

санные ранее способы воздействия на угольный массив не требуют создания новых машин и оборудования.

По мере освоения более «простых» нетрадиционных способов, несомненно, будут развиваться и реализовываться более «сложные» способы.

Намечена программа по проведению до 1995 г. отдельных теоретических и лабораторных исследований и широких шахтных экспериментов, которые позволят после 1995 г. начать, может быть не в широких масштабах, освоение нетрадиционной добычи угля.

1. Потураев В. Н., Грецингер Б. Е., Зорин А. Н. Научно-технические проблемы бесшахтной добычи угля // Вісник АН УРСР. — 1980. — № 8. — С. 18—25.

2. Зорин А. Н., Колесников В. Т., Диденко А. Т. и др. Импульсно-волновое возмущение в скважине при пневмогидравлическом способе добычи угля // Физ.-техн. пробл. разработки полезных ископаемых. — 1984. — № 4. — С. 88—91.

3. Нетрадиционные технологические процессы добычи угля / В. Н. Потураев, А. Н. Зорин, С. А. Полуянский и др. — Киев: Техніка, 1986. — 117 с.

4. Забигайло В. Е., Васючков Ю. Ф., Репка В. В. Физико-химические методы управления состоянием угольно-породного массива. — Киев: Наук. думка, 1989. — 192 с.

5. Потураев В. Н., Грецингер Б. Е., Айруни А. Т., Шинковский В. А. Нетрадиционные технологии и способы разработки пластовых месторождений полезных ископаемых. — М.: ВНИИцентр ГКНТ СССР, 1989. — 113 с.

Ин-т геотехн. механики АН Украины,
Днепропетровск

Получено 15.01.92

УДК 622.363

Б. М. Усаченко

ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКИ МОЩНЫХ ПЛАСТОВ НЕРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Рассматриваются геомеханические аспекты подземной разработки нерудных месторождений, позволяющие решать задачи изучения деформационных процессов в горных выработках, повышения уровня извлечения полезного ископаемого и оценки долговременной устойчивости выработанных пространств при разработке месторождений камерно-столбовой системой. Реализация этих подходов может быть осуществлена при проектировании отработки различных месторождений и при строительстве подземных сооружений.

Промышленно-экономическое значение таких нерудных полезных ископаемых, как гипс, ангидрит, известняк, доломит возрастает в народном хозяйстве вследствие интенсивного развития строительной индустрии, промышленности строительных материалов, роста объемов их потребления в химическом и металлургическом переработке.

Значительную часть объемов указанных геоматериалов добывают подземным способом камерно-столбовыми системами. Особенность разработки мощных (до 40—50 м) нерудных месторождений связана с необходимостью рациональной их эксплуатации при условии длительной охраны выработанных пространств как уникальных подземных сооружений, использование которых для нужд народного хозяйства является одним из видов природопользования. Специфика добычи заключена в необходимости применения такой технологии, которая обеспечила бы подготовку сырья в забое, поскольку в большинстве случаев перед использованием оно проходит дробление и измельчение.

Таким образом, геомеханические аспекты подземной эксплуатации мощных нерудных месторождений включают задачи изучения и описания деформационных процессов в элементах системы разработки, обоснование параметров горно-технологических процессов, при которых обеспечивались бы

© Б. М. Усаченко, 1993

повышение уровня извлечения полезного ископаемого, а также долговременная устойчивость крупномасштабных выработанных пространств.

Исходя из этого, рассмотрены геомеханические и технологические принципы повышения эффективности отбойки и устойчивости в обнажениях некоторых нерудных материалов. Развиваемые в работе подходы анализа напряженно-деформированного состояния породного массива и расчета параметров камерно-столбовой системы разработки отличаются общностью и могут быть приложены в геомеханических задачах обоснования параметров целиков и камер при разработке рудных, нерудных, калийных месторождений, а также при строительстве различных подземных сооружений. Технологические решения апробированы на примере эксплуатации гипсовых месторождений.

Анализ процессов, происходящих при разрушении горных пород в поле сжимающих напряжений [1, 2], свидетельствует о том, что плоскость разрушения ортогональна наименьшему главному напряжению. Анализ экспериментальных данных позволил ряду авторов [3—5] сделать вывод о том, что любое нарушение сплошности частиц и частей породы под действием системы напряжений, в том числе и при одноосном и трехосном сжатии [6], происходит в результате действия растягивающих напряжений.

