

輻射與自然對流熱傳實驗

1. 前言

我們知道熱量可以自發性地由高溫處傳遞到低溫處，而熱量傳遞的機制基本上可分為：傳導(Conduction)、對流(Convection)和輻射(Radiation)等三種。其中傳導和對流必須藉由某一『媒介物質』才能進行熱量傳遞，此物質則稱為『傳熱介質』。

傳熱介質在靜止的狀態下所進行的熱量傳遞過程，稱為『熱傳導』；當它在移動的狀態下，結合『熱傳導』所進行的熱量傳遞過程則稱為『熱對流』。在大部份的情形之下，進行熱對流的傳熱介質皆為流體，它所進行的『移動』即是『流動』，因此『熱對流』可以視為傳熱介質利用『熱傳導』以及流體的『流動』來進行熱量傳遞的一種方式。

另一方面，熱量的傳遞也可以不需要傳熱介質。熱量可利用電磁波輻射的方式穿越真空區域，抵達某一物體表面，並為該物體所吸收，此稱為『熱輻射』。例如，太陽持續不斷地輻射出熱量，此一熱量有一部份穿越太空抵達地球，提供地球光和熱。

1-1 輻射熱傳遞

就統計熱力學的觀點而言，任何物體只要溫度在絕對溫度零度(0K)以上，即會有熱量由其表面輻射出去，而理想的熱輻射體，其能量的輻射率正比於絕對溫度的四次方，以及正比於它的表面積，並可表為：

$$q = \sigma AT^4 \quad (1)$$

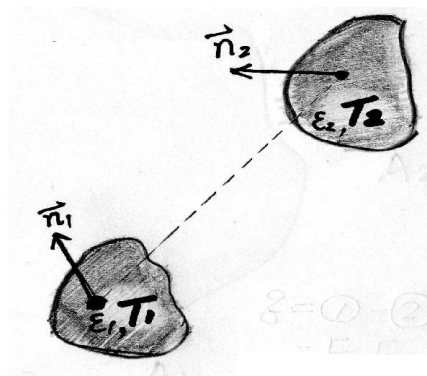
上式中 σ 為比例常數，稱為史蒂芬-波茲曼常數(Stefan-Boltzmann constant)，其值為 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ ； A 為熱輻射體的表面積， T 為熱輻射體的溫度(以單位K表之)；方程式(1)稱為『波茲曼熱輻射定律』。

所謂『理想的熱輻射體』，即是一般所稱的『黑體 (Black body)』，亦即熱輻射率遵循方程式(1)的物體。例如，表面被覆黑碳的金屬片即近似所謂的黑體。至於其它表面，例如岩石、光滑的上漆表面或磨光的金屬板，其熱輻射率雖然也與絕對溫度的四次方成正比，但卻小於同溫度之下黑體熱輻射率，一般稱之為『灰體 (Gray body)』。

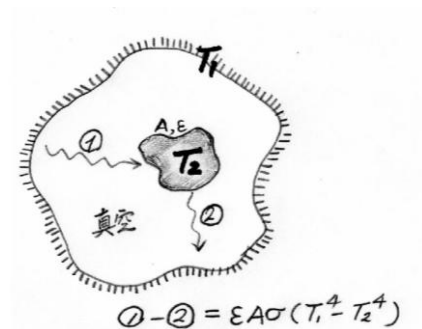
我們將某一物體的熱輻射率與同溫度下黑體的熱輻射率的比值，稱為該物體的放射率(Emissivity)，以 ε 表之。藉由放射率 ε 的定義，我們可以將任何物體的熱輻射率表為：

$$q = \varepsilon A \sigma T^4 \quad (2)$$

其中 $0 \leq \varepsilon \leq 1$ 。而 $\varepsilon = 1$ 代表黑體， $\varepsilon = 0$ 代表完全反射體。一般非金屬的 ε 較高（例如，柏油路面 $\varepsilon \cong 0.85$ 、紅磚 $\varepsilon \cong 0.95$ 、水泥 $\varepsilon \cong 0.90$ 、黑色油漆 $\varepsilon \cong 0.98$ ），而光滑的金屬表面一般 ε 都很小（大約在 $0.04 \sim 0.4$ 之間）。



圖一



圖二

位於可視範圍內（未被它物完全阻擋），溫度分別為 T_1 、 T_2 的兩個物體之間（如圖一所示），其輻射熱傳遞率，可表為：

$$q = F_\varepsilon F_G A \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (3)$$

