

第一章 液化石油气的基本特性

随着石油化学工业的发展，液化石油气作为一种化工生产的基本原料和新型燃料，已愈来愈受到人们的重视。在化工生产方面，液化石油气经过分离得到乙烯、丙烯、丁烯、丁二烯等，用来生产合成塑料、合成橡胶、合成纤维及生产医药、炸药、染料等产品。用液化石油气作燃料，由于其热值高、无烟尘、无灰渣，使用方便，已广泛地进入人们的生活领域。液化石油气还可以用来切割金属等；也可用于农产品的烘烤、工业窑炉的焙烧。可以预料，在科学技术高速发展的今天，液化石油气的用途将会越来越广泛。

液化石油气是一种低碳数的烃类混合物（在有机化学中，将碳氢化合物简称为烃，烃的字形即取碳字中的“火”和氢字中的“气”组合而成），它在常温常压下呈气体状态，只有在增加压力或降低温度的条件下，才变成液体，故称为液化石油气。构成液化石油气的主要成分是丙烷、正丁烷、异丁烷、丙烯、1-丁烯、顺-2-丁烯、反-2-丁烯和异丁烯等8种重碳氢化合物，俗称碳三（ C_3 ）和碳四（ C_4 ）以及少量的甲烷、乙烷、戊烷、乙烯和戊烯，俗称碳一（ C_1 ）、碳二（ C_2 ）和碳五（ C_5 ）。此外，还有微量的硫化物、水蒸气等非烃化合物。

第一节 液化石油气的来源与发展

一、液化石油气的来源

液化石油气目前主要来源于炼油厂石油气和油田伴生气，因此说液化石油气是一种石油产品。

1. 由炼油厂石油气中获取

炼油厂石油气是在石油炼制和加工过程中所产生的副产气体，其数量取决于炼油厂的生产方式和加工深度，一般约为原油重量的4%~10%左右。根据炼油厂的生产工艺，可分为蒸馏气、热裂化气、催化裂

化气、催化重整气和焦化气等 5 种。这 5 种气都含有 $C_1 \sim C_5$ 组分,利用分离吸收装置将其中的 C_3 、 C_4 组分分离提取出来,就获得液化石油气。目前,从炼油厂催化裂化气中回收液化石油气是国内民用液化石油气的主要来源。

2. 由油田伴生气中获取

在石油开采过程中,石油和油田伴生气同时喷出,利用装设在油井上面的油气分离装置,将石油与油田伴生气分离。油田伴生气中含有 5%左右的丙烷、丁烷组分,再利用吸收法把它们提取出来,可得到丙烷纯度很高而含硫量很低的高质量液化石油气。欧美、日本等国家供应的液化石油气,多数属于这种。

3. 由天然气中获取

天然气分为干气和湿气两种。湿气中的甲烷含量在 90%以下,乙烷、丙烷、丁烷等烷烃含量在 10%以上,若将湿气中的丙烷、丁烷等组分分离出来,就得到所需的液化石油气。

此外,还可在燃料加氢和半焦化制取人造石油的工厂中获取液化石油气。从水煤气生产合成汽油的工厂中,也能回收液化石油气。

液化石油气的质量与其来源和提取方法有关,一般从油田伴生气中获取的液化石油气的质量优于从炼油厂石油气中获取的液化石油气。

二、液化石油气的发展概况

液化石油气的问世和发展是同石油化学工业的发展分不开的。1892年,荷兰首先利用天然气进行试验,获得了液化甲烷,从而为石油气的液化奠定了理论基础。20世纪初叶,沃尔特斯林(Dr. Walter Snelling)博士对汽油进行稳定性试验,发现汽油挥发出来的气体在一定温度和压力条件下可凝结为液体,并成功地从天然气中提取了丙烷和丁烷。随后,德国、美国、日本、法国、意大利和东欧一些国家也相继生产和使用了液化石油气。近半个世纪以来,随着对石油资源的开发和炼油化工工业的发展,不仅石油资源丰富的国家的液化石油气有了迅速发展,而且一些资源贫缺的国家也大量地发展液化石油气。目前,已有 120 多个国家和地区自行生产或进口液化石油气用作燃料和

