

燃气汽车及加气站技术

RANQI QICHE JI JIAQIZHAN JISHU

冯幸福 吴同起 主编



電子工業出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

URL: <http://www.phei.com.cn>

燃气汽车及加气站技术

冯幸福 吴同起 主编

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书对液化石油气、天然气的基础知识作了系统的介绍,对气体燃料发动机和燃气汽车系统的构造、原理、安装、使用维护以及车用液化石油气加气站、天然气加气站的工艺设计、安装、维护作了详细的阐述,同时还编辑了国内外部分相关的政策、法规及标准。

本书内容翔实,由浅入深,通俗易懂,注重原理、构造和应用实例,具有较强的实用性,可供广大从事燃气汽车研究试验、制造、安装和使用维护的科技人员、生产技术人员阅读,也可作为相关专业的培训教材。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,翻版必究。

图书在版编目(CIP)数据

燃气汽车及加气站技术/冯幸福等主编. - 北京:电子工业出版社,2001.2

ISBN 7-5053-6528-2

I. 燃… II. 冯… III. ① 汽车,液化石油气-基本知识 ② 汽车,天然气-基本知识 ③ 汽车-可燃气体-燃料-供应站-基本知识 IV. U469.75

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 06282 号

书 名: 燃气汽车及加气站技术

主 编: 冯幸福 吴同起

责任编辑: 杨逢仪 张来盛

排版制作: 电子工业出版社计算机排版室

印 刷 者: 北京民族印刷厂

装 订 者: 河北省涿州桃园装订厂

出版发行: 电子工业出版社 URL: <http://www.phei.com.cn>

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销: 各地新华书店

开 本: 787×1092 1/16 印张: 24.5 插页: 3 页 字数: 625.6 千字

版 次: 2001 年 2 月第 1 版 2001 年 2 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-5053-6528-2
Z·358

印 数: 6 000 册 定价: 50.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页、所附磁盘或光盘有问题者,请向购买书店调换;
若书店售缺,请与本社发行部联系调换。电话 68279077

《燃气汽车及加气站技术》编委会

主 任：郑树森

副 主 任：张奎福 兰 荣 冯幸福 韩秀荣 蒋伯勤

委 员：(按姓氏笔画为序)

汤 森 杨青山 吴同起 张 欣 张宝良 季 伟
郑富强 崔允富 黄明珠 詹玉顺 薛 明

《燃气汽车及加气站技术》编著组

主 编：冯幸福 吴同起

副 主 编：詹玉顺 张 欣 陈侃默 张海辉 张良琛

编著成员：(按姓氏笔画为序)

皮静懿 史志安 吕 岩 刚永兰 李国岫 邹士奎
杜小宏 黄海波 韩力文 曾庆亚 薛 明

序

城市经济迅速发展导致的机动车快速增长,使城市的基础设施建设和环境保护必须采取有效的应对措施。近年来,各地为控制汽车尾气排放所造成的空气污染,采取了许多行之有效的措施,开展了“清洁汽车行动”,以天然气和液化石油气取代燃油的新技术、新工艺发展很快,尤以城市公共交通行业中以气代油的公共汽车、出租汽车起步最快,取得了明显的效果。

为了推广燃气汽车的应用,中国城市公共交通协会组织了一批经验丰富的专家、学者,编著了《燃气汽车及加气站技术》一书,供有关人士参考。这是一件十分有意义且相当及时的工作。燃气汽车的使用和加气站的建设必须实行积极稳妥、安全第一的方针,从业人员和建设者必须掌握相应的基本知识、标准规范和工作要领。这本书的出版既为燃气汽车的推广工作提供了方便,也为岗位培训提供了合适的教材。

