Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института
им. Г.В.Плеханова, 1984, т. 99

УДК 622.235

ОСОБЕННОСТИ ДЕТОНАЦИИ АЛЮМОСОДЕРЖАЩИХ ВВВ

С.А.ПЕТРОВ, Б.Г.КИРС

Каждая частица алюминия покрыта плотной и прочной пленкой окиси, которая инертна и препятствует реакции металла. Растрескивание окисной пленки на частицах алюминия может происходить при их нагревании всего на 30-50 °С [4, 5]. Воспламенение частиц крупностью до 15 мкм (в среднем 6-10 мкм) возможно при температурах 1300 К, а более крупных размером 70-100 мкм при 1500-1600 К. Таким образом, не обязательно иметь систему с температурой, близкой к температуре плавления окиси алюминия (2300-2500 К), поскольку уже при температурах 1300 К для мелких и 1600 К для более крупных частиц существенную роль играет саморазогрев и процесс окисления резко активизируется - становится автокаталическим [3, 5, 7], однако время начала реакции в значительной степени зависит от температуры.

Воспламенение алюминия по окончании индукционной задержки является по своей природе гетерогенным. Реакция окисления проходит на поверхности частиц по границе металл-окисел.

Для определения времени индукционной задержки используем упрощенную формулу Фридмана и Мачека [13]:

$$\tau_{вп} = \frac{\rho d^2}{6 Nu \lambda}\left(c \ln \frac{T_\infty - T_0}{T_\infty - T_{кр}}\right), \qquad (1)$$

где ρ - плотность материала частицы, г/см^3; d - дисперсность частицы, мкм; λ - коэффициент теплопроводности газа, Вт/(м·К); T_∞ - температура теплоподводящей среды, К; T_0 - начальная температура частицы, К; $T_{кр}$ - критическая температура воспламенения металла, К; c - удельная теплоемкость материала частицы, Дж/(кг·К); Nu - коэффициент Нуссельта.

При условии, что за период индукции основным видом теплообмена между частицей и средой является теплопроводность, время прогрева частицы от T_0 до $T_{кр}$ (в соответствии с ее размером) в среде с температурой T_∞ пропорционально выражению

$$\tau_{вп} \sim \ln \frac{T_\infty - T_0}{T_\infty - T_{кр}} \qquad (2)$$

и можно оценить время прогрева частиц до 1300 и 2300 К соответственно. Расчеты показали, что задержка воспламенения при 1300 К в 3,5-4,0 раза меньше, чем при 2300 К. С учетом поправки на скорость запаздывания различие это будет еще бо́льшим. Снижение температуры продуктов с 3000 до 2000 К приводит к увеличению индукционной задержки воспламенения в 18 раз.

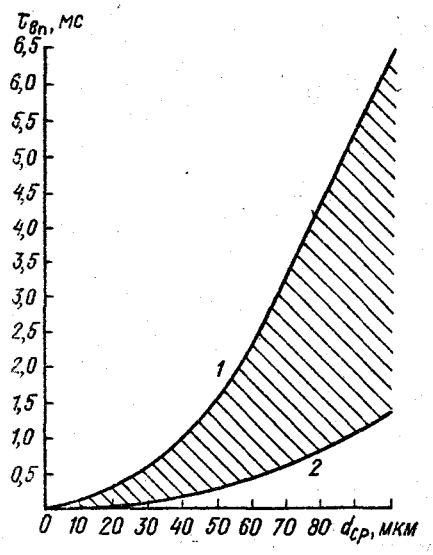


График зависимости индукционной задержки воспламенения алюминиевых частиц от их дисперсности при крайних значениях коэффициента Нуссельта: 1 – $Nu = 2$; 2 – $Nu = 126$

Наличие примесей снижает плотность пленки окиси алюминия при нагревании и тем самым способствует ускорению воспламенения алюминия.

Число Нуссельта в выражении (2) находим из соотношения Ранца – Маршалла [I4]

$$Nu = 2 + 0{,}53Re^{0{,}5}, \qquad (3)$$

а число Рейнольдса из выражения

$$Re = \frac{2r_0 u}{\nu}, \qquad (4)$$

где r_0 – радиус заряда; U – скорость разлета продуктов детонации; ν – кинематическая вязкость среды.

В проведенных оценочных расчетах параметр Nu изменялся от 2 до I26, а дисперсность частиц алюминия от I до I00 мкм (см. рисунок).

Ширина зоны химической реакции при детонации водонаполненных ВВ с плотностью I,5 г/см^3 равна 3,3–4,3 мм. Время прохождения детонационным фронтом такого расстояния при скоростях распространения 4000–6000 м/с мало и составляет 0,9–I,I мкс, что недостаточно для прогрева большинства алюминиевых частиц до воспламенения [II].

