

天然气管路输送

〔苏〕C. A. 博布罗夫斯基等著

石油工业出版社

天然气管路输送

〔苏〕C. A. 博布罗夫斯基等著

陈 祖 泽 译

石油工业出版社

内 容 提 要

本书着重论述和研究了复杂输气系统工况的计算、天然气消费量增长的预报方法、供气系统的发展最优化、事故工况的影响和计算、供气系统可靠性分析方法和建立统一供气系统的理论等问题。

本书可供从事输气管设计、施工和管理的科研人员及工程技术干部学习使用,也可供高等工科院校有关专业的师生参阅。

ТРУБОПРОВОДНЫЙ ТРАНСПОРТ ГАЗА
С.А.БОБРОВСКИЙ, С.Г.ЩЕРБАКОВ,
Е. И.ЯКОВЛЕВ, А.И.ГАРЛЯУСКАС, В.В.ГРАЧЕВ
ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА» 1976

*

天然气管路输送

〔苏〕С.А.博布罗夫斯基等著

陈祖泽译

*

石油工业出版社出版
(北京安定门外安华里二区一号楼)
地质出版社印刷厂排版
北京顺义燕华营印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行

*

787×1092毫米 16开本 27¹/₂ 印张 659千字 印2.671—4.170

1985年8月北京第1版 1988年5月北京第2次印刷

书号: 15037·2507 定价: 5.60元

ISBN 7-5021-0123-3/TE·122

目 录

第一章 天然气管路输送工艺基础	1
§ 1.1 输气管分类	1
§ 1.2 气体的物理性质	3
§ 1.3 气体稳定流动力学基本原理	14
§ 1.4 输气管在稳定流态下的水力计算	18
§ 1.5 气体流量和压力在输气管沿线的分布	50
第二章 管路输气的不稳定状态	57
§ 2.1 数学模型在输气管不稳定状态计算中的应用范围	57
§ 2.2 实际问题解法示例	66
§ 2.3 短距离输气管中不稳定过程的分析	81
§ 2.4 应用非线性方程分析干线输气管不稳定工况的特例	94
§ 2.5 输气方程的线性化问题	103
§ 2.6 计算输气管不稳定工况的稳定态替换法的应用范围	112
§ 2.7 复杂输气系统不稳定工况计算中的简化解法	117
§ 2.8 利用不稳定过程的简化估算法来解决输气管的调度业务问题	124
第三章 输气管工艺过程计算中的鉴别和模拟问题	126
§ 3.1 确定稳定工况下的输气管的有效水力摩阻系数	126
§ 3.2 对复杂输气系统在稳定工况下的参数的估算	127
§ 3.3 对可由常微分方程描述的输气过程的参数的估算	131
§ 3.4 按操作数据确定输气管的真实状况	135
§ 3.5 利用变分法模拟输气过程	144
§ 3.6 利用常微分方程模拟输气过程	145
§ 3.7 利用频率法解输气过程的模拟问题	148
§ 3.8 利用统计动力学方法模拟输气过程	154
第四章 复杂干线输气管系统稳定工况的计算方法	164
§ 4.1 概述	164
§ 4.2 干线输气管压缩机站的数学模型	165
§ 4.3 压缩机站最优工况的选择	182
§ 4.4 复杂输气管系统工况水力计算	191
第五章 复杂输气管系统不稳定工况的计算方法	199
§ 5.1 在变径管路中输气的不稳定工况	199
§ 5.2 沿途有气体分出的输气管不稳定工况的分析	204
§ 5.3 干线输气管不稳定工况的计算方法	211
§ 5.4 用矩阵法分析复杂输气系统的不稳定工况	214
§ 5.5 利用分析输气管系统的运算法求时间解	225
§ 5.6 制定输气系统不稳定工况的有效计算方法	235
第六章 天然气消费量的分析和预报	240
§ 6.1 天然气消费量预报问题的提出	240

