

05

О возможности квазивязкого разрушения хрупких сред со стохастическим распределением пор

© А.Ю. Смолин, Иг.С. Коноваленко, С.Н. Кульков, С.Г. Псахье

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск
E-mail: asmolin@ispms.tsc.ru

Поступило в Редакцию 10 марта 2006 г.

Методом подвижных клеточных автоматов проведено численное моделирование деформации и разрушения пористых керамических материалов с различными типами регулярной, а также стохастической структуры порового пространства при одноосном нагружении. Проанализировано влияние структуры пор на динамику зарождения и развития повреждений. Отмечена корреляция между эффективной жесткостью пористых образцов и скоростью накопления повреждений в них. Полученные результаты позволяют говорить о возможности квазивязкого разрушения хрупких материалов, обусловленного исключительно структурой порового пространства.

PACS: 46.50.+a, 81.05.Qk

В последнее время все более широкое распространение в технике получают спеченные керамические материалы. Вследствие технологии их получения они являются пористыми материалами, что, с одной стороны, улучшает некоторые из их потребительских свойств (малый вес, проницаемость), а с другой — усложняет понимание и предсказание их поведения в рабочих условиях эксплуатации. Если заранее известна форма пор, а их распределение в пространстве является периодическим, то для определения упругих характеристик материала можно воспользоваться теориями осреднения, суть которых сводится к интерпретации реального пористого тела (конструкции) как анизотропной сплошной среды и отысканию ее эффективных модулей упругости. Однако уравнения движения и состояния анизотропной среды намного сложнее, чем изотропной. И если в упругой области деформирования эти уравнения можно решать, то описание пластического поведения и процессов разрушения требует формулировки

дополнительных критериев и разработки отдельных теорий. В случае же существенно неперидического распределения пор в пространстве методы осреднения дают зависимости эффективных упругих модулей лишь от общей пористости, причем, как правило, эти зависимости достаточно точно могут описывать поведение лишь в узких интервалах пористости [1–4]. Но самое главное, что перечисленные методы не позволяют оценить характер разрушения образцов и их отклик после генерации даже первых повреждений. В связи с вышеизложенным определенный интерес представляет прямое численное моделирование поведения пористых материалов при заданном нагружении и определении закономерностей их деформации и разрушения. Одним из наиболее современных и эффективных методов решения таких задач является дискретный метод подвижных клеточных автоматов [5–7].

В данной работе моделировалось поведение пористых керамических (ZrO_2) образцов с различной структурой пор, как регулярной (рис. 1, *a–d*), так и стохастической (рис. 1, *e*). У всех образцов поры были вытянуты поперек направления нагружения и имели одинаковые размеры. Как показано в [7], образцы именно с такой ориентацией пор имеют самую низкую жесткость и прочность. Величина пористости для всех образцов составляла 25%, размеры образцов — 0.6×1.25 mm, размер автоматов — 0.01 mm. Нагрузка прикладывалась путем задания одинаковой скорости верхнему слою автоматов. Величина этой скорости плавно нарастала от 0 до 10 m/s в течение $3 \mu s$, а затем оставалась постоянной. Такой режим приложения нагрузки обеспечивал квазистатический характер нагружения и позволил избежать динамических эффектов вплоть до появления первых повреждений. Нижний слой автоматов был неподвижным. Задача решалась в условиях плоской деформации. Функции отклика автоматов соответствовали диаграмме нагружения спеченной из нанокристаллического порошка керамики $ZrO_2(Y_2O_3)$ с пористостью 2% и средним размером пор, соизмеримым с размером зерна [7,8].

