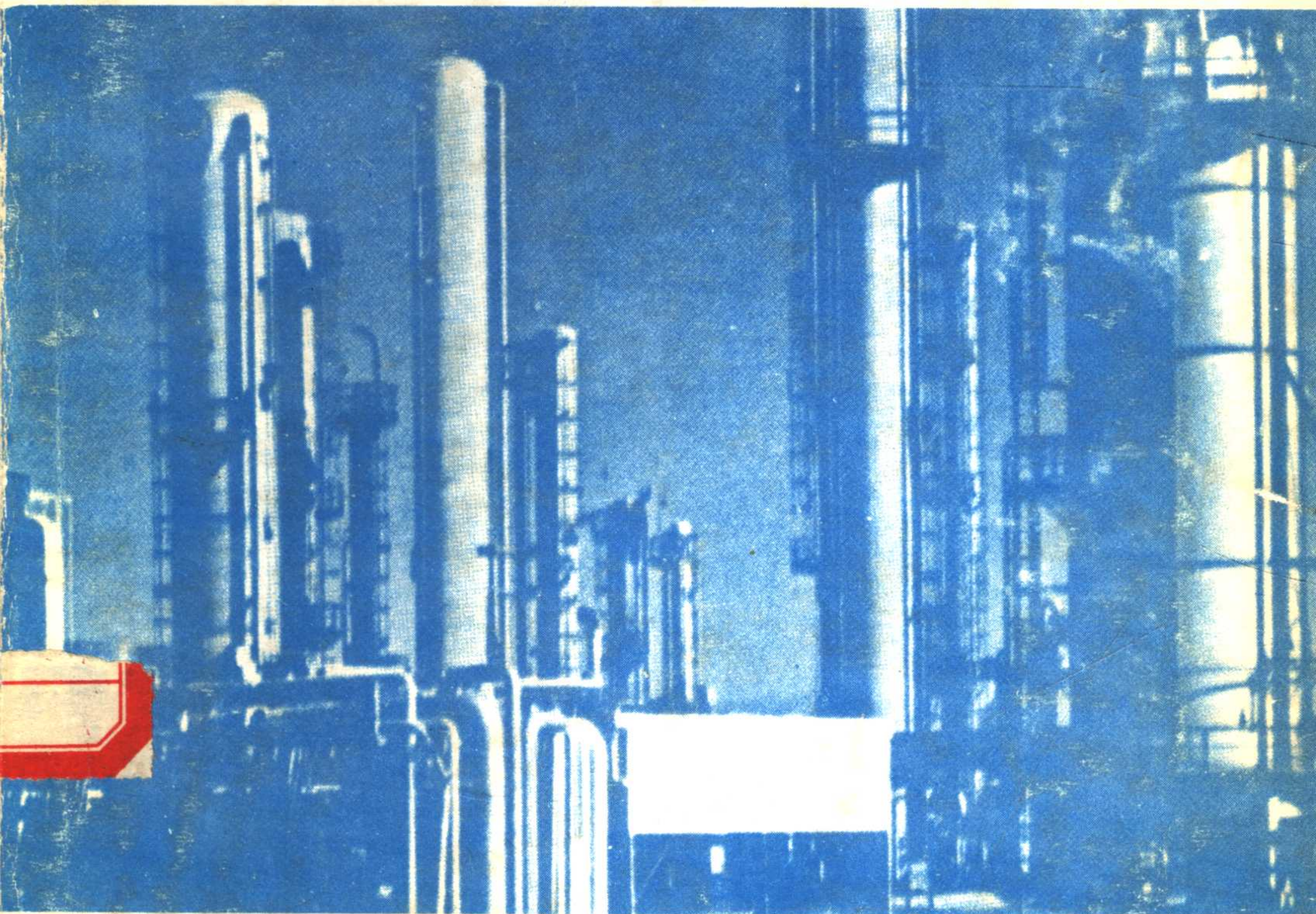


大專科技用書

單元操作 (下)

許啓榮 編著



總經銷 大學圖書供應社

單元操作 (下冊)

中華民國 68 年 8 月初版	著作者	許	啓	榮
	發行人	林	平	南
	出版者	國	彰 出 版	社
		地	址：台中市文華路七三號	
		局	版 台 業 字 0 2 2 6 號	
	總經銷	大	學 圖 書 供 應 社	
		地	址：台中市文華路七三號	
		電	話：(0 4 2) 2 4 0 2 7 3	
		郵政劃撥	：中市 2 3 1 2 3 號	
	印刷者	珠	美 打 字 印 刷 行	
		地	址：台中市進化路 199-3 號	
		電	話：(0 4 2) 3 2 2 4 2 2	
定 價：120 元				

目 錄

(下冊)

第十四章 輻射熱輸送

14 - 1	熱輻射之概念.....	221
14 - 2	輻射之基本定律.....	222
14 - 3	面間之輻射.....	224
14 - 4	輻射熱傳送係數.....	229
14 - 5	氣體與火焰之輻射.....	231

