

А.Ф. Булат, академик НАН Украины,
С.Ю. Макеев, к. т. н.,
С.Ю. Андреев, к. т. н.,
Г.А. Рыжов
(ИГТМ)

П.Е. Филимонов, к. т. н.
(АП «Шахта им. А.Ф. Засядько»)

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ В МАССИВЕ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ЕГО ГАЗОДИНАМИКОЙ

Исследован процесс сдерживания перехода угля из потенциально устойчивого состояния в стадию бурного разрушения. Ей, как правило, предшествует некоторый промежуток времени относительного затишья. Особенно важно улавливать этот момент среди массы различных откликов массива на ведение горных работ. Одним из вариантов управления развитием и релаксацией системы трещин может служить физико-химическая обработка.

FEATURES OF CRACKS FORMATION PROCESS IN ARRAY AT A CONTROL ITS GAS DYNAMICS

The inhibition process of coal transition from the potentially stable state in the stage of stormy destruction is investigation. As a rule, to it is preceded some interval of relative time calm. It is especially important to catch this moment among mass of different responses of array on the conduct of mountain works. Physical and chemical treatment can serve as one of control variants the development and relaxation of the cracks system.

Интенсивность газовыделения при добыче угля зависит от соотношения между проницаемостью массива и содержанием в нем метана. Например, областей со значительной проницаемостью и малым количеством газа или – наоборот. Результат этой взаимосвязи – величина давления метана, которая, в свою очередь, непосредственно связана с величинами соотношений между вертикальными и горизонтальными составляющими напряжений в массиве. Важность выбора верного месторасположения дегазационных скважин не подвергается сомнению. И в этом плане роль газа, как прочностной характеристики угольно-породной среды, рассматривается все чаще [1].

Мировая практика показывает, что в местах залегания осадочных пород величина минимального горизонтального напряжения больше в зонах избыточного порового давления, чем в стабильных зонах. Причем, разница между вертикальной и горизонтальной составляющими уменьшается с увеличением порового давления флюида [2]. Кроме того, общепризнан факт опускания земной поверхности вследствие отбора флюидов из насыщенных ими пластов [3]. Налицо результат некоторой разгрузки горного массива в поле напряжений. Это обусловлено взаимодействием силовых нагрузок и фильтрационных потоков, влияющих на деформационный процесс и развитие трещин [4].

Условия трещинообразования в угольно-породной среде должны быть прогнозируемы и контролируемы. В чрезмерно дефектной структуре, находящейся в разнокомпонентном напряженном состоянии, может происходить

неуправляемое слияние трещин, приводящее к катастрофическим последствиям, как это случается при внезапных выбросах, представляющих из себя своего рода непредусмотренную дегазацию. Здесь не учитывается наличие неоднократно замеченного учеными, так называемого, инкубационного времени [5], служащего неким индикатором перехода к мгновенному разрушению материала. При достижении критического значения энергии, связанной с возникновением макроскопических дефектов, ее рост ускоряется, но перед образованием магистральной трещины в некоторых интервалах времени происходит неожиданное «затишье», а уже следом – лавинообразный процесс. Нечто схожее наблюдалось в экспериментах на слоистых материалах [6], где в сформированном горной породой массиве и при определенном отношении величины расстояния между трещинами к площади всей поверхности массива, по мере моделирования нарастающих напряжений в плоскости, параллельной к плоскости трещин, рост новых дефектов замедляется. Напряжения же воспринимаются все большей площадью трещиноватой слоистой среды. Это противоречит основным понятиям теории трещин, согласно которой площадь их образования постоянно растет с увеличением действующих напряжений. Совершенно не связанная с работами предыдущих авторов попытка фрагментарно объяснить указанный парадокс, исходя из собственных исследований, прослеживается в публикации [7]. В ней рассматривается динамика разрушения горной породы во взаимообусловленной связи всего процесса энергопреобразования в системе, создания напряженного состояния массива и его разрушения. Модель твердого упругого тела учитывает основные качества реальных минеральных сред – сопротивляться изменению объема и формы при действии внешней нагрузки. Разрушение среды происходит при выполнении соответствующих критериев прочности, не зависит от породивших его полей и не влияет на распределение напряжений в материале, которое бы поменяло дальнейший ход процесса. Разделение поля напряжений и разрушения во времени, и, как следствие, пренебрежение влиянием вторичных полей, появляющихся в результате освобождения новых поверхностей от действовавших на них сил, допустимо из-за задержки трещинообразования.

