

ĐẠI HỌC ĐÀ NẴNG
TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA



Hoàng Minh Công

GIÁO TRÌNH LÒ LUYỆN KIM

Chương 1

KHÁI NIỆM VÀ CÁC ĐẶC TRƯNG CƠ BẢN

1.1. Khái niệm

Trong công nghiệp nói chung và ngành luyện kim nói riêng, nhiều quá trình công nghệ, chẳng hạn như quá trình nấu chảy, quá trình nung nóng vật liệu hoặc sản xuất vật liệu mới ... đòi hỏi phải tiến hành ở nhiệt độ cao hoặc rất cao. Để thực hiện các quá trình công nghệ này, người ta xây dựng các thiết bị nhiệt gọi chung là lò công nghiệp. Lò là thiết bị đảm nhận việc tạo ra nguồn nhiệt có công suất lớn với mức độ tập trung cao, đồng thời là nơi tổ chức quá trình trao đổi nhiệt để cung cấp nhiệt cho vật liệu gia công. Nhiệt cung cấp cho lò có thể là nhiệt sinh ra do đốt cháy nhiên liệu, do biến đổi điện năng thành nhiệt năng hoặc nhiệt tự phát sinh nhờ các phản ứng hóa học phát nhiệt xảy ra trong quá trình gia công vật liệu. Nhiệt từ nguồn nhiệt được truyền cho vật liệu gia công làm biến đổi trạng thái, tính chất của vật liệu gia công, chuẩn bị cho các bước công nghệ tiếp theo hoặc tạo ra vật liệu mới. Sự trao đổi nhiệt trong lò có thể thực hiện bằng truyền nhiệt bức xạ, đối lưu, dẫn nhiệt hoặc phối hợp các dạng truyền nhiệt trên. Cấu trúc lò hợp lý và chế độ nhiệt phù hợp với yêu cầu công nghệ là những yếu tố ảnh hưởng trực tiếp và có tính quyết định đến chất lượng, giá thành sản phẩm cũng như năng suất và các chỉ tiêu kinh tế khác của lò.

Lò công nghiệp là một thiết bị được sử dụng rộng rãi trong nhiều ngành công nghiệp. Trong ngành luyện kim lò được dùng để thiêu kết quặng, luyện thép, nấu hoặc luyện gang, nấu hoặc luyện các kim loại và hợp kim màu, nung kim loại... Trong ngành vật liệu xây dựng sử dụng các lò nung vật liệu như nung vôi, nung gạch, nung clinker sản xuất xi măng, nấu chảy men, nấu thủy tinh. Các lò sấy dùng để sấy nguyên vật liệu hoặc nông lâm sản trong chế biến.

Hiện nay lò công nghiệp sử dụng tới 50% lượng nhiên liệu đốt hàng năm và khoảng 25% lượng điện sản xuất ra.

1.2. Phân loại

Lò công nghiệp, cũng như lò luyện kim được phân loại theo các đặc trưng cơ bản sau:

- + Nguồn nhiệt sử dụng.
- + Đặc điểm công nghệ.
- + Chế độ công tác nhiệt.

+ Kết cấu của lò.

1.2.1. Phân loại theo nguồn nhiệt sử dụng

Theo nguồn nhiệt sử dụng, các lò công nghiệp được chia làm ba nhóm:

- + Lò dùng nhiên liệu.
- + Lò dùng điện năng.
- + Lò tự phát nhiệt.

Mỗi nhóm lại được phân ra các loại tùy theo đặc trưng chung của chúng.

a) Lò dùng nhiên liệu: sử dụng nhiệt sinh ra do đốt cháy nhiên liệu. Theo trạng thái của nhiên liệu, các lò dùng nhiên liệu được chia ra ba loại:

- + Lò dùng nhiên liệu rắn: than đá, than cốc, than củi ...
- + Lò dùng nhiên liệu lỏng: dầu mazut, dầu điêzen ...
- + Lò dùng nhiên liệu khí: khí lò cốc, khí lò cao, khí thiên nhiên ...

b) Lò dùng điện: sử dụng điện năng biến đổi thành nhiệt năng. Theo phương pháp biến đổi điện năng thành nhiệt năng người ta chia ra các loại:

+ Lò điện trở: biến đổi điện năng thành nhiệt năng dựa trên hiện tượng toả nhiệt khi cho dòng điện đi qua một điện trở hoặc vật dẫn có điện trở lớn. Thí dụ lò điện trở nấu kim loại màu, lò điện trở nung kim loại, lò điện trở sấy vật liệu ...

+ Lò điện cảm ứng: biến đổi điện năng thành nhiệt năng dựa trên cơ sở của hiện tượng cảm ứng điện từ. Thí dụ lò điện cảm ứng nấu thép, nấu gang ...

+ Lò điện hồ quang: biến đổi điện năng thành nhiệt năng dựa trên cơ sở hiện tượng phóng hồ quang giữa các điện cực khi đặt gần nhau. Thí dụ lò điện hồ quang trực tiếp nấu thép, gang, sản xuất đất đèn, lò điện hồ quang gián tiếp nấu đồng ...

c) Các lò tự phát nhiệt: sử dụng nhiệt do các phản ứng phát nhiệt sinh ra ngay trong bản thân vật liệu trong quá trình gia công. Thí dụ trong các lò chuyển luyện thép thổi oxy nhiệt cấp cho lò chủ yếu là do phản ứng cháy của các tạp chất C, Si, Mn.

1.2.2. Phân loại theo đặc điểm công nghệ

Theo đặc điểm công nghệ, các lò công nghiệp được phân ra:

a) Lò nấu chảy: vật liệu gia công được nung nóng và làm nóng chảy hoàn toàn. Thí dụ: các lò luyện thép, lò cao luyện gang, lò nấu hợp kim màu, lò nấu thủy tinh ...

b) Lò nung: vật liệu gia công bị nung nóng nhưng không bị hoá lỏng. Thí dụ lò nung kim loại trong gia công áp lực, nhiệt luyện, lò nung gạch, vôi, clinker ...

1.2.3. Phân loại theo chế độ công tác nhiệt

Theo đặc trưng truyền nhiệt từ nguồn nhiệt tới bề mặt vật liệu gia công trong lò, người ta phân ra:

- + Các lò làm việc ở chế độ bức xạ.
- + Các lò làm việc ở chế độ đối lưu.
- + Các lò làm việc ở chế độ lớp.

a) Lò làm việc ở chế độ bức xạ: sự truyền nhiệt tới bề mặt vật liệu gia công chủ yếu bằng truyền nhiệt bức xạ. Theo sự phân bố dòng nhiệt từ nguồn nhiệt tới vật nung và từ nguồn nhiệt tới tường, nóc lò, người ta phân ra ba loại:

- + Chế độ bức xạ phân bố đều.
- + Chế độ bức xạ trực tiếp.
- + Chế độ bức xạ gián tiếp.

