2023

№ 3

НОВЫЕ МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ В ГОРНОМ ДЕЛЕ

УДК 621.3.08+622

АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР

В. И. Востриков, П. А. Цой, О. М. Усольцева

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: vvi.49@ mail.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия

Исследованы геофизические параметры образцов горных пород в водонасыщенном и замороженном состоянии, проведено их сравнение с образцами в естественном состоянии. При динамическом воздействии на образец регистрировался сигнал ускорения и рассчитывалась спектральная плотность, на основании которых определялись скорость продольных колебаний, логарифмический декремент затухания, коэффициент внутреннего трения, акустическая добротность. В водонасыщенных и замороженных образцах наблюдалось увеличение скорости распространения упругих продольных колебаний. Образцы, имеющие в замороженном состоянии высокие значения акустической добротности, разрушались при более значительных нагрузках. Степень водонасыщенности образцов влияла на их прочность: чем выше степень водонасыщения, тем меньше предел прочности образца. При замораживании образцов генерировались микросейсмические колебания в высокочастотной области сигнала. В экспериментах при одноосном сжатии на прессе до разрушения при критической нагрузке зарождения разрывной трещины фиксировался сигнал высокой частоты, по мере развития трещины спектр сигнала смещался в область низких частот.

Образец горной породы, водонасыщение, замораживание, разрушение, микросейсмическая эмиссия, ускорение, спектральная плотность, акустическая добротность, коэффициент внутреннего трения, затухание

DOI: 10.15372/FTPRPI20230320

Вода и температура — наиболее важные факторы окружающей среды, влияющие на деформацию и разрушение горных пород, а также на изменение трещиноватости массива, что необходимо учитывать в горных инженерных технологиях при строительстве и эксплуатации туннелей, определении устойчивости бортов карьеров и др.

Большое количество экспериментальных исследований посвящено изучению количественной оценки влияния воды на механические свойства разных горных пород [1–13], результаты которых демонстрируют существенные различия в зависимости от минералогического состава

Работа выполнена в рамках проекта НИР (номер гос. регистрации 121052500138-4) на оборудовании ЦКП ГГГИ СО РАН.

пород. Для глинистых пород снижение предела прочности на сжатие в водонасыщенных условиях относительно сухого состояния достигает 90% и более, тогда как кристаллические породы демонстрируют незначительное снижение прочности (<10%) при переходе от сухого (после высушивания в печи) состояния к водонасыщенному [9]. В некоторых исследованиях отмечается, что в водонасыщенном состоянии у ряда пород возрастает деформация разрушения.

Работы [14-23] посвящены изучению влияния низких температур на разрушение горных пород, что необходимо для понимания поведения массива пород, а также характера изменения их деформационно-прочностных свойств в зависимости от периода сезонных колебаний температурных условий. В [24-27] рассмотрены акустические и механические характеристики горных пород, их взаимосвязь, изменения при воздействии положительных и отрицательных температур, а также при различной степени водонасыщения. Такие взаимосвязи важны при прогнозировании предела прочности пород неразрушающими методами измерения. Установление связей динамических акустических характеристик с прочностными позволяет оценить устойчивость геоконструкций (целики и кровля подземных выработок, борта и откосы карьеров). При открытых горных работах температурные воздействия на массивы горных пород влияют на их прочность, сказываясь на устойчивости бортовых откосов. Особенно это касается горных предприятий в условиях Якутии. Испытания на прочность сухих и водонасыщенных образцов горных пород под воздействием циклов замораживания-оттаивания от -20 до +20 °C показали снижение прочности до 20% после 40-60 циклов. Согласно [25], степень морозостойкости породы зависит от пористости и степени заполнения пор водой. Прочность изменяется с ростом дефектности породы. В [27] исследованы упругие свойства вмещающих пород алмазных месторождений Якутии при температуре +17÷-40 °C. Установлено, что с понижением температуры образца его модуль упругости линейно возрастает, при этом коэффициент Пуассона постоянен.

