

天然气汽车



加气站 设备与运行

NATURAL GAS

郁永章 高其烈 冯兴全 编著
李 云 高秀峰

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

天然气汽车加气站 设备与运行

郁永章 高其烈 冯兴全 编著
李 云 高秀峰

中国石化出版社

内 容 提 要

本书重点介绍了天然气汽车加气站设计、使用与管理,以及加气站设备,特别是天然气压缩机的相关技术与应用。同时,书中还涉及了加气站运行与维护、设备故障处理等问题。

该书内容丰富,题材新颖,具有权威性。可供从事天然气汽车加气站设计、管理与应用的工程技术人员学习与参考。

图书在版编目(CIP)数据

天然气汽车加气站设备与运行/郁永章等编著.
—北京:中国石化出版社,2006
ISBN 7-80164-983-4

I.天… II.郁… III.汽车-燃料-天然气-供应站-基本知识 IV.U473.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 018895 号

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com.cn

北京精美实华图文制作中心排版

河北天普润印刷厂印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 19.25 印张 6 彩页 480 千字

2006 年 3 月第 1 版 2006 年 3 月第 1 次印刷

定价:50.00 元

前 言

随着人们环境意识的加强与世界石油资源的紧缺,传统的汽车燃料汽油与柴油受到了严峻的挑战,在种种可取代的能源中,太阳能与电能被认为是最理想的两种。其次,以氢能为燃料的汽车也颇为人们所青睐。不过到目前为止,这些新能源的利用还都存在若干技术上的困难,因此尚无法普遍使用。

目前,在能源利用上最受人们注意的是,与石油同时存在于地壳中的天然气,其开采过程远较石油方便,加工方式又十分简单,可以方便地输送到所需要的各个地方。天然气成分以甲烷为主,燃烧后的主要排放物为水蒸气,所产生的二氧化碳或氮氧化物远较汽油、柴油为少。同时,燃烧天然气的发动机与燃烧汽油、柴油的发动机也大致相近。故就近期而言,天然气作为一种新的替代燃料十分可取。

天然气可以压缩状态存储在汽车内,也可以液化状态存储在汽车内,理论上讲液化状态能存储更多的质量,但液化设备、液体气化所需提供的热量会给汽车,尤其是小型的出租车或个人使用的汽车带来诸多不便。因此,近期普遍看好的是应用压缩天然气(Compressed Natural Gas,缩写CNG)来驱动相应的汽车,称为天然气汽车(Natural Gas Vehicle,缩写NGV)。

与以汽油为燃料需要加油站一样,天然气汽车也需要很多的加气站。由此,加气站设计、使用与管理都需要相应的技术。我们基于从事这方面工作多年的人员,为满足国家发展的需要,决定撰写一本参考书,以满足相关人员的阅读需要。

本书由郁永章、高秀峰主持撰写。写作分工为第一章由李云执笔;第二章由郁永章执笔;第三章由高其烈、高秀峰、郁永章执笔;第四章由高其烈、高秀峰执笔;第五章由冯兴全执笔。最后全书由高秀峰、郁永章统稿。本书在写作过程中得到西安市天然气汽车专家委员会邓志伟、四川石油天然气总公司伍永乔的大力支持与帮助;此外,在撰写过程中还得到了陈二峰博士的大力帮助,在此一并表示衷心的感谢。由于加气站涉及面广,国内外缺乏系统的资料,撰写难度较大,加之作者水平有限,书中难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

目 录

第一章 天然气的性质及其处理	(1)
1.1 天然气作为汽车燃料的特点	(1)
1.2 天然气的组成	(2)
1.3 天然气的分类	(3)
1.3.1 按照矿藏特点进行分类	(3)
1.3.2 按烃类组分关系分类	(4)
1.3.3 按硫化氢、二氧化碳含量分类	(4)
1.4 天然气的物理性质	(4)
1.4.1 天然气的相对分子质量、密度、比容和相对密度	(4)
1.4.2 天然气中主要组分的饱和蒸气压	(5)
1.4.3 天然气中主要组分的气化热	(5)
1.4.4 临界温度和临界压力	(5)
1.4.5 比热容	(7)
1.4.6 绝热指数	(8)
1.4.7 天然气的状态方程	(8)
1.5 天然气的化学性质	(14)
1.5.1 热值	(14)
1.5.2 可燃性与爆炸性	(15)
1.5.3 自燃点和燃烧温度	(15)
1.5.4 辛烷值	(16)
1.6 天然气的净化	(16)
1.6.1 天然气脱水	(16)
1.6.2 天然气脱硫	(19)
1.7 天然气的液化	(22)
1.8 汽车对天然气的质量要求	(24)
1.8.1 民用天然气的质量指标	(24)
1.8.2 车用天然气的质量指标	(24)
参考文献	(24)
第二章 加气站系统及其工作过程	(26)
2.1 加气站分类	(26)
2.2 常规加气站	(29)
2.2.1 常规站系统	(29)
2.2.2 常规站规模	(32)
2.2.3 常规站工作过程模拟分析	(32)
2.2.4 加气时间估算与加气量问题	(37)
2.3 母站	(44)

