

И.К. МЛАДЕЦКИЙ д-р техн. наук
(Украина, Днепропетровск, Национальный горный университет),
Э.М. ПАЙВА
(Ангола, Горнорудное общество "Катока")

РАЗМАГНИЧИВАНИЕ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ЧАСТИЦ В ПУЛЬПЕ

Размагничивание ферромагнитного образца производится следующим образом. Образец жестко закрепляется в пространстве, где будет наведено магнитное поле. Ориентация образца такая, что ось легкого намагничивания располагается параллельно вектору внешнего магнитного поля.

Устанавливается напряженность поля, соответствующая насыщению образца.

Производится многократное изменение направления вектора напряженности. В результате образец будет иметь остаточную намагниченность, которая располагается на кривой начального намагничивания.

Уменьшается амплитуда напряженности и процедура повторяется. Так поступают до уменьшения напряженности до нуля. В результате образец будет полностью размагничен. Основным условием размагничивания является жесткое его положение в изменчивом магнитном поле. Когда образец не закреплен, то он стремится изменить свое положение в соответствии с изменением направления вектора внешнего магнитного поля, поворачиваясь осью легкого намагничивания вслед за этим вектором внешнего магнитного поля. Скорость следования образца за скоростью изменения внешнего магнитного поля зависит от намагниченности образца, от параметров внешней среды и условий закрепления образца в пространстве. Намагниченность образца при условии не закрепления образца не изменяется.

Что бы добиться перемагничивания частиц в пульпе, где, как известно, ферромагнитные частицы свободно могут ориентироваться вдоль вектора внешнего магнитного поля, оно должно изменяться со скоростью, которая превышает скорость механического перемещения образца в этом поле. Угол запаздывания между углом поворота частицы и вектором магнитного поля должно быть более 90° . С тем, чтобы частицы успели двинуться вслед за магнитным полем, имеющим в тот момент однополярное направление. Определим, какова должна быть при этом частота изменения поля.

Предположим, что в потоке пульпы в качестве твердой фазы содержатся частицы ферросилиция, имеющие форму эллипсоидов вращения с большой осью a и малой осью b . Предположим также, что магнитное поле равномерное.

При попадании в магнитное поле каждая такая частица намагничивается и на ее концах образуются "магнитные массы". Эти массы взаимодействуя со внешним магнитным полем, вызывают вращение частицы относительно малой оси, т.е. ориентируются большой осью вдоль вектора внешнего магнитного поля, что приводит к изменению размагничивающего фактора отрезка пульпы и,

Магнітна і електрична сепарація

как следствие к изменению магнитной восприимчивости этого отрезка пульпы. Это, так называемое, магнитное структурирование. До поступления в магнитное поле, частицы ориентированы длинной осью произвольно в пространстве и распределение углов ориентации равномерное. А после попадания в поле ориентация частиц у всех одинаковая.

Момент вращения, действующий на частицу, составляет [1]

$$M_{MEX} = fa \sin \alpha_1,$$

где $f = mH$ – сила, действующая на концы частицы; α_1 – угол между большой осью частицы и вектором внешнего магнитного поля; m – магнитная масса.

Учитывая, что $m = \Phi$, т.е. магнитный поток, проходящий через сечение S частицы, получаем $f = \Phi H$. Известно также, что $\Phi = BH$ и $B = \mu_0 \bar{\mu} H$, где $\bar{\mu}$ – магнитная проницаемость частицы; $\mu_0 = 1,26 \times 10^{-6}$, Гн/м – абсолютная магнитная постоянная; B – магнитная индукция в области частицы. Тогда:

$$M_{MEX} = \mu_0 \bar{\mu} S H^2 a \sin \alpha_1 = K_1 \sin \alpha_1.$$

Вращению частиц препятствует момент от силы противодействия, которая зависит от вязкости среды. Сила вязкости среды равна [2]:

$$F_\mu = \frac{18\mu U_\omega m_\omega}{a^2 \delta_\omega},$$

где μ – коэффициент динамической вязкости среды; U_ω – линейная скорость вращения концов частицы; m_ω – масса частицы; δ_ω – плотность частицы. Таким образом:

$$M_\mu = F_\mu a.$$

Линейная скорость концов частицы $U = \pi a \frac{d\alpha_1}{dt}$. Общее выражение для статического момента противодействия

$$M_\mu = \frac{18\mu m_\omega}{a^2 \delta_\omega} \frac{d\alpha_1}{dt} = K \frac{d\alpha_1}{dt}.$$

Угол поворота частицы можно определить из равенства

$$M_{\mu} = M_{MEX} + J_1 \frac{d\omega}{dt},$$

где J_1 – момент инерции частицы.

