

熱學實驗講義

楊東淵編

國立武漢大學印

中華民國三十三年於樂山

熱學實驗

目錄

I 計溫學

- 實驗一 水銀溫度計之製造
實驗二 水銀溫度計之訂正
實驗三 熱電偶之製成及訂正
實驗四 牛頓之冷卻定律

II 熱膨脹

- 實驗五 求固體之線膨脹係數
√ 實驗六 重量溫度計之訂正及其應用(一)
~~實驗七~~ 重量溫度計之應用(二)
√ 實驗八 用絕對法測水銀之膨脹係數
實驗九 不同溫度下水之密度之測定
實驗十 測氣體之膨脹係數

III 量熱學

- 實驗十一 混合法測固體之比熱
實驗十二 冷卻法測液體之比熱
實驗十三 Joly 氏蒸汽量熱器
實驗十四 Bunsen 氏冰量熱器

- 實驗十五 求冰之融解熱
實驗十六 求液體之汽化熱
實驗十七 求鹽類之溶化熱
實驗十八 求氣體之比熱率

IV 飽和蒸汽

- 實驗十九 蒸汽壓之測定
實驗二十 蒸汽密度之測定

V 熱之傳播

- √ 實驗廿一 測金屬棒之導熱係數
實驗廿二 測橡皮管之導熱係數
實驗廿三 輻射常數之測定

VI 其他

- 實驗廿四 溶液之沸點與其濃度
實驗廿五 溶液之凝點與其分子量
√ 實驗廿六 求熱之功當量

熱學實驗

(物理系二三年級用)

楊東淵編

I 計溫學

實驗一

水銀溫度計之製造

目的：製造一(0°-100°)之攝氏溫度計。

引言：吾人在實驗室中所常用之溫度計，為一刻度之毛細玻璃管下有小球，內聚水銀，水之冰點在 0°C，沸點在 100°C，其間平分為一百示度。此種刻度最先為攝氏 (Celsius) 所引用，故名攝氏溫度計，於今科學界廣用之。其他分度法，如今亦有採用者為華氏 (Fahrenheit) 及列氏 (Reaumur) 所創始。惟選取水銀以作測溫之用，則推華氏為第一人。蓋以水銀具備許多優點：(1) 不潤濕玻璃，(2) 易得純潔者，(3) 保持液態之範圍相當大，(4) 比熱小而傳熱快，(5) 不透明且膨脹較均勻而有規則。同時吾人亦不可忘其缺點：(1) 比重及表面張力均大，(2) 當水銀柱上昇及下降時與管壁之接觸角不同。

普通水銀溫度計所測之範圍，因受水銀之凝固點 (-38.8°C) 與沸點 (356°C) 所限制，但在管頂封以高壓之氮氣時，亦可測至 500°C 左右。關於所用之玻璃，亦當採取性質穩定，且遇高熱極易恢復原狀者為佳。

通常如 Verre dur, Jena 16 ^{III} 及 Jena 59 ^{III} 多用之。水銀溫度計用法固簡而便，但僅能作普通工作之用；如欲用於精確之測量時，則所需之校正甚多，其主要者可列之如下：

- 甲. 玻管空心缺乏均勻一致之訂正。
- 乙. 在冰點及沸點刻標度時所引起之誤差之校正。
- 丙. 玻球在冰點示度隨時變化之校正。
- 丁. 管內水銀溫度與在球內者不同之校正。

器材： (1) 毛細玻管。 (2) Cleaning solution,
 (3) 純潔水銀。 (4) 抽氣機。
 (5) 蒸溜水及燈火。 (6) 冰及 hypsometer 裝置
 (7) 白蠟及 H F.

製造步驟：

- (一) 擇一牆壁堅厚且空心均勻之毛細玻管，長約 30 cm。
- (二) 在管之一端吹出一厚度均勻之薄氣泡。
- (三) 倒置入含有 10—15% 一縮二格酸鉀之濃硫酸溶液中，用火微熱球泡使氣泡自管流出；待取去火，球冷卻時，則見上述溶液漸漸上昇而入泡中，如法一熱一冷，使之盛滿。待液貯泡內約一小時，用火熱之使出。
- (四) 照上法注入蒸溜水洗泡數次，烘火使乾。最後與備有乾燥劑之抽氣機相聯接，使抽至全乾為止。
- (五) 仍如上法，一熱一冷，注純潔之水銀於球內。其適當之量為：當置球於冰中時，管之下端仍有一段水銀可見；當置入沸水中，

水銀柱上端尚留一段空隙。於是用火將端口封閉。

(六) 次將球泡浸入細冰屑與水之混液中，使管中水銀面露出冰水面，待溫度穩定後，用黑水筆依水銀面在玻璃管上作一細劃，嗣取出在黑水劃對面塗白蠟一薄層，對準黑水劃在白蠟層上刻一細痕，滴一小點 H F. 於其上，約五分鐘洗去之，此刻痕即溫度計之冰點。

(七) 然後將溫度計置入 hypsometer 裝置內以定沸點，刻痕全依刻冰點法行之。惟此時須察氣壓計之示度，以查此氣壓與水沸點之關係，而加以校正。

(八) 最後將此兩定痕間之長度，等分為一百格，每格均用蠟及 H F. 製一刻度，則普通之百度攝氏溫度計乃成。

實驗二

水銀溫度計之訂正

目的：訂正 $(0^{\circ}-100^{\circ})$ 之攝氏溫度計。

引言：吾人欲得一玻管空心之截面積為完全均勻一致之溫度計，事實上誠不可能，故將二定點之間隔分刻為等長之度數，結果自不十分精確。溫度計製造廠雖有對此缺乏均勻性之管心作適當之改正者，——即將各處每度之長度隨管心之不同而異——但欲用作精確之實驗觀察時，仍非另加下述之訂正不可。

茲為簡單起見，按一假定冰沸兩定點為真確之 $0^{\circ}-100^{\circ}\text{C}$.之溫度計論之。通常一溫度計，其各度間之長短照例不等，管心之截面積各處亦不同。如將 $0^{\circ}-100^{\circ}$ 分為十節，即每節包含十度；並細測此十節之長度，乃得知各節中每度之平均長度。

如在溫度計之水銀柱端，設法截開約等于十度長之水銀一段。而使此段水銀之一端適在 0° 標度上，他端約在 10° 標度上時，細測其長為 l_1 ；次使水銀之一端適在 10° 標度上，他端約在 20° 標度上時，長為 l_2 ，如是至 100° 為止。因溫度計上各節每度之平均長度為已知，故可將 l_1, l_2, l_3, \dots 等化為該處相等度數。次令此等度數為 t_1, t_2, t_3, \dots 等，其平均值為 t 。設此管有完全均勻之空心，則在 0° 與 100° 間之值必為 $t, 2t, 3t, \dots$ 等，而非 $l_1, l_1+l_2, l_1+l_2+l_3, \dots$ 等。

令 $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \dots$ 為應各加於 t_1, t_2, t_3, \dots 使與 t 相等之值，

則

$$t = t_1 + \delta_1,$$

$$t = t_2 + \delta_2,$$

.....

.....

因此對於 $10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, \dots$ 附近應加之校正為

$$t - t_1, \quad 2t - t_1 - t_2, \quad 3t - t_1 - t_2 - t_3, \dots$$

或 $\delta_1, \quad \delta_1 + \delta_2, \quad \delta_1 + \delta_2 + \delta_3, \dots$

故校正後之溫度相當於 t_1 者為 $(t_1 + \delta_1)$ ；相當於 $(t_1 + t_2)$ 者為 $(t_1 + t_2 + \delta_1 + \delta_2)$ ；餘類推。

茲舉一例，列表如下：

管之部份	每度平均 長 度	各部份量得 水銀段之長	水銀段之 相等度數	與平均值 之 差	應加於測溫 時之校正
$0^\circ - 10^\circ$	• 2385	2 • 442	10 • 231	$\delta_1 - 0.023$	- 0.023
$10^\circ - 20^\circ$	• 2389	2 • 431	10 • 176	$\delta_2 + 0.032$	+ 0.009
$20^\circ - 30^\circ$	• 2391	2 • 449	10 • 243	$\delta_3 - 0.035$	- 0.026
.....					
.....					
.....					
$90^\circ - 100^\circ$	• 2367	2 • 408	10 • 173	$\delta_{10} + 0.035$	+ 0.004

註：水銀段各相等度數之平均值為 $10 \cdot 208$ 。

- 器材：
- (1) 水銀溫度計 ($0^\circ - 100^\circ\text{C}$)；
 - (2) 本生燈 (尖嘴者)；
 - (3) 顯微測微器。

訂正步驟：

(一)將 0° — 100°C 之水銀溫度計分爲每節包十度之十節，乃用顯微測微器細測各節之長度，用十除之，即得各節每度之平均長度，列入第二格。

(二)於管內之水銀柱端，截得約等於十度長之一段使與其他水銀分離。其法，將尖嘴本生燈之尖火焰，緩射於欲截分之點，並旋轉玻璃管，則見水銀自然分開。

(三)用蘸有醚之棉花團於水銀球上，則水銀下降，待連續部份通過零點；微擰溫度計，使斷節水銀段之一端正在 0° 上，而他端約在 10° 上時，用顯微測微器測其長度。次使一端正在 10° 上，他端約在 20° 上，再測其長。如此段復一段測至 100° 爲止。將此 $l_1 l_2 l_3 \dots$ 等之長列入第三格。

(四)將各 l 值用同行之每度平均長除之，即得水銀段在該部份之相等度數，列入第四格。

(五)求第四格中全部之平均值，與各原值之差，即爲 $\delta_1, \delta_2, \delta_3; \dots$ 列入第五格。

(六)再將 $\delta_1, \delta_1 + \delta_2, \delta_1 + \delta_2 + \delta_3, \dots$ 順次列入第六格，即得應加于第一格相當各部份溫度實測時之校正值。

(七)最後用溫度計之平均示度（即 $5^{\circ}, 15^{\circ}, 25^{\circ}, \dots$ ）爲橫坐標，應加之相當校正值爲縱坐標，作一曲線，以備日後測溫時校正之用。本實驗係假定溫度計之首尾兩定點爲真確值，故此曲線在橫軸上應通過 0° 及 100° 兩點。如冰沸二定點認爲不確，學者可參攷書籍而再加以校正之。

實驗三

熱電偶之製成及訂正

目的：製成一通用之熱電偶並加訂正。

引言：試以不同之二金屬線銲接其兩端，且連一電流計而成閉路；如兩接端之溫度不同，則見電路中有電流通過，亦即云有電勢產生。此種繼續不斷之電流，其能量即取於熱端輸入之熱量，該現象為 1821 年 Seebeck 氏所發見者；其裝置通稱曰熱電偶。後據實驗及理論證實，得知熱電偶產生電勢之大小，與兩接端之溫度差有關，今設一接端恒保持在 0°C 則熱電勢為

$$E_t = at + bt^2,$$

或內 a, b 為二常數， t 為熱端之攝氏溫度。

故如將熱電偶之電勢與溫度，作一精確之訂正，則該器即有極廣之應用，其最主要者為測量溫度。且金屬線銲接處面積頗小，空間內任一定點之溫度不難藉以測出。熱電偶之熱容量頗小，此又為其另一種優點。

- 器材：(1)純銅絲及純鐵絲各一米(直徑 $\frac{1}{2}$ mm; 以下者)；
(2)玻璃管(3 mm; m;) 約二米；
(3)電位計整套；
(4)冰，水及電爐；
(5)醃，酒精，錫，鎳，鋅，鎳等純物品。

製造步驟：

- (一)取純粹之細銅絲及細鐵絲，長各一米。

(二)將小玻璃管截成一短長之段，連續套於兩金屬絲外，再將不同之兩端扭結，如此兩線除接端外既不致接觸，又不失可滷性。

(三)將扭端置于氫氧吹管火焰下或弧燈兩極間焙化之。使兩端成爲甚完美之銲接。

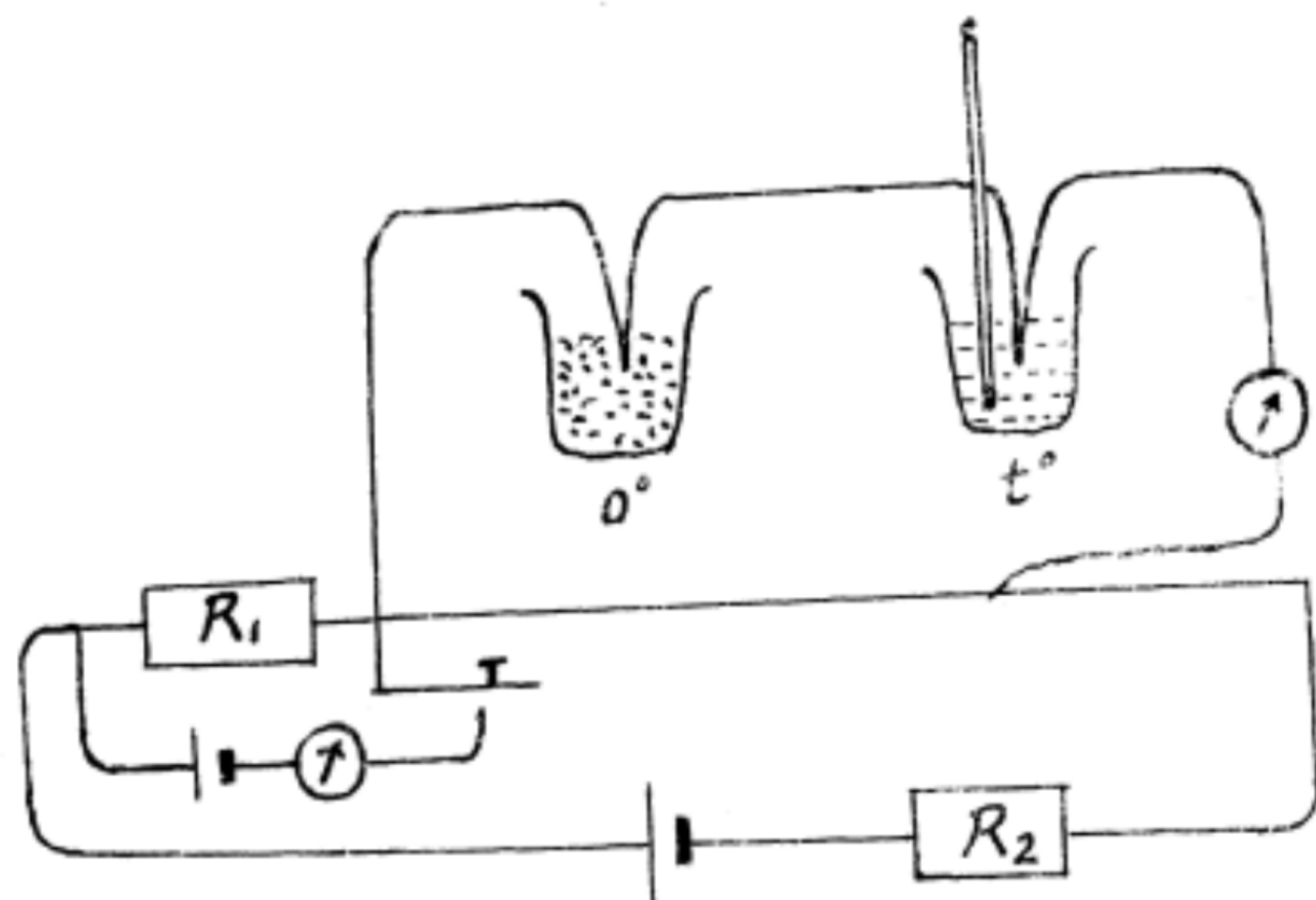


圖 3.1

(四)使一接端常置於冰內以永保 0°C ，而他端則可置於各種溫度中。

(五)最後將鐵絲中部剪斷，兩端如圖 3.1 連於已校正妥善之電位計上，則熱電偶裝置乃成。

訂正步驟：

(一)同置熱電偶之兩端於冰中，觀察其同溫度下電路中有無電流通過；如有電流，必爲絕緣體或各結觸點不良之故，應仔細檢查而設法消除之。

(二)在熱端訂正時所用之標準溫度選擇如下：

1. 水之冰點	0°C.	5. 錫之熔點	231.85°C.
2. 醚之沸點	34.6°C.	6. 鎊之熔點	320.9°C.
3. 酒精之沸點	78.3°C.	7. 鋅之熔點	419.4°C.
4. 水之沸點	100°C.	8. 銻之熔點	630.5°C.

實驗時，依次將熱端置入上列各種標準溫度內，藉電位計詳測每次發生之熱電勢。惟用各金屬之熔化點時，每種須另作一冷卻曲線以定之。

(三)最後，用熱端之各標準溫度為橫坐標，相當之熱電勢為縱坐標，作一訂正曲線，以備日後測溫之用。

附註：(1)電位計用法可參閱

Starbuck: E. and M., PP. 219--220.

(2)金屬熔點之冷卻曲線定法，可參閱

Grimsahl: Physics V, II, P. 71.

實 驗 四

牛頓之冷却定律

目的：藉實驗以證明牛頓之冷却定律。

引言：當一加熱後之物體置於空中，則因熱之對流及輻射關係，必散熱於四周而漸冷。設兩者之溫度差愈大，則散熱亦愈速。故“一物體之冷却率與該物體和其周圍間之溫度差成比例”此即牛頓之冷却定律。

設 T 為物體之溫度， T_1 為其周圍之溫度， t 為時間，

$$\text{則有} \quad \frac{dT}{dt} = -K(T - T_1), \quad (4.1)$$

$$\text{即} \quad \frac{dT}{T - T_1} = -K dt,$$

$$\text{積分之} \quad \log(T - T_1) = -Kt + c.$$

設在 $t=0$ 時，物體初溫為 T_0 ，故

$$\log(T - T_1) - \log(T_0 - T_1) = -Kt,$$

$$\therefore T = T_1 + (T_0 - T_1)e^{-Kt}. \quad (4.2)$$

此比例常數 K ，視該物體之暴露表面及熱容量而不同。(4.2)式表示任何時間之溫度，可由已知 T_0 及 K 而算得之。

儀器：

- (1) 特種量熱器；
- (2) 溫度計二；
- (3) 天秤；
- (4) 停錶；
- (5) 水及燈火。

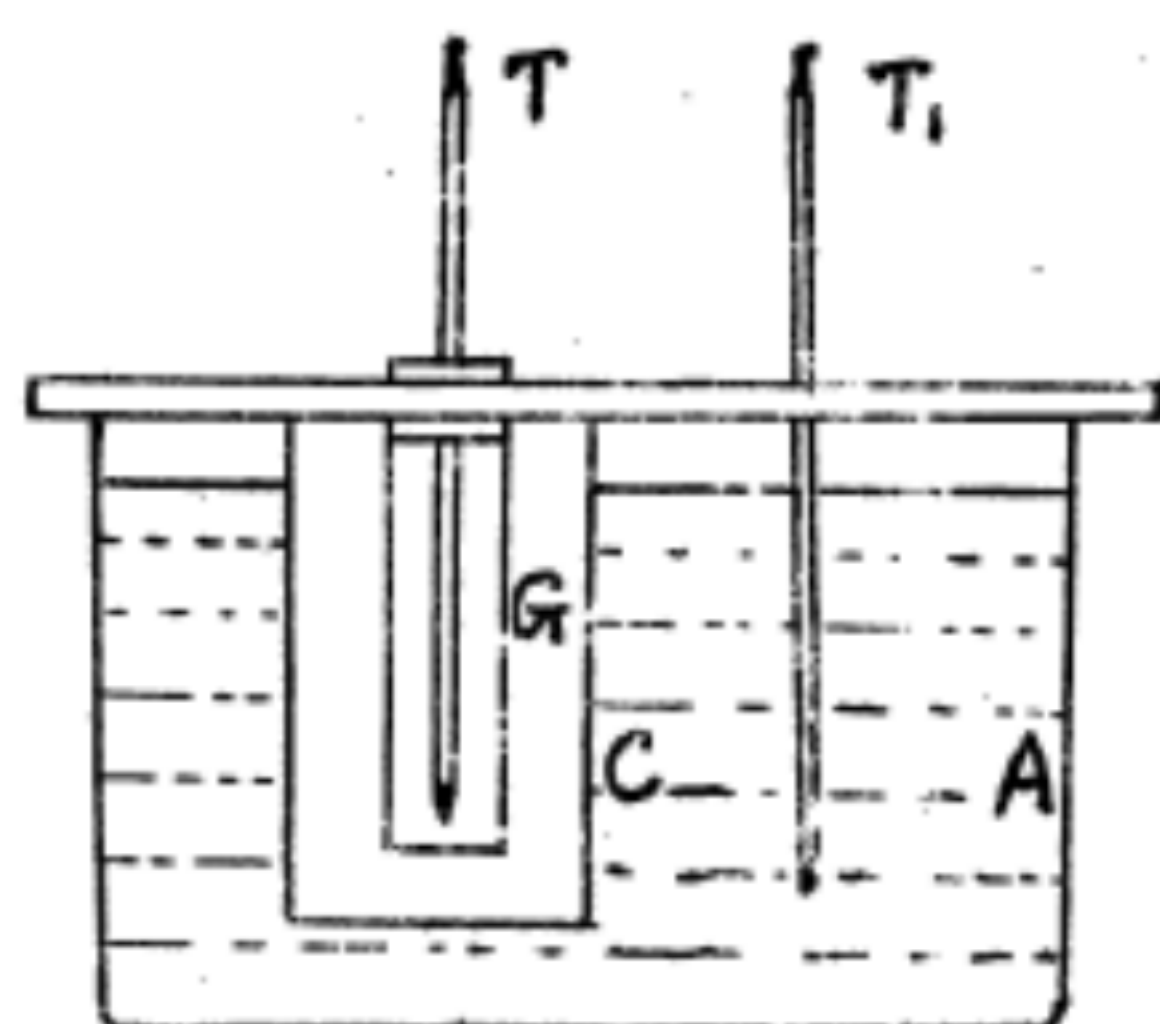


圖 4.1

本實驗所用之特種量熱器，如圖 4.1 所示： G 為金屬小圓筒，口上置以軟木塞及溫度計，懸於絕緣板上。小筒外圍，裝以雙層量熱器 C 及 A ，其間貯水，俾成定溫之箱。

實驗步驟：

- (1) 盛蒸溜水於 G 筒內約滿四分之三，將筒浸入熱水杯中煮之，待筒內水達 80°C . 左右，取出揩乾置於 C 筒內原位。
- (2) 每隔半分鐘記錄 T 及 T_1 之示度。待冷卻率漸低，則可隔一分鐘或二分鐘記之。（注意： T_1 之示度始終不應有顯明之變化）
- (3) 於是將記錄列表如下

時 間 (分)	T 之 示 度	T_1 之 示 度
0	72.5°C .	12.2°C .
.5	71.8°	12.2°
1	70.1°	12.2°
1.5	69.0°	12.2°
2	67.8	12.2°
2.5	66.7	12.3°
—	—	—
—	—	—

- (4) 用 T 之示度作縱坐標，相當之時間作橫坐標，畫一曲線，以明 T 溫度與時間之關係。

(5) 從上曲線，測其各處之傾斜度（即該點所作切線與 t 軸相交角之正切函數），即得各點下降率 $\frac{dT}{dt}$ 。

(6) 再列一表，內含兩項，一為 $(T - T_1)$ 之值，而另一為相當之 $\frac{dT}{dt}$ 值。

(7) 最後用 $(T - T_1)$ 值作縱坐標，相當之 $\frac{dT}{dt}$ 值作橫坐標，畫一曲線。如方程式(4.1)成立，則結果必為一直線。

II 熱膨脹

實驗五

求固體之線膨脹係數

目的：測金屬棒之線膨脹係數。

引言：物體之形狀大小常因溫度起變化而隨之變化。在等向性(isotropic)物體，因其各方向作相同之膨脹，故其體膨脹係數，可由實測線膨脹係數以定之。金屬雖由極多數之小晶體所構成，但因此等小晶體，方位雜亂，故各方向之平均性質，可云相等，至於非等向性(anisotropic)之結晶固體，各方向之膨脹不惟不同，甚且有正負之別者。

