УДК 536.46

ЭКСПЕРИМЕНТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗБЫТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ ЗА ПЛАСТИНОЙ ПРИ УДАРЕ РЕАГИРУЮЩИМ ЭЛЕМЕНТОМ ИЗ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА/АЛЮМИНИЯ/ВОЛЬФРАМА

F. Y. Xu¹, J. Kang¹, H. F. Wang²

¹School of Aerospace Engineering, Guizhou Institute of Technology, Guizhou, Guiyang 550003, China xufengyue_bgc@163.com

²State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology Beijing 100081, China

Теоретически и экспериментально проанализировано избыточное давление за пластиной, вызванное высокоскоростным ударом летящего реагирующего элемента из ПТФЭ/Al/W. Энергия реагирующих материалов ПТФЭ/Al/W рассчитана путем анализа химической реакции компонентов. С использованием теории одномерной ударной волны и характеристик энерговыделения реагирующего элемента разработана аналитическая модель избыточного давления за пластиной. На основе экспериментальных данных получена зависимость потери массы инициированного реагирующего материала от скорости соударения с пластиной алюминия и от ее толщины. Результаты показывают, что разработанная теоретическая модель может быть использована для оценки избыточного давления в условиях эксперимента при ударе реагирующим элементом по алюминиевой пластине.

Ключевые слова: реагирующий элемент, запреградное избыточное давление, ПТФЭ/Al/W, энерговыделение, моделирование.

DOI 10.15372/FGV20230313

ВВЕДЕНИЕ

Реагирующий материал обычно изготавливают путем предварительной обработки, смешивания, прессования и спекания фторполимерной матрицы и наполнителей. В настоящее время в качестве фторполимеров используются политетрафторэтилен (ПТФЭ), гексафторпропилен, винилиденфторид и т. д. Наполнителями обычно являются металл, сплав, интерметаллическое соединение, термит и др. [1–3]. В отличие от традиционного металлического, реагирующий элемент при больших нагрузках инициируется, что вызывает химическую реакцию и усиливает повреждение цели за пластиной за счет комбинированного воздействия кинетической и химической энергии [4, 5].

За последние десятилетия достигнут значительный прогресс в понимании механического отклика и энерговыделения реагирующего элемента. Чтобы понять процесс повреждения при соударении стальных, алюминиевых снарядов и снарядов из ПТФЭ/АІ в оболочке с металлическими пластинами, проведены эксперименты по баллистическому удару [6]. Показано, что различная масса облака осколков и их пространственное распределение зависят от уровня баллистической нагрузки.

Более того, после пробивания пластин снарядами из ПТФЭ/Аl наблюдались сильные реакции дефлаграции [6]. В [7] процесс деформации композитов ПТФЭ/Al, вызванной ударом, исследовали путем комбинирования методов: сжатия на установке Instron, экспериментов со стержнем Гопкинсона и численного моделирования. В работе [8] на основе ударных экспериментов проанализировано влияние размера частиц Al на характеристики инициирования композитов ПТФЭ/Al.

Зависимость между ударным давлением и временем, которое проходит между ударом и инициированием, исследовалась в [8, 9]. Установлено, что в экспериментах на воздухе это время значительно меньше, чем в опытах в вакууме [9]. В [10] изучалось воспламенение реагирующих материалов ПТФЭ/Аl прямым, косвенным и двухступенчатым ударом [10]. В [11, 12] методом численного моделирования выявлены три механизма фрагментации гранулированных композитов Al—W при взрыв-

[©] Xu F. Y., Kang J., Wang H. F., 2023.

ной нагрузке. В работе [13] исследовали характер фрагментации и распределение облака осколков при ударе реагирующего элемента по стальной пластине со скоростями 500 ÷ 2000 м/с. Результаты показали, что с увеличением скорости удара распределение осколков изменялось от распределения Пуассона к распределению по степенной функции.

В работах [14, 15] авторы предложили использовать калориметрию с вентилируемой камерой для оценки энерговыделения энергетических материалов. В [16–18] по результатам баллистических ударных экспериментов проанализировано влияние скорости удара и состава реагирующего материала на избыточное давление за пластиной. Исследования [19–23] по улучшению механических свойств реагирующего материала, механизма разрушения и процесса повреждения цели позволили выработать рекомендации по его применению.