§ 6.2	天然气昼夜消费图的预报	244
§ 6.3	用指数平滑法预报天然气消费	248
§ 6.4	工业中心的天然气消费量预报	251
第七章	复杂输气系统的工况最优化	254
§ 7.1	干线输气管稳定工况的最优化问题	254
§ 7.2	干线输气管工况最优化问题的解决	256
§ 7.3	干线输气管最优工况的实际计算	260
§ 7.4	输气不稳定工况的最优化	266
§ 7.5	复杂供气系统工况最优化问题的解	272
§ 7.6	干线输气管等效特性的稳定性研究	275
§ 7.7	负载最优分布问题的解	277
第八章	供气系统的最优参数	281
§ 8.1	干线输气管最优参数的择选方法	281
§ 8.2	在选择输气管最优输量时估计系统之间联系的方法	288
§ 8.3	输气管参数最优化问题(考虑原始数据误差的影响)	296
第九章	供气系统的事故工况	302
§ 9.1	在事故工况下输气管参数的变化	302
§ 9.2	确定干线输气管中的水化物生成区	311
§ 9.3	确定输气管的漏气和堵塞地点	315
§ 9.4	对供气系统设备工作能力的评价	326
§ 9.5	消除干线输气管线路部分事故的方法	328
§ 9.6	确定干线输气管系统的事故对国民经济造成的损失	332
第十章	供气系统的工作可靠性和储备	339
§ 10.1	干线输气管工作可靠性准则	339
§ 10.2	干线输气管线路部分的可靠性指标	341
§ 10.3	压缩机站输气机组的可靠性指标	348
§ 10.4	供气系统的工作可靠性	353
§ 10.5	输气系统中的天然气储备	355
§ 10.6	在供气系统的设计中对可靠性的估计	360
第十一章	形成统一供气系统的一般原则和统一供气系统各单体的特性	370
§ 11.1	天然气管路输送系统和整个统一供气系统的发展和基本特点	370
§ 11.2	统一供气系统的主要结构联系	374
§ 11.3	绘制干线输气管等效特性曲线的方法	375
§ 11.4	输气系统的动态等效特性曲线	378
§ 11.5	气田和采气区的等效特性曲线	385
§ 11.6	绘制概率等效特性曲线的方法原理	390
第十二章	统一供气系统的发展最优化问题	396
§ 12.1	关于统一供气系统最优化问题的准则	396
§ 12.2	统一供气系统发展计划问题的一般特征	398
§ 12.3	统一供气系统与邻近部门的外部联系的估算方法	402
§ 12.4	统一供气系统的线性数学模型及其应用	402
§ 12.5	统一供气系统最优化的非线性和离散性数学模型	404
§ 12.6	在受限制条件下的统一供气系统最优化模型	410

§ 12.7 考虑了储量动态的统一供气系统结构最优化模型	415
§ 12.8 统一供气系统发展最优化动态模型	421
§ 12.9 制定在原始信息的概率条件下的数学模型	423
参考文献	428

第一章 天然气管路输送工艺基础

§ 1.1 输气管分类

一、矿场输气管

矿场天然气管路系统的形式取决于井场上气井的布置及其规模、产气层的数目和性能、所采取的天然气初次净化、计量和调节的方式、气井的产气特性和操作工况、井场的气候条件和地形^[1,2]。

如果是在狭长的构造中进行开采、气井的排数不多(2至3排)、在气井的附近直接设立单独的天然气净化、计量和调节点,在这样的情况下,一般采用直线型矿场输气管。

如果井场的气井多或排数多,而在气井的附近直接设立天然气的初次净化、计量和调节点,则在这样的情况下,一般采用环形放射状和直线集气管系统。在环状系统的管环中通常装一些弦式跨接管,以便把离管环远的气井接到这些跨接管上。

如果初次分离、计量和调节是在集合站上进行的(采用组合系统)、或者矿区仅有一个站,该站集中了矿区的分离、计量和调节设备(采用无集气管系统),在这样的情况下,一般采用组合式和无集气管系统。

环状系统与放射状和直线型集气管系统相比,具有下列优点:当集气环的某个管段发生事故时,关闭相应的截流阀,仍可保证整个集气管网不间断地工作,在总压降相同和总气量相等的情况下(与其它系统相比),环状集气管的直径要小些,因此其总的金属耗量也相应地降低。

二、干线输气管

干线输气管是长距离供气用的复杂的动力系统。大型输气管的管径为720、820、1020、1420毫米。输气管压缩机站装备有大排量的压缩机机组。输气管的长度有1000公里、2000公里和2000公里以上。

