
© П.Ю. Лысенко, Р.Г. Простяков,
С.О. Вдовин, 2012

УДК 622.611.4:620179.16

П.Ю. Лысенко, Р.Г. Простяков, С.О. Вдовин

ОЦЕНКА ПОВРЕЖДЕННОСТИ ГЕОМАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СПЕКТРОСКОПИИ*

Построен алгоритм оценки поврежденности анизотропного геоматериала материала методом лазерной ультразвуковой спектроскопии.

Ключевые слова: ультразвуковая спектроскопия геоматериалов, поврежденность, модули упругости, анизотропия.

Анализ причин техногенных катастроф на шахтах и в карьерах показывает, что значительного их числа можно было избежать при проведении регулярной диагностики состояния массива горных пород и соответствующих методов математического моделирования основных стадий развития процесса его разрушения.

Ключевым вопросом в проблеме мониторинга состояния массива является проблема выбора физического метода определения упругих характеристик и оценка их поврежденности. При этом следует учитывать, что геосреда в большинстве случаев является анизотропной и, следовательно, необходимо измерить полный набор модулей упругости. Более того, любая нарушенность ее структуры приводит к появлению анизотропии из первоначально изотропных материалов.

Как показывает анализ литературы [1—5] среди неразрушающих физических методов контроля состояния горной породы одним из наиболее перспективных следует признать

ультразвуковой метод, так как физико-механические характеристики и напряженно-деформируемое состояние естественно контролировать аппаратурой, в которой в качестве тестовых используют механические воздействия. При этом для описания состояния поврежденности геоматериала необходимо выбрать соответствующие параметры количественной оценки нарушенности материала на макроуровне [7, 8]. Эти параметры должны быть связаны с какой-либо поддающейся измерению физической величиной (например, изменения модулей упругости). Исследование этих изменений позволит получить связь механических величин с процессом накопления повреждений, ввести в соответствующие механические модели влияния поврежденности на физико-механические характеристики материала и определить из соответствующих лабораторных экспериментов параметры механических эволюционных уравнений накопления повреждений.

В работе [7] был введен впервые параметр $\psi \in [0;1]$, характеризующий

* Работа выполнена по результатам доклада на Неделе горняка-2012 и в рамках гранта РФФИ № 11-05-00574.

на макроуровне степень поврежденности материала. Строгая математическая трактовка параметра ψ имеет анизотропный характер даже в тех случаях, когда материал начально изотропен, и требует значительного накопления надежных экспериментальных данных. Это можно реализовать, используя упругие волны, которые взаимодействуют с двумя видами полей (полем микродефектов и полем внутренних напряжений) и могут служить основой для построения комплексного акустического метода определения физико-механических характеристик реальных поврежденных геоматериалов.

Механизм взаимодействия упругих волн со структурными дефектами зависит в первую очередь от используемых длин волн. В том случае, когда рассматриваются лишь стадии накопления рассеянных повреждений до момента возникновения магистральных трещин, обычно используемые длины волн удовлетворяют соотношению $\lambda \gg a$, где λ — длина волны энергии зондирующего акустического сигнала, a — характерный размер микротрешин, не превышающих 0,1 мм. Данные соотношения выполняются для частот вплоть до 60 МГц. Особый интерес при этом представляет изучение анизотропии скорости распространения и затухания ультразвука в широком частотном диапазоне и установление связи между этой анизотропией и механическими свойствами.

На сегодняшний день среди вариантов акустических методов повышенной информативностью обладает спектрально-импульсный. В работах [9—10] приемы спектрально-импульсной структуроскопии положены в основу построения неразрушающего метода определения харак-

теристик поврежденности конструкционных материалов и металлов. Однако использование относительно узкополосных сигналов и пьезопреобразователей для возбуждения и приема ультразвуковых сигналов не позволило полностью использовать возможности данного метода.

В настоящей работе делается попытка оценки поврежденности геоматериала, приводящей к анизотропии материала, методом лазерной ультразвуковой спектроскопии. Преимуществом метода является возбуждение с помощью твердотельного лазера упругих импульсов, длительностью импульса 100 нс, амплитудой давления до 10 МПа и использование широкополосного пьезоприемника из ПВДФ-пленки с резонансной частотой 10 МГц и чувствительностью 10 мкВ/Па.