谨向为编著本书付出了辛勤劳动的专家、学者和为出版本书提供了支持和帮助的有关单位表示衷心的感谢。

赵宝江

2000年12月10日

本序作者赵宝江为建设部副部长,中国城市公共交通协会名誉理事长。

前 言

21 世纪人类面临着能源短缺和日益恶化的环境污染。为解决这些问题,走可持续发展道路,人们正在寻找一条既能合理利用能源,又能保护生态环境的途径。

燃气汽车的发展为油品短缺和环境保护提供了广阔空间与良好契机,特别是近十年来,燃气汽车发展较快,在一些发达国家已形成一定的产业规模。到目前为止,世界上已建成液化石油气、天然气加气站 3 万多座,燃气汽车发展到 600 多万辆。

近两三年来,我国燃气汽车备受青睐,发展势头强劲。据不完全统计,到 1999 年末,全国已建成液化石油气站、天然气站 200 多座,投入运行的燃气汽车达 5 万多辆。由于我国燃气汽车起步较晚,国内有关燃气汽车方面的资料甚少,不能满足广大用户的需求。为此,我们特编写了本书(考虑到行业习惯,书中个别地方采用了英制单位),以便让读者尽快掌握燃气汽车方面的知识。

本书由长期从事该行业教学、科研应用与维修工作的具有丰富实践经验的专家、教授和工程技术人员执笔,务求数据可靠,内容翔实,图文并茂。在编排顺序上循序渐进:第一章介绍液化石油气和天然气基本知识;第二章至第五章分别介绍气体燃料发动机的结构与原理、燃气汽车、车用液化石油气加气站和车用天然气加气站。为方便读者参考,附录中提供了国家部、委、局有关文件,部分燃气汽车示范城市发展规划及优惠政策,部分国家标准和部颁标准,以及国内外几家主要企业简介。书中许多章节在国内是首次编写,填补了我国在该图书领域里的空白。

在编写本书过程中借鉴和参考了大量的国内外有关资料及书籍,在此向有关作者致以诚挚的谢意! 建设部副部长赵宝江同志百忙之中为本书作序,在此深表感谢。

由于编者水平有限,本书在编写过程中难免出现错误,敬请批评指正。

编 者

2000 年 10 月

目 录

第一章 液化石油气和天然气基本知识	(1)
第一节 燃气的组分和来源	(1)
一、液化石油气组分和来源	(1)
二、天然气组分和来源	(1)
第二节 燃气的物理性质	(2)
一、密度和相对密度	(2)
二、颜色、气味和毒性	(3)
三、沸点和露点	(4)
四、比热容和汽化潜热	(4)
五、体积膨胀系数	(6)
六、饱和蒸气压	(6)
七、临界状态	(6)
第三节 燃气的燃烧特性	(7)
一、燃烧及其条件、形式和种类	(7)
二、热值、燃烧温度及燃烧产物	(9)
三、爆炸及爆炸极限	(10)
四、车用液化石油气和天然气燃料的特点	(11)
第四节 燃气的质量要求	(12)
一、液化石油气的质量要求	(12)
二、天然气的质量要求	(13)
三、燃气加臭的意义	(14)
第五节 燃气的储存和运输	(14)
一、液化石油气的运输	(14)
二、液化石油气的储存	(18)
三、天然气的输送	(19)
四、天然气的储存	(20)
第二章 气体燃料发动机的结构与原理	(21)
第一节 内燃机的基本工作原理	(21)
一、单缸往复式活塞式内燃机工作原理	(22)
二、发动机主要性能指标与特性	(26)
三、发动机排气有害成分的形成机理	(29)
第二节 两用燃料发动机	(33)
第三节 气体燃料发动机	(35)
一、基于汽油机原型的单燃料天然气发动机	(36)
二、基于柴油机原型的单燃料天然气发动机	(40)
第四节 双燃料发动机的结构与原理	(51)
一、概述	(51)
二、双燃料发动机的分类	(51)