固體長度因溫度而起之變化，據實驗結果，可以式表之如

$$L = L_0 (1 + at + bt^2 + ct^3 + \dots), \quad (5.1)$$

L_0 及 L 爲固體在 0°C 及 $t^\circ\text{C}$ 時之長， a, b, c 等爲常數。但通常 a, b, c 等常數依次遞減甚速，故爲簡單起見，式(5.1)可略爲

$$L = L_0 (1 + at) \quad (5.2)$$

式內之常數 a 名謂 0°C 與 $t^\circ\text{C}$ 間之平均線膨脹係數。嚴格言之，祇有

$\frac{1}{L} \frac{dL}{dt}$ 始爲 $t^\circ\text{C}$ 時 a 之真值。惟實際上設溫度差不過大，則亦可

用此平均係數代替 $\frac{1}{L}$ 度時之真值也。又通常所討論之 a ，係起始溫度爲 0°C 所定；但與其起始溫度非爲零之 a 相差甚微，均可視作相等，即普遍化爲

$$a = \frac{L_2 - L_1}{L_1 (t_2 - t_1)} \quad (5.3)$$

儀器：(1)金屬圓筒； (2)金屬棒； (3)光槓桿；
(4)溫度計二； (5)望遠鏡。

欲試驗之棒可置垂直圓筒中，筒之上下端，各有一小口，以備水蒸汽或水之出入，另有兩孔可橫插溫度計。

光槓桿係一三星之架，上置有小鏡，架之前足立于金屬棒頂，其他兩足則立于有溝槽之固定架上。今在離鏡約一二米處，置一縱立之標度及望遠鏡，如使金屬棒伸長前後兩次反射之標度像，均在望遠鏡中見到，則棒之伸長不難求出。

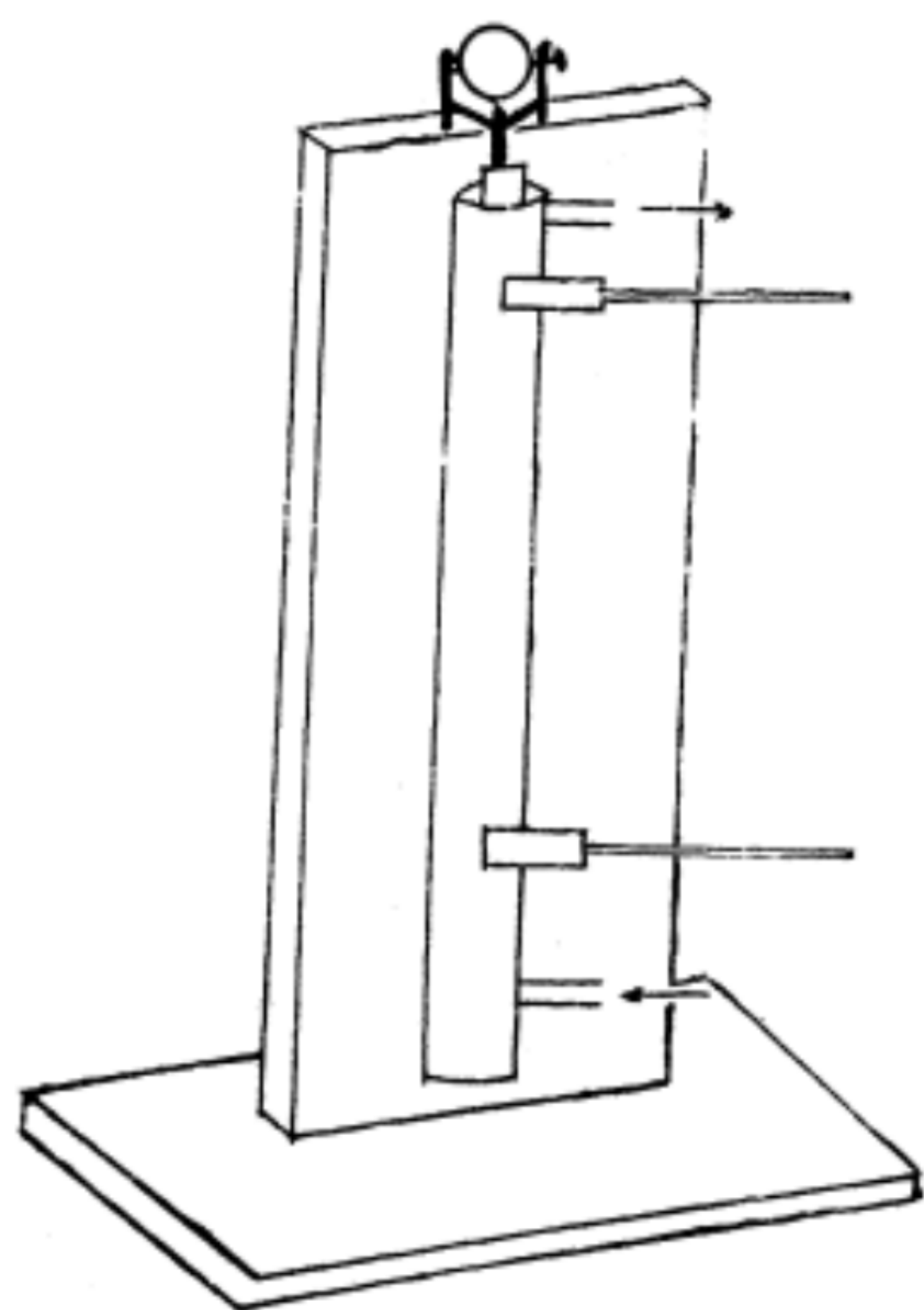


圖 5.1

實驗步驟：

- (1) 量棒長，須準確至 $\frac{1}{10}$ 耗。
- (2) 將儀器裝置畢，調節望遠鏡及標度，使能明晰見到，記錄此標度及溫度。
- (3) 令溫水由筒之下端流入，使溫度增至某一定之值時，再記錄

遠鏡所指示之標度。

(4) 繼續試驗四次，每次增加之溫度約為 15°C 。最後乃將蒸氣由上端通入筒中，而讀望遠鏡中之示度。

(5) 停止供給蒸氣，待棒之溫度復降至原始每次之值時，再讀望遠鏡之每次示度，以比較其是否未變。

(6) 量鏡至垂直縱標度之距離 D 。取下光槓桿而置于一紙上，以印得其三足中心之位置，自其前足中心畫一垂線於連後二足中心之直線，細測此垂直距離 k 。如以反射光線在標度上所移動之距離為 d ，則棒之伸長 l 乃為 $\frac{k d}{2D}$ 。

(7) 最後將各值代入(5.3)式計算 α ，並求其平均值。

實 驗 六

重量溫度計之訂正及其應用(一)

目的：訂正一重量溫度計，然後用以測水之膨脹係數。

引言：通常液體溫度計，所以示溫度之升高，乃利用球內之液體遇熱膨脹，經細管上升，由所附之刻度而讀出。同理，吾人亦可將此膨脹部分之液體，使之溢出，衡其重量，而得知溢出之體積，以表溫度，應用此理者即所謂重量溫度計。實計上，因據此以測溫度，比較繁瑣，用者甚鮮；每多以測液體之膨脹係數者，蓋取其簡確也。但吾人欲測定一液體之絕對膨脹，當非先知溫度計玻璃本身之膨脹不可。欲達此目的，可用一膨脹已知之液體注入，乃觀察其相對膨脹。水銀之膨脹係數為 0.0001818 ，其準確程度已被公認。本實驗先用水銀以測知玻璃管之膨脹，而後再利用以測定水之值。

儀器：(1) 重量溫度計； (2) 水銀(潔淨者)；
(3) 小玻璃杯； (4) 冰，沸水及燈火。

重量溫度計通常係由一英寸之 Pyrex 玻璃製造，其長約 $1.5''-2''$ ，上端吹成一灣形細管。實驗者可自試製之。

公式演導：本實驗須衡兩次溫度計盛滿不同溫度之液體之重。設在溫度 t_1, t_2 時球內盛滿液體之重各為 W_1, W_2 ；球之容積各為 V_1, V_2 ；同時液體之密度為 ρ_1, ρ_2 ，則



圖 6.1

$$W_1 = V_1 \rho_1, \quad W_2 = V_2 \rho_2,$$

如 α, β 表液體及玻球之膨脹係數，故

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{1 + \beta t_2}{1 + \beta t_1}, \quad \frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{1 + \alpha t_1}{1 + \alpha t_2},$$

$$\begin{aligned} \therefore \frac{W_1}{W_2} &= \frac{1 + \beta t_1}{1 + \beta t_2} \frac{1 + \alpha t_2}{1 + \alpha t_1} \\ &= \frac{1 + \alpha (t_2 - t_1)}{1 + \beta (t_2 - t_1)} \dots\dots\dots \text{approx.} \\ &= 1 + (\alpha - \beta) (t_2 - t_1) \dots\dots\dots \text{approx.} \end{aligned}$$

$$\therefore \beta = \alpha - \frac{W_1 - W_2}{W_2} \frac{1}{t_2 - t_1} \quad (6.1)$$

為較精確起見，上式可改為

$$\alpha - \frac{W_1}{W_2} \beta = \frac{W_1 - W_2}{W_2 (t_2 - t_1)} \quad (6.2)$$

實驗步驟：

(一) 細衡玻球(即如上製成之重量溫度計)。

(二) 將潔淨之水銀注于小玻杯內微熱之。

(三) 次圍玻球以銅絲網而加熱，並浸莖口於水銀內，待球冷卻時，則見有水銀漸漸滴入。

(四) 如此一熱一冷，反復進行，使球內注滿水銀為止。

(五) 待球漸冷後，置於冰屑內(如無冰時，較低溫之冷水亦可)，此時莖口仍不離開水銀。

(六) 次衡一空杯之重。俟球之溫度達穩定狀態，於是從冰中取出，此時莖口有水銀溢出使入空杯。

(七)復將玻璃球置于 hypsometer 裝置內，溢出水銀仍入空杯。再俟球達穩定溫度後，取出抹乾，衡其重即得 W_2 ；加以空杯所貯之水銀，即為 W_1 。而此時之 t_1 及 t_2 各為 0° 及 100° 。

(八)取 α 之值為 0.0001818，從(6.1)式以求 β ，即得玻璃球之絕對膨脹。

(九)應用以上所定之 β ，代入(6.2)式，如法以求水之 α 。但水之膨脹從 0° 至 100° 間，變化甚大，本實驗僅求 20°C 及 60° 之平均 α 即可。

實 驗 七

重量溫度計之應用(二)

目的： 用已訂正之重量溫度計，測固體之膨脹係數。

引言： 關於固體膨脹係數之測定法，常用者概為兩類：即比較法(Comparatormethod. 例如 Henning之矽管法)及光學法(Opticalmethod. 例如 Fizeau 之干涉法)。但此兩類方法，對於體膨脹係數而論，均為簡接之測定。在等向性之固體，似可由此測得一適當之值；在非等向性之結晶，則有不知所措之感。論及非等向性晶體之特性，實以 Mitscherlich 之解釋為嚆矢，學者可自查攷得之。

欲免除上述困難，當以利用重量溫度計之直接測定為唯一辦法。本實驗為簡便起見，雖以類似等向性(Quasi-isotropic)之金屬為實測材料，然其用意殊為補充比較及光學兩法之不足也。

- 儀器： (1) 玻管一節(最好已得實驗六之訂正者)；
 (2) 金屬塊(如銅、鐵、鋁等)；
 (3) 冰； (4) 水，燈火。

圖 7.1 為一現成儀器之形狀。

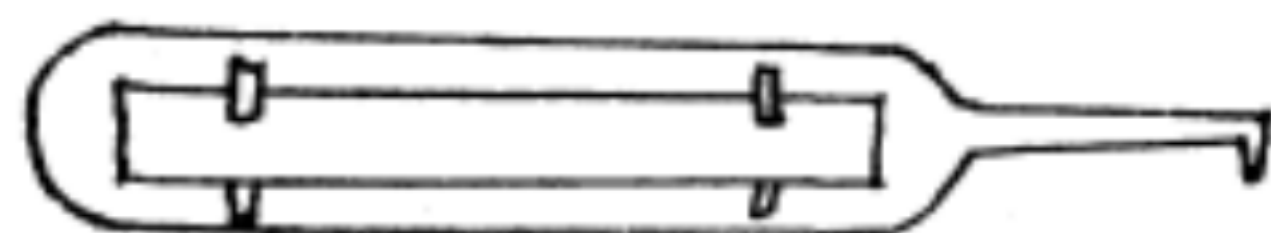


圖 7.1
圖 7.1

公式演導：

設水銀，玻管與固體之膨脹係

數各為 $m_1 g$ 及 α 。已知固體在 $t_1^\circ\text{C}$

時之重量及密度為 W_1' 及 ρ_1' ，則熱至 t_2° 時之體積當為

$$\frac{W_1'}{\rho_1'} \{1 + \alpha(t_2 - t_1)\} .$$

又設此器內空餘部份，在 t_1° 時盛密度 ρ_1 之水銀 W_1 克，至 t_2° 時內留 W_2 克，而體積乃為

$$\frac{W_2}{\rho_1} \{1 + m(t_2 - t_1)\}$$

同時，在 t_2° 時，玻器之全容積已為

$$\left(\frac{W_1'}{\rho_1'} + \frac{W_1}{\rho_1} \right) \{1 + g(t_2 - t_1)\} .$$

由此吾人可得方程式：

$$\begin{aligned} & \left(\frac{W_1'}{\rho_1'} + \frac{W_1}{\rho_1} \right) \{1 + g(t_2 - t_1)\} \\ & = \frac{W_1'}{\rho_1'} \{1 + \alpha(t_2 - t_1)\} + \frac{W_2}{\rho_1} \{1 + m(t_2 - t_1)\} . \quad (7.1) \end{aligned}$$

如已知其他各值， α 即可由上式求出。

實驗步驟：

(一)先將欲測之固體塊鏤成一圓柱形，近端處各釘三小脚；細衡其重，並測密度。

(二)取 Pyrex 玻管一節，置固體柱於其內，而吹成一重量溫度計，狀如圖 7.1 所示。

(三)衡全體之重。並一熱一冷，照實驗五法注入水銀使滿。

(四)與上實驗同樣，求出玻管空餘部份，在冰點及沸點時各所貯之水銀重量，即 W_1 與 W_2 之值。

(五)最後，用 0.0001818 代 m , 13.59 代 ρ_1 , 如 g 業已測得，則由 (7.1) 式可計算 α 矣。

附注： 甲•因 W_1'/ρ_1' 爲固體在冰點時之體積，如時間充分宜取冰水以求其密度；否則，用室溫時體積代之亦無大礙。

乙•倘所用玻管之 g 爲未知者，應事先做成一重量溫度計照實驗六法測定之。

丙•如欲測之固體能被水銀所侵蝕者，須另擇適當液體代替之。

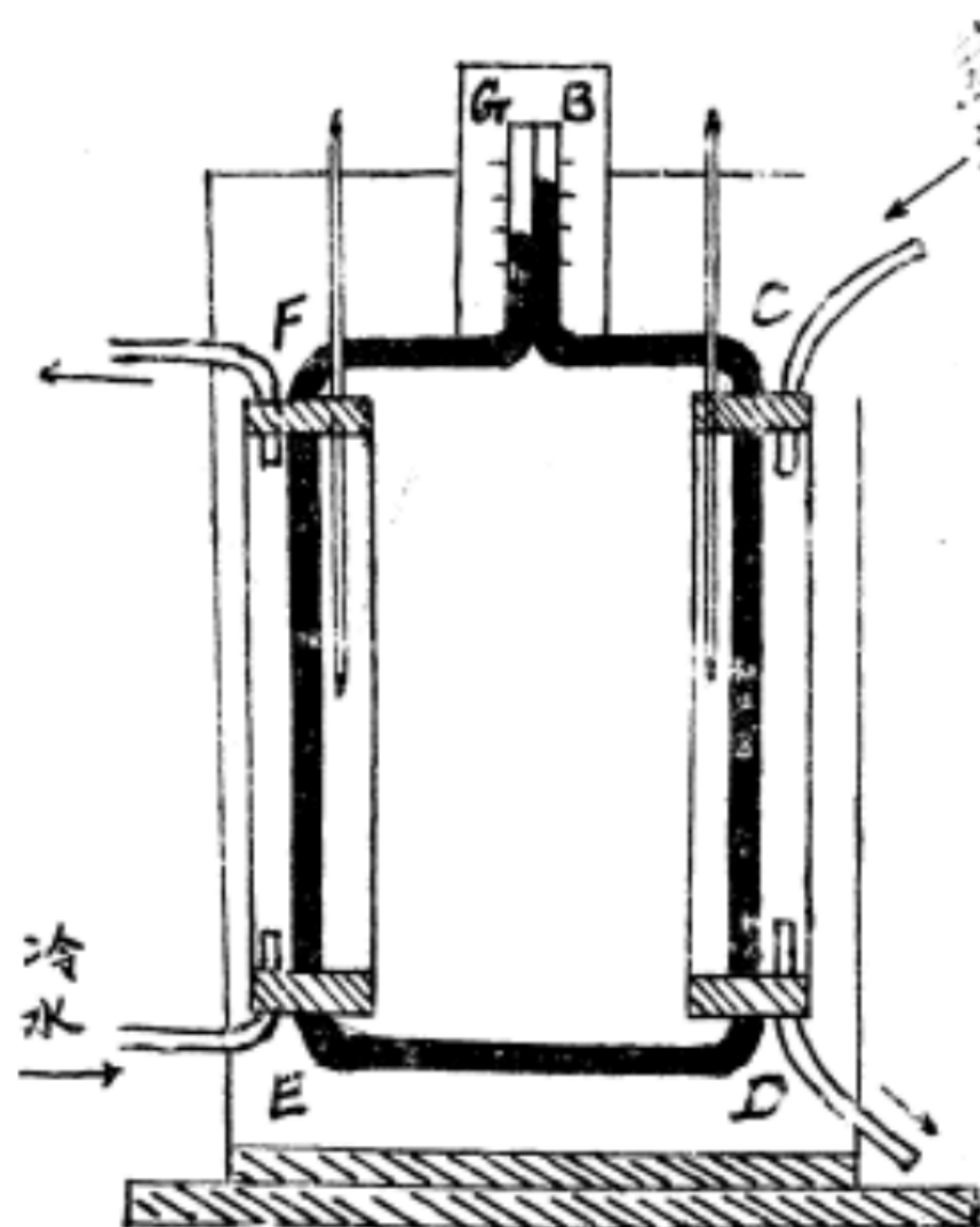
實驗八

用絕對法測水銀之膨脹係數

目的： 利用液體靜力學原理，以測水銀之絕對膨脹係數。

引言： 通常測定液體的膨脹時，因貯盛液體之器皿常亦膨脹之故，結果多為像似的膨脹。本實驗係根據液體靜力學原理，無須先知貯器之膨脹係數，故稱絕對法。

儀器： (1)絕對膨脹器； (2)潔淨之水銀；
(3)溫度計二(0-100°C)； (4)精密測高器；
(5)蒸氣鍋； (6)冷水源。



絕對膨脹器為一長玻璃管彎成， $CDEF$ 成一矩形。左柱 FE 之外圍通以冷水；右柱 CD 之圍通以蒸氣，以期各柱溫度之穩定。

公式演導：

今左右兩管溫度既不同，故兩管水銀之密度亦異。欲維持液體靜力學之壓力平衡，則熱管之水銀柱面，當較冷柱為高。今設 CD 與 FE 之高同為

H ，水銀之密度為 ρ 。當實驗時冷水之溫度為 t ，空氣之溫度為 t' ；並最後測得 B, G 兩管水銀面之位各為 h_1, h_2

故有

$$h_1 \rho_{t'} + H \rho_{100} = h_2 \rho_t + H \rho_t$$

$$\text{即} \quad (h_1 - h_2) \rho_{t'} = H(\rho_t - \rho_{100}) \quad (8.1)$$

令 m 爲水銀 100° 至 t° 之平均膨脹係數，則

$$\frac{V_{100}}{V_t} = \frac{\rho_t}{\rho_{100}} = \{1 + m(100 - t)\},$$

$$\text{即} \quad \rho_t = \rho_{100} \{1 + m(100 - t)\};$$

$$\text{同樣} \quad \rho_{t'} = \rho_{100} \{1 + m(100 - t')\}.$$

將此兩值代入(8.1)，即得

$$m = \frac{h_1 - h_2}{H(100 - t) - (h_1 - h_2)(100 - t')} \quad (8.2)$$

實驗步驟：

(一)將矩形長玻管洗滌清潔，並使完全乾燥。

(二)從一管口，徐徐注入潔淨之水銀，同時並輕搖儀器，使水銀上下左右流動，氣泡即被逐出。如此漸續注入水銀，直至離管口約三四厘米。

(三)此時左右兩管之溫度相同，兩水銀面應同高。否則，必仍留氣泡在內，繼續微搖儀器。

(四)將左管下端接於冷水管，使水自下流入，自上流出；將右管上端接於蒸氣鍋，使水蒸氣由上流入，由下流出。

(五)此時不斷實測冷水入口處及出口處之溫度，而記其平均值 t' ；再觀察室溫 t ，並大氣壓力以視此時水之沸點是否 100°C 。

(六)待 B, G 兩管內水銀柱面已恆定不變時，乃藉精密測高器 (Cathetometer) 細測 h_1 及 h_2 之值各五次。

(七)最後用米尺量 H 之值。由(8.2)式計得 m 。

實 驗 九

不同溫度下水之密度之測定

目的：用固體沒入水中，量其浮力，以求不同溫度下水之密度。

引言：如將一已衡得重量之固體，沒入不同溫度之水中，則據 Archimedes 原理，此固體在各溫度下所排去水之重量可以得知。設此固體在 0°C 之體積為 V_0 。其膨脹係數為 α ，則在 t° 時之體積為 $V_0(1+\alpha t)$ 。令 ρ_t 表水在 t° 之密度，該固體因沒入水中而失去之重乃為 $V_0(1+\alpha t)\rho_t$ ；此值可由天秤衡出，命其為 W_t ，因此

$$\rho_t = \frac{W_t}{V_0(1+\alpha t)} \quad (9.1)$$

倘因事實困難，不能使水溫直降至零，吾人亦可取盡可能低溫 t_1 之水代之，惟(9.1)式須改為。

$$\rho_t = \frac{W_t}{V_{t_1} \{1+\alpha(t-t_1)\}} \quad (9.2)$$



圖 9.1

- 儀器： (1) 通用量熱器；
 (2) 天秤； (3) 彎頸坡球；
 (4) 溫度計； (5) 水及燈火。

本實驗所用之固體為一彎頸坡球如附圖，內盛鉛丸，恰可沉入水中，而整個封閉。球之 α 值為 0.000025 。

實驗步驟：

(一)取馬尾或極細銅絲一根長約30釐，一端繫於天秤之一邊，通過盤底圓孔，他端懸彎頸玻璃球，正可落入量熱器之中心。

(二)於是在他盤加砝碼，衡得此玻璃球在空氣中之重量。

(三)將已沸之水，注入量熱器，因玻璃球受水之浮力，天秤必不平衡。此時一面攪動熱水，使溫度均勻；一面減去盤上砝碼，直至使球似稍重，瞬刻後以浮力略增天秤指針正對零時，速記水之溫度，再記取下之砝碼。

(四)如法約每隔十度，使天秤平衡一次，記溫度及砝碼一次，直降至近於室溫而止。

(五)再換溫度 t_1 之冷水(最好內加冰屑)入量熱器中，測其對玻璃之浮力 W_{t_1} ；從水之密度表中查得 t_1 度時水之密度為 ρ_{t_1} ，則得 $V_{t_1} =$

$\frac{W_{t_1}}{\rho_{t_1}}$ 。於是用相當之 W_t 代入(9.2)式，算出各個 ρ_t 之值。

(六)最後，以溫度 t 為橫坐標，相當之 ρ_t 為縱坐標作一曲線，以明水之膨脹與溫度之關係。

附註：(甲)由公式 $\rho_0 = \rho_t (1 + \beta t)$ ，本實驗亦可作為各溫度下水膨脹係數之測定。

(乙)如彎頸玻璃球無現成者，亦可自己做成，惟 α 之值必須依實驗六法測定之。

實 驗 十

測氣體之膨脹係數

目的： 在壓力不變下測空氣之容積膨脹係數。

引言： 當一定質量之氣體受熱時，其膨脹情形視其容積或壓力之變化若何而定。通常所討論之觀點有二：其一係維持其壓力不變，而視其容積與溫度之關係；其他則係維持其容積不變，而視其壓力與溫度之關係。至於所表示之方程式，通常用

$$V_t = V_c(1 + at), \quad (\text{定壓下}) \quad (10.1)$$

$$P_t = P_c(1 + bt), \quad (\text{定容下}) \quad (10.2)$$

或
$$a = \frac{V_t - V_c}{V_c t}, \quad b = \frac{P_t - P_c}{P_c t}.$$

a 稱爲容積膨脹係數， b 稱爲壓力係數。根據 Charles 與 Gay-Lussac 二人實驗結果，知 a 之值約爲 $\frac{1}{273}$ 或 0.003660，且幾與壓力係數 b 之值相等。但據 Regnault 之研究，在低壓或高溫下 a 之值始能與 b 相近。

