熱 傳 學 講 義

第　一　回

501015-1

社團法人 考友社 出版發行

501015-1

熱傳學講義第一回　目錄

第一講　緒論

❖ 命題重點 ❖

一、熱傳遞之基本概念

(一)熱傳遞 (heat transfer) 是一門預測物體間因爲溫度不同而造成能量傳遞的科學。熱力學告訴我們，這種傳遞的能量被定義爲熱 (heat)。熱傳遞的科學尋求的不僅是熱能如何傳遞，同時也預測在特定情況下熱交換的速率。事實上熱傳遞學和熱力學不同之處，在於強調熱傳遞速率爲所要探討的主題。熱力學處理的是平衡系統，它可用以預測一個系統，從一個平衡狀態變化至另一個平衡狀態時，所需能量的多寡。但是由於在變化過程中系統不是處於平衡狀態，所以它不能預測所發生的變化會有多快。熱傳遞藉著可以用來確立能量傳遞速率的其他經驗公式，以補充熱力學第一和第二定律的不足。就如同在熱力學中一般，此種做爲熱傳遞基礎的經驗公式相當簡單，可以很容易擴充應用於各種不同的實際狀況。

(二)以熱力學和熱傳遞所處理的問題種類不同爲例，考慮將一根熱鋼棒放置於一桶水中的冷卻情形。熱力學可以預測鋼棒和水最後的平衡溫度，但不能告訴我們達到平衡狀態需要多久，或在達到平衡狀態前某一特定時間鋼棒的溫度是多少。而熱傳遞卻可以預測鋼棒和水兩者的溫度和時間的函數關係。

二、傳導熱傳遞

當一物體內有溫度梯度 (temperature gradient) 存在時，經驗顯示能量會從高溫區傳到低溫區。此種能量的傳遞方式，我們稱爲傳導 (conduction)，且每單位面積之熱傳導速率 (heat transfer rate) 和法線溫度

梯度 (normal temperature gradient) 成正比：

$$\frac{q}{A} \sim \frac{\partial T}{\partial x}$$

代入比例常數後，可得

$$q = -kA\frac{\partial T}{\partial x} \qquad (式1)$$

上式中 q 是熱傳遞速率，$\partial T/\partial x$ 是熱流流動方向的溫度梯度。正値常數 k 稱爲材料的熱導性 (thermal conductivity)，加上負號是爲了滿足熱力學第二定律；亦即熱必須由高溫傳至低溫，如圖 1. 所示的座標系統。方程式 (式1) 稱爲熱傳導的傅利葉定律 (Fourier law)，以紀念法國數學物理學家約瑟夫．傅利葉 (Joseph Fourier)，他對於傳導熱傳遞的解析論述有重大的貢獻。値得注意的是方程式 (式1) 定義了導熱性 k，古典型的單位系統上，當熱流量用 W (watt) 表示時，k 的單位爲 W/m°C。

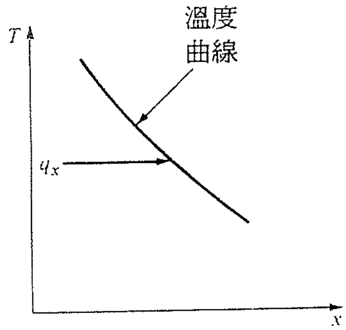

圖1. 熱流方向表示圖

以 (式1) 做爲起點，我們現在來決定支配固體中熱傳遞的基本方程式。

考慮如圖 2. 所示的一維系統，若該系統在穩定狀態下 (steady state)，即溫度不隨時間變化，則此問題就很簡單，我們只需將 (式1) 積分，然後代入適當數値即可求出熱傳量。然而若固體溫度隨時間變化，或在物體內存在有熱源 (heat sources) 或熱窩 (heat sinks)，情況將會更複

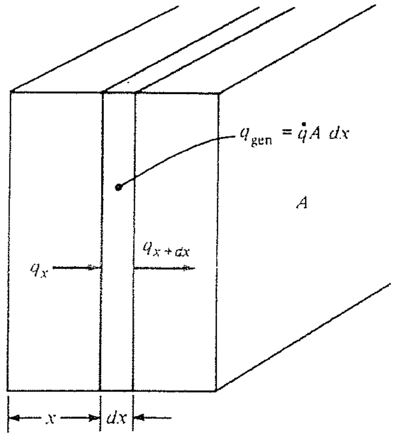

圖2. 一維熱傳導分析的體積元素

雜。我們首先考慮溫度可隨時間變化，且物體內有熱源存在的一般情況。對於厚度爲 dx 的元素，可列出下列的能量平衡：

傳入左面的能量＋元素內所產生的能量＝內能的改變量＋傳出右面的能量

這些能量分別以下列各式表示：

$$\text{傳入左面的能量} = q_x = -kA\frac{\partial T}{\partial x}$$

$$\text{元素內所產生的能量} = \dot{q}Adx$$

$$\text{內能的改變量} = \rho cA\frac{\partial T}{\partial \tau}dx$$

$$\text{傳出右面的能量} = q_{x+dx} = -kA\left.\frac{\partial T}{\partial x}\right]_{x+dx}$$

$$= -A\left[k\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right)dx\right]$$

