

УДК 622.02

**МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ
АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ УГОЛЬНО-ПОРОДНЫХ ОБРАЗЦОВ**

Дунмин Го, Вэй Чжан, Циюй Чень, Чжили Ван

*Китайский горно-технологический университет,
E-mail: dmguocumtb@126.com, ул. Сюэюань, 11, г. Пекин, Китай*

С целью изучения механизма разрушения и характеристик акустической эмиссии выполнены одноосные нагрузочные испытания угольно-породных образцов с тремя соотношениями угля к породе. Исследованы зависимости изменения напряжения во времени, а также активности акустической эмиссии и ее энергетической оценки, определены значения прочности на сжатие и модуля упругости составных образцов. Проанализированы характеристики разрушения, деформации и акустической эмиссии составного тела.

Угольно-породный образец, соотношение угля к породе, акустическая эмиссия, характеристики разрушения

DOI: 10.15372/FTPRPI20220305

Горный удар — результат совокупной неустойчивости и разрушения механической системы, состоящей из массивов угля и породы, полномасштабное отражение взаимодействия внешней напряженной среды, внутренней структуры массивов и их механических свойств. Увеличение глубины добычи угля в Китае привело к тому, что горный удар стал основным чрезвычайным происшествием, угрожающим безопасности ведения горных работ [1–4]. Исследования методов мониторинга, предотвращения и контроля за горными ударами достигли значительного прогресса. Теоретически и экспериментально обоснован ряд теорий, описывающих разрушение горных пород, условия возникновения горных ударов, способы их предупреждения [5–10]. Понимание механизма разрушения и механических свойств массивов угля и породы значимо для предотвращения горных ударов и обеспечения безопасности горных работ при добыче.

Изучению взаимодействия механической системы “порода–уголь” посвящено множество научных работ. В [11] рассмотрены энергетические и ударные характеристики угольно-породных композитов, в [12] — деформация и закон распространения трещин в угольно-

Исследование выполнено в рамках Общей программы Государственного фонда естественных наук Китая (№ 51974315) и Программы поддержки молодых ученых Китайского университета горного дела и технологий (проект № 80015Z11A05).

породных образцах при циклической нагрузке и разгрузке, в [13] — деформация и разрушение угольно-породного композита. Компьютерная томография и сканирующая электронная микроскопия применяется для изучения характеристик разрушения угольно-породных образцов на макро- и мезоскопическом уровнях [14]. Представлены механические свойства композитов, изменение характеристик разрушения после прохождения пикового напряжения, процесс раскрытия трещин в ненагруженном состоянии и т. д. [15–17]. В [18] выполнены ударно-динамические испытания угольно-породных образцов при разных скоростях деформирования, в [19] — численное моделирование механических свойств и ударного эффекта. Тем не менее экспериментальных работ, проведенных с разными соотношениями угля к породе в композитах, недостаточно.

Когда массив угля и породы подвергается воздействию внешней силы, он разрушается. Во время образования и распространения трещин быстрое высвобождение упругой энергии образует кратковременные волны, которые излучаются в окружающую среду и регистрируются как акустические эмиссии (АЭ) угля и горных пород. Метод акустической эмиссии применяется для прогнозирования горных ударов и определения характеристик разрушения породы. В [20] описаны характеристики АЭ угля и породы при одноосном сжатии и разработана модель развития разрушения угля и породы. На основе характеристик акустической эмиссии процесса усталостного разрушения песчаника предложен закон развития данного вида разрушения [21]. Метод акустической эмиссии применялся для изучения морфологии накопления и рассеяния энергии и закона повреждения угля, предрасположенного к горному удару в условиях многоступенчатого циклического нагружения [22]. Однако работ по использованию метода акустической эмиссии для изучения деформирования угольно-породных композитов крайне мало.

Возникновение горного удара связано не только с энергетическими и механическими свойствами угля и породы, но и со структурными характеристиками, соотношением толщин слоев угля и породы. Характеристики деформации и акустической эмиссии угольно-породных композитов с разным соотношением компонентов должны отличаться из-за различия в модуле упругости, способности накопления энергии и других характеристик угля и породы.

