

PGS.PTS. Bùi Hải - PTS. Hoàng Ngọc Đông

Bài tập
Kỹ thuật nhiệt

Nhà xuất bản khoa học và kỹ thuật
Hà nội -1999

Lời nói đầu

Cuốn “Bài tập kỹ thuật nhiệt” này được biên soạn theo nội dung cuốn giáo trình “Kỹ thuật nhiệt” của tác giả Bùi Hải và Trần Thế Sơn, do nhà xuất bản Khoa học và kỹ thuật phát hành đang được sử dụng cho việc đào tạo các hệ kỹ sư ở các trường đại học Kỹ thuật.

Cuốn “Bài tập kỹ thuật nhiệt” này được biên soạn theo kinh nghiệm giảng dạy lâu năm của các tác giả nhằm đáp ứng nhu cầu học tập của sinh viên các trường đại học Kỹ thuật. Cuốn sách trình bày tóm lược nội dung lý thuyết từng phần, sau đó chủ yếu là bài tập đã được giải sẵn, ở đây các tác giả chú ý đến các dạng bài tập ngắn, nhằm phục vụ cho cách thi trắc nghiệm là cách thi mới của môn học đang được sử dụng ở một số trường đại học kỹ thuật.

Sách gồm 2 phần 4 chương và phần phụ lục được phân công biên soạn như sau: PGS. PTS. Bùi Hải, trường đại học Bách khoa Hà Nội là chủ biên và soạn chương 1, chương 2 của phần I; PTS. Hoàng Ngọc Đồng biên soạn, trường đại học Kỹ thuật Đà Nẵng soạn chương 3, chương 4 của phần II và phần phụ lục. Trong quá trình biên soạn chắc chắn không tránh khỏi sai sót, mong nhận được sự góp ý của bạn đọc.

Các tác giả

Phần I

nhệt động kỹ thuật

Chương 1. **phương trình trạng thái** **Và các quá trình nhệt động của chất khí**

1.1. Thông số trạng thái

1.1.1. Nhệt và công

Nhiệt ký hiệu là Q , đơn vị là J hoặc $q = \frac{Q}{G}$, đơn vị là J/kg, với G là khối lượng của môi chất tính theo kg. Công ký hiệu là L , đơn vị là J hoặc $l = \frac{L}{G}$, đơn vị là J/kg. Nhệt lượng và công không phải là thông số trạng thái mà là hàm của quá trình. đơn vị đo của năng lượng nói chung là J (Jun), ngoài ra còn có thể sử dụng các đơn vị chuyển đổi sau:

$$1\text{kJ} = 10^3\text{J}; 1\text{MJ} = 10^3\text{kJ} = 10^6\text{J};$$

$$1\text{cal} = 4,18\text{J}; 1\text{kcal} = 4,18\text{kJ}; 1\text{BTU} \approx 0,3\text{J}.$$

Qui ước dấu của nhệt và công như sau: môi chất nhận nhệt $Q > 0$, môi chất nhả nhệt $Q < 0$; môi chất sinh công $L > 0$, môi chất nhận công $L < 0$.

1.1.2. Thông số trạng thái

a) Thể tích riêng

Thể tích riêng được xác định theo công thức sau:

$$v = \frac{V}{G} [\text{m}^3/\text{kg}], \quad (1-1)$$

trong đó:

- V - Thể tích riêng, m^3 ,
- G — Khối lượng, kg ,

Khối lượng riêng (hay mật độ) ρ là đại lượng nghịch đảo của thể tích riêng:

$$\rho = \frac{G}{V} [\text{kg}/\text{m}^3], \quad (1-2)$$

b) áp suất

áp suất được ký hiệu là p , đơn vị là $\text{N}/\text{m}^2 = 1\text{Pa}$ (Pascal). Ngoài ra còn có thể dùng các đơn vị đo khác như sau:

$$1\text{Kpa} = 10^3\text{Pa}; 1\text{Mpa} = 10^3\text{Kpa} = 10^6\text{Pa}.$$

$$1\text{bar} = 10^5\text{N}/\text{m}^2 = 10^5\text{Pa} = 750\text{mmHg}$$

$$1\text{at} = 0,98\text{bar} = 735,5\text{mmHg} = 10\text{m H}_2\text{O}$$

$$1\text{Psi} = 6895\text{pa} \approx 0,07\text{at}$$

mmHg còn được coi là tor.

Các qui đổi trên theo *mmHg* ở 0°C , nếu cột *mmHg* đo ở nhiệt độ khác 0°C , muốn tính chính xác phải qui đổi cột *mmHg* về 0°C rồi mới dùng quan hệ qui đổi trên như sau:

$$h_0 = h_t(1 - 0,000172t) \quad (1-3)$$

trong đó:

h_0 là chiều cao cột thủy ngân qui đổi về 0°C ;

h_t là chiều cao cột thủy ngân đo ở nhiệt độ t ;

t là nhiệt độ, $^{\circ}\text{C}$.

áp suất tuyệt đối là p là áp suất thực của môi chất.

Giữa áp suất tuyệt đối p , áp suất thực p_0 của khí quyển, áp suất dư p_d và độ chân không p_{ck} , $p_{ck} = p - p_0$, có quan hệ như sau:

$$p = p_0 + p_d \quad (1-4)$$

$$p = p_0 - p_{ck} \quad (1-5)$$

c) Nhiệt độ

Thang nhiệt độ theo nhiệt độ bách phân có ký hiệu t , đơn vị $^{\circ}\text{C}$; theo nhiệt độ tuyệt đối có ký hiệu T , đơn vị $^{\circ}\text{K}$; thang nhiệt độ Farenhet, có ký hiệu t_f đơn vị $^{\circ}\text{F}$. Giữa chúng có mối quan hệ như sau:

$$T (^{\circ}\text{K}) = 273,15 + t (^{\circ}\text{C}) \quad (1-6)$$

$$dT = dt; \Delta T = \Delta t$$

$$t (^{\circ}\text{C}) = \frac{5}{9}(t_f - 32) \quad (1-7)$$

d) Nội năng

Nội năng ký hiệu là U , đơn vị là J hoặc u , đơn vị là J/kg . Nội năng ở đây là năng lượng chuyển động của các phân tử (nội nhiệt năng). Biến đổi nội năng của khí lý tưởng trong mọi quá trình theo các quan hệ sau đây:

$$du = C_v dT \quad (1-8)$$

$$\Delta U = G \cdot \Delta u = G \cdot C_v (T_2 - T_1) \quad (1-9)$$

ở đây C_v là nhiệt dung riêng khối lượng đẳng tích.