三、柴油-天然气双燃料发动机结构与工作原理	(52)
四、柴油-液化石油气双燃料发动机的结构与性能研究	(62)
第五节 气体燃料发动机新技术	(63)
一、天然气发动机增压技术	(63)
二、废气再循环技术(EGR)	(63)
三、催化转换技术	(64)
四、天然气发动机缸内直接喷射技术	(64)
五、进气节流技术	(67)
六、可变气门定时技术	(67)
七、可变几何涡轮增压器技术	(67)
八、进气预热、层状充量和跳缸点火技术	(67)
九、微量引燃喷射技术	(68)
十、预燃室喷射技术	(68)
第三章 燃气汽车	(69)
第一节 燃气汽车概述	(69)
一、燃气汽车分类	(69)
二、燃气汽车术语	(69)
第二节 压缩天然气汽车	(70)
一、典型压缩天然气汽车	(70)
二、压缩天然气汽车燃气系统	(72)
三、压缩天然气汽车专用装置	(76)
四、压缩天然气汽车专用装置有关计算	(95)
五、压缩天然气汽车专用装置安装工艺流程图	(100)
六、压缩天然气汽车专用装置改装生产、检验流程表	(100)
七、压缩天然气汽车专用装置安装重点工序质量控制表	(101)
八、压缩天然气汽车保养制度	(102)
九、压缩天然气汽车常见故障及原因(以 CYTZ-100 型为例)	(102)
第三节 液化石油气汽车	(107)
一、典型的液化石油气汽车	(107)
二、液化石油气汽车燃气系统	(108)
三、液化石油气汽车专用装置	(112)
四、液化石油气汽车专用装置安装工艺及检验	(118)
五、液化石油气汽车保养	(119)
六、液化石油气汽车常见故障分析及排除	(122)
第四节 安装燃气汽车专用装置的原车技术条件	(125)
第五节 燃气汽车驾驶员操作规程	(126)
一、充装燃气时的要求	(126)
二、出车前例检	(126)
三、发动机起动操作要求	(126)
四、行驶中的要求	(126)
五、行驶中出现故障的紧急处理	(127)
六、停驶时要求	(127)
七、汽车检修要求	(127)

第六节 燃气汽车常见故障诊断排除流程图	(128)
一、起动困难	(128)
二、怠速不稳	(128)
三、动力不足	(129)
四、燃料经济性差	(129)
五、加速性不好	(129)
六、燃料转换控制电路检修	(129)
第四章 车用液化石油气加气站	(133)
第一节 液化石油气加气站基本要求	(133)
一、液化石油气加气站分类	(133)
二、液化气加气站的功能	(135)
三、液化气加气站的建设规划和选址	(135)
第二节 液化石油气加气站设计	(136)
一、液化石油气加气站规模	(136)
二、加气站总平面布置和建筑设计	(137)
三、典型液化石油气加气站介绍	(138)
四、液化石油气加气站电器设计	(147)
五、液化石油气加气站消防设计	(148)
第三节 液化石油气加气站设备	(148)
一、加气机	(148)
二、充装泵	(153)
三、卸车泵	(157)
四、储罐	(158)
五、阀门管件	(160)
六、液化石油气加气站仪表	(163)
第四节 液化石油气加气站设备安装	(165)
一、储罐安装	(165)
二、加气机安装	(167)
三、充装泵安装	(169)
四、卸车泵安装	(170)
五、工艺系统调试	(172)
第五章 车用天然气加气站	(177)
第一节 车用天然气加气站介绍	(177)
一、天然气加气站概述	(177)
二、常规加气站	(178)
三、母站	(182)
四、子站	(193)
第二节 天然气加气站主要设备	(197)
一、天然气净化设备	(197)
二、压缩机	(201)
三、控制系统	(217)
四、储气瓶组	(219)

五、子站车	(220)
六、加气机和计量设备	(220)
七、附机设备	(224)
第三节 天然气加气站设计和建设	(224)
一、加气站站址选择	(224)
二、工艺设计	(226)
三、加气站配套设施	(228)
四、施工与验收	(229)
第四节 天然气加气站的使用和维护	(231)
一、天然气加气站维护的基础知识	(231)
二、天然气加气站设计和维护注意事项	(233)
附录 A 国内发展燃气汽车有关文件和相关政策	(236)
附录 B 国外发展燃气汽车的相关优惠政策及法规简介	(285)
附录 C 相关标准	(297)
附录 D 相关企业简介	(376)
参考文献	(381)

