熱傳遞

FUNDAMENTALS OF

Heat and Mass Transfer 5/e

熱力熱傳學(二)

第一章 簡　介

1.1 何謂與如何？

一個簡單但普遍的定義可用來回答此問題：何謂熱傳遞？

熱傳遞（或熱）係由於溫度差造成能量的傳遞。

只要物體中或物體間有溫度差存在，熱傳遞便會發生。

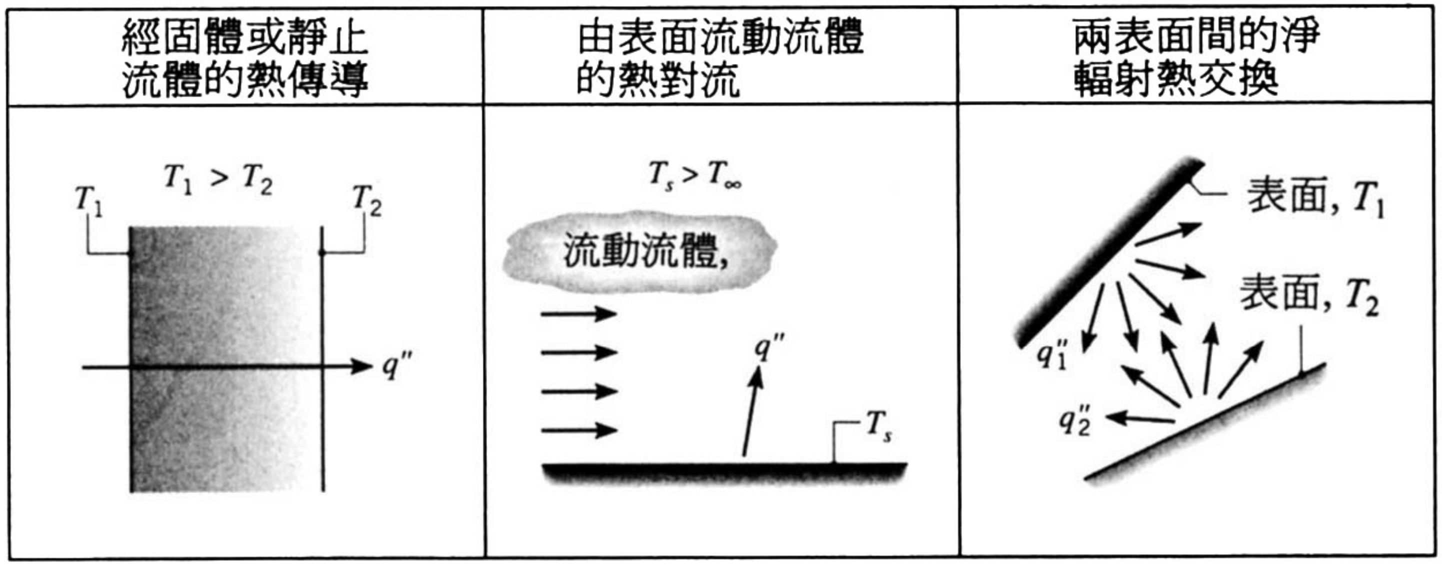


圖 **1.1** 傳導、對流及輻射熱傳遞方式。

1.2 物理起源和熱流率方程式
1.2.1 熱傳導

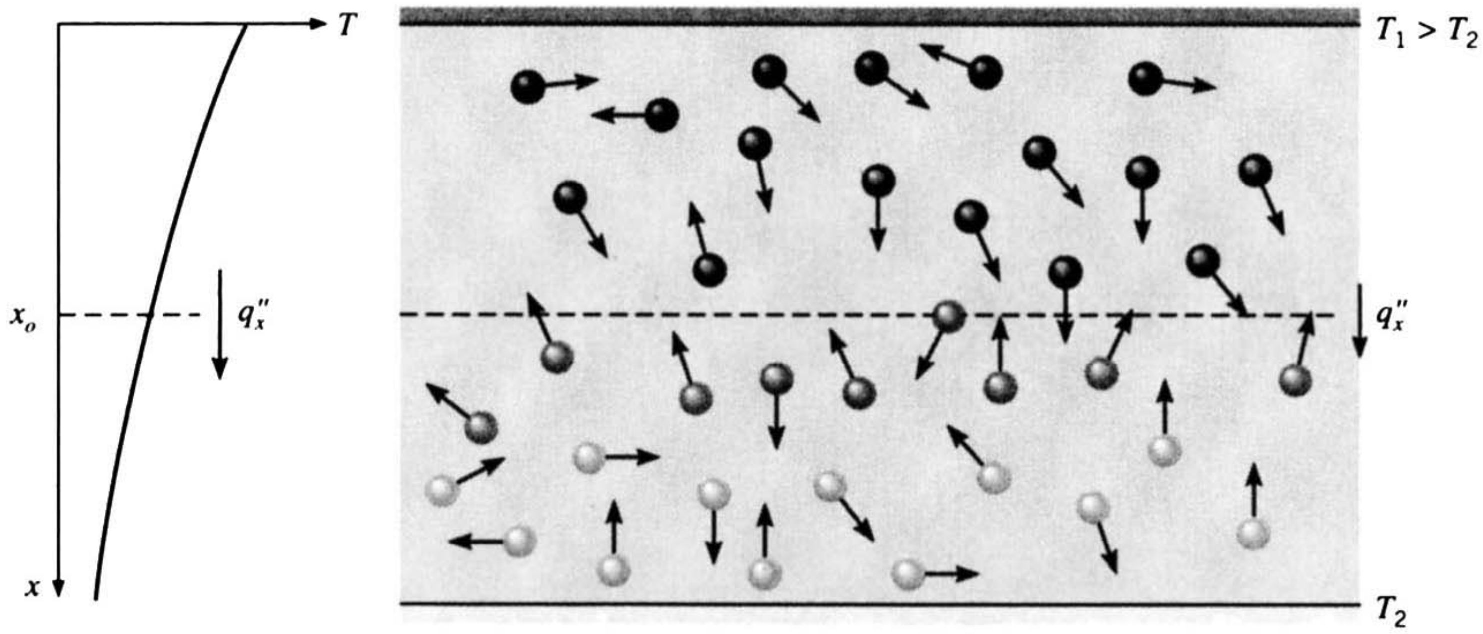


圖 1.2 分子運動引起能量擴散與熱傳導的關係

關於熱傳導的例子很多，金屬湯匙突然放入熱咖啡中，握柄將因湯匙本身的熱傳導而覺得暖和。冬天時，暖房內的暖氣會明顯地散失到大氣中，這些能量散失的途徑主要經由牆壁的熱傳導。

利用熱流率方程式可以量化熱傳遞的過程，此方程式可用來計算每單位時間的熱傳量，對於熱傳導而言，熱流率方程式稱爲**傅立葉定律** (Forier's law)。圖 1.3 爲具溫度分布 $T(x)$ 的一維平面壁，熱流率方程式可表示爲

$$q''_x = -k\frac{dT}{dx} \tag{1.1}$$

熱流通量 $q''_x(\mathrm{W/m^2})$ 表示在 x 方向，每單位垂直熱傳方向的面積的熱傳率，且與 x 方向的溫度梯度 dT/dx 成正比，比例常數 k 爲一輸送性質稱爲導熱性 $(\mathrm{W/m\cdot K})$ 且爲平面壁材料的特徵值，負號表示熱必須由高溫傳至低溫，在穩態情況下，如圖 1.3 所示，溫度分布爲

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L}$$

則熱流通量

$$q''_x = -k\frac{T_2 - T_1}{L}$$

或

$$q''_x = k\frac{T_1 - T_2}{L} k\frac{\Delta T}{L} \qquad \textbf{(1.2)}$$

值得注意的是此方程式係代表熱流通量，即每單位面積的熱傳率，而面積爲 A 的平面壁，其熱傳導的熱流率 q_x(W) 爲熱流通量與面積的乘積，即 $q_x = q''_x \cdot A$ 。

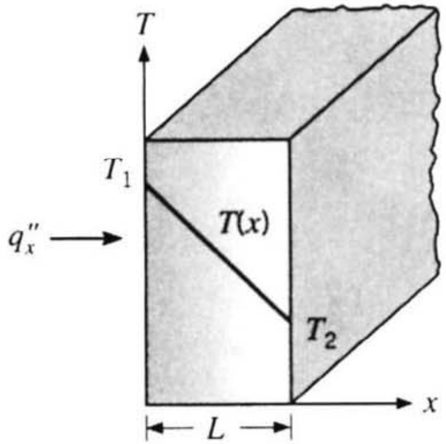


圖 1.3　一維的熱傳導（ 能量擴散 ）

例題 1.1

工業用鍋爐爐壁係用厚 $0.15\ m$ 的防火磚所建造而成，導熱性為 0.17 $W/m \cdot K$ 在穩態操作的情況下作量測，此時爐壁內外表面溫度分別為 1400 及 1150 K 。

