

УДК 622.7:621.796

В.В. Цветков, В.А. Исаев

**ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ
ЗАКЛАДКИ ПОДЗЕМНОГО ВЫРАБОТАННОГО
ПРОСТРАНСТВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ХВОСТОВ
ОБОГАЩЕНИЯ РУД НА ЖЕЗКАЗГАНСКОМ
МЕСТОРОЖДЕНИИ**

Закладка выработанного пространства Жезказганского месторождения является давно назревшей проблемой, актуальность которой определяется большими запасами руды, потерянными в целиках, поддерживающими налегающую толщу, а также необходимостью погашения накопленных открытых выработанных пространств, что предусмотрено «Концепцией дальнейшей эффективности и безопасности разработки Жезказганского месторождения в сложившихся горнотехнических и геомеханических условиях». За период эксплуатации Жезказганского месторождения с 1928 года в недрах было оставлено в виде потерь 145,1 млн т руды со средним содержанием меди 1,55 %, причем около 70 % всех потерь руды сосредоточены в целиках различного назначения.

Со временем, а также под влиянием горных работ в междукамерных целиках накапливаются хрупкие разрушения, что приводит к внезапным обрушениям налегающей толщи.

В настоящее время при разработке руд Жезказганского месторождения, как правило, применяются технологические варианты систем отработки с закладкой выработанного пространства с использованием подобранных, оптимальных для применяемых материалов, составов закладочных смесей. Обязательным

компонентом в применяемых закладочных смесях является цемент [1].

Для уменьшения материальных и трудовых затрат с применением твердеющей закладки, рассмотрим вариант с использованием гидравлической закладки выработанного пространства.

Гидравлическая закладка, поступающая в подземные выработанные пространства – это хвосты обогащения в виде пульпы, состав которой на 40-55 % состоит из твердых частиц. Размеры 68-80 % твердых частиц составляют -74 микрона. Содержание SiO₂ в общем объеме твердых веществ составляет 60-70 %.

Технология закладки основана на сгущении текущих хвостов в батарее гидроциклонов и транспортировку по пульповоду с подачей в закладываемые панели трубопроводом со скважин.

Использование гидравлической закладки позволит, увеличить продолжительность заполнения действующего хвостохранилища вследствие сокращения объемов складирования хвостов обогатительной фабрики (тем самым увеличить срок его эксплуатации) по существующим коммуникациям с корректировкой схемы подачи трубопровода и с применением автоматизированных систем управления и контроля.

Следствием предлагаемого технологического варианта является также улучшение экологических условий на действующем

щем предприятии за счет утилизации хвостов обогащения.

Вещественный и минералогический состав хвостов обогащения Жезказганских руд

Твердая фаза хвостов имеет следующий вещественный состав:

SiO₂ – 66 %; Al₂O₃ – 12 %; CaO – 5,6 %; MgO – 1,1 %; Fe₂O₃ – 2,3 %; S – 0,2 %; Cu – 0,1 %; Pb – 0,05 %; Zn – 0,07 %.

В минералогическом составе обломочной части хвостов преобладают кварц, опал, халцедон: они составляют 60-70 %. Кальцит содержится в меньшем количестве – 20-30 %; хлорит, серицит – 10-15 %; в незначительном количестве присутствует барит и полевой шпат (единичные, редкие обломки).

Для установления особенностей минералогического состава хвостов обогащения был выполнен рентгенофазовый и термографический анализ текущих хвостов.

Рентгенофазовый анализ выполнен на дифрактометре Дрон 2.0, а дифференциально-термический и термогравиметрический анализ на дериватографе Q – 1500Д.

В результате проведенных исследований установлено, что среди значимых составляющих (в количестве ≥ 5 %) в состав хвостов кроме кварца и минералов группы плагиоклазов входят также и алюмосиликаты, близкие по составу к пиррофиллиту Al₂[Si₄O₁₀] · (OH)₂, то есть минералы, в состав которых входит химически связанная влага [2]. Такие соединения в тонкодисперсном состоянии с течением времени способны к спонтанной дегидратации и образованию более простых алюмосиликатов. Анализ термогравиметрических кривых показал, что для исследуемых хвостов характерно наличие конституционной и химически связанной влаги в количестве ~ от 4 до 5 %.

