

УДК 622.272

И.А. ГАПОНЕНКО, аспирантка, Криворожский национальный университет

ЗАВИСИМОСТЬ ГРАНСОСТАВА ВЗОРВАННОЙ ГОРНОЙ МАССЫ ОТ КОНСТРУКЦИИ СКВАЖИННОГО ЗАРЯДА ВВ

Производство взрывных работ на современном этапе в железорудных карьерах характеризуется сложными горно-геологическими условиями ведения буровзрывных работ.

Реальным путем достижения повышения качества взрывоподготовки горных пород в сложившихся условиях разработки полезного ископаемого на железорудных карьерах Украины, является разработка системы технологических методов взрывного разрушения, основанной на максимальной концентрации энергии взрыва и ее рациональном перераспределении в разрушаемом горном массиве. Возникает необходимость в разработке новых технологий взрывных работ, позволяющих получать высокое качество дробления взрываеваемой горной породы.

Характер процесса взрывного разрушения массива горных пород во многом определяется конструктивными особенностями скважинного заряда ВВ. Используя последние, возможно значительно уменьшить пиковое давление продуктов детонации на границе раздела заряд-порода, увеличить общее время воздействия взрывных нагрузок на разрушаемый массив и тем самым повысить КПД взрыва.

Исследована зависимость грансостава взорванной горной массы от конструкции скважинного заряда ВВ.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Качество дробления взорванной горной массы - это один из основных показателей эффективной работы буровзрывного комплекса. Последнее во многом зависит от технологии ведения взрывных работ, включающей в себя способы размещения, формирования и инициирования скважинных зарядов ВВ.

Эти составляющие технологии ведения взрывных работ в значительной степени определяют характер распределения энергии взрыва в разрушаемом массиве горных пород. Очень быстрое выделение большого количества энергии в разрушаемом объеме горных пород сопровождается различными процессами разрушения.

Определение зависимости между этими процессами - одна из задач теории разрушения твердых тел при взрыве.

При взрыве скважинного заряда для продуктов детонации справедлив изоэнтропийный закон расширения, связывающий давление P и плотность ρ

$$P = a \cdot \rho^n,$$

где n - константа данного ВВ.

При истечении продуктов детонации в какую-либо среду в последней всегда образуется ударная волна, скорость которой согласно работы [1] есть функция

$$U_{уд.} = \alpha(D, P_1, P_2)$$

где D - скорость детонации ВВ; P_1 - давление во фронте детонационной волны, P_2 - начальное давление во фронте ударной волны, образующейся в среде.

Очевидно, что структура и параметры волны разрушения зависят от импульсной нагрузки, в нашем случае ударной волны и физико-механических свойств разрушаемой среды.

Анализ исследований и публикаций. Рассмотрим разрушающее действие скважинного (цилиндрического) заряда ВВ в плоскости, перпендикулярной к оси заряда, то есть рассмотрим плоскую картину течения разрушения. Закон сохранения энергии на фронте волны разрушения имеет вид

$$\omega_2 - \omega_1 = \frac{1}{2}(P_1 + P_2)(\rho_1^{-1} - \rho_2^{-1})$$

где ω_1, ω_2 - внутренняя энергия среды на поверхности, на которой начинается разрушение и соответственно на поверхности, где дальнейшее разрушение не происходит; P_1, P_2 - напряжения, нормальные к поверхностям, где происходит и не происходит разрушение; ρ_1, ρ_2 - плотность среды соответственно на указанных поверхностях.

Согласно [2,3], если внутреннюю энергию единицы массы материала обозначить через ω_0 , то для разрушенного материала

$$\omega = P^2 / 2k\rho_1 + \Sigma^2 / 2\mu\rho_1 + \omega_0(T_1).$$

$$3P = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$$

$$6\Sigma^2 = (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2; \quad \omega_0(T_1) = C \cdot T_1 \cdot \rho_1^{-1}$$

$$\omega_0(T_1) = cT_1\rho_1^{-1},$$

где k - модуль векторного сжатия; μ - модуль сдвига; C - теплоемкость.

За фронтом волны разрушения для разрушенного материала

$$\omega_2 = \sigma_x^2(2E\rho_2)^{-1} + \omega_0(T_2) + \omega_s$$

где ω_s - поверхностная энергия.

Структура волны разрушения состоит из двух поверхностей: поверхность L_1 , на которой начинается разрушение и поверхность L_2 , за которой дальнейшее разрушение не происходит. Очевидно, что перед поверхностью L_1 среда подвергается растяжению, а за поверхностью где разрушение не происходит, растягивающие напряжения полностью сняты.

Постановка задачи. С удалением от центра взрыва напряжение уменьшается, в результате чего вокруг заряда после зоны «перемола» образуется зона радиальных трещин. Одной из моделей системы трещин является система параллельных трещин. Принцип хрупкого разрушения тела, согласно которому развитие трещин происходит только если скорость освобождения энергии упругой деформации превзойдет прирост поверхностной энергии трещины, был сформулирован в работе [4], согласно которому

$$\frac{\partial \Delta U}{\partial t} > 4\gamma,$$

где ΔU - изменение упругого потенциала вследствие наличия трещины; γ - поверхностная энергия единицы свободной поверхности.

