

УДК 539.422:622.33

**ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ ГАЗОВОЙ СРЕДЫ НА ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
ВЫБРОСООПАСНОГО УГЛЯ ПРИ ОДНООСНОМ СЖАТИИ**

Янькунь Ма¹, Кэ Ян^{1,2}, Дерен Чен³, Чжао Аохань^{1,2}

¹Государственная главная лаборатория по изучению влияния горных работ, предотвращению катастроф и управлению глубокими угольными шахтами, 232001, г. Хуайнань, Китай

²Аньхойский университет науки и технологий,

E-mail: mykunbest@126.com, 232001, г. Хуайнань, Китай

³Компания "Huakun Geological Engineering Co., Ltd", 271000, г. Тайань, Китай

Исследовано влияние давления газовой среды на механические свойства взрывоопасного угля, морфологию его трещин и энергетические характеристики процесса деформирования во время сжатия. Установлено, что при давлении 0.03–1.0 МПа предел прочности угля на одноосное сжатие и модуль упругости уменьшаются с увеличением давления по экспоненциальному закону. С ростом давления постепенно увеличивается угол между поверхностью разрушения и горизонтальной плоскостью угольного образца, морфология трещин угля усложняется. В условиях низкого давления газовой среды уголь может запасать большое количество упругой энергии и его способность противостоять разрушению улучшается.

Пониженное давление газовой среды, выбросоопасный уголь, предел прочности на одноосное сжатие, аккумуляция и высвобождение энергии, фрактальные размерности трещин

DOI: 10.15372/FTPRPI20210106

При разных давлениях газа внешней среды уголь имеет различные механические свойства. Эти различия существенны для понимания механизма выброса угля и газа, а также предотвращения аварий, связанных с газом. Цель настоящей работы — изучение влияния давления газа на механические свойства угля, морфологию трещин и характеристики акустической эмиссии.

В зависимости от того, в какой среде находится уголь (вода, CH₄, CO₂), его механические свойства меняются [1–5]. Если газ адсорбируется, то прочность, коэффициент Пуассона, модуль упругости и другие параметры угольного массива будут уменьшаться. Повышение давления газа способствует снижению его механических параметров [6–10]. При одинаковом давлении газа изменения механических свойств угля более заметны при увеличении адсорбции газа углем. Прочность угольного массива увеличивается, если окружающий его газ не адсорбируется [11].

Исследование выполнено при поддержке Национальной ключевой научно-исследовательской программы Китая (проект № 2018YFC0808000).

Наличие воды влияет на механические свойства угля. Ее наличие приводит к резкому снижению прочности каменного угля, при этом склонность к горным ударам угольного массива существенно снижается [12–15]. На мягкий уголь вода оказывает цементирующее воздействие, скрепляя его частицы, при постепенном увеличении содержания воды прочность угля сначала увеличивается, затем уменьшается [16, 17]. После попадания в уголь газ или жидкость могут выступать в качестве пластификатора, изменяя макромолекулярную структуру и тем самым влияя на механические свойства угля [18].

Адсорбция газа уменьшает поверхностную энергию угля, когезию между его частицами, а также способность угля сопротивляться разрушению и повреждению, т. е. механизм разрушения угольного массива изменяется. В [19] проведены эксперименты по сдвиговой деформации угля и обнаружено, что наличие газа повышает угол между поверхностью трещин и направлением нагрузки.

Для анализа характеристик разрушения угля, содержащего газ, в проводимых испытаниях применялись различные методики мониторинга, в частности, основанные на регистрации акустической эмиссии и электромагнитного излучения. В [20] выявлено, что повышение давления газа способствует уменьшению энергии акустической эмиссии, высвобождаемой углем (до 25.32 %). Однако энергия акустической эмиссии — только часть высвобождаемой энергии. Если влияние газа на разрушение угля рассмотреть с точки зрения энергетической абсорбции и высвобождения энергии угля, то можно получить более корректный результат.

Давление газа в угольных пластах Китая составляет менее 3 МПа [21]. В имеющихся работах в основном исследуются механические свойства угля при давлении среды 1–3 МПа. Однако для изучения связи “жидкость–твердое тело” при дренировании газа необходимы соответствующие параметры при низком атмосферном давлении (<0.1 МПа) или функциональная зависимость механических свойств угля от давления газа. В существующих публикациях условия низкого давления газа не рассматриваются.

Уменьшение давления газа позволяет сократить риск выброса в угольном пласте. Вопрос о том, может ли обеспечение низкого давления среды угольного массива по фронту рабочего забоя положительно влиять на предотвращение и контроль выбросов угля и газа, остается нерешенным. В этой связи изучение механических свойств угля при низком давлении газа — весьма актуальная задача. Для определения влияния давления газа на механические свойства угля изучаемые образцы помещались в среду с давлением 0.030, 0.055, 0.070, 0.087, 0.1, 0.2, 0.5 и 1.0 МПа. Системно исследовались закономерности влияния давления газа на характеристики разрушения при одноосном сжатии, морфологию трещин и преобразования видов энергии.

МАТЕРИАЛЫ И ОБРАЗЦЫ

Естественная неоднородность распределения механических свойств угля и наличие внутренних трещин — неизбежные факторы при исследованиях необработанного угля [18]. Угольные брикеты имеют однородную структуру и одинаковую прочность, что позволяет уменьшить разброс экспериментальных результатов. Они являются подходящим материалом для проведения испытаний по определению характеристик угля и факторов, влияющих на его разрушение [22].

Отобранные для эксперимента образцы угля получены в рабочем забое 25091 угольного пласта № 2 (шахта “Gaocheng”, Китай). Давление газа угольного пласта 1.2 МПа, давление при работе насоса для откачки газа в целях его добычи 0.03–0.10 МПа. Таким образом давление газовой среды в угольном массиве составляет 0.03–1.20 МПа. Уголь, расположенный вблизи добывающей газ скважины, находится при низком давлении.

