

УДК. 534:622.248.3

¹Н.Ю. Швагер, д.т.н.
¹В.А. Калиниченко, д.т.н.
²Е.З. Маланчук, к.т.н.

КИНЕТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В МАСИВЕ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ОБРАЗОВАНИИ ПОЛОСТИ

¹Криворожский технический университет, vsevolod921@mail.ru,

²Национальный университет водного хозяйства и природопользования, MalanchykeEZ@mail.ru

Рассмотрены кинетические процессы происходящие в массиве горных пород при образовании полости и взаимосвязь между временем протекания кинетических процессов и энергетическими затратами на взрывную отбойку.

Ключевые слова: кинетические процессы, образование полости, процессы, диффузионная зона.

Анализ исследований и публикаций

Пространственная решетка реальных кристаллов имеет нарушения регулярной кристаллической структуры. Дефекты структуры кристаллов (вакансии, атомы примесей, дислокации...) и поликристаллов (межзеренные границы) оказывают существенное влияние на их свойства. При равновесном состоянии макроскопической системы дефекты также находятся в равновесии. Если некоторый физический параметр в неравновесном состоянии изменяется от точки к точке, то наличие его градиента вызывает процессы переноса (диффузионные процессы). Направление этого перемещения определяется стремлением избавиться от избыточной энергии. Диффузионное течение атомов обуславливает движение дислокаций, имеющих высокую подвижность. Движение дислокаций начинается при нагрузках, составляющих 10 % от разрушающих, а скорость их перемещения пропорциональна величине приложенных напряжений, точнее градиенту их изменения. В твердых телах с макродефектами кристаллической решетки диффузионная подвижность значительно выше (4).

Известно, что макроскопическая система в равновесном состоянии обладает минимально возможным уровнем энергии. Образование полости в массиве горных пород обуславливает неравновесное состояние макроскопической системы. При этом имеют место локальные изменения уровня энергии, которым обладала система в стационарном состоянии. Система в неравновесном состоянии является неустойчивой и все процессы, происходящие в этой системе, направлены на то, чтобы понизить уровень энергии до минимально возможного значения, т.е. на то, чтобы система опять достигла равновесного состояния (3) Эти процессы могут протекать в двух режимах: медленном геологическом за счет диффузионного перемещения дефектов и в динамическом, при мгновенном выделении накопленной потенциальной энергии.

Все кинетические процессы, протекающие в породах, окружающих полость, можно разделить:

1. Диффузионные процессы, вызванные градиентом изменения плотности в зонах действия статических напряжений различного знака.

Согласно (1, 22) в массиве, окружающем полость, имеют место два диффузионные потока, направленных к границе раздела зон. В зоне разгрузки от обнаженной поверхности, а в зоне опорного давления от поверхности действия максимальных сжимающих напряжений.

В результате кинетических процессов в зоне опорного давления уменьшается пористость и плотность дислокаций, а в зоне - разгрузки увеличивается размер пор и происходит вакансионное растравливание границ. Причем увеличение пористости в зоне разгрузки происходит как за счет диффузионного поглощения вакансий, находящихся в этой зоне, так и за счет поглощения вакансий из самой большой поры, которой является образованная в массиве горных пород полость.

Процессы, протекающие в диффузионной зоне, приводят к увеличению плотности пород, находящихся в зоне действия повышенных сжимающих напряжений, к увеличению скорости распространения упругих волн и акустической жесткости пород. В зоне разгрузки имеют место рост пористости, снижение плотности, уменьшение скорости упругих волн и соответствующее этому уменьшение акустической жесткости пород.

Таким образом, диффузионные процессы обуславливают изменение свойств пород в рассматриваемых зонах.

Опытами по изучению процессов диффузии изогнутых поликристаллических тел показано, что в зоне действие растягивающих напряжений происходит процесс образования стенок дислокаций, которые являются стоками для вакансий. При этом происходит процесс проникновения вакансий из самой большой поры, которой является образованная полость, в массив, находящийся под действием растягивающих напряжений (зона разгрузки). Это, в конечном итоге, приведет к образованию трещин, направленных перпендикулярно действующим в этой зоне растягивающим напряжениям.

Возникновение пластической деформации происходит при достижении касательными напряжениями, действующими в плоскости сдвига некоторой величины. На границе зон опорного давления и разгрузки действуют максимальные касательные напряжения. На указанной границе формируется поверхность сдвига, что обусловлено разными знаками напряжений, действующих по обе стороны от границы.