Попытки объяснить причины разрушения отрывом при действии сжимающих напряжений предпринимались неоднократно, однако чаще всего они сводились к определению численной зависимости пределов прочности при сжатии и растяжении [4, 7].

Следует отметить, что теория развития трещин Гриффитса, дающая хорошие результаты в поле растягивающих напряжений, не позволяет прогнозировать распространение трещин в поле сжимающих напряжений. Поэтому для объяснения эффекта разрушения образцов при одноосном сжатии по плоскостям, параллельным направлению приложенной силы, многие авторы вынуждены прибегать к сложным схемам взаимодействия дефектов, используя не всегда очевидные допущения.

Описание напряжений в плоскостях, перпендикулярных приложенным нагрузкам, с позиций, наиболее близких к теории сплошных деформируемых сред, приведено в работе [7], где автор вскрывает противоречие между наличием при одноосном сжатии поперечных деформаций и отсутствием сил, вызывающих эти деформации, а также обосновывает возможность введения системы внутренних напряжений без нарушения основных соотношений теории упругости. Однако в работе не дано определение величин внутренних напряжений, вызывающих поперечные деформации. Там же автор обращает внимание на особое значение коэффициента поперечных деформаций в описании процесса деформирования твердых тел, приведены данные о зависимости этого коэффициента от уровня напряжений. В настоящее время имеются и другие работы, указывающие на то, что именно поперечная деформация и, следовательно, коэффициент поперечных деформаций и динамика его изменения несут в себе основную информацию о ходе процесса разрушения.

Необходимо обратить внимание на возможность трех основных источников растягивающих напряжений, возникающих при сжатии [10].

1. Внешние концентраторы напряжений в местах приложения нагрузки. Как известно, поверхности деформируемых тел и элементов нагружающих устройств практически всегда имеют неровности, соизмеримые с величинами упругих деформаций нагружаемого материала. Кроме того, за счет более свободного перемещения частиц на ненагруженных поверхностях, чем на нагруженных, в нагружаемых телах формируется зона сложного напряженного состояния. Все это приводит к реальной концентрации напряжений в местах приложения силы (контактных напряжений), теоретически обоснованных во многих работах. Следствием такой концентрации является возникновение растягивающих напряжений. Именно на этом явлении базируется метод определения предела прочности на растяжение раскалыванием, в частности, так называемый бразильский метод.

2. Внутренние концентраторы напряжений. Все реальные твердые тела, а горные породы особенно, состоят из отдельных кристаллов, агрегатов,

структурных элементов, ограниченных неоднородностями типа вакансий, дислокаций, включений, пор, трещин, которые под действием сжимающих нагрузок взаимодействуют так же, как и отдельные разнородные тела и создают на поверхности друг друга контактные напряжения. Здесь возникают отдельные очаги растягивающих напряжений, которые могут быть взаимно скомпенсированы в тем большей степени, чем большее число неоднородностей содержится в нагруженном объеме и чем меньший объем занимает каждый конкретный агрегат. Однако очевидно, что из-за ограниченности объема реальных тел такие напряжения никогда не могут быть скомпенсированы полностью.

Нами проведено моделирование методом конечных элементов, имитирующее случайным образом изменяющуюся нагрузку. При этом отмечено возникновение растягивающих напряжений. Внутренние дефекты структуры могут увеличивать эти напряжения, а при отдельных условиях самостоятельно приводить к их возникновению.

Следовательно, растягивающие напряжения при сжатии могут возникать в идеальном однородном материале за счет неравномерности приложенной нагрузки, в неоднородном — за счет неоднородности среды. Так как в реальных условиях наблюдаются и неоднородность среды, и неравномерность нагрузки, то возникновение растягивающих напряжений при сжатии неизбежно. Однако поле напряжений, вызванное этими причинами, не поддается теоретическому анализу. Распределение трещин, разнородных включений, приложенных нагрузок подчиняются, в лучшем случае, лишь статистическим законам с неизвестными параметрами.

