

工程熱力學

(上 冊)

王石安編著

54

臺灣中華書局印行

工 程 熱 力 學

王 石 安 編 著

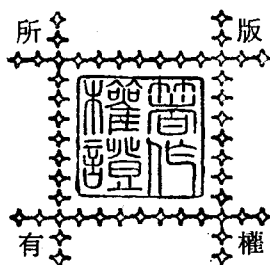
臺 灣 中 華 書 局 印 行

中華民國五十九年九月初版

大學
用書
工程熱力學（上冊）

平裝基本定價六元七角正

（郵運滙費另加）



編者 王石安
發行人 劉克寰
印刷者 臺灣中華書局
發售處 臺北市重慶南路一段九十四號

臺灣中華書局股份有限公司代表
臺北市重慶南路一段九十四號
劉克寰
臺灣中華書局印刷廠
臺北市西園路二段一六巷五號
臺灣中華書局
臺北市重慶南路一段九十四號
郵政劃撥帳戶：三九四二號
Chung Hwa Book Company, Ltd.
94, Section 1, South Chungking Road,
Taipei, Taiwan, Republic of China

（臺總）甲書

工程熱力學序言

熱能爲所有工業活動的根源。一切產品之良窳廉昂，莫不視熱能利用的巧拙以爲斷。

本世紀之初，德意志勃興成爲全世界工業首屈一指的國家，完全歸功於熱能的善爲利用，而流傳於科學史上。此一段史蹟，足爲其他國家所借鑑與仿效。是故我國工業之能否突飛猛晉，有賴於我國熱力學者的殫心竭慮闡發精微至深且鉅。

由是今後有關熱力學應課的內容，不僅對於將來的機械結構與機能的說明，同時對於所發生的熱現象實態，尤須明瞭，若不觸及熱現象的真相，而予以體驗，則一切工業的發展，無從期待。爲配合科學界無止境的進步，尋求新的熱源，構想新的熱機，設計新的加熱機構，方爲熱力學進步的嚆矢。

熱力學爲理論物理學的一分科，係研究在平衡狀態下物理學體系的一般性質與平衡成立之際所產生的一般定律性。因之，熱力學遂分爲現象論的熱力學與統計的熱力學兩種。本書所述，固爲現象論的熱力學，然其中成爲問題的熱力學上諸命題，恆以物體內部分子構造與分子的過程機構，作爲考察對象。其情況雖尚未甚明瞭，然有公式化與應用的可能性，故此部分恆基於經驗而由一連串的命題爲其出發點。至於物體的性質，則係由利用既有經驗所得的結果。統計熱力學的特徵，厥惟物體分子（原子）構造而使之有一定模型加以使用，同時又可利用統計方法與數學方法的確率論作爲研究的工具。按現代科學的趨勢，現象論的熱力學與統計的熱力學的劃分，迺爲必然的歸結。若謂此係根據理論上的判斷，應當如此，毋寧說是由於教育上的方便，方爲中肯。

所以我講授工程熱力學，重點不僅放在說明由來已久的計算方法上，且進一步要使讀者能體會到熱現象的特異性。即是根據建立能量

保存原理的第一定律而作能量的勘定，並依第二定律以明熱損失所發生的實態，而謀熱效率的增進。

本書乃準的於上述的新要求，而作項目的調整取捨，其中論次說明，尤多着重於新的想法與新的見解。爲期讀者對理論易於領解起見，乃盡量增加必要的圖表，以補救語文之不足。本書第一章至第七章及第十，十一，十三三章，均係介紹工程熱力學的一般基礎知識。第八，九兩章則敘述實際工業上已廣爲應用的半理想氣體，空氣與濕空氣的性質及其應用。第十二章係討論燃燒對於熱化學的定律及其性質。第十四章係闡釋各種冷媒與熱媒的性質。第十五至二十等六章則就內燃機，蒸汽機，蒸汽輪機，壓縮機，火箭及噴射推進裝置，冷凍機及熱幫浦，氣體液化以及電子冷凍等作全貌的說明。第二十一章專談蒸汽動力廠循環。第二十二章乃特別補充各種傳熱過程。雖最近傳熱學已發展爲工學的一分支，另有專書可資閱讀，然此處廼以實用爲主而錄之者，倘讀者能熟習此章，則將來從事於實際工作頗多幫助。

