

天然气开采試井 实用計算

胡 礪 善著

石油工業出版社

天然气开采試井 实用計算

胡礪善著



石油工業出版社

內 容 提 要

本書是作者綜合他十余年从事天然气开采工作的經驗、同时参考了苏联及其他各国有关文献写成的。書中对天然气試井的实际計算問題，作了全面而深入的探討。

書的內容包括天然气性質的計算、天然气試井时的压力測算和流量測定以及天然气地下动力学的基本原理等。为了說明問題，作者还引用了許多实例和演算題。

本書可供从事采气、試气的中等工程地質人員和各有關專業學校的學生閱讀。

統一書号：15037·230

天然气开采試井

实用計算

胡礪善著

·*

石油工業出版社出版(地址：北京六鋪炕石油工業部十号楼)

北京市書刊出版總發售許可證出字第083号

北京市印刷一厂排印 新华書店發行

·*

850×1168毫米开本·印張11張·277千字·印1—1,800册

1957年6月北京第1版第1次印刷

定价(11)2.70元

目 录

第一篇 天然气基本性質的計算

1. 天然气和各种烴的主要性質	1
2. 天然气的量度單位和标准条件	1
3. 理想气体定律	2
4. 天然气分子量的求法	5
5. 天然气的比重的計算法	7
6. 在标准条件下天然气重度的求法	11
7. 天然气比重和重度应用的实例	12
8. 天然气的压缩系数和天然气气体方程式	14
9. 天然气气体方程式的应用	18
10. 天然气的燃烧热計算方法	20
11. 天然气粘滯性的求法	21
12. 天然气和地下水間的相互关系	23
13. 石油、天然气同層时天然气对石油粘度和体积 因素的影响	28

第二篇 天然气井的試气

第一章 試气工作的重要性和目的	41
1. 試气工作的重要性	41
2. 天然气井的产气方程式和它的应用	42
3. 气井开采試气时有关压力、流量的重要术语	43
4. 天然气井試气的目的	43
5. 結論	52
第二章 气井的压力測驗和計算	53
1. 常用的仪器和仪器的校驗	53
2. 气井的井身装置和井底积液对于压力測驗的影响	60

3. 气井压力计算方程式	64
4. 天然气井流动状态, 利用井口压力计算气层压力 或相对气层压力及井底压力的方法	80
5. 从井口压力计算井底压力, 在高气油比产油井和 湿性天然气气井上的应用	82
6. 結論	83

第三章 天然气井的流量测验

I. 压力差试验原理及其应用	85
1. 流体在管道中的稳定流动和流动率	87
2. 利用流体力学求得液体在管道中流动时流速的 原理和方法	88
3. 天然气在管道中稳定流动时, 流速 v 和压力差 H 等的关系	92
4. 天然气流动时在管道内部的流量	96
5. 从管道中流到标准条件下的流量	98
6. 孔板自动流量计的构造、运用和计算	104
7. 彼脱管和它的运用	149
8. 流体从管道开口处流出的流量	152
9. 孔板开式测井器-垫圈流量计	153
10. 开式彼脱管	159
11. 气流温度的测定	163
II. 利用临界速度的量度方法	164
1. 气流的临界压力	164
2. 气流的临界速度	165
3. 临界速度与气体流量	166
4. 临界速度的应用	168
5. 节流孔板和临界速度计量器	169
6. 井口阻流器	173
7. 开式彼脱管的临界情形	173
8. 侧压力开式计量法	175

9. 結論	176
第四章 气井試气工作的計算、制圖和井下	
情况判断	177
1. 最簡單的試气方法——無阻流量的直接求法	177
2. 压力、流量相对研究的試气方法	180
3. 压力、流量相对研究試气法的对数座标直綫关系—— 回压試井法	208
4. 压力、流量相对研究試气法的二項式方程式研究方法	244
5. 結論	256
第五章 試气結果对天然气藏开發的功用	257
1. 采用指数方程式整理試气結果、气井的分类 与合理产量的决定	257
2. 原始气層压力与气井原始絕對無阻流量的理論变化; 气層开采設計簡介	272
3. 气層的儲气量和气層开發問題	278
4. 井距問題和井距对常数 C 的影响	295
5. 常規試气和对理論开采設計的修正	300
6. 流动气柱的計算問題	308
7. 其他功用	323
第三篇 天然气地下动力学原理	
1. 天然气在地層孔隙中單相滲透的原理	328
2. 天然气、液体的兩相流动	348
3. 地層滲透率不均一时的流动	354
4. 裂縫性地層的滲透率和流体在裂縫性地層中的运动	361
5. 克斯諾波里斯基定律和油气井生产方程式	364