При построении метода определения поврежденности на основе широкополосной лазерной ультразвуковой структуроскопии необходимо учитывать, что спектр $S(\omega, l)$ ультразвукового сигнала, прошедшего через исследуемый поврежденный образец равен произведению спектра опорного $S_0(\omega)$ сигнала и передаточной функции $K(\omega, l)$ геоматериала, несущей информацию о структуре образца:

$$S(\omega, l) = K(\omega, l) \cdot S_0(\omega), \quad (1)$$

где l — толщина образца.

Выполнив деление $S(\omega, l)$ на $S_0(\omega)$, можно восстановить передаточную функцию среды:

$$K(\omega, l) = \exp(-\alpha(\omega) \cdot l - j \cdot \frac{\omega \cdot l}{V(\omega)}), \quad (2)$$

где $\alpha(\omega)$ — частотная зависимость коэффициента затухания упругой волны, $V(\omega)$ — частотная зависимость

фазовой скорости, j — мнимая единица. Действительная часть $K(\omega, l)$ определяет коэффициент затухания:

$$\alpha(\omega) = \frac{1}{l} \cdot \ln \left| \frac{S_0(\omega)}{S(\omega)} \right|, \quad (3)$$

а мнимая часть — частотную зависимость фазовой скорости продольных волн. Измеряя $\alpha(\omega)$ в широком частотном диапазоне можно оценить характерные масштабы неоднородности.

Используя различные типы волн и измеряя акустические задержки t_1 и t_2 сдвиговых акустических волн, поляризованных в двух взаимно перпендикулярных направлениях, можно найти коэффициент акустической анизотропии, появляющийся за счёт поврежденности в первоначально изотропном материале:

$$A = \left(\frac{t_1}{t_2} - 1 \right). \quad (4)$$

Этот коэффициент с точностью до структурных коэффициентов β равен параметру поврежденности:

$$\psi = \beta \cdot A. \quad (5)$$

В случае наличия первоначальной анизотропии материала выражение для ψ примет вид:

$$\psi - \psi(0) = \beta \left| \frac{t_1}{t_2} - \frac{t_1(0)}{t_2(0)} \right| = \beta(A - A_0), \quad (6)$$

где A_0 — начальное значение акустической анизотропии. Величина $A_0 = \left| \frac{t_1}{t_2} - 1 \right|$

может трактоваться также как первоначальная поврежденность.

Явный вид зависимостей $\alpha(\omega)$ и $V(\omega)$ с использованием результатов работы [11], в которой в качестве причин неоднородности среды рас-

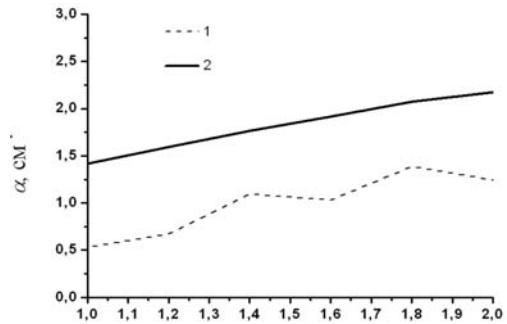


Рис. 1. Частотные зависимости коэффициента затухания ультразвука в образцах мрамора: 1 — глубинный слой, 2 — поверхностный слой

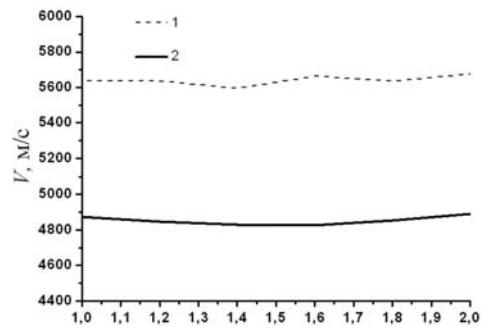


Рис. 2. Частотные зависимости скорости распространения продольных волн в образцах мрамора: 1 — глубинный слой, 2 — поверхностный слой