Цель настоящей работы — изучение характеристик деформации и акустической эмиссии угольно-породных композитов с разными соотношениями угля к породе, а также получение контрольных значений для исследования характеристик разрушения и акустической эмиссии слоев угля и породы в процессе разработки угольных месторождений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Образцы угля и породы для испытаний взяты из пласта 4 шахты “Хуафэн”. Согласно стандартам (GB/T 23561.1-2009 ~ GB/T 23561.16-2009), образцам придавались единая форма и размер 50×100 мм. Затем они разрезались и формировались образцы с соотношениями “уголь — порода” 1:2, 1:1, 2:1; размер сохранялся. Уголь с породой соединялся с помощью клея на основе эпоксидной смолы. При испытании угольно-породные композиты, взятые из шахты, сравнивались со склеенными с целью определения толщины клея для обеспечения соединения, близкого к фактическому. Механические параметры измерялись в лаборатории инженерной механики на базе Китайского горно-технологического университета. Результаты измерений представлены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Механические свойства угля и породы

Образец	Прочность на одноосное сжатие, МПа	Максимальная осевая деформация, %	Модуль упругости, ГПа	Коэффициент Пуассона	Внутренняя когезионная прочность, МПа	Угол внутреннего трения, град
Уголь	20.98	0.68	3.36	0.31	4.86	45.8
Порода	71.06	0.30	32.97	0.28	8.99	60.4

Испытания осуществлялись с применением управляемой компьютером электрогидравлической нагрузочной установки с сервоприводом TAW-3000 и устройством измерения акустической эмиссии SAEU2S (рис. 1).



Рис. 1. Установки TAW-3000 (а) и SAEU2S (б) для проведения испытаний

Установка TAW-3000 позволяет точно измерять напряжение, осевую и радиальную деформацию, а также выводить на экран графики изменения требуемых параметров. С помощью устройства SAEU2S изучаются формы колебаний сигналов акустической эмиссии и другие параметры в режиме реального времени, а также фиксируются исходные данные оригинальных форм колебаний сигналов акустической эмиссии. В ходе исследований образцы с тремя соотношениями угля к породе подвергались одноосной нагрузке сжатия со скоростью 0.005 мм/с. Во время их нагружения регистрировалась акустическая эмиссия. С целью снижения влияния дискретности данных на точность измерений для каждого соотношения “уголь – порода” выполнено 4 – 7 серий испытаний.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 представлены характеристики разрушения угольно-породных образцов с разным соотношением угля к породе. Разрушение образца в основном происходит в угольном теле, при этом с увеличением соотношения угля к породе степень фрагментации образца уменьшается.

