гетического баланса по рассматриваемым схемам показывает, что энергетические затраты в комбинированных схемах на получение углекислоты сводятся к минимуму. Несомненно, значительный интерес представляет структурная оптимизация подобных схем с использованием эксергетического анализа и применению других технологий для разложения дымовых газов.

УДК 666.92

Анализ работы печи для обжига извести типа ППР Жлобинского металлургического завода

Седнин В.А., Кожевников А.Г., Мельников И.В.
Белорусский национальный технический университет
РУП “Белорусский металлургический завод”

На БМЗ установлены и функционируют две шахтные прямоточно-противоточные регенеративные печи (ППР), основным премуществом которых являются: относительно низкий удельный расход топлива (125…136 условного топлива на 1 т продукции), высокая регенерация теплоты отходящих газов (80-85%), высокий удельный съем извести с единицы поперечного сечения печей 120…130 т/($м^2$ сут), выпуск извести без пережога, высокая степень диссоциации сырья (96…98%), умеренные капитальные затраты при реконструкции действующих печей, возможность обжига фракционированного известника с размером кусков, начиная с 15…20 мм и разбросом 1:3,5…1:4.

Анализ показателей действующих на БМЗ печей видно, что имеются резервы по увеличению производительности и повышения эффективности работы печи за счет частичной ее модернизации, а таже оптимизации режимных параметров. Оптимизацию конструктивных и режимных параметров возможно осуществить путем применения методов математического планирования промышленного эксперимента и разработки математической модели, описывающей физико-химические процессы в печи, проведения ее идентификации и выполнения численного эксперимента.

С точки зрения математической физики процесса обжига кальцита $CaCO_3$ отностися к задачам теплопроводности, в которых материал претерпевает физические и химические превращения с поглощением теплоты химической реакции. Существенной особенностью таких процессов является наличие движущейся поверхности термического разложения S между зоной кальцита $CaCO_3$ и мела CaO. На этой границе происходит поглощение теплоты диссоциации $L = -1780$ кДж/кг, а также значительное изменение теплопроводности и других физических свойств. Такие процессы описываются достаточно сложными нелинейными уравнениями, что сильно затрудняет их решение. До настоящего времени надежные аналитические формулы и численные алгоритмы пригодные для физически обоснованных расчетов таких процессов в литературе отсутствуют.

Процесс переноса теплоты в процессе обжига в направлении x описывается дифференциальным уравнением теплопроводности

$$c\rho\frac{\partial t}{\partial \tau}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda\frac{\partial t}{\partial x}\right), \tag{1}$$

где t, c, ρ и λ - соответственно температура, теплоемкость, плотность и теплопроводность материала; τ - время.

Это уравнение определяет скорость изменения температуры $\frac{\partial t}{\partial \tau}$ в\точке x в зависимости от изменений градиента температуры $\frac{\partial t}{\partial x}$ и теплового потока $q_x = -\lambda\frac{\partial t}{\partial x}$ в направлении x, а также учитывает влияние физических свойств вещества c, ρ и λ. Поскольку выражение (1) является уравнением сохранения энергии при расчетах оно обеспечивает выполнение этого закона во всех точках x для различных моментов времени τ.

Для реальных процессов часто используется трехмерные уравнения теплопроводности

$$c\rho\frac{\partial t}{\partial \tau}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda\frac{\partial t}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda\frac{\partial t}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda\frac{\partial t}{\partial z}\right), \tag{2}$$

которое учитывает дополнительно изменения потоков теплоты $q_y = -\lambda \dfrac{\partial t}{\partial y}$ и $q_z = -\lambda \dfrac{\partial t}{\partial z}$.

Формулы и алгоритмя, применяемы для расчетов должны соответствовать граничному условию при радиационно-конвективного подвода теплоты от дымовых газов к поверхности обрабатываемого материала

$$\alpha_t(t_m - t_s) + \lambda t'_{sx} = 0, \tag{3}$$

$$\alpha_t = \alpha_r + \alpha_c. \tag{4}$$

Здесь α_t - суммарный коэффициент теплоотдачи на поверхности материала; α_r и α_s - соответственно коэффициент теплоотдачи излучением и конвекцией; t_m и t_s - соответственно температура дымовых газов и поверхности материала.

Следует учитывать, что коэффициент переноса теплоты излучением α_r определяется следующим соотношением с очень сильной нелинейностью

$$\alpha_r \Delta t = \left(\frac{t_m + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{t_s + 273}{100}\right)^4. \tag{5}$$

Поэтому граничное условие (3) является нелинейным, для которого эффективные методы расчета не разработаны.

Так как теплота диссоциации L оказывает очень сильное влияние на перемещение поверхности разложения S, при разработке методов расчета таких процессов всегда используется граничное условие которое учитывает действие отрицательного источника L на поверхности S

$$L\rho dx = (\lambda_1 t'_{1x} - \lambda_2 t'_{2x})dx, \tag{6}$$

где dx - перемещение зоны диссоциации за время $d\tau$; t'_{1x} и t'_{2x} - градиенты температуры на поверхности S в зоне CaO и $CaCO_3$ соответственно; λ_1 и λ_2 - коэффициент теплопроводности соотвественно CaO и $CaCO_3$ при температуре разложения $t_h = 900\,°C$.

