

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РЕНТГЕНРАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ СЕПАРАЦИИ

Интенсивное развитие промышленного производства в последние десятилетия привело к тому, что наиболее богатые и доступные месторождения руд черных и цветных металлов, неметаллических полезных ископаемых практически полностью исчерпали свои ресурсы. Перед обогатителями ставятся новые задачи, связанные с поиском новых технических решений по эффективному обогащению минерального сырья с низким содержанием полезного компонента; освоением месторождений, расположенных на удалении от существующих промышленных мощностей по переработке сырья.

Одним из путей, способствующим решению этих задач, может быть широкое использование в схемах переработки минерального сырья радиометрического обогащения.

Радиометрические методы обогащения основаны на различиях в способности минералов испускать, отражать или поглощать излучения. Различают два вида радиометрического обогащения: обогащение радиоактивных руд, минералы которых сами испускают излучение, и обогащение нерадиоактивных руд, минералы которых не обладают естественной радиоактивностью [1-5].

В первом случае разделительным признаком является интенсивность естественного излучения разделяемых минералов. Во втором необходим внешний источник первичного принудительного излучения, и разделительным признаком является интенсивность вторичного сигнала взаимодействия этого излучения с разделяемыми минералами.

Во внешних источниках могут быть использованы самые разнообразные виды излучений: электромагнитные (ультрафиолет, инфракрасное, световое излучение, рентгеновское); ядерное (гамма-излучение, α , β – частицы, нейтроны).

Комбинации и сочетания этих излучений различных энергий и диапазонов насчитывают до сотни возможных вариантов реализации радиометрических методов, которые принципиально могут отделять самые разнообразные полезные ископаемые (кусковой материал, порции руды) по содержанию ценных компонентов с той или иной эффективностью. Но только некоторые из них, как более реальные и технически осуществимые, используются в промышленных масштабах. К ним относятся: фотометрический (сортировка по световым и цветовым признакам); рентгенолюминесцентный (сортировка алмазов); гамма-метод (по отражательной и поглощательной способности гамма-излучения, в частности для сортировки железных руд и углей); рентгенорадиометрический метод (по флуоресцентному излучению анализируемых элементов).

Каждый из этих методов имеет свои достоинства и недостатки, наиболее предпочтительную область применения. Целью настоящей работы является освещение физических основ рентгенорадиометрического метода сепарации, определение основных направлений его применения в схемах обогащения минерального сырья.

Остановимся на физических основах рентгенорадиометрической сепарации, определяющей универсальность данного метода обогащения.

Возбуждение атомов исследуемых элементов при РРС производится рентгеновским излучением, генерируемым рентгеновскими трубками.

Рентгеновского излучения – это электромагнитные колебания весьма малой длины волны, сравнимой с атомными размерами – от нескольких ангстрем до долей ангстрема. Эти лучи имеют двойную природу – волновую и корпускулярную (дуализм волн и частиц), то есть, во многих процессах проявляют себя как частицы, несущие порции (сгустки, кванты) энергии. Каждый квант в зависимости от длины волны (или что равнозначно – частоты излучения) имеет определенную энергию, которую в микромире измеряют в электронвольтах (эВ).

Простые соотношения связывают энергию с длиной волны и частотой излучения:

$$\varepsilon = h \cdot \nu = h \cdot c / \lambda,$$

где: h - постоянная Планка; ν - частота излучения; λ - длина волны; c - скорость света.

Для практических целей в основном используют рентгеновское излучение с энергией квантов от 1 до 100 кэВ. Именно эти энергии присущи характеристическому рентгеновскому излучению, испускаемому при возбуждении атомами – элементами таблицы Менделеева. В этой области энергий работают генераторы рентгеновских излучений (рентгеновские аппараты и др. устройства).

Еще в начале XX века английский ученый Г. Мозли, исследовав характеристические спектры различных химических элементов, установил следующий закон, носящий его имя: корень квадратный из частоты характеристического излучения есть линейная функция порядкового номера элемента:

$$\sqrt{\nu} = A \cdot (Z - B),$$

где: ν – частота спектральной линии; Z – атомный номер испускающего элемента; A , B – константы.