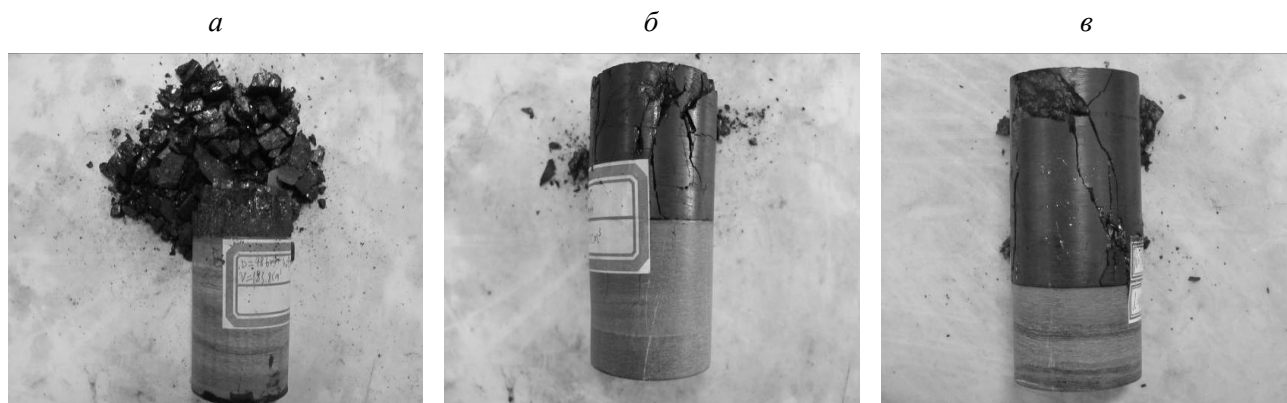


Рис. 2. Разрушение угольно-породных образцов с соотношением “уголь – порода” 1:2 (а), 1:1 (б), 2:1 (в)

При соотношении “уголь – порода” 1:2 угольное тело заметно разрушалось, а поверхность породного тела оставалась без повреждений. В угольном теле образца с соотношением 1:1 формировалась разделяющая трещина растяжения и происходило локальное откалывание угля вблизи поверхности. Поверхность породного тела оставалась без повреждений. При соотношении 2:1 угольное тело повреждалось наклонным разрушением сдвига, вне основной наклонной плоскости сдвига наблюдалась локальная фрагментация, поверхность породного тела не имела повреждений. Результаты испытаний показали, что разрушение угольно-породного образца определяется суперпозицией энергией упругости, накапливающейся в угле и в породе. Данная энергия высвобождается, когда энергии упругости, накопленная в угле, достигает предельного значения, приводящего к разрушению. С увеличением соотношения угля к породе энергия упругости снижается, степень фрагментации образца ослабевает.

На рис. 3 представлены графики изменения напряжения в угольно-породных образцах во времени: имеются фазы линейной упругой деформации, нелинейной упругой деформации и разрушения. Для угольно-породного образца, в отличие от образцов угля и породы, характерно падение напряжения до остаточного значения в рамках фазы разрушения. Иными словами, после того как напряжение достигает пикового значения, оно падает до остаточного. При увеличении соотношения угля к породе пиковое напряжение угольно-породных образцов уменьшается, тогда как остаточное напряжение почти не меняется.

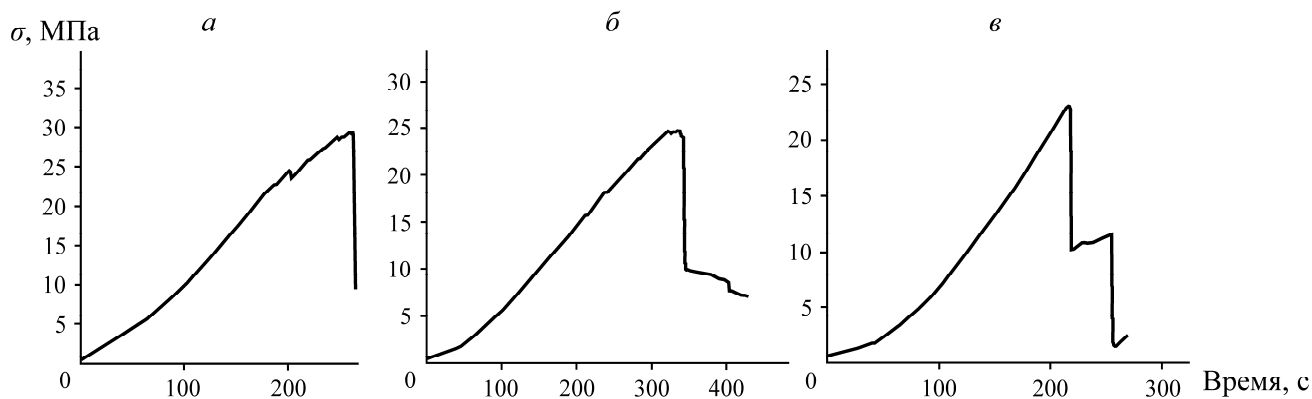


Рис. 3. Развитие напряжения в угольно-породном образце во времени: а — соотношение “уголь – порода” 1:2; б — 1:1; в — 2:1

