

Образование пылевых частиц. Численное моделирование разрушения мезообъема угля и последующий компьютерный анализ картин разрушения

И.Ю. Смолин^{1,2}, М.С. Кириченко¹, С.В. Панин^{1,3}, П.В. Макаров^{1,2}

¹ Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, 634021, Россия

² Томский государственный университет, Томск, 634050, Россия

³ Томский политехнический университет, Томск, 634050, Россия

Рассмотрена прикладная проблема образования пылевых частиц при разрушении угля. Целью работы является получение распределения пылевых частиц по размерам с использованием только компьютерных методов. На первом этапе было выполнено компьютерное моделирование деформации и разрушения мезообъема угля выбранного состава. На втором этапе была проведена компьютерная обработка полученных двумерных картин разрушения, в результате которой были выявлены замкнутые контуры зон разрушения, определены геометрические параметры выявленных частиц разрушения и построены их распределения по размерам. Показано, что предложенный подход позволил выявить фрагменты разрушения и оценить параметры распределения частиц по размерам в диапазоне 1...20 мкм. Разработанный метод может быть применен для других подобных задач.

Dust particle formation. Numerical modeling of coal mesovolume fracture and subsequent computer analysis of fracture patterns

I. Yu. Smolin^{1,2}, M.S. Kirichenko¹, S.V. Panin^{1,3}, and P.V. Makarov^{1,2}

¹ Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Tomsk 634021, Russia

² Tomsk State University, Tomsk, 634050, Russia

³ Tomsk Polytechnic University, Tomsk, 634050, Russia

The applied problem of dust particle formation during coal fracture is considered. The aim of the paper is to predict the size distribution of dust particles by means of computer methods only. First, deformation and fracture of a mesovolume of specified composition are simulated numerically. Second, the obtained 2D fracture patterns are analyzed using pattern recognition methods. As a result, we have revealed closed contours of fracture zones, determined geometrical parameters of revealed fracture fragments and plotted their size distribution. It is shown that the proposed approach makes it possible to define fracture fragments and estimate size distribution parameters for dust particles in a 2...100 μm size range. The approach can also be applied to similar problems.

1. Введение

При добыче угля современными горными машинами уголь подвергается значительным динамическим нагрузкам. Так, например, в струговых установках фирмы DBT (Германия), скорость перемещения струга может достигать 2...3 м/с. По существующим представлениям, резкое увеличение производительности горных машин должно было вызвать также значительное возрастание запыленности рудничной атмосферы, с которой современный уровень развития техники борьбы с пылью справиться не в состоянии. Однако обследования очист-

ных забоев по пылевому фактору не выявили ожидаемого прироста запыленности с увеличением нагрузок на забои [1]. В связи с этим значительный практический интерес представляют оценка общей запыленности и прогноз распределения пылевых частиц по размерам в зависимости от свойств угля и способа его добычи.

С целью выработки подходов к решению этой задачи был выполнен ряд расчетов на примере стругового метода добычи для конкретного состава угля в пласте [2, 3]. Моделирование процесса резания угля было произведено в двумерной постановке в двух взаимно перпен-

дикулярных плоскостях по ходу резания. Анализ полученных на этом этапе результатов позволил сделать вывод о том, что для зоны основного пылеобразования характерным видом нагружения является комбинация сжатия и сдвига. Далее представляет интерес оценить фракционный состав пылевых частиц размером 1...20 мкм, получаемых при разрушении.

Целью данной работы является численное моделирование деформации и разрушения мезообъемов угля, а также изучение особенности распределения по размерам получаемых частиц разрушения.

