

蒸汽鍋爐的热工計算手冊

[德]弗·努貝爾著

上海科学技术出版社



蒸汽鍋爐的热工計算手冊

[德]弗·努貝爾著

上海科学技术出版社

內 容 提 要

原书为根据实际經驗而編写的一本手册，使讀者能了解蒸汽鍋炉的热工过程，运用理解力而不作机械式的运算。內容第一部为：基本知識、水蒸汽、燃料、燃燒、热气、燃燒溫度和火室溫度、热能損失和效率、燃料用量和汽化系数、汽化試驗和热能平衡表；第二部为：热能傳遞、汽鍋热面、过热器热面、后接热面、热面的分配、热能交換器、热能的混和、热能貯存器、炉柵面和火室的大小、气道、烟囱、通风机、导管；第三部为：蒸汽动力的发生、热能經濟的工作管理和蒸汽价格、鍋炉設備全部計算的实例；第四部为：图表。

WÄRMETECHNISCHE BERECHNUNG DER FEUERUNGS UND DAMPFKESSEL ANLAGEN

Friedrich Nuber

R. Oldenbourg, München-Berlin

蒸汽鍋爐的热工計算手册

唐子青 譯 徐世鈺 校

上海科学技术出版社出版(上海瑞金二路450号)

上海市书刊出版业营业許可証出093号

上海印刷学校印刷 新华书店上海发行所发行

开本 787×1092 1/32 印張 9 12/32 插頁 1 排版字數 184,000

(原大东、科技版共印 8,500 冊 1952年8月第1版)

1959年4月新1版 1966年2月第5次印刷

印數 6,601—9,600

統一書号 15119·387 定价(科六) 1.10 元

目 錄

第 一 部

1. 一般的基本知識.....	1
2. 水蒸汽.....	10
3. 熱能的來源.....	17
4. 燃燒.....	22
5. 熱氣.....	42
6. 燃燒溫度和火室溫度.....	49
7. 熱能損失和效率.....	58
8. 燃料用量和汽化係數.....	69
9. 汽化試驗和熱能平衡表.....	70

第 二 部

10. 熱能的傳遞.....	74
11. 汽鍋熱面.....	94
12. 過熱器熱面	103
13. 後接熱面	109
14. 熱面的分配	120
15. 熱能交換器	125
16. 熱能的混和	128
17. 熱能貯存器	132

18. 爐柵面和火室的大小	135
19. 氣道	139
20. 煙囪	141
21. 吸風通風和壓風通風	145
22. 導管	150

第三部

23. 蒸汽動力的產生	153
24. 熱能經濟的工作管理	184
25. 近年來蒸汽鍋爐設備的進展	192
26. 全部鍋爐設備的計算範例	213

第四部(附錄)

27. 飽和蒸汽表	278
28. 過熱蒸汽表	281
29. 煙囪通風強度表	284
30. 水的密度, 容積和比熱(0°—320°C)	285
31. 氣體的比熱	286
32. 固體和液體的比熱	287
33. 熱能傳導係數	287
34. 熱膨脹係數	287
35. 容積重量	287
36. 平均對數溫度差的決定	288
37. 汽鍋的去鹽	289
38. 鈉鹽數	289

(另附Mollier-i-s-圖一大幅)

第一 部

1. 一般的基本知識

1-1. 溫 度

溫度以後均採用攝氏度 $^{\circ}C$ ，以 t 來表示。此外還有所謂“絕對溫度” T ，起點在攝氏表 0 下 273° ，即“絕對零度”為 -273° ，絕對溫度 $T = t + 273^{\circ}$ 。

(例如： $t = 30^{\circ}$ ， $T = 30 + 273 = 303^{\circ}$)

1-2. 壓 力

1 公制(工程)氣壓 $= 1at = 1kg/cm^2 = 0^{\circ}C$ 時 $735.5mmHg$ 或 $+4^{\circ}C$ 時 $10 mH_2O$ 的壓力。

總壓力超出 $1at$ (大氣壓力) 的部分稱為超壓力，總壓力亦可稱為絕對壓力；在熱工學上常用絕對壓力 ata ，在鍋爐工程上常用超壓力 $atü$ 來計算。(例如： $12 ata = 11atü$)