其中 F_ε 為與物體放射率 ε 有關之函數， F_G 為與兩物體的形狀及相對位置有關之函數。大部份的輻射熱傳遞問題，可能相當的複雜，其 F_ε 與 F_G 之求取較為困難。但是當一個放射率為 ε 而溫度為 T_2 的物體被一個面積較大且溫度為 T_1 的曲面所包圍時（如圖二所示），兩者之間的輻射熱傳遞率卻可簡單的以方程式(4)表示：

$$q = \varepsilon A \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (4)$$

當 T_1 大於 T_2 時，有淨熱量由曲面 1 輻射至物體 2（物體 2 被加熱）；而當 T_1 小於 T_2 時則反之（物體 2 被冷卻）。

1-2 對流熱傳遞

根據牛頓冷卻定律（Newton's law of cooling），一個溫度 T 的物體與其所接觸的流體（溫度 T_f ）之間進行對流熱傳遞時，其熱傳遞率可表為：

$$q = hA(T_f - T) \quad (5)$$

其中 h 稱為對流熱傳係數， h 值的大小取決於流體的性質以及流體流動情形，對流熱傳遞的核心問題就在於求出 h 值。

熱對流可以分成『自然對流』與『強制對流』兩種。若流體的流動是起因於流體本身密度不均勻（因與物體距離遠近不同之流體，其溫度亦不相同），輕者上浮，重者下沉，此種熱對流稱為『自然對流』。若流體的流動是由其它外力所推動（例如，風扇、幫浦），則稱為『強制對流』。本實驗中所遇到的熱對流現象，即屬於『自然對流』。

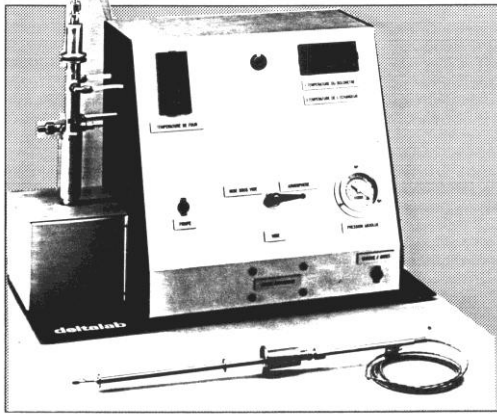
2. 實驗目的

本實驗係以一個藥片狀的測試物體（常溫），置於一封閉的腔室（高溫測試室）中進行熱傳實驗，以了解熱輻射以及熱對流的基本原理。當高溫測試室為真空時，位於測試室中的物體可與測試室壁面進行輻射熱傳遞而得到熱量，並升高溫度。根據測試物體溫度變化的情

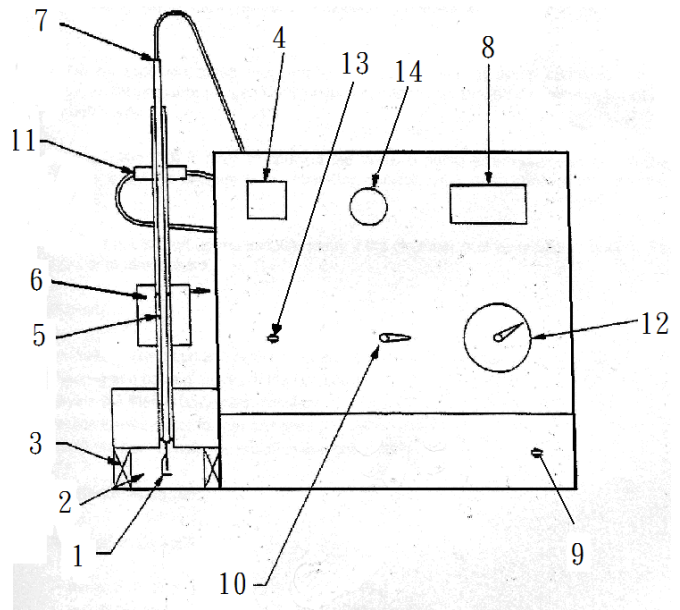
形，我們可以驗證波茲曼熱輻射定律，以及推算出波茲曼常數值。

此外，當高溫測試室中充滿空氣時，測試物體可同時由熱輻射以及熱對流得到熱量而升高溫度。藉由之前的『熱輻射』與此一『熱輻射加熱對流』兩者測試條件的差異，我們可推算出其間對流熱傳係數 h 之值。

