Л.К.ГОРШКОВ, Б.Г.ТАРАСОВ, Н.И.НИКОЛАЕВ
Санкт-Петербургский горный институт,
Россия

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ БАЛАНС ПРИ РАЗРУШЕНИИ ГОРНЫХ ПОРОД И КОНТАКТНЫЕ ЗАДАЧИ РАЗВЕДОЧНОГО БУРЕНИЯ

Изучение энергетического баланса при разрушении горных пород – одно из направлений научной школы механики деформируемого твердого тела, развиваемого на протяжении нескольких десятилетий на кафедре строительной механики Санкт-Петербургского (Ленинградского) горного института. Становление школы связано с трудами Л.С.Бурштейна, Н.С.Булычева, Н.Н.Кайдалова, А.Н.Ставрогина и др. Практические результаты деятельности этой школы известны на многих объектах подземного строительства, в горно-добывающей промышленности, в разведочном бурении. В рамках данной статьи кратко изложены современные представления о механизме трансформации потенциальной энергии упругого сжатия в динамические виды энергии при хрупком разрушении, приведен баланс энергии этого процесса, а также примеры его использования при решении ряда контактных задач разведочного бурения, наименее освещенные в технической литературе.

Механизм потери устойчивости системы «нагружающий комплекс – разрушаемый объем» стал понятен с обнаружением запредельной ветви диаграммы «напряжение – деформация»

горных пород и последующим интенсивным исследованием свойств пород за пределом прочности. Потеря устойчивости системы возникает при соблюдении двух условий: 1) породы разрушаемого объема (РО) должны находиться в состоянии предельного или запредельного деформирования; 2) энергоемкость дальнейшей деформации и разрушения этого объема должна быть меньше выделяющейся при этом из нагружающего комплекса (НК) энергии упругого сжатия. Второе условие потери устойчивости может быть охарактеризовано неравенством $M > M_н$, где M – модуль спада запредельной ветви диаграммы «нагрузка – деформация» РО; $M_н$ – модуль разгрузки (жесткость) НК.

Динамический неуправляемый процесс разрушения, развивающийся после потери устойчивости и связанный с перераспределением потенциальной энергии упругого сжатия между другими видами энергии, в которые она переходит, впервые в полном объеме был исследован на уникальном комплексе экспериментального оборудования. Установки этого комплекса позволяют изучать процессы хрупкого неуправляемого разрушения горных пород при широкой вариации таких ключевых параметров, как: жесткость НК (в 1000 раз), запас потенциальной упругой энергии сжатия перед потерей устойчивости, энергоемкость и хрупкость разрушаемой породы, инерционные массы НК и РО, вид напряженного состояния, акустическая прозрачность границ между РО и НК и др.

В результате исследований был экспериментально установлен баланс энергии динамического неуправляемого процесса разрушения и раскрыт механизм перехода потенциальной энергии упругого сжатия, накопленной перед потерей устойчивости в НК ($П_н$) и РО ($П_о$), в кинетическую энергию разлетающихся осколков ($П_р$), энергию колебательных процессов НК после разрушения объема материала ($П_к$), энергию запредельного деформирования и разрушения ($П_з$,), тепловую энергию ($П_т$).

Основные положения баланса энергии состоят в следующем:

- упругая энергия $П_о$, накопленная в РО, полностью тратится на разрушение материала и в динамические виды энергии не переходит;
- источником динамических эффектов разрушения является упругая энергия $П_н$, накопленная перед потерей устойчивости в НК.