Рудные минералы представлены, в основном, пиритом и в небольшом количестве (до 2-х %) халькопиритом и борнитом. Большинство свободных зерен сульфидов (пирит, халькопирит) окислены до рыхлых бурых гидрооксидов железа.

Содержание твердой фазы в хвостах составляет 17-22 %.

В соответствии с приведенными данными можно заключить, что высокое содержание оксидов Si, Al, Mg, Ca – в хвостах (> 80 %), а также отсутствие вредных примесей, таких как цианиды и другие ядовитые вещества, позволяет считать хвосты обогащения пригодными для закладочной смеси.

Исследование твердофазных реакций между компонентами закладочной смеси

Ряд компонентов закладочной смеси, присутствующих в виде свободных минералов и химических соединений в тонкодисперсном состоянии (SiO₂, CaO, MgO, MnO, Al₂O₃, Fe₂O₃, FeO и др.), в соответствии с термодинамической теорией твердофазных реакций могут вступать во взаимодействие с образованием вторичных соединений [3]. В таблице приведены некоторые вероятные реакции взаимодействия между компонентами закладочной смеси и соответствующие им температурные интервалы.

Как следует из таблицы, в исследуемой нами закладочной смеси вероятен целый ряд твердофазных реакций между ее компонентами с образованием вторичных соединений, обладающих вяжущими свойствами, причем эти реакции могут протекать, начиная с комнатной температуры.

Вероятные твердофазные реакции в закладочной смеси

Реакция	Температурный интервал, К
CaO + SiO ₂ → CaSiO ₃	298 - 1483
2CaO + SiO ₂ → Ca ₂ SiO ₄	298 - 1700
BaO + SiO ₂ → Ba SiO ₃	298 - 1600
2FeO + SiO ₂ → Fe ₂ SiO ₄	298 - 1692
MgO + SiO ₂ → Mg SiO ₃	298 - 1747
2MnO + SiO ₂ → Mn ₂ SiO ₄	298 - 1600

Схемы перемещения частиц A и B при их химическом взаимодействии в порошкообразной смеси A+B

На основании ряда справочных данных, а также специальных исследований подобных систем по литературным данным, нами выполнена приближенная оценка степени превращения для твердофазной реакции между оксидами кальция и кремния с образованием однокальциевого силиката (CaSiO_3).

Кинетика изучаемого процесса является диффузионной, т.е. скорость реакции в исследуемых твердых смесях ограничивается скоростью внутренней диффузии по меньшей мере одного из реагентов в зоне реакции через слой продукта, образующийся на зернах другого реагента. В нашем случае кинетика процесса может быть описана уравнением[4]:

$$I(G) = 1 + (1-G)^{\frac{2}{3}} - 2(1-G)^{\frac{1}{3}} = \frac{K_{\text{я}}^2 \cdot \tau}{R_3^2} = K_{\text{я}}' \cdot \tau \quad (1)$$

где $I(G)$ – функция степени превращения; G – степень превращения вещества, поверхность которого лимитирует скорость процесса; R_3 – первоначальный радиус зерен "покрываемого" реагента; $K_{\text{я}}$ – константа зависящая от условий процесса; τ – время.

При этом степень превращения (G) по определению:

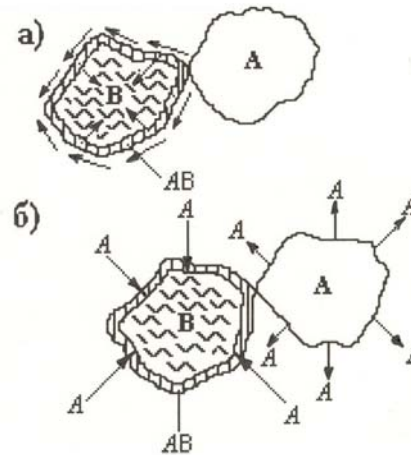
$$G = \frac{R_3^3 - (R-x)^3}{R_3^3} \quad (2)$$

где x – толщина шарового слоя зерен, превращенного продукта.

