

ИССЛЕДОВАНИЕ ДАВЛЕНИЯ В ПОЛОСТИ ВЗРЫВА СКВАЖИННОГО ЗАРЯДА БРИЗАНТНОГО ВВ

Розглянуто, як повинен змінюватися тиск у порожнині вибуху для покращення подібнювання породи. Оцінена енергія, що витрачається на тріщиноутворення.

PRESSURE INVESTIGATION IN BLAST CAVITY OF THE BORE HOLE CHARGE OF HIGH

Charging of pressure in blast cavity to improve rock breaking was considered. Energy for crackformation was estimated.

Напряжения в породе, возникающие при взрыве, существенно зависят от давления продуктов взрыва (ПВ). При дроблении крепких и очень крепких горных пород применяются взрывчатые вещества (ВВ), во фронте детонационной волны (ДВ) которых давление ПВ повышается до 2-5 ГПа за время, примерно равное 1 мкс. В этом случае ширина фронта ударной волны (УВ) ℓ в породе оценивается по формуле

$$\ell \approx h \frac{C_p}{2D} \approx \frac{h}{2}, \quad (1)$$

где h – ширина зоны химических реакций; C_p – скорость волны напряжений в породе; D – скорость детонации ВВ.

Средний модуль градиента напряжений во фронте УВ (или волны напряжений) в породе можно определить по формуле

$$|\overline{\text{grad}\sigma}| = \frac{\Delta\sigma_r}{\Delta r} = \frac{P_n}{\ell} = \frac{2P_n}{h}, \quad (2)$$

где P_n – давление на химпике ДВ.

Для бризантных ВВ $|\overline{\text{grad}\sigma}| = 1 \div 10$ ГПа. Если ограничить минимальный размер частиц ℓ_m , на которые разрушается порода, то требуемый модуль градиента напряжений можно оценить по формуле

$$|\overline{\text{grad}\sigma}| \approx \frac{\sigma_d}{\ell_m}, \quad (3)$$

где σ_d – динамический предел прочности породы при сжатии.

При взрыве модуль градиента напряжений у стенки скважины на один, два порядка больше, чем необходимо для разрушения, что приводит к переизмельчению породы у стенки скважины. Для его уменьшения необходимо увеличить ширину зоны химических реакций на один, два порядка. Оценим, как должно

изменяться давление ПВ в скважине со временем. Установлено, что за время Δt , которое можно оценить по формуле

$$\Delta t \sim \frac{x}{2D}, \quad (4)$$

где x – длина взорванной части заряда, даже в недеформируемой трубе за фронтом ДВ давление ПВ убывает до $0,3P_n$. Если учесть расширение полости взрыва, то на начальной стадии давление ПВ в ней убывает по закону

$$P = P_n \left(\frac{d_c}{d} \right)^{2n}, \quad (5)$$

где d_c – диаметр скважины; d – текущий диаметр полости взрыва при расширении ПВ; n – показатель адиабаты ПВ.

Напряжения в цилиндрической волне убывают с расстоянием пропорционально r^{-k} , где r – расстояние от оси скважины, k – показатель затухания ($k = 1$ при отсутствии разрушений, $k \approx 2$ для хрупко разрушаемых пород). Статические напряжения в упругой среде, создаваемые газом в цилиндрической полости, изменяются с расстоянием по закону [1]

$$\sigma_r(r) = P_n \left(\frac{r_c}{r} \right)^2, \quad (6)$$

где P_n – давление газа в полости; r_c – радиус полости; r – расстояние до оси полости.

Если учесть уменьшение напряжений при разрушении породы, то показатель степени в выражении (6) нужно увеличить. Закон уменьшения напряжений в разрушаемой породе можно получить, задав функцию распределения трещин по длине, которая имеет вид:

$$f(\ell) = f_0 \exp(-\alpha\ell), \quad (7)$$

где f_0 – постоянная, определяемая из условий нормировки функции; ℓ – длина трещины; α – коэффициент, зависящий от трещиноватости породы.

Из условия нормировки следует, что $f_0 = \alpha^3 / 8\pi$. Число трещин ΔN длиной от ℓ до $\ell + \Delta\ell$ в одном кубическом метре породы можно определить из формулы

$$\Delta N = \frac{\alpha^3 N}{2} \int_{\ell}^{\ell + \Delta\ell} \ell^2 \exp(-\alpha\ell) d\ell, \quad (8)$$

где N – общее число трещин в одном кубическом метре породы.

