УДК 622.235.53

М.Г.МЕНЖУЛИН, *д-р техн. наук, профессор, тел. +7(812)981-743-15-01*
П.И.АФАНАСЬЕВ, *аспирант, afan_@mail.ru*
А.В.ТРОФИМОВ, *аспирант, atrof_@pochta.ru*
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)

M.G.MENGULIN, *Dr. in eng. sc., professor, phone +7(812)981-743-15-01*
P.I.AFANASEV, *post-graduate, student, afan_@mail.ru*
A.V.TROFIMOV, *post-graduate, student, atrof_@pochta.ru*
Saint Petersburg State Mining Institute (Technical University)

ВЛИЯНИЕ ДЕТОНАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВЗРЫВНОГО РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

На щебеночных предприятиях при взрывоподготовке и последующем механическом дроблении около 30 % горной массы составляет фракция менее 5 мм (отсев), которая практически не находит сбыта и засоряет окружающую среду. На выход отсева существенно влияют детонационные характеристики взрывчатых веществ.

***Ключевые слова*:** энергия диссипации, детонационные параметры, энергетическая эффективность.

INFLUENCE OF DETONATION PARAMETERS OF EXPLOSIVES ON ENERGY EFFICIENCY OF EXPLOSIVE DESTRUCTION OF ROCKS

About 30 % of the mountain weight extracted on rubble the enterprises, at explode and the subsequent mechanical crushing, the fraction less makes than 5 mm (elimination) which practically does not find selling and litters an environment. The output of elimination is influenced essentially with detonation characteristics explosives.

***Key words*:** dissipation energy, detonation parameters, energy efficiency.

Проблема рационального дробления нерудных полезных ископаемых не является новой и решается многими исследователями десятки лет. К приоритетным направлениям следует отнести выбор рациональной конструкции скважинных зарядов ВВ (таких, как рассредоточенный или комбинированный заряд), использование низкобризантных ВВ, схем взрывания и т.д. И, тем не менее, проблема переизмельченной продукции остается важной и сегодня, хотя бы потому, что меняются условия взрывания: увеличивается глубина карьеров и, соответственно, возрастает объем добычи крепких и обводненных пород. Увеличение крепости пород ведет к повышению удельного расхода ВВ, что негативно сказывается на выходе переизмельченного продукта. Обводненность пород не позволяет использовать низкобризантные ВВ типа игданит и отдельные конструкции скважинных зарядов, например с воздушными промежутками.

Выходом из создавшегося положения на данном этапе является поиск альтернативных ВВ или усовершенствованных, модернизированных ВВ. Особое место отводится мо-

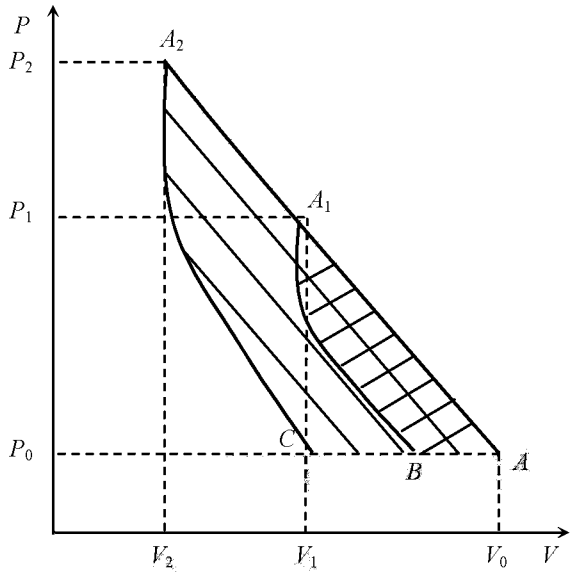
дернизированным разновидностям игданита, так называемым смесевым простейшим ВВ. В настоящее время на карьерах довольно активно используют модернизированный игданит с различными невзрывчатыми добавками (железорудный концентрат, прокатная окалина, угольный порошок и т.д.). Добавка, например, порошка железорудного концентрата в игданит увеличивает плотность взрывчатой смеси, что позволяет заряжать последнюю в обводненные скважины, используя при этом полиэтиленовые оболочки [3]. Таким образом, исследования влияния взрывчатых свойств ВВ на выход переизмельченного продукта, с учетом соответствия свойств ВВ характеру разрушаемой среды, очень важны с точки зрения как затрат энергии, так и ресурсосбережения (потери минерального сырья).