化工原料。美国液化石油气的年用量约 600kt，日本约为 200kt/a。

我国从 1965 年开始，在北京、天津、哈尔滨、沈阳、上海和南京等石油化学工业发达的城市，以及一些石油炼油厂所在地区，先后使用液化石油气作为民用燃料。此后各大城市相继建设了液化石油气民用供应系统。目前，我国东部地区的乡镇和中部地区的大多数县、乡镇城镇居民使用了液化石油气，并逐渐向农村发展。以山东省为例，全省平均每个乡镇建有一个液化石油气站。在作为燃料的使用方面，由于液化石油气气化率大、燃料热值高、且不含有毒成分，北京、上海、广州、青岛等城市已将其应用到市内公共汽车和出租汽车上替代汽油燃烧，一些大中城市也正在准备建设用于汽车使用的液化石油气加气站。另外在金属冶炼、瓷砖焙烧等工业窑炉上，也改用液化石油气来代替煤气或柴油。这对于降低空气污染、加强环境保护是十分有利的，也是液化石油气进一步发展的一大方向。

第二节 液化石油气的化学成分

液化石油气是由多种烃类气体组成的混合物。烃化学式的表示有分子式、结构式和示性式 3 种。分子式仅能表示分子中碳原子和氢原子在数量上的关系。结构式是把碳原子间及氢原子间用短线联接起来，表示分子中碳原子和氢原子的排列情况，包括碳原子之间的价键数和键的位置。示性式是简化的结构式，它省略了结构式中碳原子和氢原子之间的短线，并把连在每个碳原子上的氢原子都合并书写。结构式和示性式中原子之间的短线代表结合的共价键，碳原子之间为一条线表示一价键或单键，有两条线则表示二价键或双键。因此，烃按其分子结构的不同，可分为烷烃和烯烃等。

一、烷烃

烷烃化合物是构成液化石油气的主要化学成分，其分子通式可用 C_nH_{2n+2} ($n \geq 1$) 表示。在烃的分子里，碳的化合价是四价，氢的化合价是一价。烷烃中碳原子与碳原子之间以单键相结合，而其余的价键都与氢原子相连接，直至 4 个价键完全饱和为止，故烷烃又称饱和烃，其化学性质很不活泼。含有一个碳原子的烷烃称为甲烷，含有两个碳

原子的称为乙烷.....，以此类推（甲、乙、丙、丁、戊、己、庚、辛、壬、癸）。当碳原子数在十个以上时，就用对应的数字来表示，例如， C_3H_8 称为丙烷， $C_{12}H_{26}$ 称为十二烷，低级烷烃的化学式及常温时的状态见表 1-1。

表 1-1 几种低级烷烃的化学式及常温时的状态

名称	相对分子质量	分子式	结构式	示性式	状态
甲烷	16.043	CH_4	$\begin{array}{c} H \\ \\ H-C-H \\ \\ H \end{array}$	CH_4	气体
乙烷	30.07	C_2H_6	$\begin{array}{c} H & H \\ & \\ H-C & -C-H \\ & \\ H & H \end{array}$	CH_3-CH_3	气体
丙烷	44.097	C_3H_8	$\begin{array}{c} H & H & H \\ & & \\ H-C & -C & -C-H \\ & & \\ H & H & H \end{array}$	$CH_3-CH_2-CH_3$	气体
正丁烷	58.124	C_4H_{10}	$\begin{array}{c} H & H & H & H \\ & & & \\ H-C & -C & -C & -C-H \\ & & & \\ H & H & H & H \end{array}$	$CH_3-CH_2-CH_2-CH_3$	气体
异丁烷	58.124	C_4H_{10}	$\begin{array}{c} H & H & H \\ & & \\ H-C & -C & -C-H \\ & & \\ H & -C & -H \\ \\ H \end{array}$	$\begin{array}{c} H \\ \\ CH_3-C-CH_3 \\ \\ CH_3 \end{array}$	气体
正戊烷	72.151	C_5H_{12}	$\begin{array}{c} H & H & H & H & H \\ & & & & \\ H-C & -C & -C & -C & -C-H \\ & & & & \\ H & H & H & H & H \end{array}$	$CH_3-CH_2-CH_2-CH_2-CH_3$	液体
异戊烷	72.151	C_5H_{12}	$\begin{array}{c} H & H & H & H \\ & & & \\ H-C & -C & -C & -C-H \\ & & & \\ H & -C & -H \\ \\ H \end{array}$	$\begin{array}{c} CH_3-CH-CH_2-CH_3 \\ \\ CH_3 \end{array}$	液体

