

Магнитная сепарация

Магнитная сепарация, способ отделения магнитных материалов от немагнитных, а также разделения материалов на фракции по их магнитным характеристикам. Основан на использовании различия магнитных свойств (магнитной восприимчивости, остаточной индукции, коэрцитивной силы и др.) компонентов механической смеси или среды в неоднородном поле постоянных магнитов или электромагнитов. Осуществляется в магнитных сепараторах, в которых магнитные или сильномагнитные (магнитная восприимчивость более $3 \cdot 10^{-6}$) материалы под действием градиента магнитного поля выделяются в магнитную фракцию, а немагнитные или слабомагнитные материалы (магнитная восприимчивость около $1,2 \cdot 10^{-7}$) – в немагнитную. Наиболее широко магнитная сепарация применяется для обогащения руд чёрных и цветных металлов и регенерации магнитных суспензий, используемых при гравитационном обогащении руд и углей, а также для разделения материалов в металлургической, химической, стекольной, пищевой и других отраслях промышленности, при переработке вторичного сырья, в медицине. В настоящее время термин «магнитная сепарация» охватывает несколько различных по целям и, соответственно, по применяемым методам и устройствам процессов: обогащение (т. е. разделение на фракции с различным процентным содержанием магнитного вещества) минерального сырья; очистка немагнитных продуктов от ферромагнитных включений; манипулирование веществами в жидких растворах с помощью магнитных частиц с нанесённым на них специфическим сорбентом; сепарация цветных металлов и др.

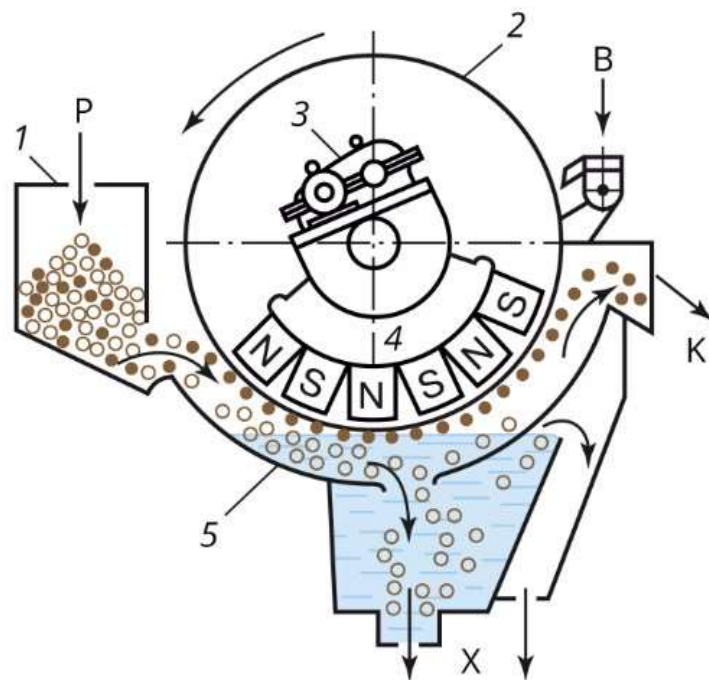
Магнитную сепарацию как метод обогащения минерального сырья впервые подробно описал Г. Агрикола в трактате «О горном деле и металлургии». В конце 19 в. началось промышленное внедрение магнитного метода для обогащения полезных ископаемых (главным образом железных руд) в Швеции, Италии, США и других странах. В России первый магнитный сепаратор для обогащения магнетитовой руды создан в 1911 г. на Урале инженером В. А. Петровым. С конца 1960-х гг. магнитная сепарация получила распространение для обогащения железных, марганцевых, вольфрамовых, хромитовых, редкометалльных руд, угля и других полезных ископаемых.

Магнитная сепарация называется прямой, если магнитная фракция (концентрат) представляет собой очищенные от пустой породы и примесей минералы, или обратной, если минералы магнитной фракции являются вредной примесью (например, при «перечистке» оловянных, циркониевых, литиевых, бериллиевых, полевошпатовых, кварцевых и других концентратов).