运行中的干线输气管的输量与管路直径有关,约为100~300亿米³/年。输气管的工作压力为55~75公斤/厘米²。

干线输气管的全部管段与压缩机站互有联系,个别管段或个别站的工况的变化将影响到全部输气管或整个输气管系统。引起干线输气管工况偏离计算工况的原因可能是:耗气量的波动、个别压缩机机组或整个压缩机站的关闭等。对于每一种情况,均需解决输气管、或者作为统一系统的许多互相关联的输气管的水力计算和最优工况选择问题。

三、城市输气管

城市的供气可以天然气为基础,它通过干线输气管输入城市或其它的某个居民点;也可以液化气、或者以丙烷、丁烷与空气的混合气为基础^[3]。

天然气是城市供气系统中的主要燃料,但近年来液化气的耗量也大幅度增加。

城市或居民点的供气系统包括气源、配气管网和内部燃气设备。

如果采用的是天然气，气源就是干线输气管；如果采用的是液化气，气源——液化气分配站。液化气的运输可通过干线液化气管路、铁路、公路或水路。

配气管网乃是在大城市内部的输送和分配天然气的输气管系统和设备。配气管网中的输气管可人为地划分为输气干线和配气管线。输气干线把天然气从一个区输送到另一个区，而配气管线则把天然气直接供给消费者。

天然气从干线输气管通过配气站送入城市配气管网。在城市配气管网中设有降低气体压力的气体调节点，通过气体调节点，把不同压力的输气管连结在一起。

住宅、公用事业和工业企业的内部气体设备包括：住宅内部或工业企业输气管、气体仪表和燃气装置。

市辖地区和其它居民点内的输气管根据最大工作压力可以划分为：

a). 低压输气管

对于人造气，压力不超过0.02公斤/厘米²；

对于天然气，压力不超过0.03公斤/厘米²；

对于液化气，压力不超过0.035~0.04公斤/厘米²。

如果日常生活和公共生活用气单位备有理想的组合式调节器（稳定器）和配气管线，则允许把压力提高到0.05公斤/厘米²。

b). 中压输气管

压力从0.05到3公斤/厘米²；

c). 高压输气管

压力从3到6公斤/厘米²；

d). 超高压输气管

压力从6到12公斤/厘米²，这种超高压输气管专用来向储气罐站和某些工业企业供气。

人造气是在工厂里生产的。生产人造气的原料有煤、页岩和石油。

苏联国土上的天然气储藏离主要消费城市——莫斯科、列宁格勒、基辅、里加、塔什干等很远，因此需建造大型干线输气管以向城市供气。这些干线输气管应该以最大的设计输量运行才是合理的。

天然气的实际消费量无论在一年之内、一月之内或是一昼夜之内都具有很大的不平衡性，其原因有：天气的变化、有些生产部门的特点等。城市和居民点在冬季的天然气消费量为夏季的1.3~2倍。

在大城市的供气系统中，季节性的剩余天然气量和短缺天然气量可达几十亿米³。为了积存如此大量的天然气、以及为了建立储备，可把天然气储存在衰竭的油田和气田中，也可储存在含水层中。

地下储气库要装备向地层注气和从其中抽气的气井、对天然气进行冷却、净化和脱水的装置。从干线输气管通过专门的压缩机站把天然气注入储气库，而从储气库取出天然气要通过配气站。

如果要储存的天然气不多，则在工厂和在配气管网中可设立低压和高压储气罐。储气罐在配气管网中的作用是为了补偿一昼夜间小时耗气量的不平衡性。

为了接收、储存和向消费者供应液化碳氢化合物气体，需要建造液化气供应站：液化

气分配站和联合站。为储存大量液化气，可在人工开挖的和天然形成的牢固而不透气的岩层洞穴中建造地下液化气储库。

配气管网的设计应遵循一定的要求，管网应该是可靠的，能保证连续供气，其操作管理应该既简便、又安全。在设计中还必须考虑到切断某些区域供气的可能性，以保证工程项目的分阶段投产。

