

机械手册

第6篇 热工学

(试用本)

机械工程手册 编辑委员会
电机工程手册



机械工业出版社

I-62

机械工程手册

第 6 篇 热 工 学

(试 用 本)

机械工程手册
电机工程手册

编辑委员会



机械工业出版社

A508934

本篇主要介绍有关热力学、传热学及燃烧方面的基本理论、数据、图表以及在机械工程中的应用。全篇共分7章,第1,2章为热力学部分,第3至6章为传热学部分,第7章为燃料与燃烧的基本概念。

机 械 工 程 手 册

第 6 篇 热 工 学

(试 用 本)

西安交通大学 主编

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092·印张 7¹/₄·字数 196 千字

1978年1月北京第一版·1978年1月北京第一次印刷

印数 00,001—76,000·定价 0.57 元

*

统一书号: 15033·4485

编 辑 说 明

(一) 我国自建国以来,特别是无产阶级文化大革命以来,机械工业在伟大的领袖和导师毛泽东主席的无产阶级革命路线指引下,坚持政治挂帅,以阶级斗争为纲,贯彻“**独立自主、自力更生**”的方针,取得了巨大的成就。为了总结广大群众在生产和科学技术方面的经验,加强机械工业科学技术的基础建设,适应实现“四个现代化”的需要,我们组织编写了《机械工程手册》和《电机工程手册》,使出版工作更好地为无产阶级政治服务,为工农兵服务,为社会主义服务。

(二) 这两部手册主要供广大机电工人、工程技术人员和干部在设计、制造和技术革新中查阅使用,也可供教学及其他有关人员参考。《手册》在内容和表达方式上,力求做到深入浅出,简明扼要,直观易懂,归类便查,以便广大机电工人使用,有利于工人阶级技术队伍的发展和壮大。

(三) 这两部手册是综合性技术工具书,着重介绍各专业的理论基础,常用计算公式,数据、资料,关键问题以及发展趋向。在编写中,力求做到立足全局,勾划概貌,反映共性,突出重点。读者在综合研究和处理技术问题时,《手册》可起备查、提示和启发的作用。它与各类专业技术手册相辅相成,构成一套比较完整的技术工具书。《机械工程手册》包括基础理论、机械工程材料、机械设计、机械制造工艺、机械制造过程的机械化与自动化、机械产品六个部分,共七十九篇;《电机工程手册》包括基础理论、电工材料、电力系统与电源、电机、输变电设备、工业电气设备、仪器仪表与自动化七个部分,共五十篇。

(四) 参加这两部手册编写工作的, 有全国许多地区和部门的工厂、科研单位、大专院校等五百多个单位、两千多人。提供资料和参加审定稿件的单位和人员, 更为广泛。许多地区的科技交流部门, 为审定稿件做了大量的工作。各篇在编写、协调、审查、定稿各个环节中, 广泛征求广大机电工人的意见, 坚持实行工人、技术人员和领导干部三结合的原则, 发挥了广大群众的智慧和力量。

(五) 为了使手册早日与读者见面, 广泛征求意见, 先分篇出版试用本。由于我们缺乏编辑出版综合性技术工具书的经验, 试用本在内容和形式方面, 一定会存在不少遗漏、缺点和错误。我们热忱希望读者在试用中进一步审查、验证, 提出批评和建议, 以便今后出版合订本时加以修订。

(六) 本书是《机械工程手册》第6篇, 由西安交通大学主编, 参加编写的有上海汽轮机厂研究所、天津大学等单位。上海机械学院对全篇进行了认真的审查, 并与清华大学参加了定稿工作。许多有关单位对编审工作给予大力支持和帮助, 在此一并致谢。

机械工程手册
电机工程手册 编辑委员会编辑组

常用符号表

A ——功热当量 kcal/(kgf·m)(第2章); 物体对热辐射的吸收率(第5章); 灰分(第7章)	q ——单位质量热量 kcal/kg(第2章); 热流密度 kcal/(m ² ·h) (第3~6章)
a ——导热系数 m ² /h	R ——气体常数 kgf·m/(kg·°K)(第1章); 物体对热辐射的反射率
B ——大气压力 mmHg	R ——公斤分子气体常数(通用气体常数) kgf·m/(kmol·°K), atm·m ³ /(kmol·°K)
C ——热容量 kcal/(°C)	R_r ——导热热阻 h·°C/kcal
C_0 ——黑体的辐射系数 kcal/(m ² ·h·°K ⁴)	r ——比潜热 kcal/kg(第1、4章); 半径 m
c ——比热 kcal/(kg·°C)	r_i ——容积成分
c^* ——容积比热 kcal/(Nm ³ ·°C)	s ——比熵 kcal/(kg·°K)(第1~2章); 管子节距 m
c ——公斤分子比热 kcal/(Kmol·°C)	s ——公斤分子熵 kcal/(kmol·°K)
D ——辐射能在物体中的透射率	T ——绝对温度 °K
d ——含湿量 g/kg(第1章); 直径(d_0 ——外径, d_i ——内径, d_m ——平均直径, d_e ——当量直径)	T_0 ——环境温度 °K
E ——物体的辐射力 kcal/(m ² ·h)(第5章); 活化能 cal/mol(第7章)	T_r ——对比温度
E_{min} ——最小点火能量	t ——摄氏温度 °C
e ——传热有效度 m _j	t_b ——着火温度 °C
F ——表面积 m ²	t_{ld} ——露点 °C
f ——横截面积 m ²	Δt ——温差 °C
G ——流体的质量流量 kg/h	Δt_m ——平均温差 °C
g ——重力加速度 m/s ²	u ——比内能 kcal/kg
g_c ——换算因数 $g_c = 9.81 \text{ kg} \cdot \text{m}/(\text{kgf} \cdot \text{s}^2)$	u^* ——容积内能 kcal/Nm ³
g_i ——质量成分	u ——公斤分子内能 kcal/kmol
H ——湿空气焓 kcal/kg(第1章); 高度 m	V ——流速 m/s(第2章); 容积 m ³
h ——比焓 kcal/kg	v ——比容 m ³ /kg
h^* ——容积焓 kcal/Nm ³	v ——公斤分子容积 m ³ /kmol
h ——公斤分子焓 kcal/kmol	W ——膨胀功 kgf·m
K_c ——定容下化学反应平衡常数	w ——单位质量膨胀功 kgf·m/kg(第2章); 流速 m/s
K_p ——定压下化学反应平衡常数	w_g ——气流平均流速 cm/s
k ——传热系数 kcal/(m ² ·h·°C)(第6章); 化学反应速度常数(第7章)	w_f ——单位质量机械功 kgf·m/kg
L ——辐射层有效厚度 m	w_n ——正常火焰传播速度 cm/s
L^0 ——理论空气量 kg/kg	w_f ——紊流火焰传播速度 cm/s
l ——定形尺寸, 长度 m	x ——干度
M ——分子量	x_i ——公斤分子成分
m ——质量 kg(第1章)	z ——压缩因子(压缩性系数)
N ——传热单元数	Bi ——毕渥数
n ——公斤分子数(第1章); 多变指数(第2章)	Eu ——欧拉数
p ——压力 ata、atm、at	Fo ——傅里叶数
p_i ——分压力 ata、atm	Gr ——葛拉晓夫数
p_r ——对比压力	Nu ——努赛特数
p_s ——饱和压力 ata、atm	Pr ——普朗特数
Q ——热量 kcal(第2章); 热流量 kcal/h(第3~6章)	Re ——雷诺数
Q_{Dw} ——燃料低位发热量 kcal/kg	α ——[对流]放热系数 kcal/(m ² ·h·°C); 过剩空气系数(第7章)
Q_{Gw} ——燃料高位发热量 kcal/kg	α_r ——辐射放热系数 kcal/(m ² ·h·°C)
	α_T ——总放热系数 kcal/(m ² ·h·°C)

