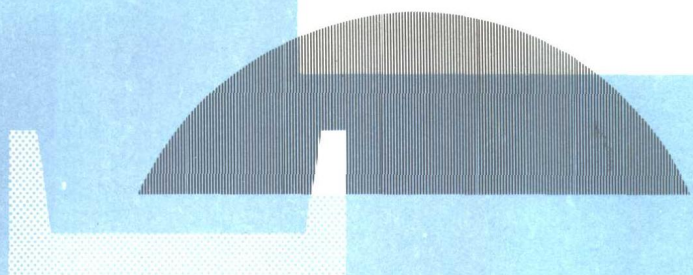


高等学校推荐教材



燃气制造 工艺学

高福焯 主编

6
● 中国建筑工业出版社





燃气制造 工艺学

主编 王明

中国石化出版社



高等学校推荐教材

燃气制造工艺学

高福焯 主编

中国建筑工业出版社

本书是高等工科院校城市燃气工程专业教材。

全书共分5篇24章。内容包括燃气基本物理化学性质,制气原料,干馏煤气、气化煤气、油制气及生物气的制造、净化基本理论、工艺技术及设备,天然气开采及净化技术,液化石油气的提取及矿井气来源等。

本书也可供从事城市或工业企业煤气、油制气、天然气、液化石油气、沼气制造及净化的设计、科研以及生产管理的工程技术人员参考。

高等学校推荐教材

燃气制造工艺学

高福焯 主编

*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店总店科技发行所发行

北京市兴顺印刷厂印刷

*

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 23 字数: 560千字

1995年6月第一版 2000年6月第二次印刷

印数: 2,901—4,400册 定价: 23.40元

ISBN 7-112-02434-X

TU·1873 (7492)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题,可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

本书是根据城市燃气工程专业“燃气制造工艺学”的教学基本要求编写的，使用学时数为84学时。

本书主要包括燃气基本物理化学性质，制气原料，干馏煤气、气化煤气、油制气及生物气的制造及净化工艺技术，天然气开采及净化技术，液化石油气提取和矿井气的来源等。着重论述了干馏煤气、气化煤气及油制气制造有关的基本理论、生产工艺及设备，以及燃气净化的基本理论和各种净化工艺及设备。

本书内容结合我国燃气制造工业的生产实际，并吸收了国外近年来开发的燃气制造技术及科研成果。

参加本书编写的有高福焯、魏敦崧、金昆、曹兴华，由高福焯任主编，闻望主审。

本书是城市燃气工程专业用书，亦可供城建、机械、冶金、化工、煤炭、石油及轻工等部门有关工程技术人员参考。

目 录

绪论	1
----------	---

第一篇 燃气性质及制气原料

第一章 燃气的性质	3
第一节 燃气的物理化学性质	3
第二节 燃气的热力学性质及燃烧特性	17
第三节 燃气的分类	21
第二章 制气用煤	24
第一节 煤的种类及生成	24
第二节 煤的工业分析	26
第三节 煤的有机组成和无机组成	29
第四节 煤的岩相组成及性质	32
第五节 煤的特性与分类	35

第二篇 干馏煤气的制造

第一章 煤干馏的理论基础	42
第一节 煤在干馏过程中的结构变化	42
第二节 煤的结焦机理	43
第三节 煤在炭化室内的结焦过程	50
第四节 煤气的形成及二次热解的化学反应特征	52
第二章 焦炉用煤准备	56
第一节 煤料的配制	56
第二节 原料煤的接受与储存	62
第三节 备煤工艺流程	65
第四节 煤的粉碎	66
第五节 煤的配合管理	67
第三章 焦炉及其附属设备	70
第一节 焦炉的基本结构	70
第二节 我国焦炉的类型	77
第三节 焦炉主要附属装置及焦炉机械	85
第四章 焦炉热工	89
第一节 焦炉的流体力学	89
第二节 焦炉传热	96
第三节 焦炉的热平衡及热工评价	102
第五章 焦炉操作	108