Khí lý tưởng là khí thực bỏ qua lực tác dụng tương hỗ giữa các phân tử và thể tích bản thân các phân tử. Ví dụ khí O_2 , N_2 , CO_2 , không khí ở điều kiện nhiệt độ và áp suất thường đều được coi là khí lý tưởng.

e) Năng lượng đẩy

Năng lượng đẩy là Năng lượng chỉ có trong hệ hở để giúp môi chất chuyển động ra hoặc vào hệ

f) Entanpi:

Entanpi có ký hiệu I , đơn vị J hoặc i , đơn vị J/kg , cũng có thể ký hiệu bằng H , đơn vị J hoặc h , đơn vị J/kg . Ta có quan hệ:

$$i = u + pv; j/\text{kg} \quad (1-10)$$

Biến đổi Entanpi của khí lý tưởng trong mọi quá trình theo các quan hệ sau đây:

$$di = C_p dT \quad (1-11)$$

$$\Delta I = G \cdot \Delta i = G \cdot C_p(T_2 - T_1) \quad (1-12)$$

g) Entropi:

Entropi có ký hiệu bằng S, đơn vị J/K hoặc s, đơn vị J/kg.K. Biến đổi Entropi theo các quan hệ sau đây:

$$ds = \frac{dq}{T}, \quad (1-13)$$

T- Nhiệt độ tuyệt đối của môi chất.

h) Execgi và anergi

Execgi có ký hiệu là E, đơn vị J hoặc e đơn vị J/kg. Execgi là phần năng lượng có thể biến đổi hoàn toàn thành công trong các quá trình thuận nghịch. Anergi có ký hiệu là A, đơn vị J hoặc a đơn vị J/kg. Anergi là phần năng lượng nhiệt không thể biến đổi hoàn toàn thành công trong quá trình thuận nghịch.

Với nhiệt q ta có quan hệ sau:

$$q = e + a \quad (1-14)$$

trong đó:

e là execgi, J/kg;

a là anergi, J/kg;

Execgi của nhiệt lượng q ở nhiệt độ T khác nhiệt độ môi trường T_0 được xác định theo quan hệ sau:

$$e = q \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \quad (1-15)$$

Execgi của dòng môi chất chuyển động được xác định theo quan hệ sau:

$$e = i - i_0 - T_0(s - s_0) \quad (1-16)$$

trong đó:

i, s — entanpi và entropi của môi chất ở nhiệt độ T, áp suất p khác với nhiệt độ môi trường T_0 , áp suất môi trường p_0 ;

i_0, s_0 — entanpi và entropi của môi chất ở nhiệt độ T_0, p_0 ;

1.2 phương trình trạng thái của chất khí

Phương trình viết cho 1kg

$$pv = RT \quad (1-17a)$$

Phương trình viết cho 1kg

$$pV = GRT \quad (1-17b)$$

trong đó:

p — tính theo N/m², T tính theo ⁰K;

R — Hằng số chất khí, được xác định bằng biểu thức:

$$R = \frac{8314}{\mu}, \text{ J/kg}^0\text{K} \quad (1-18)$$

μ - kilomol của khí lý tưởng, kg/kmol (có trị số bằng phân tử lượng);

G- Khối lượng khí, kg.

Phương trình viết cho 1kilomol khí lý tưởng:

$$pV_{\mu} = R_{\mu}T = 8314T \quad (1-19)$$

trong đó:

V_{μ} - thể tích của 1kmol khí;

$$V_{\mu} = v_{\mu} \cdot \mu, \text{ m}^3/\text{kmol},$$

R_{μ} - Hằng số của khí lý tưởng, $R_{\mu} = 8314 \text{ J/kmol.K}$

Phương trình viết cho M kilomol khí lý tưởng:

$$PV = M.R_{\mu}T = 8314.M.T \quad (1-20)$$

M — số kilomol khí;

1.3. Nhiệt dung riêng của chất khí

1.3.1. Các loại nhiệt dung riêng

- Nhiệt dung riêng khối lượng: đơn vị đo lường mỗi chất là kg, ta có nhiệt dung riêng khối lượng, ký hiệu C, đơn vị J/kg. $^{\circ}\text{K}$.

- Nhiệt dung riêng thể tích, ký hiệu C' , đơn vị $\text{J/m}^3_{v/c} \cdot ^{\circ}\text{K}$.

- Nhiệt dung riêng mol ký hiệu C_{μ} , đơn vị J/kmol. $^{\circ}\text{K}$.

Quan hệ giữa các loại nhiệt dung riêng:

$$C = v_{v/c} \cdot C' = \frac{1}{\mu} C_{\mu} \quad (1-20)$$

V_{tc} — thể tích riêng ở điều kiện tiêu chuẩn vật lý ($t_0 = 0^{\circ}\text{C}$, $p_0 = 760 \text{ mmHg}$).

- Nhiệt dung riêng đẳng áp C_p , $C_{\mu p}$, C'_{p} , - nhiệt dung riêng khi quá trình xảy ra ở áp suất không đổi $p = \text{const}$.

