

天然气的开采

苏联 A·A·布里斯克曼等著

石油工业出版社

內 容 提 要

“天然气的开采”一書，是为了配合北京石油学院采气专业的教学工作，由該校采油教研室根据苏联国立石油燃料科技書籍出版社1955年出版的“天然气的开采与运输”(ДОВЫЧА И ТРАНСПОРТ ГАЗА)一書的天然气开采部分(1—6章)譯出的。原書的天然气儲运部分(7—11章)，因我社即將另出專書，就不再翻譯出版；原序一篇，也經刪去不用。本書內容主要介紹苏联各天然气的含气层情况，闡述开发普通气田和凝析气田的气体动力学原理和現代开采技术。本書可供从事石油和天然气开采工作的工程技术人员参考，也可作为高等石油学校的教材。

А. А. ВРИСКМАН А. Л. КОЗЛОВ

Е. М. МИНСКИЙ М. Х. ШАХНАЗАРОВ

ДОБЫЧА И ТРАНСПОРТ ГАЗА

根据苏联国立石油燃料科技書籍出版社(ГОСТОПТЕХИЗДАТ)

1955年莫斯科版翻譯

統一書号：15037·305

天然气的开采

北京石油学院采油教研室譯

石油工业出版社出版(社址：北京六鋪炕石油工業園內)

北京市書刊出版業營業許可證出字第083號

北京市印刷一厂排印 新华書店发行

850×1168 $\frac{1}{2}$ 开本 * 印張13 $\frac{3}{4}$ * 332千字 * 印1—480册

1957年10月北京第1版第1次印刷

定价(11)3.40元

目 录

第一章 气体的物理性質	1
比重	1
气体的粘度	3
蒸汽压力	11
揮發度(逸度)	14
热容量	18
蒸發潛热	25
發热量	26
导热性	30
气体的扩散和逸散	31
爆炸性	38
石蜡系碳氢化合物的抗爆性	42
第二章 气体状态的基本定律	48
波义尔-馬略特定律	49
盖 呂薩克定律	53
克拉貝朗方程式	56
范德华方程式	58
对比临界参数及对应状态的定律	62
通用范德华方程式	65
道尔頓定律和阿馬格定律	68
亨利定律	71
拉烏尔定律	72
平衡常数	74
气体的压缩性	77
亞佛加德罗定律	80
格萊姆定律	82

斯托克斯定律	83
焦耳定律	84
相律	86
临界参数	87
第三章 儲气層的特征。苏联气田的开采特征	91
儲气層	91
气体在地壳中蘊藏的条件及气田的驱动方式	106
苏联气田的开采特征	119
第四章 气田开发的气体动力学基础	137
气体动力学計算的任务	137
渗透理論的原理	138
勘探气井的矿場試井	159
地層动态的預測	171
气井結構	191
确定气井的分佈及数量	210
合理开发气田的基本原則	215
第五章 天然气的开采	224
气井的試采	224
井的生产特征	229
井底压力的确定	233
气井的試井	259
气井开采的工艺方式	270
气井井口設備	272
在一口井内两个气層的分別开采	280
气井工作的調节	284
气井产量的測定与采出气体的計算	300
气井無阻流量的确定	314
井开采时水化物的形成	320
气体的分离	330
砂子对气井开采的影响	339

水对于气井开采的影响	340
自噴管柱的計算	344
气矿場上的聚气管網	358
气体的漏失, 气体噴出的防止	364
井口附近建筑物和采气矿場的建筑物	368
气井的管理	372
用鹽酸处理气井	373
气井的修理	378
控制測量仪器	383
第六章 凝析气田	395
一般概念	395
反凝析及蒸發	398
凝析气田的分类	404
凝析油气比	406
实验工作与研究工作	407
井距及井在構造上的分佈	413
必須注入的气量	416
凝析气田的計劃开發	421
凝析气藏枯竭時間的确定	423
凝析气田的开采	425
凝析气体的加工	429

第一章 气体的物理性質

比 重

比重是表征气体的重要参数之一，在解决許多实际問題时，必須知道它。对于碳氢化合物气体来說，当其中不混有其它气体时，它可作为气体含油度的标准。

气体的相对比重，根据它对空气的比值来决定。因为在 0°C 与 760 公厘水銀柱时，1 摩尔的任何气体之体积等于 22.4 公尺³，所以 1 公尺³ 气体之重量为：

$$\gamma' = \frac{M}{22.4},$$

式中 M ——气体分子量。

从而，任何气体之相对比重为：

$$\gamma = \frac{\gamma'}{1.293} = \frac{M}{22.4 \times 1.293} = \frac{M}{28.96} \approx \frac{M}{29}.$$

