

压缩机工程手册

YASUOJI GONGCHENG SHOUCHE

郁永章 姜培正 孙嗣莹 主编

中國石化出版社

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

压缩机工程手册

郁永章 姜培正 孙嗣莹 主编

中国石化出版社

图书在版编目(CIP)数据

压缩机工程手册 / 郁永章, 姜培正, 孙嗣莹主编. —北京:
中国石化出版社, 2011. 10
ISBN 978-7-5114-1114-3

I. ①压… II. ①郁… ②姜… ③孙… III. ①压缩机-技术
手册 IV. ①TH45-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 153636 号

未经本社书面授权, 本书任何部分不得被复制、抄袭, 或者以任何形式或任何方式传播。版权所有, 侵权必究。

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

北京科信印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787 × 1092 毫米 16 开本 67.5 印张 1715 千字

2012 年 1 月第 1 版 2012 年 1 月第 1 次印刷

定价: 198.00 元

前 言

从 20 世纪 80 年代开始，中国的经济建设突飞猛进。其中，在国计民生中得到广泛应用的压缩机，也在生产与科研等各个方面取得了长足的进步。现在我国已能生产满足国民经济各个部门需要的各种类型压缩机，并有不少产品远销国外。

在现代工业中，石油炼制、气体输送等行业广泛应用各种类型的压缩机，而以煤、石油、天然气为原料的化学工业更是与压缩机密不可分。由于企业的大型化发展，使压缩机处理的气量大为增加，由此使压缩机驱动功率高达数千千瓦，甚至数十兆瓦。

为适应市场的需要，满足广大运行工程技术人员、设计制造及研究人员的需求，应中国石化出版社之约，我们主编了这本《压缩机工程手册》。

手册中阐述的内容包括往复、回转、离心、轴流压缩机与风机；电动机、工业汽轮机、燃气轮机等驱动机械。此外，还包括测量、控制与自动化、气体净化、压缩机噪声源、降噪措施与噪声测量。

手册中未涉及日常生活用制冷、空调压缩机，但对工业中应用的制冷与热泵压缩机、机械真空设备等有所阐述。

在手册即将出版之际，我们向为手册提供宝贵资料的企业单位及个人致以深深的谢意。同时，也对编撰过程中引用的杂志及图书资料中的文献作者表示由衷的感谢。

基于手册内容广泛、篇幅较大，以及作者水平有限，手册中难免有欠妥之处，敬希读者批评指正。

主编 郁永章、姜培正、孙嗣莹

撰写人名单

章节目录	撰写人
第一篇	
1 气体种类与性质	郁永章
2 压缩机工况与应用选型	郁永章
3 零件材料、许用应力及强度计算	郁永章
第二篇	
4 往复压缩机热力性能与热力计算	孙嗣莹 任廷荣
5 往复压缩机动力性能分析与计算	孙嗣莹 任廷荣
6 往复压缩机结构与零部件	郁永章 李 云
7 往复压缩机辅助系统	孙嗣莹 郁永章
第三篇	
8 隔膜压缩机与液、气力驱动往复压缩机	李 云
9 螺杆压缩机	吴伟烽 冯全科 高秀峰
10 液环压缩机与罗茨鼓风机	高秀峰 郁永章
第四篇	
11 离心压缩机	姜培正
12 轴流压缩机	姜培正
13 通风机	姜培正
第五篇	
14 电动机与内燃机	郁永章
15 工业汽轮机	丰镇平
16 燃气轮机和烟气轮机	丰镇平
第六篇	
17 压缩机装置控制和自动化	郑学鹏 张早校
18 压缩机、通风机噪声及降噪措施	姜培正 郁永章
19 气体净化与净化设备	冯诗愚
附录一 部分常用图表与数据	郁永章
附录二 国内部分相关工厂、企业信息介绍	高秀峰

目 录

第一篇 基础知识

1 气体种类与性质	(1)
1.1 气体的种类与计量	(1)
1.2 气体的状态方程	(6)
1.3 其他热物理性质	(12)
1.4 理想气体状态改变——过程、热量与外功	(17)
1.5 实际气体状态改变	(20)
1.6 气体的流动性质	(24)
1.7 湿气体(包括湿空气)	(26)
1.8 气体的化学性质	(28)
参考文献	(33)
2 压缩机工况与应用选型	(34)
2.1 压缩机的工况	(34)
2.2 压缩机选型	(41)
2.3 压缩机应用与选型示例	(45)
参考文献	(54)
3 零件材料、许用应力及强度计算方法	(55)
3.1 金属材料的性能	(55)
3.2 摩擦与磨损	(62)
3.3 黑色金属种类与性能	(64)
3.4 有色金属种类与性能	(75)
3.5 橡胶、黏合与密封胶、泡沫塑料	(83)
3.6 自润滑材料及其充填与复合	(90)
3.7 零件材料的许用应力及可靠性	(98)
3.8 一些通用零件及专用零件设计计算示例	(103)
参考文献	(136)