- Nhiệt dung riêng đẳng tích C_v :

thể tích không đổi, ta có nhiệt dung riêng đẳng tích C_v , C'_{v} , $C_{\mu v}$, - nhiệt dung riêng khi quá trình xảy ra ở thể tích không đổi $V = \text{const}$.

Quan hệ giữa nhiệt dung riêng đẳng áp và nhiệt dung riêng đẳng tích của khí lý tưởng:

$$C_p - C_v = R. \quad (1-22)$$

$$C_p = k.C_v. \quad (1-23)$$

K — số mũ đoạn nhiệt.

1.3.2. Nhiệt dung riêng là hằng số và nhiệt dung riêng trung bình

Với khí lý tưởng, nhiệt dung riêng không phụ thuộc vào nhiệt độ và là hằng số được xác định theo bảng 1.1.

Bảng 1.1. nhiệt dung riêng của khí lý tưởng

| Loại khí | Trị số K | Kcal/kmol. $^{\circ}\text{K}$ | | KJ/kmol. $^{\circ}\text{K}$ | |
|------------------------------------------------------------------|----------|----------------------------------|-------------|--------------------------------|-------------|
| | | $C_{\mu v}$ | $C_{\mu p}$ | $C_{\mu v}$ | $C_{\mu p}$ |
| Một nguyên tử | 1,6 | 3 | 5 | 12,6 | 20,9 |
| Hai nguyên tử ($\text{N}_2, \text{O}_2 \dots$) | 1,4 | 5 | 7 | 20,9 | 29,3 |
| Ba hoặc nhiều nguyên tử ($\text{CO}_2, \text{HO}_2, \dots$) | 1,3 | 7 | 9 | 29,3 | 37,7 |

Với khí thực, nhiệt dung riêng phụ thuộc vào nhiệt độ nên ta có khái niệm nhiệt dung riêng trung bình. Nhiệt dung riêng trung bình từ 0°C đến $t^{\circ}\text{C}$ được ký hiệu \bar{C}_0^t và cho trong các bảng ở phần phụ lục. Nhiệt dung riêng trung bình từ t_1 đến t_2 ký hiệu $\bar{C}_{t_1}^{t_2}$ hay C_{tb} , được xác định bằng công thức:

$$\bar{C}_{t_1}^{t_2} = \frac{1}{t_2 - t_1} \left[t_2 \cdot \bar{C}_0^{t_2} - t_1 \cdot \bar{C}_0^{t_1} \right] \quad (1-24)$$

1.4.3. Tính nhiệt theo nhiệt dung riêng

thông thường nhiệt lượng được tính theo nhiệt dung riêng khối lượng:

- với quá trình đẳng áp:

$$Q = G \cdot C_p \cdot (t_2 - t_1) \quad (1-25)$$

- với quá trình đẳng tích:

$$Q = G \cdot C_v \cdot (t_2 - t_1) \quad (1-26)$$

- với quá trình đa biến:

$$Q = G \cdot C_n \cdot (t_2 - t_1) \quad (1-27)$$

Trong các công thức trên:

Q — nhiệt lượng, kJ;

C_p - nhiệt dung riêng khối đẳng áp, kJ/kg. $^{\circ}\text{K}$.

C_v - Nhiệt dung riêng khối lượng đẳng tích, kJ/kg. $^{\circ}\text{K}$.

C_n - Nhiệt dung riêng khối lượng đa biến, kJ/kg. $^{\circ}\text{K}$.

1.4. Bảng và đồ thị của môi chất

Với các khí O_2 , N_2 , không khí . . . ở điều kiện bình thường có thể coi là khí lý tưởng và các thông số được xác định bằng phương trình trạng thái khí lý tưởng đã nêu ở phần trên. Với nước, môi chất lạnh, . . . không khí có thể coi là khí lý tưởng nên các thông số được xác định theo các bảng số hoặc đồ thị của chúng.

1.4.1. Các bảng số của nước hoặc môi chất lạnh (NH_3 , R_{12} , R^{22} . . .)

Để xác định các thông số của chất lỏng sôi hoặc hơi bão hoà khô, ta sử dụng bảng hơi bão hoà theo nhiệt độ hoặc theo áp suất cho trong phần phụ lục. ở đây cần lưu ý các thông số của chất lỏng sôi được ký hiệu với một dấu phẩy, ví dụ: v' , p' , i' , . . . còn các thông số của hơi bão hoà khô được ký hiệu với hai dấu phẩy, ví dụ: v'' , p'' , i'' , . . . Trong các bảng và đồ thị không cho ta giá trị nội năng, muốn tính nội năng phải dùng công thức:

$$u = i - pv \quad (1-28)$$

trong đó:

u tính theo kJ;

i tính theo kJ;

p tính theo N/m^2 ;

v tính theo m^3/kg ;

Để xác định các thông số của chất lỏng chưa sôi và hơi quá nhiệt ta sử dụng bảng hơi quá nhiệt tra theo nhiệt độ và áp suất.

Hơi bão hoà ẩm là hỗn hợp giữa chất lỏng sôi và hơi bão hoà khô. Các thông số của hơi bão hoà ẩm được v_x' , p_x' , i_x' được xác định bằng các công thức sau:

$$v_x = v' + x(v'' - v') \quad (1-29a)$$

$$i_x = i' + x(i'' - i') \quad (1-29b)$$

$$s_x = s' + x(s'' - s') \quad (1-29c)$$

trong đó x là độ khô (lượng hơi bão hoà khô có trong 1 kg hơi bão hoà ẩm). Nếu trong công thức (1-29) khi biết các giá trị v_x , p_x , i_x ta có thể tính được độ khô.

Ví dụ:

$$x = \frac{i_x - i''}{i'' - i'} \quad (1-30)$$

1.4.2. Các đồ thị của môi chất

Để tính toán với nước, thuận tiện hơn cả là dùng đồ thị i - s . đồ thị i - s của nước được cho trong phần phụ lục.