3. 實驗裝置



圖三、實驗裝置照片



圖四、實驗設備之元件示意圖

以下說明實驗裝置之構成元件及其功能：

- (1)測試物體：藥片狀之灰黑色物體，其內部埋設溫度感測頭，可隨時測出測試物體之溫度。
- (2)加熱測試室：是一個用來容納測試物體的腔室（進行加熱測試時使用），腔室的溫度可利用加熱元件及溫控單元加以控制。
- (3)加熱元件：通電時可對加熱測試室進行加熱。
- (4)溫控單元：可設定加熱元件之溫度，表頭上'OUT'燈亮時表示正在加熱中。
- (5)冷卻測試室：是另一個用來容納測試物體的腔室（可進行冷卻測試，但本實驗不做冷卻實驗，故此一腔室僅用以使測試物體溫度

降回常溫。)，冷卻室可利用冷卻水進行熱交換，藉以維持溫度之恆定。

- (6)熱交換器：可容納冷卻水在其內部流動，以維持冷卻測試室溫度之恆定。
- (7)支持桿：用以支持測試物體，其內部設有量測測試物體溫度之熱偶線。
- (8)數位溫度顯示計：藉由選擇調扭之設定，可即時顯示測試物體的溫度或冷卻測試室溫度。
- (9)總開關：實驗裝置之總開關，當它位於'ON'的位置時，加熱元件即處於加熱狀態。
- (10)三通閥：具有三種選項：1. 關閉測試室使之與外界隔絕 (Vacuum)；2.使之連接真空幫浦 (Vacuum pump，隱藏於儀器內部)；3. 使之與大氣連通(Atmosphere)。
- (11)抽真空之接頭。
- (12)壓力表：用以顯示測試室中氣體壓力的大小。
- (13)真空幫浦開關。
- (14)數位溫度顯示器之選擇扭。

4. 與實驗有關之方程式推導

在推導與實驗有關之方程式時，使用到的參數如下所列：

- 測試物體之質量： $M=1.16 \text{ g}$ 。
- 測試物體之比熱： $C=386 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$ 。
- 測試物體之表面積： $A=2.2 \text{ cm}^2$ 。
- 測試物體表面之放射率： $\varepsilon=0.95$
- 加熱測試室溫度： $T_e \text{ (K)}$
- 測試物體之溫度： $T \text{ (K)}$

4.1 真空狀態下之實驗—輻射熱傳遞

測試物體置身於溫度為 T_e 的加熱測試室（此時為真空狀態）內時，由於吸收來自測試室壁面的輻射熱，其溫度 T 會逐漸上升。根據能量守恆原理，可將升溫過程 T 之變化以微分方程式表為：

$$MCdT = \varepsilon A \sigma (T_e^4 - T^4) dt \quad (6)$$

或寫成

$$q_R = MC \frac{dT}{dt} = \varepsilon A \sigma (T_e^4 - T^4) \quad (7)$$

其中 q_R 為輻射熱傳遞率。而測試物體的溫度 T 隨時間 t 之變化率，若以 Y'_R 表之，則有：

$$Y'_R = \frac{dT}{dt} = \frac{\varepsilon A \sigma}{MC} (T_e^4 - T^4) \quad (8)$$

4.2 大氣壓力下之實驗—輻射熱傳遞+對流熱傳遞

轉動三通閥使測試室與大氣相連通之後，原本處於真空狀態的測試室將充滿空氣，當測試物體置身於溫度為 T_e 的加熱測試室內時，由於壁面的熱輻射以及空氣的熱對流之故，測試物體溫度將逐漸上升。根據能量守恆原理，可將升溫過程 T 之變化以微分方程式表為：

$$MCdT = [\varepsilon A \sigma (T_e^4 - T^4) + q_C] dt \quad (9)$$

其中 $q_C = hA(T_e - T)$ ，代表對流熱傳遞率。而測試物體的溫度 T 隨時間 t 之變化率，若以 Y'_{R+C} 表之，則有：

$$Y'_{R+C} = \frac{dT}{dt} = \frac{\varepsilon A \sigma}{MC} (T_e^4 - T^4) + \frac{q_C}{MC} \quad (10)$$

