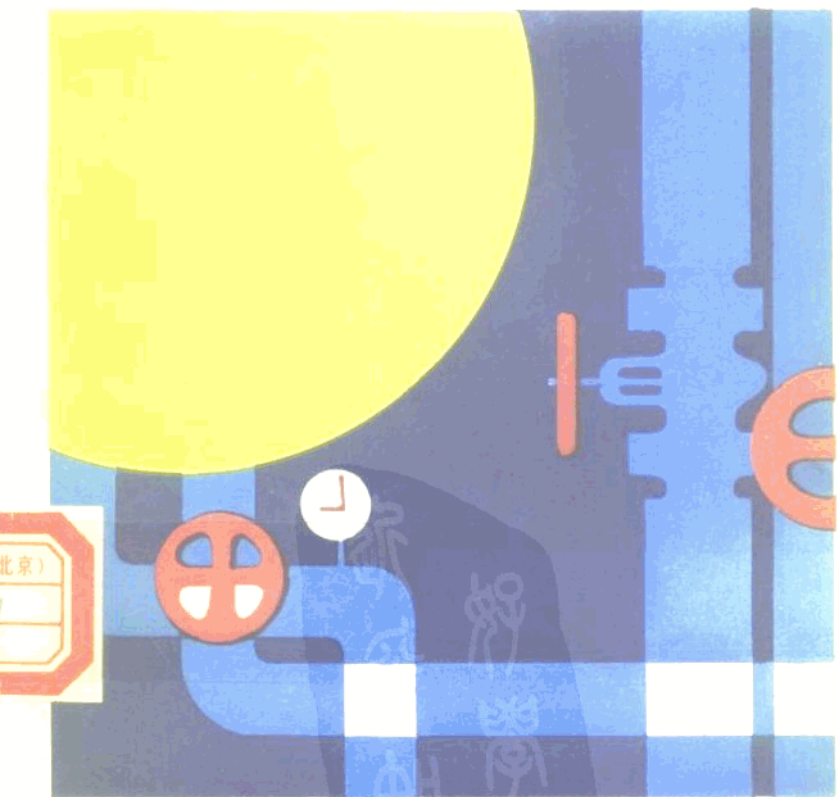


实用天然气工程

〔美〕R. V. 史密斯 著



石油工业出版社

目 录

第一章 天然气工程简介	(1)
§1.1 储量	(2)
§1.2 气体测定时的压力基础及温度基础	(2)
§1.3 符号说明	(3)
第二章 天然气的性质	(10)
§2.1 气体定律	(10)
§2.2 密度 ρ 和比容 v	(15)
§2.3 气体的压缩系数 c_g	(16)
§2.4 地层气体的体积系数 B_g	(17)
§2.5 摩尔分数、体积分数和重量分数	(18)
§2.6 视分子量	(18)
§2.7 1磅-摩尔的体积	(21)
§2.8 天然气的比重 γ_g	(21)
§2.9 气体热值测量方法.....	(22)
§2.10 天然气的粘度.....	(24)
§2.11 井内流体中气体比重 γ_g 的计算.....	(26)
习题	(28)
参考文献.....	(29)
第三章 气体定律在气藏工程中的应用	(31)
§3.1 储层内气体体积的确定方法	(31)
§3.2 物质平衡	(32)
§3.3 使用物质平衡法时的问题	(34)
习题.....	(37)
参考文献.....	(38)
第四章 气体的计量	(39)
§4.1 孔板流量计	(40)
§4.2 孔板流量计简介	(42)
§4.3 脉动流动	(43)

