Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LXVII, вып. 1, 1975 г.

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ПЕРЕХОДА НА ПОТОЧНУЮ ТЕХНОЛОГИЮ ГОРНЫХ ПОРОД В КРЕПКИХ ПОРОДАХ

Доктор техн. наук *А. Н. Ханукаев*
(Ленинградский горный ин-т)

Достигнутые успехи в технике и технологии разработки месторождений полезных ископаемых создали необходимые предпосылки для перехода на поточную, более прогрессивную технологию горных работ в крепких породах. В настоящее время можно создать необходимый запас взорванной массы с заданной степенью дробления. Этому способствуют и большие достижения в теории и практике взрывных работ. Наиболее крупным достижением в области бурения является шарошечное бурение, а в области взрывания — короткозамедленное взрывание зарядов и появление льющихся водонаполненных взрывчатых веществ. Управление действием взрыва стало возможным благодаря разработке теории разрушения пород под воздействием прямых и отраженных волн.

Успехи приборостроения позволили зарегистрировать в зоне высоких давлений и температур ударную волну в ближней зоне взрыва, волну напряжений в средней и сейсмовзрывную волну — в дальней зоне взрыва. Основные параметры указанных волн и закономерности их затухания с расстоянием известны [5].

Энергия заряда, передаваемая породе, зависит от свойств взрывчатых веществ, условий взрывания заряда и свойств горных пород [2].

Энергия, переходящая в ударную волну, составляет 40—80% и более от потенциальной энергии заряда (большие значения относятся к породам большей крепости и к ВВ, обладающим большим объемным весом). С расстоянием энергия ударной волны быстро угасает. Для цилиндрических зарядов на расстоянии 10 радиусов заряда (R_0) от центра взрыва энергия ударной волны составляет всего 25% от потенциальной энергии заряда. На расстоянии около $15\,R_0$ фронт ударной волны становится пологим, скорость ее распространения приближается к скорости распространения продольной (звуковой) волны и ударная волна трансформируется в волну напряжений. На расстояниях, равных линии наименьшего сопротивления (ЛНС), т. е. $60—90\,R_0$ от центра взрыва, энергия волны напряжений не превышает 5% от потенциальной. На расстояниях $400—500\,R_0$ от центра взрыва волна напряжений преобразуется в сейсмовзрывную волну малой амплитуды с колебаниями синусоидальной формы. Энергии сейсмовзрывной волны оказывается достаточно лишь для незначительных смещений массива и главным образом у больших тектонических трещин.

Зарегистрированные давления в ближней зоне взрыва (на контакте заряд—порода), в зависимости от свойств пород и типа ВВ, составляют 10—70 тыс.*кгс/см*^{2} и более, что в десятки и сотни раз превышает пределы прочности статическому одноосному сжатию. Благодаря высоким скоростям смещения, составляющим 500—1500 *м/сек*, порода (за счет пор и пустот) уплотняется, образуя вокруг заряда полость, достигающую в породах средней крепости 2—3 R_0. К полости примыкает зона сильно сжатой породы, а к ней зона первичных трещин.

В зоне первичных трещин, равной 10—20 R_0, напряжения составляют не более одной десятой от давления на контакте с зарядом, а величина скорости смещения частиц за фронтом волны — несколько десятков метров в секунду. Однако величина напряжений оказывается достаточной для образования трещин под воздействием растягивающей составляющей напряжений. Поскольку скорости смещений или скорости деформаций здесь меньше, чем у контакта с зарядом, то и пределы прочности тоже меньше. Они составляют 10—12 пределов прочности одноосному растяжению.

В зоне далее 15—20 R_0 от центра взрыва разрушения не наблюдается, так как энергия волны оказывается недостаточной для преодоления сил сцепления в условиях неравномерного динамического нагружения.

