

石油科学进展<sup>3</sup>

# 石油及天然气的 开采和输送

A. P. 西拉斯 著

石油工业出版社

# 序 言

广义地说，石油与天然气的开采可以分为三个基本上是独立的科技领域，即（1）油层内的开采过程（油储工程），（2）从油气井中开采石油及天然气，（3）地面收集、分离和输送。本书讨论后两部分的内容。

第一章复习有关流体在管道内流动的那些计算方法，这些知识对于理解和设计在井内和在地面管道中的单相和多相流动是必要的。

在第二章至第五章中讲述石油及天然气井。在处理这几部分的内容时，我遵循这样一个原则，即采油工程师的主要任务是以最低的开采成本保证采出油田生产计划所规定的各口井的油或气产量。上述的技术上的目标往往可以通过几种不同的生产方法、采用不同类型的生产设备来实现，而在同一种类型的生产设备中，又可以有几种不同的结构和规格可供选择。实际上，即使采用同一种类型的设备，也有几种可能的操作方法。在几种技术上可行的方案中，必有一种是最经济的，在选择时当然应当选用这种。

我打算尽可能全面地讨论各个方面的内容，但有些内容在其它书籍中作了讨论，我就把它们略去了（如抽油泵的示功图分析和天然气计量等）。如果对这些问题进行深入的讨论，就会占用太多的篇幅。

第六章讲述油气田使用的主要地面设备。在该章中，我的着眼点也是在于介绍如何选择在技术上和经济上最优的设备。

第七和第八两章讲述石油和天然气在管道和管道系统中的流动。在这两章中不讨论设备，这是因为在油气田内部的管道一般都比较短，而有关的生产设备已在第六章讨论过了。另一方面，把着重点放在设计概念上（这种概念把串联的各口井的水力单元、油气生产设备和管道看成是一个连接在一起的水力系统，该系统具有一个总体最佳方案，该最佳方案能够而且必须加以确定）似乎也是比较合理的。然而应该强调一点：这种设计方法也需要流变学的知识。

自然，在处理每个方面的内容时，我打算不但要讲述各种方案的内容，而且要说明其所以然。然而在我从事生产活动和在大学的工作过程中，我发现有一种令人遗憾的现象，即有些设计和采油工程师仅仅死板地按照书本所写的办法去做，而不真正去理解为什么要那样做，因而所采用的方案在逻辑上和经济性上都不理想。问题的关键在于理解，而这正是教科书和手册的主要目的。

在确定物理量和选择物理单位制时，我采用了国际单位制。在选择本书所用符号的下标时，由于本书所涉及的内容很广泛，所以稍微违背了“一种概念，一种符号”这样的原则。我真诚地希望，这样一种出于简化的理由而采取的折衷办法，不致增加读者的困难。

在编纂和出版本书的过程中，我得到了许多在 Miskolc 重工业技术大学石油工程系的同事的帮助。我深深地感谢他们的合作，没有这种合作，本书（总结了三十年来生产和教学方面的经验）是难以问世的。在这些人中，我要向 Ferenc Patsch（他在写第八章时起了重要作用）、Gábor Takács 和 Tibor Tóth（他们二人对于第一至第七章中的例题计算和校核方面给了很大的帮助）及 É. Szota 夫人（她负责插图的绘制）表示特殊的敬意。

作者

# 符 号 表

说明：下列各项的符号未列入本表；各种不常用的物理量（这些物理量在文中出现时加以说明）；顺序下标（不管是字母还是数字）；函数的简化形式；在别处已说明的表示常数和表达式的符号及通用符号，例如压力差  $\Delta p$ 、平均压力  $\bar{p}$ 、最大压力  $p_{max}$ 、最小压力  $p_{min}$ 、最佳流量  $g_{opt}$ 、许用应力  $\sigma_{a1}$ ；当所讨论的物理量已由书中的内容明确定义时，为简化起见，将下标略去。例如在有关天然气流动的章节中，标准气体密度简单地用  $\rho$  表示而不用  $\rho_{gs}$  表示。

a	加速度, $m/s^2$	$d_{chi}$	第 $i$ 个气举阀的节流嘴直径
$a_{max}$	光杆最大加速度	$d_{in}$	保温层外径
a	温度分布或扩散系数, $m^2/s$	$d_p$	抽油泵柱塞直径
$a_s$	土壤的温度分布或扩散系数	$d_r$	抽油杆直径
$a_{s,w}$	湿土的温度分布或扩散系数		$\left[ -\frac{du}{dr} \right]$ 管道内层流的剪切速率, $1/s$
b	抽油杆的重量损失系数	e	不同心度
c	比热	e	管子的品质因数
	每单位质量, $J/(kgK)$	f	损失系数
	每摩尔质量, $J/(kmolK)$	g	重力加速度, $m/s^2$
$c_g$	气体的比热	h	比热, $J/kg$
$c_l$	液体的比热	h	液面高度 (高程差), m
$c_o$	油的比热	$h_l$	液柱液面高度
$c_p$	定压比热	$h_{la}$	聚集液柱液面高度
$c_{p,a}$	在常压 (一个大气压) 下的比热	$h_{lo}$	产出液柱液面高度
$c_{p,p}$	在压力 $P$ 下的比热	$h_{lr}$	残留液柱液面高度
$c_{p,l}$	液相的定压比热	$h_{lu}$	在油管中上行的液柱液面高度
$C_s$	土壤的比热	$h_p$	抽油泵泵筒高程差
$C_{s,d}$	干土的比热	$h_v$	流动压头损失, m
$C_{s,w}$	湿土的比热	k	渗透率, $m^2$
$C_{s,t}$	钢的比热	$k_g$	天然气有效渗透率
c	压缩系数, $m^2/N$	$k_o$	油的有效渗透率
d	直径, m	k	管子单位长度的传热系数, $W/mk$
$d_i$	内径	$k^*$	单位表面的传热系数, $W/m^2 K$
$d_{ci}$	套管内径	k	当量绝对粗糙度, 米
$d_o$	外径	k	输油比成本, $Ft/kgkm$
$d_{ro}$	油管外径	k	采油比成本, $Ft/Mg$
$d_s$	当量直径		
$d_{cb}$	节流嘴直径、油嘴直径		

