

УДК 551.7:62-75

Ю.А. Боровков, К.Л. Акопян

ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ НА ИЗМЕНЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

Рассмотрено изменение прочностных свойств горных пород путем развития трещин и зарождения микротрещин при обработке поверхности образцов ПАВ. Установлено, что, развитие под действием ПАВ существующих в горной породе трещин и зарождение новых микротрещин описываются разными по характеру распределениями, имеют различную природу и определяются уравнениями теории Гриффитса и кинетической концепции прочности, параметры которых учитывают фрактальную размерность трещин.

Ключевые слова: поверхностно-активные вещества, трещина, теория Гриффитса, пластические деформации.

Наиболее эффективным средством направленного изменения свойств и состояния горных пород является использование поверхностно-активных веществ (ПАВ), действие которых заключается в адсорбционном понижении поверхностной энергии тел (эффект Ребиндера). Теоретические и экспериментальные исследования (Ю. В. Горюнов, Ф. Д. Овчаренко, Н. В. Перцов, П. А. Ребиндер, Е. Д. Шукин и др.) показывают, что адсорбция активных молекул из раствора происходит на свободных поверхностях, прежде всего на поверхности трещин. Поэтому эффективность действия ПАВ напрямую связана с геометрией трещин, и в то же время поверхностно-активные вещества сами влияют на процесс трещинообразования. Это определяет перспективность применения ПАВ для управления свойствами и состоянием пород в процессах горного производства (А. Д. Алексеев, Г. Я. Воронков, И. И. Круглицкий, Н. Ф. Кусов, О. Г. Латышев, Г. И. Марцинкевич, О. А. Эдельштейн и др.).

Анализ данных исследований показывает, что действие ПАВ приводит к

существенному снижению прочности и упругости горных пород, сопровождается их пластифицированием и активизацией геологических процессов. Исследования ряда ученых по изучению прочностных свойств горных пород показали, что, несмотря на различный темп снижения прочности, в финальной стадии, т. е. при полном насыщении образцов оптимально подобранными активными растворами, относительное снижение прочности пород отличается мало и в среднем составляет около 50 % (в 2 раза). Также действие ПАВ сопровождается снижением в 1,8—2,3 раза предела упругости и на 25-43 % модуля упругости. Наблюдается общий рост деформаций при уменьшении их упругой составляющей, т. е. происходит значительное пластифицирование горных пород, когда более половины общей энергоемкости разрушения приходится на необратимые (пластические) изменения в породе. Ими было установлено, что введение в горные породы растворов ПАВ увеличивает интенсивность их пластифицирования до 35 %.

В основе такого изменения свойств лежит увеличение дефектности (трещино-

ватости) горных пород. Для изучения данного вопроса О. Г. Латышевым и Н. И. Ивановым были выполнены комплексные исследования влияния ПАВ на характеристики трещиноватости горных пород. Образцы выдерживались при постоянной одноосной нагрузке 25 МПа в течение 480 часов в воздушно-сухом состоянии и в растворе ПАВ — додецилсульфата натрия R-O-SO₃Na (ДС). Нагрузка соответствовала горному давлению на глубине 800-1000 м для условий СУБРа [1]. Однако под микроскопом определялись только линейные размеры трещин. Для изучения трещин с учетом их фрактальных характеристик нами выполнены аналогичные эксперименты, но с медно-никелевыми рудами месторождения Шануч по разработанной нами методике.

Реализация описанных выше процедур позволила смоделировать фрактальные характеристики трещин в ранее выполненных исследованиях и получить новую информацию. Обобщение полученных результатов сведены в табл. 1 и был построен график изменения концентрации трещин различных размеров при нагружении пород в присутствии активной среды (рис. 1).

Анализ данных показывает, что даже при малых нагрузках, порядка 20 % от разрушающих, действие поверхностно-активных веществ почти в 4 раза увеличивает концентрацию трещин и их удельную поверхность и почти в 8 раз — степень нарушенности горной породы. Учет фрактальной размерности позволил определить истинную геометрию трещин и их характеристики, которые существенно превышают эти показатели для трещин в случае их линейного представления.

