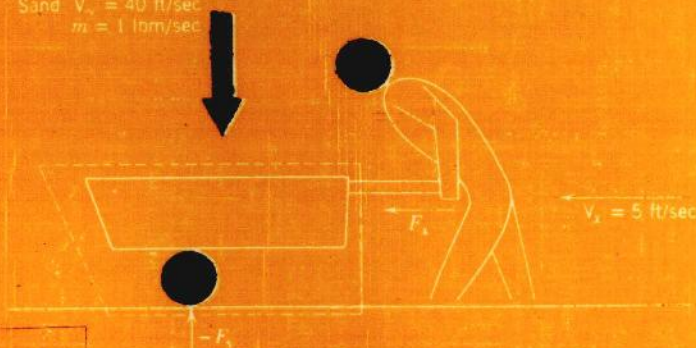


基本熱力學詳解

Fundamentals of Classical Thermodynamics

Second Edition

Sand $V_s = 40$ ft/sec
 $m = 1$ lbm/sec



Gordon J. Van Wylen
and Richard E. Sonntag

Department of Mechanical Engineering
University of Michigan, Ann Arbor, Michigan

曉園出版社

基本熱力學詳解

P. Van Wylen 原 著
Sonntag

曉園出版社

版權所有・翻印必究

中華民國六十六年九月初版

中華民國六十九年十月三版

基本熱力學詳解

定價：新台幣 150 元

原著者：Wyllen • Sonntag

譯著者：陳 昆 生

發行人：黃 旭 政

發行所：曉 國 出 版 社

臺北市永康街12巷2-3號

電話：(02) 394-9931 三線

郵撥：一九四五三號

門市部：開 放 書 城

台北市重慶南路一段61號地下樓

電話：三一四九五八〇

印刷所：遠 大 印 刷 廠

臺北市武成街36巷16弄15號

出版登記：局版台業字第 1244 號

著作執照：台內著字第 號

前 言

研習理工的同學，都有一種認識，那就是：一本書的習題往往是該書的精華所在，藉着習題的印證，才能對書中的原理原則澈底的吸收與瞭解。

有鑒於此，曉園出版社特地聘請了許多在本科上具有相當研究與成就的人士，精心出版了一系列的題解叢書，為各該科目的研習，作一番介紹與鋪路的工作。

一個問題的解答方法，常因思惟的角度而異。曉園題解叢書，毫無疑問的都是經過一番精微的思考與分析而得。其目的在提供對各該科目研讀時的參考與比較；而對於一般的自修者，則有啓發與提示的作用。希望讀者能藉着這一系列題解叢書的幫助，而在本身的學問進程上有更上層樓的成就。

目 錄

第一章	緒 論.....	0
	Some Introductory Comments	
第二章	基本觀念及定義.....	1
	Some Concepts and Definitions	
第三章	純質之性質	7
	Properties of a Pure Substance	
第四章	功與熱.....	23
	Work and Heat	
第五章	熱力學第一定律.....	37
	The First Law of Thermodynamics	
第六章	熱力學第二定律.....	90
	The Second Law of Thermodynamics	
第七章	熵.....	98
	Entropy	
第八章	不可逆性與有利性.....	163
	Irreversibility and Availability	
第九章	能及冷凍循環.....	185
	Some Power and Refrigeration Cycles	

第 十 章	熱力學諸公式.....	257
	Thermodynamic Relations	
第十一章	混合物與溶液.....	322
	Mixtures and Solutions	
第十二章	化學反應.....	383
	Chemical Reactions	
第十三章	相的平衡與化學平衡.....	426
	Introduction to Phase and Chemical Equilibrium	
第十四章	流體流經噴嘴與葉片通過器之討論.....	477
	Flow Through Nozzles and Blade Passages	
附 錄		495

第二章 基本觀念及定義 Some Concepts and Definitions

2.1 一質量 10 kg 之物體受一 10 lbf 之加速力，試計算其加速度 cm/sec^2 和 ft/sec^2

2.1

$$F = ma$$
$$a = \frac{(10 \times 4.448 \times 10^3 \text{ dynes})}{10,000 \text{ gm}} \left(1 \frac{\text{gm-cm}}{\text{dyne-sec}^2} \right) = 444.8 \frac{\text{cm}}{\text{sec}^2}$$
$$a = \frac{(10 \text{ lbf}) \left(32.174 \frac{\text{lbm-ft}}{\text{lbf-sec}^2} \right)}{\left(\frac{10,000}{453.6} \text{ lbm} \right)} = 14.6 \frac{\text{ft}}{\text{sec}^2}$$