对管网进行装备时应采用同类型的设施和部件。所采纳的配气管网的方案，其物资消耗和基本建设投资、以及操作管理费用应该是最低的。

§ 1.2 气体的物理性质

一、气体的密度

气体的密度定义为单位体积的质量，即气体的质量与其体积之比：

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

式中 m ——气体的质量，公斤；

V ——气体的体积，米³；

ρ ——气体的密度，公斤/米³。

气体的密度与测量地点无关。

二、气体的比容

气体单位质量的容积称为气体的比容，其值为密度的倒数：

$$v = \frac{1}{\rho} = \frac{V}{m}$$

式中 v ——比容，米³/公斤。

三、气体的流量

气体的流量分为质量流量和体积流量。

在单位时间内通过流量横截面的气体质量称为气体质量流量：

$$M = \frac{m}{t}$$

式中 m ——气体的质量，公斤；

t —— m 公斤的气体通过该截面的时间，秒；

M ——气体的质量流量，公斤/秒。

还可采用公斤/时、公斤/天作为气体质量流量的单位。

在单位时间内通过流通截面的以体积单位表示的气体量称为气体体积流量：

$$Q = \frac{V}{t}$$

式中 V ——气体体积，米³；

t —— V 米³气体通过所研究的截面的时间，秒；

Q ——气体体积流量，米³/秒。

气体的体积和体积流量是指一定的条件（温度、压力）而言，因此要区分正常条件（温

度20℃、压力760毫米汞柱)下的气体体积流量和标准条件(温度0℃、压力760毫米汞柱)下的气体体积流量。

体积流量的单位还可采用米³/时、米³/天。

四、气体的线速度和质量速度

气体的线速度定义为在流动的条件(温度、压力)下通过单位流通截面的气体体积流量:

$$w = \frac{Q}{F}$$

式中 Q——在流动条件(温度、压力)下的气体体积流量, 米³/秒;

F——管子的流通截面积, 米²;

w——输气管中的气体线速度, 米/秒。

气体的质量速度是指通过输气管单位流通截面的气体质量流量:

$$u = \frac{M}{F}$$

式中 M——气体的质量流量, 公斤/秒;

F——输气管的流通截面积, 米²;

u——气体的质量速度, 公斤/(秒·米²)

五、气体的压力

在一般情况下, 压力等于法向分力N对力所作用的面积S的比值的极限:

$$P = \lim_{S \rightarrow 0} \frac{N}{S} = \frac{\partial N}{\partial S}$$

当力为均匀分布的情况下, 压力等于:

$$P = \frac{N}{S}$$

式中 N——压力的法向分力, 公斤力;

S——力所作用的面积, 厘米²;

P——压力, 公斤力/厘米²。

为了说明气体状态的特征, 通常用绝对压力 $P_{a\sigma}$ 的概念。绝对压力指的是作用在管壁和容器壁上的气体压力。

为了确定施加于管壁的合力, 通常用剩余压力(表压) $P_{\text{表}}$ 的概念。剩余压力所表示的或者是绝对压力 $P_{a\sigma}$ 与气压 $P_{\sigma ap}$ 之差

$$P_{\text{表}} = P_{a\sigma} - P_{\sigma ap}$$

或者, 当 $P_{\sigma ap} > P_{a\sigma}$ 时, 是气压与绝对压力之差:

$$P_{\text{表}} = P_{\sigma ap} - P_{a\sigma}$$

式中 $P_{\text{表}}$ ——真空表所指示的压力。

剩余压力也可用于气体仪表, 以及用来测量低压、中压和高压输气管中的压力。

在中压和高压输气管的水力计算中用的是绝对压力, 而在低压输气管的水力计算中用的是剩余压力。计算低压水平输气管时采用剩余压力值是允许的, 但是在倾斜的低压输气管的水力计算中, 采用剩余压力会造成某些混乱。

在输气管的计算中，应该采用气体的绝对压力值，同时必须注意“剩余压力的允许变化”和“输气管的允许压降”这两个概念的差别。

六、功

在推导计算公式时要用到势功的概念。气体从一个压力区 (P_1) 移动到另一个压力区 (P_2)。所做的功称为势功。

元势功相应于无限小的压力变化：

$$\delta W = -VdP$$

$$\delta \omega = -\frac{1}{\rho} \delta W = -v dP$$

式中 δW ——任意气体量具有的元势功，公斤力·米；

$\delta \omega$ ——元比功，公斤力·米/公斤。

如果气体的移动发生在输气管的条件下，则其势功的分布可用下列公式表示：

$$\delta \omega = -v dP = \delta l^* + d\left(\frac{w^2}{2}\right) + g dz + \delta l^{**}$$

