

An analytical design method for stress state determination of tunnel linings of an arbitrary cross-section shape under the action of a normal load uniformly distributed along a part of the lining internal outline is proposed. The method is based on a solution of the corresponding elasticity theory problem. The example of the design is given.

Key words: tunnel lining, design, normal load, elasticity theory, method.

Получено 20.04.11

УДК 622.341.1:622.273.21

С.В. Сергеев, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой, (4722) 30-11-61,
sergeev@bsu.edu.ru,

Д.А. Зайцев, асп., zossen45@yandex.ru (Россия, Белгород, НИУ «БелГУ»)

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЗАКЛАДОЧНОГО МАССИВА ПРИ СЛОЕВОЙ СИСТЕМЕ РАЗРАБОТКИ БОГАТЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ РУД

Рассмотрены методы контроля деформирования закладочного массива при отработке богатых железных руд в условиях Яковлевского месторождения. Предложены новые пути решения реализации системы наблюдений за напряженно-деформированным состоянием искусственного массива

Ключевые слова: богатые железные руды, закладочный массив, деформации, преобразователь

В настоящее время в пределах Центрального участка Яковлевского месторождения осуществляется строительство Яковлевского подземного рудника. Горные работы ведутся на глубине более 600 метров при существовании над рудным телом системы недренированных напорных водоносных горизонтов. Как установлено результатами опытного и опытно-производственного водопонижений [1], а также по материалам гидрогеологических наблюдений [2], в формировании водопритоков к подземным горным выработкам участвуют рудно-кристаллический и нижнекаменноугольный водоносные горизонты.

С целью обеспечения безопасности ведения подземных горных работ в сложных горно-геологических и гидрогеологических условиях Яковлевского железорудного месторождения проектом решена отработка месторождения слоевой системой с нисходящим порядком и закладкой выработанного пространства твердеющими смесями. Основной задачей принятой системы является предупреждение усиления гидравлической связи между рудным массивом и перекрывающим его нижнекаменноугольным водоносным горизонтом. В дополнение к этому в соответствии с исследованиями [3, 4] между подошвой карбона и верхней границей очистных работ предусмотрен предохранительный рудный целик мощностью 65 м. Такая схема работ должна предотвратить развитие в водоупорных от-

ложениях критических деформаций, способных стать причиной образования водопроводящих трещин.

Расчеты сдвижения, выполненные в работе [5], показали, что при эффективной мощности 2 м деформации подошвы нижнекаменноугольных отложений, расположенной на отметке минус 300 м, не достигают критических величин. Следовательно, если при отработке каждого слоя добавляемая эффективная мощность не будет превышать 0,2 м, что возможно при соблюдении технологической дисциплины, безопасность отработки вскрытых запасов будет обеспечена.

Однако все оценки, в том числе и критические деформации подошвы нижнекаменноугольных отложений, получены расчетным путем, т. е. не исключены ошибки как в сторону завышения, так и в сторону занижения предельно допустимой эффективной мощности. Поэтому для обеспечения безопасности ведения горных работ фактически под водоносным объектом (СНиП 2.06.14-85) необходим комплексный мониторинг геологической среды. Наряду с системой геомеханических и гидрогеологических наблюдений для обеспечения информационной эффективности мониторинга в его состав должен входить контроль деформирования создаваемого закладочного массива.

Как показывает опыт горных работ на Яковлевском руднике, существенным недостатком нисходящей слоевой системы является образование пустот от 0,1 до 0,5 м в кровле закладываемых выработок. Это в основном обусловлено технологическим недозакладом и в значительно меньшей степени - процессом усадки и компрессионным сжатием закладочного материала. Данная ситуация может привести со временем к активизации процесса сдвижения в подрабатываемой толще заложеного пространства и негативно сказаться на безопасности горных работ. От успешного решения организации контроля напряженно-деформированного состояния закладочного массива во многом зависят технико-экономическая эффективность и безопасность дальнейшей отработки Яковлевского месторождения.

Как известно, наиболее достоверные оценки процессов деформирования формируемого искусственного массива дают экспериментальные наблюдения. Рекомендующим оптимальным методом наблюдений является применение скважинных инклинометрических измерений. В исследуемом массиве поперек предполагаемого направления перемещений бурят наблюдательную скважину и обсаживают гибкими трубами. При деформации обсадные трубы скважины перемещаются и искривляются согласно общему деформированию массива. Путем нескольких серий измерений отклонения трубы от ее первоначального положения (изменения зенитных и азимутальных углов) с помощью инклинометра могут быть получены величина, направление и скорость возникающих перемещений для каждой замерной точки. Данный метод прошел успешную апробацию при подземной отработке запасов на руднике «Интернациональный» АК «Алроса»,

где используется слоевая нисходящая система отработки по камерно-целиковой схеме выемки слоя с твердеющей закладкой выработанного пространства [6].