第一章 液化石油气和天然气基本知识

第一节 燃气的组分和来源

一、液化石油气组分和来源

液化石油气主要是由碳和氢两种元素构成的碳氢化合物的混合物,其来源可以从石油炼制中提取,也可从油田伴生气或天然气中获得。我国目前各地广泛使用的液化石油气主要是从炼油厂催化裂化装置中获得的。油田气或凝析气田气中含有相当数量的烃类,也可分离回收液化石油气。

液化石油气主要组分为丙烷、丙烯、丁烷、丁烯等石油系轻烃类,详见表 1-1,在常温、常压下液化石油气呈气态,但加压或冷却后很容易液化。石油气液化后,其体积约为气态时的 1/250。

表 1-1 液化石油气主要成分

产 地	主要成分%					其他
	C_3H_8	C_3H_6	C_4H_{10}	C_4H_8	$C_2H_6 + C_2H_4$	
南京石油化工厂	18.17	23.06	29.04	26.45	1.28	2.0
大庆炼油厂	13.60	50.90	—	31.80	0.20	3.5
锦州石油六厂	8.50	24.50	23.90	33.40	1.30	8.4

二、天然气组分和来源

天然气是指地下多孔地质构造中发现的自然形成的烃类气体和蒸气的混合气体,有时也含有一些杂质,主要组分是低分子烷烃。天然气一般可分为四种:从气田开采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,含石油轻质馏分的凝析气田气以及从井下煤层抽出的矿井气。

气田气组分以甲烷为主,也含少量的 CO_2 、 H_2S 、 N_2 和微量的惰性气体,详见表 1-2。我国四川、海南等地的天然气属于这一类,其中甲烷含量一般不少于 90%,发热值为 34 800~36 000 kJ/m^3 。天津、大庆等地使用的天然气是伴生气,甲烷含量约为 80%,其他烷烃占 15%,热值较高,大约为 41 900 kJ/m^3 。气田气除含有大量甲烷外,还含有 2%~5% 戊烷及戊烷以上的烃类,热值更高。矿井气的主要可燃成分是甲烷,其含量视抽气方式不同而变化,热值一般较低。抚顺、鹤壁等矿区使用这种矿井气多年。

天然气可以压缩或液化,在 25 MPa 压缩状态下的天然气体积接近标准状态下的 1/300。液态天然气的体积为标准状态时体积的 1/625,有利于储存和用车辆或船舶长途输送,使不生产天然气的地区也能使用到天然气。

根据天然气的组成既可将天然气分为干气、湿气、贫气和富气,又可分为酸性天然气和洁气。结合我国情况,参考国外资料,其定义如下。

表 1-2 各种天然气成分

产地	CH ₄	C ₃ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C _m H _n	H ₂	H ₂ S	CO ₂	N ₂
四川气田天然气	97.20	0.70	0.20	—	—	0.10	0.10	1.0	0.70
四川油田天然气	76.29	11.0	6.0	4.0	—	—	—	1.36	0.71
大庆天然气	91.05	1.64	2.70	2.23	1.09	—	—	—	—

