

大学基础课化学类习题精解丛书

物理化学习题精解

(上册)

王文清 高宏成 沈兴海 编著

科学出版社



064-42

大学基础课化学类习题精解丛书

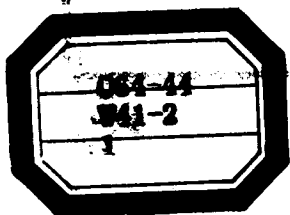
物理化学习题精解

(上册)

王文清 高宏成 沈兴海 编著

科学出版社

1999



内 容 简 介

本书是在北京大学编著的《物理化学习题解答》的基础上,经过精心修订编写而成的。1980年初稿时,该书在全国各高校反应热烈,累计销售达几十万册。

本书上册按现行的物理化学教学大纲编写,内容包括热力学第一、二定律、热化学、溶液、相平衡及化学平衡。所选习题典型全面,由浅入深,解答详尽,条理清晰,适合学生自学的需要,有助于学生加深对物理化学基本概念的理解,提高学生解决物理化学实际问题的能力,对报考研究生复习也有很大帮助。

本书可作为综合性大学、高等师范院校、工院校化学、化工、生化及地质等专业的教学参考书,也可供报考研究生、出国生自学之用。

图书在版编目(CIP)数据

物理化学习题精解 上册/王文清等编著. -北京:科学出版社,1999.8
(大学基础课化学类习题精解丛书)

ISBN 7-03-007407-6

I. 物… II. 北… III. 物理化学-高等学校-解题 IV. 064-44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 09788 号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号
邮政编码:100717

科地五印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1999年8月第一版 开本:850×1168 1/32

1999年8月第一次印刷 印张:10 1/8

印数:1—5 100 字数:264 000

定价: 16.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(新欣))

《大学基础课化学类习题精解丛书》编委会

总策划人：唐任寰 胡华强

编委：

无机化学习题精解：唐任寰（北京大学）

（上、下册） 胡少文（北京大学）

廖宝凉（北京大学）

兰雁华（北京大学）

李东风（华中师范大学）

周井炎（华中理工大学）

有机化学习题精解：冯骏材（南京大学）

（上、下册） 丁景范（山西大学）

吴琳（南京大学）

物理化学习题精解：王文清（北京大学）

（上、下册） 高宏成（北京大学）

沈兴海（北京大学）

定量分析习题精解：潘祖亭（武汉大学）

曾百肇（武汉大学）

仪器分析习题精解：赵文宽（武汉大学）

序

我国将开始全面实施《高等教育面向 21 世纪教育内容和课程体系改革计划》，按照新的专业方案，实现课程结构和教学内容的整合、优化，编写出版一批高水平、高质量的教材来。其目标就是转变教育思想，改革人才培养模式，实现教学内容、课程体系、教学方法和手段的现代化，形成和建立有中国特色高等教育的教学内容和课程体系。

演算习题是学习中的重要环节，是课堂和课本所学知识的初步应用与实践，通过演算和思考，不仅能考查对知识的理解和运用程度，巩固书本知识，而且培养了科学的思维方法和解题能力。在学习中，若仅是为了完成作业、应付考试，或舍身于题海，则会徒劳多益少，趣味索然。反之，若能直取主题，举一反三，便可收事半功倍之效，心旷神怡。

本套丛书共分 8 卷，是从大学主干基础课的四大化学：无机化学、分析化学、有机化学和物理化学等课程中精选得来，包括了综合性大学、高等院校理科和应用化学类本科生从一年级至四年级的基本知识和能力运算。各书每章在简明扼要的基本知识或主要公式后，针对性挑选系列练习题，对每题均给出解题思路、方法和步骤，使同学能加深对相关章节知识的理解和掌握，以及运用知识之灵活性，并便于读者随时翻阅，不致在解题过程中因噎废食，半途而废。

约请参加本套丛书编写的有北京大学、南京大学、武汉大学、华中理工大学和华中师范大学等长期在教学第一线从事基础教学和科学研究的教师们，他们积累有丰富的教学经验和科研成果，相得益彰，并且深入同学实际，循循善诱。不管教育内容和课程体系作如何的更动调整，集四大化学的精选题解都具有提纲挈领的功

力,因其中筛选以千计的题条几囊括了化学类题海之精英,包含各类题型和不同层面的难度及其变化。融会贯通的结果将熟能生巧,并对其他“高、精、尖”难题迎刃而解。工欲善其事,必先利其器。从历年来综合性大学、高等院校理科化学专业及应用化学专业本科生、研究生和出国留学人员的沙场战绩中证明,本套丛书将是对他们十分有用而必备的学习工具书。