Với môi chất lạnh NH_3 , R_{12} , R_{22} . . . , thuận tiện hơn cả là dùng đồ thị $\lg p$ - h . đồ thị $\lg p$ - h của một số môi chất lạnh được cho trong phần phụ lục.

1.5. các quá trình nhiệt động cơ bản Của khí lý tưởng

1.5.1. Biến đổi nội năng và entanpi của khí lý tưởng

Biến đổi nội năng:

$$\Delta U = U_2 - U_1 = G.C_v.(t_2 - t_1) \quad (1-31)$$

Biến đổi entanpi:

$$\Delta I = I_2 - I_1 = G.C_p.(t_2 - t_1) \quad (1-32)$$

trong đó:

U tính theo kJ;

I tính theo kJ;

C_v và C_p tính theo kJ/kgK;

t tính theo $^{\circ}\text{C}$;

G tính theo kg;

1.5.2. Quá trình đẳng tích

Quá trình đẳng tích là quá trình nhiệt động xảy ra trong thể tích không đổi $V = \text{const}$ và số mũ đa biến $n = \infty$, nhiệt dung riêng của quá trình C_v . Trong quá trình này ta có các quan hệ sau:

- Quan hệ giữa nhiệt độ và áp suất:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (1-33)$$

- Công thay đổi thể tích:

$$L = \int_1^2 p dv = 0$$

- Công kỹ thuật:

$$l_{kt12} = -v(p_2 - p_1) \quad (1-34)$$

- Nhiệt của quá trình:

$$Q = G.C_v (t_2 - t_1) \quad (1-35)$$

- Biến thiên entropi:

$$\Delta s = G.C_v \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} \quad (1-36)$$

1.5.3. Quá trình đẳng áp

Quá trình đẳng áp là quá trình nhiệt động xảy ra khi áp suất không đổi $p = \text{const}$ và số mũ đa biến $n = 0$, nhiệt dung riêng của quá trình C_p . Trong quá trình này ta có các quan hệ sau:

- Quan hệ giữa nhiệt độ và thể tích:

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{T_2}{T_1} \quad (1-37)$$

- Công thay đổi thể tích:

$$l_{12} = p(v_2 - v_1) \quad (1-38)$$

- Công kỹ thuật:

$$l_{kt} = 0$$

- Nhiệt của quá trình:

$$Q = G.C_p \cdot (t_2 - t_1) \quad (1-39)$$

- Biến thiên entropi:

$$\Delta s = G.C_p \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} \quad (1-40)$$

1.5.4. Quá trình đẳng nhiệt

Quá trình đẳng nhiệt là quá trình nhiệt động xảy ra trong nhiệt độ không đổi $T = \text{const}$ và số mũ đa biến $n = 1$, nhiệt dung riêng của quá trình $C_T = \infty$. Trong quá trình này ta có các quan hệ sau:

- Quan hệ giữa áp suất và thể tích:

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{v_1}{v_2} \quad (1-41)$$

- Công thay đổi thể tích và công kỹ thuật:

$$l_{kt} = l_{12} = RT \ln \frac{p_1}{p_2} = RT \ln \frac{v_2}{v_1}, \quad (1-42)$$

- Nhiệt của quá trình:

$$Q = L_{12} = Gl_{12} = G.R.T \cdot \ln \frac{p_1}{p_2} \quad (1-43)$$

- Biến thiên entropi:

$$\Delta s = G.R. \ln \frac{p_1}{p_2} \quad (1-44)$$

1.5.5. Quá trình đoạn nhiệt

Quá trình đoạn nhiệt là quá trình nhiệt động xảy ra khi không trao đổi nhiệt với môi trường $q = 0$ và $dq = 0$, số mũ đa biến $n = k$, entropi của quá trình không đổi $s = \text{const}$ và nhiệt dung riêng của quá trình $C = 0$. Trong quá trình này ta có các quan hệ sau:

- Quan hệ giữa nhiệt độ, áp suất và thể tích:

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^k \quad (1-45)$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^{k-1} = \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (1-46)$$

- Công thay đổi thể tích:

$$l_{12} = \frac{p_1 v_1}{k-1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \quad (1-47)$$

- Công kỹ thuật:

$$l_{kt12} = kl_{12} = \frac{kRT_1}{k-1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \quad (1-48)$$

1.5.6. Quá trình đa biến

Quá trình đa biến là quá trình xảy ra khi nhiệt dung riêng của quá trình không đổi $C = 0$ và được xác định bằng biểu thức sau:

$$C_n = C_v \frac{n-k}{n-1} \quad (1-49)$$

Trong quá trình này ta có các quan hệ sau:

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^n \quad (1-50)$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^{n-1} = \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{n-1}{n}} \quad (1-51)$$

- Công thay đổi thể tích:

$$l_{12} = \frac{p_1 v_1}{k-1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right] \quad (1-52)$$

- Công kỹ thuật:

$$l_{kt12} = nl_{12} = \frac{nRT_1}{n-1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right] \quad (1-53)$$

- Nhiệt của quá trình:

$$Q = GC_n(t_2 - t_1) \quad (1-54)$$

- Biến thiên entropi:

$$\Delta s = G.C_n \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} \quad (1-55)$$

