



燃气基础知识

1.1 燃气的分类及用途

城市民用和工业用燃气是由几种气体组成的混合气体,其中含有可燃气体和不可燃气体。可燃气体有碳氢化合物、氢和一氧化碳,不可燃气体有二氧化碳、氮和氧等。燃气的种类很多,主要有天然气、人工燃气、液化石油气和沼气。

1.1.1 按照气源分类

1. 天然气

天然气是指地下岩层中存在的、以烃类为主的气体。天然气是多种气体的混合物,其主要成分各种气态碳氢化合物,其中甲烷(CH_4)占绝大多数,一般含量都大于 80%,其次为乙烷(C_2H_6)、丙烷(C_3H_8)、丁烷(C_4H_{10})及其他重质气态烃,它们是天然气中的主要可燃成分。除上述烃类气体外,天然气中还含有少量二氧化碳(CO_2)、氧气(O_2)、氮气(N_2)、氢气(H_2)、硫化氢(H_2S)、一氧化碳(CO)等气体。

(1) 按照重烃含量对天然气进行分类

一般情况下相对密度为 0.58~1.6 的多为干气,相对密度在 1.6 以上的多为湿气。湿气常与石油相伴相生,而干气多与纯气藏有关。

① 干气:天然气的化学组成以甲烷为主,甲烷含量在 98%以上,乙烷与乙烷以上的重烃很少或没有,这样的气体称为干气,它来自地下干气藏,或煤田气、沼泽气聚集而成。干气可形成存气田。

② 湿气:天然气的化学组成仍以甲烷为主,甲烷含量为 80%~90%,乙烷与乙烷以上的重烃超过 10%~20%,这样的气体称为湿气。它的出现标志着地下深部有油藏存在。

③ 伴生气:天然气的化学组分中,甲烷含量在 80%以下的气体称为伴生气。

(2) 按照矿藏对天然气进行分类

一般可分为 4 种: 直接从气井开采出来的气田气或称纯天然气; 伴随石油一起开采出来的石油气, 也称石油伴生气、油田气; 含石油轻质馏分的凝析气田气, 即凝析气; 从井下煤层抽出的煤矿矿井气, 即煤成气。

① 气田气: 主要含有甲烷, 占 80%~98%, 重烃气体很少, 占 0~5%, 不含戊烷或戊烷以上的重烃或者含量甚微。

② 油田气: 主要成分除含甲烷外, 乙烷与乙烷以上的重烃较多, 在 5%~10% 以上, 和石油共生, 又称石油气。

③ 凝析气: 除含有大量甲烷外, 含有 2%~5% 戊烷或戊烷以上的烃类含量也较高, 含有汽油和煤油组分。主要是由于油、气藏的埋藏深度大, 处于高温、高压下的碳氢化合物为单相气态, 采到地面后, 由于温度、压力降低而发生凝结, 由原来单相气态的碳氢化合物转为液态石油。近些年来, 发现许多凝析气油田, 在开采时, 从井底喷上来的气体, 到井口附近, 由于压力和温度降低转化为石油。

④ 煤成气: 除含有大量甲烷以外, 重烃气体含量很少, 但有较多的二氧化碳气。甲烷含量随采气方式而变化。

(3) 液化天然气(LNG)

天然气在低温高压下(即在临界温度以下和临界压力以上^①)可以将其从气态转变为液态, 这样它的体积约为原来的 1/600, 有利于运输和储藏, 但这对技术要求、操作条件和容器的要求较高, 投资较大, 目前我国沿海地区正在发展液化天然气。LNG 的密度(液态)为 420kg/m³, 约合 2.4m³/t(液态)、1420Nm³/t(气态)。

(4) 压缩天然气(CNG)

将天然气压缩增压至 20MPa 时, 天然气体积只是原来的 1/200。并储入容器中, 便于汽车运输, 经济运输半径以 150~200 千米为宜。压缩天然气可用于民用及作为汽车清洁燃料。

我国四川天然气中甲烷含量一般不少于 90%, 发热值为 34300~36000kJ/Nm³^②。我国大港地区的天然气为石油伴生气, 甲烷含量约为 80%, 乙烷、丙烷和丁烷等含量约为 15%, 发热值约为 41900kJ/Nm³。