2. Моделирование разрушения мезообъема

Данные по тектонической структуре углей [4] дают основание в качестве изучаемого объема взять мезообъем с размерами 500...600 мкм [5, 6]. В таком мезообъеме можно выделить и явно учесть в качестве элементов структуры отдельные микролитотипы (витринит, семивитринит, фюзинит, липтинит, минеральные примеси), а также систему пор размером 1...10 мкм. Влияние пор и трещин меньшего масштаба учитывается неявно, если в качестве определяющих соотношений для микролитотипов угля использовать упругопластическую модель среды с учетом влияния давления и дилатансии, например модель В.Н. Николаевского. Поскольку на таких масштабах электронно-микроскопическими исследованиями выявляются как поверхности скола, так и следы значительных сдвиговых деформаций с разворотами отдельностей [4], то в качестве условия разрушения был использован комбинированный критерий с проверкой достижения предельных значений: 1) неупругих деформаций; 2) растягивающего давления. Предельные деформации варьировались в диапазоне $\varepsilon_{\text{пр}} = 0.01...0.13\%$ ($\varepsilon_{\text{пр}} \approx 0.02/\sigma_{\text{пр}}$, где $\sigma_{\text{пр}}$ — предел прочности на растяжение соответствующего компонента в МПа), т.е. более прочные компоненты проявляют более хрупкое поведение. Фактически это эквивалентно заданию предельного значения работы напряжений на сдвиговых пластических деформациях. Предельные значения отрицательных давлений ограничивались величиной $-0.5\sigma_{\text{пр}}$. Такой подход позволяет моделировать разрушение при сложном напряженном состоянии гетерогенной среды, когда в одних частицах преобладают сдвиги, в других — сжатие, а в третьих — растяжение. При численном моделировании разрушения считалось, что когда выполнен критерий разрушения в некоторой расчетной ячейке, то весь материал в данной ячейке превращается в «песок» — массу мелких частиц. В результате, для этой ячейки меняются механические свойства материала: он утрачивает способность сопротивляться растяжению, уменьшаются его упругие модули, девиатор напряжения в момент разрушения обнуляется.

Анализ проведенных двухмерных расчетов показал, что получаемые картины разрушения в лагранжевом

представлении (на исходной недеформированной сетке) определяются в первую очередь расположением пор, во вторую — геометрическими особенностями расположения структурных составляющих, а также способом нагружения. Были проведены расчеты для мезообъемов разного состава и размеров. На рис. 1, а представлена карта мезообъема размером 57.4×62.6 мкм². Использовалась сетка 574×626 ячеек, т.е. шаг сетки равнялся 0.1 мкм и на один фрагмент размером 1 мкм² приходится около 100 расчетных ячеек. Таким образом, в этом случае возможно явно выявить фрагменты разрушения размером 1...50 мкм.

Данные, полученные в одном из таких расчетов, представлены на рис. 1, б. Видно, что выявляемые в расчетах области разрушения имеют форму вытянутых тонких слоев, наподобие трещин. Размер фрагментов разрушения в таких областях меньше размера расчетной ячейки, и такие частицы не могут быть выявлены и подсчитаны в предлагаемом подходе. С другой стороны, на картинах разрушения выявляются также более крупные фрагменты разрушения — области, состоящие из нескольких ячеек неразрушенного материала, которые окружены «трещинами» — областями, содержащими разрушенный материал. Выявляя на картине разрушения такие частицы, можно было бы перейти к анализу их распределения по размерам. Однако непосредственно осуществить это не удастся, в силу того, что далеко не все «трещины» на картинах разрушения пересекаются или замыкаются, образуя оконтуренные частицы. Причиной являются определенные трудности как вычислительного, так и физического характера. Первые связаны с большими искажениями расчетной сетки при описании разрушения, и поэтому расчет не удастся провести достаточно далеко по деформациям. С другой стороны, стесненные условия деформирования, моделируемые в расчетах, сдерживают рост трещин. Такая особенность картин разрушения затрудняет их автоматическую обработку. Поэтому понадобилась специальные методы обработки получаемых в расчетах изображений.