Согласно геологической структуре угольного пласта, уголь значительно деформирован и обладает рыхлой структурой. По этой причине невозможно получить большие блоки угля. Взятые образцы просеивались в лаборатории, угольный порошок разделялся на две части с размерами частиц 0–1 и 1–3 мм. По распределению Годэна–Шумана, наибольшая прочность спрессованного угля наблюдается при индексе распределения частиц по размеру 0.25. Массовое отношение порошкового угля с размерами частиц 0–1 и 1–3 мм составило 76 : 24. Ниже указаны материалы и их масса (в граммах), необходимые для создания одного угольного брикета:

Порошковый уголь	Частицы 0–1 мм	172.73
	Частицы 1–3 мм	54.55
Раствор гумата натрия	Гумат натрия	4.54
	Вода	18.18

Учитывая, что влажность при формовании сильно влияет на прочность угля и его формирование, оптимальное соотношение воды составляло 10 %. Для обеспечения требуемой прочности угля выбрана концентрация раствора гумата натрия 20 %, являющегося угольным экстрактом с определенными адсорбирующими свойствами.

Пробы порошкового угля с размерами частиц 0–1 и 1–3 мм перемешивали между собой. Гумат натрия растворяли в воде и перемешивали с угольной смесью. Полученный материал загружали в форму и прессовали силой 39.44 кН в течение 30 мин. Затем угольные образцы извлекались из формы и помещались на 48 ч в сушильную печь с температурой 40 °С. После сушки образцы, имеющие высоту 100 мм и диаметр 50 мм, перенумеровывались и герметизировались для сохранения (рис. 1).



Рис. 1. Внешний вид угольных образцов

МЕТОДОЛОГИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальная установка включает в себя управляемую микрокомпьютером универсальную машину для испытаний UTM4204 компании “Shenzhen Suns Technology Stock Co., Ltd”, вакуумный управляемый насос (Fujiwara, Япония), газовый цилиндр высокого давления и экспериментальную газовую камеру (рис. 2).

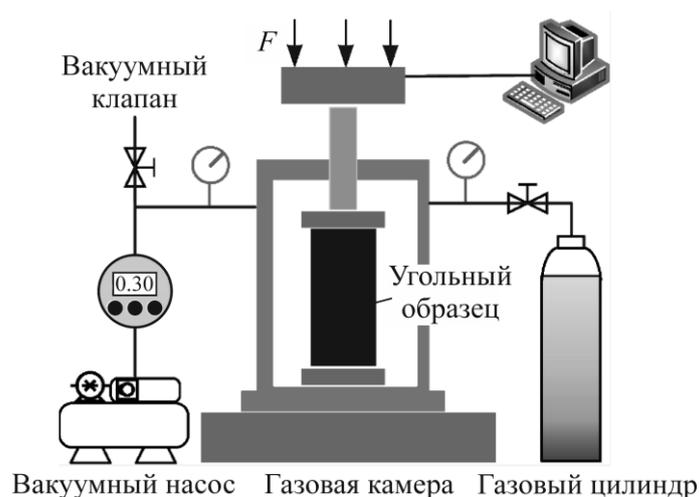


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

Вакуумный управляемый насос состоит из индикатора переключателя давления вакуума, фильтра, вакуумного клапана, гидроизолированного переключателя, электродвигателя и других элементов. Управляемый микрокомпьютером насос способен сгенерировать устойчивое вакуумное давление разного значения. При наличии утечек в системе он вовремя восстанавливает давление. Рабочее отрицательное давление насоса достигает -0.098 МПа, что удовлетворяет экспериментальным требованиям по созданию газовой среды с низким давлением.

Газовый цилиндр высокого давления обеспечивает подачу газа в камеру и регулирует давление на уровне $0-2.5$ МПа с помощью редукционного клапана. Экспериментальная газовая камера соединена с вакуумным насосом и цилиндром высокого давления трубопроводами. В верхней части камеры установлен поршень, позволяющий прикладывать внешнюю нагрузку на образцы.

Для изучения изменения прочности угля в газовой среде низкого давления принимались давления 0.030 , 0.050 , 0.070 и 0.087 МПа. Для сравнения проводились испытания при давлении 0.1 , 0.2 , 0.5 и 1.0 МПа. При каждом значении давления выполнено пять испытаний.

Алгоритм испытания состоит из следующих этапов:

— образец помещали в газовую камеру, устанавливали нужное давление и запускали вакуумный насос для поддержания давления в течение $4-8$ ч. Если давление на цифровом индикаторе не изменялось в течение 30 мин, оно считалось устойчивым;

— газовая камера помещалась на испытательную машину, где угольный образец нагружался смещением верхнего торца до момента разрушения. Скорость смещения 0.5 мм/мин. При каждом давлении осуществлялось пять испытаний;

— для испытания группы сравнения экспериментальную камеру вакуумировали в течение 4 ч до нужного давления, затем в нее подавался газ для стабилизации давления на установленном значении. После адсорбции газа в течение 8 ч угольный образец нагружался;

— после нагрузки образец вынимался и фиксировалось изображение его поверхностных трещин для анализа фрактальных характеристик ее морфологии.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Кривые “напряжение–деформация” получены путем случайной выборки из экспериментальных данных при каждом значении давления (рис. 3а). На рис. 3б продемонстрирован характер разрушения угольных образцов.