第一节	焦炉的压力制度和温度制度	103
第二节	装煤与推焦	110
第三节	熄焦与筛焦	113
第六章	连续式直立炭化炉煤气的生产	117
第一节	对原料的要求	117
第二节	连续式直立炭化炉结构	118
第三节	连续式直立炭化炉的操作	126

第三篇 煤 气 净 化

第一章	煤气冷凝鼓风	132
第一节	煤气冷凝和冷却	132
第二节	焦炉煤气输送与焦油雾的清除	139
第二章	氨的脱除及回收	144
第一节	硫酸铵的生产	144
第二节	其它的氨生产方法	150
第三章	萘的脱除与苯的回收	156
第一节	煤气的最终冷却及洗萘	156
第二节	粗苯的回收及制取	158
第三节	煤气的最终洗萘	170
第四章	硫化氢及二氧化碳的脱除	171
第一节	干法脱硫	171
第二节	湿法脱硫	174
第三节	高温脱硫	189
第四节	二氧化碳的脱除	191
第五章	天然气的净化	193
第一节	天然气脱油	193
第二节	天然气脱水	198

第四篇 气化煤气的制造

第一章	气化过程的物理化学基础	206
第一节	气化的基本反应	206
第二节	气化反应的化学平衡	207
第三节	气化反应动力学基础	212
第二章	发生炉煤气	224
第一节	制气原理	224
第二节	气化过程的指标及其影响因素	226
第三节	煤气化过程各项指标的计算	228
第四节	煤气发生炉及发生站	233
第三章	水煤气	239
第一节	制气原理	239
第二节	间歇法水煤气生产	240

第三节 水煤气发生炉及水煤气站流程	245
第四章 移动床加压气化	249
第一节 加压气化基本原理	249
第二节 操作条件对加压气化的影响	253
第三节 加压气化过程的指标及计算	257
第四节 固态排渣和液态排渣的加压气化法	264
第五章 流化床气化	270
第一节 流态化现象	270
第二节 流化床气化过程及特点	271
第三节 影响流化床气化的因素	273
第四节 流化床气化方法	275
第六章 气流床气化	282
第一节 气流床气化基本原理及特点	282
第二节 气化炉结构对气流床气化的影响	283
第三节 气流床气化方法	283
第七章 其它气化方法	289
第一节 移动床两段炉气化法	289
第二节 熔融床气化法	293
第三节 催化气化法	297
第四节 回转窑气化法	298
第五节 地下气化	300
第六节 煤气的改制	302

第五篇 其它燃气的制造

第一章 油制燃气	312
第一节 原料	312
第二节 油制燃气的方法及其原理	316
第三节 油制燃气的生产工艺	324
第二章 液化石油气	333
第一节 液化石油气的来源	333
第二节 液化石油气的提取	334
第三章 天然气	338
第一节 天然气的生成	338
第二节 天然气开采的基本过程	339
第三节 气田的井场流程和集输流程	342
第四章 生物气及矿井气	346
第一节 生物气	346
第二节 矿井气和煤层气	351
附录	353
主要参考文献	362

绪 论

“燃气制造工艺学”是一门系统地叙述气体燃料的制造、开采及加工净化等内容的课程。通过本课程学习，能系统掌握干馏煤气、气化煤气、油制燃气等制气及净化的原理、工艺过程和设备，了解天然气开采工艺过程和液化石油气的提取以及其它燃气的来源。

一、燃气工业发展简史

(一) 我国燃气工业发展概况

我国利用气体燃料有着悠久的历史。早在西周时期，已有发现天然气的记载，西周《周易》中说：“象曰‘泽中有火’”，《华阳国志》对利用天然气的情况进行了详细的描述：“临邛县郡西南二百里，……有火井，夜时光映上昭，民欲其火，先以家火投之，顷许，如雷声，火焰出，通跃数十里，以竹筒盛其光藏之，所拽行终日不灭也。井有二水，取井火煮之，一斛水得五斗盐，家火煮之，得无儿也”。《天工开物》中记载：“四川有火井，事甚奇，其中居然冷水，绝无火气，但以长竹剖开，去节、合缝、漆布，一头插入井底，其上曲接，以口对釜脐，注水釜中，见火意烘烘，水即滚沸”。

