

195705

熱機學題解

曹國惠編

商務印書館發行

24
5

熱機學題解

曹國惠編

商務印書館發行

序

拙編熱機學一書，自去年十一月由上海商務印書館編入大學叢書中出版後，各地購讀者爲數頗多。近月以來，來函討論書中習題之解答方法者亦不少。足徵社會上對於此類書籍已有相當需要，而各題之正確解答與運算，似亦爲多數讀者所急欲參考者。

近數年來，鄙人教授此門課程時，所有學生交入之習題，多由曹國惠君協助改正。故曹君對於本書所有之習題，研究極爲精審，解答極爲詳明。因前述之需要，月前遂請彼將歷年改正時所依據之底稿，正式加以整理，亦交由商務印書館印行，以爲閱讀拙編者之一助；同時並將各題完全照錄於解答之前，使凡曾讀過此類課程者，即不閱拙編中文本，亦可專用之以作習題之練習。實爲一舉兩得之事也。鄙人深喜國人對於機械工程研究者之日多，並感於曹君用力之勤，因爲之序。

劉仙洲

廿六年六月六日。

國立清華大學古月堂

熱機學題解

第二章 熱力學概論

習 題

1. 空氣 1 磅，在絕對壓力每方吋 100 磅時，其容積爲 0.3 立方呎。問其溫度爲華氏表若干度？

解答 按 $PV = WRT$ 公式，

$$P = 100 \times 144 = 14,400 \text{ 磅，每方呎，}$$

$$V = 0.3 \text{ 立方呎，}$$

$$W = 1 \text{ 磅，}$$

$$R = 53.34.$$

代入公式，得

$$T = \frac{PV}{WR} = \frac{14,400 \times 0.3}{1 \times 53.34} = 81^\circ\text{F.}, \text{ 絕對溫度.}$$

$$\text{或 } 81 - 460 = -379^\circ\text{F.}$$

2. 空氣 10 磅，在絕對壓力每方吋 10,000 磅時，其溫度爲 100°F. 問其容積應爲若干立方呎？

解答 按 $PV = WRT$ 公式，

$$P = 10,000 \times 144 = 1,440,000 \text{ 磅，每方呎，}$$

$$W = 10 \text{ 磅，}$$

$$T = 100 + 460 = 560^\circ\text{F.}, \text{ 絕對溫度.}$$

代入公式, 得

$$V = \frac{WRT}{P} = \frac{10 \times 53.34 \times 560}{1,440,000} = 0.207 \text{ 立方呎.}$$

3. 空氣 5 磅, 在溫度 60°F. , 時, 所占之容積爲 50 立方呎. 問其表壓力爲每方吋若干磅?

解答 按 $PV = WRT$ 公式,

$$V = 50 \text{ 立方呎,}$$

$$W = 5 \text{ 磅,}$$

$$T = 60 + 460 = 520^{\circ}\text{F.}, \text{ 絕對溫度.}$$

代入公式, 得

$$P = \frac{WRT}{V} = \frac{5 \times 53.34 \times 520}{50} = 2,775 \text{ 磅, 每方呎}$$

絕對壓力 = 19.3 磅, 每方吋絕對壓力.

或 $19.3 - 14.7 = 4.6$ 磅, 每方吋表壓力.

4. 一儲空氣箱, 其容積爲 300 立方呎. 箱內之絕對壓力爲每方吋 100 磅, 溫度爲 70°F. 試求箱內所有空氣之重量.