茲附舉數種常用氣體之膨脹係數及壓力係數如下表：

氣體種類	a	b
空氣	0.003671	0.003674
二氧化碳	0.003722	0.003711
氫	0.003661	0.003663
氮	0.003670	0.003671

溫度： 0°C ， -100°C .； 壓力：一大氣壓。

儀器：(1) 氣體膨脹係數測量器(圖10.1)；

- (2) 大杯(H)； (3) 溫度計；
(4) 冰及水； (5) 燈火。

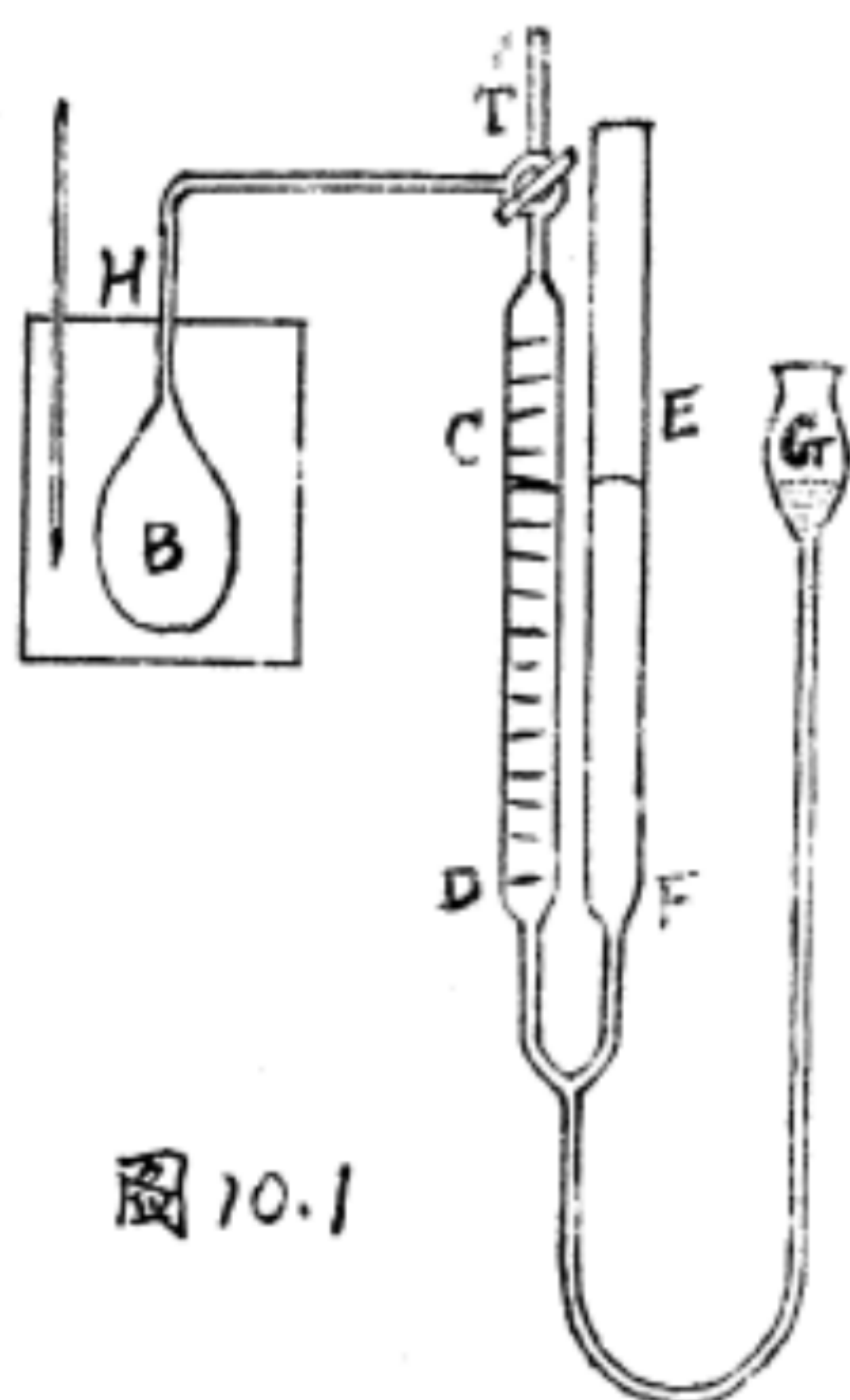


圖 10.1

測氣體膨脹係數用之儀器，如附圖所示， B 為一玻璃球，與 U 形管壓力計相連，此外 G 管為調節壓力之用。

實驗步驟：

(1) 先將玻璃球置入冰水筒內，並開龍頭 T ，使 B 球及 CD 與外界相通。調整 G 管，使 CD 管中之水銀面正對刻度零處。(此時當假定 B 球加連通管之容積及 CD 管每刻度之容積為已知值)。

(2) 約十分鐘後，玻璃球內空氣可冷至 0°C ，轉龍頭使 B 與 CD 相通而和外界隔絕。

(3) 取去冰水杯；原位換以冷水筒，則 CD 管中之水銀面必向下降，此時可調整 G 仍使 CD 與 EF 兩管之水銀面在同一平面上，則記其刻度之度數並用溫度計測冷水之溫度。

(4) 次用燈以熱杯中之水，約增加 10°C 後，再移下 G 管，使 CD 、 EF 之水銀面同高而記水銀面刻度及水之溫度。

(5) 如此每次增加之溫度約為 10°C ，繼續試驗，而至水之沸點為止。

(6) 最後用 0°C 時之 V_0 ，與每次之 t 及 V_t 代入(10•1)式以計算各次 α 之值。並平均之以與附表相比較。

附註：(10•1)式雖為本實驗之基本方程，惟因所用之儀器常有兩項不可免之誤差須加改正：即(1)因貯器受熱而膨脹；(2)因貯器外一部分連通管未曾受熱。學者可參閱

Worsnop & Flint: Advanced practical physics, Pp. 190—192

III 量熱學

實驗十一

混合法測固體之比熱

目的：用混合法測金屬塊之比熱。

引言：設有一量熱器，其水當量為 W ，內盛水 M 克，其起始溫度為 θ_1 。今若投以質量 m ，比熱 S ，溫度為 θ_2 之物體入其中，混合之後，其終溫為 θ ，則據熱量轉移原理

$$S = \frac{(W+M)(\theta - \theta_1)}{m(\theta_2 - \theta)} \quad (11.1)$$

混合法之理論固如此簡單，但實驗之結果常不易準確。其主要因概由於熱量之散失，為補正此項損失，應將(11.1)式改爲

$$S = \frac{(W+M)(\theta + \Delta\theta - \theta_1)}{m(\theta_2 - \theta)} \quad (11.2)$$

內 $\Delta\theta$ 為應加之補正值，倘進行實驗十分仔細，則該值可減至極微。熱量之損失，一般以輻射為最重要，故 $\Delta\theta$ 可由 Regnault 氏法求得，茲述其原理如下：

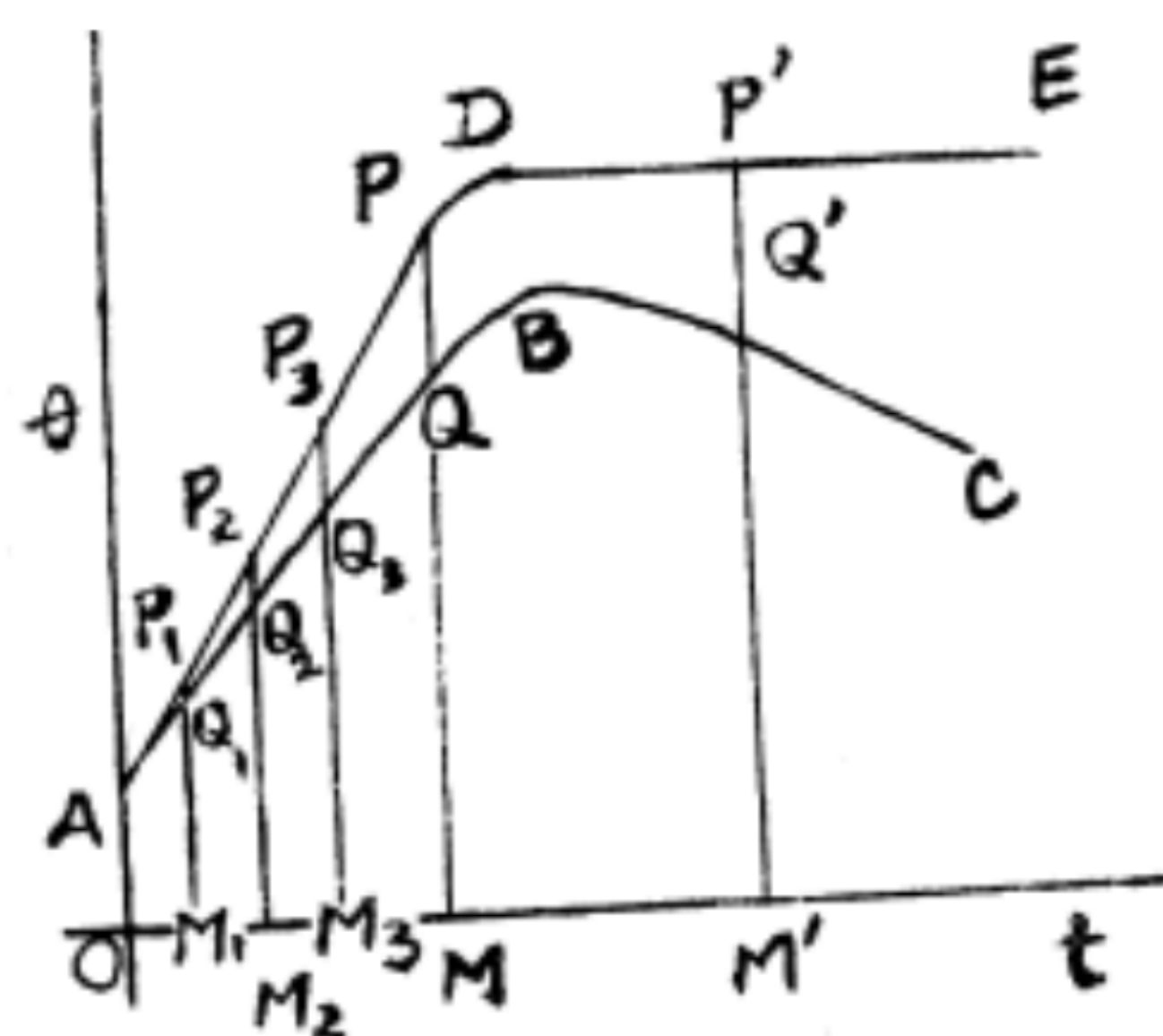


圖 11.1

當加熱之物體一投入量熱器之後，如吾人立刻開始每隔半分鐘記其溫度一次，直至最高溫度後尚繼續記若干次。此項須記錄可繪成如圖11.1之 ABC 曲線；倘熱量無輻射之得失，其曲線必如 ADE ，而終溫保持定值如 DE 部份之水平。

吾人可應用牛頓之冷却律，從曲線 ABC 而導出 ADE 。

如將 t 軸分爲小區間 OM_1, M_1M_2, M_2M_3 等，其值各爲 $\delta t_1, \delta t_2, \delta t_3$ 等，並令各區間之平均溫度各爲 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 等。於是據冷却律在 δt_1 內由於輻射之散失乃爲 $k\theta_1 \delta t_1$ ，內 k 爲一常數，

$$\therefore P_1 M_1 = Q_1 M_1 + k\theta_1 \delta t_1;$$

同樣在 M_1M_2 內之損失爲 $k\theta_2 \delta t_2$ ，即可得

$$P_2 M_2 = Q_2 M_2 + k\theta_1 \delta t_1 + k\theta_2 \delta t_2,$$

照此法可進行至任何範圍。倘吾人分時間之區間爲極小，使 $Q_1 M_1, Q_2 M_2, \dots$ 幾與 $\theta_1, \theta_2, \dots$ 相等。茲令 Θ 表 ADE 曲線在 t 時之縱坐標， θ 表 ABC 曲線在同時間之值，則有

$$\Theta_1 = \theta_1 + k\theta_1 \delta t_1,$$

$$\Theta_2 = \theta_2 + k\theta_1 \delta t_1 + k\theta_2 \delta t_2;$$

以至一般爲：

$$\Theta_n = \theta_n + k(\theta_1 \delta t_1 + \theta_2 \delta t_2 + \dots + \theta_n \delta t_n),$$

$$= \theta_n + k(\text{ABC 曲線下自 } OA \text{ 至 } \theta_n \text{ 間之面積}),$$

$$\text{即 } \Theta_n = \theta + k \int_0^t \theta dt.$$

因此，吾人可細心繪描 ABC 曲線，並計算其至 θ 間之面積，將此面積乘以 k ，即得此 θ 應加之補正值。

吾人于此實驗之目的，在求沿 DE 之任何點 P' 之縱坐標；其法由圖 $OAQ'M'$ ，而應用補正值于 $Q'M'$ ，即得 $P'M'$ 。

至於如何求得 k ，則先沿 BC 求其冷却律，從一平均溫度 θ 而計算 $\frac{d\theta}{dt}$ ，于是

$$k = \frac{1}{\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (\text{牛頓冷却律}).$$

- 儀器： (1) 量熱器，攪桿及量熱器外筒；
 (2) 溫度計($\frac{1}{5}^{\circ}$)； (3) 蒸汽發生器；
 (4) 夾層圓筒； (5) 天秤；
 (6) 停錶； (7) 燈火； (8) 金屬塊。

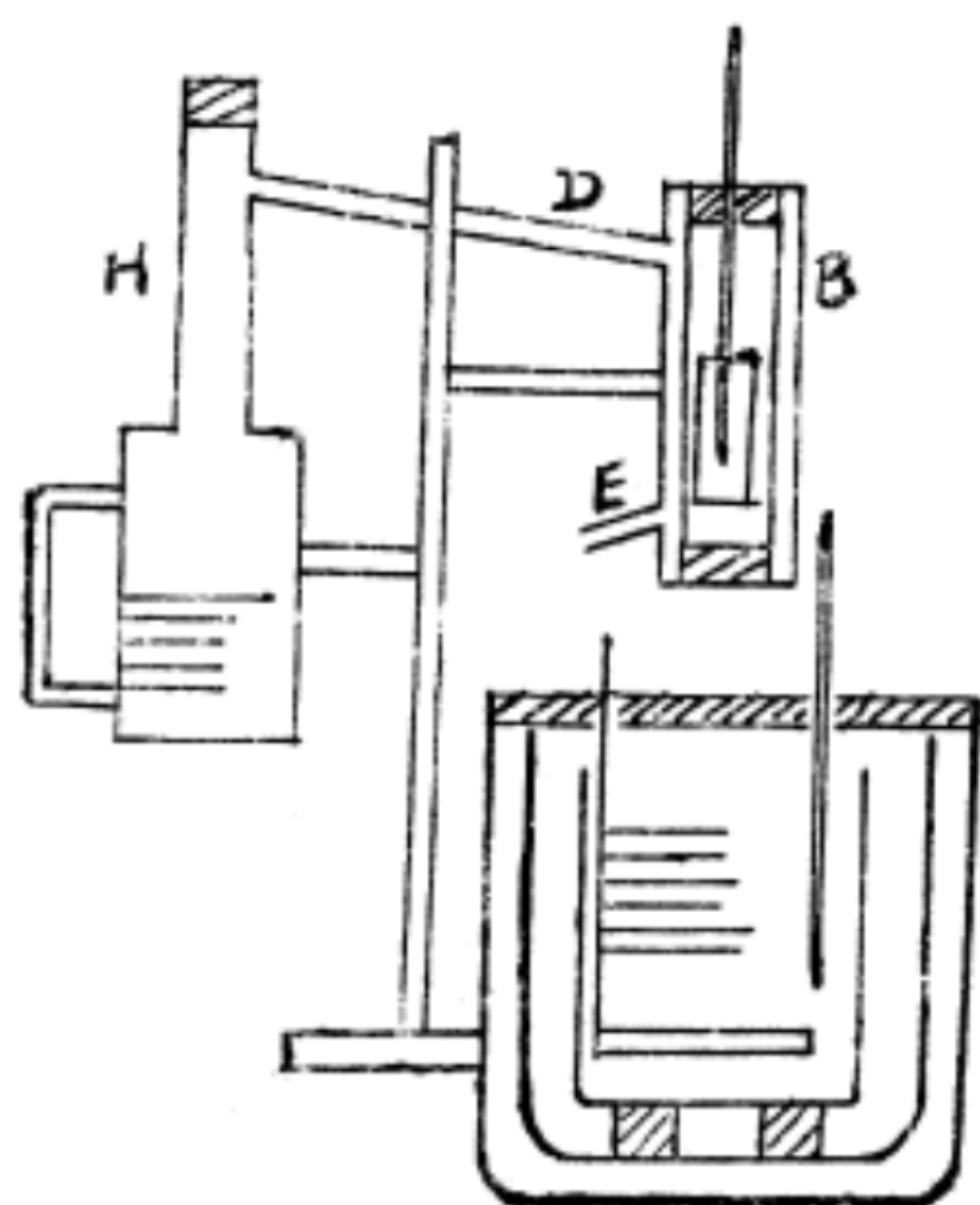


圖11•2所示為常用之量熱器，由內外兩金屬筒而成。B為夾層圓筒，中置固體及溫度計。蒸汽自H發生由D管送入夾層中，有餘則由E管放出。

實驗步驟：

(一) 細衡欲測比熱之金屬塊，得其重為 m ，藉細線懸諸夾層筒中並與溫度計接近。

(二) 用火燒 H 發生蒸氣，導蒸汽入 D 管以熱金屬塊。一面衡空量熱器及攪桿之重，乘以比熱而得其水當量 W 。(同時最好將溫度計之水當量亦測得加入)

(三) 注蒸溜水于量熱器約達半滿，再衡之，于是知冷水重 M 克。

(四) 當金屬塊已在夾層筒中加熱至數十分鐘，察其固定不變時之溫度 θ_2 ；並視量熱器內之冷水溫度 θ_1 。

(五) 置量熱器於圓筒下，並移去蓋板，使金屬塊迅速落入水中，但毋使水滴濺出。同時立即移出量熱器，加上蓋板。

(六)此時在固體落入量熱器開始，每隔半分鐘記溫一次，並不時以攪桿攪水，直達最高溫度後再記十分鐘而止。

(七)由於後半部溫度下降時之記錄，吾人可求任何點之冷卻率，今取某溫度 θ 而計算其冷卻率 $\frac{d\theta}{dt}$ ，乃在 $\frac{d\theta}{dt} - \theta$ 為軸之坐標紙上作 B 點。又當達室溫時 $\frac{d\theta}{dt}$ 之值為零，則可再得一點 A 。據牛頓冷卻律，過 A, B 所作之直線，可定任何 θ 值下之 $\frac{d\theta}{dt}$ 。

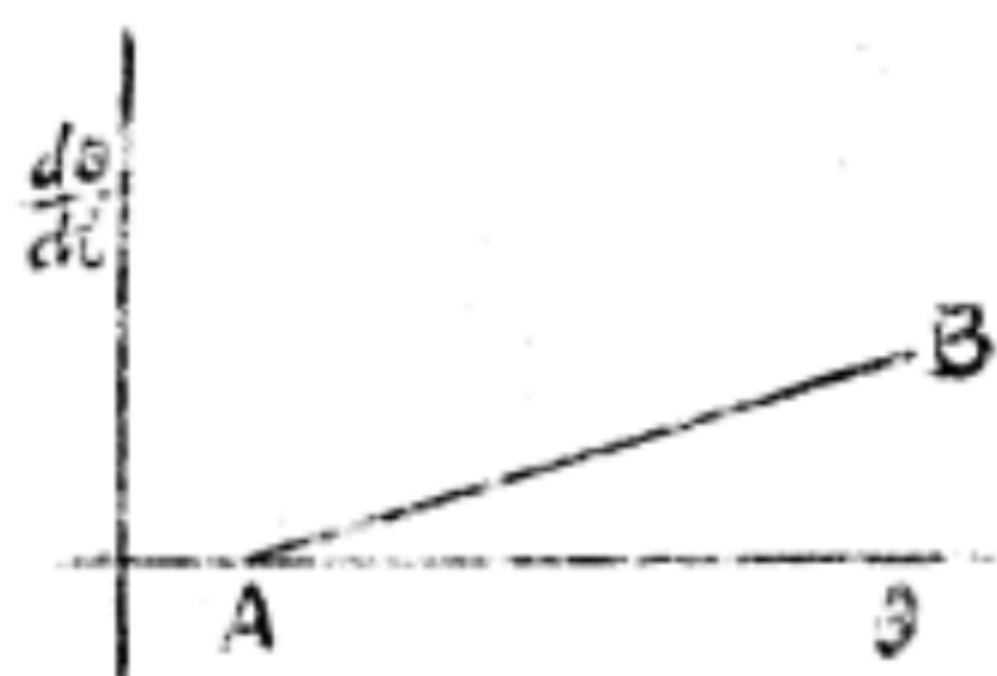


圖 11.3

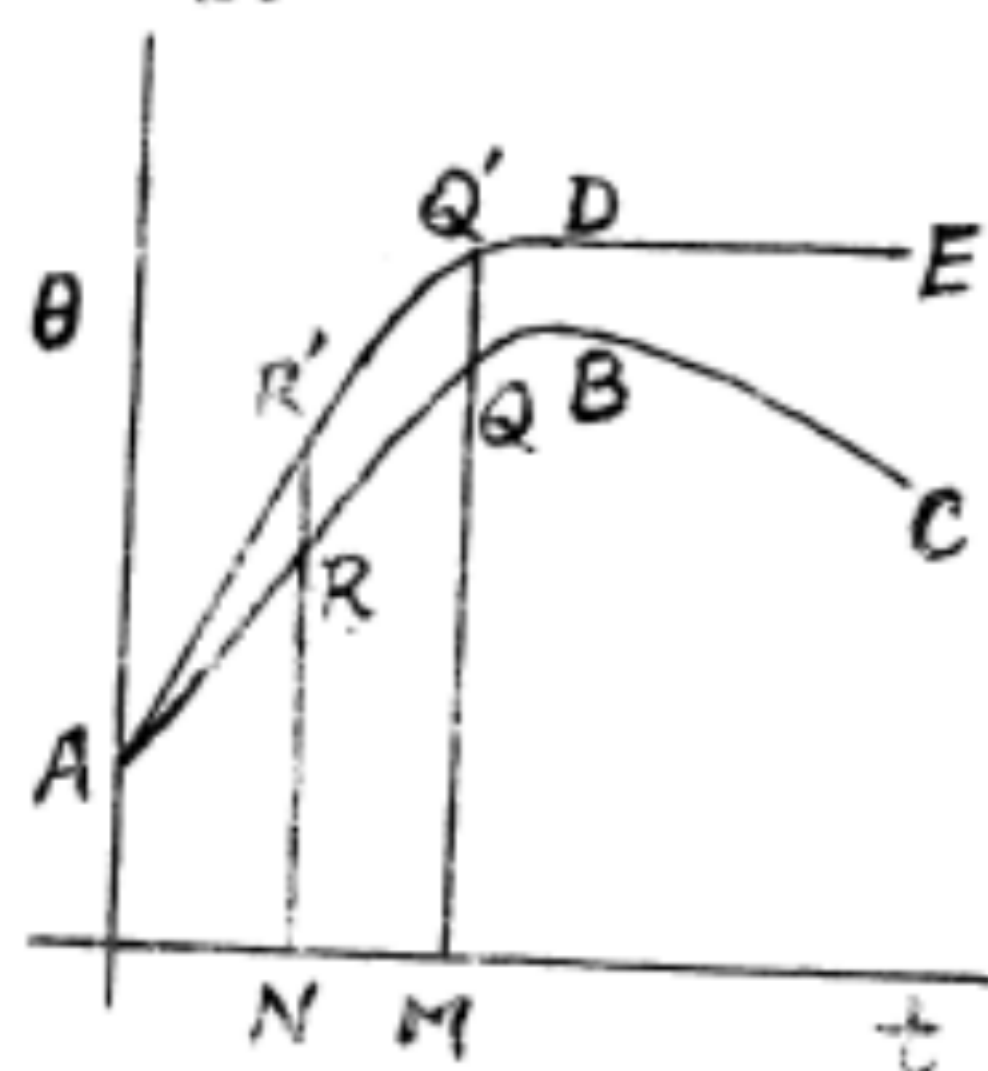


圖 11.4

(八)次將全部記錄，以時間為橫坐標，溫度為縱坐標，繪成曲線如 ABC 。再將曲線分成近似直線之線段 AR, RQ 等。由圖 11.3 查與 AR 間平均溫度相等之 $\frac{d\theta}{dt}$ ，以時間 ON 乘之，此乘積即補正值 $\delta\theta_1$ ，加于 NR 上即得 NR' 。同樣算出 NM 時間內由于熱失之補正值 $\delta\theta_2$ ，加 $(\delta\theta_1 + \delta\theta_2)$ 於 MQ 上即得 MQ' 。照法繼續行之，直至最高縱坐標延 DE 為水平而後止。