2.2 重力之“標準”加速度為 32.174 ft/sec^2 ，計算“標準”重力施於質量 1 gm 物質之力的達因數

2.2

$$g = 32.174 \frac{\text{ft}}{\text{sec}^2} \times 30.48 \frac{\text{cm}}{\text{ft}} = 980.66 \frac{\text{cm}}{\text{sec}^2}$$
$$F = \frac{mg}{g_c} = \frac{(1 \text{ gm}) (980.66 \frac{\text{cm}}{\text{sec}^2})}{1 \frac{\text{gm-cm}}{\text{dyne-sec}^2}} = 980.66 \text{ dynes}$$

2.3 計算一 10 slugs 之物體在地球某點重心加速度為 30.2 ft/sec^2 之引力大小？它的重量為多少 lbf？它的質量為多少 lbm？

2.3

$$m = 10 \text{ slugs} = 321.74 \text{ lbm}$$
$$F = \frac{mg}{g_c} = \frac{321.74 \times 30.2}{32.174} = 302 \text{ lbf}$$

2.4 1 磅質量用一桿秤在 $g = 31.0 \text{ ft/sec}^2$ 下称重，其讀數將為多少？如果用一對標準重力讀數正確之彈簧刻度，其讀數將為多少？

2.4

1 lbf. WITH BEAM BALANCE.

$$F = \frac{1 \times 31.0}{32.174} = \underline{\underline{0.965 \text{ lbf.}}} \text{ WITH SPRING BALANCE.}$$

- 2.5 一固定質量之物體用一在海平面上校正過的彈簧秤在 30,000 ft 高度 ($g = 32.08 \text{ ft/sec}^2$) 下秤重，彈簧秤上的讀數為 9.3 磅，試問此物體的質量若干？

2.5

$$m = \frac{Fg_c}{g} = \frac{9.3 \times 32.174}{32.08} = \underline{\underline{9.33 \text{ lbm.}}}$$

- 2.6 “牛頓”已經被定義為在國際 SI 單位系統上力的單位，決定牛頓和本章所討論到其他力的單位間之關係

2.6

NEW SI SYSTEM UNITS SIMILAR TO
ABSOLUTE METRIC SYSTEM EXCEPT

[MASS] = kg. INSTEAD OF gm.
[LENGTH] = m. INSTEAD OF cm.

$$\therefore [\text{FORCE}] = 1 \text{ Newton} = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{sec}^2}.$$

$$1 \text{ Newton} = (10^3 \text{ gm}) \times (10^2 \text{ cm}) = \underline{\underline{10^5 \text{ dynes}}}$$

$$1 \text{ Newton} = (2.2046 \text{ lbm}) \cdot \left(\frac{1}{0.3048} \text{ ft} \right) = \underline{\underline{7.233 \frac{\text{lbm} \cdot \text{ft}}{\text{sec}^2}}}$$

$$1 \text{ lbf} = 32.174 \frac{\text{lbm} \cdot \text{ft}}{\text{sec}^2}$$

$$\therefore 1 \text{ Newton} = \frac{7.233}{32.174} = \underline{\underline{0.225 \text{ lbf.}}}$$

- 2.7 一活塞面積 1 ft^2 ，若它能施一超過一大氣壓 10 lbf/in^2

之壓力於圓筒內之氣體，則其質量應為多少？假設為標準重力加速度。

2.7

$$F = 10 \times 1 \times 144 = 1440 \text{ lbf.}$$

$$m = \frac{F g_c}{g} = \frac{1440 \times 32.174}{32.174} = \underline{1440 \text{ lbm}}$$

2.8 假設在一太空軌道站上，由於旋轉此太空站而有人為的重力加速度 5 ft/sec^2 被減少，則裏面一個 150 lbm 的人將有多少重？

2.8

$$F = \frac{ma}{g_c} = \frac{150 \times 5}{32.174} = \underline{23.3 \text{ lbf}}$$

