

УДК 622.831: 622.537.86

Э.П.ФЕЛЬДМАН (д-р физ.-мат. наук, проф.)

Н.А. КАЛУГИНА (д-р техн. наук, уч.секретарь)

О.В. ЧЕСНОКОВА (науч. сотруд.)

Институт физики горных процессов НАН Украины, г. Днепр

ДИНАМИКА РАЗВИТИЯ ГАЗОНАПОЛНЕННЫХ ТРЕЩИН В КРАЕВОЙ ЧАСТИ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА

Представлены результаты анализа процесса развития магистральных трещин в угольном пласте вследствие быстрой разгрузки и при движении забоя с постоянной скоростью. Работа выполнена на основе теоретических исследований, включающих методы термодинамики, статистической физики, асимптотического анализа. Найденные критерии изменения параметров (пластового давления газа, размеров трещин, горного давления, поверхностной энергии угля/породы, модуля упругости), при которых становится возможным спонтанное разрушение пласта, позволяют обсуждать возможность прогноза внезапных выбросов угля, породы и газа.

Ключевые слова: углепородный массив, газонаполненная трещина, разрушение

Процесс разрушения угля и вмещающих его пород, в пустотах которых содержится газ, представляет практический интерес по двум причинам. Во-первых, разрушение входит как основное звено в технологическую цепочку добычи полезных ископаемых. Во-вторых, разрушение - это источник таких опасных явлений, как горные удары, вывалы, внезапные выбросы и т.д. Фундаментальное научное значение имеет построение и разработка физико-математических моделей явления разрушения. Комплексное физическое исследование такой сложной системы, как газонасыщенная трещиновато-пористая горная порода позволит выявить основные механизмы, обуславливающие возникновение выбросоопасных ситуаций.

В нетронутом трещиноватом газонасыщенном угольном/породном пласте процессы разрушения не происходят, несмотря на разрывающее действие давления газа P_0 , заполняющего полости трещин. Трещины "задавлены" горным давлением. При отработке пласта в его краевой части происходит разгрузка от напряжений, порождённых горным давлением [1]. Рассмотрим для определённости пласт горизонтального залегания (рис.1).

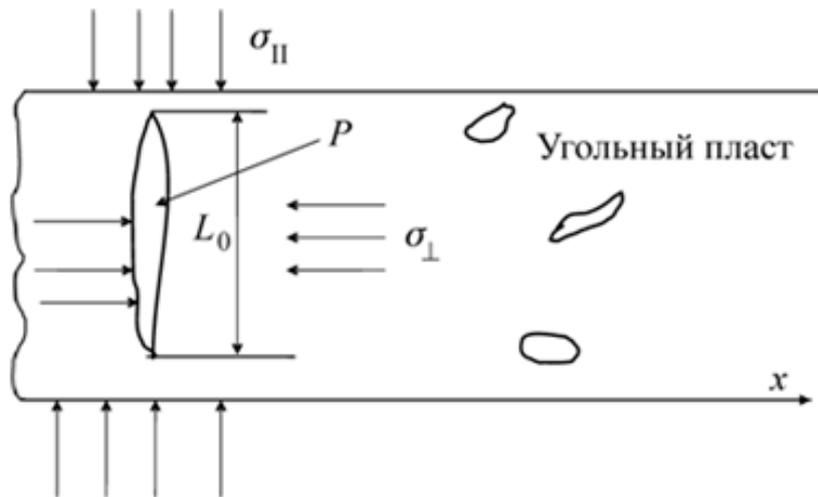


Рис. 1. Схема расположения трещин в газонасыщенном угольном пласте

В этом случае вертикальные напряжения (собственно горное давление) перераспределяются, сильно возрастая вблизи забоя. На самой обнаженной поверхности можно считать эти напряжения равными нулю. По мере удаления от этой поверхности напряжения σ_{\perp} нарастают, приближаясь к своему максимуму σ_m . Поэтому величина разгрузки характеризуется разно-

стью $\sigma_m - \sigma_{\perp}$. Таким образом, имеющиеся в пласте природные трещины, параллельные краевой поверхности пласта, освобождаются от сжимающего горного давления и становятся склонными к росту под действием растягивающих напряжений, создаваемых давлением заключенного в них газа [2, 3]. Трещины горизонтального залегания и, в определённой мере, наклонные трещины, по-прежнему не способны к росту. В то же время они играют важную роль в процессе разрушения краевой части пласта, поскольку являются основными транспортными каналами, регулирующими фильтрацию газа из угля/породы как в полости растущих трещин, так и наружу, в выработанное пространство [4]. В свою очередь, скорость фильтрации газа определяет давление газа в растущих трещинах, а значит и скорость их роста. Из-за неоднородности горного давления проницаемость пласта может сильно меняться по его простиранию, становясь очень малой в окрестности максимума опорного (горного) давления. Как следствие, может сформироваться “пробка”, запирающая выход газа в выработанное пространство и способствующая развязыванию спонтанного разрушения с выбросом угля, породы и газа [5]. Газ, обычно это метан, в угольных пластах и во вмещающих породах сосредоточен в основном в трещинах и порах материала в свободном виде, хотя часть метана растворена помоллекулярно в угольной матрице в виде твёрдого раствора [4].

