

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук

XI Всероссийская школа-семинар с международным участием «Физические основы прогнозирования разрушения горных пород», 14-18 октября, 2019 г. ГИ УрО РАН, г. Пермь

Реконструкция напряженнодеформированного состояния образцов горных пород при из квазистатических испытаниях по данным акустической эмиссии

Пантелеев И.А., Ребецкий Ю.Л.

План доклада

- ✓ Введение
- ✓ Тензор сейсмического момента
- ✓ Решение задач подготовительного этапа работы
- ✓ Постановка эксперимента
- ✓ Алгоритм уточнения и отбраковки решений механизмов событий АЭ
- 🗸 Выводы

МЕТОД АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ (АЭ) В ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ГОРНЫХ ПОРОД

1. Развитие поврежденности при механических испытаниях образцов горных пород:

- одноосное сжатие, прямое и косвенное растяжение;
- изгиб и срез со сжатием;
- ползучесть и длительная прочность;
- двухосное нагружение по пропорциональным (двухосное сжатие) и непропорциональным (чистый сдвиг в плоскости) траекториям;
- одноосное сжатие с боковым подпором (тест Кармана, традиционное трехосное сжатие);
- истинные трехосные испытания с пропорциональными и непропорциональными траекториями нагружения.
- 2. Развитие поврежденности при циклических испытаниях образцов горных пород:
 - механическое циклирование с вариациями частоты, амплитуды и среднего напряжения;
 - термоциклирование (с повышение температуры) с различными амплитудами;
 - циклирование по схеме «заморозка-разморозка»;
 - смешанные типы циклирования.
- 3. Оценка параметров отклика и эффективности воздействия на нагруженные горные породы слабых физических полей:
 - вибрационные воздействия;
 - акустические воздействия (САЭ каротаж);
 - воздействия слабых электрических полей;

МЕТОД АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ В ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ГОРНЫХ ПОРОД

- воздействия слабых магнитных полей;
- воздействия смешанных полей.
- . Верификация современных феноменологических и физических моделей деформирования и разрушения горных пород:
 - критериальные соотношения начала роста поврежденности при сложном НДС;
 - кинетические уравнения для внутренних параметров, напрямую или косвенно описывающих изменение дефектной структуры породы (пористость, плотность трещин, поврежденность с учетом размеров и ориентаций дефектов).
- 5. Лабораторное моделирование природных и геотехнологических процессов:
 - фильтрация ньютоновских и сложных реологических жидкостей в нагруженных образцах горных пород;
 - моделирование устойчивости несущих элементов камерной системы разработки продуктивных пластов;
 - моделирование одиночного и множественного гидроразрыва пласта;
 - моделирование формирования ледопородного ограждения в обводненных грунтах;

Основные направления анализа данных акустической эмиссии:

- Интегро-дифференциальные характеристики АЭ:
 - активность акустической эмиссии;
 - суммарный счет;
 - интервальные распределения;
- > Амплитудно-энергетические характеристики:
 - b-value, Ib-value анализ;
 - амплитудные, энергетические распределения;
 - амплитудные инвариантные соотношения;

Спектральных характеристики сигнала АЭ:

- медианная частота, частота максимума спектра;
- Фурье и вейвлет-спектры;
- > Корреляционные и фрактальные характеристики сигнала АЭ:
 - фрактальные размерности и мультифрактальные спектры;
 - спектральные меры когерентного поведения;
 - корреляционные связи с параметрами нагружения.
- Пространственное расположение источников АЭ:
 - решение задачи локации источников АЭ;
 - оценка пространственной кластеризации источников АЭ (С- и D- анализ);
- Кластеризация и классификация сигналов АЭ:
 - кластерный анализ в гиперпространстве параметров;
 - анализ огибающих сигналов АЭ;
 - определение К-индекса и β-индекса.
- > Акустико-эмиссионная томография

УПРАВЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННЫМ СОСТОЯНИЕМ ПЛАСТА В ОКРЕСТНОСТИ СКВАЖИНЫ







Какова ориентация возникающих микротрещин при сложном НДС??

Каковы механизмы возникающих микротрещин при сложном НДС??

Как управлять трещиноватостью в условиях сложного НДС??

Можно ли восстановить локальное поле напряжений в образце по механизмам микротрешин??

СХЕМА АЛГОРИТМА МЕТОДА КАТАКЛАСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

1 **Jman**

Энергетические критерии теории пластичности

- Направления главных осей и вид тензора напряжений и сейсмотектонических деформаций
- 2. Однородная выборка землетрясений

Начальные данные – каталог механизмов очагов землетрясений

Анализ ОВЗ на диаграмме Мора

- 1. Нормированные напряжения
- 2. Выбор реализованной плоскости для землетрясений из ОВЗ

2 **J**man

 \square

Дополнительные данные – сброшенные напряжения 1. Параметры прочности 2. Величины эффективных напряжений

Ю.Л.Ребецкий, 1997, 1999, 2001, 2003, 2005, 2007, 2009...

