



世纪高等教育建筑环境与能源应用工程系列规划教材

燃气气源

崔永章 史永征 陈彬剑 编著



013066699

TH138-43
04

21 世纪高等教育建筑环境与能源应用工程系列规划教材

燃气气源

崔永章 史永征 陈彬剑 编著
刘 蓉 刘 燕 主审



机械工业出版社



北航

C1674637

TH138-43

04

0000000000

本书是高等工科院校建筑环境与能源应用工程、新能源科学与工程专业教材。

全书分为8章,内容包括:燃气性质与分类、天然气、压缩天然气、液化天然气、干馏煤气、气化煤气、液化石油气、其他燃气。

本书重点介绍天然气开采、净化、压缩、液化等生产工艺,并介绍了页岩气、可燃冰、生物质气等新兴气源。

本书还可供从事城市或工业企业燃气、天然气、液化石油气和农村沼工程的设计、科研和运行管理的工程技术人员参考。

崔永章 史永征 陈彬剑 编著
审主 燕 改 蓉 改

图书在版编目(CIP)数据

燃气气源/崔永章,史永征,陈彬剑编著. —北京:机械工业出版社,2013.7

21世纪高等教育建筑环境与能源应用工程系列规划教材

ISBN 978-7-111-43022-3

I. ①燃… II. ①崔…②史…③陈… III. ①燃气气源—高等学校—教材
IV. ①TH138.23

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第136302号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:刘涛 责任编辑:刘涛 孙阳

版式设计:常天培 责任校对:申春香

封面设计:路恩中 责任印制:李洋

北京瑞德印刷有限公司印刷(三河市胜利装订厂装订)

2013年9月第1版第1次印刷

184mm×260mm·18.5印张·457千字

标准书号:ISBN 978-7-111-43022-3

定价:38.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

前言

本书是根据建筑环境与能源应用工程、新能源科学与工程专业的“城市燃气气源”的教学基本要求编写的，使用学时为48（供参考）。

本书主要内容包括燃气性质与分类，天然气、压缩天然气、液化天然气、干馏煤气、气化煤气、液化石油气及其他燃气的来源、性质、工艺及设备。考虑到城市燃气已经基本转向天然气和液化石油气，尤其是天然气事业取得飞速发展，作者在总结多年教学和科研经验的基础上，在书中着重介绍了天然气开采、净化、压缩、液化等生产工艺，以及页岩气、可燃冰、生物质气等新兴气源。

参加本书编写的有：山东建筑大学崔永章、陈彬剑，北京建筑大学史永征。其中，第一章、第七章由陈彬剑编写，第二章、第三章、第四章、第八章由崔永章编写，第五章、第六章由史永征编写。全书由崔永章统稿，北京建筑大学刘蓉、北京市燃气集团刘燕担任主审。

本书引用了许多资料（数据、图表、例题等），在此谨向有关文献的作者表示衷心的感谢！

由于编者水平所限，书中错误和不妥之处，敬请专家和读者批评指正，编者不胜感激。

编者

目录

前言		第三节 焦炉及其附属设备	145
第一章 燃气性质与分类	1	第四节 直立炭化炉煤气生产	159
第一节 燃气物理性质	1	第五节 干馏煤气净化	162
第二节 燃气热力性质	11	第六章 气化煤气	185
第三节 燃气分类	16	第一节 气化过程的物理-化学基础	185
第四节 燃气质量要求	19	第二节 发生炉煤气	190
第二章 天然气	22	第三节 水煤气	197
第一节 天然气开采与集输	22	第四节 移动床加压气化煤气	204
第二节 天然气预处理	33	第五节 流化床气化煤气	212
第三节 天然气凝液回收	35	第六节 气流床气化煤气	220
第四节 天然气脱硫脱碳	38	第七节 煤气精制	228
第五节 天然气脱水	41	第八节 煤的地下气化	236
第六节 天然气长输管线	58	第七章 液化石油气	242
第七节 天然气储存	63	第一节 液化石油气来源与特性	242
第三章 压缩天然气	69	第二节 液化石油气运输	244
第一节 压缩天然气加压站	70	第三节 液化石油气储存	247
第二节 压缩天然气汽车加气站	86	第四节 液化石油气储配站	248
第三节 压缩天然气供应站	89	第五节 液化石油气供应	255
第四章 液化天然气	94	第八章 其他燃气	266
第一节 液化天然气的物理性质	95	第一节 油制燃气	267
第二节 液化天然气的生产	98	第二节 煤层气和矿井气	268
第三节 液化天然气的接收	105	第三节 页岩气	270
第四节 液化天然气的储存与运输	107	第四节 可燃冰	271
第五节 液化天然气供气站	118	第五节 沼气	273
第六节 液化天然气汽车加气站	125	第六节 生物质气化	278
第七节 液化天然气冷量利用	129	第七节 二甲醚	281
第五章 干馏煤气	134	附录	285
第一节 制气用煤	134	参考文献	291
第二节 煤干馏理论基础	141		

