М.Г.МЕНЖУЛИН, Г.П.ПАРАМОНОВ, Ю.А.МИРОНОВ, А.В.ЮРОВСКИХ
Санкт-Петербургский горный институт,
Россия

МЕТОД РАСЧЕТА ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД НА КВАЗИСТАТИЧЕСКОЙ СТАДИИ ДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВА

Для расчета параметров буровзрывных работ при взрывном разрушении горных пород используются эмпирические зависимости или соотношения, основанные только на действии волн напряжений. Известно, однако, что на квазистатической стадии взрыва происходит дополнительное разрушение горных пород [5]. Оно проявляется как при вторичном дроблении кусков в зоне разрушения, так и при увеличении размеров этой зоны. Качественно эти эффекты известны и используются, в частности, при создании различных типов забоек в устьях шпуров и скважин, увеличивающих время действия квазистатической стадии взрыва. Однако физические и механические процессы дополнительного разрушения на квазистатической стадии взрыва исследованы значительно меньше, чем на волновой.

В настоящей работе предлагается метод расчета дополнительного увеличения зоны разрушения на квазистатической стадии по сравнению с зонами разрушения, сформированными на волновой стадии. Зонная модель разрушения на волновой стадии взрыва подробно рассмотрена в работах [1, 4].

При камуфлетном взрыве обычно рассматриваются следующие зоны разрушения: переизмельчения, дробления, трещинообразования. При наличии свободных поверхностей к перечисленным зонам добавляется зона откола, образующаяся при распространении отраженной от поверхности раздела сред волны разрежения.

Зону трещинообразования можно считать состоящей преимущественно из радиально расположенных трещин различной длины в диапазоне от размеров минеральных зерен до

$l_{\text{тр.max}} = R_{\text{тр}} - R_{\text{др}}$. Радиусы зон дробления $R_{\text{др}}$ и трещинообразования $R_{\text{тр}}$ на волновой стадии определяются из условий равенства соответственно максимальных сдвиговых и растягивающих напряжений динамическим пределам прочности на сдвиг и отрыв.

После прохождения волны напряжений и формирования перечисленных выше зон разрушения в окружающей взрывную полость породе действуют напряжения, обусловленные все еще достаточно высоким давлением продуктов детонации. Уровень таких напряжений на различных расстояниях от заряда ниже, чем в волне напряжений. Однако если при распространении волн напряжений прочность породы соответствовала ее естественной трещиноватости, то после прохождения волн прочность породы изменится. Изменение прочности породы обусловлено двумя факторами: появлением дополнительных наведенных трещин и увеличением размеров уже имеющихся. В первом случае реализуется кинетический механизм снижения термокинетических параметров среды и ее прочности, во втором – механизм, впервые установленный Гриффитсом.

Согласно термодинамическому подходу к описанию роста трещины по Гриффитсу, предполагается, что всегда в вершине трещины будет напряжение, достаточное для разрыва атомных связей, а возникновение катастрофического распространения трещины будет зависеть от того, уменьшается или увеличивается энергия всей системы в целом при распространении трещины. Гриффитс считал, что имеется два вида энергии: поверхностная энергия двух поверхностей, образованных при разрушении,

$$S = 2\gamma_s a$$

для половины трещины единичной толщины и длины a и энергия деформации или потенциальная энергия U, высвобождаемая телом. Величина U была вычислена путем интегрирования произведения напряжения на деформацию для всех элементов бесконечного тела, что дало (для трещины с полудлиной a)

$$U = -\sigma_{\text{эксп}}^2 \pi a^2 / 2E,$$

где E – модуль Юнга.

Тогда полная энергия есть функция длины трещины:

$$\varepsilon = S + U = -(\sigma_{\text{эксп}}^2 a^2 \pi / 2E) + 2\gamma_s a.$$

Она имеет максимум, когда $d\varepsilon / da = 0$:

$$\sigma_{\text{эксп}} = \sqrt{2E\gamma_s / \pi a}, \qquad (1)$$

где γ_s – удельная поверхностная энергия, Дж/м^2.

Поскольку $a = 0{,}5 l_{\text{тр}}$ ($l_{\text{тр}}$ – полная длина трещины) и $\sqrt{4/\pi} \approx 1$, то (1) перепишется следующим образом:

$$\sigma_{\text{эксп}} = \sqrt{E\gamma_s / l_{\text{тр}}}\ . \qquad (2)$$

При отсутствии дефектов прочность среды является идеальной. Существует несколько подходов для оценки идеальной прочности, в частности, в работе [2] она определяется из предположения, что зависимость напряжения от смещения для любого твердого тела, подверженного действию одноосного растяжения, может быть представлена первой половиной периода синусоидальной кривой с начальным наклоном, характеризуемым модулем Юнга. Далее предполагается, что совершаемая работа на единицу площади атомной плоскости, нормальной к оси растяжения, при подъеме напряжения до максимального значения на синусоиде, равна поверхностной энергии γ_s. В этих предположениях приходим к соотношению

$$\sigma_{\text{ид}}^* = \sqrt{E\gamma_s / a_0}\ , \qquad (3)$$

где a_0 – расстояние между атомными плоскостями, перпендикулярными оси растяжения, в ненапряженном состоянии.