Величина ΔU равна произведению средней площади области концентрации напряжений на среднее значение плотности упругого потенциала, пропорциональной $P^2 \cdot E^{-1}$, т.е.

$$\Delta U = \sqrt{(2/\pi) \cdot l^2 \cdot P^2 \cdot E^{-1}}, \quad (1)$$

где l - длина трещины; P - значение давления, при котором происходит развитие трещины.

Так как начальный упругий потенциал среды не зависит от длины трещины l , то согласно (1)

$$2E\gamma = \sqrt{(2/\pi)P^2 l}.$$

Из последнего уравнения получим зависимость нагрузки от длины трещины

$$P^2 = 2E\gamma/\pi l.$$

На рис. 1 изображен динамический процесс развития трещины. Вначале с увеличением нагрузки P длина начальной трещины l_0 остается неизменной, пока не достигается значения \bar{P} , после чего начинается процесс развития трещины.

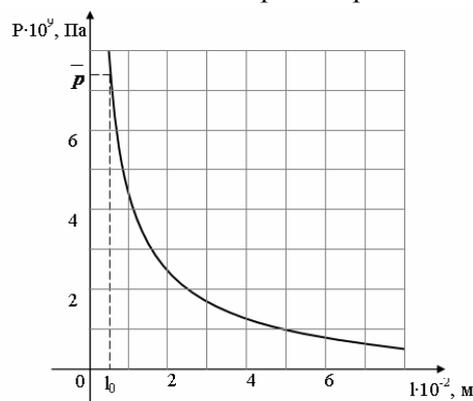


Рис. 1. Динамический процесс развития трещины

Одной из первых работ, посвященной описанию процесса развития трещин и отвечающей реальным условиям разрушения твердой среды, была работа [5].

Из условия, что

$$\frac{\partial W}{\partial l} = \frac{\partial \Pi}{\partial l} + \frac{\partial T}{\partial l} \quad (2)$$

была получена формула, определяющая скорость развития трещины

$$V = K \sqrt{(E/P)(1 - (l/l_0))^{\frac{1}{2}}},$$

где W - потенциальная энергия деформации; Π - поверхностная энергия; l_0 - длина равновесной трещины; K - эмпирическая константа; T - кинетическая энергия.

В дальнейшем в работах [6,7] выражение (2) приняло вид

$$\frac{\partial W}{\partial l} = \frac{\partial T}{\partial l} + \frac{\partial \Pi}{\partial l} - \left(\frac{\partial}{\partial l} \right) \iint \rho \left(\frac{u \partial^2 u}{\partial t^2} + \frac{v \partial^2 v}{\partial t^2} \right) dx dy,$$

где u и v - потенциалы вектора смещения.

Кинетическая энергия при взрыве заряда ВВ определяется как

$$T = T_1 + T_2,$$

где T_1 - энергия, полученная в результате импульсного воздействия взрыва; T_2 - энергия сжатых взрывных газов.

Составляющие кинетической энергии среды согласно [7] соответственно равны

$$T_1 = \frac{2\pi\rho_0 \cdot a'^2 a^3}{3-2n} \left(1 - \varepsilon^{\frac{2n-1}{n+1}} \right); \quad T_2 = \frac{4\pi\rho_0 \cdot a^3}{3(\gamma-1)} \left(\frac{a_0}{a} \right)^{3\gamma}, \quad (3)$$

где a_0 , a - соответственно радиус взрывной полости в начальный и текущий моменты времени.

Формулы (3) определены из условия, что кинетическая энергия, приходящаяся на единицу длины цилиндрического заряда, определяется как

$$W = \rho \int_a^\infty \pi r v^2 dr = \frac{\rho_0 \pi a'^2 \cdot a^2}{2(n-1)}.$$

Изложение материала и результаты. На образование трещины (начало процесса разрушения), очевидно, затрачивается энергия W , включающая в себя энергию разрыва внутренних связей, работу пластической деформации и другие виды энергии.

Если длина трещины изменяется на величину dl , то производную $\partial w / \partial l$ можно рассматривать как обобщенную силу.

Обозначив через f удельную поверхностную энергию, получим: $\partial w / \partial l = \partial f$. Тогда согласно исследованиям [8] закон сокращения импульса на поверхностях L_1 и L_2 примет вид

$$P_2 S_2 - P_1 S_1 = j(v_2 - v_1) + 2f,$$

где j - поток вещества; v_1 и v_2 ; - массовая скорость на поверхности L_1 и L_2 ; S_1 - сечение фрагмента в не разрушенной среде; S_2 - сечение фрагмента в разрушенном материале.

Закон сохранения потоков вещества с учетом наших обозначений запишется в виде

$$P_2^1 - P_1^1 = j^2 \left((\rho_1^1)^{-1} - (\rho_2^1)^{-1} \right) + 2f, \quad (4)$$

$$P^1 = PS; \quad \rho^1 = \rho S, \quad (5)$$

где ρ_1 и ρ_2 - плотность соответственно на каждой из поверхностей; P_1 и P_2 - нормальные напряжения.