气体混合物的分子量，根据气体中各个組分的分子量与其在气体混合物中的百分含量来决定。

这样，气体混合物的相对比重为：

$$\gamma_{\text{CM}} = \frac{M_1 n_1 + M_2 n_2 + \dots + M_n n_n}{100 \times 29},$$

式中 M_1, M_2, \dots, M_n ——混合物中各組分的分子量；

n_1, n_2, \dots, n_n ——各个組分的体积百分含量。

知道了气体馏分組成，就容易决定气体的相对比重 γ ，將其乘以 1.293 即得到体积重量(密度)。

当不知道气体的馏分組成时，气体比重用称量法(比重瓶法)或用專門的仪器——基于气体流經一个小孔之原理的喷射仪来

測定。

称量法保証有比噴射法为准确的結果，但为了迅速而方便的測定气体比重，特别是在野外与矿場的情况下，必須利用基于气体噴流原理的仪器。

对于噴射仪，可如下面的方法来構成格萊姆定律：在同样的压力 P 与温度 t 下，同样体积的各种气体流經小孔的时间与其比重或密度的平方根成正比。

取空气的比重为1，由下列的关系式就容易求出气体的比重：

$$\frac{\tau_r}{\tau_B} = \frac{w_B}{w_r} = \frac{\sqrt{\gamma_r}}{\sqrt{\gamma_B}} = \frac{\sqrt{\gamma'_r}}{\sqrt{\gamma'_B}}$$

式中 τ_r ——气体噴流的时间；

τ_B ——空气噴流的时间；

w_r ——气体噴流的速度；

w_B ——空气噴流的速度。

如果使用噴射仪在室内測定比重，則可以取空气与气体的温度是一样的；如果直接在矿場进行測定的話，則必須对气体和空气的温度差給以相应的修正：

当 $t_r < t_B$ 时， $t' = t_B - t_r$

$$\gamma_r = \frac{\tau_r^2}{(1 + 0.00366t')\tau_B^2}$$

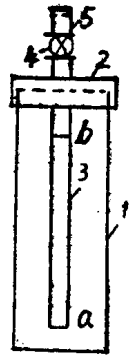
当 $t_r > t_B$ 时， $t' = t_r - t_B$

$$\gamma_r = \frac{\tau_r^2}{(1 - 0.00366t')\tau_B^2}$$

噴射法的主要缺点是：白金片上的毛細孔只要有很小的阻塞，就会引起很大的誤差。

上述类型仪器的工作实践表明：同样体积的空气或气体的噴流时间的变化达到5—10%，所以測定气体的比重必須进行2—3次或更多，并取其平均值。

圖 1 所示是最通用的噴射儀。它是一個帶有金屬蓋 2 的玻璃圓筒 1；通過金屬蓋將一個帶有敞口端和三通噴嘴 4 的玻璃管 3 插入圓筒內。在噴嘴上面，有一個不大的金屬小管 5；在其上部有一薄的白金片，白金片上有一個直徑約為 0.25 公厘的小孔。



當噴嘴關閉時，將玻璃管 3 插入裝滿水的圓筒內，因為玻璃管內充滿空氣，所以水不能進到其中。如果轉動三通噴嘴使玻璃管與大氣相通，則水逐漸地進到玻璃管 3 內。用停表測出空氣由刻綫 a 到刻綫 b 噴流的時間 τ_B 。然後，當玻璃管內完全充滿水後，使氣源與噴嘴相聯通；在氣體的壓力下，水被排擠到刻綫 a 的下面。然後轉動噴嘴 4，使玻璃管 3 與氣源隔斷而與大氣相聯通，測出同體積的氣體（從刻綫 a 到刻綫 b）的噴流時間 τ_r 。

測定比重的比重瓶法是在分析天平上準確地測定裝有氣體的比重瓶與裝有空氣的比重瓶的重量：

$$\gamma = \frac{a-b}{c-b},$$

式中 a——裝有氣體之比重瓶重量；

c——裝有空氣之比重瓶重量；

b——比重瓶本身的重量，為在仔細地抽出其中空氣後而測出的。

氣體的粘度

氣體和液體的粘度是表征氣體或液體的重要參數之一。在輸氣或輸油的所有可能的計算中，以及同氣體或液體在岩石毛細管孔隙內運動有聯系的計算中，粘度具有重要的意義。

由於超過 1000 公里的遠距離輸氣之發展，以及由此而引起的

較比精確地計算輸氣管路的必要性，所以在進行輸氣管路的水力計算時，需要將氣體的內摩擦係數引入到計算公式內。

當氣體在多孔介質內流動時，氣體粘度的影響特別大。由於採用二次採油法與凝析氣田開採的發展，以及為了保持地層壓力而進行的注氣，所以對氣體粘度的研究，開始給予了很大的注意。