2.4 子站	(46)
2.4.1 子站概述	(46)
2.4.2 液压驱动往复压缩机子站	(46)
2.4.3 液泵形成的液体活塞增压系统	(47)
2.4.4 液化天然气-压缩天然气(LCNG)子站加气系统	(47)
2.4.5 子站工作过程模拟	(47)
2.5 加气站的经济性分析	(49)
2.5.1 常规站与子站的经济性比较	(49)
2.5.2 子站用压缩机与用液泵的经济性理论分析比较	(53)
2.6 加气站安全性问题	(56)
2.6.1 天然气的安全性问题	(56)
2.6.2 储气瓶与管路的安全性问题	(57)
2.6.3 国内加气站事故的报道与分析	(57)
2.6.4 关于加气站的隔离带问题	(57)
参考文献	(59)
第三章 加气站设备	(61)
3.1 压缩机组	(61)
3.1.1 压缩机的基本概念	(61)
3.1.2 压缩机组系统构成	(64)
3.1.3 典型压缩机组简介	(69)
3.1.4 压缩机组的总体布置	(90)
3.2 气体净化设备	(91)
3.2.1 脱水	(91)
3.2.2 除油过滤设备	(95)
3.2.3 除尘	(96)
3.3 储气器	(96)
3.3.1 站用储气器	(97)
3.3.2 运输用储气器	(102)
3.3.3 车载储气器	(103)
3.4 加气机	(106)
3.4.1 加气机系统构成	(106)
3.4.2 安全保护功能	(108)
3.4.3 流量计量装置	(108)
3.4.4 其他形式加气机	(110)
参考文献	(111)
第四章 天然气压缩机	(112)
4.1 压缩机的基本知识	(112)
4.1.1 压缩机基本组成部分	(112)
4.1.2 气缸内的工作过程	(118)
4.1.3 多级压缩	(123)

4.1.4 压缩机的热力性能	(126)
4.1.5 压缩机的动力平衡性能	(129)
4.1.6 压缩机的主要结构参数	(132)
4.2 级数、列数、级与列的配置	(134)
4.2.1 压缩机的级数	(134)
4.2.2 压缩机的列数	(135)
4.2.3 级在列中的配置	(135)
4.3 机身(曲轴箱)结构形式	(137)
4.3.1 优缺点	(137)
4.3.2 闭式结构设计	(138)
4.4 运动部件的润滑	(138)
4.4.1 传动机构的润滑	(138)
4.4.2 气缸部分的润滑	(141)
4.5 压缩机的冷却	(143)
4.5.1 冷却方式	(143)
4.5.2 各种冷却方式比较	(144)
4.6 活塞组件的支承及结构	(145)
4.6.1 活塞杆径向跳动	(145)
4.6.2 级差活塞的结构	(146)
4.7 天然气压缩机结构实例	(147)
4.7.1 卧式天然气压缩机	(147)
4.7.2 角度天然气压缩机	(171)
4.7.3 立式天然气压缩机	(179)
4.8 天然气压缩机选型要点	(180)
4.9 天然气压缩机相关标准和规范	(180)
参考文献	(181)
第五章 加气站的运行与维护	(182)
5.1 加气站的试运行	(182)
5.1.1 加气站概述	(182)
5.1.2 投产领导小组	(183)
5.1.3 试运行安全预案	(183)
5.1.4 试运行前的准备工作	(183)
5.1.5 试运行	(186)
5.2 加气站的竣工验收	(186)
5.3 加气站安全注意事项	(187)
5.3.1 一般安全注意事项	(187)
5.3.2 操作维护安全注意事项	(187)
5.3.3 高压深度脱水装置操作安全注意事项	(189)
5.4 加气站的运行与维护	(189)
5.4.1 资料台账	(189)