我们对北京大学、南京大学、武汉大学、华中理工大学、华中师范大学和科学出版社等有关领导给予的大力支持和积极帮助深表感谢。

鉴于首次组织著名大学的化学教授和专家们分别执写基础化学课目,虽经认真磋商和校核,仍难免存在错误和不妥之处,还望专家和读者们不吝赐教和指正,以便我们今后工作中加以改进,不胜感谢。

唐任寰

于北京大学燕园

1999年5月

前 言

1969年北京大学技术物理系教师下放到陕西汉中办分校。1972年恢复招生,由于讲授物质化学课程需要,我收集了国内外试题,钻研、演算了十多本笔记近千题。1979年技术物理系迁回北京,与化学系教师合作编著了《物理化学习题解答》上、下册。分别于1980年、1981年出版。销售了上册11万本、下册15万本,深受广大读者厚爱,收到了近百封读者来信,并要求再版。

技术物理系的物理化学课程经过三代主讲教师们的努力,讲授了二十余届,积累了一定的教学经验。又经过我们讨论、删选及单位由C. G. S制改为SI制的换算,由王文清教授、高宏成教授、沈兴海副教授整理、修编成本书。本书按物理化学大纲分十章,第十一章为综合试题。本书的特点由浅入深,适合自学读者需要,解答力求简明,条理清晰。由于时间紧、任务重,书中遗漏、缺点、错误之处,敬请读者指正。

在编写过程中,统计热力学及综合试题部分,得到研究生易芳的验算、整理及尹航同学的帮助,特此致谢。

王文清

1998年11月于北京大学

本书主要符号

A 频率因子	h 普朗克常数
a 活度	I 电流强度
范德华常数	光强
a_{\pm} 平均离子活度	离子强度
b 范德华常数	K 组分数
C 比热	平衡常数 ($K_p^{\ominus}, K_p, K_x, K_c$)
c 光速	K_{sp} 溶度积
在脚标中表示临界状态	K_w 水的离子积
c_{\pm} 平均离子浓度	k 反应比速(速率常数)
$C_{p,m}$ 恒压摩尔热容	玻尔兹曼常数
$C_{v,m}$ 恒容摩尔热容	L 阿伏伽德罗常数(N_A)
D 扩散系数	角动量
d 比重	电导
直径	l 液态
E 能量	l 自由程
活化能	M 分子量
E_a 表观活化能	m 质量
e 电子或电子电荷	N 分子数
F 自由能(Helmholz 自由能)法拉第常 数	n 摩尔数量
f 自由度	折射率
逸度	p 压力
G Gibbs 自由能	Q 热量
$\Delta_f G_m^{\ominus}$ 标准摩尔生成吉布斯自由能	电量
g 气态	配分函数
g 简并度	R 气体常数
g 重力加速度	电阻
H 焓	r 反应速率
$\Delta_f H_m^{\ominus}$ 标准摩尔生成焓	半径
	在脚标中表示反应或转动
	S 熵

s	溶解度	ϵ	电动势
s	固态		分子能量
T	热力学温度	ζ	电势
T_b	沸点	η	粘度
T_f	凝固点		超电势
t	时间	θ	接触角
	迁移数	κ	压缩系数
	在脚标中表示平动		比电导(电导率)
U	内能	Λ_m	摩尔电导率
	方均根速度	λ	波长
V	电压	μ_B	物质 B 的化学势
	体积	ν	频率
	速度		计量系数
	在脚标中表示振动	$\bar{\nu}$	波数
V_m	最可几速度	π	渗透压
W	功	ρ	密度
Z	碰撞数		电阻率
	压缩因子	σ	碰撞截面
α	离解度	τ	弛豫时间
	膨胀系数	Φ	相数
β	压缩系数		量子效率
Γ	表面吸附超量	φ	电极电势
γ	活度系数	Ω	微观状态数
	表面自由能(表面张力)		热力学概率
	热容商 C_p/C_v	\ominus	上角标:标准状态
γ_{\pm}	平均离子活度系数	m	下角标:摩尔数量