(九)最後之最高縱坐標即為 $(\theta + \Delta\theta)$ ，於是將各值代入(11.2)式內以計算金屬塊之比熱 S 。

實驗十二

冷卻法測液體之比熱

目的：用冷卻法測液體之比熱。

引言：冷卻法測比熱。係 Dulong 及 Petit 二氏所創始最適宜於測液體之用。設一已加熱之物體，任之冷卻，則在時間 dt 內放射之熱量 dQ 可書為

$$dQ = Af(\theta) dt,$$

內 A 依物體之表面積及輻射力而定； $f(\theta)$ 為物體與四周溫度差 θ 之一函數，惜此函數至今尙未能完全明瞭。

設在 dt 時間內物體降低之溫度為 $d\theta$ ，則 $dQ = mSd\theta$ ；內 m 及 S 各表物體之質量及比熱。于是

$$mSd\theta = Af(\theta) dt,$$

或
$$t = \frac{mS}{A} \int_{\theta_2}^{\theta_1} \frac{d\theta}{f(\theta)},$$

此 t 為物體自 θ_1 降至 θ_2 所經之時間。

同理，設有另一物體，在同情況下作與上相同溫度之冷卻，則

$$t' = \frac{m'S'}{A'} \int_{\theta_2}^{\theta_1} \frac{d\theta}{f(\theta)},$$

倘兩物體為同一表面積，即 $A = A'$ ，故

$$\frac{mS}{t} = \frac{m'S'}{t'}, \quad (12.1)$$

據此，今設有二種液體之質量為 m, m' ，比熱為 S, S' ，先後注入於水當量為 W 之量熱器內，而使之同樣冷卻，故式(12.1)可書為

$$\frac{W+mS}{\rho} = \frac{W+m'S'}{\rho'} \quad (12\cdot2)$$

倘取一液體爲水($S=1$)，則他液體之比熱可定矣。

- 儀器： (1) 冷却法測比熱儀器； (2) 溫度計 ($\frac{1}{10}^{\circ}$) 二；
 (3) 天秤； (4) 停錶； (5) 燒杯及燈火；
 (6) 蒸溜水及欲測比熱之液體如甘油，松節油。

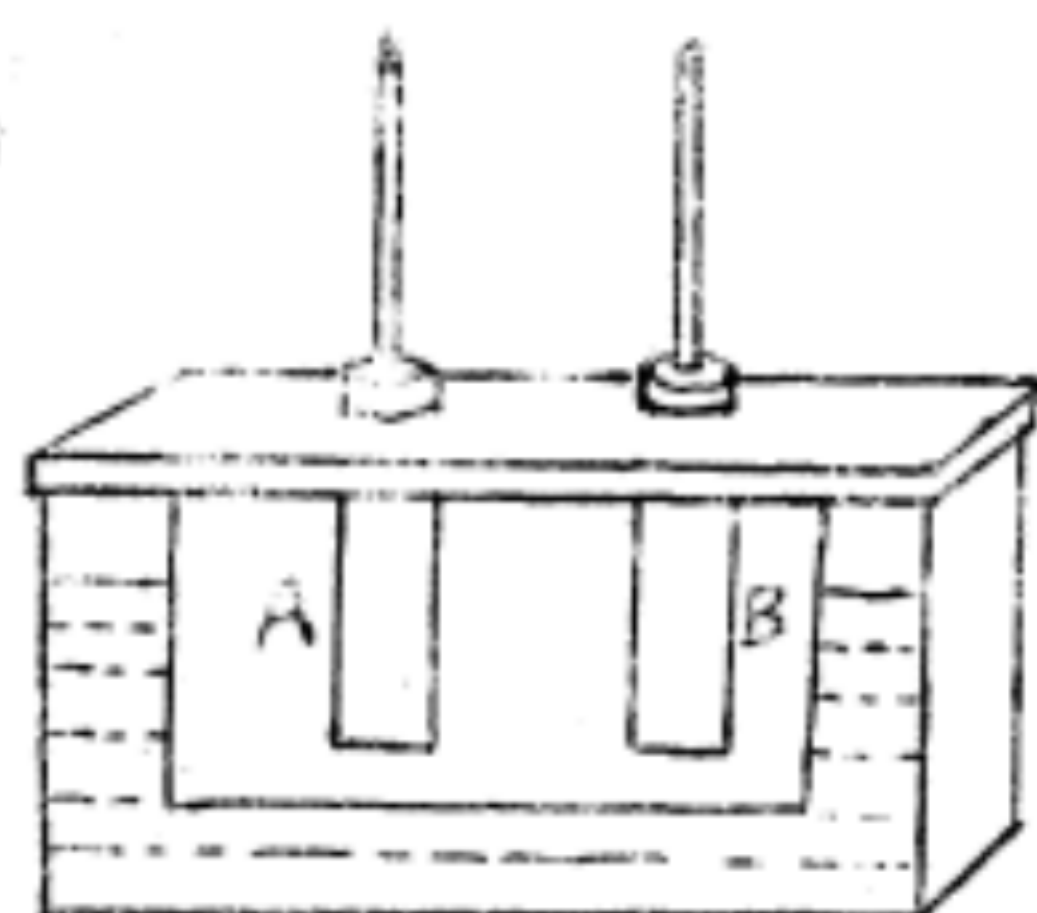


圖 12.1

圖 12.1 所示爲通常冷却法測比熱之儀器， A, B 爲二鋁質或銅質之小量熱器，口上各置以軟木塞及溫度計，同挂于絕緣蓋板上。量熱器外圍有雙層套桶，雙層空間可盛以水。

實驗步驟：

- (1) 抹乾量熱器 A (或 B)，並衡其重，乘以物質之比熱，得其水當量 W 。
- (2) 注 A 以蒸溜水約滿三分之二，浸入熱水杯中煮之，達 70°C 左右迅速揩乾外面，裝於原位。
- (3) 紀錄每隔半分鐘 A 器內溫度計之數值，如此直降至 30°C 爲止。
- (4) 然後取出 A 器，連水衡之，得水之淨重 m 。
- (5) 於是將水傾出，使之乾燥；注以同樣滿欲測之液體。照樣熱之而記其冷下之溫度，再衡液重爲 m' 。
- (6) 當記錄溫度時，亦須不時注意大桶中水之溫度是否變化，如

變化甚微，可酌取其平均值；否則，水與液體須各盛一器，而同時進行記溫始可。

(7) 上述實驗完畢後，將各液體之溫度與時間列成一表，第三項書桶水之溫度。

(8) 以時間為橫坐標，液溫與桶溫之差為縱坐標，在同圖上作二曲線略如圖12.2。設 AB 為液體之曲線， A_0B_0 為水之曲線。

(9) 取二適當溫度差 θ_1 (如 40°)

圖12.2

及 θ_2 (如 30°)，作與橫軸平行之二

線，各割曲線于 A, A_0 及 B, B_0 ，則因 $\theta_2 B_0 - \theta_1 A_0 = t$ ， $\theta_2 B - \theta_1 A = t'$ 。代各已知值入方程(12.1)，計算該液體之比熱 S' 。

附註：倘量熱器之質料不易明辯，則水當量無從得知。於是必須先將量熱器之比熱求得，其法以 A, B 二器俱用水，但一器之水較他一為多，照上述實驗記冷却之時間及溫度，設 C 為量熱器之比熱，此時計算之公式可書為

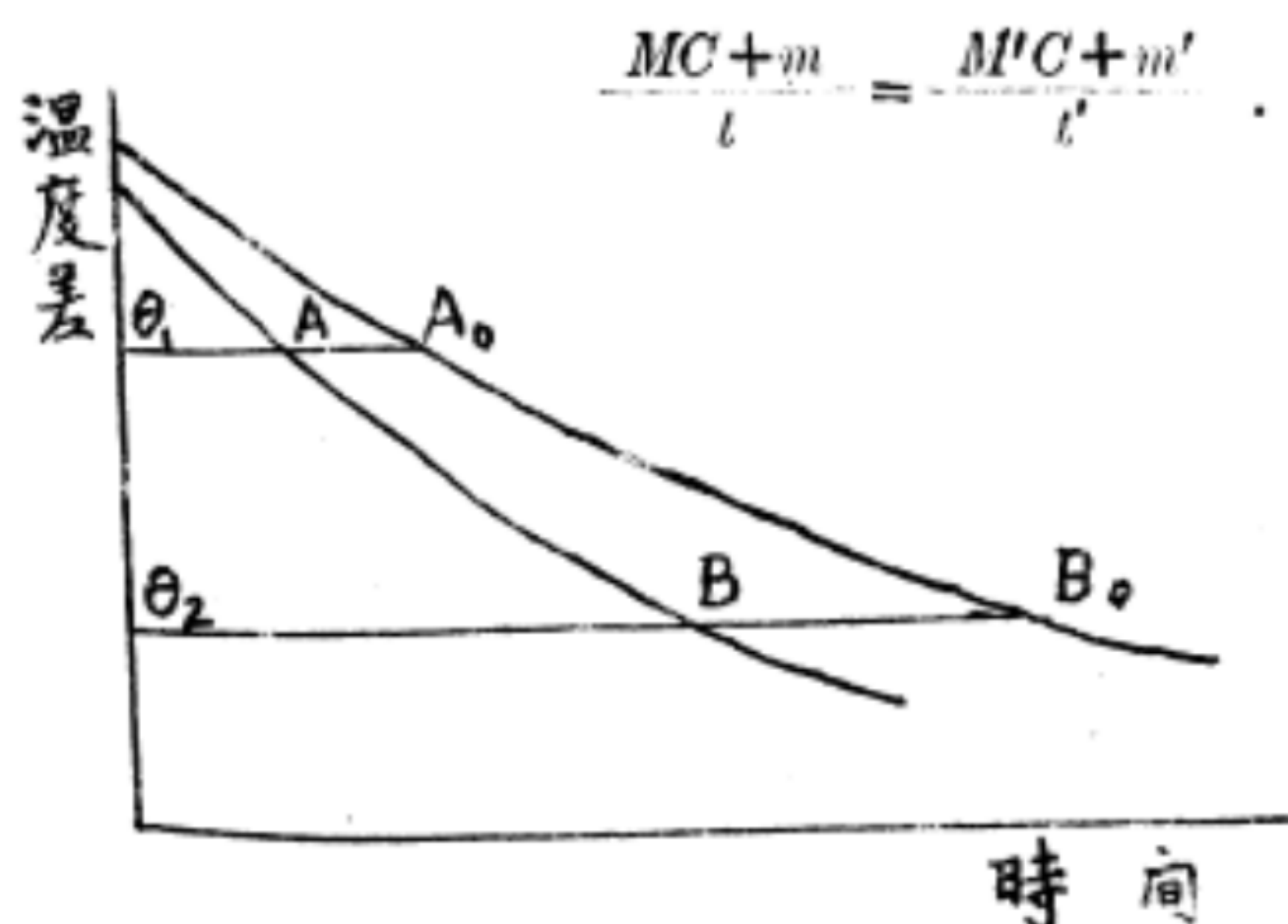


圖 12.2

實驗十三

Joly 氏蒸汽量熱器

目的：用 Joly 氏蒸汽量熱器測固體之比熱。

引言：蒸汽量熱器為 Joly 氏在 1836 年所創始。其原理係基于：一切物體由室溫升至水蒸汽溫所需之熱量，可自蒸汽凝結成同溫度水之量而測知，所用裝置略如圖 13.1：

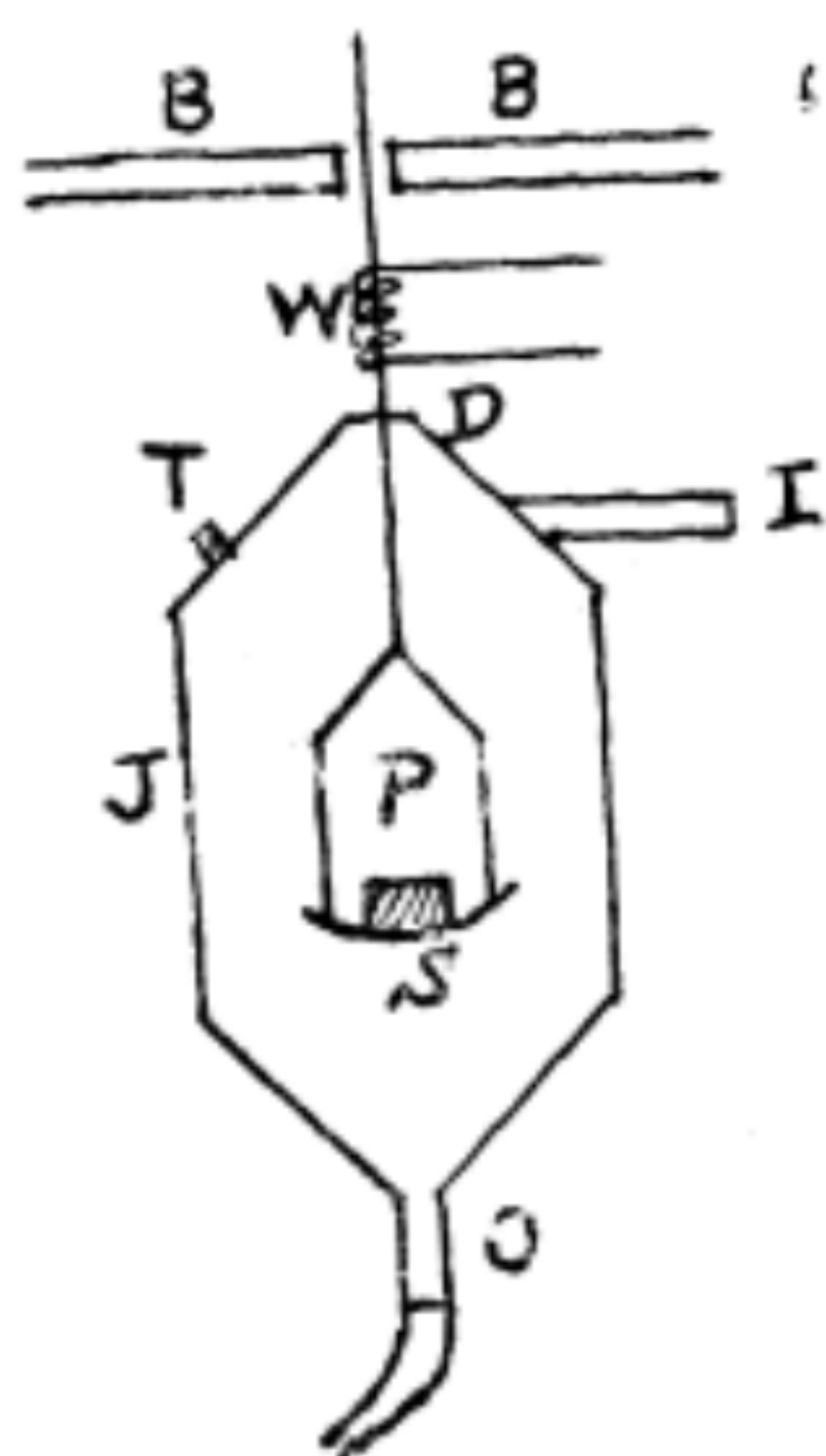


圖 13.1

水蒸汽溫， C 表 P 盤之熱容量， L 為水蒸汽之汽化熱， S 為欲求之比熱，故有

$$MS(\theta_2 - \theta_1) + C(\theta_2 - \theta_1) = WL. \quad (13.1)$$

本法之特點為：如用極精細之天秤，則所測用之物質，微量即可，故可供稀有物質測比熱之用。液體及粉末之比熱，亦可閉於特製之空球中（空球用玻璃或金屬製成）測得；同樣，氣體之定容比熱亦得用此法求之。

J 為金屬護套並以氬罩圍於外，套中之金屬小盤 P 由細線懸於天秤之一端。 D 為一金屬圓板，蓋于 J 之上口，中有一孔，懸 P 盤之線得以通過；此板可自由移動，以免懸線與孔緣接觸。可通電流之小線圈 W 密接于 D 之上端，俾蒸汽不致凝結于懸線及蓋板上，而影響實驗之準確。

今設 M 為固體之重， W 為凝結于 P 盤上之水重， θ_1, θ_2 各表初溫及

- 儀器： (1) Joly 氏蒸汽量熱器(圖13•1)；
 (2) 天秤(分析用者)；
 (3) 溫度計(100°C, 1/2°)；
 (4) 蒸汽發生器及燈火；
 (3) 測比熱之固體(如銅，鋁塊)。

實驗步驟：

(1) 將蒸汽量熱器裝妥如圖，經過天秤底 B 一圓孔，懸 P 盤于此天秤之一端。當 J 內之溫度 θ_1 與室溫相等時，閉進口 I 與出口 O 。

(2) 加砝碼於他盤，使 P 在天秤上平衡。一面使蒸汽發生器內之水沸騰，待水沸騰甚猛時，將出口 O 打開，並將蒸汽接于進口 I 而通入 J 內。

(3) 甚猛之蒸汽續通數十分鐘後，將見 T 處之溫度計示度不再升高，此時 J 內均達蒸汽之溫度 θ_2 。于是一面將通入之蒸汽減少，一面加砝碼于他盤再使平衡。如平衡後十分鐘內不起變化，此時所加之砝碼 W' 乃全由于 P 盤之熱容量而凝結成水于其上，故 $C(\theta_2 - \theta_1) = W' L$ 。

(4) 旋即打開量熱器，拭乾 P 盤及 J 筒；置欲測比熱之固體 S 於 P 盤內，裝置如原，衡得 S 重為 M 。

(5) 此時 J 內溫度一時不易恢復原溫 θ_1 ，如測之為 θ_1' 。再通甚猛之蒸汽以達 θ_2 ；因加有固體， P 盤上凝結之水必多于前，設如法衡得為 W ，則此固體之比熱 S ，可將方程(13•1)改為下式求之：

$$MS(\theta_2 - \theta_1') = \left[W - \frac{W'(\theta_2 - \theta_1')}{(\theta_2 - \theta_1)} \right] L.$$

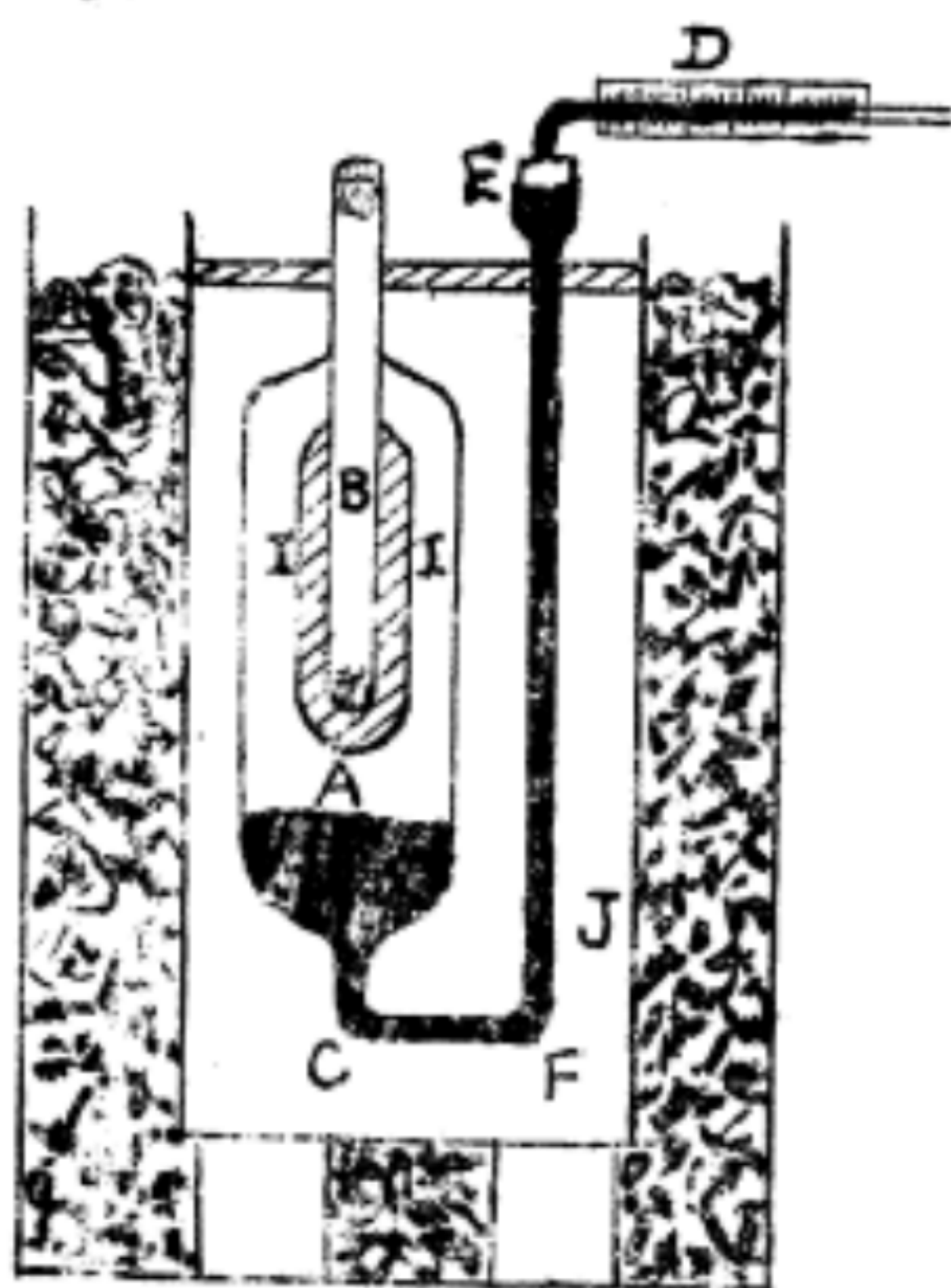
實驗十四

Bunsen 氏冰量熱器

目的：用 Bunsen 氏冰量熱器測物質之比熱。

引言：凡物質融解時，其體積恒隨之變更。大多數物質之體積於融解時膨脹，凝固時縮小。但有數種物質融解時不脹而反縮，冰即為其一例（此外尚有銻，銻等）。Bunsen 氏之冰量熱器，從實測冰塊因某熱量之輸入而融解之量，以推算該熱量之值；至於此時所融解之冰量，則由融解成水時體積之縮小而測定之。

按 Bunsen 氏之冰量熱器，係由 Black, Lavoisier 及 Laplace 諸氏



所創者逐步改良而成。其構造為一雙層之玻璃器 A, B; 雙層之間，滿注以水。外層下端通一毛細管，管中注有水銀，再連平管，並附尺度。初時藉醚之迅速蒸法或利用其他冷劑，以使水之溫度降至 0°C ，內管壁上凝成一層冰套 I。

欲藉冰量熱器以測物體之比熱，則非先將因冰融解而致水銀柱收縮之刻度加以訂正不可。今

圖 14.1

設有溫度為 $\theta^{\circ}\text{C}$ 之水 m 克注入 B 管內，冰即融解一部，以致水銀柱收縮，如在刻度上觀得為 n 格，若使水銀柱收縮一格相當之熱量為 q 卡，則

$$mq = nq, \quad \text{或} \quad q = \frac{m\theta}{n}.$$

次將欲測之物體（固體液體均可）加熱至 θ' 度，投入其內，結果如水銀柱收縮 n' 格；設 M, S 表物體之質量及比熱，則

$$M\theta'S = n'q$$

$$\therefore S = \frac{n'}{M\theta'} q = \frac{mn'}{Mn} \frac{\theta}{\theta'}, \quad (14.1)$$

此法除欲測之物體外，其他相關諸物體之溫度皆無變更，故不涉器之熱容量。

- 儀器：
- (1) Bunsen 氏冰量熱器全套(圖14.1)；
 - (2) 淨潔水銀，蒸溜水及冰；
 - (3) 醚或其他冷劑；
 - (4) 欲測之物體(固體或液體均可)；
 - (5) 燒杯及燈火。

實驗步驟：

(i) 儀器裝置：——(1)取下 E 塞及 D 管，注蒸溜水入 A 約半滿；使 B 管口向下而倒置，熱之並沸騰多時。(2)同時在一大杯內燒蒸溜水已沸，插 E 端于水杯中；停止 A 內加熱，則 A 器及 CFE 管內之水可自動注滿。(3)於是將器順置，俟之稍冷，淨潔之水銀經一滴管漸漸注入，讓水溢出，此時最應注意勿使氣泡隨水銀帶入。待水銀已滿適當位置，裝入 E 塞及 D 管。(4)然後將此器裝入外圍以冰雪混合之 J 筒內，使整個保持零度。(5)待冷一二小時後，可注入少許醚于 B 管，並吹氣使之蒸發，以至厚冰一層結于 B 管外面。管內如尚有醚用棉花擦去。