5.4.2	设备操作规程	(190)
5.4.3	设备强制维护保养规程	(194)
5.4.4	天然气压缩机故障判断与处理	(197)
5.5	加气站压缩机组的监控	(201)
5.5.1	PLC 控制系统操作方式	(201)
5.5.2	PLC 控制系统显示器	(202)
5.5.3	PLC 控制系统开机自检	(202)
5.5.4	运行状态屏	(202)
5.5.5	屏幕鉴别	(203)
5.5.6	主菜单	(203)
5.5.7	状态菜单	(204)
5.5.8	功能菜单	(207)
5.5.9	参数定位菜单	(210)
5.5.10	报警菜单	(212)
5.5.11	故障诊断菜单	(212)
5.6	加气站压缩机的常规检修	(215)
5.6.1	一般介绍	(215)
5.6.2	连杆组件的拆卸与安装	(215)
5.6.3	十字头的拆卸与安装	(216)
5.6.4	曲轴组件的拆卸与安装	(217)
5.6.5	活塞组件的拆卸与安装	(218)
5.6.6	活塞杆偏心率的检查	(219)
5.6.7	活塞环的拆卸与安装	(220)
5.6.8	活塞杆密封填料的拆卸与装配	(221)
5.6.9	气阀的拆卸与装配	(223)
5.7	润滑油及其管理	(224)
5.7.1	润滑油的类别及选用	(224)
5.7.2	压缩机气缸用润滑油	(225)
5.7.3	压缩机传动机构用润滑油	(226)
5.7.4	润滑油的管理	(227)
	参考文献	(228)
附录 1	GB/T 17747.2—1999《天然气压缩因子的计算 第二部分：用摩尔组成计算》	(229)
附录 2	GB/T 17747.3—1999《天然气压缩因子的计算 第三部分：用物性值进行计算》	(239)
附录 3	新西兰天然气加气站建设规范有关防火间距的部分要求	(257)
附录 4	天然气压缩机及加气站相关标准和规范	(262)
附录 5	压缩机/风机专业常用单位换算表	(265)
附录 6	我国主要气田天然气、凝析气和油田伴生气组分	(269)
附录 7	我国天然气资源、潜力与发展前景	(281)

第一章 天然气的性质及其处理

在油、气开采的范围内，天然气是气藏气、凝析气、油层气层气和油田气的统称。成分以甲烷(CH₄)为主。

1.1 天然气作为汽车燃料的特点

(1) 环境负效应小 就改善环境、限制移动污染源——汽车的有害排放来讲，除了太阳能和氢能，还没有一种燃料可以与天然气相媲美。表 1-1 所列 为压缩天然气(CNG)、液化石油气(LPG)、汽油作为车用燃料对环境污染主要指标的比较。

表 1-1 不同燃料车辆对环境影响的比较(以汽油为 100%)

污染物种类	汽 油	液化石油气	压缩天然气
碳氢化合物	100	40	65
氮氧化合物	100	60	50
一氧化碳	100	99	5
发动机噪声	100	50	50

(2) 安全性好 表 1-2 中提供了几种常用燃料的物理化学性质，由表中数据可见，天然气的特点是密度最小，极易散逸；自燃点高，达 700℃，是所有燃料中最高的；其爆炸极限也很高，在自然条件下，不易形成爆炸混合物。

(3) 对发动机的工作有利 天然气的辛烷值高达 130，不易爆燃；燃烧完善不易形成炭粒，可减少气缸磨损；燃烧后剩余碳氢化合物少，对润滑污染物少；由于天然气是气态与空气混合，低温启动性能好；虽然天然气的热值低于汽油，发动机公升功率会有所降低，一般降低 10%左右，但由于天然气不会产生爆燃和燃点高，因此发动机压缩比可提高，由此提高了循环的效率。

(4) 资源丰富 地球上蕴藏着极其丰富的天然气资源。到目前为止，初步估计常规天然气储量约为 6000 亿立方米，按照现在开采速度，可供人类利用 200~300 年。

表 1-2 不同气体燃料和汽油性质的比较

燃料种类 物理化学性质	天然气(甲烷)	液化石油气		汽油(90#)
		丙烷	丁烷	
H/C 原子比	4	2.67	2.5	2~2.3
密度(液相)/(kg/m ³)	424	528	602	700~780
密度(气相,标准状态)/(kg/m ³)	0.715	2.02	2.598	
分子量	16.043	44.097	58.124	96
沸点/℃	-161.5	-42.1	-0.5	30~90
凝固点/℃	-182.5	-187.7	-138.4	
临界温度/℃	-82.6	96.7	152.0	
临界压力/MPa	4.62	4.25	3.8	

续表

燃料种类 物理化学性质		天然气(甲烷)	液化石油气		汽油(90 [#])
			丙烷	丁烷	
气化热/(kJ/kg)		510	426	385	
比热容(液体,沸点)/(kJ/kg·K)		3870	2480	2360	
比热容(气体)/(kJ/kg·K)		2.23	1.67	1.68	
气/液容积比(15℃)		624	273	230	
理论空燃比	质量比	17.25	15.65	15.43	14.8
	体积比	9.52	23.81	30.95	8.586
高热值/(MJ/kg)		55.54	50.38	49.55	
低热值/(MJ/kg)		50.05	45.77	46.39	43.90
辛烷值		130	111.5	95	92
自燃点/℃		700	450	400	300
着火极限/%		5~15	2.2~9.5	1.9~8.5	1.3~7.6
火焰传播速度/(cm/m)		33.8	38	37	39~47
火焰温度/℃		1918	1970	1975	2197