大氣平均壓力 b (氣壓計位標)，在海平面上為 $760mmHg$ ，在拔海 M 時為

$M=0$	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1500	m
-------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------	------	-----

$b = 760$	751	742	733	724	716	708	700	692	684	676	636	$mmHg$
-----------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	--------

1 物理氣壓 $= 1Atm = 1.033 kg/cm^2 = 0^{\circ}C$ 時 $760 mmHg$ 或

+4°C 時 10.33 mH_2O 的壓力。

以後用物理氣壓計算時，必附註“0°，和 760 $mmHg$ ”，用公制氣壓時，用記號 at ， ata ， $atü$ 。

1—3. 氣體容積，標準立方公尺 (Nm^3)

氣體的容積在 -273° 時為 $V = 0m^3$ 。

氣體加熱時，容積膨脹，而且溫度每增高 1° ，容積必增加它在 0° 和 $760\text{ }mmHg$ 時容積 V_0 的 $1/273$ ($=0.00367$)。氣體在 $0^\circ C$ ， $760\text{ }mmHg$ 的狀況叫標準狀況。此種狀況的氣體 $1m^3$ 稱為 1 標準立方公尺 (Nm^3)。氣體加熱至 t° 時，容積增為

$$V_t = V_0(1 + 0.00367 \cdot t) \quad m^3 \quad (1)$$

在氣壓 (氣壓計位標) b 時為：

$$V_t' = V_t \cdot \frac{760}{b} \quad m^3 \quad (2)$$

例1: (1) $3000\ Nm^3$ 氣體加熱至 200° 時，容積增為

$$3000 \cdot (1 + 0.00367 \cdot 200) = 5202\ m^3。$$

(2) 在拔海 $M = 500\text{ }m$ 即 $b = 716\text{ }mmHg$ 和 0° 時， $3000\ Nm^3$ 氣體的容積為 $3000 \cdot 760 / 716 = 3180\ m^3$ 。

(3) 在此一拔海高度時加熱至 200° ， $3000\ Nm^3$ 氣體的容積為

$$5202 \cdot 760 / 716 = 5520\ m^3。$$

註：利用“ Nm^3 ”的定義，即可互相比較不同的氣體。

1—4. 熱量單位，熱能和功能

工程上的熱量單位用尅卡 $kcal$ ，即 $1\text{ }kg$ 水自 14.5° 加熱至 15.5° 所需的熱量。

熱工學第一主律 (1842年 *Robert Mayer* 創立)：熱能和功能

兩者間有一定的當量，即

$$Q = J \cdot A \quad kcal \quad (3)$$

式中 Q = 加入或放出的熱能，用 $kcal$ 計

$$J = \text{熱功當量} = \frac{1}{427}$$

A = 功能，用 mkg 計。

$$1 \text{ kcal} = 427 \text{ mkg},$$

$$1 \text{ mkg} = \frac{1}{427} \text{ kcal},$$

$$1 \text{ PS} = 75 \text{ mkg/sec} = 0.736 \text{ kW},$$

$$1 \text{ kW} = 102 \text{ mkg/sec} = 1.36 \text{ PS},$$

$$1 \text{ PSh} = 75 \cdot 3600 = 270000 \text{ mkg} = 632.3 \text{ kcal}$$

$$1 \text{ kWh} = 102 \cdot 3600 = 367200 \text{ mkg} \approx 860 \text{ kcal}.$$

1—5. 比 熱

固體或液體的比熱 c 即為使 $1kg$ 固體或液體溫度增高 1° 所需加入的熱量。

水的比熱 $c \approx 1$ ，在溫度不高時可 $c = 1$ 。準確數值可見表 IV-30。

氣體或蒸汽的比熱在定壓情形（即壓力不變）時，以 kg 計量則用 c_p 表示，以 Nm^3 計量則用 C_p 表示。

c_p 或 C_p 為使 $1kg$ 或 Nm^3 的氣體或蒸汽在定壓下溫度增高 1° 所需加入的熱量。

註：定容時氣體或蒸氣的比熱 c_v 或 C_v ，此處不加討論。

比熱隨固體、液體、氣體或蒸汽的溫度而變；但自對於水的

變動一般可畧而不計，例如自 300° 加熱至 301° 比自 10° 加熱至 11° 需要更多的熱量。

要顧到此種事實，所以計算時必須使用 0° 和 t° 間的平均比熱，即自 0° 加熱至 t° 或自 t° 冷卻至 0° 時的計算需用平均數值的 c , c_p 或 C_p 。