第十五章 熱輸送裝置

15 - 1	概論.....	234
15 - 2	熱交換器之種類.....	234
15 - 3	熱交換器之計算.....	237
15 - 4	熱源.....	246
15 - 5	保溫及保溫材料.....	251
15 - 6	冷凍.....	251

第十六章 蒸發

16 - 1	概論.....	255
16 - 2	溶液之物性.....	255
16 - 3	蒸發器之種類及其特性.....	256
16 - 4	蒸發器之輔助設備.....	262
16 - 5	沸點上升與Dührings法則.....	263
16 - 6	蒸發之操作法.....	264
16 - 7	蒸發之計算.....	265

2 單元操作

16 - 8	多效蒸發及其計算.....	269
--------	---------------	-----

第十七章 質量輸送

17 - 1	概論.....	282
17 - 2	物理平衡.....	282
17 - 3	分子擴散.....	289
17 - 4	二成份系單一向度之分子擴散.....	291
17 - 5	渦流擴散.....	294
17 - 6	質量傳送係數之測求.....	297
17 - 7	質量傳送之段級接觸.....	300
17 - 8	質量傳送之微分接觸.....	301

第十八章 蒸餾

18 - 1	蒸餾之方法.....	305
18 - 2	平衡蒸餾及微分蒸餾.....	306
18 - 3	共沸蒸餾、萃取蒸餾及水蒸氣蒸餾.....	309
18 - 4	多級簡單蒸餾與精餾.....	310
18 - 5	二成分系之精餾計算方法.....	311
18 - 6	多成分系蒸餾之計算.....	329
18 - 7	板之效率.....	331
18 - 8	精餾塔之構造及設計.....	332

第十九章 吸收與氣提

19 - 1	概論.....	338
19 - 2	吸收裝置.....	338
19 - 3	充填塔內氣流之壓力降.....	343
19 - 4	充填塔塔徑之計算.....	345

19 - 5	充填塔高之計算·····	352
19 - 6	氣提·····	357
19 - 7	反應吸收·····	358

第二十章 萃取

20 - 1	概論·····	360
20 - 2	萃取操作法·····	360
20 - 3	萃取劑之選擇·····	362
20 - 4	固液萃取 (滲提) ·····	363
20 - 5	液液萃取·····	374
20 - 6	萃取速度與級效率·····	377

第二十一章 結晶

21 - 1	概論·····	380
21 - 2	結晶之幾何性·····	380
21 - 3	結晶系之質能結算·····	382
21 - 4	結晶原理·····	390
21 - 5	結晶設備·····	395
21 - 6	晶體之結塊·····	399

第二十二章 調濕與涼水

22 - 1	概論·····	402
22 - 2	名詞定義·····	402
22 - 3	濕度表之構成及使用方法·····	405
22 - 4	濕度之測定·····	408
22 - 5	調濕方法·····	409
22 - 6	水冷器·····	411

第二十三章 乾燥

23 - 1	概論.....	414
23 - 2	乾燥特性.....	414
23 - 3	乾燥裝置之種類及其應用.....	418
23 - 4	乾燥器之計算.....	423
23 - 5	支配恒速乾燥速率之因素.....	427
23 - 6	氣體之乾燥方法.....	427
附 錄		430

第十四章 輻射熱輸送

14-1 熱輻射之概念

熱能以電磁波之形式向四周傳佈者，稱為輻射 (radiation)。輻射熱的傳遞過程不需要任何媒介 (medium)，若在真空中進行，無能量之轉變，路徑亦不致改變，惟與物質相遇，則透過或被反射，或被吸收，被吸收的能量，有固定的波長，且在吸收體內轉變為熱。

任何物質，只要溫度在絕對零度以上，皆會放出輻射熱。因為輻射熱係以電磁波之方式放出，故放射之波長範圍很廣。在工程應用上，較有用之輻射能之波長範圍在 $0.1 \mu \sim 100 \mu$ 之間。

任何物體在單位時間、單位面積所能放出的總輻射能，和其本身溫度及表面積有關，我們稱這些放射總能量為放射本領 (或放射能力，emissive power)。對某一溫度來說，每單位波長放射之能量，隨波長而異。在某一定溫度下，能放射最大輻射能之物體，稱為理想放射體。在任何溫度下，理想放射體之放射能力和波長之分佈關係如圖 (14-1) 所示。

