

УДК 622.06:622.274:622.234.57

РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОМБИНИРОВАННОГО СПОСОБА РАЗУПРОЧНЕНИЯ ТРУДНООБРУШАЕМЫХ ПОРОД

В.Г.БЕЗКАРАВАЙНЫЙ, Г.И.МОРОЗОВ

Комбинированный (взрывогидродинамический) способ разупрочнения массива разработан сотрудниками ЛГИ с участием работников п/о «Сахалинуголь» и применяется при отработке пластов с труднообрушаемыми кровлями. Для ослабления труднообрушаемых пород в кровле пласта впереди очистного забоя бурятся скважины малого диаметра (45-50 мм), в них взрываются заряды патронированного ВВ, а затем нагнетается вода. За счет влияния трех основных факторов: искусственной трещиноватости, влажности и опорного давления - массив разупрочняется, уменьшаются пролеты основной кровли, шаги посадки, размеры обрушаемых блоков, снижаются нагрузки на крепь очистного забоя. В зависимости от состава пород кровли и их физико-механических свойств, количества взрывающего ВВ, естественной влажности пород, объема подаваемой в скважину воды, режима и времени нагнетания, длины скважин эффект разупрочнения будет неодинаков, поэтому важно обосновать единый подход к определению основных параметров разупрочнения: максимальной зоны разупрочнения массива вокруг скважин, объема воды, необходимого для создания такой зоны, режима и времени нагнетания воды.

Задача ставится следующим образом. В породах кровли пласта на глубине H от поверхности в скважине взрывает заряд мощностью q , в результате чего образуется цилиндрическая полость и зона трещиноватости породы с различными прочностными характеристиками. В цилиндрическую полость под давлением p закачивается объем воды V_p . Вода, повышая влажность породы, снижает ее сопротивление упругому сжатию до определенного предела, в результате чего образуется некоторая цилиндрическая область пониженной прочности на разрушение. Требуется определить максимальный радиус зоны пониженной прочности и параметры нагнетания воды.

«Управляемыми» параметрами, т.е. данными, которые могут быть известны до начала работы, являются глубина залегания пласта, состав горных пород, мощность заряда, давление воды при нагнетании, время начала нагнетания, время полного нагнетания, объем закачанной воды, время до подхода очистного забоя. Остальные параметры обусловлены этими данными и их значения находят на основе натурных и лабораторных наблюдений.

Чтобы решить поставленные задачи, необходимо знать:

1) физико-механические свойства пород до проведения работ по разупрочнению массива (пределы прочности на сжатие $\sigma_{сж0}$; естественную влажность W_0 ; коэффициент плоскостной трещиноватости α);

2) физико-механические свойства пород кровли после взрывогидрообработки массива (раскрытие трещин на расстоянии r от оси скважины $\Delta(r)$; число трещин с данным раскрытием Δ и данной шириной d на расстоянии r от оси скважины $N_{\Delta,d}(r)$; коэффициент плоскостной трещиноватости на расстоянии r от оси скважины α_r ; максимальную влажность породы на расстоянии r от оси скважины $W(r)$);

3) характеристики зон разрушения после взрывания скважины.

Для простоты решения задачи рассматривается цилиндрический слой породы вокруг скважины шириной 1 см, в котором r_1, r_2, r_3, r_4 и r_5 - радиусы соответственно полости после взрывания, зоны дробления, зоны макротрещиноватости, зоны микротрещиноватости и зоны упругих деформаций. В зависимости от величины заряда радиусы зон будут изменяться, но пределы прочности породы на сжатие для начала (или конца) каждой зоны будут иметь одни и те же значения: $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4, \sigma_5 = \sigma_{сж0}$, поскольку сами зоны выделяются по качественному признаку - наличию трещин и микротрещин определенной величины. Следовательно, характер зависимости $\sigma(r, q)$ будет известен точно, если для каждой зоны известны $\sigma(\Delta_i)$ и $r_i(q)$.

Таким образом, характеристика прочности пород после взрывания заряда может быть задана на основе эмпирически полученных зависимостей графиком механического нарушения прочности при данной мощности заряда $\sigma(r, q)$.

На прочность пород большое влияние оказывает влажность. Например, повышение влажности с 2 (естественная влажность) до 4% снижает механическую прочность песчаников месторождений Сахалина в четыре раза [1]. Следовательно, нагнетание воды в полость, образовавшуюся после взрывания скважины, преследует цель дальнейшего уменьшения прочности пород с нарушенной структурой. Граница зоны разупрочнения пород будет проходить в области зоны микротрещиноватости, увеличивающейся за счет влияния напора воды, явления просачивания и напорного давления.

Чтобы определить величину радиуса ослабления пород R_{max} до необходимых значений предела прочности, необходимо знать зависимости прочностных и деформационных характеристик пород от влажности, а также оценить общий объем воды, который может быть закачан в зону разрушения. Зависимость прочностных и деформационных характеристик пород от влажности определяется для конкретных условий шахтными и лабораторными испытаниями по существующей методике.