Магнитную сепарацию подразделяют в зависимости от среды, в которой производится разделение, – на мокрую и сухую, по величине магнитной восприимчивости материала – на слабо- и сильномагнитную.

Устройство, принцип действия, типы магнитных сепараторов

Устройство и параметры работы магнитных сепараторов определяются типом магнитной системы, числом, формой и расположением магнитных полюсов, составом магнитных материалов, диаметром роторов, частотой их вращения, крупностью руды, содержанием и вкраплением магнитных минералов; при мокрой магнитной сепарации – также количеством воды, типом ванны и пр. Магнитные системы изготавливают на основе постоянных магнитов или электромагнитов, в т. ч. сверхпроводящих магнитов. Из магнитных материалов используются ферриты, неодим–железо–бор и др. Сепараторы со слабым магнитным полем (напряжённостью 80–150 кА/м) предназначены для обогащения сильномагнитных руд, а сепараторы с сильным магнитным полем (800–1600 кА/м) – для обогащения слабомагнитных руд. Как правило, слабое поле создаётся открытой многополюсной системой, сильное – замкнутой магнитной системой. В зависимости от физико-химических характеристик разделяемого материала (и его крупности) для сильномагнитных материалов преимущественно применяются барабанные сепараторы, для слабомагнитных – валковые, роторные и др. При сухой магнитной сепарации руда (например, магнетитовая) загружается на верхние барабаны сепаратора, в которые помещены разомкнутые постоянные магниты. Они создают поле напряжённостью около 90 кА/м. Руда притягивается к полюсам (поверхности барабана), а слабомагнитная фракция отрывается (ссыпается с барабана) и попадает на нижние барабаны с более сильным полем (110 кА/м). Здесь происходит доизвлечение менее магнитных кусков руды. При мокрой магнитной сепарации тонкоизмельчённая магнетитовая руда с водой поступает под вращающиеся навстречу потоку пульпы барабаны, притягивающие ферромагнитные минералы (рис. 1). В случае мокрой магнитной сепарации марганцевых и других слабомагнитных руд применяют сепараторы со значительно более сильным высокоградиентным полем (1500 кА/м), создаваемым замкнутой электромагнитной системой.



1 – питатель; 2 – барабан; 3 – привод барабана; 4 – магнитная система; 5 – прямооточная ванна; Р – руда; В – вода; К – концентрат, Х – пустая порода (хвосты).

Рис. 1. Схема магнитного сепаратора.

Производительность магнитных сепараторов для кусковых руд достигает 500 т/ч, для тонкоизмельчённых сильномагнитных руд – 200 т/ч, для слабомагнитных руд – 40 т/ч. Извлечение полезного минерала, переходящего в концентрат (магнитную фракцию), обычно составляет не менее 75 % от его исходной массы (для сильномагнитных руд – до 95 % и более). На обогатительных фабриках России с помощью магнитной сепарации ежегодно перерабатывается около 500 млн т полезных ископаемых. Часто магнитную сепарацию комбинируют с другими методами обогащения (электрическими, гравитационными, центробежными, флотационными). Магнитную сепарацию применяют не только для производства рудных, но и металлургических концентратов, выпуск которых резко возрастает в связи с развитием бездоменной металлургии (процессов прямого восстановления руд и горячего брикетирования концентратов).