Отсюда следует, что каждый атом имеет свой, присущий только ему, рентгеновский образ и атомы каждого элемента можно распознавать по испускаемым ими характерным лучам.

Развитие науки показало, что это характеристическое излучение атомов теснейшим образом связано со строением электронных оболочек атомов. При поглощении атомом излучения электрон переходит на более высокий уровень (атом оказывается в возбужденном состоянии), а

при испускании излучения переходит на один из нижних уровней. Излучение и поглощение энергии происходит порциями.

Каждый атом характеризуется собственной системой энергетических уровней и, как следствие, характерным спектром излучения. Различные электронные орбитали (рис. 1) обозначаются К, L, М и т.д., где К – орбиталь, ближайшая к ядру. Каждой орбитали электрона в атоме каждого элемента соответствует собственный энергетический уровень. Энергия испускаемого вторичного фотона определяется разницей между энергией начальной и конечной орбиталей, между которыми произошел переход электрона.

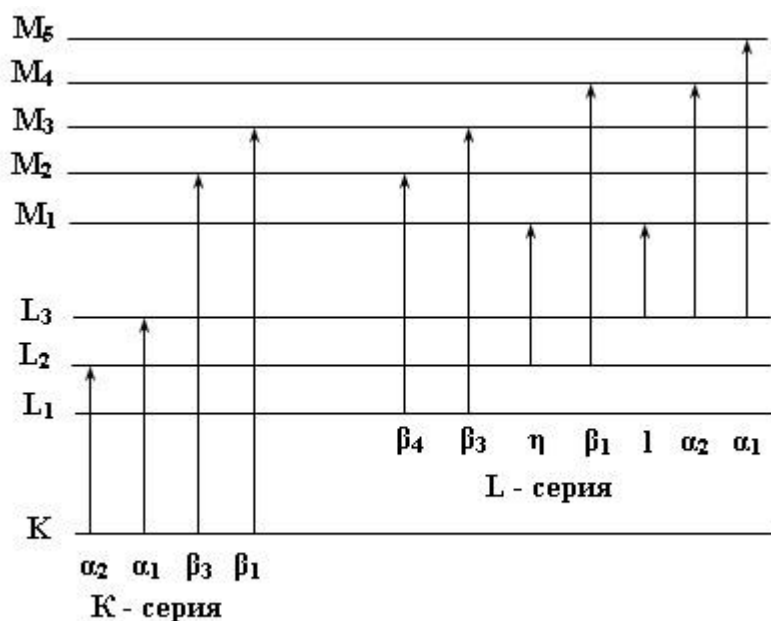


Рисунок 1. Схема образования серий характеристического рентгеновского излучения (ХРИ)

Таким образом, длина волны испускаемого фотона (флуоресценции) является индивидуальной характеристикой каждого элемента и называется характеристической флуоресценцией. В то же время интенсивность (число фотонов, поступающих за единицу времени) пропорциональна концентрации (количеству атомов) соответствующего элемента. Это дает возможность элементного анализа вещества: определение количества атомов каждого элемента, входящего в состав образца.

Возбуждение и регистрация ХРИ атомов анализируемых элементов и составляет основу рентгенорадиометрической сепарации.

При РРС возбуждение атомов производится рентгеновским излучением, генерируемым рентгеновскими трубками. Но природа рентгеновского излучения трубок отличается от ХРИ атомов. Основную часть этого излучения представляет, так называемое, тормозное излучение - название которого точно отражает физическую суть его образования при торможении ускоренных электронов в материале анода (или антикатода) рентгеновской трубки. Тор-

мозное рентгеновское излучение (ТРИ) состоит из сплошного спектра квантов разных энергий - от нуля до максимальной энергии, которая определяется высоким напряжением, подаваемым на анод рентгеновской трубки – U . В РРС рабочий диапазон U чаще всего составляет 20 - 50 кВ, отсюда и максимальная энергия отдельных (или части) квантов тормозного рентгеновского излучения достигает 20-50 кэВ.