从丁烷开始，每一种烷烃虽然分子式相同，但是由于分子结构不同，即分子内部原子的排列顺序不同，因而具有不同的性质，这样的化合物称为同分异构体。例如，丁烷的同分异构体有正丁烷（碳原子的连接为直链）和异丁烷（碳原子的连接有支链）两种。

二、烯烃

烯烃的分子通式为 C_nH_{2n} ($n \geq 2$) 烯烃的分子结构与烷烃相似，也是有直链和直链上带有支链的，所不同的是在烯烃分子中含有碳碳双键 ($C=C$)。当分子中碳原子数目相同时，烯烃分子中的氢原子要比烷烃分子中的氢原子少。由于烯烃分子中碳原子的价键没有饱和，故烯烃又称为不饱和烃，其化学性质相当活泼。烯烃分子中双键的位置和碳键排列的结构不同，都会出现异构现象，所以它的同分异构体要比同样碳原子数目的烷烃多。烯烃的命名与烷烃相近，即含有两个碳原子的烯烃称为乙烯，含有 3 个、4 个碳原子的烯烃分别称为丙烯、丁烯。低级烯烃的化学式及常温时的状态见表 1-2。

表 1-2 几种低级烯烃的化学式及常温时的状态

名称	相对分子质量	分子式	结构式	示性式	状态
乙 烯	28.054	C_2H_4	$\begin{array}{c} H-C=C-H \\ \quad \\ H \quad H \end{array}$	$CH_2=CH_2$	气体
丙 烯	42.081	C_3H_6	$\begin{array}{c} H \quad H \\ \quad \\ H-C=C-C-H \\ \quad \\ H \quad H \end{array}$	$CH_2=CH-CH_3$	气体
1-丁烯	56.108	C_4H_8	$\begin{array}{c} H \quad H \quad H \\ \quad \quad \\ H-C=C-C-C-H \\ \quad \quad \\ H \quad H \quad H \end{array}$	$CH_2=CH-CH_2-CH_3$	气体
顺-2-丁烯	56.108	C_4H_8	$\begin{array}{c} H \quad H \quad H \quad H \\ \quad \quad \quad \\ H-C-C=C-C-H \\ \quad \quad \\ H \quad H \quad H \end{array}$	$CH_3-CH=CH-CH_3$	气体
反-2-丁烯	56.108	C_4H_8	$\begin{array}{c} H \quad H \quad H \\ \quad \quad \\ H-C-C=C-C-H \\ \quad \quad \\ H \quad H \quad H \end{array}$	$CH_3-CH=CH-CH_3$	气体

至破裂，因此，应尽量将其排除。

表 1-3 液化石油气质量要求

项 目	质量指标	试验方法
密度(15 C)/(kg/m ³)	报告	ZBE 46001
蒸气压(37.8 C)/MPa 不大于	1.38	GB 6602
C ₅ 及 C ₅ 以上组分含量/(% (体积分数) 不大于	3.0	SY 2081
残留物		SY 7509
蒸发残留物/(mL/100mL)	报告	
油渍观察值/mL	报告	
铜片腐蚀/级 不大于	1	SY 2083
总硫含量/(mg/m ³) 不大于	343	ZBE 46002
游离水	无	目测

第三节 液化石油气的物理特性

一、液化石油气的状态参数

液化石油气所处的状态，是通过压力、温度和体积等物理量来反映的，这些物理量之间彼此有一定的内在联系，称为状态参数。

1. 压力

压力是一物体垂直均匀地作用于另一物体壁面单位面积上力的量度。物理上用物体单位面积上受到的垂直压力来表示，称为压强，用符号 p 表示。

$$p = F/A$$

式中 p ——压强，Pa；

F ——均匀垂直作用在容器壁面的力，N；

A ——容器壁面的总面积，m²。

由于在工程实际中习惯地将压强称作压力，因此，本书中后面提到的压力，即指压强。

测量压力有两种标准方法：一种是以压力等于零作为测量起点，称为绝对压力，用符号“ $p_{\text{绝}}$ ”表示；另一种是以当时当地的大气压力作为测量起点，也就是压力表测量出来的数值，称为表压力，用符号“ $p_{\text{表}}$ ”表示。液化石油气站所用的压力都是表压力。

