного давления, импульс положительной фазы сжатия и его длительность. На пути точного определения этих параметров существует много трудностей. Для их преодоления использовался аналитический подход, основанный на модифицированном уравнении Фридлиндера [11]:

$$p(t) = p_0 + \Delta p_{\max} \left(1 - \frac{t}{t^+} \right) \exp \left(-\frac{\alpha t}{t^+} \right), \quad (1)$$

где t — время, p_0 — внешнее давление, Δp_{\max} — пик избыточного давления, t^+ — длительность положительной фазы, α — параметр затухания взрыва.

Для определения пика избыточного давления была построена логарифмическая зависимость избыточного давления от времени. Начальный участок кривой приблизительно описывается линейной функцией. Прямая линия проведена методом наименьших квадратов и

экстраполирована на нулевое время. Пересечение прямой с осью нулевого времени дает значение натурального логарифма пика избыточного давления:

$$\frac{d(\ln p)}{dt} = -\frac{1 - \alpha}{t^+}. \quad (2)$$

Длительность импульса положительной фазы трактовалась аналогично. Пересечение с осью времени рассматривалось как натуральный логарифм длительности импульса положительной фазы. Последняя часть кривой $p(t)$ была нестабильной из-за вибрации стенда, в результате которой не была получена отрицательная фаза импульса. Однако положительная фаза импульса давления взрывной волны была более разрушительной, поэтому в данной работе обсуждается только она.

Для получения удельного импульса проводилось сглаживание кривой $p(t)$. Импульс на единицу площади определяли интегрированием сглаженной кривой $p(t)$ от момента прихода волны до точки нулевого избыточного давления:

$$I = \int_0^{t^+} \Delta p(t) dt. \quad (3)$$

Для того чтобы исключить влияние небольшой разницы в массе заряда m , результат интегрирования делили на массу заряда и получали удельный импульс:

$$i = \frac{I}{m} = \frac{1}{m} \int_0^{t^+} \Delta p(t) dt. \quad (4)$$

Результаты интегрирования в промежуток времени от прибытия волны до 200 мкс для каждого образца приведены в табл. 1.

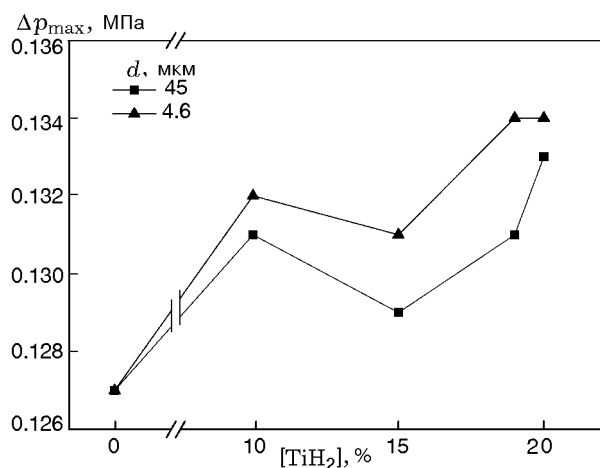
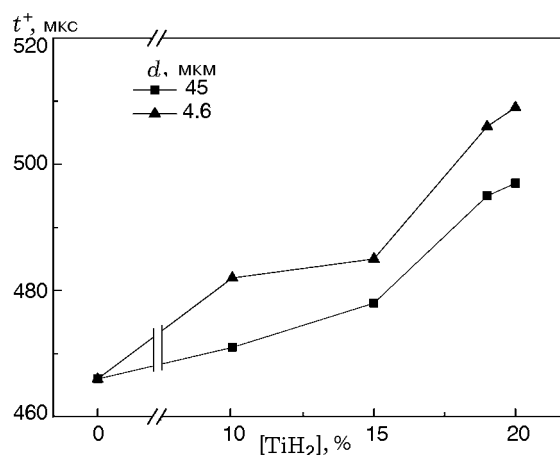
2.2. Параметры взрыва