上式中 $\dot{q}$ = 每單位體積所產生的能量，W/m^3

c = 材料比熱，$J/kg\cdot{}^\circ C$

ρ = 密度，kg/m^3

將上述關係式合併，可得

$$-kA\frac{\partial T}{\partial x}+\dot{q}Adx=\rho cA\frac{\partial T}{\partial \tau}dx-A\left[k\frac{\partial T}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right)dx\right]$$

或
$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\dot{q}=\rho c\frac{\partial T}{\partial \tau} \qquad \text{（式2）}$$

這是一維熱傳導方式，對於處理多於一組的熱流動時，我們僅需考慮如圖3-(a)所示單位體積內三個座標方向熱傳導量的傳入與傳出。由能量平衡式得到

$$q_x+q_y+q_z+q_{\text{gen}}=q_{x+dx}+q_{y+dy}+q_{z+dz}+\frac{dE}{d\tau}$$

其中各項能量爲

$$q_x=-k\,dy\,dz\frac{\partial T}{\partial x}$$

$$q_{x+dx}=-\left[k\frac{\partial T}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right)dx\right]dy\,dz$$

$$q_y=-k\,dx\,dz\frac{\partial T}{\partial y}$$

$$q_{y+dy}=-\left[k\frac{\partial T}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial T}{\partial y}\right)dy\right]dx\,dz$$

$$q_z=-k\,dx\,dy\frac{\partial T}{\partial z}$$

$$q_{z+dz}=-\left[k\frac{\partial T}{\partial z}+\frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right)dz\right]dx\,dy$$