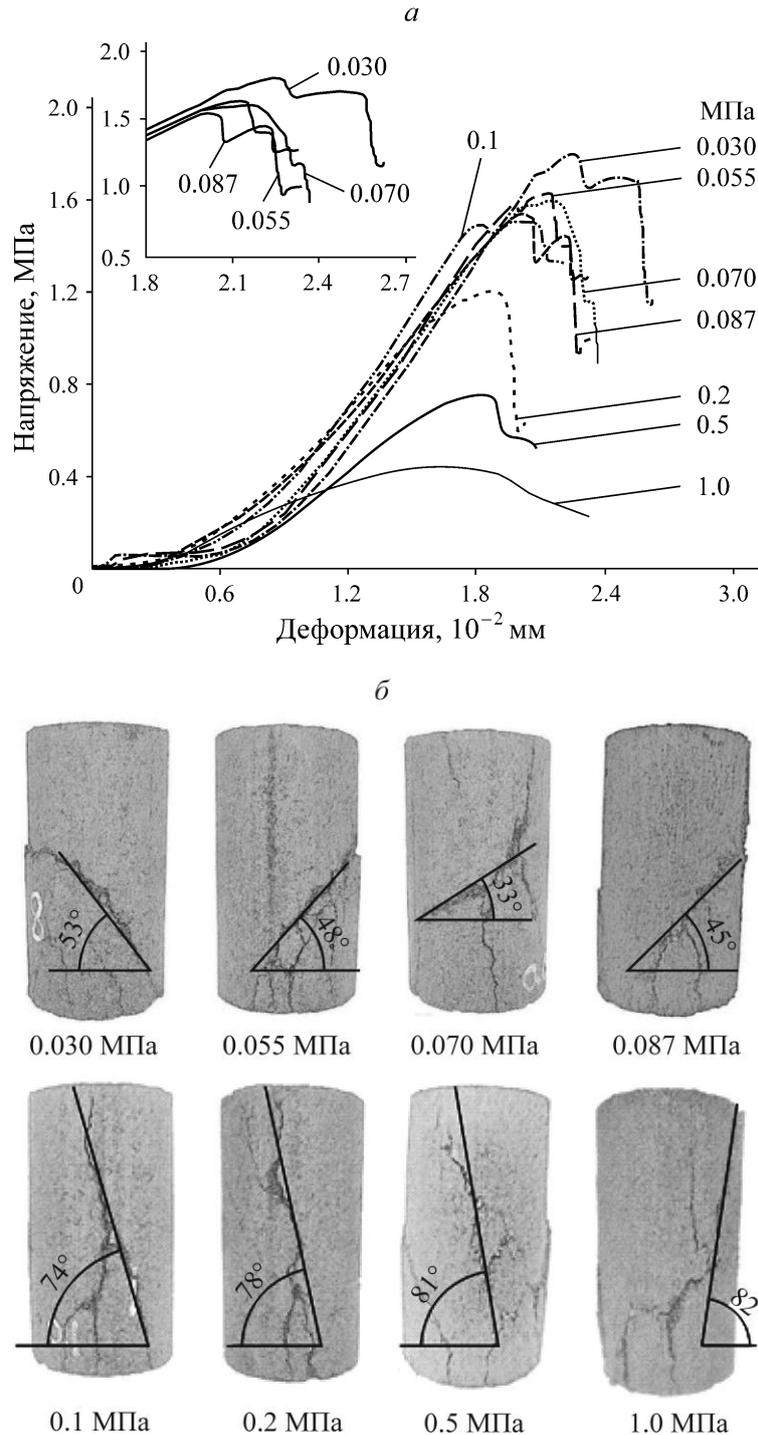


Рис. 3. Кривые “напряжение – деформация” угольных образцов (а) при разных давлениях газовой среды и варианты их разрушения (б)

Результаты эксперимента показали, что предел прочности на одноосное сжатие σ и модуль упругости угля E резко уменьшаются с увеличением давления газа p (рис. 4). Выявлено, что они имеют отрицательную экспоненциальную зависимость от давления газа ($\sigma = 1.7781e^{-1.338p}$, $E = 0.8862e^{-1.401p}$). По сравнению с результатами при $p = 0.1$ МПа средняя прочность угля в среде с $p = 0.030$ МПа увеличилась на 25 %, в среде с $p = 0.087$ МПа — на 10 %.

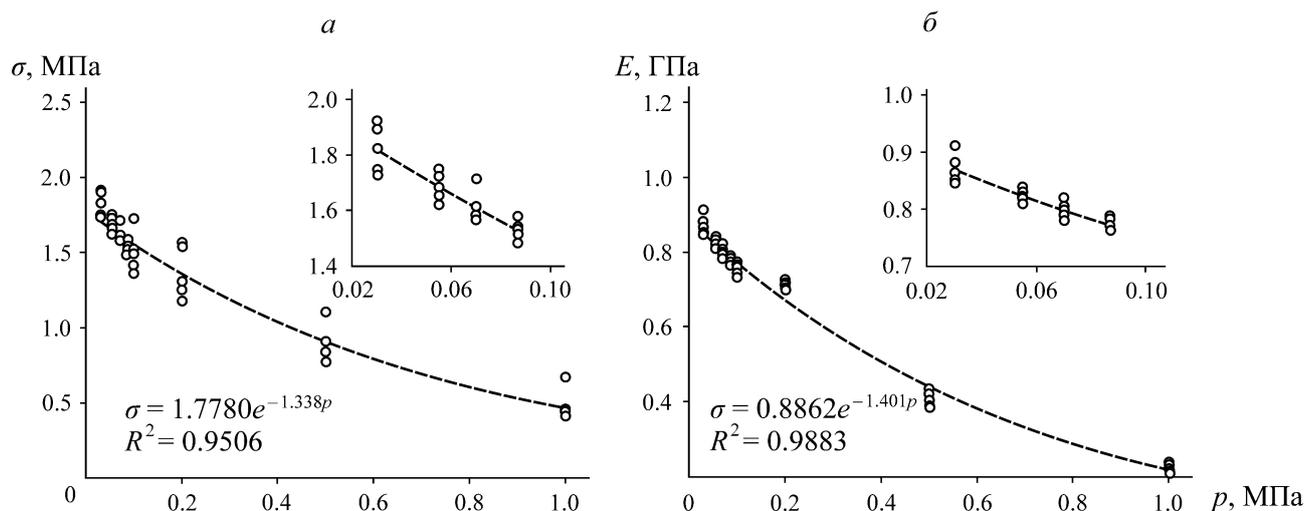


Рис. 4. Зависимость предела прочности (а) и модуля упругости (б) от давления газовой среды