Как следует из табл. 1, добавление порошка TiH_2 улучшает характеристики воздушного взрыва тестируемых зарядов. Пик избыточного давления, отражающий интенсивность начальной ударной волны, слегка увеличивался при добавлении TiH_2 . Для частиц TiH_2 обоих размеров состав с 20 % TiH_2 дает максимальное приращение импульса. При содержании 19 и 20 % TiH_2 значения пика избыточного давления

Таблица 1

Результаты измерения пика избыточного давления, импульса положительной фазы и его длительности

Образец	Δp_{\max} , МПа	Удельный импульс, Па·с/г		t^+ , мкс
		период 200 мкс	полный	
RDX	0.127 ± 0.003	0.665 ± 0.013	0.821 ± 0.006	466 ± 5
ТН45-20	0.133 ± 0.003	0.728 ± 0.012	0.925 ± 0.002	497 ± 13
ТН4.6-20	0.134 ± 0.002	0.735 ± 0.007	1.016 ± 0.026	509 ± 6
ТН45-19	0.131	0.735 ± 0.008	0.930 ± 0.032	495 ± 22
ТН4.6-19	0.134 ± 0.002	0.753 ± 0.015	0.998 ± 0.002	506 ± 3
ТН45-15	0.129	0.687 ± 0.010	0.929 ± 0.020	478 ± 7
ТН4.6-15	0.131 ± 0.002	0.700 ± 0.034	0.977 ± 0.024	485 ± 7
ТН45-10	0.131 ± 0.003	0.713 ± 0.047	0.911 ± 0.027	471 ± 18
ТН4.6-10	0.132 ± 0.014	0.724 ± 0.024	0.943 ± 0.013	482 ± 9

Рис. 4. Средние значения пика избыточного давления при взрыве композитных ВВ в зависимости от содержания порошка TiH_2 с разным размером частицРис. 5. Средние значения длительности положительной фазы импульса давления при взрыве композитных ВВ в зависимости от содержания порошка TiH_2 с разным размером частиц

оказались очень близки, что свидетельствует о надежности экспериментальной схемы. Изменение профиля пика избыточного давления показывает, что добавление TiH_2 увеличивает начальное давление и энергию поверхности раздела заряда. Связь между пиком избыточного давления и содержанием TiH_2 иллюстрирует рис. 4. Из рисунка видно, что минимальное значение пика избыточного давления соответствует составу с 15% TiH_2 . Это объясняется тем, что приращение значения Δp_{\max} было незначительным и пик оказался чувствительным к различным факторам, таким, например,

как характеристики отклика датчика и неконтролируемые изменения условий. Размер частиц также оказывает влияние на величину пика избыточного давления. Так, образцы, содержащие порошок TiH_2 размером 4.6 мкм, дают более высокое значение, чем порошок TiH_2 с размером частиц 45 мкм.

Длительность фазы положительного давления непосредственно показывает, как долго были приложены разрушающие силы. Этот важный параметр можно измерить достаточно точно. Его значение увеличивается с ростом содержания TiH_2 и с уменьшением размера ча-

стиц порошка (рис. 5).

Удельный импульс также увеличивается при добавлении порошка TiH_2 . Его максимальный рост составил 23 % при 20%-м содержании порошка TiH_2 с размером частиц 4.6 мкм. Зависимость носит приблизительно линейный характер (рис. 6). Импульс взрывной волны зависит как от пика избыточного давления, так и от длительности волны. Скорость затухания избыточного давления рассматривалась в [12], типичная кривая показана на рис. 7. Наложение зависимостей избыточного давления от времени для смеси TiH_2 /гексоген и

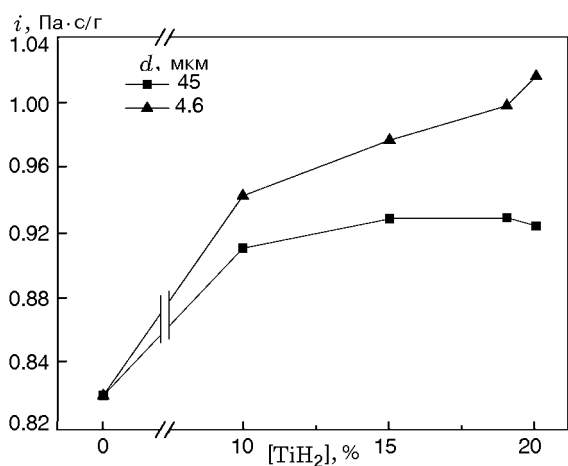


Рис. 6. Средние значения удельного импульса при взрыве композитных ВВ в зависимости от содержания порошка TiH_2 с разным размером частиц