最後須予說明者，即在工程熱力學中必須作數值計算，且須求出最終數值，其使用的單位，應以我國現行的公制單位中工學單位爲準。又本書各章之末，均未附列習題，所有應予演算的習題，擬以拙著熱工學摘要及例題解析，作爲演習的範圍。蓋如此，方可節省讀者演算及體會所費的時間。

本書係根據授課所編的講義改輯而成，匆忙脫稿，疵謬難免，倘蒙海內外賢達，專家辱賜指教，尤爲感幸。

石 安 識 於

臺北永和醉曉石軒

民國五十八年三月

工程熱力學上冊目次

第一章 熱力學發展的簡史

第一節	概 說	1
第二節	溫度測定	3
第三節	熱量測定	5
第四節	熱力學的形成	9

第二章 熱力學的基本概念

第一節	何謂工程熱力學	15
第二節	溫度與熱力學第零定律	16
第三節	溫度計測	17
第四節	熱量單位	18
第五節	比 熱	19
第六節	壓力單位	21
第七節	功	24
第八節	功 率	26
第九節	人類利用熱能的經過	27
第十節	物理單位與工學單位	29
第十一章	國際單位系	31

第三章 熱力學第一定律

第一節	熱力學第一定律與熱的功當量	33
第二節	能量保存原理及第一種永久運動	36
第三節	熱力學上的術語	37
第四節	物體的狀態與狀態變化	38

2 工程熱力學

第五節	內能	44
第六節	焓及對於穩定流的一般能量式	45
第七節	氣體膨脹時之功	48
第八節	PV -綫圖與可逆變化時之功	51

第四章 理想氣體

第一節	理想氣體的狀態式	55
第二節	焦耳定理	58
第三節	理想氣體的內能，焓及比熱	60
第四節	實際氣體與理想氣體的不同	65
第五節	理想氣體的狀態變化	70
第一項	等溫變化	71
第二項	等壓變化	72
第三項	等積變化	73
第四項	可逆絕熱變化	74
第五項	多向變化	78
第六項	不可逆絕熱變化	84
第七項	阻塞	85
第八項	氣體的混合	93
第六節	混合氣體的性質	96

第五章 熱力學第二定律

第一節	循環	101
第二節	熱力學第二定律	105
第三節	加諾循環的性質	106
第四節	熱力學的溫度	112
第五節	克勞休斯的積分	114
第六節	熵	117
第七節	理想氣體及其他物質之熵	122

第 八 節	熵的綫圖	126
第 九 節	在不可逆變化時熵的增加	131
第 十 節	氣體的可逆混合	133
第十一節	熵的絕對值與列爾斯脫的熱定理	134

第六章 有效能與最大功

第 一 節	有效能與無效能	136
第 二 節	有效能的散逸	141
第 三 節	非穩定變化時的最大功	145
第 四 節	穩定變化時的最大功	147
第 五 節	化學變化時的最大功	150
第 六 節	依不可逆變化而功的損失	153

第七章 熱力學一般關係式

第 一 節	一般關係式的導出方法	155
第 二 節	由能量式導出的關係式	157
第 三 節	Q 與 s 的微分式以及比熱的關係式	159
第 四 節	u 及 i 的微分式與由此導出的關係式	167
第 五 節	阻塞膨脹與自由膨脹時的冷却效應	169
第 六 節	流體的壓縮率與彈性係數	171
第 七 節	狀態式與 u, i, s, c_p 的關係	172
第 八 節	在 Ts, is, iP 各綫圖上各曲綫的傾斜	184
第 九 節	相的變化與克拉珀龍式	187

第八章 半理想氣體

第 一 節	半理想氣體的一般性質	191
第 二 節	半理想氣體的比熱, 內能, 焓及熵	195
第 三 節	半理想氣體的狀態變化及魯塞耳的方法	209
第 四 節	半理想氣體的狀態變化依相對壓力與相對容積的方法	213

