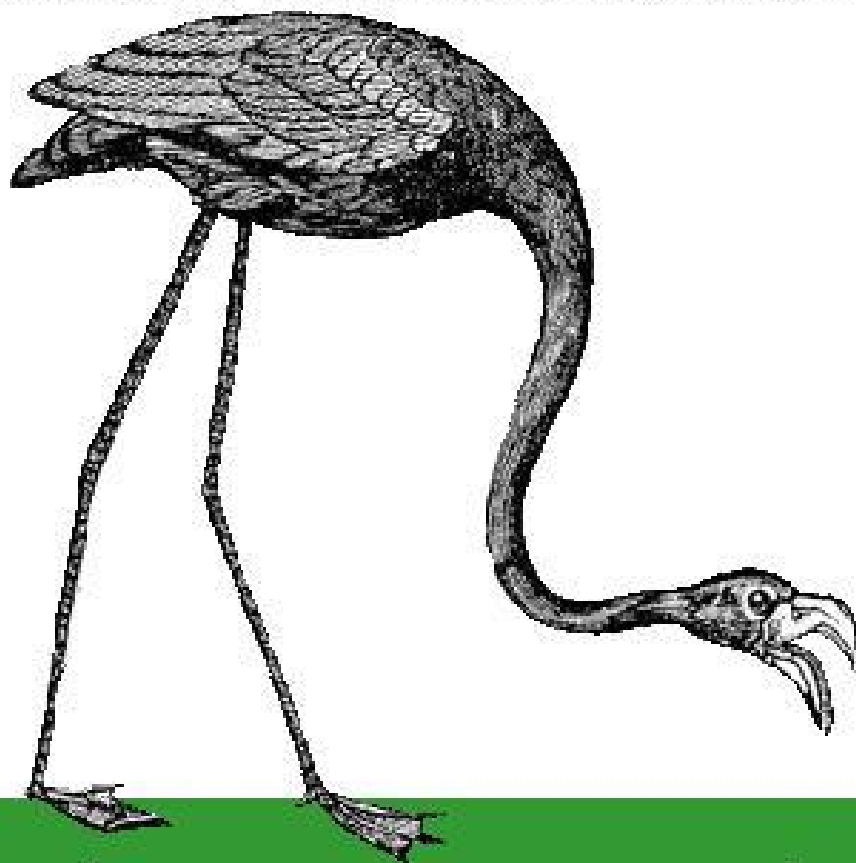


*PGS.TS. Nguyễn Bôn, PGS.TS. Hoàng Ngọc Đồng*



# Nhiệt Lạnh

*Sách: Nhiệt Kỹ Thuật*



*Lớp KTN1-K10 : ĐH Công Nghiệp Hà Nội*

**PTS. NGUYỄN BỐN - PTS. HOÀNG NGỌC ĐỒNG**

**NHIỆT  
KỸ THUẬT**

**NHÀ XUẤT BẢN GIÁO DỤC -1999**

## LỜI NÓI ĐẦU

Quyển Giáo trình “kỹ thuật nhiệt” này được biên soạn theo đề cương chi tiết đã được duyệt, dùng cho sinh viên hệ chính quy, tại chức các trường Đại học Kỹ thuật.

Nội dung giáo trình gồm 2 phần:

Phần thứ nhất là nhiệt động học Kỹ thuật, do PTS. Hoàng Ngọc đồng biên soạn. Phần này gồm 7 chương, trong đó trình bày các khái niệm, các định luật tổng quát của nhiệt động học và ứng dụng của nó để khảo sát các quá trình, các chu trình nhiệt động.

Phần thứ hai là truyền nhiệt và phần phụ lục, phần này do PTS. Nguyễn Bón biên soạn. Phần này gồm 5 chương, trong đó trình bày các khái niệm, các định luật cơ bản của các phương thức trao đổi nhiệt và ứng dụng của nó để khảo sát các quá trình trao đổi nhiệt phức hợp trong các thiết bị trao đổi nhiệt.

Phần phụ lục giới thiệu các bảng thông số vật lý của các chất thường gặp trong tính toán nhiệt cho các quá trình và thiết bị trao đổi nhiệt trong thực tế.

Bài tập ứng dụng của giáo trình này, sinh viên có thể tham khảo trong cuốn “Bài tập nhiệt kỹ thuật” của cùng tác giả hay của các tác giả khác trong và ngoài nước.

Giáo trình này cũng có thể dùng làm tài liệu học tập cho sinh viên ngành kỹ thuật hệ cao đẳng hoặc làm tài liệu tham khảo cho cán bộ kỹ thuật các ngành có liên quan.

Các tác giả mong được tiếp nhận và cảm ơn các ý kiến góp ý về nội dung và hình thức của quyển giáo trình này. Thư góp ý gửi về theo địa chỉ: Khoa Công nghệ Nhiệt-Điện lạnh, Trường đại học Bách khoa-Đại học Đà Nẵng.

CÁC TÁC GIẢ

## *Phần thứ nhất*

# **NHIỆT ĐỘNG KỸ THUẬT**

*Nhiệt động kỹ thuật là môn học nghiên cứu những qui luật biến đổi năng lượng có liên quan đến nhiệt năng trong các quá trình nhiệt động, nhằm tìm ra những phương pháp biến đổi có lợi nhất giữa nhiệt năng và cơ năng. Cơ sở nhiệt động đã được xây dựng từ thế kỷ XIX, khi xuất hiện các động cơ nhiệt.*

*Môn nhiệt động được xây dựng trên cơ sở hai định luật cơ bản: định luật nhiệt động thứ nhất và định luật nhiệt động thứ hai. định luật nhiệt động thứ nhất chính là định luật bảo toàn và biến hoá năng lượng áp dụng trong lĩnh vực nhiệt, nó cho phép xác định số lượng nhiệt và công trao đổi trong quá trình chuyển hoá năng lượng. định luật nhiệt động thứ hai xác định điều kiện, mức độ biến đổi nhiệt năng thành cơ năng, đồng thời xác định chiều hướng của các quá trình xảy ra trong tự nhiên, nó đặc trưng về mặt chất lượng của quá trình biến đổi năng lượng.*

*Những kết quả đạt được trong lĩnh vực nhiệt động kỹ thuật cho phép ta xây dựng cơ sở lý thuyết cho các động cơ nhiệt và tìm ra phương pháp đạt được công có ích lớn nhất trong các thiết bị năng lượng nhiệt.*

## **Chương 1. CÁC KHÁI NIỆM MỞ ĐẦU**

### **1.1. KHÁI NIỆM CƠ BẢN**

#### **1.1.1. Đối tượng và phương pháp nghiên cứu của nhiệt động học kỹ thuật**

+ Đối tượng nghiên cứu của nhiệt động học kỹ thuật: Nhiệt động học kỹ thuật là môn học khoa học tự nhiên, nghiên cứu những qui luật về biến đổi năng lượng mà chủ yếu là nhiệt năng và cơ năng nhằm tìm ra các biện pháp biến đổi có lợi nhất giữa nhiệt năng và cơ năng.

+ Phương pháp nghiên cứu: Nhiệt động học được nghiên cứu bằng phương pháp giải tích, thực nghiệm hoặc kết hợp cả hai.