Значение N можно определить, зная, что трещины длиной ℓ_1 располагаются в породе на расстоянии a [2]. Действительно, число трещин длиной от ℓ_1 до $\ell_1 + d\ell$ в одном кубическом метре породы равно dN

$$dN = (a + \ell_1)^{-3} - (a + \ell_1 + d\ell)^{-3} = \frac{3d\ell}{(a + \ell_1)^3}. \quad (9)$$

Согласно (8)

$$dN = \frac{\alpha^3 N}{2} \ell_1^2 \exp(-\alpha \ell_1) d\ell. \quad (10)$$

Приравняв правые части (9) и (10), получим

$$N = \frac{6 \exp(\alpha \ell_1)}{(a + \ell_1) \alpha^3 \ell_1^2}. \quad (11)$$

Затраты энергии $\Delta W / \Delta V$ на чистое дробление и разупрочнение, то есть на образование новой поверхности в единице объема породы, по Гриффитсу, равны

$$\frac{\Delta W}{\Delta V} = \gamma \frac{\Delta S}{\Delta V}, \quad (12)$$

где γ – работа образования единицы свободной поверхности породы; $\Delta S / \Delta V$ – приращение поверхности трещин в одном кубическом метре породы.

Положим, что трещины ориентированы хаотически, имеют форму дисков и при их росте форма не изменяется. Приращение площади всех трещин, начиная с некоторой длиной ℓ_m за счет увеличения их длины на $\Delta \ell$, можно найти по формуле

$$\begin{aligned} \frac{\Delta S}{\Delta V} &\approx k\pi \int_{\ell_m}^{\ell_m + \Delta \ell} ((\ell_m + \Delta \ell)^2 - \ell^2) dN(\ell) = \\ &= \frac{3k\pi \exp(\alpha \ell_1) \Delta \ell}{(a + \ell_1) \ell_1^2} \int_{\ell_m}^{\ell_m + \Delta \ell} (2\ell + \Delta \ell) \ell^2 \exp(-\alpha \ell) d\ell, \end{aligned} \quad (13)$$

где k – коэффициент, задающий часть трещин, которые растут в осесимметричном поле напряжений ($k \approx 2 \sin \beta$, β – максимальный угол между выбранным радиальным направлением и направлением растущей трещины).

По Гриффитсу напряжения, необходимые для роста трещины длиной ℓ , равны

$$\sigma_{кр} = \sqrt{4\gamma E / \pi \ell}, \quad (14)$$

где E – модуль упругости породы.

Квазистатические растягивающие напряжения $\sigma_{\theta\theta}$, создаваемые скважинным зарядом, убывают с расстоянием по закону [1]

$$\sigma_{\theta\theta}(r) = \sigma_n \left(\frac{r_c}{r} \right)^2, \quad (15)$$

где σ_n – напряжения на стенке полости взрыва; r_c – радиус скважины.

С учетом (12)-(15) зависимость удельных затрат энергии на чистое дробление и разупрочнение от расстояния r можно записать в виде:

$$\frac{\Delta W}{\Delta V} = \frac{\gamma \kappa \pi \exp(\alpha \ell_1) \Delta \ell}{(a + \ell_1) \ell_1^2} \int_{\ell_m}^{\ell_m + \Delta \ell} (2\ell_m + \Delta \ell) \ell^2 \exp(-\alpha \ell) d\ell \approx \ell_m^3 \exp(-\alpha \ell_m) \propto r^{12} \exp(-br^4), \quad (16)$$

где $b = \frac{4\gamma E \alpha}{\pi \sigma_n^2 r_c^4}$.

Аналогично, в случае разрушения породы в цилиндрической волне напряжений $\Delta W/\Delta V$ имеет вид:

$$\frac{\Delta W}{\Delta V} \approx r^6 \exp(-br^4). \quad (17)$$

Учитывая (5), (6), (17) и (16), можно сделать вывод, что давление в полости взрыва должно не убывать за фронтом ДВ, а возрастать по закону, который следует из (5)

$$P = P_n \left(\frac{r}{r_c} \right)^{2n}.$$

Таким образом, для эффективного дробления породы при взрыве необходимо, чтобы максимальное давление в полости взрыва было сравнимо по порядку, но превышало динамический предел прочности породы при сжатии. Кроме это-

го, по мере увеличения объема полости давление ПВ в ней не должно уменьшаться в течение примерно 10 мс.

Увеличить ширину зоны химических реакций, уменьшить максимальное давление в полости взрыва и частично стабилизировать давление ПВ на уровне максимального можно, используя два типа взрывчатых веществ или вводя добавки в ВВ. Так, при использовании двух типов ВВ можно, например, готовить патроны из эмульсионных взрывчатых веществ, центральная часть которых заполнена хорошо детонирующим ВВ, а периферийный цилиндрический слой – флегматизированным ВВ. Флегматизированное ВВ должно детонировать в режиме недожаты ДВ, в этом случае волновые процессы в сечении, перпендикулярном оси скважины, будут возбуждать последующие ДВ.

Оценим начальные параметры УВ в цилиндрическом слое ВВ (ВВ1). Радиальная составляющая скорости ПВ на границе раздела взрывчатых веществ u_r определяется из уравнения [3]

$$u_r = \frac{2n_2 D}{n^2 - 1} \left(1 - \left(\frac{P_y}{P_n} \right)^{\frac{n_2 - 1}{2n_2}} \right), \quad (19)$$

где n_2 – показатель адиабаты ПВ центральной части заряда ВВ (ВВ2); P_y – давление во фронте УВ; P_n – давление на поверхности Чепмена-Жуге продуктов взрыва ВВ2.

