

погрешности определения в 1,5—2 раза, согласуется с данными, полученными при измерении ударной адиабаты тэна с $\rho = 1,72 \text{ г/см}^3$ [3], имеющими разброс такого же порядка величины. Давление на фронте волны составляет 18 кбар для НСД с $u = 2600 \text{ м/с}$ (расчеты завышают действительное значение давления), оно близко к критическому давлению инициирования нормальной детонации в тэне с $\rho = 1,73 \text{ г/см}^3$ [4]. Проведена также оценка пространственного распределения давления, получено, что на расстояниях 13, 26 и 39 мм от переднего фронта действующее на оболочку давление составляло 16, 12 и 8 кбар соответственно. Следует отметить, что полученный расчетный профиль давления характеризуется относительно медленным спадом по сравнению с профилями давления, полученными в насыпных зарядах ВВ [5, 6]. При распространении преддетонационного процесса с характерной для НСД скоростью в заряде без оболочки литого тротила, обладающего малой удельной поверхностью, наблюдался аналогичный полученному в данной работе профиль давления (при распространении процесса на большие расстояния профиль массовой скорости с отсутствием спада оставался неизменным и переход в детонацию отмечался на расстоянии 120 мм) [7]. В данной работе наличие разрушающейся оболочки при малых диаметрах заряда обеспечивает отсутствие сильных вторичных волн, могущих привести к возникновению нормальной детонации.

Полученная динамическая картина деформации стальной оболочки может быть использована для расчета степени выгорания ВВ в волне НСД.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. В. Обменин, В. А. Балыков, А. И. Коротков и др. ФГВ, 1970, 5, 4, 571.
2. А. А. Сулимов, А. В. Обменин, А. И. Коротков и др.— В кн.: Горение и взрыв. М.: Наука, 1972.
3. D. Stirpe, J. O. Johnson, J. Wackerly. J. Appl. Phys., 1970, 41, 9, 3884.
4. А. Ф. Беляев, В. К. Боболев, А. И. Коротков и др. Переход горения конденсированных систем во взрыв. М.: Наука, 1973.
5. А. В. Дубовик, В. К. Боболев. Взрывное дело, № 63/20. М.: Недра, 1967.
6. К. К. Шведов, С. А. Колдунов, А. Н. Дремни. ФГВ, 1973, 9, 3, 424.
7. А. Н. Дремни, С. А. Колдунов. Взрывное дело, № 63/20. М.: Недра, 1967.

*Поступила в редакцию 20/XII 1983,
после доработки — 13/X 1986*

ВЛИЯНИЕ СЖИМАЕМОСТИ МАТЕРИАЛА ДОБАВКИ НА СКОРОСТИ ДЕТОНАЦИИ СМЕСЕВЫХ ЗАРЯДОВ

И. М. Воскобойников, М. Ф. Гоголя, Г. В. Димза

(Москва)

Параметры детонации взрывчатых веществ снижаются при введении в заряды инертных добавок из-за сжатия, разгона и прогрева частиц добавок. Характерные времена завершения этих процессов различны, возрастают в порядке перечисления, и подбором дисперсности компонентов заряда можно реализовать ситуацию, когда за времена разложения ВВ в детонационной волне (ДВ) частицы добавки будут сжаты и вовлечены в поток продуктов взрыва, но практически не прогреваются. При этом снижение параметров детонации определяется только сжимаемостью материала добавки, информацию об особенностях изменения которой с давлением можно получить из анализа снижения параметров детонации зарядов одного ВВ разной плотности или зарядов разных веществ близкой плотности. Ниже сказанное иллюстрируется на примере сравнения скоростей детонации зарядов тротила, октогена и гексогена, содержащих хлористые натрия и калия, нитрид бора, алюминий, тальк, бензол, гексан и раствор CCl_4 и гексана с плотностью бензола. Размеры частиц добавок и ВВ 10—50 мкм и не варьировались для каждой из смесей.

Скорости детонации D измерялись либо по одновременности замыкания расположенных по длине заряда электрических датчиков, либо по развертке свечения детонации на скоростном фоторегистраторе. Погрешности измерений в отдельных сериях опытов различались, но не превышали 0,1 мм/мкс. Для сравнения подбирались заряды с близкой дисперсностью компонентов. В случае смесей тротила измеренные D несколько меньше идеальных, что отражено в значениях скоростей детонации смесей с хлористыми натрием и калием при диаметрах зарядов $d = 20$ и 30 мм (равенство или различие скоростей детонации выбранных для сравнения смесей в разных диаметрах зарядов сохраняется). Заряды малой плотности смесей тротила с нитридом бора не детонируют устойчиво при $d = 20$ мм, и все измерения выполнены с $d = 40$ мм, степень достижения идеального режима не исследовалась. Для других смесей приведенные значения, по-видимому, близки к идеальным.