сматривалось наличие зернистой структуры, системы микротрешин, повреждающих материал и определяющих величину поврежденности ψ , может быть представлен для длинноволнового приближения в виде:

$$\begin{cases} \alpha(\omega) = (\beta_1 + \beta_2) \cdot \omega, \\ V(\omega) = V_0 (1 - \beta_3 \cdot \psi - \beta_4 \cdot \psi \cdot \omega^2), \end{cases} \quad (7)$$

где β_1 , β_2 , β_3 , β_4 — некоторые постоянные материала. Выражения справедливы в длинноволновом приближении. Для частот $\omega_0 < 10$ МГц ($\beta_3 \cdot \psi \gg \beta_4 \cdot \psi \cdot \omega^2$ поэтому дисперсией скорости звука можно пренебречь:

$$V(\omega) = V_0(1 - \beta_3 \cdot \psi). \quad (8)$$

Используя выражение (8) мы можем вычислить $\beta_3 \cdot \psi$:

$$\beta_3 \cdot \psi = 1 - \frac{V(\omega)}{V_0}. \quad (9)$$

В заключение приведены результаты исследования образцов напольных мраморных плит, подвергнутых длительному истиранию, воздействию воды и соли, кислот и других агрессивных веществ во процессе эксплуатации. Указанные воздействия сопровождались циклическими изменениями температуры внешней среды.

Исследовалась мраморная плитка толщиной 20 мм, нарезанная слоями толщиной 5 мм параллельно поверхности. Для диагностики образцов первоначально использовалась установка «Геоскан-02М» [12]. С помощью данной установки были получены частотные зависимости $\alpha(\omega)$ коэффициента затухания и $V(\omega)$ скорости распространения продольных волн для различных слоев. Эти зависимости приведены на рис. 1 и рис. 2. Проведенные измерения свидетельствуют о

том, что для слоев, расположенных ближе к поверхности, а, значит, более нарушенных, характерна меньшая скорость распространения продольных волн и большее значение коэффициента затухания.

Таким образом, используя экспериментальные данные и расчетную формулу (9) мы определили поврежденность $\beta_3 \cdot \psi = 0,14$ для поверхностного слоя исследуемых образцов мрамора.

С целью подтверждения результатов, полученных с помощью лазерной ультразвуковой спектроскопии, для каждого слоя был изготовлен микрошлиф. Исследование микрошлифов с помощью микроскопа подтвердило, что в результате длительного механического воздействия в совокупности с воздействием воды, соли, кислот и других агрессивных веществ, а также перепадов температуры поверхностный слой мраморной плитки сильно разрушен, причем изменения структуры полностью согласуются с результатами измерений. При этом по мере удаления от поверхности образца наведенные дефекты структуры встречаются меньше.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lifshitz I.M., Parhomenko T.D. К теории распространения ультразвуковых волн в поликристаллах // Журнал экспериментальной и теоретической физики, 1950 Т. 20, №20. — С. 175—182.
2. Nichols D., Muir F., Schoenberg M. Elastic properties of rocks with multiple set of fractures // 9th Ann. Internat. Mtg. Soc. Expt. Geophys. Expanded abstracts. 1989. — P. 471—474
3. Sayers C.M. Misalignment of the orientation of fractures and the principal axes for P- and S-waves in rocks containing multiple nonorthogonal fracture sets // Geophys. J. Int. 1998. V. 133. — P. 459—469
4. Vilhelm J., Rudajev V., Ivor R., Loka-jicek T., Pros Z. Influence of structure and cracks distribution on p-wave velocity anisotropy in rocks — laboratory and field study // Society of Petroleum Engineers — 70th European Association of Geoscientists and Engineers Conference and Exhibition — Incorporating SPE EUROPEC Rome, 2008. — С. 3308—3312.
5. Lebedev A.V., Bredikhin V.V., Soustova I.A., Sutin A.M., Kusunose K. Resonant acoustic spectroscopy of microfracture in a westerly granite sample // Journal of Geophysical Research. 2003. — T. 108. — № 10.
4. Molotkov L., Bakulin A. Wave propagation in the effective model of alternating porous and impermeable solid layers // Revue de l'Institut Francais du Petrole. 1998. — T. 53. — № 5. — С. 735—748.

