

УДК 536.46

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИИ РАКЕТНЫХ ТОПЛИВ НА ОСНОВЕ СОПОЛИМЕРА РВТ ПРИ НИЗКОСКОРОСТНОМ УДАРЕ

N. Yang¹, T. Ma¹, G. F. Guo¹, Y. M. Luo¹, S. Z. Wu¹, H. J. He³,
Y. S. Huang¹, D. B. Liu¹, S. Xu^{1,2}

¹ School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, NO. 200 Xiaolingwei, Nanjing, Jiangsu, China, youngnian@njjust.edu.cn

² China National Quality Supervision Testing Centre for Industrial Explosive Materials, Nanjing University of Science and Technology, NO. 200 Xiaolingwei, Nanjing, Jiangsu, China, xusen@njjust.edu.cn

³ Shanghai Space Propulsion Technology Research Institute, Shanghai, China

Чувствительность твердых топлив к удару является важным фактором при их производстве, применении и хранении. Для исследования чувствительности и последующей реакции топлив на основе сополимера 3,3-бис(азидометил)оксетана (ВАМО) и тетрагидрофурана (THF) (РВТ-топлива) при ударе с низкой скоростью проведено 20 Susan-тестов и разработана математическая модель. Результаты показывают, что реакция при ударе инициируется экструзионным пиролизом РВТ-топлив. При скоростях удара $120 \div 300$ м/с относительная выделяющаяся энергия в Susan-тестах больше 20 %, она увеличивается с ростом скорости удара и достигает в максимуме 57.67 %. РВТ-топлива демонстрируют сильную реакцию на удар с низкой скоростью и чувствительны к условиям разрушения при ударе. Согласно результатам моделирования протекание реакции экструдированного топлива в снаряде Susan-теста зависит как от скорости удара, так и от характеристик оболочки. Результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными и показывают, что частичная детонация инициируется при начальной скорости удара около 260 м/с.

Ключевые слова: РВТ-топлива, Susan-тест, численное моделирование, модель Ли — Тарвера, протекание реакции.

DOI 10.15372/FGV2023.9327
EDN QGPLFS

ВВЕДЕНИЕ

Твердые топлива на основе сополимера 3,3-бис(азидометил)оксетана (ВАМО) и тетрагидрофурана (THF) — высокоэнергетические малочувствительные вещества, содержащие Al, октоген и перхлорат аммония, (далее РВТ-топлива) имеют хорошие перспективы в плане применения. В связи с этим вопросы безопасности обработки, хранения и транспортировки этих топлив требуют изучения их чувствительности к удару. Ранее было показано, что удар с низкой скоростью может инициировать многие топлива и перейти в опасные события [1]. Для конкретных сценариев аварий разработано несколько тестов [2–5]: тест с модифицированным падающим грузом [6], испытание на хрупкость [7], Spigot-тест [8], Steven-тест [9],

Susan-тест [1, 10–15]. Susan-тест предназначен для оценки чувствительности замкнутого заряда взрывчатого вещества (ВВ) и представляет собой удар разрушающегося снаряда по мишени.

С его помощью можно оценить опасность случайного сброса взрывной системы в корпусе с большой высоты, например с самолета, и удара по цели с определенной скоростью [1, 10, 15]. В связи с тем, что деформация образцов топлива в Susan-тесте близка к реальной ситуации, знание реакции РВТ-топлив в этом teste имеет большое практическое значение для оценки степени безопасности при ударе взрывоопасных объектов по мишени [1, 10]. Авторы работы [15] провели Susan-тесты с рядом пластических ВВ на основе октогена. Общее описание наблюдаемого механизма удара включает в себя четыре процесса: удар, разрыв корпуса, продолжающееся разрушение, окончательное сжа-

тие. Получена информация о времени реакции ВВ, движении снаряда и поведении алюминиевой защитной оболочки при разрушении.

Авторы [10] изучали реакцию пластических ВВ LX-14 (95.5 % (мас.) октогена) и DXD-59 (92 % октогена) на удар с низкой скоростью. Образец LX-14 продемонстрировал неустойчивое поведение и сильную реакцию при низкой скорости удара и, таким образом, очень высокую чувствительность к условиям разрушения при ударе. При испытании ВВ DXD-59 зарегистрированы линейно возрастающее давление и умеренная чувствительность к удару. Как известно из литературы [1, 10–15], основная цель Susan-теста состоит в том, чтобы оценить влияние компонентов, скорости удара и т. д. на реакцию топлива в снаряде при низких скоростях удара, в то время как механизму реакции и процессам, доминирующими в нем, уделяется меньше внимания. Чтобы исследовать механизм и доминирующую реакцию в Susan-тесте, необходимо всесторонне контролировать реакцию топлива после удара, но из-за экранирования заряда алюминиевой оболочкой и стальным корпусом это сложно сделать. Для моделирования процесса ударного инициирования и быстрого перехода в детонацию энергетических материалов часто используется модель Ли — Тарвера [16–27]. Авторы статьи [24] изучали индуцированную ударом детонацию бризантных ВВ, заключенных в стальной цилиндр с открытым торцом, с помощью трехмерного анализа методом конечных элементов. Были обсуждены пороговые условия детонации, предсказываемые различными уравнениями состояния и моделями разрушения стальной оболочки и снаряда. В работе [27] с использованием программного обеспечения ANSYS/LS-DYNA и нелинейного метода конечных элементов были исследованы характеристики инициирования ракетных двигателей на твердом топливе (РДТТ) при ударе осколками. По рассчитанным значениям давления и реакционной способности заряда твердого топлива определены критическая ударная скорость инициирования РДТТ и ее изменение при различных формах осколков и условиях соударения. Как показали исследования [28–32], модель Ли — Тарвера позволяет хорошо моделировать ударное воспламенение и реакцию после воспламенения твердых топлив.