- Nghiên cứu bằng phương pháp giải tích: ứng dụng các định luật vật lý kết hợp với các biến đổi toán học để tìm ra công thức thể hiện qui luật của các hiện tượng, các quá trình nhiệt động.

- Nghiên cứu bằng phương pháp thực nghiệm: tiến hành các thí nghiệm để xác định giá trị các thông số thực nghiệm, từ đó tìm ra các qui luật và công thức thực nghiệm.

## 1.1.2. Hệ nhiệt động

### 1.1.2.1. Hệ thống thiết bị nhiệt

Trong thực tế ta gặp nhiều hệ thống thiết bị nhiệt như máy lạnh, máy điều hoà nhiệt độ, các thiết bị sấy, chưng cất, thiết bị nhà máy điện . . . , chúng thực hiện việc chuyển tải nhiệt từ vùng này đến vùng khác hoặc biến đổi nhiệt thành công.

#### \* *Hệ thống thiết bị:*

Máy lạnh, máy điều hoà nhiệt độ tiêu tốn công để chuyển tải nhiệt từ vùng có nhiệt độ thấp (buồng lạnh) đến vùng có nhiệt độ cao hơn (không khí bên ngoài). Tua bin hơi của nhà máy nhiệt điện nhận nhiệt từ nguồn nóng (có nhiệt độ cao), nhả nhiệt cho nguồn lạnh để biến đổi nhiệt thành cơ năng. Để thực hiện được việc đó thì cần có các hệ thống thiết bị nhiệt và môi chất.

#### \* *Môi chất*

Muốn thực hiện việc truyền tải nhiệt và chuyển hoá nhiệt năng thành cơ năng hoặc ngược lại trong các thiết bị nhiệt, phải dùng chất trung gian gọi là môi chất hay chất công tác. Trong thực tế, môi chất thường ở thể lỏng, thể hơi hoặc thể khí vì chúng dễ dàng nén, ép và có khả năng thay đổi thể tích lớn, thuận lợi cho việc trao đổi công.

### 1.1.2.2. Định nghĩa và phân loại hệ nhiệt động

Tập hợp tất cả các vật thể liên quan với nhau về mặt cơ và nhiệt được tách ra để nghiên cứu gọi là hệ nhiệt động, còn những vật khác không nằm trong hệ nhiệt động gọi là môi trường xung quanh.

Ranh giới giữa hệ nhiệt động và môi trường có thể là một bề mặt cụ thể, cũng có thể là bề mặt tưởng tượng do ta qui ước. Ví dụ khi nghiên cứu quá trình đun nước trong một bình kín thì có thể coi hệ nhiệt động là nước và hơi trong bình, còn môi trường xung quanh là bình và không khí xung quanh. Các vật thể nằm trong hệ có thể trao đổi nhiệt với nhau và với môi trường xung quanh.

Có thể phân hệ nhiệt động thành hệ cô lập và hệ đoạn nhiệt, hệ kín và hệ hở.

#### \* *Hệ cô lập và hệ đoạn nhiệt*

Hệ cô lập là hệ không trao đổi chất, không trao đổi nhiệt và công với môi trường xung quanh.

Hệ đoạn nhiệt là hệ không trao đổi nhiệt với môi trường.

Trong thực tế, không có hệ hoàn toàn cô lập hoặc đoạn nhiệt, mà chỉ gần đúng với sai số có thể cho phép được.

#### \* *Hệ kín và hệ hở:*

Hệ kín là hệ không trao đổi chất với môi trường xung quanh.

Hệ hở là hệ có trao đổi chất với môi trường xung quanh.

Ví dụ: ở tủ lạnh, máy điều hoà nhiệt độ thì lượng môi chất (ga làm lạnh) không thay đổi, do đó nó là một hệ kín; ở trong động cơ xe máy, môi chất chính là lượng khí thay đổi liên tục, do đó nó là hệ hở.

### 1.1.3. Thông số trạng thái của một hệ nhiệt động

#### 1.1.3.1. Trạng thái và thông số trạng thái

Trạng thái là một tập hợp các thông số xác định tính chất vật lí của môi chất hay của hệ ở một thời điểm nào đó. Các đại lượng vật lí đó được gọi là thông số trạng thái.

Thông số trạng thái là một hàm đơn trị của trạng thái, có vi phân toàn phần, do đó khi vật hoặc hệ ở một trạng thái xác định thì các thông số trạng thái cũng có giá trị xác định. Nghĩa là độ biến thiên các thông số trạng thái trong quá trình chỉ phụ thuộc vào điểm đầu và điểm cuối của quá trình mà không phụ thuộc vào đường đi của quá trình.

Trong nhiệt động, thường dùng 3 thông số trạng thái có thể đo được trực tiếp là nhiệt độ  $T$ , áp suất  $p$  và thể tích riêng  $v$  (hoặc khối lượng riêng  $\rho$ ), còn gọi là các thông số trạng thái cơ bản. Ngoài ra, trong tính toán người ta còn dùng các thông số trạng thái khác như: nội năng  $U$ , entanpi  $E$  và entropi  $S$ , các thông số này không đo được trực tiếp mà được tính toán qua các thông số trạng thái cơ bản.

Trạng thái cân bằng của hệ đơn chất, một pha được xác định khi biết hai thông số trạng thái độc lập. Trên đồ thị trạng thái, trạng thái được biểu diễn bằng một điểm.

Khi thông số trạng thái tại mọi điểm trong toàn bộ thể tích của hệ có trị số đồng nhất và không thay đổi theo thời gian, ta nói hệ ở trạng thái cân bằng. Ngược lại khi không có sự đồng nhất này nghĩa là hệ ở trạng thái không cân bằng. Chỉ có trạng thái cân bằng mới biểu diễn được trên đồ thị bằng một điểm nào đó, còn trạng thái không cân bằng thì thông số trạng thái tại các điểm khác nhau sẽ khác nhau, do đó không biểu diễn được trên đồ thị. Trong giáo trình này ta chỉ nghiên cứu các trạng thái cân bằng.

#### \* Nhiệt độ tuyệt đối

Nhiệt độ là một thông số trạng thái biểu thị mức độ nóng lạnh của vật, nó thể hiện mức độ chuyển động của các phân tử và nguyên tử. Theo thuyết động học phân tử thì nhiệt độ của chất khí là đại lượng thống kê, tỉ lệ thuận với động năng trung bình chuyển động tịnh tiến của các phân tử.

$$T = \frac{m\overline{v}^2}{3k} \quad (1-1)$$

Trong đó:  $T$  là nhiệt độ tuyệt đối của vật,  
 $m$  là khối lượng phân tử,  
 $\overline{v}$  là vận tốc trung bình chuyển động tịnh tiến của các phân tử,  
 $k$  là hằng số Bonzman, bằng  $1,3805 \cdot 10^{-23} \text{J/K}$ .

Như vậy tốc độ trung bình chuyển động tịnh tiến của các phân tử càng lớn thì nhiệt độ của vật càng cao.