绝对压力与表压力之间的关系为：

绝对压力 = 表压力 + 当时当地大气压力

(1) 压力的单位 我国现行的法定压力计量单位是国际单位制导出的压力单位，即：帕斯卡 (Pa)， $1\text{Pa}=1\text{N}/\text{m}^2$ 。由于帕斯卡的单位太小（如：一粒西瓜子平放时对桌面的压力约为 20Pa ）在实际中常使用兆帕斯卡 (MPa)，千帕斯卡 (kPa)。其关系为：

$$1\text{MPa}=10^3\text{kPa}=10^6\text{Pa}$$

(2) 压力单位的换算 在采取国际单位制以前，我国惯用的压力单位有：标准大气压、工程大气压、毫米汞柱、毫米水柱及英制压力单位等，其与法定单位的换算关系，见表 1-4。

表 1-4 各种压力单位的换算

压力单位	kgf/cm ²	Pa	bar	mmHg	lbf/in ²	mmH ₂ O
kgf/cm ²	1	9.81×10^4	0.981	735.6	14.22	10^4
1Pa	1.02×10^{-5}	1	10^{-5}	7.5×10^{-3}	145×10^{-6}	0.102
1bar	1.02	10^5	1	750	14.5	1.02×10^4
1mmHg ($t=0^\circ\text{C}$)	1.36×10^{-3}	133.3	1.333×10^{-3}	1	19.34×10^{-3}	13.6
1 lbf/in ²	70.3×10^{-3}	6.89×10^3	6.89×10^{-2}	51.71	1	703
1mmH ₂ O ($t=4^\circ\text{C}$)	10^{-6}	9.81	9.81×10^{-5}	7.356×10^{-2}	1.422×10^{-3}	1

2. 温度

温度是物质分子进行热运动的宏观表现，它是对物体冷热程度的量度。测量温度的标尺称为温标。温标的规定是选取某物质两个恒定的温度为基准点，在此两点之间加以等分，来确定温度单位尺度，称为度。

由于对两个基准点之间所作的等分不同，因此出现了各种不同的温度单位。常用的有摄氏温标 (C)、华氏温标 (F) 和开氏温标 (K)。

上述 3 种温标的相互关系，如图 1-1 所示。

3 种温标的相互关系用公式表示为：

$$n\text{C} = \left(\frac{5}{9}n + 32 \right) \text{F} = (n + 273.15) \text{K}$$

$$n^{\circ}\text{F} = \frac{5}{9}(n - 32)^{\circ}\text{C} = \left[\frac{5}{9}(n - 32) + 273.15 \right] \text{K}$$

$$n^{\circ}\text{K} = (n - 273.15)^{\circ}\text{C} = \left[\frac{5}{9}(n - 273.15) + 32 \right] ^{\circ}\text{F}$$

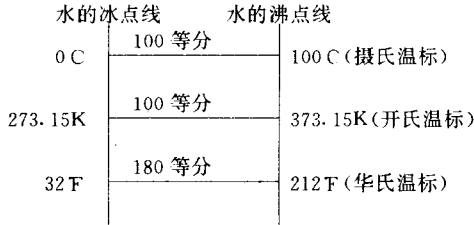


图 1-1 3 种温标的关系

3. 体积

体积是指一定数量的物质占据空间位置的大小。由于气体总是要充满所盛装的容器，所以气体的体积由盛装容器的容积来决定。

体积常用的单位是立方米 (m^3) 和升 (L)。

$$1\text{m}^3 = 1000\text{L}$$

二、液化石油气的物理特性

1. 比体积、密度和相对密度

(1) 比体积 是指单位质量的某种物质所占有的体积，用符号 v 表示，其表达式为：

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

式中 v ——某种物质的比体积， m^3/kg ；

V ——该物质的体积， m^3 ；

m ——该物质的质量， kg 。

(2) 密度 密度是指单位体积的某种物质所具有的质量。由于液化石油气的生产、储存和使用中经常呈现气态和液态两种状态，因此液化石油气的密度就有气体的密度和液体的密度两种之分。

a. 液化石油气气体的密度 其单位是以 kg/m^3 表示。它随着温度和压力的不同而发生变化。因此在表示液化石油气气体的密度时，必

须规定温度和压力的条件。表 1-5 给出了一些碳氢化合物在不同温度及相应饱和蒸气压下的密度。

表 1-5 一些碳氢化合物在不同温度及相应饱和蒸气压下的密度/(kg/m³)