1.6. các quá trình nhiệt động cơ bản Của khí thực

1.6.1. Biến đổi entanpi, nội năng và entanpi

Biến đổi entanpi:

$$\Delta I = G.\Delta i = G.(i_2 - i_1) \quad (1-56)$$

Biến đổi nội năng:

$$\Delta U = G.\Delta u = G(u_2 - u_1) = G.C_v.(t_2 - t_1) \quad (1-57)$$

Biến đổi entropi:

$$\Delta S = G.\Delta s = G.(s_2 - s_1) \quad (1-58)$$

1.6.2. Quá trình đẳng tích

- Công thay đổi thể tích:

$$l_{12} = 0 \quad (1-59)$$

- Công kỹ thuật:

$$l_{kt12} = -v(p_2 - p_1)$$

- Nhiệt của quá trình:

$$\Delta U = G.\Delta u = G(u_2 - u_1) \quad (1-60)$$

1.6.3. Quá trình đẳng áp

- Công thay đổi thể tích:

$$l_{12} = p(v_2 - v_1) \quad (1-61)$$

- Công kỹ thuật:

$$l_{kt} = 0$$

- Nhiệt của quá trình:

$$Q = \Delta I = G.(i_2 - i_1) \quad (1-62)$$

1.6.4. Quá trình đẳng nhiệt

- Nhiệt của quá trình:

$$Q = G.T(s_2 - s_1); \quad q = T(s_2 - s_1) \quad (1-63)$$

- Công thay đổi thể tích:

$$l_{12} = q - (u_2 - u_1) \quad (1-64)$$

- Công kỹ thuật:

$$l_{kt12} = q - (i_2 - i_1) \quad (1-65)$$

1.6.5. Quá trình đoạn nhiệt

- Entropi của quá trình

$$s_1 = s_2 = \text{const}$$

- Nhiệt của quá trình: $Q = 0$

- Công thay đổi thể tích:

$$l_{12} = -\Delta u = -(u_2 - u_1) \quad (1-66)$$

- Công kỹ thuật:

$$l_{kt12} = -\Delta i = -(i_2 - i_1) \quad (1-67)$$

1.7. quá trình hỗn hợp của khí hoặc hơi

1.7.1. Hỗn hợp khí lý tưởng

a) Các thành phần của hỗn hợp

- Thành phần khối lượng g_i .

$$\sum g_i = \sum \frac{G_i}{G} = 1 \quad (1-68)$$

trong đó: G_i , G là khối lượng của khí thành phần và của hỗn hợp.

- Thành phần thể tích

$$\sum v_i = \sum \frac{V_i}{V} = 1 \quad (1-69)$$

trong đó: V_i , V là thể tích của khí thành phần và của hỗn hợp.

- Thành phần mol của chất khí

$$\sum r_i = \sum \frac{M_i}{M} = 1 \quad (1-70)$$

trong đó: M_i , M là số kilomol của khí thành phần và của hỗn hợp.

Chứng minh được rằng thành phần thể tích bằng thành phần mol.

b) Xác định các đại lượng của hỗn hợp khí

- Kilômol của hỗn hợp khí μ :

$$\mu = \sum_{i=1}^n r_i \mu_i \quad (1-71)$$

$$\mu = \frac{1}{\sum \frac{g_i}{\mu_i}} \quad (1-72)$$

trong đó:

r_i , g_i - thành phần thể tích và thành phần khối lượng của khí thành phần,

μ_i — kilomol của khí thành phần.

- Hằng số chất khí của hỗn hợp:

$$R = \frac{8314}{\mu} = \frac{8314}{\sum r_i \mu_i} \quad (1-73)$$

$$R = \sum_{i=1}^n g_i R_i \quad (1-74)$$

Trong đó:

R_i , - hằng số chất khí của khí thành phần,

μ — kilomol của hỗn hợp khí được tính theo (171) hoặc (1-72).

- Nhiệt dung riêng hỗn hợp C;

$$C = \sum g_i C_i \quad (1-75)$$

trong đó: C_i , C là nhiệt dung riêng của khí thành phần và của hỗn hợp.

C) Xác định áp suất của khí thành phần p_i

$$p_i = r_i p \quad (1-76)$$

p - áp suất của hỗn hợp khí được xác định theo định luật Danton:

$$p = \sum_{i=1}^n p_i$$

d) Quan hệ giữa các thành phần g_i và r_i

$$g_i = \frac{\mu_i r_i}{\sum \mu_i r_i}; \quad r_i = \frac{\frac{g_i}{\mu_i}}{\sum \frac{g_i}{\mu_i}} \quad (1-77)$$

1.7.2. Quá trình hỗn hợp của chất khí

a) Hỗn hợp khí trong thể tích V

$$U = \sum U_i \quad (1-78)$$

trong đó: U_i , U là nội năng của khí thành phần và của hỗn hợp.

Đối với hỗn hợp khí lý tưởng, nhiệt độ của hỗn hợp được xác định theo công thức:

$$T = \frac{\sum g_i C_{vi} T_i}{\sum g_i C_{vi}} \quad (1-79a)$$

trong đó: C_{vi} là nhiệt dung riêng khối lượng đẳng tích của khí thành phần.

Nếu khí thành phần là cùng một chất, ta có:

$$t = \sum g_i t_i \quad (1-79b)$$

b) Hỗn hợp theo dòng

Hỗn hợp được tạo thành khi ta nối ống dẫn các dòng khí vào một ống chung. ở đây áp suất của hỗn hợp p thường cho trước. Entanpi của hỗn hợp được xác định theo công thức:

$$I = \sum I_i \quad (1-80)$$

trong đó: I_i , I là entanpi của khí thành phần và của hỗn hợp.

Nhiệt độ của hỗn hợp khí lý tưởng được xác định theo công thức:

$$T = \frac{\sum g_i C_{pi} T_i}{\sum g_i C_{pi}} \quad (1-81a)$$

C_{pi} là nhiệt dung riêng khối lượng đẳng áp của khí thành phần.
Nếu các dòng khí là cùng một chất, ta có:

$$t = \sum g_i t_i \quad (1-81b)$$

c) Hỗn hợp khí nạp vào thể tích cố định

Nhiệt độ của hỗn hợp khí lý tưởng được xác định theo công thức:

$$T = \frac{g_i C_{vi} T_i + \sum_{i=2}^{n+1} g_i C_{pi} T_i}{\sum_{i=1}^n g_i C_{vi}} \quad (1-82a)$$

