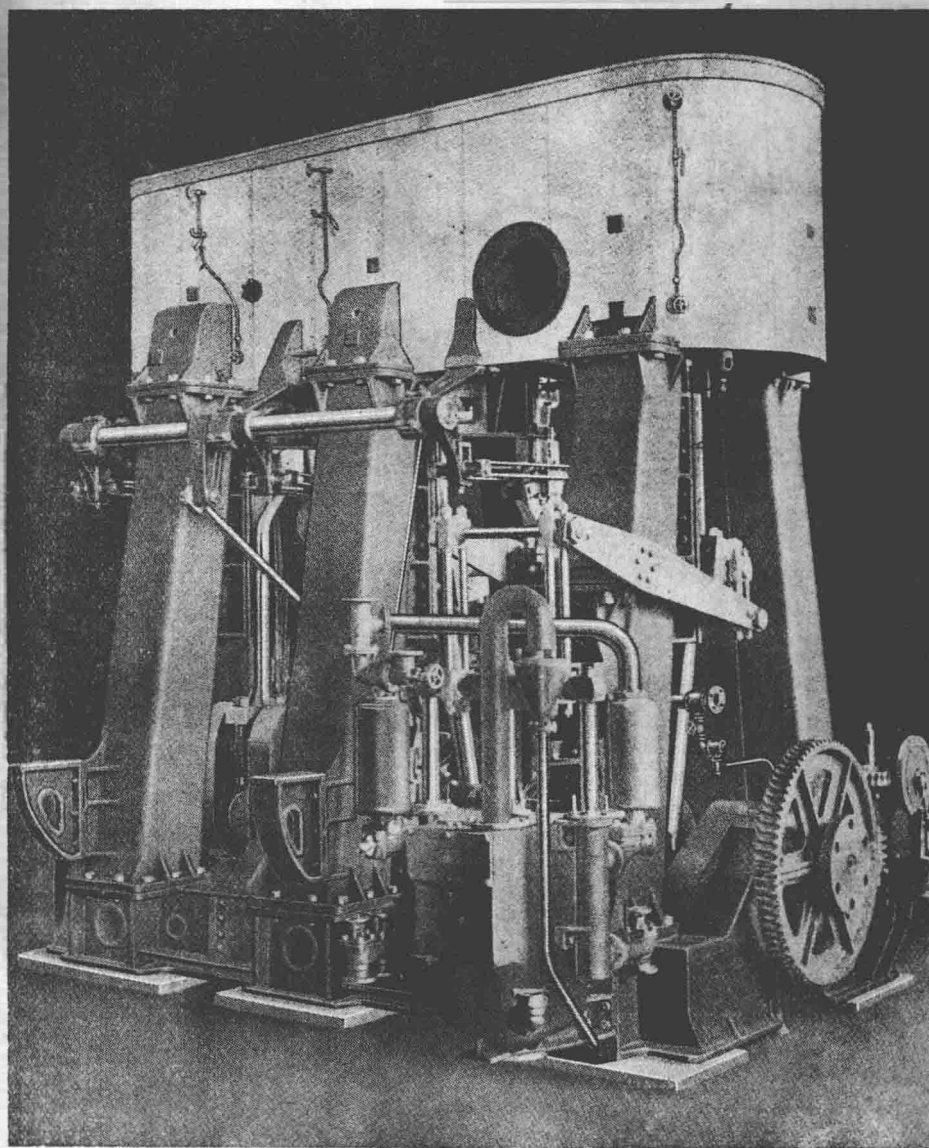


# 船用蒸汽機

劉 雍 編 著

東華書社發行



## 序

輪機工程為機械工程中之一重要部門，但對於這一部門之中文書籍，頗為稀少。在各校中教授所用課本，一向均採用外文。其內容雖頗豐富，但對於語言之隔膜，為一大障礙，而在廣大海員之欲於工餘自修者，更有無從着手之苦。作者曾執教輪機課程於上海航務學院及同濟大學，並曾參與歷屆船員檢定考試工作，深感有系統的介紹輪機工程，及用中文編譯出版，實為當務之急。