第二篇 往复压缩机

4 往复压缩机热力性能与热力计算	(137)
4.1 缸内工作过程分析	(137)
4.2 热力性能参数及评价	(153)
4.3 常规热力计算	(158)

4.4	复算性热力计算	(168)
	参考文献	(172)
5	往复压缩机动力性能分析与计算	(173)
5.1	曲柄连杆机构运动关系	(173)
5.2	往复压缩机列的作用力分析	(175)
5.3	总切向力及飞轮距的确定	(181)
5.4	往复压缩机动力平衡	(187)
5.5	基础和减振设计	(204)
	参考文献	(205)
6	往复压缩机结构与零部件	(206)
6.1	往复压缩机结构与装置	(206)
6.2	气缸组件	(235)
6.3	活塞组件	(262)
6.4	活塞杆与十字头组件	(272)
6.5	连杆组件	(281)
6.6	曲轴	(289)
6.7	机身组件及盘车机构	(299)
6.8	滑动密封组件(活塞环与填料等)	(313)
6.9	气阀部件	(331)
	参考文献	(350)
7	往复压缩机辅助系统	(351)
7.1	冷却系统与设备	(351)
7.2	润滑系统与设备	(380)
7.3	压缩机容积流量调节	(397)
7.4	气体管道	(409)
	参考文献	(429)

第三篇 特种往复压缩机与回转压缩机

8	隔膜压缩机与液、气力驱动往复压缩机	(431)
8.1	金属膜片隔膜压缩机	(431)
8.2	非金属膜片隔膜压缩机	(443)
8.3	气体增压器	(448)
8.4	液力驱动增压压缩机	(449)
	参考文献	(452)
9	螺杆压缩机	(453)
9.1	单螺杆压缩机	(453)
9.2	双螺杆压缩机	(476)
9.3	两种螺杆压缩机比较	(513)
9.4	附加功耗及内容积比设置	(515)

参考文献 (518)

10 液环压缩机与罗茨鼓风机 (519)

10.1 液环压缩机 (519)

10.2 罗茨鼓风机 (532)

参考文献 (547)

第四篇 动力式压缩机

11 离心压缩机 (548)

11.1 离心压缩机的工作原理与结构特点 (548)

11.2 性能、调节与控制 (570)

11.3 安全可靠 (582)

11.4 离心压缩机热力设计 (606)

11.5 三元流动理论和三元叶轮设计 (629)

11.6 离心压缩机的选型 (641)

参考文献 (642)

12 轴流压缩机 (643)

12.1 轴流压缩机的结构与工作原理 (643)

12.2 级中的能量损失和级效率 (652)

12.3 平面叶栅实验与设计 (658)

12.4 叶片扭曲规律 (665)

12.5 三元流动理论分析与叶片设计 (672)

12.6 多级轴流压缩机 (678)

12.7 透平压缩机(离心压缩机和轴流压缩机)的选型 (683)

参考文献 (701)

13 通风机 (702)

13.1 通风机的分类、用途、型号编制与主要性能参数 (702)

13.2 离心式通风机的结构、工作原理、性能和调节 (709)

13.3 轴流式通风机的结构、工作原理、性能和调节 (721)

13.4 通风机的选型与使用 (727)

参考文献 (733)

第五篇 压缩机驱动

14 电动机与内燃机 (735)

14.1 电动机驱动 (735)

14.2 内燃机驱动 (756)

参考文献 (763)

15 工业汽轮机 (764)

15.1 工业汽轮机的特点及应用 (764)

15.2	工业汽轮机装置和工作原理	(767)
15.3	工业汽轮机的类型和部件结构	(771)
15.4	工业汽轮机调节和运行特性	(779)
	参考文献	(790)
16	燃气轮机和烟气轮机	(791)
16.1	燃气轮机和烟气轮机的特点及应用	(791)
16.2	装置和工作原理	(795)
16.3	类型和部件结构	(799)
16.4	调节和运行特征	(808)
	参考文献	(814)

第六篇 自动控制、防噪声与气体净化

17	压缩机装置控制和自动化	(816)
17.1	压缩机测量技术	(816)
17.2	自动控制原理	(826)
17.3	典型压缩机机电一体化系统	(835)
	参考文献	(862)
18	压缩机、通风机噪声及降噪措施	(864)
18.1	噪声概述	(864)
18.2	压缩机、通风机噪声产生的原因	(870)
18.3	噪声测量	(875)
18.4	压缩机、通风机降噪措施	(879)
	参考文献	(895)
19	气体净化与净化设备	(897)
19.1	气体净化的重要性	(897)
19.2	气体干燥	(901)
19.3	气体净化的方法	(911)
19.4	气体净化工艺流程	(912)
19.5	典型气体净化设备	(915)
	参考文献	(919)

