

ДЕФОРМИРОВАНИЕ ЗАКЛАДОЧНОГО МАССИВА В УСЛОВИЯХ ОБЪЕМНОГО СЖАТИЯ

Габараев О.З., Майстров Ю.А., Габараева А.О., Зассеев И.А.

«Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), г. Владикавказ

Ключевые слова: отработка месторождения, закладочная смесь, закладка, расход компонентов, нормативная прочность.

Аннотация. Рассматриваются вопросы оценки деформационных процессов в закладочном массиве в условиях объемного неравно компонентного сжатия. Обосновываются классификация технологий перевода закладочных массивов в условия объемного сжатия и характер изменения главных напряжений в массиве из твердеющей закладки. Установлено, что относительные деформации закладочного массива в условиях объемного сжатия в 1,7-3 раза ниже, чем при одноосном сжатии и составляют 0,33-3,05%.

DEFORMATION OF THE BOOKMARK ARRAY UNDER VOLUMETRIC COMPRESSION CONDITIONS

Gabaraev O.Z., Majstrov Y.A., Gabaraeva A.O., Zasseev I.A.

North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University, Vladikavkaz)

Keywords: Mine development, backfilling mixture, bookmark, the consumption of components, regulatory strength.

Abstract. The questions of estimation of deformation processes are examined in a bookmark array in the conditions of by volume unequal component compression. Grounded classification of technologies of translation of bookmark arrays in the terms of by volume compression and character of change of main tensions in an array from a hardening bookmark. It is set that relative deformations of bookmark array in the conditions of by volume compression in 1,7-3 times below, than at a monaxonic compression and 0,33-3,05% make.

Характер изменения главных напряжений геомеханической системы - нетронутый массив - нарушенный массив - выработанное пространство, заполненное закладочной смесью - позволяет оценить виды объемных напряженных состояний.

Величины напряжений в условиях объемного сжатия характеризуются тензором напряжений [1]:

$$T_n = \begin{Bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{Bmatrix}, \quad (1)$$

где компоненты главных напряжений удовлетворяют соотношению $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$. Вид объемного напряженного состояния определяется величиной промежуточного главного напряжения в указанном интервале и его принято оценивать параметром Надаи-Лоде [2]:

$$\mu_\sigma = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}, \text{ где } -1 \leq \mu_\sigma \leq 1 \quad (2)$$

Если в качестве переменных и параметров геомеханической системы принять максимальное сжимающее главное напряжение σ_1 и параметр Надаи-Лоде μ_σ , то тензор главных напряжений можно представить в следующем виде:

$$T_i = \begin{Bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{Bmatrix} = \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \mu_\sigma \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right) I + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \begin{Bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{Bmatrix} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} (1 - \mu_\sigma) \begin{Bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{Bmatrix} + 2\mu_\sigma \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \begin{Bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{Bmatrix}, \quad (3)$$

где первый тензор характеризует гидростатическое сжатие с величиной промежуточного главного напряжения σ_2 , второй тензор – чистый сдвиг с напряжением $(\sigma_1 - \sigma_2)$ и третий тензор – одноосное сжатие при $\mu_\sigma < 0$ или одноосное растяжение при $\mu_\sigma > 0$ с напряжением $\mu_\sigma(\sigma_1 - \sigma_3)$.

Частные случаи объемных напряженных состояний сжатия $\mu_\sigma = 1$, сдвига $\mu_\sigma = 0$ и растяжения $\mu_\sigma = -1$ получаются из общего разложения (3). В этом случае сжимающие напряжения можно считать положительными и при σ_2 , равном наименьшему главному напряжению σ_3 , имеем, согласно (2), $\mu_\sigma = -1$, что также соответствует условию одноосного сжатия ($\sigma_2 = \sigma_3 = 0$) и представляет обобщенное сжатие.