Радиальная составляющая скорости частиц ВВ1, прилегающих к ВВ2, также равна u_r и находится из формулы

$$u_r = \sqrt{P_y (1 - (1 + P_y / A))^{\frac{1}{m}} / \rho_{01}}, \quad (20)$$

где ρ_{01} – плотность ВВ1; A , m – коэффициенты Тэта для ВВ1.

Скорость u_r и давление P_y находятся из уравнений (19) и (20), а скорость ударной волны D_y в ВВ1 определяется следующим образом:

$$D_y = \frac{P_y}{\rho_{01} u_r}. \quad (21)$$

Массовая скорость частиц ВВ1 на границе раздела взрывчатых веществ равна

$$u = \sqrt{u_r^2 + u_z^2}, \quad (22)$$

где u_z – осевая составляющая скорости ПВ центральной части ВВ:

$$u_z = \frac{D}{n_2 + 1}. \quad (23)$$

Начальный угол полураствора ε конической УВ в ВВ1 равен

$$\varepsilon = \arcsin\left(\frac{D_y}{D}\right). \quad (24)$$

Следует, что начальные параметры УВ позволяют определять лишь верхнюю границу параметров волны на контакте взрывчатых веществ. Когда давление ПВ ВВ2 равно P_r , то, исходя из законов сохранения массы и импульса, давление на стенки скважины можно оценить из выражения

$$P \leq \left(\frac{r_3}{r_c}\right)^2, \quad (25)$$

где r_3 – радиус заряда ВВ2; r_c – радиус скважины.

Давление P_2 , в свою очередь, изменяется от величины текущего радиуса полости взрыва ВВ2 по закону:

$$P_2 \approx P_n \left(\frac{r_3}{r_n}\right)^{2n}, \quad (26)$$

где r_n – радиус полости взрыва ВВ2.

В выбранном сечении заряда в первые микросекунды с момента детонации продукты взрыва ВВ2 будут совершать пульсации в радиальном направлении с периодом t_n

$$t_n \approx \frac{2r_n}{\langle C \rangle} \approx \frac{4r_3}{D}, \quad (27)$$

где $\langle C \rangle$ – средняя скорость звука в продуктах взрыва ВВ2.

Подстановка числовых значений в полученные формулы позволяет сделать вывод, что получить начальное давление на стенки скважины, не превышающее 0,1 ГПа ($P_2 \leq 0,1$ ГПа), не составляет труда. Время детонации ВВ1 в любом се-

чении скважины можно изменять путем изменения состава и структуры ВВ. Когда ВВ1 неоднородно по плотности и ударной сжимаемости, то течение его за фронтом УВ будет также сильно неоднородно. Действительно, выделим в ВВ1 “частицу” большой плотности и малой ударной сжимаемости и “частицу” малой плотности и большой сжимаемости. Тогда УВ в первой “частице” имеет большую скорость, чем во второй, в то время, как массовая скорость вещества в первой “частице” меньше, чем во второй. Поэтому при одинаковых размерах “частиц” первая начнет двигаться раньше второй, а ее скорость будет меньше второй [4]. Так как в первые микросекунды волны сжатия и разрежения в перпендикулярном сечении скважины (см. (27)) достаточно сильны, то “частицы” все время будут двигаться с разными ускорениями и скоростями. Кинетическая энергия “частиц” полностью переходит во внутреннюю. Таким образом, чем неоднородней ВВ1 по плотности и сжимаемости, тем меньше “зона химических реакций” и наоборот.

Увеличить зону химических реакций можно с помощью добавок в ВВ. Добавки должны отбирать энергию у ПВ до поверхности Чемпена-Жуге и отдавать или выделять энергию за ней. Кроме этого, часть тепловой энергии ПВ они преобразуют в упругую. Следует отметить, что инертные добавки должны иметь большие теплоемкость и теплоту фазовых переходов, а критическое давление вещества добавок для крепких и очень крепких пород должно измеряться сотнями мегапаскалей. В противном случае энергия обратного фазового перехода не будет использоваться при дроблении породы. Следует учитывать, что вода не удовлетворяет ни одному из этих требований, а случай с алюматолом требует отдельного рассмотрения. В качестве добавок используют вещества, которые за поверхностью Чемпена-Жуге вступают в экзотермические реакции. Весьма перспективными являются горючие вещества, не детонирующие в плоскости взрыва.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Работнов Ю.В. Механика деформируемого твердого тела. – Учеб. пособие для вузов. – 2-е издание испр. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 712 с.
2. Мосинец В.Н., Абрамов А.В. Разрушение трещиноватых и нарушенных горных пород. – М.: Недра, 1982. – 248 с.
3. Физика взрыва / Ф. А. Баум, Л. П. Орленко, К. П. Станюкович и др. – М.: Наука, 1975. – 704 с.
4. Гаркуша И. П., Куринной В. П. Особенности детонации взрывчатого вещества с инертными добавками // Труды I Межгосударственного научного семинара “Высокоэнергетическая обработка материалов”. Том. 2. – Днепропетровск: НГАУ, 1995. – С. 80-83.