4 工程熱力學

第五節	比熱式給定時半理想氣體的狀態變化	215
-----	------------------	-----

第九章 空氣

第一節	空氣的組成及其諸數值	223
第二節	標準大氣	224
第三節	空氣的狀態式	227
第四節	空氣的比熱	232
第五節	空氣的熵綫圖	235

第十章 一般蒸汽

第一節	氣體與蒸汽	239
第二節	在定壓下的蒸發及臨界狀態	240
第三節	飽和壓力與溫度的關係及蒸汽壓曲綫	246
第四節	蒸汽的等溫變化與氣液兩相的連續	249
第五節	蒸汽的狀態綫圖	254
第六節	壓縮液	259
第七節	三重點及狀態曲面	261
第八節	蒸汽熱量的狀態量	268
第九節	范德瓦耳斯的狀態式及其他的狀態式	275
第十節	蒸汽表及蒸汽綫圖	292
第十一節	蒸汽的狀態變化	298
第十二節	濕空氣	307
第十三節	蒸汽的過飽和現象與表面張力	309
第十四節	蒸汽的混合	318

第十一章 蒸汽及水銀蒸汽

第一節	蒸汽性質研究進步的概說	330
第二節	蒸汽的狀態式	334
第三節	蒸汽焓與熵	345

第 四 節	蒸汽的比熱·····	346
第 五 節	蒸汽的焦耳-湯姆遜係數與等溫指數以及絕熱指數·····	352
第 六 節	蒸汽的飽和壓力與溫度的關係·····	356
第 七 節	水的性質·····	357
第 八 節	各國蒸汽表及綫圖·····	364
第 九 節	水及蒸汽的黏性係數與熱傳導率·····	365
第 十 節	水銀蒸汽·····	368

第十二章 燃 燒

第 一 節	燃料與其成分·····	373
第 二 節	燃燒的基礎式·····	375
第 三 節	燃料的發熱量·····	377
第 四 節	完全燃燒必要的空氣量與完全燃燒瓦斯的組成·····	382
第 五 節	空氣量不足時燃燒瓦斯的組成·····	390
第 六 節	燃燒瓦斯分析及俄斯勿耳德綫圖·····	393
第 七 節	燃燒溫度·····	404
第 八 節	燃燒瓦斯的 <i>it</i> -綫圖·····	407
第 九 節	燃燒過程·····	410
第 十 節	瓦斯發生的理論·····	415

第十三章 氣體的流動

第 一 節	層流與紊流平均速度·····	427
第 二 節	關於流體流動的一般能量式·····	429
第 三 節	噴管內之流與摩擦的影響·····	432
第 四 節	噴管的理論·····	439
第 五 節	氣體的音速·····	457
第 六 節	氣體的流速與音速的相關關係·····	460
第 七 節	背壓不適宜時噴管之流·····	463
第 八 節	衝擊波·····	466

6 工程熱力學

第 九 節 管內之流.....	475
第 十 節 蒸汽在噴管內膨脹時的過飽和現象.....	484

工程熱力學

第一章 熱力學發展的簡史

第一節 概 說

亞里斯多德 (Aristoteles) 氏曾就 4 個元素各附以溫(熱), 冷, 乾, 濕 4 種不同的性質, 以其各有對立性而有其運動變化。此種思想爲以後對於熱而發生各種不同理論的根源。葛列洛斯 (Galenos, c. 130~200) 氏, 則將每個人作爲所有的有機體相異的基礎, 而取其各種性質。一個人的氣質 (Temperament) 係依存此 4 種性質混合的比例關係。溫度 (Temperature) 與氣質並非無緣的理由, 亦可由此而知之。葛氏爲分類藥用植物, 而想到熱與冷的 4 種順位及其適應, 以不同之熱與不同之冷發現於感覺上, 而用數學來表示時, 方有溫度的刻度。葛氏的「溫度刻度」是依回教 (Islam) 的醫學者而規定, 後經過亞耳慶第 (Alkindi, c. 800~870) 氏加以詳細試驗, 始知藥用混合物的「溫度」, 是基於此等成分的「溫度」而得。在此計算方法中, 發現冷, 熱之強與量之間根本不同。至於葛氏的冷熱數的規定方法, 在回教發展以後始傳至於西方。