В момент подхода волны к обнаженной поверхности условия воздействия волны меняются. Тангенциальная составляющая волны напряжений вызывает на оси симметрии — линии наименьшего сопротивления — растяжение. На расстоянии 60—90 R_0 скорости смещения составляют всего несколько метров в секунду, поэтому пределы прочности оказываются по величине близкими к одноосному статическому растяжению. В каждый последующий момент падающая волна отражается. Последняя, будучи волной отражения, волной разрежения или волной растяжения, вызывает отрыв породы от массива. Трещины распространяются от поверхности в сторону центра взрыва, пересекаясь с трещиной, ведущей к образованию откольной воронки. В монолитном массиве последняя может образоваться лишь при волне сравнительно крутой формы. Это может привести к отрыву породы, расположенной непосредственно у обнаженной поверхности. В трещиноватом массиве отраженная волна имеет пологую форму. Она приводит к смещениям и деформациям той части, которая расположена в эпицентре взрыва и непосредственно у поверхности. После отражения волны от поверхности нарушается симметрия поля напряжений, поля скоростей смещений и поля деформаций. Скорости смещений по линии наименьшего сопротивления благодаря отражению удваиваются.

Поскольку длина волны в несколько раз превышает ЛНС, то вся порода между поверхностью и центром взрыва постепенно охватывается отраженной волной или зоной разрежения, в результате чего перемещается в сторону обнаженной поверхности.

Под воздействием отраженной волны первичные трещины, направление которых совпадает с растягивающей составляющей отраженной волны, развиваются и достигают поверхности. Они образуют боковую поверхность взрывной воронки. Таким образом, трещины, распространяющиеся от обнаженной поверхности, соединяются с трещинами в зоне первичного трещинообразования.

Продукты взрыва проникают в естественные и во вновь образовавшиеся трещины, сообщая дополнительную скорость полета кускам, оторвавшимся под воздействием отраженной волны. Роль продуктов взрыва в разрушении тем больше, чем мягче порода, чем меньше скорость взрывчатого разложения (скорость детонации) ВВ и чем меньше абсолютная величина линии наименьшего сопротивления.

Средняя скорость перемещения породы, отбитой серией удлиненных зарядов, составляет 20—25 *м/сек.*

При одновременном взрывании зарядов фронты волн смежных зарядов соприкасаются и растягивающие напряжения увеличиваются примерно в два раза по сравнению с действием одиночного заряда. Устья шпуров или скважин являются местами концентрации напряжений. Трещины развиваются вдоль линии, по которой пробурены шпуры или скважины. Полости шпуров или скважин являются дополнительными поверхностями обнажения и содействуют образованию сплошной щели вдоль ряда. После подхода отраженной волны к скважинам порода перемещается в сторону обнаженной поверхности, в результате чего получают развитие только те первичные трещины, направление которых совпадает с растягивающей компонентой тензора напряжений. Таким образом, несмотря на равномерность воздействия продуктов взрыва на стенки зарядной камеры, отраженная волна вносит искажение в поле напряжений, скоростей смещений и деформаций, направляя разрушения и перемещения в сторону обнаженных поверхностей. После отрыва породы образуется довольно гладкая поверхность забоя.

В массиве крупноблочной структуры трещины являются границами, от которых волна отражается. Если заряд достаточно велик, то величина упругих смещений превышает ширину щели и трещина замыкается. Абсолютная величина упругих смещений зависит от диаметра заряда и свойств пород. В породах средней крепости и при диаметре скважинного заряда более 105 *мм* величина упругих смещений за время действия волны длительностью τ достигает 5—10 *мм* и более. Часть энергии волны преломляется в соседний блок, достигая обнаженной поверхности. Поскольку энергия волны с расстоянием быстро угасает, то от действия одиночного заряда в основном разрушается тот блок, в котором размещен заряд, и та часть массива, которая примыкает непосредственно к обнаженной поверхности.

