

Перспективы расширения минерально-сырьевой базы на основе освоения труднообогатимых руд и техногенного сырья

«Ученые о полезных ископаемых является сейчас в своей основе прикладной минералогией»
В.И. Вернадский

Горно-рудная индустрия ещё многие годы будет основой развития экономики России. Если величина валютных поступлений от экспорта всех видов сырья и полусырья составляет 94 %, то на долю экспорта твёрдых полезных ископаемых (металлы, уголь, драгоценные камни, удобрения, химические вещества) в указанной пропорции приходится около 25 %, что является весомым вкладом в валютные средства государства.

В стране насчитывается 20 тыс. разведанных месторождений, из них 1/3 разрабатывается. Но с 90-х годов прошлого столетия произошло резкое сокращение объёмов геолого-разведочных работ, результатом чего явилось отрицательное соотношение между извлечением полезных ископаемых и приростом запасов. Некоторое увеличение финансирования в последние годы на разведку недр не привело к значительным положительным сдвигам.

За последние два десятилетия в горнодобывающей и горно-перерабатывающей областях произошли большие негативные изменения. На фоне существенного сокращения объёмов геолого-разведочных работ резко снизилось внутреннее потребление почти всех видов минерального сырья. Так, с 1991 по 2000 гг. потребление алюминия снизилось в три раза, меди рафинированной — в 3,3 раза, свинца — в 3,3 раза, цинка — в 2,7 раза, никеля — в 5,7 раза, олова — в 4,2 раза, вольфрамовых и молибденовых концентратов — в 8,4 и 6,4 раза соответственно. Но даже при столь значительном снижении потребления, по мнению специалистов, в 2015—2020 гг. могут быть полностью исчерпаны запасы золота, серебра и цинка, а запасов алмазов должно хватить до 2025 г.

Задачей предстоящих десятилетий является освоение сравнительно бедных, с пониженным в 1,3—1,5 раз содержанием ценных компонентов тонковкрапленных, труднообогатимых руд и техногенного сырья, для которых необходимо разработать более эффективные, часто нетрадиционные методы переработки. Подобная тенденция характерна не только для России. В США, например, до 80 % прироста запасов достигается за счёт трудноперерабатываемых забалансовых руд и техногенного сырья. Основной акцент при этом делается на разведку минерального сырья на флангах и глубоких горизонтах эксплуатируемых объектов и детальное изучение месторождений-спутников, часто находящихся вблизи основных рудных тел, но нередко с другими видами рудных и породообразующих минералов.

Подобная стратегия характерна и для России. Выдвинута программа последовательной разработки инновационных технологий, основанная на прогрессивных системах недропользования, включающая экономическую эффективность и экологическую безопасность при переработке и комплексном использовании сырья.

Переход к освоению некондиционного, по современным требованиям, труднообогатимого сырья сопряжен с созданием более совершенных методов и процессов получения минеральных концентратов, качество которых соответствовало бы требованиям мирового рынка. Исключительно важен прогресс обогатительных технологий для месторождений, стоящих на государственном балансе, но качественные показатели которых находятся на грани соответствия нормам ГКЗ (государственного комитета по запасам), и они в связи с ростом мировых требований могут быть переведены в разряд забалансовых руд. К таким объектам относятся 34 % свинцовых, 49 % оловянных, 34 % магнетитовых, 15—30 % титановых, медных, вольфрамовых, апатитовых руд и углей.

К актуальным и сложным проблемам относится переработка техногенного сырья, количество которого в России достигает 80 млрд т. В его составе преобладают

вскрышные породы, особенно угольных месторождений. Доля техногенного сырья рудной отрасли значительно скромнее — 10—12 млрд т, но стоимость ценных компонентов в них весьма значительна.

Переработка данного вида сырья призвана параллельно решать и важные экологические проблемы, учитывая, что в отходах, например, обогатительных производств установлено более 50 токсичных элементов.

Освоение как тонковкрапленных руд, так и техногенного сырья определяется уровнем развития двух основных направлений технологии обогащения — селективного раскрытия минеральных сростков и процессов извлечения ценных компонентов.