Trong hệ thống SI thường dùng hai thang đo nhiệt độ:

- Thang nhiệt độ bách phân: nhiệt độ kí hiệu bằng chữ t, đơn vị đo là độ Censius ( $^{\circ}\text{C}$ ).
- Thang nhiệt độ tuyệt đối: nhiệt độ kí hiệu bằng chữ T, đơn vị đo là độ Kenvin ( $^{\circ}\text{K}$ ).

Hai thang đo này có quan hệ với nhau bằng biểu thức sau:

$$t (^{\circ}\text{C}) = T (^{\circ}\text{K}) - 273,15 \quad (1-2)$$

Nghĩa là  $0 (^{\circ}\text{C})$  tương ứng với  $273,15 ^{\circ}\text{K}$ . Giá trị mỗi độ chia trong hai thang này bằng nhau:  $dT = dt$ .

Ngoài ra, một số nước như Anh, Mỹ còn dùng thang nhiệt độ Farenhet, đơn vị đo là  $^{\circ}\text{F}$  và thang nhiệt độ Renkin, đơn vị đo là  $^{\circ}\text{R}$ . Giữa độ C, độ F và độ R có mối quan hệ như sau:

$$t ^{\circ}\text{C} = T ^{\circ}\text{K} - 273,15 = \frac{5}{9}(t ^{\circ}\text{F} - 32) = \frac{5}{9}t ^{\circ}\text{R} - 273,15, \quad (1-3)$$

Để đo nhiệt độ, người ta dùng các dụng cụ khác nhau như: nhiệt kế thủy ngân, nhiệt kế khí, nhiệt kế điện trở, cặp nhiệt, hoả quang kế, v.v.v.

#### \* áp suất tuyệt đối:

Lực tác dụng của môi chất vuông góc lên một đơn vị diện tích bề mặt tiếp xúc gọi là áp suất tuyệt đối của môi chất.

Theo thuyết động học phân tử, áp suất tỉ lệ với động năng trung bình chuyển động tịnh tiến của các phân tử và với số phân tử khí trong một đơn vị thể tích:

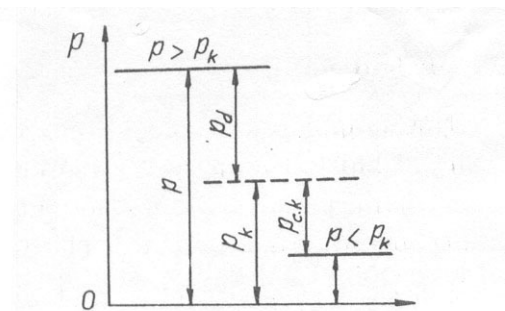
$$p = \alpha \cdot n \cdot \frac{m\bar{w}^2}{3} \quad (1-4)$$

trong đó: n là số phân tử khí trong một đơn vị thể tích,

$\alpha$  là hệ số tỉ lệ, phụ thuộc vào kích thước bản thân phân tử và lực tương tác giữa các phân tử. áp suất càng nhỏ, nhiệt độ càng cao thì  $\alpha$  càng gần tới 1;

m là khối lượng phân tử;

$\bar{w}$  là vận tốc trung bình chuyển động tịnh tiến của các phân tử.



Hình 1.1 Quan hệ giữa các loại áp suất

Đơn vị tiêu chuẩn đo áp suất là Pascal, kí hiệu là Pa:

$$1\text{Pa} = 1\text{N/m}^2, \quad 1\text{Kpa} = 10^3\text{Pa}, \quad 1\text{Mpa} = 10^6\text{Pa}. \quad (1-5)$$

Ngoài đơn vị tiêu chuẩn trên, hiện nay trong các thiết bị kỹ thuật người ta còn dùng đơn vị đo khác như: atmôtphe kỹ thuật at hay  $\text{kG/cm}^2$  ( $1\text{at} = 1\text{kG/cm}^2$ ); bar; milimet cột nước ( $\text{mmH}_2\text{O}$ ); milimet thuỷ ngân ( $\text{mmHg}$ ), quan hệ giữa chúng như sau:

$$1\text{Pa} = 1\text{N/m}^2 = 10^{-5}\text{bar} = \frac{1}{0,981} 10^{-5}\text{at} = \frac{1}{0,981}\text{mmH}_2\text{O} = \frac{1}{133,32}\text{mmHg}, \quad (1-6)$$

áp suất của không khí ngoài trời (ở trên mặt đất) gọi là p áp suất khí quyển, ký hiệu là  $p_k$ , đo bằng baromet.

Một chất khí chứa trong bình kín có áp suất tuyệt đối là  $p$ . Nếu áp suất  $p$  lớn hơn áp suất khí quyển  $P_k$  thì hiệu giữa chúng được gọi là áp suất dư, ký hiệu là  $p_d$ ,  $p_d = p - p_k$ , được đo bằng manomet. Nếu áp suất  $p$  nhỏ hơn áp suất khí quyển  $P_k$  thì hiệu giữa chúng được gọi là độ chân không, ký hiệu là  $p_{ck}$ ,  $p_{ck} = p_k - p$ , được đo bằng chân không kế. Quan hệ giữa các loại áp suất đó được biểu diễn trên hình 1.1.

**\* Thể tích riêng và khối lượng riêng:**

Một vật có khối lượng  $G$  kg và thể tích  $V$  m<sup>3</sup> thì thể tích riêng của nó là:

$$v = \frac{V}{G} \text{ [m}^3\text{/kg]}, \quad (1-7)$$

và khối lượng riêng của nó là:

$$\rho = \frac{G}{V} \text{ [kg/m}^3\text{]}, \quad (1-8)$$

**\* Nội năng**

Nội năng của một vật là toàn bộ năng lượng bên trong vật đó, gồm nội nhiệt năng và hoá năng và năng lượng nguyên tử. Trong các quá trình nhiệt động, khi không xảy ra các phản ứng hoá học và phản ứng hạt nhân, nghĩa là năng lượng các dạng này không thay đổi, khi đó tất cả các thay đổi năng lượng bên trong của vật chỉ là thay đổi nội nhiệt năng. Vậy trong nhiệt động học ta nói nội năng nghĩa là nội nhiệt năng.

Nội năng bao gồm hai thành phần: nội động năng và nội thế năng. Nội động năng là động năng của chuyển động tịnh tiến, chuyển động quay, dao động của các phân tử, nguyên tử; còn nội thế năng là thế năng tương tác giữa các phân tử:

$$U = U_d + U_{th} \quad (1-9)$$

Chuyển động của các phân tử phụ thuộc vào nhiệt độ của vật, do đó nội động năng là hàm của nhiệt độ:  $U_d = f(t)$ , còn lực tương tác giữa các phân tử phụ thuộc vào khoảng cách giữa chúng tức là phụ thuộc vào thể tích riêng  $v$  của các phân tử, do đó nội thế năng là hàm của thể tích:  $U_{th} = f(v)$ . Như vậy nội năng phụ thuộc vào nhiệt độ  $T$  và thể tích  $v$ , nói cách khác nó là một hàm trạng thái:  $U = f(T, v)$ .

Khi vật ở một trạng thái xác định nào đó, có giá trị nhiệt độ  $T$  và thể tích  $v$  xác định thì sẽ có giá trị nội năng  $U$  xác định.