Разрушения у поверхности обусловлены небольшой сопротивляемостью растяжению и отрыву. Таким образом, в массиве крупноблочной структуры менее всего подвергается воздействию волн его средняя часть. Однако эта часть перемещается с довольно большими скоростями и при короткозамедленном взрывании дробится при соударении кусков друг с другом. Кроме того, при короткозамедленном способе взрывания указанные блоки находятся в предварительно напряженном состоянии, что снижает их прочность, благодаря чему степень дробления всей взорванной массы оказывается достаточно высокой. Степень использования кинетической энергии породы на дополнительное дробление существенно зависит от схем взрывания и интервалов замедления, последние должны соответствовать конкретным горногеологическим и горнотехническим условиям (свойствам пород, типу ВВ, степени трещиноватости, сетке скважин и др.).

Накопленный опыт позволяет с достаточной степенью точности определить трещиноватость массива до взрыва и общую поверхность кусков после взрыва. Разница между ними соответствует величине вновь образованной поверхности. Специальные замеры с помощью калориметрической бомбы показали, что затраты энергии на квадратный метр вновь образованной поверхности составляют всего 25—100 *кгм.* Из этого следует, что затраты энергии на образование новой поверхности весьма незначительны [3].

Данные о количестве переданной породе энергии, о пределах прочности породы в ближней зоне взрыва, о средней скорости перемещений взорванной массы и затратах энергии на дробление позволяют составить баланс затрат энергии ударной волны

$$E_{\text{у. в}} = E_{\text{пл}} + E_{\text{кин}} + E_{\text{др}} + E_{\text{дис}}, \qquad (1)$$

где $E_{у.в}$ — энергия ударной волны; $E_{пл}$ — энергия, расходуемая на пластические деформации; $E_{кин}$ — кинетическая энергия взорванной массы; $E_{др}$ — энергия, расходуемая на дробление; $E_{дис}$ — диссипативные потери.

Отсюда

$$E_{дис} = E_{у.в} - [E_{пл} + E_{др} + E_{кин}]. \quad (2)$$

Энергия ударной волны в породе на контакте с зарядом определялась экспериментально с помощью импульсной рентгеносъемки по формуле

$$E_{у.в} = \rho_0 N \int_0^{\tau} v^2(t)\,dt, \quad (3)$$

где ρ_0 — плотность породы в невозмущенном состоянии; N — скорость распространения ударной волны; v — скорость смещения частиц за фронтом ударной волны; τ — длительность фазы сжатия ударной волны.

Энергия в зоне пластических деформаций

$$E_{пл} = \frac{[\sigma_{сж}^{в.д}]^2}{2K} V_{пл}, \quad (4)$$

где $[\sigma_{сж}^{в.д}]$ — предел прочности всестороннему динамическому сжатию, принятый для ближней зоны равным 100 пределам прочности одноосному сжатию; $V_{пл}$ — объем зоны пластических деформаций, измеряемый после взрыва.

Модуль всестороннего сжатия

$$K = 4\frac{\rho_0 N}{4}\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^4, \quad (5)$$

где ρ — плотность породы за фронтом ударной волны, определяемая с учетом экспериментальных данных.

Энергия, расходуемая на дробление,

$$E_{др} = qS, \quad (6)$$

где q — удельная поверхностная энергия на единицу вновь образованной поверхности; S — вновь образованная поверхность.

Кинетическая энергия взорванной массы

$$E_{кин} = \frac{mv^2}{2}, \quad (7)$$

где m — взорванная масса; v — средняя скорость полета взорванной массы.

Диссипативные потери $E_{дис}$, обусловленные прохождением волны, могут быть получены и из непосредственных измерений, если имеется график изменения удельной энергии в функции от расстояния.