Время протекания диффузионных процессов определяется градиентом изменения плотности, т.е. величиной действующих в массиве напряжений. Эти же показатели будут определять и период формирования поверхности сдвижения (скольжения).

Известно, что все процессы, протекающие в макроскопической системе в неравновесном состоянии, направлены к снижению энергетического уровня системы. Скопление дефектов приводит к образованию трещин различного размера и в конечном итоге неизбежно ведет к разрушению. В результате указанных диффузионных процессов у поверхности действия максимальных касательных напряжений будут скапливаться дефекты, формироваться и, за счет размножения дислокаций, расширяться поверхность сдвижения.

Таким образом, в зоне разгрузки массив разбит системой трещин, часть которых прорастает от обнаженной поверхности к поверхности действия максимальных касательных напряжений. Эта поверхность является ограничивающей, т.к. она является поверхностью свода естественного равновесия.

Время, необходимое для протекания кинетических процессов с момента образования полости до обрушения пород и формирования поверхности свода естественного равновесия, определяется градиентом изменения плотности, т.е. величиной приложенных напряжений.

Постановка задачи

Представляет интерес изучение взаимосвязи между временем протекания кинетических процессов и энергетическими затратами на взрывную отбойку.

Изложение материала и результаты

Нагрузка, действующая на массив в естественных условиях, и время ее действия до момента исчерпания несущей способности связаны обратной зависимостью. Согласно [1]

$$(\sigma - \sigma_0^*)t = I_0^* = \text{const}, \quad (1)$$

где I_0^* - импульс сопротивления разрушению; t - технологическое время действие нагрузки; σ - действующая нагрузка; σ_0^* - предел длительной прочности.

Предельный импульс сопротивления разрушению представляет собой площадь, описываемую кривой $\sigma(t)$ в пределах t_0 ; t и выражается

$$\int_{t_0}^t \left[\int_{\sigma_0^*}^{\sigma(t)} d\sigma \right] dt \geq I_0^* * 9.8 * 10^4,$$

где $\sigma(t)$ - характер приложения нагрузок; t_0 - время достижения нагрузкой предела длительной прочности σ_0^* .

При длительном действии постоянной статической нагрузки ($\sigma = \text{const}$), время нагружения обнажения при очистной выемке неизмеримо мало по сравнению с периодом несения нагрузки.

При этом

$$\begin{aligned} \sigma(t) &= \sigma_0^* = \text{const} \\ \sigma &= \sigma_0^* + I_0^*/t \end{aligned}$$

Величина действующих в обнаженном массиве напряжений, а следовательно, и его устойчивость зависит от физических свойств горных пород (на практике эти свойства обычно

характеризуються коефіцієнтом крепости пород по М.М. Протодьяконову, f) площади обнажения S и глубины разработки H .

Исследованиями Бёрча [2] на основе теории конечных деформаций получены формулы, связывающие упругие константы G , E , K с давлением. В наших целях наиболее просто использовать выражения, связывающие G и P . Это объясняется тем, что с изменением пористости и процентного содержания входящих в состав породы компонентов изменяются абсолютные значения коэффициентов Ламе α и β , но их отношение практически остается постоянным.

Взаимосвязь $G=F(P)$ описывается выражением

$$G=G_0*(1+P\chi_0*(\alpha/\beta+3)) \quad (2)$$

где G_0 и χ_0 - значения упругих констант в исходном состоянии.

Значения упругих постоянных и других параметров горных пород при изменении давления в пределах $0 < P \leq 10$ кбар, приведены в табл. 1 и представлены на графиках рис.1. Если нагружение пород производится в пределах упругости, то количество накопленной потенциальной энергии может быть установлено по диаграмме напряжений - деформация.

Известно, что удельная энергия упругой деформации при одноосном сжатии равна

$$\xi = \sigma_{сж}^2 / 2E \quad (3)$$

Так $\sigma_{сж}$ представляет собой предел прочности пород, то по выражению (3) определяется удельная энергия разрушения.