5. *Мураками*. Сущность механики по-вражденной среды и ее приложения к теории анизотропных повреждений при ползучести // Теорет. основы инж. расчётов. 1983. — № 2. — С. 28—36.
6. *Качанов. Л.М.* Основы механики разрушения. — М.: Наука, 1974. — 311 с.
7. *Ботаки А.А., Ульянов В.Л., Шарко А.В.* Ультразвуковой контроль прочностных свойств конструкционных материалов. — М.: Машиностроение, 1983. — 78 с.
8. *Бурлак Г.Н., Островский И.В.* Гистерезисные акустические явления, связанные с дислокационной нелинейностью в кристаллах // Дефектоскопия, 1989. — № 1. — С. 81—88.
9. *Бондаренко А.П., Кондратьев А.И.* Измерение дисперсии скорости и затухания упругих волн // Акуст. журн. 1981. — Т. 27. — № 1. — С. 51—55.
10. *Карабутов А.А., Макаров В.А., Чепецкая Е.Б., Шкуратник В.Л.* Лазерно-ультразвуковая спектроскопия горных пород. — М.: издательство «Горная книга», 2008. — 198 с. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Лысенко Павел Юрьевич — аспирант,
Простяков Роман Геннадьевич — студент,
Вдовин Станислав Олегович — студент,
 Московский государственный горный университет, e-mail: ud@msmu.ru.



РУКОПИСИ, ДЕПОНИРОВАННЫЕ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ «ГОРНАЯ КНИГА»

АППАРАТНЫЕ И СХЕМОТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ИСПОЛНЕНИЯ ИСКРОЗАЩИТЫ И ВЗРЫВОЗАЩИТЫ, ПОДХОДЫ ДЛЯ ИХ РЕАЛИЗАЦИИ В СИСТЕМАХ ТЕХНИЧЕСКОГО И КОММЕРЧЕСКОГО УЧЕТА ОБЪЕМНОГО РАСХОДА ГАЗА И ЕГО РАБОЧИХ ПАРАМЕТРОВ (№899/06-12 от 20.03.12, 5 с.)

Волошиновский К.И. — кандидат технических наук, Московский государственный горный университет, e-mail: volkir@nm.ru.

Приведено описание базовых принципов и подходов к схемотехнической и программно-аппаратной реализации решений искрозащиты для приборов промышленного технического и коммерческого учета газа, связанных с модернизацией старых совершенных решений искрозащищенных приборов и разработкой новых приборов, применяемых в промышленном учете природного газа (метана), важных для разработчика и программиста. Делается акцент на особенностях разработки схемотехнических (аппаратных) и программно-аппаратных решений, которые позволяет проанализировать трудоемкость разработки и выбрать дальнейший подход к разработке на основе: нового схемотехнического решения искрозащиты; модернизации существующего совершенного решения или прибора; разработке нового прибора, предназначенного для эксплуатации внутри искробезопасной зоны помещений категории А, в соответствии с правилами безопасности ПБ12.

Ключевые слова: искрозащита, взрывозащита, природный газ.

HARDWARE AND CIRCUIT DECISIONS FOR IMPLEMENTING SPARK AND EXPLOSION SAFETY, WITH IMPLEMENTATION APPROACH FOR TECHNICAL AND COMMERCIAL GAS CONSUMPTION ACCOUNTING AND GAS WORKING CHARACTERISTICS

Voloshenovskiy K.I.

In the article adduced description of basic approach for principals and electronic scheme of hard&soft sparksafety decision realization for industrial technical and commercial gas accounting related to modernization of old near to be absolutely perfect sparksafety decisions and to developing new devices applied to industrial gas (methane) accounting important for developing engineer or programming engineer, so the accent design features of schemes applied to hardware and software decisions, which allows to analyze developing difficulty & choose further approach aimed to develop decisions for sparksafety based on: new electronic sparksafety schemes; modernization of old near to absolutely perfect sparksafety schemes or devices; new devices aimed to maintenance indoor with dust-ignition-proof category «A» according to official safety regulation tools ПБ12.

Key words: implementing spark, explosion safety, natural gas.