

СОВМЕСТНОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИ ИЗВЛЕЧЕНИИ ВАНАДИЯ ИЗ КОНВЕРТЕРНЫХ ШЛАКОВ

Перевод ванадия в растворимые соединения производится путем обжига в трубчатых вращающихся печах или многоподовых печах в присутствии кислорода воздуха и реакционной добавки при температурах 700–900 °С. Обжиг шихты в условиях ЧусМЗ после мокрого помола шлака осуществляется во вращающейся трубчатой печи длиной 75 м диаметром 3,5 м. Начальная влажность шихты – не более 11 %. В усовершенствованной УралНИИЧМ технологической схеме используется сухой помол шлака. Обжиг осуществляется в коротких, 40 м, вращающихся трубчатых печах с диаметром 2,0 м, имеющих расширенную часть диаметром 2,5 м, длиной 11,5 м для выдержки шихты в зоне оптимальных температур с целью улучшения качества обжига.

Основными факторами, влияющими на степень перевода ванадия в растворимые соединения, при прочих равных условиях по химическому и минералогическому составу шлаков, являются: степень измельчения компонентов шихты, состав шихты и условия ее обжига. Как установлено опытным путем местный перегрев шихты приводит к спеканию частиц и как следствие, снижению доли водорастворимой V_2O_5 в ней [1]. Следующей причиной невысокого выхода водорастворимых соединений ванадия в присутствии $Fe_{мет}$ является образование новых соединений, которые плохо вскрываются водой. Авторы указывают на необходимость удаления металлического железа из шихты до содержания не более 3 % [1].

Качество обжига в конечном счете определяет выход ванадия и производительность предприятия в целом. Некоторые исследователи отмечают, что выход ванадия обратно пропорционален величине загрузки (коэффициенту заполнения) рабочей камеры печи (и, следовательно, времени нахождения в печи). Кроме того, увеличение загрузки печи связывают с расходом воздуха в печь и выносом материала с пылью. Практика работы существующих печей показывает, что снижение концентрации кислорода в отходящих газах ниже 10 % ухудшает степень вскрытия ванадия.

В процессе обжига шихты в шлаке происходят физико-химические превращения, протекающие в три стадии. На первой стадии, начиная с

температуры примерно 400 °С, компоненты, входящие в состав шпинелида, окисляются, что приводит к его разрушению. При температуре 500–600 °С начинает окисляться и фаялит с разрушением кристаллической решетки последнего, а при температуре 600–700 °С наблюдается активное окисление железованадиевого шпинелида.

Согласно технологическим требованиям [1], определяющим полноту извлечения ванадия, необходимо обеспечить тепловой режим, позволяющий вести обработку шлака при температуре, не превышающей 850 °С в окислительной среде. Степень извлечения ванадия тем больше, чем выше окислительный потенциал газовой среды и чем больше время пребывания технологического материала при высокой температуре (реакции начинают заметно протекать начиная с температуры порядка 400 °С). С учетом изложенного, наиболее рациональной как с точки зрения технологических, так и теплотехнических требований, является теплотехнологическая схема каскадной печи, включающая, помимо вращающейся печи заданной длины (40 м) и диаметра (2,5 м), подогреватель исходного шлака и холодильник конечного продукта обжига [2]. Первый обеспечивает предварительный подогрев исходного шлака с целью удовлетворения технологического требования достижения максимальной продолжительности пребывания материала в реакционной камере при высокой (400–800 °С) температуре и теплотехническим требованиям повышения тепловой экономичности за счет снижения тепловых потерь с отходящими дымовыми газами. Холодильник обеспечивает удовлетворение технологических требований повышения окислительного потенциала газовой среды, так как позволяет увеличить избыток воздуха в дымовых газах при разбавлении горячим воздухом по сравнению с атмосферным при заданной температуре смеси.

В соответствии с требованиями технологии, теплоноситель на входе в печь должен иметь температуру на уровне t_d около 900 °С. Расход вторичного воздуха (на разбавление продуктов сгорания топлива до заданного уровня) определяется температурой подогрева воздуха. Температура смеси связана с температурой и коэффициентом расхода первичного и вторичного воздуха уравнением теплового баланса:

$$\eta_T \cdot (Q^p_n + c_{v1} \cdot \alpha_1 \cdot L'_0 \cdot t_{v1} + c_{v2} \cdot \alpha_2 \cdot L'_0 \cdot t_{v2}) = c_d \cdot ((V'_0 + (\alpha_{\text{общ}} - 1) \cdot L'_0) \cdot t_d,$$

где η_T – тепловой КПД топки и смесителя;

c_d , c_{v1} и c_{v2} – средние объемные изобарные теплоемкость смеси дымовых газов, первичного и вторичного воздуха в интервале температур от 0 до t_d , от 0 до t_{v1} и от 0 до t_{v2} , соответственно;

t_d , t_{v1} и t_{v2} – температуры смеси после разбавления, температуры первичного и вторичного воздуха, соответственно, °С;

$\alpha_{\text{общ}}$, α_1 и α_2 – коэффициенты расхода воздуха общий, первичного и вторичного, соответственно;

Q^p_n , L'_0 и V'_0 – теплота сгорания топлива, теоретический расход влажного воздуха и дыма.