解答 按 $PV = WRT$ 公式,

$$P = 100 \times 144 = 14,400 \text{ 磅, 每方呎,}$$

$$V = 300 \text{ 立方呎,}$$

$$T = 70 + 460 = 530^{\circ}\text{F.}, \text{ 絕對溫度.}$$

代入公式, 得

$$W = \frac{PV}{RT} = \frac{14,400 \times 300}{53.34 \times 460} = 152 \text{ 磅.}$$

5. 定量之空氣，其溫度為 $60^{\circ}\text{F}.$ ，絕對壓力為每方吋 14.7 磅；容積為 5 立方呎。倘壓力不變，溫度升至 $120^{\circ}\text{F}.$ ，問其容積應為若干立方呎？

解答 按查理斯定律

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

$$V_1 = 5 \text{ 立方呎,}$$

$$T_1 = 60 + 460 = 520^{\circ}\text{F.}, \text{ 絕對溫度,}$$

$$T_2 = 120 + 460 = 580^{\circ}\text{F.}, \text{ 絕對溫度.}$$

$$\text{故 } V_2 = \frac{V_1 T_2}{T_1} = \frac{5 \times 580}{520} = 5.575 \text{ 立方呎.}$$

6. 一儲空氣箱，存有空氣 200 立方呎。其溫度為 $60^{\circ}\text{F}.$ ，其絕對壓力為每方吋 200 磅。(a) 求空氣之重量。(b) 在大氣壓力之下，此一部空氣應占之容積為若干立方呎？

解答 (a) 按 $PV = WRT$ 公式，

$$P = 200 \times 144 = 28,800 \text{ 磅, 立方呎,}$$

$$V = 200 \text{ 立方呎,}$$

$$T = 60 + 460 = 520^{\circ}\text{F.}, \text{ 絕對溫度.}$$

代入公式，得

$$W = \frac{PV}{RT} = \frac{28,800 \times 200}{53.34 \times 520} = 207.3 \text{ 磅.}$$

(b) 按薄依耳定律

$$P_1 V_1 = P_2 V_2$$

$$P_1 = 200 \text{ 磅, 每方吋,}$$

$$V_1 = 200 \text{ 立方呎,}$$

$$P_2 = 14.7 \text{ 磅, 每方吋.}$$

$$\text{故 } V_2 = \frac{P_1 V_1}{P_2} = \frac{200 \times 200}{14.7} = 2,720 \text{ 立方呎.}$$

7. 某箱之容積爲 1,000 立方呎 其中半滿空氣, 餘半爲水. 箱內之絕對壓力爲每方吋 60 磅: 溫度爲 60°F . 倘將箱內之水撤出一半, 並假設溫度保持不變, 問箱內之結果壓力爲何?

解答 因溫度不變, 按薄依耳定律

$$P_1 V_1 = P_2 V_2$$

$$P_1 = 60 \text{ 磅, 每方吋,}$$

$$V_1 = \frac{1}{2} \times 1,000 = 500 \text{ 立方呎,}$$

$$V_2 = 500 + \frac{1}{2} \times 500 = 750 \text{ 立方呎,}$$

$$\text{故 } P_2 = \frac{P_1 V_1}{V_2} = \frac{60 \times 500}{750} = 40 \text{ 磅, 每方吋絕對壓力.}$$

8. 一儲空氣箱 儲有空氣 200 立方呎. 其壓力爲大氣壓力. 其溫度爲 60°F . 如將所有空氣熱至 150°F ., 問 (a) 箱中空氣之結果壓力, (b) 所需之熱量.

解答 (a) 因容積不變, 得

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

$$P_1 = 14.7 \text{ 磅, 每方吋,}$$

$$T_1 = 60 + 460 = 520^\circ\text{F.}, \text{ 絕對溫度,}$$

$$T_2 = 150 + 460 = 610^\circ\text{F.}, \text{ 絕對溫度,}$$

$$\text{故 } P_2 = \frac{P_1 T_2}{T_1} = \frac{14.7 \times 610}{520} = 17.24 \text{ 磅, 每方吋.}$$

(b) 按定容加熱

$$\begin{aligned} Q &= \frac{V(P_2 - P_1)}{778(K - 1)} \\ &= \frac{200 \times 144(17.24 - 14.7)}{778(1.4 - 1)} = 237 \text{ 英熱單位.} \end{aligned}$$

9. 一儲空氣箱, 儲有空氣 200 立方呎. 其絕對壓力為每方吋 40 磅; 其溫度為 60°F. 倘加 1,000 英熱單位之熱量於空氣, 問其結果溫度與壓力各為何?