В соответствии с кривыми “напряжение–деформация”, разрушение угля под нагрузкой можно разделить на стадию уплотнения, упругой деформации, пластической деформации и пост-пиковую стадию разрушения. Стадия уплотнения — начальная стадия разрушения угля под нагрузкой, т. е. в условиях низкого давления газовой среды наблюдается значительная деформация угля (рис. 5). Пористая структура угля, содержащая трещины, позволяет накапливать большое количество молекул газа, находящихся в свободном и адсорбированном состоянии. Наличие газа в порах способствует уменьшению деформации угля на стадии сжатия. В газовой среде низкого давления дополнительная несущая способность газа теряется, пористая структура угля становится легкосжимаемой. При низком давлении газовой среды деформация угля на стадии сжатия имеет большую величину. На стадии упругой деформации наклон кривой “напряжение–деформация” характеризует модуль упругости угля. С увеличением давления газа наклон кривой постепенно уменьшается. Аппроксимация данных показала, что модуль упругости экспоненциально уменьшается с увеличением давления газа.

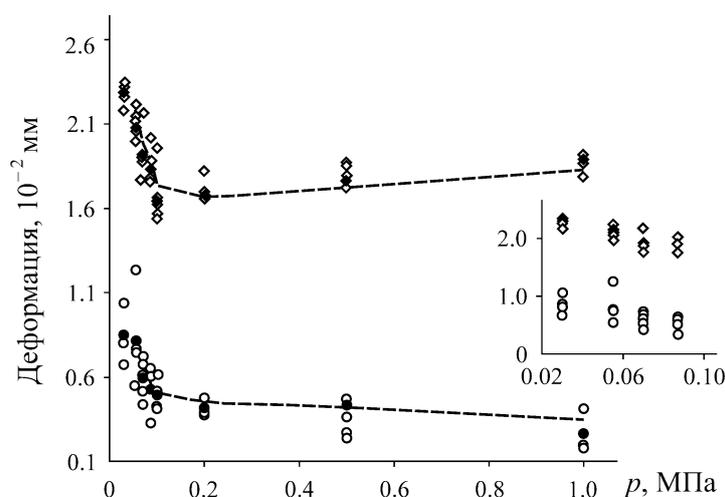


Рис. 5. Зависимости деформации на стадии уплотнения (нижняя кривая) и пиковой деформации (верхняя) угольных образцов при их сжатии от давления газовой среды

На стадии пластической деформации и постпиковой стадии разрушения угля внутренние микротрещины постепенно расширяются, соединяясь между собой. Как только напряжение достигает значения предела прочности, уголь разрушается. Разрушенный уголь все еще обладает некоторой несущей способностью и может поддерживать свое состояние при минимальном уровне напряжения. При высоком давлении газа уголь обладает низкой остаточной прочностью, в условиях низкого давления наблюдается высокая остаточная прочность угля.

При высоком давлении газовой среды молекулы газа проникают в поры угля и разрушают его макромолекулярную структуру. В данном случае механизм разрушения угля аналогичен механизму разрушения полимера с пластификатором. Адсорбция молекул газа на поверхности угля уменьшает поверхностную энергию и связность частиц угля, приводя к уменьшению его прочности.

При добыче газа из угольного массива возникает газовая среда низкого давления: увеличивается поверхностная энергия, связность частиц и прочность угля, т. е. для разрушения угля требуется больше энергии. Существуют два вида адаптивного приспособления массива к нагрузке во время деформации угля — трещинообразование и изменение несущей структуры. Эффект ослабления массива не происходит мгновенно, так как трещинам требуется время на развитие. Приспособление к нагрузке трещинообразованием показывает скрытое и равномерное ослабление образцов, и кривая напряжения угля не растет вновь после падения. Несущая структура разрушается мгновенно. При этом напряженное состояние внутри угольного образца в значительной мере смягчается.

Проанализированы кривые “напряжение – деформация” при различных условиях. Развитие трещин замедлено при низком давлении газовой среды, разрушение угля происходит за счет разрушения несущей структуры. В газовой среде высокого давления снижение связности частиц угля облегчает развитие трещин. Хрупкость угля снижается, спад напряжения не велик. По сравнению с высоким давлением, в среде низкого давления уголь предрасположен к значительному изменению напряжений на стадии разрушения.

После разрушения угольных образцов зафиксированы изображения поверхностных трещин для изучения их морфологии (см. рис. 3б). В газовой среде низкого давления области разрушения угольных образцов соответствуют деформации сдвига. Угол между поверхностью разрушения и горизонтальной плоскостью образца составляет $45-53^\circ$, его изменение не связано с давлением газа. При $p > 0.1$ МПа механизм разрушения угольных образцов включает сдвиг и разрыв, область разрушений расширяется. Угол между поверхностью разрушения и горизонтальной плоскостью образца составляет $74-82^\circ$, что значительно больше, чем при низком давлении газовой среды.

