

气田工人自学丛书

天然气处理工艺理论基础

李延平 孟 萍 编

石油工业出版社

气田工人自学丛书

天然气处理工艺理论基础

李延平 孟 萍 编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书介绍了我国目前天然气处理过程中的集输、净化、回收轻烃、天然气液化及储运等方面的有关基础理论知识。全书共分十二章，主要涉及了物理化学、热力学、流体力学及化工原理等方面的基本概念。书中内容由浅入深通俗易懂，是一本较好的自学读物。

本书可供从事天然气工业、化工工业的工人学习，也可作为有关技工学校的教学参考书，同时也可供大、中专有关专业的师生学习参考。

气田工人自学丛书
天然气处理工艺理论基础
李延平 孟 萍 编

石油工业出版社出版
(北京安定门外安华里二区一号楼)
北京海淀吴海印刷厂排版印刷
新华书店北京发行所发行



787×1092毫米 32开本16⁷/₈印张 370千字 印1-3,000

1990年11月北京第1版 1990年11月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-0434-8/TE·420

定价：3.50元

序 言

我国是开发和利用天然气最早的国家，解放后，在党和国家的亲切关怀下，我国天然气工业有了更快的发展，逐步建立了完整的工业体系。天然气和石油在勘探方面有许多共同之处，但在矿场处理方面则有相当大的差异。本书说的天然气矿场处理过程，是指天然气由井口流出到送至用户之间的一系列加工处理过程，包括天然气集输、净化、提氮、回收轻烃、天然气液化和储运等过程。本书主要介绍与这些过程有关的基础理论知识。

天然气工业在我国是一新兴工业，可供参考和借鉴的书不多，编者仅根据自己的工作经验将有关内容分成十二章，主要涉及物理化学和化工原理方面的知识。由于涉及范围较广，书的篇幅有限，故书中重点介绍基本概念，作为有关工人及技术人员进一步学习这方面知识的基础。

本书供天然气工业中有关工人和其他人员自学用，也可作为有关技工学校的教学参考书，并可供大、中专学校有关专业的教师和学生参考。

编者学识有限，书中会存在缺点和错误，希望读者提出宝贵的批评和建议，帮助我们及时纠正。

编者

1989年2月于成都

目 录

第一章 气体的状态方程式	(1)
第一节 低压气体的实验定律.....	(1)
一、波义耳定律.....	(1)
二、查理和盖·吕萨克定律.....	(2)
三、阿佛加德罗定律.....	(3)
第二节 理想气体状态方程式.....	(3)
一、真实气体和理想气体.....	(3)
二、理想气体状态方程式.....	(4)
三、混合气体分压定律和分体积定律.....	(6)
第三节 真实气体状态方程式.....	(9)
一、真实气体等温线.....	(9)
二、真实气体状态方程式.....	(11)
第四节 对比态原理和压缩因子图.....	(17)
一、对比态原理.....	(17)
二、压缩因子.....	(18)
三、压缩因子图.....	(19)
第五节 真实气体混合物的 pVT 计算.....	(32)
一、虚拟临界参数和压缩因子图法.....	(32)
二、混合气体的通用关系式.....	(33)
三、用R-K方程计算混合气体.....	(35)
四、天然气的 pVT 具体计算.....	(36)
第二章 热力学基础	(47)
第一节 热力学基本概念.....	(48)
一、体系与环境.....	(48)
二、体系的性质和状态函数.....	(48)

三、平衡状态与准平衡过程.....	(50)
四、可逆过程与不可逆过程.....	(51)
第二节 内能、热量、功.....	(53)
一、内能.....	(53)
二、热量.....	(53)
三、功.....	(55)
第三节 热力学第一定律.....	(56)
第四节 热力学第一定律对理想气体的应用.....	(57)
一、理想气体的等容过程.....	(57)
二、理想气体的等压过程.....	(59)
三、 C_p 与 C_v 间的关系.....	(60)
四、理想气体的等温过程.....	(61)
五、理想气体的绝热过程.....	(62)
六、理想气体绝热过程与等温过程的比较.....	(64)
第五节 卡诺循环.....	(66)
第六节 热力学第二定律.....	(70)
一、热力学第二定律的表述方法.....	(70)
二、热力学第二定律的统计意义.....	(72)
三、卡诺定理.....	(73)
第三章 能量转换及其计算	(76)
第一节 焓、熵、自由能、自由焓.....	(76)
一、焓.....	(76)
二、熵.....	(78)
三、自由能和自由焓.....	(80)
第二节 热容.....	(83)
一、平均热容.....	(84)
二、真实气体热容.....	(85)
三、混合气体热容.....	(86)
第三节 焓和熵的计算.....	(88)