Для скважинных зарядов из аммонита № 6 в габбродиабазах с коэффициентом крепости $f = 10 \div 12$ расчеты по формулам (1)—(7) показали, что на дробление расходуется всего 0,08—0,12%, на перемещение взорванной массы около 25%, на пластические деформации около 22%. При энергии ударной волны, равной 80% потенциальной энергии заряда, диссипативные потери составляют 33%. Из приведенных данных следует, что затраты энергии в зоне пластических деформаций и потери, обусловленные пробегом волны на расстояние до $60R_0$, составляют 55%, или более половины потенциальной энергии заряда. Это ука-

зывает на необходимость изыскания путей снижения диссипативных потерь, включая потери в зоне пластических деформаций.

Указанные потери могут быть существенно снижены подбором типа ВВ, которое должно обладать сравнительно низким начальным давлением и сравнительно большой длительностью действия продуктов взрыва. Этим требованиям более всего отвечают водонаполненные ВВ.

Влияние степени дробления на производительность горного оборудования общеизвестно. В ряде работ [1 и 3] показано, что с повышением степени дробления производительность погрузочно-транспортного и дробильного оборудования возрастает и стоимость добычи снижается (рис. 1).

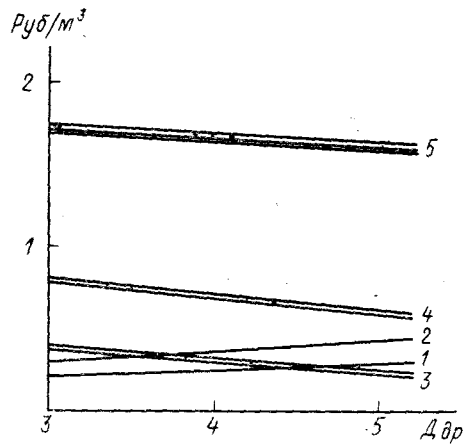


Рис. 1. Влияние степени дробления на стоимость технологических операций и на общую стоимость добычи:

1 — буровые работы; *2* — взрывные работы; *3* — экскавация; *4* — транспорт; *5* — общая стоимость

Несмотря на существенные достижения в технике и технологии взрывной отбойки, выход негабаритных (некондиционных) кусков породы все еще значителен как на открытых, так и на подземных разработках. Во многих случаях большой выход негабаритных кусков обусловлен крупноблочностью массива и свойствами горных пород. Отмечается, что выход негабаритных кусков пропорционален их содержанию в массиве до взрыва [4]. Установлено, что на большинстве горных предприятий не достигнута оптимальная степень дробления, поэтому погрузочно-транспортное оборудование работает не в оптимальных режимах. Высокая степень дробления при малом содержании переизмельченной породы является одним из важнейших условий перехода на более производительные погрузочно-транспортные машины непрерывного действия.

Повышение степени дробления может быть достигнуто выбором: 1) оптимального диаметра заряда и оптимальной сетки скважин; 2) типа ВВ, детонационные характеристики которого соответствуют свойствам пород; 3) оптимальной конструкции заряда и оптимального расположения инициатора в заряде; 4) оптимальных схем взрывания; 5) интервалов замедления.

Для повышения степени дробления массива крупноблочной структуры важное значение имеют первые два условия — диаметр заряда, от которого зависит сетка скважин, и тип ВВ.

С уменьшением диаметра заряда ВВ размещается в массиве более равномерно, и условия воздействия взрыва на породу улучшаются. С повышением мощности ВВ — скорости детонации и количества выделяемого тепла — энергия, передаваемая породе, увеличивается. Однако возрастание мощности ВВ может привести к нежелательному переизмельчению и потерям полезного ископаемого. В преобладающем большинстве случаев детонационные характеристики ВВ не соответствуют свойствам взрываемых пород. Возникающие в породе давления во много раз превышают пределы прочности, что ведет к большим потерям энергии ВВ в ближней зоне взрыва.