В табл. 2 приведены механические характеристики угольно-породных образцов, а также угля и породы. При увеличении соотношения угля к породе уменьшаются прочность на одноосное сжатие σ_c и модуль упругости E , а максимальная осевая деформация ε увеличивается. Рассчитаны средние значения этих параметров для угля и породы: $\sigma_c = 46.02$ МПа, $E = 18.16$ ГПа, $\varepsilon = 0.49$. Параметры угольно-породного образца с соотношением 1:1 относительно близки к значениям чистого угля.

ТАБЛИЦА 2. Механические параметры угольно-породных образцов

Соотношение “уголь – порода”	σ_c , МПа	ε , %	E , ГПа
Порода	71.06	0.30	32.97
1:2	28.25	0.46	15.19
1:1	24.71	0.50	13.35
2:1	23.30	0.58	8.07
Уголь	20.98	0.68	3.36

С целью количественного сравнения значений механических характеристик образцов параметры чистого угля принимались за основные, и по отношению к ним рассчитывались относительные значения каждой характеристики угольно-породных образцов. На рис. 4 показаны соотношения между относительными значениями параметров и долей угля в композите n .

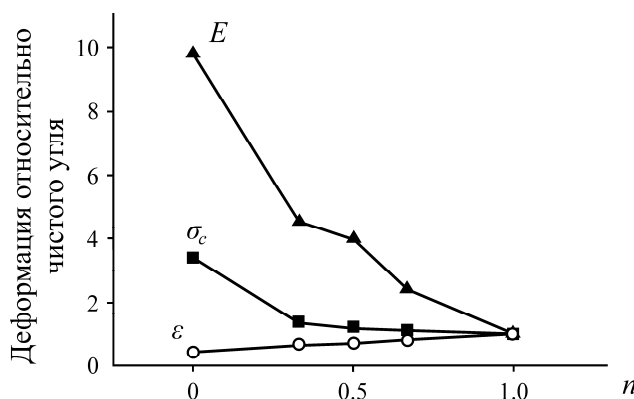


Рис. 4. Изменение механических параметров по отношению к чистому углю в зависимости от соотношения угля к породе в образце

Видно, что при увеличении n прочность на одноосное сжатие и модуль упругости уменьшаются, а максимальная осевая деформация повышается. Отметим, что данные зависимости не являются линейными. Прочность на одноосное сжатие и модуль упругости обусловлены соотношением угля к породе.

В испытаниях применялись два датчика SR150, симметрично установленные в середине угольного тела и ограниченные нагрузочным оборудованием. Диапазон частоты отклика датчика составлял 22–220 кГц, резонансная частота — 150 кГц, пиковая чувствительность — более 65 дБ. Исходя из фоновго уровня шума, пороговые значения формы колебаний сигнала и параметров установлены на отметке 45 дБ, входное усиление — 40 дБ, частота считывания сигнала — 2 МГц. Акустические события, параметры которых ниже пороговых значений, не фиксировались.

На рис. 5 представлены зависимости активности АЭ (число зарегистрированных импульсов акустической эмиссии за единицу времени) и напряжения угольно-породных образцов от времени.