§4.4 临界气流校正仪	(44)
习题	(46)
参考文献	(47)
第五章 天然气在圆管和环形空间中的流动	(48)
§5.1 方程的推导	(48)
§5.2 摩擦系数 f	(51)
§5.3 管内天然气流动的平均速度和雷诺数	(58)
§5.4 各种摩擦系数公式的适用性	(60)
§5.5 用公式5—5和5—6进行流动计算	(60)
§5.6 积分段的大小	(68)
§5.7 流动方程中的动能项	(70)
§5.8 温度和压缩因子不变时的流动	(71)
§5.9 魏茂茨公式	(71)
§5.10 环形空间中的流动	(72)
小结	(76)
习题	(76)
参考文献	(77)
第六章 气体在孔隙介质中的流动 (综述)	(79)
§6.1 孔隙度	(79)
§6.2 渗透率	(80)
§6.3 达西定律	(81)
§6.4 气体在孔隙介质中的流动	(82)
§6.5 气体的径向流动公式	(83)
§6.6 平行地层中气体的径向流动	(86)
§6.7 连续地层中气体的径向流动	(86)
小结	(87)
习题	(87)
参考文献	(88)
第七章 气井试井	(89)
§7.1 气井试井类别	(91)
§7.2 术语的定义	(93)
§7.3 试井准备工作	(93)
§7.4 试井步骤	(95)

§7.5 关井压力	(96)
§7.6 多点试井和实例	(97)
§7.7 敞喷潜力的意义	(106)
§7.8 敞喷潜力的压力调整	(108)
§7.9 一点试井	(109)
§7.10 等时试井及实例	(110)
§7.11 取资料试井	(114)
小结	(117)
习题	(118)
参考文献	(121)
第八章 气井的不稳定渗流特性	(123)
§8.1 恒定井筒压力下的特性	(125)
§8.2 不稳定渗流特性的实例和分析	(130)
§8.3 典型曲线拟合	(131)
§8.4 真实气体势函数 $m(p)$ 的计算	(137)
§8.5 压力恢复特性	(139)
§8.6 产量预测	(144)
§8.7 压力干扰到达储层边缘的时间	(145)
小结和结论	(148)
习题	(148)
参考文献	(150)
第九章 气井生产预测	(152)
§9.1 预测生产的工作制度	(152)
§9.2 产能过高的井	(154)
§9.3 产量限定为敞喷流量一部分的气井	(156)
§9.4 恒定回压下气井流动的产量	(161)
小结	(167)
习题	(168)
参考文献	(169)
第十章 气井的产量递减曲线	(170)
§10.1 与理论递减曲线的对比	(177)
§10.2 实际气井的产量递减特性	(178)
小结	(186)

习题.....	(187)
第十一章 确定气井的产气管柱的大小.....	(189)
§11.1 不同流速时所需产气管柱大小.....	(189)
§11.2 选择不同流速下用于举升液体的管径.....	(193)
习题.....	(197)
参考文献.....	(197)
第十二章 气体销售合同.....	(193)
小结.....	(200)
附录A 天然气的压缩因子	(201)
附录B 气体计量的各种系数	(226)
附录C 许用与非许用计量单位换算表	(238)

第一章 天然气工程简介

天然气工程是一门从气藏中开采最大数量天然气、并在实际可达到的最高压力下将之采到地面的技术。实现这两个目标都应尽可能既有效又经济。天然气工程也包括预测气藏的未来动态及气井的未来产量。对于天然气工业来说最为重要的是，是否能够以足够的精确度预测气井和气藏的压力以及采出气量。

天然气工程和普通的油藏工程差别极小。主要的差别是描述生产过程所用的单位和天然气在孔隙介质及管道中流动时压力-体积-温度关系对气体特性的影响。此外，与油藏工程相比，天然气工程主要考虑的是一种压缩性较大的流体的单相流动。不过，很容易把液态系统的计算转化成气态系统计算。天然气工程的进展在某种程度上曾受到所谓的“回压试井”以及气井中为非达西流动这一必然结论的影响。

虽然40年代发表的文章得出过孔隙介质中的气体流动及流入井内的气体流动具有非达西特性的结论，但是许多工程师则认为非达西特性是气体在流入井内时粘度变化及压缩性变化的结果。观点的分歧，再加上天然气工程因试井而得的偏见，已经确证是阻碍天然气工程发展的绊脚石。艾尔哈赛尼、雷米和克劳福德的工作以及后来的研究人员的工作已经证明，适当的处理粘度及压缩性的变化仍发现气体流入井内时具有非达西特性。另外，对孔隙介质中液体流动的研究证明，没有在短期内能获得气井稳定特性的捷径，也不存在在很短时间内便使气井达到稳定的“魔术般”的测试方法，因而，作者相信，在生产液体和生产气体的井的特性间没有根本的差别。