解答 (a) 按定容加熱

$$Q = \frac{V(P_2 - P_1)}{778(K - 1)}$$

$$Q = 1,000 \text{ 英熱單位}$$

$$P_1 = 40 \text{ 磅, 每方吋,}$$

$$V = 200 \text{ 立方呎.}$$

代入公式, 得

$$\begin{aligned} P_2 &= \frac{Q \times 778(K - 1)}{V} + P_1 \\ &= \frac{1,000 \times 778 \times 0.4}{200} + 40 \times 144 \\ &= 7,316 \text{ 磅, 每方呎} = 50.8 \text{ 磅, 每方吋.} \end{aligned}$$

(b) 因 $V_1 = V_2$

則 $\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$

$T_1 = 60 + 460 = 520^\circ\text{F.}$, 絕對溫度,

故 $T_2 = \frac{P_2 T_1}{P_1} = \frac{50.8 \times 520}{40} = 660.4^\circ\text{F.}$, 絕對溫度.

或 $660.4 - 460 = 200.4^\circ\text{F.}$

10. 某劇場可容五千人. 設每小時每人需供給 2,000 立方呎之通風, 場外溫度為 0°F. , 場內溫度為 70°F. 問每小時共需空氣若干磅? 共需熱量若干英熱單位? 在零度時 1 立方呎空氣之重量為 0.0863 磅, 在 70°F. 時, 1 立方呎空氣之重量為 0.075 磅.

解答 (a) 在 70°F. 時, 每小時共需空氣之容積

$$= 5,000 \times 2,000 = 10,000,000 \text{ 立方呎,}$$

故每小時共需空氣之重量

$$= 10,000,000 \times 0.075 = 750,000 \text{ 磅.}$$

(b) 按定壓加熱, 每小時共需之熱量

$$= \frac{P(V_2 - V_1)K}{(K-1)778} = \frac{WR(T_2 - T_1)K}{778(K-1)}$$

$$= \frac{750,000 \times 53.34 \times 1.4(70-0)}{778(1.4-1)}$$

$$= 12,650,000 \text{ 英熱單位.}$$

11. 空氣 4 磅, 容積 12 立方呎, 絕對壓力每方吋 80 磅. 經過等

溫膨脹後，其絕對壓力變為每方吋 15 磅。問當膨脹時所作之外功與加入之熱量各為若干？

解答 按等溫膨脹

$$W = P_1 V_1 \log_e \frac{V_2}{V_1} = P_1 V_1 \log_e \frac{P_1}{P_2}$$

$$P_1 = 80 \times 144 = 11,520 \text{ 磅, 每方呎,}$$

$$V_1 = 12 \text{ 立方呎,}$$

$$P_2 = 15 \times 144 = 2,160 \text{ 磅, 每方呎.}$$

故當膨脹時所作之外功

$$= 11,520 \times 12 \log_e \frac{80}{15}$$

$$= 11,520 \times 12 \times 2.3 \times 0.7267$$

$$= 231,300 \text{ 呎磅.}$$

加入之熱量

$$= \frac{231,300}{778} = 297 \text{ 英熱單位.}$$

12. 一壓氣機汽缸之容積為 2 立方呎。吸入之空氣之絕對壓力為每方吋 15 磅，其溫度為 70°F。按等溫壓縮直至絕對壓力為每方吋 100 磅。問 (a) 在壓縮衝程之始，汽缸內容氣之重量。(b) 空氣最後之容積。(c) 當壓縮時對於空氣所作之功。