Для оценки общего объема воды, который может быть закачан во взорванную скважину, необходимо знать коэффициенты плоскостной трещиноватости в каждой зоне: α_1 (в начале зоны дробления), α_2 (в начале зоны микротрещиноватости) и т.д. Эти коэффициенты определяются по известным методикам [3]. Зная коэффициенты трещиноватости, можно построить график их зависимости от расстояния от центра скважины при данной мощности заряда q . Такие графики $\alpha(r, q)$ могут быть использованы для вычисления объема воды в разрушенной зоне.

Общий объем определяется суммированием по зонам:

$$V_{\text{общ}} = V_1 + V_2 + V_3 + V_4,$$

$$\text{где } V_1 = 2\pi \int_0^{r_1} \alpha(r, q) r dr; V_2 = 2\pi \int_{r_1}^{r_2} \alpha(r, q) r dr; V_3 = 2\pi \int_{r_2}^{r_3} \alpha(r, q) r dr; \\ V_4 = 2\pi \int_{r_3}^{r_4} \alpha(r, q) r dr.$$

Поскольку в плоскости $\alpha(r, q) = 1$,

$$V_1 = 2\pi \int_0^{r_1} r dr = \pi r_1^2.$$

Для зоны дробления

$$V_2 = 2\pi \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \frac{(r_2 - r_1)^2}{2} = \frac{\pi}{2} (\alpha_1 + \alpha_2) (r_2 - r_1)^2,$$

где $\alpha_1 = \alpha(r_1)$; $\alpha_2 = \alpha(r_2)$; $(\alpha_1 + \alpha_2)/2 = \bar{\alpha}$.

Аналогично вычисляют V_3 и V_4 .

Итак, полный объем воды

$$V_{\text{общ}} = 2\pi \int_0^{r_4} \alpha(r, q) r dr = \pi r_1^2 + 2\pi \int_{r_1}^{r_4} \alpha(r, q) r dr = \pi r_1^2 + \tilde{V}. \quad (1)$$

Очевидно, что при вычислении увеличения влажности будет иметь значение только объем воды $\tilde{V}$, непосредственно находящейся в зоне трещиноватости. Кроме этой величины необходимо знать способность материала в различных зонах поглощать воду и коэффициент водопоглощения $\beta(r, q)$. Таким образом, если в сечении радиуса r_i находится объем воды, $dV_i = 2\pi \alpha(r_i, q) r_i dr$, то из этого объема породы будут поглощать объем $\rho dV = 2\pi \alpha(r_i, q) \rho(r_i, q) r_i dr$. В целом в зоне между радиусами r_i и r_{i+1} будет поглощен объем воды

$$d\tilde{V} = \int_{r_i}^{r_{i+1}} 2\pi \alpha(r, q) \beta(r, q) r dr. \quad (2)$$

Чтобы подсчитать, насколько при этом возрастает влажность, необходимо учитывать естественную влажность пород.

Итак, в зоне имеется порода объемом $V_{\Pi} = 2\pi \int_{r_i}^{r_{i+1}} [1 - \alpha(r, q)] r dr$, поскольку $[1 - \alpha(r, q)]$ - доля сечения, занятого породой r_i . Пусть $\rho_{\Pi}(r)$ - плотность породы, тогда общий вес породы в зоне

$$P_{\Pi} = 2\pi \int_{r_i}^{r_{i+1}} \rho(r) [1 - \alpha(r, q)] r dr. \quad (3)$$

Если влажность породы равна $W_0(r)$, то вес воды, содержащейся в породах в естественном состоянии,

$$P_{\text{Е.В.}} = 2\pi \int_{r_i}^{r_{i+1}} \rho(r) W_0(r) [1 - \alpha(r, q)] r dr. \quad (4)$$

Общий предельный вес воды в насыщенной породе

$$d\tilde{V} + P_{\text{Е.В.}} = 2\pi \int_{r_i}^{r_{i+1}} \left\{ \rho(r) W_0(r) [1 - \alpha(r, q)] + \alpha(r, q) \beta(r, q) \right\} r dr. \quad (5)$$

Предельная влажность

$$W = \frac{d\tilde{V}_i + P_{\text{в.в}}}{d\tilde{V}_i + P_{\text{н}}} = \frac{\int_{r_0}^{r_{\text{н}}} \{ \rho(r) W_0(r) [1 - \alpha(r, q)] + \alpha(r, q) \beta(r, q) \} r dr}{\int_{r_0}^{r_{\text{н}}} \{ \rho(r) [1 - \alpha(r, q)] + \alpha(r, q) \beta(r, q) \} r dr} \quad (6)$$

Если влажность в зоне меняется незначительно, т.е. $W_0(r) - W_0 = \text{const}$, то предельную влажность можно представить выражением

$$W = W_0 + \left[\frac{(1 - W_0) \int_{r_0}^{r_{\text{н}}} \alpha(r, q) \beta(r, q) r dr}{\int_{r_0}^{r_{\text{н}}} \{ \rho(r) [1 - \alpha(r, q)] + \alpha(r, q) \beta(r, q) \} r dr} \right] \quad (7)$$

или в общем виде

$$W = W_0 + \frac{(100 - W_0) P_{\text{в}}}{P_{\text{н}} + P_{\text{в}}}, \quad (8)$$

где $P_{\text{в}}$ - предельный вес воды, поглощенной породами.