6-VII 常用符号表

β ——体[积膨]胀系数 $1/^\circ\text{C}$; 燃料特性系数(第7章)
 γ ——重度(单位体积所受的重力) kgf/m^3
 ε ——黑度(第5章); 制冷系数(第2章)
 e_K ——逆卡诺循环的制冷系数(第2章)
 η ——热效率(第2章); 肋效率(第3章); 动力粘度
 $\text{kgf}\cdot\text{s}/\text{m}^2$
 η_e ——有效热效率
 η_K ——卡诺循环热效率
 η_n ——多变效率
 η_{oi} ——相对内效率
 η_s ——绝热效率
 θ ——剩余温度 $^\circ\text{C}$
 κ ——比热比(第1章); 绝热指数(第2章)
 λ ——导热系数 $\text{kcal}/(\text{m}\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C})$
 ν ——运动粘度 m^2/s
 ρ ——密度 kg/m^3
 τ ——湿球温度 $^\circ\text{C}$ (第1章); 时间 h
 φ ——相对湿度(第1章); 角系数(第5章)
 ω ——偏心因子

上角标

0 ——理想气体的
 $'$ ——饱和液体的
 $''$ ——干饱和蒸汽的

下角标

0 ——标准状态下的(第1章); 黑体的(第5章)
 m ——平均的
 f ——流体的
 w ——壁面的
 max ——最大的
 min ——最小的
 c ——临界的
 s ——饱和的
 p ——定压的

注: 关于使用单位的说明

本篇使用的单位, 参照了国际单位制的规定, 凡物体的量, 皆是指质量(气体以体积表示者除外), 单位为 kg 等。而力的单位仍沿用重力单位制, 即 kgf 等。这样在计算时, 当公式中力(或功)与质量同时出现时, 需引入一个换算因数(数值为重力加速度的标准值):

$$g_0 = 9.80665 \text{ kg}\cdot\text{m}/\text{kgf}\cdot\text{s}^2 \approx 9.81 \text{ kg}\cdot\text{m}/(\text{kgf}\cdot\text{s}^2)$$

目 录

编辑说明

常用符号表

第1章 气体与蒸汽的热力性质

1 基本定义	6-1
2 理想气体的热力性质	6-3
3 实际气体的热力性质	6-7
3.1 实际气体状态方程	6-8
3.2 实际气体热力性质的近似计算 (对比态法)	6-8
3.3 实际气体热力性质的实验值	6-12
4 混合气体的热力性质	6-14
4.1 理想混合气体的热力性质	6-14
4.2 实际混合气体的热力性质	6-16
5 水蒸汽及其热力性质	6-16
5.1 基本定义	6-18
5.2 水蒸汽热力性质图表	6-19
6 湿空气	6-27
6.1 湿空气的热力性质及有关定义	6-27
6.2 湿空气的 $H-d$ 图	6-28

第2章 热力学基本定律及其应用

1 热力学第一定律及其应用	6-29
1.1 静止系与流动系的能量转换关系式	6-29
1.2 可逆过程	6-30
1.3 热力学第一定律的应用	6-30
2 热力学第二定律及其应用	6-35
2.1 卡诺循环及其热经济指标	6-35
2.2 热力学温标和熵	6-35
2.3 热力学第二定律在热力分析中的 应用	6-36

第3章 导 热

1 导热的基本定律	6-38
2 导热系数	6-38
3 稳定导热的实用计算	6-41
4 长杆导热	6-45

5 肋片 (散热片)	6-45
5.1 肋化的目的	6-45
5.2 肋壁的传热	6-45
5.3 肋片的选择	6-47
6 不稳定导热	6-48
6.1 大平壁	6-48
6.2 长圆柱体	6-49
6.3 球体	6-49
6.4 其他简单形状的物体	6-49

