

01

## Вероятностная модель ударного инициирования гетерогенных взрывчатых веществ

© С.А. Рашковский, Г.Г. Савенков

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского, Москва  
Специальное конструкторско-технологическое бюро „Технолог“,  
Санкт-Петербург  
E-mail: sav-georgij@yandex.ru

Поступило в Редакцию 13 января 2014 г.

Предложена модель ударного инициирования гетерогенных взрывчатых веществ, которая объясняет известный вероятностный характер механизма инициирования детонации твердых гетерогенных взрывчатых веществ. В основе модели лежит положение о первичном инициировании отдельных зерен заряда взрывчатого вещества.

Полагают, что чувствительность взрывчатых веществ (ВВ) к удару (скорость удара не выше 100 m/s) не может быть с приемлемой точностью рассчитана теоретически и поэтому требует экспериментального определения [1]. Такой подход вызывает необходимость разработки стандартных экспериментальных методов определения чувствительности ВВ, основной недостаток которых заключается в том, что фиксируется частота (вероятность) взрывов, которая является качественной характеристикой ВВ к ударным воздействиям [2]. Связано это с тем, что при одной и той же энергии удара взрывчатое превращение (детонация) осуществляется не в каждом опыте, а имеется вероятность его возбуждения [3]. Отметим, что в соответствии с ГОСТ 4545 пробы гранулированных, чешуированных, прессовочных и литевых ВВ, предназначенных для испытаний, измельчают до полного прохождения через сито с размером стороны ячеек 0.9–1.0 mm. Таким образом, по сути, производится испытание порошкообразной навески ВВ определенной массы. В настоящее время не существует ни одной модели, которая описывала бы вероятностный характер возбуждения взрыва порошкообразного ВВ [3].

Поэтому разработка вероятностной модели ударного инициирования твердых гетерогенных, в частности, порошкообразных или прессованных ВВ является актуальной, хотя и трудно выполнимой задачей. Тем не менее попытка решения указанной проблемы ударного инициирования указанных ВВ является целью данной работы.

Полагаем, что для гетерогенных ВВ ударное инициирование всегда начинается с инициирования (воспламенения) отдельных зерен независимо от природы этого воспламенения: будь то зажжение путем трансляции тепла от локализованной области динамического перегрева (схлопнувшейся поры или же другого внутреннего микроскопического очага) или же оттого, что в результате быстрого деформирования некоторые зерна вследствие исходной структурной неоднородности оказываются в „сверхкритических“ условиях, за счет чего и происходит их воспламенение, а от них процесс горения может распространиться на весь заряд. В дальнейшем горение может перейти в один из видов детонации. Отметим также, что ударное воздействие на порошковые ВВ приводит к дроблению (фрагментации) частиц ВВ и повышению за счет этого процесса их химической активности, в частности снижению температуры воспламенения частиц [4].

Инициирование отдельных зерен является лишь необходимым, но не достаточным условием для инициирования всего заряда: в зависимости от условий внешнего воздействия и характеристик заряда ВВ возможны различные исходы ударного воздействия даже при возникновении в заряде первичных очагов: либо детонация, либо его сгорание (полное или частичное), либо отсутствие видимого инициирования заряда. В последнем случае заряд ВВ остается целым, однако детальный анализ показывает, что в нем имеются отдельные сгоревшие зерна (первичные очаги) в виде участков сажи, которые, однако, не смогли инициировать весь заряд [5].

Исходя из возможных механизмов инициирования отдельного зерна (тепловой взрыв, механохимическое инициирование, трибомеханическое инициирование, пирозлектрическое и пьезоэлектрические виды инициирования) сформулируем основные представления, применимые к любому виду порошкообразного ВВ.