3. Оценка фракционного состава пыли на основе компьютерной обработки полученных картин разрушений

Представляемая методика определения фракционного состава основана на анализе полученных в расчете картин разрушения. Ее суть состоит в определении площади и формы областей, занятых неразрушенными ячейками, которые полностью или почти полностью окружены разрушенными ячейками. Каждая такая область определяет одну частицу определенного размера.

На первом этапе требуется по изображениям, которые являются результатом численного расчета процессов деформации и разрушения объема среды, выделить объекты — частицы разрушения. Картины разрушения содержат пиксели трех цветов: первый — неразрушен-

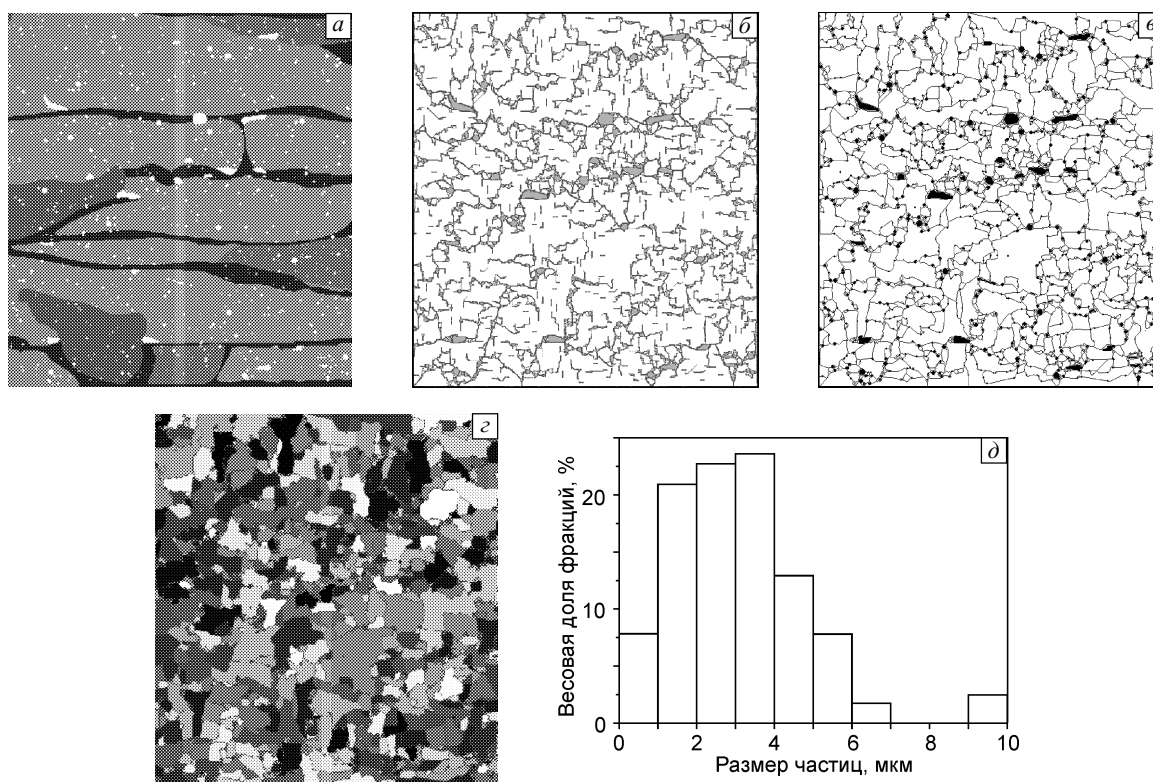


Рис. 1. Структура мезообъема (а), полученная картина разрушения (б) и результат ее обработки с привлечением аппарата распознавания образов (в), выявленные частицы разрушения (г) и распределение их по размерам (д)

ный материал, второй — области разрушения, третий — поры. С целью упрощения последующей обработки изображений была проведена процедура их бинаризации. Для создания бинарных образов использовали пороговую бинаризацию по заданным цветам, т.е. пикселу бинарного изображения присваивается 1, если пиксел исходного соответствует заданному цвету. В данном случае, для выделения контуров объектов проводили бинаризацию только для объектов второго цвета (областей разрушения), для выделения пор использовали бинаризацию по объектам третьего цвета.