温度/℃	丙 烷	正丁烷	异丁烷
-15	6.4	1.06	2.50
-10	7.57	1.85	3.04
-5	9.05	2.10	3.59
-0	10.34	2.82	4.31
5	11.90	3.35	5.07
10	13.60	3.94	5.92
15	15.51	4.65	6.95
20	17.74	5.39	7.94
25	20.15	6.18	9.21
30	22.80	7.19	11.50
35	25.30	8.17	13.00
40	28.60	9.33	14.70
45	34.50	10.57	16.80
50	36.80	12.10	18.94
55	40.22	12.38	20.56
60	44.60	15.40	24.20

从表 1-5 中可以看出，气态液化石油气的密度随着温度及相应饱和蒸气压的升高而增加。

在压力不变的情况下，气态物质的密度随温度的升高而减少，表 1-6 给出了 101.3kPa 下一些气态碳氢化合物的密度。

表 1-6 一些碳氢化合物在 101.3kPa 下的密度/(kg/m³)

温度/℃	甲烷	乙烷	乙烯	丙烷	丙烯	正丁烷	异丁烷	1-丁烯
0	0.7168	1.3562	1.2604	2.02	1.9149	2.5985	2.6726	2.503
15	0.677	1.269	1.184	1.861	1.766	2.452	2.442	2.369

b. 液化石油气液体的密度 以单位体积的质量表示，即 kg/m³。它的密度受温度影响较大，温度上升密度变小，同时体积膨胀。由于液体压缩性很小，因此压力对密度的影响也很小，可以忽略不计。由表 1-7 可以看出，液化石油气液态的密度随温度升高而减少。

表 1-7 液化石油气液态的密度 / (kg/m³)

温度/°C	丙烷	正丁烷	异丁烷	丙烯	丁烯
-15	548	615	600	567	634
-10	542	611	594	561	629
-5	535	605	588	552	624
0	523	600	582	545	619
5	521	596	576	538	612
10	514	591	570	531	606
15	507	583	565	524	600
20	499	578	560		
25	490	573	553		
30	483	568	546		
35	474	562	540		
40	464	556	534		
45	451	549	527		
50	446	542	520		

(3) 相对密度 由于在液化石油气的生产、储存和使用中，同时存在气态和液态两种状态，所以应该了解它的液态相对密度和气态的相对密度。

a. 液化石油气的气态相对密度 是指在同一温度和同一压力的条件下，同体积的液化石油气气体与空气的质量比。求液化石油气气体各组分相对密度的简便方法，是用各组分的相对分子质量与空气平均相对分子质量之比求得，因为在标准状态下 1mol 气体的体积是相同的。表 1-8 给出了液化石油气的相对密度。

表 1-8 液化石油气气态的相对密度 (0°C 101.3kPa)

名 称	分 子 式	相对分子质量	空气平均相对分子质量	相对密度
丙 烷	C ₃ H ₈	44	29	1.517
丁 烷	C ₄ H ₁₀	58	29	2.000
丙 烯	C ₃ H ₆	42	29	1.448
丁 烯	C ₄ H ₈	56	29	1.931
戊 烯	C ₅ H ₁₀	72	29	2.483