Из выражения (8) можно определить, какое количество воды необходимо подать в зону для снижения прочности на необходимую величину.

Таким образом, из формул (2)-(8) видно, что для того, чтобы обеспечить нужное увлажнение, необходимо увеличить либо $\alpha(r, q)$, либо $\beta(r, q)$. Это достигается подачей воды под давлением. При этом в зоне разупрочнения растет раскрытие трещин, увеличивается водопоглощение и быстрее достигается необходимое увлажнение пород.

Необходимый режим и время нагнетания связаны с динамикой процесса увлажнения. Уравнение, достаточно полно описывающее этот процесс, имеет следующий вид:

$$\frac{\partial \tau}{\partial t} + R_{\tau} \tau = F - \frac{\partial P}{\partial r} - \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \tau,$$

где τ - плотность потока воды, $\tau = \rho v$; R_{τ} - удельное сопротивление потоку со стороны пористого материала; F - внешние силы, действующие на воду, в том числе силы тяжести; μ - коэффициент вязкости; $\nabla^2 \tau$ - дифференциальный оператор Лапласа, задаваемый для рассматриваемого случая выражением $\nabla^2 \tau = \frac{\partial^2 \tau}{\partial r^2} + \frac{\tau}{r}$; v - средняя скорость потока; $\frac{\partial P}{\partial r}$ - градиент давления.

В такой форме уравнение исключительно сложно и для того, чтобы изложенную проблему решить проще, обычно прибегают к следующим упрощениям: пренебрегают внешними силами F , вязкостью ($\mu = 0$), и наконец, рассматривают установившееся движение, т.е. пренебрегают членом $\frac{\partial \tau}{\partial t}$.

Получившееся в результате упрощений уравнение приобретает форму "закона Дарси":

$$\tau = -k \frac{\partial P}{\partial r} = \frac{k(P_1 - P_2)}{d}, \quad (9)$$

где k - коэффициент проницаемости, $k = 1/R_{\tau}$; P_1, P_2 - давление в начале и конце зоны; d - протяженность этой зоны по радиусу.

Допуская

$$\tau \Delta S = \text{const}, \quad (10)$$

где ΔS - сечение, через которое протекает поток воды, и принимая сечение цилиндрическим

$$\Delta S = 2\pi r \alpha(r), \quad (II)$$

где $\alpha(r)$ - коэффициент трещиноватости полного плоского слоя цилиндрического сечения, для фильтрационного расхода $Q = \Delta v / \Delta t$ найдем

$$Q = \tau \Delta S = -2\pi \int_{r_1}^{r_2} k(r) \frac{\partial P}{\partial r} \alpha(r) r dr = \text{const} \quad (I2)$$

при $k(r) = \text{const} = \bar{k}$; $\alpha(r) = \text{const} = \bar{\alpha}$; $\frac{\partial P}{\partial r} = -\frac{P_1 - P_2}{r_2 - r_1} = \text{const}$, откуда

$$Q = \tau \bar{\alpha} \bar{k} (P_1 - P_2) (r_2 - r_1). \quad (I3)$$

По формуле (I3) можно вычислить время Δt , за которое объем воды пройдет через цилиндрический слой от r_1 до r_2 :

$$\Delta t = \tilde{V} / Q. \quad (I4)$$

При этом в качестве необходимых можно брать вычисленные ранее объемы по отдельным зонам.

Радиус зоны пониженной прочности посрод с учетом давления воды и времени нагнетания может быть вычислен по формуле, приведенной в работе [2]:

$$R_B = \sqrt{\frac{\varphi_2}{\varphi_1}} = \sqrt{\frac{k l P_H \Delta t}{\mu \left(\frac{l}{2} + R\right) m_T \ln \frac{R(r_0 + l)}{r_0(R + l)}}}, \quad (I5)$$

где k - средний коэффициент фильтрации массива; l - длина фильтрующей части скважины; P_H - давление воды; Δt - время нагнетания, сут.; μ - коэффициент вязкости; R - текущая координата радиуса увлажнения; m_T - коэффициент трещинной пористости; r_0 - радиус скважины.

Формула (I5) дана для случая, когда воду нагнетают при $P_H = \text{const}$. Для случая нагнетания воды при $Q = \text{const}$ радиус зоны разупрочнения можно подсчитать по формуле

$$R_B = \sqrt{\frac{\varphi_2}{\varphi_1}} = \sqrt{\frac{Q t}{\pi m_T \mu (l + 0,56R)}}. \quad (I6)$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Безкаравайный В.Г., Морозов Г.И., Алексеев Ю.И. Управление труднообрабатываемыми кровлями на шахтах производственного объединения Сахалинуголь. - Уголь, 1979, № 2.
2. Безкаравайный В.Г., Максимов В.М., Ружан М.А. Механизм ослабления массива горных пород при ведении очистных работ в условиях шахт комбината "Сахалинуголь". - В кн.: Физические процессы горного производства. Л., изд. ЛГИ, 1975, (междуз. сб., вып. 2).
3. Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород. М., Недра, 1978.