Хлористые натрий и калий и нитрид бора имеют близкие начальные плотности ($\rho_0 = 2,165, 1,984$ и $2,25$ г/см³) и сжимаемости ($4,18 \cdot 10^{-2}, 5,65 \cdot 10^{-2}$ и $5,55 \cdot 10^{-2}$ ГПа⁻¹), но при сжатии хлористого калия и нитрида бора отмечены полиморфные превращения с изменением удельного объема [1—4] соответственно 0,05 и 0,13 см³/г. Измерялись скорости детонации смесей тротила с этими соединениями при нескольких плотностях зарядов, полученные значения приводятся в таблице. При равной плотности тротила в заряде $\rho_{01} = (1 - \alpha)\rho_0\rho_{02}/(\rho_{02} - \alpha\rho_0)$, где ρ_{02} — плотность добавки и α — ее массовая доля, скорости детонации смесей с хлористыми натрием и калием близки и при $\rho_0 > 1,18$ г/см³ превышают на 0,4 мм/мкс и более значения D для смесей с нитридом бора, что можно рассматривать как следствие упомянутого полиморфного превращения в нитриде бора при $p = 12,5$ ГПа. Изменение удельного объема при полиморфном превращении в хлористом калии, по-видимому, недостаточно велико, чтобы вызвать заметное дополнительное снижение параметров детонации. Для смесей гексогена с хлористым натрием и нитридом бора отмеченное различие скоростей детонации сохраняется.

Давление детонации смесевых зарядов тротила с хлористым натрием и нитридом бора при $\rho_0 = 1,38 - 1,40$ г/см³ ($\sim 11 - 10$ ГПа) несколько меньше давления полиморфного превращения в нитриде бора, хотя различие скоростей детонации есть. Возможное объяснение этому в наличии зоны повышенных давлений химпика ДВ, хотя проведение количественных оценок влияния химпика невозможно без принятия довольно спорных предположений относительно состояний вещества за фронтами ударных волн в пористых образцах.

Во второй серии опытов сравнивались величины D зарядов октогена, заполненных бензолом, который претерпевает превращения при ударном сжатии при $p > 13$ ГПа [5], раствором ССl₄ с гексаном. Раствор имеет ту же плотность, что бензол, но его составляющие не претерпевают превращений с заметным изменением удельного объема при ударном сжатии до 20 ГПа. Скорости детонации смеси октогена с бензолом на 0,3—0,4 мм/мкс меньше, чем смеси с раствором. Поскольку ударная адиабата раствора не определялась, то проведены дополнительные опыты со смесями, содержащими только гексан, в которых получено примерно такое же снижение скорости детонации, что в опытах с раствором.

В третьей серии опытов сравнивались скорости детонации смесей гексогена с алюминием и тальком. Эти добавки имеют близкую плотность (2,70 г/см³) и начальные сжимаемости $1,34 \cdot 10^{-2}$ и $1,8 \cdot 10^{-2}$ ГПа⁻¹. При введении талька в заряды гексогена отмечено заметное снижение бризантности [6], одно из возможных объяснений которого — аномальная сжимаемость талька при высоких давлениях. В проведенных опытах различие скоростей детонации смесей с алюминием и тальком, больше 0,2 мм/мкс, было при больших плотностях зарядов, что можно рассматривать как указание на аномальное изменение удельного объема талька при $p > 20$ ГПа.

Таким образом, полученные в работе значения скоростей детонации

Состав заряда	Отношение компонентов	d, мм	ρ_0 , г/см ³	D, мм/мкс	ρ_{01} , г/см ³
Тротил/NaCl	80/20	20	0,91	3,70	0,79
		20	0,97	3,90	0,85
		40	1,18	4,70	1,06
		20	1,40	5,50	1,29
		30	1,40	5,77	1,29
		20	1,49	5,88	1,38
		20	1,64	6,35	1,55
Тротил/KCl	80/20	20	0,96	3,95	0,85
		20	1,40	5,43	1,30
		30	1,40	5,74	1,30
		20	1,62	6,25	1,55
Тротил/VN	80/20	40	1,18	4,70	1,05
		40	1,38	5,00	1,26
		40	1,55	5,63	1,44
Гексоген/NaCl	80/20	20	1,66	7,50	1,57
Гексоген/KCl	80/20	20	1,66	7,50	1,59
Гексоген/VN	80/20	20	1,66	6,90	1,56
		40	1,72	7,17	1,62
		40	1,75	7,26	1,66
Гексоген/талък	80/20	30	1,25	5,95	1,10
Гексоген/талък/воск	60/35/5	20	1,66	6,30	1,44
Гексоген/талък	50/50	20	1,75	5,75	1,30
		20	2,00	6,90	1,59
Гексоген/Al	80/20	30	1,25	5,95	1,10
Гексоген/Al/воск	60/35/3	20	1,66	6,60	1,44
Гексоген/Al	50/50	20	1,76	6,15	1,31
		20	2,04	7,53	1,63
Гексоген/C ₆ H ₆	82/18	20	1,42	6,90	1,64
Октоген/C ₆ H ₆	84/16	20	1,59	7,70	1,89
Октоген/CCl ₄ /C ₆ H ₁₄	84/6,7/9,3	20	1,59	8,06	1,89
Октоген/C ₆ H ₁₄	87/13	20	1,50	8,05	1,85