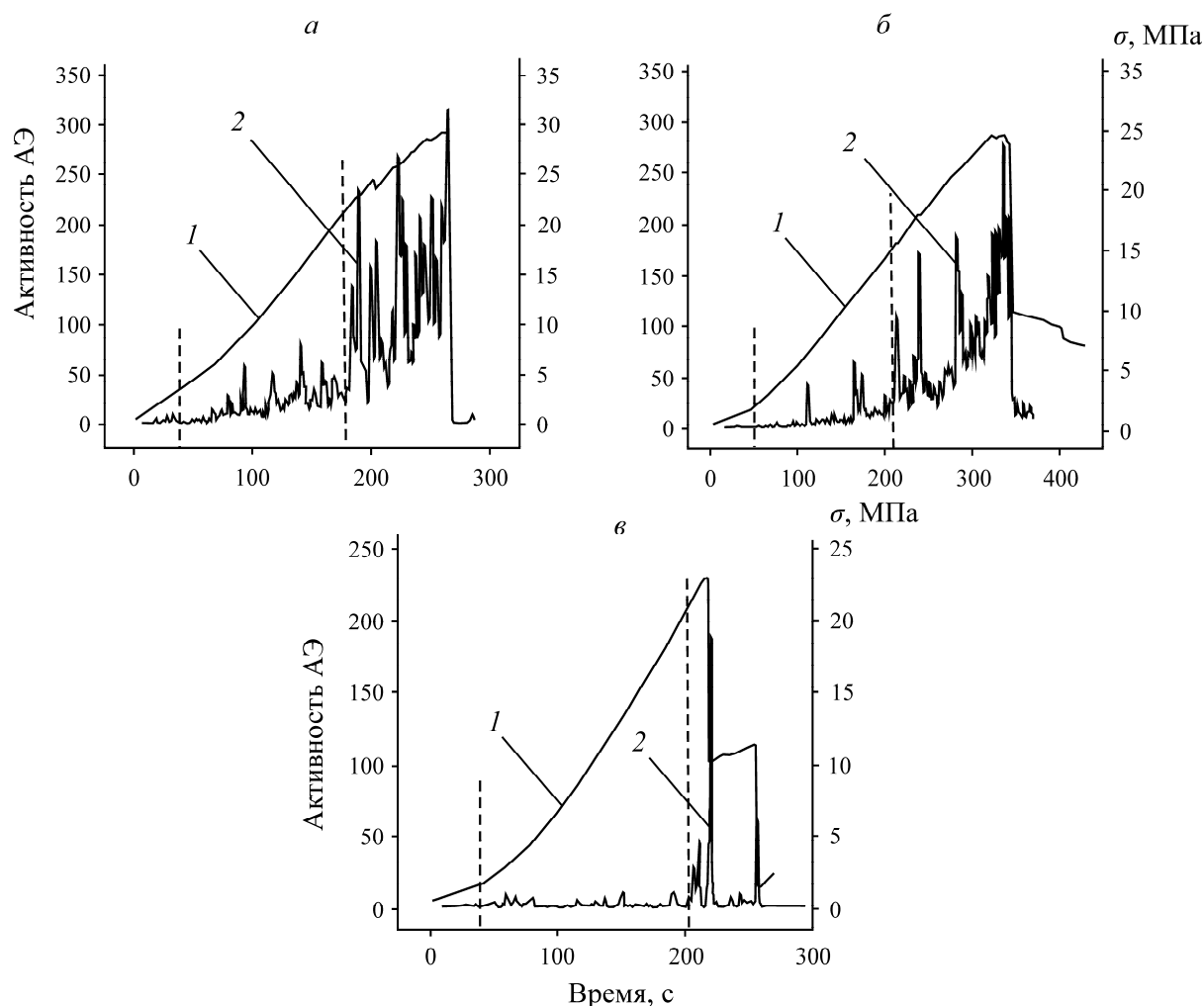


Рис. 5. Зависимости активности АЭ и напряжения для угольно-породных образцов от времени: *а* — соотношение “уголь – порода” 1:2; *б* — 1:1; *в* — 2:1; 1 — осевое напряжение; 2 — активность АЭ

График “активность АЭ–время” состоит из трех стадий, их границы отмечены на рис. 5 штриховыми линиями. Первая стадия совпадает с областью линейной зависимости напряжения от времени. Здесь фиксируется незначительная активность АЭ, так как в данный период времени не наблюдается повреждение образца, отмечается крайне малое количество возникновения или расширения микротрещин, угольное и породные тела в составе образца находятся в состоянии накопления энергии упругости. На второй стадии с повышением напряжения активность АЭ постепенно увеличивается. Происходит разрушение образца в угольном теле, образование небольшого количества микротрещин, породное тело находится в состоянии накопления энергии упругости. На третьей стадии активность АЭ увеличивается при повышении напряжения, пока не достигает пикового значения, после чего резко падает. На данной стадии наблюдается активное разрушение угольно-породного образца, образуются и распространяют-