第4章 对流放热

1 对流放热概说	6-51
1.1 影响对流放热的因素	6-51
1.2 对流放热的计算	6-51
1.3 对流放热的强化	6-52
2 强制对流放热	6-53
2.1 强制对流的放热计算	6-53
2.2 气体、水、水蒸汽和油类的 热性质表	6-58
3 自然对流放热	6-62
3.1 大空间自然对流放热	6-62
3.2 有限空间自然对流放热	6-65
4 凝结放热	6-65
5 沸腾放热	6-67

第5章 辐射换热

1 物体的辐射性质	6-68
2 固体表面间的辐射换热	6-68
3 遮热板	6-76
4 气体辐射	6-76

第6章 传热与表面式换热器热计算

1 传热过程	6-78
1.1 传热系数	6-78
1.2 平均温差	6-78
1.3 传热过程的强化	6-82
2 表面式换热器的热计算	6-82

6-VI 目 录

2.1 平均温差法	6-83
2.2 传热单元数法	6-83
2.3 污垢热阻	6-85
2.4 传热系数的大致范围	6-86

第 7 章 燃料与燃烧基本概念

1 燃料	6-87
1.1 燃料的成分	6-87
1.2 发热量	6-88
1.3 燃料特性	6-89
2 燃烧计算	6-97
2.1 理论空气量	6-97
2.2 烟气的容积	6-97

2.3 燃料特性系数和理论最大 RO_2 值	6-97
2.4 由烟气分析结果计算过剩空气 系数	6-98
2.5 理论燃烧温度	6-98
3 燃烧基本概念	6-98
3.1 燃烧过程中的主要化学规律	6-98
3.2 燃料的着火	6-99
3.3 气体燃料的燃烧	6-101
3.4 液体燃料的燃烧	6-103
3.5 固体燃料的燃烧	6-104
3.6 点火和火焰稳定	6-105
参考文献	6-106

第1章 气体与蒸汽的热力性质

机电工程的实践里,工质(气体与蒸汽)的热力性质中,经常涉及的是:比容或密度、比热、比热比、比内能、比焓和比熵。

1 基本定义

(1) 比容 v 或密度 ρ 1 公斤工质占有的容积称为比容

$$v = \frac{V}{m}$$

比容的倒数就是密度 $\rho = \frac{1}{v} = \frac{m}{V}$,

在标准状况(压力为 1atm, 温度为 0°C)下的比容称为标准比容 v_0 , v_0 的倒数就是标准密度 ρ_0 。

(2) 状态方程 工质的 p 、 v 、 T 之间的关系式称为状态方程, 即

$$f(p, v, T) = 0$$

气体的状态只取决于两个独立参数, 在规定的压力 p 和温度 T 下, 气体的比容是个定值。

(3) 比热 1 公斤工质温度升高 1°C 所需的热量称为比热。比热的大小与过程有关, 常用的有定压比热 c_p 和定容比热 c_v , 其定义式为

$$c_p = \frac{dq_p}{dT}$$

和

$$c_v = \frac{dq_v}{dT}$$

式中 dq_p ——在定压过程中, 1 公斤工质与外界的微小换热量; dq_v ——在定容过程中, 1 公斤工质与外界的微小换热量; dT ——由 dq_p 或 dq_v 所引起的微小温度变化。

(4) 比热比 κ 定压比热与定容比热之比称为比热比

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v}$$

(5) 比内能 u 1 公斤工质的热运动动能与分子相互作用的位能之和称为比内能。

(6) 比焓 h 1 公斤工质的焓称为比焓, 其

定义式为

$$h = u + A p v$$

式中 A ——功热当量。

(7) 比熵 s 1 公斤工质在可逆过程中的微小换热量 dq 与其温度 T 之比为状态参数比熵 s 的全微分, 即

$$ds = \frac{dq}{T}$$

因而比熵 s 为

$$s = \int \frac{dq}{T} + s_0$$

式中 s_0 ——熵常数。

(8) 临界参数 各种工质在汽、液两相共存时, 随着温度或压力的升高, 汽、液两相的差异将逐渐消失。到某一状态时, 汽、液两相的差异完全消失, 这个特定状态称为临界状态。临界状态下的参数称为临界参数, 这时的温度、压力和比容分别称为临界温度 T_c 、临界压力 p_c 和临界比容 v_c 。

常用气体的 M 、 ρ_0 、 c_{p0} 、 p_c 、 T_c 、临界公斤分子容积 $v_c (= M v_c)$ 、 κ 的数值见表 6.1-1。

由于所采用的单位不同, 单位量气体的热容量、内能、焓、熵的数值也就不同。以焓为例, 用 1 标米³为单位量的焓称为容积焓 h^* , 用 1 公斤分子为单位量的焓称为公斤分子焓 h 。它们之间的换算关系为

$$v_0 h^* = M h = h \quad \text{kcal/kmol} \quad (6.1-1a)$$

或

$$h^* = \rho_0 h \quad \text{kcal/Nm}^3 \quad (6.1-1b)$$

式中 M ——气体的分子量; v_0 ——1 公斤分子气体在标准状况下占有的容积, 可取为 22.4Nm³/kmol; ρ_0 ——气体的标准密度 kg/Nm³。