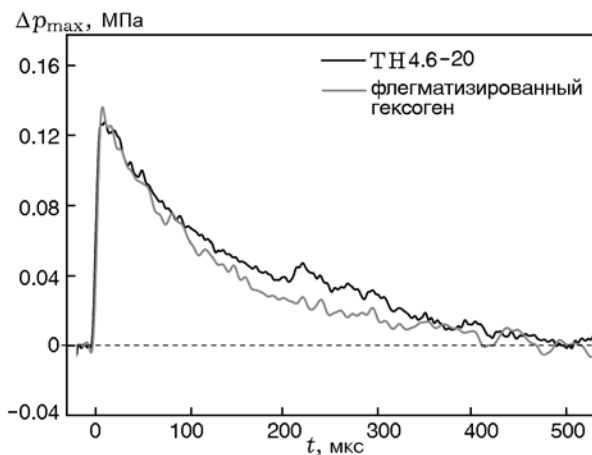


Рис. 7. Типичный профиль избыточного давления при детонации композитного состава TiH_2 /гексоген (темная кривая) и флегматизированного гексогена (светлая кривая)

для флегматизированного гексогена показывает приращение импульса для композитного состава TiH_2 /гексоген. Влияние размера частиц на удельный импульс аналогично отмеченному ранее, т. е. при меньшем размере частиц эксплуатационные характеристики улучшаются.

Результаты измерения скорости детонации приведены в табл. 2. Соотношение между скоростью детонации и содержанием TiH_2 описывается линейной зависимостью с отрицательным коэффициентом пропорциональности, а размер частиц TiH_2 незначительно влияет на скорость детонации. Результат аппроксимации экспериментальных точек линейной функцией методом наименьших квадратов показан на рис. 8.

Скорость детонации гексогена плотностью 1.55 г/см^3 при том же давлении прессования,

Таблица 2
Результаты измерения скорости детонации

Образец	D, м/с
ТН4.6-5	7 769
ТН45-5	7 731
ТН4.6-10	7 585
ТН45-10	7 501
ТН4.6-15	7 323
ТН45-15	7 321
ТН4.6-20	7 191
ТН45-20	7 154

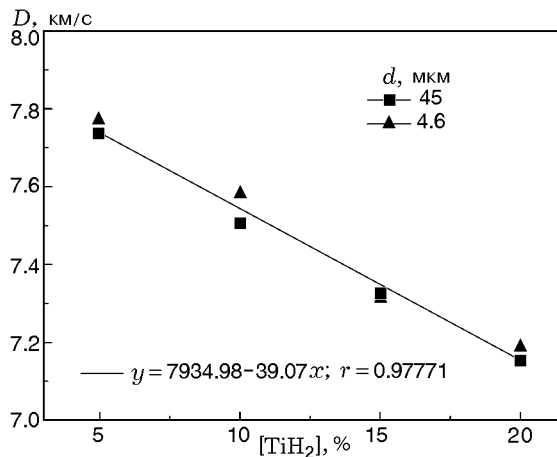


Рис. 8. Зависимость скорости детонации композитного ВВ от содержания TiH_2

что и для остальных образцов в настоящей работе, составила 7935 м/с и соответствует аппроксимационной зависимости на рис. 5. Это значение очень близко к скорости 7930 м/с из работы [13].