Обычно за критерий эффективности применяемого ВВ принимают максимум выделившейся энергии, но, с нашей точки зрения, это неверно, потому что ВВ с низкими детонационными характеристиками имеют меньшие выход переизмельченной фракции, наведенную трещиноватость и энергию диссипации.

При действии волн напряжений на некоторый выделенный объем нагрузка носит динамический характер, затем происходит статическая разгрузка до нормальных напряжений. Вследствие разности кривых нагрузки и разгрузки в частицах остается часть энергии. Данная энергия при взрывном разрушении необратимо расходуется на нагревание частиц породы в ближней зоне и наведенную трещиноватость. В результате часть энергии взрыва остается в частицах среды в общем виде как энергия диссипации.

Таким образом, на формирование механических возмущений расходуется только часть энергии взрыва, оставшаяся после исключения из общей энергии взрыва энергии диссипации.

На рисунке показано, как из начального состояния среды A (P_0 – начальное давление, а V_0 – начальный объем) под действием ударного сжатия параметры среды изменяются до состояния A_1 или A_2. Состояние A_2



Статические и ударные адиабаты

вызывает бризантное ВВ, а состояние A_1 – менее бризантное. Нагрузка происходит по ударной адиабате. Из состояний A_1 и A_2 после похождения фронта происходит разгрузка частиц. Разгрузка описывается статической адиабатой. Таким образом, существует разность между энергией, запасенной на фронте, и энергией разгрузки. Разность энергии (заштрихованная область на рисунке) для более бризантного A-A_2-C и менее бризантного ВВ (A-A_1-B) называется энергией диссипации. Она является остаточной внутренней энергией частиц после прохождения фронта.

Эта площадь увеличивается при возрастании отклонения кривой разгрузки от прямой и уменьшается при приближении кривой разгрузки к линейной зависимости. Таким образом, в линейно-упругих средах, где нагрузка и разгрузка подчиняются одному и тому же линейному закону, тепловые потери при прохождении возмущений отсутствуют. После снятия нагрузки идеально-упругая среда возвращается в исходное состояние без повышения температуры и внутренней энергии.

Диссипированная энергия не участвует в дальнейшем в формировании механических возмущений, что приводит к снижению параметров волн напряжения. С другой стороны, запасенная в частицах энергия

Энергия диссипации и радиусы трещинообразования для различных типов ВВ

Наименование ВВ	Q, КДж	D, м/с	ρ, г/см^3	$E_д$, %	$E_м$, %	$R_от$	$R_ср$, м
Тэн (эквивалент)	5860	7300	1,5	98,8	1,2	31,2	2,8
Гранипор ВГ 90/5	4600	5750	1,3	95,4	4,6	40,1	2,9
Гранипор ВГ 30/30	4100	4750	1,3	89,9	10,1	48,5	3,4
Граммонит 30/70	3900	4150	0,9	76,6	23,4	52,6	3,1
Граммонит 79/21	4300	3500	0,9	58,3	41,7	59,2	3,5
Нобелит 2030	2900	4000	1,2	81,1	18,9	45,6	2,8
Гелекс Р-80	3300	4100	1,3	83,2	16,8	51,6	3,2
Сларри А	2900	3600	1,2	72,8	27,2	53,6	3,1
Игданит	3700	2700	0,8	34,5	65,5	55,9	3,1

Примечание: Q – теплота взрыва ВВ; D – скорость детонации; ρ – плотность ВВ; $E_д$ – энергия диссипации; $E_м$ – энергия, участвующая в механической работе; $R_от$ – относительный радиус зоны трещинообразования; $R_ср$ – средний радиус зоны трещинообразования.