На руднике «Интернациональный» для контроля вертикальных сдвижений закладочного массива использовался разработанный ИГД СО РАН малогабаритный зонд, выполненный с использованием двух перпендикулярно расположенных датчиков углов наклонов – инклинометров. Он позволяет вести наблюдения в субгоризонтальных скважинах и контролировать вертикальные смещения подрабатываемой толщи закладки [7]. Первый датчик, установленный в плоскости продольной оси измерительного зонда, является основным измерительным элементом, обеспечивающим измерения углов наклона обсадной трубы в вертикальной плоскости. Второй расположен ортогонально первому и используется для установки зонда в вертикальной плоскости. Сигналы от датчиков поступают на устройство преобразования аналоговых сигналов и передачи данных в цифровом виде по каналу в персональный переносной компьютер. В процессе измерения зонд вставляется в обсадную трубу и продвигается по всей длине скважины путем наращивания досылочных штанг. Через одинаковые интервалы программно снимаются и записываются в файл значения вертикальных углов при движении зонда в направлениях «прямо» (от устья к забою скважины) и «обратно».

В условиях рудника «Интернациональный» используемая конструкция малогабаритного зонда позволила обеспечить с достаточной для практических целей точностью наблюдение за сдвижением закладочного массива при его подработке, при этом среднеквадратическая ошибка определения вертикальной отметки при длине измерительной скважины 45 м составила около 30 мм.

Для Яковлевского рудника применение метода скважинной инклинометрии представляется весьма непростой задачей. Значительная протяженность горизонтальных очистных выработок (до 250 м) с переменными углами наклона ($\pm 3^\circ$), крепление арочной трехзвенной податливой крепью типа КМП-А3 из спецпрофиля СВП-22 и армировка вертикальной арматурой диаметром 12...14 мм не позволят выбурить горизонтальную скважину в закладочном массиве.

Среди новых путей решения реализации системы наблюдений за напряженно-деформированным состоянием искусственного массива в условиях Яковлевского рудника достаточно перспективным является использование тензометрических методов. Их применение позволяет производить прямое измерение деформаций и последующий расчет по ним напряжений. С помощью данных методов определяются абсолютные значения напряжений в исследуемом массиве и их изменение во времени. В качестве основных средств измерений используются закладные измерительные преобразователи или датчики. Информативным параметром сигнала является

частота переменного напряжения на выходе преобразователя. В качестве преобразовательного элемента чаще всего используются унифицированные струнные виброчастотные преобразовательные модули, работающие в режиме затухающих колебаний.

Установление величин линейных деформаций в напряженном закладочном массиве с помощью струнных преобразователей, основано на измерении расстояния между двумя анкерами преобразователя предварительно помещенными в литую закладочную смесь. Деформация напряженного элемента вызывает взаимное смещение связанных с ним анкеров преобразователя, между которыми расположен струнный резонатор. Он представляет собой натянутую стальную струну вдоль продольной оси преобразователя, совершающую свободные затухающие синусоидальные колебания. Резонатор приводится в колебательное движение с помощью возбудителя колебаний, функции которого выполняет электромагнитное устройство.

При воздействии измеряемой силы на преобразователь, струнный резонатор подвергается растяжению или сжатию, что приводит к изменению частоты собственных колебаний резонатора, которая измеряется вторичным регистрирующим прибором. По изменению частоты судят об измеряемом усилии растяжения или сжатия. Датчик представляет собой стальную трубку, на концах которой закреплены анкерные диски. С помощью этих дисков преобразователь связывается с закладочным массивом. Внутри корпуса по оси его натянута струна и расположен электромагнит. Прибор герметичен и выдерживает давление до 25 атм.

Натурное изучение напряженно-деформированного состояния закладочного массива встречает определенные трудности. Значимым свойством закладочной смеси, которое необходимо учитывать в расчетах, является наличие деформаций не связанных с действующими нагрузками. С момента поступления в выработку в закладке возникают объемные деформации, связанные с физико-химическими процессами, сопровождающими гидратацию цемента. Эти деформации могут продолжаться в течение длительного времени. В дальнейшем объемные деформации продолжаются за счет изменений температуры и влажности. Мерой по их учету является применение так называемого «усадочного цилиндра», что широко используется при исследованиях напряжений и деформаций бетона гидротехнических сооружений. Так же он был впервые применен при изучении состояния крепи вертикальных горных выработок – стволов Яковлевского рудника [8]. Его суть заключается в следующем. Преобразователь, заложный при заливке закладочной смесью, фиксирует все деформации на длине своей базы и в направлении своей оси. Разность отсчетов по прибору, взятых в начале и в конце некоторого отрезка времени, представляет собой приращение деформации закладочной смеси, вызванной суммарным влиянием указанных выше факторов за рассматриваемый отрезок времени.