Очень важно определять моменты такого «затишья перед бурей» с помощью, например, регистрации акустической эмиссии и оперативно принимать соответствующие меры безопасности вместо монотонной и, порой, малоинформативной фиксации импульсов при ведении горных работ. Подобная точка зрения вытекает из мнения о важности прогноза после остановки механизмов, воздействующих на забой [8], поскольку перераспределение напряжений в массиве имеет длительность большую, чем длительность технологического цикла. Неизвестно к какому состоянию призабойной зоны пласта может привести процесс перераспределения, но согласно некоторым данным [9], при одноосном сжатии сращивание трещин и разрушение породного материала происходит почти одновременно, а при двухосном – разрушение опережает стадию сращивания. И тогда не избежать неуправляемого варианта реакции горного массива на воздействие.

Собственно, отклик объекта на технологическое воздействие, являющийся суперпозицией перечисленных выше факторов, служит главным мерилем распознавания критической ситуации. Например, в работе [10], где точка зрения на указанную проблему близка нашей, анализируется процесс реагирования накопившего энергию массива на мощную динамическую нагрузку. В результате констатируется, что количество поглощаемой и отдаваемой энергии не равно друг другу, и поэтому в массиве происходит её накопление. Процесс отдачи энергии идет с запаздыванием и сильно зависит от градиента поглощения. В массиве возникают зоны динамического затишья. Это – зоны переходных процессов, формирования нового напряженно-деформированного и фазового состояния, недооценка роли которых может приводить к неверному обоснованию условий возникновения внезапных выбросов и горных ударов. Так как после взрывного нагружения массив «откликается» на воздействие в течение нескольких суток, то, несомненно, наблюдаемые изменения происходят за счет собственных энергетических ресурсов среды, и взрыв только способствует их более активному проявлению [11]. Также находит подтверждение факт, что проведение взрывов инициирует дополнительный приток энергии в призабойную область пласта, отзывающийся в его колебаниях вследствие распространения акустической волны. Такой приток соизмерим с энергией выделяющегося газа и упругого деформирования массива [12]. Причем, колебания угольного пласта в нормальном к нему направлении существенно превышают по амплитуде колебания вмещающих пород (упоминаемая нами выше вертикальная составляющая напряжений). Правда, развитию колебаний в горизонтальной плоскости вблизи забоя препятствует наличие границы уголь – выработанное пространство. В то же время, в работе [13] установлен ещё и волнообразный характер выделения метана при разгрузке подрабатываемого массива от горного давления. Явно выраженная симметрия полуволн указывает на неизменность состояния массива за пределами свода сдвижений, а процессы, протекающие в его пределах, обуславливают изменение этого состояния на всю глубину ведения очистных работ, вплоть до отрабатываемого пласта. Соответственно, изменение величины горного давления в призабойной зоне пласта также носит волнообразный характер с амплитудой и периодом, удовлетворяющим закономерностям развития зон разгрузки и сдвижений массива.

Естественно, что краевая часть массива является областью разгрузки и выхода пласта из сложного напряженного состояния, способных привести к выбросам и горным ударам как при взрывной отбойке, так и при механизированной выемке угля. Характерной особенностью выбросоопасных зон угольных пластов является «задержка деформации» и возрастание концентрации напряжений в призабойной части массива, которые чаще всего наблюдаются при ведении горных работ в зоне геологических нарушений и сопутствуют возрастанию бокового давления, действующего со стороны забоя, а, следовательно – еще более сильному увеличению нормальных к угольному пласту напряжений в области влияния выработки [12]. В этой связи не совсем убедитель-

тельно одно из объяснений признаков отличия выбросов угля и газа от выбросов песчаников глубоких шахт Донбасса [14], где в первом случае главная роль отводится газовому фактору, а во втором – прочностным свойствам пород. Автор считает снижение температуры воздуха в забое после углегазового выброса результатом охлаждения свободного метана, находящегося в порах раздробленного угля, и, наоборот, повышение температуры при выбросе песчаника – переходом механических сил разрушения минеральных агрегатов в тепло. Это противоречит факту [15], когда при разрушении газонасыщенных угольных образцов энергия, идущая на их нагревание, превышала всю энергию, получаемую от пресса. То есть, реален, подчеркнутый нами ранее, вклад газа в прочностную иерархию горного массива, а также трактовка выброса, как процесса более высокого поглощения энергии, затрачиваемой на разрушение материала при быстром его нагружении.

