

熱傳學理論 與詳例

HEAT TRANSFER

DONALD R. PITTS 著
LEIGHTON E. SISSOM

陳昭昌 編譯

復文書局

熱傳學理論與詳例
HEAT TRANSFER

DONALD R. PITTS 著
LEIGHTON E. SISSOM

陳昭昌 編譯

復文書局

熱傳學理論與詳例

著作權執照台內著字第 號

版權所有



翻印必究

中華民國七十二年元月初版發行

平裝特價200元 精裝特價240元

著者： DONALD R. PITTS
LEIGHTON E. SISSOM

編譯者： 陳 昭 昌

發行者： 吳 主 和

發行所： 復 文 書 局

地址：臺南市東門路421巷28號

門市部地址：台南市林森路二段 63 號

電話：(062)370003 · 386937

郵政劃撥帳戶 32104號

No.28. LANE421 DONG-MEN
ROAD TAINAN TAIWAN REPUBLIC
OF CHINA

TEL:(062)370003 · 386937

本書局經行政院新聞局核准登記發給
出版事業登記證局版台業字第0370號

原 序

“熱傳學”這一個論題，所研討的範圍極為廣泛，除了傳導，對流以及輻射等問題的處理外，它也常概括了包含相變化與應用於熱交換器的設計等方面，某些人把熱傳學的研究重心放在熱傳輸率方程式的數學導出上，而另一些人卻把焦點集中在憑經驗收集得來的方程式應用能力上，本書中，我們盡力在兩極端論點中，尋求並達成一個折衷結論，相信此一成果，必對讀者有所助益。

本書一般的處理方式，是在每一章節中，儘量對所介紹的熱傳論題，給予清晰的定義。而在導出支配方程式（Governing equation）時，則特別注意熱力學第一定律應用至適當的控制體積的正確應用，並進而指出完整的邊界條件及初始條件（導出的程序，大部份列於詳解的例題中，而在說明部份，則僅列出結果）。且在重要關係式之前，均標以■符號，以提醒讀者注意。

每一章亦包含了許多已解答的問題，約有百分之六十採用英制單位，其餘則以國際單位（SI）為準，許多導出的式子也包括在這些已解答的問題中，另外，附有答案的補充問題，則提供做為此章複習之用。

本書特為補充通行教科書之不足，以及做為大三、大四學生在熱傳研究上之用而寫，它不僅對所有研究此一論題的機械，物理系學生有所裨益，對於那些工作包括熱傳計算的執行工程師與科學家們亦有所助益，每一主要論題均較大部份單項科目擁有更多的材料。

D.R. PITTS
L.E. SISSOM

熱傳學理論與詳例 / 目 次

第一章 導 論	1
§ 1.1 傳導熱傳遞	1
§ 1.2 對流熱傳遞	2
§ 1.3 輻射熱傳遞	3
§ 1.4 材料的性質	3
§ 1.5 單位	8
第二章 穩定狀態下一因次熱傳導	22
§ 2.1 緒論	22
§ 2.2 熱傳導能量方程式	22
§ 2.3 平面壁：具有固定的表面溫度	25
§ 2.4 徑向系統：固定的表面溫度	27
§ 2.5 平面壁：熱傳導系數不為定值	28
§ 2.6 具有熱源的系統	29
§ 2.7 對流邊界條件	33
§ 2.8 散熱片的熱傳	37
第三章 穩定狀態下多因次熱傳導	88
§ 3.1 緒論	88
§ 3.2 分析解	88
§ 3.3 傳導的形狀因子	94
§ 3.4 數值分析	97

第四章 非穩定狀態熱傳導.....129

§ 4.1	緒論.....	129
§ 4.2	變數分離法.....	129
§ 4.3	倍爾特與富利葉模數.....	137
§ 4.4	成團熱容分析.....	139
§ 4.5	壹因次系統：固定的表面溫度.....	140
§ 4.6	壹因次系統：具對流邊界狀況.....	142
§ 4.7	利用圖表求解，具對流邊界狀況.....	145
§ 4.8	多因次系統.....	151
§ 4.9	數值分析.....	152

第五章 流體力學.....187

§ 5.1	流體靜力學.....	187
§ 5.2	流體動力學.....	188
§ 5.3	質量不減.....	194
§ 5.4	沿流線的運動方程式.....	195
§ 5.5	能量不減.....	196

第六章 強迫對流：層流.....217

§ 6.1	液動（等溫）邊界層：平板.....	217
§ 6.2	熱邊界層：平板.....	225
§ 6.3	等溫管流.....	231
§ 6.4	管內層流的熱傳遞.....	234