解答 (a) 按 $PV = WRT$ 公式

$$W = \frac{PV}{RT} = \frac{15 \times 144 \times 2}{53.34(70 + 460)} = \frac{4320}{53.34 \times 530}$$

$$= 0.153 \text{ 磅.}$$

(b) 因 $T_2 = T_1$

$$\text{故 } V_2 = \frac{P_1 V_1}{P_2} = \frac{15 \times 2}{100} = 0.3 \text{ 立方呎.}$$

$$(c) W = P_1 V_1 \log_e \frac{V_2}{V_1}$$

$$= 15 \times 144 \times 2 \log_e \frac{0.3}{2}$$

$$= 4,320 \times 2.3 \log 0.15$$

$$= 4,320 \times 2.3 \times (-1 + 0.176)$$

$$= -8,200 \text{ 呎磅. (負號表示對於空氣作功)}$$

13. 一壓氣機按大氣壓力吸入空氣 並按等溫壓縮, 直至絕對壓力為每方吋 100 磅. 壓氣機之內直徑為 8 吋. 一衝程之距離為 12 吋. 如不計餘隙容積. 問由汽缸向外排氣應在一衝程之何點起始?

解答 $P_1 V_1 = P_2 V_2$

設 x 為起始排氣點距汽缸前端之距離, 則

$$x \times V_1 = V_2 = \frac{P_1 V_1}{P_2}$$

$$\text{故 } x = \frac{P_1}{P_2} = \frac{14.7}{100} = 0.147 \text{ 呎} = 1.765 \text{ 吋}$$

$$\frac{12 - 1.765}{12} = \frac{10.235}{12} = 0.853$$

故汽缸向外排氣時, 應在一衝程之 85.3%.

14. 空氣 1 立方呎, 由 4 倍大氣壓力之表壓力與 60°F. 之溫度, 按斷熱膨脹至 1 倍大氣壓力之絕對壓力. 求空氣之最後溫度.

解答 因係斷熱膨脹，故 (50) 式變為

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = (60 + 460) \left(\frac{1}{4+1} \right)^{\frac{0.4}{1.4}}$$

$$= 520 (0.2)^{\frac{1}{3.5}} = 520 \times 0.635$$

$$= 330^\circ \text{F.}, \text{ 絕對溫度.}$$

$$\text{或 } 330 - 460 = -130^\circ \text{F.}$$

15. 一氣缸之內直徑為 20 吋。其一端開口。內裝置一活塞。當移動時。須用力 50 磅方能戰勝摩擦阻力。氣缸內有空氣 5 立方呎，其絕對壓力為每方吋 12 磅，溫度為 60°F 。氣壓表之讀數為 30 吋水銀柱。倘使活塞向外移動 2 呎，問需功幾何？假設無熱之傳達。

解答 因係斷熱膨脹，按 (39) 式，得

$$P_2 = P_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^k$$

$$P_1 = 12 \times 144 = 1,728 \text{ 磅, 每方呎,}$$

$$V_1 = 5 \text{ 立方呎,}$$

$$V_2 = 5 + \frac{\pi}{4} \left(\frac{20}{12} \right)^2 \times 2 = 5 + 4.36 = 9.36 \text{ 立方呎,}$$

$$\text{故 } P_2 = 1,728 \left(\frac{5}{9.36} \right)^{1.4} = 1,728 \times 0.4167,$$

$$= 720 \text{ 磅, 每方呎.}$$

因汽缸內空氣之膨脹所作之功

$$\begin{aligned}
 &= \frac{P_1 V_1 - P_2 V_2}{k-1} \\
 &= \frac{1,728 \times 5 - 720 \times 9.36}{1.4-1} = \frac{8,640 - 6,740}{0.4} \\
 &= \frac{1900}{0.4} = 4,750 \text{ 呎磅.}
 \end{aligned}$$

戰勝大氣壓力所需之外功

$$= 30 \times 0.491 \times 144 \times \frac{\pi}{4} \left(\frac{20}{12} \right)^2 \times 2 = 9,270 \text{ 呎磅.}$$