比較方程式(8)、(10)知

$$q_C = (Y'_{R+C} - Y'_R) MC \quad (11)$$

5. 實驗步驟

5.1 真空狀態下之加熱實驗

- a. 實驗前啟動冷卻水循環，以穩定冷卻測試室之熱交換器溫度。
- b. 將測試物體之支持桿放置在'up'的位置，並適度鎖緊支持桿。(若未鎖緊則測試室將會有空氣洩入，不易維持真空狀態；若鎖得太緊，則在步驟 f 中，將支持桿下推至加熱測試室會有困難。)
- c. 轉動三通閥使測試室連通真空幫浦，並啟動真空幫浦將測試室中空氣抽出，直到壓力低於 100 mbar。之後，轉動三通閥以關閉測試室，並停止真空幫浦之運轉。
- d. 調整加熱元件之溫度設定值，並將溫度設定在 200°C 至 250°C 之間 (亦即 473K 至 523K 之間；注意：加熱元件之溫度不得超過 350°C，否則會有損壞之虞)；更改設定溫度時，持續按▲或▼三秒鐘不放，即可增加或減少設定值。出現所要的溫度數字之後，隨即放開按鈕即可完成溫度設定。三秒鐘之後，表頭所顯示的溫度為加熱元件之實際溫度。
- e. 檢視加熱功能：若溫控單元的表頭上'OUT'燈亮時，即代表加熱元件正在對加熱測試室進行加熱。
- f. 大約加熱 20 分鐘之後，加熱測試室溫度即可達到穩定值，此時可請助教將支持桿下移至'down'的位置，使測試物體置於加熱測試室內，並開始進行輻射加熱測試。
- g. 加熱測試過程中，可以由溫度顯示計看到測試物體的溫度 T 逐漸升高 (起先快速上升，之後則漸趨緩)，直到溫度 T 與加熱測試室溫度 T_e 相差 15K 以內，即可終止實驗量測，並由電腦取出加熱測試過程中，測試物體的溫度 T 隨時間升高之數據。
- h. 請助教將支持桿上移至'up'的位置，使測試物體置於冷卻測試室中，開始進行冷卻使之回到常溫，以便進行大氣壓力下之實驗。

5.2 大氣壓力下之加熱實驗

完成 5.1 的熱輻射實驗之後，可轉動三通閥，使測試室由原先關閉狀態，變成與大氣相連通，並使測試室充滿空氣。此時即可在兼具『熱輻射』與『熱對流』的機制下，進行加熱實驗。此一部份的實驗，除了不用將測試室抽成真空之外（5.1 的步驟 c），其餘則完全與 5.1 相同。

6. 實驗數據之分析與討論

1. 完成上述實驗之後，將加熱過程中測試物體溫度 T 隨時間升高之數據（電腦之數據檔），在後面的附圖中畫出曲線 1 與曲線 2。

2. 填製真空加熱實驗計算表（表一）：

根據曲線 1，利用作圖法算出 8 個溫度點處（340K 至 480K，每 20K 取一點）之曲線斜率 $Y'_R = dT/dt$ ，並根據方程式(7)算出輻射熱傳遞率 q_R 之值 ($q_R = MC dT/dt$)。之後，令 $q_e = \epsilon A \sigma T_e^4$ 計算出由測試物體發出之熱輻射率 $q_e - q_R$ ($q_e - q_R$ 等於 $\epsilon A \sigma T^4$)。最後再算出 $T_e^4 - T^4$ ，即完成表一之填製。

3. 檢驗波茲曼熱輻射定律（物體之熱量輻射率正比於 T^4 ）：利用表一所填入之數值，以測試物體溫度 T 為橫座標， $q_e - q_R$ 為縱座標（皆為對數刻度）畫出曲線 3。檢視曲線 3 是否為一直線並算出其斜率。理論上曲線 3 斜率應該是多少？你的實驗結果與理論值是否有差異？可能的原因是什麼？

4. 以 $T_e^4 - T^4$ 為橫座標， q_R 為縱座標，描繪成曲線 4。檢視曲線 4 是否為一直線，其斜率為多少？根據方程式(7)，此直線之斜率應等於 $\epsilon A \sigma$ ，請由此算出史蒂芬-波茲曼常數 σ 之值。