由上圖可知，在不同溫度下，有不同之代表曲綫。上圖之縱坐標表示單位時間、單位面積某波長所放出之輻射能。任一曲綫下之面積，代表在該溫度時，所有不同波長所放出

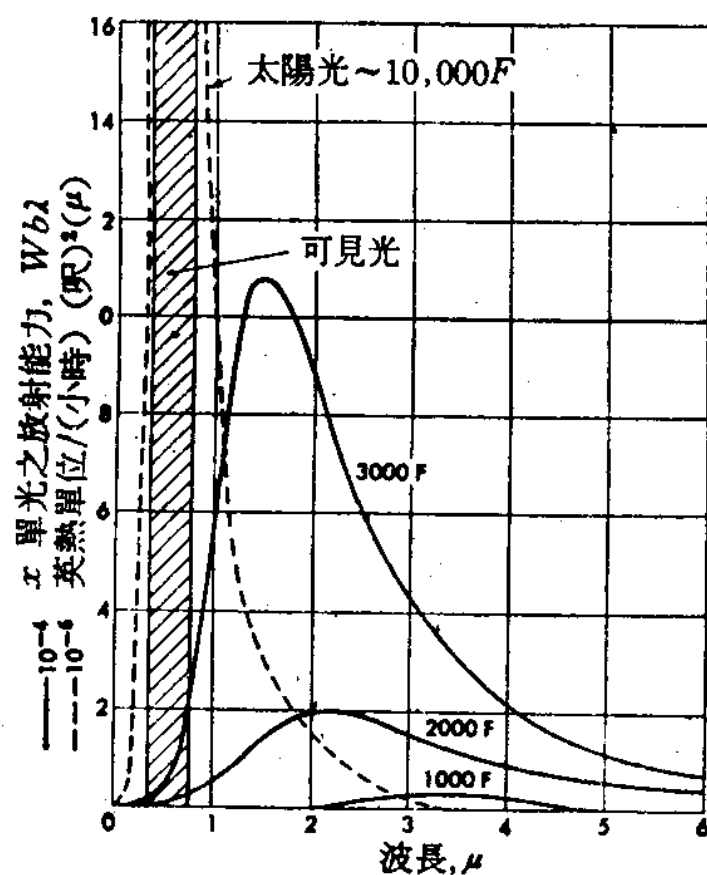


圖 14-1 理想放射體之放射能力與波長關係圖

之總輻射能。

當輻射能射至某物體時，可部份被吸收，部份被反射，部份會穿透過去，如圖(14-2)所示。

一物體對於輻射能之吸收、反射及穿透之關係如下：

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \dots\dots\dots$$

……(14-1) 圖 14-2 輻射能之吸收、反射和穿透

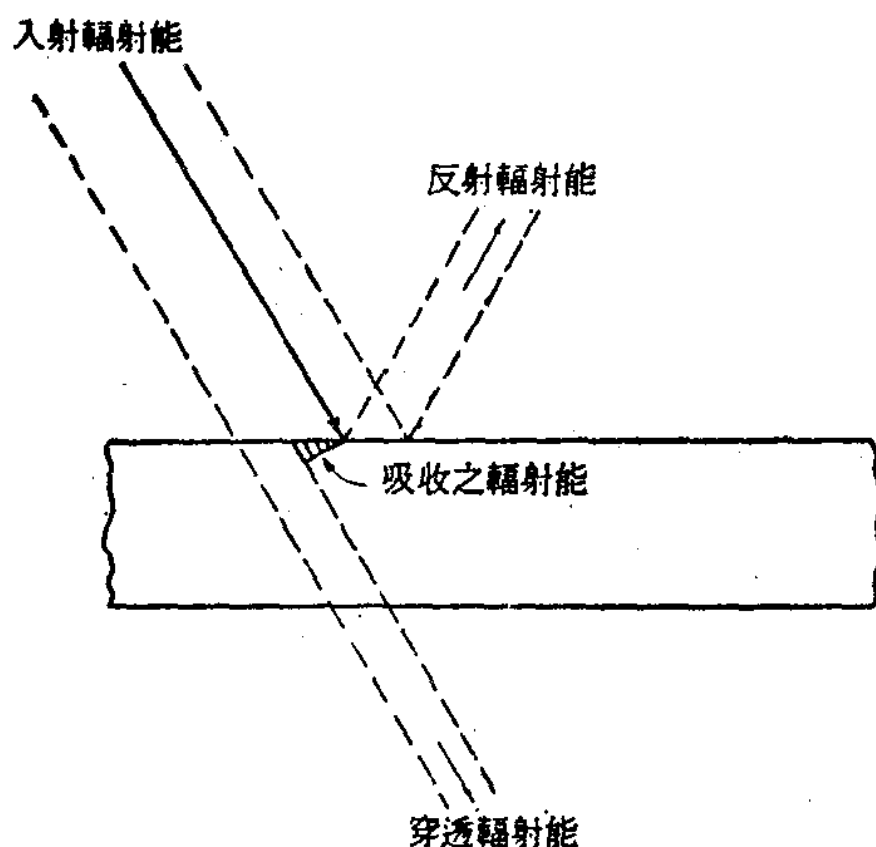
式中 α = 吸收係數 (absorptivity) = 入射輻能中，吸收部份之分率。

ρ = 反射係數 (reflectivity) = 入射輻能中，反射部份之分率。

τ = 穿透係數 (transmissivity) = 入射輻能中，穿透部份之分率。

當某物體之吸收係數為 1 時，稱之為黑體 (black body)。若某物體之穿透係數為零時，稱為不透明物體 (opaque body)。若吸收係數不隨波長而改變，則稱為灰體 (gray body)，灰體之表面稱為灰面 (gray surface)。