Последнее может происходить, если стадия разрушения опережает стадию сращивания трещин в угольно-породной среде. Меняющие своё взаиморасположение берега трещин в крошащемся материале представляют собой потенциальные полюса для проскальзывания между ними микроплазменных разрядов, соединяющихся в один лавинообразный поток. Он приводит к возникновению солитоновых волн и внезапных выбросов и горных ударов [16].

Специфика плазмы, в частности, отличие от нейтрального газа, связана с волновыми процессами. Существует много типов волн в плазме, определяемых её состоянием, зависящим, в первую очередь, от наличия или отсутствия внешнего магнитного поля. Их классификация проводится прежде всего по величине амплитуды. При больших амплитудах волновые движения относятся к нелинейным, а при наличии регулярности – к солитонам.

Общеизвестно, что распространение волн в плазме определяется её диэлектрическими свойствами, которые в общем случае описываются с помощью тензора диэлектрической проницаемости

$$\varepsilon_{\alpha\beta} = \delta_{\alpha\beta} + \frac{4\pi i}{\omega} \sigma_{\alpha\beta}(k, \omega) \quad , \quad (1)$$

где k и ω – соответственно, волновой вектор и частота волн в плазме; $\delta_{\alpha\beta}$ – символ Кронекера; $\sigma_{\alpha\beta}(k, \omega)$ – тензор проводимости; $\alpha, \beta = 1, 2, 3$.

Для возникновения газодинамического явления необходимо, чтобы частота колебаний плазмы, входящая в (1), превышала частоту колебательного процесса при лавинообразном дефектообразовании, приводящем к созданию магистральной трещины. Согласно исследований [17], условия развития последней во времени оцениваются выражением

$$k = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_2}^{t_1} \text{sgn}(\omega_{\text{МТН}}(t)) dt \quad , \quad (2)$$

где k – безразмерный коэффициент, характеризующий накопление упругой энергии в области вершины трещины; t_1, t_2 – время начала и конца процесса образования трещины; $\omega_{\text{мгн}}(t)$ – мгновенная частота, определяемая посредством преобразования Гильберта, которое позволяет по данным наблюдений получать зависимости изменения мгновенной частоты и фазы упругих колебаний в процессе развития трещины; $\text{sgn}(x) = 1$ – когда x монотонно убывает, $\text{sgn}(x) = 0$ – когда x монотонно возрастает.

Длина образующейся трещины вычисляется следующим образом:

$$L = kV_R(t_2 - t_1), \quad (3)$$

где V_R – скорость развития магистральной трещины.

Именно условия образования магистральной трещины могут стать решающим фактором, связанным с необратимостью процесса разрушения и дающим возможность эффективного контроля изменения напряженно-деформированного состояния горных пород.

В качестве основной оценки устойчивости призабойной части угольного пласта предполагается использовать критическое значение коэффициента интенсивности напряжений K , превышение которого приводит к потере равновесия в указанной зоне и бурному разрушению [16]. Он позволяет влиять на величины параметров в выражениях (1) и (2), так как непосредственно зависит от диэлектрической проницаемости пород, модуля упругости, нагрузки, вязкости материала, его чувствительности как к внешнему электрофизическому воздействию, так и к возникающему изнутри. Согласно выводам [16], изменить K на величину, препятствующую переходу состояния массива из стадии предразрушения в стадию плазменного динамического явления, способна физико-химическая обработка (ФХО). Вследствие ее использования нормальные и касательные напряжения в плоскостях, перпендикулярных плоскости пласта, изменяются незначительно или не изменяются вовсе. Более чем в два раза, уменьшаются касательные напряжения в плоскости угольного пласта. ФХО увеличивает критическое значение коэффициента интенсивности напряжений в 3-6 раз, значительно повышая устойчивость призабойной части массива. Поскольку коэффициент интенсивности напряжений линейно зависит от внешних усилий, ФХО пласта при прочих равных условиях приводит к возрастанию во столько же раз порога критических нагрузок.