$l$	长度, 距原点距离, m	$P_{T,i}$	连续气举期间在第 $i$ 个气举阀处的油管压力
$l_c$	管子临界长度	$P_p$	假对比压力
$l_g$	胶凝原油塞长度	$P_r$	对比压力
$n$	液-气系统中的总摩尔数	$P_s$	摩阻产生的压力降, $N/m^2$
$n_L$	液相中的摩尔数	$P_{sL}$	层流中的摩阻压力降
$n_V$	气相中的摩尔数	$P_{sT}$	紊流中的摩阻压力降
$n$	抽油泵冲数 (泵速), $1/min$	$\Delta P$	压力降, $N/m^2$
$n$	生产率方程的幂	$\Delta P_{c,s}$	节流嘴两端的压力降
$n$	指数定律的幂	$\Delta P_{c,1}$	气举阀关闭压差, $N/m^2$
$n_c$	间歇气举的日循环次数, $1/d$	$\Delta P_{e,1}$	气举阀开关压力差, $N/m^2$
$n_o$	抽油杆柱的自由振荡数, $1/min$	$\Delta P_{o,p}$	气举阀开启压差, $N/m^2$
$P$	压力, $N/m^2$	$q$	流量, $m^3/s$
$P_g$	临界压力	$q_g$	气体流量
$P_{g,1}$	注入气压力	$q_{i,1}$	在第 $i$ 个连接单元中流动的 标准体积流量
$P_{gL}$	长度为 $L$ 的静止气柱压力	$q_{i,j}$	由第 $i$ 个节点流向第 $j$ 个节点的标准体积流量
$P_h$	静水压力	$q_c$	压缩机排出流量
$P_k$	气举阀充氮腔压力	$q_{eL}$	注入气流量
$P_{k,n}$	标准状态下的气举阀充氮腔压力	$q_{s,n}$	以标准体积表示的流量
$P_{k,T}$	温度为 $T$ 时的气举阀充氮腔压力	$q_{i,n}$	入井流量
$P_{k,0}$	气举阀关闭时地面套管压力	$q_l$	入井液体流量
$P_n$	标准状态下的压力	$q_o$	出井流量
$P_n$	节点处压力	$q_o$	油流量
$P_{p,g}$	假临界压力	$q_{ow}$	油水混合物流量
$P_t$	瞬时 $t$ 时的压力	$q_t$	以柱塞冲程计算的抽油泵理论排量
$P_v$	罐中蒸气压力	$q_{t,o,t}$	总体积产率
$P_{wt}$	井底流压	$q'_t$	以光杆冲程计算的抽油泵理论排量
$P_{w,i}$	注入气流经第 $i$ 个气举阀时的井底流压	$q_w$	水流量
$P_{w,s}$	井底静压	$q_m$	质量流量, $kg/s$
$P_c$	套管压力	$q_{g,m}$	气体的质量流量
$P_{c,0}$	井生产时的井口套管压力	$q_{k,m}$	混合物的质量流量
$P_{c,z}$	关井时井口套管压力	$q_{o,m}$	油的质量流量
$P_{c,L}$	油管鞋处套管压力	$q_{o,c}$	间歇气举每个循环产生的油, $m^3/cycle$
$P_{c,i}$	在第 $i$ 个气举阀处的套管压力	$\Delta q$	排量校正值, $m^3/s$
$P_{c,o,i}$	在第 $i$ 个气举阀处, 当阀开启时的套管压力	$r$	半径
$P_T$	油管压力	$r_e$	井的影响半径
$P_{T,0}$	井生产时的井口油管压力	$r_i$	管子内半径
$P_{T,z}$	关井时井口油管压力	$r_w$	井的半径
$P_{T,L}$	油管柱底部的油管压力	$s$	管子壁厚, m
$P_{T,i}$	在第 $i$ 个气举阀处的油管压力	$s$	光杆冲程, m
$P_{T,o,i}$	在第 $i$ 个气举阀处, 当阀开启时的油管压力		

$s_p$  抽油泵柱塞冲程, m  
 $s_v$  阀行程, m  
 $\Delta_s$  抽油泵柱塞冲程和光杆冲程之差, m  
 $t$  时间、延续时间, 周期, s  
 $t_c$  生产循环的周期  
 $t_p$  温度波周期  
 $u$  流速, m/s  
 $v$  流速, m/s  
 $v_g$  气体流速  
 $v_{gs}$  气体滑脱速度  
 $v_k$  混合物流速  
 $v_l$  液体流速  
 $v_o$  油的流速  
 $v_{ow}$  油水混合物流速  
 $v_{tot}$  总流速  
 $v_w$  水的流速  
 $v_s$  声速, m/s  
 $v_{mg}$  气体的质量速度, kg/(m<sup>2</sup>s)  
 $v_{ml}$  液体的质量速度, kg/(m<sup>2</sup>s)  
 $w$  完井系数  
 $x_i$  液体第  $i$  种组分的摩尔分数  
 $x_j$  测量值  
 $x_{ib}$  测量基值  
 $\Delta x_i$  校正值  
 $y_j$  气体第  $i$  种组分的摩尔分数  
 $z$  压缩系数  
 $z_o$  标准温度下的压缩系数  
 $z_i$  在温度  $T_i$  下的压缩系数  
 $z$  液-气混合物中的摩尔分数  
 $z_i$  液-气混合物第  $i$  种组分的摩尔分数  
 $z_L$  液-气混合物液相中的摩尔分数  
 $z_V$  液-气混合物气相中的摩尔分数  
 $z_h$  形成水化物的组分中的摩尔分数  
 $z$  位置头, m  
 $z_{gc}$  变形临界长度, m  
 $A$  横截面积, m<sup>2</sup>  
 $A_a$  气锚的横截面积  
 $A_{cb}$  气举阀节流嘴横截面积  
 $A_{chp}$  控制阀截面的节流嘴横截面积  
 $A_i$  管道的内横截面积  
 $A_k$  抽油泵柱塞横截面积  
 $A_n$  抽油杆横截面积