本书采用自然常数值及符号

普朗克常数	h	6.626×10^{-34}	$\text{J} \cdot \text{s}$
玻尔兹曼常数	k	1.381×10^{-25}	$\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$
阿伏伽德罗常数	$N_A(L)$	6.022×10^{23}	mol^{-1}
摩尔气体常数	R	8.314	$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
法拉第常数	F	96485	$\text{C} \cdot \text{mol}^{-1}$
光速	c	2.998×10^8	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
重力加速度	g	9.8	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
大气压	atm	101.325	kPa
原子质量常数 $\frac{1}{12}m(^{12}\text{C})$	u	1.6605×10^{-27}	kg
电子伏	eV	1.6022×10^{-19}	J

* 摩尔气体常数 R 值的量纲换算

$$R = 8.314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$= 8.314 \times 10^7 \text{ erg} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$= 1.987 \text{ cal} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$= 0.08206 \text{ dm}^3 \cdot \text{atm} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$= 62.364 \text{ dm}^3 \cdot \text{mmHg} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$$

目 录

前言	(v)
本书主要符号	(ix)
本书采用自然常数值及符号	(xi)
第一章 热力学第一定律	(1)
第二章 热化学	(44)
第三章 热力学第二定律	(69)
第四章 多组分体系	(154)
第五章 相平衡	(193)
第六章 化学平衡	(252)

第一章 热力学第一定律

主要公式

1. 体积功: $\delta W_{\text{体}} = p_{\text{外}} dV$
2. 热力学第一定律: $\Delta U = Q - W$
 $dU = \delta Q - \delta W$

3. 焓的定义: $H = U + pV$

4. 等压热容: $C_p = \frac{\delta Q_p}{dT} = \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_p$

5. 等容热容: $C_v = \frac{\delta Q_v}{dT} = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_v$

6. 理想气体绝热可逆过程方程和作功:

$$pV^\gamma = \text{常数}, \gamma = C_p/C_v$$

$$TV^{\gamma-1} = \text{常数}$$

$$p^{1-\gamma} T^\gamma = \text{常数}$$

$$W = C_v(T_1 - T_2)$$

$$W = \frac{p_1 V_1 - p_2 V_2}{\gamma - 1}$$

7. 理想气体: $C_p - C_v = nR$, $C_{p,m} - C_{v,m} = R$

8. 焦耳-汤姆逊系数:

$$\mu_{J-T} = \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_H = - \frac{1}{C_p} \left(\frac{\partial H}{\partial p} \right)_T$$

1-1 在 300K 时, 5 mol 氯气由 5dm³ 恒温可逆膨胀到 50dm³, 试计算其膨胀功.

(a) 假定该气体为理想气体;

(b) 假定该气体服从范德华方程式(已知 $a = 0.650 \text{ Pa} \cdot \text{m}^6 \cdot \text{mol}^{-2}$, $b = 5.6 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$).

解 (a) 理想气体恒温可逆过程作功

$$\begin{aligned} W &= nRT \ln \frac{V_2}{V_1} \\ &= (5 \text{ mol})(8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})(300 \text{ K}) \ln \frac{50}{5} \\ &= 28.7 \text{ kJ} \end{aligned}$$

(b) 根据范德华气体方程

$$p = \frac{nRT}{V - nb} - \frac{n^2 a}{V^2}$$

等温可逆过程功

$$\begin{aligned} W &= \int_{V_1}^{V_2} p dV = nRT \ln \frac{V_2 - nb}{V_1 - nb} + n^2 a \left(\frac{1}{V_2} - \frac{1}{V_1} \right) \\ &= (5 \text{ mol})(8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})(300 \text{ K}) \\ &\quad \times \ln \frac{50 \times 10^{-3} \text{ m}^3 - 5 \text{ mol} \times 5.6 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}}{5 \times 10^{-3} \text{ m}^3 - 5 \text{ mol} \times 5.6 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}} \\ &\quad + (5 \text{ mol})^2 (0.650 \text{ Pa} \cdot \text{m}^6 \cdot \text{mol}^{-2}) \\ &\quad \times \left(\frac{1}{50 \times 10^{-3} \cdot \text{m}^3} - \frac{1}{5 \times 10^{-3} \cdot \text{m}^3} \right) \\ &= 26.4 \text{ kJ} \end{aligned}$$

1-2 1 mol 理想气体, 初始态体积为 25 dm^3 , 温度为 373.2 K . 分别通过下列四个过程等温膨胀到终态体积为 100 dm^3 , 求体系所作的功.

(a) 可逆过程;

(b) 向真空膨胀;

(c) 先在外压等于体积为 50 dm^3 时气体的平衡压力下, 使气体等温膨胀到 50 dm^3 , 然后再在外压等于体积为 100 dm^3 时气体的平衡压力下进行等温膨胀;

(d) 在外压等于终态压力下进行等温膨胀.

