化学工程中之傳热问题

序　　言

自某溫度加熱或冷却成爲某一定溫度，或維持某一定溫度，殆爲一般工業所均必須，而在化學工業中爲尤甚。如何將此項加熱作用或冷却作用經濟的達到目的並控制之，使用何種器械，此項器械之大小應如何，此等問題之癥結所在，卽爲熱之傳送問題。再者，一般工廠，除原料外均消費燃料，化學產品之製造成本中，燃料費用低者佔 5%，高者可達50%，原料之浪費，易於感覺；而燃料之浪費不易感覺，且理論上言，超過熱力學第一二定律所要求以外之熱之消費，均可隨科學之進步而逐漸減少，以致漸近於零。編者曾比較位於吾國及歐洲之兩工廠，製同一產品，而燃料之消費相差數倍之多，（原文載重慶出版之工程學報）此項對於製造成本上有極大關係之問題，每爲人所忽視。讀者中當不乏化學工廠之工程師，試各就本廠作一「熱之清算」(heat [illegible])，必可發現其中許多可節省之處。然如何節省，則又必應用傳熱之理論矣。

此項重要之問題，在一般化工原理中列爲「熱之傳送」一章。惟據余多年教學之經驗，無論採用何種教本，此區區一章之資料決不敷工廠中之應用。故編者以 Eucken-Jacob. Der Chemie Ingenieur Bd. I, II. Teil 爲主要參考，以 Walker, Lewis, Mcadams, Gilliland 之化工原理爲骨架，纂成此書，起草於陝西，成稿於重慶，付梓於臺灣，蓋五年矣。

書中若干重要公式，均經編者逐步衍導證明，俾讀者可得較深切之了解，且可明瞭處理類似問題時所應採取之手段。

本書主要供大學化工系學生及化工廠從業人員參考之需，而對機械冶金等工程人員亦有參考價值。蓋熱之傳送問題，固以在化學工廠中最為重要（極高溫，極低溫均用於化學工業）而其他工業，亦均不能離熱之問題也。

本書單位悉用公制，從吾國之制定也。名辭亦儘量依照教育部國立編譯館之規定。

古吳嚴演存序於臺北臺灣大學工學院

民國三十六年九月

啓：

本書由中國工程師學會臺灣分會印行，著者不收稿費，未抽版稅，除取若干本爲贈送友人之用外，不取任何報酬。售書所得之欵，均歸中國工程師學會臺灣分會所有。但此書以後版權，仍歸著者所有。

目　　錄

第二章 對 流

第一節 膜 係 數

第二節 不沸不凝之流體

第三節　冷凝中之氣體

第四節　沸騰之液體

第三章　幅　　射

第一節　固體流體之輻射

第二第　氣體之輻射與吸收

圖一七〇

§1. 傳熱之各種方式

一般化學反應，均放出熱或吸收熱，並須維持一定溫度，故一般化學工程所用反應器，須可傳送熱量。其餘縱無化學反應之步驟，每亦仍須加熱或冷却。故熱之傳送之理論，有研究之必要。

熱之傳送，有三種方式

1. 傳導；熱自物體之一部傳至他部，或自甲物體傳至與之接觸之乙物體，而物體之各粒子並未移動。

2. 對流；流體之一部與他部混和，因而熱亦隨之傳送。流體流動之原因，或乃由於風扇唧筒之力，或乃由於溫度不同而生之密度差異。

3. 幅射；熱物體向四週放射能量，能量接觸另一物體，則一部分反射，一部分透過，其餘部分則吸收。吸收之能量，假設未發光亦未生化學反應之類，則均變為熱能。

第一章 傳導

第一節 基本定理

§2. 富理定律亦名牛頓定律(Fourier Law or Newton Law)

假設物體棒之一端熱，他端冷，四週加以保護使無熱損失，則熱必自一端傳至他端，同時溫度亦沿此方向降低。今以與熱流動方向垂直之斷面為 A，在 $d\theta$ 時間內，傳過 dQ 之熱，在此點之

溫度陡度 (Temperature gradient) 為 $\frac{dt}{dL}$, 則

$$\frac{dQ}{d\theta} = -k\,A\frac{dt}{dL} = -A\frac{1}{r}\frac{dt}{dL}\cdots\cdots\cdots(1)$$