$A_{r1}$  空心抽油杆内横截面积  
 $A_s$  油管壁横截面积  
 $A_v$  气举阀侧孔横截面积  
 $A_{wk}$  汇集室横截面积  
 $A_T$  油管内横截面积  
 $A_{TC}$  环形空间横截面积  
 $A$  折旧费, 福林/年  
 $B$  等温声速, m/s  
 $B$  费用, 福林/年  
 $B$  体积系数, m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>  
 $B_d$  井底泵排出井液的体积系数  
 $B_i$  井底泵吸入井液的体积系数  
 $B_o$  油的体积系数  
 $B_t$  混合相的体积系数  
 $C$  气井产率公式的系数,  

$$\frac{m^{(3+n)} s^{(2n-1)}}{kg^n}$$
  
 $C$  传热修正系数  
 $D$  剪切速率, 1/s  
 $E$  弹性模量, N/m<sup>2</sup>  
 $E_g$  胶凝原油的弹性模量  
 $E_r$  抽油杆的弹性模量  
 $E_T$  油管的弹性模量  
 $F$  力、载荷、重量, N  
 $F_{fa}$  摩擦力  
 $F_h$  作用在抽油杆上的浮力  
 $F_I$  以柱塞全横截面积计算的作用在抽油泵上的液体载荷  
 $F_i$  以减去  $A_r$  的柱塞全横截面积计算的作用在抽油泵上的液体载荷  
 $F_m$  磁的吸力  
 $F_{op}$  开启气举阀所需的力  
 $F_{max}$  最大光杆载荷  
 $F_g$  抽油杆在空气中的重量  
 $F_s$  弹簧力  
 $F_s$  抽油杆静载荷  
 $F_{s,d}$  下冲程时抽油杆静载荷  
 $F_{s,u}$  上冲程时抽油杆静载荷  
 $\Delta F_p$  有杆泵抽油时的可变流体载荷  
 $G$  柱的单位重量, N/m  
 $G_1$  柱塞上部液柱的单位重量  
 $G_{11}$  油管内液柱的单位重量  
 $G_n$  抽油杆柱在空气中的单位重量

$G^*$	抽油杆柱浸没在液体中的单位重量	$N_{Repp}$	假塑性流动的雷诺数
$G_T$	油管的单位重量	$N_{Reppc}$	假塑性流动的临界雷诺数
H	泵的压头, m	$N_w$	Weber 数
H	焓, J	$N_\mu$	粘度数
J	油井采油指数,	$N_\rho$	密度数
	$\frac{(3+n) \rho^{2n-1}}{m \text{ kg}^n}$	P	功率, W
K	Coberly 系数	$P_h$	有功功率
K	总输送费用, Ft/a	Q	热量, J
$K_1$	液-气系统中的平衡比	Q	相变热量, J/kg
$K_{hi}$	形成水化物的平衡比	R	通用摩尔气体常数, J/(kmolK)
L	长度、深度, m	R	体积比, $m^3/m^3$
$L_d$	动液面	$R_{eff}$	有效油气比
$L_i$	第 i 个气举阀的深度	$R_{go}$	油气比
$L_s$	静液面	$R_{gi}$	注入油气比
$L_w$	井深	$R_p$	生产油气比
$L_T$	油管柱长度	$R_g$	比产气量
$\Delta L$	抽油杆柱伸长量, m	$R_s$	溶解油气比
$\Delta L_{ed}$	动载下的抽油杆柱伸长量	$R_w$	水液比
$\Delta L_{ep}$	静载下的抽油杆柱伸长量	$R_{wo}$	油水比
$\Delta L_{T_v}$	油管柱的可变伸长量, m	$R_p$	压力比, $Nm^{-2}/(Nm^{-2})$
M	扭矩, Nm	$R_A$	油管与环形空间截面积比, $m^2/m^2$
M	摩尔质量, kg/kmo	S	无因次滑脱速度
$M_g$	气体的摩尔质量	S	(符号), 流动方向指示符
$M_i$	多相质量系数, $kg/m^3$	$S_c$	砂质土壤中的干土百分比, kg/kg
N	无因次数	$S_w$	砂质土壤中的含水百分比, kg/kg
$N_d$	管子直径数	T	温度, K, °C
$N_{lv}$	液体速度数	$T_b$	未受扰动的地层温度
$N_p$	压力数	$T_c$	临界温度
$N_q$	流量数	$T_i$	第 i 个气举阀的温度
$N_t$	时间数	$T_i$	$T_i$ 管子内表面温度
$N_{Fo}$	傅立叶数	$T_{ia}$	保温层外表面温度
$N_{Gr}$	Grashof 数	$T_l$	流体温度(轴向)
$N_{Hd}$	Hedström 数	$T_{ik}$	校正油温
$N_{Nu}$	Nusselt 数	$T_g$	气体温度
$N_{Pr}$	Prandtl 数	$T_s$	标准状态温度
$N_{Re}$	雷诺数	$T_o$	管子外表面温度
$N_{Re,l}$	液体中的雷诺数	$T_{pe}$	假临界温度
$N_{Re,g}$	气体中的雷诺数	$T_r$	油温
$N_{Re,c}$	临界雷诺数	$T_c$	套管环形空间内的温度
$N_{Re,ow}$	水中油流的雷诺数	$T_{co}$	井口套管环形空间内的温度
$N_{Re,s}$	塑性流动的雷诺数	$T_T$	油管温度
		$T_{TC}$	井口油管温度