С помощью соотношений (2) и (3) можно установить связь между идеальной и экспериментальной прочностями:

$$\sigma^*_{\text{эксп}} = \sigma^*_{\text{ид}} \sqrt{a_0 / l_{\text{тр}}}.$$

Реальная прочность среды зависит от размеров дефекта. Это обусловлено, в частности, тем, что в окрестностях вершин трещин существует повышенный уровень напряжений по сравнению с напряжением в однородной среде.

Из приведенных соотношений следует, что размер трещины $l_{\text{тр}}$ существенно влияет на прочность среды. Более того, если для среды в естественном состоянии можно установить некоторую эффективную длину трещины $l^{\text{эф}}_{\text{тр}}$, определяющую экспериментальную прочность, то можно найти изменение прочности, обусловленное увеличением размеров трещин:

$$\sigma^* = \sigma^*_{\text{эксп}} \sqrt{l^{\text{эф}}_{\text{тр}} / l_{\text{тр}}}.$$

Рост размеров трещин на квазистатической стадии взрыва может происходить вследствие повышенных напряжений в вершине трещины. Если эти повышенные напряжения окажутся больше предела экспериментальной прочности, то трещина будет подрастать до тех пор, пока в среде действует достаточное для этого напряжение.

Таким образом, может быть предложен способ расчета увеличения зоны трещинообразования на квазистатической стадии взрыва за счет роста трещин, первоначально созданных на волновой стадии.

Напряженное состояние в породе после формирования зон разрушения определялось в работе [4]. Однако полученные в ней значения напряжений представляются завышенными в области разрушения и трещинообразования и приводят к нулевым давлениям продуктов детонации в полости взрыва.

Для расчета напряженного состояния в породе вначале рассчитывалось давление продуктов детонации после достижения полостью взрыва максимальных размеров и частичной их фильтрации в область зоны дробления. В этом случае можно считать, что давление во всем объеме среды одинаково вплоть до границы зоны дробления:

$$P_{\text{п.д}}(R_{\text{др}}) = P_{\text{п.д0}} \left(\frac{V_{\text{п0}}}{V^*}\right)^{K_1} \left(\frac{V^*}{V_{\text{п.д max}}}\right)^{K_2},$$

где $K_1 = 3$, $K_2 = 1{,}25$ – показатели адиабаты продуктов детонации; V^* – объем, при котором происходит смена адиабат; $V_{\text{п0}}$ – начальный объем полости (до начала ее расширения); $V_{\text{п.д max}}$ – конечный объем, который занимают газы после достижения полостью максимальных размеров и их частичной фильтрации в зону дробления.

Для цилиндрического и сферического заряда соответственно

$$V_{\text{п.д max}} = \pi l_{\text{зар}} [R^2_{\text{п max}} + \Pi(R^2_{\text{др}} - R^2_{\text{п max}})] \text{ и } V_{\text{п.д max}} = \frac{4}{3}\pi [R^3_{\text{п max}} + \Pi(R^3_{\text{др}} - R^3_{\text{п max}})],$$

где Π – наведенная пористость в зоне дробления; $l_{\text{зар}}$ – длина колонки заряда; $R_{\text{п max}}$ – максимальный радиус полости.

Давление продуктов детонации на границе зоны дробления может быть принято в качестве начального условия для расчета напряжений в зоне трещинообразования и прилегающей к ней упругой зоне. Давление в зарядной полости можно рассчитать и по эмпирической методике, предложенной в работе [1]:

$$P_{\text{ос}} = 8{,}5 \cdot 10^8 k_p \left(\frac{R_{0з}}{R_{0\max}} \right)^{2,5} = 13{,}7 k_p \left(\rho_n c_s^2 \right)^{0,73},$$

где k_p – коэффициент пересчета начального давления продуктов взрыва, $k_p = \gamma_{\text{ВВ}} D_{\text{ВВ}}^2 / (\gamma_{\text{тр}} D_{\text{тр}}^2)$, $\gamma_{\text{тр}}$ – плотность эталонного ВВ (тротила), $\gamma_{\text{тр}} = 1600$ кг/м^3; $D_{\text{тр}}$ – скорость детонации эталонного ВВ (тротила), $D_{\text{тр}} = 6910$ м/с.

Следует отметить, что результаты расчета остаточного давления продуктов детонации в зарядной камере по вышеописанным методикам близки.

В зоне трещинообразования тензор напряжения для сферического и цилиндрического зарядов имеет одну компоненту – только радиальную σ_r, так как вследствие разгрузки на поверхностях радиальных трещин $\sigma_\varphi = 0$. В этом случае выполняется условие: $\sigma_r(R_{\text{др}}) = P_{\text{п.д}}(R_{\text{др}})$.