С погрешностью, не превышающей 5%, предположим, что $\sin \alpha_1 = \alpha_1$. Тогда уравнение динамического равновесия частицы составит

$$J_1 \frac{d^2 \alpha_1}{dt^2} - K \frac{d\alpha_1}{dt} + K_1 \alpha_1 = 0. \quad (2)$$

Корни характеристического уравнения этого дифференциального уравнения составляют:

$$p_{1,2} = \frac{K \pm \sqrt{K^2 - 4J_1 K_1}}{2J_1},$$

а решение имеет вид:

$$\alpha_1(t) = \alpha_0 \left(\left(1 - \frac{p_1}{p_1 - p_2}\right) \exp(-p_1 t) + \frac{p_2}{p_1 - p_2} \exp(-p_2 t) \right).$$

Оценим численно, полученное решение при таких исходных данных: $a = 1 \text{ мм} = 10^{-3} \text{ м}$, $\delta_{\text{тл}} = 4000 \text{ кг/м}^3$, $\bar{\mu} = 2$, $H = 50000 \text{ А/м}$, $\mu = 10^{-3} \text{ Нс/м}^2$.

Момент инерции составит: $J_1 = 0,52 \times 10^{-12}$, Коэффициенты: $K_1 = 5 \times 10^{-6}$, $K = 9,42 \times 10^{-9}$. Корни характеристического уравнения равны: $p_1 = 17,67 \times 10^3$, $p_2 = 0,59 \times 10^3$. Уравнение вращения частицы в числовом выражении:

$$\alpha_1(t) = \alpha_0 (1 - 1,03 \exp(-17,67 \times 10^3 t) - 0,03 \exp(-0,59 \times 10^3 t)).$$

Время можно выразить через скорость потока пульпы на участке действия магнитного поля. Или же задаться условием, что угол поворота частиц не должен быть больше 5...10% от начального значения. Тогда

$$0,95 = (1 - 1,03 \exp(-17,67 \times 10^3 t) - 0,03 \exp(-0,59 \times 10^3 t)),$$

отсюда определим время воздействия магнитного поля одной полярности. Для чего ограничимся членом с наибольшим показателем и наибольшим коэффициентом, поскольку второй член уравнения вносит малую долю влияния на показатели движения частицы. Тогда:

Магнітна і електрична сепарація

$$\Delta t = \frac{\ln 0,95}{-17,07 \times 10^3} = 3 \times 10^{-6} \text{ с}.$$

Частота магнитного поля составит:

$$f = \frac{1}{\Delta t} = 0,33 \times 10^6 \text{ Гц} = 330 \text{ кГц}.$$

Время воздействия поля с частотой 50 Гц соответствует 0,01 с. В результате угол отставания ориентации частицы от вектора магнитного поля составляет

$$\alpha_1(t) = \alpha_0(1 - 1,03 \exp(-176,7) - 0,03 \exp(-5,9)) = \alpha_0(1 - 0,00028) = 0,9997 \alpha_0.$$

Таким образом, воздействие на ферромагнитную пульпу переменным магнитным полем частотой 50 Гц не может вызвать размагничивания частиц ферромагнетика, поскольку эти частицы успевают ориентироваться осью легкого намагничивания вдоль вектора внешнего магнитного поля. Жесткого закрепления положения частицы в переменном магнитном поле не наблюдается. Некоторое улучшение реологических показателей ферромагнитной пульпы, прошедшей через размагничивающий аппарат можно объяснить механическим разрушением флоккул до размеров, которые определяются значением остаточной намагниченности феррочастиц.

Список литературы

1. **Кармазин В.В.** Магнитные, электрические и специальные методы обогащения полезных ископаемых. – М.: МГГУ, 2008. – Ч. 1. – 768 с.
2. **Деркач В.Г.** Специальные методы обогащения полезных ископаемых. – М.: Недра, 1966. – 338 с.

© Младецкий И.К., Пайва Э.М., 2011

*Надійшла до редколегії 12.04.2011 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. П.І. Піловим*