本書乃根據在上海航務學院之輪機學講義，重加編訂而成。內容以介紹船用蒸汽機為主。對於船用汽旋機，內燃機及鍋爐學等等，均未包括在內，當另見專書。本書寫作之目的，為供給大學輪機學之教本，及海上輪機工作者參考自習之用，故內容力求精簡，插圖務求其多。

書內所用之各項專門名詞，多取材於劉仙洲先生所編之「機械工程名詞」。一部份則出之作者意譯，其中可以商確修改之處，自必繁多。本書所用之重要參考書目，亦詳列於書末之附錄中。中英文對照表則與索引合併。

作者編著本書，蒙承各方勉勵援助，至為感激。然而倉卒付印，錯誤失漏，及需要修改訂正之處，勢所難免，尚祈隨時能予指正為幸。

劉 雍 一九五一年十月於上海

### 本書主要參攷書籍

1. Marine Engineering : Seward.
2. Marine Engineering : A.E. Tompking
3. The Marine Steam Engine : Sennet And Oran
4. The Marine Power Plant : Chapman
5. The Marine Engines And Boilers : Bauer And Robertson
6. Steam Engine Theory And Practice : William Ripper
7. Naval Machinery.
8. Modern Marine Engineering Manual : Osbourne
9. Marine Steam Engineering : Dwyer.

# 船用蒸汽機

## 目 錄

第一章 熱及蒸汽	1—7
第一節 單位及定義	1
第二節 熱之傳導	3
第三節 水之汽化	5
第四節 定壓時水之汽化	6
第二章 氣體熱力學	8—13
第一節 熱力學定理	8
第二節 汽體膨脹時之作功	9
第三節 加諾氏循環	11
第三章 蒸汽之性質	14—21
第一節 蒸汽之組成	14
第二節 蒸汽之膨脹	18
第三節 蒸汽膨脹之使用	21
第四章 船用蒸汽機之歷史與其發展	22—28
第一節 船用蒸汽機之歷史	22
第二節 早期之船用蒸汽機	24
第三節 近代之船用蒸汽機	28
第五章 船用鍋爐	29—41
第一節 船用鍋爐之進展	29

第二節	蘇格蘭式火管鍋爐	31
第三節	水管鍋爐	34
第四節	B. & W. 式水管鍋爐	35
第五節	福斯特惠勒水管鍋爐	37
第六節	三汽鼓式快速鍋爐	38
第七節	爐水處理	39
第八節	燃燒	40
<b>第六章</b>	<b>船用往復蒸汽機之效率及其改進</b>	<b>42—53</b>
第一節	船用蒸汽機之效率	42
第二節	蒸汽套之採用	44
第三節	蒸汽套之構造及影響	45
第四節	過熱蒸汽之應用	46
第五節	複式膨脹蒸汽機之使用	48
第六節	複式膨脹蒸汽機之作功	50
<b>第七章</b>	<b>汽缸及其附件</b>	<b>54—67</b>
第一節	汽缸之組成	54
第二節	活塞	58
第三節	活塞脹圈	60
第四節	活塞桿	61
第五節	填料箱	63
第六節	金屬填料箱	64
第七節	汽缸附件	66
<b>第八章</b>	<b>往復蒸汽機中之運動部份</b>	<b>68—79</b>
第一節	總論	68
第二節	活塞桿上所受之壓力	69
第三節	十字頭	70
第四節	聯桿	72
第五節	曲柄軸	74

