P-477

SEMINARIO INTERNACIONAL SOBRE USO RACIONAL DE LA ENERGIA EN LA INDUSTRIA

JULIO, 4 - 8 DE 1983
LIMA - PERU

BALANCE TERMICO DE UNA PLANTA DE CEMENTO

Joaquín A. Ramírez

olade

CEE

MEM

AIE

PI

BALANCE TERMICO DE UNA PLANTA DE CEMENTO

1. BALANCE DE MASAS Y BALANCE ENERGETICO

Muchos de los aspectos de un sistema que requiera combustible son función de la eficiencia térmica del sistema. Para determinar esa eficiencia es preciso elaborar el balance térmico del sistema.

Un requisito previo para la elaboración de un balance térmico es el conocimiento de las cantidades de sólidos, líquidos y gases que entran o salen del sistema, esto es, el balance de masas. En otras palabras, en una planta de cemento las cantidades de materias primas, agua, combustible y aire que entran en el sistema deben ser iguales a las cantidades de clinker, polvo, gases y pérdidas que se producen.

De manera similiar, el balance térmico las cantidades de calor que entran en el sistema deben ser iguales a las que salen de él. El balance debe mostrar un detalle de todos los procesos de utilización de calor y, en especial, qué procesos utilizan gran cantidad de calor y qué procesos utilizan escasas cantidades de él, lo que mostrará cuales aspectos son los que requieren mayor atención.

En general, el balance térmico de una planta de cemento mostrará las cantidades de energía utilizadas en:

1) Evaporación del agua
2) Calor de reacción
3) Pérdidas por radiación
4) Calor sensible en el clinker producido y
5) Pérdidas en el polvo.

2. Cantidades de combustible, crudo, agua y clinker

En el primer cálculo a efectuar es el del flujo de masa bajo condiciones de estabilidad de operación.

Se determina primero la cantidad, en Kg, de combustible utilizado por cada Kg de clinker producido. Si este consumo es unitario es k, y el combustible contiene h % de humedad y c % de cenizas, el consumo de combustible seco será:

$$K' = \frac{k\ (100-h)}{100} \text{ en Kg/Kg de clinker}$$

El contenido de cenizas será:

$$C' = \frac{ck'}{100} \text{ en Kg/Kg de clinker}$$

Si se supone que todas las cenizas quedan en el clinker, la cantidad de clinker obtenido de la materia prima será:

$$K = 1 - C'$$

Es evidente que si el combustible utilizado es gas, será, en general, c = h = 0.

Las materias primas sufren una pérdida de peso al pasar por el horno. La pérdida al fuego se determina en el laboratorio calentando una muestra a cerca de 100°C durante varias horas y midiendo la pérdida de peso entre una pesada previa y otra posterior. La pérdida depeso representa principalmente: 1) El agua asociada, 2) El agua combinada, 3) La combustión de la materia orgánica y 4) El CO_2 producto de la disociación de los carbonatos.

Si esa pérdida al fuego es del f%, la cantidad de crudo necesario para producir aquellos K Kg de clinker será:

$$M = \frac{100\ K}{100-f} \text{ en Kg}$$

Las materias primas sufren también una pérdida de peso por el polvo producido en los procesos, al que llamaremos p en Kg/Kg de clinker. Si la pérdida al fuego del polvo parcialmente descarbonatado es g %, equivale a:

$$P = p\ \frac{100 - g}{100 - f} \text{ en kg de crudo seco/kg de clinker}$$

El crudo requerido para producir un Kg de clinker será, por tanto:

$$C = M + P$$

Si el contenido de agua del crudo es a % (que casi no existirá en los procesos por vía seca), la cantidad de agua será:

$$W = \frac{Ca}{100-a} \text{ en Kg de agua/Kg de clinker}$$

3. Entradas de calor en el sistema. Componentes energéticos.

La entrada total del carlo en el sistema se obtiene sumando los diversos componentes. Es necesario tener en cuenta el calor sensible contenido en el combustible, el aire comburente y las materias primas y los calores potenciales del combustible y las materias primas.