这种换算关系同样适用于热容量、内能和熵。

以 1 公斤分子为单位量的热容量、内能和熵分别称为公斤分子比热、公斤分子内能和公斤分子熵。

表6-1-1 常用气体的物理-化学常数

气 体	分子式	分 子 量 M	标准沸点 T_b °K	临界压力 p_c atm	临界公斤 分子容积 v_c m ³ /kmol	临界温度 T_c °K	临界压缩 因子 z_c	偏心因子 ω	气体常数 R kgf·m/ (kg·°K)	标准密度 ρ_0 kg/Nm ³	定压比热 c_{p0} kcal/ (kg·°K)	比 热 比 κ_0	导热系数 λ_0 kcal/ (m·h·°K)
氦	He	4.003	4.3	2.26	0.0578	5.3	0.300	≈0	212.0	0.179	1.242	1.66	0.123
氩	Ar	39.944	87.5	48.0	0.0752	151	0.290	-0.002	21.23	1.784	0.124	1.66	0.014
氢	H ₂	2.016	20.4	12.8	0.0650	33.3	0.304	≈0	420.3	0.090	34.00	1.409	0.151
氧	O ₂	32.000	90.0	50.1	0.0744	154.8	0.292	0.102	26.05	1.429	0.217	1.40	0.021
氮	N ₂	28.016	77.3	33.5	0.0901	126.2	0.297	0.040	30.26	1.250	0.248	1.40	0.021
空 气		28.96	78.8	37.17	0.0905	132.5			29.27	1.293	0.240	1.402	0.021
氯	Cl ₂	70.914	238.6	76.1	0.124	417	0.276	0.074	11.97	3.17	0.113	1.340	0.007
一氧化碳	CO	28.011	81.7	34.5	0.0931	133	0.294	0.041	30.28	1.25	0.248	1.40	0.019
二氧化碳	CO ₂	44.011	194.7	72.9	0.0940	304.2	0.274	0.420	19.25	1.977	1.196	1.30	0.012
水蒸汽	H ₂ O	18.016	373.15	218.3	0.056	647	0.230	0.348	17.06	0.804	0.444	1.33	
甲 烷	CH ₄	16.042	111.7	45.8	0.0995	190.7	0.290	0.013	52.90	0.717	0.157	1.319	0.026
乙 烯	C ₂ H ₄	28.052	169.5	50.5	0.124	283.1	0.270	0.073	30.25	1.260	0.352	1.261	0.015
丙 烯	C ₃ H ₆	42.08	225.5	45.4	0.181	365.1	0.274	0.143	20.15	1.915	0.329		0.011
乙 烷	C ₂ H ₆	30.07	184.6	48.2	0.148	305.4	0.285	0.103	25.22	1.356	0.394	1.20	0.016
丙 烷	C ₃ H ₈	44.09	231.1	42.0	0.200	369.9	0.277	0.152	18.74	2.019	0.370	1.150	0.013
正丁烷	n-C ₄ H ₁₀	58.12	272.7	37.5	0.255	425.2	0.274	0.201	14.59	2.703	0.382		0.012
异丁烷	i-C ₄ H ₁₀	58.12	261.5	36.0	0.263	408.1	0.283	0.192	14.59	2.703			
正戊烷	n-C ₅ H ₁₂	72.15	309.3	33.3	0.311	469.5	0.269	0.252	11.75	3.221			0.010
异戊烷	i-C ₅ H ₁₂	72.15	301.0	32.9	0.308	460.4	0.268	0.206	11.75	3.221			

注：1. 其他气体参阅[1]。

2. 表中 z_c 和 ω 详见本章3节，导热系数详见第4章2节。

3. 公斤分子即千克摩尔。

2 理想气体的热力性质

当气体的比容大到足以使气体分子的体积和分子之间的相互作用力可以忽略不计时, 这种气体称为理想气体。理想气体的比热、比内能和比焓仅与温度有关。理想气体是对实际气体的近似描写, 其近似程度与气体的状态及其种类有关。

锅炉、工业炉、内燃机、燃气轮机中的燃烧产物均可作理想气体处理。一些低临界温度的气体(如单原子气体和 N_2 、 H_2 、 O_2 、空气等)在常温下, 即使压力高达 100ata, 一般仍可作理想气体看待, 而水蒸汽和其他蒸汽通常不能作为理想气体处理。某一状态下的气体, 如果难以确定能否按理想气体计算时, 可参阅本章 3.2 节的方法来处理。

(1) 理想气体状态方程

$$pv = RT \quad (6.1-2a)$$

$$p\bar{v} = R\bar{T} \quad (6.1-2b)$$

式中 R ——气体常数, 常用气体的 R 值见表 6.1-1; $\bar{R}$ ——公斤分子气体常数, 它的数值与气体种类无关, 因而也叫通用气体常数。它的数值与所用单位有关(见表 6.1-2)。

表 6.1-2 公斤分子气体常数 $\bar{R}$ 的数值

p	$\bar{v}$	T	$\bar{R}$
kgf/m ²	m ³ /kmol	°K	848kgf·m/(kmol·°K)
atm	m ³ /kmol	°K	0.08206atm·m ³ /(kmol·°K)

(2) 公斤分子比热 一些常用气体的定压公斤分子比热 $\bar{C}_p$ 可由表 6.1-3 至 6.1-5 中查得。

表 6.1-3 空气在理想气体状态下的焓、内能、定压比热和比热比

温 度 t °C	公斤分子内能 u kcal/kmol	比内能 u kcal/kg	公斤分子焓 h kcal/kmol	比焓 h kcal/kg	容积焓 h^* kcal/Nm ³	公斤分子 定压比热 $\bar{C}_p$ kcal/(kmol·°K)	比热比 κ
-50	1100.6	37.69	1543.7	53.29	68.92		
-25	1224.3	41.93	1717.1	59.28	76.66		
0	1348.1	46.17	1890.5	65.26	84.39	6.941	1.401
25	1472.0	50.41	2064.1	71.25	92.15	6.947	1.400
50	1596.1	54.66	2237.9	77.25	99.91	6.959	1.399
75	1720.6	58.93	2411.9	83.26	107.67	6.970	1.398
100	1845.4	63.20	2586.4	89.28	115.46	6.988	1.397
200	2350.0	80.48	3289.6	113.57	146.86	7.086	1.389
300	2866.9	98.18	4005.1	138.25	178.80	7.228	1.379
400	3399.2	116.41	4736.0	163.47	211.43	7.390	1.368
500	3947.8	135.20	5483.2	189.27	244.79	7.555	1.357
600	4512.9	154.55	6246.8	215.23	278.88	7.715	1.347
700	5092.9	174.41	7025.4	242.51	313.63	7.860	1.338
800	5686.7	194.75	7817.9	269.86	349.01	7.990	1.331
900	6292.8	215.51	8622.5	297.64	384.93	8.100	1.325
1000	6909.2	236.62	9437.6	325.77	421.32	8.196	1.320
1100	7534.7	258.04	10261.6	354.21	458.11	8.282	1.315
1200	8168.2	279.73	11093.7	382.94	495.25	8.358	1.312
1300	8809.0	301.68	11932.9	411.91	532.72	8.427	1.308
1400	9456.2	323.84	12778.9	441.11	570.49	8.488	1.305
1500	10109.2	346.21	13630.5	470.50	608.50	8.534	1.303