Давление газа в полостях трещин (пластовое давление) в нетронутом пласте в несколько раз меньше горного давления. В процессе отработки, после разгрузки пласта, разрушение инициируется как раз газовым давлением. Газ стремится разорвать пласт. Этому препятствуют силы когезии. Разрыв происходит, когда, согласно Гриффитсу [6, 7], коэффициент концентрации напряжений в устье трещины (пропорциональный действующим напряжениям на берегах трещины, т.е. в нашем случае, давлению газа) превзойдёт модуль сцепления угля/породы. Известно [3, 8] и из простых физических соображений ясно, что в развитии трещин после внезапной разгрузки присутствует этап, который уместно назвать ударным. На этом этапе, который длится тысячные доли секунды, трещина мгновенно разбухает из-за исчезновения сжимающих её напряжений бокового распора, равных примерно половине горного давления. Роль давления газа на этом этапе пренебрежимо мала ввиду, как уже указывалось, его малости по сравнению с горным давлением. Увеличение объёма трещины идёт целиком за счёт увеличения её просвета (зияния) z_0 и определяется величиной разгрузки, исходной длиной L_0 размерами трещины и упругими модулями матрицы B . Количество газа в трещине на ударном этапе её развития остаётся постоянным по причине кратковременности этапа. Давление газа в трещине в конце этапа уменьшается по сравнению с исходным пластовым давлением ввиду разбухания трещины, и оно определяется из уравнения состояния газа. Если, несмотря на уменьшение давления газа в трещине к концу этапа, коэффициент концентрации напряжений всё же превзойдёт модуль сцепления, то трещина должна, казалось бы, мгновенно прорасти сквозь пласт. В действительности, однако, следует учесть [8], что с ростом трещины увеличивается её объём, следовательно, давление газа, при его неизменном количестве, падает. Поэтому, скачкообразный рост трещины ограничен таким её размером, при котором гриффитсовское неравенство превращается в равенство. Это и есть механизм известного явления стрельяния трещин.

В предлагаемой работе найдены интервалы значений управляющих параметров, при которых происходит стрельяние трещин. После выстреливания начинается относительно медленный, названный нами фильтрационным, этап роста трещин. Он обусловлен тем, что давление газа в трещине по завершении ударного этапа становится и в дальнейшем остаётся меньшим, чем пластовое давление газа в окружающем трещину материале. Это создаёт термодинамическую силу [9] (градиент химического потенциала метана), которая гонит газ по фильтрационным каналам из угля/породы в полость трещины. Несмотря на поступление газа в трещину, его давление в трещине падает из-за увеличения объёма трещины при её росте. Кроме того, давление газа падает вследствие выхода газа путём фильтрации наружу, в выработанное пространство.

Скорость роста трещины на фильтрационном этапе определяется проницаемостью пласта и её неоднородностями. В [10] впервые дано количественное описание фильтрационного этапа роста трещин на основе составления и решения адекватных уравнений фильтрации и предположения о том, что на этом этапе в любой момент выполняется критическое равенство Гриффитса между коэффициентом концентрации напряжений (в нетронутом пласте он равен M_0) и

модулем сцепления M_c материала. Важный для практики результат исследования этого этапа состоит в оценке времени прорастания трещин сквозь пласт. Для представительных значений управляющих параметров (пластового давления, исходных размеров трещины, пустотности, проницаемости пласта, поверхностной энергии угля/породы) скорость роста магистральной трещины - порядка метра в минуту. Найдены области изменения управляющих параметров (пластового давления газа, размеров трещин, горного давления, поверхностной энергии угля/породы, модуля упругости), внутри которых спонтанное разрушение пласта становится возможным. Это открывает путь к прогнозированию внезапных выбросов угля, породы и газа.

Диаграмма, отображающая различные сценарии роста трещин в зависимости от параметров $\frac{M_0}{M_c}$ и $a \equiv \frac{\sigma_m - \sigma_{\perp}}{B} \frac{L_0}{z_0}$, приведена на рис.2.