$T_{TL}$	油管柱底部温度	$\eta_{vb}$	油管柱的容积效率
$T'$	不稳定热流内的温度	$\eta_{v'}$	以光杆冲程体积计算的有杆泵抽油的容积效率
$T_{p,r}$	假对比温度	$\eta_w$	不产气油井的生产效率
$T_r$	对比温度	$k$	比热比
$\Delta T_a$	温度波幅, K	$k$	加热系数
$\Delta T_b$	距井底高度 $h$ 处的温差, K	$k$	石蜡的融化热, J/kg
$V$	体积, $m^3$	$\lambda$	管子的摩擦系数
$V_{gc}$	每次循环所需的注入气体积	$\lambda_{sm}$	光滑管中的流动摩擦系数
$V_{10}$	从罐中蒸发的体积	$\lambda_{ow}$	水包油乳化液的流动摩擦系数
$V_n$	标准状态下的体积	$\lambda$	热传导系数, $W/(mK)$
$V_o$	油的体积	$\lambda_b$	岩石的热传导系数
$V$	比容, $m^3/kg$	$\lambda_{in}$	保温层的热传导系数
$V_k$	混合物的比容	$\lambda_l$	液体的热传导系数
$V_{m01}$	摩尔体积, $m^3/kmo$	$\lambda_s$	土壤的热传导系数
$W$	功、能, J	$\lambda_{td}$	干土的热传导系数
$W'$	比能, $J/N$	$\lambda_{sw}$	湿土的热传导系数
$\alpha$	倾角, rad	$\mu$	流出系数
$\alpha$	通过量系数	$\mu$	动力粘度, $NS/m^2$
$\alpha_T$	油密度的温度系数, $kg/(m^3 K)$	$\mu_a$	视粘度
$\alpha_p$	油密度的压力系数, $s^2/m^2$	$\mu_g$	气体的粘度
$\alpha_1$	内部对流系数, $W/(m^2 K)$	$\mu_a$	气体在大气压下的粘度
$\alpha_2$	外部传热系数, $W/(m^2 K)$	$\mu_p$	气体在压力 $P$ 下的粘度
$\alpha_g$	相对密度的温度系数, $1/K$	$\mu_i$	油在管壁温度下的粘度
$\beta$	扩散系数	$\mu_l$	液体的粘度
$\beta_p$	气体溶解度的压力系数, $1/N$	$\mu_{ow}$	水包油乳化液的粘度
$\beta_o$	油的体积压缩系数, $1/N$	$\mu_w$	水的粘度
$\beta_T$	油的体积热膨胀系数, $1/K$	$\mu_d$	焦耳-汤姆逊系数, $Km^2/N$
$\gamma$	比重, $N/m^3$	$\mu_{dL}$	液体中的焦耳-汤姆逊系数
$\gamma_g$	气体的比重	$\mu_{dv}$	气体中的焦耳-汤姆逊系数
$\gamma_k$	混合物的比重	$\nu$	运动粘度, $m^2/s$
$\gamma_l$	液体的比重	$\nu_o$	油在 $0^\circ C$ 时的运动粘度
$\gamma_o$	油的比重	$\xi$	流动阻力系数
$\gamma_r$	抽油杆的比重	$\xi$	流体柱压力梯度, $m/m$
$\gamma_w$	水的比重	$\xi$	流体柱的加速度梯度
$\delta$	有杆泵抽油的动力系数	$\xi_m$	流体柱的质量梯度
$\epsilon_g$	气相的截面百分比	$\xi$	流体柱的摩擦梯度
$\epsilon_{gc}$	胶凝原油的相对临界变形量	$\rho$	密度, $kg/m^3$
$\epsilon_l$	液相的截面百分比	$\rho_g$	气体的密度
$\epsilon_p$	游离石蜡的比重, $kg/(kgK)$	$\rho_{gn}$	标准状态下的气体密度
$\epsilon_w$	水相的截面百分比	$\rho_k$	混合物的密度
$\eta$	效率	$\rho_l$	液体的密度
$\eta_v$	有杆泵抽油的容积效率	$\rho_o$	油的密度
$\eta_{va}$	泵筒的灌注容积效率		