Thông thường lò được coi là làm việc ở chế độ bức xạ khi nhiệt độ trong không gian làm việc của lò trên 600°C . Thí dụ lò nung thép để gia công áp lực hoặc nhiệt luyện, lò phản xạ nấu nhôm, đồng ...

b) Lò làm việc ở chế độ đối lưu: sự truyền nhiệt tới bề mặt vật liệu gia công chủ yếu bằng trao đổi nhiệt đối lưu. Trong các lò làm việc ở chế độ đối lưu, trao đổi nhiệt được thực hiện thông qua một môi chất chuyển động tiếp xúc với vật liệu gia công. Theo nguồn gốc lực tác động gây ra chuyển động của môi chất, người ta phân ra:

- + Chế độ đối lưu tự nhiên.
- + Chế độ đối lưu cưỡng bức.

Thông thường các lò có nhiệt độ làm việc dưới 600°C thuộc lò làm việc ở chế độ đối lưu. Thí dụ: lò sấy vật liệu, nông sản, thực phẩm, lò ram thép ...

c) Lò làm việc theo lớp: vật liệu gia công là vật liệu dạng hạt được chất đầy toàn bộ hay một phần không gian làm việc của lò thành lớp, còn khí nóng chuyển động qua lớp hạt và truyền nhiệt cho chúng. Trong lò tồn tại cả ba dạng trao đổi nhiệt: bức xạ, đối lưu và dẫn nhiệt. Theo trạng thái của các hạt vật liệu trong lớp, người ta phân ra:

- + Chế độ lớp chặt.
- + Chế độ lớp sôi.
- + Chế độ lớp lơ lửng.

1.2.4. Phân loại theo kết cấu

Theo kết cấu lò được chia ra các loại: lò đứng, lò tang quay, lò buồng, lò hầm, lò giếng, lò nhiều vùng . . .

1.3. Các đặc trưng cơ bản của lò công nghiệp

Các đặc trưng cơ bản của một lò công nghiệp bao gồm:

- + Chế độ nhiệt độ.
- + Chế độ nhiệt.
- + Công suất nhiệt.
- + Năng suất.
- + Hiệu suất của lò.
- + Suất tiêu hao nhiên liệu tiêu chuẩn.

1.3.1. Chế độ nhiệt độ của lò

a) Nhiệt độ lò: nhiệt độ lò là nhiệt độ trung bình giữa nhiệt độ của nguồn nhiệt và nhiệt độ của tường, nóc lò. Nhiệt độ lò phụ thuộc vào nhiệt độ cháy lý thuyết của nhiên liệu, phụ tải nhiệt của lò, cấu trúc và tính chất cách nhiệt của lò.

$$t_{lò} = \eta \cdot t_{lt}; \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (1.1)$$

Trong đó:

- + t_{lt} là nhiệt độ cháy lý thuyết của nhiên liệu, [$^{\circ}\text{C}$].
- + η là hệ số xét đến ảnh hưởng của cấu trúc và tính chất cách nhiệt của lò.

Trong thực tế nhiệt độ của lò thường được đo bằng các cặp nhiệt điện.

b) Chế độ nhiệt độ của lò: là quy luật thay đổi của nhiệt độ lò theo thời gian.

$$t_{lò} = f(\tau) \quad (1.2)$$

Những lò có nhiệt độ không thay đổi theo thời gian gọi là lò có chế độ nhiệt độ ổn định.

$$\frac{\partial t_{lò}}{\partial \tau} = 0 \quad \text{hay} \quad t_{lò} = \text{const.}$$

Những lò có nhiệt độ thay đổi theo thời gian gọi là lò có chế độ nhiệt độ không ổn định.

$$\frac{\partial t_{lò}}{\partial \tau} \neq 0 \quad \text{hay} \quad t_{lò} \neq \text{const.}$$

1.3.2. Chế độ nhiệt của lò

Lượng nhiệt cấp cho lò tại một thời điểm nhất định được gọi là phụ tải nhiệt của lò tại thời điểm đó và quy luật thay đổi phụ tải nhiệt theo thời gian được gọi là chế độ nhiệt của lò.

$$Q = f(\tau) \quad (1.3)$$

Những lò có phụ tải nhiệt không thay đổi theo thời gian được gọi là lò có chế độ nhiệt ổn định.

$$\frac{\partial Q}{\partial \tau} = 0 \quad \text{hay} \quad Q = \text{const}$$

Những lò có phụ tải nhiệt thay đổi theo thời gian được gọi là lò có chế độ nhiệt không ổn định.

$$\frac{\partial Q}{\partial \tau} \neq 0 \quad \text{hay} \quad Q \neq \text{const}$$

1.3.3. Công suất nhiệt của lò

Công suất nhiệt của lò là phụ tải nhiệt lớn nhất mà lò có thể tiếp nhận được trong một đơn vị thời gian mà vẫn đảm bảo điều kiện làm việc bình thường. Công suất nhiệt thường được tính bằng [KW].

1.3.4. Năng suất của lò

Năng suất của lò là lượng sản phẩm gia công được bởi lò trong một đơn vị thời gian. Năng suất lò thường được tính bằng [kg/h], [tấn/h] hoặc [kg/ngày], [tấn/ngày].

Ngoài ra, để so sánh năng suất của các lò khác nhau, người ta còn dùng khái niệm năng suất riêng hay còn gọi là cường độ đáy lò, đó là lượng sản phẩm gia công được ứng với một đơn vị diện tích đáy lò trong một đơn vị thời gian. Thông thường cường độ đáy lò được tính theo [kg/m².h].

1.3.5. Các hiệu suất của lò

a) Hiệu suất sử dụng nhiệt có ích

Hiệu suất sử dụng nhiệt có ích của lò là tỉ số giữa lượng nhiệt có ích để gia công vật liệu và toàn bộ lượng nhiệt cấp từ bên ngoài vào cho lò trong cùng một đơn vị thời gian.

$$\eta_q = \frac{Q_{\text{có ích}}}{\sum Q_{\text{cấp}}} \cdot 100; \quad [\%] \quad (1.4)$$

Lượng nhiệt cấp cho lò từ ngoài vào xác định theo công thức:

$$\sum Q_{\text{cấp}} = Q_c + Q_{\text{kk}}^{\text{vl}} + Q_{\text{nl}}^{\text{vl}}; \quad [\text{kJ/h}] \quad (1.5)$$

Trong đó:

+ Q_c là lượng nhiệt do đốt cháy nhiên liệu, được xác định theo công thức:

$$Q_c = B \cdot Q_d; \quad [\text{kJ/h}] \quad (1.6)$$

+ $Q_{\text{kk}}^{\text{vl}}$ là lượng nhiệt vật lý do nung nóng trước không khí được xác định theo công thức:

$$Q_{\text{kk}}^{\text{vl}} = B L_n f (i_{\text{kk}}^{\text{c}} - i_{\text{kk}}^{\text{d}}); \quad [\text{kJ/h}] \quad (1.7)$$

+ $Q_{\text{nl}}^{\text{vl}}$ là lượng nhiệt vật lý do nung nóng trước nhiên liệu được xác định theo công thức:

$$Q_{\text{nl}}^{\text{vl}} = B (i_{\text{nl}}^{\text{c}} - i_{\text{nl}}^{\text{d}}); \quad [\text{kJ/h}] \quad (1.8)$$

Với: B là lượng nhiên liệu đốt cháy trong một giờ, $[\text{kg/h}]$ hoặc $[\text{m}^3/\text{h}]$.