干气：每 1 m³ (压力为 0.1 MPa、温度为 20℃ 的状态) 井口流出物中, C₅ 以上重烃液体含量低于 13.5 cm³ 的天然气。

湿气：每 1 m³ 井口流出物中, C₅ 以上重烃液体含量超过 13.5 cm³ 的天然气, 一般湿气需分离出液态烃产品 and 水分后才能进一步加工利用。

富气：每 1 m³ 井口流出物中, C₃ 以上烃类液体含量超过 94 cm³ 的天然气。

贫气：每 1 m³ 井口流出物中, C₃ 以上烃类液体含量低于 94 cm³ 的天然气。

酸性天然气：含有显著 H₂S 和 CO₂ 等酸性气体, 需进行净化处理才能达到管输标准的天然气。

洁气：H₂S 和 CO₂ 含量甚微, 不需进行净化处理的天然气。

第二节 燃气的物理性质

一、密度和相对密度

燃气的生产、储存和使用, 包括有液态和气态及其相互的变化, 所以密度和相对密度包括气体和液体两种状态。

液体的密度是指单位体积内液体的质量。液体的相对密度是指在同一温度压力条件下, 液体与同体积水的密度之比。气体的密度是指单位体积内气体的质量。在压力不变的情况下, 气体的密度随温度升高而减少。气体的相对密度是指在同一温度压力条件下, 气体与同体积的空气质量比。

标准状态是指 0℃ 和大气压为 101 325 Pa (1 标准大气压) 时的状态。一些碳氢化合物密度见表 1-3。

表 1-3 一些碳氢化合物在标准状态下的密度

甲烷	丙烷		正丁烷		异丁烷		乙烯	丙烯	丁烯
气态 kg/m ³	液态 kg/L	气态 kg/m ³	液态 kg/L	气态 kg/m ³	液态 kg/L	气态 kg/m ³	液态 kg/L	液态 kg/L	液态 kg/L
0.717	0.529	2.010	0.600	2.703	0.582	2.691	0.345	0.545	0.619

1. 气体的密度、比容、相对密度

气体的密度是指单位体积内气体的质量。压力不变的情况下, 气体的密度随温度升高而减少。

密度习惯上采用的符号 ρ , 比容采用的符号 v 。

混合气体的密度计算公式如下：

$$\rho = \sum \rho_i V_i / 100$$

式中 ρ ——混合气体的密度(kg/m^3);

ρ_i ——混合气体各组分在标准状态下的密度(kg/m^3);

V_i ——混合气体各体积组分(%)。

比容是指单位质量的物质所占的体积,单位是(m^3/kg)。它与密度互为倒数,即 $v=1/\rho$ 。

气体的相对密度是指在温度压力相同条件下,气体与同体积空气的质量比。即

$$S = \rho/1.293$$

式中 S ——混合气体的相对密度;

1.293——标准状态下空气的密度(kg/m^3)。

几种燃气的平均密度和相对密度见表 1-4。

表 1-4 燃气的平均密度和相对密度

燃气种类	天然气	液化石油气
平均密度(kg/m^3)	0.75~0.8	1.9~2.5
相对密度	0.58~0.62	1.5~2.0

液化石油气气态的相对密度在 1.5~2 之间,因此,一旦液化石油气从容器或管道中泄漏出来,不像相对密度值小的可燃气体那样容易挥发和扩散,而像水一样往低处流动和滞存,很容易达到爆炸浓度,如遇着明火就会发生爆炸或燃烧。因此,用户在安全使用中必须充分注意。

2. 液体的密度、相对密度

混合液体的密度计算公式如下:

$$\rho = \sum \frac{v_i \rho_i}{100} \quad \text{或} \quad \rho = \frac{100}{\sum_{i=1}^n (g_i / \rho_i)}$$

式中 ρ ——混合液体的密度(kg/L);

ρ_i ——混合液体各组分的密度(kg/L);

v_i ——混合液体各组分的容积成分(%);

g_i ——混合液体各组分的重量成分(%).

混合液体的相对密度是相对于水而言(见表 1-5),而 4℃时水的密度为 1 kg/L ,故液体的相对密度与平均密度数值相等。

在常温下,液态液化石油气的平均密度是 0.5~0.6 kg/L ,其相对密度为 0.5~0.6,约为水的一半,故水分和杂质处于液化石油气容器的底部,排污阀应装罐底。

表 1-5 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	丁烯-1
-20	0.555	0.556	0.621	0.603	0.641
-10	0.550	0.541	0.611	0.592	0.630
0	0.545	0.528	0.601	0.581	0.619
10	0.540	0.514	0.590	0.569	0.607
20	0.533	0.500	0.578	0.557	0.595