2.9 一計式壓力讀數 40.7 lbf/in^2 ，同時氣壓計讀數為 29.2 in Hg ，計算絕對壓力 lbf/in^2 和 atm

2.9

$$P = 40.7 + 29.2 \times 0.491 = \underline{55.0 \frac{\text{lbf}}{\text{in}^2}}$$

$$= \frac{55.0}{14.7} = \underline{3.74 \text{ atm.}}$$

2.10 一差壓計含密度為 51.0 lbm/ft^3 之液體，其兩邊高度差為 20 in ，其壓力差為多少 lbf/in^2 ？若同樣的壓力差用一含水銀（密度 13.60 gm/cm^3 ）的差壓計中測量，則其兩邊高度差若干？

2.10

$$\Delta P = \frac{\rho L g}{g_c} = \frac{51 \times \frac{20}{12} \times 32.174}{32.174 \times 144} = \underline{0.59 \frac{\text{lbf}}{\text{in}^2}}$$

FOR MERCURY,

$$L = \frac{\Delta P \cdot g_c}{\rho g} = \frac{0.59 \times 144 \times 32.174}{13.6 \times 62.4 \times 32.174} \times 12 = \underline{1.2 \text{ in}}$$

- 2.11 一水銀差壓計用來測一真空讀數 28.8 in, 同時水銀氣壓計讀數 29.6 inHg, 試決定其壓力之 lbf/in² 數和多少 microns.

$$2.11 \quad P = \underline{0.80 \text{ inHg}} = \underline{0.392 \frac{\text{lbf}}{\text{in}^2}} = \underline{20,320 \text{ micron}}$$

- 2.12 將一標準大氣壓之值以牛頓表示 (見題目 2.6)

$$2.12 \quad (\text{SEE PR. 2.6})$$

$$1 \text{ std. atm} = \frac{(0.76 \text{ mHg})(13595.1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3})(9.80665 \frac{\text{m}}{\text{sec}^2})}{(1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{N} \cdot \text{sec}^2})}$$

$$= \underline{101.325 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}}$$

OR $1 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 10 \frac{\text{dynes}}{\text{cm}^2}$ AND

$$1 \text{ std atm} = 1.01325 \times 10^6 \frac{\text{dynes}}{\text{cm}^2} = \underline{1.01325 \times 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}}$$

- 2.13 一實驗飛機在高度 40,000 ft 上 ($g = 32.05 \text{ ft/sec}^2$) 飛行, 用一以水銀差壓計測量之儀器內測空氣流速液面差為 30 in 在海平面和同一溫度下, 水銀之密度為 13.60 gm/cm³, 決定通過孔口之壓力降落 lbf/in²。

$$2.13 \quad \rho = 13.6 \frac{\text{gm}}{\text{cm}^3} = 849 \frac{\text{lbm}}{\text{ft}^3}$$

$$\Delta P = \frac{\rho L g}{g_c} = \frac{849 \times \frac{30}{12} \times 32.05}{32.174 \times 44} = \underline{14.71 \frac{\text{lbf}}{\text{in}^2}}$$

- 2.14 一水銀柱放在室外一儀器中用來測量壓力差 30 lbf/in², 冬天之最低溫度為 0°F, 夏天之最高溫為 100°F。試問當壓力差皆為 30 lbf/in² 時在夏天所量水銀柱之高度和冬

天所量之高度差爲若干？假設爲標準重力加速度，下列數據爲查水銀之密度用

T°C	密度
-10	13.6198 gm/cm ³
0	13.5951
10	13.5704
20	13.5458
30	13.5213

2.14

$$\rho_{100^\circ\text{F}} = 842.9 \frac{\text{lbm}}{\text{ft}^3}$$

$$L_{100^\circ\text{F}} = \frac{P \cdot g_c}{\rho \cdot g} = \frac{30 \times 144 \times 32.174}{842.9 \times 32.174} = 5.11 \text{ ft}$$

$$\rho_{0^\circ\text{F}} = 851.343 \frac{\text{lbm}}{\text{ft}^3}$$

$$L_{0^\circ\text{F}} = \frac{P \cdot g_c}{\rho \cdot g} = \frac{30 \times 144 \times 32.174}{851.343 \times 32.174} = 5.07 \text{ ft}$$

$$\Delta L = 0.04 \text{ ft} \approx \underline{\underline{0.48 \text{ in}}}$$

- 2.15 一接近真空室由 Cryopumping 達到很低壓力。這包括保持某些表面在很低溫度下（低至 5°K）。尤其是所有出現的氣體（除了氮）皆在這些表面冷凝， 1×10^{-8} torr 和更低的壓力皆由此種技術在空間室達成，試問 10^{-8} torr 用大氣壓，lb/in² 和 dynes/cm² 表示各爲若干？