$$q_{gen}=\dot{q}\,dx\,dy\,dz$$

$$\frac{dE}{d\tau}=\rho c\,dx\,dy\,dz\frac{\partial T}{\partial \tau}$$

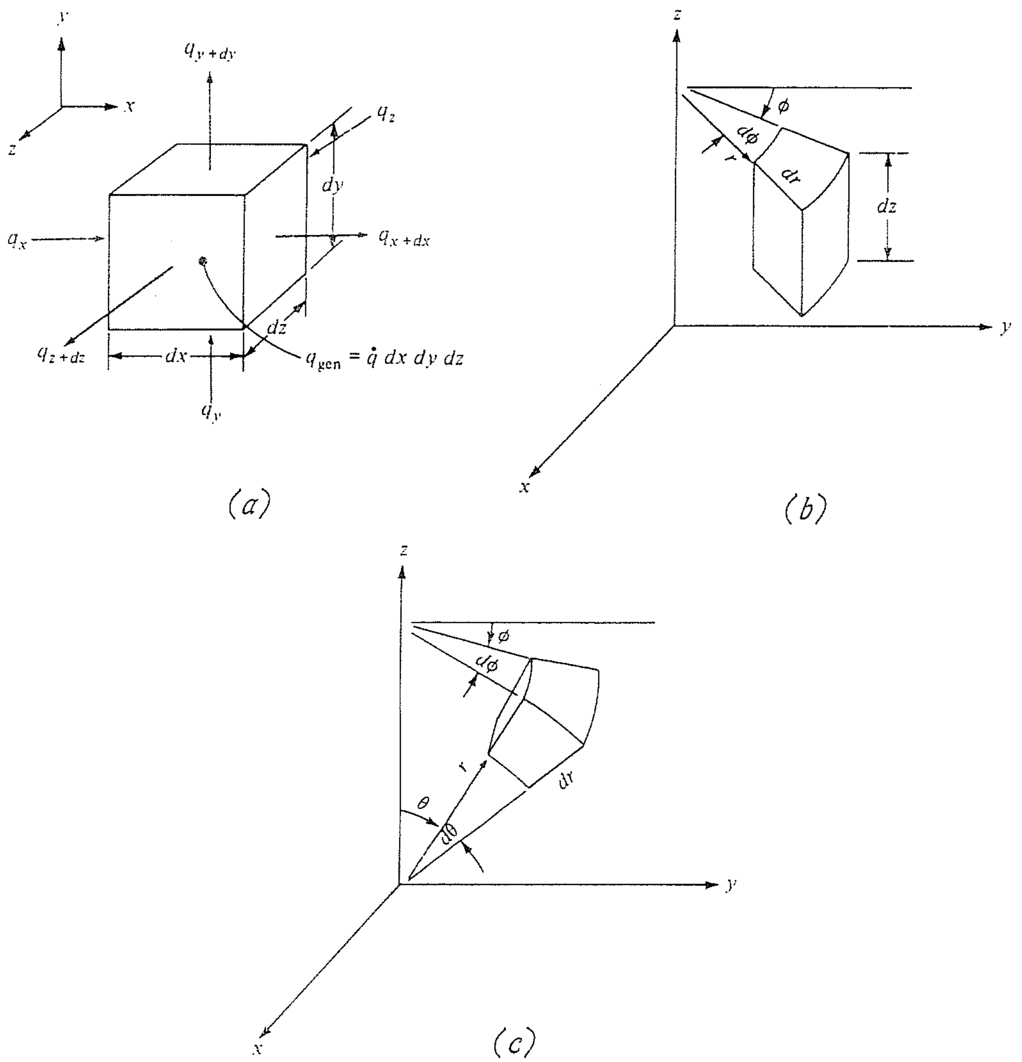

圖3. 三維熱傳導分析的體積元素：

(a)直角座標；(b)圓柱座標；(c)球座標

因此三維熱傳導的通式為

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right)+\dot{q}=\rho c\frac{\partial T}{\partial \tau} \qquad \text{（式3）}$$

當熱導性為常數，則（式3）可寫為

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}+\frac{\dot{q}}{k}=\frac{1}{\alpha}\frac{\partial T}{\partial \tau} \qquad \text{（式3–a）}$$

上式中 $\alpha = k/\rho c$ 稱爲材料的熱擴散率 (thermal diffusivity)。α 値愈大，經由材料的熱擴散也愈快。這可由檢視構成 α 的各個量看出。α 値大時，可能由於材料有高的導熱性，它表示有較快的熱傳遞速率；或者由於低的熱容量 (heat capacity) ρc，低的熱容量表示熱能通過材料時，只有少量被吸收用以升高材料的溫度，因此有更多的能量被傳遞過去。熱擴散率 α 的單位爲 m^2/s。

在以上的推導中，在 $x+dx$ 處的微分項利用泰勒級數展開式，但僅保留此級數的前兩項。

利用微積分技巧，（式3–a）可轉換成圓柱座標或球座標，其結果如下：

圓柱座標：

$$\frac{\partial^2 T}{\partial \gamma^2}+\frac{1}{\gamma}\frac{\partial T}{\partial \gamma}+\frac{1}{\gamma^2}\frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}+\frac{\dot{q}}{k}=\frac{1}{\alpha}\frac{\partial T}{\partial \tau} \qquad \text{（式3–b）}$$

球座標：

$$\frac{1}{\gamma}\frac{\partial^2}{\partial \gamma^2}(\gamma T)+\frac{1}{\gamma^2 \sin\theta}\frac{\partial}{\partial \theta}\left(\sin\theta \frac{\partial T}{\partial \theta}\right)+\frac{1}{\gamma^2 \sin^2\theta}\frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2}+\frac{\dot{q}}{k}=\frac{1}{\alpha}\frac{\partial T}{\partial \tau}$$

（式3–c）

用於（式3–b）及（式3–c）的座標系統分別用圖 3–(b) 及圖 3–(c) 表示。

許多實際問題，僅是上面所列通式的特殊情形。在此列出幾種有實際情況的通式簡化式。

一維穩態熱流（無熱產生）：

$$\frac{d^2T}{dx^2}=0 \qquad \text{（式4）}$$

注意當 $q=$ 常數，此式和（式1）相同。

圓柱座標一維穩態熱流（無熱產生）：

$$\frac{d^2T}{dr^2}+\frac{1}{\gamma}\frac{dT}{dr}=0 \qquad \text{（式5）}$$

有熱源的一維穩態熱流：

$$\frac{d^2T}{dx^2}+\frac{\dot{q}}{k}=0 \qquad \text{（式6）}$$

無熱源的二維穩態熱流：

$$\frac{\partial^2T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2T}{\partial y^2}=0 \qquad \text{（式7）}$$

三、導熱性

（式1）用以定義導熱性，基於此定義，可經由實驗測量以決定各種不同材料的導熱性。對於適度低溫的氣體可用氣體動力理論（kinetic theory of gases) 加以解析，可準確地預測實驗觀察值。在某些情況下，也可用理論來預測固體和液體的導熱性，但一般而言，對於固體和液體，仍然存在著一些未解決的問題和觀念需要澄清。