人工燃气在我国的历史较短，1865年在上海建造了我国第一座煤制气工厂，日负荷只有 850m^3 。到1949年为止，全国只有九个城市有城市燃气厂。

1950年后，首先对原有的煤气工业进行改造和扩建。接着，在冶金工业带动下，焦化工业有很大发展，从而促进了用焦炉煤气为气源的煤气事业的发展。同时，在冶金、机械、化工、轻工及建材等工业中，建造了大量发生炉及水煤气炉，制造气化煤气供作燃料气及化工原料气。随着石油化学工业的发展，从1965年起使用油制燃气及液化石油气作为城市燃气气源。自从天然气引入我国城市以来，在城市燃气化、改变城市燃料结构方面显示了巨大的优越性。

自1978年以来，我国城市燃气制造工业有了很大发展，制气技术水平也有了很大提高，气源领域不断拓宽。目前国内正在运行的气源类型有干馏煤气、气化煤气、油制燃气、液化石油气、天然气、矿井气、生物气及其它化工尾气等多种，燃气供应量及城市气化率有很大提高。

(二) 国外燃气工业发展概况

各国的燃气工业发展情况，大体上经历从煤制气为主阶段，发展到油制燃气为主或煤、油制气混合应用阶段，随后发展到天然气为主的阶段。

煤制气是十八世纪末才开始被制造和利用，1812年英国建成了世界上第一座煤制气工厂。煤气最初用于照明，直到1855年由于本生发明了引射式燃烧器，煤气才在人民生活 and 工业窑炉中获得广泛应用。

20世纪以来，由于煤在世界各国燃料构成中的比重不断下降，石油和天然气的比重不断上升，因而进行了用油作为制气原料来制造燃气的研究及生产。由于油制气比煤制气的投资及生产成本低，从而促使了燃气工业的飞速发展。

本世纪60年代以来，天然气在世界燃料构成中所占的比重越来越大，已成为各工业发达国家城市燃气的主要气源。随着天然气的需求量及开采量不断增长，其后备储量不断减少。为了保持燃气工业的不断发展，近年来各工业发达国家又转而对煤的气化技术进行了大量研究，开发出了多种新的煤气化技术。但是，目前采用新的煤制气技术所得的煤气在成本上还难与天然气、油制气进行竞争。因此，新的煤制气技术主要是作为技术储备。

二、燃气工业在国民经济中的作用

燃气作为能源的一个组成部分，是发展国民经济和改善人民生活的重要物质基础，它与固体燃料及液体燃料相比，具有巨大的优越性。首先，有利于提高热效率、节约能源。表1给出了几种燃料燃烧热效率的比较情况。

几种燃料燃烧热效率比较表(%)

表 1

燃料种类 燃料用途	煤	油	燃 气
居 民 灶	15~20	~40	55~65
公用事业炉灶	15~20	~30	55~65
一般锅炉	>70	>60	70~80
电厂锅炉	80~90	85~95	~90

其次，采用气体燃料有利于保护大气环境。煤炭燃烧所排放出的大量二氧化硫、尘粒、氮氧化物、一氧化碳等有害组分不仅严重污染人类赖以生存的大气环境，危害人类的健康与生命，而且危害工业生产，影响城市的树木生长和交通运输，严重腐蚀城市中的金属结构物，从而对国民经济造成严重损失。而采用低污染的气体燃料，可以大大减少对环境的污染，有利于改善城市居民的生活条件和延长金属结构物的使用寿命。

用气体燃料代替其它矿物燃料，可以提高工业产品的质量和产量，有利于生产自动化，并可降低工人的劳动强度提高劳动生产率。

由于气体燃料可用管道输送，因此，在很大程度上减轻了城市的交通运输压力。

此外，在人工燃气制造过程中，能回收多种化工产品，达到把燃料综合利用的目的。

由此可见，积极发展城市燃气工业对国民经济具有十分重要的意义。

第一篇 燃气性质与制气原料

第一章 燃 气 的 性 质

第一节 燃气的物理化学性质

一、燃气的组成

燃气是多种单一气体组成的混合气体。由于生产燃气所用的原料及生产工艺不同,各种燃气的组成也不相同。它主要由低级烃(甲烷、乙烷、丙烷、丁烷、乙烯、丙烯、丁烯)、氢气和一氧化碳等可燃组分,二氧化碳、氮气和氧气等不可燃组分,以及氨、硫化物、氰化物、水蒸气、焦油、萘和灰尘等杂质所组成。