Дополнительно в составе спектра тормозного излучения может присутствовать ХРИ (К- или L- серия) того элемента, из которого выполнен материал анода (чаще всего применяют Cu, Mo, Ag, W, Re). Это дополнительное излучение возникает, если энергия электронов, ускоренных анодом трубки, достаточна для выбивания (удаления) ими какого-либо электрона с К- или L- оболочки атомов анода (зависит от U).

Рассеянное рентгеновское излучение (РИ) образуется при взаимодействии первичного рентгеновского излучения с веществом – анализируемой средой (в т.ч. от воздуха, в среде которого распространяется первичное излучение).

С одной стороны часть первичного излучения уходит на возбуждение атомов и образование ХРИ, а другая просто рассеивается ("отражается") средой с образованием РИ, при этом каждое рассеивание и отражение первичных квантов атомами среды отнимает (уменьшает) энергию этих квантов в зависимости от углов рассеивания (отражения) и количества актов взаимодействия. Поэтому РИ также представляет собой сплошной спектр энергий (от минимума до максимума), как и тормозное излучение.

При рассеивании большая часть первичных квантов взаимодействует с электронами атомов, выбивая их с внешних оболочек и теряя энергию (неупругое рассеивание), другая (малая) часть первичных квантов взаимодействует с атомом как целым и отражаясь от него как от стенки (упругое рассеивание). В этот момент энергия кванта практически изменяется мало, меняется только направление движения кванта (упругое рассеивание).

Приведенная трактовка образования РИ является упрощенной. С позиции квантовой физики в каждом акте рассеивания первичный квант как бы исчезает, а рождается (переизлучается) другой вторичный квант. Поэтому и ХРИ элементов среды и РИ от среды мгновенно возникают (флуоресцируют) в момент облучения среды, образуя вторичное флуоресцентное излучение (спектр). При снятии возбуждения (прекращения облучения) также мгновенно исчезает и вторичное излучение, без всякой остаточной радиации облученного вещества (или любого материала).

В рентгеноспектральном анализе (к которому относится и РРС) анализируемая толщина материала зависит от энергий первичного и вторичного излучений (но более всего от ХРИ анализируемых элементов) и составляет от 0,01 до 1 мм - работает только поверхност-

ный слой. Эта особенность или этот фактор определяет основные физические и методические основы РРС, а также и требования к самой технологии.

Рис. 2 дает наглядное представление о физике измерений, принципах возбуждения и регистрации излучений измерительной системой РРС, опираясь на те основные понятия рентгеновского излучения, которые были рассмотрены выше.