天然气既是制取合成氨、炭黑、乙炔等化工产品的原料气, 又是优质燃料气, 是理想的城市气源。液态天然气的体积为气态时的 1/600, 有利于运输和存储。由于开采、储运和使用天然气既经济又方便, 所以近些年来, 许多国家大力发展天然气工业。有些天然气资源缺乏的国家进口液化天然气以发展城市燃气事业。

2. 人工燃气

人工燃气主要分为固体燃料干馏煤气、固体燃料气化煤气、油制气和高炉煤气四种。

(1) 固体燃料干馏煤气

固体燃料干馏煤气是利用焦炉、连续式直立炭化炉和立箱炉等对煤进行干馏所获得

① 临界温度: 当温度不超过某一数值时, 对气体进行加压, 可以使气体液化, 而在该温度以上, 无论加多大的压力都不能使气体液化, 这个温度就称为临界温度。在临界温度下使气体液化所必需的压力称为临界压力。

② 本书以 273.15K, 101325Pa 时的气体状态为标准状态。标准状态下的容积单位以 Nm³ 表示。

的煤气,这是最早开始的城市燃气气源。干馏煤气的生产历史最长,曾是我国城市燃气的重要气源之一。用干馏方式生产煤气,每吨煤可产煤气 $300\sim 400\text{m}^3$ 。这类煤气中甲烷和氢的含量较高,低发热值一般在 $16700\text{kJ}/\text{Nm}^3$ 左右。

(2) 固体燃料气化煤气

压力气化煤气、水煤气、发生炉煤气等均属此类。在 $2.0\sim 3.0\text{MPa}$ 的压力下,以煤做原料采用纯氧和水蒸气为气化剂,可获得高压蒸汽氧鼓风煤气,又称高压气化煤气。其主要组分为氢及含量较高的甲烷,发热值在 $15100\text{kJ}/\text{Nm}^3$ 左右。若城市附近有褐煤或长焰煤资源,可采用鲁奇炉生产压力气化煤气,这套装置可建立在煤矿附近(一般称为坑口气化),不需另外设置压送设备,用管道可直接将燃气输送至较远的城镇作为城市燃气使用。

水煤气和发生炉煤气的主要组分为一氧化碳和氢。水煤气的发热值为 $10500\text{kJ}/\text{Nm}^3$ 左右,发生炉煤气的发热值为 $5400\text{kJ}/\text{Nm}^3$ 左右。由于这两种燃气的发热值低,而且毒性大,不可以单独作为城市燃气的气源,但可用来加热焦炉和连续式直立炭化炉,以顶替发热值较高的干馏煤气,增加供应城市的气量,也可以和干馏煤气、重油蓄热裂解气掺混,调节供气量和调整燃气发热值,作为城市燃气的调度气源。发生炉煤气还可作工厂及燃气轮机的燃料。

(3) 油制气

利用重油(炼油厂提取汽油、煤油和柴油之后所剩的油品)制取城市燃气。

按制取方法不同,可分为重油蓄热热裂解气和重油蓄热催化裂解气两种。重油蓄热热裂解气以甲烷、乙烯和丙烯为主要组分,发热值约为 $41900\text{kJ}/\text{Nm}^3$ 。每吨重油的产气量为 $500\sim 550\text{m}^3$ 。重油蓄热催化裂解气中氢的含量最多,也含有甲烷和一氧化碳,发热值为 $17600\sim 20900\text{kJ}/\text{Nm}^3$,利用三筒炉催化裂解装置,每吨重油的产气量为 $1200\sim 1300\text{m}^3$ 。

生产油制气的装置简单,投资省,占地少,建设速度快,管理人员少,启动、停炉灵活,既可作城市燃气的基本气源,也可作城市燃气的调度(调峰)气源。

国外不少中小燃气厂多以石脑油(粗汽油)作为制气原料,因与重油相比,石脑油有如下优点:含硫少,不生成焦油,烟尘及污水等公害问题少,气化效率高,而且石脑油催化裂解制气转换一氧化碳也比较简单。

(4) 高炉煤气

高炉煤气是冶金工厂炼铁时的副产气,主要组分是一氧化碳和氮气,发热值为 $3800\sim 4200\text{kJ}/\text{Nm}^3$ 。高炉煤气可用作炼焦炉的加热煤气,以取代焦炉煤气,供应城市。高炉煤气也常用作锅炉的燃料或与焦炉煤气掺混用于冶金工厂的加热工艺。