此外,人们已经发现海底蕴藏有大量甲烷水合物(俗称“冰甲烷”),如果其开发技术获得解决,当会使此种燃料获得更充分的供应。

应当看到煤田气中也储藏着大量的煤层气,其成分也是以甲烷为主。只是煤层气中往往含有氧,甚至此种气体本身处于爆炸极限范围内,因此脱氧是必须解决的一个技术问题。

人类对于生物的可控性日趋提高,对于生物质能的向往也越来越有信心。利用有机物发酵生成沼气,实际上在许多农村中已经作为燃料广泛使用,只是由于质量的限制,目前仅限于炊事,还不足以用于驱动发动机。

总之,在人类未能解决以廉价的方法大规模获得氢气或可高效利用太阳能之前,以甲烷为主的可燃气体,应该是最佳的清洁燃料。

1.2 天然气的组成

气(油)藏中天然气的主要成分是烃类。通常以甲烷占优势,并有数量不等的重烃气(C_2+)。在某些石油伴生气(气顶气和油溶气)中,重烃气含量可以超过甲烷。非烃气在绝大多数气藏气中为次要成分,常见的非烃气有 N_2 、 CO_2 、 H_2S 、 CO 、 SO_2 、 H_2 、 Hg 等,以及含量到微量的惰性气体如氦(He)、氖(Ne)、氩(Ar)、氪(Kr)、氙(Xe)、氡(Rn)等。在某些气藏中非烃气体也可以成为主要成分,如 N_2 气藏、 CO_2 气藏、 H_2S 气藏等。

据统计,世界上绝大多数气藏的成分是以烃气为主。烃含量高于80%的气藏数占总数的85%以上,90%以上的天然气储量集中于烃含量在90%以上的气藏中。氮气为主的气藏占气藏总数的百分之几,含量在90%以上的不到1%。以 CO_2 和 H_2S 为主的气藏也不足气藏总数的1%。各个气田的天然气成分往往是不同的,表1-3列出了我国一些地区油、田的天然气的组分。世界上若干有代表性的地区和油气田中的天然气成分如表1-4。

表 1-3 我国一些地区油、气田的天然气的组分

组分	陕西靖边 气藏气	四川威远 气藏气	四川卧龙 河气藏气	大庆阿拉 辛气藏气	大庆杏南 伴生气	华北任北 伴生气	新疆柯克 亚凝析气	华北苏桥 凝析气	东海平湖 凝析气
	(体积)%								
C ₁	93.95	86.36	97.14	91.35	68.26	59.37	74.86	78.58	81.70
C ₂	0.77	0.11	0.43	0.31	10.58	6.48	8.38	8.26	7.45
C ₃	0.60		0.03	0.12	11.20	12.02	4.00	3.13	3.94
C ₄			0.01		5.96	9.21	3.31	1.43	1.64
C ₅					1.91	3.81	2.69	0.55	0.28
C ₆					0.66	1.34	2.68	0.39	0.14
C ₇					0.36	1.40		5.45	0.06
CO ₂	4.70	5.01	1.46	0.22	0.20	4.58	0.26	1.41	3.86
N ₂		7.20	0.73	8.00	0.55	1.79	3.99	0.80	0.77
H ₂ S		0.99	0.20						

表 1-4 国外一些气田的天然气的组分 %

地区及油气田名称		成 分					
		CH ₄	C ₂ ⁺	CO ₂	H ₂ S	N ₂	其他
前苏联	西西北利亚气田	97.8~99.91	痕量到 0.855	0.1~0.68	0~0.004	0.45~1.69	0~0.07
	阿塞拜疆凝析气田	91.3~97.93	1.58~8.66	0~0.5			
	奥伦堡凝析气田	81.5	5~9	1.0~3.2	1.3~4.5	2.4~7.4	
	罗马什金油田	40.0	49.9	0.1	0	9.0	
美国	胡果顿气田	74.3	11.4	0	0	14.0	
	潘汉得油气田	91.3	6.38	0.1	0	1.0	
中国	圣灯山气田	94.57	0.99	0.24	0	2.43	0.02
	大庆油田	83.82	13.0	0.11	0	0.58	
	老君庙油田	64.9	35.0	0.1			
荷兰	格罗宁根气田	81.3	3.5	0.3	0	14.0	
北海	英国赫威特气田	83.19	8.39	0.08	0.02	8.4	
		92.13	5.49	0.02	0	2.3	0.06
法国	拉克气田	68.66	5.57	9.92	15.52	0.33	

