

05

Фрактальная размерность поверхностей пористых керамических материалов

© С.Н. Кульков, Ян Томаш, С.П. Буякова

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск
Технический университет Брно, Чехия
E-mail: kulkov@ms.tsc.ru

Поступило в Редакцию 11 августа 2005 г.

Измерена фрактальная размерность поверхности пористой керамики. Полученная зависимость от объема порового пространства имеет два излома, отражающие изменение характера пористости от изолированных пор до сообщающихся поровых кластеров, что позволяет получить корреляцию с известными особенностями в поведении пористых тел.

PACS: 61.43.Gt, 61.43.Nv

Пористые материалы, в частности керамики, привлекают в последнее время пристальное внимание. Это связано с широкими возможностями их использования в качестве фильтров, носителей катализаторов, биоимплантатов и др. Однако существует проблема „описания“ характеристик поровой структуры, характерной для данного вида материала и различных технологий его получения. Известно, что подобные структуры, как правило, имеют фрактальную природу, однако работ, касающихся определения фрактальной размерности поровой структуры в таких материалах, практически нет.

Целью настоящей работы явилось определение фрактальной размерности поверхностных структур пористой керамики на основе диоксида циркония.

Фрактальная размерность поверхностей пористой керамики с пористостью от 10 до 60% измерена „Box counting“-методом [1] по фотографиям с увеличением в 500 раз, полученным с помощью оптического микроскопа Neophot-21. Обработка изображений велась по специально написанной программе, в которой осуществлялся поиск границ между поровым пространством и материалом. Правильное обнаружение границ весьма важно, так как ошибка оказывает влияние

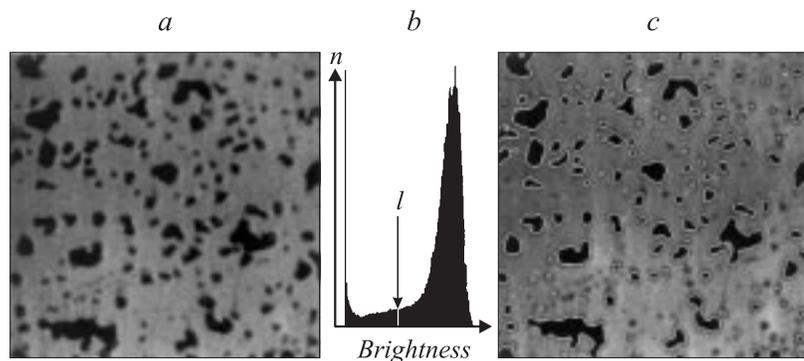


Рис. 1. *a* — оригинальное изображение структуры керамики; *b* — распределение яркости в оригинальном изображении (стрелка указывает на выбранный критерий яркости); *c* — изображение структуры керамики с границами пор при выбранном критерии яркости.

на величину фрактальной размерности (как правило, уже в первом знаке после запятой).

Для измерения фрактальной размерности определялись границы пор, имеющие более темный тон. С этой целью оригинальное изображение переводилось в изображение, в котором присутствуют только два цвета — белый и черный, для чего строилось частотное распределение яркости, на котором присутствуют два максимума (рис. 1). Первый максимум меньшей яркости соответствует порам, второй — керамике. По положению локального минимума между двумя максимумами находился яркостный критерий l , для которого все числа меньше l — поры, числа больше l — материал. В построенном таким образом бинарном изображении легко найти границы пор, которые создают все точки с ненулевой разностью между соседними. Правильность положения границ пор оценивалась визуально, сравнивались оригинальный снимок структуры керамики с изображением, полученным после очерчивания границ с помощью разработанной программы. В случае, когда найденные границы пор не совпадают с оригинальным изображением, производилось смещение критерия яркости l , при этом основной

критерий правильности положения яркостного критерия — совпадение пористости в исходном изображении и обработанном.

Для выяснения влияния критерия яркости на фрактальную размерность использовалось изображение керамики с пористостью 30% (рис. 1, *a*). В данном случае критерий яркости изменялся в интервале от 60 до 230 с шагом 10, что вызывало изменение положения границ. На рис. 2, *a* представлена зависимость фрактальной размерности от выбора яркостного критерия для изображения керамики с объемом порового пространства 30%. Вертикальная прямая на рисунке соответствует яркостному критерию, для которого при визуальной оценке получено наилучшее совпадение реальных границ пор с найденными при обработке. Величина фрактальной размерности при данном яркостном критерии на рисунке обозначена треугольником, и она практически совпадает с максимумом на зависимости, однако такое совпадение, по-видимому, возможно не всегда.

Далее цифровое изображение границ покрывалось сетками с квадратными ячейками. Для каждой сетки подсчитывалось количество квадратов, в которых находятся точки границ. Зависимость между числом квадратов и размером сторон в двойных логарифмических координатах близка к линейной зависимости, угловой коэффициент k аппроксимирующей прямой (полученной линейной регрессией) соответствует фрактальной размерности D :

$$D = -k.$$

Точность данного метода тестировалась на рисунке кривой Коха [2], теоретическая фрактальная размерность которой $D = 1.262$. Величина фрактальной размерности, измеренная используемым в работе методом, для этой кривой составила $D = 1.249$, т. е. относительная ошибка метода не превысила 0.02.