作者试图弥补经验试井结果及孔隙介质中不稳定流动的理论之间的差异，从而，也许能弥合普通油藏工程和对气井特性研究

间的差别。后者对当前的天然气价格和促使低产气井在最低压力下采气是极其重要的。最终目的是提高天然气工程的重要性。

由于作者假定读者都对油藏工程有一定了解，并且可能读过一些有关的书籍，所以油藏工程中的许多基本内容未加详述。例如，没有谈到地质，专业性较强的岩芯分析及其结果也未加详细讨论。本书的重点是气井及气藏的特性。

§1.1 储 量

读者将会发现，作者避免使用储量及可采储量这些名词。一般都把干气气藏的预计可采储量定为地质储量的85%。假定得克萨斯州的潘汉德尔及胡果顿两个气田在发现时的地层压力为435磅/英寸²（表压）（关井井口压力）。若采收率为85%，则说明井的废弃压力是应从关井井口压力降到85磅/英寸²（表压）左右。这两个气田的许多井现在已达到这个数值，但那里没有采取任何行动使井关闭停产。每个细心研究天然气工业的人都知道，气井是在产量收入不能维持所需生产费用时才废弃的。

历来，气藏的可采储量是用下述的一种或几种方法来确定的：

- （1）在人为规定一个关井压力下放弃生产的体积法；
- （2）将压力-累积产量曲线外推到某一人为规定废弃压力的外推法；
- （3）将产量-时间递减曲线外推到某一废弃产量的外推法；
- （4）以理论产量-时间曲线为基础的典型曲线分析法。

作者主张，天然气的可采储量只能通过预测考虑经济条件的极限产量来确定。这样做是比较切合实际的。因此，将重点讨论气井产量的预测方法。

§1.2 气体测定时的压力基础及温度基础

天然气工业一直苦于不能给出气体测量时一致同意的标准压力基础。经常发现，向统计人员报告的产量用的是一种压力基础，

而储量则采用另一种压力基础，热值又采用第三种压力基础。此外，各州做产量报告时的压力基础也各不相同。阿尔伯塔省采用SI计量标准，采用的计量压力基础为101.325千帕和15°C，相当于14.696磅/英寸²（绝对）和59°F。幸而，美国的天然气工业在计量时没有采用众多的温度基础。作者任意选用了14.65磅/英寸²（绝对）作为压力基础，60°F作为温度基础。文中所述气体体积除特殊标明外均按此标准条件计算。这样做的原因是相信绝大多数读者都要求按14.65磅/英寸²（绝对）和60°F来报告测试结果和产量（英尺³）。

§1.3 符号说明

符号	说 明	油田单位
A	常数，方程5—7和5—8	
A	截面积，	英尺 ²
$A_1 \sim A_8$	常数，方程2—11	
A_x	代用函数，方程9—23	
b	1磅气体的气体常数	英尺 ³ ，磅/英寸 ³ （绝对）
B_g	气体的地层体积系数	
B_1	常数，方程5—7	
B_2	常数，方程5—8	
cf	体积	英尺 ³
c'	系数，方程4—4和4—5	
c_g	气体的压缩系数	(磅/英寸 ² （绝对）) ⁻¹
c_r	综合压缩系数	(磅/英寸 ² （绝对）) ⁻¹
C	孔板系数，例题4—1	
C	系数，方程7—1、7—3、7—7等等	
$C(t)$	系数，方程7—2	
d	直径	英寸
d	管子内径	英寸
d_1	内管外径，环形空间	英寸