Исследования по первому направлению многие годы проводятся в Институте геологии и минералогии СО РАН как новый раздел технологической минералогии. Совершенствование методических основ освобождения минералов из состояния сростания, являясь актуальной проблемой обогатительной науки и практики, одновременно имеет большое значение при сепарации акцессорных минералов для изотопных исследований.

Минеральные сростки представляют особый тип геоматериалов с аномальными физическими и химическими свойствами и требуют углубленного изучения с привлечением рентгенографии, электронной микроскопии, ИК-спектроскопии, рентгеноспектрального зондирования, рентгеноэлектронной спектроскопии, ДТА и других методов.

Отличительным свойством минеральных агрегатов прежде всего следует считать их повышенную механическую прочность, что определяет использование более мощных механических воздействий и больших энергозатрат по сравнению с аналогичной задачей в исходной руде.

Извлечение ценных компонентов из руд цветных, черных, редких и благородных металлов часто не превышает 70 %, а угольного вещества — 70—80 %. Анализ причин потерь показывает, что примерно 35 % от недоизвлеченного количества минералов приходится именно на нераскрытые сростки, а ещё 30 % вызвано переизмельчением руд с переходом в частицы с размерами менее 20 мкм, которые обогащаются крайне неэффективно или вообще не поддаются обогащению.

При измельчении до подобных размеров в шаровых мельницах кристаллическая структура поверхностных слоёв минералов в результате многократных ударных и истирающих воздействий и увеличенной длительности процессов претерпевает определенные механохимические изменения. Увеличивается число разорванных и напряженных связей, радикалов, точечных дефектов, дислокаций и других структурных нарушений. Возникают аморфизованные поверхностные слои, приводящие к повышению гидратированности и неселективной адсорбции реагентов ввиду нивелирования поверхностных свойств разделяемых минералов, в результате чего резко снижается селективность флотационного разделения. Примером могут служить руды Норильского месторождения, которые на обогатительных фабриках измельчаются до 44 мкм, при этом степень аморфизации сульфидов достигает 20 %, что существенно снижает эффективность основного обогатительного метода — флотации.

Ввиду чрезвычайно тонкого взаимоперастания ряд руд вообще не разделяется методами механического обогащения. В подобных ситуациях используются гидрометаллургические методы с синтезом более простых минералов. В частности, норильский пирротинный концентрат, в котором содержится до 5—6 % никеля и 4—5 % меди, подвергается автоклавному растворению в сернокислой среде с последующим синтезом из жидкой фазы сульфидов Ni и Cu и флотационным их разделением. Естественно, подобные технологии многократно дороже стоимости традиционных методов обогащения, но затраты оправдываются повышенным содержанием платиноидов в исходном продукте и их извлечением.

Главная задача состоит в усовершенствовании технологии раскрытия сростков механическими воздействиями с выполнением таких технических условий, чтобы кристаллическая структура минералов оставалась по возможности не искажённой и не аморфизованной при одновременно минимальном шламообразовании. Подготовленная в соответствии с данными требованиями руда должна вполне удовлетворительно обогащаться гравитационными и флотационными методами.

Традиционные шаровые мельницы не решают поставленных задач — нужны измельчители с более мощными высокочастотными воздействиями. В наших работах используются центробежно-планетарные мельницы конструкции инженера С.И. Голосова (ИГМ СО РАН) и дезинтеграторы, отличающиеся видом разрушающих воздействий. Для центробежных механизмов характерны истирающие и ударно-истирующие режимы, а в дезинтеграторах имеют место только ударные воздействия, но тот и другой характеризуются более высокой эффективностью разрушения по сравнению с шаровыми мельницами.

Механически изменённые поверхностные слои минералов, и прежде всего сульфидов, как показали рентгеноструктурные исследования, достаточно полно удаляются трибообработкой (специальной оттиркой) в предназначенных для этой цели устройствах. В результате такой обработки представляется возможным значительно улучшить качественно-количественные показатели обогащения. Например, во вторичном пирротинном флотоконцентрате содержание меди возрастает в 1,6 раза, а никеля — в 1,2 раза.