Nếu hỗn hợp là cùng một chất, ta có:

$$t = g_1 t_1 + g_2 t_2 + g_3 t_3 + \dots \quad (1-82b)$$

áp suất của hỗn hợp được xác định theo phương trình trạng thái:

$$pV = RT$$

1.8. QUÁ TRÌNH LƯU ĐỘNG VÀ TIẾT LƯU CỦA KHÍ VÀ HƠI

1.8.1 Quá trình lưu động của khí và hơi

a) Khái niệm cơ bản:

- phương trình liên tục:

Với giả thiết dòng lưu động ổn định và liên tục, lưu lượng G tính theo kg/s của dòng môi chất qua tiết diện sẽ không đổi:

$$\omega \cdot \rho \cdot f = \text{const hay } \frac{f\omega}{v} = \text{const} \quad (1-83)$$

trong đó:

G — lưu lượng khối lượng [kg/s];

ω - vận tốc của dòng [m/s];

f — diện tích tiết diện ngang của dòng tại nơi khảo sát [m²];

ρ - khối lượng riêng của môi chất [kg/m³];

- Tốc độ âm thanh a

$$a = \sqrt{kp} = \sqrt{kRT} \quad (1-84)$$

trong đó:

k — số mũ đoạn nhiệt;

p - áp suất môi chất [N/m²];

v — thể tích riêng [m³/kg];

R — Hằng số chất khí [J/kg⁰K];

T — nhiệt độ tuyệt đối của môi chất [°K];

- Số Mach M .

$$M = \frac{\omega}{a} \quad (1-85)$$

trong đó:

ω - vận tốc của dòng, [m/s];

a - tốc độ âm thanh trong dòng khí, [m/s];

b) Các công thức cơ bản về lưu động

- Quan hệ giữa tốc độ dòng khí và áp suất

$$\omega d\omega = -vdp \quad (1-86)$$

Từ đó khái niệm: ống tăng tốc trong đó tốc độ tăng, áp suất giảm; ống tăng áp trong đó áp suất tăng, tốc độ giảm.

- Quan hệ giữa tốc độ và hình dáng ống

$$\frac{df}{f} = (M^2 - 1) \frac{d\omega}{\omega}, \quad (1-87)$$

Từ đó khái niệm: ống tăng tốc nhỏ dần (khi $M < 1$), ống tăng tốc lớn dần (khi $M > 1$), ống tăng tốc hỗn hợp hay laval (khi vào ống $M < 1$, khi khỏi ống dòng khí có $M > 1$). ống tăng áp nhỏ dần ($M > 1$), ống tăng áp lớn dần (khi $M < 1$), ống tăng tốc hỗn hợp (khi vào dòng khí có $M > 1$, khi ra $M < 1$).

-Tốc độ dòng khí tại tiết diện ra của ống tăng tốc

$$\omega_2 = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} RT_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \quad (1-88)$$

trong đó:

k - số mũ đoạn nhiệt;

R - Hằng số chất khí [J/kg⁰K];

T_1 - nhiệt độ tuyệt đối của chất khí khi vào ống, [°K];

p_1 - áp suất chất khí vào ống, [N/m²];

p_2 - áp suất chất khí tại tiết diện ra của ống, [N/m²];

+ Với khí thực (hơi nước . . .) thường dùng công thức:

$$\omega_2 = \sqrt{2i_{kt}} = \sqrt{2(i_1 - i_2)} \quad (1-89)$$

i_1, i_2 — entanpi của khí tại tiết diện vào và ra của ống, J/kg.

- Tỷ số áp suất tới hạn β_k được xác định theo công thức:

$$\beta_k = \frac{p_k}{p_1} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (1-90)$$

p_k là áp suất tới hạn (áp suất ở trạng thái khi $\omega = a$).

Với khí 2 nguyên tử $k = 1,4$ thì $\beta_k = 0,528$, với hơi nước quá nhiệt $\beta_k = 0,55$.

- Tốc độ tới hạn ω_k

+ Với khí lý tưởng:

$$\omega_k = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} RT_1 \left[1 - \beta_k^{\frac{k-1}{k}} \right]}, \quad (1-91)$$

Với hơi nước:

$$\omega_k = \sqrt{2(i_1 - i_k)}, \text{ m/s}; \quad (1-92)$$

i_1, i_2 — entanpi của môi chất ở trạng thái tới hạn, J/kg, có áp suất tới hạn $p_k = p_1 \cdot \beta_k$.

- Lưu lượng của dòng khí G

Lưu lượng dòng khí G được xác định theo phương trình liên tục viết cho tiết diện ra f_2 của ống:

$$G = \frac{f_2 \omega_2}{v_2}, \text{ kg/s}; \quad (1-93)$$

trong đó:

- f_2 - tính theo m^2 ;
- ω_2 - vận tốc của dòng, [m/s];
- v_2 — tính bằng m^3/kg ;

- Lưu lượng cực đại

+ Với ống tăng tốc nhỏ dần:

$$G = \frac{f_2 \omega_k}{v_k}, \text{ kg/s}; \quad (1-94)$$

+ Với ống tăng tốc hỗn hợp:

$$G_{\max} = \frac{f_{\min} \omega_k}{v_k} \quad (1-95)$$

trong đó:

- f_2, f_{\min} — diện tích cửa ra và diện tích nhỏ nhất của ống, m^2 ;
- ω_2 - vận tốc của dòng, [m/s];
- v_k — thể tích riêng ở trạng thái tới hạn có áp suất p_k , m^3/kg ;

1.8.2. Quá trình tiết lưu của khí và hơi

a) Tính chất của quá trình tiết lưu

- áp suất giảm: $p_2 < p_1$,
- Entanpi trước và sau tiết lưu không đổi: $i_2 = i_1$,
- Nhiệt độ khí lý tưởng không đổi: $T_2 = T_1$,
- Nhiệt độ khí lý tưởng không đổi: $T_2 = T_1$,
- Nhiệt độ khí thực giảm ($T_1 < T_{cb}$ — nhiệt độ chuyển biến)

b) ứng dụng

Quá trình tiết lưu được ứng dụng trong máy lạnh như van tiết lưu nhiệt (giảm áp suất và có điều chỉnh năng suất lạnh), ống mao dẫn (chỉ giảm áp suất) và trong tuốc bin để điều chỉnh công suất của tuốc bin.