3. 液化石油气(LPG)

液化石油气是开采和炼制石油过程中,作为副产品而获得的一部分碳氢化合物。目前我国供应的液化石油气主要来自炼油厂的催化裂化装置。液化石油气产量通常占催化裂化装置处理量的 $7\%\sim 8\%$ 。

液化石油气的主要成分是丙烷(C_3H_8)、丙烯(C_3H_6)、丁烷(C_4H_{10})和丁烯(C_4H_8),习惯上又称 C_3 、 C_4 ,即只用烃的碳原子(C)数表示。这些碳氢化合物在常温、常压下呈气态。当压力升高或温度降低时,很容易转变为液态。从气态转变为液态,其体积约为原来

的 $1/250$ 。气态液化石油气的发热值为 $92100 \sim 121400 \text{ kJ/Nm}^3$ 。液态液化石油气的发热值为 $45200 \sim 46100 \text{ kJ/Nm}^3$ 。

液化石油气中烯烃部分可用作化工原料,而其烷烃部分可用作燃料。近年来,国外许多城市还用它作为汽车燃料。由于发展液化石油气投资省、设备简单、供应方式灵活、建设速度快,所以液化石油气供应业发展很快,是目前城市燃气的重要气源之一。

4. 沼气(生物气)

各种有机物质,如蛋白质、纤维素、脂肪、淀粉等,在隔绝空气的条件下发酵,并在微生物的作用下产生的可燃气体,称为沼气。发酵的原料是取之不尽、用之不竭的粪便、垃圾、杂草和落叶等有机物质。沼气的组分中甲烷的含量约为 60% ,二氧化碳约为 35% ,此外,还含有少量的氢、一氧化碳等气体,发热值约为 20900 kJ/Nm^3 。

1.1.2 按照燃烧特性分类

国家标准《城镇燃气分类和基本特性》(GB/T 13611—2006)规定,城镇燃气应按燃气类别及其燃烧特性指标(华白^①数 W 和燃烧势 CP)分类,并应控制其波动范围。国家标准《天然气》(GB 17820—2012)规定,天然气按高位发热量,总硫、硫化氢和二氧化碳含量分为一类、二类和三类;作为民用燃料的天然气,总硫和硫化氢含量应符合一类气或二类气的技术指标。

华白数(Wobbe number, Wobbe index)是燃气的热值与其相对密度平方根的比值。华白数 W 可按式(1-1)计算:

$$W = \frac{H}{\sqrt{d}} \quad (1-1)$$

式中: W ——华白数(分高华白数 W_s 和低华白数 W_i) (MJ/m^3);

H ——燃气热值(分高位热值 H_s 和低位热值 H_i) (MJ/m^3);

d ——燃气相对密度(空气相对密度为 1)。

燃烧势(Combustion Potential)是指燃烧速度指数。

国际燃气联盟(IGU)按照华白数将燃气划分为一类、二类和三类,见表 1-1。

表 1-1 国际燃气联盟(IGU)燃气分类

分 类	华白指数(MJ/m^3)	典 型 燃 气
一类燃气	17.8~35.8	人工燃气
二类燃气	35.8~53.7	天然气
L 族	35.8~51.6	
H 族	51.6~53.7	
三类燃气	71.5~87.2	液化石油气

确定城市燃气输配系统的压力级制、管径、燃气管网构筑物及防护和管理带施,都与所使用燃气的种类有关。城市燃气在管道中输送的距离较长,管道的造价及金属用量在

^① 华白即沃泊。

输配系统中所占的比重很大。显然,输送高发热位燃气对输配系统的经济性是有利的。由于用气设备是按确定的燃气组分设计的,所以城市燃气的组分必须维持稳定。为保证原有的用气设备热负荷的稳定,所供应燃气的华白指数波动范围应不超过5%。当所输配的燃气被另一种燃烧特性差别较大的燃气所取代,除了华白指数外,还必须考虑不产生离焰、黄焰、回火、不完全燃烧等火焰特性。