物體吸收輻射能量，通常在物體表面發生，再將所吸收之能量經由熱傳導傳至物體內部，一般吸收係數會隨波長之不同而異。



14-2 輻射之基本定律

有關熱輻射之幾個基本定律說明如下：

1. 史蒂芬—波茲曼定律

黑體之總放射能力和絕對溫度之四次方成正比，稱為史蒂芬一波茲曼 (Stefan-Boltzmann law)，以式表之如下：

$$W_b = \sigma T^4 \quad \dots\dots\dots (14-2)$$

式中 σ = 史蒂芬一波茲曼 常數 = $0.1714 \times 10^{-8} \text{ Btu} / (\text{hr}) (\text{ft}^2) (^\circ R)^4$

T = 黑體之絕對溫度 ($^\circ R$)

W_b = 黑體之總放射能力 ($\text{Btu} / (\text{hr}) (\text{ft}^2)$)

根據 (14-2) 式，知黑體輻射能放射率與絕對溫度之四次方成正比：

$$q_r = \sigma A_1 T_1^4 \quad \dots\dots\dots (14-2a)$$

設有一溫度為 T_1 之黑體，其四周被另一溫度為 T_2 之黑體所包圍，則此二黑體皆按 (14-2a) 式放射能量，其淨熱輻射率為：

$$q_{r, \text{net}} = \sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4) \quad \dots\dots\dots (14-2b)$$

2 普朗克定律及位恩定律

由圖 (14-1) 可知，某波長之單色光，其放射能力與溫度及波長皆有關。普朗克 (Planck) 曾提出黑體單色光之放射能力與其波長之關係式，稱為普朗克定律 (Planck's law)。

$$W_{b\lambda} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{C_2/\lambda T} - 1} \quad \dots\dots\dots (14-3)$$

式中 $W_{b\lambda}$ = 波長為 λ 之單光之放射能力 ($\text{Btu} / (\text{hr}) (\text{ft}^2) (\mu)$)

λ = 單色光之波長 (μ)

T = 黑體絕對溫度 ($^\circ R$)

$$C_1 = 1.1870 \times 10^8 (Btu)(\mu)^4 / (ft)^2(hr)$$

$$C_2 = 2.5896 \times 10^4 (^\circ R)(\mu)$$

若將(14-3)式微分，並令其導函數 $dW_{\lambda} / d\lambda = 0$ ，則可求出 $\lambda_{max} T$ 之關係如下：

$$\lambda_{max} T = 5,215.6 (\mu)(^\circ R) \dots\dots\dots (14-4)$$

上式稱為位恩定律 (Wien's law)。

3. 哥西荷夫定律

物體所放射之輻射能，與溫度相等之黑體之輻射能之比值，稱為放射係數 (emissivity)，以 ϵ 表之。

假想於一真空密閉容器內，置有許多不能自行生熱之微小物體，若容器與外界隔熱，則經過一段時間後，器內每一小物體之溫度皆與密閉容器內部之表面溫度相等，亦即每一物體接受輻射能之速率等於由該物體放射出之輻射能之速率，則吾人謂此系統已達熱平衡 (thermal equilibrium)。

所有物體在熱平衡時，其放射係數與吸收係數相等，此即有名之哥西荷夫定律 (Kirchhoff's law)。某些物體之放射係數，見附錄(七)。

14-3 面間之輻射

由於絕大多數物體之溫度皆在絕對零度以上，任何物體皆會放射出輻射能。在兩個溫度不同的黑體之間，輻射能可彼此傳到對方，但其淨熱流，為由溫度較高之黑體傳到較冷之黑體。

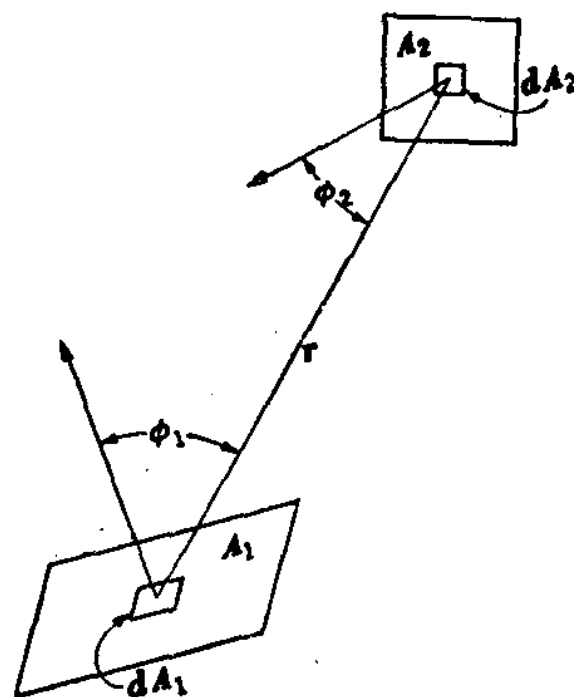


圖 14 - 3

1. 黑體之面間輻射：

現考慮兩黑體面間之熱輻射情形，如圖（14-3）所示。設有溫度分別為 T_1 與 T_2 之兩面 A_1 及 A_2 。爲了決定由 A_1 放射出之總能量中，到底有多少可以傳送到 A_2 ，首先應考慮兩個極小的面 dA_1 及 dA_2 。設其距離爲 r ，則由圖（14-3）可知 dA_2 這一微小的面所受到的熱能速率 dq_{12} 爲：

$$dq_{12} = I_{b1} \cos \phi_1 dA_1 d\omega_{12} \dots\dots\dots (14-5)$$

式中 $\cos \phi dA_1$ = 由 dA_2 上望去之 dA_1 之投影面積。

I_{b1} = dA_1 之輻射強度。

$d\omega_{12} = \cos \phi_2 dA_2 / r^2$ = 以 dA_1 爲中心， dA_2 對其之固體角（solid angle）。

（14-5）式亦可寫爲：

$$dq_{12} = \frac{I_{b1} dA_1 \cos \phi_1 dA_2 \cos \phi_2}{r^2} \dots\dots\dots (14-6)$$