第一章

燃气性质与分类

第一节 燃气物理性质

一、燃气组成及其表示方法

燃气是指可以作为燃料的气体。城镇燃气是指符合一定质量要求，供给居民生活、商业（公共建筑）和工业企业生产作燃料用的公用性质的气体。

燃气通常为多组分的混合物，具有易燃、易爆的特性。

燃气中可燃组分包括氢气、一氧化碳、甲烷及碳氢化合物等，不可燃组分包括二氧化碳、氮气等惰性气体，部分燃气中还含有氧气、水、少量杂质及有毒物质。

单一气体在标准状态下的主要特性列于附录 A 中。

1. 体积分数

体积分数是指同温同压条件下，燃气中单一组分的体积与燃气的总体积之比，即

$$r_i = V_i / V \quad (1-1)$$

式中 r_i ——燃气中 i 组分的体积分数，%；

V_i ——燃气中 i 组分的分体积， m^3 ；

V ——燃气的总体积， m^3 。

燃气的总体积等于各单一组分的分体积之和，即 $V = V_1 + V_2 + \cdots + V_n$ ，因此

$$r_1 + r_2 + \cdots + r_n = \sum r_i = 1 \quad (1-2)$$

2. 质量分数

质量分数是指燃气中单一组分的质量与燃气的总质量之比，即

$$g_i = G_i / G \quad (1-3)$$

式中 g_i ——燃气中 i 组分的质量分数，%；

G_i ——燃气中 i 组分的质量，kg；

G ——燃气的总质量，kg。

燃气的总质量等于各组分的质量之和，即 $G = G_1 + G_2 + \cdots + G_n$ ，因此

$$g_1 + g_2 + \cdots + g_n = \sum g_i = 1 \quad (1-4)$$

3. 摩尔分数

摩尔分数是指燃气中单一组分的物质的量与燃气的总物质的量之比，即

$$n_i = N_i/N \quad (1-5)$$

式中 n_i ——燃气中 i 组分的摩尔分数, %;

N_i ——燃气中 i 组分的物质的量, mol;

N ——燃气的总物质的量, mol。

燃气的总物质的量等于各组分的物质的量之和, 即 $N = N_1 + N_2 + \cdots + N_n$, 因此

$$n_1 + n_2 + \cdots + n_n = \sum n_i = 1 \quad (1-6)$$

由于在同温同压下, 1mol 任何气体的体积相等, 因此, 气体的摩尔分数等于其体积分数, 即

$$n_i = r_i \quad (1-7)$$

二、燃气平均相对分子质量

燃气是多组分的混合物, 不能用一个分子式来表示。通常将燃气的总质量与燃气的总物质的量之比称为燃气的平均相对分子质量, 即

$$M = \frac{G}{N} = \frac{\sum M_i N_i}{\sum N_i} \quad (1-8)$$

式中 M ——燃气的平均相对分子质量;

M_i ——燃气中 i 组分的相对分子质量;

N_i ——燃气中 i 组分的物质的量, mol。

(1) 燃气的平均相对分子质量可按下式计算

$$M = M_1 n_1 + M_2 n_2 + \cdots + M_n n_n \approx M_1 r_1 + M_2 r_2 + \cdots + M_n r_n = \sum M_i r_i \quad (1-9)$$

(2) 液态燃气的平均相对分子质量可按下式计算

$$M = M_1 x_1 + M_2 x_2 + \cdots + M_n x_n = \sum M_i x_i \quad (1-10)$$

式中 x_i ——液态燃气中 i 组分的摩尔分数。

三、燃气密度和相对密度

1. 燃气密度

单位体积的燃气所具有的质量, 称为燃气的平均密度 (简称燃气密度), 单位是 kg/m^3 。

$$\rho = \frac{G}{V} = \frac{\sum G_i}{V} = \frac{\sum \rho_i V_i}{V} = \sum \rho_i r_i \quad (1-11)$$

式中 ρ ——燃气的平均密度, kg/m^3 ;

ρ_i ——燃气中 i 组分的密度, kg/m^3 。

气体的密度随温度和压力的变化而改变。温度不变的情况下, 压力升高, 体积减小, 密度增大; 压力不变的情况下, 温度升高, 体积增大, 密度减小。

2. 相对密度

燃气的相对密度是指燃气的平均密度与相同状态下空气平均密度的比值, 通常用标准状况下的参数进行计算。标准状况下, 空气的密度为 $1.293 \text{ kg}/\text{m}^3$, 因此

$$s = \frac{\rho}{1.293} \tag{1-12}$$

式中 s ——燃气的相对密度。

表 1-1 列出了典型燃气的密度和相对密度的变化范围。从表 1-1 中可以看出，天然气、焦炉煤气都比空气轻，而气态液化石油气比空气约重 1 倍。如果发生泄漏，天然气、焦炉煤气会向上空逸散，应保证空气的流通以利泄漏燃气的逸散稀释。而泄漏的液化石油气，由于它比空气重，则会沉积于地面附近，一般情况是，使用喷雾水枪驱散、稀释沉积飘浮的气体，而使用喷雾水枪托住下沉气体，往上驱散，使之在一定高度飘散。

表 1-1 典型燃气的密度与相对密度（0℃，101325Pa）

燃气种类	密度/(kg/m ³)	相对密度
焦炉煤气	0.4~0.5	0.3~0.4
天然气	0.75~0.80	0.58~0.62
液化石油气（气）	1.9~2.5	1.5~2.0

液态燃气的相对密度是指液态燃气的密度与 4℃ 时水的密度的比值，4℃ 时水的密度是 1kg/L。常温下，液态液化石油气的平均密度是 0.5~0.6kg/L，其相对密度为 0.5~0.6，约为水的一半。

四、临界参数

每种物质都有一个特定的温度，在这个温度以下，可以通过对气体加压使其液化，而在该温度以上，则无论施加多大压力都不能使之液化，这个特定温度就是该物质的临界温度。临界温度下，气体的各项参数称为临界参数。临界参数是气体的重要物性指标。