(ii) 儀器訂正：——如注入以質量及溫度已知之溫水于 B 內，從

D 管上各點之移動，乃得知吸收之熱量。其實對 D 管之訂正，僅特指某段即可，因實驗時可加緊或放鬆 B 塞，而能使水銀端在已訂正之段內移動也。訂正之法：——(1)調整 D 管，並記水銀端之位置。(2)熱 m 克蒸溜水至 θ° (通常 25°C)，注入 B 管內，並用木塞閉口。(3)靜候冰之部份融化，至水銀端移達穩定位置時，記其位置。設收縮為 n 格，則 $q = m \theta / n$ 卡。(4)同樣，可訂正三次。

(iii) 比熱測定：——(1)設所測者為固體，則 B 管內可先注若干 0°C 之冷水；將固體熱至 θ' 度後而投入之(最好 B 管內底先放入少許棉花，以免被固體擊破)，測水銀最後收縮 n' 格，則 S 可由方程(14.1)求得。(2)設所測者為液體，則實驗全依儀器訂正步驟行之。(3)如 B 管曾盛液體，欲其乾燥，可用清潔之吸墨紙拭抹。

附註：

(1) 本實驗所需之校正值，即實驗前後對水銀柱端在 D 管中移動之速率，亦須加入計算。又所結之冰層，其密度常不完全一致，實為本實驗唯一不易補救之缺點。

(2) 如沿 D 管各處之截面積已測知，而一克冰融解成水時體積之減少為 0.0907C.C. ，故本實驗亦可作為測冰融解熱法之一。

實 驗 十 五

求冰之融解熱

目的： 混合法測冰之融解熱。

引言： 當一固體加熱至某一溫度時，其溫度將不變，而固體則開始液化，至其全變為液體後，溫度方始升高。固體與液體同時存在之不變溫度，名為融解點或凝固點。單位質量之固體(或液體)融解(或凝固)為同溫度之液體時所需之熱量名為融解熱。此在純晶形體(例如冰)當一定外界壓力下，其融點固為一定。如非晶形體(例如玻璃)，則熱之漸軟，乃無一定之融點可言；同樣，溶液及合金通常亦無固定之凝點。

求冰之融解熱，最簡者當推混合法。設 0°C 之冰 M 克，投入于水當量為 W ，盛水 m 克之量熱器內，水之初溫為 θ_1 ，混合後之終溫為 θ_2 ，則可得方程

$$ML + M\theta_2 = (W + m)(\theta_1 - \theta_2) \quad (15.1)$$

式內 L 名為冰之融解熱。當進行此實驗時，通常對熱量損失之補正，每不計及；本實驗特着重補正之法，俾學者得以熟習。

- 儀器： (1) 量熱器及攪桿； (2) 天秤；
(3) 冰(純淨者)； (4) 溫度計($\frac{1}{10}^{\circ}\text{C}$)；
(5) 停錶； (6) 吸墨紙；
(7) 杯、水、燈火。

實驗步驟：

(1) 衡量熱器內筒之重，可得水當量 W 。

(2) 注以較室溫約高 10°C 之熱水於筒內約半滿，再衡之，乃知水重 m 。

(3) 取吸墨紙吸乾冰塊外面之水，一面讀量熱器中水之溫度 θ_1 ，乃投冰塊于水中（其適量以可使混合後之溫度約較低于室溫 10°C 為最佳，故以事先預試一次為宜），並立刻開始每隔半分鐘記溫一次，直至冰全融解。如記錄為 $\theta_2, \theta_3, \dots, \theta_{n+1}$ 。嗣後為量熱器吸熱時期，可隔一二分鐘記之，設記錄為 t_1, t_2, \dots, t_{n+1} 。

(4) 再衡量熱器重，乃得所融解之冰 M 克。

(5) 照下述補正計算法，代入方程(15•2)計算 L 。

補正計算：

當冰完全融解後吸熱時期觀察而得之溫度既為

$$t_1, t_2, t_3, \dots, t_{n+1}。$$

則各相隔時間內因輻射而起之溫度變化應為

$$\delta T_1 = A \left[\frac{1}{2} (t_1 + t_2) - t_0 \right],$$

$$\delta T_2 = A \left[\frac{1}{2} (t_2 + t_3) - t_0 \right],$$

⋮

$$\delta T_n = A \left[\frac{1}{2} (t_n + t_{n+1}) - t_0 \right],$$

依牛頓之冷卻律， A 為一僅隨量熱器而異之常數； t_0 表外界之溫度。

于是溫度之總變化 ΔT 可書成：

$$\Delta T = A \left\{ \frac{t_1 + t_{n+1}}{2} + (t_2 + t_3 + \dots + t_n) - n t_0 \right\}.$$

但 $\Delta T = t_{n+1} - t_1$ ，故常數 A 即可計得。

又當融化冰時觀察而得之溫度爲： $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{n+1}$ ，故

$$\Delta \theta = A \left\{ \frac{\theta_1 + \theta_{n+1}}{2} + (\theta_2 + \theta_3 + \dots + \theta_n) - n t_0 \right\}.$$

據此，如觀察時之最低溫度爲 θ_{n+1} ，則補正後之值應爲 $(\theta_{n+1} + \Delta \theta)$ ；而計算之方程亦應改爲

$$ML + M\theta_{n+1} = (W + m) \{ \theta_1 - (\theta_{n+1} + \Delta \theta) \}. \quad (15.2)$$

附註：

(1) 設實驗時之初終溫度已作上述之調整，則 δT 及 $\delta \theta$ 等值各有負有正，結果可以代數法處理之。

(2) 注意量熱器之最低溫度不可降至露點，以免器壁凝附水滴，釋熱于內而生誤差。

實 驗 十 六

求液體之汽化熱

目的： 用 Berthelot 氏裝置測水之汽化熱。

引言： 加熱于一液體，其溫度將增，惟當達一適當之溫度時，見有汽泡自液內發生而升至液面，倘再加熱，溫度將不復升，此溫度名其沸點。液體沸騰時所吸收之熱量，係用於改變其物態而作功，其值視其質量及沸點而定。當每單位質量之液體在其沸點全化為同溫度之蒸汽時，所需之熱量名其汽化熱；此熱量亦等於單位質量之蒸汽，全凝結為同溫度之液體時所放出者。

測汽化熱時，亦可用前所述之混合量熱法。設量熱器之水當為 M 克，其中水之質量為 m 克，器之原始溫度 θ_1 ；今若通以 θ_2 之蒸汽 W 克，混合後之溫度為 θ 。令 S, L 各表液體之比熱及汽化熱，則有

$$(W+m)(\theta-\theta_1) = ML + M(\theta_2 - \theta)S, \quad (16.1)$$

故從上式即可求得 L 。惟此時所應注意者，即實驗時難免有熱量之散失，故必需加以補正，補正後之式應為

$$L = \frac{(W+m)(\theta + \Delta\theta - \theta_1)}{M} - S(\theta_2 - \theta). \quad (16.2)$$

Berthelot 氏所創之測汽化熱裝置如圖 16.1 所示，其重要改良之處即為放汽管及凝結器連于沸騰器之直下，以免蒸汽在導入量熱器之前已成局部凝結。

儀器： (1) Berthelot 氏裝置； (2) 環狀氣燈頭；

(3) 溫度計 $\left(\frac{1}{10}^\circ\text{C}\right)$ ； (4) 天秤；

(5) 停錶； (6) 石棉板； (7) 蒸溜水。

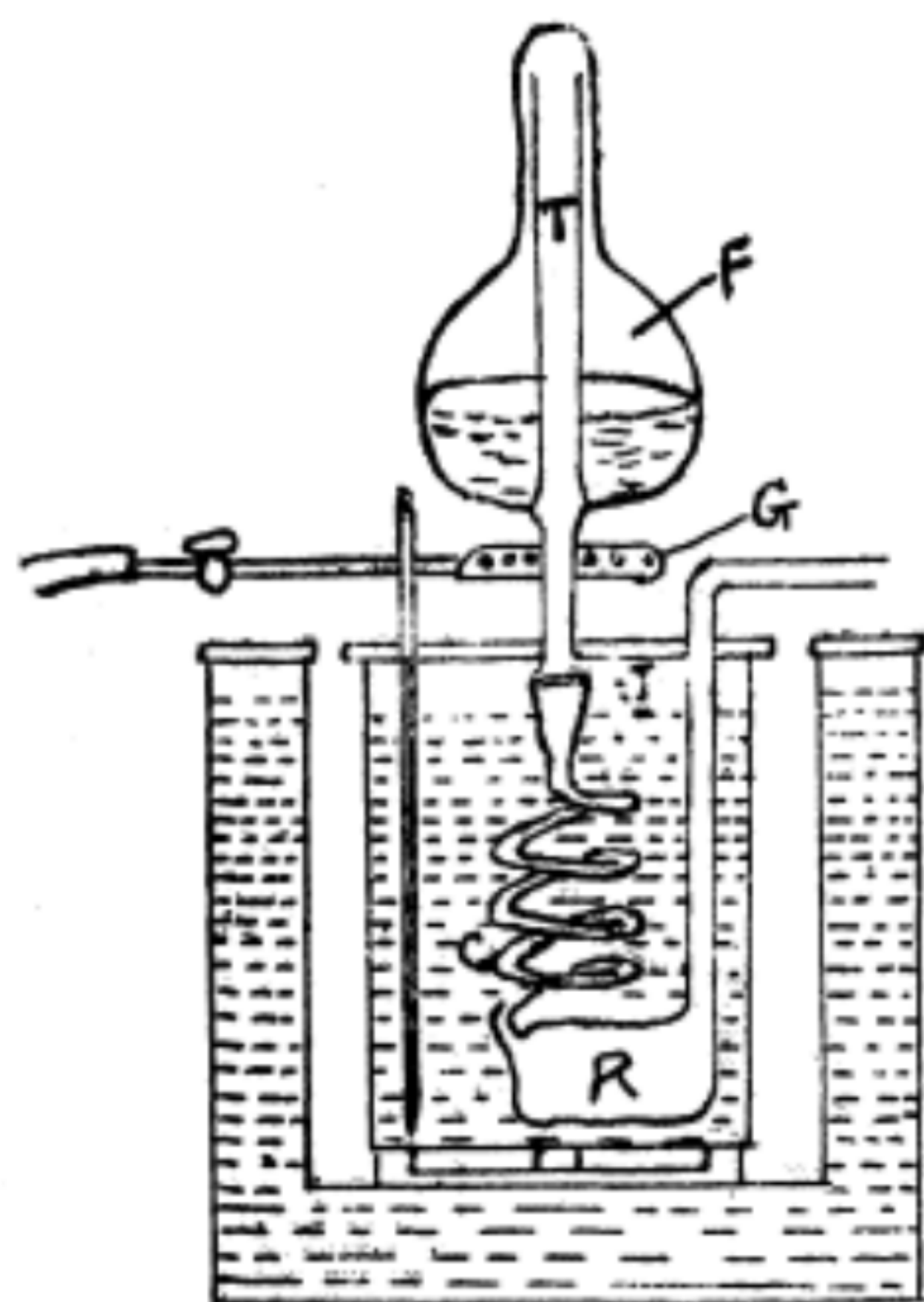


圖 16.1

實驗步驟：

(1) 衡量熱器內筒及螺旋管凝聚器（內外均乾）等之重，乘以比熱，得其水當量 W 。

(2) 注最冷之蒸溜水於內筒，約滿八分，再衡之，得水重 m 。

(3) 注蒸溜水于 F 內，燃環狀氣燈頭熱之使沸騰。（此時最應注意之點有二：a. 蒸汽易達過熱狀態；b. 量熱器與燈間，熱之隔絕問題困難。）

(4) 當水沸騰甚盛時，測量熱器中冷水溫度 θ_1 ；于是使 T 管與 J 口相連，以通蒸汽于其內。此時常攪動水，並每隔半分鐘記溫一次。如此通蒸汽約十分鐘，速將 F, G 取開，並 J 口加一木塞，繼續記溫，以

Berthelot氏裝置之主要部份如沸騰器 F 及放汽管 T ，均係玻璃製成。 C 為螺旋凝結管，下連凝聚器 R ，二者均置于量熱器中；量熱器面上覆以絕緣蓋板再加石棉板，以免環狀氣燈頭 G 之熱直接射入。又量熱器為免除與外界熱發生影響，故下墊絕緣體而置于一中空大水箱內。此外，凝聚器 R 之開端可接于汽壓表上，以便調節取某壓力下之沸點。

便作輻射之補正。

(5) 稱量熱器之總重，乃得所凝結蒸汽之重 M 。讀大氣壓力在表 J 中查得此時水之沸點 θ_2 。

(6) 最後用溫度記錄，依照 Regnault 補正法求 θ 及 $\Delta\theta$ 之值，於是將各值代入(16•2)式計算 L 。

實 驗 十 七

求鹽類之溶液熱

目的： 求食鹽及氯化銻之溶液熱。

引言： 當一鹽類溶解於液溶中，則所成溶液當時必有吸熱或放熱之現象發生。此種熱量發生之多寡，隨參與之鹽類及溶劑份量之比例而定；換言之，依所成溶液之濃度及溶解之鹽量而變。當每單位質量之鹽類，溶解于某量之溶劑中，此時吸收或放出熱量之卡數，名為此種濃度之溶液熱 (Heat of solution)。

設一量熱器之水當量為 W ，內盛溶劑之質量為 M ，今溶 m 克鹽類於其中。若鹽類及溶劑之初溫同為 t_0 ，溶解後並經熱量補正之終溫為 t ，溶液之比熱為 S ，溶液熱為 Q ，則有

$$mQ = \{ (M+m)S + W \} (t - t_0), \quad (17.1)$$

式內 $(M+m)$ 即溶液之重量。溶解時熱量放出則 Q 值為正，吸收為負。

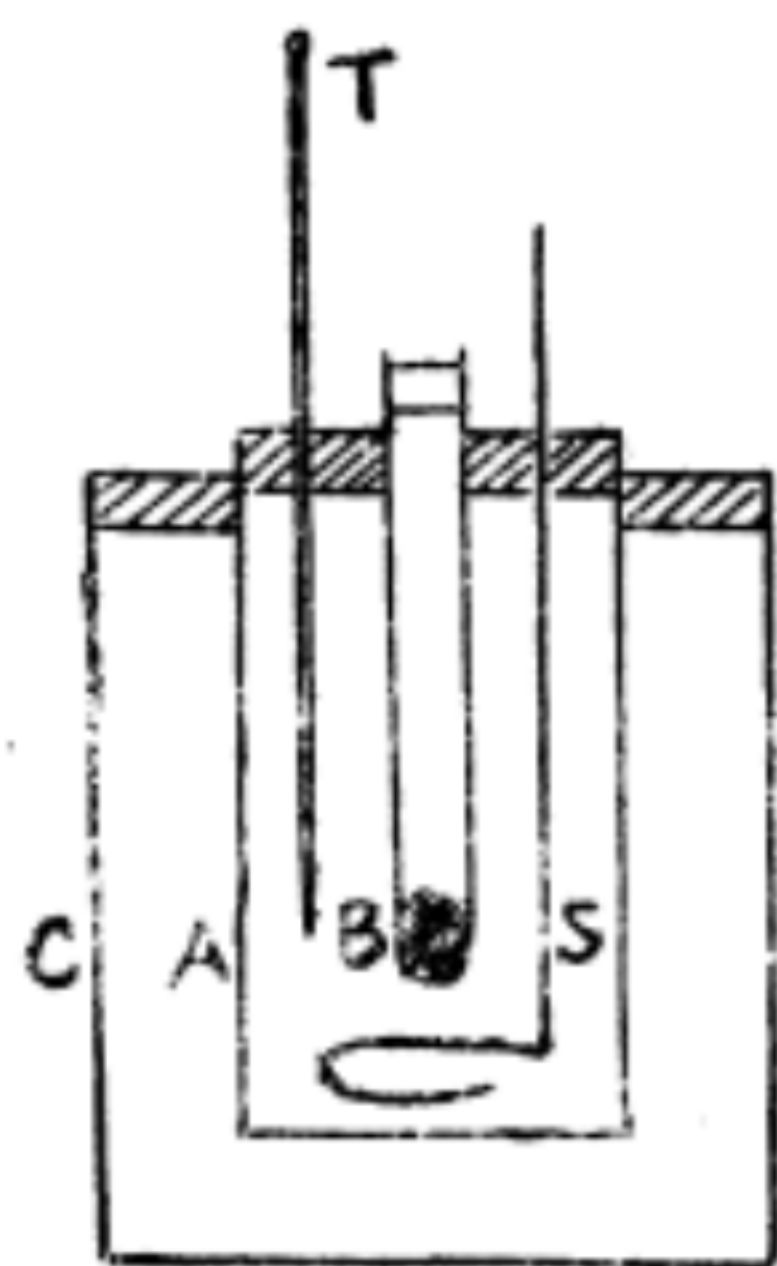


圖 17-1

儀器：

- (1) 量熱器 C ；
- (2) 內筒 A ，試管 B 及攪桿 S ；
- (3) 溫度計 $\left(\frac{1}{10}^{\circ}\text{C}\right)$ ，玻棒；
- (4) 天秤及停錶；
- (5) 淨食鹽，氯化銻；
- (6) 蒸溜水，燈火。

圖 17.1 所示為測溶液熱之儀器：

外層爲一金屬量熱器 C ，上蓋木板，板中圓空，內筒 A 得架於其上。
 A 筒亦蓋木塞，剗有三孔，盛鹽之薄試管 B ，溫度計及攪桿得以插入。
內筒 A 及攪桿 S 係玻璃製成，因金屬常爲多數溶液所侵蝕。但玻璃之比熱多無定值，故其水當量以另作實驗測之爲宜。

實驗步驟：

- (1) 照常用法測定玻璃內筒 A 、攪桿 S 及薄試管 B 之總水當量 W_0 。
- (2) 衡出淨食鹽 m 克（可取40克），倒入 B 管內。注蒸溜水於 A 筒，其量以使試管下部可沒入水中爲度，衡水重爲 M 克。
- (3) 如此靜候約半小時，並不時以乾潔之玻璃棒攪鹽，俾鹽與水得達同樣溫度，測之設爲 t_0 。
- (4) 於是用攪鹽之玻璃棒擊破試管底，則鹽落入水中而溶解；此時用 S 攪動液體，並記錄每隔半分鐘之溫度。
- (5) 由所得溶解時溫度與時間之關係曲線，乃照輻射補正法以求最高或最低之溫度 t 。
- (6) 用實驗十二之冷卻法，測定此溶液之比熱 S 。最後將各值代入方程(17.1)內，以計算 Q 。
- (7) 用氯化銣代食鹽，同樣求 Q 一次。

實驗十八

求氣體之比熱率

目的：用 Clement 及 Desormes 二氏法：求空氣之比熱率。

引言：一物質之比熱，乃使此物質一克溫度升高一度所需之能量。若所討論者為氣體，則在何種情況下加熱，必須特為註明。通常關於氣體加熱時，重要情形有二：(1)容積保持一定，(2)壓力保持一定，因此比熱亦有 C_v 、 C_p 之別。根據完全氣體之論導，吾人可得

$$C_p - C_v = R ; \quad (18.1)$$

如又命 $\frac{C_p}{C_v} = K$, (18.2)

故若設法測得比熱率 K ，則 C_p 、 C_v 個別之值可知矣。

測比熱率 K 之法，約分二類：(a)絕熱法，(b)音速法。用前法測 K ，當推 Clement 及 Desormes 二氏為首倡。其法用一大容器連一氣壓表，先使器內氣壓略高于外界；如容器裝有寬開關，旋轉半轉，則成絕熱膨脹之境地。今設此為理想氣體，令 V_0 表氣體原來佔據之體積，在轉開關後可充滿此容器， V 表器之容積， P_0 表容器內最初之氣壓， B 表轉開關後一瞬間之氣壓亦即大氣壓，據絕熱膨脹之理有

$$P_0 V_0^K = P V^K \quad (18.3)$$

但最後之溫度乃達與最初者相同，若此時壓力為 P ，則依恒溫手續有

$$P_0 V_0 = P V \quad (18.4)$$

由(18.3)，(18.4)兩式可得

$$K = \frac{\log \frac{B}{P_0}}{\log \frac{P}{P_0}}$$

如氣壓表上液體柱高度之差，開始時為 h_0 ，最後為 h ，則

$$P_0 = B + h_0; \quad P = B + h$$

$$K = \frac{\log\left(1 - \frac{h_0}{P_0}\right)}{\log\left(1 - \frac{h_0 - h}{P_0}\right)} \approx \frac{\frac{h_0}{P_0}}{\frac{h_0 - h}{P_0}} \quad (\text{approx.}),$$

上式已照對數級數展開，而 h_0 及 h 之值較 P_0 小甚，故可略去高次項也。

因此
$$K = \frac{h_0}{h_0 - h} \quad (18.5)$$

- 儀器： (1) 大玻璃瓶及橡皮塞； (2) 大小開關各一；
 (3) 橡皮管及打氣筒； (4) 液體氣壓表；
 (5) 精密測高器。

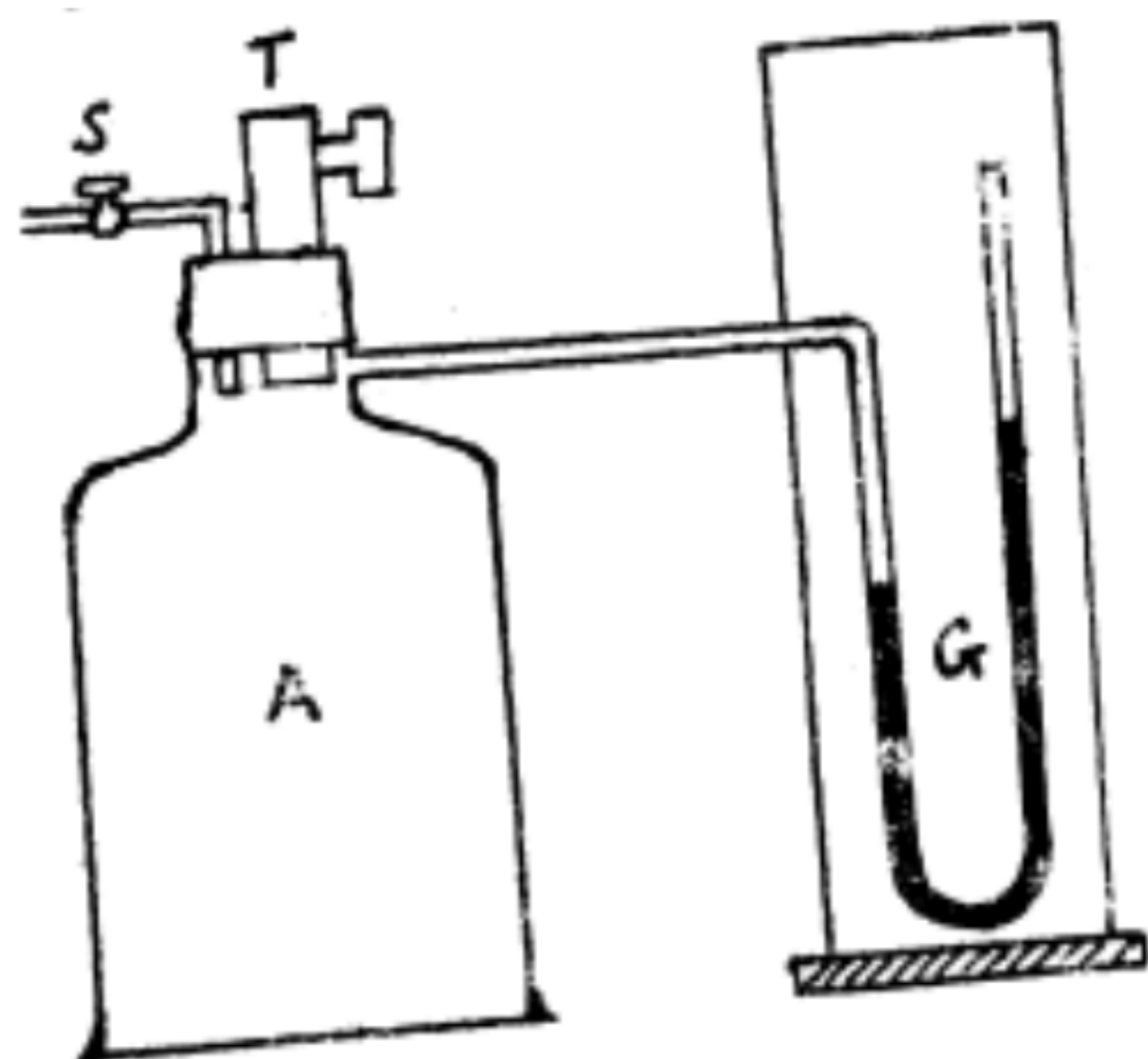


圖 18.1

圖 18.1 為 Clement 及 Desormes 二氏實驗器。A 為一大玻璃瓶，其口之橡皮塞裝一寬開關 T，俾可與空中通氣；另裝一小開關 S，用以接打氣筒。瓶口又連一液體氣壓表 G，以示內外壓力之差。此外備有精密測高器，氣壓表上之示差得細測之。

實驗步驟：

(1) 將儀器裝妥後，閉 T 開 S ，用打氣筒使瓶內氣壓較外高數種（設以水銀柱計算），關 S ，約待十分鐘後，瓶內溫度可達均勻。藉精密測高器測得壓力差 h_0 。

(2) 迅速旋轉開關 T 半轉。此時瓶內氣壓在極短時間內驟降至與大氣壓相等，熱量當無從傳入，故可稱絕熱膨脹。

(3) 相當時後，瓶內必吸取外圍之熱而恢復實驗開始時之溫度，因之氣壓亦較大氣壓為高，待穩定不變後測其差為 h 。

(4) 用各種不同之初壓實驗，乃以 h_0 與 $(h_0 - h)$ 各值作一曲線，從曲線上以尋 K 之最可信值。

附註： 進行本實驗最大之難處，即當旋轉開關 T 時，因氣體運動之能量，一瞬間之膨脹隨之發生振盪現象，而無從得知：何時瓶內氣壓剛與大氣壓相等，亦即旋轉半轉間經若干時間最為適宜。後經 Lummer 及 Pringsheim 之設計，避免用開關而僅測絕對膨脹後溫度所起之變化。學者如有興趣可參閱

Saha: Treatise on Heat Pp. 90—93.