Чтобы осуществить замыкание контуров были обработаны серии изображений, соответствующих разным последовательным моментам времени (этапам процесса деформации). Важной характеристикой серии является появление на последующих изображениях новых областей разрушения, что позволяет определить направления роста контура. Применяя известные методы идентификации объектов, например метод трасс [7], определяем «траектории» появления объектов (областей разрушения) на каждом следующем бинарном образе относительно предыдущего. Определенные таким образом траектории помещаем в пространство измерений C^k , которое содержит направляющие векторы движения каждого следующего бинарного образа относительно предыдущего [8].

Само замыкание (формирование) контуров производится при выполнении процедуры построения обобщенного бинарного эквивалента серии изображений. Поскольку в нашем случае существует сильная пространственная корреляция контурных точек и непрерывность линии контура, после обнаружения одной или небольшой группы точек, область пространства измерений C^k , где располагается последующая контурная точка резко сужается. В результате чего операция обнаружения начальной контурной точки и последующего продолжения контура заменяется операцией прослеживания контура, под которой понимается непрерывный переход от текущей точки контура к последующей до замыкания линии контура. Для замыкания линии контура для любой точки каждого следующего бинарного препарата строим операцию выбора области в пространстве измерений C^k , в которой следует извлекать свойства из любого вектора измерений в данной области. Для определения направления продолжения линий и конечной точки ее сходимости было использовано установление эквивалентности совокупностей среди областей и переход от вектора измерений к вектору признаков, что существенно снизило объем вычислений [9].

Таким образом сформировался остов изменений объектов на изображении, т.е. обобщенный бинарный эквивалент, на котором любая совокупность пикселов

исходного препарата представлена линиями толщиной не более чем элементарный элемент изображения (пиксел). Чтобы сохранить линейчатую структуру изображения, не нарушая его связности, использовали процедуру прореживания [10]. На следующем этапе находятся объекты, соответствующие «порам», и исключаются из рассмотрения. Пример построенного обобщенного изображения показан на рис. 1, в. Поры отмечены белым цветом на рис. 1, а и черным — на рис. 1, в. Затем на основании анализа четырехсвязной окрестности осуществляется поиск частиц разрушения на обобщенном бинарном изображении серии. В результате создается матрица меток, каждый элемент которой равен номеру частицы, которому принадлежит соответствующий пиксел изображения. Для наглядного представления найденных объектов на обобщенном изображении, матрица меток преобразуется в палитровое изображение с числом цветов, большим на единицу количества найденных объектов (рис. 1, з).

После определения всех частиц на основании полученной матрицы меток вычисляются площади каждой частицы. В данном случае под площадью понимаем сумму всех пикселов объекта в метрическом эквиваленте (исходя из соответствия, например, 1 пиксел = 0.01 мкм²). В результате получаем двумерный массив, содержащий значения площадей и соответствующее им количество частиц. Затем производится вычисление характерного размера частиц. Здесь под размером понимается значение минимальной оси эллипса, эквивалентного частице по моментам инерции. В результате получаем двумерный массив, содержащий значения размеров частиц и соответствующее им количество объектов.

На основании полученных массивов для площадей и размеров частиц, делая соответствующие выборки, строятся распределения частиц по размерам или площадям. Например, для всех фрагментов размером D_i весовая доля в процентах равна $n_{D_i} S_i / S_{\Sigma} \cdot 100$. Здесь n_{D_i} — количество частиц размером D_i ; S_i — площадь частиц размером D_i ; S_{Σ} — площадь всех фрагментов разрушения. Однако, поскольку для одного и того же размера D_i могут быть встречаться частицы с различной площадью, на самом деле использовалось выражение:

$$n_{D_i} S_i = \sum_{k=1}^{n_{D_i}} S_k,$$

где S_k — площадь k -й частицы размером D_i .