第一篇 天然氣基本性質的計算

1. 天然氣和各種烴的主要性質

天然石油和天然氣都是極重要的燃料，都是從油井和氣井中開采出來的。在這些井的開采過程中，經常會碰到各種各樣的計算問題。氣體是有膨脹性的，所以計算起來比液體麻煩得多。

一個氣田一旦開發，所產天然氣的性質要立即加以精密的分析，這些分析的材料，就是以後從事一切計算的根據。

天然氣是烴屬烴(C_nH_{2n+2})的混合物。以容積論，甲烷(CH_4)約佔80—90%，乙烷佔5—10%。另外還含有少量的高級烴，二氧化碳，硫化氫，氮及氬氣等。

因為天然氣是各種氣體的混合物，所以有必要把各種有關氣體的性質表示出來(表1)。

2. 天然氣的量度單位和標準條件

天然氣的量度以體積表示，單位是公尺³，以公尺³代表。

氣體隨周圍壓力大小和溫度高低而改變體積。為了便于比較，必須指定一種壓力和溫度為標準。在天然氣工業理論研究中，通常以攝氏零度($0^\circ C$)和1個大氣壓(或760公厘汞柱)為標準條件。那就是說，以後所提到的公尺³，如不另加說明時都是指在 $0^\circ C$ ，1個大氣壓條件下所佔有的公尺³。

但是，在實用上，常採用 $20^\circ C$ ，1大氣壓；或 $15.5^\circ C$ ，1大氣壓為標準。

我國規定的標準條件是 $20^\circ C$ ，1公斤/公分²(1公斤/公分²常稱為工程大氣壓)。

天然气中常見的气体的性質表

表 1

气体名称	分子式	分子量	比 重 (空气=1)	密 度 公斤/公尺 ³	临界温度 °C	临界压力工 程大气压 公斤/公分 ²
甲 烷	CH ₄	16.04	0.554	0.716	-82.5	47.3
乙 烷	C ₂ H ₆	30.07	1.038	1.34	32.2	49.8
丙 烷	C ₃ H ₈	44.09	1.523	1.93	96.8	43.4
異 丁 烷	C ₄ H ₁₀	58.12	2.007	2.60	134.0	38.2
正 丁 烷	C ₄ H ₁₀	58.12	2.007	2.60	152.0	38.7
異 戊 烷	C ₅ H ₁₂	72.15	2.49	3.22	187.8	33.9
己 烷	C ₆ H ₁₄	86.17	2.975	3.85	234.8	30.5
庚 烷	C ₇ H ₁₆	100.2	3.46	4.48	267.0	27.9
辛 烷	C ₈ H ₁₈	114.2	3.94	5.10	296.0	25.4
空 气	28.97	1	1.293	-140.7	38.4
氧	O ₂	32	1.11	1.435	-118.8	51.3
氮	N ₂	28.02	0.968	1.252	-147.1	34.6
二氧化碳	CO ₂	44.01	1.52	1.965	31.1	75.4
硫化氢	H ₂ S	34.08	1.178	1.52	101.5	91.8

上表密度系在 0°C, 1 大气压标准条件下的密度。

(本表根据苏联“石油开采工学”石油学院譯稿)

3. 理想气体定律

一切理想气体，它的体积和绝对压力、绝对温度之間都遵守下列数学关系

$$PV = NRT', \quad (1,1)$$

式中 P ——绝对压力(大气压);

T' ——绝对温度($t+273^\circ\text{C}$);

V ——为气体的体积, 公尺³;

