

ТЕХНИКА ГЕОЛОГО-РАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ

УДК 622.7:534

Е.Г. ФОНБЕРШТЕЙН, С.П. ЭКОМАСОВ

**МЕХАНИЗМ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОЛЕЙ УПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ
НА РУДНЫЕ ЗАКЛАДКИ ПРИ ЧАНОВОМ ВЫЩЕЛАЧИВАНИИ РУД**

Рассмотрены эффекты взаимодействия упругих волн частотой 10—400 Гц с многокомпонентной (минеральной газожидкостной) средой. Дана оценка влияния параметров волн на структуру и физико-механические свойства рудных закладок при чановом выщелачивании руд. Приведено математическое описание механизмов взаимодействия рудных частиц в зоне волнового поля и миграции газовых образований.

Основные причины неоднородности поля фильтрации в массиве рудных закладок — образование застойных зон в результате миграции иловых частиц фильтрующими растворами; формирование застойных зон и так называемых коротких токов растворов за счет неравномерности укладки руды; газовая кольматация массива руды вследствие формирования большого количества воздушных пустот в массиве при его укладке. Неоднородность поля фильтрации растворов даже при высоких скоростях фильтрации приводит к снижению полноты проработки растворами массива руды и, следовательно, снижению извлечения металла из руды.

Предварительный анализ показал, что в первую очередь следует решить задачи: создания однородного поля фильтрации растворов с необходимыми скоростями фильтрации 3—5 см/ч и более; достижения минимальных значений остаточной влажности рудной закладки после выпуска из нее продуктивных растворов.

Авторы рассмотрели возможные методы решения этих задач посредством наложения на массив рудной закладки полей упругих колебаний частотой до 10^3 Гц, генерируемых вибрационным или импульсным источником.

Необходимо отметить, что физические явления, сопровождающие процессы генерирования волновых полей в минеральных средах, определяют необходимость максимального предварительного влагонасыщения рыхлой породы. В противном случае практически исключаются условия распространения упругих волн в массиве. В этой связи рассмотренные методы интенсификации процессов выщелачивания металлов из руд относятся

главным образом к чановому фильтрационному выщелачиванию.

При изучении кинетики перестройки или разрушения минеральных сред широко используются их реологические характеристики. Основной аппарат исследования реологических свойств минеральных смесей, как и других сред, — качественный анализ их механических моделей. При этом абстрагируются и сознательно упрощаются свойства реальных сред за счет исключения второстепенных свойств и учета только основных. Задача реологических исследований — изучение процессов деформирования материалов с течением времени.

Основная технологическая задача вибрационного или импульсного воздействия на рудную закладку — приведение ее в состояние течения с целью достижения однородного поля фильтрации и удаления из нее крупных воздушных пузырей. Процесс вибрационного или импульсного нагружения можно разделить на три стадии, отличающихся по характеру поведения среды. На первой происходит переукладка минеральных частиц, так как начальному состоянию среды свойственно случайное распределение их и воздушных пузырьков, занимающих 20—30 % объема. Подобное строение с позиций реологии можно классифицировать как систему с неустойчивой структурой и преимущественным влиянием сил сухого трения. В результате переукладки частиц система приобретает устойчивую структуру. Вторая стадия характеризуется образованием сольватных оболочек, выделением жидкой фазы и обволакиванием ею поверхности минеральных частиц. Эту систему можно представить в виде смеси частиц со смазкой. Здесь преобладают силы вязкого трения, а смесь приобретает

свойства текучести. При этом формируется однородное поле фильтрации. На третьей стадии удаляются воздушные включения.

Каждая стадия отличается физико-механическими явлениями, протекающими в смесях, и требует оптимальных режимов динамического воздействия. Представление о вибрационном или импульсном воздействии на минеральную среду как непрерывного динамического процесса с плавным изменением реологических свойств системы позволяет исследовать механизм трансформации сил сухого трения в вязкое, возникновение упругих и диссипативных сил, условия снижения вязкости смеси. При этом появляется возможность решения технологических задач за счет использования рациональных режимов воздействия.

Результаты многочисленных исследований уплотнения бетонных смесей [1], которые по granulометрическому составу и отношению жидкой и твердой фаз близки к рудным закладкам, свидетельствуют, что начальный этап динамического воздействия характеризуется наличием в системе преимущественно кулоновского трения, а реологическое состояние описывается моделью с сухим трением. Эффект уплотнения здесь достигается в результате необратимого сдвига (проскальзывания) одних частиц относительно других, сопровождающегося значительной диссипацией энергии. Длительность этого этапа зависит как от амплитудно-частотных характеристик динамических воздействий, так и от granulометрического состава и плотности рудной закладки. С увеличением максимального размера минеральных частиц и снижением плотности укладки (увеличением количества заземленного воздуха) продолжительность этапа возрастает. Здесь целесообразны низкочастотные и высокоамплитудные воздействия, так как среда характеризуется при этом высокой степенью затухания колебаний. Полное затухание свободных колебаний в такой среде регистрируется в течение 1—4 периодов.