1.3 天然气的分类

1.3.1 按照矿藏特点进行分类

天然气按照其矿藏特点可分为伴生气和非伴生气。伴生气是伴随原油共生，与原油同时被采出；非伴生气包括纯气藏天然气和凝析气藏天然气，两者在地层均为均一的气相。凝析气藏天然气由井口流出后，经减压、降温、分离为气、液两相。气相经净化后，成为商品天然气，液相凝析液主要是凝析油，还可能有一部分被凝析的水分。纯气藏天然气主要成分是甲烷，还有少量的乙烷、丙烷和非烃气体等。凝析气藏天然气(指井口流出物)，除含有甲烷、乙烷外，还有一定数量的丙烷、丁烷及戊烷以上烃类气体、芳香烃、天然气汽油、柴油等。原油伴生气的组成和分离出凝析油以后的凝析气藏天然气很相似。

1.3.2 按烃类组分关系分类

一般常根据重烃气的含量将天然气划分为湿气和干气。但不同学者所用的参数、量值及具体的划分方案不尽相同。在天然气地质学上常用重烃气含量 5% 作为划分干气和湿气的界限, $C_2 + \geq 5\%$ 称为湿气, $C_2 + < 5\%$ 称为干气。还可以按照丙烷及以上烃类含量将天然气划分为富气和贫气。丙烷及以上烃类含量少于 100mL/m^3 的天然气为贫气; 丙烷及以上烃类含量大于 100mL/m^3 的天然气为富气。

1.3.3 按硫化氢、二氧化碳含量分类

按照天然气中的含硫量差别, 天然气可分为洁气和酸性天然气。酸性天然气是指有明显含量的硫化氢, 甚至可能含有有机硫化物、二氧化碳, 需经处理才能达到管输商品气质量要求的天然气。

1.4 天然气的物理性质

天然气物理性质取决于构成它的主要组分——烃类的物性。物质的物理性质依赖于物质的分子性质, 分子行为。天然气的物理性质一般是指天然气的密度和相对密度、平均相对分子质量、定压比热容、定容比热容、临界温度和临界压力等。

1.4.1 天然气的相对分子质量、密度、比容和相对密度

天然气作为气体混合物, 严格地说没有“特定”的相对分子质量, 其相对分子质量定义为

$$M = \sum x_i M_i \quad (1-1)$$

式中 M_i ——任一组分的相对分子质量;

$$x_i \text{——任一组分的摩尔百分数。对于实际气体, } x_i = \frac{\frac{V_i}{z_i}}{\sum \frac{V_i}{z_i}}, \text{ 其中 } z_i \text{ 为任一组分的}$$

压缩因子; V_i 为任一组分的摩尔百分数。

气体的密度是指单位体积气体的质量, 单位是 kg/m^3 。天然气作为气体混合物, 其密度 ρ 分别为各组分的密度 ρ_i 与混合气体中该组分的摩尔百分数 x_i 乘积的总和, 即

$$\rho = \sum x_i \rho_i \quad (1-2)$$

式中 ρ_i ——气体混合物任一组分的密度;

$$x_i \text{——任一组分的摩尔百分数。对于实际气体, } x_i = \frac{\frac{V_i}{z_i}}{\sum \frac{V_i}{z_i}}, \text{ 其中 } z_i \text{ 为任一组分的压}$$

缩因子; V_i 为任一组分的摩尔百分数。

天然气主要成分的平均密度和相对密度见表 1-5。天然气混合物的密度一般为 $0.7 \sim 0.75\text{kg/m}^3$, 其中石油伴生气特别是油溶气的密度最高可达 1.5kg/m^3 , 甚至更大些。天然气的密度随重烃含量尤其是高碳数的重烃气含量增加而增大, 亦随 CO_2 和 H_2S 的含量增加而增大。

天然气比容 v 是指单位质量的天然气所占的体积, 单位是 m^3/kg 。它与密度 ρ 互为倒数, 即

$$v = 1/\rho \quad (1-3)$$

天然气的相对密度是指在相同温度、压力条件下，天然气密度与空气密度的比值，或者说在相同温度、压力下同体积天然气与空气质量之比。即

$$d = \rho / 1.293 \tag{1 - 4}$$

式中 d ——混合气体的相对密度；
 ρ ——气体混合物的密度。

天然气烃类主要成分甲烷的相对密度为 0.5539，天然气混合物一般在 0.56 ~ 1.0 之间，亦随重烃及 CO_2 和 H_2S 的含量增加而增大。

表 1-5 天然气主要成分的密度和相对密度 (101.325kPa, 15.55℃)

化 合 物	相对分子质量	密度/(kg/m ³)	相对密度
甲 烷	16.043	0.6773	0.5539
乙 烷	30.070	1.2693	1.0382
丙 烷	44.097	1.8614	1.5225
丁 烷	58.124	2.4535	2.0068
异丁烷	58.124	2.4535	2.0068
戊 烷	72.151	3.0454	2.4911
异戊烷	72.151	3.0454	2.4911
新戊烷	72.151	3.0454	2.4911
己 烷	86.178	3.6374	2.9753
庚 烷	100.205	4.2299	3.4596
环戊烷	70.135	2.9604	2.4215
环己烷	84.162	3.5526	2.9057
苯	78.114	3.2974	2.6969
甲 苯	92.141	3.8891	3.1812
二氧化碳	44.010	1.8577	1.5195
硫化氢	34.076	1.4380	1.7165
氮	28.013	1.1822	1.9672