氣體的熱傳導機構相當簡單。我們知道分子動能和溫度有關，因此，分子在高溫區比在低溫區有較高的速度。分子運動是連續而雜亂的，相互碰撞並交換能量和動量。不論在氣體中是否有溫度梯度存在，分子都具有此種雜亂的運動，當分子由高溫區移至低溫區，即將動能傳給系統中低溫部份，此乃藉著碰撞而將能量傳給低能量分子。

表 1. 列出許多材料特有的導熱性數值，以顯示與實際上相對大小的

階次 (order) 相符合。一般而言，導熱性和溫度有極密切的關係。

表/. 各種材料在 0°C 時的導熱性

材料	導熱性 k	
	W / m·°C	Btu / h · ft·°F
金屬：		
銀 (純)	410	237
銅 (純)	385	223
鋁 (純)	202	117
鎳 (純)	93	54
鐵 (純)	73	42
碳鋼，1% 碳	43	25
鉛 (純)	35	20.3
鎳鉻鋼 (18% 鉻 , 8% 鎳)	16.3	9.4
非金屬固體：		
碳，與軸平行	41.6	24
鎂	4.15	2.4
大理石	2.08 ～ 2.94	1.2 ～ 1.7
砂石	1.83	1.06
玻璃，窗用	0.78	0.45
楓或橡木	0.17	0.096
木屑	0.059	0.034
玻璃纖維	0.038	0.022
液體：		
水銀	8.21	4.74
水	0.556	0.327
氨	0.540	0.312
潤滑油 , SAE 50	0.147	0.085
氟 12 , CCl_2F_2	0.073	0.042
氣體：		
氫	0.175	0.101
氦	0.141	0.081
空氣	0.024	0.0139
水蒸氣 (飽和)	0.0206	0.0119
二氧化碳	0.0146	0.00844

我們知道當熱流以瓦特 (W) 表示時，導熱性的單位爲 W / m·°C。需要注意的是，導熱性包括熱傳遞速率，而其大小乃表示熱流通過該材料的快慢。在以上討論的分子模式中，熱傳遞速率將如何計算？很顯然的，分子移動愈快，其傳遞能量也愈快，因此氣體的導熱性隨溫度而定。利用簡化的解析，顯示出氣體的導熱性隨絕對溫度的平方根而變。(氣體的聲速是隨絕對溫度的平方根而變；而音速大約等於分子的平均速度。) 若干典型氣體的導熱性如圖 4. 所示。 在適當的壓力下，大多數氣體的導熱性

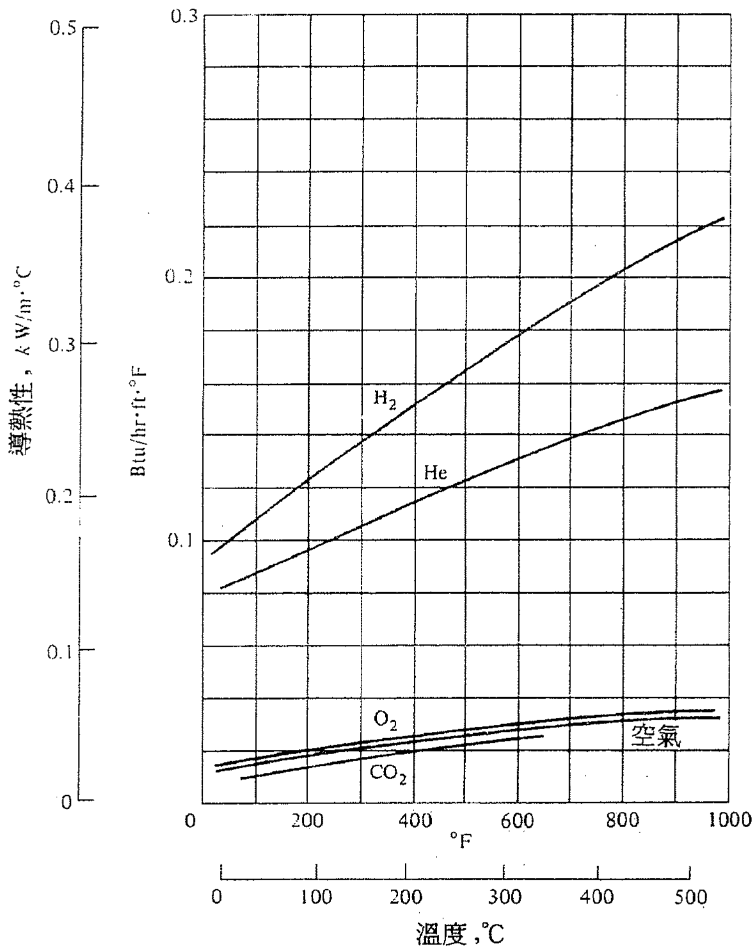

圖4. 若干典型氣體的導熱性 [1 W / m·°C = 0.5779 Btu / h · ft·°F]