1-6. 焓、攝取熱能、放出熱能

x kg 固體或液體在 t° 時所含有的熱量稱為焓，其值為

$$Q = x \cdot t \cdot c \text{ kcal} \quad (4)$$

x kg 氣體或蒸汽在 t° 時的焓為

$$Q = x \cdot t \cdot c_p \text{ kcal} \quad (5)$$

x Nm³ 氣體或蒸汽在 t° 時的焓為

$$Q = x \cdot t \cdot C_p \text{ kcal} \quad (6)$$

例2: (1) 水 ($c=1$) 1500 kg 自 30° 加熱至 100° ，此時水的攝取熱能為

$$Q = 1500 \cdot 1 \cdot 100 - 1500 \cdot 1 \cdot 30 = 105000 \text{ kcal.}$$

(2) 氣體 20000 Nm³ 自 600° ($C_p=0.324$) 冷卻至 200° ($C_p=0.316$)，此時氣體的放出熱能為

$$Q = 20000 \cdot 0.324 \cdot 600 - 0.316 \cdot 200 = 2624000 \text{ kcal.}$$

1-7. 混和溫度

混和時一般必為：攝取熱能 = 放出熱能，所以水混和時 ($c \approx 1$) 可得

$$x(t_x - t_m) = y(t_m - t_y) \text{ kcal} \quad (7)$$

式中 x 和 y 為所混合的二水量， t_x 和 t_y ，為它們所有的溫度，并

設 $t_x > t_y$, t_m 為所得的混和溫度。

由公式(7)即可求得混和溫度

$$t_m = \frac{x \cdot t_x + y \cdot t_y}{x + y} \quad ^\circ C \quad (8)$$

如混和溫度已知而水量 x 未知, 則要達到預期的混和溫度 t_m 所需要的水量為

$$x = \frac{y(t_m - t_y)}{t_x - t_m} \quad kg \quad (9)$$

氣體互相混和時要顧到各不相同的比熱, 所以氣體用 kg 計量時, 如氣量為 x, y , 相當的比熱為 c_{px}, c_{py} , 氣體溫度為 t_x, t_y 和 t_m , 則可得

$$x \cdot c_{px} \cdot (t_x - t_m) = y \cdot c_{py} (t_m - t_y) \quad kcal \quad (10)$$

$$t_m = \frac{x \cdot c_{px} \cdot t_x + y \cdot c_{py} \cdot t_y}{x \cdot c_{px} + y \cdot c_{py}} \quad ^\circ C \quad (11)$$

$$x = \frac{y \cdot c_{py} \cdot (t_m - t_y)}{c_{px} (t_x - t_m)} \quad kg \quad (12)$$

如氣體用 Nm^3 計量時, 同樣可得

$$x \cdot C_{px} (t_x - t_m) = y \cdot C_{py} (t_m - t_y) \quad kcal$$

$$t_m = \frac{x \cdot C_{px} \cdot t_x + y \cdot C_{py} \cdot t_y}{x \cdot C_{px} + y \cdot C_{py}} \quad ^\circ C \quad (13)$$

$$x = \frac{y \cdot C_{py} \cdot (t_m - t_y)}{C_{px} \cdot (t_x - t_m)} \quad Nm^3 \quad (14)$$