二、颜色、气味和毒性

液化石油气是一种无色、无味的物质,其在常温常压下以气态存在,在加压情况下液化,便

于储存和运输。液化石油气中含少量的硫化物。由于硫化物的存在,使液化石油气带有一种类似滴滴涕的刺鼻的臭味,对人体有一定的毒害作用,但人们可以凭借这种气味用以判断是否有液化石油气泄漏。液化石油气无毒,但在空气中浓度较高时,对人的中枢神经有麻醉作用。

三、沸点和露点

当液体温度升高时,液体的蒸气压也随之逐渐升高,直至其蒸气压力与外界压力相等,这时继续加热将使液体内部汽化,这种现象叫沸腾,沸腾时的温度称为沸点。通常说的沸点是指蒸气压力为 101 325Pa 时的饱和液体沸腾时的温度。某些碳氢化合物的沸点见表 1-6。

表 1-6 某些碳氢化合物的沸点

碳氢化合物名称	甲烷	丙烷	正丁烷	异丁烷	丙烯	丁烯-1	顺丁烯-2	反丁烯-2	异丁烯
沸点(°C)	-161.5	-42.10	-0.5	-11.73	-47.0	-6.3	3.7	0.88	-6.9

沸点温度与液体种类和外界压力有关。压力增高,沸点上升。由于 C_4 的平均沸点为 0°C 左右,在冬季就可能会不能汽化,从而打不着火。由于室内温度大于 C_4 的平均沸点,在室外使用钢瓶打不着火时,可将其放到室内片刻,当钢瓶温度接近室温时,瓶内液化石油气就可以导出,再点火就不困难了。

在压力不变的条件下,未饱和气体冷却到饱和状态时的温度称为露点温度。因此,气态碳氢化合物的露点温度就是给定压力下达到饱和状态时的饱和温度,对同种碳氢化合物,其压力增大,露点温度也升高。

当用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。

四、比热容和汽化潜热

(一)比热容

比热容是指单位数量的某物质在温度变化 1°C 时所吸收(或放出)的热量。

液化石油气有气态和液态之分,其比热容也就不同。表 1-7 为某些碳氢化合物在 25°C 时的比热。

表 1-7 某些碳氢化合物的比热容

碳氢化合物名称	甲烷		丙烷		丁烷	
	液态	气态(25°C)	液态	气态(25°C)	液态	气态(25°C)
比热(kJ/(kg·K))	3.87	2.23	2.48	1.67	2.36	1.68

(二)汽化潜热

液体沸腾时,1 kg 饱和液体变成同温度的饱和蒸气所吸收的热量称为汽化潜热。该过程只有相变,而温度不发生变化。

汽化潜热这一特性与安全生产和安全使用的关系很密切(见表 1-8)。液化石油气的主要成分的沸点都很低,即在 0°C 以下时液化石油气就达到它的沸点。因此液态液化石油气泄漏出来时,其压力降至常压,迅速吸收周围空气及容器的热量,把空气中的水分凝结成霜,形成白雾。倘若液态液化石油气沾至皮肤,则会迅速吸收人体的大量热量造成冻伤。因此,操作人员

必须戴皮手套加以保护以防止皮肤冻伤。

表 1-8 某些碳氢化合物的汽化潜热

碳氢化合物 名称	甲烷	丙烷	正丁烷	异丁烷	丙烯	丁烯-1	顺丁烯-2	反丁烯-2	异丁烯
汽化潜热 (J/kg)	510 000	422 584	383 254	366 100	439 320	390 786	415 800	405 430	394 133