几种可燃气体的气-液平衡曲线如图 1-1 所示，图中曲线是蒸气和液体的分界线。对应曲线的左侧为液态，右侧为气态。气体温度越低于临界温度，则液化所需压力越小。例如，20℃ 时使丙烷液化的绝对压力需要 0.85MPa，而当温度降为 -20℃ 时，在 0.25MPa 的绝对压力下即可将其液化。

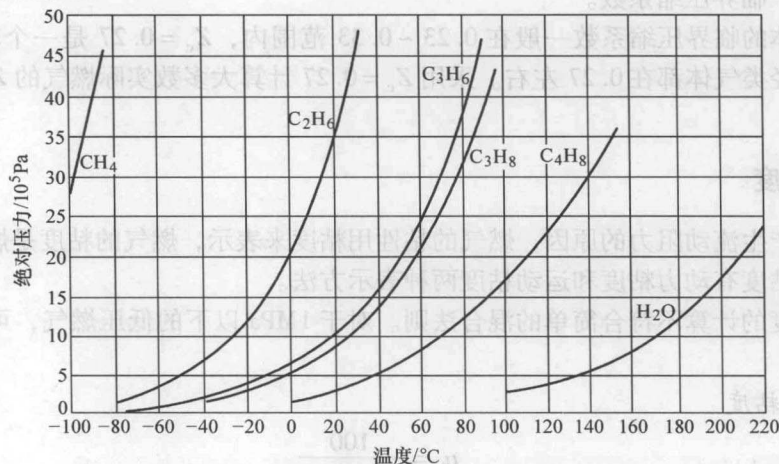


图 1-1 几种可燃气体的气-液平衡曲线

降温和加压,是气体液化的常用手段。气体的临界温度越高,越容易液化。例如,液化石油气中的丙烷、丙烯的临界温度较高,只需在常温下加压即可使其液化,而天然气的主要成分甲烷的临界温度低,难以加压液化。通常,需将天然气温度降至 -162°C 以下,才能使其在常压下液化。

五、实际气体状态方程

常温下,压力低于 1MPa 的燃气在工程上可以近似地当作理想气体处理,压力太高或温度较低时,则不能视为理想气体。此时,应考虑气体分子本身占有的容积和分子之间的引力,对理想气体状态方程进行修正。修正理想气体状态方程最简单的方法是定义压缩因子,实际气体状态方程可表示为

$$pv = ZRT \quad (1-13)$$

式中 p ——气体的绝对压力, Pa;

v ——气体的比体积, m^3/kg ;

Z ——压缩因子,随气体的温度和压力而变化;

R ——气体常数, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;

T ——气体的热力学温度, K。

Z 值偏离1的大小可以表示该气体偏离理想气体的程度。 Z 值可根据对比态定律求得。对比参数是气体实际参数与该气体临界参数的比值,如

$$p_r = \frac{p}{p_c}; T_r = \frac{T}{T_c}; v_r = \frac{v}{v_c}$$

式中 p_r 、 T_r 、 v_r ——气体的对比压力、对比温度和对比比体积;

p 、 T 、 v ——气体的工作压力、工作温度和工作比体积;

p_c 、 T_c 、 v_c ——气体的临界压力、临界温度和临界比体积。

根据对比态定律,有

$$Z = Z_c \frac{p_r v_r}{T_r} \quad (1-14)$$

式中 Z_c ——临界压缩系数。

实际气体的临界压缩系数一般在 $0.23 \sim 0.33$ 范围内, $Z_c = 0.27$ 是一个较好的平均值,60%以上的烃类气体都在0.27左右。采用 $Z_c = 0.27$ 计算大多数实际燃气的 Z 值,误差一般小于5%。

六、粘度

粘性是产生流动阻力的原因,燃气的粘性用粘度来表示,燃气的粘度是燃气流动计算的重要参数。粘度有动力粘度和运动粘度两种表示方法。

燃气粘度的计算不符合简单的混合法则。对于 1MPa 以下的低压燃气,可以近似地按下式计算。

1. 动力粘度

$$\mu = \frac{100}{\sum \left(\frac{g_i}{\mu_i} \right)} \quad (1-15)$$

式中 μ ——燃气的动力粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$;