由於地下水力學的發展，在很大程度上，還增加了研究氣體粘度的興趣。

在表征氣體滲濾規律的所有的公式中，以及在進行不同計算時的許多具有很大大實際意義與理論意義的公式中，例如當氣體穩定徑向流動時，決定其流量的公式中，以及決定導熱性，雷諾數等公式中，都要引入氣體的粘度。

液體的粘度通常被理解為各個質點相互位移產生阻力的性質。 據此，使彼此距離 1 公分、面積為 1 公分² 的兩個液層移動速度為 1 公分/秒所必需的力作為絕對粘度的單位。為紀念學者泊阿謨，故將這個單位命名為泊。

為了決定粘度，泊阿謨給出了下面的公式：

$$\eta = \frac{\pi r^4 (P_H - P_K) \tau}{8Vl}, \quad (I, 1)$$

式中 r ——毛細管半徑，公分，試驗的液體（氣體）即流經此毛細管；

P_H ——毛細管始端壓力，達因/公分²；

P_K ——毛細管末端的壓力，達因/公分²；

τ ——液體（氣體）流過的時間，秒；

V ——液體（氣體）的體積，公分³；

l ——毛細管長度，公分。

η 的因次為 $\left[\frac{\text{克}^*}{\text{公分} \cdot \text{秒}} \right]$ ，式中克*——克-質量。

氣體的粘度，人們認為是，當一個質點對其它質點作相對運

动时，或是由具有较大速度 w_1 的層膜到较小速度 w_2 的層膜轉換动量时所产生的內摩擦。

等于冲力的动量可表示为下列的关系：

$$mV = F = \frac{(w_1 - w_2)\tau \cdot s \cdot x}{l}, \quad (I, 2)$$

式中 F ——冲力；

w_1 与 w_2 ——速度；

τ ——时间； l ——距离；

s ——横截面； x ——內摩擦系数。

由公式(I, 2)，当 $\tau = 1$ 秒时，

$$x = \frac{F \cdot l}{(w_1 - w_2)s}. \quad (I, 3)$$

对于物理系統單位，得到：

$$x = \left[\frac{\text{克}^*}{\text{公分} \cdot \text{秒}} \right],$$

亦即与公式(I, 1)之粘度 η 具有相同的因次。

同样地，对于工程系統單位：

$$x = \left[\frac{\text{公斤} \cdot \text{秒}}{\text{公尺}^2} \right],$$

从而得出：绝对粘度表示內摩擦力，亦即 $x = \eta$ 。

因为：

$$1 \text{ 克}^* = \frac{1 \text{ 公斤}}{1000 \times 981}$$

或者

$$1 \text{ 公斤} = \frac{981000 \text{ 克}^* \cdot \text{公分}}{\text{秒}^2} = 981000 \text{ 达因},$$

所以，粘度的一个工程單位：

$$\frac{1 \text{ 公斤} \cdot \text{秒}}{\text{公尺}^2} = \frac{981000 \text{ 达因} \cdot \text{秒}}{10000 \text{ 公分}^2} = \frac{98.1 \text{ 达因} \cdot \text{秒}}{\text{公分}^2} = 98.1 \text{ 泊}.$$

这样，为了將工程單位制換算为物理單位制，必須將“泊”数乘以98.1；反之，为了將物理單位制換算为工程單位制，必須將“泊”数除以98.1。

在計算中，常采用运动粘度 $\mu = \frac{\eta}{\rho}$ 代替绝对粘度；它用沱来表示。

对于 CGS 制：

$$\eta = \left[\frac{\text{克}^*}{\text{公分} \cdot \text{秒}} \right], \rho = \left[\frac{\text{克}^*}{\text{公分}^3} \right],$$

$$\mu = \left[\frac{\text{公分}^2}{\text{秒}} \right] = \text{沱}.$$

对于工程单位制，运动粘度的因次由下一关系式决定：

$$\mu = \frac{\eta}{\rho},$$

式中 η ——绝对粘度，表示为工程单位： $\eta = \left[\frac{\text{公斤} \cdot \text{秒}}{\text{公尺}^2} \right]$ ；