$\rho_{0n}$	标准状态下油的密度	$\sigma_w$	水的表面张力
$\rho_{0T}$	温度 T 时油的密度	$\sigma_{ow}$	界面张力, N/m
$\rho_s$	土壤密度	$\sigma_b$	地温梯度, K/m
$\rho_{sd}$	干土的密度	$\tau$	剪应力, N/m <sup>2</sup>
$\rho_{sw}$	湿土的密度	$\tau_e$	静剪应力 (屈服应力)
$\rho_{st}$	钢的密度	$\tau_{e'}$	视屈服应力
$\rho_w$	水的密度	$\tau_i$	紧靠管壁的屈服应力
$\rho_r$	比重	$\Gamma$	液体分布系数
$\rho_{gr}$	气体的比重	$\Phi$	孔隙度
$\rho_j^i$	温度 j 时油的比重与温度 i 时 水的比重之比	$\Phi$	热流动, W
$\sigma$	正应力, N/m <sup>2</sup>	$\Phi^*$	比热流, W/m
$\sigma_t$	切向应力	$\omega$	角速度, 频率, 1/s
$\sigma_{max}$	最大拉应力	本书常用部分单位代表符号	
$\sigma_F$	屈服强度 (固体的)	a	年
$\sigma_B$	抗拉强度	bar	巴, 1bar=0.1MPa=10 <sup>5</sup> Pa
$\sigma$	表面张力, N/m	ft	英尺, 1ft=30.48cm
$\sigma_l$	液体的表面张力	Ft	福林, 匈牙利货币单位
$\sigma_o$	油的表面张力	in.	英寸, 1in.=25.4mm
		Psia	磅/英寸 <sup>2</sup> 绝对压力



# 目 录

序言 .....	( I )
符号表 .....	( II )
<b>第一章 流体力学有关内容节选</b> .....	( 1 )
1.1 管内流体流动的基本知识 .....	( 1 )
1.2 气体在管中的流动 .....	( 4 )
1.2.1 基本概念 .....	( 4 )
1.2.2 低压管中气体流动的压力降 .....	( 9 )
1.2.3 高压管中气体流动的压力降 .....	( 10 )
1.2.4 输气管道中的平均压力 .....	( 11 )
1.3 管道中的非牛顿流体的流动 .....	( 11 )
1.3.1 流体的流变学分类 .....	( 11 )
1.3.2 管子中的速度分布 .....	( 14 )
1.3.3 通用雷诺数 .....	( 16 )
1.3.4 从层流到紊流的过渡 .....	( 17 )
1.3.5 摩阻损失的计算 .....	( 18 )
1.4 液体和气体的多相流动 .....	( 22 )
1.4.1 水平管道中的流动 .....	( 22 )
1.4.2 在起伏地形铺设的管道中的流动 .....	( 26 )
1.4.3 在垂直管柱中的流动 .....	( 28 )
1.5 可压缩介质经油嘴的流动 .....	( 64 )
1.5.1 气体的流动 .....	( 64 )
1.5.2 气体和液体的两相流动 .....	( 66 )
<b>第二章 采油-(1)</b> .....	( 69 )
2.1 试井：入井液流动态曲线 .....	( 69 )
2.2 不产气的自喷油井 .....	( 72 )
2.3 产气的自喷油井 .....	( 80 )
2.3.1 井与地层的相互作用 .....	( 80 )
2.3.2 各项生产参数随时间的变化情况 .....	( 84 )
2.3.3 自喷井参数的优化设计 .....	( 86 )
2.3.4 完井 .....	( 91 )
2.3.5 一口井的生产 .....	( 103 )
2.4 气举 .....	( 111 )
2.4.1 连续气举 .....	( 111 )
2.4.2 间歇气举 .....	( 127 )

2.4.3	气举阀	(140)
2.4.4	气举装置的类型	(150)
2.4.5	气的注入	(154)
2.4.6	柱塞举升	(158)
<b>第三章</b>	<b>采气</b>	<b>(163)</b>
3.1	试井, 入井气流动态曲线	(163)
3.1.1	稳定试井	(166)
3.1.2	等时试井	(166)
3.1.3	将稳定试井所导出的动态公式转变为等时试井动态公式	(168)
3.2	完井; 油管尺寸的确定	(170)
3.3	气井的腐蚀; 水化物的形成	(172)
<b>第四章</b>	<b>采油-(2)</b>	<b>(175)</b>
4.1	泵法采油	(175)
4.1.1	游梁式抽油机-抽油泵装置	(175)
4.1.2	长冲程抽油泵	(238)
4.1.3	多层完井的分层有杆泵抽油	(241)
4.1.4	无杆泵抽油	(247)
<b>第五章</b>	<b>最经济的生产方法的选择</b>	<b>(263)</b>
<b>第六章</b>	<b>石油与天然气的收集和分离</b>	<b>(267)</b>
6.1	管子	(267)
6.1.1	钢管	(267)
6.1.2	铝管	(272)
6.1.3	塑料管; 塑料衬里钢管	(273)
6.1.4	管子的壁厚	(277)
6.2	阀; 压力调节器	(278)
6.2.1	阀	(278)
6.2.2	压力调节器	(286)
6.3	管道内部的维护	(290)
6.4	油气分离	(293)
6.4.1	平衡计算	(293)
6.4.2	影响分离回收的因素	(301)
6.4.3	分离器的基本类型	(307)
6.4.4	分离器的选择	(310)
6.4.5	特殊的分离器	(313)
6.4.6	低温分离	(320)
6.5	矿场原油储存	(322)
6.5.1	储存损耗	(322)
6.5.2	储油罐	(325)
6.5.3	油罐计量	(330)