例3: (1) 100° 水 $600 kg$ 和 40° 水 $1000 kg$ 相混和時, 由公式(8)可得混和溫度

$$t_m = \frac{600 \cdot 100 + 1000 \cdot 40}{600 + 1000} = 62.5^\circ$$

(2) 600° 氣體 ($c_p = 0.259$) 8000 kg 和 200° 氣體 ($c_p = 0.252$) 2000 kg 相混合時, 由公式(11)

$$t_m = \frac{8000 \cdot 0.259 \cdot 600 + 2000 \cdot 0.252 \cdot 200}{8000 \cdot 0.259 + 2000 \cdot 0.252} = 523^{\circ}$$

(3) 600° 氣體 ($C_p = 0.324$) 6000 Nm^3 和 200° 氣體 ($C_p = 0.316$) 3000 Nm^3 相混和時, 由公式(14)可得

$$t_m = \frac{6000 \cdot 0.324 \cdot 600 + 3000 \cdot 0.316 \cdot 200}{6000 \cdot 0.324 + 3000 \cdot 0.316} = 470^{\circ}$$

1-8. 比重、比容

1 dm^3 水在 $+4^{\circ}$ 時重 1 kg , 即水的比重 $\gamma = 1$ 。

固體和液體的比重, 是據水在 $\gamma = 1$ 時 1 dm^3 所有的重量。

例如鐵的 $\gamma = 7.8$, 即 1 dm^3 鐵重 7.8 kg 。

氣體和蒸汽的比重為 1 Nm^3 氣體或蒸汽的重量對於 $+4^{\circ}$ 水 1 dm^3 的重量所成的比。例如乾燥空氣在 0° 和 760 mm Hg 時 $\gamma = 1.293$, 即 1 Nm^3 空氣重 1.293 kg ; 水蒸汽在 0° 和 760 mm Hg 時 $\gamma = 0.804$, 即 1 Nm^3 水蒸汽重 0.804 kg 。氣體和水蒸汽的比重亦可直接用 22.4 除分子量而求得。(見表 4 氣體表)

根據 Avogadro 定律: 各種氣體 22.4 Nm^3 內含有同數的分子, 而知分子量即此 22.4 Nm^3 (分子容積) 的重量。例如 $22.4 \text{ Nm}^3 \text{ N}_2$ 重 28 kg , 即 N_2 的分子量為 28, 所以 N_2 的 $\gamma = 28/22.4 \approx 1.25$ 。

氣體的比重, 如以空氣的 $\gamma = 1$ 為根據, 稱為密度, 即 0° 和 760 mm Hg 時氣體密度 = $\gamma/1.293$ 。

$$\left. \begin{array}{l} x \text{ dm}^3 \text{ 固體或液體重 } x \cdot \gamma \text{ kg} \\ x \text{ Nm}^3 \text{ 氣體或水蒸汽重 } x \cdot \gamma \text{ kg} \end{array} \right\} \quad (16a)$$

1kg固體、液體、氣體或水蒸汽的容積稱為比容 v 。

$$v = 1/\gamma, \text{ 即 } 1 \text{ kg 有容積 } 1/\gamma \text{ dm}^3 \text{ 或 Nm}^3.$$

例如鐵的 $\gamma = 7.8, v = \frac{1}{7.8} = 0.128$, 即 1 kg 鐵的容積為 0.128 dm^3 ; 乾燥空氣的 $\gamma = 1.293, v = \frac{1}{1.293} = 0.773$, 即 1 kg

空氣的容積為 0.773 Nm^3 。

$$\left. \begin{array}{l} x \text{ kg 固體或液體的容積為 } x \cdot v \text{ dm}^3 \\ x \text{ kg 氣體或水蒸汽的容積為 } x \cdot v \text{ Nm}^3 \end{array} \right\} \quad (16b)$$

1—9. 溫度增高時固體的長度變化, 熱應力

固體的線膨脹係數 α 即指增高溫度 1° 所得的單位長度增加。如固體的長度為 $l \text{ cm}$, 自 t_1° 加熱至 t_2° , 則長度的增加為

$$\Delta l = l \cdot \alpha \cdot (t_2 - t_1) \text{ cm} \quad (17)$$

線膨脹係數 α (表 IV—34) 隨溫度升降而有變化:

	自 0° 加熱至 1° 時	自 t_1° 加熱至 t_2° 時
熔鋼	$\alpha = 0.000011181$	$\alpha = 0.000011181 + 0.0000000053(t_1 + t_2)$
鑄鐵	$= 0.000009794$	$= 0.000009794 + 0.0000000057(t_1 + t_2)$

所以熔鋼自 0° 加熱至 100° 時

$$\begin{aligned}\alpha &= 0.000011181 + 0.0000000053(0 + 100) \\ &= 0.000011711\end{aligned}$$

自 20° 加熱至 100° 時

$$\begin{aligned}\alpha &= 0.000011181 + 0.0000000053(20 + 100) \\ &= 0.000011817\end{aligned}$$

如加熱增長後的長度為 l_1 ，則

$$l_1 = l + l \cdot \alpha \cdot (t_2 - t_1) \quad \text{cm} \quad (18)$$

或如已知 l_1 ，自 t_2° 冷卻至 t_1° 時，可得

$$l = \frac{l_1}{1 + \alpha(t_2 - t_1)} \quad \text{cm} \quad (19)$$

例4：(1)一熔鋼桿長 600 cm ，自 20° 加熱至 100° ，其長度因之增加

$$\Delta l = 600 \cdot 0.000011817(100 - 20) = 0.567216 \text{ cm}$$

$$\text{即 } l_1 = 600 + 0.567 = 600.567 \text{ cm}$$

(2)一熔鋼桿在 100° 時長 600.567 cm ，如冷卻至 20° ，則其長度當縮短至

$$l = \frac{600.567}{1 + 0.000011817(100 - 20)} = 600 \text{ cm}$$

所以冷卻時長度減短了 0.567 cm 。

如加熱時的膨脹或冷卻時的收縮受到阻止，固體內部就會產生熱應力 σ ：

$$\sigma = \alpha \cdot (t_2 - t_1) \cdot E \quad \text{kg/cm}^2 \quad (20)$$

熱應力和固體的長度，斷面積無關，式中 E 即所謂固體的彈性模數，熔鋼的 $E = 2100000$ ，鑄鐵的 $E = 750000$ 至 1050000 kg/cm^2 。

阻止長度發生變化時，物體承受處必須承受的力量為

$$P = \sigma \cdot f \quad \text{kg} \quad (21)$$

式中 f 為物體的斷面積，用 cm^2 計量。

例5: (1) 一熔鋼桿自 20° 加熱至 100° ，如其膨脹因有承受物而受阻止，桿內所產生的“壓應力”為

$$\sigma = 0.000011817(100 - 20) \cdot 2100000 \approx 1985 \text{ kg/cm}^2$$

(2) 如相反地使熔鋼桿自 100° 冷卻至 20° 時不能收縮，桿內即發生同樣大小的“拉應力”。

(3) 在熔鋼桿斷面積 $f = 5 \text{ cm}^2$ 時，承受物必須承受的力量為

$$P = 1985 \cdot 5 = 9925 \text{ kg}$$

例6: 一“行動鍋爐”長 4.5 m ，在汽壓 10 atü 時，溫度約為 180° ，但鍋爐的支架溫度，在冬季最低可至 -20° 。此種情況可得

$$\begin{aligned} \alpha &= 0.00001181 + 0.0000000053(180 - 20) \\ &= 0.00012029 \end{aligned}$$

所以鍋爐對於支架的長度增加為

$$\Delta l = l_1 - l = 450 \cdot 0.00012029(180 + 20) = 1.0826 \text{ cm}$$

鍋爐在支架上必須有 $\sim 11 \text{ mm}$ 的移動性，否則必然產生不可容許的高應力，此應力在鍋爐本體內為壓應力，支架內為拉應力，兩應力均為

$$\sigma = 0.00012029 \cdot (180 + 20) \cdot 2100000 \approx 5052 \text{ kg/cm}^2$$

由此等例可知固體內部因溫度變化而產生的應力，必須應用“彈性的接合”，“彈簧的平差”和“膨脹間隙”等方法來防止，以

免損害的發生。

2. 水 蒸 汽^①

水在 1 ata 壓力下，加熱至 100° (較確為 99.1°) 即開始汽化，壓力較高或較低時，水的汽化溫度同樣亦增高或減低，例如 7 ata 時，水須加熱至 164° 才開始汽化，但 0.5 ata 時只須加熱至 81° 即已開始汽化。