Đối với khí lý tưởng, lực tương tác giữa các phân tử bằng không, do đó nội năng chỉ phụ thuộc vào nhiệt độ  $T$ , nghĩa là  $U = f(T)$ . Trong mọi quá trình, nội năng được xác định bằng:

$$du = C_v dT \text{ và } \Delta u = C_v (T_2 - T_1) \quad (1-10)$$

Đối với 1kg môi chất, nội năng ký hiệu là  $u$ , đơn vị đo là  $\text{J/kg}$ ; Đối với  $G$ kg ký hiệu là  $U$ , đơn vị đo là  $\text{J}$ . Ngoài ra có thể dùng các đơn vị đo khác như: Kcal; KWh; Btu . . . . Quan hệ giữa các đơn vị đó là:

$$1\text{kJ} = 0,239 \text{ kcal} = 277,78 \cdot 10^{-6} \text{ kWh} = 0,948 \text{ Btu}. \quad (1-11)$$

Trong các quá trình nhiệt động, ta chỉ cần biết biến thiên nội năng mà không cần biết giá trị tuyệt đối của nội năng, do đó có thể chọn điểm gốc tùy ý mà



tại đó nội năng bằng không. Theo qui ước, đối với nước ta chọn  $u = 0$  tại điểm có nhiệt độ  $t = 0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$  và áp suất  $p = 0,0062\text{ at}$  (điểm 3 thể của nước).

**\* Entanpi:**

Đối với 1kg, entanpi được ký hiệu là  $i$ , đối với Gkg ký hiệu là  $I$ , và được định nghĩa bằng biểu thức:

$$i = u + pv; \text{ (j/kg)} \quad (1-12)$$

$$I = G.i = G.(u + pv) = U = pV; \text{ (J)} \quad (1-13)$$

Entanpi cũng là một thông số trạng thái, nhưng không đo được trực tiếp mà được tính toán qua các thông số trạng thái cơ bản  $u$ ,  $p$  và  $v$ . Vi phân của nó:  $di = du + d(pv)$  là vi phân toàn phần. Đối với hệ hở,  $pv$  là năng lượng đẩy tạo ra công lưu động để đẩy dòng môi chất dịch chuyển, còn trong hệ kín tích số  $pv$  không mang ý nghĩa năng lượng đẩy.

Tương tự như nội năng, entanpi của khí thực phụ thuộc vào nhiệt độ  $T$  và thể tích  $v$ , nói cách khác nó là một hàm trạng thái:  $i = f(T, v)$ .

Đối với khí lý tưởng, lực tương tác giữa các phân tử bằng không, do đó entanpi chỉ phụ thuộc vào nhiệt độ  $T$ , nghĩa là  $i = f(T)$ . Trong mọi quá trình, entanpi được xác định bằng:

$$di = C_p dT \text{ và } \Delta i = C_p(T_2 - T_1) \quad (1-14)$$

Tương tự như nội năng, trong các quá trình nhiệt động ta chỉ cần tính toán độ biến thiên entanpi mà không cần biết giá trị tuyệt đối của entanpi, do đó có thể chọn điểm gốc tùy ý mà tại đó entanpi bằng không. Theo qui ước, đối với nước ta chọn  $i = 0$  tại điểm có nhiệt độ  $T = 0\text{ }^{\circ}\text{K}$  hoặc ở điểm 3 thể của nước.

**\* Entropi:**

Entropi là một thông số trạng thái, được ký hiệu bằng  $s$  và có vi phân toàn phần bằng:

$$ds = \frac{dq}{T}, \text{ j/kg}^{\circ}\text{K}, \quad (1-15)$$

Entropi được ký hiệu bằng  $s$  đối với 1 kg và  $S$  đối với G kg.

Entropi không đo được trực tiếp mà phải tính toán và thường chỉ cần tính toán độ biến thiên  $\Delta s$  của nó như đối với nội năng và entanpi.

Đối với Gkg thì:

$$dS = G.ds = \frac{dQ}{T}, \text{ j}^{\circ}\text{K}, \quad (1-16)$$

**\* Execgi:**

Trong thực tế, tất cả các dạng năng lượng (trừ nhiệt năng) đều có thể biến hoàn toàn thành công trong các quá trình thuận nghịch. Ngược lại, nhiệt năng chỉ có thể biến đổi một phần thành công trong quá trình thuận nghịch vì chúng còn bị giới hạn bởi nhiệt độ môi trường. Phần năng lượng có thể biến thành công trong các quá trình thuận nghịch được gọi là execgi, kí hiệu là  $e$  hoặc  $E$ , còn phần năng lượng không thể biến thành công được gọi là anecgi, kí hiệu là  $A$  hoặc  $a$ .

$$Q = e + a \quad (1-17)$$

Trong đó:

$E$  là execgi,

A là anecgi.

### **1.1.3.2. Tính chất của thông số trạng thái**

- Thông số trạng thái có vi phân toàn phần
- Thông số trạng thái là hàm đơn trị của trạng thái, lượng biến thiên thông số trạng thái chỉ phụ thuộc vào điểm đầu và điểm cuối của quá trình mà không phụ thuộc vào đường đi của quá trình.

Nhiệt lượng và công trao đổi trong một quá trình phụ thuộc vào đường đi của quá trình nên không phải là thông số trạng thái, chúng là hàm của quá trình.

### **1.1.4. Quá trình và chu trình nhiệt động**

#### **1.1.4.1. Quá trình**

Bất kỳ sự thay đổi trạng thái nào của vật hoặc của hệ gắn liền với những hiện tượng nhiệt gọi là quá trình nhiệt động. Nói cách khác, trong quá trình nhiệt động phải có ít nhất một thông số trạng thái thay đổi kèm theo sự trao đổi nhiệt hoặc công.

Khi môi chất hoặc hệ thực hiện một quá trình, nghĩa là chuyển từ trạng thái cân bằng này sang trạng thái cân bằng khác thì trạng thái cân bằng trước bị phá hủy. Nếu quá trình tiến hành vô cùng chậm để có đủ thời gian xác lập trạng thái cân bằng mới thì thực tế vẫn coi hệ đã thực hiện quá trình cân bằng. Do đó, muốn thực hiện một quá trình cân bằng thì phải tiến hành vô cùng chậm, nghĩa là các điều kiện bên ngoài phải thay đổi vô cùng chậm.

Trên đồ thị, đường biểu diễn sự thay đổi trạng thái của môi chất hay của hệ trong quá trình nào đó gọi là đường của quá trình. Lượng thay đổi các thông số trạng thái chỉ được xác định bằng trạng thái đầu và trạng thái cuối của quá trình nên chúng không phụ thuộc vào đường đi của quá trình.

#### **1.1.4.2. Chu trình**

Một quá trình mà trạng thái đầu và trạng thái cuối trùng nhau thì gọi là chu trình (tức một quá trình kín).

Trong một chu trình luôn có quá trình nhận nhiệt từ nguồn này, nhả nhiệt cho nguồn kia và kèm theo quá trình nhận hoặc sinh công. Do đó, trong một chu trình nhiệt động ít nhất phải có: 1 nguồn nóng, 1 nguồn lạnh và chất môi giới.