2.3. Механизм взрыва

Прирост параметров взрыва показал, что добавление гидрида титана увеличивает энергию композитного взрывчатого состава TiH_2 /гексоген, однако достаточно трудно определить механизм возрастания энергии. Энергия может увеличиваться в результате различных экзотермических реакций в процессе взрыва, вызванных присутствием гидрида титана, например окислением TiH_2 и фазовым переходом водорода в металлическое состояние [14]. Анализ продуктов взрыва позволяет выявить механизм химической реакции. Однако газообразные продукты композитного ВВ TiH_2 /гексоген могут не отличаться от компонентов продуктов взрыва гексогена, поскольку водород был единственным элементом, добавленным в газообразные продукты в результате добавления гидрида титана, а точный количественный анализ газообразных продуктов выполнить сложно. Поэтому в опытах проводился анализ твердых продуктов взрыва состава TiH_2 /гексоген.

Заряд TiH_2 /гексоген в массовом соотношении 50 : 50 был взорван в герметичном стальном контейнере, твердые продукты собраны, фрагменты заряда отфильтрованы. Результаты энергодисперсионной спектроскопии полученного остатка показали, что в порошкообразных продуктах присутствуют следующие ос-

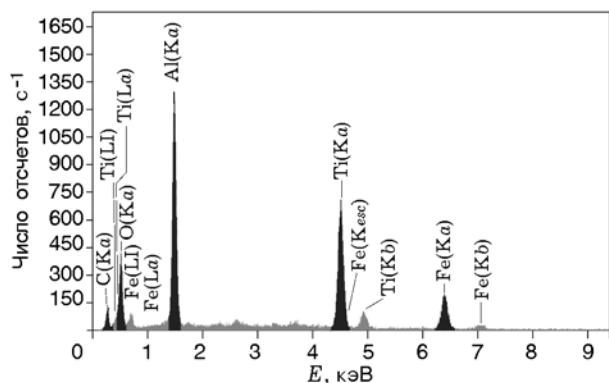


Рис. 9. Результаты обнаружения элементов в продуктах взрыва методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии

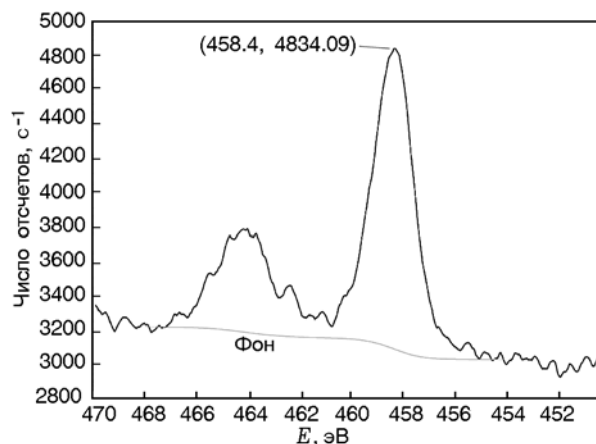
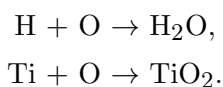


Рис. 10. Детальное сканирование продуктов взрыва методом РФЭС

новные элементы: С, О, Ti, Fe, Al (рис. 9). Наличие Al и Fe в остатке можно объяснить материалом детонатора и контейнера, а С и О попали из воздуха или ВВ, Ti присутствует за счет композитного ВВ. Однако Н не может быть обнаружен методом энергодисперсионной спектроскопии. Порошковые продукты анализировались методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС), который обычно используется для идентификации химического состояния элемента. Сканирование спектра в широком диапазоне показало отчетливый пик в районе Ti. Детальное сканирование этой зоны представлено на рис. 10. Энергия связи правого пика равна 458.4 эВ, расстояние между пиками 5.8 эВ. Сравнение результатов, полученных методом РФЭС, со стандартными спектрами РФЭС позволило идентифицировать TiO_2 , который, скорее всего, образуется при окислении TiH_2 [15]. Энергия связи TiH_2 составляла 454 эВ, однако очевидного пика на спектре при этом значении не было. Это означает, что TiH_2 нет в продуктах. Таким образом, другие возможные пути превращения TiH_2 при взрыве, например фазовые превращения, можно не рассматривать.