Регулярность пористой структуры задавалась четырьмя способами. В первом случае поры в образце повторялись в вертикальном направлении с расстоянием, равным их высоте, а в горизонтальном направлении — равным их ширине. Располагаясь таким образом, поры образовывали вертикальные высокопористые слои материала, чередующиеся с монолитными слоями (рис. 1, *a*). Во втором, третьем и четвертом случаях поры в образцах были расположены в шахматном

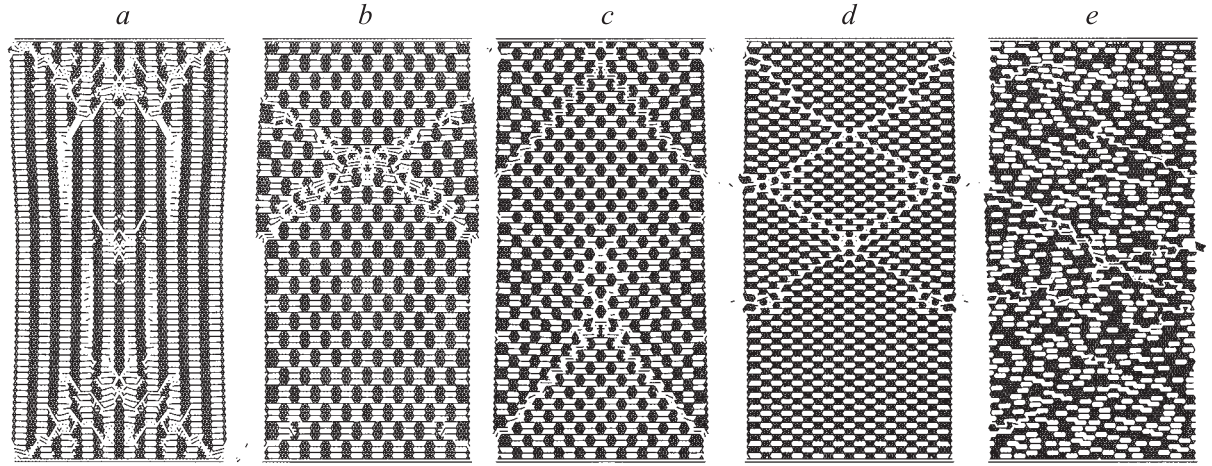


Рис. 1. Структуры межавтоматных связей в образцах с различным расположением пор при относительной деформации 3%.

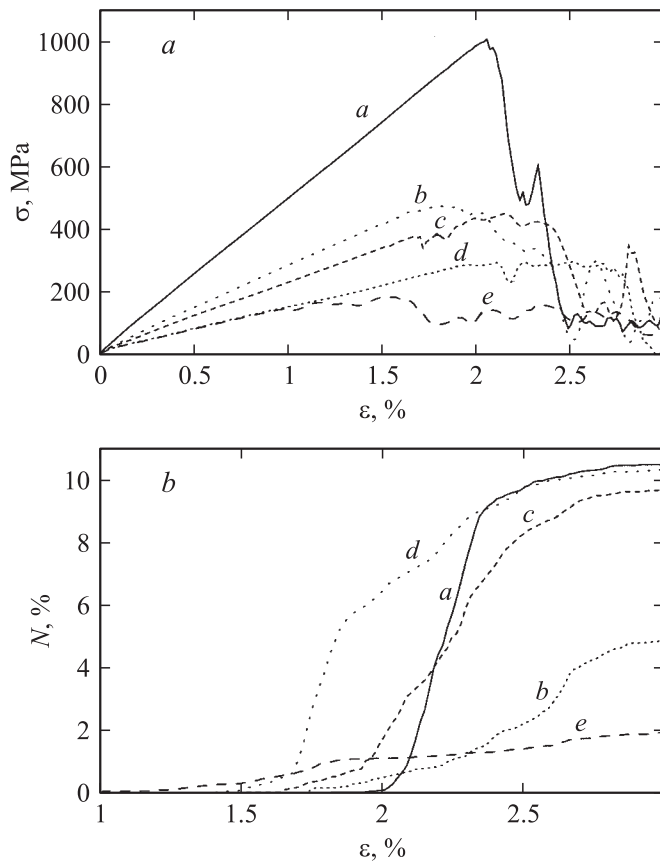


Рис. 2. Характеристики механического поведения образцов: *a* — диаграммы нагружения; *b* — зависимости доли разорванных межавтоматных связей от относительной деформации. Обозначения кривых соответствуют образцам на рис. 1.