表6-1-4 常用双原子和三原子气体在理想气体状态下的焓、熵和定压比热

气体 温度 T °K	O ₂					N ₂				
	公斤分子焓 h kcal/kmol	比 h kcal/kg	容积焓 h^* kcal/Nm ³	公斤分子熵 $s_{r,1}$ kcal/(kmol·°K)	公斤分子定压比热 c_p kcal/(kmol·°K)	公斤分子焓 h kcal/kmol	比 h kcal/kg	容积焓 h^* kcal/Nm ³	公斤分子熵 $s_{r,1}$ kcal/(kmol·°K)	公斤分子定压比热 c_p kcal/(kmol·°K)
200	1361.7	675.43	60.790	28.520	6.1759	1389.3	49.589	62.022	42.990	6.957
300	2036.6	1010.2	90.920	31.253	6.8935	2085.1	74.425	93.035	45.809	6.961
400	2731.1	1354.7	121.924	33.250	6.9745	2782.3	99.312	124.210	47.818	6.991
500	3429.6	1701.2	153.107	34.809	6.9929	3484.9	124.390	155.576	49.385	7.070
600	4129.6	2048.4	184.357	36.985	7.0088	4197.9	149.840	187.406	50.685	7.197
700	4831.8	2396.7	215.705	37.167	7.0366	4925.1	175.797	219.871	51.805	7.351
800	5537.4	2746.7	247.205	38.108	7.0803	5668.3	202.324	253.050	52.797	7.512
900	6248.4	3099.4	278.946	38.946	7.1419	6427.5	229.422	286.942	53.692	7.671
1000	6966.5	3455.6	311.004	39.704	7.2194	7201.8	257.061	321.509	54.509	7.816
1100	7692.9	3815.9	343.433	40.395	7.3088	7989.9	285.192	356.682	55.259	7.947
1200	8428.3	4180.7	376.263	41.033	7.4055	8790.4	313.763	392.429	55.955	8.063
1300	9174.2	4550.7	409.563	41.629	7.5115	9601.6	342.719	428.643	56.606	8.165
1400	9930.4	4925.8	443.321	42.190	7.6188	10422.3	372.012	465.281	57.215	8.253
1500	10697.3	5306.2	477.558	42.726	7.7202	11251.3	401.604	502.334	57.786	8.330
1750	12659.9	6279.7	565.174	43.928	7.9686	13370.5	466.704	596.897	59.085	8.486
2000	14679.5	7281.5	655.334	45.005	8.1931	15489.7	552.889	691.504	60.225	8.602

气体 温度 T °K	O ₂					Cl ₂				
	公斤分子焓 h kcal/kmol	比 h kcal/kg	容积焓 h^* kcal/Nm ³	公斤分子熵 $s_{r,1}$ kcal/(kmol·°K)	公斤分子定压比热 c_p kcal/(kmol·°K)	公斤分子焓 h kcal/kmol	比 h kcal/kg	容积焓 h^* kcal/Nm ³	公斤分子熵 $s_{r,1}$ kcal/(kmol·°K)	公斤分子定压比热 c_p kcal/(kmol·°K)
200	1319.6	41.2375	58.911	46.214	6.961	2208.6	31.15	98.598	53.341	8.12
300	2087.6	65.2388	93.196	49.048	7.019	3088.0	43.55	137.857	55.725	8.44
400	2797.8	87.4317	124.902	51.093	7.194	3891.5	54.88	173.728	57.630	8.62
500	3528.9	110.279	157.540	52.723	7.429	4761.0	67.14	212.545	59.613	8.74
600	4284.2	133.880	191.259	54.100	7.670	5639.9	71.07	251.781	60.568	8.82
700	5062.1	158.190	225.987	55.296	7.885	6524.8	92.01	291.286	61.750	8.88
800	5859.8	183.118	261.598	56.364	8.064	7414.2	105.6	330.991	62.798	8.92
900	6673.8	208.556	297.938	57.322	8.212	8309.0	118.4	370.938	63.741	8.96
1000	7501.4	234.419	334.884	58.194	8.335	9207.0	129.8	411.027	64.586	8.99
1100	8340.3	260.634	372.335	58.993	8.440	10107.6	142.5	451.232	65.379	9.02
1200	9188.8	287.150	410.214	59.730	8.530	11009.7	155.3	491.504	66.102	9.04
1300	10045.4	313.919	448.455	60.419	8.608	11914.0	168.0	531.875	66.773	9.06
1400	10909.4	340.920	487.026	61.061	8.676	12822.0	180.8	572.410	67.399	9.08
1500	11780.1	368.128	525.897	61.659	8.739	15098.4	212.9	673.901	68.797	9.12
1750	13984.4	437.011	624.303	63.617	8.888	17380.0	245.1	775.892	70.021	9.16
2000	16223.3	506.977	724.254	64.213	9.030					

(续)