式中 l^* ——传给外部系统物体的单位有效功(对于输气管 $l^* = 0$)；

l^{**} ——功的不可逆转换

$$l^{**} = \lambda \frac{w^2}{2} \frac{dx}{D}$$

式中 λ ——水力摩阻系数；

w ——气体的线速度；

x ——输气管的起点到进行分析的那一点的距离；

D ——输气管的内径；

z ——输气管上进行分析的那一点的高程；

g ——重力加速度。

由势功的数学表达式可知，功消耗于克服气体对输气管壁的摩阻、气体位置的变化和气体线速度的变化。

七、理想气体和真实气体

在气体工程中广泛应用理想气体的学说。理想气体所遵循的定律虽然非常简单，但是在不高的压力和不低的温度条件下，这些定律仍能用来很正确的描述真实气体的行为和性质。真实气体离饱和区和临界状态区越远，理想气体定律也越能更好地用来描述真实气体的性质。

八、波义耳-马里奥特定律

波义耳-马里奥特定律确立了气体在恒温下的压力和比容之间的关系。波义耳对空气在恒温下的压缩性进行了无数次的实验研究，大量的实验数据使他发现气体的压力与比容成反比关系：

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{v_2}{v_1}$$

或

$$P_1 v_1 = P_2 v_2 = \text{常数}$$

马里奥特也独立地获得了与波义耳相同的结论。波义耳-马里奥特定律用来描述理想气体的物理状态，它可表述如下：理想气体在恒温下的绝对压力与比容的乘积是一个不变量。理想气体的绝对压力与比容的乘积与气体的性质有关。

九、盖吕萨克定律

盖吕萨克定律确立了理想气体在恒定压力下的比容与温度的关系。气体受热而发生膨胀有如下特性：在恒定的压力下 ($P = \text{常数}$) 对理想气体进行加热，其相对膨胀量与温度的升高成正比；

$$\frac{v - v_0}{v_0} = \alpha_0 (t - t_0)$$

当 $t_0 = 0$ 时

$$v = v_0 (1 + \alpha_0 t)$$

式中 v ——温度为 $t^\circ\text{C}$ 和压力为 P 时的气体比容；

v_0 ——温度为 0°C 和压力也为 P 时的气体比容；

α_0 ——理想气体在 0°C 时的体膨胀温度系数，它在所有的压力下均保持相同的值，并对所有的理想气体都一样。

理想气体的体膨胀温度系数的值通常取为：

$$\alpha_0 = \frac{1}{273.16} \approx \frac{1}{273.2} \frac{1}{^\circ\text{C}}$$

因为对于所有的理想气体来说，体膨胀温度系数的值都一样，因此，体膨胀温度系数为一常数。

十、克拉珀龙方程

克拉珀龙方程是在对波义耳-马里奥特定律和盖吕萨克定律进行对比的基础上得到的。这一方程有如下形式：

$$Pv = RT$$

式中 v ——理想气体的比容，米³/公斤；

P ——理想气体的绝对压力，公斤力/米²；

R ——理想气体的气体常数，公斤力·米/公斤·°K；

T ——气体的绝对温度，°K。

克拉珀龙方程也可写成如下形式：

$$\frac{P}{\rho} = RT$$

式中 ρ ——气体的密度，公斤/米³。

如果在状态方程左边和右边同乘以以质量单位表示的气体质量 (m)，则可得到任意气体量的状态方程：

$$PV = mRT$$

式中 V ——气体的全部体积，米³；

m ——气体的质量，公斤。

气体常数 (R) 就是在恒定的压力下 ($P = \text{常数}$) 单位量 (1 公斤) 的气体被加热 1°C 所做的膨胀功。

十一、阿佛加德罗定律

盖吕萨克在研究有气态物质参与的化学反应时发现，参与反应的气体之比、以及其与所得到的气态产物的体积之比均等于一个简单的整数。

意大利学者阿佛加德罗为解释起反应的气体体积之间的这种简单的比例关系，提出了一个后来被试验数据所证实的假设。这个假设就是阿佛加德罗定律：体积相等的不同气体在相同的条件（温度和压力）下含有相同数目的分子。