Влияние ФХО на газовый фактор исследовалось в лабораторных условиях путем регистрации образующихся трещин методом акустической эмиссии в разрушаемых образцах угля [18]. Известно, что при ведении горных работ в пласте возникают техногенные трещины давления, среди которых наибольшую опасность представляют ориентированные параллельно свободной поверхности. Подобные дефекты наблюдались перпендикулярно нагружаемым граням образца. В этом случае давление газа действует на боковую поверхность трещины, вызывая растягивающие напряжения, приводящие в свою очередь к разрушению материала по механизму послойного отрыва.

Фиксировались образующиеся трещины и их распределение по величине, из которого определялся средневзвешенный размер дефектов. Для установления доли площади, подверженной газовому давлению, необходимо перейти от объемных к поверхностным характеристикам. Возникающие трещины не являются идеально гладкими и их отклонение от плоскости достигает примерно 0,1 общей длины [18]. Число дефектов в объеме вычислялось произведением площади продольного сечения образца и средневзвешенного поперечного размера визуально наблюдаемой трещины. Таким образом, находилось число линейных трещин, площадь которых соотносилась к продольному размеру исследуемых образцов.

По данным измерений акустической эмиссии в углях различных пластов Донбасса образуются трещины со средневзвешенным размером 3,5 мм в количестве порядка 10^4 штук на образец $50 \times 50 \times 50$ мм. Тогда, считая трещины круговыми в плане, можно определить величину пустотности угольного материала

$$m = \frac{0,1 \cdot 3,5 \cdot 10^4 \cdot 50 \cdot 50 \cdot \pi \cdot 3,5^2}{50 \cdot 50 \cdot 50 \cdot 50 \cdot 50 \cdot 4} \approx 0,27$$

Суммарная доля площади, на которую действует давление газа с учетом ее величины в нетронутом массиве (0,06) [18], будет равна 0,33.

Обработка приводит к уменьшению числа образующихся трещин приблизительно в три раза, что в итоге составит $0,27/3 = 0,09$. Когда в угле, согласно принятым стандартам, оказывается около 2 % раствора с 20 %-ой концентрацией реагента, то величина m в зоне ФХО равняется: $0,09 + 0,06 - 0,02 = 0,13$.

Выброс происходит при выполнении известного критерия С.А. Христиановича $m \cdot P - P_0 - \sigma_p > 0$, где P – давление газа; P_0 – атмосферное давление; σ_p – предел прочности угля на отрыв. Последний параметр, характерный для исследованных углей, составляет 0,2 МПа, а давление газа во вскрываемых пластах в среднем равно 2,0 МПа. Учитывая тот факт, что ФХО уменьшает величину σ_p не более, чем на 15%, получим: $0,13 \cdot 2,0 - 0,1 - 0,85 \cdot 0,2 = -0,01$.

Приведенные результаты подтверждают эффективность физико-химической обработки массива ввиду её способности сдерживать процесс перехода угля из потенциально устойчивого состояния в стадию бурного разрушения. Этот переход может характеризоваться неким временем затишья, улавливать наступление которого среди массы различных откликов массива на ведение горных работ было бы особенно важно при осуществлении контроля его состояния, как проявления чувствительности последнего к действию внешних и внутренних сил. Причем, несоблюдение рамок масштабности некоторых внешних воздействий способно возбуждать близкие к ним по физической сущности негативные процессы изнутри в виде плазменной динамики в угольно-породной среде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бобин В.А. Структурный параметр угля как критерий для идентификации опасных газодинамических

явлений в угольных шахтах / В.А. Бобин // Підземні катастрофи: моделі, прогноз, запобігання: Матеріали II міжнародної конференції. – Дніпропетровськ: НГУ, 2011. – С. 16-24.

2. Engelder T. Influence of poroelastic behavior on the magnitude of minimum horizontal stress, S_{h} , in over-pressured parts of sedimentary basins / Engelder T. et al. // *Geology*. – 1994. – 22, № 10. – P. 949-952.

3. Arriaga M.C.S. On the natural collapse of fractures in rocks with low fluid / M.C.S. Arriaga, F.S. Verduzco // *Int. J. Rock Mech. and Mining Sci. and Geomech. Abstr.* – 1998. – 35, № 4-5. – P. 500-501.