ρ ——密度； $\rho = \left[\frac{\text{公斤} \cdot \text{秒}^2}{\text{公尺}^4} \right]$ 。

因之，

$$\mu = \left[\frac{\text{公尺}^2}{\text{秒}} \right] = \left[\frac{10000 \text{ 公分}^2}{\text{秒}} \right].$$

在 0°C 与 760 公厘水银柱时的绝对粘度除以质量密度就可以求出运动粘度。

例如，在 0°C 与 760 公厘水银柱时之空气绝对粘度为：

$$\eta = \frac{1.71 \times 10^{-6} \text{ 公斤/秒}}{\text{公尺}^2}.$$

空气的重量密度为：

$$\gamma'_s = 1.293 \text{ 公斤/公尺}^3.$$

空气的质量密度为：

$$\rho = 1.293/9.81 = 0.132.$$

则运动粘度为：

$$\mu = \frac{1.71 \times 10^{-6}}{0.132} = 13 \times 10^{-6}.$$

同样地，根据表 1 所列的数据，可以求出碳氢化合物的运动

粘度。

飽和碳氫化合物的粘度 $\eta \times 10^7$

表 1

$t, ^\circ\text{C}$	CH_4	C_2H_6	C_3H_8	正- C_4H_{10}	異- C_4H_{10}	C_5H_{12}	C_6H_{14}
0	1030	860	750	682	689	623	601
20	1095	920	800	739	744	668	644
50	1190	1010	878	814	814	737	710
100	1338	1150	1006	947	947	850	820
150	1480	1274	1130	—	—	975	930
200	1610	1402	1243	—	—	1086	1040

气体的粘度和液体的粘度不同，它随着分子量的增加而减小，而随着温度的升高而增加。后者之产生，是由于温度升高时，气体的分子具有较大的速度与运动性，结果增加了分子间的相互碰撞，从而使分子间的摩擦增加。

随着分子量增高而粘度的减小，只能在一定的温度范围内产生，这可由圖 2 看出[2]。

由圖 2 看出：在温度范围从 80° 到 $380-400^\circ\text{K}$ 时， CH_4 与 C_2H_6 的粘度大于 C_3H_8 的粘度。当温度超过上述范围时， C_3H_8 的粘度大于 CH_4 与 C_2H_6 的粘度。碳氢气体粘度的这个可变的性质，对于天然气来说，它如圖 3 [3] 所示。

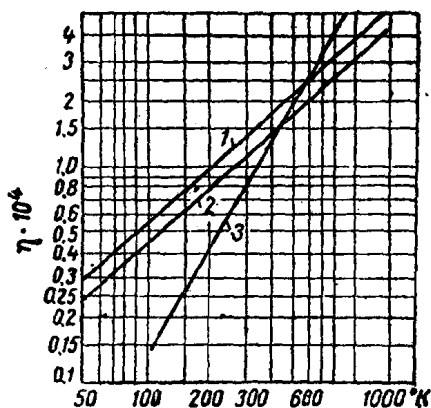


圖 2 气体粘度与温度的关系
1- C_2H_6 ; 2- CH_4 ; 3- C_3H_8 。

由所列出的圖中看出：

1. 当气体比重相同时，在一定的压力极限以前，随着温度的升高而绝对粘度减小，但低于此极限时，粘度却增加；

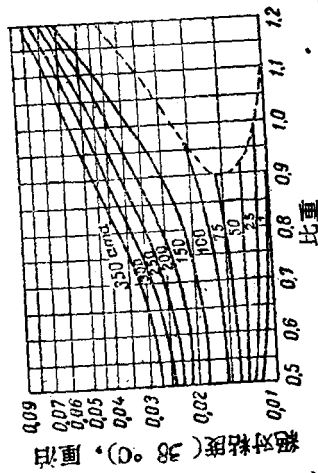
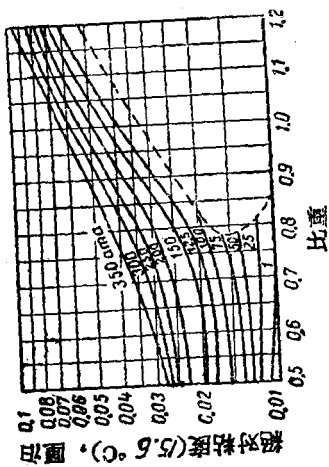
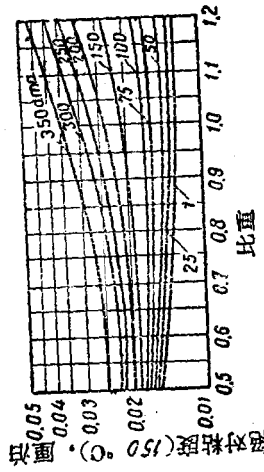
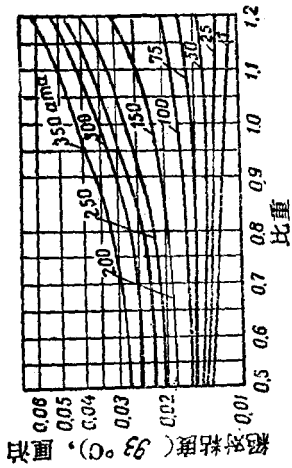