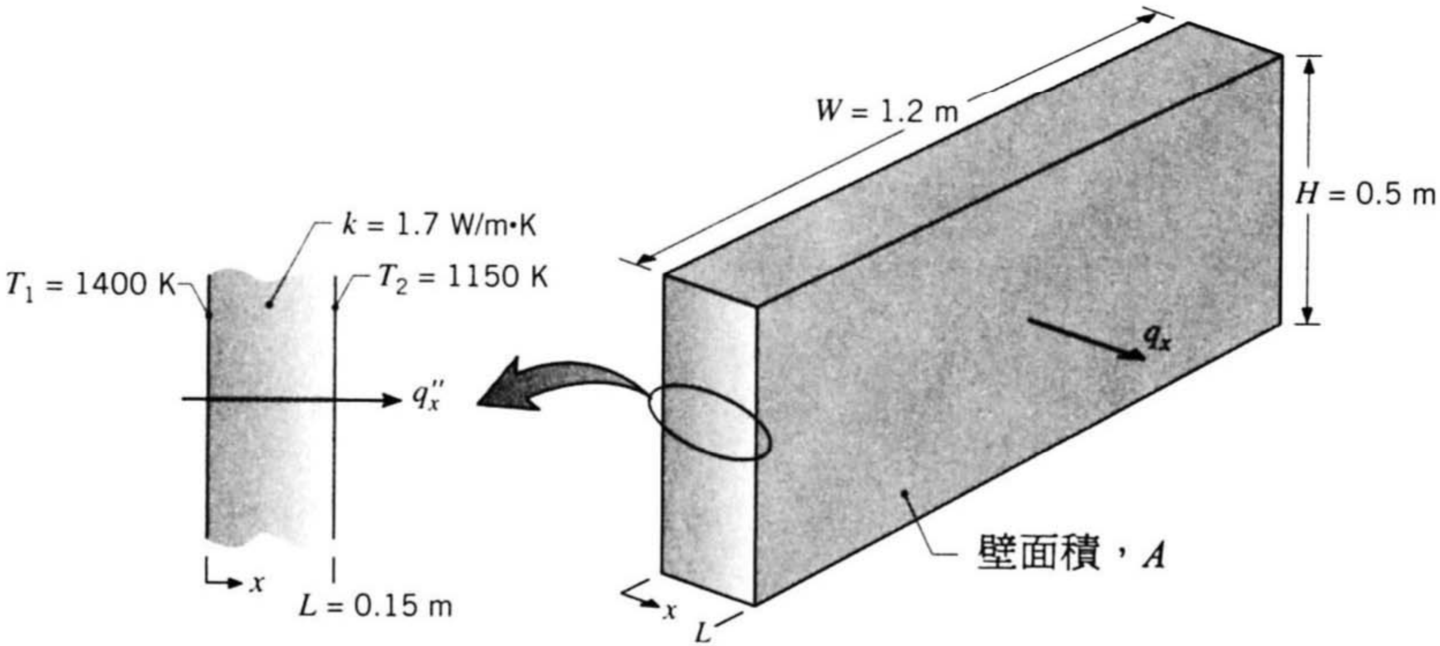
假設爐壁尺寸為 $0.5\ m \times 3\ m$ ，試求經爐壁的熱損失率？

解答：

己知：穩定狀態下，壁厚、面積、導熱性及表面溫度。

求解：爐壁熱損失。

概略圖：



假設：

1. 穩定狀態；
2. 一維的熱傳導；
3. 導熱性為定值（ 常數 ）。

分析：因為爐壁的熱傳方式為傳導，熱流通量可由傅立葉定律決定，利用式 (1.2)，得

$$q''_x = k\frac{\Delta T}{L} = 1.7\ \mathrm{W/m\cdot K} \times \frac{250\ \mathrm{K}}{0.15\ \mathrm{m}} = 2833\ \mathrm{W/m^2}$$

熱流通量代表經一單位面積的熱傳率，因此爐壁熱損失為

$$q_x = (HW)q''_x = (0.5\ \mathrm{m} \times 1.2\ \mathrm{m})\,2833\ \mathrm{W/m^2} = 1700\ \mathrm{W} \quad ◀$$

