

ливался и подавался на осциллограф К-115. Полученные результаты для труб диаметром 15, 20, 25 и 30 мм приведены в таблице.

Установлено, что минимальный диаметр трубы, в которой детонирует бензино-воздушная смесь, при давлении в 1 кг/см^2 составляет 25 мм. С повышением давления до 2 кг/см^2 устойчивая детонация наблюдается в трубах диаметром 20 и даже 15 мм.

Поступила в редакцию
31/1 1977

ЛИТЕРАТУРА

1. Разрушение горного массива машинами взрыво-импульсного действия. М., «Наука», 1974.
2. С. М. Когарко. ЖТФ, 1958, XXVIII, 9.
3. Д. П. Лобанов, Е. Г. Фонберштейн, С. П. Экомасов. ФГВ, 1976, 12, 3.

РЕЖИМЫ ТЕПЛООВОГО ВЗРЫВА ДИСПЕРСНОГО МАГНИЯ В СРЕДАХ С НЕДОСТАТКОМ ОКИСЛИТЕЛЯ

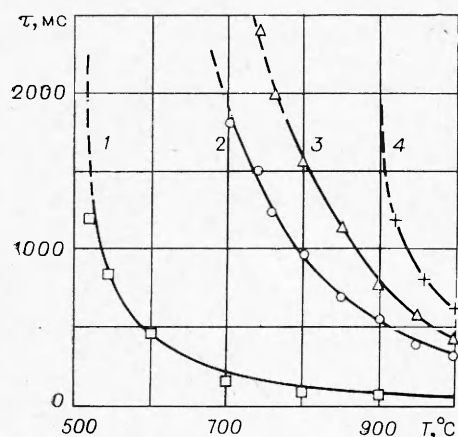
А. Б. Рыжик

(Ленинград)

В теории теплового взрыва [1] рассматриваются экзотермические процессы, характеризующиеся большим тепловым эффектом и сильной зависимостью скорости выделения тепла от температуры. В ряде случаев при тепловом воспламенении газовзвесей возникают качественные особенности, обусловленные выгоранием компонентов, и классическая модель явления нарушается [2, 3]. С этой точки зрения особого внимания заслуживает процесс воспламенения взвесей магниевого порошка в азоте, отличающихся слабым тепловым самоускорением реакции. Практический интерес к проблеме связан с идеей использования азота с небольшими добавками кислорода в качестве защитной атмосферы для диспергированных порошков магния.

С целью более детального анализа теплового взрыва такого рода систем в данной работе исследуются индукционные периоды воспламенения магниевого порошка в различающихся по составу азотно-кислородных средах. Опыты проводились в вертикальной трубчатой печи [4], в бомбе постоянного объема [5] и на ударной трубе [6]. Частицы имели сферическую форму, их размер не превышал 100 мкм.

Установленная в условиях реакционной камеры печи температурная зависимость периода индукции τ (см. рисунок) показала, что его длительность резко возрастает, если температура среды T близка к своему критическому значению. Точные измерения вблизи пределов (штриховые линии) были затруднены причинами, связанными с нестабильностью концентраций конденсированной фазы при больших длительностях процесса, и нестационарным «всплеском» периода индукции [7]. С повышением температуры задержки воспламенения быстро сокращаются, причем более интенсивно — по мере перехода от воздуха к азоту. Однако, несмотря на эту явно выраженную тенденцию, периоды индукции в азотных и воздушных взвесах даже при максимальных температурах отличаются более чем на порядок.



Зависимость задержки воспламенения взвесей магниевого порошка от температуры.

1 — воздух; 2 — 0,70% кислорода в смеси; 3 — 0,43% кислорода в смеси; 4 — азот.

процессов (выравнивание температур частиц и газа до квазистационарного режима и воспламенение частиц в конце его) носит лишь поправочный характер.

Используя в качестве масштаба времени воспламенения величину адиабатического периода индукции τ_a , запишем выражение для длительности $\tau_{ст}$ квазистационарного режима [2]:

$$\tau_{ст} \approx \tau / \tau_a, \quad (1)$$

$$\tau_{ст} \approx (1 + \kappa \ln \kappa - 2\kappa) / (b - \kappa \ln \kappa), \quad (2)$$

где b — массовая концентрация частиц; κ — параметр Семенова для одиночной частицы, воспламеняющейся при $\kappa > \kappa_{кр} = 1/e$.

Поскольку $\tau_a \sim 1/\kappa$, из (1) и (2) следует, что задержка воспламенения газовой взвеси есть возрастающая функция τ_a . Теплофизические свойства азота и воздуха различаются слабо, поэтому экспериментально установленное увеличение задержки воспламенения магниевого порошка по мере перехода от воздуха к азоту связано с возрастанием τ_a . Для системы с заданными константами среды и частиц

$$\tau_a \sim T^2 \exp(E/RT),$$

и без существенной ошибки при типичных значениях $E \geq 20000$ кал/моль

$$\tau_a \sim \exp(E/RT), \quad (3)$$

где E — энергия активации; R — газовая постоянная.