約在 14 至 15 世紀, 對於熱是與藥用的問題相關連。其關於熱的理論在斯苛拉 (Scholasticism) 哲學者之間 (即西洋中世紀神學的哲學, 又稱之爲煩瑣哲學) 議論紛紛。若根據亞氏運動思想, 則「作用」係由「性質」對立性的結果而生。斯苛拉哲學者亦根據此觀點在冷熱問題中而注意熱與冷的性質對立性, 認爲熱與冷之間, 其有力的一方爲作動者, 較弱的一方則爲受動者, 受動者是抵抗, 於是亞氏的「作用」爲作動力與抵抗力的比例關係。站在此種立場言之, 作動者與受動者之間而有作用與反作用的問題, 亦即溫水冷却的物理現象的解明。換言之, 溫水

冷卻的發生係基於內因或外因，似此種問題，應有闡明的必要。在斯苛拉哲學者間，而有各種學說，且常呈有針鋒相對的狀況結果，而形成牛津，巴黎及意大利等三個學派。茲僅就 15 世紀意大利米蘭 (Milano) 的斯苛拉哲學家瑪爾利亞尼 (Giovanni Marliani, 1483 年去世) 氏立論的結果述之。

瑪氏在冷熱作用中，使能動力與抵抗力顯現。在熱與冷之量 (Quantitas) 以外，是即在熱與冷之強 (Intensio) 以外，因有其某強度的外延物，而想到冷熱量的概念。根據彼の意見，此量不僅依存物體的體積，且依存其密度，於是彼用

$$P = VDT$$

(式中 V 為體積， D 為密度， T 為冷熱的強度)

的公式而算定力之量。

其次就冷熱的強度而有瑪氏的刻度，其刻度的方法約如次所述。

根據斯苛拉哲學家的理論，不問任何物體，對於熱與冷，應有接受的界限，是即再有此以上的接受，依其強度上亦不能比此為更熱。同樣，亦不得比此為更冷。如此的界限謂之可能最高熱度 (Summus gradus caliditatis) 與可能最高冷度 (Summus gradus frigiditatis)。物體的冷熱不能達於其強度的最高度時，則物體一定的熱度與一定冷度為保持平衡，在冷熱狀態中，於是伴有向熱性 (Caliditas) 最高度的變動與向冷性 (Frigiditas) 最低度 (Zero) 的變動，作其相應的減少。瑪氏所用之者為 8 度刻度系，因之熱強度 C 與其共存的冷強度 F 之間的關係而用

$$F = 8 - C$$

表之。此種冷熱理論，仍站在亞氏的立場，而將冷熱強度用數字表示及提示冷熱量的概念。因之而有溫度計的發明及依溫度與熱量的相異知識而奠定熱量計發明的基礎。

近世對於熱學的發展，吾人不妨分成數個階段言之，即

(i) 溫度測定，

(ii) 熱量測定，

(iii) 熱的力學定式化。

第二節 溫度測定

空氣加熱而膨脹，早在亞里山大利亞 (Alexandria) 的希律 (Heron, Ca一世紀) 時代，即爲一般人所熟知。古代的機械裝置——此爲玩具——係基於此事實而製造。然此乃示以「熱的程度」爲目的的關係而採用，此種思考爲古代及中世紀所無，因此與此玩具相結合的溫度計，方產生最初的形式。首先用此種古代裝置而研究溫度計的實現者爲伽利略 (Galileo) 氏，然彼對於此種發明的重要性，似無充分的評價，故無詳細的記述留傳於後世。根據彼同時代的人所傳，此種裝置係含有空氣，用大閥 (valve) 與長管配合而成，管係向下插入於水的容器內，隨水的溫度變化，管內的空氣即發生膨脹與收縮，即可表示溫度。伽氏依溫度的不同，而附以刻度，此種刻度僅分爲 8 個大的區間，其各區間再作 60 等分，然無其刻度的基準 (又溫度計所謂 Thermometer 的名詞係始於 1624 年)。伽氏使用此溫度測定器，似在 1592 年以後，在巴都亞 (Padua) 大學內，彼的同僚桑克托里斯 (Sanctorius, 1561-1636) 醫生曾將伽氏的此種器械用之於熱病及生理學的研究，因之彼認爲滿足的測定裝置，必須有刻度的基準點，故將此種器械曝露於雪中時與曝露於燭焰上時所得的度數，作爲基準點而記於刻度之上。

