

УДК 622.2

Коробійчук В. В., к.т.н., доцент (Житомирський державний технологічний університет)

ПРИНЦИПИ ІНТЕРПРЕТАЦІЇ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ВИМІРЮВАНЬ В НАПРУЖЕНОМУ МАСИВІ

Наведена методика визначення максимальних та мінімальних значень швидкостей ультразвукових хвиль і орієнтування їх в ділянці гірської породи, що вивчається. Розглянуто явище виникнення швидкісної анізотропії порід в процесі їх навантаження.

Ключові слова: ультразвук, анізотропія, напруження, навантаження.

Приведена методика определения максимальных и минимальных значений скоростей ультразвуковых волн и ориентирования их в участке горной породы, что изучается. Рассмотрено явление возникновения скоростной анизотропии пород в процессе их нагрузки.

Ключевые слова: ультразвук, анизотропия, напряжения, нагрузки.

The method of determination of maximal and minimum values of speeds of ultrasonic waves and orientation of them in the area of mountain breed is resulted. The phenomenon of origin of speed anisotropy of breeds in the process of their loading is considered.

Keywords: ultrasonic, anisotropy, tension, load.

Вступ. Отримання кількісної інформації про напружений стан гірських порід в масиві має велике значення для вирішення наукових і практичних задач в області гірської справи. Основним методом вимірювання напруг є метод розвантаження, якому властиві деякі істотні недоліки. Основні з них: висока трудомісткість і неможливість багатократних вимірювань в одній і тій же точці масиву. Це є причиною для пошуків або розвитку інших ефективних методів, в першу чергу геофізичних, заснованих на залежності фізичних властивостей гірських порід від тиску. Одним з таких методів є імпульсний сейсмічний (ультразвуковий).

Звукові методи дослідження мають перед статичними наступні основні переваги:

- відсутність всяких руйнуючих і ушкоджувальних дій на випробуваний зразок (інтенсивність коливань складає десятки і соті частки Вт/см²);
- можливість необмеженого повторення випробувань, що додає особливу достовірність одержуваним показникам;

– швидкість випробування і практично «миттєве» отримання результатів.

Звукові методи дослідження засновані на фізичному явищі розповсюдження пружних хвиль в твердих тілах, а отже, і в гірських породах.

У даний час в науці і техніці застосовуються звукові коливання дуже широкого частотного і енергетичного діапазону.

Для дослідження матеріалів і контролю технологічних процесів найбільше поширення набули коливання ультразвукового діапазону, тобто коливання, частота яких лежить за верхньою межею чутності людського вуха і перевищує 16-20 кГц.

Актуальність питання. Вивчення напруженого стану гірських порід в масиві є найважливішою частиною експериментальних досліджень в механіці гірських порід. Саме тому перспективними напрямками розвитку вивчення напруженого стану гірських порід в масиві є неруйнуючі засоби визначення міцності, а саме ультразвукове випромінювання.

Постановка завдання. Розробити методика визначення максимальних та мінімальних значень швидкостей ультразвукових хвиль і орієнтування їх в ділянці гірської породи, що вивчається.

Викладення основного матеріалу. У основі ультразвукового методу вивчення напруженого стану гірських порід лежить залежність основних параметрів пружних хвиль в породах – швидкості їх розповсюдження загасання – від тиску. До теперішнього часу за дослідженням залежності швидкості і загасання пружних хвиль в зразках порід накопичений значний експериментальний матеріал для широкого класу гірських порід [1-6]. Основні результати цих досліджень зводяться до наступного:

1. Швидкості пружних хвиль в зразках гірських порід із зростанням тиску збільшуються. Це збільшення залежно від типу порід для одного і того ж тиску коливається в широких межах – від декількох відсотків до 50% і більш.

З двох основних типів хвиль – подовжніх і поперечних найбільший приріст спостерігається для швидкості подовжніх хвиль. Це і визначило, разом із значно більшою технічною простотою збудження подовжніх хвиль і прийому, переважне їх використання для дослідження напруженого стану порід.

2. Для всіх порід зростання швидкостей починається зразу ж із збільшенням тиску і практично припиняється при напругах, що становлять залежно від типу порід 30-70% від руйнуючих. При цьому мінімальна межа відноситься до найщільніших і міцніших порід, максимальна – сильно-пористих і слабких порід.

3. Основна зміна швидкості подовжніх хвиль спостерігається в напрямі паралельному навантаженню, що при нерівномірному навантаженні призводить до появи швидкісної анізотропії в анізотропних по будові породах.

4. Відносні зміни загасання подовжніх хвиль значно більше відносних змін швидкостей, однак основне зменшення загасання відбувається також в початковий період навантаження.