N ——为“分子”数目;

$$N = \frac{G}{m};$$

G ——为气体的重量, 公斤;

m ——为气体的分子量;

k ——为气体共有常数, 它的值可以按下列方式求得。

已知各种气体在 1 大气压, 0°C 时, 1 公斤分子占有体积 22.414 公尺³, 应用(1,1)式

$$P=1, T=0+273=273, N=1, V=22.414$$

$$R = \frac{1 \times 22.414}{1 \times 273} = 0.082 \text{ 公尺}^3 \text{ 大气压/公斤分子} \times ^{\circ}\text{C} \quad (1,1a)$$

为了应用便利起见, 也采用下列单位

$$1 \text{ 大气压} = 1.033 \text{ 公斤/公分}^2 = 10330 \text{ 公斤/公尺}^2.$$

$$R = \frac{10330 \times 22.414}{1 \times 273} = 848 \text{ 公斤} \times \text{公尺/公斤分子} \times ^{\circ}\text{C}. \quad (1,16)$$

R 对所有的气体都是相同的。

(1)式又可写成下列形式:

$$PV = \frac{G}{m} RT = G \frac{R}{m} T. \quad (1,1B)$$

设 R' 为 1 公斤气体的常数,

$$\text{即} \quad R' = \frac{R}{m} \text{ 或 } R = mR'. \quad (1,1r)$$

因各气体的分子量 m 都是不同的, 所以它们的 R' 也不同。

R' 的单位是 $\frac{\text{公尺}^3 \text{ 大气压}}{\text{公斤} \times ^{\circ}\text{C}}$ 或 $\frac{\text{公尺} \times \text{公斤}}{\text{公斤} \times ^{\circ}\text{C}}$, 即 $\frac{\text{公尺}}{^{\circ}\text{C}}$

[例 1] 有一合金钢瓶, 它的容积是 50 公升, 里面盛着压缩空气。用压力计量度, 表上指出压力为 150 大气压, 温度是 30°C , 求瓶中压缩空气的重量。

$$V = \frac{50}{1000} = 0.05 \text{ 公尺}^3;$$

$$P = 150 + 1 = 151 \text{ 大气压(绝对)};$$

$$T = 273 + 30 = 303^{\circ}\text{C}(\text{绝对}).$$

代入(1,1)式

$$N = \frac{PV}{RT'} = \frac{151 \times 0.05}{0.082 \times 303} = 0.304 \text{ 分子数}.$$

空气的分子量 = 28.97.

压缩空气的重量 = $28.97 \times 0.304 = 8.8$ 公斤.

[例 2] 空气的分子量为 28.97, 求空气的气体常数 R' .

以 0.082 或 848 代(1,1r)式中,

$$R' = \frac{R}{m} = \frac{0.082}{28.97} = 0.00283 \text{ 公尺}^3 \times \text{大气压/公斤} \times ^{\circ}\text{C};$$

$$R' = \frac{R}{m} = \frac{848}{28.97} = 29.3 \text{ 公尺}^3 \times \text{公斤/公斤} \times ^{\circ}\text{C}.$$

(1B)式可写成:

$$\frac{G}{V} = \frac{Pm}{RT'},$$

而 $\frac{G}{V}$ 即为气体单位体积的重量——重度, 设以 ρ 代表之:

$$\rho = \frac{G}{V} = \frac{Pm}{RT'}. \quad (1,1a)$$

[例 3] 求空气在标准状态下的重度。

$$\rho_a = \frac{Pm_a}{RT'} = \frac{1 \times 28.97}{0.082 \times 273} = 1.2929 \text{ 公斤/公尺}^3.$$

即在 0°C , 1 大气压条件下每公斤/公尺³ 空气重 1.2929 公斤。

(1)式又可写成下列形式:

$$\frac{P_b V_b}{T_b} = \frac{P_1 V_1}{T_1} = \dots = \frac{P_n V_n}{T_n}. \quad (1,2)$$