(三) 燃气的热值

1 m³ 燃气完全燃烧所放出的热量称为燃气的热值,单位为 kJ/m³,对于液化石油气,热值单位也可用 kJ/kg。

热值可分为高热值和低热值。

高热值是指 1 m³ 燃气完全燃烧后其烟气被冷却至原始温度,而其中的水蒸气为凝结水状态排出时所放出的热量。

低热值是指 1 m³ 燃气完全燃烧后其烟气被冷却至原始温度,但烟气中的水蒸气仍为蒸气状态时所放出的热量。

高、低热值数值之差为生成水蒸气的冷凝热。

1. 混合气体比热容的计算

已知体积组分时,

$$C = V_1 C_1 + V_2 C_2 + \cdots + V_n C_n$$

已知质量组分时,

$$C' = g_1 C'_1 + g_2 C'_2 + \cdots + g_n C'_n$$

式中 C ——混合气体的容积比热容,单位 J/(m³ · °C);

C' ——混合气体的质量比热容,单位 J/(kg · K);

$C_1, C_2 \cdots C_n$ ——混合气体各组分容积比热容,单位 J/(m³ · °C);

$C'_1, C'_2 \cdots C'_n$ ——混合气体各组分质量比热容,单位 J/(kg · K)

$V_1, V_2 \cdots V_n$ ——混合气体各体积组分;

$g_1, g_2 \cdots g_n$ ——混合气体各质量组分。

2. 混合液体比热容的计算

混合液体比热容可按下式计算:

$$C' = g_1 C'_1 + g_2 C'_2 + \cdots + g_n C'_n$$

式中 C' ——混合液体的质量比热容 J/(kg · K);

$g_1, g_2 \cdots g_n$ ——混合液体各质量组分;

$C'_1, C'_2 \cdots C'_n$ ——混合液体各组分质量比热容 J/(kg · °C)。

3. 混合液体汽化潜热的计算

混合液体的汽化潜热可用下式计算:

$$r = g_1 r_1 + g_2 r_2 + \cdots + g_n r_n$$

式中 r ——混合液体的汽化潜热(J/kg);

$g_1, g_2 \cdots g_n$ ——混合液体各质量组分;

$r_1, r_2 \cdots r_n$ ——混合液体各组分的汽化潜热(J/kg)。

五、体积膨胀系数

绝大多数物体都具有热胀冷缩的性质。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体积的比值。

液化石油气体积膨胀系数比水大得多,约相当水的 10 至 16 倍,且随温度升高而增大。据计算,家用液化气钢瓶在满液情况下,温度每升高 1℃,压力就会上升 2~3 MPa(20 至 30 大气压),不难推知,只要温升 3℃至 5℃,内压就会超过普通钢瓶 8 MPa 的实际胀裂限度。因此,液化石油气的充装作业,必须限制装载量,不能全部充满液态液化气。

六、饱和蒸气压

一定温度下的液体置于密闭容器中,当单位时间由液态变为气态的分子数目与由气态变为液态的分子数目相等时,气液两相处于动态平衡状态,此时饱和蒸气所呈现的压力称为饱和蒸气压。

饱和蒸气压的大小与液体的种类、温度的高低有关。

碳氢化合物的蒸气压随温度升高而增大。一定液体的饱和蒸气压与容积大小及液量多少无关,只取决于温度。某些烃类的饱和蒸气压与温度的关系,见表 1-9。

表 1-9 某些烃类的饱和蒸气压

单位(MPa)

温度℃	丙烷	丙烯	异丁烷	正丁烷	丁烯-1	丁烯-2	异丁烯	
-40	0.109	0.150	—	—				
-30	0.164	0.216	—	—				
-20	0.236	0.308	—	—				
-15	0.285	0.362	0.088	0.056	0.070	0.046	0.052	0.073
-10	0.338	0.423	0.107	0.068	0.086	0.057	0.065	0.089
-5	0.399	0.497	0.128	0.084	0.105	0.071	0.078	0.108
0	0.466	0.575	0.153	0.102	0.127	0.087	0.097	0.130
5	0.543	0.665	0.182	0.123	0.152	0.105	0.117	0.155
10	0.629	0.765	0.215	0.146	0.182	0.126	0.140	0.184
15	0.725	0.874	0.252	0.174	0.215	0.151	0.166	0.217
20	0.833	0.992	0.294	0.205	0.252	0.179	0.197	0.255
30	1.080	1.280	0.394	0.280	0.343	0.247	0.270	0.345
40	1.382	1.623	0.513	0.374	0.456	0.333	0.362	0.458
50	1.744	2.028	0.669	0.490	0.594	0.439	0.475	0.598

