

УДК 622.341:622.7

П.А. Цеховой¹, генеральный директор
 А.И. Якунин¹, заведующий отделом инновационных технологий
 В.С. Музгина², д-р техн. наук, менеджер по научно-техническому развитию
 И.А. Якунин³, технический эксперт

¹ТОО «Антал», ²ТОО «Горное бюро», ³ТОО «Тране Текникк»

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЬ ДРОБЛЕНИЯ И ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ РУД

Энергетикалық заңдылығының бұрғылау-жару жұмыстары кенді ұсақталу мен майдалау жүргізу жұмыстары кезінде, біріккен минералдардың бетінде жана құрылумен байланысты, шығару процестері кезінде габаритті емес құрылулардың айтарлықтай сендіре түсіндіреді және Риттингердің толық тендемесімен көрсетіледі, сондай-ақ майдалау мен ұсақтату циклында сыны аймағында ірілердің пайда болуы.

Энергетическая закономерность при проведении буровзрывных работ, дробления и измельчения руд связана с образованием новой поверхности минеральных ассоциаций; наиболее полно отображается уравнением Риттингера и достаточно убедительно объясняет образование негабаритов при добыче, а также образование критического класса крупности в циклах дробления и измельчения.

Energy pattern during the blasting, crushing and grinding the ore is associated with the formation of a new surface mineral association that best displays the equation Rittenger and convincingly explains the formation of oversized during production as well as the formation of a critical class size cycles crushing and grinding.

Түйінді сөздер: Риттингердің теңдеуі, қойтас, ұсақталу, ұсақтау.

Ключевые слова: уравнение Риттингера, негабариты, дробление, измельчение.

Key words: the equation Rittenger, bulkiness, crushing, grinding.

При добыче и переработке минерального сырья значительная часть энергии тратится на разрушение горной массы, дробление и измельчение. Энергоемкость процесса дезинтеграции минералов до необходимой технологической крупности значительна, к тому же повсеместно наблюдается несовершенство многих технологических схем рудоподготовки минерального сырья, начиная от процесса добычи и завершая многими разновидностями процессов дробления и измельчения. Следует отметить, что определенное количество энергии при дроблении (взрывом или механическим способом), а также при измельчении (самоизмельчение, полусамоизмельчение, шаровое или стержневое, струйное или ударное) тратится на образование новой поверхности минеральных ассоциаций и пропорционально этой новой образованной поверхности. Вопрос величины пропорциональности не имеет под собой достаточной степени теоретической обоснованности и, следовательно, в последующем не представляется возможным развивать эти закономерности в плане установления теоретических зависимостей процесса разрушения минералов. Неравномерность дробления и измельчения руды по классам крупности многие эмпирические зависимости просто не объясняют, хотя накопилось достаточно много практического материала, на основании которого успешно рассчитываются регрессионные модели разрушения минералов. В настоящее время ни одна теория разрушения рудных минералов не может объяснить наличие, накопление и непропорциональное преобладание какого-то одного класса крупности на разных стадиях разрушения горных пород, включая добычу, дробление и измельчение. Использование самых разнообразных сетей расположения скважин никак не может полностью избавить от так называемых негабаритов, а в процессе самоизмельчения – от образования критического класса крупности, который сам не участвует в дроблении и измельчении, сам не

дробится и не измельчается. При более тонком измельчении происходит накопление циркуляционной нагрузки в циклах «измельчение – классификация». Разумеется, накопление ограничивается объемами аппаратов и после определенного количества циклов пропорционально выводится в слив классификатора, чем значительно снижает эффективность работы последнего. В случае с самоизмельчением и полусамоизмельчением при наличии в цикле классифицирующих аппаратов (классификатор или гидроциклон) накопление критического класса может привести к полной остановке процесса. Вывод критического класса и дробление его в отдельном цикле, конечно, частично решает эту проблему, но значительно усложняет схему рудоподготовки.

Определение величины затрачиваемой энергии на дробление и измельчение составляет одну из главных проблем в обогащении полезных ископаемых. П. Риттингер предположил, что работа, затрачиваемая на измельчение, пропорциональна вновь обнаженной поверхности в измельчаемом материале. В.Н. Кирпичев, а затем и Ф. Кик дали несколько отличное решение рассматриваемой проблемы теории измельчения и предположили, что энергия, требуемая для производства аналогичных изменений в очертании геометрически подобных тел одинакового технологического состава, изменяется пропорционально объему или весу этих тел. Предположение о прямой пропорциональности работы измельчения вновь образованной поверхности или объема можно считать справедливым только в случае достаточно убедительных доказательств. Одним из доказательств, на наш взгляд, является процесс образования негабаритов при добыче и накоплении критического класса крупности в процессах дробления и измельчения.