圖 3 气体粘度与其比重的关系(空气的比重取为 1)

2. 在相同的温度下, 随着比重的增大, 在一定的压力极限以內, 气体的粘度增加, 而低于此极限时却减少;

3. 在相同的温度与比重下, 随着压力之增大而粘度增加。

在有的文献中指出: 气体的绝对粘度不取决于压力, 因为随着压力的降低, 单位体积气体的分子数目减少多少, 气体分子运动的自由路程长度就增加多少。

上面所指出的，應該是对理想气体和压力接近于大气压力时的情况。实际上，气体的绝对粘度是随着压力的增大而增加。这可以由上面所列出的圖看出来。

粘度随着压力的增大而增加，是因为单位体积内的分子数量增加，从而增加了分子间的碰撞次数。

上面所指出的，对于真实气体具有特殊的意义，因为真实气体具有超压缩性。

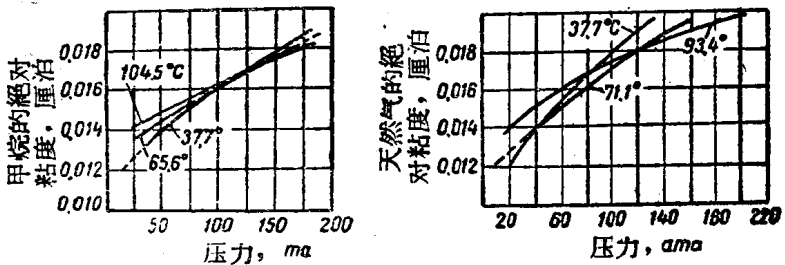


圖 4 在不同压力时之气体粘度

B. B. 拉普克 [4] 根据圖 4 的数据，以具体例子表明：在决定气井的产量时，如忽略绝对粘度与压力的关系，确定出的产量就要偏高；对于甲烷来说误差可达到 20—30%；对于由 83.19% 的 CH_4 ，8.48% 的 C_2H_6 ，4.37% 的 C_3H_8 ，2.44% 的 C_4H_{10} 与 1.52% 的 C_5H_{12} 组成的天然气，误差可达到 46—63%。

为了实用的目的，天然气的粘度可以按照加和定律——按照气体中各组分的粘度(表 2 与表 3)来相当精确地求出。

这样所求出来的粘度与由实验测定出的数据有 1—3% 的偏差，这可由表 2 看出。

知道了在 0°C 时之绝对粘度，根据苏捷尔兰特的近似公式可以求出在任何温度时之粘度值：

$$\eta_t = \eta_0 \left(\frac{T}{273} \right)^{3/2}$$

具有乙烷的甲烷混合物的粘度 $\eta \times 10^7$

表 2

% C ₂ H ₆	$t=20^\circ\text{C}$	按照加和性	$t=100^\circ\text{C}$	按照加和性
	根据手册 [1]		根据手册 [1]	
18.84	1046	1050	1288	1290
43.30	999	1005	1229	1250
51.26	986	992	1226	1236
80.97	938	936	1174	1159

具有丙烷的甲烷混合物的粘度 $\eta \times 10^7$

表 3

% C ₃ H ₈	$t=20^\circ\text{C}$	按照加和性	$t=100^\circ\text{C}$	按照加和性
	根据手册 [1]		根据手册 [1]	
53.84	948	961	1182	1221
63.83	878	902	1100	1124
83.41	851	845	1042	1062

或根据苏氏的比较精确的公式:

$$\eta_t = \eta_0 \left(\frac{273 + c}{T + c} \right) \left(\frac{T}{273} \right)^{3/2},$$