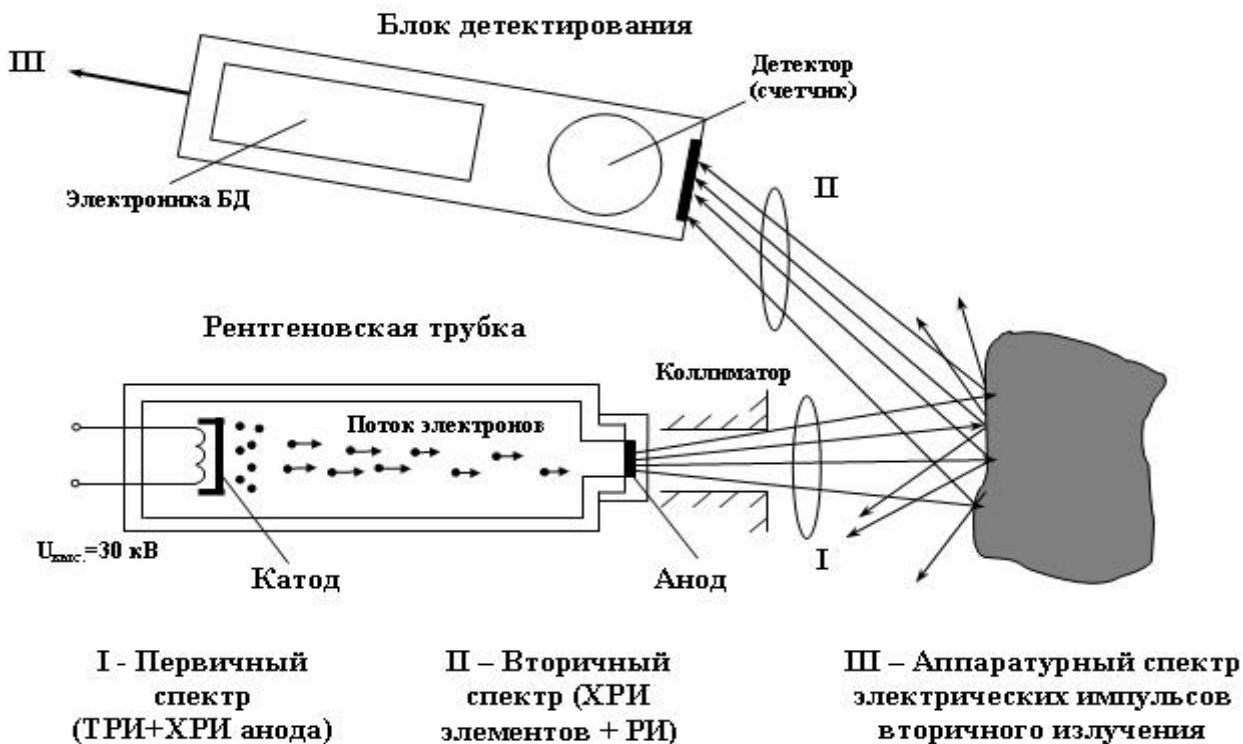


Рисунок 2. Принцип возбуждения и регистрации излучения при РРС

Главная задача в исследовании кускового материала при помощи первичного рентгеновского излучения (I) – получить аппаратный спектр вторичного излучения (III), который представляет уже не реальный вторичный спектр рентгеновского излучения (II), а его аппаратное отражение – электрические импульсы, зависящие от характеристик детектора (энергетического разрешения, эффективности регистрации квантов различных энергий) и электронных параметров блока детектирования (уровня шумов, амплитудного диапазона, линейности характеристик и пр.).

Первичное излучение рентгеновских излучателей подбирается для каждого анализируемого элемента (или группы элементов) материалом анода трубки (Mo, W, Re, Ag), анодным напряжением (в пределах 20-50 кВ) и анодным током (в пределах 40-60 мкА), а также фильтрами-ослабителями (из фольги Al и Cu). Оно должно обеспечивать оптимальный по интенсивности и качеству аппаратный спектр вторичного рентгеновского излучения. Т. е.

такой спектр, в котором четко выделяются ХРИ анализируемых элементов, и интенсивность которых позволяет проводить их анализ за реальное время измерения кусков (0,02-0,1 с).

Вторичное излучение от куска регистрируется блоками детектирования ДЭУ (детектор электронный управляемый) на основе пропорциональных газовых счетчиков с наполнителем. Электрические импульсы ДЭУ с помощью электронных средств и компьютерной обработки преобразуются в аппаратный спектр вторичного регистрируемого излучения, анализ которого (выделение аналитических областей анализируемых элементов и рассеянного излучения) и расчет аналитического параметра также производится бортовым компьютером в реальном масштабе времени.

Измерительно – управляющая система вырабатывает сигнал управления на срабатывание исполнительного механизма на кусок с повышенным или пониженным содержанием ценных компонентов или элементов-примесей.

Указанный принцип действия рентгенорадиометрического метода разделения позволяет выделить основные физические и технологические факторы, определяющие эффективность использования РРС в схемах обогащения полезных ископаемых. Физические – высокая селективность и информативность рентгеновского излучения. Технологические – руда при взрывании и дроблении разламывается по плоскостям низкой прочности, плоскостям минерализации. Поэтому поверхность кусков более обогащена ценными компонентами, что способствует распознаванию кусков относительно поверхностным методом РРС (глубинность проникновения рентгеновского "мягкого" излучения в среднем составляет 0,1-1 мм).