порядке (рис. 1, *b, c, d* соответственно). Разница между этими способами состояла в плотности генерируемых таким образом пор.

Полученные в результате моделирования диаграммы нагружения рассмотренных образцов представлены на рис. 2, *a*. Можно видеть, что при одной и той же величине пористости образцы с регулярной

пористой структурой (рис. 1, $a-d$) имеют более высокую прочность и эффективные упругие модули (наклон кривых в линейной области) по отношению к образцу со стохастическим распределением пор (рис. 1, e). Особенно сильно данная тенденция выражена для образца на рис. 1, a . Для образцов с порами, расположенными в шахматном порядке (рис. 1, $b-d$), наблюдается увеличение эффективной жесткости и прочностных характеристик, а также некоторое снижение предельной деформации (рис. 2, a), при увеличении количества пор, входящих в „шахматную клетку“. При этом, обладая той же величиной пористости, что и образец на рис. 1, a , и регулярной поровой структурой, но другого типа, данные образцы имеют более низкие прочностные и упругие характеристики.

После линейных областей упругого деформирования на $\sigma-\varepsilon$ диаграммах моделируемых образцов следуют участки с многочисленными „срывами“ (рис. 2, a), соответствующие генерации и развитию повреждений. Для образцов со случайным распределением пор и „шахматки“, состоящей из одиночных пор, данный участок, как показали расчеты, является достаточно протяженным (плато). В случае регулярной поровой структуры указанные „срывы“ наблюдаются при больших относительных деформациях, чем для стохастического распределения пор. Это может быть следствием более равномерного распределения напряжений по образцу с упорядоченной поровой структурой по сравнению со стохастическим распределением пор и „размытия“ концентраторов напряжений. В свою очередь, у образцов с разными типами периодической поровой структуры (рис. 1, a и $b-d$) генерация повреждений также начинается при различных значениях деформации. Эта же тенденция наблюдается и для образцов с порами, расположенными в шахматном порядке (рис. 1, $b-d$).

После появления макротрещин кривая нагружения переходит в ниспадающий участок, соответствующий потере несущей способности образца. Анализ упругой энергии, „закаченной“ в образец (площадь под $\sigma-\varepsilon$ диаграммой), показал, что у всех образцов с регулярной поровой структурой она выше, чем у образцов со случайным распределением пор, и пропорциональна эффективной жесткости образца.

Непосредственно характер разрушения модельных образцов можно оценить из анализа межавтоматных связей, которые отображаются в виде сеток (рис. 1). Для исследованных образцов характерны два типа разрушения. У образца с регулярной пористой структурой (рис. 1, a)

имеет место зарождение повреждений, множественные растрескивания и разрушение материала на торцах образца в области нагружающих поверхностей. Далее происходит „выпучивание“ наружу слоев материала по боковым поверхностям образца и его расслоение с образованием повреждений в центральной части (рис. 1, *a*). Для образцов с порами, расположенными в шахматном порядке, характерно образование системы симметричных макротрещин, распространяющихся по направлениям наибольших касательных напряжений (рис. 1, *b–d*). Образец со стохастическим расположением пор (рис. 1, *e*) характеризуется тем, что первые повреждения образуются, как правило, вдали от нагружающих поверхностей, в наиболее ослабленных участках, определяемых наибольшей локальной пористостью. В этом случае система макротрещин не симметрична. Для образования магистральной трещины в таком образце необходимо затратить дополнительную энергию, так как направления развития трещин от ослабленных областей в нем не прямолинейны и носят случайный характер.