第七章 強迫對流：擾流.....268

§ 7.1	運動方程式.....	268
§ 7.2	熱傳與表皮磨擦：雷諾類比.....	272
§ 7.3	流經平板之流體流.....	273

§ 7.4	管內之流體流動	277
§ 7.5	流過沈體的流體流	285
§ 7.6	液態金屬的熱傳遞	292
第八章	自然對流	365
§ 8.1	垂直平板上的自由對流熱傳遞	330
§ 8.2	實驗校正：等溫表面	339
§ 8.3	封閉空間的自中對流	339
§ 8.4	自由對流與強制對流相伴發生的情況	346
第九章	沸騰與凝結	367
§ 9.1	沸騰現象	367
§ 9.2	池沸騰	369
§ 9.3	流動（對流）沸騰	375
§ 9.4	凝結	378
第十章	熱交換器	405
§ 10.1	熱交換器的型式	405
§ 10.2	熱交換器的計算	407
§ 10.3	熱交換器的效率（NTV法）	413
§ 10.4	積垢因子	418
第十一章	輻射	439
§ 11.1	緒論	439
§ 11.2	性質定義	440
§ 11.3	黑體輻射	443
§ 11.4	真實表面及灰體	445
§ 11.5	輻射交換：黑表面	451
§ 11.6	輻射交換：灰表面	461

§ 11.7	求出延伸表面的形狀因素：霍特氏交叉弦法·····	467
§ 11.8	輻射屏·····	468
§ 11.9	氣體及蒸汽的輻射·····	471
附 錄 A	·····	500
附 錄 B	·····	503
附 錄 C	·····	521

第一章 導論

通常我們所說的熱學係包含熱力學與熱傳學二大學門，熱力學僅考慮在平衡狀態下的系統，而熱傳學則可預測能量傳遞率，以彌補熱力學的不足。

熱傳送的基本方式有三：即傳導、對流及輻射。

§1.1 傳導熱傳遞

當物體內有溫度梯度存在時，將會產生能量傳遞，且可用下式表之：

$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial n} \quad (1.1)$$

式中 $\frac{\partial T}{\partial n}$ 為垂直面積 A 的方向之溫度梯度，而常數 k 則稱為熱傳導係數 (Conductivity)，其值可由實驗測定之，它與某些性質有關，諸如溫度、壓力等，將在 1.4 節內再予討論， k 的單位為 Btu/hr-ft-°F 或 W/m-K (請參閱 1.5 節)。

傅立葉定律 (1.1) 中的負號，乃用以滿足熱力學第二定律：即熱須由高溫處傳至低溫處 (此種熱能傳送，係因溫度梯度所致。)

若介質內的溫度分佈是線性的，(圖 1.1)，則溫度梯度可用下式表之：

$$\frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{T_2 - T_1}{x_2 - x_1} \quad (1.2)$$

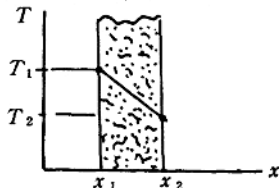


圖 1.1

2 熱傳學理論與詳例

此種線性式，經常存在於具有恆定 k 值的均勻介質中（具穩態熱傳遞）。

當穩態熱傳遞（Steady-State Transfer）發生時，則在物體內（包括物體表面）之每一點的溫度，均與時間無關，若溫度隨時間而異，則能量將貯存於物體內或由物體內傳出，能量貯存率（Storage Rate）可用下式表之：

$$q = mc_p \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1.3)$$

式中質量 m 為體積 V 與密度 ρ 之乘積。

§1.2 對流熱傳遞

若將一固體置於流動流體內，且流體與固體溫度不同，則將有能量傳遞存在，此種傳遞方式，謂之對流。

若流體的上流溫度（Upstream Temperature）為 T_∞ ，而固體的表面溫度為 T_s ，則單位時間的熱傳遞方程式為：

$$q = h A (T_s - T_\infty) \quad (1.4)$$

此即著名的牛頓冷卻定律，由此方程式，我們可定義對流熱傳遞係數 h ，它係單位時間，單位面積的熱傳值與總溫差（Overall Temperature Difference）之間的比例常數，其單位為 $\text{Btu/hr} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}$ 或 $\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{K}$ 。此外，必需記住，固體一流體界面間的熱傳遞方式為傳導。首先，高溫物體將熱傳至接觸到的流體粒子，而使流體溫度上升，然後，流體粒子將移動至較低溫區，並與之混合，而將部分能量傳給其他的流體粒子。試比較（1.1）與（1.4）式，則得

$$h A (T_s - T_\infty) = -k A \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (1.5)$$