从表 1-8 中可以看出液化石油气气态比空气重 1.5~2.5 倍。由于液化石油气比空气重，因此一旦液化石油气从容器或管道中泄漏出来，

它不像相对密度小的可燃气体那样容易挥发与扩散，而是像水一样往低处流动和滞存，很容易达到爆炸浓度。因此用户在安全使用中必须充分注意，厨房不应过于狭窄，通风换气要良好。液化石油气站内不应留有井、坑、穴等。对设计的水沟、水井、管沟必须密封，以防聚积，引起火灾。

b. 液化石油气液体的相对密度 指在规定温度下液体的密度与规定温度下水的密度的比值。它一般以 20℃或 15℃时的密度与 4℃或 15℃时纯水密度的比值来表示。

液化石油气液态的相对密度，随着温度的上升而变小，如表 1-9 所示。

表 1-9 液化石油气液态各组分相对密度

温度/℃	丙 烯	丙 烷	正丁烷	异丁烷	1-丁烯
-20	0.573	0.544	0.621	0.603	0.641
-10	0.559	0.541	0.611	0.592	0.630
0	0.545	0.528	0.601	0.581	0.619
10	0.530	0.514	0.590	0.569	0.607
20	0.513	0.500	0.578	0.557	0.595

从表 1-9 中看出，在常温下（20℃左右）液化石油气液态各组分的相对密度约为 0.5~0.59 之间，接近为水的一半。当液化石油气中含有水分时，水分就沉积在容器的底部，并随着液化石油气一起输送到用户，这样既增加了用户的经济负担，又会引起容器底部腐蚀，缩短容器的使用期限。因此液化石油气中的水分要经常从储罐底部的排污阀放出。

2. 体积膨胀系数

绝大多数物质都具有热胀冷缩的性质，液化石油气也不例外，受热会膨胀，温度越高，膨胀越大。膨胀的程度是用体积膨胀系数来表示的。所谓体积膨胀系数，就是指温度每升高 1℃ 液体增加的体积与原来的体积的比值。液体的体积随温度升高的膨胀量可用下式计算。

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

式中 V_1 、 V_2 ——液体在温度 t_1 、 t_2 时的体积， m^3 ；

α ——液体温度由 t_1 至 t_2 时的平均体积膨胀系数， $1/^\circ\text{C}$
见表 1-10。

表 1-10 液化石油气组分及水的体积膨胀系数/ $^\circ\text{C}^{-1}$

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

由表 1-10 可知，液化石油气液体的体积膨胀系数比水大十几倍，且随温度的升高而增大，因此液化石油气在充装作业中必须限制充装量。

3. 体积压缩系数

对于满液的容器，当温度升高时，液体的体积会膨胀，但由于受到容器容积的限制，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。表 1-11 列出了液化石油气（65%丙烷 + 35%异丁烷）的体积膨胀系数、体积压缩系数及其比值。

表 1-11 液化石油气体积膨胀系数、体积压缩系数及其比值

温度/ $^\circ\text{C}$	体积膨胀系数/ $^\circ\text{C}^{-1}$	体积压缩系数/ MPa^{-1}	比值/ $(\text{MPa}/^\circ\text{C})$
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

由表 1-11 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容积增量，则容器在满液情况下，温度一旦升高，就使得容器内压力急剧升高。

4. 饱和蒸气压

自然界中的物质所呈现的聚集状态，有气态、液态和固态 3 种，其中任何一种状态只能在一定的条件下（温度、压力）存在。当条件发

生变化时，物质分子间的相互位置就要发生相应的变化，即表现为聚集状态的改变。物质的聚集状态在热力学上称为相，如液态称为液相，气态称为气相。在密封容器中，气相和液相达到动态平衡时的状态称为饱和状态。在饱和状态下，液体和其蒸气处于平衡共存状态，也就是说液相蒸发成气体的速度和气相凝结成液体的速度相等，此时气体中分子数不再增加，液体中分子数不再减少。

饱和状态时的液体称为饱和液体，饱和状态时的蒸气称为饱和蒸气，饱和蒸气所显示出来的压力称为饱和蒸气压。液化石油气各组分在不同温度下的饱和蒸气压见表 1-12。

由表 1-12 可以看出，液化石油气的蒸气压是随温度而变化的，温度升高，蒸气压增大。另外液化石油气的蒸气压和组分有关，随着碳原子数的增加，蒸气压则减小。对于液化石油气来说，常温下，容器内部液化石油的压力总比外界大气压力大的多，所以液化石油气一定要在密闭的、具有足够强度的容器中储存。