Из анализа (3) видно, что при непрерывном повышении температуры различие в задержках воспламенения магния в воздухе и азоте должно сокращаться. Однако это обстоятельство не единственная причина такого сокращения.

При более высоких температурах роль реакции азотирования в процессе воспламенения, по-видимому, возрастает и влияние состава азотно-кислородных смесей на индукционный период несколько ослабляется. Так, при воспламенении дисперсного магния за отраженными ударными волнами в воздухе и аргоно-кислородной смеси с таким же, как в воздухе, содержанием кислорода (число Маха волны $M_1 = 4,5$) задержка воспламенения составляла 1,1 и 1,3 мс соответственно. Следует при этом обратить внимание на тот факт, что вследствие уменьшения теплопотерь, связанных с диссоциацией и ионизацией, температура за отраженным скачком в аргоно-кислородной смеси (~ 3000 К) была выше, чем в воздухе (~ 2400 К).

Для анализа полученных результатов воспользуемся квазистационарной моделью воспламенения взвеси. Согласно [2], в течение периода индукции теплового взрыва совокупности частиц, взвешенных в газе, температура газа возрастает от некоторой начальной до температуры воспламенения одиночной частицы. До момента воспламенения температуры частиц и газа близки, и вещество реагирует в квазистационарном режиме, похожем на режим теплового взрыва в условиях самоускоряющихся (автокаталитических) реакций [8]. Количественные оценки, проведенные в [2], показали, что время квазистационарного режима для взвеси составляет основную часть периода индукции, а длительность остальных про-

Исследуем теперь особенности теплового взрыва дисперсного магния в азоте. Возрастание τ_a в этом случае обусловлено относительно слабым тепловым самоускорением реакции азотирования — причиной, приводящей к увеличению глубины превращения за время достижения максимального разогрева. Изотермическое относительное выгорание реагирующего вещества во взвеси за адиабатический период индукции составляет [1, 3]

$$\gamma = \gamma_0/b = cRT^2/bQE,$$

где c — теплоемкость вещества частиц; Q — тепловой эффект реакции на единицу массы частиц; γ_0 — параметр, относящийся к одиночной частице. Численные оценки параметры γ показывают, что при одинаковой температуре замена воздуха азотом приводит к увеличению γ от $6,42 \cdot 10^{-3}$ до $5,74 \cdot 10^{-2}$, т. е. практически на порядок.

Вычисления проведены с использованием следующих величин: для реакции окисления $Q=5900$ кал/г, $E=50500$ кал/моль [9, 10]; для реакции азотирования $Q=1520$ кал/г, $E=22300$ кал/моль [11]; $T=1200$ К, $c=0,25$ кал/(г·град), $b=0,368$. Отметим также, что выгорание резко усиливается при $\gamma > 10^{-2}$ [7], а для реакции первого порядка и $c=0,30$ кал/(г·град) полное вырождение теплового взрыва наступает при следующих условиях [8]: $Q=350$ кал/г, $E=30000$ кал/моль, $T=1485$ К.

Таким образом, отличительная черта воспламенения дисперсного магния в азоте состоит в возрастании роли выгорания за период индукции и существенном вырождении теплового взрыва. Последнее особенно наглядно проявляется при испытаниях в бомбе постоянного объема. В этих условиях значения взрывного давления и скорости его нарастания в предельных по кислороду магниевых взвесях снижаются настолько, что становятся соизмеримыми с величинами, характерными для «холостого» впрыска. Более того, в некоторых опытах наблюдалось повышение давления, а воспламенения при этом не было. Последнее свидетельствует о медленном протекании экзотермических процессов вплоть до конца реагирования и оказывается убедительной иллюстрацией явления вырождения теплового взрыва.

*Поступила в редакцию 27/XII 1976,
после доработки — 16/V 1977*

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. Н. Семенов. УФН, 1940, 23, 3, 251.
2. В. И. Лисицын, Э. Н. Руманов, Б. И. Хайкин. ФГВ, 1971, 8, 1, 3.
3. В. И. Лисицын, Б. И. Хайкин. ПМТФ, 1974, 5, 72.
4. Ю. А. Юрманов, А. Б. Рыжик и др. Четвертый всесоюзный симпозиум по горению и взрыву. Аннот. докл. Черноголовка, ИХФ АН СССР, 1974, 26.
5. В. В. Недин и др. Взрывоопасность металлических порошков. Киев, «Наукова думка», 1971.
6. А. Н. Ханукаев, А. Б. Рыжик и др. ФТПРПИ, 1974, 3, 124.
7. В. В. Барзыкин и др. ПМТФ, 1964, 3, 118.
8. А. Г. Мержанов, Е. Г. Зеликман, В. Г. Абрамов. Докл. АН СССР, 1969, 180, 3, 639.
9. T. Leontig, F. Rhines. Trans. AJMME, 1946, 166, 265.
10. В. Ф. Зеленский, И. А. Петельгузов, С. Д. Широченков.— В сб.: Высокотемпературная коррозия и методы защиты от нее. М., «Наука», 1973, 25.
11. J. G. Murgulescu, D. Cismațu. Rev. Chim. Acad. Rep. Pop. Roumanie, 1960, 251.