第六節 潤滑系統.....	77
第九章 蒸汽機之機架、基座、主軸及軸承.....	80—90
第一節 機架.....	80
第二節 基座.....	81
第三節 主軸.....	82
第四節 主軸軸承.....	83
第五節 推力軸承.....	83
第六節 尾軸套筒.....	88
第十章 滑動汽門與汽門圖解.....	91—106
第一節 滑動汽門之作用.....	91
第二節 偏心輪與汽門運動.....	94
第三節 導程及餘面.....	96
第四節 雙口汽門與平衡環之減壓裝置.....	97
第五節 活塞形滑動汽門.....	99
第六節 均衡活塞.....	100
第七節 進位角，曲柄運動與活塞之關係.....	100
第八節 芮納汽門圖解.....	102
第九節 聯桿傾斜之影響.....	105
第十一章 倒車裝置——連動桿運動.....	107—113
第一節 總論.....	107
第二節 斯蒂文生連動桿運動.....	109
第三節 連動桿之構造.....	110
第四節 獨立聯動桿接動機構.....	111
第五節 倒車機構.....	112
第十二章 馬力指示圖.....	114—125
第一節 馬力指示器.....	114
第二節 馬力指示圖.....	117
第三節 汽缸間隙.....	119
第四節 實地馬力指示圖所顯示之差誤.....	120

第五節	平均有效壓力及指示馬力之計算	122
第六節	複式膨脹蒸汽機之馬力指示圖	124
第十三章	冷凝器	126—141
第一節	冷凝器之作用	126
第二節	冷凝器之種類	128
第三節	魏氏順流冷凝器	133
第四節	冷凝器之改進	134
第五節	冷凝器管子之腐蝕	136
第六節	空氣邦浦	137
第七節	循環水邦浦	139
第十四章	鍋爐給水系統	142—156
第一節	鍋爐給水之供給	142
第二節	爐水之侵蝕性	144
第三節	開式給水系統	145
第四節	閉式給水系統	146
第五節	給水邦浦	147
第六節	爐水預熱器	150
第七節	蒸溜設備	153
第十五章	管系與汽門	157—169
第一節	總論	157
第二節	管子接筭及墊料	158
第三節	管系	160
第四節	汽門	162
第五節	壓力控制汽門	167
第六節	汽水分離器	168
第十六章	艙面輔助機	170—176
第一節	總論	170
第二節	司舵機	171
第三節	電動油壓司舵機	173
第四節	起錨機及絞盤機	175
中英對照		177—185

# 船用蒸汽機

## 第一章 熱及蒸汽

### 第一節 單位及定義

在研究蒸汽機時，其內容必須涉及多門其他之學術理論。而其中直接有關係而又重要之原理，莫如應用力學，材料力學，化學，物理學及熱力工程學。而其中尤以熱力工程學，為一切熱力機械之基礎，亦為其學理之主要依據。是以在研究蒸汽機之前，必須先將熱力工程學，有一明確之印象，然後才能進而討論蒸汽機之學理，及其使用狀況。在介紹熱力工程學之前，對於熱力工程上所用之單位及定義，實有闡明之必要。今僅就其最重要者，略舉數則，分述如下。而此數種單位及定義，在此後研究蒸汽機時，均將時常用到。

1. 力 (Force) —— 力加於物體，可以使靜止之物體，有發生運動之傾向。力之單位，在英美制為磅 (Pound)，在大陸制或公制為克或鈣 (Gram or Kilogram)。

2. 壓力 (Pressure) —— 將一定大小之力，加於一單位平方面上，所受之力，即為壓力。故壓力之單位為每方吋若干磅，或每方公分若干克。

3. 大氣壓力 (Atmosphere Pressure) —— 大氣壓力須視大氣之密度而定。在一般之應用時，乃以在海平面上 (即在 30 吋水銀柱壓力時)，每方吋 14.7 磅，是即為在海平面之大氣壓力。



4. 絕對壓力(Absolute Pressure)——假定從大氣壓力等於零時，所量之壓力，即等於絕對壓力。是以在海平面時：

絕對壓力 = 表上所示壓力 + 14.7 磅/方吋。

5. 功 (Work)——當物體受力而移動時，即稱之為做功。故功即等於力乘距離。在英美制，功之單位為呎磅，在公制，則功之單位為克米，或廷米。

6. 功率 (Power)——在某一單位時間內，所作之功，即名之為功率。

7. 熱之單位——熱之單位，並不以溫度表作為根據。在英美制之單位為 B.T.U. (British Thermal Unit)。一個 B.T.U. 之熱量相當於將一磅之純水，在  $62^{\circ}\text{F}$  時升高  $1^{\circ}\text{F}$  所需之熱量。此種單位，雖然使用時並不方便，但為一般所採用。在大陸制，則熱之單位為加羅里 (Calorie)，一個加羅里之熱量，等於一克之純水，在  $4^{\circ}\text{C}$  時升高  $1^{\circ}\text{C}$  時，所需要之熱量。二者換算之數值為：