附录一	部分常用图表	(920)
1.	附表	(920)
表 A-1	国内主要城市海拔高度与平均大气压力	(920)
表 A-2	各种单位(量纲)换算	(922)
表 A-3	常用物质的物理与热力学性质	(927)
表 A-4	几种常见气体在水中的溶解度	(935)
表 A-5	常见易燃、易爆、有毒物质的主要安全技术数据	(936)
表 A-6	某些固体材料的重要热物理性质	(938)
表 A-7	中位序表	(939)

表 A-8	国内外常用钢铁材料牌号对照表	(940)
表 A-9	摩擦副材料性能	(943)
表 A-10	轴端密封等常用摩擦副材料组合的 $[pv]$ 值	(945)
表 A-11	弹性密封材料特性	(946)
表 A-12	气阀弹簧力与气体力之比 μ 值的计算表	(947)
表 A-13	往复压缩机行程-转角转换计算因子 $g_i(\theta)$ 表	(949)
表 A-14	国内外压缩机油牌号对照表(近似性能)	(953)
2.	附图	(954)
图 B-1	通用压缩因子(压缩性系数) Z 值	(955)
图 B-2	按 p_r 、 T_r 确定 Δc_{pm}	(956)
图 B-3	按 p_r 、 T_r 确定 Δc_m	(956)
图 B-4	湿空气物性图	(961)
图 B-5	气体对比态热导率	(962)
图 B-6	气体对比态热导率与标准状态热导率的比值	(962)
图 B-7	常压下气体黏度共线图	(963)
图 B-8	无机气体在石油中的溶解度	(964)
图 B-9	硫化氢含量对钢的应力腐蚀图	(965)
图 B-10	氨的压-焓图	(966)
图 B-11	甲烷的压-焓图	(967)
图 B-12	乙烷的压-焓图	(967)
图 B-13	丙烷(R290)的压-焓图	(968)
图 B-14	异丁烷(R600a)的压-焓图	(969)
图 B-15	二氧化碳的压-焓图	(970)
图 B-16	乙烯的压-焓图	(971)
图 B-17	丙烯的压-焓图	(972)
3.	往复式压缩机部分标准	(973)
C-1	往复式空气压缩机基本参数	(973)
C-2	一般用固定式往复式空气压缩机技术条件	(974)
C-3	一般用往复式空气压缩机主要零部件技术条件	(979)
C-4	往复式压缩机金属平面三、六瓣密封圈尺寸	(984)
C-5	往复式压缩机金属平面径向切口刮油圈尺寸	(986)
C-6	往复式压缩机金属平面密封圈和刮油圈用拉伸弹簧	(989)
C-7	往复式压缩机金属平面密封圈和刮油圈技术条件	(990)
C-8	往复式压缩机连杆小头衬套	(991)
C-9	往复式压缩机薄壁轴瓦	(996)
C-10	往复式压缩机气阀安装尺寸	(1005)
C-11	容积式压缩机流量测量方法	(1007)
附录二	国内部分相关工厂、企业信息介绍	(1029)

第一篇 基础知识

1 气体种类与性质

1.1 气体的种类与计量

从事压缩机设计与研究,或选型与运行的人,都得与气体打交道。因此,对被处理气体,必须有基本的认识。

1.1.1 气体定义

(1) 对单一气体的界定

ISO/FDIS 11622—2005 将单一气体界定为:

- ① 永久气体 临界温度 $< -10^{\circ}\text{C}$, 如 N_2 、 O_2 、 H_2 、 Ar 等双、单原子气体;
- ② 高压液化气体 临界温度 $> -10 \sim 70^{\circ}\text{C}$, 如 CO_2 、 SF_6 、 HCl 等;
- ③ 低压液化气体 临界温度 $> 70^{\circ}\text{C}$, 如 NH_3 、 SO_2 、 H_2S 等。

(2) 理想气体与实际气体

① 理想气体 指气体分子既不占有体积也没有质量。实际上,这种气体是不存在的。但在计算中将某些气体处理成理想气体可使问题的讨论简化。比如,对于一些单原子气体,如氩、氦,以及一些双原子气体,如氮、氧等,在常温下压力小于 10MPa 时当成理想气体来处理,误差仅 $1\% \sim 2\%$ 。即使是 CO_2 、 NH_3 等多原子气体压力在 3MPa 以下,也可当成理想气体来处理。