一、焓和熵的基本计算公式.....	(88)
二、气体焓和熵的计算.....	(90)
第四节 能量平衡关系.....	(103)
一、能量的形态.....	(103)
二、总能量平衡式.....	(104)
三、能量转换计算的适用公式.....	(107)
第五节 物理过程的热效应形式和计算.....	(109)
一、显热.....	(110)
二、潜热.....	(110)
三、溶解热.....	(110)
四、稀释热.....	(110)
第六节 化学反应热的计算.....	(112)
一、标准反应热的计算.....	(113)
二、温度与压力对化学反应热的影响.....	(116)
第四章 溶液的基本性质.....	(119)
第一节 概述.....	(119)
一、溶液的定义.....	(119)
二、溶质和溶剂.....	(119)
三、溶液的浓度.....	(120)
第二节 偏摩尔数量.....	(121)
一、偏摩尔数量的定义.....	(122)
二、偏摩尔数量的集合公式.....	(123)
三、吉布斯-杜亥姆公式.....	(125)
第三节 稀溶液的实验定律.....	(125)
一、液体的饱和蒸汽压.....	(126)
二、拉乌尔定律.....	(127)
三、亨利定律.....	(128)
第四节 理想溶液与真实溶液.....	(130)
一、理想溶液的定义.....	(130)

二、理想溶液的蒸汽压与组成的关系.....	(131)
三、理想溶液的通性.....	(132)
四、真实溶液对理想溶液的偏差.....	(132)
第五节 逸度.....	(134)
一、逸度和逸度系数的定义.....	(135)
二、纯组分逸度和逸度系数的计算.....	(137)
三、混合气体中组分逸度的计算.....	(146)
四、混合气体逸度的计算.....	(147)
第六节 活度.....	(149)
一、活度与活度系数的定义.....	(149)
二、活度系数的计算.....	(151)
第五章 汽-液两相平衡及计算	(157)
第一节 相平衡基本知识.....	(157)
一、相及相图.....	(157)
二、组分数和独立组分数.....	(158)
三、自由度数和相律.....	(159)
四、汽-液相平衡条件.....	(161)
第二节 单组分体系的相图.....	(163)
第三节 纯组分蒸汽压与温度的关系.....	(164)
第四节 双组分体系的相图.....	(168)
一、理想溶液的汽-液相平衡图.....	(169)
二、真实溶液的相图.....	(171)
第五节 多组分体系的临界区域现象.....	(174)
一、临界状态.....	(174)
二、反凝析现象和反蒸发现象.....	(176)
三、虚拟临界状态.....	(179)
第六节 汽-液相平衡关系式.....	(180)
第七节 汽-液相平衡的计算.....	(185)
一、露点温度和泡点温度的计算.....	(186)

二、汽-液相平衡常数的计算.....	(187)
第八节 闪蒸计算.....	(200)
第六章 流体力学基础	(206)
第一节 流体的基本性质.....	(207)
一、密度.....	(207)
二、比容.....	(208)
三、粘度.....	(208)
四、压力.....	(211)
第二节 流体的流动形态.....	(212)
一、流量和流速.....	(212)
二、流体的流动形态.....	(214)
第三节 流体静力学基本方程.....	(217)
一、流体静力学基本方程的推导.....	(217)
二、流体静力学方程应用举例.....	(218)
第四节 流体动力学基础.....	(220)
一、有关基本概念.....	(220)
二、流体的连续性方程.....	(222)
三、流体动力学基本方程——伯努利方程.....	(223)
第五节 流体流动阻力.....	(227)
一、流体阻力的产生.....	(227)
二、流体阻力的计算.....	(228)
第六节 伯努利方程式的应用.....	(236)
一、应用举例.....	(236)
二、天然气输气管能力计算公式的推导.....	(240)
三、天然气流量测定理论公式.....	(249)
第七章 传热学基础	(253)
第一节 基本概念.....	(253)
一、传热的三种形式.....	(253)
二、稳定传热和不稳定传热.....	(254)