Трибообработка является эффективным методом реставрации поверхностных свойств не только рудных минералов. Нашими работами показано повышение результативности обогащения кварц-полевощпатовых, апатитовых, редкоземельных и других видов сырья.

Механохимическая аморфизация поверхности может выступать и в роли положительного фактора. Например, она усиливает депрессию флотиремости отдельных минералов, выполняя функции реагентов-подавителей. На основе данных механизмов предложены новые принципы обогащения руд, в частности, так называемая обратная флотация, когда традиционно переводимый в пенный концентрат компонент остается в камерном, несфлотированном продукте. Данная технология оказалась перспективной методом при обогащении оловянных, фосфорных и ряда силикатных руд. Обратная флотация касситерита из шламов начинает внедряться на Новосибирском оловокомбинате.

Перспективный, но ещё недостаточно исследованный применительно к разделению минералов процесс — ударное измельчение в дезинтеграторах. Мощные с коротким периодом действия удары позволяют с высокой эффективностью дезинтегрировать минералы из руд при достаточной сохранности кристаллической структуры. Именно после дезинтеграторного измельчения были получены наиболее богатые по содержанию цветных металлов концентраты из Норильских руд. Выпускаются многотоннажные дезинтеграторы, что открывает перспективы их промышленного использования как при переработке техногенного сырья, так и при повышении качества концентратов перерабатываемых руд с целью приближения их к требованиям рынка.

В сравнении с центробежными мельницами дезинтеграторы отличает ряд преимуществ при раскрытии органо-минеральных ассоциаций в углях и последующего их гравитационного и химического обогащения. Установлена возможность повышения степени деминерализации с получением малозольных концентратов с $As < 1\%$ для ряда наукоемких технологий.

Развивается новое направление оптимизации рудоподготовки перед обогащением, состоящее в измельчении руд в режимах



повышенной энергонапряженности в присутствии поверхностно-активных веществ (ПАВ).

Академиком П.А. Ребиндером добавки ПАВ при тонком диспергировании рассматривались как понизители прочности веществ с повышением тонины помола. В наших работах решаются другие задачи — снижение переизмельчения и аморфизации структуры. В основе данных процессов лежит известный в физико-химической механике эффект снижения коэффициента трения контактирующих твёрдых тел (минералов и мельющих шаров).

Использование в качестве ПАВ жирных кислот при центробежном измельчении медно-никелевой руды в водной среде позволило сократить образование шламовых частиц с размером менее 20 мкм до 40 %, что открывает пути значительного прогресса при обогащении. Но и эффект Ребиндера, несомненно, присутствует при подобной механообработке, способствуя селективности дезинтеграции. Данные работы можно считать новым разделом технологической минералогии применительно к измельчительным процессам.

С помощью рентгенофазового анализа продуктов, полученных измельчением с добавками органических реагентов, установлен эффект снижения образования дефектов структуры и значительное повышение селективности флотационного разделения. Из других направлений снижения аморфизации следует выделить вывод из измельчительного процесса абразивных породообразующих минералов, эффективность технологии показана на медно-никелевых рудах.

В горной промышленности исследуются также нетрадиционные методы дезинтеграции минеральных комплексов, в частности электрохимическая обработка руд, воздействие ускоренных электронов, СВЧ, электроимпульсной, электро-гидродинамической обработки, эффективность электромагнитных наносекундных импульсов и других методов. Новым направлением является предварительное механическое разупрочнение руд (проф. К. Шенерт, Германия). Достаточно широко используются роллер-прессы, разрушение в которых основано на сжатии частиц в уплотненном слое между вращающимися навстречу друг другу валками. Обладающая многими технологическими, экономическими и эксплуатационными преимуществами, они нашли применение при обогащении железных руд, алмазов, благородных металлов и других видов сырья.

Данный обзор работ, в том числе и краткое изложение некоторых наших исследований, не претендует на полноту, но предпринят с целью привлечь внимание учёных и специалистов смежных дисциплин к актуальным задачам освоения труднообогатимых руд и техногенного сырья.

Т.С. Юсупов, д.т.н., профессор,
Институт геологии и минералогии
им. В.С. Соболева СО РАН