② 实际气体 气体分子实际具有体积,当直径为 $\text{\AA}$ ($=10^{-10}\text{m}$) 数量级,并且彼此间具有相对复杂的作用力,它们主要有下列诸种:

范德华力 又称为分子间引力,主要包括静电力、诱导力和色散力三种力。静电力指分子的永久偶极矩间的相互作用;诱导力指被诱导的偶极矩和永久偶极矩间的相互作用;色散力指被诱导偶极矩之间的相互作用,它是存在于分子或原子之间的一种相互作用的吸引力,作用势能的能量级是 $0.41868 \sim 4.1868\text{J/mol}$ 。范德华力的作用范围是 $3 \sim 5\text{\AA}$, 即 $(3 \sim 5) \times 10^{-10}\text{m}$ 。范德华力中最主要的是色散力,但对于强极性分子,主要作用力是静电力。

氢键 有些化合物中,氢原子可以同时和两个电负性很大而原子半径很较小的原子(O 、 F 、 N 等)相结合,这种结合称为氢键。一般认为, H 和另外两个原子 X 、 Y 结合成 $\text{X}-\text{H}\cdots\text{Y}$ 时,其中 $\text{X}-\text{H}$ 键基本上是共价键,而 $\text{H}\cdots\text{Y}$ 则是强力的有方向的范德华力。这种吸引作用一般在 41.86J/mol 以下,比化学键的键能小,但和范德华力数量级相同,所以常把氢键归入范德华力。但是,氢键有两个与一般范德华力不同的特点,即它的饱和性和方向性。氢键的饱和性表现在 $\text{X}-\text{H}$ 只能和一个 Y 原子相结合,因为 H 原子很小,而 X 、 Y 原子都相当大,另一个 Y 原子接近时,受到的 X 、 Y 原子的排斥力大于 H 原子的吸引力;另一方面,

X-H的电偶极矩与Y的相互作用,只有当X-H...Y在同一直线上时才最强烈,这就是氢键具有方向性的原因。

相斥力 原子间和分子间不仅有相互吸引力,而且当其距离小时相互间有相斥力。相斥力的产生有两种情况:其一,当分子间相互接近至电子云相互渗透时,电子负电荷间有相斥作用,而且核电荷间也有相斥作用;其二,当分子间外层轨道中的电子发生交换时,自旋同向电子相互回避,产生相斥力。

偏心力 不规则形状的非极性分子间的相互作用,不仅应考虑分子中心的相互作用,而且应该考虑分子各部分间的相互作用。不规则形状的分子之间的相互作用力是分子各部分相互作用力之和。偏心因子 ω (表征分子的偏心性或非球形分子偏离球对称的程度)就反映了非中心部分相互作用的影响。偏心因子这一物性常数的值一般在0~0.7之间。

③ 极性气体、非极性气体和量子气体

根据分子间相互作用力性质的不同,还可以把实际气体区分为极性气体、非极性气体和量子气体。

极性气体 指由极性分子(所带正负电荷的中心不重合的分子)组成的气体。极性气体分子有永久偶极矩,相互作用力除色散力和诱导力外,强极性气体的静电力较大。氢键作用气体也可称极性气体的一种形式。水蒸气、氨和某些氟利昂气体都是极性气体。

非极性气体 指由非极性分子(所带正负电荷的中心重合的分子)组成的气体。非极性气体分子没有偶极矩,相互作用力主要是色散力,即瞬时的诱导偶极矩之间的作用力,如惰性气体Ar、Kr、Xe等。

量子气体 指相对分子质量很小的轻气体,如Ne、H₂、He、D₂(重氢)等。在低温时,这些气体分子可能占据的能量级数很小,因此能量变化时呈离散型而不是连续型,即低温时平动模型必须量子化,有显著的量子效应。

1.1.2 气体的温度与压力

(1) 气体温度

气体温度是气体分子热运动的一种表现形式,它可以进行具体计量。

① **摄氏温度** 在标准压力 $p_0 = 101.3\text{kPa}$ 下,以水的三相点温度(习称冰点),定义为零度,水的沸点定义为100度,其间为100个等分刻度,单位为℃,用英文字母 t 表示摄氏温度。

② **热力学温度** 以物质分子完全停止运动时为绝对零度,单位为K。以水的三相点定义为273.15K,并以 T_0 表示,刻度与摄氏温度相同,以英文字母 T 表示热力学温度。0K相当于-273.15℃,因此

$$t = T - T_0 \text{ 或 } T = T_0 + t \quad (1-1)$$

式中, $T_0 = 273.15\text{K}$ 或可近似地用 $T_0 = 273\text{K}$ 。

(2) 气体压力

① **定义** 气体压力也称压强,是气体分子热运动作用在壁面上的力。气体压力在SI单位制中,定义为每平方米壁面上作用1牛顿力为1帕斯卡(Pascal),简称帕,代号为Pa,也即 $1\text{Pa} = 1\text{N/m}^2$ 。根据所计量压力的高低,压力单位还可表1-1中各种代号。此外,还定义 $10^5\text{Pa} = 1\text{bar}$ (巴),在英语国家常用bar为单位。