Цель настоящей работы — изучение взаимосвязи акустических и механических свойств образцов горной породы в сухом, водонасыщенном и замороженном состояниях.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Исследование характеристик образцов горных пород включало в себя следующие этапы.

1. В исходном естественно сухом состоянии образцы подвергались динамическому воздействию в виде удара стальным шариком массой 8.6 г с высоты 10 см. Регистрировался аналоговый сигнал ускорения и рассчитывалась спектральная плотность ускорения (СПУ).

2. Образцы насыщались водой в течение 3 сут до полностью водонасыщенного состояния.

3. После насыщения водой образцы подвергались ударному воздействию с регистрацией сигнала ускорения, рассчитывалась СПУ.

4. Водонасыщенные образцы замораживались в морозильной камере VT 75 до -60 °C и выдерживались при этой температуре 1 ч. Регистрировалась микросейсмическая эмиссия (МСЭ).

5. После замораживания проводились эксперименты по ударному воздействию с регистрацией аналогового сигнала и вычислением СПУ.

6. Замороженные образцы нагружались на прессе одноосным сжатием до разрушения. Скорость нагружения составляла 0.05 мм/мин, в процессе нагружения регистрировалась МСЭ.

7. Если образец при одноосном сжатии не был разрушен и сохранял форму, проводился эксперимент по ударному воздействию.

После каждого эксперимента с динамическим воздействием по полученным графикам ускорения и спектральной плотности ускорения определялись амплитуды первой A(t) и, через период T, второй A(t+T) положительных полуволн аналогового сигнала ускорения, а также

максимальная спектральная составляющая f_p . Эти данные использовались для расчета геомеханических параметров образцов: скоростей продольных колебаний, логарифмических декрементов затухания, коэффициентов внутреннего трения и акустической добротности, на основе которых строились гистограммы для дальнейшего анализа.

ПОДГОТОВКА ЛАБОРАТОРНЫХ ОБРАЗЦОВ

Для экспериментов отобраны несколько образцов из разных горных пород: алевролиты — 1-1, 1-2, 4-1, 4-2; песчаники — 2-1, 2-2; базальты — 3-1, 3-2. Всего подготовлено четыре пары лабораторных образцов (рис. 1*a*). Длина кернов составляла 59.55 – 60.40 мм, диаметр — 29.53 – 29.96 мм, масса — 101.75 – 119.73 г. К торцам образцов приклеивались стальные закаленные диски (таблетки): по одному наносилось динамическое воздействие, к другому на винтовой шпильке крепился акселерометр типа 8309 фирмы Брюль и Къер (рис. 1*б*), резонансная частота которого составляла 180 кГц. Масса таблетки с акселерометром 9.4 г, что в 10 раз меньше массы образца, поэтому вносимая погрешность на измерения ничтожно мала. Для оценки качества крепления акселерометра предварительно проводился следующий эксперимент: на стальную пластину крепились два акселерометра, один — на винтовую шпильку, другой — через винтовую шайбу на клей. Существенные различия резонансных частот не зарегистрированы.



Рис. 1. Подготовленные керны (a) и керн с установленным акселерометром (δ)

На рис. 2 представлен стенд для проведения исследований по динамическому воздействию. Удар шариком с высоты 10 см осуществлялся через трубку. На одном из парных образцов (1-1, 2-1, 3-1, 4-1) проводились исследования с водонасыщением, замораживанием и испытанием на прочность, другой образец (1-2, 2-2, 3-2, 4-2) служил контрольным и подвергался только динамическому воздействию и разрушению на прессе.



Образец

Рис. 2. Стенд для динамических исследований

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Выполненные исследования показали подобие "поведения" образцов, поэтому ниже приведены результаты только для образцов пары № 3: 3-1 — экспериментальный; 3-2 — контрольный. На экспериментальных образцах проводились исследования по описанной выше методике по п. 1–7, на контрольных — только в естественно сухом состоянии по п. 1, 6.