μ_i ——燃气中 i 组分的动力粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

2. 运动粘度

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-16)$$

式中 ν ——流体的运动粘度, m^2/s 。

一般情况下, 燃气的粘度随温度的升高而增加, 液体的粘度随温度的升高而降低。高压燃气动力粘度的计算比较复杂, 可参照相应经验公式进行。

七、饱和蒸气压和相平衡常数

1. 饱和蒸气压

(1) 单一液体的蒸气压 液态烃的饱和蒸气压, 简称为蒸气压, 是指在一定温度下, 密闭容器中的液体及其蒸气处于相平衡时蒸气的绝对压力。

饱和蒸气压与容器的大小及其中的液量多少无关, 仅取决于物质的种类及温度。液态烃的饱和蒸气压随温度的升高而增大。一些低碳烃在不同温度下的蒸气压列于表 1-2 中。

表 1-2 某些常见低碳烃的蒸气压与温度的关系

温度/ $^{\circ}\text{C}$	蒸气压 (10^5Pa)							
	乙烷	乙烯	丙烷	丙烯	异丁烷	正丁烷	1-丁烯	正戊烷
分子式	C_2H_6	C_2H_4	C_3H_8	C_3H_6	C_4H_{10}	C_4H_{10}	C_4H_8	C_5H_{12}
-30	10.50	19.12	1.64	2.16	—	—	—	—
-25	12.15	21.92	1.97	2.59	—	—	—	—
-20	14.00	24.98	2.36	3.08	—	—	—	—
-15	16.04	28.33	2.85	3.62	0.88	0.56	0.70	—
-10	18.31	31.99	3.38	4.23	1.07	0.68	0.86	—
-5	20.81	35.96	3.99	4.97	1.28	0.84	1.05	—
0	23.55	40.25	4.66	5.75	1.53	1.02	1.27	0.24
5	25.55	44.88	5.43	6.65	1.82	1.23	1.52	0.30
10	29.82	50.00	6.29	7.65	2.15	1.46	1.82	0.37
15	33.36	—	7.25	8.74	2.52	1.74	2.15	0.46
20	37.21	—	8.33	9.92	2.94	2.05	2.52	0.58
25	41.37	—	9.51	11.32	3.41	2.40	2.95	0.67
30	45.85	—	10.80	12.80	3.94	2.80	3.43	0.81
35	48.89	—	12.26	14.44	4.52	3.24	3.96	0.96
40	—	—	13.82	16.23	5.13	3.74	4.56	1.14

(2) 混合液体的蒸气压 在一定温度下, 当密闭容器中的混合液体及其蒸气处于相平衡时, 气相符合道尔顿分压定律, 混合气体的蒸气压等于各组分蒸气分压之和。如果液体为理想液体, 则符合拉乌尔定律, 即各组分蒸气分压等于此纯组分在该温度下的蒸气压乘以其在混合液体中的摩尔分数。

$$p = \sum p_i = \sum x_i p'_i \quad (1-17)$$

式中 p ——混合液体的蒸气压, Pa;

p_i ——混合液体中 i 组分的蒸气分压, Pa;

x_i ——混合液体中 i 组分的分子成分, %;

p'_i ——混合液体中 i 组分在同温度下的蒸气压, Pa。

根据混合气体分压定律, 各组分的蒸气分压为

$$p_i = y_i p \quad (1-18)$$

式中 y_i ——混合液体中 i 组分在气相中的摩尔分数 (等于其体积分数)。

由丙烷和丁烷组成的液化石油气, 当温度一定时, 其蒸气压取决于丙烷和丁烷体积分数之比, 如图 1-2 所示。液化石油气的使用过程中, 总是先蒸发出较多的丙烷, 而剩余的液体中丙烷的体积分数逐渐减少。因此, 即使温度不变, 容器中的蒸气压也会逐渐降低。

2. 相平衡常数

在一定温度下, 一定组成的气液平衡系统中, 某一组分在该温度下的蒸气压 p'_i 与混合液体蒸气压 p 的比值是一个常数 k_i 。该组分在气相中的分子成分 y_i 与其在液相中的分子成分 x_i 的比值, 同样是这一常数 k_i , 该常数称为相平衡常数, 即

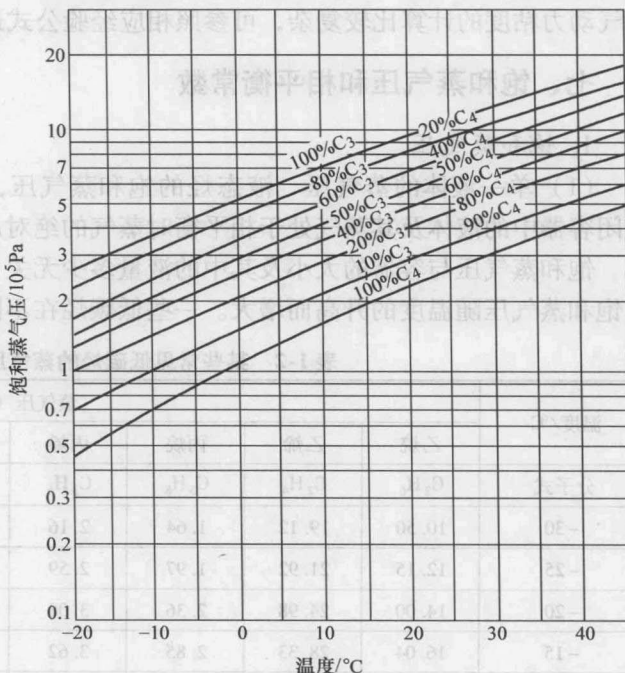


图 1-2 丙烷-丁烷混合物的蒸气压

$$\frac{p'_i}{p} = \frac{y_i}{x_i} = k_i \quad (1-19)$$

式中 k_i ——燃气中 i 组分相平衡常数。

工程上, 常利用相平衡常数 k_i 计算液化石油气的气相组成或液相组成。 k_i 值可由图 1-3 查得。使用该图时, 先连接温度和碳氢化合物两点之间的直线, 并向右延长与基准线相交。然后把此交点同反映系统压力的点相连, 在此连接线与相平衡常数线相交的地方, 即可求得 k_i 值。

【例 1-1】 已知液化石油气的气相分子组分为 $y_{C_3H_8} = 0.90$, $y_{C_4H_{10}} = 0.10$, 求 $t = 30^\circ\text{C}$ 时的平衡液相成分。

