

О ГОРЕНИИ ПОРИСТЫХ ОБРАЗЦОВ В УСЛОВИЯХ НЕОДНОМЕРНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

Б. Ш. Браверман, М. Х. Зиатдинов, Ю. М. Максимов

Отдел структурной макрокинетики Томского научного центра СО РАН, 634021 Томск
maks@fisman.tomsk.su

Предлагается экспериментальный метод изучения горения пористых образцов в условиях неоднородной фильтрации газообразного реагента. Впервые *in-situ* наблюдалось движение фронта поверхностного горения в направлении, перпендикулярном газопроницаемой боковой поверхности. При встрече поверхностных фронтов в центре образца отмечается повышение температуры, что объясняет результаты, наблюдавшиеся ранее в экспериментах.

Ключевые слова: поверхностное горение, неоднородная фильтрация, порошки металлов, сверхадиабатический нагрев, нитриды хрома.

ВВЕДЕНИЕ

Отличительной особенностью фильтрационного горения пористых образцов при умеренных давлениях (до ≈ 10 МПа) является то, что в исходном состоянии содержащегося в порах газа-окислителя недостаточно для поддержания горения. Для распространения фронта горения необходим подвод извне газообразного реагента к реакционной зоне путем фильтрации по порам образца. Скорость распространения фронта горения существенно зависит от скорости подвода окислителя к зоне реакции, направление движения фильтрующегося газа влияет на форму и параметры зоны горения.

Наиболее простой является схема горения цилиндрических образцов с газонепроницаемой боковой поверхностью при движении фронта горения вдоль оси образца. В этом случае фронт горения и фильтрующийся газ движутся вдоль одной прямой, что позволяет рассматривать горение в одномерном приближении. Закономерности фильтрационного горения для такой схемы изучены теоретически и экспериментально в [1–5]. При горении образцов с газопроницаемой боковой поверхностью фильтрация газа-окислителя происходит как в направлении движения фронта горения, так и в перпендикулярном ему направлении. Участки фронта, находящиеся на различном расстоянии от боковой поверхности, оказываются в неравном отношении к процессу фильтрации положений, что приводит к изменению формы

фронта реакции. Экстремальным случаем такого изменения является поверхностное горение, при котором фронт реакции распространяется преимущественно по поверхности образца, а центральная часть либо реагирует после прохождения поверхностного фронта горения, либо остается непрореагировавшей. Экспериментальные данные о существовании поверхностных режимов горения получены в [1, 5]. Теоретическому изучению поверхностного горения посвящены работы [6, 7]. В работе [8] переход от послойного к поверхностному режиму назван одной из нерешенных задач, имеющих принципиальное значение для самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Известно несколько работ по математическому моделированию горения в условиях двумерной фильтрации для образцов в форме прямоугольной призмы [7, 9, 10]. Однако экспериментально такой режим горения изучен недостаточно, так как существующие экспериментальные методы не позволяют непосредственно наблюдать поверхностное горение и о наличии такового судят по косвенным данным: неполноте превращения, особенностям зависимости скорости горения от диаметра, по закалочным структурам. В настоящей работе предлагается способ непосредственного наблюдения горения при неоднородной фильтрации.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Движение фронта горения обычно изучают визуальным наблюдением перемещения светящихся зон горения по поверхности образца. Оптические методы применяют чаще всего при

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 01-03-32055).

измерении скорости фронта горения. С их помощью установлены существование и особенности различных режимов горения. Однако эти методы не позволяют наблюдать перемещение фронта реакции в участках образца, удаленных от газопроницаемой боковой поверхности. В настоящей работе предлагается изменение схемы горения, благодаря которому удастся преодолеть этот недостаток.