2.15

$$1 \times 10^{-8} \text{ mmHg} = 1.317 \times 10^{-11} \text{ std. atm.}$$

$$= \underline{\underline{1.933 \times 10^{-10} \frac{\text{lb}_f}{\text{in}^2}}} = \underline{\underline{1.34 \times 10^{-5} \frac{\text{dynes}}{\text{cm}^2}}}$$

- 2.16 一含氫氣的垂直圓柱體配上一質量 100 lbm 之活塞和載面

積 40 in^2 ，圓柱外之大氣壓為 14.0 lbf/in^2 。同時當地的重力加速度為 31.0 ft/sec^2 ，試問圓柱內氬氣之壓力若干？

$$\boxed{2.16} \quad F = \frac{mg}{g_c} = \frac{100 \times 31.0}{32.174} = 96.4 \text{ lbf}$$

$$P = P_{\text{atm}} + P_{\text{piston}} = 14.0 + \frac{96.4}{40} = \underline{\underline{16.41 \frac{\text{lbf}}{\text{in}^2}}}$$

2.17 在一封閉水塔內之液面高於地面 100 ft ，水面上之空氣壓力為 17 lbf/in^2 ，水的平均密度為 62.4 lbm/ft^3 ，試問地平面上之水壓力為多少？

$$\boxed{2.17} \quad P_{z=0} = 17 + \frac{62.4 \times 100}{144} \times \frac{32.174}{32.174} = \underline{\underline{60.3 \frac{\text{lbf}}{\text{in}^2}}}$$

2.18 一氣體容於圓柱 A 和 B 內，用一兩邊不同直徑的活塞連接著，如 Fig 2.8 所示，活塞之質量為 20 lbm ，圓柱內之氣體壓力為 30 lbf/in^2 ，試計算圓柱 B 內之壓力。

$$\boxed{2.18} \quad A_A = \frac{\pi}{4} \cdot 4^2 = 12.57 \text{ in}^2, \quad A_B = 0.785 \text{ in}^2$$

$$F_{\text{DOWN}} = 30 \times 12.57 + \frac{20 \times 32.174}{32.174} = 397 \text{ lbf.}$$

$$F_{\text{UP}} = 397 = 14.7(12.57 - 0.785) + P_B \times 0.785$$

$$\therefore P_B = \frac{397 - 173}{0.785} = \underline{\underline{285 \frac{\text{lbf}}{\text{in}^2}}}$$

第三章 純質之性質 Properties of a Pure Substance

3.1 一圓氣球半徑 10 ft, 大氣壓爲 14.7 lbf/in², 溫度 60°F

- (a) 試計算此氣球置換爲空氣時相當於多少質量和多少莫耳數之空氣。
 (b) 若此氣球在 14.7 lbf/in² 時充滿氦氣, 60°F, 試問氦氣的質量及莫耳數。

3.1

$$V = \frac{\pi}{6} (20)^3 = 4192$$

$$a) \quad m_{\text{AIR}} = \frac{PV}{RT} = \frac{14.7 \times 144 \times 4192}{1545 \times 520} = \underline{11.04 \text{ lb-mole}}$$

$$m_{\text{AIR}} = n_{\text{AIR}} \cdot M_{\text{AIR}} = 11.04 \times 28.97 = \underline{320 \text{ lbm}}$$

$$b) \quad n_{\text{He}} = \frac{PV}{RT} = \underline{11.04 \text{ lb-mole}}$$

$$m_{\text{He}} = n_{\text{He}} \cdot M_{\text{He}} = 11.04 \times 4 = \underline{44.16 \text{ lbm}}$$

3.2 空氣包含於一沒有摩擦阻力的活塞之垂直圓筒和一組制止物內, 如 Fig 3.11 所示, 此活塞之截面積爲 0.5 ft², 此空氣最初在 30 lbf/in², 800°F, 空氣接著由於熱傳遞到周遭而冷卻。

- (a) 試問當活塞達到此制止物時其內空氣之溫度若干?
 (b) 若冷卻繼續到溫度達 70°F, 試問此時圓柱內部之壓力若干?