С продолжением силового импульсного воздействия рудная закладка переходит в другую фазу. Ей присущи трансформация сухого трения в вязкое, увеличение упругих сил. Силы внутреннего трения уменьшаются за счет различия градиента скоростей колебаний частиц руды. Отдельные частицы рудной закладки перемещаются относительно друг друга, занимая положение, при котором объем системы становится наименьшим. Изменения в скоростях колебаний различных по крупности частиц объясняются сдвигом их фаз колебаний, наличием воздушных включений. На этой стадии реологические свойства характеризуются двумя параметрами — предельным напряжением сдвига и пластической вязкостью (модель Бингама). До достижения предела текучести среда представляется упругим телом, а при превышении такого предела она ведет себя подобно вязкой жидкости.

Заключительной фазе второй стадии в большей степени отвечает упруговязкая модель Кельвина—Фойгта: напряжение складывается из упругой части, пропорциональной деформации среды, и

вязкого напряжения, пропорционального скорости деформации.

После приложения нагрузки деформация, отставая от нее по времени возрастает, асимптотически приближаясь к равновесному значению. После снятия нагрузки (до $\sigma = 0$), деформация снижается по экспоненте $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot e^{-\psi/t}$. Здесь постоянная ψ соответствует времени запаздывания изменения деформации относительно напряжения, ε_0 — исходная деформация.

Закономерности изменения реологических характеристик, например, коэффициента вязкости, предельного напряжения сдвигу, определяются режимами динамического воздействия на рудную закладку. Известно, что при приложении к линейному вязкоупругому материалу синусоидально изменяющегося напряжения изменение деформации во времени будет также синусоидальным, но со сдвигом по фазе. Отношение амплитуд напряжения к результирующей деформации, а также сдвиг фаз (φ) между ними в каждый отрезок времени характеризуют реологическое состояние смеси.

С изменением деформации по синусоидальному закону $\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \cdot \sin \omega \cdot t$ для деформаций и напряжений сдвига имеем:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 [\sin(\omega \cdot t + \varphi) \cdot \cos \varphi - \cos(\omega \cdot t + \varphi) \cdot \sin \varphi],$$

$$T(t) = G \cdot \varepsilon_0 \cdot [\sin(\omega \cdot t) + \lambda \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t)], \operatorname{tg} \varphi = \lambda \cdot \omega, \quad (1)$$

где $\varepsilon, \varepsilon_0$ — деформации; t — напряжение сдвига; G — модуль сдвига; $\lambda = \eta/G$, η — коэффициент вязкости.

Таким образом, результирующее напряжение зависит как от частоты нагружения, так и от амплитуды деформирования.

Решение системы (1), приведенное в [3], показало, что вязкие свойства среды проявляются в большей степени под влиянием частоты колебательного процесса. Параметры продольной волны в среде, аппроксимируемой моделью Кельвина—Фойгта, описываются выражением [2]:

$$(\lambda + 2\mu) \frac{\partial^2 U_x}{dx^2} + (\lambda' + 2\mu') \frac{\partial^3 U_x}{dt \cdot dx^2} = \rho \frac{\partial^2 U_x}{dt^2}, \quad (2)$$

где λ — параметр Ламе, $\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}$; E — модуль продольной упругости; ν — коэффициент Пуассона; U_x — смещение частиц в волне; μ — модуль сдвига; λ', μ' — параметры, характеризующие потери энергии; ρ — плотность среды.

$$a_p = \left[\frac{\omega_0}{2(M/\rho)^{1/2}} \right] \left(\frac{\omega^2}{\omega_0^2} \right), \quad (3)$$

$$c_p = \left(\frac{M}{\rho} \right)^{1/2}. \quad (4)$$

Здесь $M = \lambda + 2\mu$; $\omega_0 = M/M'$; $M' = \lambda' + 2\mu'$.

Таким образом, поглощение сигнала в среде рудной закладки на рассматриваемой стадии растет пропорционально квадрату частоты, а скорость

волны постоянна. Свободное движение системы представлено затухающими колебаниями. Величина коэффициента затухания по мере уплотнения рудной закладки в результате удаления воздушных включений уменьшается. Низкие значения этого коэффициента характерны и для смесей с меньшим градиентом изменения размеров частиц смеси. Уменьшение коэффициента затухания колебаний (демпфирования) приводит к увеличению зоны активной проработки рудной закладки единственным источником колебаний.