三、传热速率和热强度.....	(256)
第二节 导热.....	(256)
一、导热基本方程式.....	(256)
二、导热系数.....	(257)
三、平面壁的稳定传热.....	(260)
四、圆筒壁的稳定传热.....	(262)
第三节 对流传热.....	(268)
一、对流传热基本方程式.....	(268)
二、给热系数.....	(270)
第四节 辐射传热.....	(285)
一、基本定义.....	(285)
二、黑体与灰体的发射能力.....	(287)
三、两个固体壁面间的辐射传热.....	(288)
四、辐射传热和对流传热.....	(290)
第五节 换热器的计算.....	(291)
一、换热器的传热速率和传热系数.....	(291)
二、传热平均温度差.....	(295)
三、强化传热过程的方法.....	(300)
第六节 列管式换热器.....	(301)
第七节 其它类型的换热器.....	(306)
一、夹套式换热器.....	(306)
二、套管式换热器.....	(306)
三、蛇管式换热器.....	(307)
四、板式换热器.....	(308)
第八章 精馏和吸收.....	(310)
第一节 精馏.....	(310)
一、精馏原理及装置流程.....	(310)
二、精馏塔的物料恒算.....	(312)
三、回流比的选定.....	(320)

四、连续精馏塔理论塔板数的计算.....	(323)
五、多组分精馏.....	(335)
第二节 吸收.....	(343)
一、吸收剂与吸收类型.....	(343)
二、吸收装置流程.....	(345)
三、吸收塔的物料恒算.....	(346)
四、最小吸收剂用量.....	(348)
五、吸收速率方程.....	(350)
六、吸收塔的计算.....	(352)
七、板式吸收塔的理论塔板数计算.....	(356)
八、多组分吸收与化学吸收.....	(357)
第三节 气液传质设备.....	(360)
一、板式塔.....	(360)
二、塔板数、塔径、塔高的计算.....	(363)
三、填料塔.....	(368)
四、填料塔塔径和压降的计算.....	(373)
第九章 吸附分离.....	(376)
第一节 物理吸附与化学吸附.....	(376)
第二节 吸附剂.....	(378)
一、吸附剂的性能参数.....	(378)
二、工业吸附剂应具备的主要性质.....	(381)
三、几种常用吸附剂的主要特点和用途.....	(382)
第三节 吸附平衡与吸附速度.....	(384)
一、平衡吸附量.....	(384)
二、单组分体系的吸附平衡.....	(386)
三、多组分气体的吸附平衡.....	(392)
四、吸附速度.....	(394)
第四节 吸附分离过程及原理.....	(395)
一、工艺过程.....	(396)

二、固定床吸附分离原理.....	(396)
三、脱附与再生.....	(398)
第五节 吸附分离在天然气工业中的应用.....	(400)
一、天然气脱水.....	(400)
二、天然气脱硫.....	(408)
第十章 制冷工艺与天然气液化	(413)
第一节 制冷原理.....	(414)
一、气体节流膨胀.....	(414)
二、气体作外功的绝热膨胀.....	(418)
三、气体节流膨胀与作外功的绝热膨胀的比较.....	(421)
第二节 制冷循环工艺.....	(423)
一、理想的制冷循环.....	(423)
二、实用的制冷循环.....	(426)
第三节 制冷循环的热力学分析和冷量损失.....	(436)
一、制冷循环的热力学分析.....	(437)
二、冷量损失分析.....	(440)
第四节 天然气液化.....	(443)
一、天然气的预处理.....	(443)
二、天然气液化制冷工艺.....	(444)
三、天然气液化装置.....	(444)
四、液化天然气汽化时的冷量回收.....	(445)
五、液化天然气的储存和运输.....	(447)
第十一章 水烃系统的计算	(452)
第一节 天然气的饱和含水汽量计算.....	(452)
第二节 水合物的形成.....	(458)
第三节 节流允许最大压降.....	(468)
第十二章 泵及压缩机	(473)
第一节 泵.....	(473)
一、离心泵.....	(474)