В соответствии с оценкой индукционных задержек воспламенения по формуле (I) при плотностях заряда I,5–I,6 г/см^3, в зоне химической реакции возможно воспламенение и горение частиц алюминия не крупнее 3 мкм. Доля частиц с такой крупностью в применяемых на практике порошках и пудрах незначительна, однако и они могут являться источниками локального воспламенения, переходящего в более широкое – самоускоряющееся [8, I2].

Нельзя также не учитывать возможность интенсивного дробления и абляции (срыва окисной пленки) частиц под воздействием температуры и ударных нагрузок при движении детонационного фронта. Это может привести к дополнительному снижению индукционных задержек воспламенения и будет способствовать сгоранию алюминия до плоскости Чепмена – Жуге, хотя само понятие плоскости в этом случае несколько своеобразно. Плоскость Чепмена – Жуге в зарядах конечного диаметра занимает вполне определенное положение, соответствующее поверхности, на которой средняя скорость движения среды равна средней массовой скорости звука [I0]. В нашем случае реакция не заканчивается на поверхности Чепмена – Жуге, т.е. в детонационном фронте, который в этом случае является лишь составной частью зоны реакции. Зона реакции, учитывая сгорание алюминия за плоскостью Чепмена – Жуге, в со-

ставах с неидеальной детонацией имеет значительную протяженность и не связана с понятием химпик (область, связанная с определяющими параметрами химпика, является частью зоны реакции). В ряде случаев химпик вообще отсутствует, а профиль массовой скорости имеет треугольную форму [9]. Энергия, отданная металлом в той части зоны химической реакции, которая влияет на формирование химпика, составляет лишь часть общей энергии ВВ. Значительная ее доля выделяется за пределами поверхности Чепмена – Жуге при сгорании алюминия в газообразных продуктах детонации, процесс которого происходит по модели теплового взрыва.

Известно, что скорость детонации связана с теплотой взрыва и в значительной степени обусловлена энергией, выделяемой до поверхности Чепмена – Жуге. Наряду с теплотой взрыва скорость детонации зависит и от показателя политропы.

Для водонаполненных металлосодержащих ВВ и ВВ с повышенной плотностью значения показателя политропы могут достигать 4,5 и более. В свою очередь, показатель политропы зависит от диаметра заряда, причем, даже при взрывании зарядов в диаметрах, больших предельного, величина показателя политропы больше трех.

Величины показателя политропы водонаполненных алюмосодержащих ГЛВВВ с плотностью заряда от I,52 до I,75 г/см^3 и удельной теплотой от 52I0 до 7290 КДж/кг были измерены по методике Г.И.Покровского на полигоне рудника «Медвежий ручей». С увеличением содержания алюминиевого наполнителя суммарная теплота взрывчатого разложения растет, а доля энергии, ответственной за скорость детонации (выделяемой до поверхности Чепмена – Жуге) снижается, что подтверждено замерами скорости детонации [6].

Полезность энергии, выделяемой алюминием, в этом случае состоит в том, что выделяется она не мгновенно, а постепенно из-за разности времени прогрева и сгорания его частиц в широком диапазоне дисперсностей. Благодаря этому возрастает суммарное время воздействия взрывного импульса на разрушаемый объект. Вследствие существенной «подкачки» тепла и стадийности процесса детонации давление газов в зарядной полости может увеличиться в несколько раз по сравнению с первоначальным. Увеличение давления связано с тем, что температура взрыва составов водонаполненных ВВ с алюминием может достигать 5000 К, что способствует значительному расширению газообразных продуктов.

Объем газов, выделившихся при взрыве при содержании алюминия в ВВВ I0; I5; 20; 25 % составил соответственно 880; 754; 708; 663 л/кг. Температура взрыва, данная без учета приращения внутренней энергии кварца в силикоалюминии, при содержании алюминия I0; I5; 20; 25 % составила соответственно 3500; 3700; 39I0; 4000 К. При таких температурах и высокой концентрации частиц алюминия уже не проявляется роль коллективного эффекта при их воспламенении, так как наступает срыв теплового равновесия и даже одиночные частицы воспламеняются с очень малыми периодами индукции.

Косвенным подтверждением стадийности детонации алюмосодержащих ВВВ, сенсибилизированных гранулотолом, явились эксперименты на копре Каста.

Чувствительность к удару у таких составов низкая, до поднятия стандартного груза на высоту 750 мм наблюдались отказы и частичные взрывы, когда взрывалось только бризантное ВВ – тротил. Отмечено, что в начале детонация идет по горячим точкам, роль которых выполняет тротил и пузырьки воздуха или газа. В период развития процесса и разогрева системы вместе с тротилом детонирует окислитель и сгорает часть алюминия и лишь в заключение в продуктах детонации первых двух стадий – основная доля алюминиевого наполнителя.