С учетом соотношения (6) расчет выполняется для двух областей (до поверхности радела и за ней) , размеры которых непрерывно изменяются. При этом перемещения зоны диссоциации x значительно зависит от времени τ. При подстановке в уравнение (6) функций, определяющих зависимость $x = f(\tau)$, условие (6) оказывается сильно нелинейным.

Анализ литературных источников показывает, что существующие численные схемы непригодня для расчета подобных нелинейных задач, так как доказательства сходимости численных алгоритмов к решению задачи не получены, несмотря на многочисленные попытки специалистов в области математической физики. Кроме того, расчтеы с помощью различных численных алгоритмов часто приводят к противоречивым результатам, которые могут отличаться в 2 раза и более._Это означает, что численные алгоритмы, возможно, вообще не имеют сходимости к решениям нелинейного уравнения (2).

Важно учитывать, что доказательства сходимости численных алгоритмов к решению задачи (1), (3) и (5) обеспечивают выполнение закона сохранения энергии, который определяется уравнением теплопроводности (5). Поскольку указанные выше расхождения результатов свидетельствуют об очень больших нарушений основного физического закона сохранения, применение существующих численных алгоритмов приводит к недопустимым ошибкам и оказывается невозможным.

В данном случае предложено расчет выполнять с помощью аналитически полученных точных решений и формул, которые являются наиболее надежными соотношениями и не нуждаются в проверке их пригодности экспериментальными методами. Аналитические методы требуют выбора специальных математических функций, которые удовлетворяют уравнению теплопроводности (2), а также нелинейным граничным условиям (3) и (6).

С учетом того, что куски $CaCO_3$ имеют произвольную геометрическую форму, для оптимизации процесса обжига необходимо выполнить его теплофизическое моделирование для некоторой области, в пределах которой может изменяться конфигурация кусков. Такое моделирование может выполнено с помощью решений, которые получены для куба и шара [1], Поскольку куски кальцита имеют некоторую конфигурацию, промежуточную между кубом и шаром соответствующих характерных размеров.

При одинаковом объеме $V_s = (4/3)\pi R^3$ и куба со сторонами и куба со сторонами $2x$ $V_c = 8x^3$, т.е. при $V_s = V_c$ отношение их размеров $k_f = x/R$ составит $k_f = 1{,}24$. Если принять средний размер кусков $x = 100$ мм, то при моделировании радиус шара с таким же объемом составляет $R = 0{,}5 \cdot 100(1 + 1{,}24)/2 = 56$ мм. Размер куба со стороной $2x$ и тем же объемом_будет меньше в $(1 + 1{,}24)/2 = 1{,}12$ раза: $2x = 100/1{,}12 = 90{,}2$ мм.

С учетом вышеизложенного в дальнейшем моделировании выполняется по формулам, полученным для куба и шара [1]. При этом возможное время отжига для кусков, которые имеют средний размер x_c определяется, как среднее время для куба τ_c и шара τ_s

$$\tau = (\tau_c + \tau_s)/2.$$

Аналогичным образом определяется температура материала в различные моменты времени, если необходимо рассчитывать температурное поле в процессе отжига.

Аналитические формулы позволяют также определить значения коэфициентов теплопроводности λ, а также коэффициенты теплоотдачи α_r и α_s в процессе обжига, если имеются экспериментальные значения температуры для различных моментов времени при некоторых режимах. Поскольку значения

α_r и λ могут быть ненадежными это преимущество предлагаемых формул является очень важным.

Анализ результатов численного эксперимента позволят разработать технические мероприятия по модернизации печи. Внедрение разработанных предложений должны дать следующие теплотехнологические преимущества: а) исключается пережог материала за счет возможности поддержания температуры факела в любом заведомо заданном диапазоне; б) обеспечивается равномерность распределения температуры по высоте и поперечному сечению печи; в) обеспечивается надежность и безопасность эксплуатации при изменении в широких пределах параметров самой горелки и печи. Это должно в конечном счете обеспечить увеличение производительности печи на 10-20%, снижение удельного расхода топлива не менне, чем на 5...10%, снижение выбросов окислов азота не менне, чем 10...20%.

Литература

1. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высш. шк., 1967.

УДК 699.86:621

Параметрический анализ режимов работы новых конструктивов теплопроводов

Седнин В.А., Абражевич С.И., Аксенович А.В.
Белорусский национальный технический университет
СП “Бел-Изолит”

При оптимизации конструктивных параметров предварительно изолированного самокомпенсирующегося теплофикационного трубопровода [1] важно определить условия потери устойчивости (состояние при котором возникают большие осевые сжимающие силы и скручивающие моменты).

При потере устойчивости ось эквивалентного бруса выпучивается и может образовать пространственную кривую. Будем считать, что концы бруса закреплены шарнирно. Рассматриваемая система является неконсервативной, но для определения критических значений осевой силы P и скручивающего момента для данной системы можно воспользоваться статическим методом [2,3].