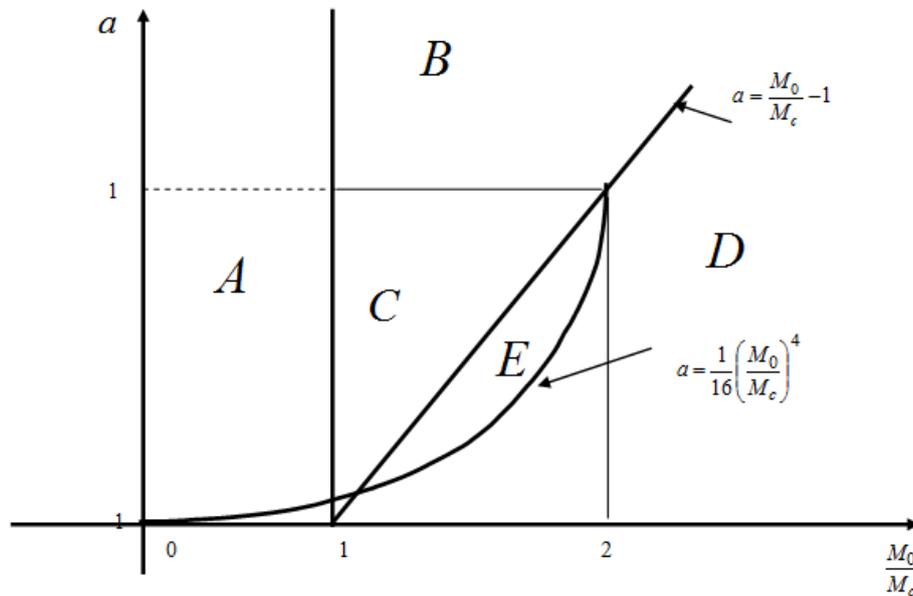


Рис. 2. Диаграмма различных сценариев роста трещин

- A – трещины не растут ($\frac{M_0}{M_c} < 1$); B – трещины растут в два этапа за счет фильтрации газа в их полость, на первом этапе происходит лишь разбухание, на втором – рост трещин ($a > 1, a > \frac{M_0}{M_c} - 1$); C – мгновенное прорастание трещин после натекания газа ($\frac{M_0}{M_c} - 1 < a < 1$); D – «выстреливание», после чего – прорастание за счет фильтрации ($\frac{1}{16} \left(\frac{M_0}{M_c}\right)^4 < a < \frac{M_0}{M_c} - 1$); E – мгновенное прорастание без фильтрации ($a < \frac{1}{16} \left(\frac{M_0}{M_c}\right)^4; a < \frac{M_0}{M_c} - 1$).

Полученное критериальное неравенство [10], при выполнении которого происходит скачкообразный рост трещины, оно является обобщением критерия Гриффитса на случай, когда разрывающие напряжения создаются газом полости трещины:

$$\frac{\sigma_m - \sigma_{\perp}}{B} \frac{L_0}{z_0} < \frac{M_0}{M_c} - 1.$$

Что касается относительной величины скачка размера трещины, то он (скачок) растет с ростом $\frac{M_0}{M_c}$, т.е. с увеличением пластового давления, уменьшением модуля сцепления, ростом зияния и уменьшением разгрузки.

Построение и анализ уравнения для давления газа в полости магистральной трещины в краевой части пласта, когда разгрузка реализуется за счет стационарного, относительно медленного, постепенного подвигания забоя, показали, что определяющим в этой ситуации является отношение времени заполнения трещины газом ко времени подвигания забоя на расстояние порядка величины зоны разгрузки.

Время выхода газа из угля в выработку $t_c \approx \frac{l^2}{D_f}$. Для коэффициента фильтрации метана в угле $D_f \sim 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ и расстояния от забоя до пика опорного давления $l \sim 4 \text{ м}$ t_c порядка суток, т.е. вполне может быть гораздо меньше времени подхода забоя к трещине $t_m = \frac{l}{v}$ (v – скорость подвигания забоя). В таком случае пласт быстро дегазируется и опасность выброса исчезает. Соответствующее критериальное неравенство имеет вид:

$$\frac{lv}{D_f} \ll 1,$$

т.е. скорость подвигания забоя должна быть достаточно малой, а коэффициент фильтрации через поверхность забоя – большим. Вместе с тем, может случиться и так, что при большой скорости подвигания забоя и очень малом коэффициенте фильтрации забой может продвинуться и «поглотить» трещину за времена, меньшие времени наполнения трещины газом. Соответствующий критерий имеет вид

$$v \cdot \frac{\pi z_0^2}{4\gamma^2 D_f} \geq \frac{l}{a},$$

где параметр $a \equiv \frac{\sigma_m L_0}{Bz_0}$, γ – пористость угля. И в таком случае исчезает опасность

выброса. Для этого зияние трещины должно быть достаточно большим, коэффициент фильтрации малым, скорость подвигания забоя v большой, пористость малой, то есть речь может идти о плотном угле или породе.