Невысокая плотность смеси, характерная для начального состояния рудной закладки, приводит к интенсивному затуханию высокочастотных составляющих колебаний. Поэтому для рассматриваемого этапа наиболее целесообразны колебания низкочастотные. Высокоамплитудные низкочастотные колебания ускоряют процесс перестройки среды с трансформацией сухого трения в вязкое. В этих условиях механизм взаимодействия рудных частиц и заполнителя (среда, обволакивающая частицу и состоящая в основном из более мелких частиц и жидкости) меняется.

Формула Лэмба для шара, колеблющегося по гармоническому закону в вязкой несжимаемой жидкости, имеет вид:

$$D = 3\pi\eta R_0 \left(1 + R_0 \sqrt{\frac{1}{2} \frac{\omega}{\nu}}\right) \cdot \left(\frac{da_c}{dt}\right)^2. \quad (5)$$

Здесь D — отнесенные к единице времени затраты энергии колебаний шара; ν — коэффициент кинематической вязкости; $\nu = \frac{\eta}{\rho_c}$; R_0 — радиус шара; a_c — смещение среды.

Дифференцирование (5) дает уравнение для силы сопротивления колебаниям частицы в волновом поле вязкой среды:

$$F_c = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r_v \left(1 + r_v \sqrt{\frac{\rho_0 \omega}{2\eta}}\right) \cdot \frac{da}{dt}. \quad (6)$$

Уравнение движения частицы имеет вид:

$$\left[\alpha(M_0 + M_{II}) - 6\pi \cdot \eta \cdot r_v \left(1 + r_v \sqrt{\frac{\rho_0 \omega}{2\eta}}\right) \right] \times \left(\frac{da_c}{dt} - \frac{da_v}{dt} \right) = \alpha(M_v - M_0) \frac{da_v}{dt}, \quad (7)$$

где M_0 — масса среды в объеме, равном объему частицы; M_{II} — присоединенная масса частицы; M_v — масса частицы; a_c — смещение частицы.

Согласно (7), отношение амплитуд колебаний частицы и среды для малых значений r_v равно:

$$\frac{A_y}{A_c} \approx \frac{M_0 + M_{II}}{M_v + M_{II}}. \quad (8)$$

Таким образом, при сближении плотностей среды и частицы отношение амплитуд колебаний и скоростей стремится к 1. В противном случае будет иметь место миграция частиц в среде. При этом частицы с плотностью больше плотности среды погружаются в нее, а с меньшей всплывают.

Состояние воздушных образований в рудных закладках в процессе вибрационного или импульсного силового нагружения резко изменяется. После укладки руды система характеризуется рыхлым состоянием. Каналы воздушных включений не замкнуты, сами включения могут быть весьма велики. В этот период в системе преобладают силы сухого трения. На первой стадии динамического воздействия происходит удаление из закладки основной части воздуха. При этом вследствие перестройки структуры системы плотность ее увеличивается. На второй и третьей стадиях динамического воздействия оставшийся в системе воздух находится в виде разрозненных пузырьков. Однако наличие их затрудняет контакт значительной части рудных частиц с продуктивными растворами, а также снижает коэффициент фильтрации рудной закладки.

На второй стадии динамического воздействия на рудную закладку размер воздушных пузырьков не превышает 3—5 мм в диаметре. При этом происходит как дробление крупных пузырьков, так и слияние мелких. В общем же жидкость вытесняет воздух. По аналогии с известными представлениями воздушный пузырек в процессе его подъема в рудной закладке сохраняет шарообразную форму при условии ламинарного движения ($Re \leq 9$):

$$Re = \frac{V \cdot d \cdot \rho_0}{\eta}, \quad (10)$$

где Re — число Рейнольдса; V — скорость подъема пузырька; ρ_0 — плотность среды; η — вязкость системы.

Движение пузырька можно описать выражением (7) при $\rho = 0$. Из (8) получаем:

$$\frac{1}{\Omega} \left(1 + r_v \sqrt{\frac{\rho_0 \omega}{2\eta}}\right) = \frac{f_g}{f} \left(1 + r_v \sqrt{\frac{\rho_0 \pi}{\eta}}\right) \ll 1, \quad (11)$$

где $\Omega = \frac{f}{f_g} = \frac{f(M_0 + M_{II})}{3\eta \cdot r_v} = \frac{\alpha(M_0 + M_{II})}{6\pi \cdot \eta \cdot r_v}$, принимается $\Omega \gg 1$; f ; f_g — частоты вынужденных и собственных колебаний.

Запишем (11) в виде:

$$f_g (\gamma^2 + r_v \cdot \gamma \cdot z) \ll 1 \text{ или } \gamma^2 + r_v \cdot \gamma \cdot z \ll \frac{1}{f_g}, \quad (12)$$

где $\frac{1}{\sqrt{f}} = \gamma$; $\sqrt{\frac{\rho_0 \pi}{\eta}} = z$.