1 加羅里 = 3.968 B.T.U.      1 B.T.U. = 0.252 加羅里。

8. 溫度 (Temperature)——物體中所含熱量之多少，可以用溫度來衡量。如果以溫度不同之物體相置一處時，熱乃從高溫度流向低溫度，直到二者之溫度相等。熱量流傳之速度與溫度差成正比，即溫度差愈大時，熱度之流傳也愈快。溫度與熱量不同，如將一杯開水，測得其溫度與熱度各為多少，今將沸水傾去一半時。熱量應減少一半，但其溫度却並不因此而減低。溫度之單位頗多，一種為攝氏 (Centigrade)，一種為華氏 (Fahrenheit)，在一個大氣壓力時，水之沸點為  $100^{\circ}\text{C}$ 。或  $212^{\circ}\text{F}$ 。

9. 絕對溫度 (Absolute Temperature)——氣體受熱時，有膨脹之現象，反之如將熱量取去，則氣體體積有縮小之現象。今假定一立方呎之氣體，在  $32^{\circ}\text{F}$  時，冷卻  $1^{\circ}\text{F}$ ，則用精密儀器測量，氣體體積將縮小  $1/492$  倍。今假定氣體受冷而體積縮小之比例不變，當氣體冷至一

492°F時，此一立方呎之體積即等於零（即縮小492/492倍）。今即將此冰點下492°F作為絕對溫度，意即在絕對溫度時，氣體中一切分子運動完全停止。絕對溫度在熱力工程計算方面有極重要之地位。今將絕對溫度，華氏與攝氏溫度之對照表，比較如下：

	華氏	攝氏
絕對溫度 = 0°	-459.6°F	-273.1°C
華氏溫度 = 0°	——	-17.78°C
水在冰點	32°F	0°C
水最大密度時	39.1°F	3.94°C

10. 比熱(Specific Heat)——不同之物質有不同之含熱量，此種含熱量之不同，可以用比熱來表示之。當一磅之物質升高1°F時，所需要之熱量(B.T.U.)，與一磅水升高1°F時所需熱量之比，即為此物體之比熱。水之比熱在不同溫度下稍有不同，但在水溫度最大時，其比熱為一。

11. 能(Energy)——能為作功之能力，可以存在於各種不同之狀況中，靜能為儲藏不露之能，動能為物體運動時之能，在不同之狀況下，能可以互相變化，如煤中所儲之靜能，可以變為熱能，由熱能變為機械能，由機械能變為電能，凡此種種皆是熱能各種形態之變化。在一般情形，皆以熱作為能之衡量標準。

12. 裘爾比值(Joule's Equivalent)——為確定熱能與機械能間之關係起見，裘爾曾作過很多之精密實驗，將水、油、水銀及其他物質間因運動摩擦而生熱加以比較，結果確定每一個B.T.U.之熱量等於778呎磅之機械能。為紀念此偉大之發現起見，即以發現者之名來稱呼這一比值，平時用大寫之J來表示，同時根據這一比值，可以將熱能與機械能之關係確立，在熱工學之應用上，有莫大之價值。

## 第二節 熱之傳導

熱工學之基本原則，為研究如何將熱能，轉變成機械能，而加以運用，使靜能變成動能而作功。在處理熱的問題時，最初之問題即為熱如何可以傳導，其情形在物理學中已經闡明。熱之傳導可以由於三種方法：