Таблица 1

Изменение свойств горных пород под воздействием давления

P	G , кбар	K , кбар	E , кбар	$\sigma_{сж}$, кг/см ²	V_m км/с	V_s км/с	$1-K_n$	K_n	$\varepsilon = [\sigma^2] / 2E$ кгс*см/с м ³
0	185	92,5	333	292	2,14	1,93	0,775	22,5	1,305
1	205	106,8	375	366	2,28	2,06	0,780	22,0	1,823
2	232	128,2	435	481	2,47	2,23	0,805	19,5	2,715
3	265	164,3	517	660	2,71	2,45	0,860	14,0	4,298
4	331	255,2	693	1106	3,17	2,88	0,870	13,0	8,998
5	410	447,0	942	1831	3,74	3,41	0,925	7,5	18,148
6	506	1042,2	1307	3004	4,46	4,07	1,000	0	35,232

где P – давление; σ – модуль сдвига; K – абсолютный модуль упругости; E – модуль Юнга; $\sigma_{сж}$ - предел прочности на одноосное сжатие; V_m – средняя скорость упругих волн; V_s – скорость поперечной волны; K_n – коэффициент пористости пород

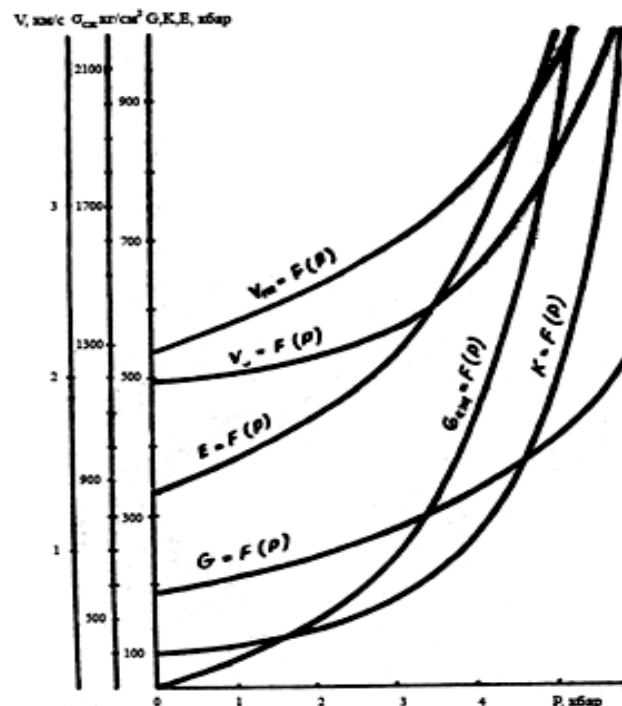


Рис. 1. Изменение упругих постоянных горных пород под воздействием давления.

Зависимости, приведенные на рис. 1 и выражение (3) позволяют легко рассчитать энергию разрушения горных пород в исходном, стационарном и неравновесном состояниях по данным измерений скоростей упругих волн

Так как разрушение среды при взрыве происходит в основном под воздействием растягивающих напряжений, то разупрочнение пород, находящихся в зоне разгрузки, приводит к снижению энергетических затрат ВВ на отбойку, если скважинные заряды расположены в этой зоне.

Это обусловлено тем, что сопротивляемость горных пород растягивающим нагрузкам значительно ниже, чем сжимающим. Так, например, согласно [3] предел прочности на одноосное сжатие для мармитовых руд $[\sigma_{сж}] = 650 \text{ кг/см}^2$, а на растяжение $[\sigma_p] = 11,0 \text{ кг/см}^2$.

Энергоемкость разрушения существенно зависит от способа приложения нагрузки и вида действующих в массиве напряжений. Для оценки энергоемкости разрушения под воздействием динамических нагрузок широко применяется удельная работа упругой деформации, равная при одноосном сжатии $[\sigma_{сж}]^2/2E$; при растяжении $[\sigma_p]^2/2E$.

При этом если отношение пределов прочности $[\sigma_{сж}] / [\sigma_p]$ для мармитовой руды примерно равно 60, то отношение энергий разрушения составляет 3500. Отсюда следует целесообразность взрывного разрушения пород, находящихся под воздействием растягивающих напряжений.

Известно, что горные породы способны накапливать упругую энергию сжатия. Мгновенное выделение накопленной энергии приводит к возникновению динамических явлений (горных ударов и внезапных выбросов пород) [4]. Энергетический баланс выброса формируется следующим образом. Потенциальная энергия упругих деформаций расходуется на физические и механические процессы, предшествующие и сопутствующие выбросу, на разрушение связей, пластические деформации, выброс разрушенного материала, колебательные движения горных пород, рассеивание в виде тепла. Часть энергии расходуется на хрупкое разрушение. В массиве появляются микро- и макротрещины.