Теоретический анализ в статье направлен на оценку энерговыделения заданного состава реагирующих материалов и создание математической модели для анализа избыточного давления за пластиной, вызванного реагирующим элементом ПТФЭ/Al/W.

1. ЭКСПЕРИМЕНТ

Эксперименты по удару по алюминиевым пластинам с регистрацией избыточного давления за пластиной проводились в испытательной камере объемом 27 л и диаметром 220 мм (рис. 1). В качестве передней крышки камеры использовались алюминиевые пластины 2024-ТЗ толщиной 3, 6 и 10 мм. Порошковая смесь имела следующий состав (по массе): 11.3 % ПТЭФ, 7.5 % Al и 81.2 % W. Средние размеры реагирующих элементов плотностью 7.7 г/см³ составляли Ø11.0 × 10.7 мм, а средняя масса — 7.83 г. Для измерения избыточного давления в камере использовался датчик давления AK-1. Дополнительные детали проведения экспериментов представлены в [17].

Типичный профиль избыточного давления Δp , зарегистрированный системой сбора данных TST3206, показан на рис. 2. Полное давление — это исходный сигнал, а квазистатическое — сигнал после фильтрации. Рис. 3 иллюстрирует процесс энерговыделения при соударении цилиндрического реагирующего элемента ПТФЭ/Al/W с алюминиевой пластиной. Процесс энерговыделения можно разделить на три стадии. Во-первых, элемент проникает в



Рис. 1. Схема испытательной камеры



Рис. 2. Типичный профиль избыточного давления в камере:

1 — полное давление, 2 — квазистатическое давление

пластину и перфорирует ее. Некоторое количество реагирующего материала было инициировано и воспламенилось во время проникновения. На видеокадрах рис. 3, б, в наблюдается пламя. Во-вторых, инициированный реагирующий материал сгорает на обратной стороне пластины. На этом этапе избыточное давление за пластиной создавалось за счет химической реакции в камере (см. рис. 3,г). И наконец, в третьих, из-за вентилирования через пробитое отверстие избыточное давление в камере постепенно уменьшается до тех пор, пока внутреннее и внешнее давление не приходят в равновесие. В процессе вентилирования в пробитом отверстии формировался выброс пламени (см. рис. 3, d, e).



Рис. 3. Типичные видеокадры ударного эксперимента в разные моменты времени

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

2.1. Теоретическая энергия реагирующих материалов ПТФЭ/AI/W

Реагирующий элемент ПТФЭ/Al/W обычно изготавливают путем смешивания, прессования и спекания порошковой смеси. Массовое соотношение компонентов

$$m_{(\text{PTFE})}: m_{(\text{Al})}: m_{(\text{W})} = x: y: z.$$
 (1)

Добавление вольфрамовых частиц предназначено для увеличения плотности элемента, чтобы улучшить его проникающую способность. Когда химическая реакция инициируется, алюминия обычно достаточно, чтобы обеспечить полную реакцию ПТФЭ с алюминием. Кроме того, следует отметить, что остаточный алюминиевый порошок реагирует с кислородом воздуха.

Уравнение химической реакции с участием алюминия и ПТФЭ имеет вид

$$3C_2F_4 + 4Al = 4AlF_3 + 6C.$$
 (2)

На основании уравнений (1) и (2) выделившаяся энергия e_1 в расчете на массу реагирующего материала ПТФЭ/Al/W может быть выражена следующим образом:

$$e_1 = \frac{xe_0}{(x+y+z)\cdot 73.5\,\%} \quad [\kappa \square ж/r], \qquad (3)$$

где e_0 — теоретическая энергия материалов ПТФЭ/Аl при их массовом соотношении

73.5 : 26.5, равная 14.15 кДж/г [14]. Следует отметить, что e_1 означает энергию, полученную только в результате химической реакции с участием алюминия и ПТФЭ (см. уравнение (2)).