5. 填製大氣壓下加熱實驗計算表（表二）：

根據曲線 2，利用作圖法算出 8 個溫度點處（340K 至 480K，每

20K 取一點) 之曲線斜率 $Y'_{R+C} = dT/dt$ ，並算出 $Y'_{R+C} - Y'_R$ 之值 (Y'_R 之值抄自表一)。根據方程式(13)，將 MC 乘以 $Y'_{R+C} - Y'_R$ 即為對流熱傳遞率 q_C 。最後再填上 $T_e - T$ 之值，即完成表二之填製。

6. 以 $T_e - T$ 為橫座標 q_C 為縱座標，畫出曲線 5，檢視曲線 5 是否呈一直線，若非一直線是否可就此推論：對流熱傳係數 h 隨測試物體溫度 T 改變？（因 $q_C = hA(T_e - T)$ ，故曲線斜率應等於 hA ，可據此推算出對流熱傳係數 h 。）

表一：真空加熱實驗計算表

參數	T	T^4	$Y'_R = dT/dt$	q_R	$q_e - q_R$	$T_e^4 - T^4$
單位 溫度點	K	$10^{10} K^4$	K/s	W	W	$10^{10} K^4$
1	340	1.33				
2	360	1.67				
3	380	2.09				
4	400	2.56				
5	420	3.11				
6	440	3.75				
7	460	4.48				
8	480	5.31				