3.1. Calor de la combustión

Si el consumo unitario de combustible seco era K' y el porder calorífico superior de este combustible es H_s en Kcal/Kg, el suministro de calor por el quemado del combustible será:

$$E = K' H_s \text{ en Kcal/Kg de clinker}$$

Como se ha tomado el poder calorífico superior, y en la práctica el agua producida por la combustión sale por la chimenea en forma de vapor, habrá que tener esto en cuenta al calcular el calor sensible de los gases de salida.

3.b. Combustión de las materias primas

Las materias primas contienen materia orgánica que, a su vez, tiene un contenido b % de carbono. Ello equivale a:

$$\frac{Cb}{100} \text{ Kg/Kg de clinker}$$

y, si el poder calorífico del carbono es H_c, el suministro de calor por el quemado de este carbono será:

$$E_2 = H_c \frac{Cb}{100} \text{ en Kcal/Kg de clinker}$$

3.c. Calor sensible en el combustible

Si el combustible entra en el sistema a una temperatura t_2, siendo t_1 la temperatura ambiente (genralmente t_1 = 15°a 25°C), y s su calor específico, la cantidad de calor suministrada al sistema por este concepto será:

$$E_3 = m\ s\ (t_2 - t_1)$$

donde m es el peso del combustible y s su calor específico medio entre las temperaturas t_1 y t_2.

3.d. Calor sensible en el aire comburente

Si la cantidad de aire necesaria para la combustión A Kg de aire/Kg de clinker, como el calor específico del aire es s_a=0,24 este calor sensible será:

$$E_4 = 0,24\ (t_1 - t_1)\ A = 0$$

Sale 0 ya se tomó la temperatura ambiente t_1 como temperatura de referencia.

3.e. Calor sensible en las materias primas:

Si el crudo que alimenta el horno está a una temperatura t_3 (t_3 t_1 para el caso de la pasta húmeda), y el calor específico del crudo es s_m (aproximadamente s_m = 0.2), el calor sensible de las materias primas secas será:

$$E' = C\ s_m\ (t_3 - t_1) \text{ en Kcal/kg de clinker}$$

El calor sensible de la humedad de la pasta para un contenido de humedad W antes calculado, será:

$$E'' = W\ (t_3 - t_1) \text{ en Kcal/Kg de clinker}$$

El calor sensible total del crudo será:

$$E_5 = E' + E''$$

4. Salidas de calor del sistema. Componentes energéticos

Los componentes energéticos de las salidas de calor del sistema son más complejos que los de las entradas.

4.a. Calor teórico de reacción

Para qué se produzcan carias reacciones químicas es necesario suministrar calor. Estas reacciones se llaman endotérmicas. Un ejemplo de ellas es la disociación del carbonato cálcico:

$$Ca\ CO3 = Ca\ O + CO2$$

Otras reacciones, en cambio, producen calor y se llaman exotérmicas. Un ejemplo evidente de estas es la combustión de cualuier combustible. También son exotérmicas las combinaciones de los óxidos Ca O, Si O2, Al2O3 y Fe2O3 en el horno de cemento.

Cada reacción química tiene una cierta cantidad de calor asociada. Este calor de reacción suele variar con la temperatura. Los calores de reacción se suelen presentar en términos de una reacción isotérmica a una cierta temperatura arbitraria de referencia, aunque dichas reacciones no tengan lugar necesariamente a esta temperatura de referencia. Así, para las reacciones que tienen lugar en un horno de cemento, a 20°C se tiene:

	Calor de reacción (Kcal/Kg.)
Disociación del carbonato cálcico: CaCO3 CaO + CO2	+ 422,0
Id. del carbonato magnésico: MgCO3 MgO + CO2	+ 310,0
Deshidratación de la Kaolinita: (a agua, alúmina y cuarzo)	+ 141,0
Id. de la ilita: (id.)	+ 41,7
Id. de la monmorillonita:	+ 39,4
Formación de aluminato tricálcico: 3CaO + Al2O3 - C3A	- 3,7
Id. de aluminio - ferrita tetracálcica: 4CaO + Al2O3 + Fe2O3 C4AF	- 20,1
Deshidratación del óxido férrico hidratado: 2Fe (OH)3 Fe2O3+3H2O	- 26,0
Formación del silicato tricálcico: 3CaO + SiO2 C3S	- 126,2
Id. del silicato dicálcico : 2CaO + SiO2 C2S	- 171,0

En la tabla anterior el signo (+) indica reacciones endotérmicas y

el signo (-) las exotérmicas. Para otra temperatur t distinta de 20°C basta suponer que los compuestos se llevan de t a 20° para su reacción, y luego sus productos de 20°a t.