Для обогащения тонкоизмельчённых слабомагнитных минералов используют высокоградиентные (в СССР также был принят термин «полиградиентные») магнитные сепараторы. Их рабочая зона заполнена стальными осадительными элементами. Высокое значение магнитной силы создаётся в местах контакта осадительных элементов, а также на особенностях их формы (остриях, рёбрах и т. П.), т. Е. во многих точках во всём объёме рабочей зоны. Особенностью данных магнитных сепараторов является то, что они требуют периодической очистки (регенерации) осадительных элементов. Различают высокоградиентные магнитные сепараторы с подвижными (регенерируемыми)

осадительными элементами (шары, кубики) и с закреплёнными осадительными элементами (сетки, стержни, рифлёные пластины). В первых – осадительные элементы циркулируют между зонами высокого и низкого магнитного поля и очищаются за счёт промывки в области низкого поля (например, сепаратор ЭБШМ 120/250). Во вторых – вся рабочая камера периодически выводится из области высокого поля для промывки. Используются также сепараторы со стальной ватой в качестве наполнителя осадительной системы. В них осадительные элементы являются полуподвижными и регенерируются за счёт механической деформации при выходе из зоны высокого магнитного поля.

С развитием технологии производства сверхпроводящих материалов и криогенной техники всё большее распространение получают магнитные сепараторы со сверхпроводящей магнитной системой. При охлаждении такой системы ниже критической температуры электрическое сопротивление обмоток падает до нуля, что позволяет без омических потерь и нагрева пропускать через обмотки большой ток и достигать индукции магнитного поля до 5-7 Тл. Сверхпроводящие магнитные сепараторы более компактны, чем классические электромагнитные, и не потребляют электрическую мощность в процессе работы (за исключением систем охлаждения). Магнитная система сепаратора представляет собой соленоид из ниобий-титанового провода, охлаждаемый жидким гелием до температуры 4,2 К. Индукция магнитного поля в соленоиде составляет 5,5 Тл. Рабочая система состоит из двух камер, совершающих возвратно-поступательное движение и поочередно входящих в соленоид и выходящих из него. Рабочие камеры заполнены стальной ватой, через которую прокачивается пульпа сепарируемого материала. В фазе, когда камера выведена из соленоида, магнитная фракция вымывается из стальной ваты водой.

Практическое применение магнитных сепараторов

В производстве сельскохозяйственной продукции, в пищевой промышленности, в производстве строительных материалов, в химической промышленности, в производстве пластика и изделий из него, а также многих других отраслях промышленности стоит задача очистки как сырья, так и конечного продукта (зерна, муки, кофе, чая, сахара, комбикормов, кормовых добавок, пластиковых гранул, песка, цемента, угля и т. д.) от металлических предметов. Наиболее часто встречаются предметы из ферромагнитных материалов (чёрная сталь), поэтому для очистки продуктов в первую очередь применяют устройства магнитной сепарации. Эти устройства также называют «железоотделители» или «устройства магнитной защиты». Кроме повышения качества продукта, их важной функцией является защита технологического оборудования от попадания стальных предметов и защита от взрывов при транспортировке и переработке пылящих продуктов.

Большинство типов железоотделителей могут быть выполнены как на основе электромагнитов, так и постоянных магнитов (ферритов, SmCo, NdFeB). При этом общемировая тенденция состоит в максимально широком использовании высокоэнергетичных постоянных магнитов NdFeB, что позволяет достигать высоких характеристик и экономить на потреблении электроэнергии в процессе эксплуатации.

Как правило, устройства магнитной защиты устанавливают в местах перегрузки продукта или на линиях его транспортировки. Существует большое разнообразие типов и конструкций железоотделителей, применяемых в зависимости от свойств продукта, характера вредных примесей и особенностей технологической линии. При транспортировке ленточными транспортёрами широко применяют подвесные железоотделители, подвешиваемые над лентой и извлекающие относительно крупные стальные предметы со значительного расстояния (до 500 мм). Кроме того, используют магнитные ролики, устанавливаемые в качестве конечного ролика конвейера, которые отклоняют траектории движения стальных предметов относительно движения основного продукта при сбросе с конвейера. Сыпучие продукты мелкой фракции при транспортировке их по трубопроводам сепарируются чаще всего решётками из магнитных стержней либо магнитными плитами, установленными на специально организованном изгибе трубопровода. Магнитные системы как решёток, так и плит не обладают значительным дальнодействием, но развивают большое усилие при попадании ферромагнитного предмета на рабочую поверхность устройства. Аналогичные по принципу действия железоотделители применяют и для очистки разнообразных жидких продуктов.