【解】 根据表 1-2 查得丙烷和正丁烷的蒸气压。系统的压力 p 为

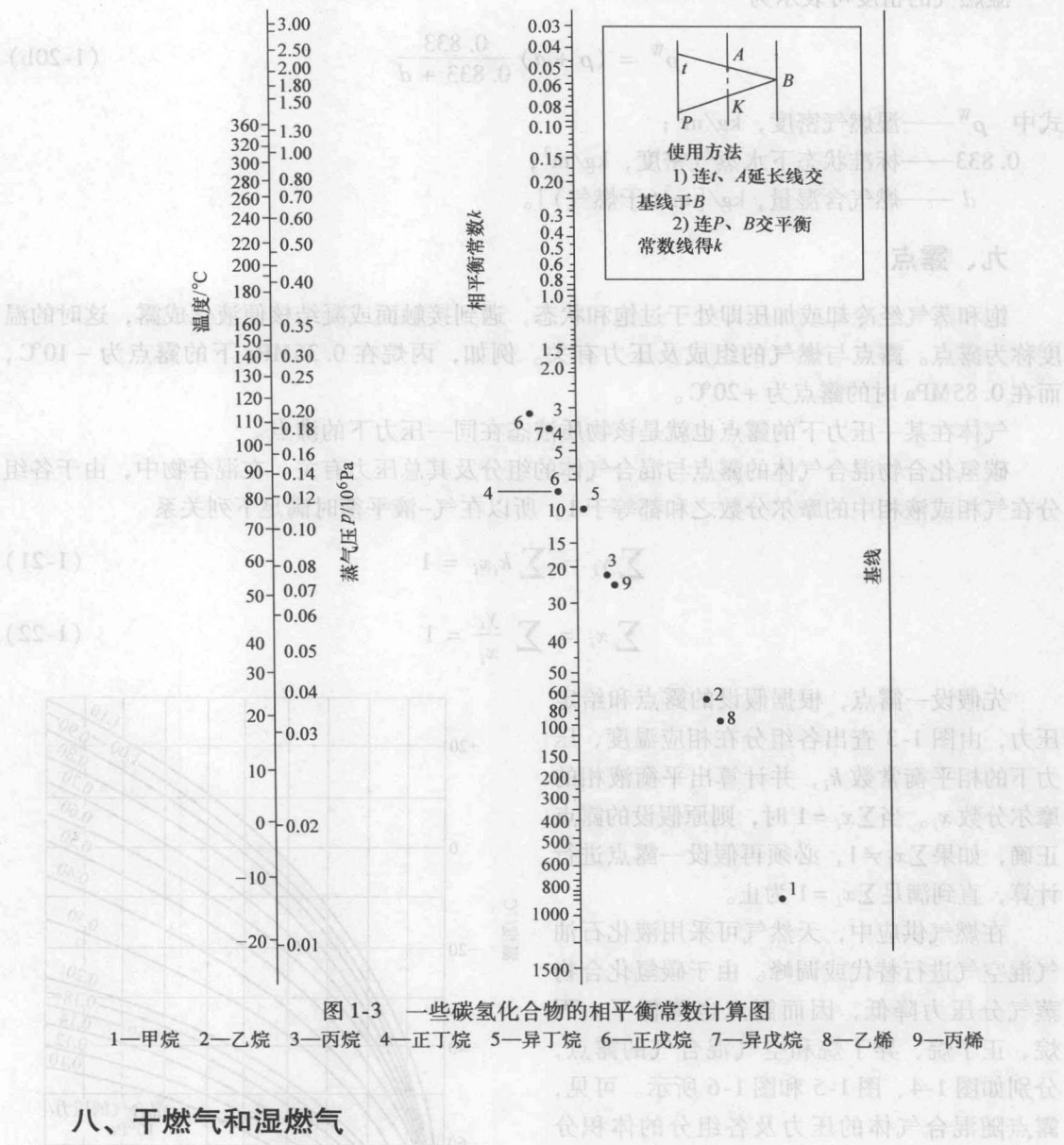
$$p = \frac{1}{\sum \frac{y_i}{p_i}} = \frac{1}{\frac{0.9}{1.08} + \frac{0.1}{0.28}} \text{Pa} = 0.84 \times 10^6 \text{Pa}$$

平衡液相组分的分子成分

$$x_{C_3H_8} = \frac{y_{C_3H_8}P}{p'_{C_3H_8}} = \frac{0.9 \times 0.84}{1.08} = 0.7; \quad x_{C_4H_{10}} = \frac{y_{C_4H_{10}}P}{p'_{C_4H_{10}}} = \frac{0.1 \times 0.84}{0.28} = 0.3$$

也可用相平衡常数计算。由图 1-3 查得 $k_{C_3H_8} = 1.29$, $k_{C_4H_{10}} = 0.33$, 平衡液相成分为

$$x_{C_3H_8} = \frac{y_{C_3H_8}}{k_{C_3H_8}} = \frac{0.9}{1.29} = 0.7; \quad x_{C_4H_{10}} = \frac{y_{C_4H_{10}}}{k_{C_4H_{10}}} = \frac{0.1}{0.33} = 0.3$$



八、干燃气和湿燃气

通常,燃气中会含有一定量水蒸气,工程应用中也有干燃气与湿燃气之分。所谓 1m^3 湿燃气是指燃气的总体积为 1m^3 ,其中包含水蒸气所占体积(实际的燃气成分小于 1m^3)。

1m^3 干燃气则是指燃气成分的体积是 1m^3 ，而与其共存的还有若干水蒸气，因此 1m^3 干燃气的实际体积是大于 1m^3 的。

单位体积的燃气所具有的质量称为燃气的平均密度， kg/m^3 。

混合气体的平均密度为

$$\rho = \frac{1}{100} \sum y_i \rho_i \quad (1-20a)$$

湿燃气的密度可表示为

$$\rho^w = (\rho + d) \frac{0.833}{0.833 + d} \quad (1-20b)$$

式中 ρ^w ——湿燃气密度， kg/m^3 ；

0.833——标准状态下水蒸气密度， kg/m^3 ；

d ——燃气含湿量， $\text{kg}/[\text{m}^3(\text{干燃气})]$ 。

九、露点

饱和蒸气经冷却或加压即处于过饱和状态，遇到接触面或凝结核便液化成露，这时的温度称为露点。露点与燃气的组成及压力有关。例如，丙烷在 0.35MPa 下的露点为 -10°C ，而在 0.85MPa 时的露点为 $+20^\circ\text{C}$ 。