В представленной нами работе Susan-тест применялся для анализа характеристик реак-

ции топлива при скорости удара $120 \div 300$ м/с. Для описания всех процессов в Susan-тесте использовалась численная модель Ли — Тарвера. Путем объединения экспериментальных и численных результатов изучены механизм реакции и доминирующий в нем процесс.

1. ЭКСПЕРИМЕНТ

Размер образца топлива РВТ — $\varnothing 50 \times 100$ мм, масса около 345 г. Топливо РВТ состоит из связующего РВТ (ВАМО : THF = 3 : 2, средняя молекулярная масса 5500, 17 %), перхлората аммония (39 %), алюминия (19 %), 3,5,7-тетранитро-1,3,5,7-тетразоцина (октоген, 20 %) и пластификатора АЗ (5 %). Плотность заряда 1.763 г/см³.

Ударные испытания РВТ-топлив проведены в соответствии с GJB 8142 со стандартным методом 8 [33] и рекомендациями Организации Объединенных Наций по перевозке опасных грузов (Руководство по испытаниям и критериям, часть 1, серия 7, тип (с)) [34] (рис. 1).

Снаряд в Susan-тесте массой около 5.4 кг состоит из трех частей: стальной корпус,

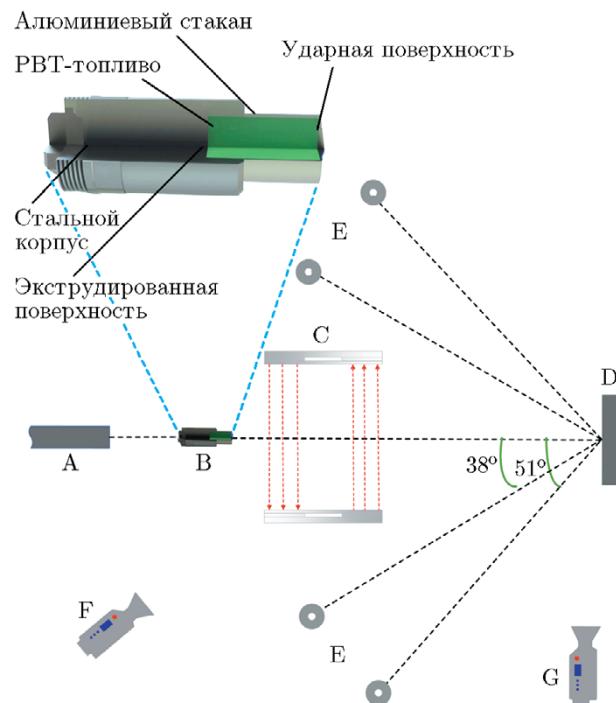


Рис. 1. Схема постановки Susan-теста:

A — 82-миллиметровая пушка, B — снаряд, C — лазерный измеритель скорости, D — мишень (толщина 6.4 см), E — датчики давления, F и G — высокоскоростные камеры

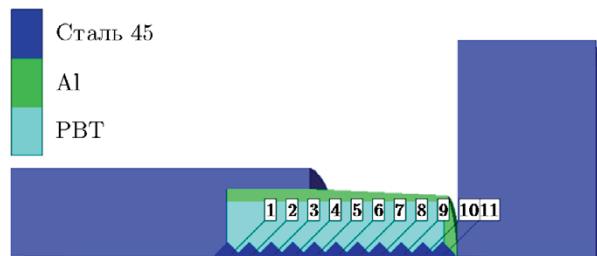


Рис. 2. Численная модель

РВТ-топливо и алюминиевый стакан. Выстрел проводится из 82-миллиметрового орудия. Датчики воздушной ударной волны расположены на расстоянии 4 м от мишени. Для измерения скорости снаряда используются камера F с частотой 10 000 кадр/с (FASTCAM Mini AX200-200K-C-16, 1 024 × 672) и лазерные измерители скорости, момент удара регистрируется камерой G с частотой 190 000 кадр/с (PHANTOM V1212, 256 × 128).

2. ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ

Для моделирования реакции РВТ-топлива при низкоскоростном ударе использовано программное обеспечение ANSYS/AUTODYN. Для упрощения расчетов задача рассматривалась в симметричном по осям Y и Z виде. Расчетная схема показана на рис. 2. Для описания неидеальной детонации основного заряда используются модель высоконергетического сгорания и уравнение состояния Джонса — Уилкинса — Ли (JWL). Стальной корпус, РВТ-топливо, алюминиевый стакан и мишень — это все элементы Лагранжа. Чтобы облегчить анализ воспламенения и последующей реакции, в центре заряда устанавливается ряд датчиков давления в направлении движения снаряда. Расстояние между двумя смежными датчиками составляет 10 мм, во всем ряду от датчика 1 до датчика 11.