Q 及 $\frac{dt}{dL}$ 為向量 (Vectors)。式中所以有負號者，因 t 必沿 L 而減小也。k 為物體之性質，稱為導熱度 (Thermal conductivity); r 稱為阻熱度 (Thermal resistivity)，k 之積次為熱單位/時間長度溫度；下列單位均所常用。

英熱單位/呎，小時，華氏度。 小卡/厘米，秒，攝氏度

大卡/米，小時，攝氏度。 小卡厘米/平方米，秒，攝氏度

如以 Q/θ 為瓦，(Watt) t 為攝氏度，A 為平方厘米，L 為米，則 r 之單位稱為熱歐姆 (Thermal ohm)。

自實驗結果，知凡無方向性之物體 (Isotropic substances)，k 僅受溫度之支配，與壓力之關係頗微 (嚴格言之，仍隨壓力而稍增)。又大多數物體 k 隨溫度之變化尚不甚大，一般 k 與 t 間之關係在實驗精度之範圍內，可用一次方程式示之。各種物體之導熱度，可極相懸殊，如銅比軟木大約1000倍。一定成分密度之混凝土，並非均一物體，而仍具一定之導熱度。又物體中少量雜質，或其中含空氣微孔，可以影響導熱度至鉅。關於導熱度之數字，見附錄。

(1) 式一般稱富理定律，而實則在富理 (Fourier) 發明之前已由皮亞 (Biot) 氏發現之也。

§ 3. 熱傳導之一般方程式

設有一物體，其各點溫度，時在變化之中，且其各點或若干

點同時發生熱；換言之本身爲熱源。今欲求任何點在任何時間之溫度。視物體之形狀選用適當座標；例如爲方形物，可選用直線座標 xyz。以極小固體 dx dy dz 而論，任何點自 x 方向傳入之熱，根據(1)式當爲 $dQ = -k\left(\frac{\partial t}{\partial x}\right) dy\ dz\ d\theta$

dQ 隨 x 而變。在 dx 間 dQ 之變化，當卽爲 dx 間所蓄或所發生之熱，卽

$$(dQ)r_1 = \frac{\partial}{\partial x} k\left(\frac{\partial t}{\partial x}\right) dy\ dz\ d\theta\ dx$$

同樣就 y 方向 z 方向言

$$(dQ)r_2 = \frac{\partial}{\partial y} k\left(\frac{\partial t}{\partial y}\right) dz\ dx\ d\theta\ dy$$

$$(dQ)r_3 = \frac{\partial}{\partial z} k\left(\frac{\partial t}{\partial z}\right) dy\ dx\ d\theta\ dz$$

物體本身可能爲熱源，在該點單位體積單位時間發生之熱爲 q (q 當然亦可爲負數)則 $d\theta$ 時間內發生之熱爲 $q\ d\theta$，此熱連同 $(dQ)r_1$ $(dQ)r_2$ 及 $(dQ)r_3$ 均用以昇高溫度。此小體積 (dxdy dz) 內物質，在 $d\theta$ 時間內昇高溫度 dt，其所需熱爲

$$dx\ dy\ dz\varrho\ C_v \frac{\partial t}{\partial \theta}\ d\theta$$

$$\therefore dx\ dy\ dz\ \varrho C_v\left(\frac{\partial t}{\partial \theta}\right) d\theta = q\,d\theta + dx\ dy\ dz\left(\frac{\partial}{\partial x} k \frac{\partial t}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} k \frac{\partial t}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} k \frac{\partial t}{\partial z}\right) d\theta$$

卽 $$\varrho C_v \frac{\partial t}{\partial \theta} = q + \frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial t}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial t}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial t}{\partial z}\right)$$ ……(2)

但 ϱ 爲密度，C_v 爲比熱。此卽熱傳導之一般方式也。

在一般情形下，物體中各點之 k 相同，故上式成爲

$$\frac{\partial t}{\partial \theta} = \frac{q}{\varrho C_v} + \frac{k}{\varrho C_v}\left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}\right)$$

$$= \frac{q}{\varrho C_v} + \alpha\left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}\right) \cdots\cdots\cdots\cdots (2')$$

其中 $\alpha=\frac{k}{\varrho C_v}$ ……………………(3)