4. Xiao Y.X. Assessment of an equivalent porous medium for coupled stress and-fluid flow in fractured rock / Y.X. Xiao, C.F. Lee, S.J. Wang // *Int. J. Rock Mech. and Mining Sci.* – 1999. – 36, № 7. – P. 871-881.

5. Manjavidze J. Phenomenology of rupture process in homogeneous isotropic media / J. Manjavidze, V. Sgrigna, D. Zilpimiani // *Nuovo cim. C.* – 2000. – 23, № 2. – P. 165-175.

6. Bal T. Explanation for fracture spacing in layered materials / T. Bal, D.D. Pollard, H. Gao // *Nature (Gr. Brit.)*. – 2000. – 403, № 6771. – P. 753-756.

7. Каманин Ю.Н. Исследование разрушения твердого минерального массива, находящегося под действием ударной нагрузки на основе ранее определенного нестационарного поля напряжений / Ю.Н. Каманин, Л.С. Ушаков // *Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды: конф. с участием иностр. учёных.* – Новосибирск, 2010. – Т.3. – С. 297-300.

8. Деглин Б.М. О повышении точности прогнозов выбросоопасности / Б.М. Деглин // Підземні катастрофи: моделі, прогноз, запобігання: Матеріали II міжнародної конференції. – Дніпропетровськ: НГУ, 2011. – С. 50-53.

9. Bobet A. Fracture coalescence in rock-type materials under uniaxial and biaxial compression / A. Bobet, H.N. Einstein // *Int. J. Rock Mech. and Mining Sci.* – 1998. – 35, № 7. – P. 863-869.

10. Пространственно-временные колебательные особенности синергетических свойств состояния ударопрочного массива горных пород, определяемые по данным шахтного сейсмологического каталога / О.А. Хачай, О.Ю. Хачай, В.К. Клименко, О.В. Шипев // *Горн. инф.-анал. бюл.* – 2011. – № 2. – С. 305-312.

11. Викторов С.Д. Изучение процессов разгрузки образцов горных пород после взрывного нагружения / С.Д. Викторов, А.Н. Кочанов // *ФТПРПИ.* – 2004. – №2. – С. 52-57.

12. Прогноз опасности внезапных выбросов и горных ударов по энергии массива / Г.Н. Фейт, О.Н. Малинникова, В.С. Зыков, В.А. Рудаков // *ФТПРПИ.* – 2002. – № 1. – С. 67-70.

13. Козырева Е.Н. Газогеомеханические процессы во вмещающем массиве впереди движущегося очистного забоя / Е.Н. Козырева, В.Е. Ануфриев, М.В. Шинкевич // *Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды: конф. с участием иностр. учёных.* – Новосибирск, 2010. – Т.1. – С. 122-127.

14. Трощенко В.В. К вопросу о выбросах песчаников / В.В. Трощенко // *Горн. инф.-анал. бюл.* – 2011. – № 3. – С. 192-195.

15. Фейт Г.Н. Тектоно-физический эффект зональной генерации метана в угольных пластах / Г.Н. Фейт, О.Н. Малинникова // Підземні катастрофи: моделі, прогноз, запобігання: Матеріали II міжнародної конференції. – Дніпропетровськ: НГУ, 2011. – С. 59-68.

16. Феноменологическая модель генезиса динамических явлений в шахтах / А.Ф. Булат, С.Ю. Макеев, С.Ю. Андреев, Г.А. Рыжов // Підземні катастрофи: моделі, прогноз, запобігання: Матеріали II міжнародної конференції (18 травня 2011 р.). – Дніпропетровськ: НГУ, 2011. – С. 11-16.

17. Пат. 2410727 Россия, МПК⁷ E21C 39/00. Способ определения размеров трещины в породах / П.Б. Бортников, А.П. Кузьменко, С.М. Майнагашев, Ф.Д. Шмаков: Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий. – № 2009119103/28; заявл. 20.05.2009; опубл. 27.01.2011, Бюл. 3.

18. Репка В.В. Физико-химическая механика и способы управления свойствами и состоянием углеводородных массивов: дис... д-ра техн. наук: 05.15.11 / Репка Валерий Васильевич; Ин-т геотех. механики АН Украины. – Днепропетровск, 1991. – 495 с.