组成燃气的各单一气体在标准状态下的物理化学特性及各种燃气的组成分别见附表1和附表2。

燃气的组成可用质量分率、容积分率及摩尔分率来表示:

(一) 质量分率 燃气中各单一组分的质量与燃气总质量的比值称为质量分率。即:

$$g_i = \frac{m_i}{m}$$

式中 g_i ——燃气中第 i 组分的质量分率;

m_i ——燃气中第 i 组分的质量 (kg);

m ——燃气总质量 (kg)。

显然

$$m = \sum_{i=1}^n m_i$$

$$\sum_{i=1}^n g_i = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{m} = 1 \quad (1-1-1)$$

(二) 容积分率 在相同温度、压力条件下,燃气中各单一组分的容积与燃气总容积的比值称为容积分率。即:

$$\gamma_i = \frac{V_i}{V} \quad (1-1-2)$$

式中 γ_i ——燃气中第 i 组分的容积分率;

V_i ——燃气中第 i 组分的分容积 (m^3) ;

V ——燃气的总容积 (m^3) 。

显然

$$V = \sum_{i=1}^n V_i$$
$$\sum_{i=1}^n \gamma_i = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{V} = 1 \quad (1-1-3)$$

(三) 摩尔分率 燃气中各单一组分的摩尔数与燃气总摩尔数的比值称为摩尔分率。

即,

$$y_i = \frac{n_i}{n} \quad (1-1-4)$$

式中 y_i ——燃气中第 i 组分的摩尔分率;

n_i ——燃气中第 i 组分的摩尔数;

n ——燃气的总摩尔数。

显然

$$n = \sum_{i=1}^n n_i$$
$$\sum_{i=1}^n y_i = \frac{\sum_{i=1}^n n_i}{n} = 1 \quad (1-1-4)$$

二、燃气的平均分子量和平均气体常数

由于燃气是多种气体的混合物, 所以它不能用一个分子式来表示, 严格地说, 它没有真正的分子量。为计算方便起见, 将燃气的总质量与燃气的摩尔数之比称为燃气的平均分子量。

即

$$M = \frac{m}{n} \quad (1-1-5)$$

式中 M ——燃气的平均分子量;

m ——燃气的总质量 (kg);

n ——燃气的总摩尔数 (kmol) 。

根据燃气的平均分子量, 可按下式计算燃气的平均气体状态常数 R ;

$$R = \frac{R_0}{M} \quad (1-1-6)$$

各单质气体的分子量与气体常数列于附表2。可通过各组分的摩尔分率或质量分率计算燃气的平均分子量与平均气体常数。

1. 利用各组分摩尔分率计算

根据质量守恒定律:

$$m = \sum_{i=1}^n m_i \quad (1-1-7)$$

将 (1-1-5) 式代入上式

则得:

$$nM = \sum_{i=1}^n n_i M_i$$

$$M = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{n} M_i$$

$$M = \sum_{i=1}^n y_i M_i \quad (1-1-8)$$

上式说明：燃气的平均分子量，等于各组分的分子量与其摩尔分率乘积的总和。

2. 利用各组分质量分率计算

根据各组分的分压可写出第 i 组分的气体状态方程式：

$$p_i V = m_i R_i T$$

因为：

$$\sum_{i=1}^n p_i V = PV = \sum_{i=1}^n m_i R_i T = m R T$$

所以

$$R = \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{m} R_i$$

$$R = \sum_{i=1}^n g_i R_i \quad (1-1-9)$$

上式说明：燃气的平均气体常数可用各组分的分压常数与其质量分率乘积之总和求得。

根据 (1-1-6) 式可写成：

$$R_i = \frac{R_0}{M_i}$$

将上式代入式 (1-1-9) 式：

$$R = \sum_{i=1}^n g_i \frac{R_0}{M_i} = R_0 \sum_{i=1}^n \frac{g_i}{M_i}$$

因为

$$M = \frac{R_0}{R}$$

所以

$$M = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{g_i}{M_i}} \quad (1-1-10)$$