ся микротрещины. Помимо влияния напряжения, на данной стадии отмечается воздействие энергии упругости, накопленной в породном теле, которая высвобождается после разрушения угольного тела. При увеличении соотношения угля к породе активность АЭ на каждой стадии и в рамках общего процесса разрушения снижается.

Энергетическая оценка интенсивности АЭ отражает относительную энергию и относительную интенсивность события и используется для оценки активности акустической эмиссии. На рис. 6 показаны графики развития энергетической оценки АЭ и напряжения угольно-породных образцов во времени.

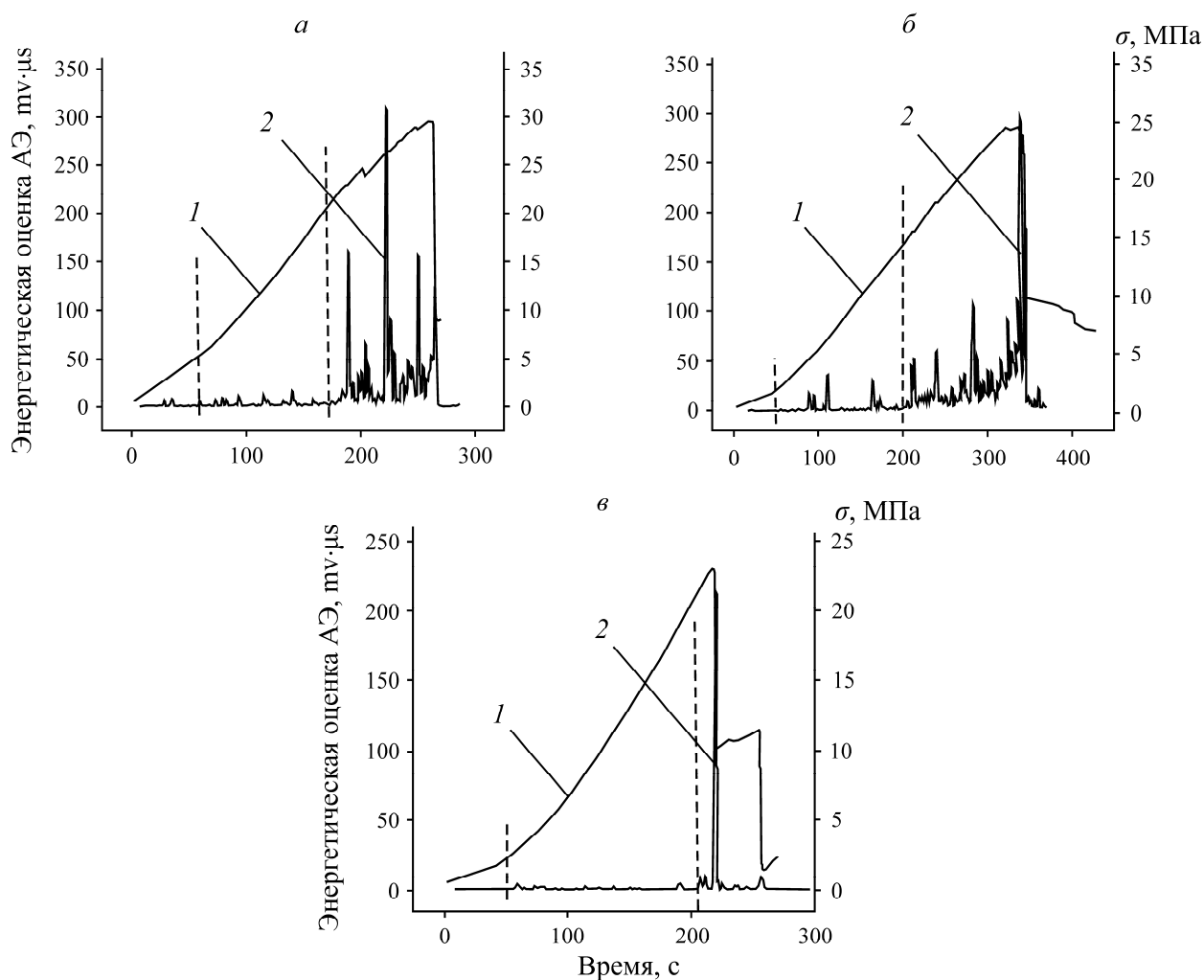


Рис. 6. Зависимости энергетической оценки АЭ и напряжения угольно-породных образцов от времени: *а* — соотношение “уголь – порода” 1:2; *б* — 1:1; *в* — 2:1; 1 — осевое напряжение; 2 — энергетическая оценка АЭ

На первой стадии наблюдается небольшое количество событий акустической эмиссии. Численное значение их энергетической оценки, так же как интенсивность образования и расширения микротрещин, крайне мала. На второй стадии количество событий акустической эмиссии постепенно увеличивается, как и их энергетическая оценка, т. е. происходит медленное увеличение скорости образования и расширения трещин. На третьей стадии количество образующихся и распространяющихся микротрещины резко увеличивается, частично расши-

ренные микротрещины соединяются в макротрещины или даже в поверхности разломов, которые скользят относительно друг друга вплоть до достижения предела напряжения при разрушении образца. Под влиянием высвобождения энергии упругости из породного тела скорость развития трещин и их протяженность значительно увеличиваются. При увеличении соотношения угля к породе общая энергетическая оценка АЭ на каждой стадии и в рамках общего процесса разрушения снижается.

ВЫВОДЫ

Разрушение угольно-породного образца происходит в угольном теле. С увеличением соотношения угля к породе степень повреждения композита постепенно снижается. Вид разрушения изменяется от хаотичного дробления до сдвигового разрушения по наклонным плоскостям, проходя стадию растягивающего разделения образца вдоль его оси. В угольно-породном образце наблюдается падение напряжения до остаточного значения. Достигнув пика, оно падает до максимального остаточного значения. Чем больше соотношение угля к породе, тем меньше пиковое напряжение, остаточное напряжение почти неизменное.