Как правило, при составлении рецептуры реагирующих материалов доля алюминия должна быть достаточной, чтобы ПТФЭ полностью прореагировал, поэтому необходимо учитывать химическую реакцию с участием остаточного алюминия и кислорода в воздухе:

$$4Al + 3O_2 = 2Al_2O_3.$$
 (4)

В этом случае высвобождаемая энергия e_2 в пересчете на массу реагирующего материала ПТ Φ Э/Al/W может быть записана в виде

$$e_{2} = \frac{Q_{1}}{2} \frac{M_{r(\text{Al}_{2}\text{O}_{3})}}{M_{r(\text{Al})}} \times \frac{y \cdot 73.5\% - x \cdot 26.5\%}{(x+y+z) \cdot 73.5\%} \quad [\kappa \Pi \text{ж}/\text{r}], \qquad (5)$$

где $M_{r(Al_2O_3)}$ — относительная молекулярная масса Al_2O_3 , $M_{r(Al)}$ — относительная молекулярная масса Al, Q_1 — энергия химической реакции (4), равная 16.43 кДж/г [24]. Отметим, что e_2 — это энергия, полученная только в результате химической реакции с участием остаточного алюминия и кислорода (см. уравнение (4)).

Для заданных массовых отношений компонентов состава теоретическая энергия *e* в расчете на массу реакционноспособного материала ПТФЭ/Al/W составляет

$$e = e_1 + e_2.$$
 (6)

Предполагается, что массовая доля Al в реагирующих материалах ПТФЭ/Al/W равна 20 %. Влияние массовой доли ПТФЭ на теоретическую энергию и плотность определялось путем расчета плотности многокомпонентного композита с использованием уравнений (1)–(6) и показано на рис. 4. Видно, что с увеличением массовой доли ПТФЭ теоретическая плотность уменьшается, а теоретическая энергия постепенно увеличивается.

Следует отметить, что проникающая способность реагирующего элемента растет с увеличением плотности. Следовательно, необходимо разумно разработать рецептуру реагирующих материалов на основе характеристик уязвимости целей. В качестве необходимого усло-



Рис. 4. Влияние массовой доли ПТФЭ на теоретическую энергию (штриховая линия) и плотность метаемого образца (сплошная линия)

вия реагирующий элемент должен эффективно инициироваться и перфорировать пластину. Затем энерговыделение за пластиной должно быть максимально увеличено, чтобы усилить избыточное давление, обеспечивая высокий уровень разрушения цели за пластиной.

2.2. Моделирование избыточного давления за пластиной

При разработке математической модели для анализа запреградного избыточного давления форма реагирующего элемента предполагалась цилиндрической. На основе теории одномерных ударных волн ударное давление p_0 определялось из закона сохранения импульса [25]:

$$p_0 = v_p \frac{\rho_p U_p \rho_t U_t}{\rho_p U_p + \rho_t U_t},\tag{7}$$

где v_p — скорость метаемого элемента при ударе, ρ — плотность материала, U — скорость ударной волны. Здесь и везде далее нижние индексы p и t обозначают метаемое тело и цель соответственно.

Скорость ударной волны Uвыражается в виде

$$U_p = c_p + s_p u_p, \qquad U_t = c_t + s_t u_t, \qquad (8)$$

где c — скорость звука, u — массовая скорость, s — коэффициент; для алюминия марки 2024-T3 $c = 5\,328$ м/с и s = 1.338, а для реагирующего материала $c = 1\,350$ м/с и s = 2.26 [25]. С учетом затухания ударной волны и действия отраженной волны разрежения длина инициируемого участка элемента L_i при перфорации составляет

 $L_i = \min(L_1, L_2),$

где

(9)

$$L_1 = \ln(p_0/p_c)/\delta,\tag{10}$$

$$L_2 = h \frac{U_p [1 + (U_t - u_t)/c_t]}{U_t [1 - (U_p - u_p)/c_p]},$$
(11)

 p_c — пороговое давление инициирования, ГПа, δ — эмпирическая константа, связанная со свойствами материала [25], h— толщина пластины мишени, c— скорость волны разрежения.

Таким образом, формула для массы инициированного участка элемента имеет вид

$$m_i = \frac{\pi}{4} \rho_p L_i D_p^2, \tag{12}$$

где ρ_p и D_p — плотность и диаметр цилиндрического метаемого элемента.