戰勝摩阻力所需之外功

$$= 50 \times 2 = 100 \text{ 呎磅.}$$

故所需之總功

$$= 9,270 + 100 - 4,750 = 4,620 \text{ 呎磅.}$$

16. 空氣 2 立方呎，其溫度為 540°F.，其絕對壓力為每方吋 100 磅。按斷熱膨脹直至其溫度降至 40°F. 問所作之功幾何？

解答 因係斷熱膨脹，由 (38) 式

$$\begin{aligned}
 W &= \frac{wR(T_2 - T_1)}{1-k} \\
 &= \frac{P_1 V_1 (T_2 - T_1)}{T_1 (1-k)} \\
 &= \frac{100 \times 144 \times 2 (40 - 540)}{(540 + 460) (1 - 1.4)} \\
 &= \frac{14,400}{0.4} = 36,000 \text{ 呎磅.}
 \end{aligned}$$

17. 空氣 3 立方呎，其溫度為 60°F ., 其絕對壓力為每方吋 45 磅。
問：(a) 當斷熱膨脹至絕對壓力每方吋 15 磅時，空氣之容積與溫度。(b) 膨脹時所作之功。(c) 變功之熱量(以英熱單位計)。

解答 (a) 因係斷熱膨脹，按 (39) 式，得

$$V_2 = V_1 \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{1}{k}} = 3 \times \left(\frac{45}{15} \right)^{\frac{1}{1.4}} = 3^{\frac{2.4}{1.4}} = 3^{1.714} \\ = 6.58 \text{ 立方呎.}$$

按 (49) 式，得

$$T_2 = T_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1} = (60 + 460) \left(\frac{3}{6.58} \right)^{0.4} \\ = \frac{520}{(2.193)^{\frac{1}{2.5}}} = \frac{520}{1.37} = 379^{\circ}\text{F}., \text{ 絕對溫度.}$$

$$\text{或 } 379 - 460 = -81^{\circ}\text{F}.$$

$$(b) \quad W = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1 - k} = \frac{144 (15 \times 6.58 - 45 \times 3)}{1 - 1.4} \\ = \frac{5230}{0.4} = 13075 \text{ 呎磅.}$$

$$(c) \text{ 變功之熱量 } Q = \frac{13075}{778} = 16.8 \text{ 英熱單位.}$$

18. 空氣 2 立方呎，其溫度為 60°F ., 其絕對壓力為每方吋 80 磅。
問 (a) 空氣之重量。(b) 倘空氣按斷熱膨脹直至容積為 8 立方呎時，求最後之溫度與壓力。(c) 膨脹時所作之功。(d) 倘空氣按等溫膨脹直至容積為 8 立方呎時，求所作之功。

解答 (a) 按 $PV = WRT$ 公式

$$W = \frac{PV}{RT} = \frac{80 \times 144 \times 2}{53.34(60 + 460)} = 0.83 \text{ 磅}$$

(b) 因係斷熱膨脹, 故

$$\begin{aligned} P_2 &= P_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^k = 80 \left(\frac{2}{8} \right)^{1.4} = 80 \left(\frac{1}{4} \right)^{1.4} \\ &= \frac{80}{6.97} = 11.47 \text{ 磅, 每方吋.} \end{aligned}$$

$$T_2 = \frac{P_2 V_2 T_1}{P_1 V_1} = \frac{11.47 \times 8 \times 520}{80 \times 2} = 298^\circ \text{F., 絕對溫度,}$$

或 $298 - 460 = -162^\circ \text{F.}$

(c) 斷熱膨脹時所作之功

$$\begin{aligned} W &= \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1 - k} = \frac{144(11.47 \times 8 - 80 \times 2)}{1 - 1.4} \\ &= \frac{144 \times 68.24}{0.4} = 24550 \text{ 呎磅.} \end{aligned}$$

(d) 等溫膨脹時所作之功

$$\begin{aligned} W &= P_1 V_1 \log_e \frac{V_2}{V_1} = 80 \times 144 \times 2 \times 2.3 \log \frac{8}{2} \\ &= 53,000 \times 0.602 = 31,900 \text{ 呎磅.} \end{aligned}$$

19. 空氣 4 立方呎, 其絕對壓力為每方吋 100 磅, 沿 $PV^n = C$ 曲線膨脹至容積 14.2 立方呎, 絕對壓力每方吋 15 磅. 問: (a) 膨脹時加熱或放熱? (b) 加熱或放熱之量. (c) 膨脹時所作之功.