расходуется вначале на повышение температуры среды, а по мере остывания – на возникновение трещин, увеличение их размеров, последующее слияние и образование кусков.

Энергия динамической нагрузки $e_н$ определяется по формуле Гюгонио и совпадает с энергией при идеально-упругой нагрузке [1]:

$$e_н = \frac{1}{2} P_{(i)} \frac{1}{\rho_0} \left(1 - \frac{1}{\overline{R}_{(i)}} \right), \qquad (1)$$

где $P_{(i)}$ – максимальное напряжение в i-м слое; ρ_0 – плотность породы; $\overline{R}_{(i)}$ – относительная плотность (отношение плотностей возмущенной среды к невозмущенной) в i-м слое.

Для оценки энергии разгрузки $e_р$ применяем уравнение Тэта, которое на основании законов термодинамики при постоянной энтропии преобразуется к виду [1]

$$e_р = \frac{C_V^2}{m} \left[\frac{\left(\overline{R}_{(i)}\right)^{m-1} - 1}{m-1} - 1 + \frac{1}{\overline{R}_{(i)}} \right], \qquad (2)$$

где C_V – скорость распространения волны объемного сжатия; m – коэффициент.

Уравнение состояния в форме Тэта имеет вид

$$P - P_0 = \frac{\rho_0 C_V^2}{m} \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^m - 1 \right], \qquad (3)$$

где ρ – плотность породы в нагруженном состоянии.

В уравнении (3) применяется скорость объемной волны, так как для статической адиабаты разгрузки важно учитывать изменение объема. С увеличением максимальной динамической нагрузки изменяется энтропия и, соответственно, коэффициент m. На этом основании в настоящей работе коэффициент m определяется из совпадения максимального напряжения при динамической нагрузке и начале статической разгрузки. В зависимости от максимального напряжения коэффициент m изменяется в диапазоне $2 \le m \le 3$.

Для экспериментов были отобраны ВВ [2], приведенные в таблице. Затем была написана программа по нахождению энергии динамической нагрузки $e_н$ и энергии разгрузки $e_р$ и как их разность найдена диссипированная энергия, а также энергия, участвующая в механической работе, относительный и средний радиусы трещинообразования. Результаты полученных расчетов также приведены в таблице.

Таким образом, было установлено, что ВВ с низкими детонационными характеристиками при применении для взрывного разрушения горных пород обеспечивают наименьшие потери энергии на переизмельчение и позволяют увеличить долю полезной энергии, затрачиваемой на разрушение горной массы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Дубнов Л.В.* Промышленные взрывчатые вещества. М.: Недра, 1988. 358 с.

2. *Ефремов Э.И.* Технология формирования скважинных зарядов ВВ и отбойки обводненных горных пород / Э.И.Ефремов, А.В.Пономарев // Взрывное дело. 2007. Вып.5. С.33-40.

3. *Менжулин М.Г.* Энергетическая эффективность разрушения горных пород при взрыве ВВ с различными детонационными характеристиками / М.Г.Менжулин, В.Е.Бровин // Зап. Горного ин-та. 2007. Т.171. С.121-125.

REFERENCES

1. *Dubnov L.V.* Industrial explosives. Moscow: Nedra, 1988. 358 p.

2. *Efremov Y.I., Ponomarev A.V.* Technology of formation wells charges of explosives and breaking water-bearing of rocks // Blasting. 2007. Issue 5. P.33-40.

3. *Mengulin M.G., Brovin V.E.* Energy efficiency of destruction of rocks at explosion of explosives with various detonation characteristics // The Proceeding of the Mining Institute. 2007. V.171. P.121-125.

Научный руководитель д-р техн. наук, профессор *М.Г.Менжулин*