事實上，對流亦是一種能量傳輸的過程，它含有流體之能量貯存，熱傳導現象及流體分子間之混合運動等三種現象。

一般把對流熱傳區分為自然對流及強制對流二種，若流體之混合運動僅僅是由於溫度梯度的存在，而產生密度變化，最後導致流體的運動者，謂之自然對流，而當流體的運動是由外力所引起者，諸如泵，風扇等，則此種程序謂之強迫對流。

§1.3 輻射熱傳遞

在傳導與對流的機構中，能量經由材料傳遞，但熱也可傳播到完全真空的區域，在此種情形下的機構，是為電磁輻射 (Electro magnetic Radiation)，而此種由溫度梯度所造成的電磁波傳遞，謂之熱輻射。由實驗的證據顯示，輻射熱傳將與絕對溫度的四次方成正比，而熱傳導與熱對流，則正比於線性溫度差 (Linear Temperature Difference)。

著名的史蒂芬一波茲曼定律，以式表之如次：

$$q = \sigma AT^4 \quad (1.6)$$

式中 T 為絕對溫度，而常數 σ 值則與表面狀況，介質和溫度無關，其值為 $0.1714 \times 10^{-8} \text{ Btu/hr-ft}^2 \cdot ^\circ\text{R}^4$ 或 $5.6697 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{K}^4$ 。

若放射出的輻射能以 (1.6) 式表之，則此種物體，謂之理想放射體，或稱黑體，而非黑體的其他表面，其放射的能量將小於此值（同溫時），而可用下列表之

$$q = \epsilon \sigma AT^4 \quad (1.7)$$

式中 ϵ 值，謂之表面放射係數 (Emissivity)，其值由 0 至 1。

§1.4 材料的性質

固體的熱傳導係數

4 熱傳學理論與詳例

各種純金屬和合金的熱傳導係數值，請參閱附錄B. 中的表B-1。已知成份金屬的固相之熱傳導係數值主要與溫度有關。若所考慮的溫度範圍不大，則熱傳導係數隨溫度的變化，將可忽略，但若系統內的溫差很大，足以影響熱傳導係數時，則溫度的影響，須被計及。

在寬廣的溫度範圍內，金屬的熱傳導係數，可以下式表之

$$k = k_0 (1 + b\theta + c\theta^2) \quad (1.8)$$

式中 $\theta = T - T_{ref}$ ， k_0 為在參考溫度 T_{ref} 時之熱傳導係數。

許多的工程應用，其溫度域是很小的，通常僅有數百度，故熱傳導係數可用下式表之

$$k = k_0 (1 + b\theta) \quad (1.9)$$

一些非均質材料 (Nonhomogeneous Material) 的熱傳導係數，明顯地與虛容積密度 (Apparent Bulk Density) 有關 (虛容積密度為物質的質量除以物質佔據的總體積)，此總體積包括空隙體積 (Void Volume)，諸如材料內的氣袋。此類材料之熱傳導係數亦隨溫度變化而變化。一般而言，非均質材料的 k 值隨溫度和虛容積密度的增加而增加。表B-2列舉一些非均質材料的熱傳導係數，以供參考。液體的熱傳導係數。

表B-3列舉一些工程上較重要液體的熱傳導係數值，這些液體的 k 值，將與溫度有關，而與壓力無關，表B-3的 k 值是處於飽和狀態時的值，大部份液體的熱傳導係數是隨溫度之升高而降低，水是此規則的例外情形，其值在溫度 300 °F 以下時，是隨溫度上升而增加，而當溫度高於 300 °F 時， k 值將隨溫度之升高而降低，除了液態金屬以外，水是所有液體中，具有最高熱傳導係數者。

氣體的熱傳導係數

氣體的熱傳導係數隨溫度之升高而升高，而若壓力接近於大氣壓時，則其 k 值與壓力無關。表B-4列舉一些氣體的 k 值 (在大氣壓時)，若在高壓力時，則 k 值將受壓力的影響。圖B-3 (附錄B)

為氣體在高壓時，熱傳導係數的約略值圖。

工程上最常用之二種重要氣體為空氣和蒸汽 (Steam)，就空氣而言，表 B - 4 所列舉的一些數值，在下列的應用範圍內是適當的 i) $32^{\circ}\text{F} \leq T \leq 3000^{\circ}\text{F}$ 且 $1 \text{ atm} \leq p \leq 100 \text{ atm}$ ii) $-100^{\circ}\text{F} \leq T \leq 32^{\circ}\text{F}$ 且 $1 \text{ atm} \leq p \leq 10 \text{ atm}$ ，圖 B - 3 不可應用於空氣，因將產生大的誤差 (過度校正)。

