

УДК 622.272

С. В. ТИЩЕНКО, д-р техн. наук, проф, Криворожский национальный университет

Г. И. ЕРЕМЕНКО, канд. техн. наук, Академия горных наук Украины

Д. Ю. МАЛЫХ, директор по производству и планированию ЧАО «ИнГОК»

ЗАВИСИМОСТЬ ПРОЦЕССА ВЗРЫВНОГО РАЗРУШЕНИЯ ОТ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СРЕДЫ

Актуальность. Процесс взрывного разрушения горного массива при заданных параметрах поля напряжений во многом определяется физическими свойствами и структурой разрушаемых пород. К основным свойствам горных пород относится объемный вес γ , а именно вес единицы объема породы с естественной влажностью и структурой, сопротивляемость горной породы разрушению при любом виде приложения нагрузки, которая оценивается величиной коэффициента крепости f по шкале профессора М.М. Протоdjаконова и трещиноватость. В свою очередь, трещиноватость горного массива характеризуется густотой сетки трещин, их размерами, и ориентацией в пространстве.

Анализ исследований и публикаций. Процесс дробления многие авторы рассматривают как процесс роста и слияния трещин в разрушаемом объеме горного массива. Исследуем основные закономерности процесса разрушения с использованием теории статистики.

Методы исследований. Значение параметров трещин во время воздействия взрывной нагрузки меняется в их совокупности по закону непрерывной случайной величины. Совокупность всех возможных значений параметров в силу непрерывности их изменения образуют некоторую трехмерную область.

Горный массив будем рассматривать как квазиизотропную среду, размеры трещин не превышают линейные размеры рассматриваемого объема и беспорядочно ориентированы.

Постановка задачи. Продукты детонации, действующие на стенки зарядной камеры, образуют в разрушаемом горном массиве очень неоднородное сложное поле напряжений, распространяющееся со скоростью, определяемой физическими свойствами среды. В реальных условиях, даже при равномерном напряжении, поля напряжений имеют локальную неоднородность. На берегах трещин концентрируются напряжения. Этот процесс во многом зависит от их конкретных размеров. Когда величина напряжений достигает величины σ_p , трещина начинает расти. При этом процесс развития трещин становится необратимым.

Результаты. Выполненные исследования показывают, что процесс разрушения горных пород при данных характеристиках поля напряжений определяется физическими свойствами разрушаемого массива и его структурными особенностями. Хотя интенсивность дробления разрушаемой среды и зависит от многочисленных факторов, при этом их влияние на характер процесса разрушения неравнозначный. На это указывают и многочисленные исследования. Определяющими факторами качества взорванной горной массы, очевидно, является величина и продолжительность импульсного воздействия в разрушаемом массиве горных пород и физико-механические свойства последних.

Ключевые слова: взорванная масса, интенсивность дробления, разрушение горных пород.

doi: 10.31721/2306-5451-2019-1-48-75-79

Проблема и ее связь с научными и практическими заданиями. Процесс взрывного разрушения горного массива при заданных параметрах поля напряжений во многом определяется физическими свойствами и структурой разрушаемых пород. К основным свойствам горных пород относится объемный вес γ , а именно вес единицы объема породы с естественной влажностью и структурой, сопротивляемость горной породы разрушению при любом виде приложения нагрузки, которая оценивается величиной коэффициента крепости f по шкале профессора М.М. Протоdjаконова и трещиноватость [1]. В свою очередь, трещиноватость горного массива характеризуется густотой сетки трещин, их размерами, и ориентацией в пространстве. Следовательно, трещиноватость разрушаемого горного массива можно рассматривать как функцию от перечисленных параметров

$$\varphi = \psi(x_1, x_2, x_3). \quad (1)$$

Анализ исследований и публикаций. Процесс дробления многие авторы [2,3] рассматривают как процесс роста и слияния трещин в разрушаемом объеме горного массива. Исследуем основные закономерности процесса разрушения с использованием теории статистики [4].

Значение параметров трещин во время воздействия взрывной нагрузки меняется в их совокупности по закону непрерывной случайной величины. Совокупность всех возможных значений параметров в силу непрерывности их изменения образуют некоторую трехмерную область z , координаты каждой точки которой определены как (γ, f, φ) .