Следует отметить, что в эксперименте (седиментационный анализ) для диапазона от 1 до 10 мкм определяется дискретный набор размеров частиц, кратный 1 мкм. Далее в диапазоне от 10 до 100 мкм — с шагом 10 мкм. В расчетах же получаются частицы, размер которых, выраженный в микрометрах, не равен целым числам. Поэтому при построении распределений частиц

по размерам все фрагменты размером больше 1 мкм и ≤ 2 мкм считали соответствующими размеру 2 мкм, и так далее для других размеров.

На рис. 1 показано, как работает предлагаемый алгоритм, какие при этом выявляются разрушенные частицы и какие получают распределения по размерам.

4. Заключение

Проведенные исследования показали, что предлагаемый подход к анализу серии картин разрушения позволяет адекватно их аппроксимировать и с помощью последующей цифровой обработки получить набор замкнутых контуров и соответственно фрагментов разрушения. Применение предложенного алгоритма к картинкам разрушения мезообъема угля конкретного петрографического состава, полученным в результате численного моделирования их деформации и разрушения, позволило выявить образующиеся частицы разрушения. Построенные распределения этих частиц по размерам имеют максимум в диапазоне 2...6 мкм, что согласуется с данными экспериментальных исследований методами ситового и седиментационного анализа [3].

Данная работа частично была выполнена в рамках междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН № 90.

Литература

1. Ищук И.Г., Трубицына Д.А. Особенности пылевыведения при различных нагрузках на комбайновые очистные забои (на примере шахт Кузбасса) // Рудничная аэрология и безопасность горного производства: Научные сообщения ННЦ ГП – ИГД им. А.А. Скочинского. – 2005. – Вып. 330. – С. 47–58.
2. Макаров П.В., Трубицын А.А., Трубицына Н.В., Кузнецов П.В., Смолин И.Ю., Стефанов Ю.П., Ворошилов С.П. Экспериментальное и теоретическое исследование разрушения углей и расчет выхода пылевых частиц. II. Численное изучение разрушения угля на мезо- и макроуровнях // Физ. мезомех. – 2004. – Т. 7. – Спец. выпуск. – Ч. 2. – С. 249–252.
3. Макаров П.В., Трубицын А.А., Трубицына Н.В., Кузнецов П.В., Смолин И.Ю., Стефанов Ю.П., Ворошилов С.П., Ищук И.Г., Голосков С.И. Численное изучение разрушения угля на мезо- и макроуровнях // Уголь. – 2005. – № 2. – С. 33–36.
4. Макаров П.В., Смолин И.Ю., Черепанов О.И., Трубицына Н.В., Ворошилов Я.С. Упруго-вязкопластическая деформация и разрушение угля на мезоскопическом масштабном уровне // Физ. мезомех. – 2002. – Т. 5. – № 3. – С. 63–87.
5. Трубицын А.А., Макаров П.В., Смолин И.Ю. и др. Адаптация методов мезомеханики к исследованию процессов деформации и разрушения угля. – Кемерово: Кузбасс-ЦОТ, 2002. – 116 с.
6. Саранчук В.И., Айруни А.Т., Ковалев К.Е. Надмолекулярная организация, структура и свойства угля. – Киев: Наукова думка, 1988. – 192 с.
7. Претт У. Цифровая обработка изображений. – М.: Мир, 1982. – Т. 2. – 478 с.
8. Ту Дж., Гонсалес Р. Принципы распознавания образов. – М.: Мир, 1978. – 403 с.
9. Патрик Э.А. Основы теории распознавания образов. – М.: Советское радио, 1980. – 407 с.
10. Лавлидис Т. Алгоритмы машинной графики и обработки изображений. – М.: Радио и связь, 1986. – 400 с.