蒸汽的熱傳導係數值顯示出其與壓力的相關性，由表 B - 4 與圖 B - 3 聯合使用，可得熱傳導係數的估計值。

密度

密度可定義為單位體積的質量。通常，我們考慮連續體的概念，即物質的連續分佈區域，若所討論的系統具有不同的密度，則我們可定義任一點 (某一特定位置) 的密度為

$$\rho \equiv \lim_{\delta V \rightarrow \delta V_c} \frac{\delta m}{\delta V} \quad (1.10)$$

式中 δV_c 可認為是連續體的最小界限 (最小體積)。

大部份的固體和液體，其密度僅受溫度變化的輕微影響，而壓力在 100 大氣壓以下時，密度受壓力的影響可予忽略。固體和液體的密度值列舉於表 B - 1，B - 2，及 B - 3。而氣體的密度，則不僅與溫度有關，亦與壓力有關，若缺乏特定的氣體數據 (Specific Gas Data) 時，則可應用理想氣體定律，將表 B - 4 之值做如下的修正

$$\rho = \rho_1 \left(\frac{p}{p_1} \right) \quad (1.11)$$

比容為密度的導數

$$v = \frac{1}{\rho} \quad (1.12)$$

比重 (Specific Gravity) 則為物質的密度與 4°C 及 1 大氣

壓 (760 mm Hg) 下純水的密度之比值，故

$$S = \frac{\rho}{\rho_w} \quad (1.13)$$

式中 S 是比重。

比熱

物質的比熱為其貯存能隨溫度變化的一種量度，由熱力學的觀點而言，有二種比較重要的比熱，列之如下：

$$\text{定容比熱：} \quad c_v = \left. \frac{\partial u}{\partial T} \right|_v \quad (1.14)$$

$$\text{定壓比熱：} \quad c_p = \left. \frac{\partial h}{\partial T} \right|_p \quad (1.15)$$

式中 u 是單位質量的內能，而 h 是單位質量的焓。一般而言， u 與 h 分別為溫度與比容，溫度與壓力的函數，若物質為不可壓縮（固體或液體）時，則 c_p 與 c_v 具有相等的數值，若為氣體，則此二種比熱有相當的差異。 c_p 與 c_v 的單位是 Btu / lbm °F 或 J / kg - °K。

就固體而言，比熱值受溫度影響不大，而壓力對比熱值的影響更小，因此，在寬廣的溫度和壓力範圍內，使用表 B-1 與表 B-2 的 c_p 值，經常是可接受的。

液體的比熱受壓力的影響亦很小，而受溫度的影響則較顯著，液體的比熱值列於表 B-3。

溫度對氣體的比熱有相當的影響，而除了接近臨界狀態以外，壓力對比熱的影響是輕微的，且隨溫度的升高，壓力與比熱的相關性逐漸減少。表 B-4 所列舉的一些數值，對大部份的工程計算，若壓力小於 200 psia，則仍是適用的。

熱擴散度

熱傳學裏，經常用到一個有用的參數 α ，我們稱之為熱擴散度 (Thermal Diffusivity)，其定義如下

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (1.16)$$

由上式，可了解熱擴散度為熱傳導係數與材料的熱容量 (Thermal Capacity) 之比值，其單位為 ft^2/hr 或 m^2/sec ， α 值大時，表示

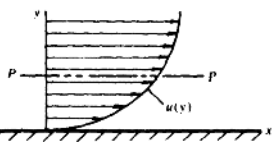


圖 1.2

經由材料的熱發散愈快，此可由方程式 (1.16) 即可了解，因 α 值大時 i) 材料可能有較高的熱傳導係數，此表示較快的熱傳遞率。或 ii) 材料具有較低的熱容量 ρc_p ，此意謂經由材料的能量，僅有較小部份為材料所吸收，而有更多的能量可做進一步的熱傳 (傳至其他物體或物體自身的其他部份)。

附錄 B 的一些表中，已列舉有若干物質的熱擴散度數據，值得注意的是，氣體的熱擴散度將受溫度及壓力的顯著影響，而附錄 B 所列與的一些數值，僅適用於大氣壓下的某特定溫度。

粘度

圖 1.2 為真實流 (具有粘度值的流體) 以層流的方式流經平板的示例，流層是以互相平行的方式滑動，而在鄰近壁的分層，則為靜止的，離開壁的次一層是沿著靜止層滑動著，而由於層與層間存在有磨擦剪力的關係，而使運動減緩，當離開壁面一段距離時，則由於壁的存在，而使流體運動減速的現象，將不再存在。