1.4.2 天然气中主要组分的饱和蒸气压

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体量多少无关，只取决于温度。某些烃类的饱和蒸气压与温度的关系见图 1-1。

1.4.3 天然气中主要组分的气化热

液体沸腾时，单位质量饱和液体变成同温度的饱和蒸气所吸收的热量称为气化潜热。该过程只有相变，而温度不发生变化。一些碳氢化合物的气化潜热见表 1-6。

表 1-6 某些碳氢化合物的气化潜热

碳氢化合物	甲 烷	丙 烷	正丁烷	异丁烷	丙 烯	丁 烯 - 1	异丁烯
气化潜热/(kJ/kg)	510	422.584	383.254	366.1	439.32	390.786	394.133

1.4.4 临界温度和临界压力

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。临界状态是饱和状态的一个特殊情况：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，因而使液相密度不断减少，而气相密度则相应增大。当温度升到一定值时，液体的密度和气体的密度相同，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。

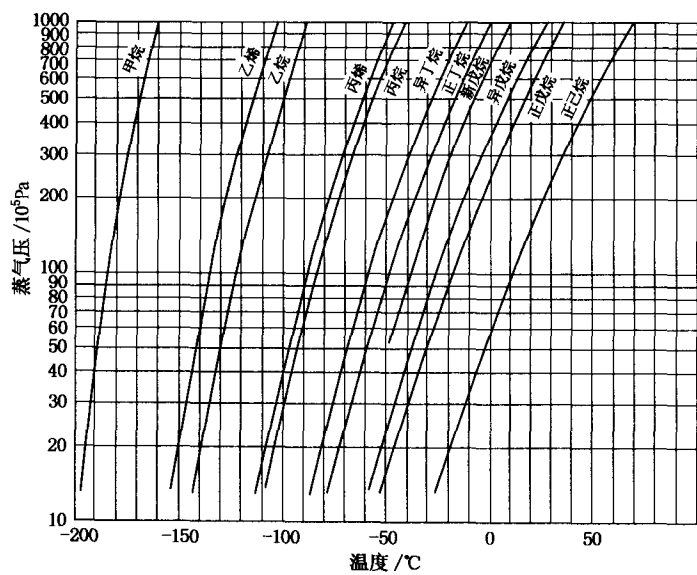


图 1-1 某些烃类的饱和蒸气压

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。天然气主要成分的临界温度和临界压力见表 1-7。

表 1-7 天然气主要成分的临界温度和临界压力

化 合 物	沸点/℃(0.1MPa)	凝固点/℃(0.1MPa)	临界温度/℃	临界压力/0.1MPa
甲 烷	- 161.49	- 182.48	- 82.57	45.44
乙 烷	- 86.60	- 183.23	32.27	48.16
丙 烷	- 42.04	- 187.69	96.67	41.94
丁 烷	- 0.50	- 138.36	152.03	37.47
异丁烷	- 11.72	- 159.61	134.94	36.00
戊 烷	36.07	- 129.73	196.50	33.25
异戊烷	27.88	- 159.91	187.28	33.37
新戊烷	9.50	- 16.57	160.63	31.57
己 烷	68.73	- 95.32	234.28	29.73
庚 烷	98.43	- 90.58	267.11	27.00
环戊烷	49.25	- 93.84	238.60	44.49
环己烷	80.72	6.54	286.39	40.22
苯	80.09	5.53	289.01	48.34
甲 苯	110.63	- 94.97	318.64	40.55
二氧化碳	- 78.50	—	31.06	72.88
硫化氢	- 60.33	- 82.89	100.39	88.87
氮	- 195.78	- 210.00	- 146.89	33.55

1.4.5 比热容

在不发生相变化和化学变化的条件下，加热单位质量的天然气时，温度升高 1℃ 所吸收的热量，称为天然气的比热容，其单位为 $\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$ ，即

$$c = \frac{dq}{dT}$$

工程上为简化计算，还引入了平均比热容 c_m 的概念。平均比热容 c_m 是指某温度范围内

比热容的平均值，即 $c_m \Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{q}{t_2 - t_1} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} c dt}{t_2 - t_1}$ 。

气体的比热容还可分为定容比热容 c_v 和定压比热容 c_p ，其定义式分别为

$$\left. \begin{aligned} c_v &= \frac{dq_v}{dT} = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v \\ c_p &= \frac{dq_p}{dT} = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_p \end{aligned} \right\}$$