Roberts: Heat Pp. 134—136.

IV 飽 和 蒸 汽

實 驗 十 九

蒸 汽 壓 之 測 定

目的： 用沸點法測水在各溫度下之蒸氣壓。

引言： 祇閉一液體（或固體）于容器內，一部物質即行蒸發，器中蒸氣最後必達飽和狀態。飽和蒸氣之壓力，在某溫度下其值乃一定（與容積無關），名爲此液體在該溫度下之蒸氣壓。蒸氣壓已測得之範圍，可自 10^{-3} mm. 以至400大氣壓，故所用之方法甚多，常用者約可括爲下連二類：

(i) 直接法或靜方法——將溫度保持一定，其壓力由壓力計直接讀出，或測其密度而得之。

(ii) 沸點法或動方法——將壓力維持某值，測在此壓力下液體開始沸騰之溫度。

本實驗即屬於第二類，因吾人已知當一液體達沸點時，其蒸氣壓必與其表面之外界壓力成平衡而相等。今用唧筒使液體表面之外界壓力變化，則液體之沸點亦當隨之而異。故由溫度計讀得沸點，壓力計讀得壓力，則實驗之目的乃達矣。

儀器： (1) 汽鍋； (2) 冷凝器；
 (3) 大瓶； (4) U管壓力計；
 (5) 打氣機及抽氣機； (6) 溫度計；
 (7) 燈火； (8) 冷水。

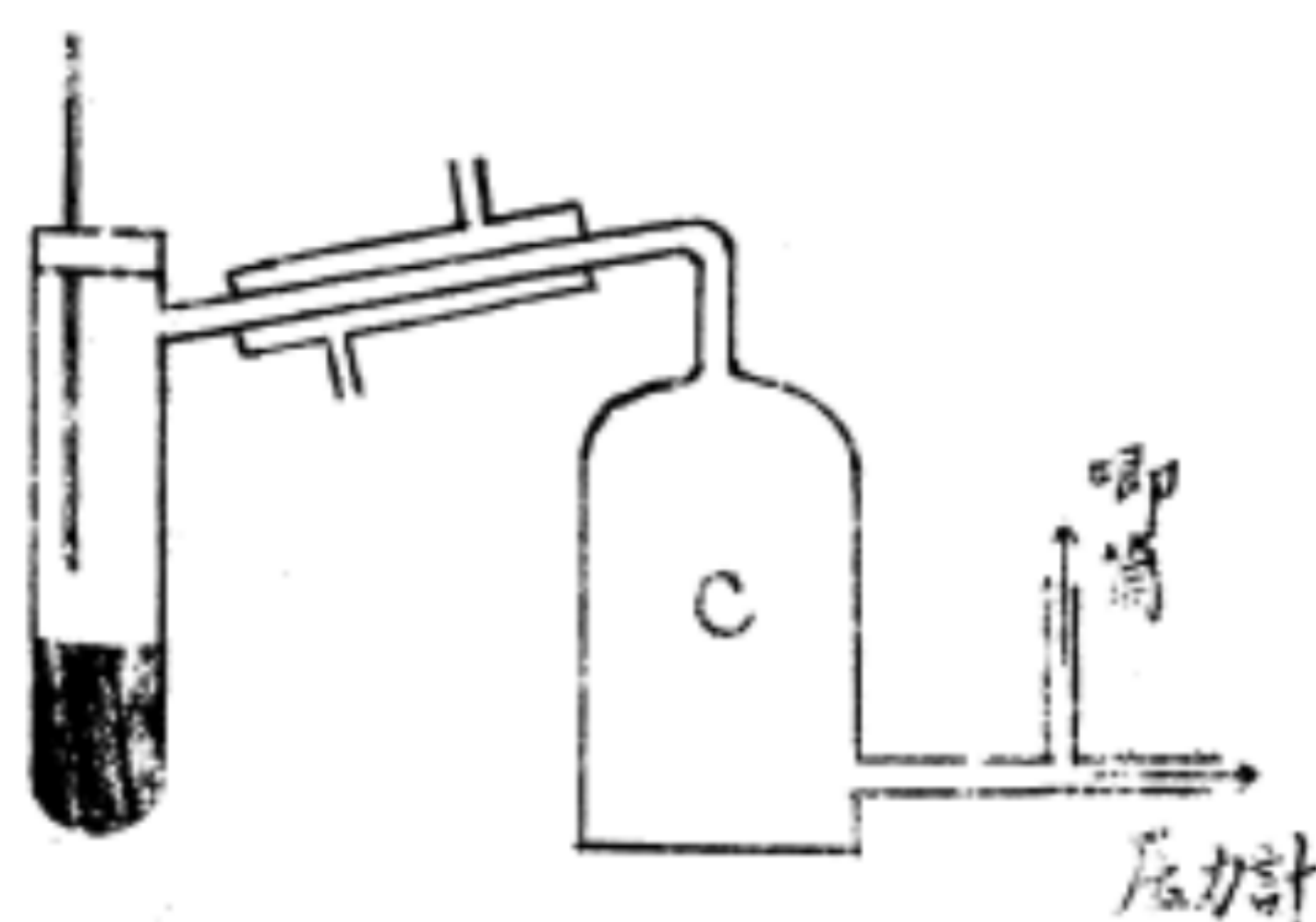


圖 19.1

自汽鍋所產生之蒸汽，
為冷凝器所冷凝而流回汽
鍋。大瓶 C 之功用為傳遞汽
鍋之壓力至壓力計，並避免
汽鍋及唧筒中壓力之不規則
變化，而影響壓力計之示值。

實驗步驟：

(1) 將儀器裝好。開啓
水門，使冷水流通于冷凝器

中。

(2) 先令汽鍋與大氣相通。燃火使汽鍋中水沸騰，當各情況均呈
穩定狀態時，記下大氣壓及汽鍋中之溫度。

(3) 次旋轉瓶塞使汽鍋與抽氣機相聯。抽去汽鍋中之氣，至壓力
計兩管之水銀柱約差 5 至 10 厘米。關閉瓶塞並停止抽氣機。約三分鐘
後再量沸點及其相對應之壓力。將壓力減低數次，至沸點約達 50°C 左
右為止。

(4) 將抽氣機更換為一打氣機，令汽鍋中氣壓漸次增加，而求在
較大汽壓更大之壓力下之沸點數次，以至 150°C 為止。

(5) 最後，以沸點為橫坐標，相當之壓力為縱坐標，將觀察各結
果作一曲線，以明水在各溫度下之蒸汽壓。

附註：(i) 金屬之蒸汽壓，亦可用沸點法測之。Braun 氏

會測錳及鎳等之蒸汽壓。法將金屬置於石英管或瓷杯內藉電力熱之，而用熱電偶量其溫度。

(ii) 壓力與沸點遞增或遞減之數值，可用Clausius-Clapeyron氏之方程表之如下：

$$\frac{dp}{dT} = \frac{JL}{T(V_2 - V_1)}$$

實驗二十

蒸汽密度之測定

目的：用 V. Meyer 氏法測醚之蒸汽密度。

引言：按 Avogadro 氏之定律，一切理想氣體在相同之情形下，每一立方厘米中之分子數皆相同，故此種氣體密度之比應等於其單個分子質量之比，亦即等於其分子量之比。是測在同壓力同溫度時，理想氣體之密度應正比於其分子量，而分子量即可自密度計算之。

凡固體與液體之能汽化者，皆得應用此法。吾人所取之密度係指 0°C 及 760 毫米壓力下物質已化成理想氣體之狀態者而言，此即稱為蒸汽密度。惟此時有多種物質與理想氣體狀態相去頗遠。但祇須其在任何溫度及壓力下得能近似理想氣體，照常法測得其密度，於是援用理想氣體之定律，不難推算其在標準情形下密度應有之值。

在 V. Meyer 氏法實測時，設小瓶內物質汽化時所排擠之空氣容積為 v ，此時水溫為 t ，大氣壓為 B ， t 度水之蒸氣壓為 b ；則在標準情形下之容積 v_0 必為

$$v_0 = v \times \frac{273}{273+t} \times \frac{B-b}{760}$$

設 m 為物質汽化之質量，則蒸汽密度 ρ 為

$$\rho = \frac{m}{v_0} = \frac{m}{v} \times \frac{273+t}{273} \times \frac{760}{B-b} \quad (20.1)$$

並該物質之分子量應為

$$M = \frac{2}{0.00009} \times \frac{m}{v} \times \frac{273+t}{273} \times \frac{760}{B-b} \quad (20.2)$$

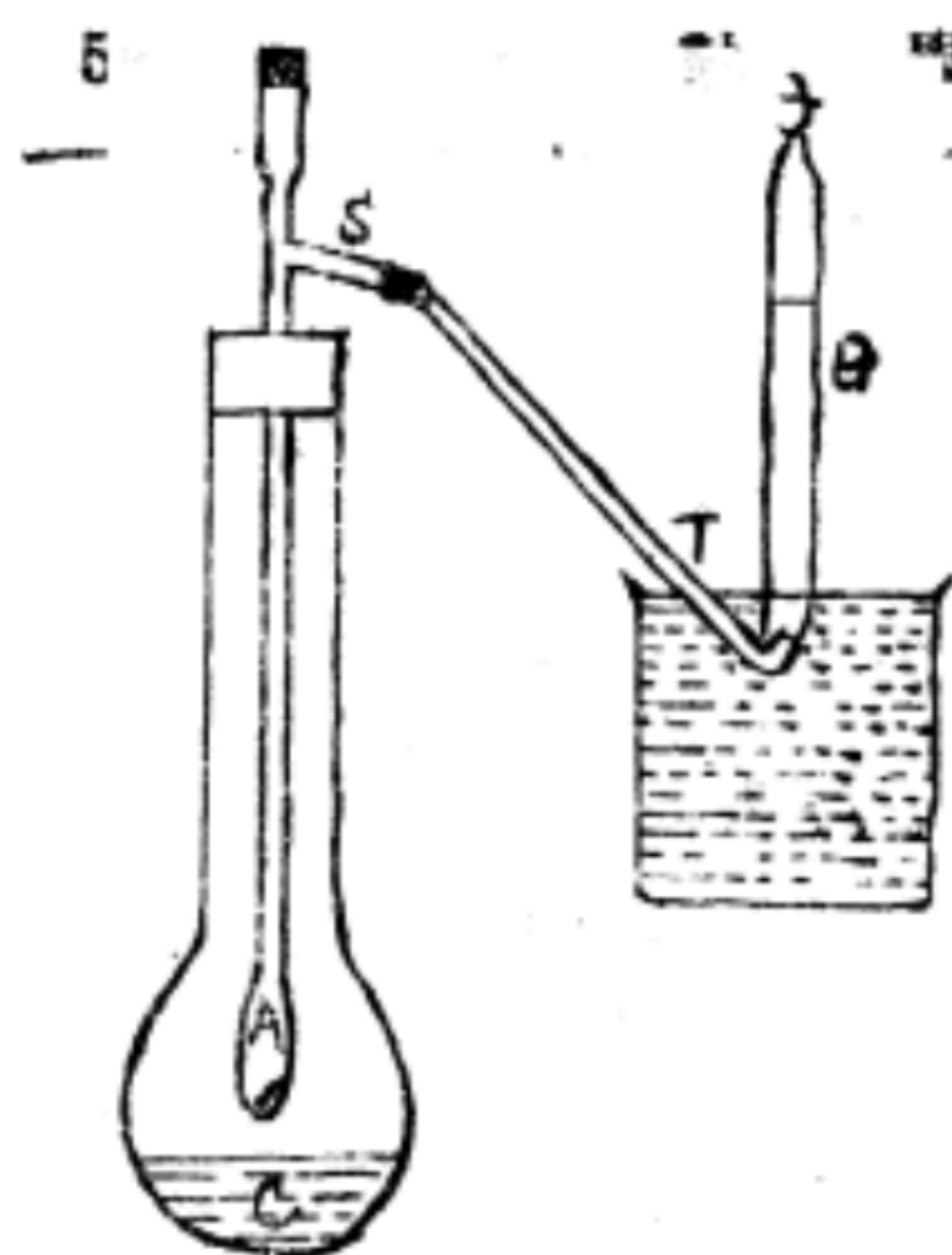


圖 20.1

儀器：

- (1) V. Meyer 氏器；
- (2) 滴管及水槽；
- (3) 小瓶及醚；
- (4) 水及燈火。

圖20.1 示 V. Meyer 氏測蒸汽密度之儀器。此器全係玻璃製成，外管 C 盛水，煮之以熱內管 A；內管上端連一輸管 ST，俾導

蒸汽入倒置于水槽中之滴管內。內管底面置一石棉小塊，以防小瓶投入而擊破其底。

實驗步驟：

- (1) 注外管 C 以水若干，並將儀器裝置妥善後，用燈火燒 C，使水沸騰，以熱 A 管。
- (2) 待水槽中不見有氣泡自輸管中流出，可知 A 管內已達完全乾燥，乃將上端之塞放鬆。
- (3) 將滴管 B 滿注以水，倒架于水槽內。
- (4) 衡空小瓶 D；注入以醚，再速稱之，得醚重 m 。
- (5) 開 A 管之塞，投入小瓶速復閉之。醚在 A 管內開始汽化，乃排空氣經輸管入滴管內。待滴管內再無汽泡上升，于是將 ST 管取出水面。
- (6) 若干時後，滴管內氣溫可達水槽中水溫。然後將滴管下移使內外水面相同。于是空氣之容積 v 可從滴管上之刻度讀得。

(7) 測此時水之溫度 t ，察氣壓計上之氣壓 B ，再從常數表中查 t 度時水之蒸汽壓 b ，將各值代入式(20•1)以計算 g ；並自式(20•2)可得 M 。

(8) 如法再實驗兩次。

V 熱之傳播

實驗二十一

測金屬棒之導熱係數

目的：以 Forbes 氏法測金屬棒之導熱係數。

引言：溫度不同之物體互相接觸，則冷者漸熱，熱者漸冷，直至二者之溫度為等值時而止。此為吾人所常見之傳熱方法，名曰傳導。關於熱傳導以數學為根基之理論，當屬 1822 年 Fourier 氏所首倡。設一物體，一端導熱至他端，在 dt 時間內，通過一垂直于溫度梯度方向 x 之截面 A 所傳導之熱量為

$$Q = -kA \frac{d\theta}{dx} dt,$$

其中 $-d\theta/dx$ 為溫度梯度，即在 x 方向上每隔一單位長度下降之值。 k 為一物質常數，稱為該物質之導熱係數。導熱現象一般以金屬為最顯著，故測其導熱係數之方法亦甚多。茲擇一 Forbes 氏在 1864 年所設計者，此法原理雖簡，工作却繁，學者應特加注意。

儀器：(1) Forbes 氏器；(2) 溫度計六 (0—200°C)；
(3) 停錶。

Forbes 氏測導熱係數之儀器，分二部份：

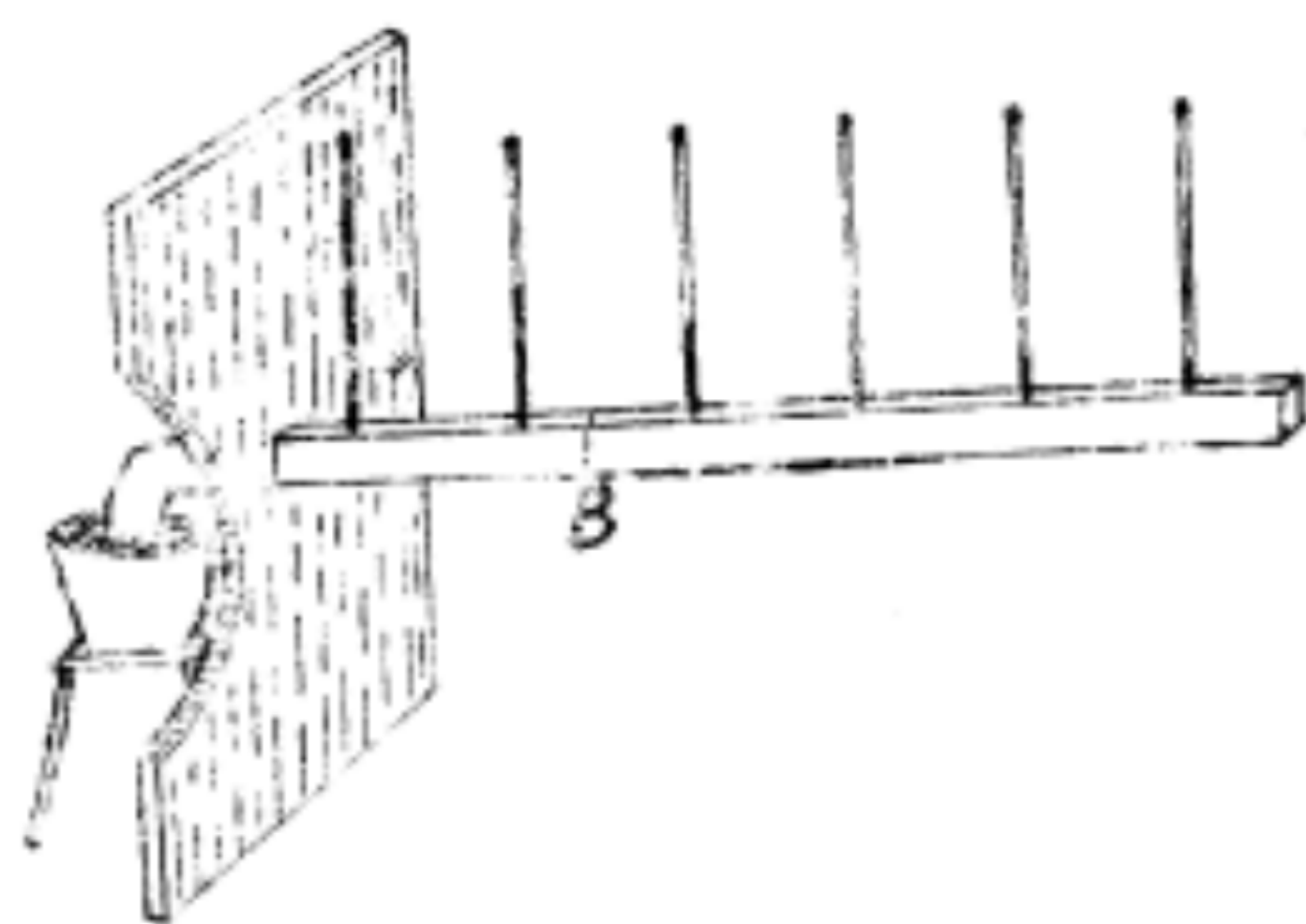


圖 21.1

第一部份如圖 21.1 所示，金屬棒長約一米，左端彎曲，以便浸入溶化金屬之砂鍋中導熱。為免熱源之直接輻射，有一石棉屏為之隔絕。棒之上方，設有相去等距之圓孔若干，上有木架，藉以支持插于

孔中之溫度計。此等溫度計之讀數，乃示熱流達穩定狀態時之分佈，故稱靜的實驗 (Statical experiment)。

第二部份爲一與上述同質料等截面長約十厘米之短棒，上面亦鑽有一孔可容溫度計。此溫度計乃示短棒在與長棒同一外界狀況下溫度冷卻之變化，故稱此部份爲動的實驗 (Dynamical experiment)。

實驗步驟：

(1) 實驗開始前須先選定地點。因長棒與短棒必須保持有相同之外界狀態爲條件，故本實驗最好在實驗室中隔出一小區域爲之。

(2) 將第一部份儀器裝妥如圖。砂鍋中盛以鉛或錫，置電爐上熔之，於是將長棒之彎端浸入鍋內。次於棒上各小孔內近熱端者注以熔漿，其餘注以水銀。

(3) 插溫度計于各孔內。待棒導熱二三小時後，紀錄各溫度計之示度，此後每隔十分鐘觀察一次，若前後兩次各孔之溫度不變，則全棒已達穩定狀態。乃將各孔之溫度記下，並測由隔板至各孔之距離。

(4) 嗣作第二部份實驗。將短棒包以一二層薄紙，整個埋入熔漿中熱之。

(5) 待其溫度超過長棒各孔之最高溫度，乃取出懸于第一棒之附近。每隔半分鐘記錄其溫度一次，直降至各孔之最低溫度爲止。

理論及計算：

吾人可由第一部份紀錄作 $\theta-x$ 曲線，第二部份紀錄作 $\theta-t$ 曲線，設如圖 21.2。再由 $\theta-t$ 曲線上選定 θ 值五六個而計算各點 $\frac{d\theta}{dt}$ 之值，

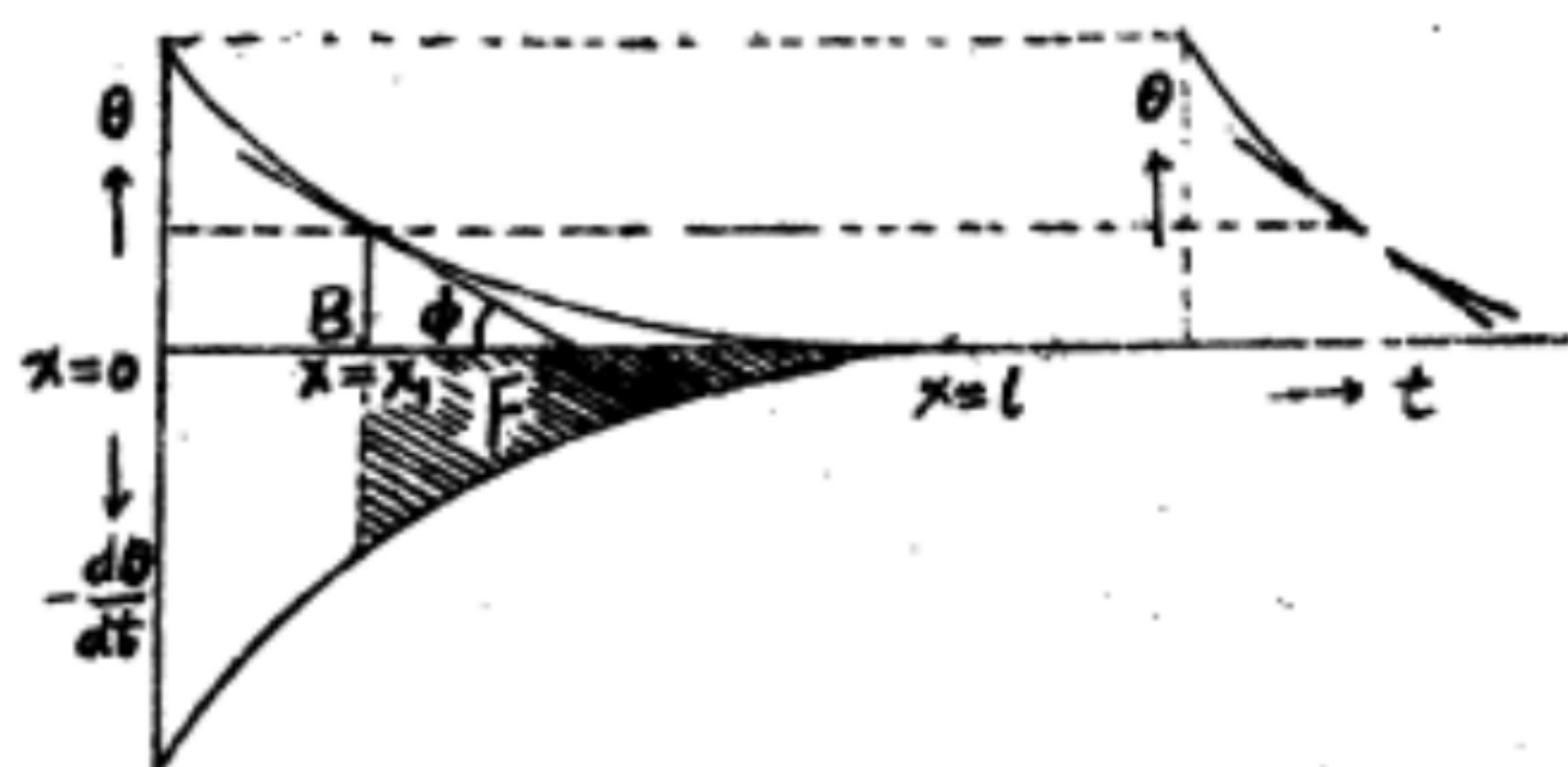


圖 21.2

由各 θ 之值於 $\theta-x$ 曲線上尋其相應之 x 值，於是吾人有 $\frac{d\theta}{dt}$ 與 x 之相當值，故得 $\frac{d\theta}{dt}-x$ 曲線如圖。