### **1.1.5. Nhiệt và công**

Nhiệt và công là các đại lượng đặc trưng cho sự trao đổi năng lượng giữa môi chất và môi trường khi thực hiện một quá trình. Khi môi chất trao đổi công với môi trường thì kèm theo các chuyển động vĩ mô, còn khi trao đổi nhiệt thì luôn tồn tại sự chênh lệch nhiệt độ.

#### **1.1.5.1. Nhiệt lượng**

Một vật có nhiệt độ khác không thì các phân tử và nguyên tử của nó sẽ chuyển động hỗn loạn và vật mang một năng lượng gọi là nhiệt năng.

Khi hai vật tiếp xúc với nhau thì nội năng của vật nóng hơn sẽ truyền sang vật lạnh hơn. Quá trình chuyển nội năng từ vật này sang vật khác gọi là quá trình truyền nhiệt. Lượng nội năng truyền được trong quá trình đó gọi là nhiệt lượng trao đổi giữa hai vật, ký hiệu là:

$Q$  nếu tính cho  $G$  kg, đơn vị đo là  $J$ ,  
 $q$  nếu tính cho  $1$  kg, đơn vị đo là  $J/kg$ ,

Qui ước: Nếu  $q > 0$  ta nói vật nhận nhiệt,  
Nếu  $q < 0$  ta nói vật nhả nhiệt,

Trong trường hợp cân bằng (khi nhiệt độ các vật bằng nhau), vẫn có thể xảy ra khả năng truyền nội năng từ vật này sang vật khác (xem là vô cùng chậm) ở trạng thái cân bằng động. Điều này có ý nghĩa quan trọng khi khảo sát các quá trình và chu trình lí tưởng.

### 1.1.5.2. Công

Công là đại lượng đặc trưng cho sự trao đổi năng lượng giữa môi chất với môi trường khi có chuyển động vĩ mô. Khi thực hiện một quá trình, nếu có sự thay đổi áp suất, thay đổi thể tích hoặc dịch chuyển trọng tâm khối môi chất thì một phần năng lượng nhiệt sẽ được chuyển hoá thành cơ năng. Lượng chuyển biến đó chính là công của quá trình.

Ký hiệu là:

$l$  nếu tính cho  $1$  kg, đơn vị đo là  $J/kg$ ,  
 $L$  nếu tính cho  $G$  kg, đơn vị đo là  $J$ ,

Qui ước: Nếu  $l > 0$  ta nói vật sinh công,  
Nếu  $l < 0$  ta nói vật nhận công,

Công không thể chứa trong một vật bất kỳ nào, mà nó chỉ xuất hiện khi có quá trình thay đổi trạng thái kèm theo chuyển động của vật.

Về mặt cơ học, công có trị số bằng tích giữa lực tác dụng với độ dời theo hướng của lực. Trong nhiệt kỹ thuật thường gặp các loại công sau: công thay đổi thể tích; công lưu động (công thay đổi vị trí); công kỹ thuật (công thay đổi áp suất) và công ngoài.

#### \* Công thay đổi thể tích:

Công thay đổi thể tích là công do môi chất thực hiện khi có sự thay đổi thể tích. Công thay đổi thể tích được trình bày trên hình 1.2.

Với 1kg môi chất, khi tiến hành một quá trình ở áp suất  $p$ , thể tích thay đổi một lượng  $dv$ , thì môi chất thực hiện một công thay đổi thể tích là:

$$dl = p.dv \quad (1-19)$$

Khi tiến hành quá trình, thể tích thay đổi từ  $v_1$  đến  $v_2$  thì công thay đổi thể tích được tính là:

$$l = \int_{v_1}^{v_2} p.dv \quad (1-20)$$

Từ công thức (1-19) ta thấy  $dl$  và  $dv$  cùng dấu. Khi  $dv > 0$  thì  $dl > 0$ , nghĩa là khi xảy ra quá trình mà thể tích tăng thì công có giá dương, ta nói môi chất sinh công (công do môi chất thực hiện).

Khi  $dv < 0$  thì  $dl < 0$ , nghĩa là khi xảy ra quá trình mà thể tích giảm thì công có giá âm, ta nói môi chất nhận công (công do môi trường thực hiện). Công thay đổi thể tích không phải là thông số trạng thái, được biểu diễn trên đồ thị  $p-v$  hình 1.3.

**\* Công kỹ thuật:**

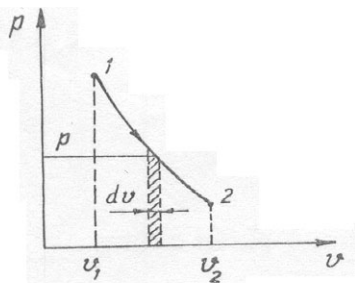
Công kỹ thuật là công do thay đổi áp suất. Khi môi chất tiến hành một quá trình, áp suất thay đổi một lượng là  $dp$  thì thực hiện một công kỹ thuật là  $dl_{kt}$ , công kỹ thuật được tính:

$$dl = -v.dp \quad (1-21)$$

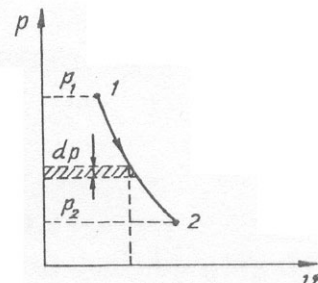
Nếu quá trình được tiến hành từ áp suất  $p_1$  đến  $p_2$  thì công kỹ thuật được tính là:

$$l = - \int_{v_1}^{v_2} v.dp \quad (1-22)$$

Từ công thức (1-22) ta thấy  $dl_{kt}$  và  $dp$  ngược dấu nên khi  $dp < 0$  thì  $dl_{kt} > 0$ , nghĩa là áp suất  $p$  giảm thì công kỹ thuật dương, ta nói môi chất sinh công và ngược lại.



Hình 1-3. Đồ thị xác định công thay đổi thể tích



Hình 1-4. Đồ thị xác định công kỹ thuật

**\* Công ngoài:**

Công ngoài là công mà hệ trao đổi với môi trường trong quá trình nhiệt động. Đây chính là công có ích mà hệ sinh ra hoặc nhận được từ bên ngoài:

$$dl_n = dl - dl_{ld} - d\left(\frac{\omega^2}{2}\right) - gdh \quad (1-23)$$

Vì trong hệ kín, trọng tâm khối khí không dịch chuyển do đó không có lực đẩy, không có ngoại động năng nên công ngoài trong hệ kín bằng chính công thay đổi thể tích. Nói cách khác, chỉ có thể nhận được công trong hệ kín khi cho môi chất giãn nở hay:

$$dl_n = dl = pdv. \quad (1-24)$$

Đối với hệ hở, môi chất cần tiêu hao công để thay đổi vị trí gọi là công lưu động hay lực đẩy ( $dl_n = d(pv)$ ), khi đó công ngoài bằng :

$$dl_n = dl - d(pv) - d\left(\frac{\omega^2}{2}\right) - gdh \quad (1-25a)$$

hay có thể viết:

$$dl_n = dl - pdv - vdp - d\left(\frac{\omega^2}{2}\right) - gdh = dl_{kt} - d\left(\frac{\omega^2}{2}\right) - gdh \quad (1-25b)$$