Q_d - nhiệt trị thấp của nhiên liệu, $[\text{kJ/kg}]$ hoặc $[\text{kJ/m}^3]$.

L_n - lượng không khí dùng để đốt cháy 1 kg hoặc 1m^3 nhiên liệu, $[\text{m}^3/\text{kg}]$ hoặc $[\text{m}^3/\text{m}^3]$.

f - tỉ lệ không khí nung nóng trước.

$i_{\text{kk}}^{\text{d}}, i_{\text{nl}}^{\text{d}}$ - nhiệt hàm không khí và nhiên liệu trước khi nung, $[\text{kJ/m}^3]$.

$i_{\text{kk}}^{\text{c}}, i_{\text{nl}}^{\text{c}}$ - nhiệt hàm không khí và nhiên liệu sau khi nung, $[\text{kJ/m}^3]$.

Lượng nhiệt có ích xác định theo công thức sau:

$$Q_{\text{có ích}} = Q_{\text{vật liệu}} + Q_{\text{xí}} + Q_{\text{thu}} - Q_{\text{toả}}; \quad [\text{kJ/h}] \quad (1.9)$$

Trong đó:

+ $Q_{\text{vật liệu}}$ - lượng nhiệt cần thiết để gia công vật liệu, $[\text{kJ/h}]$.

+ $Q_{\text{xí}}$ - lượng nhiệt cần thiết để tạo xỉ, $[\text{kJ/h}]$.

+ Q_{thu} - lượng nhiệt cấp cho các phản ứng thu nhiệt, $[\text{kJ/h}]$.

+ $Q_{\text{toả}}$ - lượng nhiệt toả ra từ các phản ứng toả nhiệt, $[\text{kJ/h}]$.

Ta có công thức tổng quát xác định hiệu suất nhiệt có ích như sau:

$$\eta_{\text{có ích}} = \frac{Q_{\text{vật liệu}} + Q_{\text{xí}} + Q_{\text{thu}} - Q_{\text{toả}}}{Q_c + Q_{\text{kk}}^{\text{vl}} + Q_{\text{nl}}^{\text{vl}}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (1.10)$$

b) Hiệu suất sử dụng nhiên liệu có ích

Hiệu suất sử dụng nhiên liệu có ích là tỉ số giữa lượng nhiệt có ích và lượng nhiệt cấp vào lò do đốt cháy nhiên liệu:

$$\eta_{\text{nhiên liệu}} = \frac{Q_{\text{có ích}}}{Q_c} \cdot 100 ; \quad [\%] \quad (1.11a)$$

Hay:
$$\eta_{\text{nhiên liệu}} = \frac{Q_{\text{vật liệu}} + Q_{\text{xí}} + Q_{\text{thu}} - Q_{\text{toả}}}{Q_c} \cdot 100 \quad [\%] \quad (1.11b)$$

c) Hiệu suất sử dụng nhiệt của lò

Ngoài lượng nhiệt có ích, một lượng nhiệt đáng kể bị mất mát ngay tại lò do truyền nhiệt qua tường lò, bức xạ qua cửa lò, do khói rò qua cửa, do nước làm nguội, tích nhiệt của tường lò, nung nóng các giá đỡ ... Để đặc trưng cho khả năng sử dụng nhiệt và cấu trúc của lò (về phương diện nhiệt) người ta sử dụng khái niệm hiệu suất sử dụng nhiệt của lò, đó là tỉ số giữa tổng lượng nhiệt có ích và lượng nhiệt mất mát tại lò so với toàn bộ lượng nhiệt cấp cho lò.

$$\eta_q = \frac{Q_{\text{có ích}} + \sum Q_{\text{mất mát tại lò}}}{\sum Q_{\text{cấp}}} \cdot 100 ; \quad [\%] \quad (1.12a)$$

Hay:
$$\eta_q = \frac{\sum Q_{\text{cấp}} - Q_{\text{khối thải}}}{\sum Q_{\text{cấp}}} \cdot 100 ; \quad [\%] \quad (1.12b)$$

So sánh công thức (1-4) và (1-12a) ta thấy hiệu suất sử dụng nhiệt bao giờ cũng lớn hơn hiệu suất sử dụng nhiệt có ích. Nếu cấu trúc lò hợp lý, sao cho mất mát nhiệt tại lò là không đáng kể, thì hiệu suất sử dụng nhiệt có ích có giá trị xấp xỉ với hiệu suất sử dụng nhiệt, khi đó về phương diện sử dụng nhiệt thì lò có cấu trúc tốt nhất.

1.3.6. Suất tiêu hao nhiên liệu tiêu chuẩn

Trong thực tế, các lò công nghiệp sử dụng nhiều loại nhiên liệu khác nhau và cấu trúc lò, công nghệ gia công cũng khác nhau, bởi vậy để đánh giá và so sánh chúng về phương diện nhiệt người ta dùng khái niệm suất tiêu hao nhiên liệu tiêu chuẩn, đó là lượng nhiên liệu tiêu chuẩn cần thiết để gia công một ki-lô-gam vật liệu, với quy ước một ki-lô-gam nhiên liệu tiêu chuẩn có nhiệt trị thấp bằng 7.000 kcal/kg hoặc 29.300 kJ/kg.

$$b = \frac{B \cdot Q_d}{29\,300 \cdot P} ; \quad \left[\frac{\text{kg nhiên liệu tiêu chuẩn}}{\text{kg vật liệu gia công}} \right] \quad (1.13)$$

Trong đó: B - lượng tiêu hao nhiên liệu [kg/h].

Q_d - nhiệt trị thấp của nhiên liệu [kJ/kg].

P - năng suất lò [kg/h].

Chương 2

CÔNG TÁC NHIỆT CỦA LÒ

2.1 Chế độ làm việc bức xạ

Chế độ làm việc bức xạ là chế độ làm việc mà sự trao đổi nhiệt bên ngoài của lò chủ yếu bằng truyền nhiệt bức xạ. Thông thường các lò có nhiệt độ làm việc cao (trên 600 - 700°C) đều làm việc ở chế độ bức xạ.