式中右下标 b 表示标准条件, 1, n 表示各种不同条件。

[例 4] 例 1 中的压缩空气, 在标准条件下有多少公尺³。

$$\frac{P_b V_b}{T_b} = \frac{P_n V_n}{T_n},$$

$$V_b = V_n \frac{P_n}{P_b} \cdot \frac{T_b}{T_n},$$

$$= 0.05 \cdot \frac{151}{1} \cdot \frac{273}{303} = 6.8 \text{ 公尺}^3.$$

4. 天然气分子量的求法

天然气的分子量是根据它的組成成份和每种成份含量的百分数計算出来的。

天然气的成份分析，一般均以容积百分数表示，但也有用重量表示的。兩者之間可按下面的例子进行換算。

[例 5] 已知天然气的容积百分数，求其重量百分数。

天然气分析結果		II	III	IV	V		
組成成份	I 容积百分数	分子数目	分子量	重量	重量百分数		
甲烷 CH_4	60.4	$\div 22.4$	$= 2.696 \times$	16.04	$= 43.2$	$\div 134.1$	$= 32.21$
乙烷 C_2H_6	6.2	$\div 22.4$	$= 0.276 \times$	30.07	$= 8.3$	$\div 134.1$	$= 6.19$
丙烷 C_3H_8	10.4	$\div 22.4$	$= 0.464 \times$	44.09	$= 20.4$	$\div 134.1$	$= 15.2$
丁烷 C_4H_{10}	18.8	$\div 22.4$	$= 0.840 \times$	58.12	$= 48.7$	$\div 134.1$	$= 36.35$
戊烷 C_5H_{12}	4.2	$\div 22.4$	$= 0.187 \times$	72.15	$= 13.5$	$\div 134.1$	$= 10.05$
合計	100.0		4.463		134.1		100

表中的 22.4 是一單位分子所佔的容积；

134 是合計重量；

III 欄中分子量是由表 I 中查得的。

[例 6] 求上例中天然气的分子量。

由公式(1,1)中已知

$$N = \frac{G}{m}, \quad m = \frac{G}{N}.$$

由前例 II 欄分子数目 $N=4.463$,

由前例 IV 欄总重量 $G=134$,

故分子量
$$m = \frac{134}{4.463} = 30.02.$$

根据[例 5]和[例 6], 可以写出計算天然气分子量的一般簡化方程式如下:

$$N = \Sigma N_n = \frac{V_1}{22.4} + \frac{V_2}{22.4} \dots + \frac{V_n}{22.4};$$

$$G = \Sigma G_n = \frac{V_1 m_1}{22.4} + \frac{V_2 m_2}{22.4} \dots + \frac{V_n m_n}{22.4}.$$

式中 V ——天然气中各成份的容积百分数; 右下标小字表示不同成份。

$$m = \frac{G}{N} = \frac{\Sigma G_n}{\Sigma N_n} = \frac{\frac{V_1 m_1}{22.4} + \frac{V_2 m_2}{22.4} \dots + \frac{V_n m_n}{22.4}}{\frac{V_1}{22.4} + \frac{V_2}{22.4} \dots + \frac{V_n}{22.4}}$$

$$= \frac{V_1 m_1 + V_2 m_2 + \dots + V_n m_n}{V_1 + V_2 + \dots + V_n},$$

但
$$V_1 + V_2 + \dots + V_n = \frac{100}{100} = 1,$$

故
$$m = V_1 m_1 + V_2 m_2 + \dots + V_n m_n = \Sigma V_n m_n. \quad (1,3)$$

即天然气的分子量, 等于它所含的各种成份的容积百分数乘各成份的分子量的总和。

[例 7]用公式(1,3)求[例 5]中天然气的分子量。

天然气組成成份			I 容积百分数	II 分子 量	I × II
甲	烷	CH ₄	60.4	16.04	9.66
乙	烷	C ₂ H ₆	6.2	30.07	1.86
丙	烷	C ₃ H ₈	10.4	44.09	4.58
丁	烷	C ₄ H ₁₀	13.8	58.12	10.9
戊	烷	C ₅ H ₁₂	4.2	72.15	3.03
合		計	100.0	ΣI × II = m _g = 30.03	