В общем виде закономерность распределения трещин, согласно введенных параметров, будет иметь вид

$$F = \int_z F(\gamma, f, \varphi) dz, \quad (2)$$

где $F(\gamma, f, \varphi)$ - дифференциальная функция распределения.

Конкретный вид данной функции зависит от свойств и структуры рассматриваемой среды, при этом надо учитывать тот факт, что переменная φ , в свою очередь, является функцией от основных параметров, характеризующих степень трещиноватости горной породы. Область z определяется параметрами поля напряжений, при котором происходит развитие и слияние трещин, имеющих в разрушаемом массиве.

Рассмотрим процесс взрывного разрушения горного массива в динамике.

Постановка задания. Горный массив будем рассматривать как квазиизотропную среду, размеры трещин не превышают линейные размеры рассматриваемого объема и беспорядочно ориентированы.

В качестве количественной характеристики напряженного состояния разрушаемого массива, вызывающее разрушения, примем согласно [5] величину

$$\sigma_p^2 = \sqrt{(1+V)(\sigma_{ij}\varepsilon_{ij} - V\theta^2)}, \quad (3)$$

где σ_{ij} - компоненты тензора напряжений; ε_{ij} - компоненты тензора деформаций, $\theta = \sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}$.

Энергия деформированного изотропного тела равна

$$W = -\int_V \left(\frac{V}{2E} \theta^2 - \frac{1+V}{2E} \sigma_{ij}\varepsilon_{ij} \right) dV. \quad (4)$$

Если обозначить через ΔV - элементарный объем в разрушаемом массиве и учесть, что компоненты тензора напряжений в этих пределах изменяются незначительно, то получим

$$\Delta W = 1/2 \sigma_p^2 E^{-1} \Delta V. \quad (5)$$

Принимая во внимание тот факт, что число трещин в объеме ΔV - горной породы подчиняется нормальному закону распределения по площадям

$$dN = n_0 e^{-\beta^2 S} dS, \quad (6)$$

откуда

$$N = n_0 \int e^{-\beta^2 S} dS = -n_0 \beta^{-2} e^{-\beta^2 S}, \quad (7)$$

где n_0 и β - постоянные коэффициенты, характеризующие структуру горного массива.

Изложение материала и результаты. Продукты детонации, действующие на стенки зарядной камеры, образуют в разрушаемом горном массиве очень неоднородное сложное поле напряжений, распространяющееся со скоростью, определяемой физическими свойствами среды. В реальных условиях, даже при равномерном напряжении, поля напряжений имеют локальную неоднородность. На берегах трещин концентрируются напряжения. Этот процесс во многом зависит от их конкретных размеров. Когда величина напряжений достигает величины σ_p , трещина начинает расти. При этом процесс развития трещин становится необратимым. Для разрушения хрупкой среды необходимо и достаточно, чтобы удовлетворялось условие

$$\varepsilon \geq \varepsilon_p,$$

где ε - относительная деформация среды от воздействия взрыва; ε_p - максимально возможная относительная деформация.

Относительная деформация определяется так: $\varepsilon = \Delta S/S$, где ΔS - абсолютное перемещение стенок скважины в заданный момент времени m , S - длина напряженного массива, м. На рис. 1 показана графически зависимость величины относительной деформации от линейных размеров разрушаемого массива.

Длина горного массива, находящегося под действием взрывной нагрузки в направлении от скважинного заряда в сторону перемещения ΔS в момент времени Δt равна $\Delta S = C \Delta t$, где C - скорость распространения волн напряжений в данной среде, м/с.

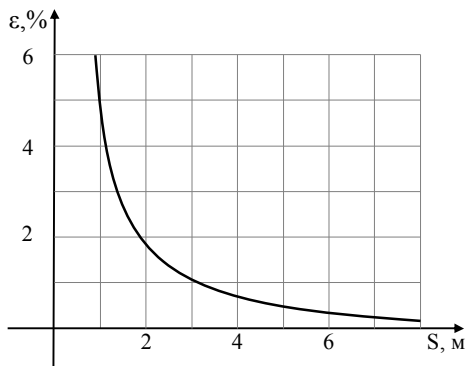


Рис. 1. Зависимость относительной деформации от расстояния

Известная формула А.А. Гриффитса [6] устанавливает связь между действующими напряжениями и размером трещин