Расчет по уравнению (12) дает общую инициированную массу во время удара и проникания. На самом деле, следует учитывать потерю массы образца при ударе и проникании, т. е.

$$m_i = m_{r,l} + m_{r,h},$$
 (13)

где $m_{r,h}$ — эффективная реакционная масса после перфорации пластины, которая напрямую влияет на рост избыточного давления в экспериментальной камере, а $m_{r,l}$ — потеря инициированного материала при ударе и проникании. Кроме того, на потерю массы существенное влияние оказывают параметры удара.

Увеличение энергии ΔE в экспериментальной камере, вызванное инициированным элементом, определяется по формуле

$$\Delta E = em_{r,h}.\tag{14}$$

Связь между энергией, выделяемой в испытательной камере, и избыточным давлением в ней можно записать в виде [14, 15]

$$\Delta p = \frac{\gamma - 1}{V} e m_{r,h},\tag{15}$$

где V — объем камеры, γ — показатель адиабаты. Используя уравнения (12) и (13), уравнение (15) можно переписать в виде

$$\Delta p = \frac{\gamma - 1}{V} e \left(\frac{\pi}{4} \rho_p L_i D_p^2 - m_{r,l}\right).$$
(16)

2.3. Потеря массы инициированного материала

В настоящее время трудно получить аналитическое выражение для потери массы инициированного материала $m_{r,l}$, поэтому полезно представить потерю массы как функцию толщины и скорости пластины:

$$m_{r,l} = f(h, v_p). \tag{17}$$

В нашей предыдущей работе проведены баллистические ударные эксперименты для исследования избыточного давления за пластиной при воздействии цилиндрического элемента ПТФЭ/Al/W плотностью 7.7 г/см³ [17]. Основываясь на экспериментальных данных [17], эффективную реакционную массу $m_{r,h}$ после перфорации пластины и потерю массы инициированных материалов $m_{r,l}$ можно рассчитать с помощью уравнений (12), (13), (15). Результаты расчетов приведены в таблице. Масса реагирующего элемента в опытах 7.83 г.

Исходя из данных в таблице, с использованием метода наименьших квадратов (бинарного квадратичного полиномиального подбора) полиномиальное выражение уравнения (17) можно представить в виде

$$m_{r,l} = 14.05 - 1.1h - 0.0125v_p + 0.1h^2 + 9.7 \cdot 10^{-5}h \cdot v_p + 3.3 \cdot 10^{-6}v_p^2, \quad (18)$$

где размерность h - мм, а $v_p - \text{м/c}$.

Расчетные результаты воздействия реагирующего элемента на алюминиевые пластины толщиной 3, 6 и 10 мм, полученные с использованием уравнений (16) и (18), показаны на рис. 5. Максимальное избыточное давление на этих рисунках соответствует реакции полностью инициированного элемента без потери массы. В этом случае инициированная масса равна всей массе реагирующего элемента.

Результаты показывают, что параметры снаряда и мишени оказывают значительное влияние на избыточное давление за пластиной, особенно в случае удара по толстой пластине или при ударе по ней с низкой скоростью снаряда. Причины большого расхождения результатов в этих случаях могут быть следующими. С одной стороны, при ударе по толстой пластине или ударе по ней с малой скоростью время после удара до перфорации пластины будет расти, что приведет к увеличению потери массы

Эффективная реакционная масса $\left(m_{r,h} ight)$
после перфорации пластины и потеря массы
инициированных реагирующих
материалов $(m_{r,l})$ в экспериментах

Толщина пластины, мм	U, м/с	Δp , ΜΠα	$m_{r,h},$ г	<i>т</i> , <i>l</i> , г
3	712	0.08	1.67	4.63
	898	0.15	3.12	3.29
	1 1 2 0	0.20	4.17	2.35
	1309	0.25	5.21	1.39
	1512	0.27	5.63	1.05
6	709	0.17	3.54	4.28
	905	0.21	4.38	3.45
	1 102	0.27	5.63	2.20
	1300	0.32	6.67	1.16
	1508	0.35	7.29	0.54
10	715	0.05	1.04	6.79
	910	0.12	2.50	5.33
	1 108	0.16	3.33	4.50
	1 302	0.19	3.96	3.87
	1516	0.20	4.17	3.66