Trong thực tế, lượng biến đổi động năng và thế năng ngoài là rất nhỏ so với công kỹ thuật do đó có thể bỏ qua, từ (1-25b) ta có:

$$dl_n = dl_{kt} \quad (1-26)$$

Từ (1-26) ta thấy công kỹ thuật tính gần đúng là công có ích nhận được từ dòng môi chất (hệ hở) thông qua một thiết bị kỹ thuật (tuabin):

Đối với một quá trình thì:

$$dl_n = dl_{kt} \neq dl \quad (1-26a)$$

Đối với một chu trình, vì  $dl_{ld} = 0$  nên:

$$dl_n = dl_{kt} = dl \quad (1-26b)$$

## 1.2 PHƯƠNG TRÌNH TRẠNG THÁI CỦA CHẤT KHÍ

### 1.2.1. Khí lý tưởng và khí thực

Khí lý tưởng là khí mà thể tích bản thân phân tử của chúng vô cùng bé và lực tương tác giữa các phân tử bằng không. Ngược lại, khí thực là khí mà thể tích bản thân các phân tử khác không và tồn tại lực tương tác giữa các phân tử. Nếu khí thực có áp suất rất thấp và nhiệt độ cao thì có thể coi là khí lý tưởng. Trong thực tế không có khí lý tưởng, có thể xem khí lý tưởng là trạng thái giới hạn của khí thực khi áp suất  $p$  rất nhỏ. Trong kỹ thuật ở điều kiện nhiệt độ, áp suất bình thường có thể coi các chất như Hydrô, Oxy, Nitơ, không khí . . . là khí lý tưởng.

### 1.2.2. Phương trình trạng thái của chất khí

#### 1.2.2.1. Phương trình trạng thái của khí lý tưởng (Clapêron)

Phương trình trạng thái khí lý tưởng biểu diễn quan hệ giữa các thông số trạng thái của khí lý tưởng ở một thời điểm nào đó. Khi nhiệt ở độ cao thì lực tương tác càng nhỏ, do đó có thể coi  $\alpha = 1$  và biểu thức (1-4) sẽ được viết là:

$$p = n \cdot \frac{m\bar{v}^2}{3} \quad (1-27)$$

Số phân tử trong một đơn vị thể tích là:

$$n = \frac{N}{V} = \frac{N_\mu}{V_\mu} \quad (1-28)$$

trong đó:

$N$  là số phân tử khí chứa trong khối khí có thể tích là  $V$ ,

$N_\mu$  là số phân tử khí chứa trong 1kmol khí,

$V_\mu$  là thể tích của 1kmol khí ở điều kiện tiêu chuẩn: áp suất  $p = 101326\text{Pa}$ , nhiệt độ  $t = 0^\circ\text{C}$ . ở điều kiện tiêu chuẩn, thể tích của 1 kmol khí bất kỳ là  $V_\mu = 22,4\text{m}^3$ . Thay (1-28) vào phương trình (1-27) và để ý biểu thức (1-1) ta sẽ có:

$$P = \frac{N_\mu}{V_\mu} \cdot \frac{m\bar{v}^2}{3} \cdot k = \frac{N_\mu}{V_\mu} \cdot T \cdot k \quad (1-28)$$

Hay:  $p \cdot V_\mu = N_\mu \cdot k \cdot T \quad (1-30)$

Theo Avôgadrô thì 1kmol khí bất kỳ đều có  $6,0228 \cdot 10^{26}$  phân tử. Nghĩa là đối với mọi chất khí, tích số  $N_\mu \cdot k = R_\mu = \text{const}$ ,  $R_\mu$  được gọi là hằng số phổ biến của chất khí. Vậy phương trình (1-30) có thể viết là:

$$p \cdot V_\mu = R_\mu \cdot T \quad (1-31)$$

chia hai vế của phương trình cho  $\mu$  ta được:

$$p \frac{V_\mu}{\mu} = \frac{R_\mu}{\mu} T$$

hay:  $pV = RT \quad (1-32)$

trong đó:  $R$  là hằng số chất khí:

$$R = \frac{R_\mu}{\mu} \quad (1-33)$$

Đối với khối khí có khối lượng là  $G$  kg, thể tích  $V$   $\text{m}^3$  thì ta có:

$$G \cdot pV = G \cdot RT$$

Hay  $pV = GRT \quad (1-34)$

Phương trình (1-32), (1-33) và (1-34) gọi là phương trình trạng thái khí lý tưởng.

**\* Tính hằng số  $R$ :**

Từ (1-31) ta có:

$$R_\mu = \frac{pV_\mu}{T}$$

ở điều kiện tiêu chuẩn, áp suất  $p = 101.326\text{Pa}$ , nhiệt độ  $t = 0^\circ\text{C}$  thì 1 mol khí lý tưởng chiếm một thể tích là  $V_\mu = 22,4 \text{ m}^3$ , vậy hằng số phổ biến của chất khí bằng:

$$R_{\mu} = \frac{pV_{\mu}}{T} = \frac{101326.22,4}{273} = 8314 \text{ j/kmol.}$$

Hoặc cũng có thể tính:  $R_{\mu} = N_{\mu} \cdot k = 6,0228 \cdot 10^{26} \cdot 1,3805 \cdot 10^{-23} = 8314 \text{ j/kmol}$ , thay vào (1-31) ta được:

$$R = \frac{R_{\mu}}{\mu} = \frac{8314}{\mu}, \text{ j/kg}^0\text{K} \quad (1-35)$$

### 1.2.2.2. Phương trình trạng thái khí thực

Trong thực tế, không tồn tại khí lý tưởng. Các quá trình nhiệt động kỹ thuật thường gặp là xảy ra với khí thực. Do khí thực có nhiều khác biệt với khí lý tưởng, nên nếu áp dụng phương trình trạng thái khí lý tưởng cho khí thực thì sẽ gặp phải sai số lớn. Do đó cần thiết phải thiết lập các phương trình trạng thái cho khí thực để giải quyết vấn đề trên.

Cho đến nay, chúng ta chưa tìm được một phương trình trạng thái nào dùng cho mọi khí thực ở mọi trạng thái, mà chỉ tìm được các phương trình gần đúng cho một chất khí hoặc một nhóm chất khí ở khoảng áp suất và nhiệt độ nhất định. Hiện nay có rất nhiều phương trình trạng thái viết cho khí thực, dưới đây ta khảo sát một số phương trình trạng thái khí thực thường gặp trong thực tế.

Phương trình Vandecvan là một trong những phương trình viết cho khí thực có độ chính xác cao và được áp dụng khá rộng rãi.

Như đã nói ở trên, khí thực khác với khí lý tưởng là thể tích bản thân phân tử khác không và có lực tương tác giữa các phân tử. Do đó khi thành lập phương trình trạng thái cho khí thực, xuất phát từ phương trình trạng thái khí lý tưởng, để hiệu chỉnh các sai số, Vandecvan đã đưa thêm vào các hệ số hiệu chỉnh được xác định bằng thực nghiệm kể đến ảnh hưởng của thể tích bản thân các phân tử và lực tương tác giữa các phân tử của chất khí đó.