Для оценки состояния массива требуется значение величины компоненты девиатора напряжения D_n , в этом случае объемно-напряженное состояние при $\mu_\sigma = -1$ можно представить в виде разложения (3) на шаровой тензор T_n^0 и девиатор напряжений [3]:

$$T_n = \begin{Bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{Bmatrix} = T_n^0 + D_n = \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3} \begin{Bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{Bmatrix} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3} \begin{Bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{Bmatrix}. \quad (4)$$

При σ_2 , равном полусумме минимального σ_3 и максимального σ_1 главных напряжений, имеем, согласно (2), $\mu_\sigma=0$, что представляет состояние обобщенного сдвига. Тензор напряжений (1) при $\mu_\sigma=0$ в этом случае удобно представить в виде разложения:

$$T_n = \begin{Bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0,5(\sigma_1 + \sigma_3) & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{Bmatrix} = T_n^0 + D_n =$$

$$= \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \times \begin{Bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{Bmatrix} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \begin{Bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{Bmatrix}. \quad (5)$$

При σ_2 , равном наибольшему главному напряжению σ_1 , имеем, согласно (2), $\mu_\sigma=1$, что соответствует состоянию обобщенного растяжения ($\sigma_2=\sigma_1=0$). В этом случае тензор напряжений (1) удобно записать в виде разложения:

$$T_n = \begin{Bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{Bmatrix} = T_n^0 + D_n =$$

$$= \frac{2\sigma_1 + \sigma_3}{3} \times \begin{Bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{Bmatrix} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3} \begin{Bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -2 \end{Bmatrix}. \quad (6)$$

Величина деформации закладки зависит от ее физико-механических свойств, от времени, необходимого для полной стабилизации массива закладки и рудовмещающих пород, и напряжений, действующих у контура закладки и внутри массива.

По признаку воздействия материалов закладки на напряженность массивов и времени ввода работы массивов в режим объемного сжатия разработана классификация технологий с закладкой выработанного пространства, которая представлена в таблице 1.

В классификации выделены классы, различающиеся временем воздействия на напряженность пород, и варианты их осуществления. Такое классификационное деление применено впервые и является своевременным, учитывая важность перевода искусственных массивов в режим объемного сжатия с возможными природосберегающими и экономическими преимуществами.

При заполнении очистного пространства закладкой, массив начинает работать как несущий конструктивный элемент геомеханической системы и находится в условиях объемного сжатия $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$. Поддерживающий эффект искусственного массива развивается постепенно по мере того, как горные породы деформируются в достаточной степени и выдавливаются в заполненное пространство. Наступает момент, когда закладочный массив начинает воспринимать полное давление толщ налегающих пород:

$$\epsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E} \left(1 - \frac{2\mu^2}{1-\mu} \right) \quad (7)$$

где μ - коэффициент Пуассона, E - модуль упругости закладочного массива, МПа.

Табл. 1. Классификация технологий перевода закладочных массивов в условия объемного сжатия

Класс	Группа	Вариант	Условия применения
I Предварительное воздействие на рудовмещающий массив	Предварительное упрочнение	Твердеющими растворами. Тросовыми и распорными штангами.	Нарушенные массивы вмещающих пород.
	Опережающими массивами из твердеющей закладки.	Предохранительные камеры висячем или лежащем боку месторождения.	Ослабленные вмещающие породы.
II Воздействие на массив одновременно с обнажением очистного пространства	Закладкой из твердеющих или сыпучих смесей.	Подачей закладки на руду.	Без ограничений.
		Наклоном стенок камер.	Ослабленный рудный массив.
		С экранирующей щелью по контуру камер.	Нарушенные породы.
	Упрочнение выработанного пространства.	Анкерованием стенок. Крепление	Ослабленные руды и вмещающие породы.
III Воздействие на массив после техногенного вмешательства	Закладкой из твердеющих смесей.	Прочная.	Без ограничений.
		Малопрочная.	При наличии факторов, способствующих упрочнению.
	Сыпучей закладкой.	Сухая. Гидравлическая.	Соответствие параметров объемного сжатия и компрессионных свойств.
IV Комбинированное воздействие	Сочетание вариантов одного или нескольких классов		В зависимости от условий образования устойчивых систем.