2.1.1. Một số khái niệm và định luật cơ bản về truyền nhiệt bức xạ

a) Bức xạ nhiệt và sự hấp thụ năng lượng bức xạ

Theo vật lý học hiện đại thì bức xạ nhiệt là một hiện tượng phức tạp, ở một số trường hợp nó có tính chất sóng, ở một số trường hợp khác nó lại có tính chất hạt, nghĩa là những luồng hạt bay rất nhanh gọi là lượng tử hay phôtôn. Ngày nay, người ta coi bức xạ nhiệt là một dạng của sóng điện từ, có bước sóng từ 0,76 - 400 μm .

Khả năng bức xạ nhiệt của một vật thể được đánh giá qua năng lượng bức xạ ứng với một đơn vị diện tích bề mặt vật thể trong một đơn vị thời gian:

$$E = \frac{Q}{F} \quad ; \quad [\text{W}/\text{m}^2] \quad (2.1)$$

Trong đó :

Q là lượng năng lượng bức xạ của vật thể trong một đơn vị thời gian, $[\text{J}/\text{s}]$.

F là diện tích bề mặt của vật thể, $[\text{m}^2]$.

Năng lượng bức xạ ứng với các tia nhiệt có chiều dài bước sóng khác nhau thì khác nhau, cường độ bức xạ đơn sắc (I_λ) ứng với một chiều dài bước sóng (λ) xác định bởi công thức :

$$I_\lambda = \frac{dE}{d\lambda} ; \quad [\text{W}/\text{m}^2.\text{m}] \quad (2.2)$$

Khi một luồng bức xạ nhiệt (Q) đập tới một vật thể khác, một phần bị vật thể hấp thụ (Q_A), một phần bị phản xạ trở lại (Q_R) còn một phần nó cho đi qua (Q_D).

$$Q_A + Q_R + Q_D = Q$$

$$\text{Suy ra} \quad \frac{Q_A}{Q} + \frac{Q_R}{Q} + \frac{Q_D}{Q} = \frac{Q}{Q} = 1$$

$$\text{Hay} \quad A + R + D = 1 \quad (2.3)$$

Trong đó :

A - là khả năng hấp thụ (hệ số hấp thụ).

R - là khả năng phản xạ (hệ số phản xạ).

D - là khả năng cho qua (hệ số cho qua).

Dựa vào khả năng hấp thụ, phản xạ và cho qua đối với bức xạ nhiệt, người ta phân chia các vật thể ra như sau:

+ Vật đen tuyệt đối : $A = 1$; $R = 0$; $D = 0$.

+ Vật trắng tuyệt đối : $A = 0$; $R = 1$; $D = 0$.

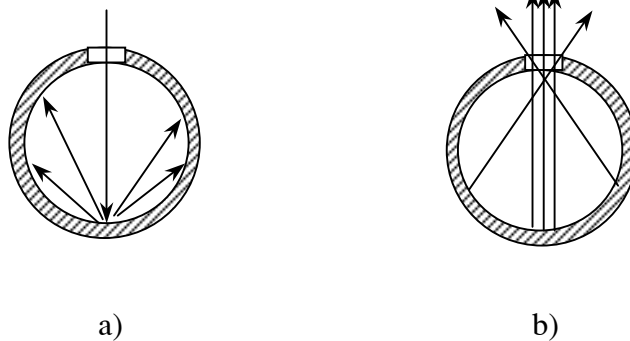
+ Vật trong suốt : $A = 0$; $R = 0$; $D = 1$.

+ Vật xám : $A + R = 1$; $D = 0$.

Trên thực tế không có vật đen tuyệt đối, tức là các vật hấp thụ hoàn toàn, không phản xạ và cũng không cho qua các tia nhiệt với mọi chiều dài bước sóng đập tới nó. Người ta coi các vật thể hấp thụ hầu hết các tia nhiệt bức xạ tới nó và chỉ phản xạ một phần nhỏ là vật đen. Trong lò công nghiệp, hầu hết các vật liệu ở thể rắn và thể lỏng được coi là vật xám ($A+R=1$), các sản phẩm cháy ở thể khí chỉ có khả năng hấp thụ và cho qua mà không có khả năng phản xạ ($R=0$).

b) Sự bức xạ và hấp thụ năng lượng bức xạ của vật đen tuyệt đối

Mẫu vật đen tuyệt đối được chế tạo bằng cách lấy một khối cầu rỗng làm bằng vật liệu hoàn toàn đục ($D=0$) rồi khoét một lỗ nhỏ trên thành của nó, bất kỳ một tia nhiệt nào đi qua lỗ vào trong khối cầu đều bị hấp thụ hoàn toàn mặc dầu mặt trong của nó có khả năng phản xạ.



Hình 2.1 Mẫu vật đen tuyệt đối
a) Hấp thụ b) Bức xạ

Bằng thực nghiệm và lý thuyết người ta đã chứng minh được các định luật về bức xạ của vật đen tuyệt đối như sau:

+ Định luật Plăng: xác lập quan hệ giữa cường độ bức xạ của vật đen tuyệt đối với chiều dài bước sóng và nhiệt độ tuyệt đối của nó:

$$I_{\lambda} = \frac{C_1 \cdot \lambda^{-5}}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1}; \quad \left[\frac{W}{m^2 \cdot m} \right] \quad (2.4)$$

Trong đó:

C_1, C_2 là các hằng số thực nghiệm.

$$C_1 = 3,69 \cdot 10^{-16} \quad [W \cdot m^2]$$

$$C_2 \approx 1,44 \cdot 10^{-2} \quad [m \cdot ^\circ K]$$

+ Định luật Stêphan-Bolzman: xác lập quan hệ giữa khả năng bức xạ của vật đen tuyệt đối với nhiệt độ tuyệt đối của nó:

$$E_0 = \int_{\pi=0}^{\infty} I \cdot d\lambda = \sigma_0 T^4; \quad \left[\frac{Kcal}{m^2 \cdot h} \right] \text{ hay } [W/m^2] \quad (2-5a)$$

Trong đó:

T là nhiệt độ tuyệt đối của vật, $[^\circ K]$.

σ_0 là hệ số bức xạ của vật đen tuyệt đối:

$$\sigma_0 = 5,7 \cdot 10^{-8}; \quad \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K^4} \right]$$

Công thức (2-5a) thường được viết dưới dạng sau:

$$E_0 = C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4; \quad [W/m^2] \text{ hay } \left[\frac{Kcal}{m^2 \cdot h} \right] \quad (2.5b)$$

$$C_0 = 5,7 \text{ cũng được gọi là hệ số bức xạ của vật đen tuyệt đối, } \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K^4} \right]$$

+ Định luật Lăm-bec-ta: xác lập sự phân bố năng lượng bức xạ theo các hướng trong không gian.