表 1-12 液化石油气在不同温度下各种组分的蒸气压 / MPa

温度/℃	丙烷	丙烯	正丁烷	异丁烷	1-丁烯	顺-2-丁烯	反-2-丁烯	异丁烯
-20	0.232	0.302	0.045	0.069	0.056			0.062
-15	0.253	0.355	0.055	0.086	0.609	0.045	0.051	0.072
-10	0.332	0.415	0.067	0.105	0.084	0.056	0.064	0.087
-5	0.391	0.486	0.082	0.126	0.103	0.070	0.077	0.106
0	0.457	0.564	0.100	0.150	0.125	0.085	0.095	0.128
5	0.533	0.562	0.121	0.179	0.149	0.103	0.115	0.152
10	0.617	0.750	0.143	0.211	0.179	0.124	0.137	0.181
15	0.711	0.857	0.171	0.247	0.211	0.148	0.163	0.213
20	0.817	0.973	0.201	0.288	0.247	0.176	0.193	0.256
25	0.933	1.11	0.235	0.335	0.289	0.207	0.227	0.291
30	1.06	1.26	0.275	0.387	0.336	0.242	0.265	0.338
35	1.20	1.42	0.318	0.433	0.388	0.282	0.307	0.391
40	1.36	1.59	0.367	0.503	0.447	0.327	0.335	0.449
45	1.52	1.78	0.421	0.579	0.512	0.376	0.408	0.514
50	1.71	1.99	0.481	0.656	0.583	0.431	0.466	0.587

5. 沸点和露点

(1) 沸点 在一定的压力下，液体表面不断蒸发变为气体的过程称为汽化。随着液体温度逐渐升高，汽化速度不断加快。当温度达到

某一定值时，则不仅液体表面，而且内部也同时进行剧烈的汽化。这种液体内部出现上下翻滚的汽化现象称为沸腾。液体在 101.3kPa 下达到沸腾时的温度称为沸点。液体在沸腾过程中，由外界吸收的热量全部用于汽化，因而温度停留在沸点不再升高，直至液体全部变成气体为止。液化石油气各组分在 101.3kPa 时的沸点见表 1-13。

表 1-13 液化石油气各组分在 101.3kPa 时的沸点

组 分	丙烷	丙烯	正丁烷	异丁烷	1-丁烯	顺-2-丁烯	反-2-丁烯	异丁烯	正戊烷
沸点/℃	-42.1	-47.0	-0.5	-11.7	-6.26	3.75	0.88	-6.9	36.2

由表 1-13 可知，碳氢化合物的沸点有如下特点。

a. 分子中碳原子数越多，沸点越高。如：丙烷的沸点为 -42.1℃ ，正丁烷的沸点则为 -0.5℃ 。

b. 当碳原子数相同时，多数烷烃的沸点比烯烃的沸点高。如：丙烷的沸点为 -42.1 ，则丙烯的沸点为 -47.0℃ 。

c. 正构物的沸点比异构物的沸点高。如：正丁烷的沸点为 -0.5℃ 。则异丁烷的沸点为 -11.7℃ 。

d. 沸点越低的烃越难于液化。如果要液化它需要低的温度或者更高的压力。

e. 沸点越低的烃越容易汽化。如：丙烷的沸点为 -42.1℃ ，在常温下呈气态，即使在严冷的冬季也很容易汽化。正戊烷的沸点为 36.2℃ 。即使在酷热的夏天也很难汽化。

f. 压力增高，沸点也提高。如：丙烷在常压下沸点为 -42.1℃ ，而当压力增至 0.82MPa 时，沸点相应提高到 20℃ 。

(2) 露点 露点是指气态液化石油气加压或冷却时，使之液化成液滴的温度。液化石油气各组分的露点实际上就是各组成液体在饱和蒸气压力下所对应的饱和温度（见表 1-12），也就是各组成液体在饱和蒸气压力下的沸点（见表 1-13）。露点是对蒸气而言，沸点是对液体而言，两者在数值上相等。

6. 汽化潜热

液态变成气态时，需要吸收热量，气态变成液态时将放出热量，这

些热量只用来改变物质的状态（发生相变），而温度不发生变化，因此称之为潜热。汽化潜热就是在一定温度下，一定数量的液体变为同温度的气体所吸收的热量。

不同的液体有不同的汽化潜热，即使是同一液体，其汽化潜热也随沸点不同而发生变化。当液体的沸点上升时汽化潜热相应减少，在临界温度时汽化潜热为零。图 1-2 给出了一些液化石油气各组成的汽化潜热值。