3 *Эman*

4 *Эman*

Дополнительные данные – литостатическое давление 1. Величины напряжений

2. Величина флюидного давления

Aki K., P.G. Richards Quantitative seismology: Theory and Methods, Vols. I and II, W. H. Freeman, New York, 1980.

Тензор сейсмического момента

$$u_i(x,t) = G_{ip,q}(x, y, t)M_{pq} * S(t),$$

$$M_{pq} = C_{pqkl}b_kn_l$$
(1)



Рис. 1. Генерация упругих волн одиночной трещиной

Рис. 2. Девять пар сил для описания силового эквивалента произвольно ориентированного разрыва

Тензор сейсмического момента

Декомпозиция тензора сейсмического момента

$$M = M_{ISO} + M_{DC} + M_{CLVD}$$
(2)



Анализ механизмов источников АЭ

Цель исследования: программно-аппаратная реализация метода восстановления компонент тензора сейсмического момента событий акустической эмиссии и его апробация на модельном эксперименте.

Задачи подготовительного этапа работы:

- прецизионное определение времени вступления Р-волны;
- трехмерная локация источников акустической эмиссии;
- абсолютная калибровка преобразователей акустической эмисссии.

Задачи основного этапа работы:

- программная реализация алгоритма восстановления тензора сейсмического момента;
- разработка и реализация алгоритмов уточнения механизма источника АЭ и выбраковки неустойчивый решений;
- апробация разработанного подхода на модельном эксперименте.



1. Сравнение методов автоматического определения времен вступления Р-волн

в записях акустической эмиссии

Рис. 3. Волновая форма одиночного импульса акустической эмиссии



Рис. 4. Совмещенные волновая форма и зависимость классического критерия Акаике

Рис. 5. Гистограммы разности времен вступления, вычисленных по классическому и двухступенчатому критерию Акаике, и времени вступления, вычисленному по пересечению порога дискриминации

$$\mathbf{V}x = C_p \,\Delta t \approx 3.9 \,\mathrm{MM} \,(\Delta t = 1 \,\mathrm{MKC})$$

2. Двухступенчатый метод уточнения решения задачи плоскостной локации источников АЭ.



Рис. 6. Результат решения задачи локации источников АЭ на плоскости для случая, когда по очереди каждый их четырех датчиков АЭ является источников модельного сигнала.



Рис. 7. Результат решения задачи локации источников АЭ на плоскости для случая, когда по очереди каждый их четырех датчиков АЭ является источников модельного сигнала.

Panteleev I., Beltyukov N., Pankov I., Kostina A. Two-Stage Method for the Accurate Solution to the Plane Problem of Acoustic Emission Source Location // AIP Conference Proceedings. 2018. 2053, 040070.

3. Сравнение двух методов абсолютной калибровки датчиков акустической эмиссии.

Во временной области: $s(x,t) = u_k(x,t) * i_k(t),$ B частотной области: $I_k(\omega) = S(x,\omega)/U_k(x,\omega),$ $z \partial e I_k(\omega) - \Phi y p b e - c nekmp nepedamoчной фукции i_k(t),$ $S(x,\omega) - \Phi y p b e - c nekmp зарегистрированного сигнала s(x,t),$ $U_k(x,\omega) - \Phi y p b e - c nekmp теоретического перемещения$ B точке падения шара $u_k(x,t),$ *- операция конволюции.



G. Mc Laskey, S. Glaser Acoustic emission sensor calibration for absolute source measurements // J Nondestruct Eval. 2012, 13, P. 157-168



Рис. 8. Результаты восстановления временной функции перемещения в точке падения шара (черная кривая – теоретическое перемещение) по зарегистрированным сигналам АЭ (синяя и зеленая кривые).

3. Сравнение двух методов абсолютной калибровки датчиков акустической эмиссии.

S. Lazarev, A. Mozgovoi, A. Vinogradov, A. Lazarev, A. Shvedov Electromagnetic method of elastic wave excitation for calibration of acoustic emission sensors and apparatus // J. Acoustic Emission. 2009. V. 27. P. 212-223.

Генератор MSAE-UCA-01







Рис. 9. Сравнение АЧХ передаточных функций, полученных методом модельного источника (синяя кривая) и с использованием генератора MSAE-UCA-01 (красная кривая).

Трехточечный изгиб мрамора



Трехточечный изгиб мрамора



Мрамор Коелга Россия, Челябинская обл.

предел прочности при сжатии – 83.7 МПа; удельный вес – 2.74 г/см³; пористость – 1.6 %; водопоглощение – 0.23 %.



Рис. 10. Фотография деформируемого образца мрамора с используемым оборудованием для регистрации акустической эмиссии и полей деформации на боковой поверхности образца.