气体在某一压力下的露点也就是该物质液态在同一压力下的沸点。

碳氢化合物混合气体的露点与混合气体的组分及其总压力有关。在混合物中，由于各组分在气相或液相中的摩尔分数之和都等于 1，所以在气-液平衡时满足下列关系

$$\sum y_i = \sum k_i x_i = 1 \quad (1-21)$$

$$\sum x_i = \sum \frac{y_i}{x_i} = 1 \quad (1-22)$$

先假设一露点，根据假设的露点和给定压力，由图 1-3 查出各组分在相应温度、压力下的相平衡常数 k_i ，并计算出平衡液相的摩尔分数 x_i 。当 $\sum x_i = 1$ 时，则原假设的露点正确，如果 $\sum x_i \neq 1$ ，必须再假设一露点进行计算，直到满足 $\sum x_i = 1$ 为止。

在燃气供应中，天然气可采用液化石油气混空气进行替代或调峰。由于碳氢化合物蒸气分压力降低，因而露点也降低了。丙烷、正丁烷、异丁烷和空气混合气的露点，分别如图 1-4、图 1-5 和图 1-6 所示。可见，露点随混合气体的压力及各组分的体积分数而变化，混合气体的压力增加，露点升高。

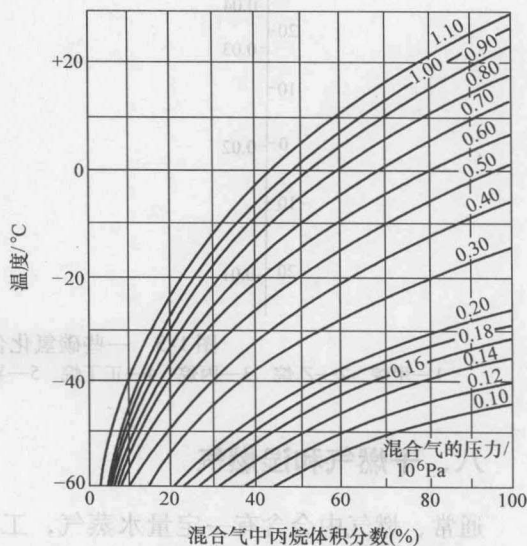


图 1-4 丙烷-空气混合气的露点

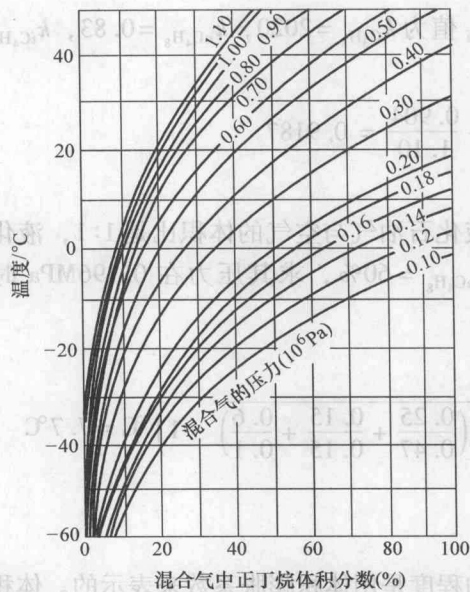


图 1-5 正丁烷-空气混合气的露点

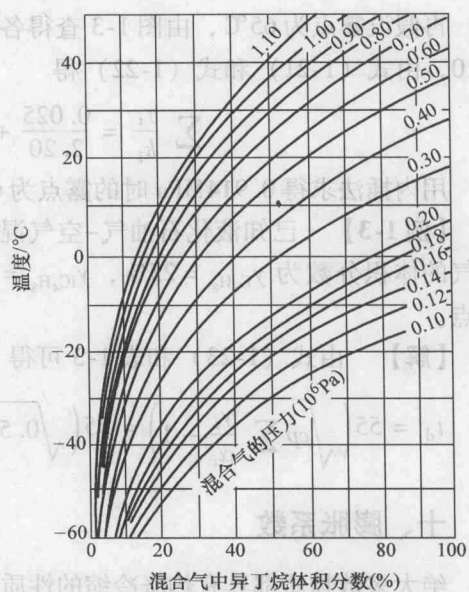


图 1-6 异丁烷-空气混合气的露点

当管道输送气体碳氢化合物时，必须保持其温度在露点以上，以防凝结，阻碍输气。液化石油气管道供气的工程中气态液化石油气或液化石油气-空气混合气一般处于压力为 0.1~0.3MPa 的范围内，必须对露点进行校核计算。可采用下式直接计算

$$t_d = 55 \left(\sqrt{c p \sum \frac{y_i}{\alpha_i}} - 1 \right) \tag{1-23}$$

- 式中 t_d ——气态液化石油气或液化石油气-空气混合气的露点，℃；
 p ——气态液化石油气或液化石油气-空气混合气的压力，MPa；
 c ——液化石油气-空气混合气中液化石油气组分的体积组分，对气态液化石油气 $c=1.0$ ；
 y_i ——液化石油气中 i 组分的体积分数；
 α_i ——液化石油气中 i 组分的特性系数，见表 1-3。