На рис. 2, *b* приведена зависимость фрактальной размерности поровой структуры керамики от объема порового пространства. Видно, что на графике присутствуют три участка: с увеличением пористости в интервале от 10 до 25%, на котором фрактальная размерность линейно возрастает, в интервале пористости от 25 до 50% величина фрактальной размерности остается практически постоянной, а с дальнейшим увеличением объема порового пространства в керамике фрактальная размерность линейно уменьшается.

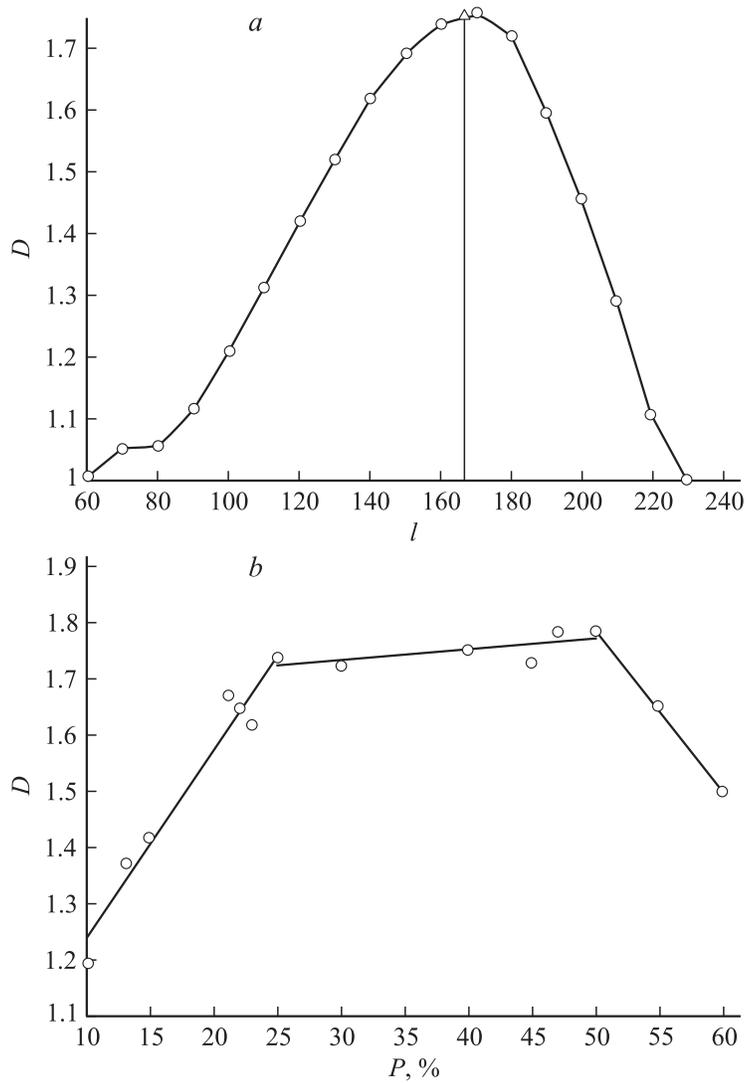


Рис. 2. *a* — зависимость между фрактальной размерностью D и критерием яркости l для керамики с пористостью 30%; *b* — зависимость между фрактальной размерностью D и пористостью в керамике P .

Вероятно, что присутствие изломов на зависимости величины фрактальной размерности от объема порового пространства в керамике связано с изменением характера поровой структуры: первый интервал — это переход поровой структуры от изолированных пор от формы, близкой к сферической, до сообщающихся поровых кластеров, где происходит слияние сферических пор и образование поровых кластеров с разветвленными границами, что вызывает рост фрактальной размерности. Во втором интервале увеличение объема порового пространства, где не изменяется фрактальная размерность, очевидно, не изменяется геометрическая конфигурация границ пор, а изменяется только их протяженность. Наконец, в третьем интервале, где фрактальная размерность убывает, сформировались очень крупные поры, вследствие чего границы являются геометрически гладкими, а их изрезанность убывает, а следовательно, фрактальная размерность уменьшается. По-видимому, такое поведение фрактальной размерности связано с известными в пористых материалах порогами перколяции [3].

Таким образом, с помощью относительно простого метода анализа поверхностей пористых керамик оказалось возможным не только определить их фрактальную размерность, но и получить корреляцию с известными особенностями в поведении пористых тел.

Список литературы

- [1] *Falconer K.J.* The Geometry of Fractal Sets. Cambridge: Cambridge University Press, 1985.
- [2] *Mandelbrot B.B.* The Fractal Geometry of Nature. New York: W.H. Freeman and Company, 1983.
- [3] *Sahimi M.* Application of Percolation Theory. L.: Taylor & Francis. 1994.