阿佛加德罗定律也可作为纯粹的经验定律来表达：一千摩尔理想气体的体积与气体的性质无关，而只取决于气体的物理状态参数（压力和温度）。

在数值上等于物质的分子质量(μ)的物质的公斤数称为千摩尔，或公斤-摩尔。

根据克拉珀龙方程，1千摩尔的理想气体的体积等于：

$$v = \mu \bar{v} = \mu R \frac{T}{P}$$

根据阿佛加德罗定律，上式的右边与气体的性质无关，因此，分子质量(μ)与气体常数(R)的乘积也与气体性质无关，此乘积就是理想气体的通用气体常数：

$$\mu R = \bar{R} = \text{const}$$

1千摩尔的理想气体的状态方程为：

$$Pv = \bar{R}T$$

理想气体的通用气体常数乃是1千摩尔理想气体在恒定的压力下被加热1℃所做的膨胀功。

目前取理想气体的通用气体常数的计算值等于：

$$\bar{R} = 847.82 \text{ 公斤力} \cdot \text{米} / (\text{千摩尔} \cdot ^\circ\text{K})$$

理想气体在标准物理条件下的摩尔体积值等于：

$$\bar{v} = 22.4 \text{ 米}^3 / \text{千摩尔}$$

理想气体单位气体常数的计算值可按通用气体常数决定。

真实气体的状态方程数目众多，其中最通用的是加了修正系数的克拉珀龙方程：

$$Pv = ZRT$$

式中 Z ——真实气体与理想气体定律的偏差系数。

系数 Z 通常称为压缩系数。

偏差系数的值可由图1查得。图中所画的是系数 Z 与气体对比参数（温度和压力）的关系曲线：

$$\pi = \frac{P}{P_{\kappa p}}$$

$$\tau = \frac{T}{T_{\kappa p}}$$

式中 π ——对比压力；

P ——气体的绝对压力；

$P_{\kappa p}$ ——气体的临界压力；

τ ——对比温度；

T ——气体的绝对温度；

T_{sp} ——气体的临界温度。

临界压力是这样一种压力，在此压力下和高于此压力时，任便温度增加多高，也不能使液体蒸发。

临界温度是这样一种温度，在此温度下和高于此温度时，任便压力增加多高，也不能使蒸汽冷凝。

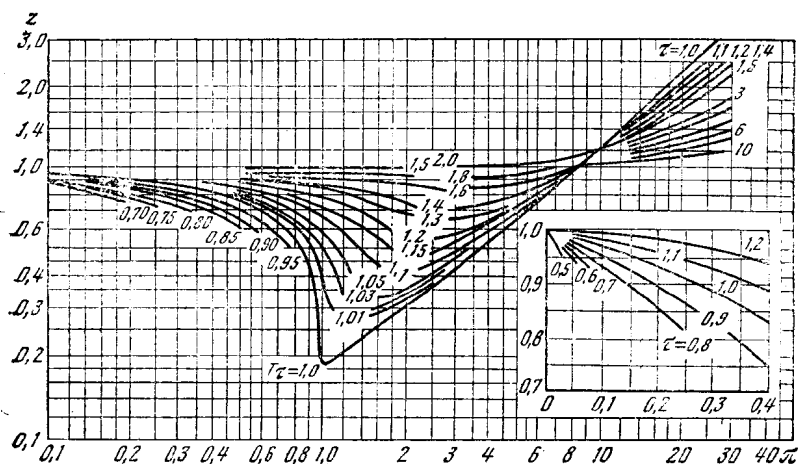


图 1 压缩系数 Z 与对比压力 π 和对比温度 τ 的关系曲线

十二、气体的比热

在进行输气管的热力计算时，必须要知道气体的比热，其定义是：为使单位质量（或体积）的气体在所进行的过程中改变温度 1°C 所必须给予的热量称比热。

气体的比热与所进行的过程的性质有关。

在热力学计算中，最常用的是两种最简单过程下的比热，这就是定压比热 C_p 和定容比热 C_v 。

无论是在哪一种恒定的气体状态变化过程中，在已知压力下，加热 1 公斤气体使其温度升高 1°C 所必需的热量与气体的绝对温度有关。在不同的气体温度下，所需的热量是不同的。在已知温度下，加热 1 公斤气体，使其温度升高 1°C 所必需的热量与压力有关。

