

ЭФФЕКТИВНАЯ ПОВЕРХНОСТНАЯ ЭНЕРГИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

д.т.н. Алексеев А.Д., асп. Гладкая Е.В., к.т.н. Ревва В.Н. (ОФТПП ДонФТИ НАНУ), инж. Чистокластов В.И. (ГХК "Октябрьуголь")

При проведении горных выработок нарушается естественное равновесие пород, происходит перераспределение статических напряжений и другие изменения в горном массиве. Это приводит к потере устойчивости горных пород и разрушению. Разрушение является основным процессом при разработке месторождений полезных ископаемых. Во всех случаях разрушение связано с распространением трещин, разрывающих атомные связи в минералах и силы сцепления на их контакте.

Поскольку горные породы относятся к хрупким телам, ослабленным различными дефектами типа трещин, при описании процесса разрушения горных пород целесообразно использовать параметр, характеризующий способность материала сопротивляться росту трещин.

Необратимая энергия, потребляемая на рост трещины в твердом теле является основной характеристикой процесса разрушения, коренным образом отличающей его от других процессов.

Более физически обоснованное представление о механизме разрушения дает теория трещин, предусматривающая дефектность структуры и механизм разрушения.

Для зарождения и роста трещин в настоящее время используются силовой и энергетический критерии. При выполнении силового критерия межатомные связи разрываются за время порядка периода межатомных колебаний. Этот критерий является достаточным. Выполнение энергетического критерия означает возможность разрыва, т.е. является необходимым.

Основой энергетического критерия является теория Гриффитса, заключающаяся в том, что при образовании трещины в хрупком теле, с уменьшением потенциальной энергии твердого тела происходит увеличение его поверхностной энергии. Другими словами, трещина при своем росте преобразует потенциальную энергию твердого тела в поверхностную. Для развития трещины необходимо, чтобы при увеличении ее размера изменение свободной энергии не возрастало. Таким образом, для увеличения трещины необходимо следующее условие:

$$\frac{\partial}{\partial x}(W - U_0) = 0$$

Поверхностная энергия трещины U_0 равна произведению площади поверхности трещины на энергию γ_0 , затрачиваемую при образовании трещины.

$$U_0 = 2\pi a^2 \gamma_0$$

В большинстве же реальных тел, при сравнительно низких напряжениях (гораздо ниже предела теоретической прочности $\sigma_{теор}$), начинается пластическая деформация. Поэтому в местах с повышенными напряжениями (например, у вершины трещины) пластическая деформация может начаться раньше разрушения и существенно изменить его характер.

Существование пластической зоны окружающей трещину, связана с определенными энергетическими затратами. Поэтому вместо удельной поверхностной энергии вводится эффективная поверхностная энергия (ЭПЭ), включающая собственно ПЭ, энергию пластической деформации (основные затраты) и другие затраты энергии (см. далее). Величину ЭПЭ в основном определяют, как затраты на пластическое деформирование материала в окрестности устья трещины. Так, для пластичных тел $\gamma_{пла} = (10^2 - 10^4)\gamma \approx \gamma_{эф}$, т.е. энергией свободной поверхности можно пренебречь по сравнению с работой пластической деформации в пластической зоне [1].

Известно, что пластической деформацией сопровождается любое разрушение твердых тел. На основании многочисленных исследований, проведенных в этой области, отличительной чертой хрупких тел можно считать не отсутствие, а лишь сравнительно очень малую величину пластического деформирования сосредоточенного в области максимальных напряжений. Явления, которые можно объяснить лишь эффектом их пластического деформирования были обнаружены при измельчении таких хрупких материалов, как алмаз, кварц, корунд, разрушение которых при нормальной температуре происходит при увеличении напряжений до разрушающих. Пластическое деформирование таких материалов не существенно при разрушении крупных образцов, но в процессах измельчения его роль становится все более значительной. По данным [2], затраты на предельное пластическое деформирование кварца и карбонатов, составляют около 20 дж/м².