評論：注意熱流的方向及熱流通量與熱流率之間的差異。

1.2.2 熱對流

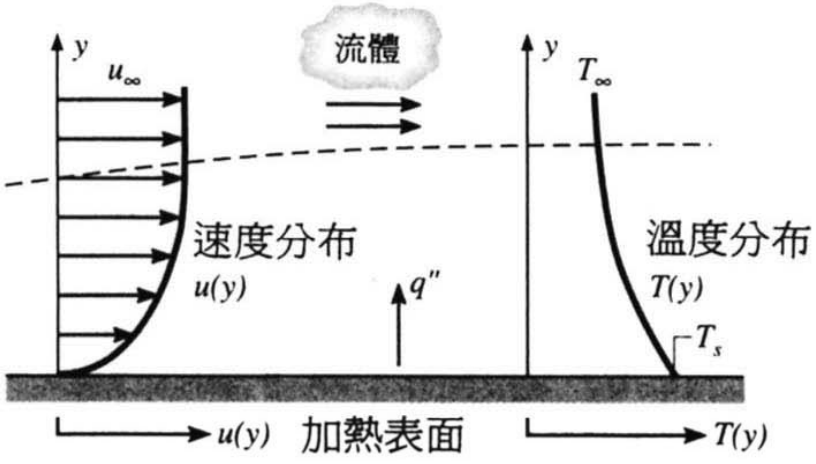


圖 1.4 熱對流中邊界層的形式

若不論熱對流的過程，適當的對流熱流率方程式可表示為

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \tag{1.3a}$$

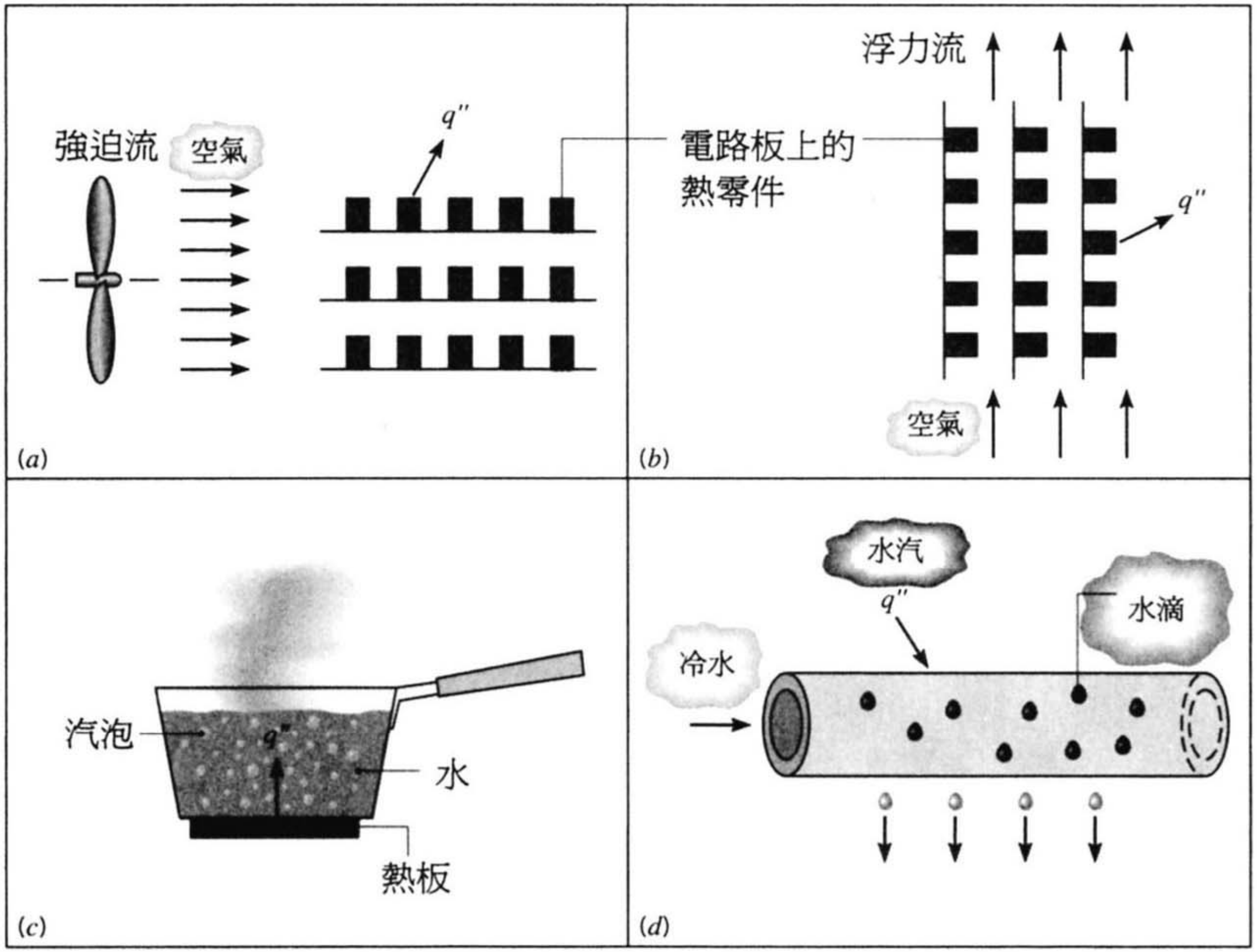


圖 1.5　熱對流過程。(*a*) 強迫對流自然；(*b*) 自然對流；(*c*) 沸騰；(*d*) 凝結。

表 1.1　典型的對流熱傳係數

過　程	h $(W/m^2 \cdot K)$
自然對流	
氣體	2–25
液體	50–100
強迫對流	
氣體	25–250
液體	100–20,000
具相變化的熱對流	
沸騰或凝結	2500–100,000

當使用式 (1.3a) 時，若熱由界面傳出，則熱流通量爲正，若熱傳入界面，則熱流通量爲負，然而若 $T_\infty > T_s$ ，我們也可以將牛頓冷卻定律表示爲

$$q'' = h(T_\infty - T_s) \qquad \textbf{(1.3b)}$$

在這種情況下，若熱傳入界面，則熱流通量爲正。

1.2.3　熱輻射

考慮如圖 1.6(a) 表面的熱輻射過程，由表面放射出的輻射熱係起源於具熱能的物體表面，而每單位面積的熱釋放率稱爲表面放射功率 E ，此放射功率有一上限值，可由**史蒂芬 - 波茲曼定律** (Stefan-Boltzmann law) 表示

$$E_b = \sigma T_s^4 \tag{1.4}$$

其中 T_s 爲表面的絕對溫度，σ 爲史蒂芬 - 波茲曼定律常數 ($\sigma = 5.67\times 10^{-8}\,\mathrm{W/m^2\cdot K^4}$)，這種表面稱爲理想輻射體或**黑體** (blackbody)。

實際表面所放射的能量小於同溫度的黑體的，其放射量可表示爲

$$E = \varepsilon\sigma T_s^4 \tag{1.5}$$

其中 ε 是表面的放射性質，稱爲放射率，其值介於 0 與 1 之間，$0\le\varepsilon\le 1$，與表面材質，加工情況有很大的關係，由此值可以知道，表面相對於黑體的放射效率。表 A.11 爲常用典型的 ε 值。

輻射熱也可由周圍入射進來，此種輻射熱係來自於一些特殊的熱源，如太陽或從其他的表面反射進來。若不論熱源的形式，我們將入射在每一單位面積上的輻射熱表示爲**入輻射熱** G (irradiation) (如圖 1.6(a))。

部分或全部的入射熱會被表面所吸收，因此內部的熱能將會增加，單位表面積所吸收的輻射熱可由表面的輻射性質（移爲吸收率 α）計算而得，即

$$G_{\mathrm{abs}} = \alpha G \tag{1.6}$$

其中 $0 \le \alpha \le 1$，如果 $\alpha < 1$ 且表面爲非透明的，則部分的入射熱將會被反射回去。假設表面爲半透明的，則部分的入射熱將會穿透此表面。然而，吸收或放射輻射熱可分別增加或降低物體的熱能，但反射或穿透表面的輻射熱對於物體內部的熱能卻毫無影響，請注意，α 值與入射熱及本身表面的狀況有很大的關係。例如，一表面對於太陽能與對於鍋爐爐壁放射熱的吸收率並不相同。

有一常見的特殊例子，溫度 T_s 的小表面與完全包圍此表面的等溫大表面間的輻射熱交換，例如，此**周圍環境** (surroundings) 可為房間或熔爐的

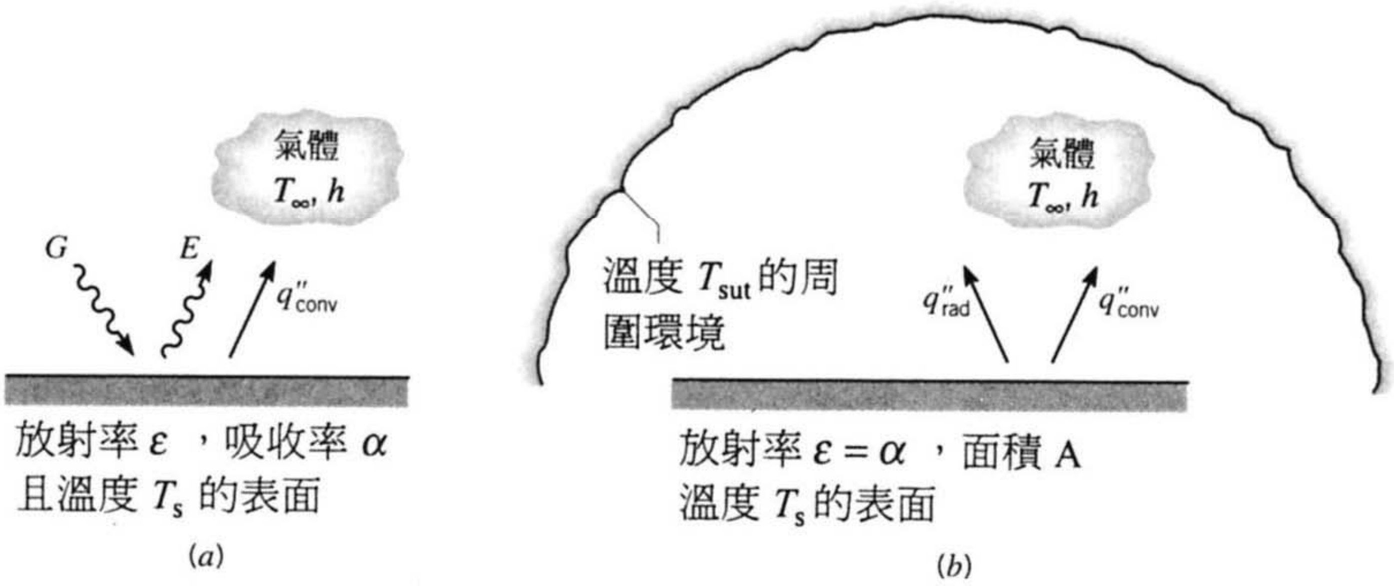


圖 1.6 輻射熱交換：(*a*) 在表面；(*b*) 表面與周圍環境。

牆壁，其溫度 T_{sur} 與封閉表面的溫度 T_s 不同（即 $T_s \neq T_{\text{sur}}$），我們將在第 12 章證明，對於這種情況，入射熱相當於一溫度爲 T_{sur} 的黑體的放射熱 $G = \sigma T_{\text{sur}}^4$，假設表面爲一**灰表面** (gray surface)，$\alpha = \varepsilon$，則表面的淨輻射熱傳可表示爲，(單位面積)

$$q''_{\text{rad}} = \frac{q}{A} = \varepsilon E_b(T_s) = \alpha G = \varepsilon\sigma(T_s^4 - T_{\text{sur}}^4) \qquad \textbf{(1.7)}$$

此式代表放射熱與吸收熱的差。

若將淨輻射熱交換寫成式 (1.8) 的形式，則在應用上將更方便，

$$q_{\text{rad}} = h_r A(T_s - T_{\text{sur}}) \qquad \textbf{(1.8)}$$

其中，由式 (1.7)，輻射熱傳係數 h_r 可表示爲

$$h_r \equiv \varepsilon\sigma(T_s + T_{\text{sur}})(T_s^2 + T_{\text{sur}}^2) \tag{1.9}$$