Como se conoce la composición de las materias primas se puede calcular así el calor de reacción. Sin embargo, por simplicaidad, es frecuente utilizar la fórmula aproximada de H.Z. Strassen:

$$Q_1 = 2{,}22A + 6{,}48\ M + 7{,}646 - 5{,}11 - 0{,}59\ F$$

donde:

Q = Calor teórico de reacción en Kcal/Kg de clinker
A =% en peso de Al2O3 en el clinker
M,C,S = Id. de MgO, Cao y Si)2 respectivamente
F = Id. de Fe2O3 mas Mn2O3

En general, el calor teórico de reacción viene a ser de unos 420 Kcal/Kg de clinker.

4.b. Calor necesario para la evaporación del agua

El contenido de agua del crudo era W Kg de agua/Kg de clinker; el polvo era P, y las materias primas necesarias para 1 Kg de clinker eran C. De esa manera, la cantidad de humedad en las pérdidas por polvo es:

$$U = \frac{PW}{C} \text{ en Kg/Kg de clinker}$$

La cantidad W incluye esta humedad y eso deja:

$$W' = W - \frac{PW}{C} = W\,\frac{C - P}{C} \text{ Kg/Kg de clinker}$$

como contenido de agua del crudo.

El calor requerido para la evaporación de esta agua es:

$$Q_2 = 586\ W' \text{ Kcal/Kg de clinker}$$

Si el contenido de agua combinada en el crudo es b % la cantidad de humedad en las pérdidas por polvo será:

$$W'' = \frac{bk}{100} \quad \text{Kg de agua/Kg de clinker}$$

y el calor requerido para evaporar esta agua:

$$Q_2' = 586\ W'' \quad \text{Kcal/Kg de clinker}$$

La cantidad de agua en el combustible es:

$$W'' = \frac{kh}{100} \quad \text{Kg de agua/Kg de clinker}$$

y el calor requerido para evaporar esta humedad:

$$Q_2'' = 586 W'' \quad \text{Kcal/Kg de clinker}$$

Como en las entradas de calor se utilizó el poder calorífico superios del combustible, hay que incluir en las salidas de calor el calor latente del agua producida por la combustión del hidrógeno del combustible. Si P_A es la cantidad de agua producida por la combustión del hidrógeno, el calor necesario para evaporarla será:

$$Q_2''' = 586\ P_A \quad \text{Kcal/Kg de clinker}$$

4.c. Calor sensible de los gases de salida

Si llamamos M_w, M_c, M_s, M_o y M_n a los pesos de H2O, CO2, SO2, O2 y N2 respectivamente por Kg de clinker en los gases de salida, t_s a la temperatura de salida de estos gases, s_w, s_c, s_s, s_o y s_n a los respectivos calores específicos medios entre las temperaturas t_1 y t_s, el calor sensible de los gases de salida será:

$$Q_3 = (M_w s_w + M_s s_S + M_o s_p + M_n s_n)\ (t_s - t_1)$$

en Kcal/Kg de clinker.

4.d. Calor sensible del clinker

Si el clinker sale del enfriador a la temperatura t_k y su calor específico medio es s_k (viene a tener ordinariamente un valor alrededor de 0,2), el calor sensible será:

$$Q_4 = s_k(t_k - t_1) \quad \text{Kcal/Kg de clinker}$$

4.e. Pérdidas de calor del horno

Una ciera cantidad de calor es transferida al ambiente desde la superficie exterior del horno. Su cálculo es un problema difícil. Ese calor se transfiere de dos maneras:

a) Por radiación, que es porporcional a la diferencia de las cuartas potencias de las temperaturas absolutas de la superficie exterior del horno y del ambiente.

b) Por convección, que es proporcional a la diferencia de temperaturas de esa superficie y del ambiente.