Theo định luật Lăm-bec-ta, mật độ tia bức xạ đi ra từ lỗ hổng của mẫu vật đen tuyệt đối theo các hướng khác nhau thì khác nhau, nó tỉ lệ với cosin của góc φ là góc tạo thành bởi hướng nghiên cứu với pháp tuyến của mặt phẳng lỗ hổng:

$$E_{\varphi} = E_n \cos \varphi \quad (2.6)$$

Trong đó: E_n, E_{φ} là mật độ tia năng lượng theo hướng pháp tuyến và hướng nghiên cứu, φ là góc giữa hướng nghiên cứu và hướng pháp tuyến.

+ Định luật bình phương khoảng cách: mật độ tia bức xạ tỉ lệ nghịch với bình phương khoảng cách tới nguồn bức xạ:

$$E_r = \frac{E_1}{r^2} \quad (2.7)$$

Trong đó: E_1 là mật độ tia bức xạ ở khoảng cách một mét từ nguồn bức xạ, E_r là mật độ tia bức xạ ở khoảng cách r mét tới nguồn bức xạ.

c) Sự bức xạ và hấp thụ năng lượng bức xạ của vật xám

Trong thực tế tính toán nhiệt trong các lò công nghiệp người ta thừa nhận bức xạ của các vật rắn và chất lỏng là bức xạ của vật xám và gọi là bức xạ xám.

Đối với vật xám lý tưởng, cường độ bức xạ của nó chỉ khác với cường độ bức xạ của vật đen tuyệt đối bởi một hệ số ε nào đó ($\varepsilon < 1$) ở cùng một nhiệt độ và bước sóng. Bởi vậy, khả năng bức xạ của vật xám có thể xác định theo công thức:

$$E = \varepsilon E_0 = \varepsilon \sigma_0 T^4 \quad (2.8a)$$

$$\text{Hay} \quad E = \varepsilon C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 = C \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad (2.8b)$$

Hệ số ε được gọi là độ đen của vật xám, C được gọi là hệ số bức xạ của vật xám.

Nghiên cứu khả năng hấp thụ bức xạ của các vật thể nói chung và vật xám nói riêng, người ta thấy nếu một vật thể có khả năng hấp thụ năng lượng bức xạ mạnh thì nó cũng có khả năng bức xạ mạnh.

Theo định luật Kiếc-khốp thì: Tỷ số giữa khả năng bức xạ của vật xám và khả năng hấp thụ của nó có giá trị đồng nhất với mọi vật xám và bằng khả năng bức xạ của vật đen tuyệt đối ở cùng nhiệt độ trên.

$$\frac{E_1}{A_1} = \frac{E_2}{A_2} = \dots = \frac{E_n}{A_n} = E_0 \quad (2.9)$$

So sánh (2.8a) và (2.9) ta thấy với vật xám, giá trị của hệ số hấp thụ A cũng bằng độ đen ε của nó.

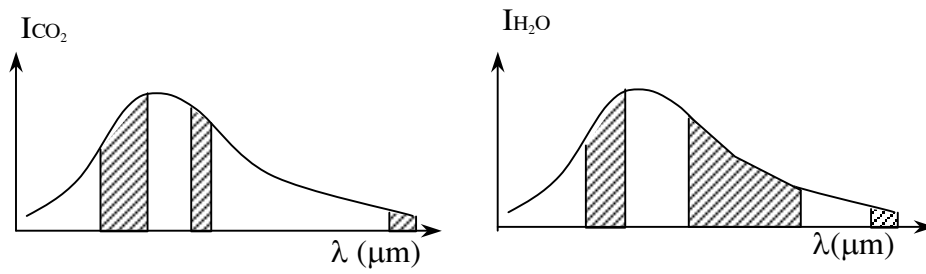
d) Sự bức xạ và hấp thụ năng lượng bức xạ của khí

Trong các lò luyện kim, khối lò bao gồm các khí có một, hai hay nhiều nguyên tử, những khí có một hay hai nguyên tử như Ar, N₂, O₂, H₂, CO ... có quang phổ bức xạ là những dải hẹp cho nên tổng năng lượng bức xạ của những khí này ở nhiệt độ cao không lớn lắm. Thực tế có thể coi những khí này hoàn toàn không bức xạ nhiệt và cũng không hấp thụ năng lượng bức xạ đi qua nó. Bởi vậy, không khí sạch có thể coi như vật hoàn toàn trong suốt. Những khí có ba hay nhiều nguyên tử có khả năng hấp thụ và bức xạ khá mạnh ở nhiệt độ cao.

Trong các lò luyện kim, quan trọng nhất là sự bức xạ của khí CO₂ và H₂O, quang phổ của chúng trình bày trên hình 2.2.

Khí CO₂: 2,36 - 3,02 μm; 4,01 - 4,08 μm; 12,5 - 16,3 μm.

Hơi nước : 2,24 - 2,27 μm; 4,80 - 8,5 μm; 12 - 25 μm.



Hình 2.2 Quang phổ bức xạ của khí CO₂ và H₂O

Năng lượng bức xạ của khí CO₂ và H₂O phụ thuộc vào áp suất riêng phần của khí (p), chiều dày có hiệu quả của lớp khí (S_{hq}) và nhiệt độ, có thể xác định bằng công thức sau:

$$E_{\text{CO}_2} = 4,1 \cdot (pS_{\text{hq}})^{\frac{1}{3}} \left(\frac{T}{100} \right)^{3,5}; \quad [\text{W/m}^2] \quad (2.10)$$

$$E_{\text{H}_2\text{O}} = 40,7 \cdot p^{0,8} \cdot S_{\text{hq}}^{0,6} \left(\frac{T}{100} \right)^3; \quad [\text{W/m}^2] \quad (2.11)$$

Từ các công thức trên ta nhận thấy bức xạ nhiệt của khí CO₂ và H₂O không tuân đúng theo định luật Stêphan- Bôlzman. Tuy nhiên để tính toán được thuận lợi người ta coi bức xạ của khí cũng tuân theo định luật Stêphan- Bôlzman nhưng độ đen của chúng phụ thuộc nhiệt độ.

$$E_k = \varepsilon_k C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad (2.12)$$

Độ đen của khí ε_k xác định theo công thức:

$$\varepsilon_k = \varepsilon_{\text{CO}_2} + \beta \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} \quad (2.13)$$

Biểu đồ xác định $\varepsilon_{\text{CO}_2}$, $\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}$ và β có dạng như trên hình 2.3.