При увеличении соотношения угля к породе прочность на сжатие и модуль упругости уменьшаются, максимальная осевая деформация увеличивается. Значение каждого параметра стремится к соответствующему параметру чистого угля. Определены относительные значения характеристик прочности и деформации угольно-породного образца по отношению к их значениям в угле.

События акустической эмиссии и их энергетические оценки изменяются постадийно и согласуются с графиком развития напряжения во времени. В процессе приложения нагрузки на образец отмечаются следующие стадии: накопление энергии, медленное развитие трещин и быстрое разрушение. Количество событий акустической эмиссии и их энергетическая оценка последовательно увеличиваются на каждой стадии, с ростом соотношения угля к породе — уменьшаются.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Dou Linming and He Xueqiu.** Theory and technology of rock burst prevention and control, Xuzhou, China University Min. Technol. Press, 2001.
2. **Qi Qingxin.** Rockburst theory and technology, Xuzhou, China University Min. Technol. Press, 2008.
3. **Du Taotao, Li Kang, Lan Hang, et al.** Rockburst process analysis insteeply-inclined extremely-thick coal seam, J. Min. Safety Eng., 2018, Vol. 35, No. 1. — P. 140–145.
4. **Kang Hongpu.** Temporal scale analysis on coal mining and strata control technologies, J. Min. Strata Control Eng., 2020, Vol. 2, No. 2. — 023538.
5. **Cook N. G. W.** The failure of rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstracts, 1965, Vol. 2, No. 4. — P. 389–403.
6. **Bieniawski Z. T., Denkhaus H. G., and Vogler U. W.** Failure of fractured rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstracts, 1969, Vol. 6, No. 3. — P. 323–341.
7. **Cook N. G. W., Hoek E., Pretorius J. P. G., Ortlepp W. D., and Salamon M. D. G.** Rock mechanics applied to the study of rock bursts, J. South African Institute of Min. and Metal., 1965, Vol. 66, No. 12. — P. 435–528.
8. **Jin Liping.** Research on the occurrence conditions and prediction methods of rock bursts, Chongqing, Chongqing University, 1992.