Степень динамичности процесса разрушения помимо соотношения энергий $П_н$ и $П_з$ определяется рядом других важных факторов. Например, способностью пород изменять свою энергоемкость разрушения ($П_з^д$) при изменении скорости деформации (ε); соотношением инерционной массы РО ($m_р$) и массы НК ($m_н$), участвующей в колебательном процессе; акустической жесткостью границ раздела между РО и НК и др. Взаимосвязь между составляющими баланса энергии описывается следующими уравнениями:

$$П_к = m_н(П_н - П_з^д) / (m_н + m_о); \quad (1)$$

$$П_р = m_о(П_н - П_з^д) / (m_н + m_о); \quad (2)$$

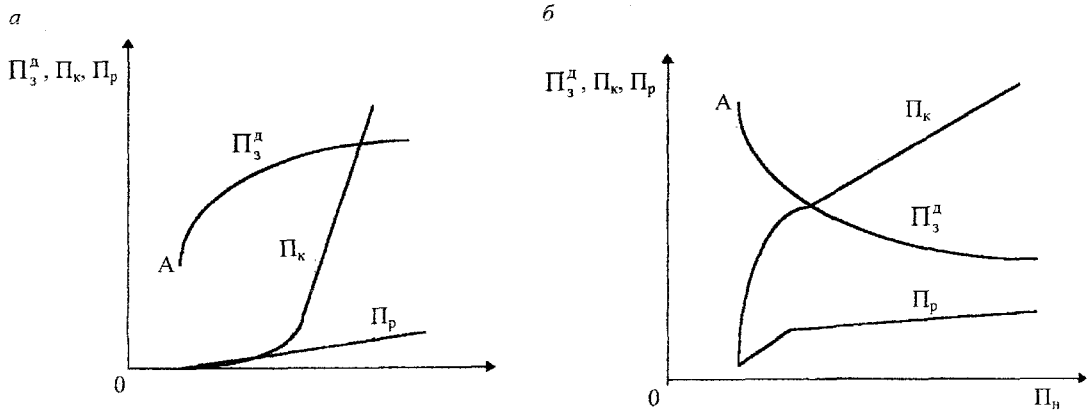
$$П_з^д = П_з^д(\varepsilon); \quad (3)$$

$$П_к / П_р = m_н / m_о. \quad (4)$$

Энергия тепловых потерь при одноосном разрушении пренебрежимо мала в сравнении с другими составляющими общего баланса энергии, который имеет вид

$$П_н = П_з^д + П_р + П_к. \quad (5)$$

Экспериментально определенное соотношение (4) раскрывает механизм перехода энергии упругого сжатия, накопленной в НК, в динамические виды энергии $П_к$ и $П_р$: разгон и раз-



Зависимость составляющих баланса энергии процесса хрупкого неуправляемого разрушения от общего запаса упругой энергии в нагружающей системе для пород первого (*а*) и второго (*б*) класса

брасывание разрушенного объема материала упруго восстанавливающимися элементами НК. Принцип реализации данного механизма подобен принципу действия рогатки.

Важнейшим результатом исследований является обнаружение двух классов пород с противоположными изменениями энергоемкости разрушения за пределом прочности ($П_з^д$) при изменении скорости деформации в процессе развития динамического разрушения. Породы первого класса увеличивают энергоемкость разрушения, а породы второго класса – снижают. Как показали эксперименты, энергия, необходимая для разрушения некоторых пород за пределом прочности, в условиях динамики может в 10 раз превосходить энергоемкость породы в условиях статики (см. рисунок). Точка А на графиках соответствует энергоемкости разрушения пород в статическом режиме. У пород первого класса в результате существенного роста энергоемкости разрушения в динамике $П_з^д$ наблюдается замедленный рост динамических видов энергии $П_р$ и $П_к$. Рост энергоемкости демпфирует развитие динамики процесса разрушения. Наоборот, у пород второго класса даже небольшого избытка свободной энергии перед началом разрушения достаточно, чтобы вызвать бурный процесс разрушения вследствие резкого уменьшения энергоемкости разрушения.

Особенность баланса энергии хрупкого разрушения при объемном сжатии состоит в отсутствии энергии $П_р$, характеризующей разлет осколков разрушенного материала, и в сильном возрастании доли тепловой энергии, что вызвано наличием остаточной прочности в материале. Покажем решение конкретных контактных задач для статического и динамического режимов при бурении.

Контактные задачи в бурении можно объединить в две группы:

- взаимодействие бурового инструмента с забоем скважины;
- взаимодействие крепи интервала осложнений в скважине с горным массивом.