Оскільки при тиску, що має місце, в масиві порід на досягнутих глибинах розробки кристалічні ґрати мінералів практично не деформуються, основною причиною зміни параметрів пружних хвиль в зразках порід є деформації, що виникають в результаті закриття пор, каверн, макротріщин, що призводить до зростання пружності породи. При цьому найбільше збільшення пружності при нарузі пов'язано з впливом щільових пор і мікротріщин, що значною мірою пояснює появу в навантажених зразках швидкісної анізотропії. Дійсно, оскільки ступінь закриття щілистих пор і мікротріщин залежить від їх орієнтування відносно діючого навантаження, то, мабуть, найбільший ефект закриття спостерігатиметься для пор і мікротріщин, орієнтованих перпендикулярно до діючого зусилля, в цьому ж напрямі має спостерігатися максимальне збільшення модуля пружності породи і відповідно найбільше збільшення швидкості подовжньої хвилі.

Якнайменше закриття спостерігатиметься для пор і мікротріщин, які розташовані паралельно навантаженню, і відповідно в цьому напрямі буде якнайменша зміна модуля пружності і швидкості подовжньої хвилі. Таким чином, зміна швидкості в якому-небудь напрямі залежить від деформації в цьому напрямі, а відносна різниця швидкостей в двох яких-небудь напрямках має залежати від різниці деформацій в цих напрямках:

$$\frac{V_1 - V_2}{V_2} = \varphi(\varepsilon_1 - \varepsilon_2). \quad (1)$$

Оскільки

$$\frac{E}{(1 + \nu)}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) = \sigma_1 - \sigma_2, \quad (2)$$

то

$$\frac{V_1 - V_2}{V_2} = \varphi(\sigma_1 - \sigma_2). \quad (3)$$

Ліва частина рівності (3) є коефіцієнтом анізотропії, права – рівність головних напруг. Таким чином, очевидно, що швидкісна анізотропія порід залежить від їх напруженого стану. Це відкриває відповідні можливості для інтерпретації результатів натурних ультразвукових вимірювань при визначенні напруженого стану порід в масиві.

Питання інтерпретації результатів натурних вимірювань є одним з основних в будь-якому методі. Інтерпретація ультразвукових вимірювань в масиві можлива двома способами:

– за допомогою розвантаження блоку масиву з подальшим його навантаженням за допомогою гідродомкратів або гідроподушок (кар'єрне тарування):

– використанням графіків або залежностей, одержаних в лабораторних умовах (лабораторне тарування).

Інтерпретація результатів натурних ультразвукових намірів за допомогою розвантаження блоку породи, в якому ведуться спостереження, з подальшим навантаженням його гідроподушками або гідродомкратами має ряд істотних недоліків:

- обмежена глибина проникнення в масив, а оскільки контур виробки породи може бути порушений, то достовірність такого тарування невизначена;
- при створенні розвантажувальної щілини можливе додаткове руйнування породи, що також знижує достовірність одержуваних результатів;
- метод надзвичайно трудомісткий і тому непридатний для масових визначень.

Інший спосіб інтерпретації кар’єрних вимірювань – використання залежностей, які одержані при лабораторних випробуваннях.

При вивченні напруженого стану порід в масиві основною задачею є визначення величини і напрямку головних напруг. Для цієї мети при використанні ультразвукового методу вимірювань може бути використано явище виникнення швидкісної анізотропії порід в процесі їх навантаження.

Дійсно, хоча швидкість подовжньої хвилі є функцією всіх трьох головних напруг, визначаючий вплив на її величину має напруга, яка діє у напрямі розповсюдження хвилі. Таким чином, вимірюючи швидкості подовжніх хвиль в яких-небудь двох напрямках, можливо оцінити величину нормальних напруг, діючих в цих напрямках. Очевидно, що найбільше і найменше значення швидкостей в якій-небудь площині відповідатимуть найбільшій і найменшій головним нормальним напругам. Змірявши максимальні і мінімальні значення швидкостей, можна оцінити найбільшу і найменшу напруги.

Оскільки породи під впливом тиску стають анізотропними (рисунок), можна прийняти, що швидкість подовжніх хвиль V_a в будь-якому напрямі в одній площині пов’язана з максимальною V_{max} і мінімальною V_{min} швидкостями функцією, яка виражається рівнянням еліпса з центром на перетині осей.

