2019

УДК 622.831.1

ВЛИЯНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ВЫРАБОТОК НА НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД

В. Шанкар¹, Д. Кумар², Д. С. Субрахманьям¹

¹Национальный институт механики горных пород, E-mail: ajayvaish007@gmail.com, г. Бангалор, Индия ²Индийский институт технологий, г. Дханбад, Индия

Для выбора технологии ведения горных работ и стратегии разработки месторождений необходимо знать напряженное состояние нетронутого массива. Это важно для определения способа отработки и оптимального крепления горных выработок с целью экономичной и безопасной добычи руды. С увеличением глубины рудника пропорционально возрастают действующие напряжения. Повышение роста напряжений приводит к соответствующему увеличению трещиноватости горных пород и вызванных деформаций. Обрушения пород на удаленных участках ведения добычных работ нередко связаны с изменением напряженного состояния на данном месторождении. Рассматривается изменение напряжений в массиве до и после начала разработки. За основу принимаются локальные измерения на глубоких горизонтах рудника. Приводится установленное перераспределение напряжений, вызванное ведением горных работ, а также определяется изменение и переориентация напряжений вследствие действия различных геологических факторов.

Напряжение, гидравлические испытания существующей трещины, топография, анизотропия

DOI: 10.15372/FTPRPI20190205

Безопасность шахтеров нередко снижается из-за непредвиденных обрушений породы. Одна из основных причин обрушения — действующие в массиве напряжения. Понимание процесса изменения локальных напряжений и их влияния на уровень безопасности на рабочем участке весьма актуально. В настоящей работе описывается изменение действующих напряжений, влияющих на неравномерное распределение потенциально опасных нагрузок при проходке горных выработок в подземных условиях. Измерения напряжений выполнялись методом гидравлического разрыва пласта (ГРП) на различных глубинах в свинцово-цинковой шахте при проведении подготовительных работ, когда для исследований было доступно только несколько выработок, и после начала очистных работ из выработок, расположенных между отработанными и нетронутыми участками массива.

По данным измерений определены значения градиента напряжений, вызванных горными работами. Этот градиент значительно отличается от градиентов напряжений, измеренных до начала очистных работ. Установлено, что направление максимального горизонтального главного напряжения перпендикулярно простиранию рудного тела, в то время как до начала горных работ направление напряжения было параллельно простиранию. Измерения проводились

№ 2

в четырех точках. Полученные данные согласуются с ранее измеренными напряжениями при отработке рудного тела. Результаты исследований использовались при проектировании очистных забоев, выборе технологии работ и крепления горных выработок.

Компания Hindustan Zinc Limited, входящая в группу компаний Vedanta, специализируется на добыче, обогащении, переплавке, очищении и литье очищенного цинка и свинца. Она является лидером в Индии и занимает второе место в мире по производству этих металлов. Согласно целям компании по увеличению объемов продукции и повышению производительности труда, основной задачей является добыча полезных ископаемых с неосвоенных участков, расположенных под выработанными областями.

Исследования проводились на свинцово-цинковой шахте "Rajpura-Dariba", расположенной в деревне Дариба (Раджастан) (рис. 1). Шахта спроектирована с учетом блочной системы разработки с забоями, находящимися под выработанными участками.



Рис. 1. Расположение рассматриваемой области

Величина действующих в массиве напряжений — один из наиболее важных факторов при проектировании забоев, по которым определяется тип крепления, технология добычи, а также параметры забоя. Основные вмещающие породы — доломит и графит-слюдяной сланец. Главная залежь простирается на 1700 м и разделяется на два рудных массива (Северная и Южная залежь) участком пустой породы длиной 300 м. Эти формации протянулись с севера на юг с плавным уклоном в сторону востока. При добыче использовался вариант камерной системы отработки с кратерной отбойкой (VRM — Vertical retreat mining) на участках с мощностью рудного тела > 10 м, а именно на участках L1 Lens (100–180 mRL¹) и South (50–180 mRL); скважинная отбойка руды применялась на участках с мощностью рудного тела 8-15 м.

Для определения напряжений в окрестности горной выработки выполнялась детальная программа измерений при проведении подготовительных работ, т. е. до введения в эксплуатацию забоев между отметками 100 и 0 mRL. Измерения напряжений проводились на двух участках рудника, расположенных на разных по глубине уровнях с несхожими вмещающими породами, методом гидроразрыва из скважин, пробуренных из квершлагов.

¹mRL (meters Relative Level) — метры относительно принятого уровня. В качестве нулевого принят уровень глубиной 500 м относительно поверхности.



Рис. 2. Структурная схема шахты с указанием местоположений проведения эксперимента до и после начала очистных работ: *1* — измерения во время подготовительных работ; *2* — измерения во время очистных работ

Добыча до отметки 100 mRL завершена и в настоящее время ведется на отметках от 50 до 0 mRL. Планируется ввод в эксплуатацию участков, расположенных ниже отметки 0 mRL (рис. 2). Необходимо провести замеры напряжений после проведения очистных работ на выработанных участках для определения влияния этих напряжений на более глубоких горизонтах. Исследования должны проводиться на двух уровнях с различной вмещающей породой аналогично замерам, выполненным при проведении подготовительных работ. Измерение напряжений необходимо осуществлять методом гидроразрыва из пробуренных в массиве скважин.