α 稱擴熱係數 (Thermal diffusivity) 爲熱傳導問題中物體之重要常數。

§ 4. 熱傳導之各種情形

(1) 第一情形。任何點之溫度不因時間而變，即一定量之熱在物體內自一方傳至他方，熱雖傳過而各點之溫度不變。例如爐已熱至相當溫度後，自爐內壁傳至外壁之熱相等，爐壁溫度始終不變，傳入之熱來自熱力甚足之火焰，傳出之熱止於遼闊之大氣，兩者均不因熱之得失而異其溫度，故爐壁透過之熱亦不因時間而變。此種情形稱爲衡續狀況 (Steady state)。此時 t 與 θ 無關，即 $\frac{\partial t}{\partial\theta}=0$.

$$\therefore\ \frac{q}{\varrho C_v}+\alpha\left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 t}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 t}{\partial z^2}\right)=0 \cdots\cdots\cdots\cdots(4)$$

倘物體本身不發熱（如化學變化或電熱），亦不吸收熱（如化學變化等），則 $q=0$.

(2) 倘各點之溫度隨時間而變，則稱不衡續狀況 (unsteady state)。例如爐開始操作或操作已畢，逐漸冷却之時，均屬此情形。此中又分本身爲熱源 $(q\neq 0)$ 及本身非熱源 $(q=0)$ 之兩類。

第二節 衡續狀況之熱傳導問題

§ 5. 本身非熱源時之一般公式

此時單位時間內通過之熱量爲一定，$\frac{\partial Q}{\partial\theta}$ 可改成 Q/θ，即

$$\frac{Q}{\theta} = -kA\frac{dt}{dL} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (5)$$

即 $\frac{Q}{\theta}\frac{dL}{A} = -kdt$

$$\frac{Q}{\theta}\int_{L_1}^{L_2}\frac{dL}{A} = -\int_{t_1}^{t_2}kdt$$

物體之形狀已定，則式左首之積分可求出；k 與 t 之關係已知，則式右首之積分亦可求出。一般 k 與 t 間爲一次式關係，故

$$-\int_{t_1}^{t_2}kdt = k_{av}\ (t_1-t_2)$$

kav 爲平均溫度 $(t_1+t_2)/_2$ 下之導熱度，$\frac{dL}{A}$ 之積分一般可書成 $\frac{L_2-L_1}{Aav}$，其中 Aav 視物體之形狀而定。

故 $\frac{Q}{\theta}\ \frac{L_2-L_1}{Aav} = kav\ (t_1-t_2) \cdots\cdots\cdots\cdots (5')$

其中 $Aav = \dfrac{L_2-L_1}{\int_{L_1}^{L_2}\frac{dL}{A}} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (6)$

玆分別求數種形狀之物體之 Aav 値。

1.　倘熱經平板傳達，則 A 爲不變之數，故 Aav=A.

$$\frac{Q}{\theta} = \frac{kavA(t_1-t_2)}{L_2-L_1} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (7)$$

假設 k 不因溫度而變，則板中任何點 L 之溫度可自下式求出。

$$t = \frac{t_1-t_2}{L_2-L_1}\ L + \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (8)$$

故固體中溫度成直線的分佈。

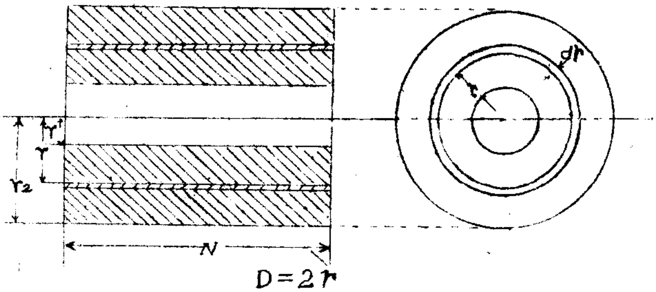
倘 k 與 t 爲一次式的關係，即

$$k = k_2 + a(t-t_2)$$

而 $Q/\theta = -[k_2+a(t-t_2)]A\frac{dt}{dL}$

積分之，並解 t, 得，

$$t = t_2 + \frac{k_2}{a}\left(\sqrt{1+\frac{2a}{k_2}\ \frac{Q}{\theta}\ \frac{L_2-L}{A}}-1\right) \cdots\cdots\cdots (8')$$



第 一 圖

2. 熱經圓柱體傳導(如一般之管件)