Тем не менее общие закономерности деформирования и хрупкого разрушения реальных тел при сжатии, несомненно, существуют. Об этом свидетельствуют и повторяющаяся форма разрушенных образцов, и относительно небольшой разброс в определении предела прочности на растяжение и сжатие. Напрашивается вывод о том, что существует некоторый более общий закон возникновения растягивающих напряжений, на который накладывается неоднородность среды и приложения нагрузок, приводящие к разбросу экспериментальных данных.

В самом общем случае деформирования однородных тел, следующих закону Пуассона, т. е. тел, у которых непременным условием действия сжимающих нагрузок является наличие поперечных деформаций, возникновение растягивающих напряжений можно объяснить, если ввести изменение в противоречивый постулат теории упругости о том, что поперечные деформации совершаются в отсутствие соответствующих напряжений.

Как известно, в теории упругости понятие главных приложенных и возникающих в результате их действия внутренних напряжений для элементарного объема деформируемого тела эквивалентны. Именно поэтому в теории для одноосного растяжения — сжатия в главных напряжениях допускается соотношение $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, а $\epsilon_2 \neq 0$ и $\epsilon_3 \neq 0$.

Значит в данном случае нарушается коаксиальность тензоров напряжений и деформаций, т. е., иными словами, такая формальная запись означает, что реально наблюдаемые перемещения материальных точек (деформации ϵ_2 и ϵ_3) происходят без действия соответствующих сил (напряжений) и, следовательно, без затрат энергии. Наблюдения же за различными твердыми телами и их движением позволяют однозначно считать, что движению тела в определенном направлении (т. е. следствию некоторого действия) всегда соответствует сила (причина движения), действующая в направлении движения тела. Это положение сформулировано во втором законе Ньютона. Очевидно, что этот принцип должен полностью соблюдаться в механике твердого деформируемого тела, поскольку она также основана на общих законах механики.

Установлено [8], что эффект Пуассона связан с проявлением межатомного взаимодействия, которое заключается в стягивании (растягивании) атомов в поперечном сечении под воздействием меняющегося поля внутренних межатомных сил по мере увеличения (уменьшения) расстояния между атомами. Определение величин внутренних напряжений, возникающих в результате

такого перераспределения приложенных сил, на основе учета межатомного взаимодействия представляет собой сложную задачу. В более простом виде ее можно решить на основе закона сохранения энергии, полагая, что реально наблюдаемые деформации твердого тела являются интегральным проявлением межатомного взаимодействия.

Вводя гипотезу о том, что деформирование и разрушение реальных твердых тел отрывом при сжимающих нагрузках происходит под действием внутренних растягивающих напряжений, объективно возникающих в плоскостях, нормальных к направлению действия внешних приложенных напряжений, для одноосного нагружения тензор главных напряжений можно записать в виде

$$T_{\sigma} = \begin{vmatrix} \sigma_x & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z \end{vmatrix} = \sigma_1 T_{\xi} = \sigma_1 \begin{vmatrix} \xi & 0 & 0 \\ 0 & \eta & 0 \\ 0 & 0 & \eta \end{vmatrix}, \quad (1)$$

где T_{ξ} — тензор передачи напряжений; ξ и η — коэффициенты передачи напряжений соответственно на продольное и поперечное деформирование.

Смысл записи (1) заключается в том, что при одноосном нагружении единственным источником возникновения напряжений как в продольном σ_x , так и в поперечных направлениях $\sigma_y = \sigma_z$ является приложенное напряжение σ_1 , распределенное по направлениям x, y, z , пропорционально коэффициентам ξ и η .

Согласно принципу суперпозиции тензор возникающих главных напряжений для трехосного нагружения примет вид

$$T_{\sigma} = \begin{vmatrix} \sigma_1 \xi + \eta (\sigma_2 + \sigma_3) & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 \xi + \eta (\sigma_1 + \sigma_3) & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \xi + \eta (\sigma_1 + \sigma_2) \end{vmatrix}. \quad (2)$$

Коэффициенты ξ и η определялись для условий одноосного сжатия призматического элемента. При этом сжимающие напряжения и деформации полагались положительными, а растягивающие — отрицательными.