Динамика генерации и накопления повреждений для моделируемых образцов количественно может быть охарактеризована зависимостью отношения разорванных связей в образце к их первоначальному количеству от относительной деформации образца (рис. 2, *b*). На каждой кривой, соответствующей разным образцам, можно выделить три участка. Первый характеризуется малым углом наклона, ему соответствует стадия генерации первых одиночных повреждений и их развития. На $\sigma - \varepsilon$ диаграммах этому участку соответствует выход на горизонтальное плато с многочисленными „срывами“ (рис. 2, *a*). У образцов с регулярной поровой структурой длина данного участка пропорциональна их эффективной жесткости, а скорость накопления повреждений (угол наклона) обратно пропорциональна этой величине. На втором участке происходит образование и развитие в образце системы макротрещин. Он характеризуется наибольшей скоростью роста разорванных связей. На кривых нагружения этому участку соответствует большая часть горизонтального „плато“ и часть следующих за ним ниспадающих ветвей. Следует отметить, что пологость ниспадающих ветвей диаграмм нагружения пропорциональна скорости накопления повреждений в образце. Третий участок соответствует фрагментации образца и образованию немногочисленных новых повреждений, как правило, в области магистральных трещин.

Хорошо видно, что среди образцов с поровой структурой „в шахматку“ (рис. 1, *b–d*) наибольшей скоростью накопления повреждений

(угол наклона кривых на рис. 2, *b*) обладает образец с минимальной эффективной жесткостью (рис. 1, *d*). По мере уменьшения эффективной жесткости образцов ускоряется динамика накопления повреждений. Стоит заметить, что данная тенденция верна только для образцов с одинаковым типом поровой структуры. Так, образцы на рис. 1, *a, d*, обладающие разными типами периодической поровой структуры и величинами эффективной жесткости, различающимися практически в 2 раза, тем не менее характеризуются близкой динамикой накопления повреждений на второй стадии (рис. 2, *b*).

Образец со стохастическим распределением пор проявляет существенно иную динамику накопления повреждений. Так, наклон кривой e (рис. 2, *b*) на всем ее протяжении меняется незначительно, и вторая стадия, соответствующая распространению макротрещин в других образцах, здесь практически не выделяется. Общее количество разорванных связей при потере несущей способности такого образца в 5 раз меньше, чем для большинства других образцов.

Таким образом, на основе результатов моделирования можно сделать вывод о том, что в образцах со стохастической пористостью может отсутствовать фаза быстрого распространения магистральной трещины и резкого падения несущей способности, характерная для хрупкого разрушения. Это позволяет говорить о возможности квазивязкого разрушения хрупких материалов, обусловленного исключительно структурой порового пространства.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 05-08-33530 и 05-01-98008-р_объ_а) и проекта 8.12 Программы президиума РАН.

Список литературы

- [1] Аннин Б.Д., Калмакаров А.Л., Колпаков А.Г. и др. Расчет и проектирование композиционных материалов и конструкций. Новосибирск: Наука, 1993. 256 с.
- [2] Победра Б.Е. Механика композиционных материалов. М.: Изд-во МГУ, 1984. 336 с.
- [3] Сендецкий Дж. Механика композиционных материалов. Т. 2. М.: Мир, 1978. 563 с.
- [4] Лейцин В.Н., Сидоренко Ю.Н. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. В. 12. С. 89–94.

- [5] Псахье С.Г., Остермайер Г.П., Дмитриев А.И. и др. // Физ. мезомех. 2000. Т. 3. № 2. С. 5–13.
- [6] Psakhie S., Horie Y., Ostermeyer G. et al. // Theor. and App. Fract. Mech. 2001. N 37. P. 311–334.
- [7] Коноваленко Иг.С., Смолин А.Ю., Псахье С.Г. // Изв. вузов. Физика. 2005. Т. 48. № 6. С. 25–26.
- [8] Кульков С.Н., Буякова С.П., Масловский В.И. // Вестник Томского гос. ун-та. 2003. № 13. С. 34–57.