1. В условиях ударного нагружения гетерогенных ВВ при определенных условиях (скорости удара или интенсивности ударной волны и скорости деформации (нагружения)) в заряде возникает система мезоскопических очагов — первоначально воспламенившихся зерен, от

которых процесс горения может разойтись по всему образцу. Горение системы изолированных очагов (как крайний случай — одного очага) может либо затухнуть, если энергия очага окажется меньше критического, либо перейти в горение всего заряда и (при определенных условиях) в детонацию, если энергия первичных очагов (очага) будет больше критической.

2. При некоторой концентрации первичных очагов волны реакции от отдельных очагов будут объединяться, образуя сплошную область реакции. В этом случае возможно воспламенение заряда ВВ от первичных очагов, даже если их энергия будет существенно меньше критической, т.е. существует некоторая критическая концентрация очагов, которая зависит от их энергии, выше которой происходит воспламенение всего заряда порошкообразного ВВ. Эта критическая концентрация тем меньше, чем ближе энергия очагов к критической. Если энергия очага очагов много больше критической, то воспламенение возможно даже от одиночного очага.

3. Появление первичных очагов инициирования при ударном воздействии на заряд ВВ определяется как условиями инициирования, так и параметрами самого заряда. Поэтому концентрация первичных очагов зависит от интенсивности воздействия (скорости удара или интенсивности ударной волны), характеристик ВВ и относительной плотности заряда.

4. Возникновение первичных очагов является необходимым условием инициирования заряда ВВ.

Будем полагать, что инициирование зерна при его сжатии происходит при достижении в нем некоторого предельного (критического) напряжения  $\sigma_{cr}$ .

Относительное число зерен ВВ в заряде, которые инициируются при достигнутом среднеобъемном давлении  $p$  в заряде (т.е. отношение числа инициированных зерен в заряде к общему числу зерен в том же заряде), равно

$$n = \begin{cases} 0, & \sigma_m < \sigma_{cr} \\ \int_{\sigma_{cr}}^{\sigma_m} f(\sigma, \sigma_0, \sigma_m) d\sigma, & \sigma_m \geq \sigma_{cr} \end{cases}, \quad (1)$$

где  $\sigma_m$  — максимальное напряжение, которое может возникнуть в зернах и которое зависит от размера зерен  $d$ , плотности образца  $\rho$  и давления  $p$ .

Введение максимального напряжения  $\sigma_m$  связано с тем, что давление  $p$  характеризует лишь среднеобъемное напряжение в заряде взрывчатого вещества. Однако в силу случайной структуры такого ВВ каждая частица вещества будет подвержена своему сжимающему усилию и, следовательно, будет иметь свое напряжение  $\sigma$ , которое будет случайным, зависящим от многих факторов, в первую очередь от расположения и ориентации частицы, а также от ее размеров и формы. В этом случае, чтобы охарактеризовать механическое состояние зерен, можно ввести вероятность того, что в произвольно выбранном зерне напряжение будет равно  $\sigma$  при заданном среднеобъемном давлении в образце  $p$ . Эта вероятность описывается плотностью распределения  $f(\sigma)$ , которая зависит от среднеобъемного давления  $p$ , от плотности образца  $\rho$  и от размеров зерен  $d$ .

Из существования функции распределения и общих соображений следует, что при заданном среднеобъемном давлении  $p$  в образце и существует максимальное напряжение  $\sigma_m$ , которое может возникнуть в зернах и которое зависит от размера зерен  $d$ , плотности образца  $\rho$  и давления  $p$ . Если это напряжение превышает предел текучести материала зерен, в зернах возникают пластические деформации. Если напряжение  $\sigma_m$  превысит предел прочности зерен, начинается разрушение (фрагментация) зерен.

Напряжение в каждом отдельном зерне связано с перераспределением среднеобъемного давления  $p$  между зернами. Перераспределение среднеобъемного давления между зернами происходит за счет нормального и касательного действия зерен друг на друга. Касательное воздействие связано с наличием трения между зернами.

