

А.А. БЕРЕЗНЯК, канд. техн. наук,

Е.А. БЕРЕЗНЯК, М.Э. ГУМЕРОВ

(Украина, Днепропетровск, Национальный горный университет)

РАСЧЕТ НЕОБХОДИМЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА РАЗМАГНИЧИВАНИЯ МАГНЕТИТА

Ферромагнитные минералы магнетита обладают значительной величиной остаточной индукции намагниченности, равной при комнатной температуре около 50 мТл [1]. Поэтому частицы магнетитовой руды самопроизвольно образуют агрегаты и флоккулы, внутри которых возможно защемление частиц минералов пустой породы, что снижает качество концентрата. Особенно проявляется это свойство после воздействия на частицы сильного постоянного магнитного поля при их магнитной сепарации.

Магнетит крупностью менее 74 мкм широко применяется в углеобогащении в качестве утяжелителя при тяжелосредной сепарации. Магнитное агрегатирование утяжелителя приводит к более быстрому расслоению суспензии, что увеличивает погрешность сепарации и нижний предел крупности обогащаемого угля.

Следовательно, остаточная намагниченность частиц магнетита играет отрицательную роль в обогащении полезных ископаемых и ее уменьшение, или размагничивание, является актуальной задачей. Магнитные свойства ферромагнетик полностью теряет при его нагревании до температуры выше точки Кюри, равной для магнетита 580 °С [2]. Такой способ размагничивания магнетита является наиболее полным, но он неприемлем в обогащении полезных ископаемых вследствие больших энергетических затрат.

Другой способ размагничивания заключается в помещении частицы во внешнее переменное магнитное поле, индукция которого плавно уменьшается от максимального значения, которое должно быть больше остаточной намагниченности, до нуля. При этом размагничивание неподвижной частицы будет происходить согласно кривым гистерезиса, представленным на рис. 1 [2].

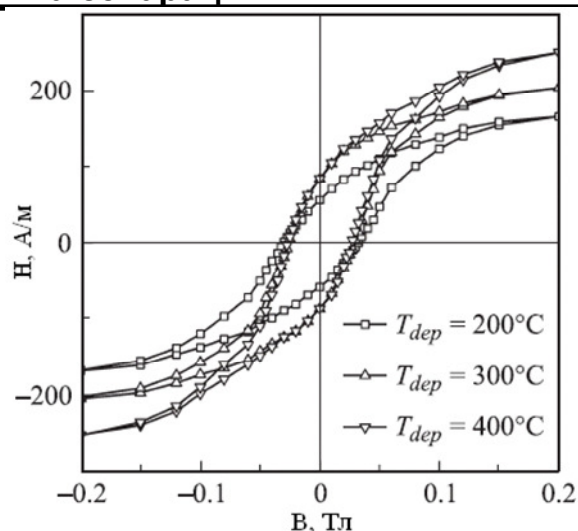


Рис. 1. Петли гистерезиса пленок магнетита, полученных при разных температурах подложки

Такого режима воздействия внешнего поля можно достичь двумя способами. Во-первых, можно вводить магнетит в соленоид и выводить из него, при этом соленоид постоянно подключен к источнику переменного тока. Размагничивание будет происходить во время вывода частиц из соленоида, которое должно быть как минимум на порядок больше периода переменного тока. Во-вторых, можно создать в катушке соленоида затухающие колебания тока, причем число колебаний должно быть больше 5, что обеспечивается соответствующей добротностью колебательного контура. В этом случае размагничиванию подвергнутся все частицы, находящиеся внутри соленоида и в местах, где максимальная индукция магнитного поля больше остаточной намагниченности частицы.

Очевидно, что размагничивание в соленоиде при импульсном режиме с энергетической точки зрения более выгодно, чем в непрерывном режиме, при котором все частицы внутри соленоида постоянно перемагничиваются в сильном поле по полной петле гистерезиса, и на этот процесс бесполезно затрачивается энергия.

Все вышеприведенные рассуждения справедливы, когда частицы магнетита неподвижны. Обогащение магнетитовых руд осуществляется мокрым способом, и частицы магнетита находятся в виде суспензии во взвешенном состоянии. При этом они имеют возможность вращаться во внешнем магнитном поле и если время поворота частицы соизмеримо с полупериодом переменного размагничивающего поля, то вместо размагничивания будет наблюдаться намагничивание частиц. Это было одной из причин, по которой применявшиеся ранее способы размагничивания переменным полем с частотой 50 Гц были малоэффективны.

Для определения минимальной частоты магнитного поля рассмотрим отдельную частицу магнетита размером менее 100 мкм, взвешенную в воде и на-

Магнітна і електрична сепарація

ходящуюся во внешнем магнитном поле. Вследствие наличия у частиц такой крупности гидратной оболочки их можно рассматривать, как сферические. Такое допущение основывается на применимости к ним закона Стокса.

Пусть частица радиуса R имеет остаточную намагниченность J . Тогда ее магнитный момент будет равен:

$$P_m = JV = J \frac{\pi d^3}{6},$$

где V , d – объем и диаметр частицы соответственно.