曲線既得，吾人應計算此靜棒自

B 點 ($x=x_1$) 至右端 ($x=l$) 間熱量之總損失。已知 x 與 $x+dx$ 兩點間棒表面熱量之散失率為

$$-A dx \cdot \rho S \frac{d\theta}{dt},$$

內 ρ, S 為物質之比重與比熱， $-\frac{d\theta}{dt}$ 為冷却率。于是在棒之 B 點及右端間熱之總失量為

$$-A \rho S \int_{x=x_1}^{x=l} \frac{d\theta}{dt} dx = A \rho S \times (\text{圖21.2之陰影面積 } F).$$

設靜棒之長足以令其右端之溫度與室溫相同，則在穩定狀態下，此部份所失之熱應與截面 B 所導入者相等，該熱為

$$-kA \left(\frac{d\theta}{dx} \right)_{x=x_1},$$

吾人故有

$$\frac{k}{\rho S} \left(\frac{d\theta}{dx} \right)_{x=x_1} = \int_{x=x_1}^{x=l} \frac{d\theta}{dt} dx$$

$$\therefore k = \frac{\rho S}{\tan \phi} \cdot F \quad (21.1)$$

今由圖21•2量得 $x = x_1$ 處之斜度 $\tan\phi$ 及陰影面積 F ， q, S 爲二常數， k 乃定矣。

附註：

(i) 若 $\frac{d\theta}{dt} - x$ 曲線不能與 x 軸交於一點，可在棒長方向取 B, B' 二點，並用下式計算之

$$k \left[\left(\frac{d\theta}{dx} \right)_B - \left(\frac{d\theta}{dx} \right)_{B'} \right] = q S (F - F').$$

(ii) Forbes 氏法有數原因使之不能得甚精確之結果：

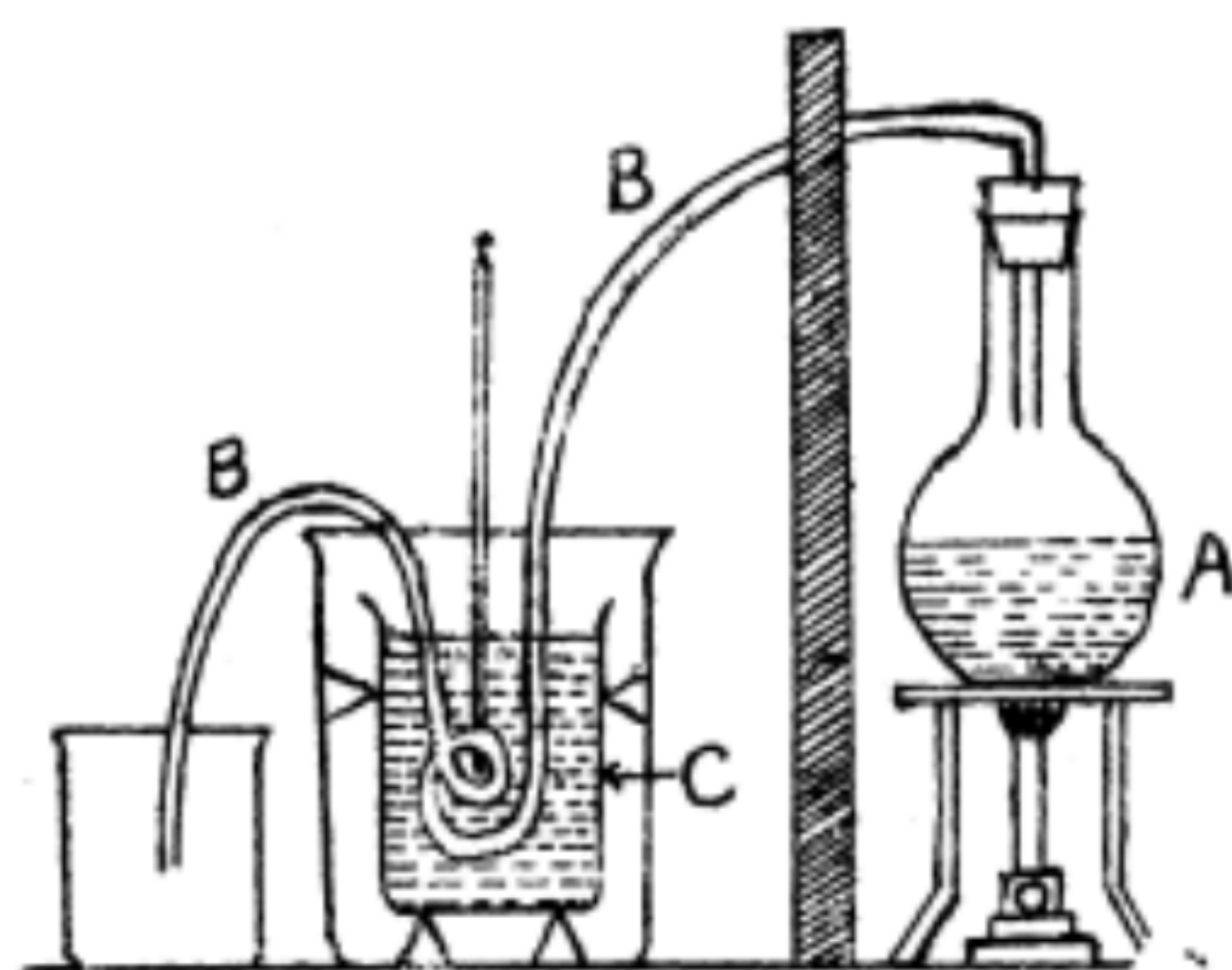
- A. 物質之比熱常隨溫度之不同而起變化。
- B. 在靜與動兩部份實驗中，棒之內部溫度分佈不能完全相同。

實驗二十二

測橡皮管之導熱係數

目的：測橡皮管之導熱係數。

引言：測劣導體之導熱係數時，因表面散失之熱較諸實際導過之熱，既易且多，故其形不能取長棒如測金屬體者，而取薄片、球形或圓柱形。所有非金屬概屬於劣導體，吾人所常見者如橡皮，石棉，玻璃，木材，泥，磚等；其導熱係數概在0.01與0.00008之範圍內。本實驗欲測橡皮管之導熱係數，乃屬圓柱形之一例。



儀器：

- (1) 蒸汽鍋 A；
- (2) 量熱器 C；
- (3) 溫度計 T；
- (4) 量筒；
- (5) 停錶；
- (6) 橡皮管；
- (7) 水及燈火。

圖 22.1

A 為蒸汽鍋或燒瓶，可使發生蒸汽而導入橡皮管 B。橡皮管長約取一二米，使工作較為方便。為避免熱之直接影響量熱器，故以取一屏風隔之為宜。

實驗步驟：

- (1) 衡量熱器 C，並注以水約滿四分之三再衡之，得總水當量 M。
- (2) 將橡皮管中段盤置水中，在管之入水與出水兩處縛以棉花，

浸水部分毋使變動。

(3) 先取去 A 鍋之塞，燒之使沸。一面測量熱器中水之初溫 θ 。待水已沸騰，將塞復原，則蒸汽導入 B 管。于是開始每隔半分鐘記錄溫度一次，直至約總升 10°C 而止。設此時為 θ' 度。

(4) 次又打開 A 鍋之塞，繼續記錄下降時之溫度，其範圍約與溫度上升時相等，以便作溫度之補正。

(5) 記此時室溫 θ_c 。量橡皮管浸于水中部分之長 L 。用測徑器量橡皮管外半徑 r_1 。復取橡皮管一端之長 l 置入量筒水中察水升高體積 v ，從 $v = \pi l (r_1^2 - r_2^2)$ 以計算橡皮管內半徑 r_2 。

溫度補正：

當橡皮管通以蒸汽而導熱時，量熱器中熱量必有因輻射而損失者。倘無此種損失，其最高溫度當非 θ' 而為 $\theta' + \Delta\theta$ ，此 $\Delta\theta$ 即為所需之補正值。

設通蒸汽時在 θ 與 θ' 間所記得之溫度為 t_1, t_2, \dots, t_{n-1} ，則因熱之損失或吸收而致各時間內溫度之改變據冷卻律應為：

$$\delta\theta_1 = c \left\{ \frac{\theta + t_1}{2} - \theta_c \right\},$$

$$\delta\theta_2 = c \left\{ \frac{t_1 + t_2}{2} - \theta_c \right\},$$

$$\delta\theta_3 = c \left\{ \frac{t_2 + t_3}{2} - \theta_c \right\},$$

.....

.....

$$\delta\theta_n = C \left\{ \frac{t_{n-1} + \theta'}{2} - \theta_c \right\}.$$

因此

$$\Delta\theta = \sum\delta\theta = C \left\{ \frac{\theta + \theta'}{2} - n\theta_c + (t_1 + t_2 + \dots + t_{n-1}) \right\}.$$

式內 C 爲一量熱器之常數，吾人可定之如下。

設在斷絕蒸汽後記得之下降溫度爲 T_1, T_2, \dots, T_n ，照上法以 δt 表溫度之變化值，故有

$$\sum\delta t = C \left\{ \frac{T_1 + T_n}{2} - (n-1)\theta_c + (T_2 + T_3 + \dots + T_{n-1}) \right\}.$$

但 $\sum\delta t = T_1 - T_n$ ，故由此式計算 C ，則 $\Delta\theta$ 乃可得矣。惟應注意者，此兩項記錄之溫度範圍以相同爲最佳。

理論：

因圓柱體據軸爲對稱，則導熱時之等溫面亦爲圓柱形。故每秒流過等溫面 $2\pi rL$ 之熱量 Q 爲

$$Q = -2\pi rL K \frac{d\theta}{dr},$$

$$\therefore \int d\theta = -\frac{Q}{2\pi LK} \int \frac{dr}{r},$$

此積分之極限，係自內半徑 r_1 至外半徑 r_2 ，溫度亦自內至外。今取水蒸汽之溫度爲 θ ，管外溫度取 θ 與 θ' 之平均值，因此

$$\theta - \frac{\theta + \theta'}{2} = \frac{Q}{2\pi LK} \log_e \frac{r_1}{r_2},$$

或

$$K = \frac{Q}{2\pi L \left\{ \theta - \frac{\theta + \theta'}{2} \right\}} \log_e \frac{r_1}{r_2}.$$

$$Q = M(\theta' + \Delta\theta - \theta),$$

$$\therefore K = \frac{M}{2\pi L} \times 2.303 \times \frac{\theta' + \Delta\theta - \theta}{\theta - \frac{\theta + \theta'}{2}} \log_{10} \frac{r_1}{r_2}.$$

【此式可以計算 K 。

實 驗 二 十 三

輻射常數之測定

目的： 測 Stefan 氏之輻射常數。

引言： 置溫度不同之兩物體于真空中，縱使二者不相接觸，然因輻射之故，熱量亦可互相交換。惟熱量交換結果之淨值，當隨二者溫度之差別而有異。關於輻射與溫度得有數量上之聯繫，其首功當推 Stefan 氏。緣氏在 1881 年作實驗以考究黑體所輻射之熱量與其溫度之關係，復收集 Tyndall 及 Dulong 與 Petit 諸氏之實驗值，結果指出完全黑體每單位面積在每秒內所輻射之能量 E 係與其絕對溫度 T 之四乘幕成正比，即

$$E = \sigma T^4 \quad (23.1)$$

此定律復經 Boltzmann 于 1885 年引用熱力學原理加以理論之推證，故亦稱 Stefan-Boltzmann 定律。

嚴格言之，此定律雖僅能應用于完全黑體為對象；惟尋常物體所遵循之輻射律，與此亦頗近似。本實驗乃利用尋常輻射而定此輻射常數 σ 。

今若有物體甲為物體乙所圍罩，而乙之溫度 T_1 高于甲之溫度 T 。

設 E_1 為乙物體每單位面積每秒鐘所放射之能量，亦即為甲物體所吸收者； E 為甲物體所放射之能，則甲每秒鐘淨得之能量當

$$= (E_1 - E) A,$$

內 A 表物體甲之表面積。

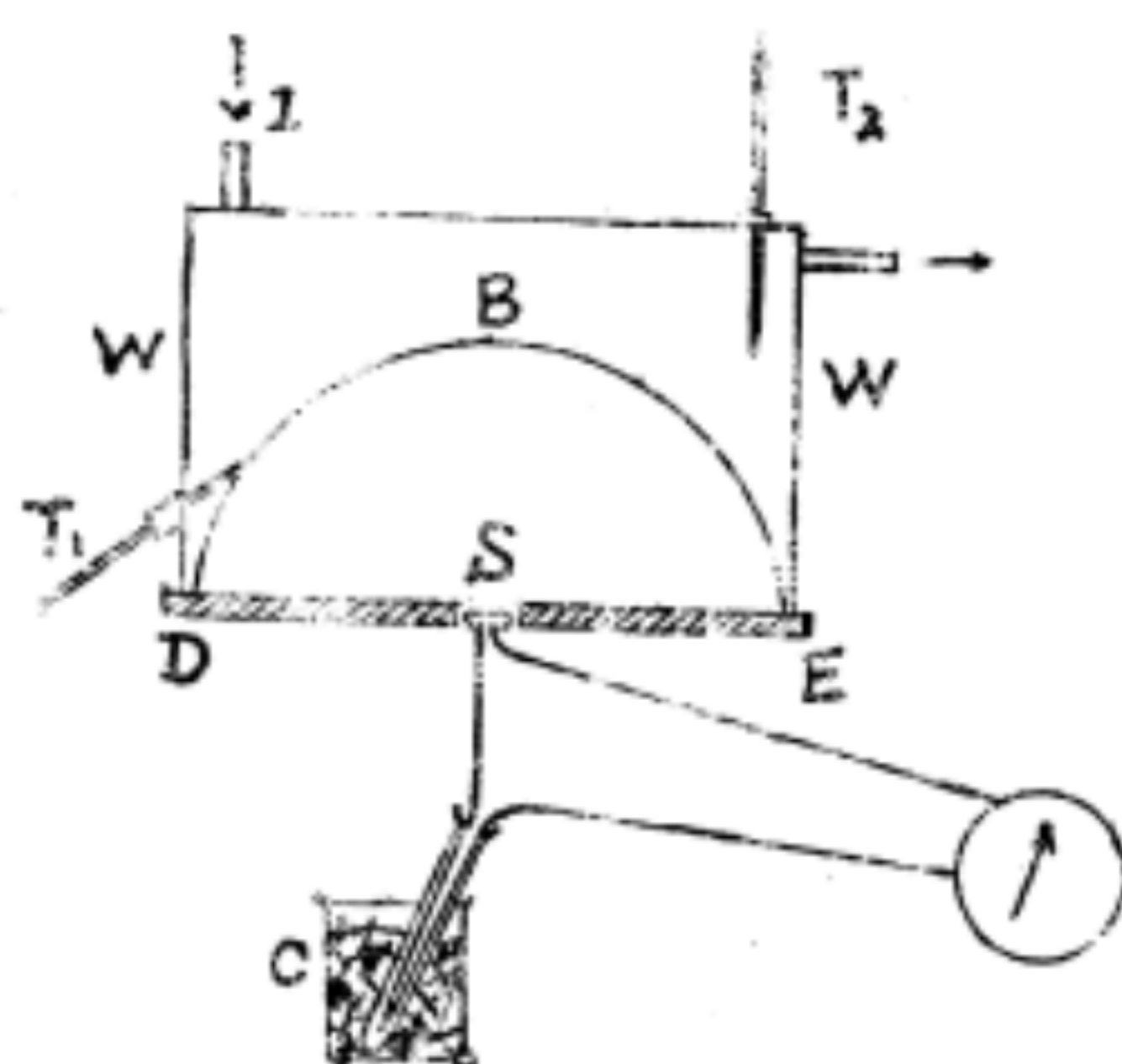
若 mS 各表物甲之質量及比熱， $\frac{dT}{dt}$ 表其溫度變化率，故

$$mS \frac{dT}{dt} = \frac{E_1 - E_2}{J} A = -\frac{\sigma A}{J} (T_1^4 - T_2^4),$$

$$\sigma = \frac{JmS}{A(T_1^4 - T_2^4)} \frac{dT}{dt}, \quad (28 \cdot 2)$$

內 J 為功之相當量 $= 4.18 \times 10^7$ 每卡厄。

- 儀器： (1) 半球形金屬鍋； (2) 木箱； (3) 溫度計三；
 (4) 小氣圓； (5) 熱電偶全套； (6) 停錶；
 (7) 蒸汽鍋； (8) 玻璃杯； (9) 水及燈火。



儀器之裝置略如圖 28·1。B 爲一兩面塗黑之半球形金屬鍋，其直徑約十吋，用內塗有錫之木箱 W 罩于其上。整個固置于桌面 DE，對鍋之中心鑽有一小孔 S。由 I 處導入蒸汽以熱 B

鍋，其均勻溫度自 T_1, T_2 讀之。B 鍋之裡黑面作輻射體，置于 S 孔之一小氣圓內裝有銀元，此小氣元上面應塗黑色，與桌面接觸處宜以絕緣體隔之。將測量小銀元因吸熱而增加之溫度，故需一精細之熱電偶，其一接線桿連于小銀元底面，他一接端沒入于量熱器 C 內之油管中。

實驗步驟：

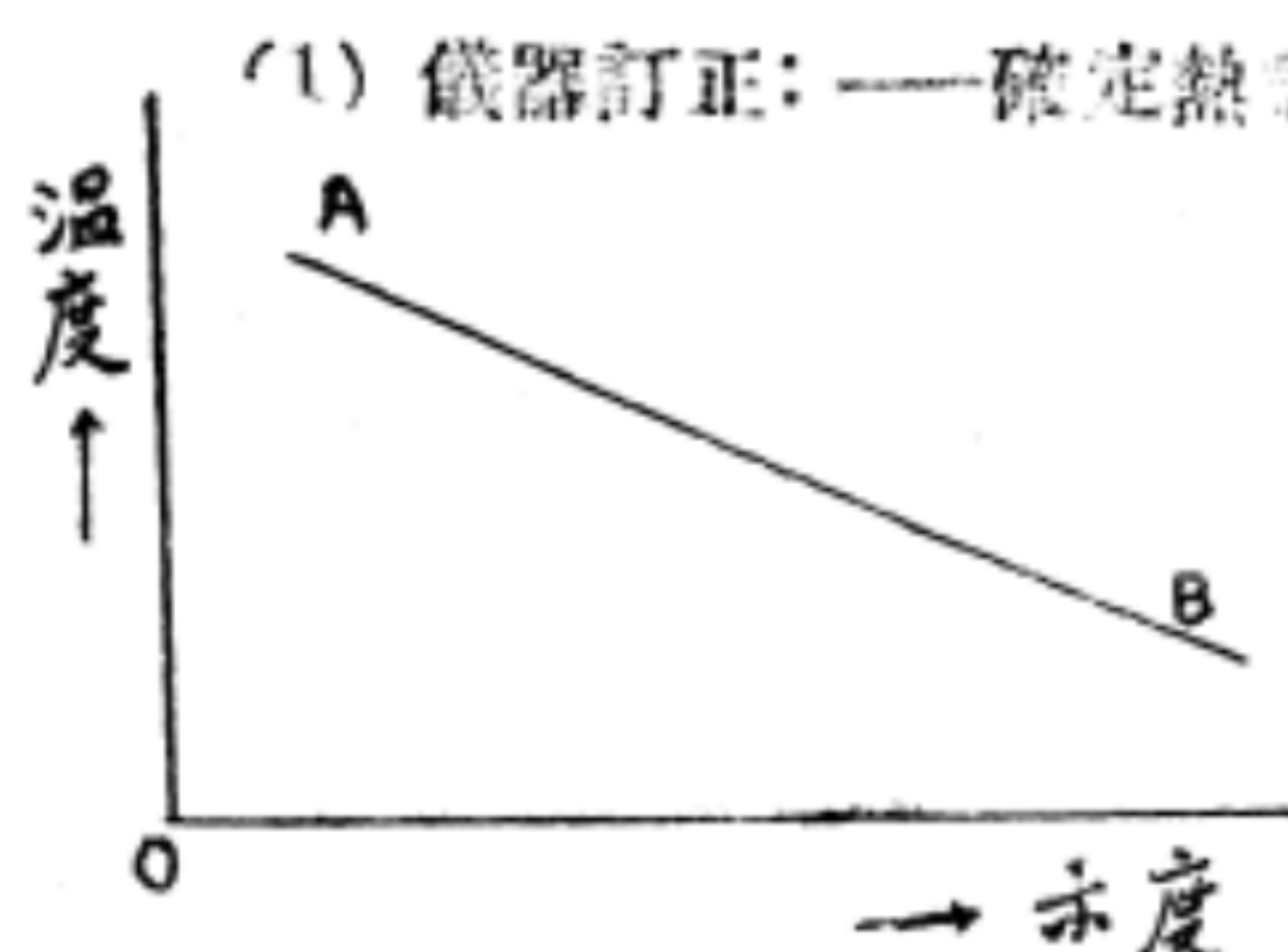


圖 23.2

(1) 儀器訂正：——確定熱電偶兩端溫度差與電流計示度之關係。
 (1) 將銀圓包以棉花，而用冷鍋置于其上。(2) 將量熱器 C 逐次加熱，記其溫度與電流計之示度。(3) 再測銀圓之溫度，于是可得溫度差與電流計示度之關係曲線如圖 23.2。故以後實驗時，既知 C 之溫度及電流計示度，由此圖即可得 S 處之溫度矣。

(2) $\frac{dT}{dt}$ 之測定：——(1) 取一小銀元，通 B 以蒸汽熱之。(2) 將量熱器 C 內之溫度固定(用水或冰均可)。待木箱內溫度達穩定狀態時，將小銀元由 S 孔塞入並使之夾定不動，此後每隔五分鐘記電流計示度一次。茲舉一例如下：