表 1-1 压力单位符号

量级	帕	百帕	千帕	兆帕	吉帕	毫帕	微帕
	1 Pa = 1 N/m ²	10 ² Pa	10 ³ Pa	10 ⁶ Pa	10 ⁹ Pa	10 ⁻³ Pa	10 ⁻⁶ Pa
代号	Pa	hPa	kPa	MPa	GPa	mPa	μPa

② 大气压力 地球表面的空气作用于地表的力，其值与海拔高度及温度有关，表 1-2 所列为大气压力与海拔高度等的一般关系数值。此外，人们定义北纬 45°、海平面(海拔为 0m)、温度为 15℃时的大气压力为 760mmHg 柱为 1 物理大气压，也即 1 标准大气压，因为 760mmHg = 101.33kPa，故在化工等计算中，均把 101.33kPa 作为 1 标准大气压力。

表 1-2 不同海拔高度时的大气状态(US, 1962)

海拔高度/m	大气压力/(× 10 ⁵ Pa)	大气温度/℃	大气密度/(kg/m ³)
- 200	1. 038	16. 3	1. 249
- 100	1. 025	15. 7	1. 237
0	1. 013	15. 0	1. 225
100	1. 001	14. 4	1. 213
200	0. 989	13. 7	1. 202
300	0. 977	13. 1	1. 190
400	0. 966	12. 4	1. 179
500	0. 955	11. 8	1. 167
600	0. 943	11. 1	1. 156
800	0. 921	9. 8	1. 134
1000	0. 899	8. 5	1. 112
1200	0. 877	7. 2	1. 090
1400	0. 856	5. 9	1. 069
1600	0. 835	4. 6	1. 048
1800	0. 815	3. 3	1. 027
2000	0. 795	2. 0	1. 007
2200	0. 775	0. 7	0. 986
2400	0. 756	- 0. 6	0. 967
2600	0. 738	- 1. 9	0. 947
2800	0. 719	- 3. 2	0. 928
3000	0. 701	- 4. 5	0. 909
3200	0. 684	- 5. 8	0. 891
3400	0. 666	- 7. 1	0. 872
3600	0. 649	- 8. 4	0. 854
3800	0. 633	- 9. 7	0. 837
4000	0. 617	- 11. 0	0. 819
4500	0. 577	- 14. 2	0. 777
5000	0. 540	- 17. 5	0. 736
5500	0. 505	- 20. 7	0. 697
6000	0. 472	- 24. 0	0. 660
6500	0. 441	- 27. 2	0. 624
7000	0. 411	- 30. 5	0. 590
7500	0. 383	- 33. 7	0. 557
8000	0. 357	- 36. 9	0. 526

③ 表压力与绝对压力 用压力表测得的压力称为表压力。它是容器中的压力与当地大气压力之差。大气压力由气压计测量。

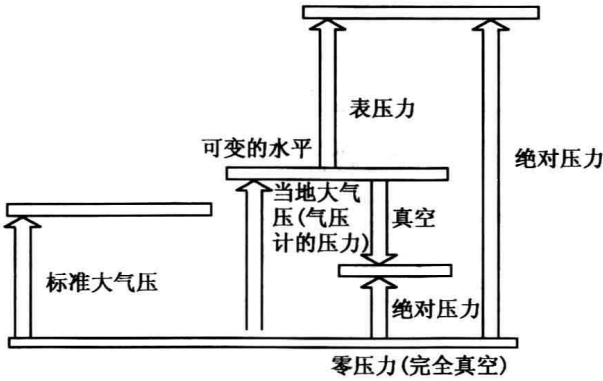


图 1-1 各种压力及真空的关系

容器中的绝对压力为表压力与当地大气压力之和。在本手册中，凡压力单位后不加说明的，均指绝对压力。

④ 真空 指容器中或系统中的一种气体压力状态，它低于周围环境的大气压力，用真空计测量。真空如用绝对压力表示，即环境大气压力减去真空计压力读数，单位为 Pa。图 1-1 中示出了各种压力及真空的关系。

1.1.3 气体的度量

(1) 摩尔(mole)