3. МОДЕЛЬ ОПИСАНИЯ МАТЕРИАЛОВ

Процесс расширения продуктов взрыва описывается уравнением JWL (уравнение (1) в [24]):

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right) \exp(-R_1 V) + \\ + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right) \exp(-R_2 V) + \frac{\omega E}{V}, \quad (1)$$

где P — давление, $V = v/v_0$ — относительный объем, ω — коэффициент Грюнайзена, E — удельная внутренняя энергия, A , B , R_1 , R_2 — эмпирические параметры, определяемые в эксперименте.

Кроме уравнения состояния JWL, используется программа BKW продуктов детонации для получения данных об изоэнтропическом расширении, которые нужны для получения параметров уравнения JWL [35]. Рассчитанные параметры продуктов реакции РВТ-топлива представлены в табл. 1. Для газообразных продуктов РВТ-топлива используется уравнение JWL (1), для непрореагированного твердого вещества используется уравнение состояния Ми — Грюнайзена. Поскольку точное давление непрореагированного РВТ-топлива не является каким-то особым [35], параметры для него даются напрямую уравнением [24]

$$P = P_H + \Gamma \rho (e_i - e_{iH}), \quad P_H = \frac{\rho_0 c_0 \mu (1 + \mu)}{[1 - (s - 1)\mu]^2}, \\ e_{iH} = \frac{p_H}{2\rho_0} \frac{\mu}{1 + \mu}, \quad \rho \Gamma = \rho_0 \Gamma_0, \quad \mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1, \quad (2)$$

где Γ — коэффициент Грюнайзена, e_i — внутренняя энергия, P_H — давление Гюгонио, e_{iH} — внутренняя энергия Гюгонио, Γ_0 , c_0 , s — константы.

Для описания горения в зоне реакции принята модель Ли — Тарвера [24–32]:

Таблица 1

Параметры уравнения состояния РВТ-топлив

Реагирующее ВВ						Нереагирующее ВВ		
ρ , г/см ³	B , Мбар	R_2	A , Мбар	R_1	ω	γ_0	c_0	S_1
1.763	0.3236	1.76	10.221	4.7	0.39	0.8	0.199	3.05

Таблица 2
Параметры уравнения скорости реакции РВТ-топлив

I , мкс $^{-1}$	G_1	G_2	b	c	e	a	d	g	x	y	z
$7.4 \cdot 10^{11}$	20.5	750	0.3333	0.6667	0.6667	0	0.3333	0.6667	20	1.5	2

$$\frac{\partial F}{\partial t} = I(1-F)^b \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 - a \right)^x + \\ + G_1(1-F)^c F^d P^y + G_2(1-F)^e F^g P^z, \quad (3)$$

где F — доля реагирующего ВВ; t — время, мкс; P — давление, Мбар; ρ — текущая плотность, г/см 3 ; ρ_0 — начальная плотность; I , b , x — параметры члена, описывающего воспламенение; a — критическое сжатие, при котором нет воспламенения (заряд воспламеняется, когда $\rho/\rho_0 > 1 + a$); G_1 , c , d , y — параметры начального роста реакции после воспламенения; G_2 , e , g , z — параметры для определения скорости реакции высокого давления. В уравнении (3) большинство параметров РВТ-топлива такие же, как и у топлив на основе НТРВ/RDX/Al/AP [29], некоторые параметры, такие как G_1 и G_2 , определяются методом, описанным в [35] (табл. 2). Параметры Al взяты из библиотеки материалов AUTODYN (Al-6061-T6). Стальной корпус и мишень изготовлены из стали 45 с параметрами из работы [29]: плотность 7900 кг/м 3 , скорость звука $c_0 = 0.457$ см/мкс, константа $S_1 = 1.49$, коэффициент Грюнайзена 2.17, модуль сдвига 81.8 ГПа, предел текучести 0.35 ГПа.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

4.1. Susan-тест

При скоростях удара $v = 120 \div 300$ м/с проведено в общей сложности 20 тестов и рассчитана относительная высвобождаемая энергия (η) РВТ-топлива, которая представляет собой отношение высвобожденной в ходе реакции энергии к общей энергии топлива и может количественно определять реакцию топлива.