Сопоставление результатов анализа продуктов взрыва с характеристиками термического разложения гидрида титана позволило получить основной реакционный процесс TiH_2 при взрыве: детонация гексогена обеспечивает высокую температуру и это приводит к разложению TiH_2 согласно модели сжимающегося ядра [16, 17]:





При этом выделяется водород, который высвобождает энергию при окислении во время взрывного процесса подобно алюминизированному ВВ. Другой продукт разложения, титан, также окисляется при высокой температуре и увеличивает теплоту взрыва [18]. Диффузия водорода из ядра гидрида и твердого раствора водорода к поверхности частицы была лимитирующей стадией, ограничивающей скорость процесса, которая зависела как от температурных условий, так и от размера частиц. Зависимость скорости детонации от содержания гидрида титана показывает уменьшение скорости при добавлении TiH_2 , что свидетельствует о понижении давления Чепмена — Жуге:

$$p_{\text{CJ}} = \frac{1}{4} \rho D^2, \quad (6)$$

где ρ — плотность заряда ВВ.

Итак, можно сказать, что TiH_2 почти не вносит вклада в энергию в зоне химической реакции. Несмотря на то, что температура взрыва (≈ 3000 К) намного выше, чем температура начала разложения TiH_2 ($645 \div 873$ К) и гидрид титана разлагается быстрее при высокой температуре [19, 20], длительность химической реакции конденсированных ВВ в детонационном процессе составляет всего лишь 0.1 мкс, а ширина зоны реакции равна 0.1 мкм [21]. Этого времени недостаточно для разложения и реагирования TiH_2 . Предполагается, что разложение и окисление TiH_2 , скорее всего, произойдут после детонационной волны, в зоне продуктов детонации, которая обеспечивает процесс энергией. Вырабатываемая TiH_2 энергия поддерживает распространение ударных волн и замедляет затухание избыточного давления [22, 23]. Таким образом, рост продолжительности реакции увеличивает ее протяженность и выход энергии.

Различные приращения параметров взрыва при использовании частиц TiH_2 различных размеров можно объяснить тем, что частицы меньшего размера имеют большую реакционную способность и менее стабильны при более высоких скоростях нагрева [24]. Малый размер частиц обеспечивает большую площадь удельной поверхности, что способствует нагреву и эффективной десорбции. В работе [20] наблюдалось уменьшение начальной температуры разложения до 173 К для порошка TiH_2 ,

подвергнутого размолу в течение 10 ч, это также доказывает, что чем меньше частицы, тем легче они разлагаются.

ВЫВОДЫ

1. Характеристики воздушного взрыва композитного ВВ на основе гексогена улучшались при содержании TiH_2 в количестве $10 \div 20$ %. На характеристики композитного ВВ оказывал влияние размер частиц TiH_2 : пик избыточного давления, длительность и удельный импульс от зарядов с размером частиц гидрида титана 4.6 мкм были выше, чем при размере 45 мкм. Скорость детонации уменьшалась с увеличением содержания TiH_2 , однако влияние на нее размера частиц было невелико.

2. В продуктах взрыва состава TiH_2 /гексоген обнаружено соединение TiO_2 , что свидетельствует об окислении TiH_2 во время взрыва. Этот процесс, по-видимому, является основной причиной улучшения взрывных характеристик композитного состава TiH_2 /гексоген.

Работа выполнена при финансовой поддержке Национального фонда естественных наук Китая (N 51174183). Авторы выражают благодарность Хуемеи Zhao и аспирантам, принявшим участие в исследовании.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гордон Дж. М., Гросс К. К., Перрам Г. П. Динамика огненного шара и ударных волн при взрыве новых алюминизированных боеприпасов // Физика горения и взрыва. — 2013. — Т. 49, № 4. — С. 79–90.
2. Чэн Я.-Ф., Ма Х.-Х., Шень Чж.-У. Детонационные характеристики эмульсионных взрывчатых веществ, сенсibilизированных гидридом магния // Физика горения и взрыва. — 2013. — Т. 49, № 5. — С. 120–125.
3. Liu H., He P., Feng J. C., et al. Kinetic study on nonisothermal dehydrogenation of TiH_2 powders // Intern. J. Hydrogen Energy. — 2009. — V. 34, N 7. — P. 3018–3025.
4. Shark S. C., Sippel T. R., Son S. F., et al. Theoretical performance analysis of metal hydride fuel additives for rocket propellant applications // 47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conf. and Exhibit, 2011.
5. Li C. F. Research of raise solid propellant burning rate by using titanium hydride // Winged Missiles J. — 1997. — V. 6. — P. 34–37.
6. Collins L. W. The stability and compatibility of $\text{TiH}_x/\text{KClO}_4$ pyrotechnics // J. Hazard. Mater. — 1982. — V. 5, N 4. — P. 325–333.