符号	说明	油田单位
d_2	外管内径, 环形空间	英寸
D	管子内径	英尺
E	内能	英尺-磅
f	摩擦系数	
$\sqrt{1/f}$	传输系数	
F	摩阻	英尺-磅
$^{\circ}\text{F}$	温度, 华氏度	$^{\circ}\text{F}$
F_b	基本孔板系数	
F_g	比重系数	
F_m	压力计系数	
F_p	基本孔板校正系数	
F_{pb}	压力基础系数	
F_{PV}	超压缩因子	
F_r	雷诺数系数	
F_r	由方程5—11定义的系数	
F_t	流动温度系数	
F_{tb}	温度基础系数	
F_{tt}	流动温度系数	
g	比重换算系数 (32.17)	英尺/秒 ²
G	标准状况下的气体体积 (14.65磅/英寸 ² (绝对) 和60°F)	英尺 ³
G_i	原始气体量	英尺 ³
G_p	产出的气体量	英尺 ³
h	厚度	英尺
h_w	压差	英寸(水柱)
H	高度或位差	英尺
I_n	第5章用的系数	
ID	内径	英寸
k	渗透率 (仅用于第六章)	达西

符号	说明	油田单位
k	储层渗透率	毫达西
k	绝对粗糙度	英寸
K	排液系数	
K	方程2—1中的一项	
$\ln$	底数为e的对数	
$\log$	底数为10的对数	
L	长度	英尺
m	直线的斜率, 半对数座标	$\frac{(\text{磅/英寸}^2(\text{绝对}))^2}{\text{周期}}$ 或 $\frac{(\text{磅/英寸}^2(\text{绝对}))^2}{\text{厘泊} \cdot \text{周期}}$
$m(p)$	真实气体势函数	$(\text{磅/英寸}^2(\text{绝对}))^2/\text{厘泊}$
M	千	
M	分子量	磅/磅-摩尔
M_a	空气的平均分子量=28.964	磅/磅-摩尔
M_i	组分i的分子量	磅/磅-摩尔
M_g	气体的分子量	磅/磅-摩尔
Mcf	千英尺 ³	10 ³ 英尺 ³
$MMcf$	百万英尺 ³	10 ⁶ 英尺 ³
$Mcfd$	流速	10 ³ 英尺 ³ /日
$MMcfd$	流速	10 ⁶ 英尺 ³ /日
n	气体量	磅-摩尔
n	方程7—1、7—2和7—3等中的系数	
N	质量流速	磅/秒
N_{Re}	雷诺数	
OD	外径	英寸
p	压力	磅/英寸 ² (绝对)
(p)	表示该变量是压力的函数	
Δp^2	压力平方差	$[(\text{磅/英寸}^2(\text{绝对}))^2]$

符号	说明	油田单位
p_b	气体计算中的基础压力	磅/英寸 ² (绝对)
p_{cf}	产气管上无封隔器时的地面 套管压力	磅/英寸 ² (绝对)
$\overline{p_{cs}}$	无封隔器时地面套管稳定 关井压力	磅/英寸 ² (绝对)
p_m	真实气体势函数中的低值基 础压力	磅/英寸 ² (绝对)
p_m	实测压力	磅/英寸 ² (绝对)
p_{pc}	假临界压力	磅/英寸 ² (绝对)
p_{pr}	假对比压力	
$\overline{p_R}$	气层关井后的稳定压力	磅/英寸 ² (绝对)
p_{if}	产气管生产时气管的地面压力	磅/英寸 ² (绝对)
p_{ifd}	输送压力	磅/英寸 ² (绝对)
$\overline{p_{is}}$	地面产气管稳定关井压力, 方程7—7	磅/英寸 ² (绝对)
p_{wf}	井底流动压力	磅/英寸 ² (绝对)
p_{ws}	井底关井压力	磅/英寸 ² (绝对)
q	在周围环境中损失掉的能量,	英尺-磅
q	体积流速	英寸 ³ /日
q_d	输送能力	千英尺 ³ /日
q_D	无因次流速	
q_h	流速	英尺 ³ /小时
q_h	流速	千英尺 ³ /日
q_m	流速	百万英尺 ³ /日
q_o	油的流速	桶/日
q_{of}	敞喷潜力, 方程7—8	千英尺 ³ /日
r	半径	英寸
r	管线内径	英寸
r_w	井半径	英尺