气体的物质质量以摩尔计算，代号为 mol。定义单位物质的量(1mol)在 1 标准大气压，293K(20℃)时，任何气体有 6.023×10^{23} 个分子，其具有的质量叫做摩尔质量，如 H₂O 的摩尔质量为 18g/mol。每一种气体 1 摩尔有一定的体积量。一些气体在标准状态下的摩尔体积可见表 1-3，在临界状态时摩尔体积值见表 1-4。

表 1-3 一些气体标准状态下的摩尔体积值 (L/mol)

气体名称	摩尔体积	气体名称	摩尔体积
空气	22.414	甲烷	22.36
氮	22.40	乙烷	22.16
氧	22.39	丙烷	22.00
氦	He ³ 22.42	正丁烷	21.50
	He ⁴ 22.63	异丁烷	21.78
氟	23.16	正戊烷	20.87
一氧化碳	22.4	乙烯	22.257
二氧化碳	22.26	丙烯	21.990
水蒸气	22.45	丁烯	21.607
硫化氢	22.14	乙炔	22.223
二氧化硫	21.89	氢化锗(GeH ₄)	* 24.147
氨	22.08		

* 温度为 21.1℃。

表 1-4 一些气体临界状态下的摩尔体积值 (cm³/mol)

气体名称	摩尔体积	气体名称	摩尔体积
氮	90.1	一氧化碳	57.7
氩	74.59	硅烷(SiH ₄)	132.7
氟	66.2	六氟化硫(SF ₆)	79.17

(2) 气体密度与比体积

① 密度 指单位体积气体的质量, 符号为 ρ , 单位为 g/cm^3 或 kg/m^3 。

② 比体积 指单位质量气体所占有的体积, 符号为 v , 单位为 cm^3/g 或 m^3/kg 。

因此, 两者的关系为 $\rho = 1/v$ 或 $v = 1/\rho$ 。

1.1.4 气体状态与状态参数 p 与 T

(1) 状态参数

气体会因受热而温度上升, 体积膨胀, 因冷却而温度降低, 体积缩小; 并且气体会因受到压缩而体积缩小, 而降低压力则体积膨胀而增大。因此, ρ 与 v 并非定值, 它与气体所处的状态, 即气体所处的温度 T 和压力 p 有关。由此人们称 p 和 T 为气体的状态参数。因此, 还有必要确定一个标准状态。

(2) 标准状态(Standard Condition)与参考状态(Normal Condition)

国际标准化组织(ISO 504—1984)规定: 气体标准状态的温度 $T_0 = 273.15\text{K}$, 压力 $p_0 = 101.325\text{kPa}$ 。

ISO 与 1991 年 TC 193 文件公布部分国家还用参考状态, 其压力与标准状态相同, 而温度则有所差别。欧洲大陆国家, 如德国、法国、意大利、奥地利、丹麦、荷兰、比利时等, 此外还有日本, 参考状态温度均与标准状态相同为 0°C 。英语国家, 如美国、英国、加拿大、澳大利亚均为 15°C , 但爱尔兰为 1°C ; 俄罗斯为 0°C 或 20°C 。

中国标准 GB 1314—1977 及 GB 17820—1999 规定参考状态温度为 20°C 。

1.1.5 气体相变

(1) 临界温度与临界压力

气体是能转变成液体的, 在化学工业中把气体所处的状态称为气相, 液体状态为液相, 故气体变为液体便称为相变。气体的相变取决于气体所处的温度和压力。

当气体被冷却, 其温度不断降低时便可能液化。气体刚开始液化时的温度便称为“临界温度”, 以 T_c 表示; 与这一温度相应的气体压力称为“临界压力”, 以 p_c 表示。临界温度是气体液化的最高温度, 气体温度高于临界温度永远不会液化, 成为永久气体; 若气体温度低于临界温度则均能液化, 其相应的压力也低于临界压力。

(2) 单组分气体相变曲线图

可以用状态参数作为坐标来表示相变的情况。图 1-2 是 $p-v-T$ 三维坐标来全面表示单一气体的相变情况。图中 HCK 曲线称为相界曲线, 相界曲线内 HI 线以上称为气液两相区, T_c 为临界温度, 相应的临界压力为 p_c 。关于气、液、固相的情况可直接从图中看出, 其中 H 点为气、液、固三相点。

图 1-3 为纯组分相变在 $p-T$ 图上的表示, 其中 $H-D$ 为固液分界线, $H-C$ 为气液分界线, 相界曲线范围内 $b-d$ 相重合。

(3) 饱和蒸气压与饱和蒸气温度

在相界曲线内气体呈饱和状态。曲线右边 CI 称为露点线, 气体进入该线便开始凝露(液); 曲线左边的 CH 称为泡点线, 液体进入该线便开始发泡汽化。在相界曲线内某一状态的压力与温度都是恒定的, 整个液化或汽化的过程是靠外界的冷却或加热来实现。