Chiều dày có hiệu quả của lớp khí bức xạ tính theo công thức:

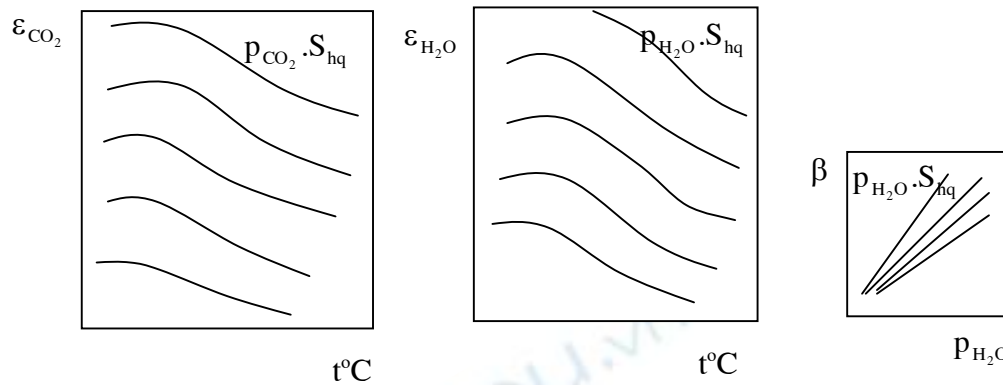
$$S_{\text{hq}} = \eta \frac{4V}{F} \quad (2.14)$$

Trong đó:

+ η là hệ số đặc trưng cho phần năng lượng của khí đến bề mặt vật nung hay tường lò. Thường $\eta = 0,9 - 0,95$.

+ V là thể tích khối khí, m^3 .

+ F là diện tích bề mặt bao quanh khối khí, m^2 .



Hình 2.3 Biểu đồ tra ϵ_{CO_2} , ϵ_{H_2O} và β

e) Hệ số góc bức xạ

Xét hai bề mặt tham gia trao đổi nhiệt có diện tích là F_1 và F_2 , nếu từ bề mặt F_1 bức xạ một năng lượng Q_1 ra môi trường bao quanh thì chỉ một phần năng lượng bức xạ này đập tới bề mặt F_2 và ngược lại cũng vậy. Người ta gọi tỉ số giữa phần năng lượng bức xạ đập tới F_2 (Q_{12}) trên tổng năng lượng bức xạ của mặt F_1 là hệ số góc bức xạ từ mặt F_1 tới mặt F_2 , ký hiệu là φ_{12} :

$$\varphi_{12} = \frac{Q_{12}}{Q_1} \quad (2-14a)$$

Tương tự ta có hệ số góc bức xạ từ mặt F_2 tới mặt F_1 là:

$$\varphi_{21} = \frac{Q_{21}}{Q_2} \quad (2-14b)$$

Hệ số góc bức xạ không phụ thuộc nhiệt độ, hệ số bức xạ, khoảng cách giữa hai mặt mà nó hoàn toàn được xác định bởi các góc đặc trưng cho vị trí tương đối giữa hai mặt trong không gian.

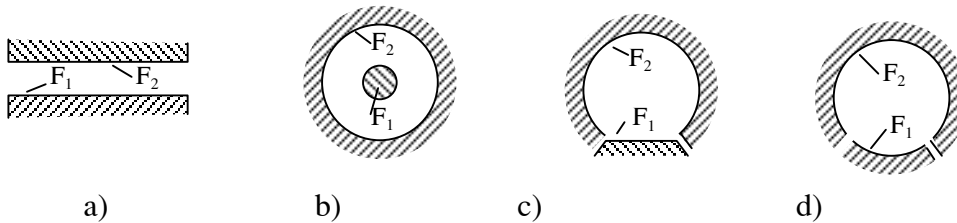
Dưới đây là giá trị của số hệ số góc bức xạ trong một số trường hợp đơn giản (hình 2.4):

- Trường hợp (a): Hai mặt phẳng song song có khoảng cách nhỏ.

$$\varphi_{12} = \varphi_{21} = 1$$

- Trường hợp (b): Hai mặt cầu hoặc hai mặt trụ có khoảng cách bé so với chiều dài lông nhau:

$$\varphi_{12} = 1 \quad \text{và} \quad \varphi_{21} = \frac{F_1}{F_2}$$



Hình 2.4 Sơ đồ tính hệ số góc bức xạ giữa hai bề mặt

- Trường hợp (c): Mặt cầu rỗng và mặt phẳng cắt nhau.

$$\varphi_{12} = 1 \quad \text{và} \quad \varphi_{21} = \frac{F_1}{F_2}$$

- Trường hợp (d): Hai mặt chỏm cầu tạo thành mặt cầu.

$$\varphi_{12} = \frac{F_2}{F_1 + F_2} \quad \text{và} \quad \varphi_{21} = \frac{F_1}{F_1 + F_2}$$

2.1.2. Chế độ làm việc bức xạ phân bố đều

a) Truyền nhiệt ở chế độ bức xạ phân bố đều

Ở chế độ bức xạ phân bố đều, dòng nhiệt bức xạ từ nguồn nhiệt tới bề mặt vật nung bằng dòng nhiệt bức xạ từ nguồn nhiệt tới tường và nóc lò (gọi chung là tường lò).

$$q_N^V = q_N^T$$

Đặc trưng của chế độ bức xạ phân bố đều là sự phân bố đồng đều của nhiệt độ và độ đen của nguồn nhiệt trong toàn bộ thể tích không gian làm việc của lò.

Khi lò làm việc ở chế độ phân bố đều, tường lò đóng vai trò quan trọng trong quá trình trao đổi nhiệt. Có thể coi tường lò như vật trung gian tham gia vào quá trình trao đổi nhiệt giữa nguồn nhiệt và vật nung. Do độ đen tường lò khá lớn ($\varepsilon_T > 0,6$), trong quá trình trao đổi nhiệt, tường lò hấp thụ mạnh bức xạ nhiệt từ nguồn nhiệt đập tới, làm cho nhiệt độ tăng lên và trở thành vật bức xạ truyền nhiệt tới vật nung. Khi ở trạng thái ổn định, nhiệt độ tường lò càng cao thì lượng nhiệt bức xạ truyền từ tường lò

tới vật nung càng lớn, nếu độ đen của ngọn lửa $\varepsilon_N = 1$ và tổn thất nhiệt qua tường $q_{tt} = 0$ thì nhiệt độ tường lò đạt cực đại và bằng nhiệt độ ngọn lửa:

$$T_T = T_N$$

Trong thực tế, do $\varepsilon_N < 1$ và tổn thất nhiệt qua tường $q_{tt} > 0$ nên nhiệt độ tường thường nằm trong khoảng giữa nhiệt độ vật nung và nhiệt độ ngọn lửa:

$$T_V < T_T < T_N$$

Độ đen của nguồn nhiệt cũng ảnh hưởng lớn tới hiệu quả truyền nhiệt tới vật nung, khi tăng ε_N hiệu quả truyền nhiệt tăng.

b) Chọn nhiên liệu và phương pháp đốt

Chế độ làm việc bức xạ phân bố đều được ứng dụng rộng rãi trong các lò nhiên liệu. Tiêu chuẩn quan trọng để chọn nhiên liệu khi lò làm việc ở chế độ bức xạ phân bố đều là khả năng tạo ra ngọn lửa có độ sáng cao (ε_N lớn). Do vậy, nhiên liệu thích hợp là các loại nhiên liệu khí chứa nhiều cacbua hydro (CH_4 , C_mH_n), nhiên liệu lỏng và nhiên liệu bụi. Với các nhiên liệu chứa nhiều cacbua hydro, khi cháy cacbua hydro phân hủy tạo ra một lượng lớn hạt cacbon có độ sáng cao làm cho ngọn lửa có độ sáng cao.