График изменения концентрации трещин различных размеров при нагружении пород в присутствии активной среды имеет явно выраженный нелинейный характер. Наличие экстремума на графике свидетельствует о том, что действие ПАВ приводит к развитию ранее

Таблица 1

| Среда | Общее число трещин | Средняя длина трещин $l_{cp} \cdot 10^{-6}$, м | Концентрация трещин $N \cdot 10^{10}$, $1/м^3$ | Удельная поверхность $S_{уд}$, $м^2/м^3$ | Нарушенность |
|-------------|--------------------|---|---|---|--------------|
| Воздух | 218 | 78,0 | 2,86 | 234,1 | 0,0056 |
| Раствор ПАВ | 815 | 83,8 | 11,11 | 927,9 | 0,0444 |

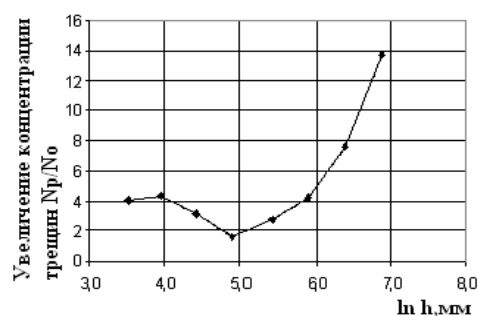


Рис. 1. Относительное приращение концентрации трещин в ПАВ

существовавших в породе трещин (сопровождается снижением концентрации трещин средних размеров) и зарождению новых микротрещин (левая ветвь графика).

Концентрация указанных трещин описывается разными законами распределения, что свидетельствует о разном механизме их образования. Трещины больших размеров (более 80 мкм) распределены по логарифмически-линейному закону (коэффициент вариации $K_{вар} = 7,0 \%$; критерий Пирсона $\chi^2 = 0,06 > \chi_{кр}^2 = 7,81$)

$$\ln m_i = 3,86 - 1,32 \cdot \ln(L_i), \quad (1)$$

Зарождающиеся микротрещины описываются распределением Вейбулла ($K_{вар} = 16,9 \%$; $\chi^2 = 0,0052$):

$$M_i = 1 - \exp \left[- \left(\frac{L_i}{48,808} \right)^{1,775} \right], \quad (2)$$

Аналитическая оценка действия ПАВ с позиций теории трещин Гриффитса и кинетической концепции прочности позволила получить соотношения, являю-

шиеся основой прогнозирования свойств и состояния горных пород, их удельной поверхностной энергии и трещиностойкости с учетом фрактальных свойств трещиноватой горной породы как природной самоподобной структуры. В основу этих соотношений положена подстановка в классическое уравнение Гриффитса истинной длины трещины с учетом ее фрактальной размерности

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{4Ee_s}{\pi L_0^d}}, \quad (3)$$

где σ_p — критическое напряжение на разрыв, Па; E — модуль упругости, Па; e_s — удельная поверхностная энергия породы, Дж/м²; L_0 — расстояние между вершинами трещины, м; d — фрактальная размерность трещины.

Из данного уравнения можно определить совокупную поверхностную энергию горной породы с учетом поправки Орована — удельной энергии пластических деформаций e_p :

$$(e_s + e_p) = \frac{\pi L_0^d \sigma_p^2}{4E}. \quad (4)$$

Расчет, выполненный для рассматриваемых пород, показал, что под воздействием ПАВ совокупная поверхностная энергия породы возрастает с 101,8 Дж/м² до 123,1 Дж/м², т.е. наряду с уменьшением e_s происходит увеличение удельной энергии пластических деформаций e_p . Приняв, что при разрушении руды зона пластической деформации в вершине трещины отсутствует (т.е. $E = \text{const}$), можно определить величину e_p при воздействии ПАВ на породу. Для руды — $e_p = 64,5$ Дж/м².

Ослабление под влиянием активных молекул межатомного взаимодействия приводит к локальным перенапряжениям в горной породе. Это определяет увеличение активационного объема, что в соответствии с кинетической концепцией прочности (С. Н. Журков) сопровождается активизацией процессов движения и размножения дислокаций, их группированием и зарождением микротрещин. Для концентрации микротрещин под действием ПАВ увеличивается в 3,98 раза по сравнению с исходной породой, следовательно, в такой же пропорции увеличивается активационный объем.

При динамическом нагружении горных пород имеющиеся в породе дефекты структуры (макро- и микротрещины) не успевают включиться в процесс деформирования, что приводит к возрастанию динамической прочности и упругости пород. Полученные экспериментальные соотношения позволяют прогнозировать динамические характеристики горных пород и являются основой методики определения разрушаемости пород ударом и взрывом.

Таким образом, развитие под действием ПАВ существующих в горной породе трещин и зарождение новых микротрещин описываются разными по характеру распределениями, имеют различную природу и определяются уравнениями теории Гриффитса и кинетической концепции прочности, параметры которых учитывают фрактальную размерность трещин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Латышев О.Г., Жилин А.С., Осипов И.С., Сынбулатов В.В. Выбор поверхностно-активной среды для управления свойст-

вами пород в горной технологии// Изв. вузов. Горный журнал. — 2004. — № 6. — С. 117—121. **ПАВ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Боровков Ю.А., Акоюн К.Л. — МГРИ — РГГУ.