解答 (a) 按 $P_1 V_1^n = P_2 V_2^n$ 公式

$$100 \times 4^n = 15 \times 14.2^n$$

$$\left(\frac{14.2}{4}\right)^n = \frac{100}{15}$$

$$n \log 3.55 = \log 100 - \log 15$$

$$n \times 0.5502 = 2 - 1.1761 = 0.8239$$

$$n = \frac{0.8239}{0.5502} = 1.497$$

因 $n > k$, 故膨脹時放熱。

(b) 膨脹時放出之熱量

$$\begin{aligned} Q &= (P_2 V_2 - P_1 V_1) \left(\frac{1}{k-1} + \frac{1}{1-n} \right) \\ &= (15 \times 144 \times 14.2 - 100 \times 144 \times 4) \left(\frac{1}{0.4} - \frac{1}{0.497} \right) \\ &= (30,700 - 57,600)(2.5 - 2.01) \\ &= -26,900 \times 0.49 \\ &= -13,200 \text{ 呎磅} = -16.95 \text{ 英熱單位。} \end{aligned}$$

(c) 膨脹時所作之功

$$W = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1-n} = \frac{-26,900}{-0.497} = 54,100 \text{ 呎磅。}$$

20. 空氣 10 磅, 其溫度為 150°F ., 其絕對壓力為每方吋 200 磅。沿 $PV^{0.9} = C$ 曲線膨脹至絕對壓力每方吋 15 磅。問: (a) 膨脹最後之溫度. (b) 膨脹時所作之功, 以呎磅計. (c) 膨脹時加熱或放熱及其量。以英熱單位計

解答 (a) 由 (50) 式

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} = \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{1-n}{n}}$$

$$\begin{aligned}
 T_2 &= (150 + 460) \left(\frac{200}{15} \right)^{\frac{1-0.9}{0.9}} \\
 &= 610 \left(\frac{40}{3} \right)^{\frac{1}{9}} = 610 \times \frac{1.505}{1.13} = 814 \text{ F.}, \text{ 絕對溫度} \\
 \text{或 } 814 - 460 &= 354 \text{ F.}
 \end{aligned}$$

(b) 膨脹時所作之功

$$\begin{aligned}
 W &= \frac{wR(T_2 - T_1)}{1 - n} = \frac{10 \times 53.34(354 - 150)}{1 - 0.9} \\
 &= \frac{533.4 \times 204}{0.1} = 1,087,000 \text{ 呎磅.}
 \end{aligned}$$

(c) 因 $n = 0.9 < k$, 故膨脹時加熱.

$$\begin{aligned}
 Q &= \frac{wR}{778} (T_2 - T_1) \left(\frac{1}{k-1} + \frac{1}{1-n} \right) \\
 &= \frac{10 \times 53.34 \times 204}{778} \left(\frac{1}{0.4} + \frac{1}{0.1} \right) \\
 &= \frac{533.4 \times 204 \times 12.5}{778} \\
 &= 1,750 \text{ 英熱單位.}
 \end{aligned}$$

21. 一定重量之空氣, 由絕對壓力每方吋 100 磅, 容積 2 立方呎, 膨脹至絕對壓力每方吋 25 磅, 容積 4 立方呎. 問: (a) 膨脹時加熱或放熱. (b) 加熱或放熱之量, 以英熱單位計. (c) 倘最後之容積不為 4 立方呎, 而為 5.38 立方呎, 求所加或所放之熱量. (d) 膨脹時空氣所作之功. (e) 假設空氣原來之溫度為 70 F., 並沿 $PV = C$ 曲線由原來