$$\sigma = \frac{2}{3} (E\gamma L S_{кр}^{-1})^{1/2}, \quad (8)$$

т.е., если приложенная нагрузка вызывает в теле поле напряжений величиной σ , то все трещины площадью $S \geq S_{кр}$ станут расти, причем линейные размеры трещин l_i должны удовлетворять условию

$$l_i \ll L,$$

где L - линейные размеры тела. Число таких трещин, распространяющихся под действием напряжений σ согласно [7], равно

$$m = n_0 \int_{S_{кр}}^{\infty} e^{-\beta^2 S} dS = \frac{\sqrt{\pi}}{2\beta} (1 - \Phi(S_{кр})),$$

где $\Phi(S_{кр}) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{S_{кр}} e^{-\rho^2 S} d(\beta S)$ - интеграл вероятности, определяющий вероятностное число трещин, удовлетворяющих условию $S \geq S_{кр}$.

Постоянные n_0 и β определяют для каждого конкретного материала особенности процесса разрушения. Они отражают зависимость между разрушающим напряжением и первоначальной сеткой трещин в данном разрушаемом объеме.

Экспериментальные исследования, выполненные авторами [5], позволили аппроксимировать зависимость времени достижения трещиной максимальной скорости распространения $t = ke^{-m\sigma} P(\sigma - \sigma_0)$, где k и m - постоянные для каждого конкретного материала, σ_0 - напряжение, при котором вероятность роста трещин равна вероятности их смыкания. Функция $P(\sigma - \sigma_0)$ определена в виде функции Дирихле и имеет вид

$$P(\sigma - \sigma_0) = \begin{cases} 1, & \text{если } \sigma - \sigma_0 > 0; \\ 0, & \text{если } \sigma - \sigma_0 \leq 0. \end{cases}$$

Общее время разрушения единицы объема равно

$$t_{общ} = \frac{1}{V} \left(\frac{\beta}{n_0 \sqrt{\pi}} \right)^{1/3} \left(1 - \Phi \left(\frac{4}{9} LE\gamma\sigma^{-2} \right)^{-1/3} - \frac{\varepsilon}{2} e^k P(\sigma - \sigma_0) \right). \quad (9)$$

Усредненное расстояние между растущими трещинами при условии их равномерного распределения в рассматриваемом единичном объеме

$$h = \left(\frac{\beta}{\sqrt{\pi} \cdot n_0 (1 - \Phi(S_{кр}))} \right)^{1/3}.$$

Согласно [8,9] энергия, диссипированная в данном объеме разрушаемой среды в результате взрыва, складывается из работы сил деформации и энергии, переданной среде ударной волной, элементарная работа сил пластической деформации над сферическим слоем толщиной dr при его перемещении на расстояние $S=udt$, равна

$$dE'_1 = -8\pi(\sigma_r - \sigma_\theta)urdrdt. \quad (10)$$

После интегрирования выражения (9) по времени получим работу сил пластической деформации, производимую над рассматриваемым объемом за время его движения

$$dE_1 = -8\pi \int_{t_0}^{t_m} (\sigma_r - \sigma_\theta)urdrdt, \quad (11)$$

где t_0 - начальное время; t_m - время полного расширения радиуса ударной волны; σ_r, σ_θ - главные нормальные напряжения.

Энергия, переданная ударной волной сферическому объему среды,

$$dE_2 = 2\pi\varepsilon^2 \cdot \rho_0 R^2(r_0) r_0^2 dr_0, \quad (12)$$

где r_0 - Лагранжева координата; ε ; ρ_0 - параметры, характеризующие среду; R - радиус фронта ударной волны.