七、临界状态

任何气体在温度低于某一数值时都可以等温压缩成液态,但当高于该温度时,无论压力增加到多大,都不能使气体液化,可以使气体压缩成液态的这个极限温度称为气体临界温度。当温度等于临界温度时,使气体压缩成液体所需的压力称为临界压力,此时的状态称为临界状态。其实,临界状态是饱和状态的一个特殊情况——极端情况:处于密封容器中的气液共存物质,在温度不断升高时,由于原来的饱和状态不断被打破,液相分子不断溢出液面,同时,由于液相受热会膨胀,所占体积增大,因而使液相密度 $\rho_{\text{液}}$ 会不断减少,而气相密度则会相应增大,

当温度升到一定值时, $\rho_{\text{液}} = \rho_{\text{气}}$, 此时气液界面消失, 气液不分, 处于一个模糊状态, 即临界状态。临界状态时的温度、密度、压力均为常数, 与容器的形状、大小无关。

气体的临界温度越高, 越易液化。天然气主要成分甲烷临界温度低, 故较难液化。而液化石油气的主要成分 C_3 、 C_4 临界温度较高, 故较易液化, 便于储存和运输燃气的临界温度和压力见表 1-10。

表 1-10 液化石油气和天然气的临界压力和临界温度

性质	液化石油气		天然气
	丙烷	丁烷	甲烷
临界压力 (MPa)	4.25	3.8	4.62
临界温度 (°C)	96.7	152.0	-82.6

第三节 燃气的燃烧特性

一、燃烧及其条件、形式和种类

(一) 燃烧

可燃物与助燃物作用发生的放热反应, 通常伴有火焰、发光和(或)发烟现象, 称为燃烧。

任何物质要发生燃烧, 都必须具备三个必要的条件: 可燃物、助燃物和点火源。也就是说, 只有在上述三个条件同时具备的情况下才能发生燃烧。

(1) 可燃物: 凡是能与空气中的氧气或其他氧化剂起化学反应的物质称可燃物, 如木材、氢气、煤炭、汽油、酒精、纸张等。

(2) 助燃物: 能帮助和支持可燃物燃烧的物质, 即能与可燃物发生氧化反应的物质称为助燃物。如空气、氧气、氯气及其他一些氧化剂, 空气到处都有, 一般来说, 这个燃烧条件是难以控制的。

(3) 点火源: 是指供给可燃物与助燃物发生燃烧反应的能量来源。一般分直接火源和间接火源两大类。直接火源主要有明火(如生产、生活中的炉火、灯火、焊接火、撞击火星、摩擦打火等)、电弧、电火花、瞬间高压放电的雷击; 间接火源主要有高温发热、自燃起火。

可燃物、助燃物和点火源是构成燃烧的三个要素, 缺少其中任何一个要素, 燃烧便不能发生。对于已经进行着的燃烧, 若消除可燃物或助燃物其中任何一个条件, 燃烧便会终止, 这就是灭火的基本原理。

(二) 燃烧过程

大多数可燃物质的燃烧是在其挥发出蒸气或气体状态下进行的, 由于可燃物的状态不同, 其燃烧特点也不同。

气体最容易燃烧, 只要达到其本身氧化条件所需的热量便能迅速燃烧, 在极短的时间内全部烧光。天然气和液化石油气中的所有组分, 在常温常压下均是气态, 在空间传播迅速, 所以非常容易燃烧, 甚至能形成爆炸。

可燃液体燃烧不是液体本身燃烧。首先是液体蒸发汽化, 然后在火源作用下, 蒸气氧化分解进行燃烧, 燃烧又加速了汽化。由于液体燃烧在火源、升温、汽化等过程的准备阶段, 要消耗