1.2 燃气的基本性质

这里首先介绍表示燃气特性的基本物理量及其计算方法,然后重点介绍目前作为城市燃气主要气源的天然气的性质。

1.2.1 燃气特性参数及其计算方法

1. 混合气体及混合液体的平均分子量、平均密度和相对密度

(1) 平均分子量

混合气体的平均分子量可按式(1-2)计算:

$$M = \frac{1}{100}(y_1 M_1 + y_2 M_2 + \cdots + y_n M_n) \quad (1-2)$$

式中: M ——混合气体平均分子量;

$y_1, y_2, \cdots, y_n$ ——各单一气体容积成分(%);

$M_1, M_2, \cdots, M_n$ ——各单一气体分子量。

混合液体的平均分子量可按式(1-3)计算:

$$M = \frac{1}{100}(x_1 M_1 + x_2 M_2 + \cdots + x_n M_n) \quad (1-3)$$

式中: M ——混合液体平均分子量;

$x_1, x_2, \cdots, x_n$ ——各单一液体分子成分(%);

$M_1, M_2, \cdots, M_n$ ——各单一液体分子量。

(2) 平均密度和相对密度

混合气体平均密度和相对密度按式(1-4)、式(1-5)计算:

$$\rho = \frac{M}{V_M} \quad (1-4)$$

$$S = \frac{\rho}{1.293} = \frac{M}{1.293 V_M} \quad (1-5)$$

式中: ρ ——混合气体平均密度(kg/m^3);

V_M ——混合气体平均摩尔容积(m^3/kmol);

S ——混合气体相对密度(空气为1);

1.293——标准状态下空气的密度(kg/m^3)。

对于由双原子气体和甲烷组成的混合气体,标准状态下的 V_M 可取 $22.4 \text{ Nm}^3/\text{kmol}$, 而对于由其他碳氢化合物组成的混合气体,则取 $22 \text{ Nm}^3/\text{kmol}$ 。若要精确计算,可采用式(1-6):

$$\rho = \frac{1}{100}(y_1\rho_1 + y_2\rho_2 + \cdots + y_n\rho_n) \quad (1-6)$$

式中: $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \cdots, \rho_n$ ——标准状态下各单一气体密度(kg/Nm^3)。

燃气通常含有水蒸气,则湿燃气密度可按式(1-7)计算:

$$\rho^w = (\rho + d) \frac{0.833}{0.833 + d} \quad (1-7)$$

式中: ρ^w ——湿燃气密度(kg/m^3);

ρ ——干燃气密度(kg/m^3);

d ——水蒸气含量(kg/m^3 干燃气);

0.833——水蒸气密度(kg/m^3)。

干、湿燃气容积成分按式(1-8)换算:

$$y_i^w = ky_i \quad (1-8)$$

式中: y_i^w ——湿燃气容积成分(%);

y_i ——干燃气容积成分(%);

k ——换算系数, $k = \frac{0.833}{0.833 + d}$ 。

2. 临界参数及实际气体状态方程

(1) 临界参数

临界参数定义: 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,无论加多大压力都不能使气体液化,这个温度就称为该气体的临界温度。在临界温度下,使气体液化所必需的压力称为临界压力。

图 1-1 所示为在不同温度下对气体压缩时,其压力和体积的变化情况。

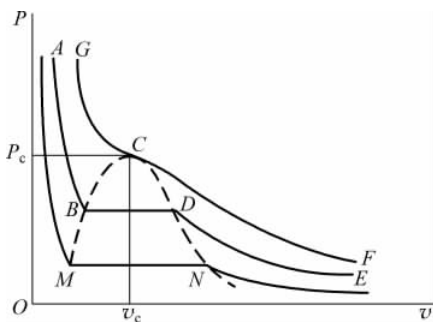


图 1-1 临界状态

当从 E 点开始压缩时至 D 点开始液化,到 B 点液化完成;而当气体从 F 点开始压缩时至 C 点开始液化,但此时没有相当于 BD 直线部分,其液化的状态与前者不同。C 点又称临界点。气体在 C 点所处的状态称为临界状态,它既不属于气相,也不属于液相。这时的温度 T_c 、压力 P_c 、比容 v_c 、密度 ρ_c 分别称为临界温度、临界压力、临界比容和临界密度。在图 1-1 中, NDCG 线的右边是气体状态, MBCG 线的左边是液体状态,而在 MCN