7. **Collins L. W.** Thermal ignition of titanium based pyrotechnics // *Combust. Flame.* — 1981. — V. 41. — P. 325–330.
8. **Sorensen D., Quebral A., Baroody E., et al.** Investigation of the thermal degradation of the aged pyrotechnic titanium hydride/potassium perchlorate // *J. Therm. Anal. Calorimetry.* — 2006. — V. 85, N 1. — P. 151–156.
9. **Bjarnholt G.** Suggestions on standards for measurement and data evaluation in the underwater explosion test // *Propel., Explos., Pyrotech.* — 1980. — V. 5, N 2-3. — P. 67–74.
10. **Liu W. X., Zhang D. Z., Zhang F. P., Li Y.** Blast loading difference between spherical charge and cylindrical charge with length equal to diameter at small scaled distances // *Explos. Shock Waves.* — 2013. — V. 33, N 3. — P. 330–336.
11. **Ismail M. M., Murray S. G.** Study of the blast wave parameters from small scale explosions // *Propel., Explos., Pyrotech.* — 1993. — V. 18, N 1. — P. 11–17.
12. **Kinney G. F., Graham K. J.** *Explosive Shocks in Air.* — Berlin; New York: Springer-Verlag, 1985.
13. **Baytos J. F., Gibbs T. R., Popolato A.** *LASL Explosive Property Data.* — Univ. of California Press, 1980.
14. **Максимов Е. Г., Панкратов О. А.** Водород в металлах // *Успехи физ. наук.* — 1975. — Т. 116, № 7. — С. 385–412.
15. **Wagner C., Muilenberg G.** *Handbook of X-ray Photoelectron Spectroscopy.* — Perkin-Elmer, 1979.
16. **Stepura G., Rosenband V., Gany A.** A model for the decomposition of titanium hydride and magnesium hydride // *J. Alloys and Compounds.* — 2012. — V. 513. — P. 159–164.
17. **Gabis I. E., Voit A. P., Evard E. A., et al.** Kinetics of hydrogen desorption from the powders of metal hydrides // *J. Alloys and Compounds.* — 2005. — V. 404. — P. 312–316.
18. **Huang Y. F., Wang X. F.** Reaction mechanism of metallized explosive with composite metals powder // *Chin. J. Explos. Propel.* — 2004. — V. 27, N 4. — P. 26–28.
19. **Bhosle V., Baburaj E. G., Miranova M., et al.** Dehydrogenation of nanocrystalline TiH₂ and consequent consolidation to form dense Ti // *Metallurg. Mater. Trans. A.* — 2003. — V. 34, N 12. — P. 2793–2799.
20. **Prashanth K. G.** Influence of mechanical activation on decomposition of titanium hydride // *Mater. Manufactur. Process.* — 2010. — V. 25, N 9. — P. 974–977.
21. **Физика взрыва** / под ред. Л. П. Орленко. — М.: Физматлит, 2002.
22. **Cheng Y. F., Ma H. H., Shen Z. W.** Detonation characteristics of emulsion explosives sensitized by MgH₂ // *Chin. J. High Pressure Phys.* — 2013. — V. 27, N 1. — P. 45–50.
23. **Baker W.** *Explosion in Air.* — Texas, 1973.
24. **Samal S., Cho S., Park D. W., et al.** Thermal characterization of titanium hydride in thermal oxidation process // *Thermochim. Acta.* — 2012. — V. 542. — P. 46–51.

*Поступила в редакцию 17/1 2014 г.,
в окончательном варианте — 10/IX 2014 г.*