На рис. 3 представлена зависимость высвобождаемой энергии η от скорости удара v . Видно, что с ростом скорости значение η увеличивается от минимального 24.31 % до максимального 57.67 %. Все значения η превышают 20 %, и это показывает, что топливо РВТ проявляет сильную реакцию на удар с низкой скоростью и чувствительно к условиям разруше-

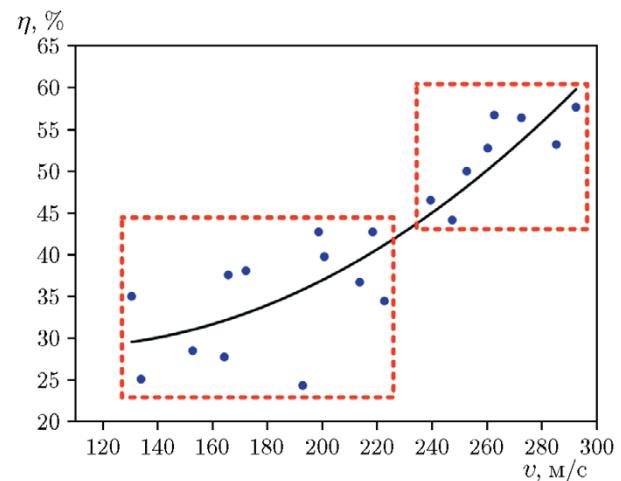


Рис. 3. Соотношение между скоростью удара и относительной высвобождаемой энергией

ния. С увеличением скорости удара интенсивность реакции топлива возрастает существенно, но зависимость нелинейная.

При скоростях удара $v < 240$ м/с значение η растет медленнее, чем при большей скорости. Кроме того, в этом случае наблюдается значительный разброс значений η , что свидетельствует о нестабильной реакции топлива при ударе. При скоростях удара $v > 240$ м/с большинство полученных точек находится ближе к аппроксимирующей кривой, реакция более стабильна и интенсивна. Количество высвобождаемой энергии η хорошо описывает реакционное поведение в целом, но не позволяет представить в деталях механизмы реакции и воспламенения некоторой части топлива.

Время от момента удара до появления свечения составляет 52.6 \div 105.2 мкс и уменьшается с ростом скорости. Свечение вызвано воспламенением из-за термического разложения топлива на поверхности удара за счет выдавливания, трения потока и т. д. Анализ показал, что с увеличением скорости удара алюминиевый стакан разрушается быстрее и на поверхности удара появляется больше точек воспламенения, в результате чего свечение регистрируется раньше, становится более равномерным и расширяется быстрее.

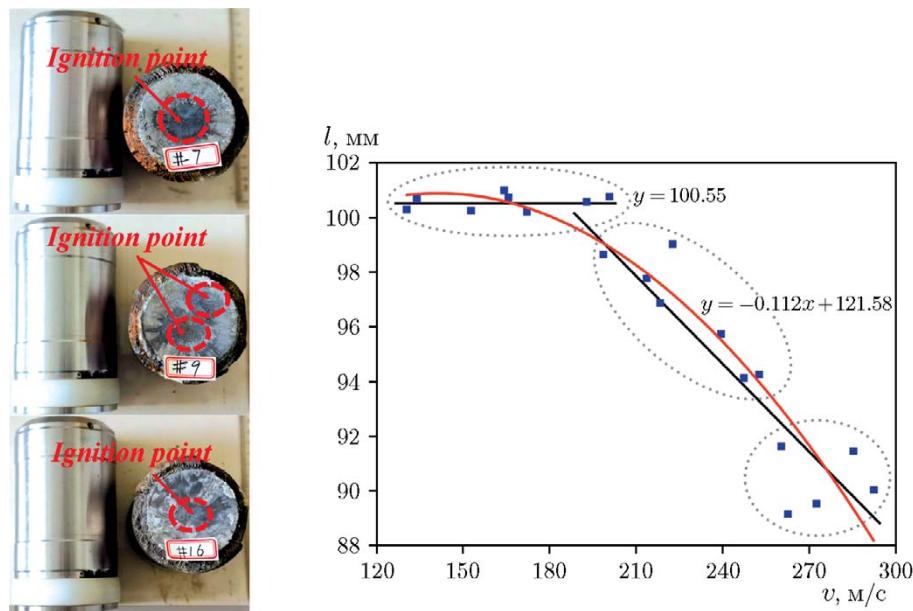


Рис. 4. Фотографии экструдированной поверхности и зависимость длины стального корпуса от скорости после удара

Поскольку последующий ход реакции нельзя оценить по изображениям, записанным высокоскоростной камерой, можно проанализировать состояние стального корпуса после удара и контактную поверхность между ним и образцом топлива (экструдированная поверхность). Как видно на рис. 4, на экструдированной поверхности появляются следы реакции, которые возникают из-за воспламенения топлива. Количество точек воспламенения и их расположение в различных опытах сильно отличаются. На среднем снимке видны точки воспламенения на экструдированной поверхности, на нижнем — точки воспламенения со следами распространения пламени, на верхнем снимке — одна точка воспламенения в центре экструдированной поверхности. Количество и расположение точек воспламенения влияет на протекание реакции, являясь одной из причин нестабильности процесса.

Интенсивность реакции РВТ-топлив на основании работы [34] условно подразделяется на несколько уровней: отсутствие реакции, горение, дефлаграция, взрыв, частичная детонация, устойчивая детонация. Интенсивность можно оценить по степени повреждения стального корпуса после удара. Зависимость длины оставшейся части стального корпуса от скорости удара показана на рис. 4.