气体在标准状态压力($p = 101.325\text{kPa}$)下的饱和蒸气温度称为该气体的饱和蒸气温度, 用符号 T_b 表示。

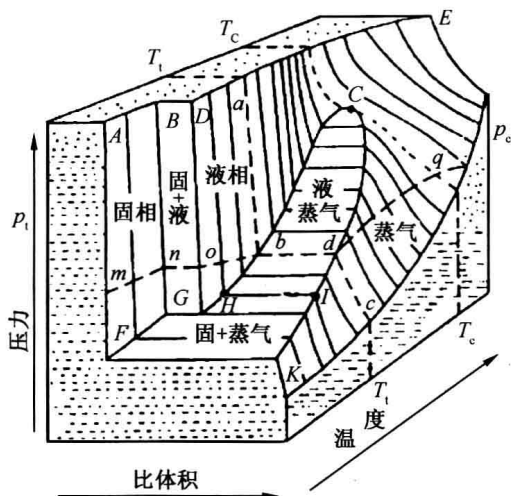


图 1-2 纯组分的 $p-v-T$ 图

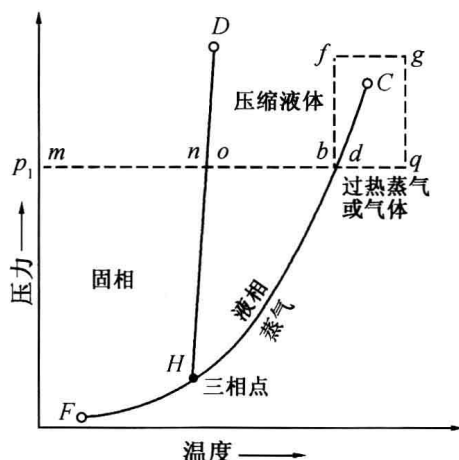


图 1-3 纯组分的 $p-T$ 图

(4) 两组分及多组分体系相变

图 1-4 为组成一定的两组分体系的 $p-T$ 图。图中，由泡点线、临界点和露点线构成的相包络线以及所包围的相包络区位置，取决于体系组成和各组分的蒸气压线。图 1-4 与图 1-3 之间的区别在于两组分体系的露点线与泡点线并不重合但却交汇于临界点，因而在相包络区内还有表示不同气、液含量或汽化百分数的等汽化率线（图 1-4 中仅表示了 90% 汽化率线）。此外，两组分体系在高于临界温度 T_c 时仍可能有饱和和液体存在，直至最高温度点 M 为止。 T_M 是相包络区内气、液能够平衡共存的最高温度，称为临界冷凝温度。同样，在高于临界压力 p_c 时仍有可能有饱和和蒸气存在，直至最高压力点 N 为止。 p_N 是相包络区内气、液能够平衡共存的最大压力，称为临界冷凝压力。 T_M 和 p_N 的大小和位置取决于体系中的组分和含量。

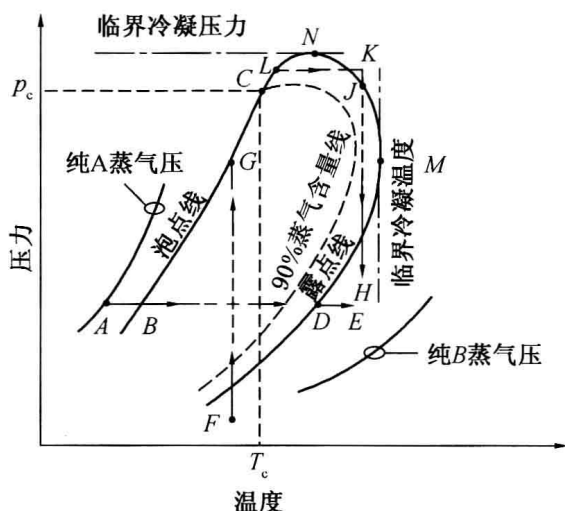


图 1-4 两组分体系相变 $p-T$ 图

正是由于两组分体系的临界点 C 、临界冷凝温度点 M 和临界冷凝压力点 N 并不重合，因而在临界点附近的相包络区内会出现反凝析（倒退冷凝、反常冷凝）现象，即在等压下升高温度时可以析出液体（见 LK 线），而在等温下降低压力时会使蒸气冷凝（见 JH 线）。对于纯组分，这是完全不可能的。

1.2 气体的状态方程

1.2.1 理想气体状态方程

$$pv = RT \text{ 或 } pV = mRT \quad (1-2)$$

$$PV = NR_m T \quad (1-3)$$

式中： R 为气体常数，各种气体常数不同，见附录一表 A-1，对于各种气体它是一定值； v 为比体积， m^3/kg ； m 为气体质量， kg ； N 为物质的量， $N = m/M$ ，其中 M 为相对分子质量；