5. 天然气的比重的計算法

計算天然气的問題，都和天然气的比重有关。所以天然气比重的計算法格外重要。

气体的比重标准是空气。它的定义是，在同样条件下單位体积的气体重量和單位体积的空气重量的比。

天然气的比重，通常在 0.6—0.7 之間。含重經特多的天然气，也偶有大于 1 的。比重的符号常用 S 代表。

(1) 根据天然气的成份計算比重。

根据比重的定义：

$$S = \frac{\rho_g}{\rho_a} \quad (1,4)$$

$$\rho_g = S \rho_a \quad (1,4a)$$

式中 ρ_g, ρ_a 是天然气和空气的重度。

把公式(1,1a)代入(1,4)式中，則得

$$S = \frac{\frac{Pm_g}{RT}}{\frac{Pm_a}{RT}} = \frac{m_g}{m_a} \quad (1,5)$$

即天然气的比重，是它的分子量和空气的分子量之比，而空

气的分子量是一个常数: $m_a = 28.97$,

故
$$S = \frac{m_g}{28.97} \quad (1,6)$$

[例 8] 求下列天然气的比重。

天然气組成成份	I 容积百分数	II 分子量	I × II
甲 烷 CH ₄	95.42	16.04	14.98
乙 烷 C ₂ H ₆	3.85	30.07	1.16
丙 烷 C ₃ H ₈	1.33	44.09	0.59
異 丁 烷 C ₄ H ₁₀	0.46	58.12	0.27
正 丁 烷 C ₄ H ₁₀	0.36	58.12	0.21
高級烷	0.58	72.15	0.42
合 計	100.00	$m_g = 17.63$	

$$\text{比重 } S = \frac{m_g}{28.97} = \frac{17.63}{28.97} = 0.610.$$

[例 9] 求[例 5]所示的天然气的比重。

已知 $m_g = 30.03$,

$$S = \frac{m_g}{28.97} = \frac{30.03}{28.97} = 1.037.$$

(2) 天然气比重之測量及計算。

在新地区的探井中，常常遇到大量天然气。这些探区不一定設有能分析天然气的化驗室，所以天然气的成份就不能立即知道。但为了要知道气井的流量，和初步判断气層所含气体是“湿气”还是“干气”，必須知道天然气的比重。这时無法应用成份含量計算的方法。目前，現場上都用下列一些簡單仪器先測出与比重有間接关系的因数，再以計算求得其比重。

甲、浮力比較儀

使用时用泵 O 把金屬筒 e 抽成 25 吋水銀柱的真空，金屬泡 d 所受浮力減小，指針 B 乃移至标尺 S 的上方，打开三通 K 使空气从小管 R 流进，再用泵 O 加压直到金屬泡把指針 B 升起标尺 S 正中时为止，讀記“U”管中所記的水銀柱高度 H_a 。

放走空气，并用天然气置換，然后以三通 K 連于有压力的天然气管，使金屬泡 d 又平衡，讀記“U”管中的水銀柱高度 H_g 。

$$S = \frac{H_a}{H_g}$$

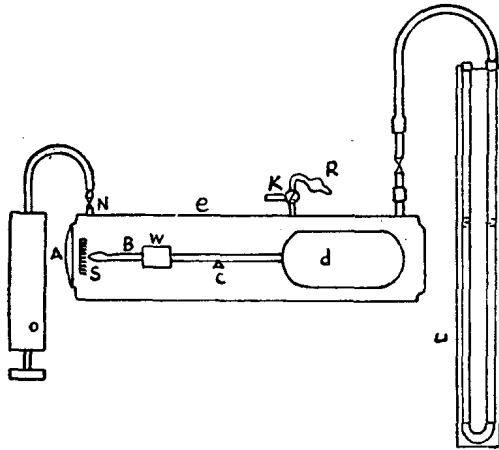


圖 1 浮力比較儀

原理和公式的演証：

物体悬浮在流体中，其所承受的浮力，等于物体所排出同容积流体的重量。流体的密度愈大，浮力就愈大；反之，就愈小。但气体的密度和压力成正比例。因此，浮悬在气体中的物体所受的浮力也和压力成正比。