6.6 油气的收集和分离系统.....	( 332 )
6.6.1 对设计带有测试中心的集油系统的一些看法.....	( 332 )
6.6.2 手工操作的计量站.....	( 334 )
6.6.3 自动化系统.....	( 336 )
<b>第七章 原油的管道输送</b> .....	( 349 )
7.1 牛顿原油的等温流动.....	( 349 )
7.1.1 管道的压力分布和最大容量.....	( 349 )
7.1.2 提高管道通过能力的途径.....	( 352 )
7.1.3 分支管路的输送能力.....	( 354 )
7.1.4 管道的最佳线路和尺寸.....	( 356 )
7.2 非等温流动.....	( 359 )
7.2.1 土壤的热性能.....	( 359 )
7.2.2 油品在埋地管道中稳定流状态下的温度.....	( 362 )
7.2.3 传热系数.....	( 364 )
7.2.4 牛顿油在稳定状态流动时的压头损失计算.....	( 371 )
7.2.5 在埋地管道中不稳定流动的油温.....	( 376 )
7.2.6 牛顿原油的启动压力及其换算.....	( 381 )
7.2.7 假塑性原油的启动压力和流动.....	( 383 )
7.2.8 输送热油的管道.....	( 386 )
7.3 改善流动特性的措施.....	( 390 )
7.3.1 热处理.....	( 390 )
7.3.2 溶剂添加剂.....	( 393 )
7.3.3 化学处理.....	( 395 )
7.3.4 伴水输油.....	( 397 )
<b>第八章 天然气的管道输送</b> .....	( 400 )
8.1 天然气的物理和物理-化学性质 .....	( 400 )
8.1.1 状态方程、压缩性、密度、重度.....	( 400 )
8.1.2 粘度.....	( 404 )
8.1.3 比热、摩尔热、气体绝热指数、焦耳-汤姆逊效应 .....	( 405 )
8.1.4 碳氢化合物的水化物.....	( 408 )
8.2 流动天然气的温度.....	( 411 )
8.3 管道系统中的稳定流动.....	( 413 )
8.3.1 设计基础.....	( 413 )
8.3.2 无环系统.....	( 415 )
8.3.3 环状系统.....	( 419 )
8.4 管道系统中的不稳定流动.....	( 427 )
8.4.1 基本关系式.....	( 427 )
8.4.2 管道中的流动.....	( 428 )
8.4.3 管道系统中的流动.....	( 433 )

8.5 用计算机模拟天然气输送系统.....	( 436 )
8.5.1 数字计算机的应用.....	( 436 )
8.5.2 模拟计算机的应用.....	( 442 )
8.6 天然气管道输送的经济问题.....	( 444 )
附录 不同 $d$ 和 $q_0$ 值的 Gilbert 梯度曲线 .....	( 447 )
参考文献.....	( 450 )

# 第一章 流体力学有关内容节选

## 1.1 管内流体流动的基本知识

不可压缩液体在水平管中流动，因摩擦而造成的压力降由下式给出：

$$p_f = \lambda \frac{v^2 l \rho}{2d_i} \quad 1.1-1$$

式中  $v = G/A$ 。如果雷诺数

$$N_{Re} = \frac{vd_i}{\nu} \quad 1.1-2$$

小于 2000~2300 这个范围，则流动为层流。根据 Hagen 和 Poiseuille 的理论，其摩擦系数  $\lambda$  为：

$$\lambda = \frac{64}{N_{Re}} \quad 1.1-3$$

对于光滑管中的紊流， $N_{Re} < 10^5$  时，Blasius 公式给出一个相当好的近似值：

$$\lambda = \frac{0.316}{4 \sqrt{N_{Re}}} \quad 1.1-4$$

对于光滑管中的紊流， $N_{Re} > 10^5$  时，Nikuradse 公式成立：

$$\lambda = 0.0032 + 0.221 N_{Re}^{-0.237} \quad 1.1-5$$

Prandtl-Kármán 公式

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2.5 \lg \frac{N_{Re} \sqrt{\lambda}}{2.51} \quad 1.1-6$$

对于整个紊流区都适用，但它的隐含形式给运算带来一些困难。在粗糙管中，对于由公式 1.1-6 所确定的曲线和所谓的边界曲线(参看公式 1.1-12)之间的过渡区域，Colebrook 公式给出：

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left\{ \frac{2.51}{N_{Re} \sqrt{\lambda}} + \frac{k}{3.71 d_i} \right\} \quad 1.1-7$$

对于粗糙管边界曲线以外的区域，Prandtl 和 Kármán 给出如下关系式：

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \lg \frac{3.71 d_i}{k} \quad 1.1-8$$

虽然公式 1.1-7 和 1.1-8 在实用上能给出足够精确的结果，但为了避免计算麻烦的

隐式方程，常常采用其它公式来计算粗糙管中紊流的压力降。也可由以下的分析导出显式方程。

如果引入相对粗糙度的概念，那么我们就可以用一个公式来表示  $\lambda$  与  $N_{Re}$  的关系，该公式与公式 1.1-6 仅在常数上有所不同。例如，Drew 和 Genereaux 公式即属这一类 (Gyulay 1942 年的资料)：

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1.6 \lg \frac{N_{Re} \sqrt{\lambda}}{0.762} \quad 1.1-9$$

这个函数的图形中的每一小段可用幂函数良好地近似表示

$$\lambda = a N_{Re}^{-b} \quad 1.1-10$$

式中  $a$  和  $b$  为表征相对粗糙度和  $N_{Re}$  范围的真实值的常数。公式 1.1-10 的缺点是，当  $N_{Re}$  的范围仅仅超过真实值两个数量级时，其精确度就不能令人满意了。有一个稍微复杂一些的 Supino 公式，能在较宽的  $N_{Re}$  范围内给出足够精确的结果：

$$\lambda = \lambda_{sm} + 0.17 N_{Re} \lambda_{sm}^2 \frac{k}{d_i} \quad 1.1-11$$