При скоростях удара менее 200 м/с все обручи стальных корпусов были разорваны, а

длина корпусов существенно не изменилась. С увеличением скорости удара длина стальных корпусов меняется значительно — топливо реагирует сильнее, реакция взрывоопасна. В опытах со скоростями удара 292.4, 260.3, 262.6, 272.5 и 285.3 м/с длина стальных корпусов существенно меньше начальной и равна 90.02, 91.62, 89.14, 89.51 и 91.44 мм соответственно. Пластическая деформация некоторых корпусов показывает, что уровень реакции — частичная детонация. Таким образом, при скорости удара меньше 200 м/с уровень реакции — горение и дефлаграция, при скорости 200 \div 260 м/с — взрыв, а при 260 \div 270 м/с — частичная детонация.

4.2. Численное моделирование

Как уже отмечалось выше, в заряде (см. рис. 2) устанавливался ряд измерительных точек, в которых рассчитывались профили давления. При скорости удара 120 \div 300 м/с давление на датчике 11, находящемся на ударной поверхности, составляет 0.37 \div 0.98 ГПа. После воспламенения топлива давление на ударной поверхности (датчик 11) не может достичь значений, соответствующих переходу в устойчивую детонацию. По мере развития процесса давление, возникающее при ударе, непрерывно передается от ударной поверхности (датчик 11) к датчику 1, находящемуся в центре заряда, но оно падает, и это указывает на то,

что точки воспламенения на поверхности удара не расширяются, усиливая реакцию.

В течение примерно $40 \div 50$ мкс после удара давление внутри заряда непрерывно растет (датчик 1), что свидетельствует о воспламенении топлива в результате экструзии, а не удара. Топливо воспламеняется на экструдированной поверхности, давление при воспламенении составляет $1.52 \div 4.58$ ГПа, уровень начальной реакции в результате воспламенения от экструзии — взрыв. Воспламенение вызвано не давлением после удара, а экструзией топлива в стальном корпусе. С ростом скорости удара давление на датчике 1 увеличивается из-за воспламенения в результате экструзии.

При скоростях удара $v \leq 240$ м/с площадь реагирующей поверхности топлива увеличивается, максимальное давление составляет $1.52 \div 2.76$ ГПа и достигает максимального значения на датчике 1, при этом оно непрерывно снижается по направлению к датчику 11. Давление воспламенения из-за экструзии имеет единственный пик — в области положения датчиков 1–7 на длине заряда 60 мм.

При скоростях удара $v > 240$ м/с реакция топлива заключается не только в быстром расширении площади, но и в повышении интенсивности реакции, при этом максимальное давление составляет $3.03 \div 4.58$ ГПа. Давление воспламенения имеет два пика. Это указывает на то, что критическая скорость удара при частичной детонации равна примерно 260 м/с, что хорошо согласуется с экспериментальными результатами. При скоростях удара $v \geq 280$ м/с давление увеличивается в направлении от датчика 1 до датчика 4, при этом максимальное давление достигается в месте расположения датчика 4 или 5, но начиная с датчика 6 оно уменьшается вплоть до датчика 11. Это связано с наличием стальной оболочки между датчиками 1 и 5, энергия легко накапливается, и после воспламенения реакция сильно интенсифицируется. Когда плоскость реакции пересекает датчик 5, стальная оболочка заменяется алюминиевым стаканом (см. рис. 2), прочность которого меньше, поэтому давление и уровень реакции также падают. Уровень реакции топлива, ограниченного оболочкой, зависит от скорости удара и прочности оболочки. Экспериментальные результаты Susan-теста подтверждают этот вывод. Как показано на рис. 5, алюминиевый стакан и топливо деформировались после удара,

а затем расширились по ударной поверхности наружу в радиальном направлении. На ранней стадии деформации внешняя поверхность снаряда выглядит как правильный круговой цилиндр, алюминиевый стакан и заряд топлива изменились только по форме, и алюминиевый стакан по-прежнему сохраняет вид целого. По мере того, как снаряд приближается к мишени, нагрузка от стального корпуса приводит к появлению продольных трещин на ударной поверхности алюминиевого стакана, открывая проходы, через которые выталкивается топливо и появляется свечение. Энергия разрыва, связанная с кольцевой нагрузкой и ведущая к разрушению корпуса, является основным фактором, приводящим к ранним изменениям зазоров, наблюдаемых при смещении снаряда. Зазоры проходят только в слегка напряженную толстостенную область алюминиевого стакана. По мере того, как снаряд продолжает продвигаться к мишени, в начальной стадии сегменты гильзы могут изгибаться вверх с небольшим дальнейшим проникновением в ранние трещины. Соотношение между раскрытием зазора и скоростью потока будет меняться в зависимости от скорости удара. Очаги воспламенения, вызванные ударом о поверхность, распространяются медленно, уровень реакции — непрореагированное топливо, горение и дефлаграция, что указывает на то, что общий уровень реакции топлив РВТ формируется не за счет развития воспламенения на ударной поверхности.

В период времени $50 \div 80$ мкс на экструдированной поверхности появляются точки воспламенения, уровень реакции — горение или дефлаграция. Эта часть Susan-теста называется экструдированной стадией. На этом этапе частицы топлива на экструдированной поверхности попадают между другими частями топлива и стальным корпусом, начавшаяся низкоуровневая реакция (горение или дефлаграция) усиливается в экструдированной стадии до взрыва или частичной детонации.