Образец 3-1 подвергался ударному воздействию. Полученные характеристики представлены на рис. 3. На дальнейших графиках для упрощения названия осей опущены. По графику сигнала ускорения (рис. 3*a*) определялись A(t), A(t+T), равные 1.24 и 0.84 м/с² соответственно. На рис. 3*б* максимальная спектральная составляющая выделяется с частотой 19.5 кГц. Для исключения погрешности измерений диапазон частот сигналов ограничивается 1/3 от резонансной частоты акселерометра. В экспериментах регистрируемые значимые частоты сигналов находятся в диапазоне ниже 54 кГц.



Рис. 3. Аналоговый сигнал ускорения (а) и СПУ S (б) при ударном воздействии на образец 3-1

Далее образец подвергался экспериментам согласно п. 2–7 методики. По формулам [24, 26] при динамическом воздействии на образец 3-1 горной породы в сухом состоянии, после водонасыщения и замораживания, а также для контрольного образца 3-2 рассчитывались продольная скорость упругих колебаний в образце V, логарифмический декремент затухания λ , коэффициент внутреннего трения tg φ и акустическая добротность Q:

$$V = 2lf_p, \quad \lambda = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)}, \quad \mathrm{tg}\varphi = \frac{A(t) - A(t+T)}{A(t)}, \quad Q = \frac{\pi}{\lambda},$$

где l=60 мм — длина образца; f_p — резонансная частота, определяемая из графика СПУ; A(t), A(t+T) — амплитуды первой и, через период T, второй положительных полуволн аналогового сигнала ускорения. Результаты расчетов представлены на рис. 4 в виде гистограмм.





Анализ геофизических параметров показал, что при динамическом воздействии на образцы горной породы после водонасыщения и замораживания скорости продольных колебаний по отношению к образцам в исходном состоянии возрастают соответственно на 25 и 38% (рис. 4). Водонасыщенные образцы горной породы обладают наибольшими коэффициентами внутреннего трения $tg \varphi$, логарифмического декремента затухания λ и наименьшей акустической добротностью Q. Замороженные образцы горной породы имеют наибольшие значения Q и наименьшие $tg \varphi$ и λ .

Отметим, что скорость замораживания существенно влияет на сигналы микросейсмической эмиссии (МСЭ). Изменение температуры от +25 до -40 °C достигается за 40 мин, первые слабые сигналы МСЭ зарегистрированы при -17, и до -40 °C интенсивность сигналов слабая (4-6 имп.). При понижении температуры до -60 °C регистрируется интенсивная МСЭ (25-40 имп.). Затем температура -60 °C выдерживалась 1 ч, после чего интенсивность МСЭ понижалась до 5-10 имп. На рис. 5 приведен один из сигналов МСЭ. Существенные по амплитуде спектральные составляющие находятся в высокочастотном диапазоне 85-95 кГц, что указывает на формирование в образце мелких трещин. В экспериментах по исследованию МСЭ корректно говорить только о регистрации сигналов эмиссии.



Рис. 5. Сигнал МСЭ (а) и СПУ (б) при замораживании керна 3-1

При нагружении образца 3-1 на прессе сигналы МСЭ начали генерироваться при нагрузке 3700 кг. Запись одного из сигналов представлена на рис. 6. Сигнал зарегистрирован на восходящем участке нагрузочной характеристики, когда образуются мелкие трещины без формирования разрывных нарушений. Пиковая нагрузка 9800 кг.



На рис. 7 приведены гистограммы разрушающих нагрузок и содержания воды после водонасыщения.



Рис. 7. Разрушающие нагрузки для контрольных и экспериментальных образцов (*a*) и содержание воды после водонасыщения (б)

Эксперименты по разрушению кернов на прессе показали, что образцы, подвергшиеся водонасыщению, а затем замораживанию, разрушаются при значительно меньших нагрузках, составляющих 46-90% от контрольных, причем чем больше содержание воды в образце, тем при меньших нагрузках он разрушается. Вид разрушенных образцов представлен на рис. 8.