如第一圖，以半徑爲 r 處之 dr 厚之小圓而論，熱傳達之斷面積爲$2\pi rN$, (N 爲管長)故

$$\frac{r_2-r_1}{A_{av}}=\int_{r_1}^{r_2}\frac{dr}{A}=\int_{r_1}^{r_2}\frac{dr}{2\pi rN}=\frac{1}{2\pi N}\,\mathrm{Ln}\,\frac{r_2}{r_1}$$

即 $$A_{av}=\frac{2\pi N(r_2-r_1)}{\mathrm{Ln}\,\frac{r_2}{r_1}}=\frac{A_2-A_1}{\mathrm{Ln}\,\frac{A_2}{A_1}}\cdots\cdots\cdots\cdots(9)$$

亦可用直徑表示，即 $$D_{av}=\frac{D_2-D_1}{\mathrm{Ln}\,\frac{D_2}{D_1}}\cdots\cdots\cdots(9')$$

(9) (9′) 式算得之平均值，稱對數平均值(Logarithme mean)。以 $A_{l.m.}$ 及 $D_{l.m.}$ 示之。以下(10)式之值則稱算術平均值，以 a. m. 示之，

$$\left.\begin{aligned}A_{am}&=\frac{A_1+A_2}{2}\\ D_{am}&=\frac{D_1+D_2}{2}\end{aligned}\right\}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(10)$$

對數平均值與算術平均值之關係如次。

按 $$\mathrm{Ln}\,(1+x)=x+\frac{x_2}{2}+\frac{x_3}{3}+\cdots\cdots\cdots\cdots$$

$$\mathrm{Ln}\,(1-x)=x-\frac{x_2}{2}-\frac{x_3}{3}+\cdots\cdots\cdots\cdots$$

$$\frac{1}{2}\,\mathrm{Ln}\,\frac{1+x}{1-x}=x+\frac{x_3}{3}+\frac{x_5}{5}+\cdots\cdots\cdots\cdots$$

令 $\frac{1+x}{1-x}=\frac{A_2}{A_1}$ 則 $x=\frac{A_2/A_1-1}{A_2/A_1+1}$

$$\therefore \ \mathrm{Ln}\frac{A_2}{A_1}=2\left(\frac{A_2/A_1-1}{A_2/A_1+1}+\frac{1}{3}\left(\frac{A_2/A_1-1}{A_2/A_1+1}\right)^3+\cdots\cdots\right)$$

$$=2\ \frac{A_2-A_1}{A_2+A_1}\left(1+\frac{1}{3}\left(\frac{A_2/A_1-1}{A_2/A_1+1}\right)^2+\cdots\cdots\right)$$

$$\therefore \ \frac{A_2-A_1}{\mathrm{Ln}\frac{A_2}{A_1}}=\frac{A_1+A_2}{2}\left[\frac{1}{1+\frac{1}{3}\left(\frac{A_2/A_1-1}{A_2/A_1+1}\right)^2+\cdots\cdots}\right]\cdots\cdots(11)$$

可見對數平均值比算術平均值爲小，A/A_1 之值愈近 1. 則兩者之差別愈小。如 $A_2/A_1<1.5$，則 (11) 式右首括號內之值 >0.99，如 $A_2/A_1<3.2$，則括號內之值 >0.9，換言之，如 $A_2/A_1<1.5$ 時，用算術平均值以代對數平均值，其錯誤不及百分之一；如 $A^2/A_1<3.2$，則錯誤不及百分之十。復自 (11) 式可知倘 $A^2/A_1<1.02$，則以 A_1 或 A_2 代替對數平均值，錯誤不及百分之一，如 $A_2/A_1<1.24$，則以 A_1 或 A_2 代替之，錯誤不及百分之十。下表示對數平均值與算術平均值之比。

D^2/D_1	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4
對數平均值 / 算術平均值	1.000	0.999	0.997	0.994	0.990

1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.2
0.986	0.982	0.977	0.972	0.967	0.961	0.952
2.4	2.6	2.8	3.0	3.5	4.0	
0.940	0.930	0.920	0.910	0.886	0.866	

圓筒中任何點之溫度，如導熱度不因溫度而變，則可用下式示之；

$$t=(t_1-t_2)\ \frac{\ln\frac{D}{D_1}}{\ln\frac{D_2}{D_1}}+t_2\cdots\cdots\cdots\cdots(12)$$

即 t 與 lnD 間爲一次式之關係。