气 体	乙 烷 C_2H_6					丙 烷 C_3H_8					正 丁 烷 $n-C_4H_{10}$				
	公 斤 分 子 量 $\frac{h}{\text{kmol}}$	比 热 $\frac{h}{\text{kcal/kg}}$	容 积 热 $\frac{h^*}{\text{Nm}^3}$	公 斤 分 子 焓 $\frac{s_{T-1}}{\text{kcal/(kmol}\cdot^\circ\text{K})}$	公 斤 分 子 定 压 比 热 $\frac{c_p}{\text{kcal/(kmol}\cdot^\circ\text{K})}$	公 斤 分 子 焓 $\frac{s_{T-1}}{\text{kcal/(kmol}\cdot^\circ\text{K})}$	容 积 热 $\frac{h^*}{\text{Nm}^3}$	比 热 $\frac{h}{\text{kcal/kg}}$	公 斤 分 子 焓 $\frac{s_{T-1}}{\text{kcal/(kmol}\cdot^\circ\text{K})}$	公 斤 分 子 定 压 比 热 $\frac{c_p}{\text{kcal/(kmol}\cdot^\circ\text{K})}$	公 斤 分 子 焓 $\frac{s_{T-1}}{\text{kcal/(kmol}\cdot^\circ\text{K})}$	容 积 热 $\frac{h^*}{\text{Nm}^3}$	比 热 $\frac{h}{\text{kcal/kg}}$	公 斤 分 子 焓 $\frac{s_{T-1}}{\text{kcal/(kmol}\cdot^\circ\text{K})}$	公 斤 分 子 定 压 比 热 $\frac{c_p}{\text{kcal/(kmol}\cdot^\circ\text{K})}$
200	1744	59.00	77.86	50.35	10.17	2006	45.50	89.55	58.44	13.35	2632	45.29	117.5	65.99	20.51 (250°K)
300	2879	95.74	128.5	54.93	12.64	3546	80.43	158.3	64.62	17.66	4689	80.68	209.3	74.28	23.40
400	4296	142.9	191.8	58.98	15.68	5556	126.0	248.0	70.37	22.54	7340	126.3	327.7	81.86	29.60
500	6016	200.6	268.6	62.79	18.66	8040	182.4	358.9	75.89	27.02	10595	182.3	473.0	89.10	35.34
600	8016	268.6	357.9	66.44	21.85	10930	247.9	487.9	81.15	30.88	14376	247.4	641.8	95.97	40.30
700	10280	341.9	456.7	69.93	23.72	14190	321.8	633.5	86.17	34.20	18620	320.4	831.3	102.51	44.55
800	12760	424.3	569.6	73.24	25.83	17760	402.8	792.9	90.94	37.08	23264	400.3	1038.6	108.71	48.23
900	15440	513.5	689.3	76.39	27.69	21600	489.9	964.3	95.47	39.61	28251	486.1	1261.2	114.57	51.44
1000	18280	607.9	816.1	79.39	29.33	25670	582.2	1146.0	99.77	41.83	33540	577.1	1497.3	120.14	54.22
1100	21290	708.0	950.5	82.25	30.77	29950	679.3	1337.1	103.86	43.75	39083	672.5	1744.8	125.43	56.64
1200	24420	812.1	1090.2	84.98	32.02	34420	780.7	1536.6	107.75	45.42	44863	771.9	2002.8	130.47	58.74
1300	27680	920.5	1235.7	87.59	33.11	39030	885.2	1769.2	111.45	46.89	50843	874.8	2269.8	135.25	60.58
1400	31040	1032.3	1385.7	90.08	34.07	43780	993.0	1954.5	114.97	48.16	56994	980.6	2544.4	139.80	62.17
1500	34500	1147.3	1540.2	92.46	34.90	48650	1103.4	2171.9	118.29	49.26	63270	1088.6	2779.9	144.13	63.57

气 体	异 丁 烷 $i-C_4H_{10}$					正 戊 烷 $n-C_5H_{12}$					异 戊 烷 $i-C_5H_{12}$				
	公 斤 分 子 量 $\frac{h}{\text{kmol}}$	比 热 $\frac{h}{\text{kcal/kg}}$	容 积 热 $\frac{h^*}{\text{Nm}^3}$	公 斤 分 子 焓 $\frac{s_{T-1}}{\text{kcal/(kmol}\cdot^\circ\text{K})}$	公 斤 分 子 定 压 比 热 $\frac{c_p}{\text{kcal/(kmol}\cdot^\circ\text{K})}$	公 斤 分 子 焓 $\frac{s_{T-1}}{\text{kcal/(kmol}\cdot^\circ\text{K})}$	容 积 热 $\frac{h^*}{\text{Nm}^3}$	比 热 $\frac{h}{\text{kcal/kg}}$	公 斤 分 子 焓 $\frac{s_{T-1}}{\text{kcal/(kmol}\cdot^\circ\text{K})}$	公 斤 分 子 定 压 比 热 $\frac{c_p}{\text{kcal/(kmol}\cdot^\circ\text{K})}$	公 斤 分 子 焓 $\frac{s_{T-1}}{\text{kcal/(kmol}\cdot^\circ\text{K})}$	容 积 热 $\frac{h^*}{\text{Nm}^3}$	比 热 $\frac{h}{\text{kcal/kg}}$	公 斤 分 子 焓 $\frac{s_{T-1}}{\text{kcal/(kmol}\cdot^\circ\text{K})}$	公 斤 分 子 定 压 比 热 $\frac{c_p}{\text{kcal/(kmol}\cdot^\circ\text{K})}$
200	2304	39.64	102.86	62.50	17.15	3146	43.60	140.45	73.39	25.29 (250°K)	2888	40.03	128.93	72.50	24.52 (250°K)
300	4317	74.28	192.72	70.55	23.25	5682	78.75	253.66	83.59	28.87	5346	74.09	238.66	82.29	28.54
400	6964	119.9	310.89	78.13	29.77	8952	124.1	399.64	92.95	36.53	8596	119.1	383.75	91.56	36.49
500	10250	176.4	457.59	85.45	35.62	12970	179.8	579.02	101.88	43.58	12620	174.9	563.39	100.52	43.71
600	14070	242.1	628.12	92.40	40.62	17628	244.3	786.96	110.34	49.64	17300	239.8	772.32	109.04	49.89
700	18340	315.6	818.75	98.98	44.85	22848	316.7	1020.0	118.38	54.83	22570	312.8	1077.6	117.16	55.19
800	23010	395.9	1027.2	105.21	48.49	28568	396.0	1276.4	126.02	59.30	28300	392.2	1263.4	124.82	59.71
900	28020	482.1	1250.9	111.11	51.65	34695	480.9	1548.9	133.22	63.18	34490	478.0	1539.7	132.09	63.66
1000	33310	573.1	1487.1	116.69	54.40	41190	570.9	1838.8	140.06	66.55	41010	568.4	1830.8	138.97	67.12
1100	38870	668.8	1735.3	121.99	56.81	47993	665.2	2142.5	146.55	69.48	47780	662.2	2133.0	145.51	70.10
1200	44680	768.8	1994.6	127.03	58.89	55092	763.6	2459.5	152.74	72.02	55030	762.7	2456.7	151.73	72.68
1300	50650	871.5	2261.2	131.82	60.71	62413	865.0	2786.3	158.59	74.24	62390	864.7	2785.3	157.64	74.94
1400	56780	976.9	2534.8	136.37	62.27	69944	969.4	3122.5	164.17	76.16	69990	970.1	3124.6	163.27	76.88
1500	63050	1084.8	2814.7	140.67	63.67	77625	1075.9	3465.4	169.47	77.83	77740	1077.5	3470.5	168.61	78.55