Возможность наблюдения пластического деформирования больших образцов хрупких тел обнаруживается при их медленном сжатии. Так, такие хрупкие горные породы, как джеспилит и кварцит, на самом деле имеют значительную область пластического деформирования. При этом вклад работы предельного пластического деформирования составляет для джеспилита немного меньше половины всей работы разрушения, а для мрамора - более 80 % [3]. Комплекс пластических деформаций как в

породообразующих минералах (кварц, плагиоклаз, полевые шпаты), так и в минералах цемента (вторичный карбонат, слюды) был установлен в углевмещающих песчаниках Донбасса [4].

При разрушении сжатием в областях наивысших сдвиговых напряжений растяжения вызывают перестройку кристаллической решетки, а высокий уровень напряжений - появление аморфных менее прочных образований. В тех областях, где произошла аморфизация, в результате дальнейших сдвигов и развиваются затем трещины разрушения.

Аморфизация и другие изменения кристаллической структуры, наблюдаемые при измельчении ряда твердых тел, также позволяют считать наличие пластической деформации достаточно общим явлением.

Как отмечалось ранее, кроме затрат энергии на разрыв атомных связей и пластическую деформацию всегда существуют и другие затраты энергии. Даже в относительно простом случае разрушения кристалла на половины берется в расчет много факторов. Основные из них: работа, отвечающая за накопление упругой ($W_{уп}$) деформации материала на краях растущей трещины, кинетическая энергия нарушенных частей ($W_{кин}$), выделения поверхностного заряда ($W_{зар}$) и трения ($W_{тр}$) на берегах трещины.

В таблице 1 приведены главные каналы потребления энергии при разрушении кристалла [5].

Значительная часть энергии при разрушении поглощается

Таблица 1. Каналы энергопотребления.

Источники энергопотребления	Уравнения для вычислений	Энергопотребление, Дж/м ²
Образование поверхности ($W_{пов}$)		1 - 3
Упругая энергия ($W_{уп}$)	$U = 2 \cdot F^2 \cdot L^3 / (E \cdot b \cdot a^3)$	3 - 5
Пластические деформации ($W_{пл}$)	$A_{\text{пл}} = [a \cdot A / (8 \cdot L)] \cdot [1 + 2 \cdot \ln(\mu / \pi \tau)]$	10 и более
Кинетическое разрушение ($W_{кин}$)	$T = (24/5) \cdot U \cdot (L/a) (i/v_s)$	3 - 5
Выделение поверхностного заряда ($W_{зар}$)	$A_{\text{зар}} = 2\phi \cdot \text{tg} \gamma \cdot (\sigma_{\text{зар}} \cdot L + \sigma_{\text{зар},0} \cdot L_0)$	2 и более

где E - модуль Юнга, v - скорость звука в кристалле, $\sigma_{\text{зар}}$ и $\sigma_{\text{зар},0}$ - поверхностные плотности зарядов, L - размер трещины в вершине, где $\sigma_{\text{зар},0}$ может достигать $2 \cdot 10^{-8}$ к/м², γ - угол раскрытия трещины.

различными неупругими и диссипативными процессами вблизи распространяющейся трещины, и формированием микротрещин в стороне от главной плоскости трещин. Эффективная поверхностная энергия разрушения включает в себя также тепловую, электрическую компоненту, обусловленную накоплением зарядов на берегах образующихся микротрещин, акустическую, микросейсмическую и ряд других, более слабо влияющих на величину ПЭ.

Из приведенных в табл.1 данных видно, что удельная ПЭ, измеренная или рассчитанная теоретически, исходя из простейших представлений об энергии связи в идеальной кристаллической решетке, составляет лишь малую долю работы разрушения. Уместно заметить, что значения ЭПЭ существенно зависят от способа разрушения материала. Так, например, значения работы затраченной на образование поверхности в кварце при сверлении, разрушении сжатием или при молке находятся в пределе 100 ± 10 Дж/м² [5], что значительно превышает работу при раскалывании. Эти значения превосходят значения теоретической поверхностной энергии кварца, равной 0,78-1,81 Дж/м², на два порядка. Исходя из этого можно предположить, что при указанных выше методах речь идет об определении ЭПЭ.