Принимая во внимание, что $r^3 = \varepsilon n^3 + (1 - \varepsilon)r_0^3$, а также значение параметров пластической среды $\sigma_r - \sigma_0 = k + m(\sigma_r + 2\sigma_0)$, $k = \tau_k - \bar{m}\rho$, где τ_k - касательное напряжение, ρ - среднее напряжение; \bar{m} - коэффициент внутреннего трения при условии что массовая скорость частиц за фронтом ударной волны равна

$$U = \varepsilon R^2(t) \cdot R'(t) \cdot r^{-2},$$

где $R'(t)$ - скорость фронта ударной волны можно получить формулу, определяющую полную энергию, диссипированную в рассматриваемом объеме разрушаемой среды

$$dE = 2\pi\varepsilon^2 \rho_0 R^2(r_0) \cdot r_0^2 \cdot dr_0 - 4\pi\alpha\varepsilon r_0 dr_0 (1 - \varepsilon) \cdot \int_{t_0}^{t_m} \frac{(\sigma_r + k/3m)R^2(t) \cdot R'(t) \cdot dt}{\varepsilon R^3(t) + (1 - \varepsilon)r_0^3}.$$

Согласно полученной формулы, а также формул (10) и (11) видно, что распределение энергии в рассматриваемой среде, зависит от k и свойств самой среды, и при этом не зависит от полной энергии взрыва.

Выводы и направление дальнейших исследований. Выполненные исследования показывают, что процесс разрушения горных пород при данных характеристиках поля напряжений определяется физическими свойствами разрушаемого массива и его структурными особенностями. Хотя интенсивность дробления разрушаемой среды и зависит от многочисленных факторов, при этом их влияние на характер процесса разрушения неравнозначный. На это указывают и многочисленные исследования [10,11, 12]. Определяющими факторами качества взорванной горной массы, очевидно, является величина и продолжительность импульсного воздействия в разрушаемом массиве горных пород и физико-механические свойства последних. Учитывая тот факт, что горно-геологические условия проведения взрывных работ можно считать заданными, то процессом взрывного дробления можно управлять, рационально используя определенную технологию взрывной отбойки, определяющую характер взрывного нагружения в зависимости от физико-механических свойств среды.

Список литературы

1. Протодяконов М.М., Тедер Р.И., Ильиниц Е.И. и др. Распределение показателей физических свойств горных пород / Протодяконов М.М., Тедер Р.И., Ильиниц Е.И. // М.: Недра, 1981. – 188 с.
2. Воробьев В.Д., Куриной В.М., Мяделец В.Н. Исследование процесса детонации комбинированных зарядов ВВ и эффективность их применения при разрушении гранитов / Воробьев В.Д., Куриной В.М., Мяделец В.Н. // Изд-во ВУЗов. Горный журнал, 1972. - № 2. – С.82-90.
3. Кучерявый Ф.И., Лучко И.А. Взрыв и горные технологии / Кучерявый Ф.И., Лучко И.А. // Киев: Наукова думка, 1988. – 157 с.
4. Пугачев В.С. Теория вероятностей и математическая статистика / Пугачев В.С. // М.: Наука, 1979. – 469 с.
5. Друкованный М.Ф., Куц В.С., Ильин В.Н. Управление действием взрыва скважинных зарядов на карьерах. – М.: Недра, 1980. – 223 с.
6. Griffith A.A. Theory of rupture. Proc. First. / Griffith A.A. // International Congress Appl. Mech. 1924. P.256.
7. Физика взрыва / Баум Ф.А., Орленко Л.П., Станюкович К.П. и др./ Под. ред. К.П.Станюковича. - М.: Наука, 1975. - 407 с.
8. Баум Ф.А., Станюкович К.П., Шехтер В.Н. Физика взрыва / Баум Ф.А., Станюкович К.П., Шехтер В.Н. // М.: ФизматГИЗ, 1959. – 800 с.
9. Миндели Э.О., Кусов Н.Ф., Корнеев А.А., Марцинкевич Г.И. Комплексное исследование действия взрыва в горных породах / Миндели Э.О., Кусов Н.Ф., Корнеев А.А., Марцинкевич Г.И. // М.: Недра, 1978. – 253 с.
10. Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Салганик Р.М. О кинетике распространения трещин // Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Салганик Р.М. // Инженерный журнал, МТТ, 1963. - № 1. – С.28-30.
11. Вовк А.А., Михалюк В.В., Белинский Н.В. Развитие зон разрушения горных пород при камуфлетных взрывах / Вовк А.А., Михалюк В.В., Белинский Н.В. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1973. № 4. – С.39-45.
12. Berry I.P. Fracture process in polymeric material / Berry I.P. // I. Polymer7 Sci. V.50, n.153. – P.56-81.

Рукопись поступила в редакцию 04.04.2019