（14-6）式中之 I_{b1} 可經由計算而得，其值如下：

$$I_{b1} = \frac{\sigma T_1^4}{\pi} \dots\dots\dots (14-7)$$

將（14-7）式代入（14-6）式，得：

$$dq_{12} = \frac{\sigma T_1^4 dA_1 \cos \phi_1 dA_2 \cos \phi_2}{\pi r^2} \dots\dots\dots (14-8)$$

同理可計算出：

$$dq_{21} = \frac{\sigma T_2^4 dA_1 \cos \phi_1 dA_2 \cos \phi_2}{\pi r^2} \dots\dots\dots (14-9)$$

(14-8) 式及 (14-9) 式經過積分，得

$$q_{12} = \sigma T_1^4 \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{dA_1 \cos \phi_1 dA_2 \cos \phi_2}{\pi r^2} \dots\dots (14-10)$$

$$q_{21} = \sigma T_2^4 \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{dA_1 \cos \phi_1 dA_2 \cos \phi_2}{\pi r^2} \dots\dots (14-11)$$

若令 $\int_{A_1} \int_{A_2} \frac{dA_1 \cos \phi_1 dA_2 \cos \phi_2}{\pi r^2} = A_1 F_{12} = A_2 F_{21} \dots\dots$

\dots\dots\dots (14-12)

將 (14-12) 式代入 (14-10) 及 (14-11) 兩式，得

$$q_{12} = \sigma A_1 F_{12} T_1^4 \dots\dots\dots (14-13)$$

$$q_{21} = \sigma A_2 F_{21} T_2^4 \dots\dots\dots (14-14)$$

式中 F_{12} = 以 A_1 為熱源之形狀因素 (configuration factor)。

F_{21} = 以 A_2 為熱源之形狀因素。

就物理意義而言， F_{12} 表示為由 A_1 所放射之總輻射能中， A_2 所能接受到之部份熱能； F_{21} 則為由 A_2 所放射之總輻射能中， A_1 所能接受到之部份熱能。

設 $T_1 > T_2$ ，則 A_1 與 A_2 兩黑體面間之淨熱輻射流率應為：

$$\begin{aligned} q_{12, net} &= \sigma T_1^4 A_1 F_{12} - \sigma T_2^4 A_2 F_{21} \\ &= \sigma T_1^4 A_1 F_{12} - \sigma T_2^4 A_1 F_{12} \\ &= \sigma A_1 F_{12} (T_1^4 - T_2^4) \dots\dots\dots (14-15) \end{aligned}$$

由(14-15)式可導出

$$q_{12,net} = -q_{21,net} \dots\dots\dots (14-16)$$

形狀因素若欲利用(14-12)式之面積分方式求得，將是非常的複雜，所幸，一些先前研究者，已完成了許多形狀因素之公式及圖表，供在不同之幾何排列下，求其形狀因素，圖(14-4)及圖(14-5)僅列出兩種較實用者，讀者若欲求取較複雜之形狀因素，可自行參閱Wiebelt 著“Engineering Radiation Heat Transfer”。