符号	说明	油田单位
r'_{wn}	井筒有效半径	英尺
R	气体常数	英尺 ³ , 磅/英寸 ² (绝对), °R ⁻¹ , 磅摩尔 ⁻¹
°R	°F + 460, 兰金温度	°F + 460
R_g	气体与液态烃之比	英尺 ³ /桶
s	方程5—19和5—20中的因子	
s	范·艾佛丁根表皮效应, 方程8—23	
S_w	含水饱和度	百分数
t	时间 (检验用)	天, 年
(t)	表示该变量是时间的函数	
t_D	无因次时间	
T	绝对温度, °F + 460 = °R	°R
T_b	气体计量时的基础温度, 60°F或 (°F + 460), 按实际用法而定,	°F, °R
T_{pc}	假临界温度	°F + 460
T_{pr}	假对比温度	
u	速度	英尺/秒
$\overline{u}$	平均速度	英尺/秒
v	比容	英尺 ³ /磅
V	体积 (第六章等)	英尺 ³
V_g	含气体时的体积	英尺 ³
V_L	烃类液体的当量蒸气体积	英尺 ³ /桶
W	重量 (第六章)	克
W	向系统提供的能量	英尺-磅
W_f	摩擦能量损失或不可逆能量损耗	英尺-磅
x	压力比, $\overline{p_R}/P_{wf}$	
x_f	裂缝长度	英尺
X	见方程2—21	
X	管线长度	

符号	说明	油田单位
y_i	i 组分在气体混合物中的摩尔分数	
Y	见方程2—21	
Y	气体计量中的膨胀因子	
z	压缩因子	
$\bar{z}$	平均条件下的压缩因子	
γ_g	气体比重 (空气=1.000)	
γ_{gf}	井内流动液体中气体的比重	
γ_o	油对水的比重	
Δ	变量增量	
Δ_p^2	压力平方差	[磅/英寸 ² (绝对)] ²
μ	粘度	厘泊
$\bar{\mu}$	平均条件下的粘度	厘泊
ρ_a	干空气的密度	磅/英尺 ³
ρ_g	气体密度	磅/英尺 ³
ρ_{gr}	假对比密度, 方程2—10	
ρ_L	液体密度	磅/英尺 ³
ρ_1	密度 (第二章)	克/毫升
ϕ	孔隙度	小数

脚注

a	空气
b	气体计量用的标准条件或基础条件
b	总 (第六章)
cs	套管, 关井 (用于压力)
cf	套管, 流动条件下 (用于压力)
d	输送 (用于压力)
e	外边界
f	流动
f	摩擦
f	裂缝

g	气体
i	初始
i	第 i 组分
k	千
L	液体
m	百万
m	计量（用于压力）
ma	基岩
n	第 n 项
o	石油
of	敞喷
p	孔隙，见方程8—1
p	校正仪
pc	假临界
pr	假对比
r	指半径，方程5—11
R	储层
t	整个系统
tfd	输送（用于压力）
tfp	管线压力
W	水
W	井筒
Wf	井底流动（用于压力）
Ws	井底关井（用于压力）
x	指 x 的函数，方程9—23
1, 2, 3, 等	指时间或位置

第二章 天然气的性质

对天然气性质的了解是天然气工程应用的基础。负责天然气的开采、输运及销售的工程师对影响气体渗流和销售价值的很多特性十分关心。这些特性是：气体的压力-体积-温度关系，粘度及气体的组成。天然气的热值，即天然气作为燃料的参数值，在假定其它变量保持不变的情况下，直接决定其销售的价格。

目前，天然气的计量单位是立方英尺，其定义是在给定的基础压力和温度下一立方英尺容积内所含的气体量。遗憾的是，并不存在工业界使用的标准基础压力。不过，除非是另有说明，否则本文所指的一切“标准”气体体积是指基础压力为14.65磅/英寸²（绝对）和基础温度为60°F时的体积。通常，干的立方英尺和实测立方英尺间没有什么差异，因为在天然气的计量中这两个名词是通用的。许多合同中要求水蒸气含量低于7磅/百万英尺³。在绝大多数气藏工程中，都假定天然气是干气，或者说的不含水蒸气的，除非是要考虑气体水化问题。

天然气通常是在压力比基础压力高许多倍、温度比基础温度高出很多的生产条件下进行测量的。通常，工程研究要求计算在特定压力和温度下给定数量气体的体积。这些计算是采用气体定律进行的。