現在我們將熱輻射的表示式寫成類似於熱對流的，如此情況下，我們已將輻射熱傳率方程式線性化，使得熱傳率正比於溫度差而非 4 階溫度的差，注意，h_r 與溫度有很大的關係，但在對流中 h 與溫度的關係卻非常微小。

圖 1.6 的表面也可以同時有熱對流至鄰接的氣體，如圖 1.6(b)，由表面傳遞之總傳率爲

$$q = q_{\text{conv}} + q_{\text{rad}} = h\,A(T_s - T_\infty) + \varepsilon A\sigma(T_s^4 - T_{\text{sur}}^4) \tag{1.10}$$

例題 1.2

一未經絕熱的蒸汽管路通過一房間，其內之空氣及牆壁溫度均爲 25°C，管的外徑爲 70 mm，表面溫度及放射率分別爲 200°C 及 0.8，試問表面的放射功率及入射熱爲何？假設表面之自由對流熱傳係數爲 15 $W/m^2 \cdot K$，試求單位管長度的熱損失率？

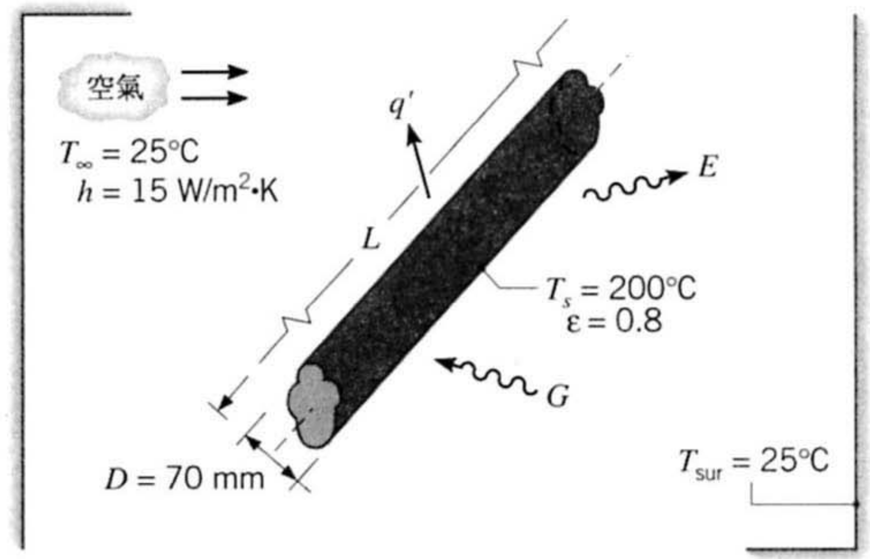
解答：

已知：未經絕熱管直徑、放射率，及具固定的房間。

求解：

1. 表面放射功率及入射熱。
2. 每單位管長度的熱損失，q'。

概略圖：



假設：

1. 穩定狀態。
2. 房間與管之間的輻射熱交換為小表面積與大封閉面間的熱交換。
3. 表面放射率與吸收率相同。

分析：

1. 表面放射功率可由式 (1.5) 計算而入射熱可由 $G=\sigma T_{\text{sur}}^4$ 計算而得，因此

$$E=\varepsilon\sigma T_s^4=0.8(5.67\times10^{-8}\ \text{W/m}^2\cdot\text{K}^4)(473\ \text{K})^4=2270\ \text{W/m}^2$$

$$G=\sigma T_{\text{sur}}^4=5.67\times10^{-8}\ \text{W/m}^2\cdot\text{K}^4(298\ \text{K})^4=447\ \text{W/m}^2$$

2. 管的熱損失包括室內空氣的熱對流與牆壁間的輻射熱交換，因此，由式 (1.10) 知，$A=\pi DL$

$$q=h(\pi DL)(T_s-T_\infty)+\varepsilon(\pi DL)\,\sigma\,(T_s^4-T_{\text{sur}}^4)$$

所以每單位管長的熱損失爲

$$q'=\frac{q}{L}=15\ \text{W/m}^2\cdot\text{K}(\pi\times0.07\ \text{m})(200-25)^\circ\text{C}$$
$$+0.8(\pi\times0.07\ \text{m})5.67\times10^{-8}\ \text{W/m}^2\cdot\text{K}^4(473^4-298^4)\ \text{K}^4$$
$$q'=577\ \text{W/m}+421\ \text{W/m}=998\ \text{W/m}$$

◀

1.3 能量守恆

1.3.1 控制體積的能量守恆

根據時間的基準，適用於熱傳分析的第一定律公式敘述如下：

在一瞬間 (*t*)：

進入控制體積的熱能與機械能流率，加上控制體積內的熱能產生率，減掉離開控制體積的熱能與機械能流率等於貯存在控制體積內的能量增加率。

在一區段時間 (Δt)：

進入控制體積的熱能與機械能總量，加上控制體積內的熱能產生總量，減掉離開控制體積的熱能與機械能總量等於貯存在控制體積內的能量增加總量。

假設進入及產生的能量超過流出的能量。則控制體積內的貯存（ 累積 ）能將增加。假設進入及產生的能量等於流出的能量，則控制體積處於穩定狀態下，貯存能的總量並無改變。

考慮圖 1.7 的控制體積應用能量守恆的觀念，首先以虛線確定控制表面的範圍，其次確定能量的項目。在一瞬間，此包括進出控制體積的熱能及機械能，$\dot{E}_{\text{in}}$ 與 $\dot{E}_{\text{out}}$。同時，在控制體積內，其他形式的能量可能轉換為熱能，我們此過程為**能量產生** (energy generation)，且此產生率記為 $\dot{E}_g$。貯存在控制體積內的能量變化率，dE_{st}/dt，記為 $\dot{E}_{\text{st}}$。因此，能量守恆的通式可表示為

$$\dot{E}_{\text{in}} + \dot{E}_g - \dot{E}_{\text{out}} = \frac{dE_{\text{st}}}{dt} \equiv \dot{E}_{\text{st}} \qquad \textbf{(1.11a)}$$

式 (1.11a) 可應用到任一瞬間，適用於一區段時間 Δt 的表示式，可由式 (1.11a) 積分而得

$$E_{\text{in}} + E_g - E_{\text{out}} = \Delta E_{\text{st}} \qquad \textbf{(1.11b)}$$

總之，由上式可看出，進入及產生的能量可以增加控制體積內的貯存能總量，而流出的能量卻減少貯存能的總量。

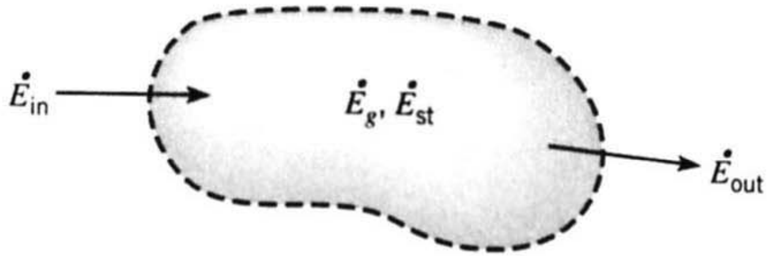


圖 1.7　在一瞬間，控制體積的能量守恆。

式 (1.11a、b) 也可以用來導出更多能量守恆的表示式，包括熱力學中所提到的公式。考慮一具固定質量的封閉系統 (如圖 1.8(*a*))，能量可以熱功交換方式通到系統邊界，假設在一段時間 Δt 內，傳到系統的總熱量爲 Q (能量進入系統)，系統作功量爲 W (能量流出系統)，系統內並無能量轉換 $(E_g = 0)$ 且動能與位能可以忽略，則式 (1.11b) 可簡化爲