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА И СТРУКТУРА ШАХТЫ

Шахта "Rajpura-Dariba" находится на южной оконечности металлогенического пояса Дариба-Бетхумни. Область, где располагается шахта, представляет череду метаосадочных пород, состоящих из кварц-слюдяного сланца, известкового биотитового сланца и графит-слюдяного сланца (от подошвы до кровли). На глубине пересечения графит-слюдяного сланца с известковым биотитовым сланцем встречается известково-силикатный доломит. Южная залежь имеет длину 500 м и простирается с севера на юг с уклоном $60-70^{\circ}$ в сторону востока. Длина Северной залежи 900 м, пролегает она с севера на юг с уклоном $70-75^{\circ}$ в сторону востока. Длина Восточной залежи 600 м также проходит с севера на юг с уклоном $60-70^{\circ}$. Она расположена на расстоянии 150 м от висячего крыла сброса Южной залежи. Средняя мощность Южной, Северной и Восточной залежей — 24, 18 и 18 м соответственно.

Скважинная отбойка руды применяется при малой мощности рудного тела, которая варьирует от 8 до 15 м. Общая длина простирающейся жилы разделена на участки длиной 20 м, составляющие первичный и вторичный участок разработки. Горные работы в забоях включают бурение скважин сверху вниз (115 мм) с верхнего уровня, а отбойка осуществляется противоположно разрезной выработке. После выемки руды проводится закладка забоев цементной смесью. На шахте "Rajpura-Dariba" скважинная отбойка применяется на Северной залежи на участках L2 L4 lens (200-375 mRL), на Восточной залежи (50-75 mRL) и на нижнем горизонте (-119 ± -55 mRL). Способ добычи по методике VRM используется при мощности массива > 10 м. На шахте "Rajpura-Dariba" он применяется на участке (100-180 mRL) и на Южной залежи (50-180 mRL). Забои, проводимые по падению, обуриваются скважинами большого диаметра (165 мм) с верхних горизонтов.

методология

В ходе измерений действующих напряжений использовалась модификация метода гидравлического разрыва пласта (испытание существующих трещин) при проведении подготовительных работ (100 и 0 mRL) и в процессе отработки рудного тела (-55 и -87 mRL).

Такая модификация имеет следующие преимущества:

• в отличие от других методик не требуется направленного бурения скважин, совпадающих по направлению с вектором главного напряжения;

• для оценки напряжений необязательно создавать новую трещину. Напряжение можно оценивать с помощью существующих или ранее созданных трещин [1].

Схема оборудования для гидравлического разрыва показана на рис. 3. Для последовательного образования/раскрытия трещин применялось устройство со сдвоенными пакерами. Оно состоит из узлового соединения длиной 200 мм и двух армированных металлическим кордом пакеров (длина 250 мм, Ø 42 мм, давление разрыва 70 МПа). Диаметр буровых скважин 48 мм. Управление устройством осуществлялось посредством подводящих трубок диаметром 32 мм и длиной 1500 мм (использовался один блок подачи давления в оболочки и в интервал разрыва). Максимальная производительность электрического насоса 10 л/мин, в качестве рабочей жидкости использовалась вода. Результаты каждого измерения фиксировались в режиме реального времени на цифровое устройство. После проведения испытаний в скважину помещался пакер, покрытый мягкой резиновой оболочкой, совмещенный с магнитным одноточечным инклинометром, чтобы получать информацию об ориентации следов трещины на стенках скважины.



Рис. 3. Схема оборудования для эксперимента

ОЦЕНКА НАПРЯЖЕНИЙ И ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Определение действующих в массиве напряжений выполнялось с учетом того, что известно место проведения измерений и наличие анизотропной породы. Вследствие указанных условий наблюдался большой разброс данных об ориентации трещин, что привело к невозможности использования классической теории измерительного гидроразрыва [2]. Анализ данных требует более сложного метода расчета, а именно интерпретации измеренных нормальных напряжений, действующих поперек произвольно-ориентированных плоскостей разрыва. В этом подходе используется давление запирания P_{si} для оценки нормальной компоненты напряжений при условии, что главная ось напряжений направлена по вертикали, а вертикальное напряжение σ_v равно весу вышележащих пород. Давление запирания определяется сразу после резкого падения давления в интервале разрыва, вызываемого отключением насоса. Среднее значение давления запирания рассчитывалось на основе результатов трех испытаний по кривой "давление–время" [3]. Напряжения, измеренные до и после начала очистных работ, приведены в табл. 1, 2.