Решая (12), приведенное к виду $\gamma^2 + r_v z \gamma - \frac{1}{f_g} < 0$, получаем:

$$\gamma = \frac{-r_v \cdot z + \sqrt{r_v^2 \cdot z^2 + \frac{4}{f_x}}}{2} \quad (13)$$

Из (13) следует:

$$f = \left[\frac{2}{\sqrt{\frac{r_v^2 \cdot \pi \cdot \rho_0}{\eta} + \frac{4}{f_x}} + \sqrt{\frac{r_v^2 \cdot \pi \cdot \rho_0}{\eta}}} \right]^2 \quad (14)$$

Поскольку для $\rho_0 = 0$, $f_x = \frac{9 \cdot \eta}{4\pi \cdot r_v^2 \cdot \rho_0}$, то частота

колебаний, при которой силы трения между воздушными пузырьками и средой приближаются к 0, составляет:

$$f_x > \frac{9 \cdot \eta}{\pi \cdot r_v^2 \cdot \rho_0} \quad (15)$$

Таким образом, для удаления пузырьков воздуха определенного диаметра требуется конкретный диапазон частот колебаний. При этом с уменьшением радиуса пузырьков воздуха вынужденная частота колебаний должна повышаться.

Приведенный анализ процессов вибрационного или импульсного воздействия на рудные закладки чанового фильтрационного выщелачивания позволяет сделать следующие выводы:

1. Генерирование волновых полей в рудных закладках способствует решению двух задач гидрометаллургической технологии: создать однородное поле фильтрации по всему объему рудной закладки и за счет этого обеспечить полную проработку ее продуктивными растворами; достичь минимальных значений остаточной влажности рудной закладки после выпуска из нее продуктивных растворов. Решение этих задач в целом позволяет существенно повысить извлечение полезного компонента из руд.

2. Силовое воздействие на рудную закладку подразделяется на три стадии, отличающихся механизмами взаимодействия волнового поля со средой и процессами, протекающими в рудной закладке.

Первая стадия — первоначальное уплотнение среды в результате переукладки минеральных частиц и удаления крупных воздушных включений.

Здесь для среды характерно наличие в основном сил кулоновского трения, а реологическое состояние в наибольшей степени отвечает модели с сухим трением. Для этой стадии наиболее эффективны низкочастотные высокоамплитудные колебания, обеспечивающие ускоренную перестройку среды.

Вторая стадия — переукладка частиц и создание однородного поля фильтрации вследствие однородной укладки минеральных частиц по всему объему. В начальной фазе на этой стадии среда ведет себя подобно пластически-вязкому телу Бингама, а на заключительном этапе среда в большей степени отвечает упруговязкой модели Кельвина—Фойгта. Относительное перемещение частиц среды обеспечивается за счет изменения значений эффективных коэффициентов трения частиц и вязкости среды. При этом легкие частицы поднимаются в верхние слои рудной закладки, а тяжелые опускаются в нижние. Фильтрующие потоки жидкости стремятся осадить легкие частицы. Совместное действие указанных механизмов обеспечивает равномерное распределение мелких легких частиц по всему объему закладки и в результате приводит к поддержанию на постоянном уровне скорости фильтрации продуктивных растворов. На снижение указанных эффективных коэффициентов оказывают влияние как амплитуда, так и частота вынужденных колебаний. При этом с увеличением размера минеральных частиц необходимо увеличение амплитуды колебаний. При достижении определенного уровня амплитуды преобладающее влияние на эффективные коэффициенты начинает оказывать частота колебаний.

Третья стадия — удаление из смесей воздушных пузырьков. Эффективное течение этой стадии требует плавного повышения частоты вынужденных колебаний. С повышением частоты колебаний создаются благоприятные условия для удаления все более мелких пузырьков.

3. Приведенные формулы описывают качественную картину изучаемых процессов. Количественная оценка эффектов динамической обработки рудных закладок требует экспериментального определения многих эмпирических коэффициентов и значений параметров, входящих в приведенные в работе аналитические выкладки. В наибольшей степени это касается размеров зон эффективной проработки сред конкретными источниками — генераторами волновых полей, необходимой продолжительности динамической обработки рудных закладок и др.

ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасьев А.А. Технология импульсного уплотнения бетонных смесей. М.: Стройиздат, 1987. 168 с.
2. Блехман И.И., Джанелидзе Г.Ю. Вибрационное перемещение. М.: Наука, 1964, 368 с.
3. Подмарков О.В., Фонберштейн Е.Г., Экомасов С.П. Импульсные и вибрационные системы в технологиях добычи полезных ископаемых. М.: ЭКОС, 2003. 184 с.

Российский государственный геологоразведочный университет
Рецензент — М. И. Фазлуллин