线以下为气液共存状态, CM 和 CN 为边界线。

气体的临界温度越高, 越易液化。天然气主要成分甲烷的临界温度低, 故较难液化; 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。

几种气体的液态-气态平衡曲线如图 1-2 所示。图 1-2 中的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, 气体温度比临界温度越低, 则液化所需压力越小。例如, 20°C 时使丙烷液化的绝对压力为 0.846MPa , 而当温度为 -20°C 时, 在 0.248MPa 绝对压力下即可液化。

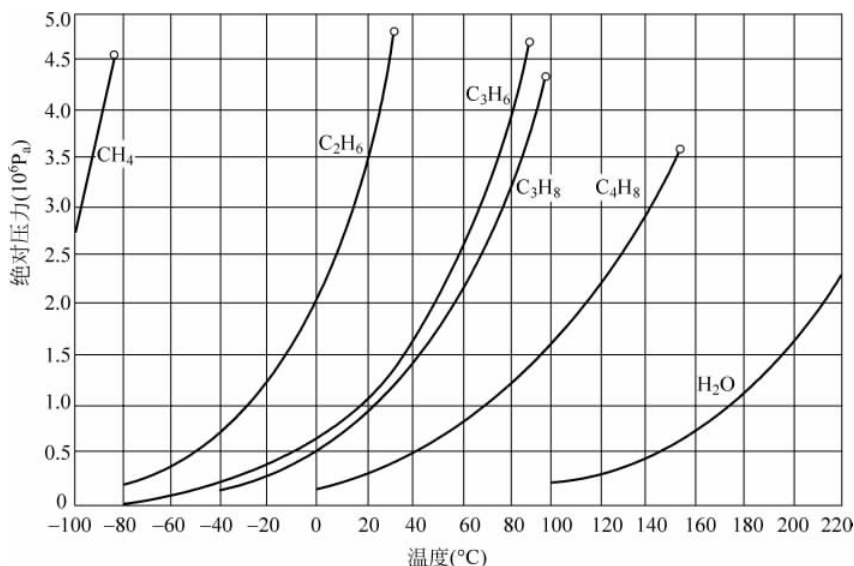


图 1-2 几种气体的液态-气态平衡曲线

混合气体的平均临界压力和平均临界温度按式(1-9)、式(1-10)计算:

$$P_{m,c} = \frac{1}{100}(y_1 P_{c_1} + y_2 P_{c_2} + \cdots + y_n P_{c_n}) \quad (1-9)$$

$$T_{m,c} = \frac{1}{100}(y_1 T_{c_1} + y_2 T_{c_2} + \cdots + y_n T_{c_n}) \quad (1-10)$$

式中: $P_{m,c}, T_{m,c}$ ——混合气体的平均临界压力和平均临界温度;

$P_{c_1}, P_{c_2}, \cdots, P_{c_n}$ ——各组分的临界压力;

$T_{c_1}, T_{c_2}, \cdots, T_{c_n}$ ——各组分的临界温度;

$y_1, y_2, \cdots, y_n$ ——各组分的容积成分(%)。

(2) 实际气体状态方程

当燃气压力低于 1MPa 和温度在 $10\sim 20^{\circ}\text{C}$ 时, 在工程上还可当作理想气体。当压力很高(如在天然气的长输管线中)、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。实际工程中, 在理想气体状态方程中引入考虑气体压缩性的压缩因子 Z , 可以得到实际气体状态方程(1-11)。