Về áp suất: đối với khí lý tưởng, giữa các phân tử không có lực tương tác nên các phân tử tự do chuyển động và va đập tới mọi nơi với năng lượng của chúng. Còn ở khí thực, trong quá trình chuyển động và va đập các phân tử tự do sẽ chịu lực hút và đẩy của các phân tử xung quanh, do đó lực va đập sẽ giảm đi. Vì vậy áp suất khí thực mà ta đo được sẽ nhỏ hơn giá trị áp suất thực tế một đại lượng

là  $\Delta p$ , đại lượng này tỷ lệ với bình phương khối lượng riêng và bằng:  $\Delta p = \frac{a}{v^2}$ , áp suất thật của khí thực sẽ là:

$$P + \Delta p = p + \frac{a}{v^2} \quad (1-36)$$

Về thể tích: Các phân tử khí thực có thể tích khác không. Giả sử tổng thể tích bản thân các phân tử có trong 1kg khí là  $b$  thì không gian tự do cho chuyển động của chúng sẽ giảm xuống và chỉ còn là  $(v - b)$ . Vậy phương trình trạng thái khí thực Vandecvan sẽ là:

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT \quad (1-37)$$

Trong đó :  $a$  và  $b$  là các hệ số có giá trị xác định, phụ thuộc vào bản chất của mỗi chất khí,  $b$  chính là tổng thể tích bản thân các phân tử có trong 1kg khí.

Trong phương trình này, chưa kể đến ảnh hưởng của một số hiện tượng vật lý phụ như hiện tượng phân li và kết hợp các phân tử.

Khi chú ý đến hiện tượng kết hợp mạnh giữa các phân tử khí thực dưới ảnh hưởng của lực tương tác giữa các phân tử, Vukalovich và Novikov đã đưa ra phương trình khác có độ chính xác cao hơn, đặc biệt phù hợp khi áp dụng cho hơi nước, có dạng như sau:

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT \left[ 1 - \frac{c}{T^{\frac{3+2m}{2}}} \right] \quad (1-38)$$

trong đó: c và m là các hằng số xác định bằng thực nghiệm.

Ngoài các công thức thực nghiệm, đối với khí thực thì người ta có thể xác định các thông số bằng bảng hoặc đồ thị.

### 1.3. HỖN HỢP KHÍ LÝ TƯỞNG

#### 1.3.1. Khái niệm

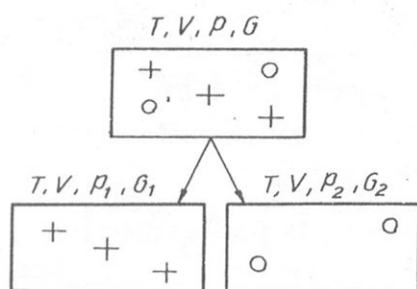
Hỗn hợp khí là một tập hợp một số khí không có tác dụng hoá học với nhau. Ví dụ không khí là một hỗn hợp của các khí Oxy, Nitơ, Hydro, Carbonic . . .

Ở điều kiện cân bằng thì áp suất và nhiệt độ tại mọi điểm trong khối khí đều bằng nhau:

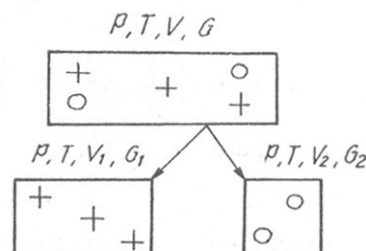
$$T_1 = T_2 = T_3 = \dots = T_n = T_{hh} \quad (1-39)$$

**\* Tính chất của hỗn hợp khí lý tưởng:**

Ta xét một hỗn hợp được tạo thành từ n chất khí thành phần. Giả sử hỗn hợp có áp suất là p, thể tích là V. Nếu tách riêng chất khí thứ i ra khỏi hỗn hợp và chứa nó vào bình có thể tích V, thì chất khí đó sẽ có áp suất là p<sub>i</sub>, p<sub>i</sub> được gọi là áp suất riêng phần hay là phân áp suất của chất khí thứ i (hình 1.5).



Hình 1.5 Tách hỗn hợp theo phân áp suất



Hình 1.6 Tách theo phân thể tích

Nếu tách chất khí thứ i ra khỏi hỗn hợp với điều kiện áp suất, nhiệt độ của nó bằng áp suất và nhiệt độ hỗn hợp khí thì chất khí đó sẽ chiếm một thể tích V<sub>i</sub>, V<sub>i</sub> được gọi là thể tích riêng phần hay là phân thể tích của chất khí thứ i (hình 1.6).



- Áp suất của hỗn hợp khí lý tưởng tuân theo định luật Danton. Định luật phát biểu: áp suất của hỗn hợp khí bằng tổng áp suất riêng phần của tất cả các chất khí thành phần tạo nên hỗn hợp.

$$\sum_{i=1}^n p_i = p \quad (1-40)$$

- Nhiệt độ của các chất khí thành phần bằng nhiệt độ của hỗn hợp khí:

$$T_1 = T_2 = T_3 = \dots = T_n = T_{hh} \quad (1-41)$$

- Khối lượng của hỗn hợp khí bằng tổng áp suất riêng phần của tất cả các chất khí thành phần tạo nên hỗn hợp:

$$G = \sum_{i=1}^n G_i \quad (1-42)$$

- Thể tích của hỗn hợp khí bằng tổng áp suất riêng phần của tất cả các chất khí thành phần tạo nên hỗn hợp:

$$V = \sum_{i=1}^n V_i \quad (1-43)$$

### 1.3.2. Phương trình trạng thái của hỗn hợp khí

Có thể coi hỗn hợp khí lý tưởng tương đương với một chất khí đồng nhất, do đó có thể áp dụng định luật và phương trình trạng thái của khí lý tưởng cho hỗn hợp khí. Nghĩa là hỗn hợp khí lý tưởng và các chất khí thành phần đều tuân theo phương trình trạng thái khí lý tưởng. Có thể viết phương trình trạng thái của hỗn hợp khí dưới các dạng sau:

$$p_i \cdot V = G_i \cdot R_i \cdot T \quad (1-44a)$$

$$p \cdot V_i = G_i \cdot R_i \cdot T \quad (1-44b)$$

$$p \cdot V = G \cdot R \cdot T \quad (1-44c)$$

Từ phương trình (1-44a) ta có:

$$p_i = R_i G_i \frac{T}{V} \quad (1-45)$$

Và từ phương trình (1-44b) ta có:

$$V_i = R_i G_i \frac{T}{p} \quad (1-46)$$

### 1.3.3. Các thành phần của hỗn hợp

Đối với một hỗn hợp khí lý tưởng, để xác định một trạng thái cân bằng của hỗn hợp, xác định hằng số chất khí của hỗn hợp thì ngoài hai thông số trạng thái độc lập thường dùng, cần phải xác định thêm một thông số thứ ba nữa là thành phần của hỗn hợp khí. Thành phần của hỗn hợp khí có thể là thành phần thể tích, thành phần khối lượng hay thành phần mol.