Наиболее актуальной задачей первой группы является исследование работы алмазного инструмента как упругого тела в упругом полубесконечном пространстве (горном массиве). Задачи второй группы решаются как в упругих, так и в упругопластических моделях, так как неустойчивые интервалы скважин сложены, как правило, неоднородными породами осадочного комплекса, не являющимися упругими, в отличие от упругих – однородных и крепких изверженных пород.

Все разнообразие расчетных схем по обеим группам контактных задач сводится к схемам, в которых предполагается задание внешних нагрузок:

- при алмазном бурении задаются осевая нагрузка и частота вращения (крутящий момент), которые могут быть как стационарными (постоянными во времени), так и нестабильными (динамический режим);

• при расчетах крепи интервалов скважин задаются внутреннее (гидростатическое или аэростатическое) и внешнее (горное) давления (статический режим).

При решении этих задач можно использовать методы как строительной механики, так и механики деформируемого твердого тела. Последние считаются более прогрессивными, так как учитывают взаимодействие бурового инструмента и крепи с горным массивом или взаимосвязанные перемещения и напряжения, определяемые энергетическим балансом процесса.

Рассмотрим некоторые характерные контактные задачи разведочного бурения как задачи, решаемые методами механики твердого деформируемого тела.

Алмазное бурение при нестабильной осевой нагрузке. Как известно, отклонения значений осевой нагрузки от заданного номинала могут, в силу различных причин, составлять 30-50 %. При этом в алмазной коронке возникают упругие и необратимые деформации, вызывающие появление напряжений, значения которых колеблются от самых малых до разрушающих.

Исследуем влияние колебаний осевой нагрузки на распространение волн в теле матрицы алмазной коронки, а также распределение динамических напряжений в матрице и смещений ее торца с учетом трения в контактной паре «торец матрицы – забой скважины». Решение представляется в упругой постановке с использованием цилиндрической системы координат. Коронка имеет вид полого цилиндра с алмазосодержащей матрицей на конце, контактирующем с забоем. В момент постановки на забой бурового снаряда, т.е. в момент появления осевой нагрузки, коронка испытывает осевой продольный удар, мгновенно вызывающий динамические напряжения и смещения на торце и в других сечениях матрицы коронки.

Решение задачи сводится к интегрированию системы двух дифференциальных уравнений относительно некоторого скалярного потенциала φ и угловой компоненты Φ_θ векторного потенциала (метод упругих потенциалов):

$$\nabla^2\varphi = \frac{1}{C_e^2}\frac{\partial^2\varphi}{\partial t^2}; \quad \nabla^2\Phi_\theta = \frac{1}{C_t^2}\frac{\partial^2\Phi_\theta}{\partial t^2}, \tag{6}$$

где C_e, C_t – скорость распространения соответственно продольных и поперечных (сдвиговых) упругих волн при возникновении колебаний в материале матрицы из-за нестабильности осевой нагрузки; t – время.

Задача решена путем преобразований Фурье. При этом получены функции напряжений σ_z, σ_θ, σ_ρ, $\tau_{\theta z}$ и перемещений U_ρ, U_z. Решения для всех приведенных функций представляются в виде семейства зависимостей, определяющих распространение волн колебаний в теле матрицы с числом мод $n \to \infty$. Практический интерес представляют колебания нулевой моды с главной частотой, т.е. колебания непосредственно на торце коронки ($Z = 0$), тогда как частоты колебаний на остальных модах будут обертонами.