Трехточечный изгиб мрамора



Результаты определения механизмов АЭ

G. Kwiatek, P. Martínez-Garzón, M. Bohnhoff. HybridMT: A MATLAB/Shell Environment Package for Seismic Moment Tensor Inversion and Refinement // Seismological Research Letters. 2016. V. 87 (4). P. 964-976.



Hudson, J.A., Pearce, R.G., Rogers, R.M. (1989). Source Type Plot for Inversion of the Moment Tensor, Journal of geophysical research, 1989(94): 765-774

4-ступенчатый алгоритм уточнения механизма источника АЭ

<u>1</u> Этап: Уточнение решения на основе гибридного алгоритма инверсии тензора сейсмического момента.

Суть алгоритма: итеративное уточнение амплитуд Р-волн, зарегистрированных различными датчиками в антенне, для минимизации невязки между найденным решением (смещением на конкретном датчике) и теоретическим рассчитанным.

Применение итеративного метода позволяет скорректировать найденное решение на систематическую ошибку в определении механизма источников, расположенных в кластере (близко друг к другу), вызванную внешним шумом, качеством акустического контакта между датчиками и материалом, локальными неоднородностями на траектории распространения волны.



Рис. 13. Найденные поправочные коэффициенты для амплитуд волн, регистрируемых различными ПАЭ.

Andersen L.M. (2001) A relative moment tensor inversion technique applied to seismicity induced by mining, Univ. of th Witwatersand, Johannesburg

4-ступенчатый алгоритм уточнения механизма источника АЭ

<u>2 Этап</u>: Определение вариаций углов Р и Т осей при исключении из расчетов механизмов источников АЭ одного из ПАЭ.

Критерий: минимум 5 определений положения осей P и T должны находиться в секторе $\pm 15^{0}$ по каждому из углов.



Удовлетворяет критерию

Не удовлетворяет критерию!

Итого событий АЭ – 557

4-ступенчатый алгоритм уточнения механизма источника АЭ

<u>3 Этап</u>: Определение вариаций углов простирания и падения нодальных плоскостей при исключении из расчетов механизмов источников АЭ одного из ПАЭ. Критерий: минимум 5 определений пар углов должны находиться в секторе ± 5⁰.



Рис. 14. Стереограммы механизмов источников АЭ (проекция на нижнюю полусферу), удовлетворяющие заданному критерию

Итого событий АЭ – 377

<u>4 Этап</u>: Определение преобладающих решений механизмов источника АЭ.



Рис. 15. Диаграмма Хадсона с итоговым решением задачи определения механизмов источников АЭ.



Рис. 16. Распределение относительных величин ISO компонент найденных решений.





Рис. 17. Распределение относительных величин DC компонент найденных решений.

Рис. 18. Распределение относительных величин CLVD компонент найденных решений.



Рис. 19. Распределение углов простирания для одной из нодальных плоскостей.





Рис. 20. Распределение углов погружения для одной из нодальных плоскостей.

Рис. 21. Распределение направлений подвижки для одной из нодальных плоскостей.



Рис. 22. Изменение количества источников АЭ различных типов с течением времени

	Таблица	1. Классио	ыкация	источников	AB
--	---------	------------	--------	------------	----

Тип	Признаки	Тип источника АЭ
1	DC > 60%	Трещина сдвига (мода II)
2	DC < 40%, CLVD+ISO>60%	Трещина отрыва (мода I)
3	40% < DC < 60%	Трещина смешанного типа (мода I+II)

Выводы

- 1. Проведена серия экспериментов по трехточечному изгибу образцов мрамора месторождения Коелга с регистрацией акустической эмиссии антенной из восьми датчиков. В результате проведенных экспериментов показано, что возникающие трещины характеризуются нецентральным расположением относительно точки приложения нагрузки и сложной геометрией (существенно отличающейся от плоской).
- 2. Проведена программная реализация алгоритма восстановления компонент тензора сейсмического момента (в абсолютных величинах) для трехмерного случая (произвольного расположения источников акустической эмиссии в трехмерном пространстве). Разработанный программный комплекс базируется на протестированных и отлаженных алгоритмах: трехмерной локации источников акустической эмиссии (USBM метод) с двухстадийным уточнением решения, процедуре определения момента вступления Р-волны с использованием классического информационного критерия Акайке, процедуре деконволюции волновой формы для определения амплитуды Р-волны.
- 3. Предложен 4-ступенчатый алгоритм уточнения механизмов источников АЭ, основанный на гибридном алгоритме инверсии тензора сейсмического момента, проверки устойчивости решения для Р, Т осей и углов нодальных плоскостей при исключении из расчетов одного из ПАЭ.
- 4. В результате анализа и уточнения механизмов АЭ показано, что при трех-точечном изгибе мрамора преобладают сдиговые трещины и трещины смешанного типа. Полученные распределения событий АЭ по углам простирания, погружения и направления подвижки качественно соответствуют геометрии магистральной трещины.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!!