$$Pv = ZRT \quad (1-11)$$

式中： P ——气体的绝对压力(Pa)；

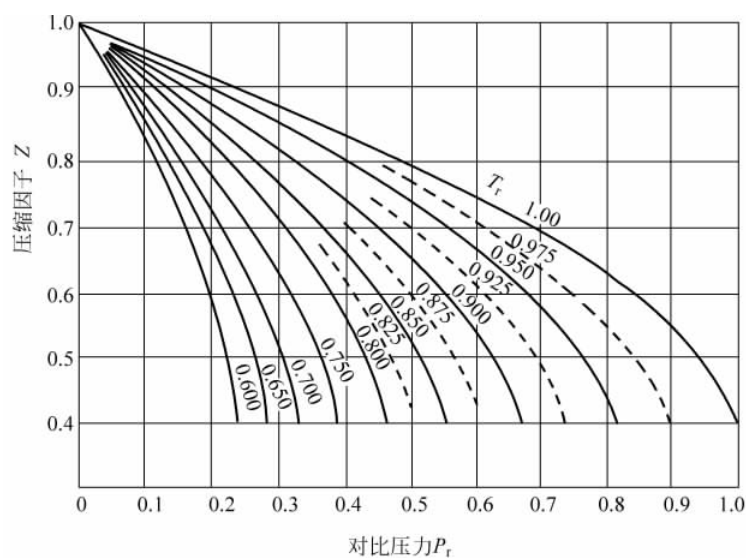
v ——气体的比容(m^3/kg)；

Z ——压缩因子；

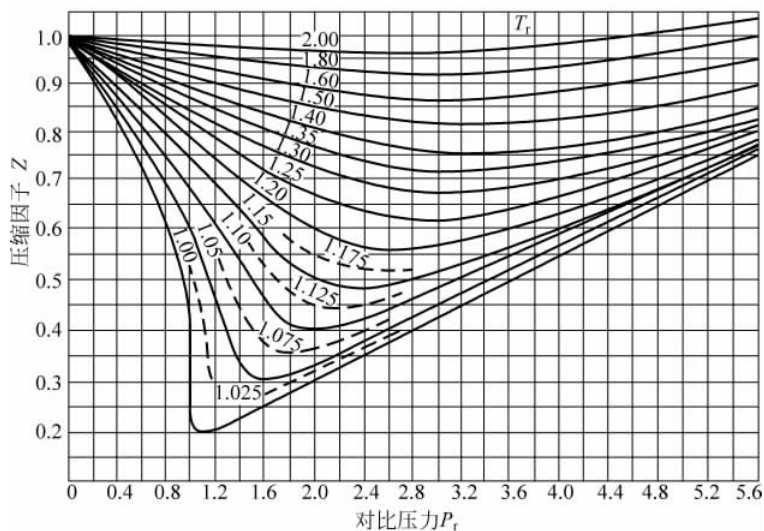
R ——气体常数 $[\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$ ；

T ——气体的热力学温度(K)。

压缩因子 Z 是随温度和压力而变化的。压缩因子 Z 值可由图 1-3 确定。



(a) 当 $P_r < 1, T_r = 0.6 \sim 1.0$



(b) 当 $P_r < 5.6, T_r = 1.0 \sim 2.0$

图 1-3 气体的压缩因子与对比压力和对比温度的关系

图 1-3 是按对比温度 and 对比压力制作的。所谓对比温度 T_r 就是工作温度 T 与临界温度 T_c 的比值,而对比压力 P_r 就是工作压力 P 与临界压力 P_c 的比值。此处温度为热力学温度,压力为绝对压力。

对于混合气体,在确定压缩因子 Z 值之前,首先要按式(1-9)、式(1-10)确定平均临界压力和平均临界温度,然后再按图 1-3 求得压缩因子 Z 。

3. 动力粘度

混合气体的动力粘度可以近似地按式(1-12)计算:

$$\mu = \frac{g_1 + g_2 + \cdots + g_n}{\frac{g_1}{\mu_1} + \frac{g_2}{\mu_2} + \cdots + \frac{g_n}{\mu_n}} \quad (1-12)$$

式中: μ ——混合气体在 0°C 时的动力粘度($\text{Pa} \cdot \text{s}$);

$g_1, g_2, \cdots, g_n$ ——各组分的质量成分(%);

$\mu_1, \mu_2, \cdots, \mu_n$ ——相应各组分在 0°C 时的动力粘度($\text{Pa} \cdot \text{s}$)。

混合气体的动力粘度和单一气体一样,也是随压力的升高而增大的,在绝对压力小于 1MPa 的情况下,压力的变化对动力粘度的影响较小,可不考虑。至于温度的影响,却不容许忽略。若仍然以 μ 表示 0°C 时混合气体的动力粘度,则 $t(^\circ\text{C})$ 时混合气体的动力粘度按式(1-13)计算:

$$\mu_t = \mu \frac{273 + C}{T + C} \left(\frac{T}{273} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (1-13)$$

式中: μ_t —— $t(^\circ\text{C})$ 时混合气体的动力粘度($\text{Pa} \cdot \text{s}$);