对城市输气管来说，气体的比热变化很小，因此，可认为其值为常数。

理想气体遵循下列关系式（马约尔定律）：

$$C_p - C_v = R$$

因此，如已知定压比热，就可决定定容比热。

理想气体的质量定压比热和定容比热只是一个温度的函数，即只与温度有关。

十三、焦耳-汤姆逊效应

当天然气通过阻力（配气站和调压站的调节阀、管路、过滤器等）流动时，特别在压降很大的情况下，气体的温度要下降。温度的降低会使配气站上的管路、截流阀、调节阀和测量仪表结冰，管路中会生成水化物，这种现象称为节流效应（节流过程）。

气体在等焓过程中的温度变化与压力变化之比的极限称为节流过程的特性、或称焦耳-汤姆逊系数：

$$D_i = \lim_{\Delta P \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta t}{\Delta P} \right)_i = \left(\frac{\partial t}{\partial P} \right)_i = D_i(i, P)$$

对于理想气体：

$$D_i = \left(\frac{\partial t}{\partial P} \right)_i$$

大多数气体在平常温度和压力下的节流总是伴随着气体的冷却（正的焦耳-汤姆逊系数），但在某些条件下（温度和压力），节流却伴随着气体的受热（负的焦耳-汤姆逊系数）。

焦耳-汤姆逊系数在压力和温度为某些值时可能变成零。由焦耳-汤姆逊系数等于零的点连成的线称为转化线。

十四、气体混合物

天然气总是一种混合气体。甲烷是这种混合气体中的主要成分。为进行热力和水力计算，必须要根据每种成分的特性来确定混合气体的性质。现在我们来研究混合气体的某些主要指标。

混合气体中组分*i*的质量（重量）浓度 m_i 称为该组分的质量 G_i 与混合气体量 G 之比值：

$$m_i = \frac{G_i}{G}$$

混合气体量等于各组分气体量之和：

$$G = \sum_{i=1}^{i=n} G_i$$

组分*i*的摩尔浓度(r_i)称为该组分的千摩尔数($\bar{G}_i$)与混合气体的千摩尔数($\bar{G}$)之比：

$$r_i = \frac{\bar{G}_i}{\bar{G}}$$

$$\bar{G}_i = \frac{G_i}{\mu_i}$$

式中 μ_i ——以公斤表示的气体质量，在数值上等于相对分子质量（公斤/千摩尔）。

混合气体所有组分的千摩尔数之和等于混合气体的千摩尔数：

$$\sum_{i=1}^{i=n} \bar{G}_i = \bar{G}$$

混合气体所有组分的摩尔浓度之和等于1：

$$\sum_{i=1}^{i=n} r_i = \frac{1}{\bar{G}} \sum_{i=1}^{i=n} \bar{G}_i = \frac{\bar{G}}{\bar{G}} = 1$$

混合气体的平均分子质量(μ)称为混合气体的质量与其摩尔数之比值：

$$\mu = \frac{G}{\bar{G}}$$

如果把混合气体的质量通过单个组分的质量展开，则可得：

$$\mu = \frac{G}{\bar{G}} = \frac{1}{\bar{G}} \sum_{i=1}^{i=n} G_i = \frac{1}{\bar{G}} \sum_{i=1}^{i=n} \mu_i \bar{G}_i = \sum_{i=1}^{i=n} \mu_i \frac{\bar{G}_i}{\bar{G}} = \sum_{i=1}^{i=n} \mu_i r_i$$

因此，混合气体的平均分子质量等于各组分的相对分子质量与摩尔浓度的乘积之和。

如果把摩尔数展开，则可得下列关系式：

$$\mu = \frac{G}{\bar{G}} = \frac{G}{\sum_{i=1}^{i=n} \bar{G}_i} = \frac{G}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{G_i}{\mu_i}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{\mu_i} \frac{G_i}{G}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{m_i}{\mu_i}}$$