Численный анализ решения при единичной условной нагрузке для коронки диаметром 59 мм со следующими константами материала матрицы: модуль упругости при растяжении-сжатии $E = 1 \cdot 10^5$ МПа; модуль упругости при сдвиге $G = 0{,}4 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0{,}3$; коэффициент трения $f = 0{,}39$; $C_l = 4{,}38 \cdot 10^3$ м/с; $C_t = 2{,}53 \cdot 10^3$ м/с, – показал:

• наибольшее абсолютное значение как по упругим, так и по изнашивающим составляющим имеют осевое σ_z и окружное σ_θ нормальные напряжения, радиальные напряжения σ_ρ значительно уступают первым;

• осевые напряжения износа возрастают примерно в 1,5 раза от внутреннего радиуса стенки матрицы к внешнему, в то время как напряжения σ_θ и упругая составляющая осевого напряжения мало изменяются в радиальном направлении;

• радиальные касательные напряжения постоянны по толщине стенки матрицы и в 7-10 раз ниже нормальных напряжений;

• осевые упругие смещения постоянны на всем сечении матрицы, тогда как радиальные (упругие и смещения износа) возрастают в направлении к внутренней поверхности стенки матрицы.

В результате решения приведенной задачи установлено, что для увеличения износостойкости коронок при нестабильной осевой нагрузке необходимо усиливать вооружение торца

матрицы, т.е. повышать концентрацию объемных алмазов и усиливать жесткость самой матрицы за счет усиления ее каркаса у внутренней поверхности матричного кольца.

Контактная задача при нестабильном во времени крутящем моменте. В этом случае динамический характер работы алмазной коронки определяется значением и интенсивностью колебаний крутящего момента, передаваемого коронке от привода через колонну бурильных труб. Поскольку верхний торец матрицы жестко скреплен с корпусом коронки, акустическую жесткость матрицы следует принять более низкой, чем жесткость корпуса и связанной с ним колонковой трубы. При этом на боковые поверхности матрицы, в отличие от случая с нестабильной осевой нагрузкой, действуют касательные напряжения $\tau_{\rho\theta}$, а по торцу – скручивающие касательные напряжения $\tau_{z\theta}$.

Решение получено методом преобразований Лапласа в виде суммы решений трех простых частных задач, в которых нагрузка действует только по торцу (первая задача), только по внутренней поверхности матрицы (вторая задача) и только по внешней ее поверхности (третья задача). Общее решение найдено в упругом приближении, при котором упругие функции определяются через свертку:

$$M(t) = \int_0^t M_0(t-\gamma)g(\gamma)\mathrm{d}\gamma\,, \tag{7}$$

где $M(t)$ – некоторая внешняя нагрузка (крутящий момент) как функция времени; $g(\gamma)$ – переходная функция по некоторому аргументу γ.

По полученным функциям напряжений и перемещений проведен численный анализ для коронки диаметром 59 мм при условной единичной нагрузке $M_0 = 1$, который показал следующее:

- характер изменения перемещений и напряжений в любом произвольном сечении носит явно импульсивный вид, причиной его возникновения является наложение друг на друга волн, отраженных от торцов матрицы;
- поскольку акустическая жесткость материала матрицы ниже акустической жесткости корпуса, в определенные промежутки времени наложение прямого импульса на отраженный приводит к почти полной компенсации напряжений и перемещений;
- для нулевой моды (торец коронки) изменение характера распределения напряжений и перемещений не зависит от закона задания внешней нагрузки (крутящего момента);
- в некоторые промежутки времени наложение прямого и отраженного импульсов приводит к удвоению напряжений, что необходимо учитывать при прочностных расчетах;
- представляется целесообразным придавать верхнему торцу матрицы некоторый наклон с тем, чтобы избежать параллельности торцов и удвоения напряжений; кроме того, рациональным может стать устройство демпфирующих корпусов в коронках и демпфирующих прослоек в матрице.

Упругое взаимодействие крепи интервала скважины и горного массива. На крепь интервала скважины действуют пластовое (горное) давление со стороны массива и внутрискважинное давление со стороны очистного агента, заполняющего скважину. Для определения толщины крепи необходимо найти распределение напряжений в ней. В упругой постановке задача аналогична известной в теории упругости задаче Ляме.

Внутри крепежной оболочки на определенной глубине H скважины деформация симметрична относительно оси скважины, поэтому все перемещения, деформации и напряжения не зависят от координаты θ и являются функциями только текущего радиуса ρ.