上式说明：燃气平均分子量可用各组分质量分率与其分子量之商总和的倒数求得。

三、燃气的平均密度、比容和相对密度

(一) 燃气平均密度

单位容积的燃气所具有的质量称为燃气平均密度，其单位为 kg/m^3 或 kg/Nm^3 。燃气平均密度可用下式计算：

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-1-11)$$

或

$$\rho = \frac{M}{V_M} \quad (1-1-12)$$

式中 ρ ——燃气平均密度 (kg/m^3)；

m ——燃气总质量 (kg)；

V ——燃气的容积 (m^3)；

V_M ——燃气的平均摩尔容积 (Nm^3/kmol) ;

M ——燃气的平均摩尔质量 (kg/kmol) 。

其数值与燃气平均分子量相当。

如果燃气全由双原子气体和甲烷组成,标准状态(温度为 273.15°K , 压力为 $1.01325 \times 10^5 \text{Pa}$) 下的 V_M 可取 $22.4 \text{Nm}^3/\text{kmol}$; 如果燃气全由多原子气体组成,标准状态下的 V_M 可取 $22.0 \text{Nm}^3/\text{kmol}$; 如果燃气由两种气体组成或欲精确计算时,可按下式计算:

$$V_M = \sum_{i=1}^n y_i V_{M_i} \quad (1-1-13)$$

将(1-1-12)式及(1-1-8)式代入(1-1-13)式

则得:

$$\rho V_M = \sum_{i=1}^n y_i \rho_i V_{M_i}$$

若各组分均为双原子或均为多原子,则 $V_M = V_{M_i}$,

故

$$\rho = \sum_{i=1}^n y_i \rho_i \quad (1-1-14)$$

上式说明:燃气平均密度可用各组分的密度与其摩尔分率乘积的总和求得。各组分的密度可在附表2中查得。

根据分容定律,

$$V = \sum_{i=1}^n V_i$$

将(1-1-11)式代入上式,

则

$$\frac{m}{\rho} = \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{\rho_i}$$
$$\rho = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\rho_i}} \quad (1-1-15)$$

上式说明:燃气平均密度可用各组分的质量分率与其密度之商总和的倒数求得。

根据阿伏加德罗(Avogadro)定律,在相同温度、相同压力条件下,气体的密度与分子量成正比,

$$\frac{\rho}{\rho_i} = \frac{M}{M_i} \quad (1-1-16)$$

(二) 燃气的比容

单位质量燃气所具有的容积称为比容,即:

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

式中 v ——燃气的比容 (m^3/kg 或 Nm^3/kg)。

与燃气平均密度定义相比较,很明显,燃气的比容与平均密度之间存在以下关系:

$$\rho v = 1$$

上式说明:燃气的比容和密度互为倒数,故可用密度计算结果求得燃气的比容。

(三) 燃气相对密度

燃气平均密度与相同状态下的空气平均密度之比值称为燃气相对密度。通常用标准状态数值进行计算：

$$S = \frac{\rho_0}{1.2931} \quad (1-1-17)$$

式中 S ——燃气的相对密度；

ρ_0 ——标准状态下的燃气平均密度 (kg/Nm^3)；

1.2931 ——标准状态下的空气平均密度 (kg/Nm^3)。

上式也可写成：

$$S = \frac{M}{1.2931 V_M}$$

式中 M ——燃气平均分子量 (即平均摩尔质量, kg/kmol)；

V_M ——标准状态下燃气的摩尔容积 (Nm^3/kmol)。

通常气态的液化石油气相对密度大于1。

四、燃气各组分表示方法之间的换算

在工程上经常要对燃气各组分分率之间进行换算。

若已知摩尔分率换算为容积分率可按下式进行：

$$\gamma_i = \frac{V_i}{V} = \frac{n_i V_{M_i}}{n \cdot V_M}$$

由阿伏加德罗定律可知，在同温度同压力下任何理想气体的摩尔容积相等，即

$$V_M = V_{M_i}$$

所以

$$\gamma_i = \frac{n_i}{n} = y_i \quad (1-1-18)$$

上式说明：燃气的容积分率与摩尔分率在数值上相等。

若已知质量分率换算成容积分率可按下式进行：

$$\gamma_i = \frac{V_i}{V} = \frac{m_i \rho}{m \cdot \rho_i} = g_i \frac{\rho}{\rho_i}$$

因为

$$\frac{\rho}{\rho_i} = \frac{M}{M_i}$$

所以

$$\gamma_i = y_i = g_i \frac{M}{M_i} \quad (1-1-19)$$

上式说明：燃气的某组分之摩尔（容积）分率与其质量分率成正比，其比例常数为燃气平均分子量与该组分分子量之商。

根据气体状态方程，在同温同压下气体的密度与其气体常数成反比，即：

$$\frac{\rho}{\rho_i} = \frac{R_i}{R}$$

则

$$\gamma_i = y_i = g_i \frac{R_i}{R} \quad (1-1-20)$$

五、临界参数

当温度不超过某一数值，对气体进行加压可以使气体液化，而在该温度以上，无论施

加多大压力都不能使之液化，这个温度就称为该气体的临界温度；在临界温度下，使气体液化所需的压力称为临界压力；此时的比容称为临界比容；上述参数统称为临界参数。

临界参数是气体的重要物性数据，一些单一气体的临界参数列于附表2。

气体临界温度越高，越易液化。由于组成天然气的主要成分甲烷的临界温度低，故天然气较难液化；而组成液化石油气的碳氢化合物的临界温度较高，故较易液化。几种单一气体的气—液平衡曲线示于图1-1-1。图中曲线是蒸汽和液体的分界线，曲线左侧为液态，右侧为气态。由图可知，丙烷、丁烷临界温度较高，在20℃时它们液化所需的压力分别为0.85MPa和0.2MPa，而甲烷则因临界温度低，在该温度下液化所需要的压力要大得多。

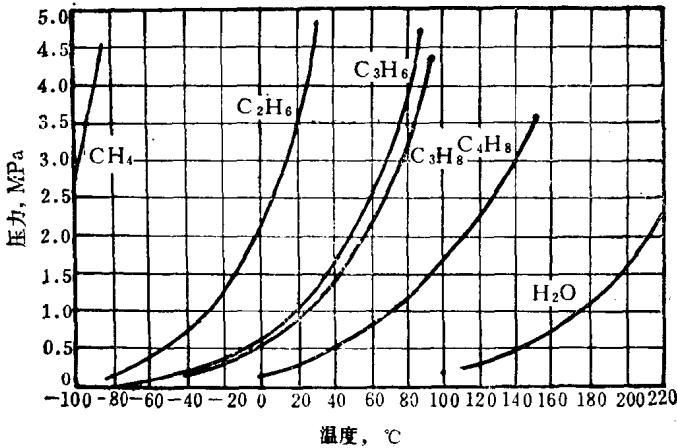


图 1-1-1 几种单一气体的气—液平衡曲线

燃气的平均临界温度与平均临界压力，在工程上可按式计算：

$$T_{cm} = \sum_{i=1}^n y_i T_{ci} \quad (1-1-21)$$

$$P_{cm} = \sum_{i=1}^n y_i P_{ci} \quad (1-1-22)$$

式中 T_{cm} ——燃气的平均临界温度 (K)；
 P_{cm} ——燃气的平均临界压力 (MPa)；
 T_{ci} ——燃气中第 i 组分的临界温度 (K)；
 P_{ci} ——燃气中第 i 组分的临界压力 (MPa)。