С увеличением коэффициента Пуассона μ до 0,5 в уравнении (7) σ_1 обращается в ноль и представляется возможным определить деформацию закладочного массива, находящегося в объемно-напряженном состоянии.

Для исследования деформационных свойств твердеющей закладки были проведены исследования на установке длительного неравнокомпонентного сжатия. Установка (рис. 1) представляет собой испытательную камеру. Вертикальное давление, создаваемое испытательной машиной, передается на образец закладки, размещаемый в кольцевой перегородке, посредством поршня.



Рис. 1. Установка объемного неравнокомпонентного сжатия

Испытания проводили на образцах цилиндрах, изготовленных из раствора, взятого на сливе смесителя с расходом цемента 80 кг/м^3 . В каждом опыте относительную деформацию ϵ (%) закладочной смеси определяли из соотношения суммарной величины усадки образца с первоначальной высотой Δh к первоначальной высоте образца h . Результаты определения деформационных свойств твердеющей закладки при различных условиях нагружения приведены в таблице 2.

Табл. 2. Относительная деформация ϵ (%) закладочного массива

Условия работы образца	Боковое давление, МПа	Величина отношения $\sigma_1/\sigma_{сж}$					
		1	2	3	4	5	6
Объемное сжатие	0	0,56	1,40	2,62	2,91	3,38	3,72
	0,25	0,46	1,15	2,16	2,54	2,76	3,05
	0,50	0,42	1,06	1,64	2,21	2,36	2,32
	0,75	0,40	0,94	1,31	1,42	1,57	1,86
	1,00	0,37	0,79	1,21	1,26	1,28	1,39
	1,25	0,33	0,70	1,03	1,08	1,17	1,22
Одноосное сжатие	0	0,50	1,40	2,60	2,90	3,40	3,70

Как видно из таблицы относительные деформации закладочного массива в условиях объемного сжатия в 1,7-3 раза ниже, чем при одноосном сжатии и составляют 0,33-3,05%.

Величина деформации закладки зависит от ее физико-механических свойств, от времени, необходимого для полной стабилизации массива закладки и рудовмещающих пород, и напряжений, действующих у контура закладки и внутри массива.

Список литературы

1. Баклашов И.В., Картозия Б.А. Механика подземных сооружений и конструкций крепей. Учебник для вузов. – М.: Недра, 1992. – 543 с.
2. Норель Б.К., Петров Ю.В., Селютина Н.С. Энергетические и временные характеристики предельного состояния горных пород. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет, 2018. – 132 с.
3. Чирков С.Е. Предельная поверхность прочности горных пород и критерии сопротивляемости их разрушению // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2002. – №9. – С. 74-75.

References

1. Baklashov I.V., Cardboard B.A. Mechanics of underground structures and structures of supports. Textbook for universities. – M.: Nedra, 1992. – 543 p.
2. Norel B.K., Petrov Yu.V., Selyutina N.S. Energy and time characteristics of the limit state of rocks. – SPb.: Saint Petersburg state University, 2018. – 132 p.
3. Chirkov S.E. Ultimate surface strength of rocks and criteria of resistance to their destruction // Mining information and analytical bulletin. – 2002. – №9 – P. 74-75.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Габараев Олег Знаурович – профессор кафедры горного дела	Gabarayev Oleg Znaurovich – professor of Mining Department
Майстров Юрий Александрович – аспирант	Majstrov Yuri Alexandrovich – postgraduate student
Габараева Алана Олеговна – аспирант	Gabaraeva Alana Olegovna – postgraduate student
Зассеев Игорь Анатольевич – аспирант	Zasseev Igor Anatoltvich – postgraduate student
Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), г. Владикавказ, Россия	North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia

Получена 29.11.2020