

С.В. Тищенко, С.А. Жуков

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТНОЙ ЗОНЫ НА ГРАНИЦЕ РАЗРУШАЕМОГО МАССИВА

RESEARCH OF FORMING OF DYNAMIC PROTECTIVE AREA ON BORDER OF THE DESTROYED ARRAY

Показано, что использование динамической зоны разрушений, образованной перед взрывом зарядов дробления, позволяет снизить разрушение смежного уступа горных пород, особенно в верхней его части. Процесс взрывного разрушения горных пород определенно включает элементы разгрузочного разрушения среды от быстрого снятия нагрузки.

Ключевые слова: граница разрушаемого массива, динамическая защитная зона, заряды дробления.

Механизм взрывного разрушения горных пород в граничных зонах массива широко исследован, но вместе с тем, для повышения эффективности буровзрывных работ (БВР) целесообразным является рассмотрение малоизученной возможности практического использования динамической зоны разрушений, образованной перед взрывом зарядов дробления, для снижения разрушения смежного уступа горных пород в верхней его части, что и является целью данной статьи.

Традиционные методы ведения взрывных работ объединяет то, что разрушаемый уступ горных пород подвергается взрывному воздействию от ранее произведенных взрывов, в результате чего верхняя его часть имеет неоднородную целостность из-за образования хаотической искусственной системы структурных нарушений и заколов [1, 2].

Так, при отбойке смежного уступа нарушения контурного массива (вновь образованного уступа), проявляются на расстоянии около 100-150 диаметров скважинного заряда, а глубиной до 45 диаметров [3]. Нарушенная верхняя часть разрабатываемого массива является причиной неконтролируемого выхода негабаритной фракции при производстве дальнейших взрывных работ, что отрицательно сказывается на технико-экономических показателях всего горнодобывающего производства.

Значительно снизить отрицательное воздействие от ранее произведенных взрывов на разрабатываемый горный массив возможно при использовании для взрывной отбойки горной массы, динамической зоны разрушения, создаваемой силовыми полями взаимодействующих зарядов ВВ, расположенных на границе разрушаемого уступа [4]. Основные скважинные заряды дробления инициируют после зарядов, образующих защитную динамическую зону, через интервал времени, сопоставимый с короткозамедленным взрыванием и с конкретными условиями.

Исследуем механизм образования предварительной защитной динамической зоны разрушения. Для этого рассмотрим процесс взаимодействия смежных скважинных зарядов ВВ, расположенных на линии образования динамической зоны разрушения, и непо-

средственное поведение горного массива, заключенного между ними.

Для рассмотрения решения поставленной задачи рассмотрим цилиндрическое тело (стержень), расположенное перпендикулярно по отношению к смежным рассматриваемым скважинным зарядам (рис. 1).

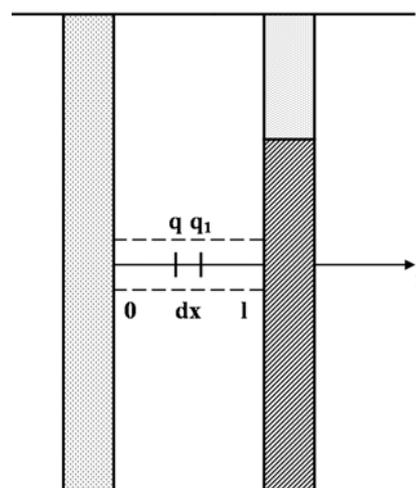


Рис. 1. Схема к исследованию колебательного процесса в горном массиве

Будем считать, что поперечный разрез цилиндрического тела – небольшой по отношению к его длине. Направим ось абсцисс по оси цилиндра, и будем считать, что в состоянии покоя данные тела находятся в точках $x = 0$ и $x = l$, где l – расстояние между зарядами. Пусть x – абсцисса некоторого сечения q тела, тогда последнее находится в покое. Обозначим через $u(x, t)$ смещение этого сечения в момент времени t , в момент детонации первого заряда. Тогда смещение q_1 с абсциссой $X+dx$ будет равно $u + \frac{\partial u}{\partial x} dx$, а относительное удлинение стержня при абсциссе X есть производная $\frac{\partial u(x, t)}{\partial x}$. Допуская, что цилиндрическое тело имеет колебания, можно вычислить возмущающую силу T , то есть:

$$T = ES \frac{\partial u}{\partial x}, \tag{1}$$

где E – модуль Юнга; S – площадь поперечного сечения цилиндрического тела.

Возьмем элемент тела между двумя сечениями q и q_1 , абсциссы которых в состоянии покоя соответственно равны x и $x+dx$. На этот элемент действуют возмущающие силы T_x и T_{x+dx} , которые направлены по оси OX . Результирующая этих сил равна:

$$T_{x+dx} - T_x = ES \frac{du}{dx} \Big|_{x+dx} - ES \frac{du}{dx} \Big|_x = ES \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} dx \tag{2}$$

и направлена также по оси абсцисс.