Как было отмечено выше, разрушение горных пород практически всегда происходит отрывом. Такой вид разрушения имеет наиболее очевидный практический смысл: для нарушения связей между структурными элементами на любом уровне (межатомные, межмолекулярные, межзеренные) необходимо их разорвать, т. е. подвергнуть действию растягивающих усилий. Все другие виды разрушения (сдвиг, скол) являются следствием способа перераспределения напряжений, обеспечивающих растяжение внутренних связей, и зависят от напряженного состояния.

Таким образом, критерий разрушения должен быть основан на сравнении величин растягивающих напряжений с пределом прочности при растяжении. Подобный подход не мог быть применен во всех случаях при решении задач геомеханики в силу того, что постулировалось отсутствие растягивающих напряжений в поле сжимающих. Однако анализ соотношения (2) показывает, что при определенных условиях в общем случае неравнокомпонентного трехосного сжатия могут возникать растягивающие напряжения. В частности, очевидно, что при одноосном сжатии возникают растягивающие напряжения в плоскости, перпендикулярной приложенному. Учитывая, что в общем случае растягивающие напряжения могут возникать вдоль нескольких осей, целесообразно в качестве критерия разрушения принимать достижение предела прочности при растяжении результирующей всех растягивающих компонент. Математически это условие можно записать в следующем виде:

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2} \leq \sigma_p,$$

где σ_i — растягивающие компоненты тензора главных возникающих напряжений, определяемые по (2); n — их количество.

Следует отметить, что предлагаемый критерий имеет четкий физический смысл, согласно (2) в его выражение входят все три компоненты приложенных напряжений, а также две характеристики материала — деформационная ν и прочностная σ_p , определяемые из простейших экспериментов. Именно такие требования предъявляются в настоящее время к создаваемым теориям прочности. В работе [9] отмечается, что теория, не учитывающая хотя бы один из компонентов напряженного или деформированного состояния, допускает для этого компонента значительный произвол, внося некоторую неопределенность в характеристики поведения материалов. Использование только одной константы механических свойств материала для оценки их прочности при любом соотношении главных напряжений в общем случае противоречит опытам даже при линейных напряженных состояниях.

Из формулировки предлагаемого критерия следует, что поверхность разрушения в каждой точке будет перпендикулярна результирующему вектору растягивающих напряжений. Таким образом, зная распределение напряжений по некоторому макрообъему, можно предсказать форму его разрушения. Так, при одноосном сжатии ($\sigma_2 = \sigma_3 = 0$) из (2) следует, что возникающие напряжения σ_y и σ_z — растягивающие и, следовательно, разрушение произойдет по плоскостям, параллельным приложенному сжимающему напряжению.

Используя предложенную концепцию и соответствующий критерий прочности, разработана методика расчета параметров камерно-столбовой системы разработки. При этом нагрузка на целики определялась в соответствии с гипотезой Л. Д. Шевякова по формуле

$$P = (a + l)(b + l')\gamma H. \quad (3)$$

Несущая способность целика определяется с учетом его деформационных и прочностных свойств, геометрических размеров, характера взаимодействия с кровлей и особенностей процесса разрушения по формуле:

$$R = ab\sigma_p K_c / [n\eta (k \operatorname{th} h/a + 1 - k)]. \quad (4)$$

Минимальные геометрические размеры прямоугольного целика определяются из условия равенства нагрузки и несущей способности из соотношения

$$\gamma H n (a + l)(b + l') \eta (k \operatorname{th} h/a + 1 - k) = \sigma_p ab K_c. \quad (5)$$

При расчете ленточного целика необходимо учитывать как напряжения от веса столба пород до поверхности σ_1 , так и влияние силы бокового распора, определяемое как $\sigma_2 = \lambda \sigma_1$.