注：其他气体可参阅[3]。

表6-1-6 常用气体在理想气体状态下的定压比热与温度的关系式

$$c_p = a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + a_3 T^3 \quad \text{kcal}/(\text{kmol} \cdot ^\circ\text{K})$$

气 体	分 子 式	a_0	$a_1 \times 10^3$	$a_2 \times 10^6$	$a_3 \times 10^9$	温度范围 °K	最大误差 %
空 气		6.713	0.4697	1.147	-0.4696	273~1800	0.72
氢	H ₂	6.952	-0.4576	-0.9563	-0.2079	273~1800	1.01
氧	O ₂	6.085	3.631	-1.209	0.3133	273~1800	1.19
氮	N ₂	6.903	-0.3753	1.930	-6.861	273~1800	0.59
一氧化碳	CO	6.726	0.4001	1.283	-0.5307	273~1800	0.89
二氧化碳	CO ₂	5.316	14.285	-8.362	1.784	273~1800	0.647
水蒸汽	H ₂ O	7.700	0.4594	2.521	-0.8587	273~1800	0.53
乙 烯	C ₂ H ₄	0.985498	37.0262	-19.4768	4.05454	298~1500	0.30
丙 烯	C ₃ H ₆	0.894648	55.8925	-27.4978	5.19139	298~1500	0.44
甲 烷	CH ₄	4.750	12.00	3.030	-2.630	273~1500	1.33
乙 烷	C ₂ H ₆	1.29285	42.5354	-16.5699	2.08148	298~1500	0.70
丙 烷	C ₃ H ₈	-1.008568	73.1499	-37.8885	7.67782	298~1500	0.28
正丁烷	n-C ₄ H ₁₀	-0.585433	93.5864	-48.4829	9.74318	298~1500	0.39
异丁烷	i-C ₄ H ₁₀	-2.1289	100.204	-55.8023	12.1915	298~1500	0.34
正戊烷	n-C ₅ H ₁₂	-0.866195	116.434	-61.6297	22.6705	298~1500	0.35
异戊烷	i-C ₅ H ₁₂	-2.27506	120.972	-65.1891	13.6681	298~1500	0.23

注：其他气体可参阅[4]。

各种气体在理想气体状态下的公斤分子比热也可用下式计算

$$c_p = a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + a_3 T^3 \quad \text{kcal}/(\text{kmol} \cdot ^\circ\text{K}) \quad (6-1-3)$$

$$c_v = c_p - 1.986 \quad \text{kcal}/(\text{kmol} \cdot ^\circ\text{K}) \quad (6-1-4)$$

式中 系数 a_0 、 a_1 、 a_2 、 a_3 见表 6-1-6。在作估算时，单原子气体的 $c_p = 4.97 \text{ kcal}/(\text{kmol} \cdot ^\circ\text{K})$ ，双原子气体的 c_p 可取作 $7 \text{ kcal}/(\text{kmol} \cdot ^\circ\text{K})$ 。

(3) 比热比

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v} = \frac{c_p}{c_p - 1.986} = 1 / \left(1 - \frac{1.986}{c_p} \right) \quad (6-1-5)$$

理想气体的 κ 仅与温度有关，空气的 κ 可从表 6-1-3 中查得。在作估算时，单原子气体的 κ 取 1.67，双原子气体的 κ 取 1.4，三原子和多原子气体的 κ 取 1.29。

(4) 公斤分子焓 计算中所用的焓都是相对于某一给定态（称为起算点）的相对值，因而，随着起算点的不同，焓的数值也就不同。所以，在计算焓差时，必须采用同一起算点的数据。本章（除水蒸汽和湿空气的比焓外）统一采用以 $T = 0^\circ\text{K}$ 为起算点的焓值。常用气体的 h 、 h' 和 h^* 可由表 6-1-3 至 6-1-5 中查得。

(5) 公斤分子内能

$$u = h - Apv = h - 1.986 T \quad \text{kcal}/\text{kmol} \quad (6-1-6)$$

空气的 u 和 u' 可从表 6-1-3 中查得。

(6) 公斤分子熵 取 $T = 0^\circ\text{K}$ ， $p = 1 \text{ atm}$ 时的熵为 0，则温度 $T^\circ\text{K}$ ，压力 $p \text{ atm}$ 时的公斤分子熵 s 为

$$s = c_p \ln T - 1.986 \ln p \quad \text{kcal}/(\text{kmol} \cdot ^\circ\text{K}) \quad (6-1-7)$$