液體溫度計約始於法人醫學者列葉 (Jean Rey, 1631) 氏，彼の裝置與伽氏的裝置同樣亦爲閥與管配合而成，管中裝有水的一部分，並使管口向上而上端開放。至於將管的上端封閉，且用酒精以代替水的裝置，則爲托斯喀那 (Toscana, 意大利中部) 大公菲第南德 (Ferdinand) 二世所創設。彼以此而作爲氣象上的目的及卵的人工孵化作用的實驗，其後彼復製作各種變形的溫度計。意大利的西門托 (Accademiadel Cimento) 在極短期間 (1657-1667)，將酒精放入於玻璃管內而製作各種膨脹式的多數溫度計。其刻度的分割則於管上附以各種顏色，依玻璃球的指示，將『最嚴寒的冬天』與『最酷熱的夏天』之間作成等分，而附以刻度。約在 1665 年，對於範圍較廣的溫度已能測定。至於其他的刻

度法，雖由波義耳 (Robert Boyle, 1627-1691)，虎克 (Robert Hooke, 1635-1703) 及海更士 (Christian Huygens) 諸氏各別獨立提出。然此等刻度法，均於溫度計的管上，僅記入一個固定點，而與固定點對應的溫度，則與管中物質的膨脹與收縮所佔的體積的分數—— $\frac{1}{1,000}$ ， $\frac{1}{10,000}$ ——相當。此固定點的溫度，有用大茴香油的水點，有用水的冰點與沸點為依據，此即所謂一固定點刻度法。然以水的冰點與沸點為固定點的現行刻度法，則為意大利學者烈拉耳第尼 (Carlo Renaldini, 1694) 氏所創。對於空氣溫度計為有名的法國物理學家亞蒙頓 (Guillaume Amonton, 1663-1705) 氏所倡導。此種溫度計，有以壓力為一定而觀其體積的膨脹，及以體積為一定而使壓力增大的二種形式。

丹麥天文學家若麥 (Ole Roemer, 1644-1710) 氏，曾於 1702 年注意到用水與鹽的混合物，可使其溫度降至冰點以下。並決定以此溫度為固定點而置為 0，對於沸點增高的固定點，則提倡再加上 60°。有名的氣象機械製造家華嚴哈 (D. G. Fahrenheit, 1686-1736)，曾為此而到哥本哈根 (Copenhagen) 訪晤若氏，經過兩人研討後，即採用同樣方針的刻度法，而以 32°F 及 212°F 為冰點與沸點 (1717)。此即今日所謂的華氏系 (Fahrenheit system)。彼係採用柱狀管，以代替球狀之閥。至於其他各點，如玻璃管內放入酒精與放入水銀等的溫度計的製造，亦均為最可信賴的改良方法，對於溫度測定的技術，貢獻頗大。此外將酒精由水點加熱至沸點時，即由 1,000 至 1,080，基於其體積的膨脹，將冰點與沸點之間作為 80 等分，此為吾人所知的烈安努爾 (Réan nur) 氏的酒精溫度計 (1730)。以冰點為 0°C，以沸點為 100°C，所謂的攝氏系統的溫度計 (Centigrade system)，係由瑞典人愛耳汶斯 (Elvius) 氏最初使用 (1710)。其後 1740 年為著名的瑞典植物學家利勒奈斯 (Linnaeus, Carl von Linné 1707-78) 與 1743 年里昂 (Lyon) 的庫里斯惕安 (Christian) 兩氏所倡導。至 1742 年為瑞典天文學家攝耳休斯 (Anaers Celsius, 1701-1744) 氏所採用。然彼曾以冰點為 100°，沸點為 0°。此種主張，其真正的意義，吾人至今尚無法瞭解。