исследованных смесей указывают на то, что полиморфные и иные превращения с заметным изменением удельного объема при ударно-волновом сжатии материала добавки вызывают дополнительное снижение скоростей детонации на величины, превышающие обычную погрешность измерения. Оценка по схеме [7] давлений, при которых наблюдались и не наблюдались превращения нитрида бора и талька в детонационной волне, дает соответственно значения 7,5 и 12 ГПа и 12 и 17 ГПа. Для нитрида бора это согласуется со значением 12,5 ГПа для превращений в ударных волнах. Учитывая простоту измерения скоростей детонации, изучение эффекта введения добавки в заряд может быть использовано для получения начальной информации относительно сжимаемости материала добавки и, в частности, возможности превращения с заметным изменением удельного объема в некотором диапазоне давлений, определяемом характеристиками использованного взрывчатого вещества и плотностью зарядов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. А. Ададунов, З. Г. Алиев, Л. О. Атовмян и др. Докл. АН СССР, 1967, 172, 5, 1066.
2. Л. В. Альшулер, М. Н. Павловский, В. П. Дракин. ЖЭТФ, 1967, 52, 3, 400.
3. P. W. Bridgman. Phys. Rev., 1935, 48, 905.
4. N. L. Coleburn, J. W. Folbes. J. Chem. Phys., 1968, 48, 2, 555.

5. R. D. Dick. J. Chem. Phys., 1970, 52, 12, 6021.
 6. А. Я. Аппи, Е. П. Бардин, Н. Ф. Велина. Взрывное дело, № 52/9. М.: Госгортехиздат, 1959.
 7. И. М. Воскобойников, А. А. Котомин. ФГВ, 1985, 21, 5, 93.

Поступила в редакцию 6/II 1986,
 после доработки — 7/VII 1986

РАСЧЕТ КРИТИЧЕСКОЙ ТОЛЩИНЫ ГАЗОВОГО СЛОЯ ПО ОТНОШЕНИЮ К РАСПРОСТРАНЕНИЮ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ

Ю. Н. Шебеко, А. Я. Корольченко, О. Я. Еременко
 (Балашиха)

Изучение распространения детонационных волн (ДВ) в газовых слоях конечной толщины, граничащих с твердой стенкой, представляет интерес в связи с исследованием околопредельных явлений при детонации и с необходимостью обеспечения взрывобезопасности технологических процессов. Конкуренция нагрева горючей смеси в ударной волне (УВ) и охлаждения ее за счет боковой разгрузки приводит к существованию критической толщины газового слоя $\delta_{кр}$ по отношению к стационарному или квазистационарному (пульсирующий режим) распространению ДВ. Значения $\delta_{кр}$ для некоторых газовых смесей ($2\text{H}_2 + \text{O}_2$, $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$) измеряли в работах [1, 2] и рассчитывали в [3—5]. Опытное определение, безусловно, дает наиболее достоверные величины $\delta_{кр}$, однако такие эксперименты весьма трудоемки и дорогостоящи. Более доступны расчетные методы, среди которых в качестве наиболее надежного следует отметить численное моделирование распространения детонации в газовом слое.

В настоящей работе методика численного моделирования распространения ДВ в газовых объемах конечной толщины из [4, 5] с более адекватным описанием химической кинетики использована для расчета $\delta_{кр}$ смесей $2\text{H}_2 + \text{O}_2$, 29% $\text{H}_2 + 71\%$ воздух, 23% $\text{H}_2 + 77\%$ воздух, $4\text{H}_2 + \text{O}_2$.

Для моделирования распространения ДВ взяты двумерные уравнения газодинамики в лагранжевом описании, дополненные уравнением химической кинетики в аррениусовском виде:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -Ac\rho \exp(-E/RT). \quad (1)$$

Здесь c — относительная концентрация гремучей смеси ($0 \leq c \leq 1$); ρ , T — плотность и температура газа; A , E — предэкспоненциальный фактор и энергия активации. Величины A и E подобраны таким образом, чтобы правильно описывать экспериментальную зависимость периода индукции самовоспламенения гремучей смеси от температуры [6]. Их значения составляют $3 \cdot 10^{11}$ см³/(г·с) и 84 кДж/моль соответственно.

Удельное тепловыделение в результате химической реакции рассчитывали по формуле

$$Q = Q_0(c_0 - c), \quad (2)$$

где Q_0 — эффективная удельная теплота сгорания гремучей смеси; c_0 — начальная концентрация гремучей смеси ($0 \leq c \leq c_0 \leq 1$). Методика расчета подробно изложена в [4, 5].

Применимость аррениусовского описания химической кинетики для расчета критической толщины газового слоя вытекает из того, что возможность распространения детонации в нем определяется соотношением характерных времен охлаждения за счет боковой разгрузки и химической реакции. Характерное время химической реакции близко к периоду индукции самовоспламенения гремучей смеси, которое в определенных тем-