T ——混合气体的热力学温度(K);

C ——混合气体的无因次实验系数,可用混合法则求得。单一气体的 C 值可以查表得到。

液态碳氢化合物的动力粘度随分子量的增加而增大,随温度的上升而急剧减小。气态碳氢化合物的动力粘度则正相反,分子量越大,动力粘度越小,温度越上升,动力粘度越增大,这对于一般的气体都适用。

混合液体的动力粘度可以近似地按式(1-14)计算:

$$\frac{1}{\mu} = \frac{x_1}{\mu_1} + \frac{x_2}{\mu_2} + \cdots + \frac{x_n}{\mu_n} \quad (1-14)$$

式中: $x_1, x_2, \cdots, x_n$ ——各组分的分子成分(%);

$\mu_1, \mu_2, \cdots, \mu_n$ ——各组分的动力粘度($\text{Pa} \cdot \text{s}$);

μ ——混合液体的动力粘度($\text{Pa} \cdot \text{s}$)。

混合气体和混合液体的运动粘度为

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-15)$$

式中: ν ——混合气体或混合液体的运动粘度(m^2/s);

μ ——相应的动力粘度($\text{Pa} \cdot \text{s}$);

ρ ——混合气体或混合液体的密度(kg/m^3)。

4. 饱和蒸汽压及相平衡常数

(1) 饱和蒸汽压与温度的关系

液态烃的饱和蒸汽压简称蒸汽压,就是在一定温度下密闭容器中的液体及其蒸汽处于动态平衡时蒸汽所表示的绝对压力。

蒸汽压与密闭容器的大小及液量无关,仅取决于温度。温度升高时,蒸汽压增大。

(2) 混合液体的蒸汽压

根据道尔顿定律,混合液体的蒸汽压等于各组分蒸汽分压之和。根据拉乌尔定律,在一定温度下,当液体与蒸汽处于平衡状态时,混合液体上方各组分的蒸汽分压等于此纯组分在该温度下的蒸汽压乘以其在混合液体中的分子成分。

综上所述,混合液体的蒸汽压可由式(1-16)计算:

$$P = \sum P_i = \sum x_i P'_i \quad (1-16)$$

式中: P ——混合液体的蒸汽压(Pa);

P_i ——混合液体任一组分的蒸汽分压(Pa);

x_i ——混合液体中该组分的分子成分(%);

P'_i ——该纯组分在同温度下的蒸汽压(Pa)。

如果容器中为丙烷和丁烷所组成的液化石油气,当温度一定时,其蒸汽压取决于丙烷和丁烷含量的比例(图 1-4)。当使用容器中的液化石油气时,总是先蒸发出较多的丙烷,而剩余的液体中丙烷的含量渐渐减少,所以温度虽然不变,容器中的蒸汽压也会逐渐下降。

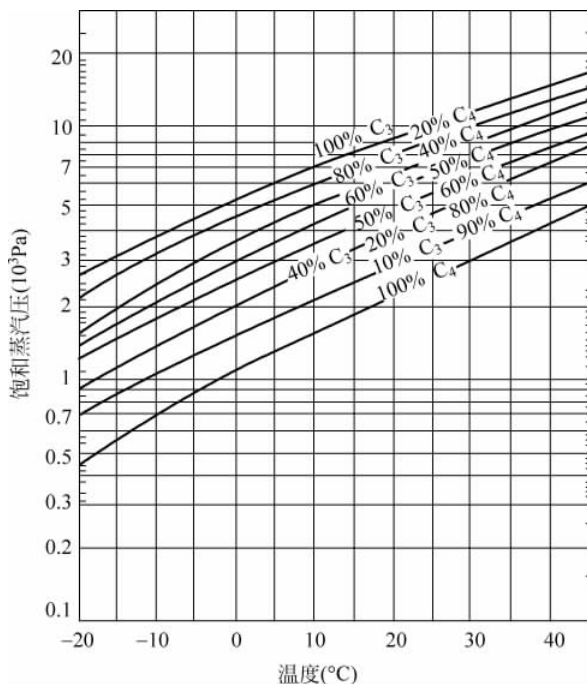


图 1-4 丙烷、正丁烷混合物的饱和蒸汽压