Về phương pháp đốt, do độ sáng của ngọn lửa bao giờ cũng cao hơn độ sáng của sản phẩm cháy nên khi điều kiện công nghệ cho phép, cần kết hợp quá trình đốt cháy và quá trình trao đổi nhiệt trong cùng một không gian làm việc của lò. Mặt khác, phải tạo điều kiện tốt nhất cho quá trình cacbon hóa tự nhiên của ngọn lửa trong quá trình cháy. Nung nóng trước nhiên liệu và không khí làm tăng khả năng các bon hóa tự nhiên, còn hòa trộn trước khí đốt và không khí lại cản trở sự cacbon hoá.

c) Cơ học khí

Đối với chế độ bức xạ phân bố đều, một yêu cầu quan trọng là phải tạo sự đồng nhất của trường nhiệt độ và độ sáng của khí lò. Để đạt được điều đó, thường dùng nhiều mỏ đốt công suất nhỏ và bố trí sao cho tạo ra sự xáo trộn mạnh giữa ngọn lửa và sản phẩm cháy. Các miệng kênh khói cần bố trí hợp lý để không hình thành các góc chết (tại đó khí lò không lưu thông), không được bố trí miệng kênh khói đối diện với mỏ đốt khi khoảng cách giữa chúng không đủ lớn.

2.1.3. Chế độ làm việc bức xạ trực tiếp

a) Truyền nhiệt ở chế độ bức xạ trực tiếp

Ở chế độ bức xạ trực tiếp, dòng nhiệt bức xạ từ nguồn nhiệt tới bề mặt vật nung lớn hơn dòng nhiệt bức xạ từ nguồn nhiệt tới tường và nóc lò.

$$q_N^V > q_N^T$$

Đặc trưng của chế độ bức xạ trực tiếp là sự phân bố không đồng đều của trường nhiệt độ và độ đen của nguồn nhiệt trong không gian làm việc của lò. Vùng gần bề mặt vật nung là vùng có nhiệt độ và độ sáng cao, vùng gần tường và nóc lò là vùng có nhiệt độ và độ sáng thấp. Trong lò nhiên liệu, vùng có nhiệt độ cao chính là vùng chứa ngọn lửa, giữa ngọn lửa và vật nung, cũng như giữa ngọn lửa và tường lò là lớp sản phẩm cháy có nhiệt độ thấp. Khi dòng nhiệt từ vùng ngọn lửa có nhiệt độ cao đi qua lớp khí có nhiệt độ thấp, bị các lớp khí này hấp thụ một phần nên cường độ của nó giảm.

- Vai trò của tường lò: Trong chế độ này, nhiệt độ tường lò thấp và tường lò có chức năng công tác nhiệt nhẹ hơn so với chế độ bức xạ phân bố đều.
- Vai trò của ngọn lửa: hiệu quả trao đổi nhiệt phụ thuộc nhiệt độ và độ sáng của vùng nhiệt độ cao (ngọn lửa), độ đen của lớp có nhiệt độ thấp (sản phẩm cháy). Khi nhiệt độ cực đại của ngọn lửa ở chế độ bức xạ trực tiếp bằng nhiệt độ ngọn lửa ở chế độ bức xạ phân bố đều thì nhiệt độ trung bình của nó thấp hơn. Do vậy, để tăng hiệu quả trao đổi nhiệt cần nâng cao nhiệt độ cực đại của ngọn lửa. Việc tăng độ sáng của lớp có nhiệt độ cao và giảm độ đen của lớp có nhiệt độ thấp làm tăng tính định hướng bức xạ về phía vật nung.

b) Chọn nhiên liệu

Chế độ làm việc bức xạ trực tiếp thường dễ dàng thực hiện trong các lò nhiên liệu. Để tạo ra ngọn lửa có độ sáng cao, nhiên liệu phải có khả năng cacbon hóa cao, do đó nhiên liệu thích hợp là các loại nhiên liệu khí chứa nhiều cacbua hydro, nhiên liệu lỏng, nhiên liệu bụi.

c) Cơ học khí và phương pháp đốt

Về phương pháp đốt, cần đốt nhiên liệu sao cho tạo ra ngọn lửa tập trung chủ yếu trong vùng nhiệt độ cao, trong vùng nhiệt độ thấp chủ yếu chứa sản phẩm cháy. Chuyển động của khí trong lò không gây ra sự xáo trộn giữa hai vùng. Do vậy, thường chọn thiết bị đốt có công suất lớn, số lượng ít, các thiết bị đốt được bố trí về một bên, hướng ngọn lửa về gần bề mặt nung, miệng kênh khói bố trí đối diện với thiết bị đốt, tạo ra dòng chuyển động thẳng của khí trong lò là tốt nhất.

d) Lĩnh vực ứng dụng

Chế độ bức xạ trực tiếp được ứng dụng rộng rãi trong các lò nấu chảy như lò luyện thép, lò nấu gang, lò nấu thủy tinh ... Chế độ bức xạ trực tiếp cũng được dùng trong các lò nung để nung vật mỏng cũng như vật dày, tuy nhiên khi nung vật dày hiệu quả thấp hơn chế độ bức xạ phân bố đều.

2.1.4. Chế độ làm việc bức xạ gián tiếp

a) Truyền nhiệt

Ở chế độ bức xạ gián tiếp, dòng nhiệt bức xạ từ nguồn nhiệt tới bề mặt vật nung bé hơn dòng nhiệt bức xạ từ nguồn nhiệt tới tường và nóc lò.

$$q_N^V < q_N^T$$

Đặc trưng của chế độ bức xạ trực tiếp là sự phân bố không đồng đều của trường nhiệt độ và độ đen của nguồn nhiệt trong không gian làm việc của lò. Vùng gần bề mặt tường, nóc lò có nhiệt độ và độ sáng cao, vùng gần bề mặt vật nung có nhiệt độ và độ sáng thấp. Dòng nhiệt từ nguồn nhiệt chủ yếu tập trung lên nóc lò và tường lò, chuyển thành bức xạ xám truyền đến vật nung.

Để thực hiện chế độ bức xạ trực tiếp người ta sử dụng các phương pháp sau:

- Trong các lò nhiên liệu, hướng thiết bị đốt về phía tường và nóc lò, tạo ra ngọn lửa có nhiệt độ và độ sáng cao nằm gần tường và nóc lò, vùng gần vật nung chứa sản phẩm cháy có nhiệt độ và độ sáng thấp.