Экспериментальная сборка в виде прямоугольной призмы состояла из двух параллельных кварцевых пластин размером 60×110 мм, две боковые стороны размером 30×110 мм изготавливались из стальной сетки с размером ячейки ≈ 100 мкм. Верхнее и нижнее основания призмы открыты. Сборку устанавливали вертикально на графитовую подставку. Порошок засыпали между кварцевыми пластинами. Образец поджигали сверху. Такая конструкция сборки позволяет моделировать горение в условиях двумерной фильтрации газа (в данном случае азота): газ фильтруется через открытые верхнее и нижнее основания, а также через две боковые стороны, изготовленные из сетки, две другие стороны, изготовленные из кварцевого стекла, газонепроницаемы и прозрачны, что дает возможность визуально следить за движением фронта горения. Сборку помещали в стандартную бомбу постоянного давления, заполненную азотом. Движение фронта горения фиксировалось видеокамерой. Исследовали горение хрома марки ПХ1С в азоте, поскольку, как известно [11], горение хрома протекает в твердой фазе, что обеспечивает газопроницаемость продукта (измеренная пористость продукта близка к 50%). Максимальная температура горения хрома не превышает 1500°C [12], что ниже температуры размягчения кварцевого стекла (1750°C [13]). Кроме того, продукт горения хрома в азоте представляет практический интерес [14]. Относительная плотность исходных образцов составляла $\approx 0,4$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлены кадры видеосъемки горения хрома при давлении азота 5 МПа. Видно, что в течение некоторого времени форма фронта горения близка к форме, соответствующей послойному режиму горения. Небольшой выступ в центре образца постепенно исчезает, а выступы, расположенные с краев образца, находящиеся в более выгодном положении

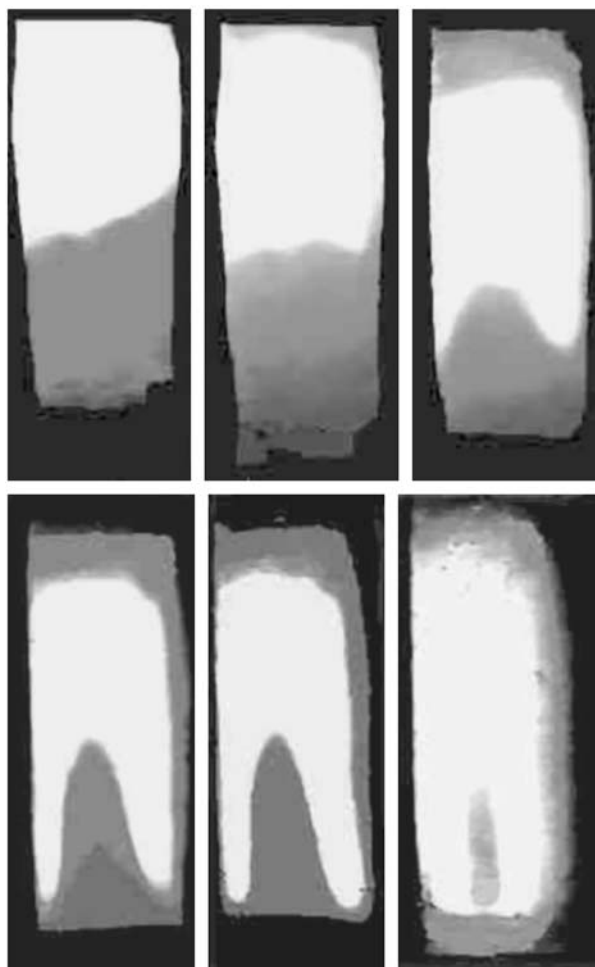


Рис. 1. Развитие поверхностного режима горения

по отношению к фильтрации азота, увеличиваются. Центральная часть фронта отстает, поскольку растущие боковые выступы экранируют ее от фильтрационного подвода азота. Расстояние между передними кромками боковых участков фронта и центральной частью увеличивается. Наблюдается тенденция к уменьшению ширины участка поверхностного горения. К сожалению, ограниченная длина образца не позволяет установить, наступает ли стабилизация формы фронта горения.

В образцах с газопроницаемым продуктом поверхностные участки фронта горения должны смещаться по направлению к центру. При таком движении фронта горения в центре образца возможно повышение температуры горения. Этот эффект теоретически предсказан в [7, 9]. Перегрев в центре обусловлен, главным



Рис. 2. Встреча поверхностных фронтов в центре образца:

яркое пятно — участок, в котором аккумулируется тепло

образом, двумя причинами. Во-первых, основная часть газа реагирующего в центральной части образца, фильтруется через разогретые поверхностные слои (спутное фильтрационное горение [4]). При этом газ нагревается и повышает начальную температуру центральной части образца. Во-вторых, при встрече сходящихся участков фронта происходит концентрация избыточной энтальпии, запасенной в зоне прогрева [7, 9].