9. **Li Yusheng.** Rockburst mechanism and its preliminary application, J. China Institute Min. Technol., 1985, Vol. 14, No. 3. — P. 37–43.
10. **Zhang Mengtao, Xu Zenghe, Pan Yishan.** A united instability theory on coal (rock) burst and outburst, J. China Coal Soc., 1991, Vol. 16, No. 4. — P. 48–53.
11. **Dou Linming, Lu Caiping, Mou Zonglong.** Rock burst tendency of coal-rock combinations sample, J. Min. Safety Eng., 2006, Vol. 23, No. 1. — P. 43–46.
12. **Chen Yan, Zuo Jianping, Song Hongqiang, et al.** Deformation and crack evolution of coal-rock combined body under cyclic loading/unloading effects, J. Min. Safety Eng., 2018, Vol. 35, No. 4. — P. 826–833.
13. **Zhao Y. X., Jiang Y. D., Zhu J., and Sun G. Z.** Experimental study on precursory information of deformations of coal-rock composite samples before failure, Chin. J. Rock Mech. Eng., 2008, Vol. 27, No. 2. — P. 339–346.
14. **Guo Dongming.** Macro- and mesoscopic failure test and theoretical study of deep coal-rock combinations in Huxi mine, China University Min. Technol., Beijing, 2010.
15. **Zuo Jianping and Chen Yan.** Investigation on crack recovery effect of coal-rock combined body under the influence of unloading, J. China Coal Soc., 2017, Vol. 42, No. 12. — P. 3142–3148.
16. **Zuo Jianping, Song Hongqiang, Chen Yan, and Li Yanhong.** Post-peak progressive failure characteristics and nonlinear model of coal-rock combined body, J. China Coal Soc., 2018, Vol. 43, No. 12. — P. 3265–3272.
17. **Zuo Jianping, Chen Yan, and Cui Fan.** Investigation on mechanical properties and rock burst tendency of different coal-rock combined bodies, J. China University Min. Technol., 2018, Vol. 47, No. 1. — P. 81–87.
18. **Miao Leigang, Niu Yuanyuan, and Shi Biming.** Impact dynamic tests for rock-coal-rock combination under different strain rates, J. Vibration and Shock, 2019, Vol. 38, No. 17. — P. 137–143.
19. **Yu Yongjun, Zhu Wanchen, Li Lianchong, et al.** Simulations on hydraulic fracture propagation of coal-rock combination in deep underground, J. Hazard Control Tunnel. Underground Eng., 2019, Vol. 1, No. 3. — P. 96–108.
20. **Liu Baoxian, Huang Jinglin, Wang Zeyun, et al.** Study on damage evolution and acoustic emission character of coal rock under uniaxial compression, Chinese J. Rock Mech. Eng., 2009, Vol. 28, No. 1. — P. 3234–3238.
21. **Xu Jiang, Li Shuchun, Tang Xiaojun, et al.** Rock fatigue damage evolution based on acoustic emission, J. University Sci. Technol., Beijing, 2009, Vol. 31, No. 1. — P. 19–24.
22. **Zhang Guanghui, Deng Zhigang, Jiang Junjun, et al.** Acoustic emission characteristics of coal with strong impact tendency under different loading methods, J. Min. Safety Eng., 2020, Vol. 37, No. 5. — P. 977–982.

Поступила в редакцию 16/V 2021

После доработки 04/III 2022

Принята к публикации 06/V 2022