В течение многих десятилетий велась дискуссия между сторонниками теории Риттингера и теории Кирпичева-Кика. В ходе этой дискуссии первые провели

многочисленные исследования по разработке методов определения поверхности сыпучих материалов и установлению связи между поверхностью и размером частиц материала, а также определению удельной работы измельчения. К числу таких исследований относятся работы Гетса, Дель-Мара, Белла, Мартина, Гросса и Циммерлея и других. Исследованиями доказывалась справедливость предположения о пропорциональности работы измельчения вновь образованной поверхности.

Сторонники теории Кирпичева-Кика также провели исследования, подтверждающие пропорциональную зависимость работы измельчения от объема или веса измельчаемого материала. Изучая теорию Риттингера, они обращали внимание на тот факт, что в ней не учитывается путь, на котором действует сила, вызывающая разрушение тела. Но и теория Кирпичева-Кика в ее первоначальном виде была недостаточной для решения практических задач. Это побудило Стедлера, одного из активных сторонников теории Кирпичева-Кика, предпринять попытку развить эту теорию, придав ей математическую форму, приемлемую для инженерных решений. Его выводы сводятся к следующему. Измельчение тела происходит в несколько приемов разрушения и расход энергии измельчения зависит от количества этих приемов.

Л.Б. Левенсон, основываясь на теории Кирпичева-Кика, предложил следующий упрощенный путь определения энергии, затрачиваемой на измельчение материала. Если вместо напряжения в выражение работы упругих деформаций подставить разрушающее напряжение, то оно, по Левенсону, дает работу, затраченную на разрушение всего деформируемого объема куска материала до продукта с частицами приближающегося к нулю размера. При этом степень измельчения теоретически достигает бесконечности.

В итоге многолетней дискуссии были разделены сферы применения соперничавших теорий. Указывалось, что теория Риттингера приемлема для определения энергетических затрат в области тонкого измельчения, а теории Кирпичева-Кика отводилась область мелкого, среднего и крупного измельчения. Однако проблема установления связи между энергетическими затратами и результатами измельчения по-прежнему оставалась центральной темой теории измельчения.

В поисках общей формулы, пригодной для всех случаев дробления, Ф. Бонд предложил гипотезу, согласно которой работа разрушения пропорциональна диаметру зерна в степени два с половиной. Эмпирическая формула Бонда, названная третьим законом дробления, получила широкое распространение, благодаря широкому перечню технологий, параметры которых находились именно в области ее действия. Более корректна с физической точки зрения формула П.А. Ребиндера, в соответствии с которой, элементарная работа, затрачиваемая в процессе разрушения куска материала, равна сумме работ по деформации объема и образованию новой поверхности. Основой этой формулы все-таки является теория Риттингера, так как большая деформация объема не приводит к разрушению куска руды.

Поэтому наши дальнейшие изыскания были проведены с использованием формулы Риттингера.

Хоултейн еще в 1923 г. на основании своих опытов пришел к выводу, что при измельчении материалов энергия расходуется на образование новой поверхности, на теплоту деформации материала без разрушения, на теплоту трения материала по рабочим поверхностям измельчительных аппаратов. Ни одна из предложенных теорий, по его мнению, не учитывает точно этих расходов энергии, ни одна простая формула не применима ко всем породам и методам дробления.

Измельчение материала, как отмечалось, идет в несколько приемов. На каждом этапе получают частицы различной дисперсности. В составе этих частиц имеются и такие, которые не должны были бы подвергаться разрушению в последующих приемах, но не всегда возможно вывести их из процесса. Они остаются в общей массе материала, воспринимают на себя часть действующих усилий, гасят их, переизмельчаются и резко тормозят течение процесса в нужном направлении. Тормозящее действие присутствующего в сырье готового продукта и накопление некоторого продукта средней крупности в цикле «измельчение – классификация» давно отмечено. Основное правило «ничего лишнего не измельчать» требовало не допускать переизмельчения материала и перерасхода энергии. Необходимость извлекать из сырья мелочь перед подачей его на измельчение и производить дополнительное дробление промежуточного класса или, как его называют, критического, который характеризуется повышенным «энергопотреблением», создает определенную проблему и снижает производительность измельчения.

При измельчении однородной по составу руды, как отмечают практически все исследователи, одновременно образуется ряд классов крупности. Количество энергии, затраченное на получение каждого из них, неодинаково. Некоторые классы крупности накапливаются в цикле измельчения и для их дезинтеграции требуется дополнительная энергия. Это подтверждается наличием значительных циркуляционных нагрузок в цикле «измельчение – классификация». Согласно закону Риттингера, величина площади вновь образованной поверхности измельчаемого материала S пропорциональна количеству энергии W , затраченной на измельчение:

$$W = \omega_0 \times S, \quad (1)$$

где ω_0 – удельный расход энергии.

Заменив S и ω_0 соответствующими выражениями, получим:

$$W = G^2/2E \times \psi \times D \times S_n \times n, \quad (2)$$

где G , E – напряжение сдвига и модуль упругости материала;

ψ , D , S_n – соответственно, коэффициент формы, диаметр, площадь поверхности зерна материала;

n – количество зерен.