Очевидно, определяющими параметрами в этом процессе будут: среднеобъемное давление  $p$ , форма зерен, которая задается как типом формы (шар, параллелепипед и т.д.), так и соотношением ее характерных размеров, размер зерен  $d$ , коэффициент трения между зернами  $k_f$ , число зерен ВВ в единице объема заряда  $N_1$ , которое связано с плотностью заряда соотношением  $\rho = \rho_0 a N_1 d^3$ , где параметр  $a$  зависит только от формы зерен, например, для сферических зерен  $a = \frac{\pi}{6}$ ,  $\rho_0$  — плотность одного зерна. Тогда число зерен ВВ в единице объема заряда

$$N_1 = \frac{\rho}{\rho_0} \frac{1}{ad^3}. \quad (2)$$

Из соображений размерности и условия статического равновесия системы контактирующих зерен в заряде, нагруженном среднеобъем-

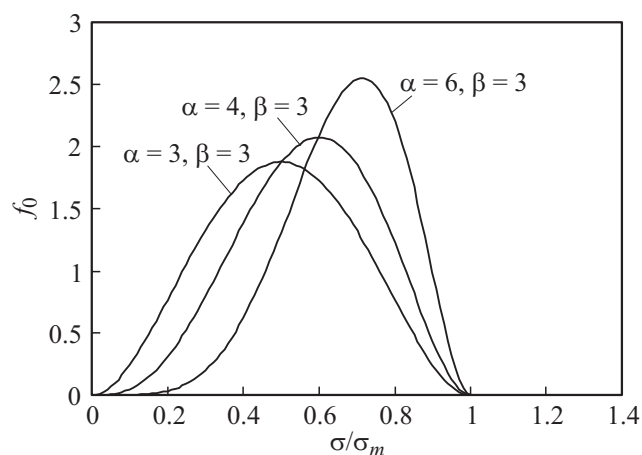


Рис. 1. Бета-распределение (6) для  $\beta = 3$  и разных значений параметра  $\alpha$ .

ным давлением  $p$ , следует, что среднее напряжение в зернах будет пропорционально  $p/N_1 d^3$  или  $p(\rho_0/\rho)$ . Это же относится и к любому другому характерному напряжению, например  $\sigma_m$ .

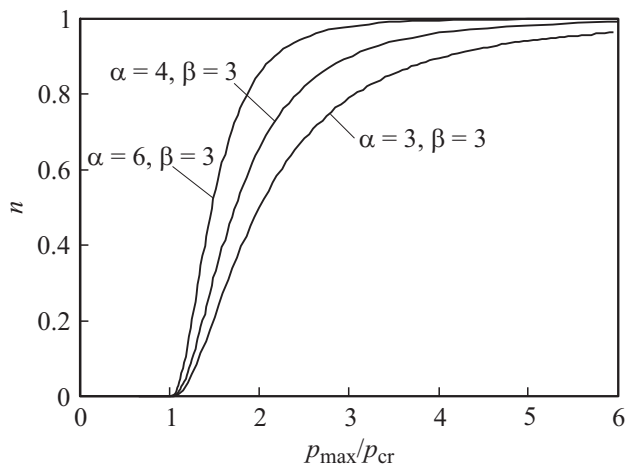
С практической точки зрения распределение  $f(\sigma)$  удобнее всего описывать функцией с минимальным числом параметров. Наиболее просто это сделать с помощью двухпараметрической функции  $f(\sigma, \sigma_0, \sigma_m)$ , где  $\sigma_0$  — среднее напряжение в зернах.

Согласно сказанному, а также из анализа размерностей можно записать

$$\sigma_m = p(\rho_0/\rho)\Phi_m(\rho), \quad (3)$$

$$\sigma_0 = p(\rho_0/\rho)\Phi_0(\rho), \quad (4)$$

функции  $\Phi_m$ ,  $\Phi_0$  зависят также от формы зерен и от свойств ВВ, в частности от коэффициента трения  $k_f$  между зернами, но не зависят (или, по крайней мере, слабо зависят) от давления. Отметим, что зависимости  $\Phi_m$ ,  $\Phi_0$  от  $\rho$  должны быть слабыми по сравнению с множителем  $\rho_0/\rho$ , поэтому с достаточной точностью можно считать  $\Phi_m$ ,  $\Phi_0$  постоянными.