液体和固体定容比热容和定压比热容相差很小，常不加区别。天然气中主要组分常压下的定压比热容可由图 1-2 查出。液态烃的比热容可由图 1-3 查出。理想气体的比热容不随

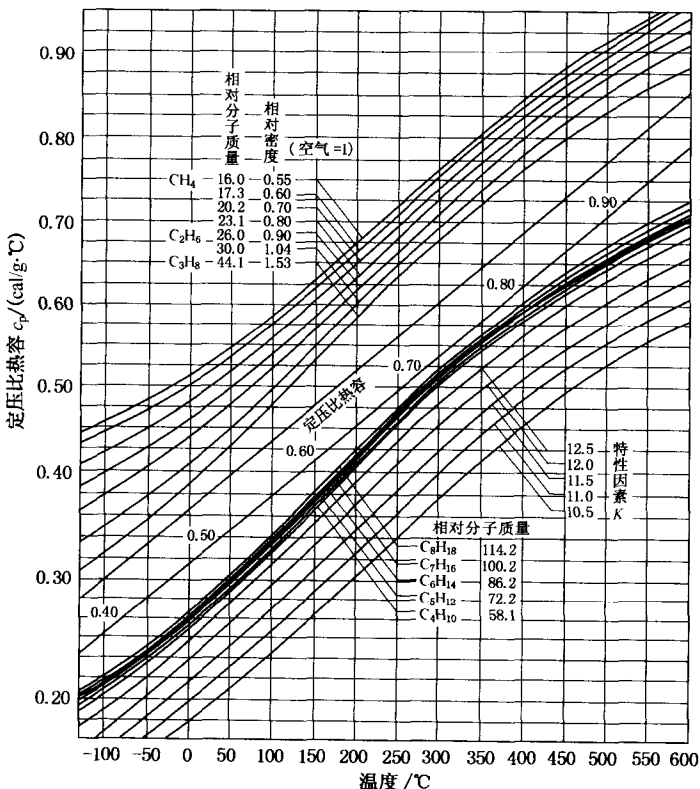


图 1-2 1 个大气压下烃类气体的定压比热容

注：特性因素 $K = \frac{1.216 \sqrt{T_i}}{d_{15.5}^{1/3}}$

式中 T_i ——立方平均沸点，等于各组分的体积分数与其沸点的立方根乘积之和的立方，K；

$d_{15.5}^{1/3}$ ——烃类组分在 15.5℃ 的相对密度 (与 15.5℃ 时水对比)。

另外，1cal = 4.1868J，下同。

压力变化，真实气体比热容随压力变化而变化。天然气的比热容可根据各组分的比热容，用分子分数加合法求得，即

$$c_x = \sum y_i c_i \tag{1-5}$$

式中 c_x ——天然气的比热容；
 y_i ——天然气各组分的摩尔百分数；
 c_i ——各组分的比热容。

对于一般气体或气体混合物，当压力大于 3.5kg/m^2 时，则应按照实际气体由图 1-4 查得真实气体比热容与理想气体比热容的差值，以求得此压力下真实气体的比热容 c_p 。图 1-4 的误差在 5%~10%，对于极化合物可达到 50%，液体比热容通常可忽略压力的影响。