式中  $\lambda_{sm}$  是用公式 1.1-4 或 1.1-5 算出的光滑管的摩擦系数。公式 1.1-3 和 1.1-6 至 1.1-8 的图形以 Moody 图的形式示于图 1.1-1 中，图中的以虚线表示的曲线是边界曲线，它将过渡区与完全紊流区分开。在过渡区， $\lambda$  既取决于相对粗糙度  $k/d_i$ ，也取决于  $N_{Re}$ ；而在完全紊流区， $\lambda$  仅是  $k/d_i$  的函数。边界曲线的方程为：

$$N_{Re} \sqrt{\lambda} \frac{k}{d_i} = 200 \quad 1.1-12$$

例 1.1-1 油在水平管道中流动，管道长度  $l=25$  km， $d_i=0.3$  m， $q=270$  m<sup>3</sup>/h，在

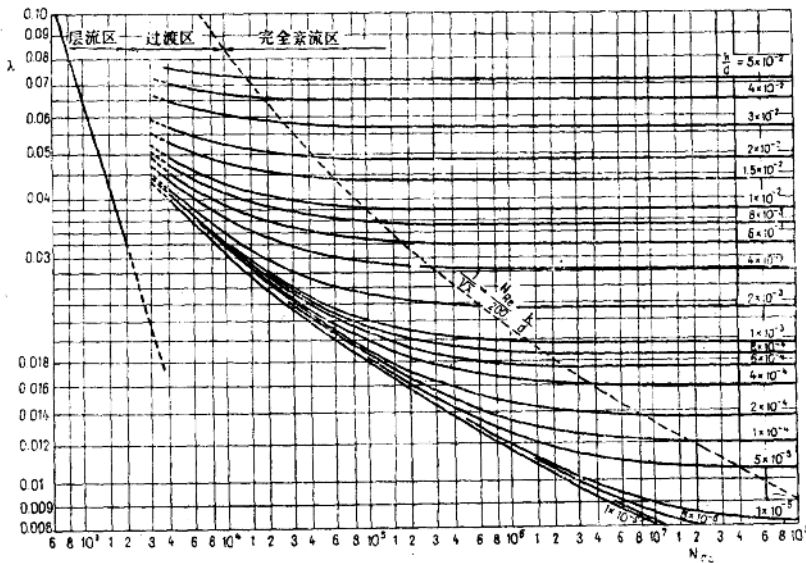


图 1.1-1 管子中的摩擦系数，引自 Moody 的资料

流体温度和压力下  $\nu = 2.5 \text{cSt}$ ,  $\rho = 850 \text{kg/m}^3$ 。管子为无缝管, 其  $k/d_i = 0.00017$ 。求摩擦压力降。

解: 将上述数据转换成国际单位制, 得  $l = 25000 \text{ m}$ ,  $d_i = 0.3 \text{ m}$ ,  $q = 0.075 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $\nu = 2.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $\rho = 850 \text{ kg/m}^3$ ,  $k/d_i = 0.00017$ 。流速为

$$v = \frac{q}{\frac{d_i^2 \pi}{4}} = \frac{0.075}{0.7854 \times 0.3^2} = 1.06 \text{ m/s}$$

且

$$N_{Re} = \frac{1.06 \times 0.3}{2.5 \times 10^{-6}} = 1.27 \times 10^5$$

因为  $1.27 \times 10^5$  大于临界雷诺数(2300), 所以流动是紊流。Moody 图(图 1.1-1)表明, 当  $k/d_i = 0.00017$  时, 流动在过渡区, 在该区公式 1.1-7 成立。我们便可直接由图上读出要求的  $\lambda = 0.018$ 。如果需要更精确的值(不过, 由于难以精确确定相对粗糙度, 这样做一般是没有必要的), 那末可将这样读出的  $\lambda$  值代入公式 1.1-7 的右侧, 并利用该式求出  $\lambda$  的精确值。这个方法不受读数误差的很大影响。在本例中,

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left[ \frac{2.51}{1.27 \times 10^5 \sqrt{0.018}} + \frac{0.00017}{3.71} \right] = 7.428$$

于是

$$\lambda = 0.0181$$

利用由公式 1.1-5 求得的  $\lambda_{,m}$ , 也可以从公式 1.1-11 算出摩擦系数

$$\lambda_{,m} = 0.0032 + 0.221 (1.27 \times 10^5)^{-0.2337} = 0.0168$$

$$\lambda = 0.0168 + 0.17 \times 1.27 \times 10^5 \times 0.0168^2 \times 0.00017 = 0.0178$$

进一步计算时, 以  $\lambda = 0.018$  代入, 由公式 1.1-1 求出流动压力降为

$$p_f = 0.018 \times \frac{1.06^2 \times 25000 \times 850}{2 \times 0.300} = 0.72 \text{ MN/m}^2 = 7.2 \text{ bar}$$

在环形空间中的流动压力降可如下确定: 在公式 1.1-1 中, 以当量管径  $d_e$  代替  $d_i$ , 一般地

$$d_e = 4 \times \frac{\text{沾湿的横截面}}{\text{沾湿的周长}}$$

对于环形空间, 则有

$$d_e = 4 \times \frac{\frac{d_1^2 \pi}{4} - \frac{d_2^2 \pi}{4}}{d_1 \pi + d_2 \pi} = d_1 - d_2 \quad 1.1-13$$

式中  $d_1$  是外管的内径,  $d_2$  为内管的外径。公式 1.1-1 便修正为

$$p_f = \lambda \frac{v^2 l \rho}{2(d_1 - d_2)} \quad 1.1-14$$

对于层流, 摩擦系数由下式足够精确地给出

$$\lambda = \frac{64}{N_{Re}} \phi \left[ \frac{d_1}{d_2} \right] \quad 1.1-15$$

(Knudsen 和 Katz 1958 年的资料) 式中

$$\phi \left[ \frac{d_1}{d_2} \right] = \frac{(1-d_1/d_2)^2}{1 + (d_1/d_2)^2 + \frac{1-(d_1/d_2)^2}{\ln d_1/d_2}}$$