计算结果说明什么问题?

解 (a) 等温可逆膨胀

$$W = nRT \ln \frac{V_2}{V_1} = (1 \text{ mol}) \times (8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}) \\ \times (373.2 \text{ K}) \ln \frac{100}{25} \\ = 4.302 \text{ kJ}$$

(b) 向真空膨胀时, $p_{\text{外}} = 0$, $W = 0$.

(c) 分两个阶段进行等温不可逆膨胀

$$W = W_1 + W_2 = p_2(V_2 - V_1) + p_3(V_3 - V_2) \\ = \frac{nRT}{V_2}(V_2 - V_1) + \frac{nRT}{V_3}(V_3 - V_2) \\ = (1 \text{ mol})(8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})(373.2 \text{ K}) \times \\ \left[\frac{50 - 25}{50} + \frac{100 - 50}{100} \right] \\ = 3.102 \text{ kJ}$$

$$(d) \quad W = p_{\text{终}}(V_{\text{终}} - V_{\text{初}}) \\ = nRT \left(1 - \frac{V_{\text{初}}}{V_{\text{终}}} \right) \\ = 2.327 \text{ kJ}$$

计算结果表明, 虽体系始态与终态相同, 但所做的膨胀功不同, 它与过程有关, 其中以可逆过程(a)作功最大。

1-3 在 101.325 kPa 及 423.2K 时, 把 1 mol 的氨气等温压缩到体积等于 10dm³, 求最少需作多少功?

(a) 假定氨气是理想气体,

(b) 假定服从范德华气体, (已知 $a = 0.425 \text{ Pa} \cdot \text{m}^6 \cdot \text{mol}^{-2}$, $b = 3.73 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$)

解 (a) 等温压缩过程对体系作的最小功, 就是恒温可逆过程对体系所作的功。

$$W = \int_{V_1}^{V_2} p dV = nRT \ln \frac{V_2}{V_1}$$

$$V_1 = \frac{nRT}{p_1} = \frac{(1 \text{ mol}) \times (8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}) \times (423.2 \text{ K})}{101325 \text{ Pa}} \\ = 0.0347 \text{ m}^3 = 34.7 \text{ dm}^3$$

$$\begin{aligned} \therefore W &= (1 \text{ mol}) \times (8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}) \\ &\quad \times (423.2 \text{ K}) \ln \frac{10}{34.7} \\ &= -4.38 \text{ kJ} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{(b) 由} \left(p_1 + \frac{n^2 a}{V_1^2} \right) (V_1 - nb) &= nRT_1 \\ \left[101325 \text{ Pa} + \frac{(1 \text{ mol})^2 (0.425 \text{ Pa} \cdot \text{m}^6 \cdot \text{mol}^{-2})}{V_1^2} \right] \\ (V_1 - (1 \text{ mol}) \times (3.73 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1})) & \\ = (1 \text{ mol}) \times (8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}) \times (423.2 \text{ K}) & \end{aligned}$$

解得 $V_1 = 34.64 \text{ dm}^3$. 气体作功为

$$\begin{aligned} W &= \int_{V_1}^{V_2} p dV = \int_{V_1}^{V_2} \left(\frac{nRT}{V-nb} - \frac{n^2 a}{V^2} \right) dV \\ &= nRT \ln \frac{V_2 - nb}{V_1 - nb} + n^2 a \left(\frac{1}{V_2} - \frac{1}{V_1} \right) \\ &= (1 \text{ mol}) \times (8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}) \times (423.2 \text{ K}) \times \\ &\quad \ln \frac{10 \times 10^{-3} \text{ m}^3 - (1 \text{ mol}) \times (3.73 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1})}{34.64 \times 10^{-3} \text{ m}^3 - (1 \text{ mol}) \times (3.73 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1})} \\ &\quad + (1 \text{ mol})^2 \times (0.425 \text{ Pa} \cdot \text{m}^6 \cdot \text{mol}^{-2}) \\ &\quad \times \left(\frac{1}{10 \times 10^{-3} \text{ m}^3} - \frac{1}{34.7 \times 10^{-3} \text{ m}^3} \right) \\ &= -4.35 \text{ kJ} \end{aligned}$$

1-4 在 288.2K 及 99.990 kPa 下, 把 50g Zn 放入过量稀盐酸中, 试计算产生的氢气逸出大气时所作的功.