R_m 为通用气体常数, $R_m = MR$, 对任何气体 $R_m \approx 8310\text{J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ 。

实际气体要计及分子体积与分子间作用力的影响, 可用以下两种方法对理想气体状态方程进行修正:

(1) 压缩因子法

将气体状态方程表示为

$$pv = ZRT \tag{1-4}$$

式中, Z 为修正系数, 称为压缩因子, 也称压缩性系数, 其值由实验确定, 或由对比态原理求得。

令: $p_r = p/p_c$, $v_r = v/v_c$, $T_r = T/T_c$, 并 $Z_c = p_c v_c / (RT_c)$

对比态方程中也只两个参数独立, 故方程中(1-4) Z 可表示为 $Z = f(p_r, T_r, Z_c)$ 。

Lydersen-Greenkonn-Hougen 分析了常用的 82 种物质的 Z_c 值(在附录 A-3 中列有一些气体的 Z_c 值), 根据 Z_c 值的不同而把物质分为四个热相似组:

$Z_c = 0.23$	水
平均 $Z_c = 0.25 (0.24 < Z_c < 0.26)$	氨
平均 $Z_c = 0.27 (0.26 < Z_c < 0.28)$	80% 烃类
平均 $Z_c = 0.29 (0.28 < Z_c < 0.30)$	O_2 、 N_2 、 CO 、 CH_4 、 C_2H_6 、 Ar 、 H_2S

对每组物质仍应用二参数对比态原理计算, 构造了以 p_r 、 T_r 、 Z_c 三个参数来确定物质的压缩因子的表, 简称 LGH 表, 可参阅参考文献[7]及附录 B-1。

压缩系数 Z 的简捷估算可查图 1-5 的列线图。

除了氮、氢、蒸气、氨气体外, 据称准确度可达 1%。

(2) 实际气体状态方程对容积与压力进行修正

① 范德华方程

$$p = \frac{RT}{v - b} - \frac{a}{v^2} \tag{1-5}$$

式中, a 、 b 是物理常数, 其值可根据临界参数(p_c , T_c)求取。

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{27}{64} \frac{(RT_c)^2}{p_c} \\ b &= \frac{RT_c}{8p_c} \end{aligned} \right\} \tag{1-6}$$

范德华方程是实际气体状态方程最基本的形式, 后来又在此基础上导出了许多更精确的修正形式。

② RKS(Redlich-Kwong-Soave) 方程

$$p = \frac{RT}{v - b} - \frac{a(T)}{v(v + b)} \tag{1-7}$$

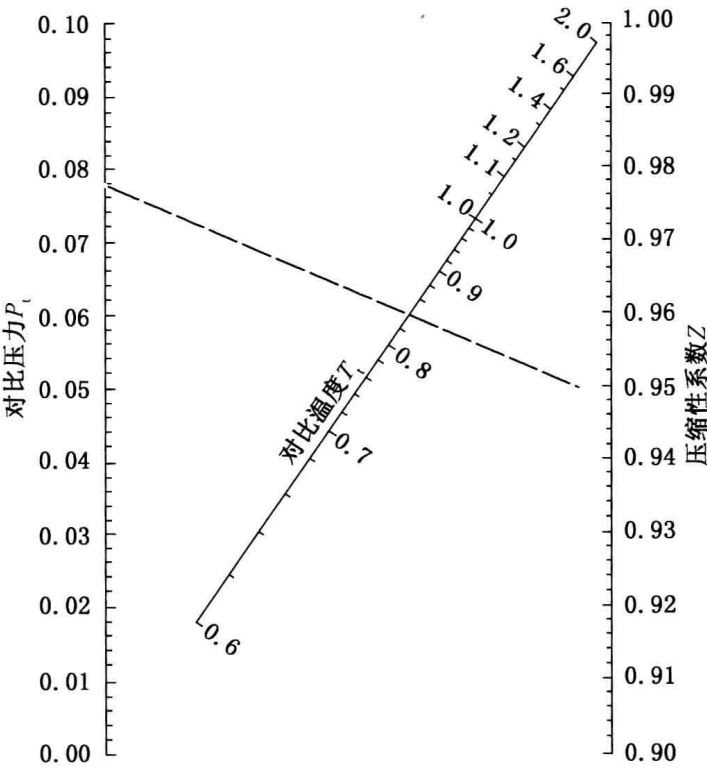


图 1-5 气体的通用压缩系数(摘自《Petroleum Refiner》Vol. 37, No. 11, Houston Gulf 出版公司, 1961 年)