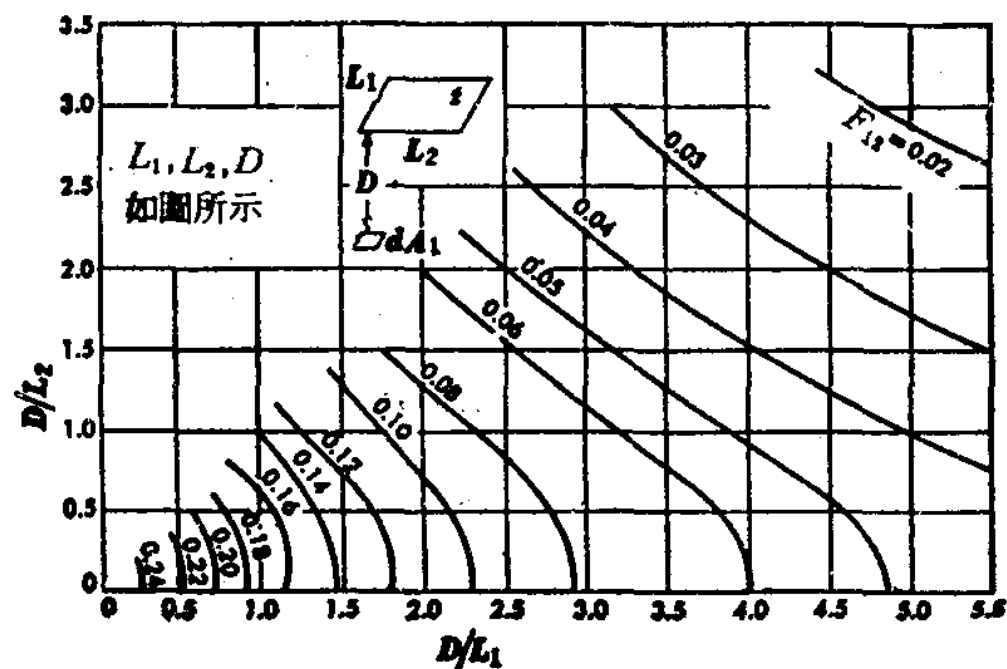


圖 14-4 兩平行長方形之形狀因素

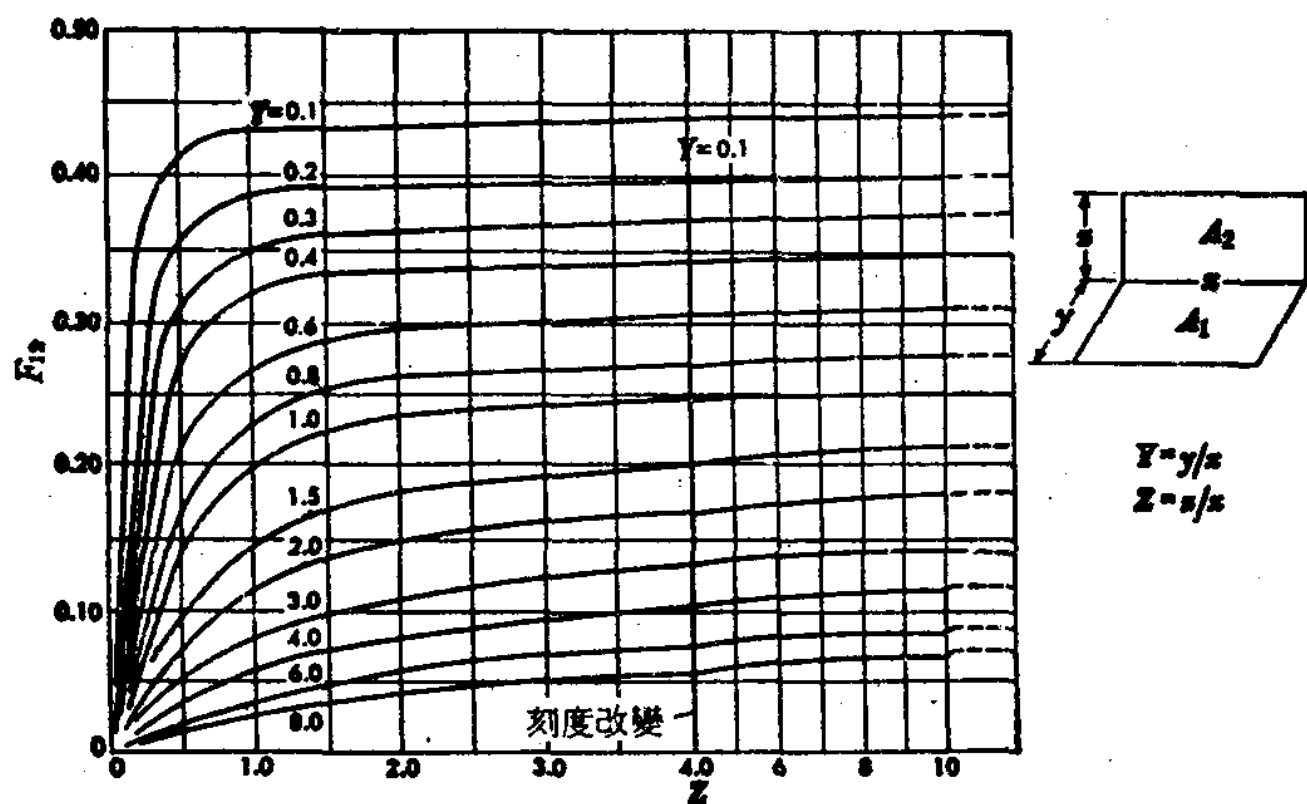


圖 14-5 兩垂直長方形之形狀因素

2 再輻射面

假若有一表面，以某速率吸收輻射能，同時將輻射能在相同之速率反射而出，則稱此表面為再輻射面 (reradiating surface)。例如，一火爐內之耐火磚面，除了具有面間之輻射外，尚有爐壁反射所引起之間接輻射，故為一再輻射面。