二、其它类型的液体输送设备.....	(493)
第二节 压缩机.....	(500)
一、往复式压缩机.....	(501)
二、离心式压缩机.....	(504)
三、真空泵.....	(505)

附录

附录1 临界参数和偏心率因子.....	(508)
附录2 液体比热共线图.....	(511)
附录3 气体比热共线图(常压下用).....	(515)
附录4 一些物质的基本热力学数据.....	(517)
附录5 一些化合物298K时的燃烧热	(526)

第一章 气体的状态方程式

气体的压力、温度和体积是气体物质的最基本性质，在进行与天然气有关的能量平衡、相平衡及其它计算中，离不开对三者的讨论，因此讨论和研究气体的压力、温度和体积之间的关系，对于天然气工业来说是非常重要的。

第一节 低压气体的实验定律

一、波义耳定律

很早以前人们就认识到气体的可压缩性，并将此性质应用于工业生产中，制造出了鼓风机和抽气机。但当时人们还不能定量地研究气体的压力、温度和体积三者间的相互关系。到十七世纪，生产的发展促使人们去研究气体的性质，寻找压力、温度和体积的关系。当时英国学者波义耳根据大量的实验结果，总结出·一条低压气体的实验定律，即“当温度 T 不变时，一定量气体的体积 V 与它的压力 p 成反比”。该定律的数学表达式为

$$V = \frac{k}{p} \quad (1-1)$$

式中 k ——比例常数，其值与气体的温度和数量有关。

(1-1)式表明了气体在低压范围内压力和体积的函数关系。此关系在 p - V 图上是一条双曲线，由于双曲线上所有

点对应的温度都相同，故称为等温线。不同温度在 $p-V$ 图上有不同位置的曲线，温度越高，曲线离坐标原点 O 越远，如图 1-1 所示。 $T_3 > T_2 > T_1$ 。

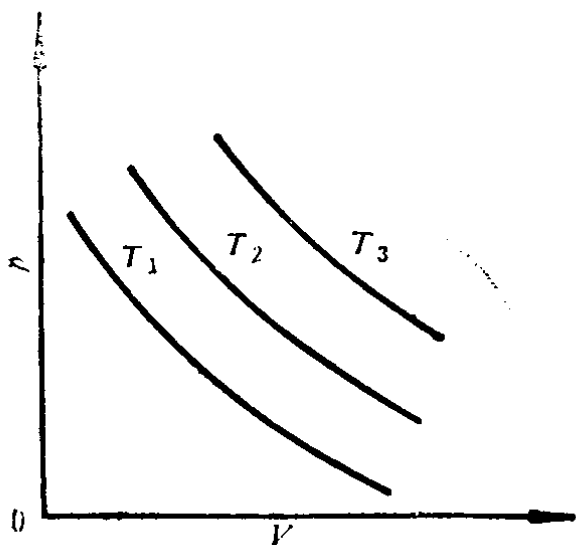


图1-1 低压气体等温线

波义耳定律只有在气体温度较高压力较低的情况下才能较好适用，在低温高压下会出现较大偏差。

二、查理和盖·吕萨克定律

查理和盖·吕萨克分别在1787年和1820年从大量实验中总结出一条反映低压气体 $V-T$ 关系的实验定律，即

“在压力一定的情况下，一定量气体的体积与温度成正比”。其数学表达式为：

$$V = cT \tag{1-2}$$

式中 c —比例常数，其值与气体的压力和数量有关。

式 (1-2) 在 $V-T$ 图上是一条直线，称为等压线。压力不同，直线在图中的位置不同。图1-2所示为一组不同压力下气体的 $V-T$ 关系曲线，其中 $p_1 > p_2 > p_3$ 。图中虚线表示，当温度低于某一个值时，气体开始发生相变，这时查理-盖·吕萨克定律不再适用。