式中 $c_p \ln T$ 是 $p = 1 \text{ atm}$ ，温度 $T^\circ\text{K}$ 时的公斤分子熵，其值见表 6-1-4 至 6-1-5。

3 实际气体的热力性质

实际气体的比热、比热比、比内能和比焓不仅与温度有关，还与压力有关，而且 $\frac{pv}{RT}$ 也不等于 1。实际气体偏离理想气体的程度与气体的 p 、 T 及气体的种类有关。一般说，气体的温度越低，压力越高，两者的偏差越大；在同样的压力 p 和温度 T 下，碳氢（烃类）气体的分子量越大，两者的偏差也越大。

3.1 实际气体状态方程

实际气体的状态方程为

$$p v = z R T \quad (6.1-8)$$

式中 z ——压缩因子 (压缩性系数), 表示实际气体的公斤分子容积与同温同压下理想气体的公斤分子容积之比。理想气体的 $z = 1$, z 值偏离 1 的大小, 表示它与理想气体偏离的程度。

3.2 实际气体热力性质的近似计算 (对比态法)

在引入对比压力 $p_r \left(\frac{p}{p_c} \right)$, 对比温度 $T_r \left(\frac{T}{T_c} \right)$

和对比容积 $v_r \left(\frac{v}{v_c} \right)$ 等三个对比参数后, 气体的状态方程变成通用的对比态方程

$$f(p_r, v_r, T_r) = 0$$

式中不包含与物性有关的常数项。因而, 对比态方程相同的各种气体, 只要它们的任意两个对比参数相同 (即在相同的对比状态下), 第三个对比参数也必然相等。将对比态方程相同的一切气体, 称为彼此热相似的气体。

根据上述对比态原理, 可求得实际气体的压缩因子 z 为

$$z = \frac{p v}{R T} = z_c \frac{p_r v_r}{T_r} = z_c \phi(p_r, T_r)$$

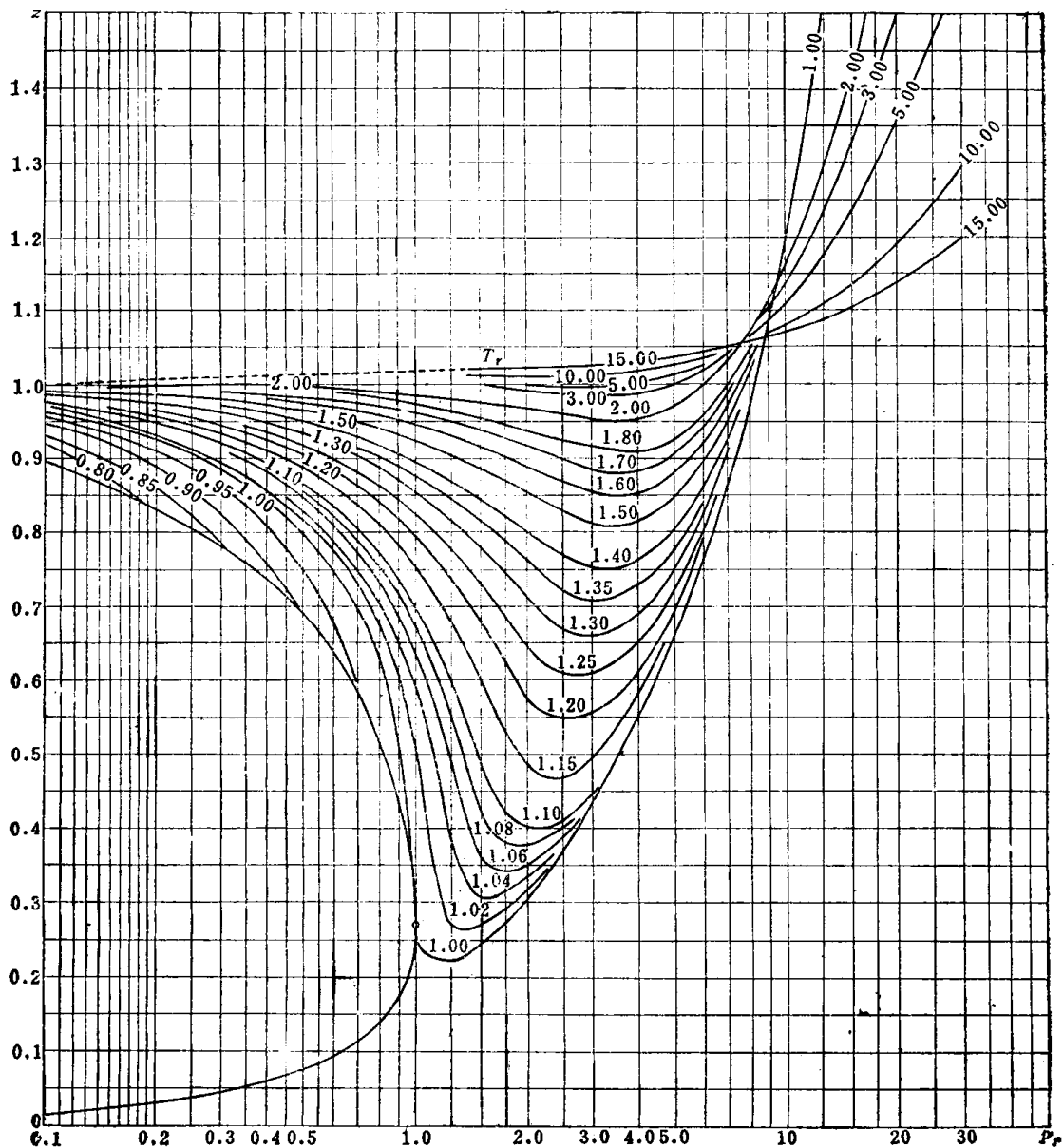


图6-1-1 气体的通用压缩因子 z ($z_c = 0.27$)