- Dùng các thiết bị đốt có mặt gốm đặt ở nóc lò tạo ra bề mặt bức xạ. Trong trường hợp này, hỗn hợp khí đốt và không khí được hòa trộn trước và được đốt cháy cưỡng bức ngay trên mặt gốm làm cho bề mặt gốm bị nung lên đến nhiệt độ gần nhiệt độ cháy của nhiên liệu, đồng thời bề mặt nóc lò cũng bị nung nóng lên nhiệt độ cao tạo nên bề mặt bức xạ, dòng nhiệt bức xạ qua lớp khí trong lò đập tới vật nung.

- Dùng tường và nóc lò có bề mặt phản xạ cao ($R = 0,95 - 0,97$), khi đó hầu hết luồng nhiệt đập tới tường và nóc lò bị phản xạ tới bề mặt vật nung.

Trong chế độ bức xạ gián tiếp, vai trò công tác nhiệt của tường và nóc lò nặng hơn nhiều so với các chế độ trên. Độ phát triển của tường lò $\omega = \frac{F_T}{F_V}$ ảnh hưởng lớn đến hiệu quả truyền nhiệt, còn chiều cao lò ít ảnh hưởng hơn.

b) Chọn nhiên liệu

Với lò làm việc ở chế độ bức xạ gián tiếp, yêu cầu độ đen của sản phẩm cháy phải thấp và nhiệt độ cực đại của ngọn lửa phải cao nên nhiên liệu thích hợp là các loại

nhiên liệu khí có nhiệt trị cao (thường trên 16.000 kJ/m³) hoặc là nhiên liệu lỏng thuộc nhóm nhẹ.

c) Cơ học khí và phương pháp đốt

Về cơ học khí, ở chế độ bức xạ trực tiếp, cần tạo ra các luồng ngọn lửa có hoạt lực đủ lớn để tạo nên vùng có nhiệt độ cao và độ sáng lớn đồng đều sát nóc lò, nhưng không được quá lớn để tránh sự xáo trộn giữa vùng này với lớp khí sát vật nung.

Để đạt được yêu cầu trên, về phương pháp đốt, người ta dùng các mỏ đốt có tốc độ phun nhỏ (khi đốt nhiên liệu khí), mỏ phun thấp áp hoặc mỏ phun có biến bụi cơ học (khi đốt nhiên liệu lỏng), bố trí thiết bị đốt tập trung ở phần trên của lò và hướng ngọn lửa về phía bề mặt nóc lò. Miệng các kênh khói bố trí đều ở phần dưới của lò trong vùng tuần hoàn của lớp khí có nhiệt độ thấp.

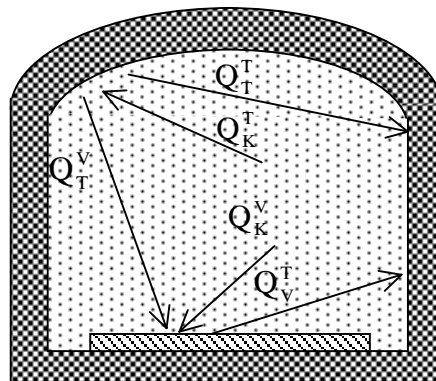
d) Lĩnh vực ứng dụng

Lò làm việc ở chế độ gián tiếp được sử dụng trong nhiều công nghệ khác nhau trừ hai trường hợp sau:

- Khi nung các vật nung dày mà vật nung được xếp đầy không gian lò (ví dụ lò nung ngói, nung gạch).
- Khi nhiệt độ yêu cầu của vật nung gần bằng nhiệt độ làm việc tối đa của gạch xây tường lò và nóc lò.

2.1.5. Tính toán trao đổi nhiệt bức xạ

Ta xét trường hợp trao đổi nhiệt trong lò có sơ đồ trình bày trên hình 2.5, với giả thiết:



Hình 2.5 Sơ đồ trao đổi nhiệt trong lò

- + Nhiệt độ mặt tường và vật nung có giá trị đồng nhất là T_T và T_V .
- + Độ đen của tường và vật nung cũng đồng nhất là ε_T và ε_V .

+ Hệ số góc bức xạ từ tường lò đến tường lò và từ tường lò đến vật nung cũng đồng nhất theo mọi hướng và mọi điểm trên tường lò là φ_{T-T} và φ_{T-V}

Gọi Q_V^{hq} là lượng nhiệt có hiệu quả mà vật nung hấp thụ được, xét cân bằng nhiệt trên bề mặt vật nung ta có:

$$Q_V^{hq} = \sum Q_{\text{đập tới vật}} - \sum Q_{\text{đi ra từ vật}}$$

$$\sum Q_{\text{đập tới vật}} = Q_K^V + Q_T^V$$

$$\sum Q_{\text{đi ra từ vật}} = Q_{PX}^{K-V} + Q_{PX}^{T-V} + Q_{BXR}^V$$

Vậy $Q_V^{hq} = (Q_K^V + Q_T^V) - (Q_{PX}^{K-V} + Q_{PX}^{T-V} + Q_{BXR}^V)$

Hay $Q_V^{hq} = (Q_K^V + Q_T^V) - Q_V$ (2.15)

Với: $Q_V = Q_{PX}^{K-V} + Q_{PX}^{T-V} + Q_{BXR}^V$ (2.16)

Trong đó:

+ Lượng nhiệt từ khí lò đập tới bề mặt vật nung:

$$Q_K^V = \varepsilon_K \cdot C_0 \left(\frac{T_K}{100} \right)^4 \cdot F_V$$

+ Lượng nhiệt từ tường lò đập tới bề mặt vật nung:

$$Q_T^V = Q_T \cdot \varphi_{T-V} (1 - \varepsilon_K)$$

Với Q_T là tổng lượng nhiệt bức xạ và phản xạ của tường lò.

+ Q_{PX}^{K-V} là lượng nhiệt bức xạ từ khí lò đến vật bị vật phản xạ:

$$Q_{PX}^{K-V} = \varepsilon_K \cdot C_0 \left(\frac{T_K}{100} \right)^4 \cdot (1 - \varepsilon_V) F_V$$

+ Q_{PX}^{T-V} là lượng nhiệt từ tường đập tới vật bị vật phản xạ:

$$Q_{PX}^{T-V} = Q_T \cdot \varphi_{T-V} \cdot (1 - \varepsilon_K) (1 - \varepsilon_V)$$

+ Q_{BXR}^V là lượng nhiệt bức xạ riêng của vật nung:

$$Q_{BXR}^V = \varepsilon_V \cdot C_0 \left(\frac{T_V}{100} \right)^4 \cdot F_V$$

Mặt khác gọi Q_T^{hq} là lượng nhiệt có hiệu quả mà tường hấp thụ được và xét cân bằng các dòng nhiệt trên bề mặt trong của tường lò, ta có:

$$Q_T^{hq} = \sum Q_{\text{đập tới tường}} - \sum Q_{\text{đi ra từ tường}}$$

$$\sum Q_{\text{đập tới tường}} = Q_K^T + Q_T^T + Q_V^T + Q_{DL}^{K-T}$$