ТАБЛИЦА 1. Напряжения до начала очистных работ

Параметр	100 mRL	0 mRL
Глубина залегания породы, м	404	504
Вертикальное напряжение σ_{ν} , МПа (плотность породы 2.8 г/с ³)	11.09	13.83
Минимальное горизонтальное главное напряжение σ_h , МПа	9.14 ± 0.89	11.38 ± 0.36
Максимальное горизонтальное главное напряжение $\sigma_{\scriptscriptstyle H}$, МПа	18.28 ± 1.78	22.76 ± 0.72
Направление максимального горизонтального главного напряжения	Север 10°	Север 30°
$K = \sigma_H / \sigma_v$	1.64	1.64

Коэффициент *К* повышается на отметке 1035 N с увеличением глубины залегания породы (при глубине залегания 557 м K=2.27, при 589 м K=2.36). На отметке 1150 N при глубине залегания породы 557 м K=1.20. Следовательно, вызванные горными работами напряжения не повлияли на этот участок так сильно, как на отметке 1035 N при одинаковой глубине залегания породы. Это может быть вызвано меньшей интенсивностью работ в забоях над измеряемым участком и его близостью с участком целика пустой породы, расположенным выше на отметке 180 mRL.

ТАБЛИН	A 2.	Нап	ряжения	после	начала	очистных	работ
1110011114		110011	princemin	1100010	114 14214	0 membra	pacer

Параметр	Горизонтальная скважина 1035 N	Вертикальная скважина 1035 N	Вертикальные и горизонтальные скважины 1150 N	– 87 mRL 1035 N
Глубина залегания породы, м	502+55=557			502 + 87 = 589
Вертикальное напряжение σ_{v} , МПа	14.74			15.58
Минимальное горизонтальное главное напряжение σ_h , МПа	15.63 ± 2.55	22.33 ± 0.80	11.83 ± 2.06	24.59 ± 2.71
Максимальное горизонтальное главное напряжение $\sigma_{\scriptscriptstyle H}$, МПа	23.45 ± 3.83	33.50 ± 1.20	17.74 ± 3.09	36.88 ± 4.06
Направление максимального горизонтального главного напряжения (север град)	120	120	110	120
$K = \sigma_H / \sigma_v$	1.59	2.27	1.20	2.36

Исходные напряжения, измеренные в 1994 г. на отметке 100 mRL (850 N и 950 N) при глубине залегания породы 404 м и на отметке 0 mRL (950 N) при глубине залегания 504 м, составили K=1.64. Ввиду того, что объем добычи увеличивается, величина горизонтальных напряжений на нижних горизонтах выше в сравнении с вертикальными. При этом возрастает значение K, что связано с изменением напряжений на отметках -55 и -84 mRL. Вертикальное напряжение не возрастает вследствие ведения очистных работ на участках. Сравнение градиентов напряжений до и после начала очистных работ представлено в табл. 3.

Параметр	До начала горных работ 100÷0 mRL	После ведения горных работ – 55 ÷ – 87 mRL	Примечание
Ориентация максимального главного напряжения σ_{H}	От 10 до 30°	От 110 до 120°	Изменение направления вызвано очистными работами
Градиент напряжений $\sigma_{\scriptscriptstyle H}$	0.0448Z + 0.1808 $R^2 = 1$	$\begin{array}{c} 0.0722Z - 12.686 \\ R^2 = 0.3644 \end{array}$	Изменение градиента напряжений вызвано очистными работами
Градиент напряжений $\sigma_{_h}$	0.0224Z + 0.0904 $R^2 = 1$	$\begin{array}{c} 0.0693Z - 20.756 \\ R^2 = 0.5336 \end{array}$	Изменение градиента напряжений вызвано очистными работами

ТАБЛИЦА 3. Сравнение градиента напряжений до и после начала очистных работ

выводы

Значение напряжений, вызываемых горной деятельностью, является основным критерием при проектировании рудников. В данном случае участок над исследуемой областью был полностью отработан, что повлекло изменение направлений действующих напряжений на нижних горизонтах, где планируется начало работ по добыче руды.

Сбор данных о напряжениях в массиве после выполнения горных работ поможет в изучении влияния их на происходящие изменения и будет использоваться при проектировании безопасной и оптимальной технологии добычи полезного ископаемого.

Авторы выражают благодарность управляющему и рабочему персоналу исследуемых участков на шахте "Rajpura-Dariba" компании HZL (Vedanta) за помощь в исследовании, а также руководителю Национального института механики пород за ценные советы и разрешение на публикацию данной работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Cornet F. H. Stress determination from hydraulic tests on pre-existing fractures the HTPF method, Proc. Int. Symp., Rock Stress and Rock Stress Measurements, CENTEK Publ., Lulea, 1986. P. 301–311.
- Hubbert K. M. and Willis D. G. Mechanics of hydraulic fracturing, Petroleum Transactions AIME, 1957, Vol. 210. — P. 153–166.
- 3. MeSy Code. Hydraulic fracture pressure and flow rate data analysis software user's manual, 1992.

Поступила в редакцию 18/IV 2018 После доработки 18/IV 2018 Принята к публикации 26/III 2019