1.9 QUÁ TRÌNH NÉN KHÍ

Máy nén cũng như bơm, quạt là máy tiêu tốn công, nên cố gắng để công hoặc công suất của máy nén càng nhỏ càng tốt.

Có hai loại máy nén khí: máy nén piston và máy nén li tâm. Nguyên lý làm việc cấu tạo của hai loại máy nén khác nhau nhưng chúng giống nhau trong việc phân tích tính chất nhiệt động.

1.9.1. Máy nén piston một cấp lí tưởng và thực

Máy nén piston gọi là lý tưởng khi nghĩa là khi piston chuyển động đến sát nắp xilanh, máy nén piston thực khi piston chỉ chuyển động đến gần nắp xilanh, nghĩa là còn một khoảng hở gọi là thể tích thừa (hay thể tích chết).

Công tiêu thụ của máy nén một cấp lí tưởng hoặc thực khi quá trình nén là đa biến, với số mũ đa biến n được tính theo công thức:

$$L_{mn} = -\frac{n}{n-1} GRT_1 \left[\pi^{\frac{k}{k-1}} - 1 \right], [J] \quad (1-96)$$

trong đó:

G — khối lượng khí, kg;

R - Hằng số chất khí [J/kg⁰K];

T_1 - nhiệt độ khí khi vào máy nén, [°K];

Nhiệt lượng tỏa ra trong máy nén khí nén đa biến:

$$Q_n = -GC_n T_1 \left[\pi^{\frac{k}{k-1}} - 1 \right], [J] \quad (1-97)$$

C_n — nhiệt dung riêng của quá trình đa biến, [J/kg⁰K];

1.9.2. Máy nén piston nhiều cấp

Với máy nén một cấp, tỉ số nén cao nhất khoảng $\pi = 6 \div 8$, vậy muốn nén tới áp suất cao hơn phải dùng máy nén nhiều cấp. Tổng quát, khi ký hiệu số cấp máy nén là m , ta có tỉ số giữa các cấp như nhau và bằng:

$$\pi = \sqrt[m]{\frac{p_c}{p_d}} \quad (1-98)$$

trong đó:

p_c - áp suất cuối cùng;

p_d - áp suất đầu của khí.

Công của máy nén nhiều cấp bằng m lần công của máy nén một cấp L_1 :

$$L_{mn} = mL_1 = -m \frac{n}{n-1} RT_1 \left[\left(\pi \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \quad (1-99)$$

1.10 KHÔNG KHÍ ẤM

1.10.1. Tính chất của không khí ẩm

Không khí ẩm là hỗn hợp của không khí khô và hơi nước.

Không khí khô là hỗn hợp các khí có thành phần thể tích: Nitơ khoảng 78%; Oxy: 20,93%; Carbonic và các khí trơ khác chiếm khoảng 1%.

Vì phân áp suất của hơi nước trong không khí ẩm rất nhỏ nên hơi nước ở đây có thể coi như là khí lý tưởng.

áp suất của không khí ẩm là p (áp suất khí quyển) là tổng của phân áp suất của không khí khô p_k và hơi nước p_h :

$$p = p_k + p_h, \quad (1-100)$$

Nhiệt độ của không khí ẩm t bằng nhiệt độ của không khí khô t_k và bằng nhiệt độ của hơi nước t_h :

$$t = t_k = t_h,$$

Thể tích của không khí ẩm V bằng thể tích của không khí khô V_k và bằng thể tích của hơi nước V_h :

$$V = V_{kk} + V_h,$$

Khối lượng của không khí ẩm là G bằng tổng khối lượng của không khí khô G_k và hơi nước G_h :

$$G = G_k + G_h, \quad (1-101)$$

Tuy nhiên vì khối lượng của hơi nước trong không khí ẩm thường rất nhỏ nên có thể coi khối lượng của không khí ẩm bằng khối lượng của không khí khô:

$$G = G_k,$$

ở đây ta có thể dùng phương trình trạng thái của khí lý tưởng cho không khí ẩm:

$$pV = GRT$$

- đối với không khí khô:

$$p_k V = G_k R_k T; \text{ với } R_k = 287 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{K}$$

- đối với hơi nước:

$$p_h V = G_h R_h T \text{ với } R_h = 8314/18 = 462 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{K}$$

1.10.2. Các loại không khí ẩm

Không khí ẩm chưa bão hòa là không khí ẩm mà trong đó còn có thể nhận thêm một lượng hơi nước nữa từ các vật khác bay hơi vào. Hơi nước ở đây là hơi quá nhiệt.

Không khí ẩm bão hòa là không khí ẩm mà trong đó không thể nhận thêm một lượng hơi nước nữa từ các vật khác bay hơi vào. Hơi nước ở đây là hơi bão hòa khô.

Không khí ẩm quá bão hòa là không khí ẩm bão hòa và còn chứa thêm một lượng hơi nước nhất định, ví dụ sương mù là không khí ẩm quá bão hòa.