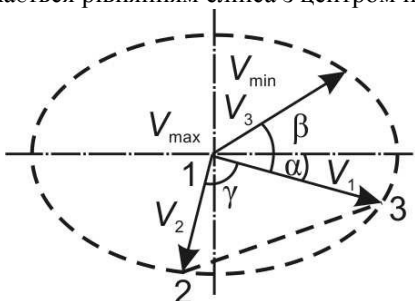


Рисунок. Розрахункова схема до визначення параметрів еліпса анізотропії

$$\frac{X}{d^2} + \frac{Y}{b^2} = 1. \quad (4)$$

Прийемо $d = V_{max}$, $b = V_{min}$,

$r = V_{\alpha}$ – швидкість в будь-якому довільно вибраному напрямі.

Приведемо до полярних координат:

$$\begin{aligned} X &= V_{\alpha} \cos \alpha, \\ Y &= V_{\alpha} \sin \alpha. \end{aligned} \quad (5)$$

Підставивши значення X і Y з рівняння (5) в рівняння (4), одержимо:

$$\frac{V_{\alpha}^2 \cos^2 \alpha}{V_{max}^2} + \frac{V_{\alpha}^2 \sin^2 \alpha}{V_{min}^2}, \quad (6)$$

звідки

$$V_d = \frac{V_{max} V_{min}}{\sqrt{V_{min}^2 \cos^2 \alpha + V_{max}^2 \sin^2 \alpha}}. \quad (7)$$

Розмістивши шпури 1, 2, 3, як показано на рисунку, і змірявши швидкості V_1 , V_2 , V_3 , одержимо систему з трьох рівнянь з трьома невідомими:

$$\begin{aligned} V_1 &= \frac{V_{max} V_{min}}{\sqrt{V_{min}^2 \cos^2 \alpha + V_{max}^2 \sin^2 \alpha}}, \\ V_2 &= \frac{V_{max} V_{min}}{\sqrt{V_{min}^2 \cos^2 (\alpha + \gamma) + V_{max}^2 \sin^2 (\alpha + \gamma)}}, \\ V_3 &= \frac{V_{max} V_{min}}{\sqrt{V_{min}^2 \cos^2 (\beta + \alpha) + V_{max}^2 \sin^2 (\beta + \alpha)}}. \end{aligned} \quad (8)$$

Для спрощення рішення системи (8) вимірювання швидкостей V_1 , V_2 , V_3 доцільно проводити за такими напрямками, щоб кут $\gamma = 90^\circ$, угол $\beta = 45^\circ$, тобто за схемою прямокутної розетки швидкостей аналогічно розетці деформацій в методі розвантаження.

З сумісного рішення рівнянь системи (8) одержимо:

$$d = \frac{1}{2} \arctg \left[\frac{2V_1^2 \cdot V_2^2 - V_2^2(V_1^2 - V_2^2)}{V_2^2(V_2^2 - V_1^2)} \right], \quad (9)$$

$$V_{max} = \sqrt{\frac{V_1^2 V_2^2 \cos 2\alpha}{V_2^2 \cos^2 \alpha - V_1^2 \sin^2 \alpha}}, \quad (10)$$

$$V_{min} = \sqrt{\frac{V_1^2 V_2^2 \cos 2\alpha}{V_1^2 \cos^2 \alpha - V_2^2 \sin^2 \alpha}}. \quad (11)$$

Висновок. Змірявши швидкості в масиві за трьома напрямками в даній площині вимірювання, відповідно до схеми на рисунку, можна обчислити за формулами (9, 10, 11) максимальні і мінімальні значення швидкостей і орієнтування їх в ділянці, що вивчається, а від швидкостей за графіками з відповідних кореляційних рівнянь перейти до нормальних напруг.

1. Короблев А. Л. Современные методы и приборы для изучения напряженного состояния массива горных пород / А. Л. Короблев. – М.: Наука, 1969. – 127 с. 2. Ломтадзе В. Д. Методы лабораторных исследований физико-механических свойств горных пород / В. Д. Ломтадзе. – М.: Недра, 1972. – 312 с. 3. Карташов Ю. М. Прочность и деформируемость горных пород / Ю. М. Карташов, Б. В. Матвеев, Г. В. Михеев, А. Б. Фадеев. – М.: Недра, 1979. – 269 с. 4. Шаумян Л. В. Физико-механические свойства массивов скальных горных пород / Л. В. Шаумян. – М.: Наука, 1972. – 120 с. 5. Турчанинов И. А. Руководство по измерению напряжений в массиве скальных пород методом разгрузки (вариант торцевых измерений) / И. А. Турчанинов, Г. А. Марков, В. И. Иванов. – Апатиты: КФ АН СССР, 1970. – 48 с. 6. Зубков А. В. Геомеханика и геотехнология / А. В. Зубков. – Екатеринбург: УрО РАН, 2001. – 335 с.

Рецензент: д.г.-м.н., професор Підвисоцький В. Т. (Житомирський державний технологічний університет).