На предприятиях стекольной и керамической промышленности магнитная сепарация применяется для очистки песка от оксидов железа и других слабомагнитных примесей, которые придают стеклу нежелательные оттенки, снижают его прозрачность, а также являются причиной появления «мушек» на керамической плитке. Использование магнитной сепарации для очистки шликера (фарфоровой суспензии) и глазури при производстве высококачественного фарфора позволяет повысить белизну, прочность и улучшить диэлектрические свойства изделий. Особенностью очистки песка от оксидов железа и других слабомагнитных примесей является необходимость создания высокоградиентных магнитных полей большой напряжённости.



Рис. 2. Двухбарабанный магнитный сепаратор с системой подачи и выгрузки на мусоросортировочном заводе в Котляково [производство компании ООО «ПМТиК» (группа АМТ&С)].

Особое значение имеет магнитная сепарация при решении экологических проблем. Так, магнитная сепарация активно используется в мусороперерабатывающей промышленности при утилизации автомобилей, автопокрышек, железобетонных конструкций и др. её используют как при извлечении для дальнейшей переработки ферромагнитных (изготовленных из чёрных металлов) предметов и деталей, так и при сепарации включений из цветных металлов (как правило, это предварительно измельчённые детали бытовых приборов, радиодетали и т. п.) (рис. 2). Существенную роль в экологии моногородов стали играть комплексы для очистки земли от металлических примесей (рис. 3). Для извлечения ферромагнитного лома применяются либо подвесные железоотделители, либо барабанные сепараторы, состоящие из вращающегося барабана и неподвижной системы постоянных магнитов, формирующей магнитное поле в рабочей области сепаратора. Попадая в зону действия магнитного поля, куски лома притягиваются к поверхности барабана и переносятся им в зону со слабым магнитным полем, где происходит разгрузка. Такие сепараторы используются,

например, для очистки угля от металлического лома (вагонных замков, элементов крепежа в угольных шахтах и т. д.), попадание которого в печь может привести к её выходу из строя (рис. 4).



Рис. 3. Комплекс для очистки земли [производство ООО «ПМТиК» (группа АМТ&С)].

Для извлечения лома цветных металлов используют электродинамические (вихретоковые) магнитные сепараторы, с помощью которых в частицах цветного металла, обладающих высокой электропроводностью, под воздействием переменного магнитного поля наводятся вихревые токи (токи Фуко). В свою очередь, токи Фуко формируют в окружающем пространстве индуцированное магнитное поле. Взаимодействие магнитных полей токов Фуко и магнитной системы сепаратора приводит к возникновению сил, выталкивающих частицы цветного металла из рабочей области сепаратора. Наиболее широкое распространение получили электродинамические сепараторы с вращающимися магнитными системами на постоянных высокоэнергетичных редкоземельных магнитах.



Рис. 4. Магнитный сепаратор над угольным конвейером на Черепетской ГРЭС Тульской области [производство ООО «ПМТиК» (группа АМТ&С)].

В нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей промышленности магнитную сепарацию используют для очистки нефтепродуктов и других жидких материалов с различной вязкостью от мелких металлических включений при транспортировке продуктов по трубам. В металлообрабатывающей промышленности – для очистки смазочных охлаждающих жидкостей металлорежущих и шлифовальных станков (основу конструкций для этих целей составляют магнитные системы на постоянных магнитах). Тонкая очистка жидкостей от оксидов металлов производится с помощью электромагнитных сепараторов (фильтров), позволяющих доводить содержание оксидов до сотых долей процента.