$$\begin{aligned} \text{解 } W &= p(V_2 - V_1) = p(V_g - V_l) = pV_g = nRT \\ &= \left(\frac{50 \times 10^{-3} \text{ kg}}{56 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}} \right) \\ &\quad \times (8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}) \times (288.2 \text{ K}) \\ &= 2.14 \text{ kJ} \end{aligned}$$

1-5 (a) 在 373.2K 及 101.325 kPa 下, 液态水的比容是 $1.043 \text{ dm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, 水蒸气的比容是 $1677 \text{ dm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$. 水的汽化热为 $40.62 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$. 求 1 mol 液态水在 373.2K 及 101.325 kPa

下蒸发为 1 mol 的水蒸气时所做的功。

(b) 假定把液体水的体积忽略不计, 试求上述过程所作的功。这时产生多大的误差?

(c) 假定把水蒸气看做是理想气体, 并略去液态水的体积, 试求蒸发过程所作的功。这个假定带来多大误差?

解 (a) 此过程是等压过程

$$\begin{aligned} W &= p(V_g - V_l) \\ &= (101325 \text{ Pa}) \times [(1.677 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} - 1.043 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}) \times (1.80 \times 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1})] \\ &= 3.059 \text{ kJ} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{(b) } W &= p(V_g - V_l) \simeq pV_g \\ &= (101325 \text{ Pa}) \times (1.677 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}) \\ &\quad \times (1.80 \times 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}) \\ &= 3.062 \text{ kJ} \end{aligned}$$

这时造成的相对误差为

$$\frac{3.062 - 3.059}{3.059} \doteq 0.1\%$$

$$\begin{aligned} \text{(c) } W &= p(V_g - V_l) = pV_g = nRT \\ &= (1 \text{ mol}) \times (8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}) \times (373.2 \text{ K}) \\ &= 3.102 \text{ kJ} \end{aligned}$$

此时相对误差为

$$\frac{3.102 - 3.059}{3.059} = 1.4\%$$

1-6 在 273.2 K 及 101.325 kPa 下, 1 mol 的冰熔化为水时, 计算过程中的功。已知该条件下冰和水的密度分别为 0.917 和 1.000 kg · dm⁻³。

$$\begin{aligned} \text{解 } W &= p(V_l - V_s) \\ &= (101325 \text{ Pa}) \\ &\quad \times \left(\frac{18.02 \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}}{1.000 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}} - \frac{18.02 \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}}{0.917 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}} \right) \\ &= -0.165 \text{ J} \end{aligned}$$

1-7 1mol 的氢气在 298.2K 及 101.325 kPa 下,经可逆绝热过程压缩到 5dm³. 试计算

- (a) 氢气的最后温度;
- (b) 氢气的最后压力;
- (c) 需作多少功?

解 (a) 设氢气为理想气体. 由于 H₂(g) 为双原子分子,

$$\gamma = 1.40.$$

$$T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_2^{\gamma-1}$$

$$\text{则 } \lg T_2 = \lg T_1 + (\gamma - 1) \lg \frac{V_1}{V_2}$$

$$\therefore V_1 = \frac{nRT_1}{p_1}$$

$$\begin{aligned} \therefore \lg T_2 &= \lg T_1 + (\gamma - 1) \lg \frac{nRT_1}{p_1 V_2} \\ &= \lg(298.2) + (1.40 - 1) \\ &\quad \times \lg \frac{(1 \text{ mol}) \times (8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}) \times (298.2 \text{ K})}{(101325 \text{ Pa}) \times (5 \times 10^{-3} \text{ m}^3)} \end{aligned}$$

$$= 2.750$$

$$T_2 = 562 \text{ K}$$

$$\begin{aligned} \text{(b) } p_2 &= \frac{nRT_2}{V_2} \\ &= \frac{(1 \text{ mol}) \times (8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}) \times (562 \text{ K})}{5 \times 10^{-3} \text{ m}^3} \end{aligned}$$

$$= 9.345 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$\text{(c) } W = nC_{V,m}(T_1 - T_2)$$

$$= \frac{5}{2} nR(T_1 - T_2)$$

$$= \frac{5}{2} \times (1 \text{ mol}) \times (8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$$

$$\times (298.2 \text{ K} - 562 \text{ K})$$

$$= -5.49 \text{ kJ}$$

1-8 273K 时,将 10g 铜块的压力自 p^\ominus 增加到 $1000p^\ominus$,问需作功多少? 已知铜的密度为 $8.93 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,其体积系数 $\beta =$