На основе экспериментальных и численных результатов реакцию РВТ-топлив можно свести к двум основным стадиям. Первая — воспламенение при ударе и последующее усиление реакции, вторая — воспламенение при экструзии и после этого также усиление реакции. Механизмы воспламенения в Susan-тесте в основном заключаются в термическом разложении твердых наполнителей, таких как Al, пер-

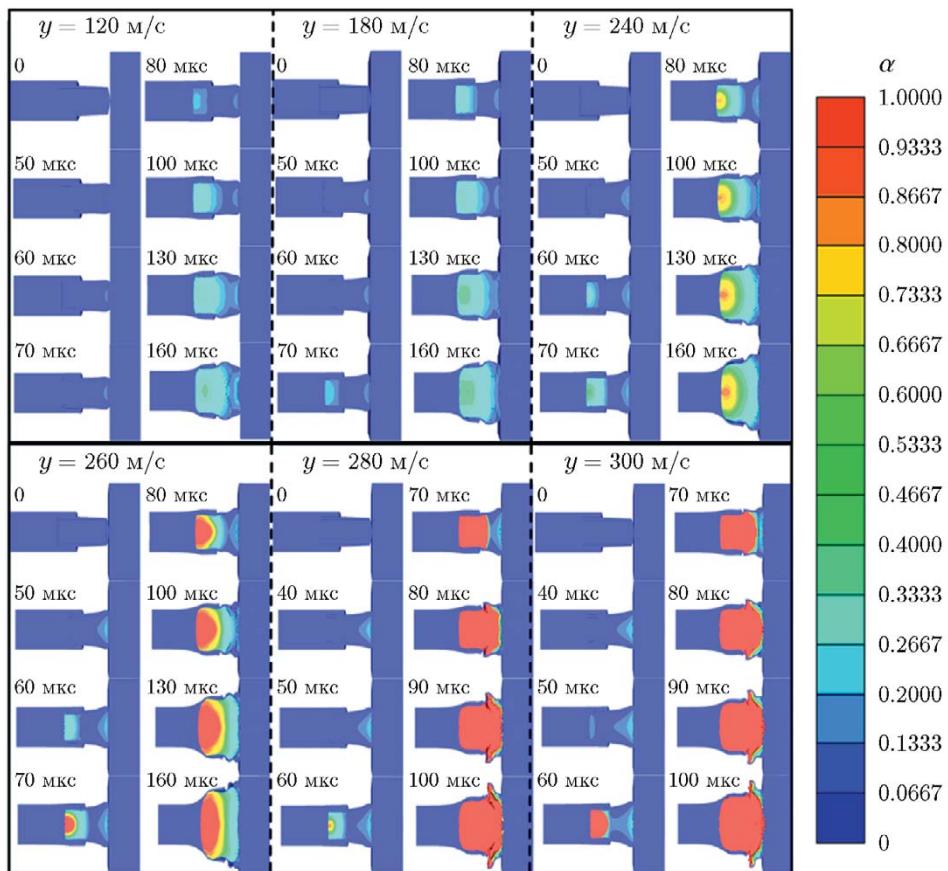


Рис. 5. Поля реагирования топлива (α) при моделировании ударов со скоростями 120, 180, 240, 260, 280 и 300 м/с

хлорат аммония (ПХА) и октоген, при ударной экструзии, трении в потоке и т. д. Заряды РВТ-топлив без оболочки могут воспламеняться при ударе о стальную пластину со скоростью 136 м/с [7]. Низкотемпературное разложение ПХА вызывает экзотермический пик октогена, а газообразные продукты, выделяющиеся при его разложении, ускоряют дальнейшее разложение ПХА. Следовательно, в Susan-тесте РВТ-топлив образование точек воспламенения на ударной поверхности начинается с разложения ПХА. При дальнейшем движении снаряда к мишени топливо не может растекаться по ударной поверхности из-за наличия стальной оболочки. Давление реакции топлива и давление экструзии стальным корпусом растут, что приводит к резкому повышению уровня реакции, вплоть до взрыва и даже частичной детонации. Чем выше скорость удара, тем интенсивнее экструзионное воспламенение РВТ-топлива, и чем прочнее оболочка, тем выше уровень реакции. Уровень реакции части

топлива (длиной около 40 мм), ограниченной стальной оболочкой, доминирует над общим уровнем реакции в Susan-тесте. Таким образом, доминирующим процессом реакции РВТ-топлива в Susan-тесте является воспламенение путем экструзии и нарастание интенсивности реакции после воспламенения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты Susan-тестов вместе с численными расчетами по модели Ли — Тарвера позволили определить чувствительность РВТ-топлива к удару и его поведение после удара. Предложены механизмы воспламенения и объяснена доминирующая стадия реакции, что имеет большое значение для безопасного обращения с РВТ-топливами. Основные выводы следующие.

(1) По мере увеличения скорости удара в диапазоне 120 \div 300 м/с относительная высвобождаемая энергия возрастает, в 20 проведенных Susan-тестах она изменялась от мини-

мального значения 24.31 % до максимального 57.67 %. РВТ-топлива проявляют сильную реакцию при ударе с низкой скоростью и чувствительны к условиям разрушения.