#### 1.3.3.1. Thành phần khối lượng

Theo định luật bảo toàn khối lượng thì khối lượng của hỗn hợp sẽ bằng tổng khối lượng của các khí thành phần. Tỷ số giữa khối lượng của các khí thành phần với khối lượng của hỗn hợp được gọi là thành phần khối lượng của chất khí đó trong hỗn hợp, ký hiệu là  $g_i$ .

$$g_i = \frac{G_i}{G} \quad (1-47)$$

như vậy ta có:  $g_1 + g_2 + \dots + g_n = \frac{G_1 + G_2 + \dots + G_n}{G} = 1$

hay:

$$\sum_{i=1}^n g_i = 1 \quad (1-48)$$

### 1.3.3.2. Thành phần thể tích và thành phần áp suất của chất khí

Đại lượng:

$$r_i = \frac{V_i}{V} \quad (1-49)$$

được gọi là thành phần thể tích của chất khí thứ  $i$ .

và có thể viết:  $r_1 + r_2 + \dots + r_n = \frac{V_1 + V_2 + \dots + V_n}{V} = 1$

hay: 
$$\sum_{i=1}^n r_i = \sum_{i=1}^n \frac{V_i}{V} = 1 \quad (1-50)$$

Từ phương trình trạng thái viết cho các chất khí thành phần:

$$p_i \cdot V = G_i \cdot R_i \cdot T \quad (a)$$

$$p \cdot V_i = G_i \cdot R_i \cdot T \quad (b)$$

chia vế theo vế (a) cho (b) ta có:

$$pV_i / p_i V = 1$$

hay:

$$r_i = \frac{V_i}{V} = \frac{p_i}{p}$$

vậy thành phần áp suất của chất khí thứ  $i$  bằng thành phần thể tích của nó.

Ví dụ: Có một hỗn hợp hai chất khí, có nhiệt độ  $T$ , áp suất là  $p$ , thể tích  $V$ , khối lượng  $G$ . Nếu ta tách riêng hai chất khí đó ra ở cùng nhiệt độ  $T$  và mỗi chất khí đều có thể tích  $V$  thì chất khí thứ nhất sẽ có áp suất  $p_1$ , khối lượng  $G_1$ , còn chất khí thứ hai sẽ có áp suất  $p_2$ , khối lượng  $G_2$  và  $p = p_1 + p_2$ ;  $G = G_1 + G_2$ .

### 1.3.3.3. Thành phần mol của chất khí

Thành phần mol của chất khí thứ  $i$  trong hỗn hợp là tỷ số giữa số mol của chất khí thứ  $i$  với số mol của hỗn hợp.

Nếu gọi  $M_i$  là số mol của chất khí thứ  $i$ ,  $M$  là số mol của hỗn hợp khí thì thể tích của 1kmol khí thứ  $i$  là:  $\frac{V_i}{M_i}$  và thể tích của 1kmol hỗn hợp khí là  $\frac{V}{M}$ .

Theo định luật Avogadro, khi ở cùng một điều kiện nhiệt độ và áp suất thì thể tích 1kmol của các chất khí đều bằng nhau, nghĩa là:  $\frac{V_i}{M_i} = \frac{V}{M}$ , do đó ta có:

$$\frac{V_i}{V} = \frac{M_i}{M} = r_i. \quad (1-51)$$

nghĩa là:

$$r_i = \frac{M_i}{M} \quad (1-52)$$

Vậy thành phần mol bằng thành phần thể tích.

### 1.3.4. Xác định các đại lượng tương đương của hỗn hợp khí

#### 1.3.4.1. Khối lượng kilômol của hỗn hợp khí

Khối lượng kilômol của hỗn hợp khí được xác định theo thành phần thể tích hoặc thành phần khối lượng.

**\* Tính theo thành phần thể tích:**

Khối lượng khí có thể xác định bằng:

$$G_i = \mu_i M_i \text{ và } G = \mu M,$$

Mà theo (1-47) ta có:  $g_i = \frac{G_i}{G}$ , thay giá trị của  $G_i$  và  $G$  vào ta được:

$$g_i = \frac{G_i}{G} = \frac{\mu_i M_i}{\mu G} = r_i \cdot \frac{\mu_i}{\mu}$$

hay: 
$$\sum g_i = r_i \cdot \frac{\mu_i}{\mu} \quad (1-53)$$

kết hợp (1-48) và (1-53) ta có:

$$\sum g_i = \sum r_i \cdot \frac{\mu_i}{\mu} = 1$$

suy ra:

$$\mu = \sum_{i=1}^n r_i \mu_i \quad (1-54)$$

**\* Tính theo thành phần khối lượng:**

Từ  $\mu = \frac{G}{M}$  ta có:

$$\mu = \frac{G}{M} = \frac{G}{\sum M_i} = \frac{G}{\sum \frac{G_i}{\mu_i}} = \frac{G}{\sum \frac{G_i}{G} \cdot \frac{1}{\mu_i}}$$

suy ra khối lượng kilômol của hỗn hợp khí tính theo thành phần khối lượng bằng:

$$\mu = \frac{1}{\sum \frac{g_i}{\mu_i}} \quad (1-55)$$

### 1.3.4.2. Hằng số chất khí của hỗn hợp

Từ phương trình (1-40) ta có:  $\sum_{i=1}^n p_i = p$ , thay giá trị của  $p_i$  từ (1-44) và  $p$  từ (1-44c) vào ta được:

$$\sum_{i=1}^n R_i G_i \frac{T}{V} = R G \frac{T}{V}$$

suy ra hằng số chất khí của hỗn hợp bằng:  $R = \sum_{i=1}^n R_i \frac{G_i}{G}$

hay

$$R = \sum_{i=1}^n g_i R_i \quad (1-56)$$

Hoặc từ (1-35) và (1-54) ta có thể tính hằng số chất khí của hỗn hợp theo  $\mu_i$ :

$$R = \frac{8314}{\mu} = \frac{8314}{\sum r_i \mu_i} \quad (1-57)$$

### 1.3.4.3. Thể tích riêng của hỗn hợp:

Thể tích riêng của hỗn hợp có thể xác định được khi biết thể tích riêng  $v_i$  của các khí thành phần và khối lượng  $g_i$ .

Từ  $v = V/G$ , biến đổi ta có:

$$v = \frac{V}{G} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{G} = \frac{\sum_{i=1}^n v_i G_i}{G} = \sum_{i=1}^n g_i v_i \quad (1-58)$$

## 1.4. NHIỆT DUNG VÀ NHIỆT DUNG RIÊNG

### 1.4.1. Nhiệt dung

Khảo sát một vật có khối lượng  $G$  trong một quá trình nhiệt động nào đó, nếu cung cấp một lượng nhiệt  $dQ$  thì nhiệt độ của vật tăng lên một lượng là  $dt$ .

Tỷ số :

$$c = \frac{dQ}{dt}, j/^\circ K, \quad (1-59)$$

được gọi là nhiệt dung của vật.

$$c \Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{Q}{t_2 - t_1}, j/^\circ K \quad (1-60)$$