3.2

$$a) \quad V_1 = 0.5 \times 4 = 2 \text{ ft}^3 \quad T_1 = 800 \text{ F} = 1260 \text{ R}$$

$$P_2 = P_1 = 30 \frac{\text{lbf}}{\text{in}^2}, \quad V_2 = 0.5 \times 2 = 1 \text{ ft}^3$$

$$T_2 = \frac{V_2}{V_1} T_1 = \frac{1}{2} \times 1260 = 630 \text{ R} = \underline{170 \text{ F}}$$

$$b) \quad V_3 = V_2, \quad T_3 = 530 \text{ R}$$

$$P_3 = P_2 \frac{T_3}{T_2} = 30 \times \frac{530}{630} = \underline{25.2 \frac{\text{lbf}}{\text{in}^2}}$$

- 3.3 一真空唧筒(幫浦)用來抽取液態氮池上真空。進入真空唧筒的體積流量為 $3000 \text{ ft}^3/\text{min}$ 。真空唧筒內之壓力為 0.1 torr ，其溫度為 -10°F ，試問進入此唧筒每分鐘之氮的質量？

3.3

$$P = 0.1 \text{ torr} = 1.933 \times 10^{-3} \frac{\text{lbf}}{\text{in}^2}$$

$$\dot{m} = \frac{P \dot{V}}{RT} = \frac{1.933 \times 10^{-3} \times 144 \times 3000}{386 \times 450} = 4.8 \times 10^{-3} \frac{\text{lbm}}{\text{min}}$$

- 3.4 一內直徑 6 in 之金屬球在排除內部空氣後放在一準確之桿秤上秤重，再用一未知氣體充滿再秤一次重量差為 2.25 gm 。室溫為 80°F 。假設它為純物質，試問其為何種氣體？

3.4

$$V = \frac{\pi}{6} \left(\frac{1}{2}\right)^3 = 0.0655 \text{ ft}^3$$

ASSUME IDEAL GAS

$$n = \frac{PV}{RT} = \frac{110 \times 144 \times 0.0655}{1545 \times 540} = 1.241 \times 10^{-3} \text{ lb-mole}$$

$$M = \frac{m}{n} = \frac{2.25 \text{ gm.}}{(1.241 \times 10^{-3} \times 454 \text{ g-mole})} = 4 \therefore \text{HELIUM}$$

- 3.5 一硬的容器A連接到一圓形塑膠球如 Fig 3.12 所示，兩者皆含空氣，周圍溫度為 80°F 。容器A之體積為 1 ft^3 ，最初壓力為 40 lbf/in^2 。氣球之最初直徑為 1 ft ，內部壓力為 15 lbf/in^2 。此時將連接A和B之閥打開，保持開著。也許可以假設氣球內部壓力正比於其直徑，同時空氣最後溫度一直保持一定在 80°F ，試決定系統內最後壓力和氣球最後的體積？

3.5

$$V_{B1} = \frac{\pi}{6} (1)^3 = 0.524 \text{ ft}^3$$

$$m_{B1} = \frac{P_{B1} V_{B1}}{RT} = \frac{15 \times 144 \times 0.524}{53.34 \times 540} = 0.0393 \text{ lbm.}$$

$$m_{A1} = \frac{P_{A1} V_{A1}}{RT} = \frac{40 \times 144 \times 1}{53.34 \times 540} = 0.20 \text{ lbm.}$$

$$\therefore m_2 = m_{A1} + m_{B1} = 0.2393 \text{ lbm.}$$

$$P_{A2} = P_{B2} = P_2, \quad T_{A2} = T_{B2} = T_2 = T_1$$

$$P_B \propto D_B^3, \text{ BUT } V_B \propto D_B^3 \therefore P_B \propto V_B^{1/3}$$

$$\therefore \left(\frac{P_2}{P_{B1}}\right)^3 = \frac{V_{B2}}{V_{B1}}$$

ALSO

$$P_2 V_2 = P_2 (V_{A1} + V_{B2}) = m_2 R T_2$$

$$\therefore P_2 \left[1 + 0.524 \left(\frac{P_2}{15}\right)^3 \right] = \frac{0.2393 \times 53.34 \times 540}{144} = 47.86$$

$$\text{ASSUME } P_2 = 20.5 \text{ lbf/in}^2$$

$$20.5 \left[1 + 0.524 \left(\frac{20.5}{15}\right)^3 \right] = 47.8 \quad \therefore P_2 = \underline{20.5 \text{ lbf/in}^2}$$

$$V_{B2} = 0.524 \left(\frac{20.5}{15}\right)^3 = \underline{1.33 \text{ ft}^3}$$