1. 輻射 (Radiation)——當烤火時，不必與火爐接觸，即可以感到火爐中所發生之熱，此種感覺，乃由於火爐中熱能之輻射而來，故輻射為一種熱之傳導方法。熱能之輻射，與光之情形相似，即沿一直線向外射出。在蒸汽機中，此種輻射現象，有二種重要之影響，一為利用燃燒所生之熱能，經過輻射而傳到鍋爐中，鍋爐中之水，吸收熱能而變為蒸汽，是為將燃料中之靜能，傳達到蒸汽中變為熱能，而再使熱能變為動能以作功。次為蒸汽在鍋爐中及經過各管子和汽缸部份時，因蒸汽本身溫度較外面為高，故一部份熱能乃由於輻射而散失於四周空氣之中，此種散失之熱能，乃歸於損失。為減少這種損失起見，可以將容納或通過蒸汽之各部份，包裹一層熱之絕緣體。此絕緣體可以用石棉、木材、帆布、礦物或其他物質所組成，藉此以減少熱之輻射。

2. 傳導 (Conduction)——熱之能夠從高溫度物體傳到低溫度物體，已為極明顯之事實。此種熱傳導，可以從二方面來講，一為內部之傳導，在同一物體之內，有熱之傳導。次為兩個物體溫度不同，互相接觸時，熱乃自高溫度流向低溫度，直到二者之溫度相等為止。

3. 對流 (Convection)——此種傳熱之方法，主要應用於液體及氣體方面。如將液體或氣體置於一容器之中，在下面加熱，則容器下部之液體或氣體先吸收熱能，於是密度減少逐漸上升，上部較冷之液體或氣體密度較大，乃行下降。如是川流不息，造成對流。直到最後容器內各部份之溫度完全平均。此種現象為鍋爐中傳熱之主要方法，使水相對流，繼續吸收熱能，而化為蒸汽。有時為增加對流效率起見，更使用人工方法來增加對流，以加快熱傳導之速度，以增加蒸汽之產

量。

### 第三節 水之汽化

將油或煤在鍋爐中燃燒，所產生之熱，經過輻射、傳導及對流而傳達到水中，於是水之溫度均勻上升，達到沸點。此時水雖繼續吸熱，但溫度不再上升，但水之形態開始改變，由液體而漸變為汽體，此為由水變為蒸汽之步驟。但在水之汽化過程中，有數種現象必須闡明之，然後才能討論到蒸汽之性質。

1. 顯熱(Sensible Heat)——水自冰點起，繼續加熱而至沸點，在這一段過程中，溫度繼續上升而至沸點為止，在溫度表上可以看出，水之溫度雖然上升，但水之形態不變，此時所加之熱，名之為顯熱。因為在溫度表上，可以顯示加熱之多少，故可以直接計算得到。

2. 潛熱(Latent Heat)——水之溫度達到沸點之後，雖然仍舊繼續加熱，但其溫度即停止於沸點，不再上升。繼續所加之熱，仍被水所吸收，而水之形態開始改變，由液體化為汽體。蒸汽與水之形態雖然不同，但是其溫度相同，此種從達到沸點後，再加之熱，即名之為潛熱。因為是潛伏在內部，溫度表上，並不能夠顯示熱量之增加。除水與蒸汽之外，水與冰亦有同樣之現象。在冰點時，水與冰可以共同存在，所不同者即水中所含之熱量較冰為多，如果將這一份熱取出，則水即改變形態而變成為冰；而將冰加熱時，即變為水而溫度並未增高，這一部所加或取出之熱，對於溫度，並無影響，是即為潛熱。故潛熱之定義，也可以解釋為當物體變化形態時，所需要增加或減少之熱量。

3. 沸點(Boiling Point)——液體吸收熱量，到一定之溫度後，即行汽化，當汽化之壓力超過液體之壓力時，即稱之為沸點。是以液體之沸點，並不是始終不變，須視其壓力不同而定，壓力愈大時，沸點之溫度也愈高。如水在一個大氣壓力時，沸點為  $212^{\circ}\text{F}$ ，如果壓力增

加到每方吋100磅時，其沸點為  $337.61^{\circ}\text{F}$ ，如果壓力增到200磅時，沸點為  $387.57^{\circ}\text{F}$ 。如果將這種關係，列成一表，同時並可以表明顯熱，潛熱，總熱及體積之關係，此表即名之為蒸汽表，使用時對於蒸汽之性質，一索即得。