**Рис. 2.** Зависимости относительного количества первичных очагов в заряде ВВ от максимального давления инициирования, рассчитанные по распределению (6), (9) при  $\beta = 3$  и разных значениях параметра  $\alpha$ .

Из соображений размерности плотность распределения  $f(\sigma)$  можно записать в виде  $f(\sigma, \sigma_0, \sigma_m) = \frac{1}{\sigma_m} f_0(\sigma/\sigma_m, \sigma_0/\sigma_m)$  или с учетом (3), (4)

$$f(\sigma, \sigma_0, \sigma_m) = \frac{1}{\sigma_m} f_0(\sigma/\sigma_m, \Phi_0/\Phi_m). \quad (5)$$

Из качественных соображений ( $f(\sigma) = 0$  при  $\sigma > \sigma_m$ ) примем  $f_0$  в виде бета-распределения

$$f_0(z) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} z^{\alpha-1} (1-z)^{\beta-1}, \quad (6)$$

где  $z = \sigma/\sigma_m$ ,  $\alpha$  и  $\beta$  — параметры согласования модели.

На рис. 1 приведена зависимость распределения (6) для  $\beta = 3$  и разных значений параметра  $\alpha$ . В соответствии с (1) при  $\sigma_m < \sigma_{cr}$  инициирование заряда в принципе невозможно.

Согласно (3) можно ввести предельное давление инициирования

$$p_{cr} = \frac{\rho/\rho_0}{\Phi_m} \sigma_{cr}. \quad (7)$$

Если максимальное давление в заряде ВВ, возникающее при ударе,  $p_{\max} < p_{cr}$ , ни одно зерно в заряде не инициируется. В этом случае инициирование заряда в принципе невозможно. Поэтому далее будем рассматривать только случай  $p_{\max} > p_{cr}$ , представляющий практический интерес. Очевидно, что

$$\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_m} = \frac{p_{cr}}{p_{\max}}. \quad (8)$$

С учетом (5) соотношение (1) принимает вид

$$n = \int_{p_{cr}/p_{\max}}^1 f_0(z) dz. \quad (9)$$

На рис. 2 приведены зависимости относительного количества первичных очагов в заряде гетерогенного ВВ от максимального давления при ударе, рассчитанные по формулам (6), (9) при  $\beta = 3$  и разных значениях параметра  $\alpha$ .

Из рис. 2 следует, что при  $p/p_{cr} > (4-8)$  (в зависимости от  $\alpha$  и  $\beta$ ) можно считать, что воспламеняются все зерна в заряде ( $n_{\max} = 1$ ). Таким образом, вероятность инициирования заряда будет определяться необходимой для этого долей зерен, которая инициируется первоначально. Определение этой необходимой доли зерен является темой отдельной работы.

## Список литературы

- [1] Пепекин В.И., Денисаев А.А., Корсунский Б.Л. // Горение и взрыв. В. 1. М.: Торус пресс, 2008. С. 48–51.
- [2] Пепекин В.И. // Горение и взрыв. В. 3. М.: Торус пресс, 2010. С. 286–291.
- [3] Физика взрыва. Т. 1 / Под ред. Л.П. Орленко. М.: Физматлит, 2003.
- [4] Бацанов С.С., Бокарев В.П., Лазарева Е.В. // ФГВ. 1989. Т. 26. № 1. С. 94–95.
- [5] Глушак Б.Л., Новиков С.А., Бельский В.М. Возбуждение процесса детонации в твердых гетерогенных взрывчатых веществах импульсными нагрузками (Обзор). Арзамас-16: ВНИИЭФ, 1993.