在某些熱傳系統裡，高溫面和低溫面皆靠一些耐熱物質連結，現在，我們來討論這些耐熱物質對於兩黑體面間輻射能之熱交換的影響。

首先假設耐熱物質放射及反射出之總輻射能，等於其所接受之輻射能。設有兩黑體面 A_1 及 A_2 ，其間由 R 之耐熱物質面所連接，因

$$q_{R,net} = 0, \quad \text{故}$$

$$\sigma A_1 F_{1R} (T_1^4 - T_R^4) = \sigma A_2 F_{2R} (T_R^4 - T_2^4) \dots\dots\dots (14-17)$$

$$\text{故} \quad T_R^4 = \frac{A_1 F_{1R} T_1^4 + A_2 F_{2R} T_2^4}{A_1 F_{1R} + A_2 F_{2R}} \dots\dots\dots (14-18)$$

$$\text{但} \quad q_{12} = \sigma A_1 F_{12} (T_1^4 - T_2^4) + \sigma A_1 F_{1R} (T_1^4 - T_R^4) \dots\dots\dots (14-19)$$

將 (14-18) 式代入 (14-19) 式，得

$$\begin{aligned} q_{12} &= \sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4) \left[F_{12} + \frac{1}{(1/F_{1R}) + (A_2/A_1 F_{2R})} \right] \\ &= \sigma A_1 \bar{F}_{12} (T_1^4 - T_2^4) \dots\dots\dots (14-20) \end{aligned}$$

$$\text{式中} \quad \bar{F}_{12} = F_{12} + \frac{1}{(1/F_{1R}) + (A_2/A_1 F_{2R})} \dots\dots\dots (14-21)$$

$\bar{F}_{12}$ 稱爲交換因素 (interchange factor)。

3. 灰面間之輻射

若爲非黑體面時，則其放射或吸收輻射能，無法達到最大限度，此時，其形狀因素或交換因素必須配合其放射率而成爲總交換因素 (overall interchange factor, $\mathcal{F}_{12}$)，則：

$$\begin{aligned} q_{12} &= \sigma A_1 \mathcal{F}_{12} (T_1^4 - T_2^4) \\ &= \sigma A_2 \mathcal{F}_{21} (T_1^4 - T_2^4) \dots\dots\dots (14-22) \end{aligned}$$

若 A_1 與 A_2 表面積較大，且其放射係數爲 ϵ_1 及 ϵ_2 ，則

$$\mathcal{F}_{12} = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} \dots\dots\dots (14-23)$$

若 A_1 面全部由 A_2 面包圍，而兩面均爲灰面，且其放射係數分別爲 ϵ_1 及 ϵ_2 ，則：

$$\mathcal{F}_{12} = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right)} \dots\dots\dots (14-25)$$

對於 A_1 面與 A_2 面間之輻射，兩面均爲灰體，其放射係數分別爲 ϵ_1 及 ϵ_2 ，則

$$\mathcal{F}_{12} = \frac{1}{\frac{1}{\bar{F}_{12}} + \left(\frac{1}{\epsilon_1} - 1 \right) + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right)} \dots\dots\dots (14-25)$$

14-4 輻射熱傳送係數

輻射熱傳送係數之定義如下：

$$h_r = \frac{q_r}{A_1 (T_1 - T_2')} \\ = \bar{F}_{12} \left\{ \frac{\sigma (T_1^4 - T_2'^4)}{T_1 - T_2'} \right\} \dots\dots\dots (14-26)$$