4. 總熱 (Total Heat)——總熱之定義，即等於顯熱與潛熱之和，故又名之為液體之熱量 (Heat Content of Liquid)。但嚴格說來，潛熱又可以分為二部份，一部份之熱量全為用以改變液體分子之構造情形，使重新排列，是為內潛熱。同時另一部份之熱量可以將液體之體積改變，重心提高，並且要克服四週之阻力，此種熱量，是為外潛熱。二者之和，即等於潛熱。潛熱再加顯熱，即等於總熱。因為在測量總熱時，必須有同一起始點，作為根據，始能計算。故皆以從  $32^{\circ}\text{F}$  量起，此物質所包含之熱，即為總熱。

#### 第四節 定壓時水之汽化

今假定有一容器 AB，在此容器中有一活塞，可以自由上下運動，但不能漏汽，在活塞之上有一定之重量壓住，每方吋為若干磅。今在容器內放置二磅之水，溫度為  $32^{\circ}\text{F}$ ，然後在容器之下加熱，水之溫度乃升高，但活塞則仍留於原處，當水熱到沸點時（沸點溫度須視活塞上壓力而定），再繼續加熱，則水乃開始汽化，在這一段時間中，溫度不變，蒸汽逐漸增加，蒸汽之壓力逐漸超過活塞上之壓力，直到容器中之水全部化為蒸汽時為止，溫度始終保持在沸點。活塞因為蒸汽之壓力而向上移，其逐步變化，可以在第一圖中表示之。

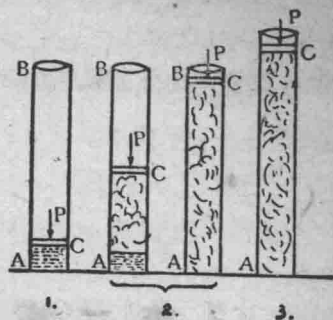
在汽化過程中所加之總熱，可以從汽化之步驟分別說明之：

1. 水在容器中吸收外熱，溫度從  $32^{\circ}\text{F}$  起，到沸點為止，所加之熱為顯熱，可以從溫度表中測得其熱量。

2. 水在沸點時汽化，在這一段過程中溫度始終不變，但水繼續吸熱，由開始到完成汽化，所加之熱即為潛熱。此時汽體體積膨脹，必

須超過活塞C之壓力，將活塞推上。本來水積存在容器之底部，今化為蒸汽，一方面將活塞推上而作功，一方面水之質量位能提高，是即為內潛熱與外潛熱之分別。

3. 如水完全汽化之後，壓力不變，繼續加熱，蒸汽乃繼續膨脹而將活塞再繼續推上，蒸汽溫度亦自沸點再提高，此時之蒸汽乃是過熱蒸汽，因其含熱量增多，而形態不變，故溫度亦有顯著之增加。



第一圖 水之汽化

## 第二章 氣體熱力學

### 第一節 熱力學定理

1. 熱力學第一定理——“熱能與機械能可以互相交換，但是不憑空產生或消滅之”。當一定數量之熱消失後，必可以產生一定數量之機械能，反之亦可以從機械能變到熱能，其中變化之關係即可以用裘爾比值來表示，即  $1 \text{ B.T.U.} = 778 \text{ 呎磅}$ 。

2. 熱力學第二定理——“沒有一樣機械，無論是理想的或實際的，能夠將熱能完全變成機械能”。此乃由於熱能之傳導，僅限於從高溫度傳到低溫度，而到二者之溫度相等時，即停止傳導，而熱之傳導又僅有一個方向。不能逆傳，否則將可以得到永久運動，是為不可能之事情。

在詳細討論蒸汽做功之前，必先明瞭，空氣受熱之情形，因為空氣之性質，近於理想氣體，可以從數學公式計算，更可以用定理定律來規範空氣因受熱之變化，在研究空氣對於熱之變化時，可以從物理學上之波義爾定律與查理氏定律開始。