К достоинствам рентгенорадиометрической сепарации (РРС) также следует отнести то, что это единственный "прямой" метод оценки содержания большинства элементов, содержащихся в руде или любом кусковом материале. Важное значение для экономической и технологической эффективности добычи руды и обогащения имеет и то, что этот метод позволяет сортировать крупнокусковой материал в диапазоне крупности от 20 до 300 мм, а в исключительных случаях (особо ценное сырье) и мелкокусковой материал от 5 до 20 мм. Кроме того, РРС обладает высокой чувствительностью, позволяющей обнаруживать многие элементы с содержанием 0,01-0,1% и рассортировывать руды, содержащие ценные компоненты даже на уровне нескольких процентов [7-8].

По нашему мнению, указанные преимущества дают возможность применять рентгенорадиометрическую сепарацию для решения следующих технологических задач.

1. Предварительное обогащение руд (крупнокусковое). Удаление на первом этапе обогащения до 20-50 % отвальной породы позволяет сократить объем руды, поступающей на среднее дробление и дальнейшую переработку. Кроме того, оно повышает содержание

ценного компонента в перерабатываемом сырье и, как следствие, общее извлечение этого компонента в концентрат.

Предварительное обогащение при помощи РРС даёт возможность разрабатывать месторождения, удалённые от существующих промышленных мощностей по переработке сырья, а также бедные и забалансовые руды, существенно снижая затраты на транспортировку обогащенного продукта.

2. Обогащение принципиально новых, ранее не обогащавшихся видов сырья. "Прямой" метод оценки содержания элементов в руде или любом кусковом материале позволяет эффективно использовать рентгенорадиометрическую сепарацию для этих целей, тем самым расширяя сырьевую базу промышленного производства.

3. Предварительное разделение полезных ископаемых на отдельные технологические типы и сорта, которые более эффективно перерабатываются по различным схемам.

4. Получение крупнокусковых концентратов. Для некоторых металлургических процессов необходимо крупнокусковое исходное сырье. Рентгенорадиометрическое обогащение позволяет получать крупнокусковые железные, хромовые, марганцевые концентраты, которые без всякой дополнительной подготовки можно направлять на плавку.

5. Доводка концентратов, полученных другими методами обогащения.

Выводы.

Накопленный опыт использования рентгенорадиометрического метода, который базируется на непосредственном измерении ХРИ анализируемых элементов, позволяет определить перспективы применения РРС в схемах обогащения полезных ископаемых. Основные направления использования данного метода в технологических схемах переработки сырья изложены в данной работе. Они, естественно, не охватывают всего возможного спектра технических решений, которые раскрывает перед обогатителями данный метод. Дальнейшие теоретические и практические исследования РРС позволят существенно расширить область применения рентгенорадиометрического метода разделения.

Список используемых источников

1. Чантурия В.А. Перспективы устойчивого развития горноперерабатывающей индустрии России // Известия вузов. Горный журнал, 2007. №2. С. 2- 9.

2. Кобзев А.С. Направления развития и проблемы радиометрических методов обогащения минерального сырья // Обогащение руд, 2013. №1. С. 13-17.

3. Salter J.D., Wyatt N.P. Sorting in the minerals industry: past, present and future // Minerals Engineering, 1991. Vol.4. No.7-11. P. 779-796.

4. Demingling the mix: An assessment of commercially available automated sorting technology. Portland, April 2010. URL: <http://www.4RSustainability.com>
5. Seerane K., Rech G. Investigation of sorting technology to remove hard pebbles and recover copper bearing rocks from an autogenous circuit // 6th Southern African Base Metals Conference 2011. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Phalaborwa on 18-20 July 2011. P. 123-136.
6. Федоров Ю.О. Пособие по рентгенорадиометрической сепарации URL: <http://www.rados.ru/info-article.html?st=10>
7. Федоров Ю.О., Кацер И.У., Коренев О.В. Опыт и практика рентгенорадиометрической сепарации руд // Известия вузов. Горный журнал, 2005. №5. С. 21-37.
8. Самойлик В.Г. Специальные и комбинированные методы обогащения полезных ископаемых: учебное пособие // Донецк: ООО «Східний видавничий дім», 2015. 165 с.