Изменение напряжений σ_r и σ_φ вне зоны дробления для цилиндрического заряда в соответствии с [1, 4] можно принять в виде

$$\sigma_{r\max} = \sigma_{r\max}(R_{\text{др}}) \left(\frac{R_{\text{др}}}{r} \right)^2 \quad \text{при} \quad r \geq R_{\text{др}};$$

$$\sigma_{\varphi\max} = 0 \quad \text{при} \quad R_{\text{др}} \leq r \leq R_{\text{тр}};$$

$$\sigma_{\varphi\max} = \sigma_{r\max}(c_1 + c_2 \bar{r}) \quad \text{при} \quad r > R_{\text{тр}},$$

где $\bar{r} = r / R_{0з}$; $R_{0з}$ – фактический радиус заряда.

Изложенные представления были использованы при расчете зон разрушения на волновой стадии и дополнительного трещинообразования на квазистатической стадии для взрыва заряда граммонита 30/70 в граните со следующими физико-механическими свойствами: плотность породы 2650 кг/м^3; скорость продольной волны в массиве 5700 м/с; скорость поперечной волны в массиве 3200 м/с; коэффициент Пуассона 0,24; статический предел прочности на одноосное сжатие 160 МПа; статический предел прочности на сдвиг 40 МПа; статический предел прочности на растяжение 11 МПа.

Характеристики ВВ: плотность заряжания 900 кг/м^3; теплота взрывчатого превращения 4000 кДж/кг; скорость детонации 4000 м/с; диаметр скважины (с учетом 3 % разбуривания) 220 мм.

Для расчета размеров зон разрушения на волновой стадии рассчитывались значения динамических пределов прочности в соответствии с зависимостями, приведенными в работе [1]: на сдвиг 215 МПа, на отрыв 44 МПа. Для таких условий взрыва получены следующие значения размеров зон разрушения на волновой стадии: $R_{\text{др}} = 6R_{0з} = 0{,}65$ м; $R_{\text{тр}} = 26{,}5R_{0з} = 2{,}92$ м.

Для оценки увеличения размеров зоны трещинообразования рассматривались трещины внутри этой зоны длиной $l_{\text{тр}}^{\text{н}}$. Предполагалось, что трещины одним концом касались радиуса зоны трещинообразования. Предполагалось также, что забойка не вылетает в течение времени подрастания трещин. Для расчета времени подрастания трещин использовалась зависимость

$$l_{\text{тр}} = \int_0^t V_{\text{тр}} dt,$$

где $V_{\text{тр}} = V_{\text{тр}\max} \left(1 - l_{\text{тр}}^{\text{н}} / l_{\text{тр}} \right)$; $V_{\text{тр}\max} = 0{,}38 c_p$; c_p – скорость продольной волны в массиве.

Результаты расчетов увеличения первоначальных трещин от $l_{\text{тр}}^{\text{н}}$ до $l_{\text{тр}}^{\text{к}}$ и времени их подрастания следующие:

$l_{тр}^{н}$, м	0,4	0,6	0,8	1,0	1,3	1,6	1,8	2,0	2,1	2,27
$l_{тр}^{к}$, м	1,2	1,9	2,2	2,6	3,1	3,57	4,03	4,15	4,3	4,54
$r_{тр}^{*}$, м	3,72	4,22	4,32	4,52	4,72	4,89	5,05	5,07	5,12	5,19
$\Delta l_{тр}$, м	0,8	1,3	1,4	1,6	1,8	1,97	2,13	2,15	2,2	2,27
t, мс	1,3	2,1	2,5	3,0	3,7	4,3	4,8	5,1	5,3	5,7

* $r_{тр}$ – расстояние от оси заряда, на котором заканчивается рост трещины.

При расчете приращения длин трещин использовалось условие равенства повышенных напряжений в вершине трещины экспериментальному пределу прочности на отрыв:

$$\sigma_{\varphi max}(r_{тр})\sqrt{l_{тр}/l_{тр}^{эф}} \geq \sigma_{эксп}^{*}.$$

Как следует из полученных результатов, возможно заметное увеличение зоны трещинообразования только за счет концентрации напряжений в вершинах трещин в поле напряжений, обусловленных высокими давлениями продуктов детонации. Время, необходимое для подрастания трещин, может быть обеспечено применением обычных или специальных забоек [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Боровиков В.А.* Техника и технология взрывных работ: Учебное пособие / В.А.Боровиков, И.Ф.Ванягин; Ленинградский горный ин-т. Л, 1985. 89 с.

2. *Макмилан Н.* Идеальная прочность твердых тел //Атомистика разрушения: Сб. статей. М.: Мир, 1987. С.35-103.

3. *Парамонов Г.П.* Предупреждение взрывов сульфидной пыли на колчеданных рудниках / Санкт-Петербургский горный ин-т. СПб, 1999. 132 с.

4. *Родионов В.Н.* Основы геомеханики / В.Н.Родионов, И.А.Сизов, В.М.Цветков. М.: Недра, 1986. 301 с.

5. *Шемякин Е.И.* О разрушении горных пород в ближней зоне подземного взрыва / Е.И.Шемякин, А.Н.Кочанов // Взрывное дело. № 92/49. М., 1999. С.7-19.