在汽化的全部過程中，水的溫度始終維持不變，無論是沸騰的水或已汽化而析出的蒸汽，均保持有同一的溫度。如加強熱能的輸入，雖可加速汽化的進行，但不會因此增高溫度。

當水加熱，直至汽化溫度(沸點溫度或飽和蒸汽溫度)，每增高溫度 1° 約攝取熱能 1 kcal/kg 。但水溫增高時，水的比熱亦隨着增大，所以水自 0° 加熱至 99.1° (1 ata 時)，共約攝取 99.1 kcal/kg ，但自 0° 加熱至 229° (28 ata 時) 却需輸入熱能 235 kcal/kg (見蒸汽表)。

如水全部汽化，即得飽和蒸汽，在蒸汽壓力低小時，其容積遠較原來的水量容積為大。但當壓力漸漸增大時，此種容積差亦漸漸減少，最後至壓力 224 ata 時容積差減至為 0，即此時汽化並不增大容積。此種極限狀況可用臨界壓力 p_k 表示，此時的飽和蒸汽溫度為 374°C ；壓力超過 p_k 後，熱能一經輸入，便不再有液體的水存在了。

再加熱此種發生的飽和蒸汽時，可使蒸汽溫度比與該壓力

① 蒸汽表見表Ⅳ—27/28

相應的飽和蒸汽溫度更高。即使蒸汽過熱，此時稱為過熱蒸汽。

蒸汽過熱後容積增大，所以 1 kg 過熱蒸汽常比 1 kg 同壓力的飽和蒸汽有更大的容積。如輸入熱能使過熱蒸汽的溫度愈高，容積的增大亦必愈劇。使 1 kg 水自 0° 升至與壓力相當的沸騰溫度所需加入的熱能，稱為液體熱，使 1 kg 已達沸騰溫度的水全部汽化所需加入的熱能，稱為汽化熱。所以使 1 kg 水自 0° 變為飽和蒸汽必須加入的飽和蒸汽熱 = 液體熱 + 汽化熱。壓力愈高時，液體熱愈大，汽化熱愈小，最後至臨界壓力時汽化熱 = 0，即飽和蒸汽熱 = 液體熱（圖 1.）。汽化熱可分為內熱和外熱二部。下例即可說明此點：汽化前 1 kg 水的容積為 $v' = 0.001 m^3$ 。如放入斷面積為 $1 m^2$ 的圓筒內，水柱高度即為 $0.001 m$ 。在水柱上放一活塞，如外界壓力為 $1 \text{ ata} = 1 \text{ kg/cm}^2 = 10000 \text{ kg/m}^2$ ，活塞上所受的力量即為 10000 kg ，因為圓筒斷面積恰為 $1 m^2$ 。

如汽化時壓力 1 ata 保持不變，容積即增為 $v'' = 1.725 m^3$ ，所以容積的增加為

$$v'' - v' = 1.725 - 0.001 = 1.724 m^3.$$

汽化時因為容積的增大，必使在圓筒內斷面積為 $1 m^2$ 的活塞上升 $1.724 m$ ，即蒸汽須將 10000 kg 提高 $1.724 m$ ，故所作的功能為

$$A = 10000 \cdot 1.724 = 17240 \text{ mkg}.$$

此一功能，即相當於本例中汽化熱的外熱 $\psi = \frac{17240}{427} = 40.3 \text{ kcal/kg}$ 。內熱 ρ 為用以分解水分子間內部結合關係而變成蒸汽所需加入的熱能，等於汽化熱減去外熱。如已知過熱蒸汽的