Так как процесс протекает в диффузионной области, то его скорость можно определить величиной коэффициента диффузии:

$$K = D = A \cdot e^{\frac{-Q}{RT}} \quad (3)$$

где D – коэффициент диффузии; A – зависит от частоты колебаний структурных элементов кристаллической решетки и



средних расстояний между их соседними положениями равновесия; Q – энергия "разрыхления" решетки, которая зависит от сил связи между ее структурными элементами. В частности, для реакции $\text{CaO} + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{CaSiO}_3$, $Q = 54.0$ кал/моль. Отметим также, что для диффузионного процесса, характеризующегося обычно малой энергией активации, его скорость меняется с температурой примерно на 10-40 % при изменении температуры на 10° (кажущаяся энергия активации).

В рассматриваемом случае возможны два варианта симметричной диффузии и массопередачи. По первому варианту (рис. 1, а) частицы перемещаемого реагента через участки непосредственного контакта между зернами переходят на поверхность слоя кристаллического продукта, покрывающего зерна другого реагента. Затем частицы перемещаются по этой поверхности, полностью окружают ее, после чего равнодоступно диффундируют к непрореагировавшей части "покрываемого" реагента через слой кристаллического продукта реакции. Во втором варианте (рис. 1, б) частицы перемещаемого вещества каким-либо образом отрываются от поверхности зерен, проходят расстояние, отделяющее их от зерен второго реагента (внешняя диффузия), а затем, как и в первом варианте, проходят слой кристалличе-

ского продукта реакции (внутренняя диффузия).

Так как $x = K \cdot \sqrt{\tau}$, где x - толщина слоя продукта; τ - время; K - константа, зависящая от свойств реагентов и условий процесса, то $x^2 = K_1 \cdot \tau$.

В то же время

$$x = R_3 \cdot (1 - \sqrt[3]{1 - G}), \quad (4)$$

тогда для изотермического протекания процесса получим:

$$R_3 \cdot (1 - \sqrt[3]{1 - G}) = K_2 \cdot \tau \cdot e^{-\frac{Q}{RT}} \quad (5)$$

Таким образом, из уравнения (5) можно рассчитать степень превращения (G) для исследуемой реакции.

$$G = 1 - \left(1 - \frac{K_{\text{диф}} \times \tau \times e^{-\frac{Q}{RT}}}{R_3}\right)^3 \quad (6)$$

В принятой нами модели $R_3 = 50 \text{ мкм} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ - размер зерен участвующих в реакции компонентов; $K_{\text{диф}} = 2 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{сутки}$ - коэффициент пропорциональности, равный коэффициенту диффузии (выбран на основании литературных данных по подобным реакциям); $Q = 54 \text{ кал/моль}$ (для реакции $\text{CaO} + \text{SiO}_2 \rightarrow$

CaSiO_3); $T = 350 \text{ К}$; $R = 8,3145 \text{ Дж/моль} \cdot \text{К}$; $\tau = 365 \text{ суток}$.

Оценка степени превращения однокальциевого силиката, в соответствии с принятой моделью, показывает, что в течение года она может достигать значений в пределах 1-3 %. Учитывая, что в исследуемой системе вероятны и ряд других реакций между ее компонентами, можно предположить, что образующиеся вторичные соединения, в том числе обладающие вяжущими свойствами, в целом на протяжении 2-3-х лет, когда степень превращения составит не менее 10 %, позволят всю закладочную смесь считать монолитной единой системой, обладающей достаточными прочностными характеристиками.

Таким образом, можно считать, что процесс твердения закладочной смеси на основе тонкодисперсных хвостов обогащения обусловлен твердофазными реакциями между компонентами этой смеси с образованием в течение нескольких лет достаточно прочного монолитного агрегата, обеспечивающего устойчивость налегающей толщи пород.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Большой Жезказган. Под редакцией В.И. Урумова. Алма-Ата, 1994. - 53 с.
2. Термический анализ минералов и горных пород. В.П. Иванова, Б.К. Касатов, Т.Н. Красавина и др. - Л.: Недра, 1974. - 399 с.
3. Твердофазные реакции. Третьяков Ю.Д. М.: Химия, 1978. - 360 с.
4. Реакции в смесях твердых веществ. Будников П.П., Гистлинг А.М. - М.: Изд-во лит. по строительству., 1965. - 474 с.

Коротко об авторах

Цветков В.В. - инженер,
Исаев В.А. - кандидат технических наук, доцент, кафедра «Физика горных пород и процессов»,
Московский государственный горный университет.