这就是说，混合气体的平均分子质量可通过各组分的质量浓度和相对分子质量来表示。

质量浓度和摩尔浓度存在一定的关系：

$$\frac{m_i}{r_i} = \frac{G_i}{\bar{G}} \cdot \frac{1}{\frac{G_i}{\bar{G}_i}} = \frac{G_i}{\bar{G}_i} \cdot \frac{\bar{G}_i}{\bar{G}} = \frac{\mu_i}{\mu}$$

由此可得：

$$m_i = r_i \frac{\mu_i}{\mu} = \frac{r_i \mu_i}{\sum_{i=1}^{i=n} \mu_i r_i}$$

或

$$r_i = m_i \frac{\mu}{\mu_i} = \frac{\frac{m_i}{\mu_i}}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{m_i}{\mu_i}}$$

体积浓度($r_i^{(v)}$)称为在混合气体的压力和温度下组分体积($V_i^{(p,t)}$)与混合气体的体积($V^{(p,t)}$)之比值：

$$r_i^{(v)} = \frac{V_i^{(p,t)}}{V^{(p,t)}}$$

对于真实气体：

$$\sum_{i=1}^{i=n} r_i^{(v)} = \frac{1}{V^{(p,t)}} \sum_{i=1}^{i=n} V_i^{(p,t)} \neq 1$$

因此，真实气体的体积浓度概念没有物理和计算意义。

而对于理想气体：

$$V_i^{(p,t)} P_m = V^{(p,t)} P_i$$

式中 P_m ——混合气体的压力；

P_i ——气体的分压。

于是，各组分的体积浓度之和就等于

$$\sum_{i=1}^{i=n} r_i^{(v)} = \frac{1}{V^{(p,t)}} \sum_{i=1}^{i=n} V^{(p,t)} \frac{P_i}{P_m} = \frac{V^{(p,t)}}{V^{(p,t)}} \cdot \frac{1}{P_m} \sum_{i=1}^{i=n} P_i$$

根据道尔顿定律，各组分的分压之和等于混合气体的压力：

$$\sum_{i=1}^{i=n} P_i^{(v)} = P_m$$

于是

$$\sum_{i=1}^{i=n} r_i^{(v)} = \frac{V^{(p,t)}}{V^{(p,t)}} \cdot \frac{1}{P_m} P_m = 1$$

对于理想气体，根据阿佛加德罗定律，一摩尔气体体积完全取决于气体物理状态的参数(压力和温度)，而与气体的性质无关：

$$\bar{v} = f(p, t)$$

于是

$$r_i^{(v)} = \frac{V_i^{(p,t)}}{V^{(p,t)}} = \frac{\frac{V_i^{(p,t)}}{\bar{v}^{(p,t)}}}{\frac{V^{(p,t)}}{\bar{v}^{(p,t)}}} = \frac{\bar{G}}{G}$$

因此，理想气体混合物各组分的摩尔浓度与体积浓度恒等。

理想气体混合物各组分的体积浓度：

$$r_i^{(v)} = \frac{P_i}{P_m}$$

十五、气体的湿度

配气管网中所输送的天然气可能含有一定量的水分，这会引起管路、阀件和仪表的腐蚀，并可能形成水化物和冷凝液。

湿气可看成是任何气体与任何液体的蒸汽的混合物，或者是一种接近饱和状态的蒸汽的气体混合物。

在作计算时，对湿气作了这样的假定：因为过热水蒸汽是理想气体，因此理想气体定律在这些条件下也适用于湿气。

湿气的特征可以用绝对湿度和相对湿度来说明。

单位气体量中所含的水蒸汽量称为绝对湿度，它有质量湿度和体积湿度之分。

质量绝对湿度：

$$d = \frac{m_a}{m_r}$$

式中 m_a ——水蒸汽量，公斤；

m_r ——气体量，公斤

d ——质量湿度，公斤/公斤。

体积绝对湿度

$$d_v = \frac{m_a}{V}$$

式中 V ——气体体积，米³；

d_v ——体积绝对湿度，公斤/米³。

在已知条件下，实际的水蒸汽含量与最大可能含量之比称为相对湿度：