Ввиду зависимости температур и расходов первичного и вторичного воздуха от принятой теплотехнологической схемы установки, параметры работы смесителя определялись в ходе решения сопряженной системы уравнений тепловых и материальных балансов, записанных для каждого расчетного участка с учетом условий теплообмена.

Для принятого в расчетах состава природного газа с теплотой сгорания $Q_p^p = 36,6$ МДж/м³ при н.у. увеличение за счет использования на горение и разбавление подогретого воздуха, общего коэффициента расхода воздуха от 2 (соответствует случаю отсутствия подогрева воздуха) до 4 позволяет существенно увеличить окислительный потенциал газовой среды (содержание O₂ в продуктах полного горения увеличивается с 9,8 до 15,1 %) при сохранении начальной температуры продуктов сгорания и тем самым повысить степень извлечения ванадия из шлака. Удовлетворение теплотехнических требований достигается снижением потерь с выгружаемым обожженным шлаком.

Задача теплового расчета на первом этапе разработки конструкции агрегата сводилась к поиску необходимого количества ступеней подогрева и охлаждения шлака. Повышение температуры подогрева воздуха, способствующее увеличению общего избытка воздуха, оказывает положительное влияние и на второй определяющий фактор интенсификации технологического процесса – время пребывания шлака при высоких температурах, ввиду увеличения средней температуры печи при увеличении начальной энтальпии газового потока (при одинаковой начальной температуре газов). Тепловой режим агрегата определялся описанной особенностью протекающих физико-химических процессов. При этом, из соображений тепловой экономичности, желательно чтобы теплота экзотермических процессов окисления железа использовалась в технологических целях, а поэтому нагрев исходного сырья в зоне подготовки выше 400 °С следует признать нежелательным.

Задача решалась методом динамического программирования с ограничением по количеству ступеней как подогрева, так и охлаждения не более трех, так как дальнейшее увеличение количества ступеней подогрева и охлаждения не приводило в данном случае к заметным теплотехническим или технологическим преимуществам. В результате выполненного математического моделирования с одновременной оптимизацией тепловой работы для каждого анализируемого варианта теплотехнологической схемы получены значения температур и расходов всех потоков материала и теплоносителя и определены показатели тепловой работы агрегата.

В рассмотренных вариантах принималась одинаковая производительность агрегата по исходному сухому на уровне 4000 кг/час, начальная температура материала и охлаждающего воздуха 20 °С, исходная влажность сырья 0,5 % для сухого и 11 % для мокрого помола. Выход обожженного шлака в сравниваемых вариантах принят одинаковым и равным

4360 кг/час – прирост массы за счет поглощения кислорода из газовой среды, степень усвоения которого в сравниваемых случаях принималась одинаковой.

Как показывают результаты математического моделирования, переход с мокрого способа помола на сухой не приведет к существенному увеличению тепловой экономичности (относительно низкие удельные затраты тепла на процесс обжига связаны с особенностью протекающих при этом в шлаке физико-химических процессов, общий тепловой эффект которых близок к нулю). Расчетная величина удельных затрат тепла при сухом способе помола составили 1198,8 кДж/кг против 1211,6 кДж/кг для варианта мокрого помола, а соответствующие значения удельных затрат условного топлива составляют 0,0409 и 0,0413 кг у.т./кг обожженного продукта. Сопоставление тепловых балансов показывает, что переход на сухой способ, как и следовало ожидать, привел к уменьшению тепловых затрат на удаление свободной влаги, но одновременно с этим возросли и потери с отходящими газами; общий же эффект по этим двум статьям составил всего около 1,3 % (от 52 % при мокром до 50,7 % при сухом помоле) Относительное снижение затрат топлива на обжиг шлака при переходе от мокрого способа помола к сухому по расчету составило около 1 % и может не окупить потерь технологического продукта как из-за более высокого пылеуноса, так и по причине снижения тонины помола при сухом способе помола по сравнению с мокрым. Также следует учитывать, что переход на сухой способ помола требует предварительной сушки реакционной добавки, что не может не сказываться на общих энергозатратах.

Каскадная организация теплотехнологического процесса обжига ванадиевого шлака позволяет влиять на протекание физико-химических процессов и, вследствие этого, на степень извлечения ванадия и на показатели тепловой экономичности. Переход на сухой способ помола шлака с более технологичного мокрого помола не приводит к существенному повышению тепловой экономичности, если не сопровождается специальными мероприятиями по более глубокой утилизации тепла отработанного теплоносителя.

Список использованных источников

1. Производство и использование ванадиевых шлаков / Л.А. Смирнов, Ю.А. Дерябин, А.А. Филиппенко [и др.] М.: Металлургиздат, 1989. 126 с.
2. *Фетисов Б.А.* Каскадные печи : труды Междунар. науч.-практ. конф. «Творческое наследие Б.И. Китаева. К 100-летию со дня рождения Б.И. Китаева». Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009. С. 480–485.