При этом необходимая ширина ленточного целика определяется по формуле

$$\gamma H n (a + l)(1 + \lambda) \eta (k \operatorname{th} h/a + 1 - k) = a \sigma_p K_c \xi. \quad (6)$$

При отсутствии в массиве горных пород горизонтальных напряжений, вызванных действием тектонических сил, коэффициент бокового распора λ определяется по формуле А. М. Динника

$$\lambda = \nu / (1 - \nu). \quad (7)$$

В этом случае уравнение (6) примет вид

$$\gamma H n (a + l) \eta (k \operatorname{th} h/a + 1 - k) = a \sigma_p K_c (1 - \nu).$$

В зонах геологических нарушений необходимо оставлять нарушенную часть в середине целика. При этом размер ненарушенной части целика b , оставляемой с каждой стороны от нарушения, определяется по формуле

$$2b = \frac{(l_{\text{зн}} + l)(a + l)\gamma H n - a l_{\text{зн}} K_{\phi} K_c \sigma_p K_0 \frac{(1 + 2\nu_n^2)(1 + 2\nu_c^2)}{\nu_n(1 + \nu_c + 2\nu_c^2)}}{a K_{\phi} K_c \sigma_p \frac{1 + 2\nu_c^2}{\sqrt{2\nu_c}} - (a + l)\gamma H n}.$$

Эта формула учитывает как особенности деформирования и разрушения, так и взаимодействие различных частей внутри целика. Коэффициент торцевого

влияния K в общем случае должен определяться экспериментально, однако в случае совместного деформирования целика и кровли, сложенных одной породой,

$$K = \frac{1}{2} (1 - \nu)^{-1}.$$

Реализация изложенных подходов осуществлена при проектировании отработки мощных гипсовых пластов, ведущейся с целевой подготовкой выработанных пространств.

1. Берг О. Я. К вопросу и прочности и пластичности бетона // Докл. АН СССР. — 1950. — 70, № 4. — С. 945—961.
2. Балавадзе В. К. Новое о прочности и деформативности бетона и железобетона. — Тбилиси : Менияреба. — 1986. — 363 с.
3. Гвоздев А. А. Расчет несущей способности конструкций по методу предельного равновесия. — М. : Стройиздат, 1949. — 273 с.
4. Мордухович М. М. Расчет предела прочности горных пород на одноосное сжатие // Механика горн. пород. — 1980. — 32. — С. 84—90.
5. Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения. — М. : Наука, 1974. — 640 с.
6. Hobbs D. W. A study of the behavior of a broken rock under triaxial compression and its application to mine roadways // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. — 1966. — 3, N 1. — P. 11—13.
7. Кузьменко В. А. Новые схемы деформирования твердых тел. — Киев : Наук. думка, 1973. — 200 с.
8. Мороз Л. С. Механика и физика деформаций и разрушения материалов. — Л. : Машиностроение, 1984. — 224 с.
9. Седоков Л. М. Механические теории прочности. — М. : Изд. Тул. политехн. ин-та, 1975. — 140 с.
10. Курничанский Г. Т., Усаченко Б. М., Хаит М. Д. Модель деформирования и разрушения горных пород // Прикл. механика. — 1986. — 22, № 4. — С. 83—88.

Ин-т геотехн. механики АН Украины,
Днепропетровск

Получено 05.02.92

УДК 622.831.325

Г. А. Шевелев

МЕХАНИЗМ РАЗВИТИЯ И ЗАТУХАНИЯ ВЫБРОСОВ УГЛЯ, ПОРОДЫ И ГАЗА

Изложены результаты исследований механизма развития и затухания выбросов. Показано, что выбросы представляют собой саморегулируемый процесс, происходящий в узком диапазоне значений динамических параметров. Обоснованы совокупности силовых, энергетических и структурных критериев, при выполнении которых обеспечиваются условия развития выбросов. При нарушении любого из них развитие выброса прекратится и он затухнет.

Как известно, в выбросоопасных пластах существуют локальные выбросоопасные и невыбросоопасные зоны. Причем отличия их по физико-механическим свойствам и напряженно-деформированному состоянию зачастую прослеживаются весьма слабо, а по отдельным параметрам подобные зоны могут вообще не отличаться между собой. Этим, в частности, объясняется тот факт, что наиболее надежными методами прогноза выбросоопасности являются те, которые базируются на комплексных или интегральных показателях.

В то же время выбросам подвержены не только угольные пласты и залежи соли, но и песчаники, т. е. совершенно разные среды, которые существенно отличаются между собой по структуре, вещественному составу и физико-механическим свойствам. Вместе с тем результаты исследований доказывают, что динамические параметры выбросов практически не зависят ни от массы выбросов, ни от типа горных пород, в которых они происходят. Например

© Г. А. Шевелев, 1993