$$Q - W = \Delta U \tag{1.11c}$$

作功項 W 可能由系統邊界位移、旋轉及 / 或電磁效應所造成，另外，在任一瞬間 t ，能量守恆定律可爲

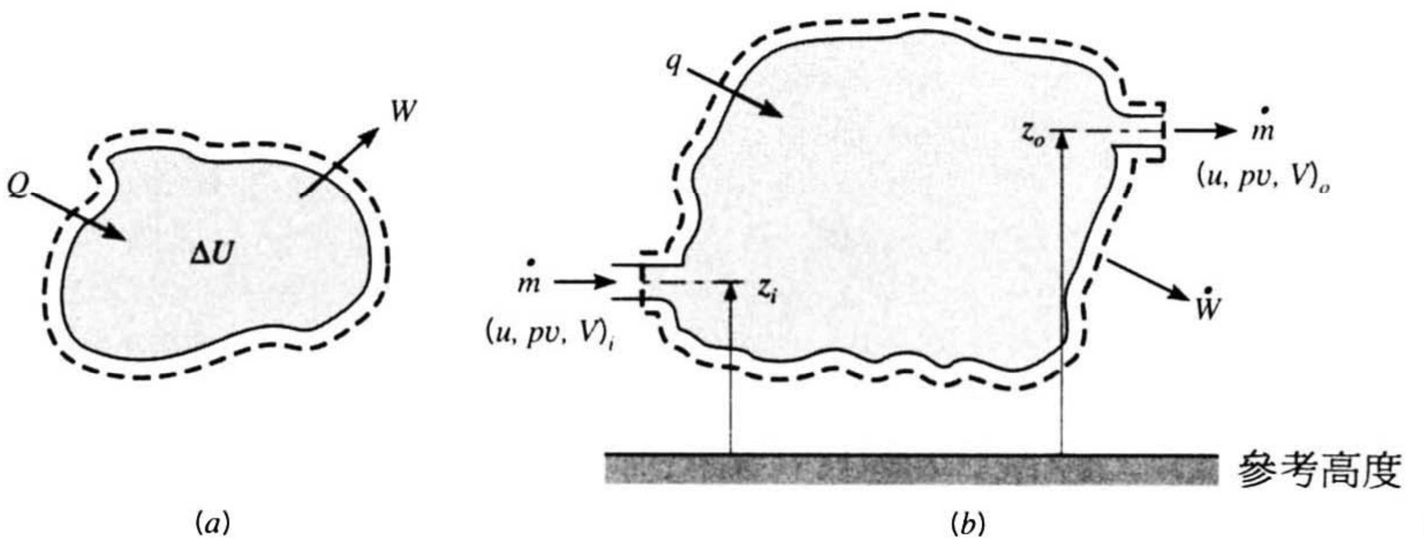
$$q - \dot{W} = \frac{dU}{dt} \tag{1.11d}$$

另外，關於**開放系統** (open system)(如圖 1.8(*b*)) 的能量守恆，質量流可攜帶內能、動能及位能進出系統，在這種情形下，我們習慣將能量交換的功分成兩類，第一種稱爲**流功** (flow work)，係由流體流動通過邊界造成壓力所作的功。對單位質量而言，流功等於流體的壓力與比容的乘積

$(p\upsilon)$，所有其他的功係由系統所作且將其歸在 W 項。因此，如果有熱量傳遞至系統，系統內無能量轉換且是在穩定狀態下進行 $(\dot{E}_{st}=0)$，則式 (1.11a) 在穩定流的情況，可表示為，

$$\dot{m}\left(u+p\upsilon+\frac{v^2}{2}+gz\right)_i-\dot{m}\left(u+p\upsilon+\frac{v^2}{2}+gz\right)_o+q-\dot{W}=0 \qquad \textbf{(1.11e)}$$

當然，內能與流功的和可以焓來代替，即 $i=u+p\upsilon$。



7

圖 1.8　能量守恆應用在：(a) Δt 時間內封閉系統；(b) 瞬間 t 穩流開放系統。

例題 1.3

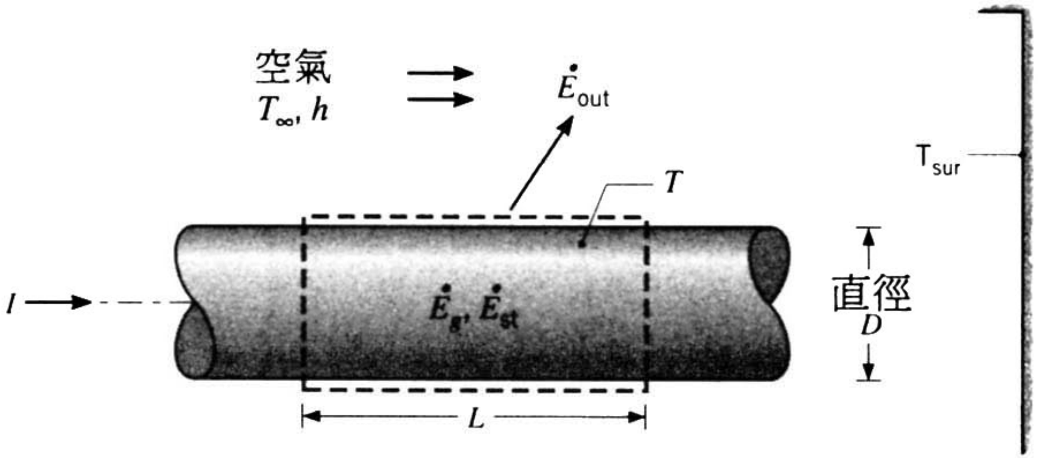
一直徑爲 D 的導體長桿，每單位長度的電阻爲 R_e'，最初與大氣及周圍環境保持熱力平衡。當一電流 I 通過此桿時平衡就被干擾了。試導出一方程式，用來計算電流通過期間桿溫度的變化。

解答：

已知：桿直徑及電流通過時電阻的變化，溫度。

求解：桿溫度的流御方程式。

概略圖：



假設：

1. 任何時間 t ，桿溫度均勻。
2. 性質固定 $(\rho, c\ , \varepsilon = \alpha)$ 。
3. 桿外表面與周圍環境的輻射熱交換為小面積與大封閉體間的熱交換。

分析：熱力學第一定律常用來決定未知的溫度，在本例中，相關項包括表面的輻射及對流熱傳遞，導體電阻產生的熱量，及貯存熱的變化。因為我們希望求得溫度的改變率，第一定律應該用於瞬間，因此，式 (1.11a) 應用到長度為 L 的控制體積，

$$\dot{E}_g - \dot{E}_{\text{out}} = \dot{E}_{\text{st}}$$

其中能量產生項係由於電阻產生熱量，

$$\dot{E}_g = I^2 R'_e L$$

控制體積內的熱產生均勻且表示為容積熱產生率 $q'(\mathrm{W/m^3})$ ，整個控制體積的熱產生率為 $\dot{E}_g = \dot{q}V$ ，其中 $\dot{q} = I^2 R'_e / (\pi D^2/4)$ 。流出系統的能量係由表面的熱對流及熱輻射所進行。式 (1.3a) 及 (1.7)，分別為

$$\dot{E}_{\text{out}} = h(\pi DL)(T - T_\infty) + \varepsilon\sigma(\pi DL)(T^4 - T_{\text{sur}}^4)$$

而貯存能的變化係由於溫度變化所引起

$$\dot{E}_{\text{st}} = \frac{dU_t}{dt} = \frac{d}{dt}(\rho VcT)$$

$\dot{E}_{\text{st}}$ 項係關於桿內能的變化率，其中 ρ 和 c 分別爲桿的密度及比熱，而 V 爲桿的體積，$V = (\pi D^2 / 4)L$ 將這些變化率方程式代入能量守恆方程式，得到

$$I^2 R'_e L - h(\pi DL)(T - T_\infty) - \varepsilon\sigma(\pi DL)(T^4 - T_{\text{sur}}^4) = \rho c\left(\frac{\pi D^2}{4}\right) L \frac{dT}{dt}$$

因此

$$\frac{dT}{dt} = \frac{I^2 R'_e - \pi Dh(T - T_\infty) - \pi D\varepsilon\sigma(T^4 - T_{\text{sut}}^4)}{\rho c(\pi D^2 / 4)} \quad \blacktriangleleft$$

評論：

1. 上式可以積分方式求出溫度與時間的關係，當 $dT/dt = 0$，可得到穩定狀態的溫度桿溫可由下式求得，

例題 1.4

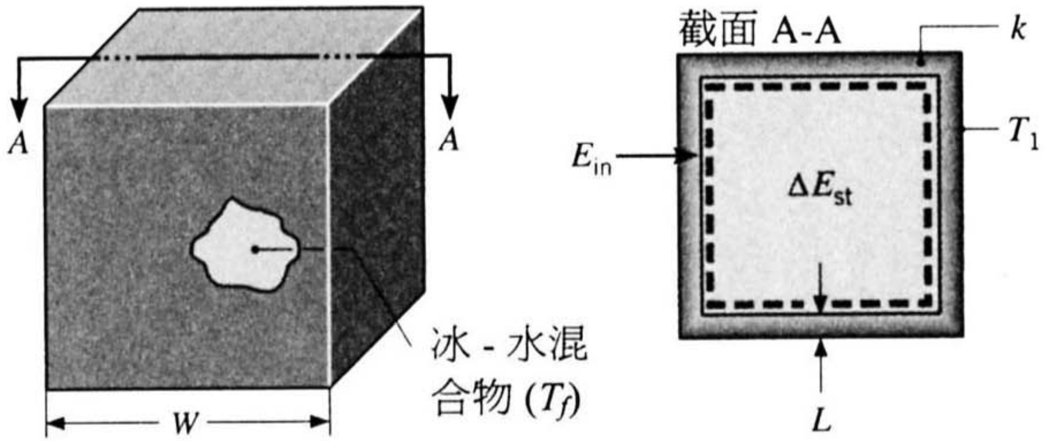
質量 M 的冰塊，在溶解溫度 ($T_f = 0°C$) 下裝在邊長爲 W 的箱內，箱壁的厚度爲 L ，導熱性爲 k ，假設箱壁外表面溫度 $T_1 > T_f$ ，試導出冰塊完全溶解所需的時間？