查理-盖·吕萨克定律也是一个反映低压气体 $V-T$ 关系的实验定律，各种气体只有在低压下才能适用，低温高压下会出现明显偏差。

三、阿佛加德罗定律

阿佛加德罗根据大量实验结果总结出：同温同压下，同体积的任何气体具有相同的摩尔数。这就是通常所称的阿佛加德罗定律。

设有 n_1 摩尔的某气体，其体积为 V_1 ，有一 n_2 摩尔的另一气体，体积为 V_2 ，当这两种气体在相同温度和压力条件下时，根据阿佛加德罗定律，有：

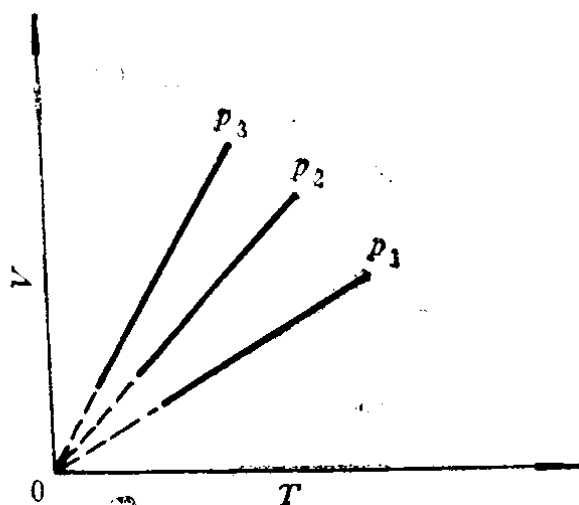


图1-2 低压气体等压线

$$\frac{V_1}{n_1} = \frac{V_2}{n_2} = \tilde{V} \quad (1-3)$$

式中 $\tilde{V}$ ——1摩尔气体所具有的体积， m^3 。

人们定义，气体在压力 $p=1.01325 \times 10^5 \text{Pa}$ ，温度 $T=273.15 \text{K}$ 时所处的状态为标准态。大量的实验表明，在标准态时，1摩尔任何气体所占的体积都基本上等于 $22.414 \times 10^{-3} \text{m}^3$ 。

阿佛加德罗定律同样是一个低压气体的实验定律，仅适用于低压范围。

第二节 理想气体状态方程式

一、真实气体和理想气体

自然界中客观存在的一切气体都称为真实气体，而理想

气体是一个科学的抽象化概念，实际上并不存在。理想气体的定义是：任何条件下都严格遵守波义耳定律、查理-盖·吕萨克定律和阿佛加德罗定律的气体，称为理想气体。由分子运动论，理想气体的微观模型可简述为：气体分子的体积和分子间的相互作用力可以忽略不计，分子之间和分子与器壁间的碰撞是完全弹性碰撞。由理想气体的微观模型，应用统计力学的方法，可以推导出前述三个低压气体的实验定律。

真实气体的分子具有一定的体积，分子间也存在相互作用力，因而各种气体都有各自的特性。但是，在低压、高温条件下，气体的密度很小，分子间距离较大，单位体积内分子的数目很少，此时分子本身的体积与容器的体积相比可以忽略；分子间的作用力较小也可忽略不计。正是由于这两个因素，在低压范围内，尽管气体的种类不同，它们的 p - V - T 关系却表现得极为一致，符合三个低压力气体的实验定律。

综上所述，一般真实气体在压力较低、温度较高的条件下，都可当作理想气体来研究，而理想气体则可看成是真实气体在压力趋近于零时的极限情况。

二、理想气体状态方程式

任何联系气体 p - V - T 关系的方程式，统称为气体的状态方程式。前面讨论低压气体实验定律时，都只考虑了 p 、 V 、 T 中两个量间的变化规律，而实际过程中重要的是确定 p 、 V 、 T 三者间的关系。理想气体虽然不存在，但它反映了真实气体低压时的共性，如果有了理想气体状态方程式，只要加以适当修正，就可用于任何真实气体。

将公式（1-1）、（1-2）和（1-3）三者合并，可得：