(2) Судя по стальным частям сборки, после удара с низкой скоростью уровень реакции РВТ-топлив — взрыв и даже частичная детонация, при этом уровень повышается с увеличением скорости удара. Пороговая скорость удара при частичной детонации составляет примерно 260 м/с, что совпадает как с экспериментальными, так и с численными результатами.

(3) Воспламенение РВТ-топлива происходит в результате двух процессов: удара и экспрессии. Термическое разложение твердых наполнителей РВТ-топлива, таких как алюминий, перхлорат аммония и октоген, обусловлено процессами ударного выдавливания, трения потока и т. д.

(4) Сильная реакция РВТ-топлива возникает в результате сочетания удара и ограничения части заряда стальным корпусом (длиной около 40 мм), стянутым кольцами. При ударе с низкой скоростью экструдированное РВТ-топливо доминирует в реакции Susan-теста.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при финансовой поддержке National Natural Science Foundation of China (grant 12272184).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной статьи заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Li Y. B., Zheng X. Influence of crystal characteristics on reaction for HMX-based pressed PBXs in the Susan impact test // Sci. Technol. Energ. Mater. — 2016. — V. 77, N 1-2. — P. 34–39.
2. Reaugh J. E., Jones A. G. Mechanical damage, ignition, and burn: experiment, model development, and computer simulations to study high-explosive violent response (HEVR) // Rep. of the Lawrence Livermore Nat. Lab. — Livermore, CA, USA, 2010.
3. Ma D. Z., Chen P. W., Dai K. D., Zhou Q. Specimen size effect of explosive sensitivity under low velocity impact // J. Phys.: Conf. Ser. — 2014. — V. 500, N 5. — 052026. — DOI: 10.1088/1742-6596/500/5/052026.
4. Van der Heijden A. E. D. M., Bouma R. H. B. Confocal scanning laser microscopic study of the RDX defect structure in deformed polymer-bonded explosives // Propell., Explos., Pyrotech. — 2016. — V. 41, N 5. — P. 875–882. — DOI: 10.1002/prep.201500267.
5. Yang K., Wu Y. Q., Huang F. L., Ming L. Numerical simulations of mechanical and ignition-deflagration responses for PBXs under low-to-medium-level velocity impact loading // J. Hazard. Mater. — 2017. — V. 337. — P. 148–162. — DOI: 10.1016/j.jhazmat.2017.05.008.
6. Preston D. N., Brown G. W., Tappan B. C., Oshwald D. M., Koby J. R., Schoonover M. L. Drop weight impact measurements of HE sensitivity: modified detection methods // J. Phys.: Conf. Ser. — 2014. — V. 500, N 18. — 182033. — DOI: 10.1088/1742-6596/500/18/182033l.
7. Yang N., Ma T., Liu J. P., Bai D. Y., Li Y., Wang X., Huang Y. S., Liu D. B., Xu S. Influences of HMX contents on potential reaction violence and fragmentation degree of PBT-propellants after impact load // AIP Adv. — 2022. — V. 12, N 8. — 085202. — DOI: 10.1063/5.0099253.
8. Wallace I. G. Spigot intrusion // 26th Department of Defense Explosives Safety Seminar, Miami, FL, USA, 16–18 August, 1994.
9. Chidester S. K., Tarver C. M., Garza R. Low amplitude impact testing and analysis of pristine and aged solid high explosives // 11th Int. Detonation Symp., Snowmass, CO, USA, 31 August — 4 September, 1998.
10. Kim H. S., Park B. S. Characteristics of the insensitive pressed plastic bonded explosive, DXD-59 // Propell., Explos., Pyrotech. — 1999. — V. 24, N 4. — P. 217–220. — DOI: 10.1002/(SICI)1521-4087(199908)24:4<217::AID-PREP217>3.0.CO;2-A.
11. Gao D. Y., Zheng B. H., Huang H. J., Cao L. X., Cao W., Wen S. G., Wen W., Lu X. J. Effect of polymer additives on impact sensitivity and power of composition B // Chin. J. Energ. Mater. — 2017. — V. 25, N 4. — P. 326–332. — DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.04.010.
12. Ruan Q. Y., Chen Q. Z. Safety evaluation of explosives by Susan test // Explos. Shock Waves. — 1989. — V. 9, N 1. — P. 68–72. — (in Chinese).
13. Dai X. G., Han D. X., Xiang Y., Li T. The measurement and numerical simulation of the projectile deformation in Susan test // Chin. J. Energ. Mater. — 2004. — V. 12, N 4. — P. 235–238. — DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2004.04.010.
14. Humphrey J. R. Safety handling characteristics of LX-04-1 // Rep. of the Lawrence Livermore Nat. Lab. — Livermore, CA, USA, 1996.