六、实际气体状态方程

当燃气压力低于1MPa和温度在0℃以上时，在工程上可以当作理想气体计算。当压力超过1MPa、温度很低时，用理想气体状态方程进行计算所引起的误差将很大。在实际工程计算时，常用理想气体状态方程式进行修正的办法，引入压缩系数（压缩因子） Z ，得出下述实际气体状态方程：

$$Pv = ZRT \quad (1-1-23)$$

压缩系数 Z 随着温度、压力而变化。 Z 值偏离1的大小就表示该气体偏离理想气体的程度。 Z 值可以根据对比态定律求得，或由对比温度和对比压力制作的曲线（见图1-1-2）查得。

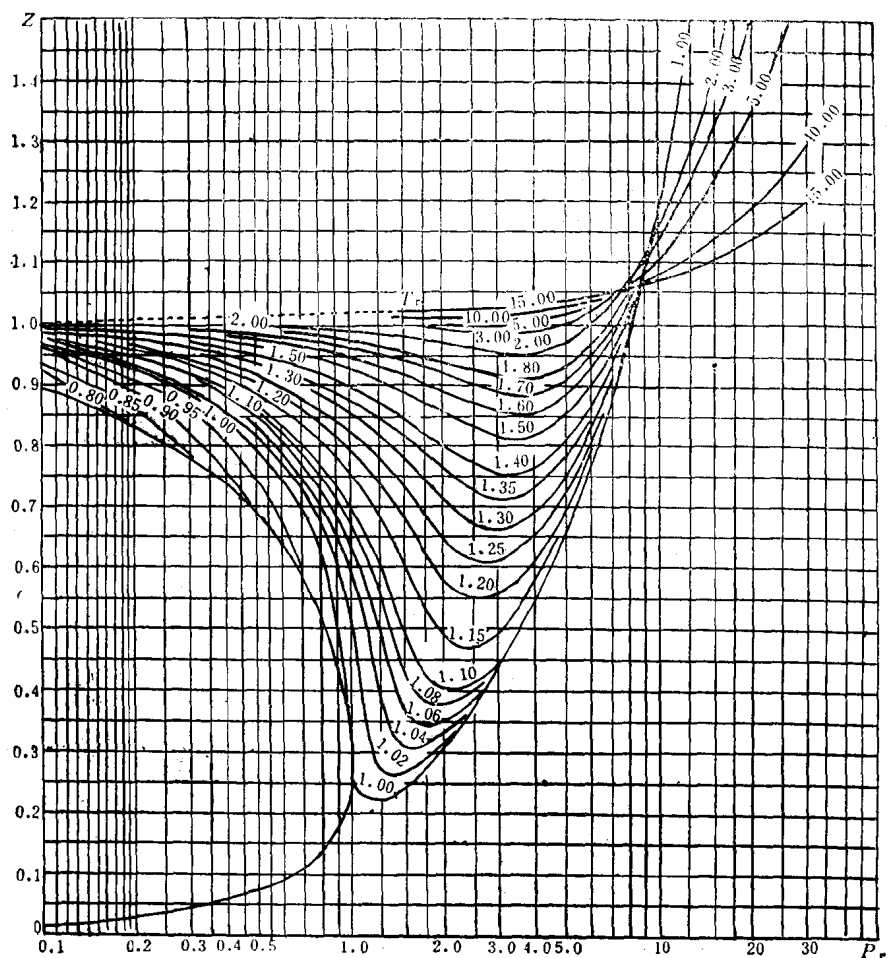


图 1-1-2 气体的通用压缩系数 $Z (Z_c = 0.27)$

对比温度 T_r 是指工作温度 T 与临界温度 T_c 的比值；对比压力 P_r 是指工作压力 P 与临界压力 P_c 的比值。即：

$$T_r = \frac{T}{T_c} \quad (1-1-24)$$

$$P_r = \frac{P}{P_c} \quad (1-1-25)$$

对于 1kmol 的实际气体，其状态方程为：

$$Pv_M = ZR_0T$$

对于临界状态时，其实际状态方程为：

$$P_c v_c = Z_c R_0 T_c$$

式中 Z_c ——临界压缩系数。

两式相比

$$\frac{Pv_M}{P_c v_c} = \frac{ZT}{Z_c T_c}$$