Оптимальной конструкцией заряда следует считать ту, которая обеспечивает наибольший переход энергии в породу и наименьший вы-

ход продуктов взрыва в атмосферу. Кроме того, при оптимальной конструкции заряда потери энергии в ближней зоне должны быть минимальными, при этом должна быть минимальной и сопротивляемость массива действию взрыва. Наиболее полно указанным требованиям отвечает заряд, разделенный на части инертными промежутками и взрывающийся последовательно по частям сверху вниз. По мере взрывания частей заряда число обнажаемых поверхностей и их суммарная поверхность не должны уменьшаться. В заряде оптимальной конструкции мощность ВВ в различных частях скважины должна быть различной и соответствовать изменению сопротивляемости отбиваемого массива действию взрыва. Например, нижняя часть заряда по отношению к верхней должна обладать большей мощностью, так как нижняя часть массива обладает большей сопротивляемостью, чем верхняя.

Зарядами подобной конструкции пользуются главным образом при проходке горных выработок и при контурном взрывании. При ведении же очистных работ применение подобных зарядов связано с большими затратами труда при заряжании. Выпуск детонирующих шнуров с малой скоростью детонации существенно облегчит реализацию указанных преимуществ.

На большинстве предприятий применяются оптимальные схемы взрывания скважинных и шпуровых зарядов и сравнительно оптимальные интервалы замедлений. Однако в настоящее время используются не все преимущества короткозамедленного взрывания. Это объясняется, с одной стороны, отсутствием средств взрывания для широкого и надежного интервала замедлений без существенного отклонения от заданного номинала, а с другой — недостаточной ясностью в физике процессов, и в связи с этим неполным соответствием принятых схем взрывания и интервалов замедления конкретным горногеологическим условиям.

Одним из радикальных средств решения задачи о повышении степени дробления при минимальном переизмельчении породы является применение водонаполненных ВВ (ВВВ). В состав указанных ВВ входят обычные компоненты примерно в тех же соотношениях; например, горячие льющиеся ВВВ (ГЛВВВ) 80/20 по составу близки к аммониту № 6, однако в отличие от аммонита в их состав входит еще 7—8% воды (по отношению к весу сухой смеси) и 0,5—3% загустителя (по отношению к весу сухих компонентов и воды). Теплота взрыва ГЛВВВ 80/20 меньше, чем у аммонита № 6, так как часть тепла расходуется на испарение воды (883 и 1030 *ккал/кг* соответственно). Объемный вес ГЛВВВ 1,5—1,6 *г/см*^{3} (после остывания в скважине). Это обеспечивает высокую концентрацию энергии в единице объема скважины — 88300 *ккал* вместо 61800 *ккал* в 1 *м* скважины диаметром 270 *мм*, т. е. в 1,5—1,4 раза больше, чем при аммоните № 6, и в 1,5—1,6 раза больше, чем при гранулотоле [6].

Энергия ударной волны в породе при взрывании ГЛВВВ, по сравнению с аммонитом того же веса, оказывается большей, что обусловлено меньшим пиковым давлением во фронте и большей длительностью действия ударной волны благодаря наличию воды в составе ВВ. С уменьшением величины пикового давления затраты энергии в ближней зоне уменьшаются, а выход энергии в среднюю и дальнюю зоны увеличивается. Это ведет к более рациональному использованию энергии взрыва на дробление и перемещение среды. В составе ГЛВВВ может быть алюмотол, что повышает количество выделяющегося тепла.

Наблюдения на Ждановском карьере комбината «Печенганикель» показали, что с повышением концентрации энергии в 1 *м* скважины степень дробления пород увеличивается (рис. 2). Аналогичные данные были получены в карьере «Медвежий Ручей» Норильского комбината при переходе на скважинные заряды диаметром 105—160 *мм*.

Степень дробления рекомендуется определять по формуле [3]

$$Д_{др} = \frac{\Sigma V_i \frac{6V}{\pi d_i}}{V}, \qquad (8)$$

где V_i — объем i-й фракции; V — разрушаемый объем; d_i — средний размер i-й фракции.