式中 T ——气体的绝对温度; $T = 273 + t$;

c ——由实验测定出的各个气体的系数, 对于 H₂, 此系数等于 79; CH₄ 为 170; C₂H₆ 为 280; C₃H₈ 为 318; CO₂ 为 240; N₂ 为 110; 空气为 124。

足够近似的气体粘度, 可用实验的方法来测定: 应用喷射仪并估计到在同一温度下, 气体粘度对空气粘度的比值等于同一体积之气体和空气流经毛细孔时间之比值, 亦即:

$$\frac{\eta_{\Gamma}}{\eta_{\text{B}}} = \frac{\tau_{\Gamma}}{\tau_{\text{B}}},$$

这可由泊阿谏基本公式得出。

空气粘度与温度的关系列于表 4 中。

在 $P=1.033$ 公斤/公分² 时，空气粘度与温度的关系

表 4

$t, ^\circ\text{C}$	$\eta \times 10^6$	$t, ^\circ\text{C}$	$\eta \times 10^6$
0	171	60	200
10	176	70	204
20	181	80	208
30	185.6	90	213
40	190	100	217.5
50	195		

蒸 汽 压 力

在某温度下，某液体与其本身的蒸汽处于平衡时的压力，称为液体的饱和蒸汽压力。当作用在系统内之力或在外边因素影响下所产生之力相互平衡时，即达到系统的平衡状态。当存在有兩相系统时，在平衡状况下，既不产生蒸汽之凝析为液体，也不产生蒸汽从液体的逸出。这样，在动平衡的情况下，在单位时间内，由液相转变为气相(蒸汽相)之分子数等于由气相转变为液相之分子数。

表面分子的动能是在液体表面上聚集蒸汽的推动力。分子从液体表面的脱出和它转变为蒸汽相，可能在其动能超过表面分子与下面液相分子间相互吸引力的情况下发生。在相反的情况时，分子即由蒸汽相转变为液相。在第一种情况下，产生液体的蒸发；在第二种情况下产生蒸汽的凝析。

蒸汽压力随着温度之升高而增大，在饱和情况下，亦即在单位体积中，蒸汽含量达到最大值时，蒸汽压力达到最大值。

按照气体动力理论，分子数的增加将引起分子同有限表面的

碰撞次数增加，这样就使压力增加。但这仅仅在容器内存在有液体时才有可能。当没有液体时，随着温度的升高而蒸汽或气体之压力增加，是由于气体体积膨胀的结果。当蒸汽压力变得与外界压力相等时，液体就开始沸腾。因此，沸点温度，就是液体的蒸汽压力与外界压力相等时的温度。在某压力下，随着沸点温度的接近，温度就不再继续升高了，一直到所有的液体蒸发完为止。每一个温度就相应有一个蒸汽压力。

对于不同的碳氢化合物，蒸汽压力 P 与温度 t 的关系，在图形上用凸向于温度座标轴的抛物线来表示。这个关系在对数座标上则为直线(图 5)。

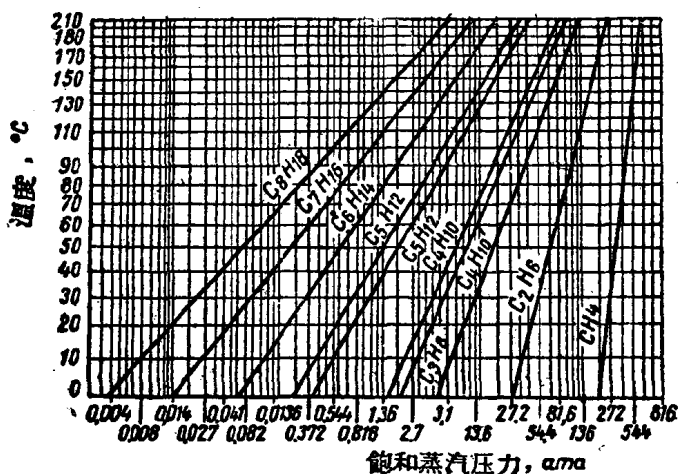


图 5 蒸汽压力

对于多组分液体来说蒸汽压力可以足够近似地取为混合物中各个组分的分压力之和。已经确定出：当各组分相互溶解时，蒸汽压力常比用以上方法所求出的总蒸汽压力低一些。不能混和的液体(例如液体碳氢化合物与水)的蒸汽压力，等于其蒸汽压力之和，而此蒸汽压力与它们在混合物内的百分含量没有关系。对这样的混合物，我们不能应用拉乌尔定律(见第二章)。