試考慮平面 $P-P$ ，在此層微下方的速度 $u - \delta u$ ，而在此流層稍上方的速度是 $u + \delta u$ ，此處，所談及的速度 u 是在 y 位置 ($P-P$ 平面) 處 x 方向的速度，由於二鄰接流層間速度的差異，而產生剪應力 τ ，牛頓假設此剪應力正比於垂直速度梯度，故我們可寫出粘度的定義方程式：

$$\tau = \mu_f \frac{du}{dy} \quad (1.17)$$

式中的比例係數 μ_f ，稱為動力粘度 (Dynamic Viscosity)，或稱絕對粘度 (Absolute Viscosity)。

黏度單位

方程式 (1.17) 中 μ_f 的單位是 $\text{lbf} \cdot \text{sec} / \text{ft}^2$ 或 $\text{N} \cdot \text{s} / \text{m}^2$ ，在許多應用上，動力黏度的單位用質量表示較之用力單位表示更為方便。本書中以 μ_m 表用質量單位的動力黏度。國際單位制 (SI) 中， μ_m 的單位是 $\text{kg} / \text{m} \cdot \text{s}$ ，且 μ_m 與 μ_f 的數值是相等的。而在英制工程系統中， μ_m 的單位是 $\text{lbm} / \text{ft} \cdot \text{sec}$ ，且 $\mu_m = (32.17) \mu_f$ (數值)。

就氣體和液體而言，動力黏度將受溫度的顯著影響，而壓力之影響則較微，一些數據列於表 B-3 和 B-4。

如同氣體的熱傳導係數，當壓力趨近臨界值或高於臨界值時，氣體的動力黏度是與壓力有關的。若缺乏高壓狀況下，氣體的黏度數據時，可使用圖 B-4 求之。無論如何，在大部份的工程問題上，空氣的 μ 值，可視為與壓力無關，而若使用如圖 B-4 以求黏度時，將因過度校正 (Overcorrect)，而有相當的誤差。

動力黏度對流體密度之比，我們稱之為動黏度 ν (Kinematic Viscosity)，即

$$\nu = \frac{\mu_m}{\rho} \quad (1.18)$$

ν 的單位是 ft^2 / sec 或 m^2 / s

※注意：不同於動力黏度，動黏度受壓力的影響是相當顯著的 (因為密度受壓力的變化而異)，表 B-4 僅適用於 1 大氣壓，若欲求在較高壓力下的數值時，必須做適當的修正。

§1.5 單位

表 1.1 列舉了一些經常使用的單位系統。在牛頓第二運動定律中， g_c 是比例常數。

表 1.1

單位系統	基本單位	導 出 單 位	比例常數 g_c
絕對公制 (Metric Absolute)	質量, g 長度, cm 時間, sec 溫度, °K	力: $\text{dyne} = \frac{\text{g} \cdot \text{cm}}{\text{sec}^2}$	$1 \frac{\text{g} \cdot \text{cm}}{\text{dyne} \cdot \text{sec}^2}$
絕對英制 (English Absolute)	質量, lb 長度, ft 時間, sec 溫度, °R	力: $\text{poundal} = \frac{\text{lbm} \cdot \text{ft}}{\text{sec}^2}$	$1 \frac{\text{lbm} \cdot \text{ft}}{\text{poundal} \cdot \text{sec}^2}$
英國技藝單位制 (British Technical)	力, lbf 長度, ft 時間, sec 溫度, °R	質量: $\text{slug} = \frac{\text{lbf} \cdot \text{sec}^2}{\text{ft}}$	$1 \frac{\text{slug} \cdot \text{ft}}{\text{lbf} \cdot \text{sec}^2}$
英制工程 單位制	力, lbf 質量, lbm 長度, ft 時間, sec 溫度, °R	無	$32.17 \frac{\text{lbm} \cdot \text{ft}}{\text{lbf} \cdot \text{sec}^2}$
國際系統 單位制 (SI)	長度, m 質量, kg 時間, S 溫度, K	力: $\text{newton (N)} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{S}^2}$	$1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{N} \cdot \text{S}^2}$

$$F = \frac{1}{g_c} ma$$

g_c 值在表 1.1 的最後一行列出。

本書中, SI 單位制與英制工程單位均被使用, 為了方便起見, 各種單位系統換算成 SI 單位制的轉換因子均列於附錄 A 中, 以供參考。

問題詳解

【例 1.1】 1.5 in 厚度的均勻平板, 其中一面維持 100 °F 的溫