15. Weston A. M., Green L. G. Data analysis of the reaction behavior of explosive materials subjected to Susan test impacts // Rep. UCRL-13480. — Lawrence Radiation Lab., Livermore, CA, USA, 1970.
16. Horie Y. Hot spots, high explosives ignition, and material microstructure // Mater. Sci. Forum. — 2014. — V. 767. — P. 3–12. — DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.767.3.
17. Tarver C. M., Urtiew P. A., Chidester S. K., Green L. G. Shock compression and initiation of LX-10 // Propell., Explos., Pyrotech. — 1993. — V. 18, N 3. — P. 117–127. — DOI: 10.1002/prep.19930180302.
18. Kong X. S., Wu W. G., Li J., Chen P., Liu F. Experimental and numerical investigation on a multi-layer protective structure under the synergistic effect of blast and fragment and fragment loadings // Int. J. Impact Eng. — 2014. — V. 65. — P. 146–162. — DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2013.11.009.
19. Browning R. V., Scammon R. J. Influence of mechanical properties on non-shock ignition // Proc. of 12th Int. Detonation Symp., 2002.
20. Xiao J. G., Wang Y. X., Zhou D. M., Zhou C. L., Li X. R. Research on the impact-induced deflagration behavior by aluminum/teflon projectile // Crystals. — 2022. — V. 12, N 4. — 471. — DOI: 10.3390/cryst12040471.
21. Kou Y. F., Chen L., Lu J. Y., Geng D. S., Chen W., Wu J. Y. Assessing the thermal safety of solid propellant charges based on slow cook-off tests and numerical simulations // Combust. Flame. — 2021. — V. 228. — P. 154–162. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2021.01.043.
22. Liu R., Chen P. W. Modeling ignition prediction of HMX-based polymer bonded explosives under low velocity impact // Mech. Mater. — 2018. — V. 124. — P. 106–117. — DOI: 10.1016/j.mechmat.2018.05.009.
23. Qin J. G., Liang W., Chen R., Lu F. Y. Experimental and simulation study on the ignition criterion of JHL-3 under non-shock loading // Propell., Explos., Pyrotech. — 2021. — V. 46, N 4. — P. 537–547. — DOI: 10.1002/prep.202000237.
24. Chen J. K., Ching H. K., Allahdadi F. A. Shock-induced detonation of high explosives by high velocity impact // J. Mech. Mater. Struct. — 2007. — V. 2, N 9. — P. 1701–1721. — DOI: 10.2140/jomms.2007.2.1701.
25. Liu X., Zhang Q. M. Numerical simulation on shock initiation of double-shell charges by high velocity impact // Appl. Mech. Mater. — 2012. — V. 187. — P. 3–7. — DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.187.3.
26. Jiang Y. Z., Wang W. L., Huang X. F., Fu L., Fan Z. Q. Numerical simulation and analysis on the impact effect of cylindrical projectile impacting shelled explosive // Adv. Mater. Res. — 2013. — V. 710. — P. 320–324. — DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.710.320.
27. Wang Z. J., Qiang H. F., Geng B., Geng T. J. Numerical simulation of fragment impacting solid rocket motors // AIP Adv. — 2022. — V. 12, N 5. — 055204. — DOI: 10.1063/5.0088412.
28. Pang S. L., Chen X., Xu J. S. Numerical simulations of sympathetic detonation of solid rocket motors // J. Phys.: Conf. Ser. — 2022. — V. 2235, N 1. — 012014. — DOI: 10.1088/1742-6596/2235/1/012014.
29. Wang Z. Q., Wang L. Q., Zhen F. Numerical simulation of deflagration to detonation transition in high-energy propellant // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. — 2019. — V. 538, N 1. — 012051. — DOI: 10.1088/1757-899X/538/1/012051.
30. Wen Y. S., Dai X. G., Han Y., Xiang Y. Reaction characteristic for various scale explosive under mild impact // J. Energ. Mater. — 2014. — V. 32, supp1. — S41–S50. — DOI: 10.1080/07370652.2013.820808.
31. Xiao Y. C., Fan C. Y., Wang Z. J., Sun Y. Coupled mechanical-thermal model for numerical simulations of polymer-bonded explosives under low-velocity impacts // Propell., Explos., Pyrotech. — 2020. — V. 45, N 5. — P. 823–832. — DOI: 10.1002/prep.201900345.
32. Huang X. C., Yan Y. X., Hao Z. M., Zhu J. S. Numerical modeling of shock initiation of PBX by projectile impact: safety analysis of structures with HE under abnormal impact condition // 2nd Int. Conf. on Computational Modelling and Simulation. — 2010. — P. 278–281. — DOI: 10.1109/ICCMS.2010.272.
33. National Military Standard of China, Test method of safety for insensitive high explosive. Pt 8: Susan test, GJB 8142.8, 201. — (in Chinese).
34. Recommendations on the Transport of Dangerous Goods: Manual of Tests and Criteria, 4 Ed., United Nations, ST/SG/AC.10/11/Rev4. — New York, USA; Geneva, Swiss, 2003.
35. Li Y. H., Yang X. Y., Wen Y. Q., Xiong S. H., Li X. G. Determination of Lee—Tarver model parameters of JO-11C explosive // Propell., Explos., Pyrotech. — 2018. — V. 43, N 10. — P. 1032–1040. — DOI: 10.1002/prep.201800038.

Поступила в редакцию 27.03.2023.

После доработки 21.04.2023.

Принята к публикации 24.05.2023.