При изучении процесса разрушения горных пород, относящихся к полиминеральным соединениям, в работе [2], были получены значения ЭПЭ некоторых углевменяющих песчаников равные 10-150 Дж/м², что на один-два порядка больше теоретической ПЭ породообразующих минералов (кварца, полевых шпатов) и цемента. В то же время, они совпадают с экспериментальными значениями ПЭ для образцов кварца. Удельная ПЭ минералов, составляющих цемент имеет значения на порядок меньше теоретической ПЭ породообразующих минералов. Так, ПЭ карбонатов равна 0,078-0,23 Дж/м², глинисто-сланцевых минералов - 0,038-0,48 Дж/м². Отсюда, зачастую при отрыве и сдвиге, наблюдается зернограничный излом (разрушение идет по цементу) и мы имеем минимальное значение ЭПЭ (~ 10 Дж/м²). Лишь в отдельных случаях - разрушение крупных дефектных зерен кварца. При этом трещины зарождаются у зерен кварца за счет различия пластических свойств цемента и кварца. Энергоемкость разрушения определяется механизмом разрушения и степенью дробления. При увеличении бокового давления вязкое разрушение по цементу сменяется крупным разрушением по зернам кварца.

Как известно, определяющими факторами, влияющими на различные физико-механические свойства являются состав и структура горных пород. Для осадочных пород, занимающих наибольший удельный вес в продуктивной толще месторождений (песчаников, алевролитов и аргиллитов) наиболее полно изучались

зависимости ЭПЭ песчаников от отдельных структурно-текстурных параметров.

Наибольшее изменение ПЭ твердых тел происходит при воздействии поверхностно-активных сред (эффект Ребиндера). В горных породах и углях чаще всего присутствует минерализованная вода. Вопросы изучения состояния воды и степени ее влияния и на ЭПЭ углей и пород освящены в работах [2, 6]. Так, ЭПЭ песчаников с силикатным цементом снижается до 6 раз. При этом наибольшее снижение происходит при содержании влаги 1,2-1,5 %. В песчаниках с карбонатным цементом (особенно базальным) ЭПЭ уменьшается до 1,5 раз, при этом наибольшее снижение происходит при содержании влаги до 0,5-0,75 %.

В случае ярко выраженной анизотропии в осадочных горных породах, величина ЭПЭ меняется в пределах порядка в зависимости от направления плоскости разрушения к слоистости, структурной ориентации и текстуры.

В настоящее время величина ЭПЭ γ эфф представляет наибольший интерес для практики, как характеристика, интегрально учитывающая все энергопоглощающие процессы локализованные непосредственно перед фронтом трещины. В отличии от используемых для оценки разрушения горных пород прочностных и деформационных характеристик, учитывающих усредненные свойства образца при нагружении, ЭПЭ дает возможность оценить локальные его свойства, являясь фундаментальной характеристикой сопротивляемости горных пород разрушению.

Все, выше изложенное, убеждает в необходимости усиления исследований ЭПЭ горных пород.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В.И.Владимиров. Физическая природа разрушения металлов. - М.: Металлургия, 1984. - 280 с.
2. Алексеев А.Д., Ревва В.Н., Рязанцев Н.А. Разрушение горных пород в объемном поле сжимающих напряжений. - К.: Наукова думка, 1989. -168 с.
3. Ходаков Г.С. Физика измельчения. - М.: Наука - 1972. - 308 с.
4. Баранов В.А. Структурные превращения песчаников Донбасса и прогноз их выбросоопасности: Автореф. дис. ... д-ра геол. наук.- Днепропетровск, 2000.- 34 с.
5. Yu. Butyagin. Mechanical disordering and reactivity of solids // Chemistry Reviews, 1998, Vol. 23, pp. 89 - 165.
6. Алексеев А.Д., Недодаев Н.В. Предельное состояние горных пород. -К.: Наук. думка, 1982.-200 с.