На рис. 2 приведен кадр видеосъемки с применением нейтрального светофильтра, демонстрирующий подобный «кумулятивный» эффект при давлении азота 3 МПа. Яркое пятно в центре образца — область, в которой аккумулируется тепло при встрече поверхностных фронтов. Цветовая температура в центральном пятне превышала максимальную температуру поверхностных участков фронта на ≈ 100 °С. Подобная концентрация тепла в центре образца при горении в азоте образцов большего диаметра из порошка хрома приводит к сверхдиабатическому перегреву и расплавлению в центральной части, что наблюдалось в [15].

ВЫВОДЫ

1. В работе предложен способ визуального наблюдения неоднородных фронтов горения.
2. Впервые наблюдалось распространение

фронта горения хрома в азоте в условиях двумерной фильтрации в направлении, перпендикулярном газопроницаемой боковой поверхности. Визуально зафиксирован перегрев образца при встрече поверхностных участков фронта горения, теоретически предсказанный в работах [7, 9].

Представленные результаты носят предварительный характер. Предложенная методика должна позволить изучать устойчивость послойных фронтов, а также формы и скорость перемещения поверхностных фронтов фильтрационного горения СВС-систем.

Авторы благодарят Г. А. Цыбу, В. Г. Саламатова и В. Д. Китлера за оказанную помощь в обработке видеoinформации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мержанов А. Г., Боровинская И. П., Володин Ю. Е. О механизме горения пористых металлических образцов в азоте // Докл. АН СССР. 1972. Т. 206, № 4. С. 905–908.
2. Алдушин А. П., Мержанов А. Г., Хайкин Б. И. Режимы послойного фильтрационного горения пористых металлов // Докл. АН СССР. 1974. Т. 215, № 3. С. 612–615.
3. Алдушин А. П., Мержанов А. Г. Теория фильтрационного горения: общие представления и состояние исследований // Распространение тепловых волн в гетерогенных средах. Новосибирск: Наука, 1988.
4. Алдушин А. П. Теория фильтрационного горения // Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Черноголовка, 1982.
5. Питюлин А. Н. Процессы самораспространяющегося высокотемпературного синтеза с фильтрационным подводом реагирующего газа (на примере системы тантал — азот): Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Черноголовка, 1980.
6. Алдушин А. П. Теоретическое исследование горения гетерогенных систем с твёрдофазными продуктами реакции // Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Черноголовка, 1974.
7. Ивлева Т. П., Мержанов А. Г., Шкадинский К. Г. Поверхностное горение пористых конденсированных веществ с конденсированными продуктами // Химическая физика процессов горения. Горение конденсированных и гетерогенных систем. Материалы VI Всесоюз. симпоз. по горению и взрыву. Черноголовка, 1980. С. 99–103.
8. Merzhanov A. G. Ten Research Direction in the Future of SHS // Intern. J. SHS. 1995. V. 4, N 4. P. 323–350.
9. Боровинская И. П., Ивлева Т. П., Лорян В. Э., Шкадинский К. Г. Естественное изменение пористости реагирующего спрессованного вещества и неоднородные режимы

- фильтрационного горения // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31, № 2. С. 47–58.
10. **Грачёв В. В., Ивлева Т. П.** Двумерные режимы фильтрационного горения // Физика горения и взрыва. 1999. Т. 35, № 2. С. 16–22.
 11. **Браверман Б. Ш., Зиятдинов М. Х., Максимов Ю. М.** Горение хрома в азоте // Физика горения и взрыва. 1999. Т. 35, № 5. С. 40–45.
 12. **Braverman B. Sh., Ziatdinov M. Kh., and Maximov Yu. M.** The mechanism of chromium nitriding using SHS // Intern. J. SHS. 2000. V. 9, N 2. P. 217–222.
 13. **Таблицы физических величин / И. К. Кикоин.** М.: Атомиздат, 1976.
 14. **Пат. 1789064 СССР, МКИ 5 В 22 f 9/16.** Способ получения нитрида хрома / Браверман Б. Ш., Зиятдинов М. Х., Максимов Ю. М. Заявл. 13.04.89; Опубл. 28.02.94. Бюл. № 4.
 15. **Браверман Б. Ш., Зиятдинов М. Х., Максимов Ю. М.** О сверхadiaбатическом разогреве при горении хрома в азоте // Физика горения и взрыва. 1999. Т. 35, № 6. С. 50–52.

Поступила в редакцию 26/VII 2001 г.