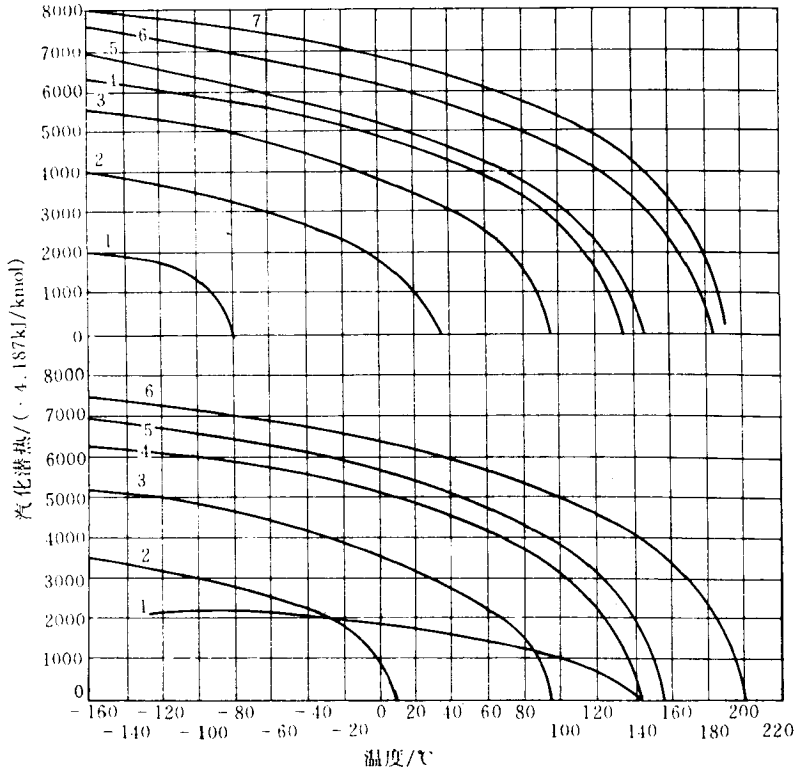


图 1-2 液化石油气各组成的汽化潜热

- (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

由于液化石油气的汽化潜热比较大，因此在生产、储存、灌装、使用中要严禁使液态的石油气直接接触人体，以免皮肤被吸收大量的热量，而造成严重冻伤。

液化石油气各组分的物理、化学性质见表 1-14。

表 1-14 液化石油气各组分的物理化学性质

项 目	甲 烷	乙 烷	丙 烷	正丁烷	异丁烷
分子式	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	n-C ₄ H ₁₀	i-C ₄ H ₁₀
相对分子质量	16.04	30.07	44.004	58.12	58.12
蒸气压/MPa					
0 C		2.43	0.476	0.104	0.107
20 C		3.75	0.8104	0.203	0.299
气体密度/(kg/m ³)					
0 C	0.7168	1.3562	2.020	2.5985	2.6726
15.5 C	0.677	1.269	1.860	2.452	2.452
沸点(0.1013MPa)/C	-161.5	-88.63	-42.07	-0.5	-11.73
汽化潜热(沸点及 0.1013MPa 下)/ (kJ/kg)	569.4	489.9	427.1	386.0	367.6
临界温度/C	-82.5	32.3	96.8	152.0	134.9
临界压力/MPa	4.64	4.88	4.25	3.80	3.66
临界密度/(kg/L)	0.162	0.203	0.236	0.227	0.233
低热值(0.1013MPa, 15.6 C)/(kJ/ kg)					
液 态			46099	45458	45375
气 态	34207	60753	88388	115561	115268
气态比热容(0.1013MPa, 15.6 C)/ [kJ/(kg·K)]					
定压比热容	2.21	1.72	1.63	1.66	1.62
定容比热容	1.68	1.44	1.44	1.52	1.47
爆炸极限(体积分数)/%					
下 限	5.3	3.2	2.37	1.86	1.80
上 限	14.0	12.5	9.50	8.41	8.44

第四节 液化石油气的燃烧与爆炸

一、液化石油气的燃烧

1. 燃烧的条件

燃烧是一种同时伴有发光、发热的激烈的氧化反应。发光、发热