表 1-3 液化石油气组分的特性系数

组分	乙烷	乙烯	丙烷	丙烯	异丁烷	正丁烷	1-丁烯	异丁烯	异戊烷	正戊烷
系数 α_i	2.4	4.18	0.47	0.59	0.15	0.10	0.126	0.129	0.035	0.026

【例 1-2】 已知液化石油气的体积分数为 $y_{C_3H_8} = 2.5\%$ ， $y_{nC_4H_{10}} = 7.1\%$ ， $y_{iC_4H_{10}} = 90.4\%$ ，求液化石油气压力为 0.914MPa 时的露点。

【解】 假定露点温度为 55℃，根据露点和压力，由图 1-3 查得各组分的 k_i 值为 $k_{C_3H_8} = 1.82$ ， $k_{nC_4H_{10}} = 0.65$ ， $k_{iC_4H_{10}} = 0.88$ ，由式 (1-21) 和式 (1-22) 得

$$\sum \frac{y_i}{k_i} = \frac{0.025}{1.82} + \frac{0.071}{0.65} + \frac{0.904}{0.88} = 1.1502$$

再假设露点为 65°C ，由图 1-3 查得各组分的 k_i 值为 $k_{\text{C}_3\text{H}_8}=2020$ ， $k_{\text{nC}_4\text{H}_8}=0.83$ ， $k_{\text{iC}_4\text{H}_8}=1.10$ ，由式 (1-21) 和式 (1-22) 得

$$\sum \frac{y_i}{k_i} = \frac{0.025}{2.20} + \frac{0.071}{0.83} + \frac{0.904}{1.10} = 0.9187$$

用内插法求得 0.914MPa 时的露点为 61.5°C 。

【例 1-3】 已知液化石油气-空气混合气，液化石油气与空气的体积比是 1:1，液化石油气的体积分数为 $y_{\text{C}_3\text{H}_8}=25\%$ ， $y_{\text{iC}_4\text{H}_8}=15\%$ ， $y_{\text{nC}_4\text{H}_8}=60\%$ ，求其压力在 0.196MPa 时的露点。

【解】 由式 (1-23) 和表 1-3 可得

$$t_d = 55 \left(\sqrt{c_p \sum \frac{y_i}{\alpha_i}} - 1 \right) = 55 \left(\sqrt{0.5 \times 0.196 \left(\frac{0.25}{0.47} + \frac{0.15}{0.15} + \frac{0.6}{0.1} \right)} - 1 \right) ^{\circ}\text{C} = 7.7^{\circ}\text{C}$$

十、膨胀系数

绝大多数物质都具有热胀冷缩的性质，膨胀的程度是用体积膨胀系数来表示的。体积膨胀系数，是指温度每升高 1°C ，液态物质增加的体积与原体积的比值。液态液化石油气的体积膨胀系数，约比水大 16 倍。在灌装容器时必须考虑由温度变化引起的体积增大，留出相应的气相空间容积。

液态液化石油气各组分及水的体积膨胀系数见表 1-4。

表 1-4 液态液化石油气组分及水的体积膨胀系数 (单位: $1/^{\circ}\text{C}$)

温度/ $^{\circ}\text{C}$	丙烷	丙烯	正丁烷	异丁烷	1-丁烯	水
0 ~ 10	0.00265	0.00283	0.00181	0.00233	0.00198	0.0000299
10 ~ 20	0.00258	0.00313	0.00237	0.00171	0.00206	0.00014
20 ~ 30	0.00352	0.00329	0.00173	0.00297	0.00214	0.00026
30 ~ 40	0.00340	0.00354	0.00227	0.00217	0.00227	0.00035
40 ~ 50	0.00422	0.00389	0.00222	0.00266	0.00244	0.00042

液态液化石油气的体积膨胀可按下式计算

$$V_2 = V_1 [1 + \alpha(t_2 - t_1)] \quad (1-24)$$

式中 V_1 ——温度为 t_1 时的液体体积， m^3 ；

V_2 ——温度为 t_2 时的液体体积， m^3 ；

α —— $t_1 \sim t_2$ 温度范围内的体积膨胀系数平均值， $1/^{\circ}\text{C}$ 。

对于满液的容器，当温度升高时液体的体积膨胀，而受到容器的限制，液体将会受到压缩。体积压缩系数是指压力每升高 1MPa 时液体体积的减缩量。液化石油气 (65% 丙烷 + 35% 异丁烷) 的体积压缩系数见表 1-5。

由表 1-5 可以看出，体积膨胀系数和体积压缩系数的比值一般为 1.8 以上，这说明如果不考虑容器本身由于温度和压力的升高而产生的体积增量，则容器在满液情况下，温度的升高会引起容器内压力急剧升高。

表 1-5 液化石油气体积膨胀系数、体积压缩系数及其比值

温度/℃	体积膨胀系数/(1/℃)	体积压缩系数/(1/MPa)	比值/(MPa/℃)
0	0.00215	0.00107	2.01
10	0.00228	0.00116	1.97
20	0.00246	0.00126	1.95
30	0.00266	0.00138	1.93
40	0.00292	0.00151	1.93
50	0.00326	0.00168	1.84
60	0.00313	0.00187	1.99

第二节 燃气热力性质

一、汽化热

常压下，单位质量的物质由液态变成与之处于平衡状态的蒸气所要吸收的热量称为该物质的汽化热。反之，由蒸气变成与之处于平衡状态的液体时所放出的热量称为该物质的凝结热。同一物质，在同一状态时汽化热与凝结热是同一数值，其实质为饱和蒸气与饱和液体的焓差。