La temperatura de la superficie exterior del horno varía grandemente a lo largo de su longitud, y en cada punto depende de la correspondiente temperatura en el horno, el tipo y espesor de los ladrillos refractarios y el espesor de cualquier aislamiento. En un horno moderno esas pérdidas vienen a ser del orden de 4.100 Kcal/hr-m^2 de superficie, aunque se presentan sustanciales variaciones en cada caso concreto. Llamaremos a estas pérdidas de calor Q_r.

4.f. Pérdidas de calor en el polvo

El polvo varía considerablemente en cantidad y composición lo que hace difícil un cálculo preciso. Se puede suponer que el polvo está parcialmente descarbonatado. Si la pérdida al fuego de la materia prima era

f y la del polvo g, se puede suponer que el porcentaje de descarbonatación es:

$$d = \frac{10000\ (f-g)}{f\ (100-g)} \quad \text{en \%}$$

Si el contenido de CO2 en el crudo era e % y el de carbono orgánico en las materias primas b %, el CO2 en el polvo será:

$$c_p = \frac{d}{100}\ \frac{C}{100} + \frac{44b}{1200} = \frac{f-g}{f\ (100-g)}\ e + \frac{44b}{12} \quad \text{en Kg/Kg de polvo}$$

Como la pérdida en polvo era p y éste sale del sistema a la temperatura t_s, si su calor específico es s_p (generalmente se toma el del CaCO3, o sea, 0,21), la pérdida por calor sensible será:

$$Q'_6 = p s_p\ (t_s - t_1) \quad \text{Kcal/Kg de clinker}$$

El porcentaje de descarbonatación se estimó en d. Suponiendo que este CO2 provenga de la disociación del carbonato cálcico, el peso de este carbonato disociado será:

$$m_p = \frac{100}{44}\ p\ c_p$$

Como se indicó en la tabla de calores de reacción, el calor necesario para la disociación del CaCO3 es 422 Kcal/Kg, luego el calor necesario para esta descarbonatación parcial del polvo será:

$$Q''_6 = 422\ m_p \quad \text{Kcal/Kg de clinker}$$

Las pérdidas de calor asociadas con el polvo son, pues:

$$Q_6 = Q'_6 + Q'' \quad \text{Kcal/Kg de clinker}$$

También esta asociada con el polvo la pérdida de calor requerida para secar la humedad de su pasta. Esta humedad era U, y el calor necesario para evaporarla será:

$$Q_7' = 586\ U \quad \text{Kcal/Kg de clinker}$$

Además, si el agua combinada en el crudo es v%, o en peso:

$$V = \frac{v\ P}{100} \qquad \text{Kg/Kg de clinker}$$

el calor necesario para evaporarla será:

$$Q_7'' = 586\ V \quad \text{Kcal/Kg de clinker}$$

El calor total necesario para evaporar el agua asociada con el polvo será pues:

$$Q_7 = Q_7' + Q_7'' \quad \text{Kcal/Kg de clinker}$$

Por tanto, la pérdida de calor producida por el polvo es:

$$Q_8 = Q_6 + Q_7 \quad \text{Kcal/Kg de clinker}$$

4.g. Pérdidas de calor por combustión incompleta

Si los procentajes en peso de los elementos del combustible C,H,S, O y N son respectivamente TC, TH, TS, TO y TN; y en análisis de los humos de salida en el aparato de Orsat da los porcentajes en volumen CO2, CO y O2, el peso de carbono que no forma CO2 es:

$$p' = \frac{0{,}2684 \cdot CO\ (X + 0{,}0378\ K'.TN)}{100 - CO2 - 4{,}776 \cdot O2 + 1{,}388 \cdot CO}$$

$$X = K' \frac{TC}{3} + TH + \frac{TS - TO}{8} + \frac{bC}{3}$$

y como el calor perdido por laproducción de CO en lugar de CO2 es de 2417 Kcal/Kg, el calor perdido por la combustión incompleta será:

$$Q_9 = 2417\ p'$$

5. Balance térmico

El total de entradas de calor al sistema es:

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5$$

Y el total de salidas de calor del sistema es:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_2' + Q_2'' + Q_2''' + Q_3 + Q_4 + Q_r + Q_8 + Q_9$$

Generalmente resulta que $Q \neq E$. Si la diferencia es substancial habrá que corregir los cálculos.