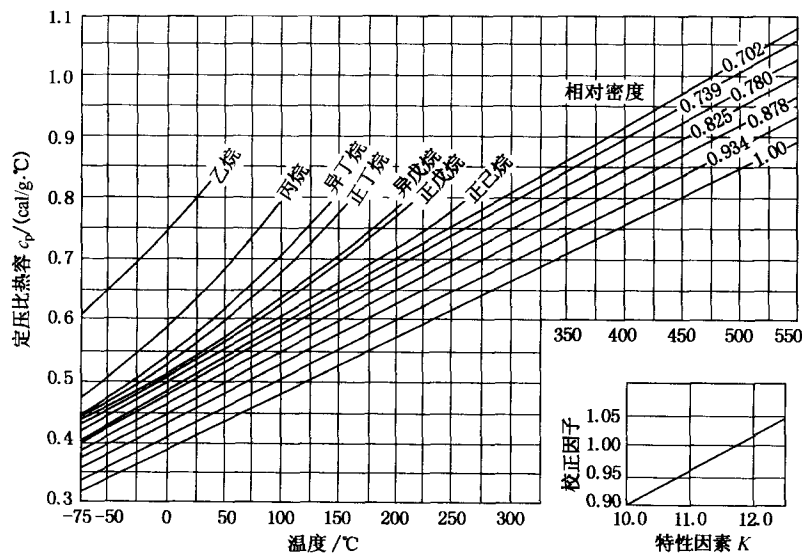


图 1-3 液体烃的比热容

计算高压天然气的比热容，可先求出其常压下的比热容，再计算其临界参数，然后按图 1-4 校正。

1.4.6 绝热指数

绝热指数 k 是定压比热容和定容比热容之比，即 $k = c_p/c_v$ ，又称等熵指数。

烃类的绝热指数可查图 1-5。一般常见气体常压下的绝热指数分别为：二氧化碳 1.31；空气 1.4；二氧化硫 1.29；硫化氢 1.32；氢气 1.4。

1.4.7 天然气的状态方程

(1) 理想气体

是指在任何温度、压力下均服从理想气体状态方程的气体。按上述定义，理想气体必须具有两个特征，即分子本身必定不占有体积，分子间无相互作用力。

理想气体在客观上是不存在的，它只是实际气体的一种极限。

(2) 实际气体

实际气体分子占有体积，并且分子间有相互作用力，这使得实际气体不能完全符合理想气体状态方程。当压力接近于零或体积趋于无穷大时，实际气体趋于理想气体。

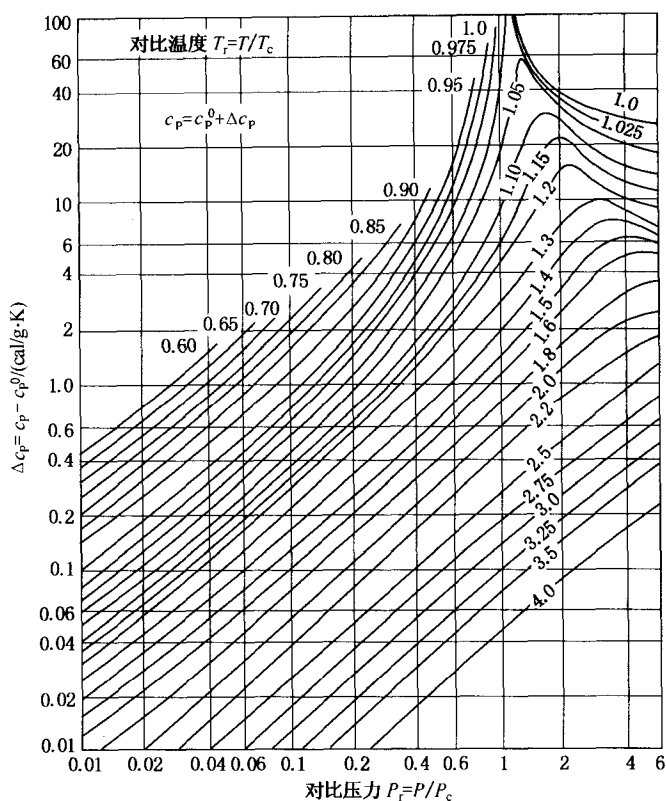


图 1-4 真实气体比热容校正图

注：图中 c_p^0 是一个大气压下的定压比热容； c_p 是任一压力下的定压比热容，单位是 $\text{cal/g}\cdot\text{K}$ 。

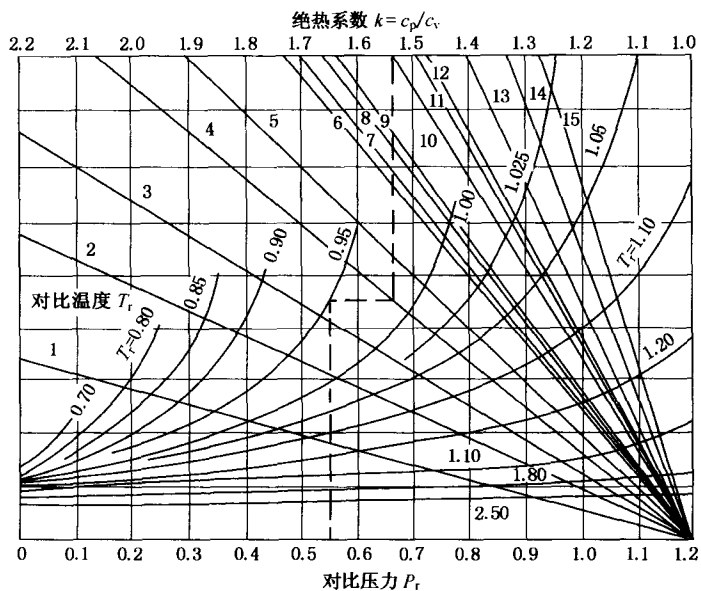


图 1-5 烃蒸气的绝热指数

1—甲烷；2—乙烯；3—乙烷；4—丙烯；5—丙烷；6—异丁烯；7—异丁烷；8—丁烯-2；

9—正丁烷；10—异戊烷；11—正戊烷；12—苯；13—正己烷；14—正庚烷；15—正辛烷

(图中对比压力 P_r 和对比温度 T_r 分别为： $P_r = p/p_c$ ； $T_r = T/T_{c0}$ ， T_{c0} 为天然气的临界压力和临界温度)