波義爾定律(Boyle's Law)——“理想氣體之溫度不變時，其壓力與容積之乘積，為一常數”。用公式表示之：

$$PV = C$$

$$P = \text{壓力}$$

$V$  = 容積

$C$  = 常數

查理氏定律 (Charle's Law)——“理想氣體當壓力不變時，其體積之變化與絕對溫度之變化成正比”。

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

$T$  = 絕對溫度。

根據上面所述之二項定律，對於理想氣體之性質（壓力，容積與溫度）皆有一規範可循，故可以加以計算。此為計算氣體性質最基本之定律，其單位之關係，在各種物理書籍中，皆有說明。

## 第二節 氣體膨脹時之作功

在第一圖中，水因汽化而體積膨脹，壓力增高，將活塞推上而作功，但溫度仍維持不變，即繼續從外界吸收熱量，此種膨脹名之為等溫膨脹 (Isothermal Expansion)。如果不照這一方法，而使外界之熱源隔絕，僅靠氣體本身所含之熱量而膨脹，雖然同樣可以使被活塞推上，但是其所能產生之壓力，必然低於等溫膨脹，這種僅靠氣體內部所含能力之膨脹，名為絕熱膨脹 (Adiabatic Expansion)。此二種膨脹情形，在研究氣體性質時，有極重要之地位。但此時必須認明，即是這二種膨脹，皆為在理想情形下之膨脹，在實際情形中，不能辦到。因為無論如何，必有因熱之傳導所引起之熱損失，而不能達到理想之地步。今將二種不同之理想膨脹做功情形，分論如下：

1. 等溫膨脹之作功——用圖解方法來表示，橫座標為容積，豎座標為壓力。氣體本來之壓力為  $P_1$ ，膨脹後，活塞移動，體積增加，而壓力下降到  $P_2$ 。結果此壓力  $P$  之軌跡即為壓力線  $ab$ ， $ab$  線下之面積即等於膨脹時所作之功，因為面積即等於壓力乘距離，如第二圖中所示。



因爲  $PV = C$ 。故

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 = PV = C。$$

從  $V_1$  到  $V_2$  積分求其面積

$$\begin{aligned} \text{面積} &= \int_{V_1}^{V_2} \frac{P_1 V_1}{V} dV \\ &= P_1 V_1 \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} \\ &= P_1 V_1 \text{Loge} \frac{V_2}{V_1} \end{aligned}$$

$$= P_1 V_1 \text{Loge} r。$$

$r =$  氣體膨脹之體積比。

而  $P_1 V_1 = PV = RT$ 。

∴ 做功 (= 面積) =  $RT \text{Loge} r$ 。

以上之公式，爲等溫膨脹時之作功，即等於  $P_1 V_1 \text{Log} r$ ，或等於  $RT \text{Loge} r$ 。R 爲氣體常數。T 爲絕對溫度。

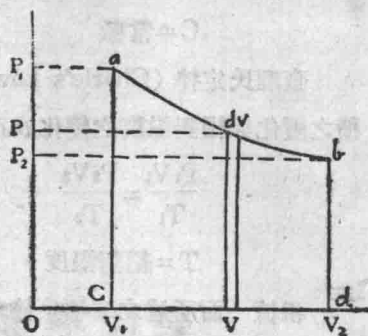
2. 絕熱膨脹之作功——絕熱膨脹之作功，必然少於等溫膨脹之作功，其做功之量，應恰等於其內部能力之變化，故絕熱膨脹做功 =  $K_v(T_1 - T_2)$ ， $K_v$  爲在定容量時之比熱，其單位爲呎磅。

絕熱膨脹曲線之數學公式，應寫成  $PV^n = C$ 。n 之值爲在定壓及壓容時比熱之比率，即  $K_p/K_v = 1.4$  (空氣) 因此既知膨脹曲線之公式，可以計算其面積，而面積即等於做功。

$$\text{面積} = \int_{V_1}^{V_2} P dV$$

$$\text{但 } PV^n = P_1 V_1^n \quad P = \frac{P_1 V_1^n}{V^n}$$

$$\text{面積} = \int_{V_1}^{V_2} \frac{P_1 V_1^n}{V^n} dV$$



第二圖 膨脹做功