за счет химической реакции и пробивного выброса. С другой стороны, при ударе и пробитии возникает грибовидный эффект от реагирующего элемента [25]. Более того, этот грибовидный эффект постепенно усиливается с ростом толщины мишени. В этом случае потеря массы за счет дробления на краю реагирующего элемента увеличится.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе анализа химических реакций и теории одномерной ударной волны путем теоретического моделирования изучен эффект (возникновение) избыточного давления за пластиной, вызванного ударом реагирующего элемента ПТФЭ/Al/W. Результаты показывают, что массовая доля политетрафторэтилена в реакционноспособных материалах ПТФЭ/Al/W значительно влияет на теоретическую энергию и плотность материала. Если реагирующий элемент пробивает пластину, то энергия, высвобождаемая за преградой, должна быть максимально увеличена, чтобы усилить действие



Рис. 5. Расчетные (линия) и экспериментальные (точки) результаты при ударе метаемого элемента по пластине толщиной 3 (a), 6 (b), 10 мм (b)

избыточного давления для сильного повреждения запреградных целей.

На основе экспериментальных данных получено выражение для определения потери массы инициированных реагирующих материалов. Результаты показывают, что предложенная теоретическая модель может быть использована для анализа и оценки избыточного давления при ударе метаемого реагирующего элемента по алюминиевой пластине в экспериментальных условиях.

Работа выполнена при финансовой поддержке National Natural Science Foundation of China (grant No. 11902087), Start-up Funds for High-level Personnel Research of the Guizhou Institute of Technology (No. XJGC20190957), Youth Science and Technology Talents Growth Project of Guizhou Provincial Education Department (grant No. Qian Jiao He KY [2022]344).

ЛИТЕРАТУРА

- Geng B. Q., Wang H. F., Yu Q. B., Zheng Y. F., Ge C. Bulk density homogenization and impact initiation characteristics of porous PTFE/Al/W reactive materials // Mater. — 2020. — V. 13, N 10. — 2271. — DOI: 10.3390/ma13102271.
- Nable J., Mercado A., Sherman A. Novel energetic composite materials // MRS Online Proc. Library. — 2005. — V. 896. — 103. — DOI: 10.1557/PROC-0896-H01-03.
- 3. Martinez H., Zheng Z. Y., Dolbier W. R. Energetic materials containing fluorine. Design, synthesis and testing of furazancontaining energetic materials bearing a pentafluorosulfanyl group // J. Fluorine Chem. — 2012. — V. 143. — P. 112–122. — DOI: 10.1016/j.jfluchem.2012.03.010.
- 4. **DE Technologies Inc.** Reactive fragment warhead for enhanced neutralization of mortar, rocket, & missile threats. ONR-SRIR: N04-903, 2006. http://www.detk.com.
- Vine T., Stubberfield J., Jobson D., Kirkpatrick D., McLean S. Penetration and ignition performance of reactive fragments // 29th Int. Symp. on Ballistics, Edinburgh, Scotland, UK, May 9–13, 2016.
- 6. Sorensen B. High-velocity impact of encased Al/PTFE projectiles on structural aluminum armor // Procedia Eng. — 2015. — V. 103. — P. 569–576. — DOI: 10.1016/j.proeng.2015.04.074.
- Raftenberg M. N., Mock W., Jr, Kirby G. C. Modeling the impact deformation of rods of a pressed PTFE/Al composite