時間	示度	時間	示度
0	227	40	190
10	218	50	181
20	203	60	173
30	199	70	165

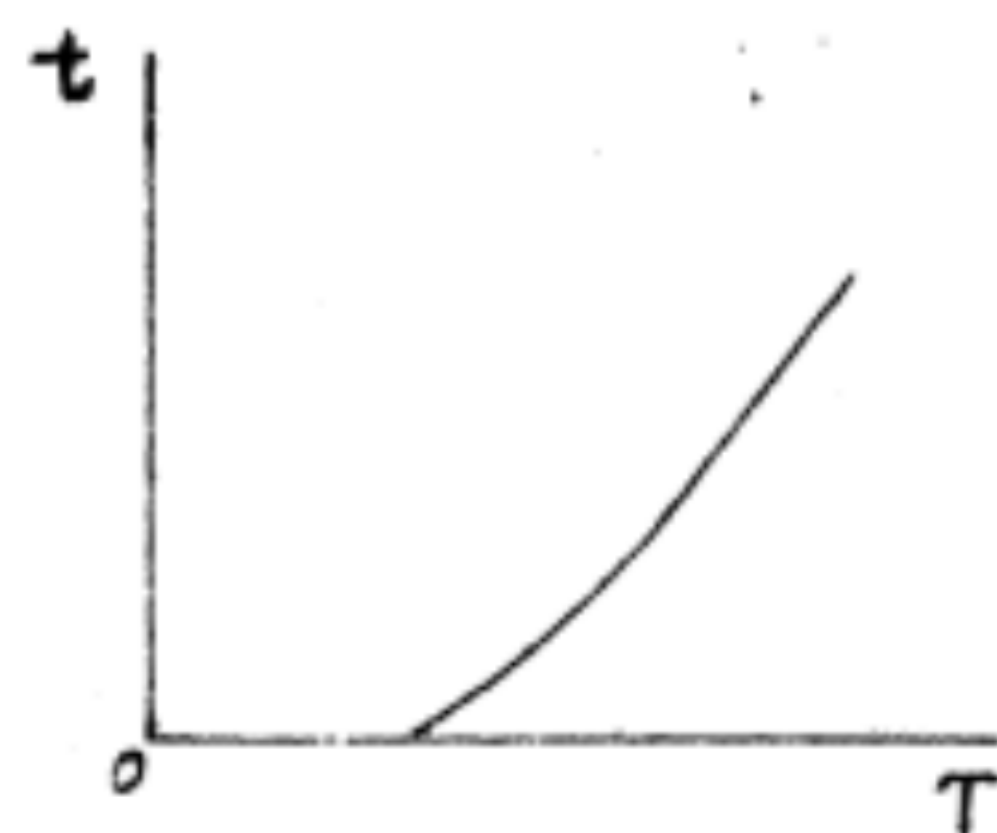


圖 23.3

(3) 從電流計之示度可自圖 23.3 查得相當之溫度差，故可得圖 23.3 之曲線。擇曲線近 A 處作一切線而量 $\frac{dT}{dt}$ 之值。此切點所以愈近 A 愈佳者，因傳導而引起之誤差與時俱增也。

(3) 最後照常法求得 A, m 及 S 等值，代入 (23.2) 式以計算 σ 。

VI 其 他

實 驗 二 十 四

溶 液 之 沸 點 與 其 濃 度

目的： 求溶液沸點上升與濃度之關係。

引言： 當一溶媒 (Solvent) 內滲以一非發揮性之溶質 (Solute) 若干，則其蒸汽壓由是降低，結果沸點因而上升。

溶液沸點較純溶媒沸點所上升之值 ΔT_b ，與此時溶液之蒸汽壓 P 及濃度各因素之變化有直接關係。據 Clausius-Clapeyron 氏方程示沸點之增減為

$$\Delta T_b = \frac{RT^2}{PL_v} \Delta P$$

又 Raoult 氏定律示蒸汽壓之降低為

$$\Delta P = \frac{n_2}{n_1 + n_2}$$

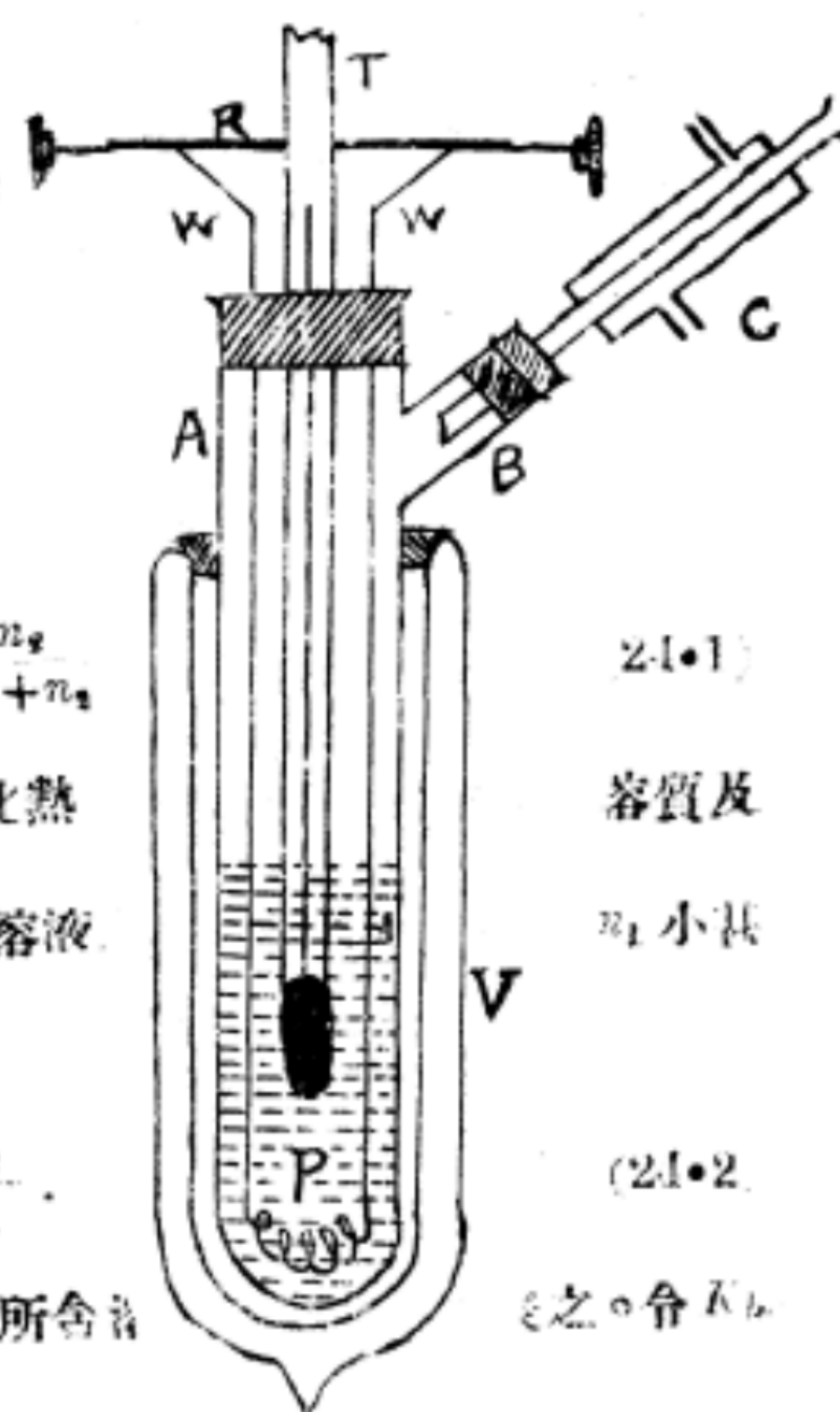
因此可得

$$\Delta T_b = \frac{RT^2}{L_v} \times \frac{n_2}{n_1 + n_2} \tag{24.1}$$

式內 T 及 L_v 各表純溶媒之沸點及汽化熱
溶媒之克分子數。惟此式僅適合于稀溶液
至可略而勿計，因此(24.1)式可改為

$$\Delta T_b = \frac{RT^2}{L_v} \times \frac{n_2}{n_1} \tag{24.2}$$

通常溶液之濃度以溶媒1000克中所含



容質及
 n_1 小甚
之。令 K_b

圖 24.1

表某溶液一克分子濃度之沸點上升值。今設有分子量 M_2 之溶質 W_2 克
 滲入于分子量 M_1 之溶媒 W_1 克內，則可得比例式如

$$\frac{\Delta T_b}{K_b} = \frac{\frac{RT}{L_v} \times \frac{W_2}{M_2} / \frac{W_1}{M_1}}{\frac{RT}{L_v} \times 1 / \frac{1000}{M_1}}$$

即
$$\Delta T_b = K_b \frac{1000 W_2}{M_2 W_1} \quad (24.3)$$

如已知 K_b 及 M_2 之值，故由各別 W_2 及 W_1 之量即可將 ΔT_b 計算而得。

茲列舉數種常用溶媒之各值如下表，以便查閱：

溶 媒	沸點(C) (760m.m.)	K_b	每10m.m.沸點 之校正值	汽化熱(卡)
Acetone	56.2°	1.480	—	124.5
Benzene	80.2°	2.570	24	94.4
Chloroform	61.2°	3.610	30	59.0
Ethyl alcohol	78.5°	1.150	10	204.4
Ethyl ether	34.6°	2.010	7	83.9
Water	100°	0.513	7	539.5

本實驗之要旨在求溶液之沸點如何隨濃度而變，並取實測得之結
 果與由方程(24.3)計算而得之 ΔT_b 相互比較。

儀器：(1) S.L. Rigelow 裝置；(2) Beckman 式溫度計；

- (3) 電源； (4) 水源；
 (5) 蒸溜水； (6) 精糖或
 其他有機化合物。

圖 21•1 所示係通常實驗室中之沸騰裝置，為 S.L. Bigelow 氏所設計者。A 為沸騰管，口有一塞，Beckman 式溫度計 T 及金屬捲絲 P 之兩接頭 WW (最好套以細玻璃管) 由此通過。接線兩端架於一絕緣棒 R 上，藉接頭通電流以熱液體。為避免熱之損益，實驗時用一 Dewar 瓶 V 裝軟塞套

圖 21•1

于管外。接管 B 接有冷凝器 C，以便沸騰時之溶媒蒸汽因此凝結而流還。

實驗步驟：

- (1) 將儀器裝置妥善。細衡蒸溜水之重 W_1 克，注入 A 管內。
- (2) 取 Beckmann 溫度計 T，調整其水銀柱使水之沸點近刻度之下端，插入致玻璃球完全浸在水中。於是通電流熱 P，通冷水于冷凝器。當水沸騰，用電阻調節電流使之保持正常甚盛之沸騰，待溫度已達定常，乃細測此時純水之沸點 T。
- (3) 關閉電流，待冷凝器再無水點下滴，乃取去之。將細衡過重之精糖 W_2 克由 B 管倒入，復將冷凝器裝上，並通電流熱之又測其沸

點，設為 T_1 。

(4) 如法將精糖繼續加入數次，設各次之重為 W_3, W_4, \dots, \dots 克；並求各次溶液之沸點，設為 T_2, T_3, \dots, \dots 。

(5) 查精糖之分子量 M_2 。實驗結果可登記如下：

蒸溜水重 $W_1 =$; 沸點 $T =$;

精糖分子量 $M_2 =$; 校正後之 $K_b =$;

精糖重 (W_2)	沸點	直接得之 ΔT_b	計算得之 ΔT_b
(W_2)	(T_1)	$(T_1 - T)$	
$(W_2 + W_3)$	(T_2)	$(T_2 - T)$	
$(W_2 + W_3 + W_4)$	(T_3)	$(T_3 - T)$	
⋮	⋮	⋮	

附註： 沸點變化之值甚微。但 Beckmann 式溫度計直接可讀至 $\cdot 01^\circ$ ，而計算可得 $\cdot 001^\circ$ ，故本實驗非用此種溫度計不可。學者如對其用法不甚清楚，可參閱

Warren & Flint: Advanced Practical Physics, Pp. 348--351.

實驗二十五

溶液之凝點與其分子量

目的：用降低溶液之凝固點法以求物質之分子量。

引言：一溶媒之蒸汽壓既因非揮發性溶質之滲入而降低，則其溶液之凝固點自然隨之下降。此可由下述之例說明之。如一純溶媒已達凝固點，此時固液兩態平衡存在，今若加入以若干溶質，由于溶媒液態蒸汽壓之降低，固態因此逐漸融化而為液態。故欲兩態再可平衡存在則非降溫不可。

關於稀溶液凝點之下降值 ΔT_f ，可從 Clausius-Clapeyron 氏方程之積分式導得，其結果為

$$\Delta T_f = \frac{RT_0^2}{L_f} \times \frac{n_2}{n_1} \quad (25 \cdot 1)$$

式內 T_0 及 L_f 各表純溶媒之凝固點及融解熱。

如以 K_f 表其溶液一克分子濃度之凝點下降值，則照上實驗之比例法可得

$$M_2 = K_f \frac{1000 W_2}{\Delta T_f W_1} \quad (25 \cdot 2)$$

此式表示溶媒 W_1 克內滲以溶質 W_2 克時，如觀察得其凝固點之降低值 ΔT_f ，則溶質之分子量 M_2 可以計算得之。

茲列舉數種常用溶媒於下：

溶 媒	凝固點	K_f	融解熱(卡)
Acetic acid	16.6°C	3.900	44.7
Benzene	5.4°	5.120	30.4
Water	0°	1.855	79.7
Nitrobenzene	5.72°	6.995	22.5

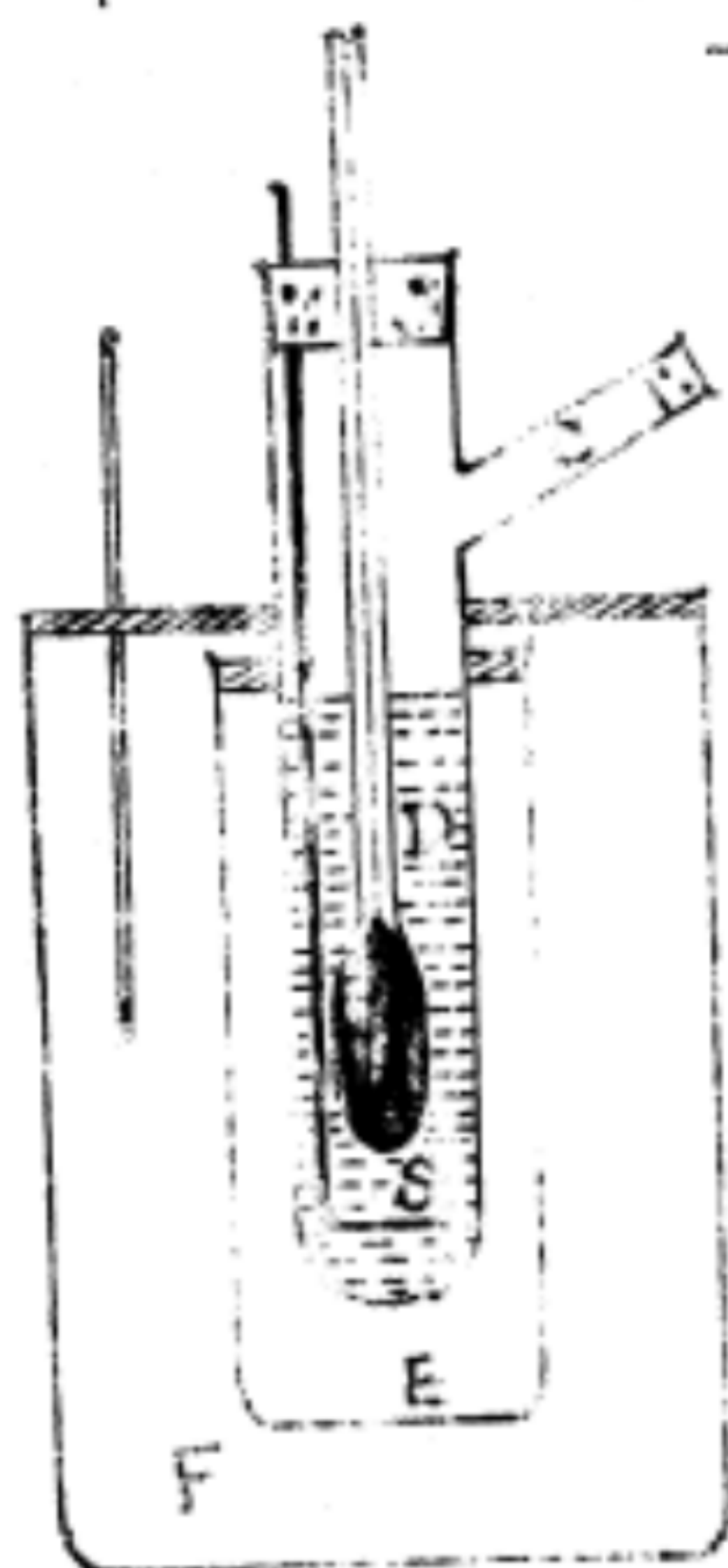


圖 25-1

凝管冷却和緩並有規則，外面盛空氣之管 E 。整個架于內儲冰鹽冷劑之 F 筒內，冷劑之溫度應低於所測之凝點更低 3 度為佳。

實驗步驟：

- (1) 裝 F 筒以冰鹽之混合冷劑，使溫度約在 -4°C . 左右。
- (2) 衡 D 管。注蒸溜水約半滿。再衡之，得水之淨重 W_1 克。于是套以 E 管，架于 F 筒內。並不時以 S 桿攪之。

儀器：

- (1) 凝管 D 及攪桿 S ；
- (2) Beckmann 式溫度計；
- (3) 外管 E 、筒 F 及冷劑(冰，鹽)；
- (4) 軟木塞；
- (5) 普通溫度計；
- (6) 蒸溜水；
- (7) 氯化鉀，氯化鈉。

本實驗所用儀器全部係玻璃製成。凝管 D 口之塞插以 Beckmann 式溫度計及攪桿 S ，旁有支管 C 。為使

(3) 將 Beckmann 溫度計之玻璃球置入另一冰水杯內，並調整其水銀柱面近刻度之上端。

(4) 待 D 管內之水將開始凝固，一面攪水，一面速將溫度計移入凝管水中（移溫度計必須十分迅速，否則水銀柱將滿過刻度而流出）。當液固兩態並存且溫度已達定常，即示水之凝點 T_0 。

(5) 細衡氯化鉀 W_2 克（其量可預先作一計算以使凝點降低約 0.3° 為最好），從 C 管送入，並以棒攪之。亦如法測其凝點。

(6) 再加入同量之氯化鉀，又測其凝點。于是由測得之 ΔT_f ，則氯化鉀之分子量可據 (25.2) 式計算而得。

(7) 如法用氯化鈉為溶質而實驗之。

附註：本實驗應特別注意之點如下：

甲 • F 筒內冷劑之溫度不可太低。

乙 • 過冷狀態 (Supercooling) 極易發生，應設法免除。

丙 • 攪動不應過速使盡量均勻。

丁 • 讀溫度計示度前必先輕叩之。

詳細情形學者可參閱

Findlay: Practical Physical Chemistry, Pp. 118-123

實 驗 二 十 六

求 熱 之 功 當 量

目的：藉兩錐之摩擦以測熱之功當量。

引言：熱可由作功得之，因此熱為能之一種；自 Rumford, Davy 及 Joule 等氏之實驗聞世，此問題已無疑義矣。至于測熱功量之值，方法甚多；為便利實驗室之簡而易舉，茲擇一 G. F. C. Searle 氏所設計之摩擦法如下。

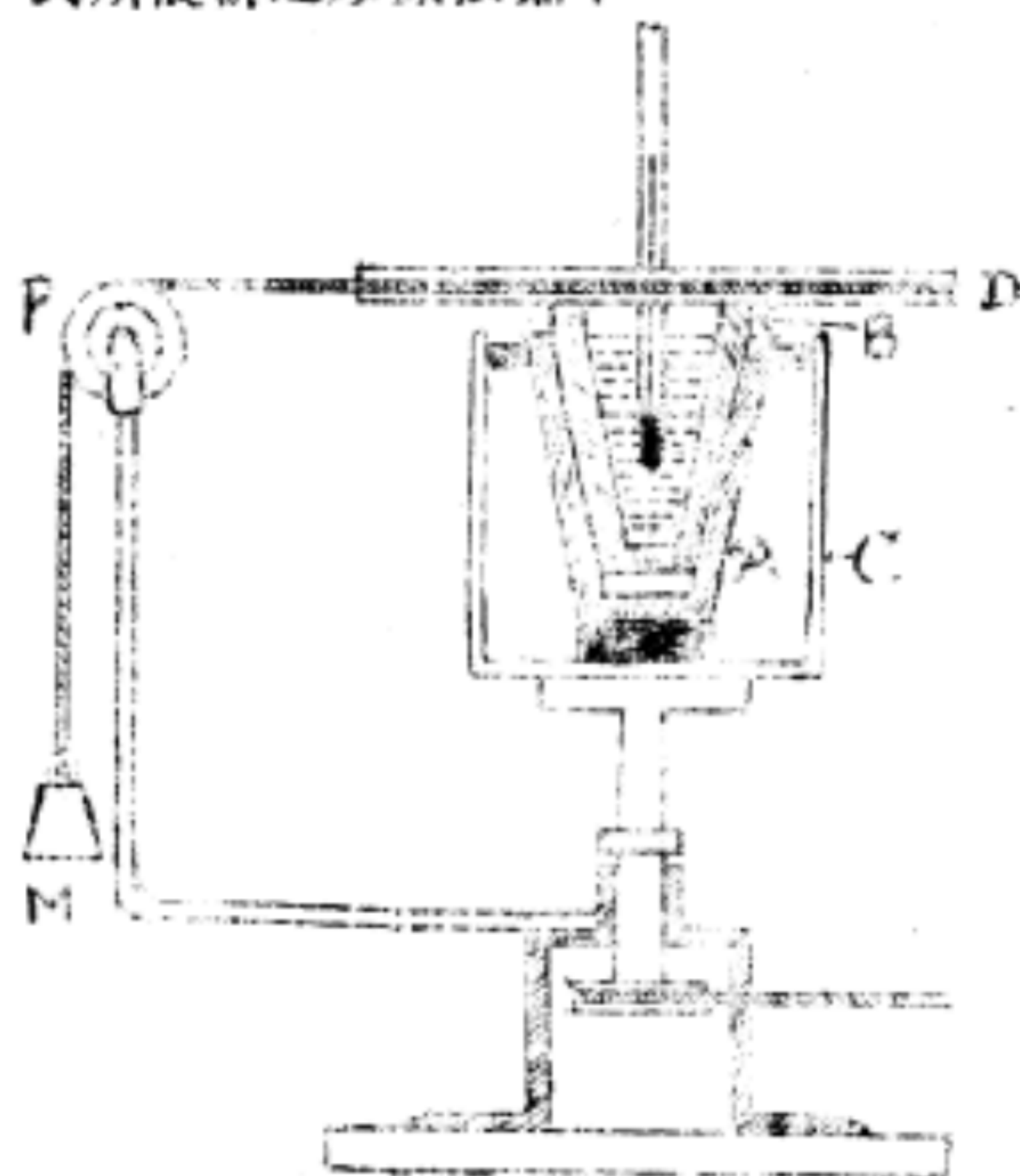


圖 26.1

實驗時所用之儀器如圖 26.1 所示。A, B 為二金屬圓錐體，互相套合，A 錐藉一絕緣環支持于 C 杯內，此杯之軸可連一皮帶于手搖飛輪而旋轉之。內錐 B 得固定于木盤 D 上，盤之邊有一槽可繫繩，跨過滑車 P 懸砝碼 M。錐內可盛水及溫度計。

當外錐轉動時，內錐因其間摩擦亦必隨之轉動，今如所懸之砝碼 M 克可以穩定不變，則此時之摩擦力偶必與轉動力矩抵消無疑。今設 R 為 D 盤之半徑，摩擦力偶則為 MgR ，因此錐轉動 N 轉而作之功乃為 $2\pi NMgR$ 。以 m 表錐內水重，W 表二錐之水當量， θ_1 表初溫， θ_2 表終溫，則有

$$2\pi NMgR = (m + W)(\theta_2 - \theta_1) J.$$

若加以熱量因輻射耗損之補正後，則公式變為

$$J = \frac{2\pi NMgR}{(m + W)(\theta_2 + \Delta\theta - \theta_1)}. \quad (26.1)$$

- 儀器： (1) 熱之功當量儀器(圖26.1)；
 (2) 溫度計(0—50°C, ½°)；
 (3) 停錶； (4) 天秤及砝碼；
 (5) 米尺； (6) 蒸溜水。

實驗步驟：

- (1) 將兩錐抹乾，衡其重，乘之以比熱，得水當量 W 。
- (2) 在兩錐摩擦面間敷以極微量之滑劑，裝置妥當，懸適當之砝碼于繩端，試以手搖飛輪，再加減砝碼，直使其可懸空穩定而止。
- (3) 待兩錐冷卻，一同取出，注以蒸溜水若干，衡之得水重 m 。裝入原位，並細測水之溫度二次，其平均值即 θ_1 。
- (4) 記下計數器之示數。次手搖飛輪，略變速度，當易使砝碼懸空穩定不動；否則，即加減之重亦當甚微。此時起手搖速度亦應均勻，並每隔半分鐘記錄一次。如此繼續搖動約十分鐘。停止搖動後，水之溫度仍繼續記錄若干次，以備作輻射補正計算之用。
- (5) 再察計數器之示數，乃得 N 。以米尺測 D 盤之半徑 R 。記懸空不動之砝碼重 M 。
- (6) 然後，依實驗十一之補正法求得 $\theta_2 + \Delta\theta$ 之值。將各值代入(26.1)式以計算 J 。

封底