С повышением давления газа морфология поверхностных трещин усложняется. В данной работе количественно проанализировано изменение структуры трещин путем подсчета распределения трещин по размерам. Поверхность угольных образцов разделялась на слои сеткой $L_0, L_0/2, L_0/4, \dots, L_0/2^{n+1}$, подсчитывалось количество трещин в каждой иерархической сети с большей или равной длиной как $N(L_0), N(L_0/2), N(L_0/4), \dots, N(L_0/2^{n+1})$. В конечном итоге на основе определения количества трещин в каждом слое построен график $\lg N - \lg L$. Его наклон представляет собой фрактальную размерность D поврежденных образцов под нагрузкой. Распределение количества трещин по масштабу выражается следующим образом: $N(L_i) = N_0 L_i^{-D}$ ($L_i = L_0/2^{i-1}, i = 1, 2, \dots, n, N_0$ — количество трещин в исходном масштабе L_0, D — фрактальная размерность угольного излома).

Зависимость фрактальной размерности поверхностных трещин каждого угольного образца от давления газовой среды показана на рис. 6. Фрактальная размерность трещин на поверхности образца угля увеличивается логарифмически с увеличением давления, морфология трещин становится более сложной.

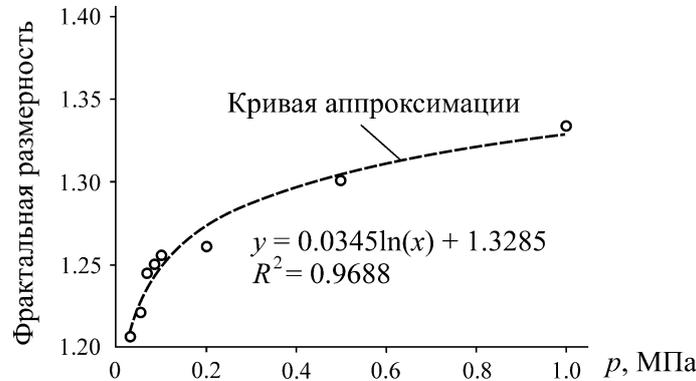


Рис. 6. Зависимость фрактальной размерности от давления газовой среды

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Угольные образцы при различных давлениях газовой среды имеют разные кривые “напряжение – деформация”. Это указывает на то, что характеристики подводимой энергии и ее потери также изменяются при различных давлениях.

Преобразования энергии при разрушении угля. При нагружении угля теплообмен с внешней средой не происходит, что соответствует замкнутой системе. Общая энергия, подводимая нагружающей силой, равна U [23]. Согласно первому закону термодинамики:

$$U = U^e + U^d + U^0,$$

где U^e — энергия упругой деформации; U^d — энергетические потери; U^0 — энергия, выделяемая при тепловом излучении и теплообмене.

Энергией теплового излучения и теплообмена можно пренебречь. Энергия упругой деформации и потеря энергии, которая может высвободиться в единице объема породы, соответствуют

$$U = U^e + U^d.$$

Для одноосного сжатия энергия, подводимая нагружающей силой, и упругая энергия единицы породы определяются как

$$U = \int_0^{\varepsilon_1} \sigma_1 d\varepsilon_1 + \int_0^{\varepsilon_2} \sigma_2 d\varepsilon_2 + \int_0^{\varepsilon_3} \sigma_3 d\varepsilon_3, \quad U^e = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} (\sigma_1^i + \sigma_1^{i+1}) (\varepsilon_1^{i+1} - \varepsilon_1^i),$$

здесь $\sigma_1^i, \varepsilon_1^i$ — напряжения и деформации в каждой точке кривой “напряжение – деформация”.

Рассчитаны значения U, U^e и U^d в процессе разрушения угольных образцов под нагрузкой, построены графики зависимостей указанных энергетических характеристик от деформации образцов угля в процессе испытаний при различных условиях их проведения (рис. 7). Во время деформации и разрушения угля вещество и энергия постоянно обмениваются с внешней средой. При одноосном сжатии внешняя подача энергии осуществляется прессом. Часть подаваемой энергии аккумулируется в форме энергии упругой деформации угля, оставшаяся часть рассеивается в форме энергии пластической деформации и энергии, идущей на разрушение.