解答：

已知：冰塊的質量及溫度，箱的尺寸、導熱性及外表面溫度。

求解：冰塊溶解所需的時間

概略圖：



其中貯存能的增加主要來自於固態變成液態的潛能變化，熱以傳導的方式經箱壁傳至冰塊內，因爲假設壁內外的溫度差維持在 $(T_1 - T_f)$ ，因此箱壁的熱傳導率爲固定

$$q_{\text{cond}} = k(6W^2)\frac{T_1 - T_f}{L}$$

而傳入的總能量爲

$$E_{\text{in}} = \left[k(6W^2)\frac{T_1 - T_f}{L}\right]t_m$$

每單位固體質量所需的能量變化量稱爲溶解潛熱 h_{sf} ，因此貯存能的增加量爲

$$\Delta E_{\text{st}} = Mh_{sf}$$

代入第一定律中，得到

$$t_m = \frac{M h_{sf} L}{6W^2 k(T_1 - T_f)}$$ ◀

評論：

1. 假設冰塊最初溫度低於溶解溫度，問題將顯得更複雜，貯存能項將包括顯能（內熱能），由冷狀態至溶解溫度。在此過程中，冰塊內將會有溫度梯存在。
2. 考量應變為 $W = 200\ \text{mm}$ 空腔，壁厚為 $L = 10\ \text{mm}$，導熱係數為 $k = 0.05\ \text{W/m}\cdot\text{K}$，空腔中冰的質量為

$$M = \rho_s (W - 2L)^3 = 920\ \text{kg/m}^3 (0.200 - 0.020)^3\ \text{m}^3 = 5.37\ \text{kg}$$

如果表面溫度為 $T_1 = 20°\text{C}$，要使冰熔化的時間為

$$t_m = \frac{5.37\ \text{kg} \times 344{,}000\ \text{J/kg} \times 0.01\ \text{m}}{6(0.200\ \text{m})^2 \times 0.05\ \text{W/m}\cdot\text{K}\,(20-0)°\text{C}} = 74{,}730\ \text{s} = 20.8\ \text{h}$$

冰的密度及熔解潛熱分別為 $\rho_s = 920\ \text{kg/m}^3$ 和 $h_{sf} = 334\ \text{kJ/kg}$。

3. 注意到 t_m 的表達式中，單位 K 和 °C 相互抵消。這樣的抵消在傳熱學問題中經常出現。

1.3.2　表面能量守恆

我們常有機會將能量守恆定律應用到物體間的接觸面，在這種特殊的情況下，控制表面內無質量及體積如圖 1.9 所示。因此，式 (1.11a) 內的產生項及貯存項並不相干且只需要處理表面現象即可。能量守恆在這種情形便成爲，

$$\dot{E}_{\text{in}} - \dot{E}_{\text{out}} = 0 \qquad \textbf{(1.12)}$$

即使物體中有熱源，但並不影響控制表面的能量平衡。另外，能量守恆對於穩態及過渡情況均適用。

圖 1.9 的控制表面有三種熱傳遞項，以單位面積爲基準，分別爲物體至控制表面的熱傳導 (q''_{cond})，控制表面至流體的熱對流 (q''_{conv}) 及表面至周圍環境的淨輻射熱 (q''_{rad})。因此能量守恆的形式爲，

$$q''_{\text{cond}} - q''_{\text{conv}} - q''_{\text{rad}} = 0 \qquad \textbf{(1.13)}$$

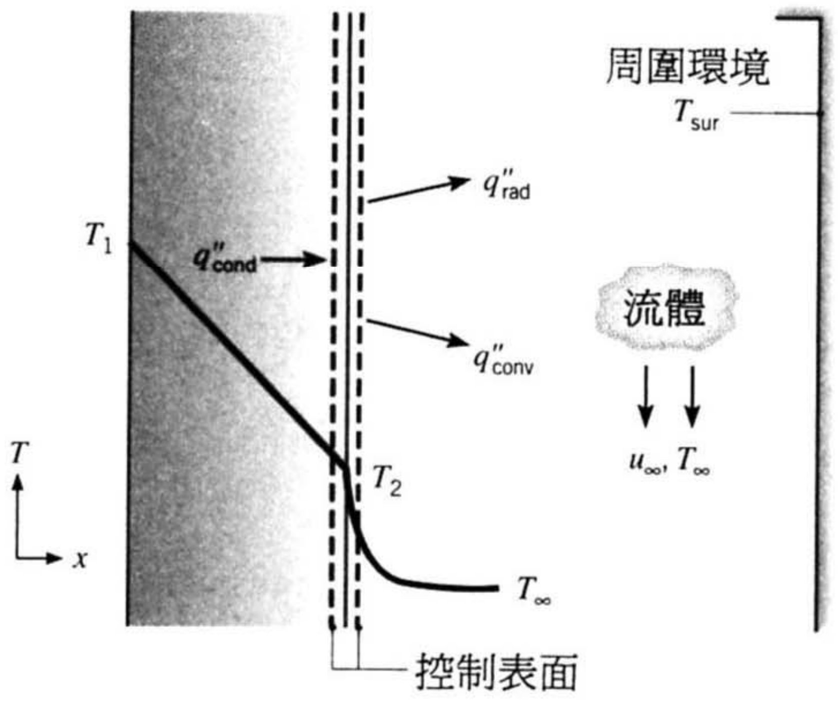


圖 1.9　物體間表面的能量守恆

而且我們可以利用適當的熱流率方程式，式 (1.2)、(1.3a) 及 (1.7)，來表示每一項。

例題 1.5

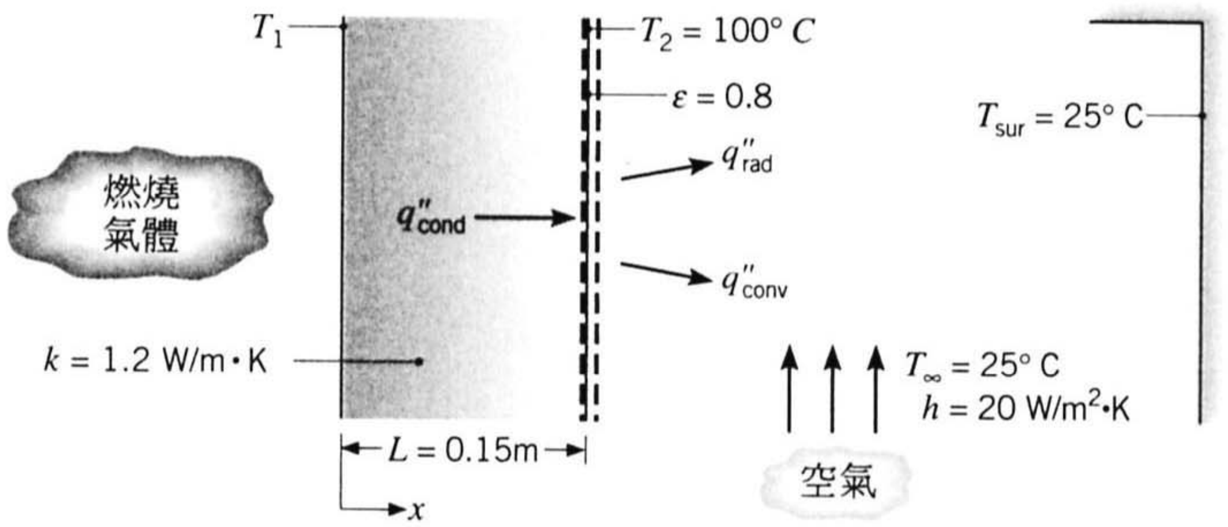
厚 0.15 m 的磚牆，將鍋爐的熱燃燒熱氣與溫度為 25°C 的大氣及周圍環境隔開，磚的導熱性為 $1.2\ \mathrm{W/m \cdot K}$ 且表面的放射率為 0.8，穩定狀態下，外表面的溫度為 100°C，表面與大氣間的自然對流熱傳係數 $h = 20\ \mathrm{W/m^2 \cdot K}$，試求磚牆內表面的溫度？