С другой стороны, ускорение элемента равно $\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$,

в силу чего имеет место равенство:

$$\rho S dx \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = ES \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \cdot dx, \tag{3}$$

где ρ – плотность рассматриваемого тела.

Пусть

$$a = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \tag{4}$$

и, сократив на $S dx$ выражение (3), получим дифференциальное уравнение продольных колебаний [5] рассматриваемого цилиндрического тела:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}. \tag{5}$$

Рассмотрим случай, когда на цилиндрическое тело действует внешняя сила $F(x,t)$ на единицу его объема, тогда вместо уравнения (3) будем иметь:

$$\rho S dx \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = ES \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} dx + F(x,t) \cdot S dx,$$

откуда получаем:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{1}{\rho} F(x,t). \tag{6}$$

Мы получили уравнение вынужденных продольных колебаний рассматриваемого стержня. Согласно (6) прохождение по массиву волны напряжений после взрыва первого заряда вызывает вынужденные продольные колебания самого горного массива. Скорость распространения этих колебаний согласно формулы (4), совпадает со скоростью волн напряжений. Этот факт имеет важное значение для определения полной картины процесса разрушения при взаимодействии смежных зарядов ВВ. Так, например, наличие вынужденных продольных колебаний горного массива во многом объясняет интенсивный процесс трещинообразования по линии расположения контурных скважинных зарядов ВВ при их последовательной работе.

Следует отметить, что в динамике уравнения (6) недостаточно для полной картины колебания цилиндрического тела. Необходимо еще задать начальные условия, а именно задать смещение сечения цилиндрического тела и скорость в начальный момент вре-

мени $U \Big|_{t=0} = f(x), \frac{du}{dt} \Big|_{t=0} = F(x)$, где $f(x), F(x)$ – заданные функции на $(0,l)$.

Кроме того, граничными условиями в рассматриваемом варианте являлись условия, что оба конца нашего тела (стержня) подвижны. Выбор формы тела в нашем случае – не случайный, так как многие исследователи [6, 7] рассматривают поведение разрушаемого горного массива как совокупность упругих стержней.

Следовательно, от взрыва первого заряда ВВ в горный массив трансформируется волна напряжений, которая, в свою очередь, вызывает вынужденные продольные колебания массива, заключенного между двумя скважинами. Зародыши радиальных трещин в большом количестве возникают в направлении распространения вынужденных колебаний под давлением взрывных газов. При детонации смежного заряда ВВ волна напряжений распространяется в массиве, имеющем ориентированную напряженность с радиальными и тангенциальными нарушениями. Горный массив, заключенный между взаимодействующими зарядами, концентрирует напряжения, значения которых намного превышают напряжения на целике. По линии, соединяющей заряды ВВ, массив значительно ослабляется, а поскольку он находится в волновом поле напряжений, то процесс развития трещин интенсивно распространяется в направлении взорвавшегося второго заряда ВВ. Взрыв последующего заряда проявляется как начальный импульс дальнейшего наиболее благоприятного направления роста трещин. В развитии направленной системы разрушений играют важную роль вынужденные продольные колебания в массиве, максимальная интенсивность которых проявляется на границе динамической защитной зоны.

Продольные вынужденные колебания возникают в массиве под действием внешней импульсной силы.

В массиве при взрыве зарядов ВВ, образующих динамическую зону, последняя реализуется как предельное положение поверхности разрушения. Поверхность разрушения имеет толщину, определяемую как

$$D = \sum_{n=1}^m \theta_n, \tag{7}$$

где $n = \overline{1, m}$.

Величина D равна необратимой работе пластических деформаций плюс превращение поверхностной энергии трещин на фронте разрушения в процессе образования динамической защитной зоны.

Система уравнений, позволяющая описать процесс образования поверхности разрушения, рассматривается в неподвижной декартовой системе координат [8].

Уравнение сохранения импульса для рассматриваемых условий имеет вид $\rho V'_i = \sigma_{i,\gamma} + x_S, i, \gamma = \overline{1,3}$.

Уравнение сохранения массы $\rho'_i + \rho \operatorname{div} \bar{V} = 0$, соотношение взаимосвязи компонента тензора ско-

рости деформации e_{ij} через компоненты вектора скорости v_i материальной частицы имеет вид

$$e_{i,j} = \frac{1}{2}(V_{i,j} + V_{j,i})$$

Деформация среды $\varepsilon_{i,j}$ выражается через смещение \bar{U} при помощи обычных соотношений механики сплошной среды. При этом смещение определяется из условий:

$$\begin{cases} r'_i = \bar{U}(r, t) \\ \bar{U} = r - r_0. \end{cases}$$

В заключение рассмотрим вопрос о расположении системы скважинных зарядов, образующих динамическую защитную зону, чтобы после их инициирования между ними не оставалось неразрушенных участков массива.