Для случая когда $P_1' = P_2'$ с учетом формул (4) и (5), получаем

$$\rho_1 S_1 (\rho_1 S_1 / \rho_2 S_2 - 1) = 2f / (C_r - v_1)^2, \quad (6)$$

где c_r - скорость волны разрушения.

Из предположения, что среда является упругопластической, имеем

$$S_1 = S_0 (1 + \varepsilon_*), \quad S_2 = S_0 (1 + \varepsilon'), \quad (7)$$

где S_0 - размер рассматриваемого фрагмента в не напряженном состоянии; ε' - остаточная деформация.

Подставляя значения S_1 и S_2 из формул (7) в выражение (6), получим

$$S_2 = 2f / \rho (c_r - v_1)^2 (\varepsilon_* - \varepsilon'),$$

так как $\varepsilon_* - \varepsilon' = \sigma_* / E$, то окончательно формула по определению размера осколка, если известна окончательная скорость C_r волны разрушения, может быть записана в виде

$$S_2 = 2fE(\rho\sigma_*(c_r - v_1)^2)^{-1}. \quad (8)$$

Для случая радиального движения с осевой симметрией скорость фронта разрушения равна

$$dR / dt = v / 2\varepsilon_*, \quad (9)$$

где R - радиус фронта разрушения; t - время,

или

$$dR / dt = c_r - v_1. \quad (10)$$

Тогда с учетом формул (8), (9), (10) получим

$$S_2 = 8fE\varepsilon_*^2(\rho\sigma_* \cdot v^2)^{-1}. \quad (11)$$

Формула (11) дает возможность определить поперечный размер куска разрушенного материала в зависимости от величины массовой скорости V .

Если поперечный размер осколка обозначить через $\langle x \rangle$, а величину массовой скорости для цилиндрического заряда принять в виде

$$V = A(\sqrt{Q} \cdot R_*^{-1})^2,$$

где Q - вес заряда ВВ, приходящийся на единицу длины; R_* - расстояние от центра заряда; A , α – эмпирические коэффициенты, то формула (11) примет окончательный вид

$$H = (8fE\varepsilon_*^2 A^2 \sigma_*) (R/Q^{1/2})^\alpha. \quad (12)$$

Формула (12) определяет характерный размер осколков в зависимости от веса заряда (приходящийся на единицу длины) и расстояния от центра заряда. В общем виде это может быть записано как

$$H = X(Q_1 R). \quad (13)$$

Выводы. Изменение веса заряда ВВ, приходящийся на единицу длины в скважине возможно только за счет изменения конструкции скважинного заряда ВВ.

Зависимость (13) это теоритическое обоснование возможности влияния конструктивных особенностей скважинного заряда ВВ на качество взорванной горной массы.

Следует отметить, что наличие в скважинном заряде ВВ [9] воздушного промежутка и отражателя из сыпучих материалов позволит снизить тепловые потери и интенсивностью дробления в ближней зоне от заряда [10,11].

Это позволит повысить эффективность использования энергии взрыва и снизить отрицательное взрывное воздействие взрыва виде заколов на нижележащие уступы горных пород.

Список литературы

1. Кузнецов В. М. О плоской волне разрушения / В. М. Кузнецов. // ФГВ, 1974.- № 1. – С.124-127.
2. Друкованый М.Ф., Комир В.М., Кузнецов В.М. Действие взрыва в горных породах / М. Ф. Друкованый, В. М. Комир., В. М. Кузнецов // .Киев: Науковва думка, 1973. -184 с.
3. Родионов В.Н. О подобии процесса дробления при взрывах рудного масштаба / В. Н. Родионов // - В кн. Механизм разрушения горных пород взрывом. Киев: Наукова думка, 1971. – С.107-112.
4. Griffith A.A. The phenomenon of rupture and flow in solids / А. А. Griffith // Phil. Trans. Poy. Soc. A 221, 1920, p.1201-1206.
5. Moth N.F. Fracture of metals / N. F. Moth // Theor. Conq. Enqng. 1948. V.1657 № 16. p.321-348.
6. Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г. Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах / А. Н. Ставрогин, А. Г. Протосеня // М.: Недра, 1985. – 270 с.
7. Кузнецов В. М. Математические модели взрывного дела / В. М. Кузнецов // Новосибирск: Наука, 1977. – 259 с.
8. Физика взрыва / Баум Ф.А., Орленко Л.П., Станюкович К.П. и др./ Под. ред. К.П.Станюковича. - М.: Наука, 1975. - 407 с.
9. Пат.№35423 Украина МПК F42D 1/00 F42D 3/00.Свердловинний заряд/ Гапоненко А.Л. и др.
10. Мельников Н.В., Марченко Л.Н. Энергия взрыва и конструкция заряда / Мельников Н.В., Марченко Л.Н. // М.: Недра, 1964. - 138 с.
11. Эффективные методы управления процессами взрывного дробления и выброса / Н.В.Мельников, Л.П.Марченко, И.П. Сеинов и др. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1971. № 2. – С.37-45.