解答：

已知：已知厚度磚牆的外表面溫度、導熱性、放射率及大氣狀況。

求解：磚牆內表面的溫度。

概略圖：



假設：

1. 穩定狀態；
2. 經磚牆的熱傳導爲一維；

3. 磚牆外表面與周圍的輻射熱交換為小面積與大封閉圍體的熱交換。

分析：內表面溫度可由外表面取能量平衡而求得。由式 (1.12)

$$\dot{E}_{\text{in}} - \dot{E}_{\text{out}} = 0$$

因此，在單位面積的基準下，

$$q''_{\text{cond}} - q''_{\text{conv}} - q''_{\text{rad}} = 0$$

或，將式 (1.2)，(1.3a) 及 (1.7) 代入上式，並整理得到

$$k\frac{T_1 - T_2}{L} = h(T_2 - T_\infty) + \varepsilon\sigma(T_2^4 - T_{\text{sur}}^4)$$

因此，將已知條件的數值代入，得到

$$1.2\ \text{W/m}\cdot\text{K}\frac{(T_1 - 372)\text{K}}{0.15\ \text{m}} = 20\ \text{W/m}^2\cdot\text{K}(373 - 298)\text{K}$$

$$+ 0.8(5.67\times 10^{-8}\ \text{W/m}^2\cdot\text{K}^4)(373^4 - 298^4)\text{K}^4$$

$$= 1500\ \text{W/m}^2 + 520\ \text{W/m}^2 = 2020\ \text{W/m}^2$$

解 T_1

$$T_1 = 373\text{ K} + \frac{0.15\text{ m}}{1.2\text{ W/m}\cdot\text{K}}(2020\text{ W/m}^2) = 625\text{ K} = 352°\text{C}$$ ◀

評論：

1. 當使用能量平衡在輻射熱交換及其他形式，溫度單位最好用 K。當熱輻射項及其他項的溫度未知，此舉更顯得必要。
2. 外表面輻射熱流量在總熱流量 $q''_{tot} = q''_{conv} + q''_{rad}$ 的比例隨表面溫度變化，並且隨表面的輻射率 ε 和對流係數 h 變化。下圖描繪了當 $\varepsilon = 0.8$，$h = 10$, 20, 40 $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ ，內表面溫度 $T_1 = 352°\text{C}$ 時的 q''_{rad}/q''_{tot} 之比例關係曲線。輻射熱流量和對流熱流量隨溫度增加而增加。但是，因爲輻射熱流量以溫度的四次方增加，而對流熱流量只爲線性增加，所以輻射熱流量和對流熱流量對總熱流量的貢獻分別隨溫度增加而增加和減少。在中等溫度 ($T < 100°\text{C}$) 和中等到高值的對流係數 ($h > 100$ $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$)，輻射也許可以忽略不計。可是如圖中所示，對氣體的自然對流狀態係數下，輻射將是重要的。

1.4 熱傳問題的分析 - 方法論

例題 1.6

平板的塗料藉暴露於紅外線燈下層化，入射熱爲 2000 $\mathrm{W/m^2}$ 其中 80% 被吸收且放射率爲 0.50。另外，此板亦暴露於空氣流及大的周圍環境中溫度分別爲 20°C 及 30°C。

1. 假設板與大氣間的對流係數 $h = 15\ \mathrm{W/m^2 \cdot K}$，試板的層化溫度爲何？
2. 塗料的動能，包括耐磨損及耐久，與層化溫度息息相關，空氣流系統可控制空氣的流速，也就是對流熱傳係數。但製程工程所需要知道溫度與對流熱傳係數問題的關係。試以計算及畫圖表示溫度及 h 的關係。$2 \le h \le 200\ \mathrm{W/m^2 \cdot K}$。當層化溫度爲 50°C 時，$h$ 的値爲何？

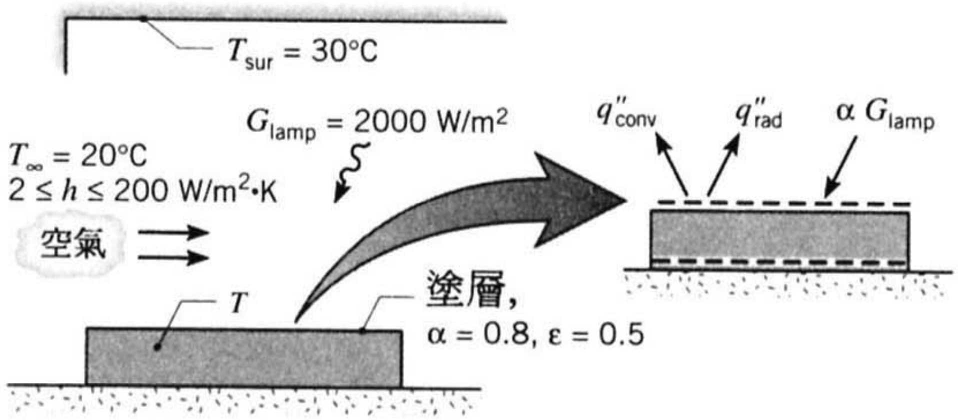
解答：

已知：塗料以紅外線的入射熱層化，輻射性質已知塗料的熱傳遞爲熱對流至大氣及周圍環境間的輻射熱交換。

求解：

1. 層化溫度，$h = 15\ \mathrm{W/m^2 \cdot K}$ 。
2. 空氣流與層化溫度間的關係，$2 \le h \le 200\ \mathrm{W/m^2 \cdot K}$ 。

概略圖：



假設：

1. 穩定狀態。

2. 板背面的熱損失可忽略。

3. 板在大周圍環境中，爲大物體，塗層之吸收率 $\alpha_{sur} = \varepsilon = 0.5$ 。

分析：

1. 因爲過程爲穩定狀態，且板背面無熱傳，所以板必定爲等溫 $(T_s - T)$ 。因此，可在暴露的板表面取控制面積且應用式 (1.12) 或對整塊板取控制面積並應用式 (1.11a) 來求得所需的溫度，這裡將採用後者且內部無 產生熱 $(\dot{E}_g = 0)$ ，則式 (1.11a) 變成

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = 0$$

其中，穩態下，$\dot{E}_{st}=0$，進入的能量係由塗料吸收入射熱所形成，而流出的能量乃因熱對流及熱輻射到周圍環境所造成。因此

$$(\alpha G)_{\text{lamp}} - q''_{\text{conv}} - q''_{\text{rar}} = 0$$

將式 (1.3a) 及 (1.7) 代入，得到，

$$(\alpha G)_{\text{lamp}} - h(T - T_{\infty}) - \varepsilon\sigma(T^{4} - T_{\text{sur}}^{4}) = 0$$

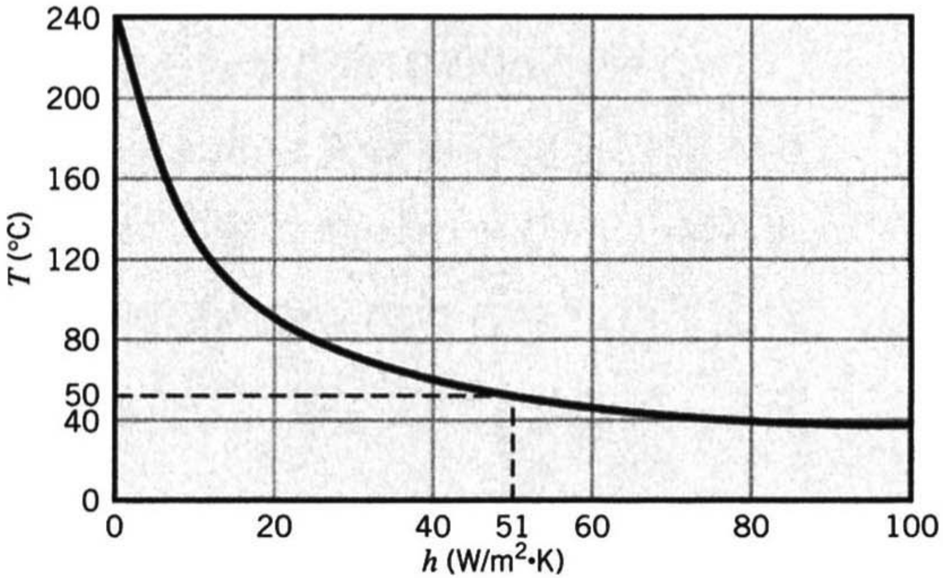
將數值代入，則，

$$0.8\times 2000\ \mathrm{W/m^2} - 15\ \mathrm{W/m^2\cdot K}(T-293)\mathrm{K}$$
$$-0.5\times 5.67\times 10^{-8}\ \mathrm{W/m^2\cdot K^4}(T^4-303^4)\mathrm{K^4}=0$$