附註：

- $q_e = \varepsilon A \sigma T_e^4$

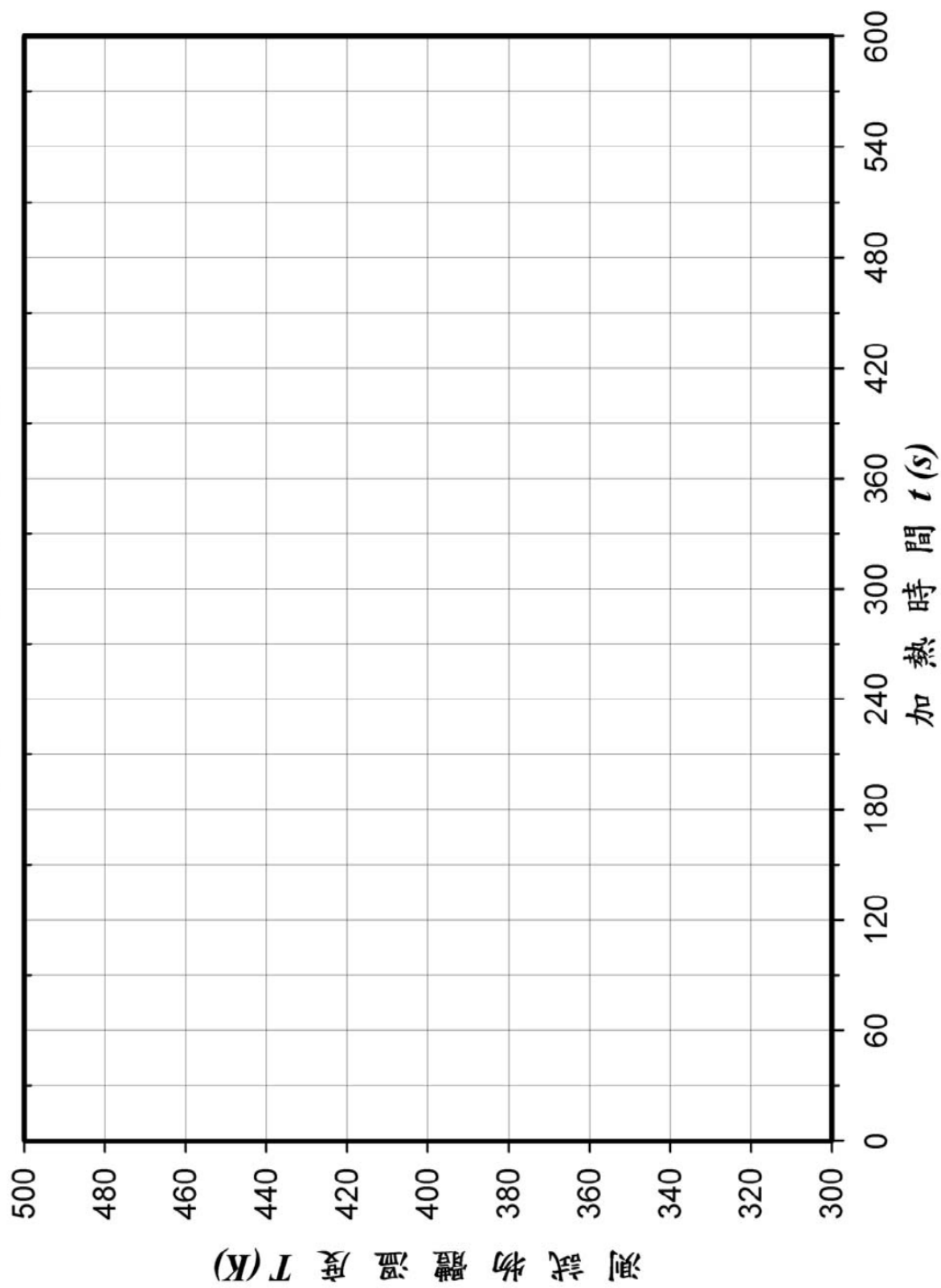
- $q_R = MCY'_R$

表二：大氣壓下加熱實驗計算表

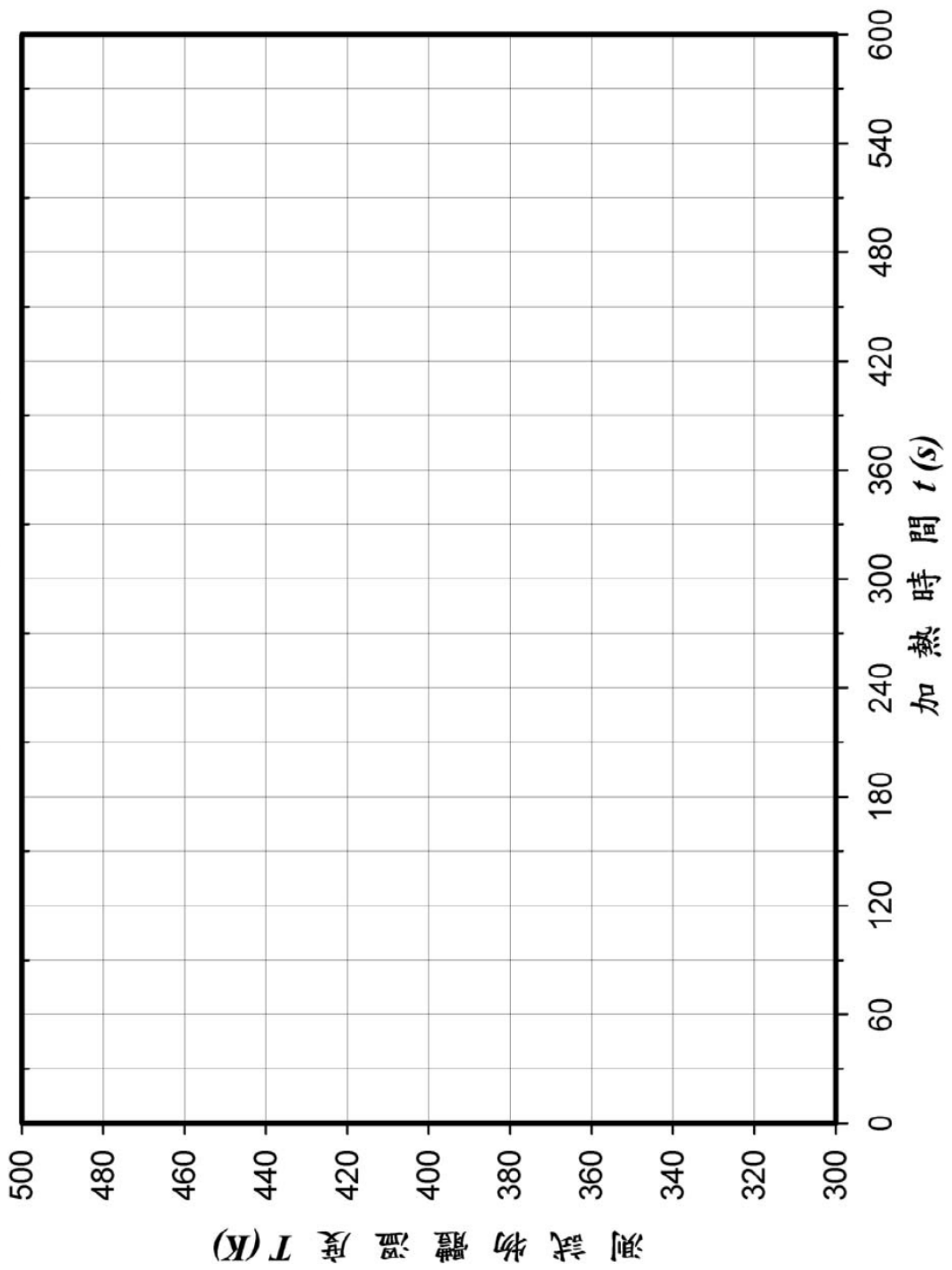
參數	T	$Y'_{R+C} = dT/dt$	$Y'_{R+C} - Y'_R$	q_C	$T_e - T$
單位 溫度點	K	K/s	K/s	W	K
1	340				
2	360				
3	380				
4	400				
5	420				
6	440				
7	460				
8	480				