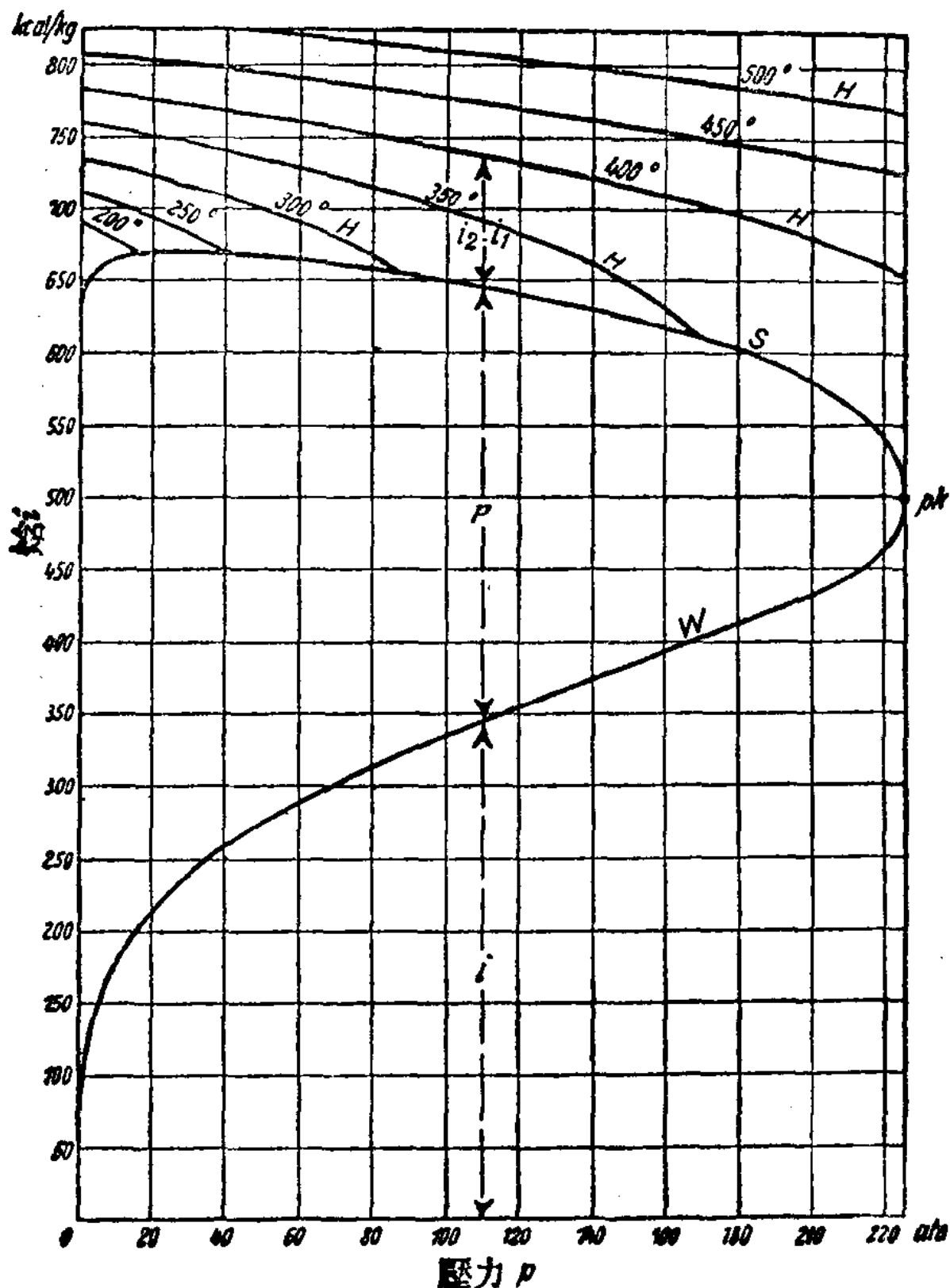


圖 1 水蒸汽的 $i-P$ 圖

P_c = 臨界壓力 H = 過熱範圍內的等溫線
 S = 飽和蒸汽範圍 W = 飽和水(沸騰的水)範圍

平均比熱，即可求得過熱所需的熱能 = (過熱蒸汽溫度 - 飽和蒸汽溫度) × 平均比熱。蒸汽的比熱已經由很多研究工作者如 Knoblauch, Raisch, Hausen 等求得；它因飽和蒸汽壓力的增