В медицине магнитная сепарация эффективно используется для разделения клеток с помощью специфичной иммуносорбции на магнитоуправляемых сорбентах. Последние представляют собой ферромагнитные частицы (например, микроскопические стальные шарики в оболочке из полистирола), покрытые ковалентно связанными с молекулами поверхностного слоя моноклональными антителами – искусственными образованиями, способными взаимодействовать с мембранными антигенами клеток-мишеней, притягивая либо здоровые, либо поражённые клетки. Иммуносорбция, предшествующая извлечению с помощью магнитного поля здоровых клеток, носит название позитивной иммуносорбции, а поражённых клеток – негативной иммуносорбции. Позитивная и негативная селекция материала используется для предтрансплантационного разделения и получения чистых фракций стволовых кроветворных клеток для их криоконсервации при онкологических поражениях костного мозга. На основе иммуносорбции

разработан метод борьбы с рядом патогенных микроорганизмов (например, с возбудителем сепсиса дрожжеподобным грибом *Candida albicans*), которые после присоединения к антителам, нанесённым на стальные микросферы, удаляются магнитным полем из крови, предварительно выведенной из организма. Парамагнитные свойства красных кровяных телец, содержащих в своём составе железо, позволили разработать методику выделения их из крови высокоградиентными магнитными сепараторами, магнитное поле которых формируется с помощью ферромагнитных микропроволок или стальной ваты. С помощью магнитной сепарации можно, подбирая подходящий рецептор, удалять из крови любые нежелательные примеси. Например, для очистки крови от свинца подобран рецептор, который в соединении с магнитными наночастицами никеля, покрытого диоксидом кремния, избирательно связывается со свинцом и с помощью магнитного поля выводится из организма. Магнитная сепарация клеток стала активно развиваться в середине 1970-х гг. и ныне является широко используемым недорогим методом, который применяется для разделения на более чистые фракции компонентов крови или костного мозга после экстракорпорального разделения (афереза), для очистки крови от радиоактивных токсинов и некоторых видов биологических ядов, проточной цитометрии, изоляции опухолевых клеток и т. п.

Магнитную сепарацию применяют также в устройствах ПЦР-диагностики (полимеразная цепная реакция), которая известна с 1980-х гг. В настоящее время она широко применяется для диагностики заболеваний, установления родства, в криминалистике и многих других исследованиях структуры ДНК. Суть метода состоит в многократном копировании (амплифицировании) интересующего участка ДНК, что приводит к экспоненциальному увеличению его концентрации и повышению точности анализа. При подготовке к амплифицированию необходимо выделить из исходного биоматериала нужные фрагменты ДНК, для чего и используется метод магнитной сепарации. В раствор вводятся суперпарамагнитные частицы – Fe_3O_4 с характерными размерами 10–20 нм. Покрытие, нанесённое на наночастицы, в сочетании со свойствами раствора, обеспечивает адгезию к ним нуклеиновых кислот. По окончании очередной фазы подготовки образца магнитная система собирает магнитные частицы вместе с фрагментами ДНК в компактное пятно на стенке контейнера, из контейнера удаляются ненужные вещества и заменяется биохимический реагент. Применение бесконтактного метода магнитной сепарации для сбора частиц позволяет избежать загрязнений при подготовке образцов.

Тишин Александр Метталинович, Кармазин Виктор Витальевич, Копелиович
Дмитрий Бенедиктович

Библиография

- Кармазин В. И. Магнитные методы обогащения / В. И. Кармазин, В. В. Кармазин. – Москва : Недра, 1984.
- Кармазин В. В. Магнитные, электрические и специальные методы обогащения полезных ископаемых. Т. 1. Магнитные и электрические методы обогащения полезных ископаемых / В. В. Кармазин, В. И. Кармазин. – Москва : Издательство Московского государственного горного университета, 2005. – (Высшее горное образование).
- Microfluidic high gradient magnetic cell separation / D. W. Inglis, R. Riehn, J. C. Sturm [et al.] // Journal of applied physics. – 2006. – Vol. 99, № 8.
- Tsutsui H. Cell separation by non-inertial force fields in microfluidic systems / H. Tsutsui, C.-M. Ho // Mechanics Research Communications. – 2009. – Vol. 36, № 1. – P. 92–103.