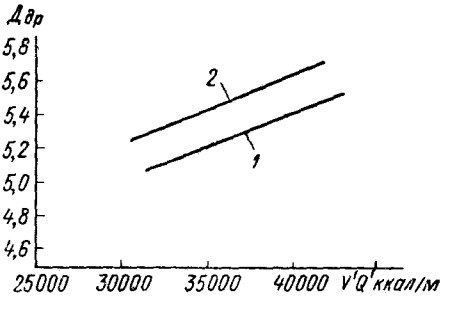


Рис. 2. Влияние концентраций энергии ВВ в 1 *м* скважины на степень дробления:

породы первой (*1*) и второй (*2*) категории по взрываемости

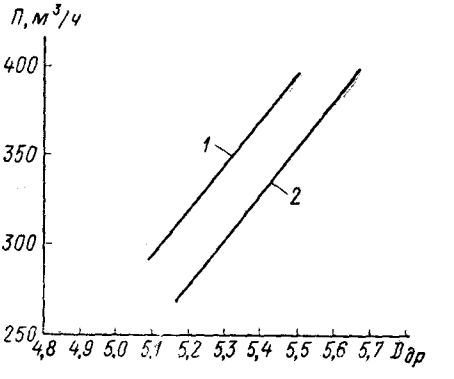


Рис. 3. Влияние степени дробления на производительность экскаватора:

породы первой (*1*) и второй (*2*) категории по взрываемости

Указанный показатель степени дробления характеризует весь гранулометрический состав взорванной массы и по сравнению с другими показателями дробления (выходом негабарита в процентах, средним размером куска и др.) более полно отражает результаты взрыва. С увеличением степени дробления производительность экскаватора (рис. 3) и транспортных средств увеличивается.

Горячие льющиеся водонаполненные ВВ на основе горячего раствора аммиачной селитры (температура 93° С), тротила и загустителя легко перекачиваются насосом центробежного типа. Зарядные агрегаты высокопроизводительны и рассчитаны на минимальные затраты труда взрывного персонала.

Указанные ВВ изготовляются непосредственно на предприятиях, а поэтому их стоимость за счет удешевления стоимости доставки компонентов незначительна. В связи с этим линия *1*, отражающая стоимость ВВ, на рис. 1 пойдет вниз. Высокая концентрация энергии в 1 *м* скважины позволяет расширить сетку скважин примерно на 20%, что удешевляет стоимость и буровых работ (линия *2* на рис. 1 также пойдет вниз). Таким образом, горячие льющиеся ВВ являются реальным средством снижения стоимости всех технологических операций, включая стоимость первой стадии дробления. Горячие льющиеся ВВВ могут быть использованы и для подземной отбойки мощных руд. Технология их изготовления и заряжания будет аналогична применяемой на открытых работах; компоненты ГЛВВВ должны доставляться к взрываемому блоку раздельно. Доставка может быть осуществлена поочередно по одной и той же скважине, пробуренной с поверхности, в район отбиваемого блока.

ГЛВВВ в сочетании с другими мероприятиями по снижению степени дробления пород взрывом является надежной основой для повышения производительности применяемых машин цикличного действия и для перехода на машины непрерывного действия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арбиев К. К. Исследование эффективности применения взрывных скважин большого диаметра. Автореф. канд. дисс., ЛГИ, 1964.

2. Беляцкий В. П., Бриль В. Я. Механизм разрушения горных пород взрывом. Мат-лы научного семинара. Наукова думка, 1971.

3. Долгов К. А. Исследование энергоемкости и эффективности процесса разрушения горных пород взрывом. Автореф. канд. дисс., ЛГИ, 1969.

4. Рубцов В. К. Исследование дробимости горных пород взрывами на карьерах. Автореф. докт. дисс., МГИ, 1971.

5. Ханукаев А. Н. Энергия волн напряжений при разрушении пород взрывом. Госгортехиздат, 1962.

6. Ханукаев А. Н. Механизм разрушения горных пород. Мат-лы научного семинара. Наукова думка, 1971.