Давление в буримом массиве $P_м = \lambda\gamma_п H$, внутри скважины $P_с = \gamma_о H$, где $\gamma_п$, $\gamma_о$ – удельный вес пород и очистного агента; λ – коэффициент бокового распора.

Решением задачи являются зависимости:

$$\sigma_\rho = \frac{(P_м - P_с)r^2R^2}{\rho^2(R^2 - r^2)} - \frac{P_с r^2 - P_м R^2}{R^2 - r^2}\,; \tag{8}$$

$$\sigma_\theta = -\frac{(P_м - P_с)r^2R^2}{\rho^2(R^2 - r^2)} + \frac{P_с r^2 - P_м R^2}{R^2 - r^2}; \qquad (9)$$

$$\tau_{\theta\rho} = 0. \qquad (10)$$

Поскольку в системе (8)-(10) $\tau_{\theta\rho} = 0$, напряжения σ_ρ и σ_θ по выражениям (8) и (9) являются главными, поэтому их можно использовать для определения толщины крепи, например, по второй теории прочности

$$\sigma_1 - \mu\sigma_3 \le [\sigma], \qquad (11)$$

где σ_1, σ_3 – главные напряжения, при этом σ_1 – алгебраически большее из напряжений σ_ρ и σ_θ, а σ_3 – наименьшее из них; $[\sigma]$ – допускаемое напряжение для материала крепи; μ – коэффициент Пуассона.

Толщина крепи определяется из условия $\delta = R - r$ при одном из заданных значений радиусов (R или r), $P_м$ и $P_с$ считаются заданными.

Упругопластическое взаимодействие крепи интервала скважины и горного массива. Бурение скважин в сложных горно-геологических условиях определяется необратимостью процессов деформирования пород и бурового инструмента, а также изменением естественного напряженного состояния окружающих скважину упругих и пластичных неустойчивых пород. Для оперативного закрепления таких пород требуется расширять деформированный ствол до определенного размера, равного смещению пород внутрь скважины при деформировании (это и будет толщина будущей крепи).

В упругопластической модели взаимодействия крепи и массива могут иметь место два варианта решения задачи: когда массив представляется изотропным или неоднородным, где зона пластической деформации одновременно является и зоной разрушения, так как в ней отсутствует сцепление в породах. Итак, для изотропного массива имеем

$$U_\rho = \frac{R}{2G}\sin\alpha\left(\lambda\gamma_п H + K_с \operatorname{ctg}\alpha\right)^{1/\sin\alpha}\left(\frac{1-\sin\alpha}{P + \gamma_0 H + K_с \operatorname{ctg}\alpha}\right)^{(1-\sin\alpha)/\sin\alpha}, \qquad (12)$$

где U_ρ – радиальное смещение стенок скважины; $K_с$ – коэффициент сцепления; P – давление на крепь; α – угол внутреннего трения для пород массива, окружающего скважину.

В неоднородном массиве, когда сцепление в породах отсутствует ($K_с = 0$), для радиального смещения имеем

$$U_\rho = \frac{R}{2G}\left(\lambda\gamma_п H\sin\alpha + (1-\sin\alpha)\frac{\sigma_{сж}}{2} - \gamma_0 H\sin\alpha\right)\left[(1-\sin\alpha)\frac{2(\lambda\gamma_п H - \gamma_0 H) - \sigma_{сж}}{23}\right]^{1/\sin\alpha}, \qquad (13)$$

где $\sigma_{сж}$ – предел прочности пород на одноосное сжатие.

Приведенные методики расчета упругого и упругопластического взаимодействия крепи интервала скважины с породным массивом позволяют качественно и количественно оценить деформационные процессы на закрепляемом интервале, определить рациональную область беструбного крепления зон осложнений в скважине в зависимости от ее глубины, диаметра, природы очистного агента и свойств материала крепи.

Очевидно, что приведенный выше обзор контактных задач не претендует на полноту исследования, но он показывает значительные возможности методов механики деформируемого твердого тела при решении различного рода контактных задач бурения с учетом энергетического баланса процесса разрушения горных пород.