以上爲溫度計發達的過程，至是始有可能作正確溫度的測定。此不僅促進物體膨脹及收縮的研究，並開拓熱現象全般走上正確而有把握的道路。

第三節 熱量測定

在 18 世紀的前半葉，對於溫度概念尙不能認爲已達於確立的情況，所謂熱與冷的日常概念，恆反映出含有多義性。今日之所謂溫度，在當時亦有指熱與火。自 17 世紀以來，經驗論的思潮，對於熱所謂 Intensive (強烈的) 與 Extensive (廣大的) 的區別(斯苛拉的議論)，有拒絕與否的流通權。尤其對於明瞭物體熱的狀態時，除溫度以外，尙有其他最基本概念，似有其注意的必要。例如以水銀溫度計與水溫度計，測各種溫度的液體時，前者比之後者爲速而變更其水平。又將各種液體作同溫度的加熱，並將此等的等量注入於水之上時，即可發現其溶解水的分量不同。此點使彼輩感覺到除溫度以外，必定尙有何種別的概念規定。荷蘭有名醫學者坡易哈夫(Herman Boerhaave, 1668-1738) 氏曾於 1732 年發現 *Elementa Chemiae*，而華氏根據彼的希望特提供冷水與溫水，水與水銀的混合，其所作實驗的結果，而知同體積的冷水與溫水混合時，混合物的溫度爲混合以前兩者溫度的算術平均。水與水銀混合時，2 體積水與 3 體積水銀的混合物，其溫度恰爲開始兩者溫度之和的 $\frac{1}{2}$ 。於是坡氏所得的結論爲水銀的密度約爲水的密度的 13 倍，然在冷卻溫化中，比之同一體積之水，其作用爲弱。對於水之重爲 1 而與水銀之重約爲 20，持有同等的作用。於是坡氏根據此結果而解之爲「熱」在相異的物體中與物質之量成比例。因之推論爲「熱」應與各物體的體積作比例的分布。並根據二物體的接觸而熱趨於平衡之點，始知此種想法頗爲正確。在熱平衡中，有同一溫度的觀測事實，例如在一室內，多數的物體中，若樹立熱的平衡時，則溫度爲一樣。熱對於室與其內容物恆一視同仁而作一樣的分布。在室之 1cm^3 內，充實其內部爲木或爲水，或爲空氣或爲水銀時，常含有同一的「熱量」。荷蘭物理學家莫斯琴布若

克 (Peter von Musschenbroek, 1691-1769) 氏 [爲萊登 (Leyden) 大學教授] 亦有此相同的想法。

『熱係亙所有的物體分布，然不與其重量成比例，金的 1 m^3 ，與空氣，羽毛的 1 m^3 均有同一量的熱』。

如此想法，吾人可知，熱量與溫度的區別頗爲明顯。

然就混合言之，已早有實驗，法國天文學家毛里 (Jean Baptiste Morin, 1583-1656) 氏關於冷熱相同的液體在混合中的溫度，而創出一種定理。是即熱與冷恒獨立存在，兩者在結合狀態中且以某種的比例而共存。其各別均不超過某最大限度 θ 與最小限度 θ 。熱的單位個數與冷的單位個數之和爲 θ 。毛氏認爲「熱與冷係不能破壞的」，各度數之溫與各度數之冷，在力的方面係同等的。在此前提下，而研究水的混合。例如以熱 2 單位，冷 6 單位之水與熱 4 單位，冷 4 單位之水 (同體積) 相混合，而作爲問題研究時，則毛氏曾有次之立論。即

此不能成爲熱 2° ，因爲不是有熱 4 單位的溫水內，有 2 單位熱作用於冷水而消失。亦不能謂之爲熱 4° ，因爲此時雖爲冷 4° ，然冷水的冷 6 單位內的 2 單位並非作用於溫水，故不能消失。於是毛氏就混合物而爲

$$2^\circ < \text{「混合的熱單位個數」} < 4^\circ$$

然毛氏亦不認爲混合而有熱 3° ，假如若有熱 3° 時，則有冷 5° ，冷水的冷 6° 係將溫水的熱 4° 使之作 1° 的降下。反之，溫水的熱 4° 係將冷水的冷 6° 降下 1° 。然此乃示冷熱的作用而發生不平衡，因之混合的熱度並非 3° ，而認爲冷水的冷 6° 與溫水的熱 4° 而有比例作用 (即 3:2) 的關係，應在 3° 以下。如此的混合，若置熱度爲 A ，冷度爲 B 時，則毛氏的公式，此時應爲

$$(4 - A) : (6 - B) = 3 : 2,$$

$$A + B = 8,$$

由此式而混合之熱爲 $2\frac{4^\circ}{5}$ ，冷爲 $5\frac{1^\circ}{5}$ 。

對於毛氏混合的公式，亦有學者加以改正，如克拉夫特 (George