附註： $q_C = MC (Y'_{R+C} - Y'_R)$

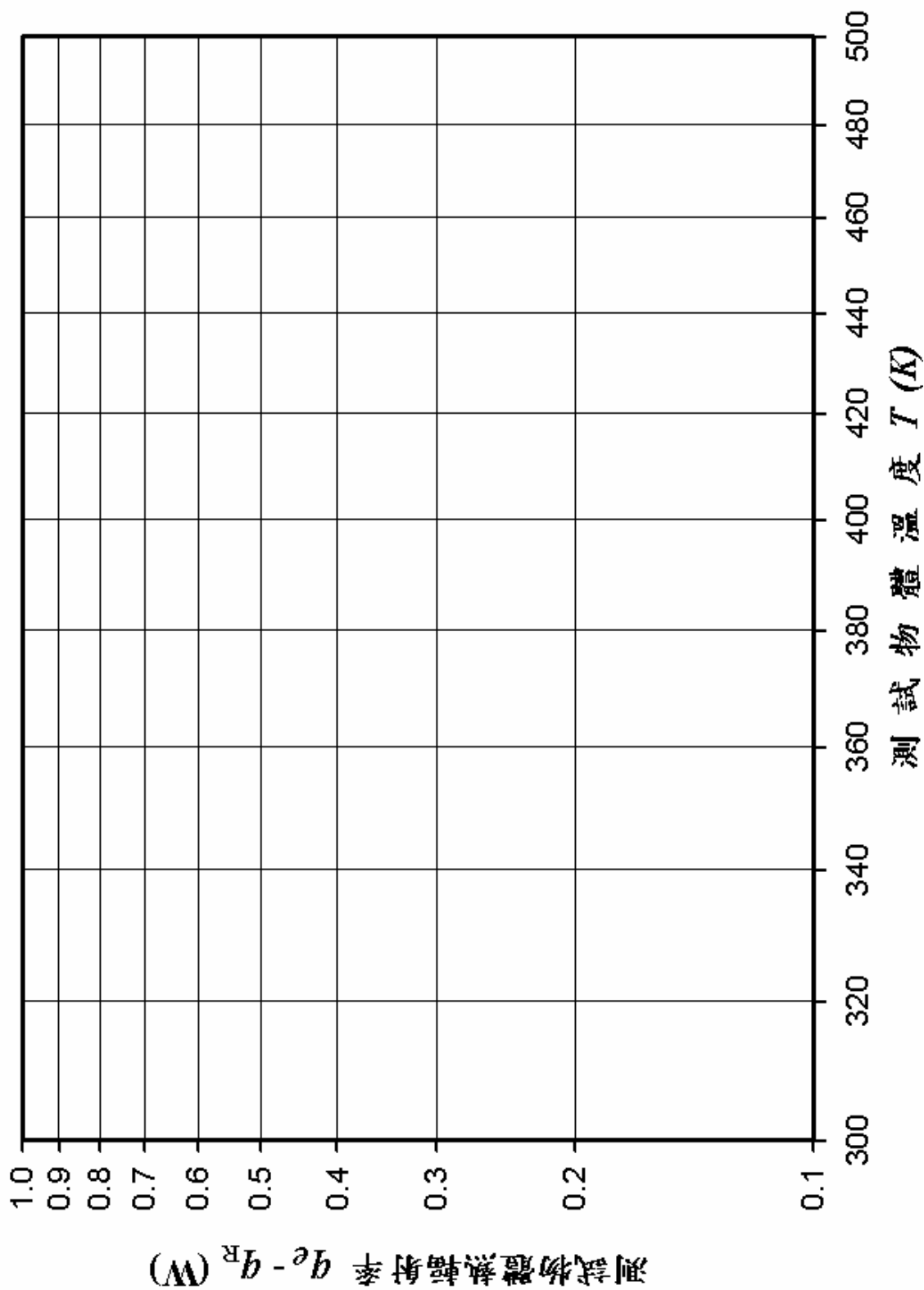
曲線 1：真空加熱



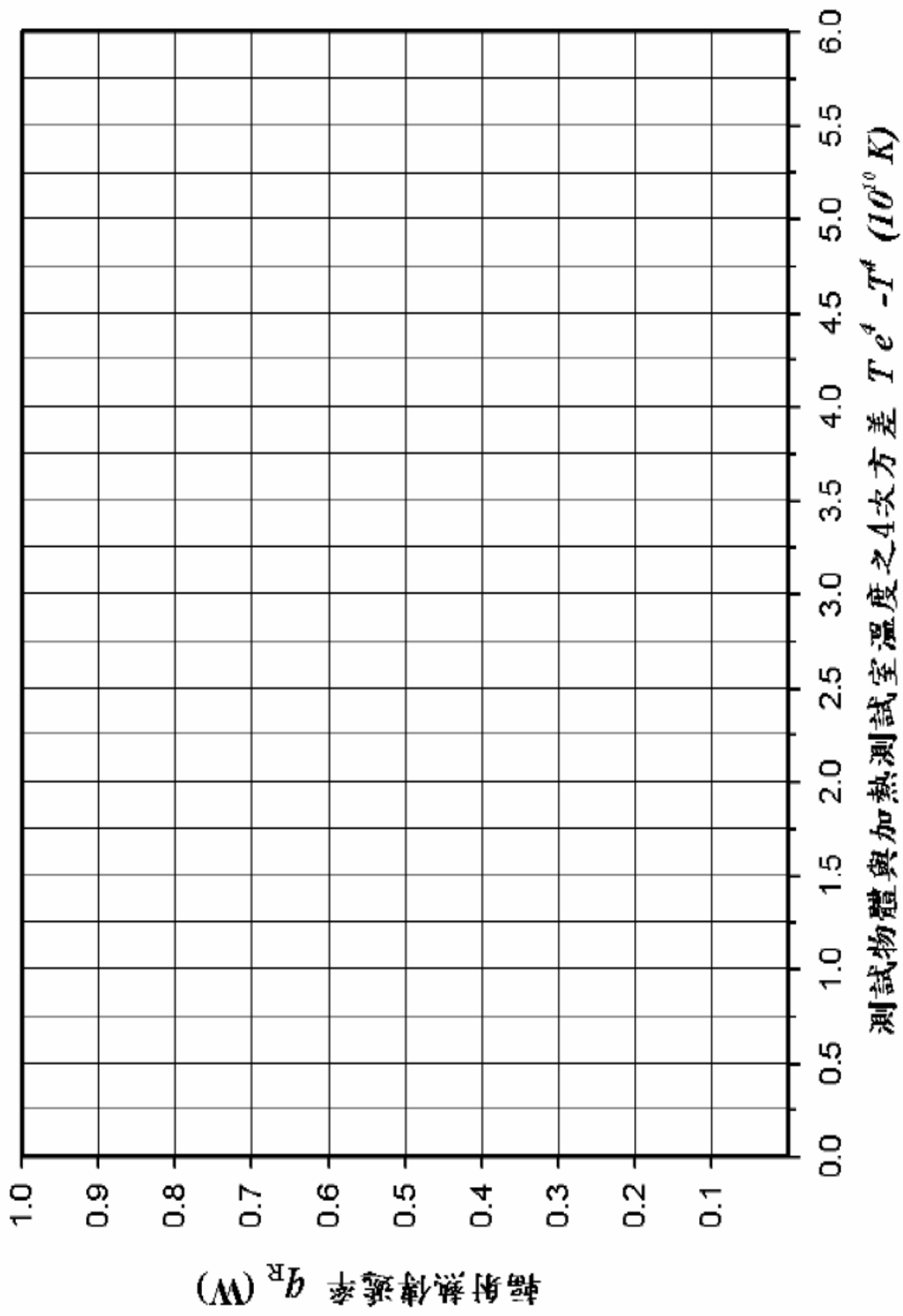
曲線 2：大氣壓下加熱



曲線 3：檢驗波茲曼熱輻射定律



曲線 4：決定波茲曼常數值



曲線 5 : 決定對流熱傳係數 h