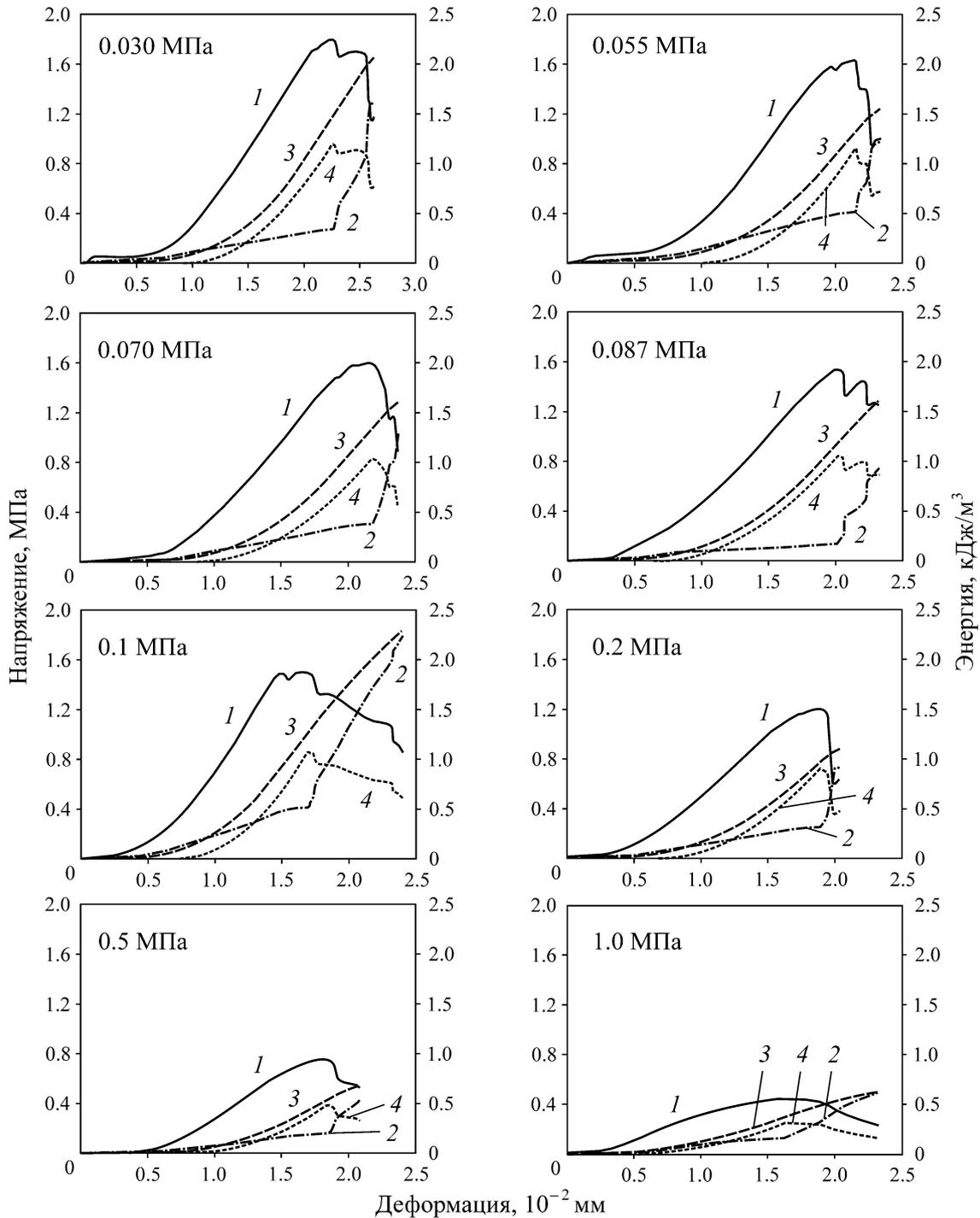


Рис. 7. Энергетические изменения в процессе деформации угольных образцов при разных давлениях газовой среды: 1 — напряжение; 2 — диссипативная энергия; 3 — общая энергия; 4 — энергия упругой деформации

Общая энергия, энергия упругой деформации и рассеиваемая энергия медленно увеличиваются в начале стадии сжатия. Рассеиваемая энергия превышает энергию упругой деформации. Внешняя подводимая энергия тратится на уплотнение и трение угля, поэтому доля рассеиваемой энергии составляет более 80% от общей. При увеличении деформации уголь уплотняется. В условиях низкого давления газовой среды уголь легко сжимается, обеспечивая относи-

тельно большую деформацию. На этой стадии происходят значительные энергетические потери, в то время как в условиях высокого давления энергетические потери и деформация значительно меньше. Они постепенно уменьшаются при увеличении давления газа (отношение энергетических потерь к общим пиковым потерям энергии находится в пределах 8–35 %).

На стадии упругой деформации уголь непрерывно поглощает энергию, большая часть которой аккумулируется в форме энергии упругой деформации, при этом рост диссипативной энергии незначителен. В конце стадии упругой деформации доля рассеиваемой энергии составляет 20–50 % от общей. Отношение рассеиваемой энергии к общей постепенно возрастает с увеличением давления. На этой стадии кривые энергии упругой деформации и энергетических потерь пересекаются. Доля упругой энергии угля увеличивается, приводя к его деформационному упрочнению. В газовой среде низкого давления уголь обладает значительной способностью запасать энергию. При увеличении давления газовой среды эта способность ослабевает.

На стадии пластической деформации постепенно возникают и развиваются микротрещины. Энергия рассеивается в различных формах, но энергия упругой деформации все еще занимает большую долю. Максимальное значение запасенной энергии наблюдается в точке пикового напряжения. В течение данной стадии отношение энергии упругой деформации к общей энергии составляет 50–75 %. С увеличением давления запасенная энергия упругой деформации постепенно уменьшается. Далее микротрещины расширяются и соединяются, количество и плотность их резко увеличиваются. Также растет поверхностная энергия угля, резко возрастают акустическая эмиссия, электромагнитное и инфракрасное излучение. Способность угля запасать энергию в стадии пластической деформации уменьшается, большое количество поступающей энергии высвобождается и рассеивается. Доля энергетических потерь резко на 47 % увеличивается от общей энергии.

На постпиковой стадии разрушения количество запасенной энергии упругой деформации угля уменьшается с высокой скоростью и рассеивается в форме механической энергии, энергии образования поверхностных трещин и энергии, затрачиваемой на трение. Энергетические потери превышают энергию упругой деформации. Доля высвобождаемой энергии упругой деформации достигает 32–47 % при увеличении давления газа. Доля энергии упругой деформации, которая преобразуется в диссипативную энергию, постепенно увеличивается. Большая часть энергии расходуется на образование трещин, приводя их к сложной морфологии.

Влияние давления газа на преобразование энергии. Как показано на рис. 8а, повышение давления приводит к уменьшению общей энергии угля. Общая подводимая энергия варьирует от 1.197 до 1.598 кДж/м³ в диапазоне $p = 0.03 - 0.1$ МПа. При $p > 0.1$ МПа количество общей подводимой энергии резко падает до 1 кДж/м³ и ниже, при $p = 1$ МПа количество общей подаваемой энергии составляет 0.367 кДж/м³.