§2.1 气体定律

气体可以定义为能充满任何容器的均质流体。有关压力和温度对一定数量气体体积的影响的物理定律已有明确的定义。这些定律在17世纪和18世纪首次由实验得出，并且以发现者的名字命名。波义耳定律指出，温度不变时，气体的体积与压力成反比关系。由于温度在形成科学的概念方面存在许多困难，所以几乎把

发现体积和温度间关系的时间推迟了一个世纪。查理或称盖-吕萨克定律指出，在压力不变的条件下，气体的体积与绝对温度成正比。

把这些定律与阿伏加德罗的假设（该假设指出，同样体积的不同理想气体在同压同温下含有相同数量的气体分子）相结合，则理想气体，或称完美气体的气体定律可用下式表示：

$$pV/T = nR \quad (2-1)$$

方程2—1说明了气体的压力、体积和温度与该气体数量 n 和 R （气体常数）之间的关系。气体分子运动理论的发展为气体定律提供了理论基础。

实验证明，理想气体方程只是初步近似描述了天然气的压力-体积-温度特性。为了工程应用，用 pV/nRT 比值对实际天然气与理想气体特性之间的偏差进行了校正，该比值叫做压缩因子 z 。对于非理想气体，气体定律可写成如下形式：

$$pV = nzRT \quad (2-2)$$

式中 n 为气体的摩尔数，其定义为：

$$n = \frac{\text{气体重量}}{\text{气体的分子量}} = \frac{W_{\text{气体}}}{M}$$

1. 气体常数 R

常数 R 的数值取决于方程2—2中所用单位。使用下列单位时：

p = 绝对压力，磅/英寸²（绝对）

V = 体积，英尺³；

z = 压缩因子，比值；

n = 磅-摩尔的数量；

T = 绝对温度（°F + 459.67），即兰氏度°R。

则气体常数的值 R 为：

$R = 10.732$ （英尺³，磅/英寸²（绝对），°R⁻¹，磅-摩尔⁻¹）

或 $R = 1545.4$ （英尺³，磅/英尺²，°R⁻¹，磅-摩尔⁻¹）对于1磅气体：

$$pV = bzT; \quad b = \frac{R}{M} \quad (2-3)$$

取空气的平均分子量为28.964，气体相对于空气的比重为 γ_g ，则气体的分子量为（见文献5）：

$$M = 28.964\gamma_g$$

因而：

$$b = \frac{10.732}{28.964\gamma_g} = \frac{0.37053}{\gamma_g} \quad (2-4)$$

其单位为（英尺³，磅/英寸²（绝对），°R⁻¹和磅⁻¹），以及：

$$b = \frac{(10.732)(144)}{28.964\gamma_g} = \frac{53.356}{\gamma_g} \quad (2-5)$$

此时单位为（英尺³，磅/英寸²，°R⁻¹，磅⁻¹）。

2. 压缩因子 z

实际上，压缩因子 z 是个变数，其数值取决于压力、温度和

气体的组成。将压缩因子绘制成压力的函数曲线。在恒定温度下，非理想气体的曲线形状如图2—1所示。

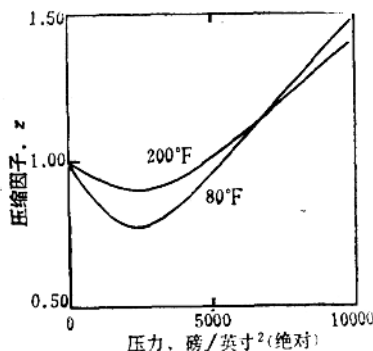


图2—1 恒定温度下某一天然气的压缩因子作为压力的函数

对各种组成的天然气的压缩因子进行研究表明，可将压缩因子归一化，即引入假对比压力和温度的概念。此假对比压力和温度以假临界压力和温度为基础，将之用于绝大多数工程问题时仍具有很高的准确度。简化式如下：

$$p_{pr} = p/p_{pc}, \quad T_{pr} = T/T_{pc} \quad (2-6)$$

式中的压力为绝对压力，温度为绝对温度，例如兰氏度（°F+460）^①。

①此近似值用于绝对温度换算。