Рис. 8. Вид разрушенных образцов 3-2, 3-1 (а) и 4-2, 4-1 (б)

Представляет интерес развитие трещинообразования при разрушении. На рис. 9*а* показана часть сигнала МСЭ в самой верхней точке нагрузочной кривой, т. е. непосредственно перед разрушением.





Трехмерное изображение получено путем последовательного вырезания из аналогового сигнала ускорения фрагментов по 50 мкс, вычисление по каждому СПУ, и затем их последовательного расположения по временной оси (рис. 9e). Из рисунков с записью аналогового сигнала ускорения и трехмерным спектральным образом видно, что "старт" трещины сопровождается генерацией высокочастотных составляющих сигнала в области 150–170 кГц (рис. 9e). По мере развития трещины, составляющие СПУ, перемещаются в область низких частот 40–50 кГц.

Образец 3-1 после эксперимента по разрушению на прессе сохранил целостность формы и его подвергли динамическому воздействию (рис. 10). Наличие образовавшихся в результате эксперимента по разрушению отдельных крупных фрагментов керна 3-1 (рис. 8*a*) привело к уменьшению амплитуды сигнала ускорения по сравнению с целым образцом и смещению спектрального состава в область низких частот 1–3 кГц.



Рис. 10. Аналоговый сигнал ускорения (*a*) и СПУ (б) при ударном воздействии на образец 3-1

выводы

На основе проведенных исследований динамических характеристик лабораторных образцов горных пород можно заключить, что после водонасыщения и замораживания регистрируется увеличение скорости продольных колебаний по отношению к образцам в исходном естественно сухом состоянии на 25 и 38% соответственно. Образцы в замороженном состоянии при ударном воздействии показали более высокие значения акустической добротности, наименьшие значения коэффициента внутреннего трения и логарифмического декремента, что проявляется в слабом затухании сигнала ускорения по сравнению с экспериментами на контрольных и водонасыщенных образцах. Образцы в замороженном состоянии, имеющие наименьшее значение коэффициента внутреннего трения и высокое значение добротности, разрушаются при более высоких значениях нагрузок. Водонасыщение образцов горной породы существенно влияет на их прочность: чем больше влаги в породе, тем меньше их прочность. При замораживании водонасыщенных образцов горной породы генерируется МСЭ в высокочастотном диапазоне спектра сигнала, что указывает на образование сети мелких трещин в структуре образца. В экспериментах по разрушению образцов на финальной стадии разрушения разрывная трещина характеризуется генерацией высокочастотных гармоник сигнала, и по мере развития трещины спектр гармоник смещается в низкочастотную область.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Feucht L. J. and Logan J. M. Effects of chemically active solutions on shearing behavior of a sandstone, Tectonophysics, 1990, Vol. 175, Issue 1.
- Karfakis M. G. and Akram M. Effects of chemical solutions on rock fracturing, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abs., 1993, Vol. 30, Issue 7.
- **3.** Dove P. M. Geochemical controls on the kinetics of quartz fracture at subcritical tensile stresses, J. Geoph. Res., 1995, Vol. 100, Issue B11.
- 4. Li N., Zhu Y. M., Su B., and Gunter S. A chemical damage model of sandstone in acid solution, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2003, Vol. 40, Issue 2.
- 5. Erguler Z. A. and Ulusay R. Water-induced variations in mechanical properties of clay-bearing rocks, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2009, Vol. 46, Issue 2.
- 6. Nara Y., Hiroyoshi N., Yoneda T., and Kaneko K. Effects of relative humidity and temperature on subcritical crack growth in igneous rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2010, Vol. 47, Issue 4.
- 7. Wasantha P. L. P. and Ranjith P. G. Water-weakening behavior of Hawkesbury sandstone in brittle regime, Eng. Geol., 2014, Vol. 178.
- 8. Cherblanc F., Berthonneau J., Bromblet P., and Huon V. Influence of water content on the mechanical behavior of limesonte: role of clay minerals content, Rock Mech. Rock Eng., 2016, Vol. 49.
- 9. Hua W., Dong S., Li Y., and Wang Q. Effect of cyclic wetting and drying on the pure mode ii fracture toughness of sandstone, Eng. Fracture Mech., 2016, Vol. 153.
- 10. Wong L. N. Y., Maruvanchery V., and Liu G. Water effects on rock strength and stiffness degradation, Acta Geotechnica, 2016, Vol. 11.
- 11. Zhao Z., Yang J., Zhang D., and Peng H. Effects of wetting and cyclic wetting–drying on tensile strength of sandstone with a low clay mineral content, Rock Mech. Rock Eng., 2017, Vol. 50.
- 12. Zhao C., Niu J., Zhang Q., Zhao C., and Zhou Y. Failure characteristics of rock–like materials with single flaws under uniaxial compression, Bull. Eng. Geol. Env. Vol., 2019, Vol. 78.
- 13. Qiao L., Wang Z., and Huang A. Alteration of mesoscopic properties and mechanical behavior of sandstone due to hydro-physical and hydro-chemical effects, Rock Mech. Rock Eng., 2017, Vol. 50.
- Mellor M. Mechanical properties of rocks at low temperatures, Permafrost: North American contribution to the Second International Conference, Yakutsk, USSR, July 13-28, 1973, Washington: National Academy of Sciences.
- **15.** Inada Y. and Yokota K. Some studies of low temperature rock strength, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abs., 1983, Vol. 21, Issue 3.
- 16. Sarkka P. and Polla J. Strength and deformation characteristics of a gabbro rock between -10 °C and -60 °C, Safety and Environmental Issues in Rock Engineering, Proc. Int. Symp. Eurock 1993 (Lisbon, Portugal, June 21-24), Rotterdam: A. A. Balkema, 1993, Vol. 1.
- 17. Yamabe T. and Neaupane K. M. Determination of some thermo-mechanical properties of Sirahama sandstone under subzero temperature condition, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2001, Vol. 38, Issue 7.
- 18. Liu Q. S., Xu G. M., Hu Y. H., and Chang X. Study on basic mechanical behaviors of rocks at low temperatures, Key Eng. Materials, 2006, Vol. 306–308.
- 19. Chen Y., Azzam R., Wang M., Xu S., and Chang L. The uniaxial compressive and tensile tests of frozen saturated clay in Shanghai area, Env. Earth Sci., 2011, Vol. 64, Issue 1.
- 20. Kodama J., Goto T., Fujii Y., and Hagan P. The effects of water content, temperature and loading rate on strength and failure process of frozen rocks, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2013, Vol. 62.