4.6 下列諸狀態下是否可合理的假設此物質視為理想氣體：

- 氮在 90°F , 500 lbf/in^2 .
- 二氧化碳在 90°F , 500 lbf/in^2 .
- 水在 1800°F , 500 lbf/in^2 .
- 水在 120°F , 1 lbf/in^2 .
- 水在 90°F , 1 lbf/in^2 .

3.6

$$\text{a) } N_2 \text{ AT } 90^\circ\text{F}, 500 \text{ lbf/in}^2. \quad \underline{16.}$$

$$T \gg T_c$$

b) CO_2 AT 90 F, 500 lbf/in² . NO

$T \sim T_c$, P HIGH.

c) H_2O AT 1800 F, 500 lbf/in² : IG.

$T \gg T_c$

d) H_2O AT 120 F, 1 lbf/in² . IG.

$P \ll P_c$ (CHECK $P < P_c$).

e) H_2O AT 90 F, 1 lbf/in² . NO

COMPRESSED LIQUID ($P > P_c$)

3.7 決定水在下列狀態下爲壓縮液體，過熱蒸氣，或飽和液體與蒸氣的混合物：250°F, 20 lbf/in²; 50 lbf/in², 8 ft³/lbm; 300°F, 8 ft³/lbm; 30 lbf/in², 230°F; 400°F, 0.02 ft³/lbm; 0.5 lbf/in², 60°F。

3.7

250 F } SUP. VAP. $P < P_c$ AT T
P=20 }

P=50 } MIX. LIQ.+VAP. $v_f < v < v_g$ AT P
v=8 }

300 F } SUP. VAP. $v > v_g$ AT T
v=8 }

P=30 } COMP. LIQ. $P > P_c$ AT T
230 F }

400 F } MIX. LIQ.+VAP. $v_f < v < v_g$ AT T
v=0.02 }

P=0.5 } COMP. LIQ. $P > P_c$ AT T
60 F }

- 3.8 繪出下列蒸氣—壓力曲綫（飽和壓力對飽和溫度作圖）
- 水在笛卡爾坐標， -40°F 至 60°F 。
 - 水在笛卡爾坐標，0至 3500 lbf/in^2 。
 - 水，Freon-12，氮在半對數紙（壓力為對數刻度） 1.0 至 1000 lbf/in^2 ， -50°F 至 300°F 。

3.8

PLOT

- 3.9 計算下列比容

- 氮， 80°F ，80 % quality（蒸氣質量的百分比）
- Freon-12， 120°F ，15 % quality
- 水， 1000 lbf/in^2 ，98 % quality
- 氮， -300°F ，40 % quality

3.9

a)

$$v = 1.955 - 0.2 \times 1.9283 = \underline{1.5693} \text{ ft}^3/\text{lbm.}$$

b)

$$v = 0.013174 + 0.15 \times 0.22019 = \underline{0.0462} //$$

c)

$$v = 0.4459 - 0.02 \times 0.4243 = \underline{0.4374} //$$

d)

$$v = 0.02132 + 0.4 \times 1.1469 = \underline{0.48004} //$$

- 3.10 決定下列物質在諸狀態下其 quality（若飽和）或溫度（若過熱）為多少？

- 氮， 80°F ， $1.43\text{ ft}^3/\text{lbm}$ ； 80 lbf/in^2 ， $4.75\text{ ft}^3/\text{lbm}$ 。
- Freon-12， 50 lbf/in^2 ， $0.6\text{ ft}^3/\text{lbm}$ ， 50 lbf/in^2 ， $0.960\text{ ft}^3/\text{lbm}$ 。
- 水， 80°F ， $20\text{ ft}^3/\text{lbm}$ ； 1000 lbf/in^2 ， $0.4\text{ ft}^3/\text{lbm}$
- 氮， 100 lbf/in^2 ， $0.9\text{ ft}^3/\text{lbm}$ ； 1 atm ， $3\text{ ft}^3/\text{lbm}$ 。