- 8. Mock W., Jr, Holt W. H. Impact initiation of rods of pressed polytetrafluoroethylene (PTFE) and aluminum powders // AIP Conf. Proc. — 2006. — V. 845, N 1. — P. 1097–1100. — DOI: 10.1063/1.2263514.
- 9. Mock W., Jr, Drotar T. Effect of aluminum particle size on the impact initiation of pressed PTFE/Al composite rods // AIP Conf. Proc. 2007. V. 955, N 1. P. 971–974. DOI: 10.1063/1.2833292.
- Lee R. J., Mock W., Jr, Carney J. R., Holt W. H., Pangilinan G. I., Gamache R. M., Boteler J. M., Bohl D. G., Drotar J., Lawrence G. W. Reactive materials studies // AIP Conf. Proc. — 2006. — V. 845, N 1. — P. 169–174. — DOI: 10.1063/1.2263291.
- Olney K. L., Chiu P. H., Lee C. W., Nesterenko V. F., Benson D. J. Role of material properties and mesostructure on dynamic deformation and shear instability in Al—W granular composites // J. Appl. Phys. — 2011. — V. 110, N 11. — 114908. — DOI: 10.1063/1.3665644.
- Olney K. L., Nesterenko V. F., Benson D. J. Mechanisms of fragmentation of aluminumtungsten granular composites under dynamic loading // Appl. Phys. Lett. — 2012. — V. 100, N 19. — 191910. — DOI: 10.1063/1.4711768.
- Hooper J. P. Impact fragmentation of aluminum reactive materials // J. Appl. Phys. — 2012. — V. 112, N 14. — 043508. — DOI: 10.1063/1.4746788.
- 14. Ames R. G. Energy release characteristics of impact-initiated energetic materials // MRS Online Proc. Library. — 2006. — V. 896. — 308. — DOI: 10.1557/PROC-0896-H03-08.
- Ames R. G. Vented chamber calorimetry for impact-initiated energetic materials // 43rd AIAA Aerospace Sci. Meeting and Exhibit, Nevada, Reno, USA, January 10–13, 2005. — AIAA Paper 2005–279.
- 16. Wang H. F., Zheng Y. F., Yu Q. B., Liu Z. W., Yu W. M. Impact-induced initiation and energy release behavior of reactive materials // J. Appl. Phys. — 2011. — V. 110, N 7. — 074904. — DOI: 10.1063/1.3644974.
- 17. Xu F. Y., Geng B. Q., Zhang X. P., Xiao J. G., Wang H. F. Experimental study on behind-plate overpressure effect by reactive material projectile // Propell., Explos., Pyrotech. — 2017. — V. 42, N 2. — P. 192–197. — DOI: 10.1002/prep.201600086.
- 18. Cai X. M., Zhang W., Xie W. B., Ni Y. G., Li D. C., Sun Y. Initiation and energy release characteristics studies on polymer bonded explosive materials under high speed impact // Mater. Des. — 2015. — V. 68. — P. 18–23. — DOI: 10.1016/j.matdes.2014.12.004.

- Tsai J., Sun C. T. Constitutive model for high strain rate response of polymeric composites // Compos. Sci. Technol. — 2002. — V. 62, N 10-12. — P. 1289–1297. — DOI: 10.1016/S0266-3538(02)00064-7.
- 20. Wang L., Liu J. X., Li S. K., Zhang X. B. Investigation on reaction energy, mechanical behavior and impact insensitivity of W—PTFE— Al composites with different W percentage // Mater. Des. — 2016. — V. 92. — P. 397–404. — DOI: 10.1016/j.matdes.2015.12.045.
- Zhang X. F., Zhang J., Qiao L., Shi A. S., Zhang Y. G., He Y., Guan Z. W. Experimental study of the compression properties of Al/W/PTFE granular composites under elevated strain rates // Mater. Sci. Eng. A. — 2013. — V. 581. — P. 48–55. — DOI: 10.1016/j.msea.2013.05.063.
- 22. Zheng Y. F. Research on enhanced lethality effects and mechanisms of reactive materials: PhD Thesis / Beijing Institute of Technology. — Beijing, China, 2012.

- 23. Wang H. F., Zheng Y. F., Yu Q. B., Liu Z. W., Yu W. M. Experimental research on igniting the aviation kerosene by reactive fragment // Acta Armamentarii. — 2012. — V. 33, N 9. — P. 1148–1152.
- 24. **Physical Chemistry** / Tianjin University, Department of Physical Chemistry. — Higher Education Press, 2011.
- 25. Xu F. Y., Zheng Y. F., Yu Q. B., Wang Y. Z., Wang H. F. Experimental study on penetration behavior of reactive material projectile impacting aluminum plate // Int. J. Impact Eng. — 2016. — V. 95. — P. 125–132. — DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2016.05.007.

Поступила в редакцию 07.04.2022. После доработки 20.06.2022. Принята к публикации 22.06.2022.