对于紊流, 除非管壁可认为是水力学上光滑的, 否则还无法求出令人满意的结果。如果管壁可认为是水力学上光滑的, 那末根据 Knudsen 和 Katz 1958 年的资料,

$$\lambda = 0.304 N_{Re}^{-0.25} \quad 1.1-16$$

$N_{Re}$  用水力学直径  $(d_1-d_2)$  进行计算。层流和紊流之间的界限约为  $N_{Re}=2000$ 。不过根据 Prengle 和 Rothfus 的观点, 紊流将在最大速度点开始逐渐发展 (Knudsen 和 Katz 1958 年的资料)。对于相应于最大速度的  $N_{Re}'$ , 由这些人推导出的关系式为

$$N_{Re}' = \frac{d'v}{\nu} \quad 1.1-17$$

式中

$$d' = \frac{2}{r^2} \left[ r_2^2 - \frac{r_2^2 - r_1^2}{2 \ln \frac{r_2}{r_1}} \right]$$

甚至当  $N_{Re}'=700$  时, 实际的摩擦系数也与由公式 1.1-15 算出的值有出入。完全紊流在  $N_{Re}'=2200$  时形成。

内管往往向外管不同心, 根据 Deyssler 和 Taylor 的论述, 摩擦系数随偏心度的增大而减小 (Knudsen 1958 年的资料)。让我们把偏心度定义为两管中心距与两管半径差之比:

$$e = \frac{s}{r_1 - r_2}$$

摩擦系数的减小可能很显著。例如, 当  $r_2/r_1=3.5$  且  $N_{Re}=10^5$ ,  $e=0$  时  $\lambda=0.019$ , 而  $e=1$  时  $\lambda=0.014$ 。

## 1.2 气体在管中的流动

### 1.2.1 基本概念

在管中流动的气体, 由于其温度和压力沿管长变化, 其流速和密度也会有显著的变化。这样, 只有当长度无限小的一段管子  $dl$  两端的压力差为  $dp$  时, 适用于稳态流动的能量方程对于这段管子才能成立。于是有

$$-\frac{dp}{\rho} + vdv + gdh + \lambda \frac{v^2 dl}{2d_i} = 0 \quad 1.2-1$$

设管子与水平面成  $\alpha$  角, 于是  $dh = \sin \alpha dl$ , 通用气体定律给出



$$\rho = \frac{Mp}{RTz}$$

及

$$v = \frac{p_n}{T_n \pi/4} - \frac{q_n T_2}{d_i^2 p}$$

一般情况下，消耗于加速气体的能量是比较少的，所以从实用的角度出发，通常假设  $v dv = 0$ ，将以上  $\lambda$  和  $v$  的表达式代入方程 1.2-1 并加以整理，得

$$\frac{R}{M} \frac{Tz}{p} dp + \sin \alpha g dl + \left( \frac{p_n}{T_n \pi/4} \right)^2 \frac{q_n^2}{2d_i^5} - \frac{\lambda T^2 z^2}{p^2} dl = 0 \quad 1.2-2$$

这个方程有多解。在大多数情况下假设流动是等温的，即平均温度不变， $T = \bar{T}$ 。根据描述变量  $z$  和  $\lambda$  与  $p$  和  $T$  的关系的函数式之不同，该方程的解也不同。实际上，在大多数描述稳态流动的公式中，除了假定  $T = \bar{T}$  外，还假定  $z = \bar{z}$  以及  $\lambda = \bar{\lambda}$ ，即这些值沿整个管长均不变。作了这些假定以后，再加上边界条件

$$p = p_1 \quad (l=0 \text{ 时}) \quad \text{及} \quad \sin \alpha = \frac{h}{l} = \text{常数}$$

便可得到方程 1.2-1 的下列解：

$$p_1^2 = p_2^2 e^{\frac{2g h M}{R \bar{T} z}} + \left[ \frac{p_n}{T_n \pi/4} \right]^2 \frac{l}{2gh} \frac{\bar{\lambda} (\bar{q}_n \bar{T} \bar{z})^2}{d_i^5} \left[ e^{\frac{2g h M}{R \bar{T} z}} - 1 \right]$$

$R$  为 8315.1，取  $g=9.8067$ ，便得

$$e^{\frac{2g h M}{R \bar{T} z}} = e^{\frac{0.002259 h M}{\bar{T} z}} = e^m \quad 1.2-3$$

所以

$$p_1^2 = p_2^2 e^m + \left[ \frac{p_n}{T_n \pi/4} \right]^2 \frac{l}{2gh} \frac{\bar{\lambda} (\bar{q}_n \bar{T} \bar{z})^2}{d_i^5} (e^m - 1) \quad 1.2-4$$

$\bar{\lambda}$  可用许多方式表示，用得最广的是 Weymouth 提出的公式：

$$\lambda = \frac{0.009407}{\sqrt[3]{d_i}} \quad 1.2-5$$

在大多数情况下，该式都给出足够精确的结果，将该式代入 1.2-4，得

$$p_1^2 = p_2^2 e^m + 7.775 \times 10^{-4} \frac{l}{h} \left( \frac{p_n}{T_n} \right)^2 \left( \frac{\bar{q}_n \bar{T} \bar{z}}{d_i^{8/3}} \right) (e^m - 1) \quad 1.2-6$$

在平坦地形上铺设的输气管道两端之间的高差可以忽略不计，因此对于水平管道，如果也假设  $T = \bar{T}$ ， $z = \bar{z}$ ，以及当  $l=0$  时  $p = p_1$ ，便可得