При медленном приложении нагрузки и длительных наблюдениях в измеренную деформацию войдут, наряду с упругой и пластической, также температурно-усадочные. Чтобы использовать относительную деформацию, измеренную преобразователями, для вычисления напряжений необходимо из суммарной деформации вычесть свободную объемную деформацию закладочной смеси. Разность показаний рабочих преобразователей и преобразователей в усадочных цилиндрах в каждый момент времени соответствует деформации, вызванной действующим в данной точке напряжением.

Рекомендуется следующий порядок использования тензометрической аппаратуры. Для наблюдений за деформированием защитной потолочины (нулевой слой), а также последующих рабочих слоев производится заложение нескольких измерительных тензометрических комплексов. В состав комплексов включаются датчики типа ПЛДС (преобразователь линейных деформаций струнный) и ПТС (преобразователь температуры струнный). Три-четыре измерительных комплекса установленные в одной очистной заходке представляют собой профильную линию, пересекающую площадь блока на всю ширину рудного тела. Установленные преобразователи располагают в трех наблюдаемых направлениях деформирования закладочного массива: вдоль оси выработки, поперек оси и вертикально, кроме того, один датчик ПЛДС входит в состав усадочного цилиндра. На месте системы преобразователей линейных деформация контролируют температурный режим закладочного массива. Изучение температуры твердения позволяет установить влияние разогрева массива на скорость гидратации и соответственно на скорость набора прочности закладочным массивом, что важно для определения начала отработки присечной заходки и нижележащего слоя.

Таким образом, использование тензометрических методов контроля деформирования закладочного массива позволяют долговременно и дистанционно получать данные изменения напряженно-деформированного состояния при слоевой системе разработки. Опыт использования тензометрических комплексов, установленных в очистных заходках одного из эксплуатационных блоков Яковлевского рудника, подтверждает перспективность использования выбранного метода контроля при разработке богатых железных руд в сложных горнотехнических и гидрогеологических условиях КМА.

Список литературы

1. Анализ результатов режимных гидрогеологических наблюдений на Яковлевском железорудном месторождении в связи с отключением водопонижающих скважин на карбон и уточнение фильтрационных парамет-

ров водоносных горизонтов: отчет о НИР (заключительный) / НТЦ «НОВОТЭК»; рук. работ Л.А. Еланцева. Белгород, 1995. 44 с.

2. О гидрогеологических и инженерно-геологических работах за 2010 год (мониторинг подземных вод): отчет / ООО «Металл-групп»; рук. работ А.И. Лябах, Д.А. Зайцев. п. Яковлево, 2011. 21 с.

3. Выполнить обоснование безопасных условий отработки Яковлевского железорудного месторождения под неосушенным нижнекарбонным водоносным комплексом без сооружения водонепроницаемых перемычек. Согласование результатов в Госгортехнадзоре России: отчет о НИР / НТЦ «НОВОТЭК»; рук. работ Г.Н. Гензель. Белгород, 2004. 122 с.

4. Научное сопровождение строительства и ввода в эксплуатацию Яковлевского рудника. Этап 2. Экспертная оценка и анализ принятых ранее решений по гидрогеологической защите горных работ и предотвращению внезапных прорывов воды в горные выработки. Разработка рекомендаций по выбору системы разработки для участка первоочередной отработки рудного тела: отчет о НИР / СПГТИ им. Г.В. Плеханова (ТУ); рук. работ В.Л. Трушко. СПб., 2003. 162 с.

5. Обоснование безопасных и эффективных условий отработки Яковлевского железорудного месторождения под водоносным горизонтом: отчет о НИР / ИЭЦ ИГД УрО РАН; Рук. работ О.В. Зотеев, А.Б. Макаров. Екатеринбург – М. 2008. 110 с.

6. Смирнов А.А., Крамсков Н.П. Предложения по подземной отработке подкарьерных запасов трубок «Интернациональная», «Мир» и «Удачная» // Актуальные проблемы разработки кимберлитовых месторождений: современное состояние и перспективы решения: сб. докл. Международной научно-практической конференции «Мирный-2001», 1-9 июля 2001 г. М.: Изд-во «Руда и металлы», 2002.

7. Барышников В.Д., Барышников Д.В., Качальский В.Г. Опыт применения инклинометрического метода для контроля за сдвигами складочного массива при подземной разработке месторождений // ГЕО-Сибирь-2007/ СГГА. Новосибирск, 2007.

S.V. Sergeev, D.A. Zaytsev

*ADVANCED METHODS OF CONTROL OF DEFORMATION BACKFILL MASS
IN LAYERS OF SYSTEM DEVELOPMENT GRADE IRON ORE*

Possible methods to control the deformation backfill mass when developing the rich iron ore in the Jakovlevsky deposit. We propose new solutions to the implementation of the observing system for the tense-but-strain state of artificial array.

Key words: rich iron ores, backfill mass, deformations, converter.

Получено 20.04.11