Упругая потенциальная энергия превращается в кинетическую, тогда когда часть горных пород вышла из-под нагрузки. Иницирующим фактором выброса являются механические напряжения, которые, реализуясь в деформациях, способствуют переходу потенциальной энергии в кинетическую.

Р. Квапил в своих исследованиях по теории горных ударов опирается на два основных положения:

- аккумуляция потенциальной энергии ограничивается механическими свойствами среды.
- скорость приложения нагрузки определяет аккумуляцию энергии, которое происходит до предела упругости и выше его.

Аккумуляция энергии выше предела упругости возможно, когда имеет место опережение напряжений или запаздывание деформаций, т.е. скорость приложения нагрузки должна быть выше скорости деформирования.

Исходя из условия, что равновесие напряжений возможно в случае, когда не превышен максимум удельной потенциальной энергии, Р. Квапил приходит к выводу, что разрушение пород в виде горного удара происходит при освобождении пород от напряжений, что приводит к мгновенному переходу аккумулярованной потенциальной энергии за пределом упругости и прочности в работу разрушения.

Динамические явления всегда возникают при внешних воздействиях на выбросоопасную среду. Этими воздействиями могут быть условия нагружения призабойной части, взрывные работы.

Изменение свойств массива под воздействием горного давления (сжимающих напряжений) является основным фактором, определяющим динамические явления при разгрузке, которые всегда возникают в результате внешних воздействий на напряженную среду. Этот фактор необходимо учитывать и при отбойке напряженных горных пород. Поэтому целесообразно установить общие черты и различия в процессах взрывного и динамического разрушения горных пород.

Установлено, что основными факторами, совокупность которых определяет условия возникновения выброса (выделения накопленной потенциальной энергии сжатия), являются физические свойства среды, обусловленное гравитационными силами напряженное состояние

массива, дополнительные напряжения, создаваемые в массиве внешними воздействиями (взрывные нагрузки, технологические факторы).

Количество накопленной потенциальной энергии сжатия определяется механическими свойствами среды и скоростью приложения нагрузки.

Разгрузка пород от сжимающих напряжений приводит к мгновенному превращению накопленной потенциальной энергии за пределом упругости и прочности пород в работу разрушения. Накопленная потенциальная энергия может выделяться в виде динамического процесса только при внезапных изменениях напряженного состояния. Наиболее часто внезапные выбросы имеют место в газонасыщенных углях. В сжатом газе имеются запасы энергии сжатия, превосходящие в несколько раз накопленную энергию в породах. Выделение энергии может происходить при расширении сжатого газа в момент разгрузки пород. Если представить скважину, находящуюся под давлением продуктов детонации как пору, заполненную сжатым газом, то становится очевидной необходимость одновременной разгрузки массива от сжимающих напряжений и взрыва скважинных зарядов. Так же очевиден факт, что, чем меньше диаметр скважин и параметры разбуривания массива, тем больше в обрушаемом массиве "пор", заполненных сжатыми продуктами взрыва, тем меньше кусковатость взорванной горной массы.

При взрывной отбойке напряженных горных пород в целях повышения эффективности буровзрывных работ и очистной выемки в целом методы ведения очистных работ и технологические приемы отбойки должны быть направлены на то, чтобы спровоцировать динамическое превращение накопленной потенциальной энергии в работу разрушения одновременно со взрывом зарядов ВВ.

Выводы

Таким образом, для эффективной отбойки напряженных горных пород необходимо:

1. Весь период подготовки блока скважины должны находиться в зоне действия сжимающих напряжений, что обеспечит их сохранность.
2. На момент взрыва скважинных зарядов необходимо изменить действующие сжимающие нагрузки на растягивающие. Параметры обнажения при этом должны обеспечивать предельное и запредельное состояние обрушаемого в данный момент массива.

Такая технология ведения очистных работ обеспечивает мгновенное выделение накопленной энергии сжатия и разрушение массива под совместным воздействием горного давления и взрыва.

Список литературных источников

1. Андерсон. А. Определения и некоторые применения изотропных упругих постоянных поликристаллических систем, полученных из данных для монокристаллов. Физическая акустика., М., «Мир», 1968, с. 13-61
2. Майер Дж., Генерт-Майер М. Статистическая механика. – М., «Мир», 1980, 540с.
3. Тохтуев Г.В., Борисенко В.Г., Титлянов А.А. Физико – механические свойства горных пород Кривбаса. Гостехиздат, 1962, 100с.
4. Алексеев А.Д., Недодаев Н.В. Предельное состояние пород. Киев, «Наукова думка», 1982, 195с.