1.10.3. Các đại lượng đặc trưng của không khí ẩm

q^* Độ ẩm tuyệt đối:

Độ ẩm tuyệt đối đwocj tính theo công thức:

$$\rho_h = \frac{G_h}{V}, \text{ kg/m}^3; \quad (1-102)$$

b Độ ẩm tương đối φ :*

Độ ẩm tương đối φ là tỷ số giữa độ ẩm tuyệt đối của không khí chưa bão hòa ρ_h và của không khí ẩm bão hòa $\rho_{h\max}$ ở cùng nhiệt độ.

$$\varphi = \rho_h / \rho_{h\max} \quad (1-103)$$

trong đó:

ρ_h - phân áp suất của hơi nước trong không khí ẩm chưa bão hòa;

ρ_{\max} - phân áp suất của hơi nước trong không khí ẩm bão hòa;

Giá trị ρ_{\max} tìm được từ bảng nước và hơi nước bão hòa (theo nhiệt độ) với nhiệt độ $t_h = t$.

c Độ chứa hơi d :*

Độ chứa hơi d là lượng hơi chứa trong 1kg không khí khô hoặc trong $(1+d)$ kg không khí ẩm. Độ chứa hơi còn gọi là dung ẩm:

$$d = \frac{G_h}{G_k} = 0,622 \frac{p_h}{p - p_h}; [\text{kg} / \text{kgk}]; \quad (1-104)$$

Độ chứa hơi trong không khí ẩm bão hòa là độ chứa hơi lớn nhất d_{\max} (khi $p_h = p_{\max}$):

$$d = 0,622 \frac{p_{h\max}}{p - p_{h\max}}; [\text{kg} / \text{kgk}]; \quad (1-105)$$

d Entanpi của không khí ẩm*

Entanpi của không khí ẩm bằng tổng entanpi của 1kg không khí khô và của d kg hơi nước:

$$I = t + d(2500 + 1,93t); (\text{kJ/kgK}).$$

t — nhiệt độ của không khí ẩm, $^{\circ}\text{C}$.

e) Nhiệt độ bão hòa đoạn nhiệt τ :

Khi không khí tiếp xúc với nước, nếu sự bay hơi của nước vào không khí chỉ do nhiệt lượng của không khí truyền cho, thì nhiệt độ của không khí bão hòa gọi là nhiệt độ bão hòa đoạn nhiệt τ (nhiệt độ τ lấy gần đúng bằng nhiệt độ nhiệt kế ướt $\tau = t_w$).

f) Nhiệt độ đọng sương t_s :

Nhiệt độ đọng sương t_s hay là điểm sương là nhiệt độ tại đó không khí chưa bão hòa trở thành không khí ẩm bão hòa trong điều kiện phân áp suất của hơi nước không đổi $p_h = \text{const}$. Từ bảng nước và hơi nước bão hòa, khi biết p_h ta tìm được nhiệt độ t_s .

g) nhiệt độ nhiệt kế ướt t_w :

Nhiệt độ nhiệt kế ướt t_w là nhiệt độ đo được bằng nhiệt kế ướt (nhiệt kế có bọc vải ướt bên ngoài).

Khi $\varphi = 100\%$ ta có $t_s = t_w$.

Khi $\varphi < 100\%$ ta có $t_s < t_w$.

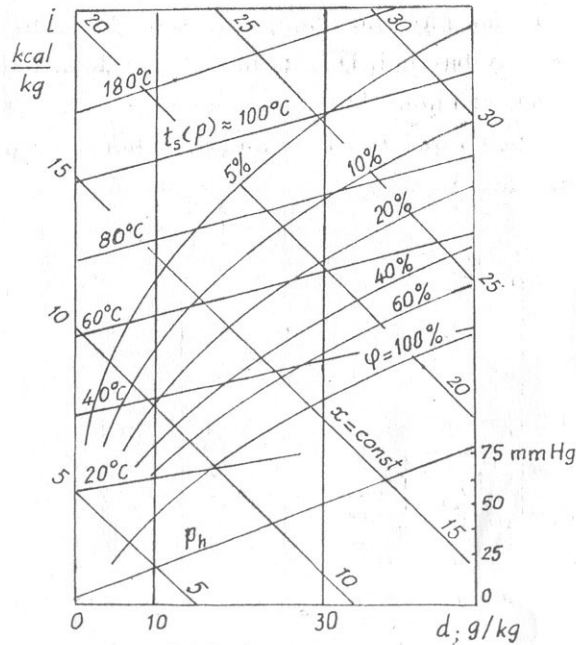
1.10.4. Đồ thị i - d của không khí ẩm

Hình 1.1 biểu diễn đồ thị i - d được, trong đó:

- $d = \text{const}$ là đường thẳng đứng, đơn vị g hơi/kg không khí khô;
- $i = \text{const}$ là đường thẳng nghiêng góc 135° , đơn vị kJ/kg hoặc kcal/kg;
- $t = \text{const}$ là đường chên về phía trên,
- $\varphi = \text{const}$ là đường cong đi lên, khi gặp đường nhiệt độ $t = 100^\circ\text{C}$ sẽ là đường thẳng đứng;

$p_h = \text{const}$ là đường phân áp suất của hơi nước, đơn vị mmHg.

Sử dụng đồ thị I - d (hình 1-2), ví dụ trạng thái không khí ẩm được biểu diễn bằng điểm A là giao điểm của đường φ_A và t_A . Từ đó tìm được entanpi I_A , độ chứa hơi d_A , phân áp suất p_h , nhiệt độ nhiệt kế ướt t_w (đường I_A cắt đường $\varphi = 100\%$), nhiệt độ đọng sương t_s (đường $d_A = \text{const}$ cắt đường $\varphi = 100\%$), độ chứa hơi lớn nhất $d_{A\text{max}}$, phân áp suất hơi nước lớn nhất $p_{h\text{max}}$ (từ điểm $t_A = \text{const}$ cắt đường $\varphi = 100\%$).



Hình 6.10 Đồ thị I - d của không khí ẩm

1.10.5. Quá trình sấy

Quá trình sấy là quá trình làm khô vật muốn sấy. Môi chất dùng để sấy thường là không khí. Có thể chia quá trình sấy làm hai giai đoạn:

- giai đoạn đốt nóng không khí 1-2 (hình 1.3), ở đây $d = \text{const}$, độ ẩm tương đối φ giảm, nhiệt độ không khí tăng.
- giai đoạn sấy 2-3, ở đây $I = \text{const}$.