Пиковое значение энергии упругой деформации представляет собой предел запасаемой породой энергии и отражает способность породы сопротивляться разрушению (рис. 8б). Наличие газа в порах угля снижает поверхностную энергию, связность частиц и предел запасаемой энергии, делая угольный массив предрасположенным к разрушению. При $p = 0.030$ МПа предел запасаемой энергии достигает 1.298 кДж/м³, с увеличением давления он резко уменьшается (при $p = 1$ МПа равен 0.243 кДж/м³). Установлено, что в условиях высокого давления газовой среды предел запасаемой энергии достигается даже при малом количестве подводимой внешней энергии (нагрузки). При превышении предела энергия рассеивается на развитие трещин и трение. С макроскопической точки зрения механизмы разрушения угля являются весьма сложными и сопровождаются множественным развитием поверхностных трещин.

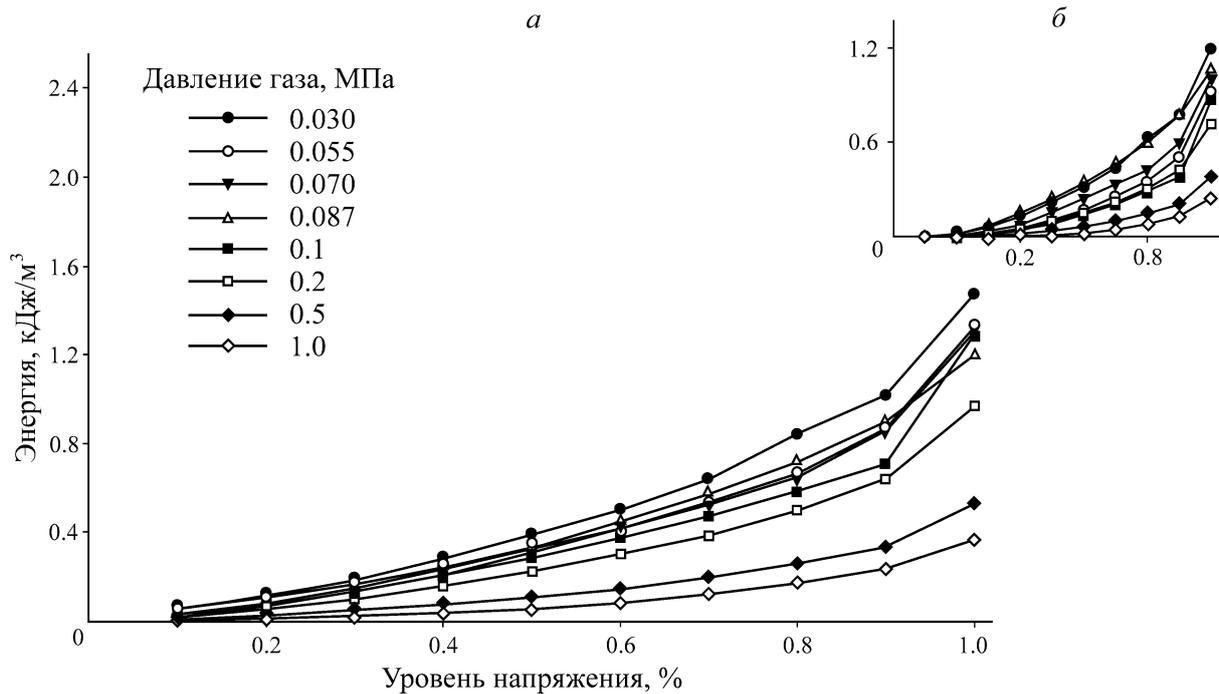


Рис. 8. Энергетические изменения в процессе деформации угольных образцов при разных напряжениях: а — изменения общей энергии; б — изменения пикового значения упругой энергии

При добыче угольных пластов горное сжатие приводит к тому, что уголь перед рабочим забоем находится в состоянии высокого напряжения. В процессе добычи к углю подводится большое количество энергии, а в условиях высокого давления газовой среды он теряет свою прочность. Расширение областей высокого давления газа способствует возникновению выбросов угля и газа. В условиях низкого давления газовой среды предел запасаемой углем энергии увеличивается и повышается способность угля сопротивляться разрушению. В этом случае поверхностная энергия и связность частиц угля больше, чем в условиях высокого давления. Когда подводимая энергия достигает своего предела, образование и распространение трещин требуют большего количества энергии.