式中 $\bar{h}_r$ = 輻射熱傳送係數

$T_1 - T_2'$ = 某參考溫度差 ($^{\circ}F$)，其中 T_2' 可等於 T_2 ，也可以等於系統中之另一溫度。

如此定義 $\bar{h}_r$ 是因為熱流和溫度差成直線關係，故 $\bar{h}_r$ 之定義與熱傳導度或對流熱傳送係數相仿。

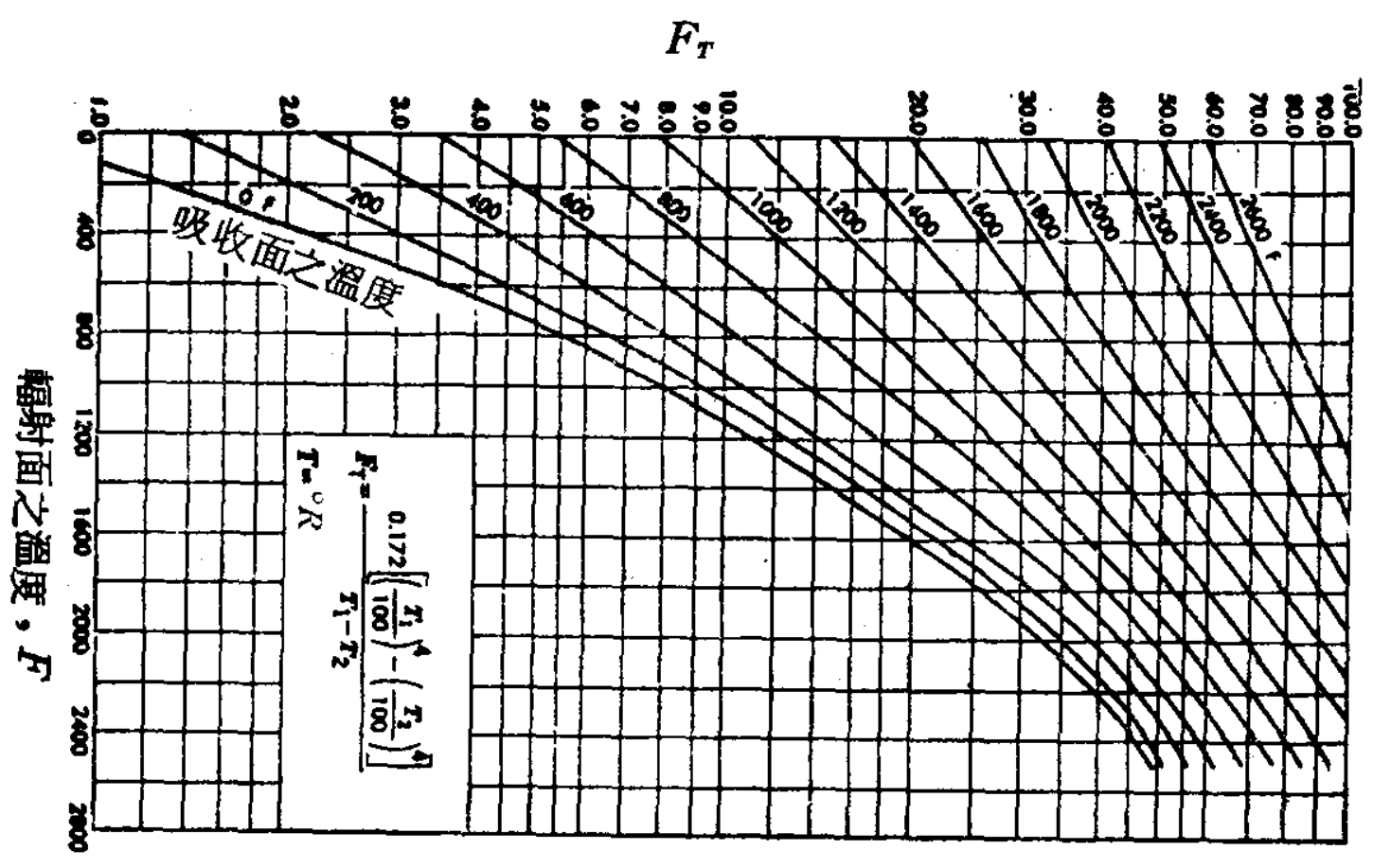
若 $T_2' = T_2$ ，則 (14-26) 式中之括號部份稱為溫度係數 (temperature factor) F_T ，即

$$F_T = \frac{\sigma (T_1^4 - T_2^4)}{T_1 - T_2} \dots\dots\dots (14-27)$$

故 $\bar{h}_r = \bar{F}_{12} F_T \dots\dots\dots (14-28)$

溫度係數和溫度之關係，如圖 (14-6) 所示。

圖 14-6 溫度係數與溫度之關係



14-5 氣體與火焰之輻射

氣體不會以連續光譜放出輻射能，此點與固體及液體不同。分子構造對稱者，如 O_2 或 N_2 等，既不吸收也不放出輻射熱。反之，若分子構造不對稱，或具有極性之氣體，如 CO_2 或水蒸氣等，則可吸收或放出部份之輻射能。而且，氣體吸收或放出輻射能，只在一些光譜波帶中進行。而波帶之寬度取決於溫度及壓力。對於不同之氣體，其波帶亦不同，圖(14-7)表示水蒸氣及 CO_2 之放射波帶。 CO_2 之放射波帶在 $\lambda = 2.36 \mu \sim 3.02 \mu$ ； $\lambda = 4.01 \mu \sim 4.80 \mu$ 及 $\lambda = 12.5 \sim 16.5 \mu$ 之間。而水蒸氣之放射波帶在 $\lambda = 2.24 \mu \sim 3.27 \mu$ ， $\lambda = 4.8 \sim 8.5 \mu$ 及 $\lambda = 12 \sim 25 \mu$ 之間。故知可見光譜($0.35 \mu \sim 0.78 \mu$)之輻射能，不在 CO_2 及水蒸氣之放射範圍。

從另一角度來看，固體之放射或吸收輻射能，主要是一種面間之現象，但對於氣體來說，其放射和吸收輻射能，除了和面有關之外，也和氣體層之厚度，壓力等有關。

假設 $I_{\lambda L}$ 為經過厚度 L 之氣體後之某特定波長之輻射強度， $I_{\lambda D}$ 為進入氣體前之同波長輻射強度，則有以下之關係：

$$I_{\lambda L} = I_{\lambda D} e^{-mL} \dots\dots\dots (14-29)$$

式中 m 為和氣體特性、分壓及波長有關之常數，由(14-29)式，

$$I_{\lambda_0} - I_{\lambda L} = I_{\lambda_0} (1 - e^{-mL}) \dots\dots\dots (14-30)$$

式中 $(1 - e^{-mL})$ 表示該氣體在波長 λ 下之吸收係數，以 $\alpha_{g\lambda}$ 表之， $\alpha_{g\lambda}$ 隨波長而異。圖(14-8)表示 CO_2 之 $\alpha_{g\lambda}$ 值與溫度之關係。