- 21. Al-Omari A., Brunetaud X., Beck K., and Al-Mukhtar M. Coupled thermal-hygriccharacterisation of elastic behaviour for soft and porous limestone, Construction Building Materials, 2014, Vol. 62.
- **22.** Suknev S. V. Determination of elastic properties of rocks under varying temperature, J. Min. Sci., 2016, Vol. 52, Issue 2.
- **23.** Suknev S. V. Influence of temperature and water content on elastic properties of hard rocks in thaw/freeze state transition, J. Min. Sci., 2019, Vol. 55, Issue 22.
- 24. Куткин Я. О. Обоснование методики определения взаимозависимостей акустической добротности и прочности горных пород // ГИАБ. 2014. № 12. С. 346–351.
- 25. Курилко А. С., Попов В. И. Исследование прочности пород после воздействия циклов замораживаниявания-оттаивания // ГИАБ. — 2004. — № 9.
- 26. Вознесенский А. С., Куткин Я. О., Красилов М. Н. Взаимосвязь акустической добротности с прочностными свойствами известняков // ФТПРПИ. 2015. № 1. С. 30–39.
- 27. Сукнев С. В. Методика определения статического модуля упругости и коэффициента Пуассона при изменении температуры образца // ГИАБ. 2013. № 8. С. 101–105.

Поступила в редакцию 17/IV 2023 После доработки 16/V 2023 Принята к публикации 18/V 2023