ВЫВОДЫ

Проведенные испытания по одноосному сжатию образцов при разных давлениях газа показали, что предел прочности и модуль упругости выбросоопасного угля постепенно уменьшаются с увеличением давления газа по экспоненциальному закону. С повышением давления газа угол между поверхностью разрушения и горизонтальной плоскостью сжимаемых образцов постепенно возрастает (при $p < 0.1$ МПа угол изменяется от 33 до 53° , при $p > 0.1$ МПа — от 74 до 82°), а также наблюдается тенденция к усложнению морфологии трещин и росту их фрактальной размерности. Зависимость фрактальной размерности трещин от давления газа описывается логарифмической функцией. Установлено, что увеличение давления газовой среды ослабляет способность угля поглощать и запасать энергию. При низком давлении газа уголь способен запасать большое количество энергии, его сопротивляемость разрушению увеличивается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Shukla R., Ranjith P. G., Choi S. K., Haque A., Yellishetty M., and Hong L.** Mechanical behavior of reservoir rock under brine Saturation, *J. Rock Mech. and Rock Eng.*, 2013, Vol. 46, No. 1. — P. 83–93.
2. **Poulsen B. A., Shen B., Williams D. J., Huddleston-Holmes C., Erarslan N., and Qin J.** Strength reduction on saturation of coal and coal measures rocks with implications for coal pillar strength, *Int. J. Rock Mech. and Min. Sci.*, 2014, Vol. 71. — P. 41–52.
3. **Ates Y. and Barron K.** The effect of gas sorption on the strength of coal, *J. Min. Sci. Technol.*, 1988, Vol. 6, No. 3. — P. 291–300.
4. **Ranjith P. G., Jasinge D., Choi S. K., Mehic M., and Shannon B.** The effect of CO₂ saturation on mechanical properties of Australian black coal using acoustic emission, *Fuel*, 2010, Vol. 89, No. 8. — P. 2110–2117.
5. **Weishauptová Z., Příbyl O., Sýkorová I., and Machovič V.** Effect of bituminous coal properties on carbon dioxide and methane high pressure sorption, *Fuel*, 2015, Vol. 139. — P. 115–124.
6. **Czaplinski A. and Holda S.** Changes in mechanical properties of coal due to sorption of carbon dioxide vapour, *Fuel*, 1982, Vol. 61. — P. 1281–1282.
7. **Masoudian-Saadabad M., Airey D. W., Gainey A., Morris T., and Berger J.** The mechanical properties of CO₂-saturated coal specimens, *Proc. of 12th Int. Congr. on Rock Mech.*, Beijing, China, 2011.
8. **Masoudian M. S., Airey D. W., and El-Zein A.** A chemo-poro-mechanical model for sequestration of carbon dioxide in coalbeds, *Geotech.*, 2013, Vol. 63. — P. 235–243.
9. **Viete D. R. and Ranjith P. G.** The effect of CO₂ on the geomechanical and permeability behaviour of brown coal: implications for coal seam CO₂ sequestration, *Int. J. Coal Geol.*, 2006, Vol. 66. — P. 204–216.
10. **Viete D. R. and Ranjith P. G.** The mechanical behaviour of coal with respect to CO₂ sequestration in deep coal seams, *Int. J. Coal Geol.*, 2007, Vol. 86. — P. 2667–2671.
11. **Perera M. S. A., Ranjith P. G., and Peter M.** Effects of saturation medium and pressure on strength parameters of Latrobe Valley brown coal: Carbon dioxide, water and nitrogen saturations, *Energy*, 2011, Vol. 36, No. 12. — P. 6941–6947.
12. **Zhang Y. H., Lebedev M., Al-Yaseri A., Yu H. Y., Xu X. M., Sarmadivaleh M., Barifcani A., and Iglauer S.** Nanoscale rock mechanical property changes in heterogeneous coal after water adsorption, *Fuel*, 2018, Vol. 218. — P. 23–32.
13. **Wang K., Jiang Y. F., and Xue C.** Mechanical properties and statistical damage model of coal with different moisture contents under uniaxial compression, *Chin. J. Rock Mech. Eng.*, 2018, Vol. 37, No. 5. — P. 1070–1079.
14. **Xiao X. C., Pan Y. S., Lv X. F., Luo H., and Li Z. H.** Experimental research on gas flow law of containing water coal specimens in deformation and fracture process, *J. China Coal Soc.*, 2012, Vol. 37, No. S1. — P. 115–119.
15. **Su C. D., Zhai X. X., Wei X. Z., and Li Y. F.** Influence of saturation period on bursting liability indices for coal seam #2 in Qian Qiu coal mine, *Chin. J. Rock Mech. Eng.*, 2014, Vol. 33, No. 2. — P. 235–242.
16. **Wang L., Zhu C. Q., Yin Z. Q., and Hou J. L.** Research on soft coal mechanics characteristic test for moisture content effect, *J. Min. Saf. Eng.*, 2016, Vol. 33, No. 6. — P. 1145–1151.
17. **Zhu C. Q., Xie G. X., Wang L., Wang C. B., and Hou J. L.** Experimental study on the influence of moisture content and porosity on soft coal strength characteristics, *J. Min. Saf. Eng.*, 2017, Vol. 34, No. 3. — P. 601–607.

18. **Masoudian M. S., Airey D. W., and El-Zein A.** Experimental investigations on the effect of CO₂ on mechanics of coal, *Int. J. Coal Geol.*, 2014, Vol. 128–129. — P. 12–23.
19. **Xu J., Liang Y. Q., Liu D., Cheng L. C., Wang L., and Song X.** Experimental study of cracks meso-characteristics of raw coal subjected to direct shear load under different gas pressures, *Chin. J. Rock Mech. Eng.*, 2012, Vol. 31, No. 12.
20. **Gao B. B., Lyu P. B., and Guo F.** Study on mechanical properties and acoustic emission characteristics of coal at different gas pressures, *Coal Sci. Technol.*, 2018, Vol. 46, No. 1. — P. 112–119.
21. **Li Z. H., Wang E. Y., and Ou J. C.** Hazard evaluation of coal and gas outbursts in a coal-mine roadway based on logistic regression model, *Int. J. Rock Mech. and Min. Sci.*, 2015, Vol. 80. — P. 185–195.
22. **Wang H. P., Zhang Q. H., Yuan L., and Xue J. H., Li Q. C., Zhou W., Li J. M., and Zhang B.** Development of a similar material for methane-bearing coal and its application to outburst experiment, *J. Rock Soil Mech.*, 2015, Vol. 36, No. 6. — P. 1676–1682.
23. **Xie H. P., Ju Y., Li L. Y., and Peng R. D.** Energy mechanism of deformation and failure of rock masses, *Chin. J. Rock Mech. Eng.*, 2008, Vol. 9. — P. 1729–1740.

Поступила в редакцию 27/XI 2019

После доработки 10/XI 2019

Принята к публикации 15/I 2021