設标准条件为 H_b, T_b 时，空气和天然气密度各为 ρ_a 和 ρ_g ；

压力为 H_a ，温度为 T_a 时，空气的密度为 ρ'_a ；

压力为 H_g ，温度为 T_g 时，天然气的密度为 ρ'_g 。

在測驗过程中，温度变化并不大，同时，較精密的浮力比較仪还附設有水套以便保持一定温度。故 $T_a = T_g$ 。

$$\text{因 } \frac{H_b}{T_b \rho_a} = \frac{H_a}{T_a \rho'_a}, \text{ 所以 } \rho'_a = \frac{H_a T_b \rho_a}{H_b T_a};$$

$$\frac{H_b}{T_b \rho_g} = \frac{H_g}{T_g \rho'_g}, \rho'_g = \frac{H_g T_b \rho_g}{H_b T_g} = \frac{H_g T_b \rho_g}{H_b T_a}.$$

而金屬泡的体积是 v ，它在空气和天然气中所受的浮力各为 B_a, B_g 。

$$B_a = v \rho'_a \quad \text{或} \quad B_a = v \frac{H_a T_b \rho_a}{H_b T_a};$$

$$B_g = v \rho'_g \quad \text{或} \quad B_g = v \frac{H_g T_b \rho_g}{H_b T_a}.$$

金屬泡 d 在空气和天然气中既达到同样平衡位置，故 $B_a = B_g$ ，

$$\text{即 } \frac{v T_b}{H_b T_a} H_a \rho_a = \frac{v T_b}{H_b T_a} H_g \rho_g,$$

简化后得 $H_a \rho_a = H_g \rho_g$ 。

把公式 $\rho_g = S \rho_a$ 代入上式得：

$$H_a \rho_a = H_g S \rho_a;$$

故得到

$$S = \frac{H_a}{H_g}.$$

[例10]用浮力比較仪測量天然气的比重。U形管中水銀柱为27公分时，金屬泡 d 平衡，而測量空气时(-13.7)公分水銀柱平衡，求比重。

$$S = \frac{H_a}{H_g}$$

$$= \frac{75 + (-13.7)}{75 + 27} = 0.60$$

式 中 75——当地大气压力相当水銀柱高度公分數。

乙、時間比較儀

使用时，在玻璃罐 *c* 中盛滿清水，使液面淹到玻璃管 *d* 最高標記以下大約 2.5 公分的位置，轉開三通 *b* 以通空氣，并把玻璃管 *d* 抽出讓空氣裝滿。关上三通 *b*，將玻璃管 *d* 插入玻璃罐 *c* 內，此時因 *d* 中有空氣，故 *d* 管外液面比管內的高 *h*。再轉開三通 *b* 并溝通玻璃管 *d* 及小孔“*a*”，空氣便从 *a* 排出。用停表記出排完時間（液面回升到最高位置），如此重复四、五次，求平均后得時間 t_a 。

提高玻璃管 *d* 令它的下端剛剛淹在液面以下。用三通 *b* 上水平短管借橡皮管連天然氣源，使冒泡一兩分鐘，將玻璃管 *d* 內空氣全部驅出，关上三通 *b*，放下玻璃管 *d*，令內外液面差仍舊为 *h*，轉開三通 *b* 使其通小孔 *a*，令天然氣排出，同样重复操作四、五次求出平均后即得時間 t_g 。

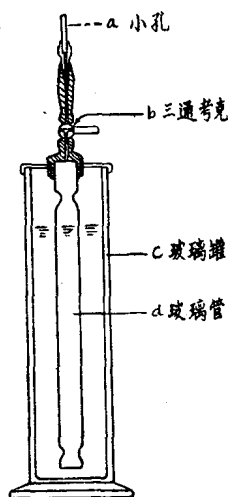


圖 2 時間比較儀

$$S = \frac{t_g^2}{t_a^2}$$

上式因涉及流体力学，將在例 74 中引証。

6. 在标准条件下天然气重度的求法

知道了天然气的比重，应用公式(1,4a)便能求出其在标准条件下的重度