Во внешнем магнитном поле с индукцией B на частицу будет действовать вращающий момент сил:

$$\vec{M}_m = \vec{P}_m \vec{B}$$

или в скалярном виде:

$$M_m = P_m B \sin \alpha,$$

где α – угол между векторами \vec{P}_m и \vec{B} .

Момент сил инерции вращения сферы относительно оси, проходящей через ее центр, равен (3):

$$M_i = \frac{2}{5} mR^2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2},$$

где $I = \frac{2}{5} mR^2$ – момент инерции сферы, φ – угол поворота.

Момент сил сопротивления вращению частицы, обусловленный вязкостью воды, равен (4):

$$M_r = 8\pi\mu R^3 \frac{\partial \varphi}{\partial t},$$

где μ – вязкость среды.

Приравнивая нулю сумму всех моментов, получим дифференциальное уравнение вращения намагниченной частицы магнетита во внешнем поле:

$$\frac{1}{6} JB \sin(\varphi + \alpha) - \mu \frac{\partial \varphi}{\partial t} - \frac{1}{60} d^2 \gamma_T \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = 0.$$

Магнітна і електрична сепарація

Аналитически в общем виде уравнение не имеет решения, поэтому решение будем искать для случая, когда угол $\varphi \ll \alpha$. В этом случае получим решение в виде:

$$\varphi = \frac{1}{360} JB \sin \alpha \left(\frac{d^2 \gamma_T}{\mu^2} \left(\exp \left(-\frac{60 \mu t}{d^2 \gamma_T} \right) - 1 \right) + \frac{60 t}{\mu} \right).$$

Графически решение этого уравнения приведено на рис. 2 при следующих значениях величин: размер частицы 100 мкм, плотность магнетита 5200 кг/м³, вязкость воды 10⁻³ Па·с, остаточная намагненность 0,05 Тл, наибольшая индукция внешнего поля 0,5 Тл.

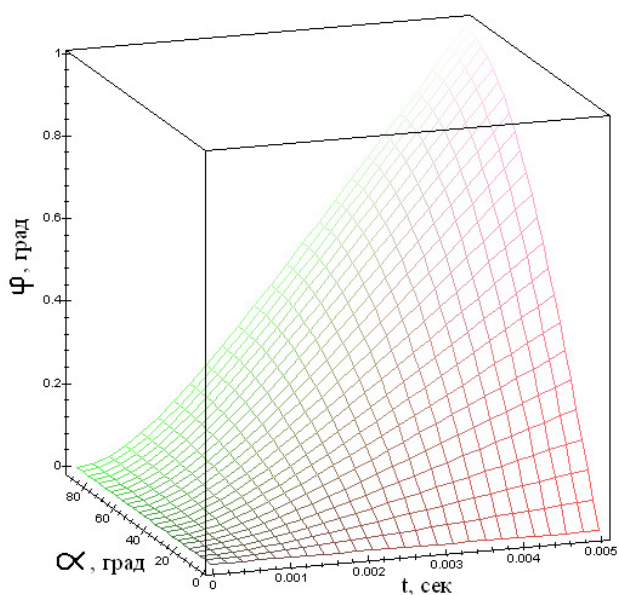


Рис. 2. Зависимость угла поворота частицы от времени и угла между векторами намагненности и индукции внешнего поля

Как видно из рисунка, даже в самом неблагоприятном для размагничивания случае, когда векторы намагненности и внешнего поля перпендикулярны, за время 5 мс угол поворота частицы составит 1 градус. Расчеты показывают, что угол поворота практически не зависит от размера частиц. Например, частица диаметром 1 мкм за то же время повернется на угол 1,2 град. Это обусловлено тем, что вклад во вращение частиц момента сил инерции в рассматриваемых случаях на несколько порядков меньше, чем момента сил вязкостного трения.

За время 10 мс, что соответствует воздействию переменного поля с частотой 50 Гц, частица повернется на угол 2,5 град.

Выводы

1. Неэффективность применения размагничивающих аппаратов, работающих на частоте 50 Гц, не может быть объяснена только одним вращением час-

тиці магнетита во внешнем поле.

2. Для размагничивания целесообразно применять импульсы, возбуждающие в соленоиде затухающие колебания.

3. Рациональная частота затухающих колебаний размагничивающего магнитного поля должна быть выше 500 Гц. В этом случае эффектом вращения частиц в этом поле можно пренебречь.

Список литературы

1. Геологический словарь: в 2-х томах / Под ред. К.Н. Паффенгольца и др. – М.: Недра, 1978.

2. Влияние температуры синтеза на структурные и магнитные свойства пленок Fe_3O_4 на поверхности $SiO_2/Si(001)$ / В.А. Викулов, В.В. Балашев, Т.А. Писаренко и др. // Письма в ЖТФ. – 2012. – Т. 38, Вып. 7. – С. 73-80.

3. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. – М.: Наука, 1965. – 850 с.

4. Слезкин Н.А. Динамика несжимаемой жидкости. – М.: Государственное изд-во технико-теоретической литературы, 1955. – 520с.

© Березняк А.А., Березняк Е.А., Гумеров М.Э., 2012

Надійшла до редколегії 01.03.2012 р.

Рекомендовано до публікації д.т.н. І.К. Младецьким