Таким образом, модификация теории Гриффитса применительно к газонасыщенному, трещиновато – пористому угленородному пласту, позволила найти области изменения управляющих параметров (пластового давления газа, размеров трещин, горного давления, поверхностной энергии угля/породы, модуля упругости), внутри которых спонтанное разрушение пласта становится возможным. Это открывает путь к прогнозированию внезапных выбросов угля, породы и газа. Исследование возможных вариантов развития магистральных трещин в краевой части угольного пласта при разгрузке от горного давления за счет стационарного подвигания забоя, позволило получить критериальные неравенства, соответствующие безопасным условиям ведения добычных работ.

Библиографический список

1. Алексеев А. Д. Физика угля и горных процессов: монография / А. Д. Алексеев; Ин-т физики горных процессов НАН Украины. – Киев : Наук. думка, 2010. – 423 с.
2. Христианович С.А. Внезапные выбросы угля (породы) и газа. Напряжения и деформации / С.А. Христианович, Р.Л. Салганик. – М.: Ин-т проблем механики (препринт акад. наук СССР № 153), 1980. – 87 с.
3. Шевелев Г. А. Динамика выбросов угля, породы и газа / Г.А. Шевелев. - К. : Наук. думка, 1989. – 160 с.
4. Alexeev A.D., Feldman E.P., Vasilenko T.A., Kinetics of methane desorption from coal nano- and mesostructures, Energy and Fuels 2010, v.24, pp 4375-4379.
5. Христианович С.А. Выбросоопасные ситуации. Дробление. Волна выброса / С.А. Христианович, Р.П. Салганик. – М.: ИПМ СССР (препринт № 152), 1980. – 44 с.
6. Griffith A.A., The phenomena of rupture and flow in solids, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1921, A221, pp 163-198.
7. Varenblatt G.I. Mathematical theory of equilibrium cracks formed under the brittle fracture. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 1961, v.4, pp 3-56.

8. Feldman E.P., Yurchenko V.M., Streltsov V.A., Volodarskaya E.V., Subcritical growth of cracks in gas-contained materials, *Sov. Phys. Solid State* 1992, v.34, #2, pp 618-627.
9. Kosevich A.M., Feldman E.P., Streltsov V.A., The evolution of a slender crack under diffusion mass-transfer condition, *International Journal of Fracture*, 1987, v.33, #2, pp125-134.
10. E. P. Feldman N. A. Kalugina, and T. N. Meln'ik. Role of unloading and filtration of gas in the development of main cracks in coal seams. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2017, Vol. 58, No. 1, pp. 155–164.
11. Фельдман Э. П. Развитие магистральных трещин в газонасыщенном угольном пласте при стационарном подвигании забоя / Э. П. Фельдман, Н. А. Калугина // Физико – технические проблемы горного производства. – 2014. – Вып.17. – С. 46-52.

Надійшла до редакції 23.05.2017

Е.П. Фельдман, Н.О. Калугіна, О.В. Чеснокова
Інститут фізики гірничих процесів НАН України, м Дніпро

ДИНАМІКА РОЗВИТКУ ГАЗОНАПОВНЕНИХ ТРІЩИН В КРАЙОВІЙ ЧАСТИНІ ВУГІЛЬНОГО ПЛАСТА

Представлені результати аналізу процесу розвитку магистральних тріщин у вугільному пласті внаслідок швидкого розвантаження і при русі вибою з постійною швидкістю. Робота виконана на основі теоретичних досліджень, що включають методи термодинаміки, статистичної фізики, асимптотичного аналізу. Знайдені критерії зміни параметрів (пластового тиску газу, розмірів тріщин, гірського тиску, поверхневої енергії вугілля / породи, модуля пружності), при яких стає можливим спонтанне руйнування пласта, дозволяють обговорювати можливість прогнозу раптових викидів вугілля, породи і газу.

Ключові слова: вуглепородний масив, газонаповнена тріщина, руйнування

E. Feldman, N. Kalugina, O. Chesnokova
Institute for physics of mining processes of the NAS of Ukraine, Ukraine, Dnipro

DYNAMICS OF DEVELOPMENT OF GAS-FILLED CRACKS IN THE MARGINAL PART OF THE COAL SEAM

The results of the analysis of the development of the main cracks in the coal seam are presented due to rapid unloading and with the movement of the face at a constant rate. The research was carried out on the basis of theoretical studies, including methods of thermodynamics, statistical physics, and asymptotic analysis. The found criteria for changing the parameters (formation gas pressure, crack size, rock pressure, surface coal / rock energy, elastic modulus) at which spontaneous fracture of the formation becomes possible allow us to discuss the possibility of predicting sudden releases of coal, rock and gas.

Keywords: coal – rock massif coal, gas-filled crack, destruction