Примем h – расстояние от свободной поверхности; l – расстояние между скважинными зарядами. Согласно [9] потенциал поля скоростей определяется как

$$W = \frac{m}{2\pi} \ln \frac{\sin \frac{\pi}{l}(z + h_i)}{\sin \frac{\pi}{l}(z - h_i)}, \quad (8)$$

где $m = (E_k \cdot r_0 / 2\pi\rho)^{1/2}$.

Дважды дифференцируя выражение (8) по z , получим:

$$d^2W / dz^2 = (\pi m / 2l^2)(\sin^{-2} \pi(z - h_i) / l - \sin^2 \pi(z + h_i) / l).$$

Максимальная скорость сдвига на середине расстояния между зарядами равна $C_{\max} = (d^2W / dz^2)$ при $z = l/2 - ih$.

$$C_{\max} = (\pi m / 8l^2)th(2\pi h_i / l). \quad (9)$$

Если одиночный скважинный заряд создает сплошную проработку – «траншею», то величина C_{\max} вычисляется по формуле:

$$C_{\max} = 2mhx / \pi(x^2 + h^2)^2. \quad (10)$$

Приняв $x = h$, получим:

$$C_{\max} = 2m / \pi h^2. \quad (11)$$

Если между зарядами скорость сдвига – такая же, как и скорость, то очевидно, что «целиков» не будет. Приравнявая выражение (9) к (11), получим $4l / \pi h = (th2\pi h / l)^{1/2}$.

Решение последнего уравнения $h/l = 1,2$.

Полученное значение хорошо согласуется с принятыми на практике характеристиками буровзрывных работ.

Таким образом, процесс взрывного разрушения горных пород определенно включает элементы разгрузочного разрушения от быстрого снятия нагрузки. Использование динамической зоны разрушений обеспечит почти одновременный переход из состояния сжатия в растяжение отделившейся части массива после взрыва в нем зарядов дробления. Этот эффект обеспечит интенсивное дробление разрушаемого массива. Эффективность данного разрушения во многом зависит от рационального выбора способов формирования скважинных зарядов ВВ с привязкой к

горно-геологическим свойствам взрывааемых горных пород. Использование динамической зоны разрушений, образованной перед взрывом зарядов дробления, позволяет снизить разрушение смежного уступа горных пород, особенно в верхней его части.

Поверхность разрушения при взрыве скважинных зарядов ВВ, образующих динамическую защитную зону, в геометрическом смысле есть граница между целиком и разрушаемым горным массивом.

Список литературы

1. Фещенко А.А., Шьюфер М.И. К вопросу о снижении разрушающего действия взрыва // ФТПРПИ, 1974. – № 1. – С. 42-47.
2. Попов И.И., Шабурников А.В., Гриценко А.В. Деформации приконтурных уступов при массовых взрывах на карьере // Изв. вузов. Горный журнал. – 1975. – № 10. – С. 80-82.
3. В.В. Перегудов, С.А. Жуков. Пути повышения качества взрывных работ при разрушении горных пород сложной структуры. – Кривой Рог: Изд. дом, 2002. – 179 с.
4. Тищенко С.В., Жуков С.О. Вплив енергії вибуху на процес тріщинотворення у гірському масиві // Вісник ЖДГУ. – 2003. – № 2(26). – С. 232-234.
5. Кошляков Н.С. Основные дифференциальные уравнения математической физики. – М.: Физ-матлит, 1962. – 767 с.
6. Кузнецов В.М. Математические модели взрывного дела. – Новосибирск: Наука, 1977. – 259 с.
7. Григорян С.С. Некоторые вопросы математической теории деформирования и разрушения твердых горных пород // ПММ. – 1967. – Т. 31. – С. 157-245.
8. Cherepanov G.P. On the theory of fluidization, part I. General model. Ind. Engrg chemistry fundamentals 11. – 1972. – № 1.
9. Власов О.Е. Основы теории действия взрыва. – М.: ВИА, 1957. – 407 с.

Показано, що використання динамічної зони руйнувань, утвореної перед вибухом зарядів дроблення, дозволяє знизити руйнування суміжного уступу гірських порід, особливо у верхній його частині. Процес вибухового руйнування гірських порід визначено включає елементи розвантажувального руйнування середовища від швидкого зняття навантаження.

Ключові слова: межа руйнованого масиву, динамічна захисна зона, заряди дроблення.

It is shown, that the use of the dynamic zone of destructions, formed before the explosion of charges of crushing, allows to lower destruction of contiguous ledge of mountain rocks, especially in overhead his part. The process of explosive destruction of mountain rocks certainly includes the elements of unloading destruction of resilient medium by the rapid removal of pressure loading.

Key words: boundary of a destroyed massif, dynamic protection zone, the charges of fragmentation.

Рекомендовано до публікації д.т.н. В.В. Перегудовим 21.11.09