Допустим, что в процессе измельчения средний диаметр зерна изменяется от D_1 до D_2 . Тогда количество энергии, затраченной на увеличение площади поверхности материала от S_1 до S_2 , будет:

$$dW = G^2/2E \times \psi \times n[(D_1 - D_2) \times d(S_1 - S_2) + (S_1 - S_2) \times d(D_1 - D_2)]. \quad (3)$$

Зависимость расхода энергии с изменением крупности материала и площади вновь образованной при этом

поверхности можно определить, взяв производную функцию (3) по D и S :

$$W'_{SD} = G^2/2E \times \psi \times n[(D_1 - D_2) \times d(S_1 - S_2) + (S_1 - S_2) \times d(D_1 - D_2)]. \quad (4)$$

Обозначим $S = \psi_1 \times \pi \times D_1^2$; $S = \psi_2 \times \pi \times D_2^2$, учитывая, что $\psi = \psi_1 = \psi_2$, причем $\psi_0 = \psi \times \psi_1 \times \psi_2$; $D_2/D_1 = m$.

После подстановки обозначений в выражение (4) получим:

$$\begin{aligned} W'_{SD} &= G^2/2E \times \psi_0 \times n[(1-m) \times d(1-m^2) + (1-m^2) \times d(1-m)]D_1 = \\ &= G^2/2E \times \psi_0 \times n[(-m/\sqrt{1-m^2}) + 2]D_1 = \quad (5) \\ &= -G^2/2E \times \psi_0 \times n \times m[(1-m^2)^{-0.5} + 2]D_1. \end{aligned}$$

Функция (5) наиболее полно описывает процесс дезинтеграции и, чтобы найти экстремумы этой функции, следует определить экстремальные точки, для вычисления которых необходимо приравнять нулю вторую производную функции:

$$\begin{aligned} W''_{SD} &= G^2/2E \times \psi_0 \times n \times m[(1-m^2)^{-0.5} + \\ &+ m^2(1-m^2)^{-1.5}/2 \times (-2)]D_1 = G^2/2E \times \psi_0 \times n \times \quad (6) \\ &\times m[(1-m^2)^{-0.5} \times (1-m^2/(1-m^2))]D_1 = 0. \end{aligned}$$

Уравнение (6) имеет решение при $m = 0$; $m = 1$; $m = 0,7$.

Экстремальные значения функции (3), записанные с учетом обозначений $D_2/D_1 = m$, достигаются при $D_2 = 0$ (это условие справедливо при абсолютном разрушении материала, что в принципе невозможно); $D_2 = D_1$, (начальное условие); $D_2 = 0,7D_1$ (условие, характеризующее размер D_2 , как критический).

Таким образом, теория Риттингера объясняет образование негабаритов при добыче, образование критических классов крупности в замкнутых циклах «дробление – грохочение» и в циклах «измельчение – классификация». Размер критического класса крупности, согласно настоящим теоретическим исследованиям, определяется, в среднем, как $\approx 70\%$ от частиц средней крупности, поступающих в измельчительный аппарат. Накапливаясь в цикле «измельчение – классификация»,

критические классы крупности снижают эффективность дробления и измельчения за счет увеличения циркуляционной нагрузки, которая, как известно, может достигать 800%. Безусловно, можно в одну стадию измельчить весь материал до необходимой конечной крупности, не считаясь с энергетическими затратами. Авторы в настоящей работе исходили из принципа необходимости и достаточности энергетических воздействий при измельчении однородной по химико-физическим свойствам руды.

Попытка авторов настоящей работы провести аналогичные теоретические исследования, приняв за основу теорию Кирпичева-Кика, успехом не увенчалась, теоретических экстремумов преобразованной функции не наблюдалось, а процесс образования циркуляционной нагрузки и критических классов крупности математически не объяснялся. Из чего можно сделать вывод, что теория измельчения Риттингера более достоверна.

Очевидно, что критические классы крупности могут образовываться также и при любом диспергировании горной породы неоднородной твердости, начиная от добычи, дробления, измельчения и завершая сверхтонким измельчением.

Результаты многочисленных экспериментов по измельчению различных руд и пород позволяют сделать вывод, что, с учетом прочности характеристик, коэффициентов формы зерен, показатель образования критических классов крупности не меняется и не зависит от типа измельчительного аппарата и способов дробления и измельчения.

Таким образом, энергетическая закономерность дробления и измельчения руд разными способами, связанная с образованием новой поверхности минеральных ассоциаций, наиболее полно отображается уравнением Риттингера и достаточно убедительно объясняет образование негабаритов при добыче, а также образование критического класса крупности в циклах дробления и измельчения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Справочник по обогащению руд. Подготовительные процессы. – М.: Недра, 1982.
2. Справочник по обогащению руд. Обогащительные фабрики. – М.: Недра, 1984.
3. Перов В.А., Андреев Е.Е., Биленко Л.Ф. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. Справочник по обогащению руд. – М.: Недра, 1980.

Статья публикуется по рекомендации заместителя главного редактора, доктора технических наук Л.А. Крупника