並以試誤法得出 T ，

$$T = 377\ \mathrm{K} = 104°\mathrm{C}$$ ◀

2. 將題目所給的 h 範圍代入前述能量平衡式，並將結果畫圖如下：



假設層化溫度爲 50°C ，則空氣流之對流係數應爲

$$h(T=50°\mathrm{C}) = 51.0\ \mathrm{W/m^2\cdot K}$$ ◀

1.6　單位與因次

熱傳的物理量以單位組成的因次來說明，共有四個基本因次，他們是長度 (L)、質量 (M)、時間 (t) 及溫度 (T)。其他所有的物理量均與這個基本因次有關係。

在美國，習慣以英制單位來做度量。這些基本單位爲

因　次		單　位
長度 (L)	→	呎 (ft)
質量 (M)	→	磅 (lb_m)
時間 (t)	→	秒 (s)
溫度 (T)	→	華氏 (°F)

所有物理量的單位都可由這些因次導出。例如，力的因次與質量有關，由牛頓第二定律。

$$F = \frac{1}{g_c} Ma \tag{1.14}$$

其中加速度 a 的單位爲呎 / 秒平方， g_c 爲一比例常數，假設此常數可任意設爲 1 且爲無因次，則力的因次是 $(F) = (M) \cdot (L)/(t)^2$ ，且單位爲

$$1 \text{ 磅} = 1 \text{ lb}_\text{m} \cdot \text{ft}/\text{s}^2$$

另外，我們將討論包括質量與力等基本因次的系統，然而，此例的比例常數的因次必須爲 $(M) \cdot (L)/(F) \cdot (t)^2$ ，再者，如果定義 1 磅的力爲使質量 1 磅的物體產生 32.17 ft/s^2 加速度的力量，比例常數的形成必須爲，

$$g_c = 32.17 \text{ lb}_\text{m} \cdot \text{ft}/\text{lb}_\text{f} \cdot \text{s}^2$$

功的單位可由其定義導出，即力乘以位移，單位爲 $\text{ft} \cdot \text{lb}_\text{f}$ ，功的單位與能量單位相同，雖然通常以英制熱力單位 (Btu) 出現，作爲熱能的單位。一 Btu 將使 1 lb/m , 68°F 的水升高 1°F ，相當於 778.16 $\text{ft} \cdot \text{lb}_\text{f}$ 的機械能。

表 1.2　SI 制基本與補充單位

量與符號	單位與符號
長度 (L)	米 (m)
質量 (M)	公斤 (kg)
濃度 (C)	莫耳 (mol)
時間 (t)	秒 (s)
電流 (I)	安培 (A)
溫度 (T)	凱氏 (K)
平面角 (θ)	徑度 (rad)
立體角 (ω)	立體徑度 (sr)

表 1.3　常用量的 SI 導出單位

量	名稱與符號	公　式	以 SI 單位表示
力	牛頓 (N)	$m \cdot kg/s^2$	$m \cdot kg/s^2$
壓力與應力	巴斯卡 (Pa)	N/m^2	$kg/m \cdot s^2$
能量	焦耳 (J)	$N \cdot m$	$m^2 \cdot kg/s^2$
功率	瓦特 (W)	J/s	$m^2 \cdot kg/s^3$

表 1.4　乘方字首

字　首	縮　寫	乘　方
pico	p	10^{-12}
nano	n	10^{-9}
micro	μ	10^{-6}
milli	m	10^{-3}
centi	c	10^{-2}
hecto	h	10^{2}
kilo	k	10^{3}
mega	M	10^{6}
giga	G	10^{9}
tera	T	10^{12}

1.7 總　　結

表 1.5　熱傳過程的摘要

方式	機　　構	熱流率方程式	方程式的序號	輸送性質或係數
傳導	混亂的分子運動所引起的能量擴散	$q''_s(\mathrm{W/m^2}) = -k\dfrac{dT}{dx}$	(1.1)	$k(\mathrm{W/m\cdot K})$
對流	混亂的分子運動及能量擴散及流體巨大運動（移流）所引起的能量傳遞	$q''(\mathrm{W/m^2}) = h(T_s - T_\infty)$	(1.3a)	$h(\mathrm{W/m^2\cdot K})$
輻射	電磁波方式的能量傳遞	$q''(\mathrm{W/m^2}) = \varepsilon\sigma(T_s^4 - T_{sur}^4)$	(1.7)	ε
		or $q(\mathrm{W}) = h_r A(T_s - T_{sur})$	(1.8)	$h_r(\mathrm{W/m^2\cdot K})$

例題 1.7

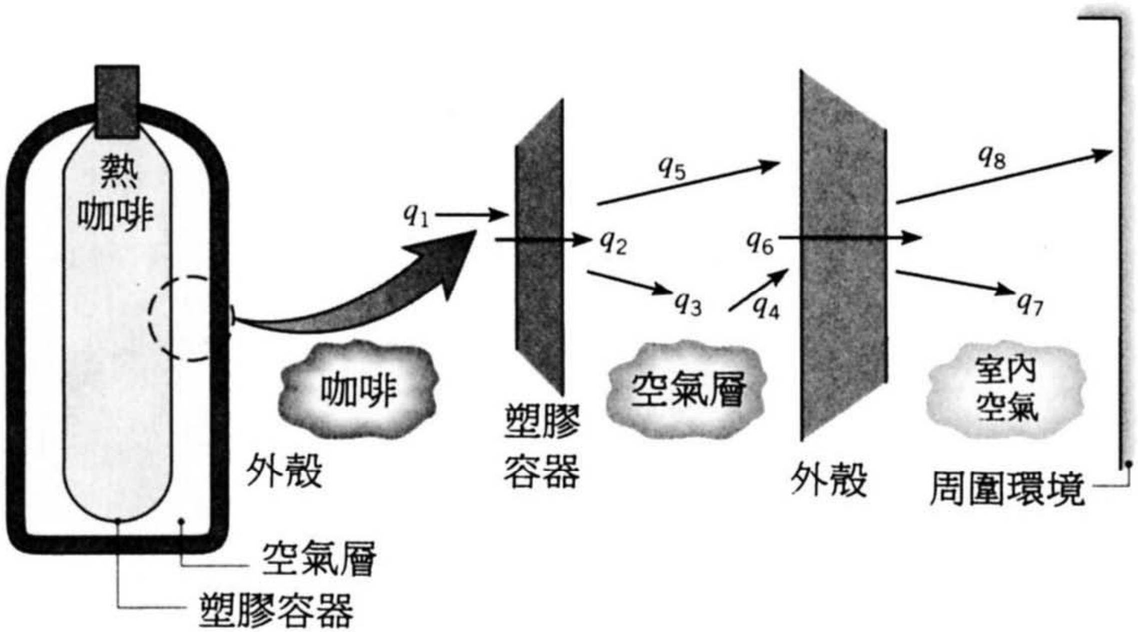
在一房間內有一盛滿熱咖啡的封閉容器，房內的空氣及牆壁有固定的溫度。試試確認咖啡冷卻的熱傳遞過程。如何設計一較佳的容器？

解答：

已知：熱咖啡以塑膠容器、空氣空間及塑膠封套與較為冷的周圍環境隔絕。

求解：相關的熱傳過程。

概略圖：



由咖啡傳遞熱的途徑有：

q_1 ：咖啡到容器的自然對流。

q_2 ：經容器的熱傳導。

q_3 ：容器至空氣的自然對流。

q_4 ：空氣到瓶套的自然對流。

q_5 ：容器外表面與瓶套內表面的淨輻射熱。

q_6 ：經瓶套的熱傳導。

q_7 ：瓶套至外界的自然對流。

q_8 ：瓶套外表面與外界間的淨輻射熱。

評論：改善設計可由下列兩種方法著手：(1) 使用鋁製（低放射率）容器及瓶，降低淨輻射熱；(2) 將瓶內的空氣抽成真空或使用填充以減緩自然對流。