水的汽化热是所有物质中最大的，标准大气压下、沸点 100℃时的汽化热为 2257kJ/kg。标准大气压下，甲烷在其沸点 -162℃的汽化热为 511kJ/kg。丙烷在其沸点 -42℃时的汽化热为 423kJ/kg。

不同液体汽化热也不同，相同液体的汽化热也随沸点上升而减少，在临界温度时汽化热为零。

混合液体汽化热可按下式计算

$$r = \sum g_i r_i = g_1 r_1 + g_2 r_2 + \cdots + g_n r_n \tag{1-25}$$

式中 r ——混合液体汽化热，kJ/kg；
 $g_1、g_2 \cdots g_n$ ——混合液体各组分的质量分数，%；
 $r_1、r_2 \cdots r_n$ ——相应各组分的汽化热，kJ/kg。

汽化热因气化时的压力和温度而异，汽化热与温度的关系可用下式表示

$$r_1 = r_2 \left(\frac{t_c - t_1}{t_c - t_2} \right)^{0.38} \tag{1-26}$$

式中 r_1 ——温度为 t_1 ℃时汽化热，kJ/kg；
 r_2 ——温度为 t_2 ℃时的汽化热，kJ/kg；
 t_c ——临界温度，℃。

某些碳氢化合物的汽化热随温度的变化值见图 1-7。

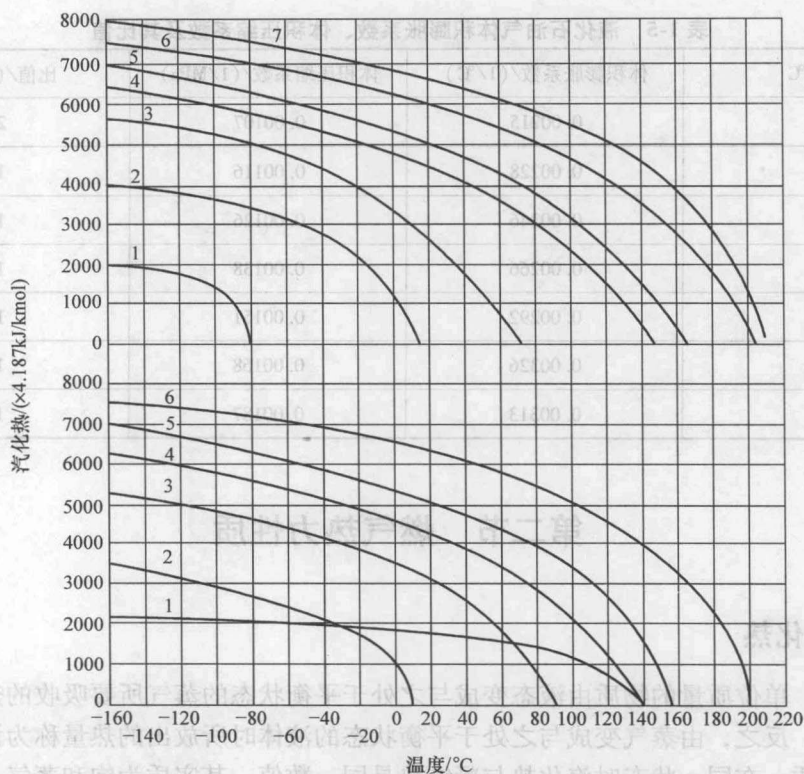


图 1-7 液化石油气各组分的汽化热

(上) 1—甲烷 2—乙烷 3—丙烷 4—异丁烷 5—正丁烷 6—异戊烷 7—正戊烷

(下) 1—异丁烯 2—乙烯 3—丙烯 4—丁烯 5—顺丁烯 6—戊烯

【例 1-4】 已知液态液化石油气的质量分数为：丙烷 60%，丙烯 15%，异丁烷 25%，求 5℃ 时液化石油气的汽化热。

【解】 由图 1-7 查得液化石油气各组分在沸点时的汽化热，按式 (1-26) 计算液化石油气各组分在 5℃ 的汽化热：

$$\text{丙烷: } r_1 = r_2 \left(\frac{t_c - t_1}{t_c - t_2} \right)^{0.38} = 422.9 \left(\frac{369.8 - 278}{369.9 - 230.9} \right)^{0.38} \text{ kJ/kg} = 361.4 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{丙烯: } r_1 = r_2 \left(\frac{t_c - t_1}{t_c - t_2} \right)^{0.38} = 439.6 \left(\frac{365.1 - 278}{365.1 - 226} \right)^{0.38} \text{ kJ/kg} = 368.0 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{异丁烷: } r_1 = r_2 \left(\frac{t_c - t_1}{t_c - t_2} \right)^{0.38} = 366.3 \left(\frac{408.1 - 278}{408.1 - 262.8} \right)^{0.38} \text{ kJ/kg} = 351.2 \text{ kJ/kg}$$

按式 (1-25) 计算液化石油气在 5℃ 时的汽化热为

$$r = \sum g_i r_i = (0.6 \times 361.4 + 0.15 \times 368.0 + 0.25 \times 351.2) \text{ kJ/kg} = 359.8 \text{ kJ/kg}$$

二、燃气热值

1m³ 燃气完全燃烧后，其烟气被冷却至初始温度，所释放出的总热量称为该燃气的热值，单位为 kJ/m³。对于液化石油气，热值单位也可用 kJ/kg。