Исходя из условия стадийности процесса химического превращения алюмосодержащих ВВВ, необходимо учитывать, что при содержании алюминия более 15 % следует до минимума снижать количество взрывчатого сенсибилизатора в составе. Это обосновывается тем, что большое количество углеродсодержащего сенсибилизатора, реагирующего в первой стадии, в составах с недостатком кислорода, приводит к заведомо неполному использованию потенциальных энергетических возможностей алюминия. Углерод тротила, окисляясь до низкоэнергетичных, по сравнению с продуктами окисления алюминия – CO и CO_2, успевает отобрать у окислителя значительную часть кислорода до вступления алюминия в реакцию. Лишь высокая химическая активность этого металла и присутствие в ВВВ воды как кислородосодержащего компонента, несколько восполняет потери энергии при взрыве.

Алюминий способен отнимать кислород у CO_2 и даже у CO, но только при содержании металла в ВВВ более 20 %, да и то не в полном объеме, в то время как снижение индукционной задержки воспламенения благодаря повышению содержания частиц металла в составах происходит только до его концентраций 20–22 %, а затем период индукции вновь возрастает. Для частиц крупностью 40–200 мкм воспламенение в продуктах детонации, содержащих CO_2 и H_2O в повышенных количествах, значительно облегчается. При этом сама температура воспламенения алюминия в атмосфере CO_2 почти в два раза ниже, чем на воздухе [15].

Сокращение индукционной задержки воспламенения с увеличением концентрации частиц алюминия до определенного предела можно объяснить тем, что поступление частиц в газовый поток в продуктах взрыва происходит непрерывно и процесс развивается до самоподдерживающегося горения [1, 2]. При этом существенно увеличивается тепловой эффект реакции горения повышенного количества частиц металла, а прогрев вновь поступающих частиц определяется уже не только их теплообменом с окружающей средой, но и дополнительным теплоподводом (теплопроводностью и излучением) из зоны горения. Повышенное содержание алюминия в ВВВ также вызывает потери энергии, сосредоточенной в детонационной волне, на сжатие металлических частиц. При содержании алюминия до 15 % эти потери энергии невелики и не превышают 3 %. Повышение концентрации алюминия до 30–35 % может вызвать снижение параметров детонационной волны на 10–15 %, что приводит к падению работоспособности взрывчатого состава. Неэффективно вводить в ВВВ более 25 % алюминия из-за его высокой стоимости. Использование во взрывчатых составах в качестве металлического горючего высокодисперсных порошков из сплава алюминия и

кремния заэвтектического состава (более 13 % кремния) позволяет при существенном снижении затрат и повышении стабильности зарядов добиться хорошего качества взрывов, что подтверждается результатами промышленных испытаний подобных смесевых ВВ.

Обладая меньшим коэффициентом сжимаемости, кремний способствует снижению термодинамических потерь, что подтверждается опытами по определению критического диаметра ВВВ. Так, бестротиловые ВВВ с добавками алюминия имеют критический диаметр 200–220 мм. При замене алюминия на силикоалюминий критический диаметр снижается до 150 мм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беляев А.Ф., Ермолаев Б.С., Коротков А.И., Фролов Ю.В. – ФГВ, 1969, № 2.

2. Беляев А.Ф. Горение, детонация и работа взрыва конденсированных систем. М., Наука, 1968.

3. Беляев А.Ф., Фролов Ю.В., Коротков А.И. – ФГВ, 1968, № 4.

4. Бржустовский Т., Глассмен И. Гетерогенное горение. М., Мир, 1964.

5. Горение металлизированных конденсированных систем /. П.Ф.Похил, В.С.Логачев, М.В.Мальцев, В.А.Селезнев. М., изд. ИХВ АН СССР, 1962.

6. Кирс Б.Г., Петров С.А. О влиянии дисперсности алюминия на детонационные параметры водонаполненных ВВ. – ФТПРПИ, 1980, № 1.

7. Похил П.Ф., Беляев А.Ф., Фролов Ю.В. Горение порошкообразных металлов в активных средах. М., Наука, 1972.

8. Похил П.Ф., Логачев В.С., Мальцев В.М. Изучение слияния частиц металла при горении металлизированных баллистных составов и смесей горючее – окислитель. – ФГВ, 1970, № 1.

9. Сулимов А.А., Ермолаев Б.С. Низкоскоростная детонация в твердых ВВ. – В кн.: Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация. Черноголовка, изд. ИХФ АН СССР, 1977.

10. Трофимов В.С., Веретенников В.А. О структуре детонационного фронта в конденсированных ВВ. – В кн.: Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация. Черноголовка, изд. ИХФ АН СССР, 1977.

11. Шведов К.К., Дремин А.Н. Параметры и некоторые особенности детонации гранулированных и водонаполненных ВВ. – В кн.: Механика и разрушение горных пород взрывом, вып. 1, Киев, Наукова думка, 1969.

12. Crump J., Prentice J., Krácutle K. – Combustion Science of Technology, 1969, N 1.

13. Fajdman R., Maček A. – Combustion and Flame, 1962, N 6.

14. Ranz W.E., Marshall W.R. – Chem. Engineer. Progr., 1952, N 4.

15. Rhein R.A. – Pyrodynamics, 1965, N 3.