PETROLEUM INDUSTRY PRESS

叶昌书 编著

气井分析

石油工业出版社

前　言

我国是世界上天然气勘探、开发、利用最早的国家。近年来陆续在全国很多省份发现了气田,形成了几大气区。天然气已成为我国的重要能源和化工原料。

过去从事天然气开采的技术人员不多,总结这方面的理论和应用的书籍也有限,现场人员实感缺乏参考资料。本书正是根据现场实际需要,结合各类气田气井管理的理论和实践写成的。

本书主要内容是气井管理中所涉及的气井的试井、生产、故障三方面。在气井试井中,全面介绍了气井的两种流态(稳定流、不稳定流)在三种(平面径向流、平面平行流、球向流)模型下的试井理论及分析方法;在气井生产中,说明了两种气井(纯气井、气液同产井)在六种生产工艺制度下的分析方法和对比;在气井故障分析中,以大量的实例描绘了气井故障的发生原因、现象及处理方法。

该书完稿后,承蒙石油大学副校长、博士研究生导师葛家理教授,采油老专家秦同洛教授共同审阅推荐;新疆石油管理局领导和科技处的大力支持;矿场采油专家任德政高级工程师和采油专家陈振生高级工程师的关注,在此向他们表示衷心的感谢。

由于编者的水平有限,缺点和错误在所难免,欢迎读者批评指正。

编著者

1996 年国庆于彩南油田

目　　录

第一章　气井试井分析

第一节　气井试井

每一口新钻的气井，在钻遇的气层或完钻后的气层，要进行测试，了解该井有无具有工业价值的天然气，这叫初试(或叫试气)。在初试中要取得气层最大关井压力、气井产物(气、油、水)和产量数据。根据产量多少，气井可分为干井、微气井、小产量井、中产量井、大气井("气老虎")、特大气井("大气老虎")。通过试气后，要明确气井产什么，有无工业价值，地层能量有多大。

初试很重要，不能马虎、草率，否则会放过气层或把一般气井误认为是大气井或特大气井，特别是在一个新构造(探区)初试，更要慎重。

一口新井投产之初还要进行一次正规测试，全面获取各项资料数据，为确定气井工艺制度，编写试采设计等提供依据，这叫试采测试。在试采测试中，常采用稳定试井法录取资料，求出产量与压力的稳定关系。在此测试中要求资料全、准、可靠，它是今后定产、配产、作试采设计的依据。

气井正式生产后，每隔一段时间(半年至二年)进行一次试井，叫系统试井。在系统试井中要全面、准确地录取各项资料，以便修改气井工艺制度，编制和修改气田开发设计。

气井在某个时间，为了某一项特殊目的而进行的试井，叫特殊试井。如测气井的凝析油含量，找气水同产井出水工作点等。

上面提到的几种试井，是按工作需要而分的，但归纳起来只有两类：一类是测取压力 p、产量 q 的相互关系，而与测试时间无关的试井叫稳定试井。稳定试井常用回压法录取资料，又叫回压法试井。另一类是测取压力 $p(t)$、产量 $q(t)$两者与时间(t)的相互

关系，叫不稳定试井。不稳定试井是目前发展的方向，常用压力恢复(或降落)曲线法和等时距法获取资料。无论用什么方法试井，都是把实测的资料数据，经过计算和整理后，列成表，画成图，进行分析比较，找出气井的产量与压力之间的关系。

第二节　稳定试井分析

天然气在气层中渗流，由于产量大，一般为非线性渗流，因此只推导非线性稳定流态的三种公式，作为稳定试井的理论基础。

一、稳定试井理论

(一)非线性平面单向流

1. 二项式公式

天然气在气层中作非线性流时的二项式阻力定律可写成

$$-\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}x}=\frac{\mu}{K}V+\bar{\alpha}_2\gamma V^2 \qquad (1—1)$$

式中 $\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}x}$——单位长度上的压力降，MPa/m；

V——天然气在气层中的渗流速度，m/s；

μ——天然气动力粘度，mPa·s；

K——气层渗透率，m^2；

γ——天然气的重度，N/m^3

$-$——负号表示流速方向与压力降方向相反；

$\bar{\alpha}_2$——影响惯性阻力的孔隙结构几何特征参数，m^{-1}。

当气井以定产量 Q 生产时，重量流量不变，有重量渗流速度

$$V=\frac{G}{\gamma A}=\frac{\gamma_a Q}{\gamma bh} \qquad (1—2)$$

式中 Q——折算到标准状态(0.1MPa，20℃)下气井产量，m^3/s；

b——天然气产出道宽度，m；

h——天然气产出道高度，m；

γ、γ_a——天然气在地层和标准条件下的重度，N/m^3。

把(1—2)式代入(1—1)式得

$$-\gamma \mathrm{d}p = \left(\frac{\mu}{K} \cdot \frac{\gamma_a Q}{bh} + \overline{\alpha}_2 \cdot \frac{\gamma_a^2 Q^2}{b^2 h^2}\right)\mathrm{d}x$$

由$\frac{p}{\gamma \overline{Z} T_f} = R$ 知

$$\gamma = \frac{\gamma_a T_a p}{p_a \overline{Z} T_f} \tag{1—3}$$

式中　γ_a、T_a、p_a——标准状态下天然气的重度、温度、压力；

γ、T_f、p——地层条件下天然气的重度、温度、压力；

$\overline{Z}$——天然气平均压缩系数。

如图 1-1，边界条件为

$x=0$ 时，$p=p_{wf}$；

$x=L$ 时，$p=p_R$。

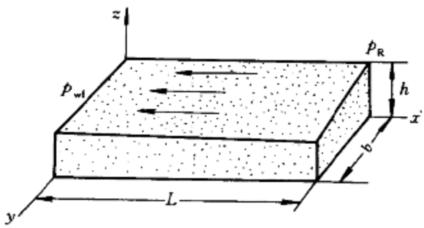

图 1-1　单向渗流模型

把(1—3)式代入(1—1)式进行积分

$$\frac{\gamma_a T_a}{p_a \overline{Z}\, T_f}\int_{p_{wf}}^{p_R} p\,\mathrm{d}p = \left(\frac{\mu}{K} \cdot \frac{\gamma_a Q}{bh} + \frac{\overline{\alpha}_2 \gamma_a^2 Q^2}{b^2 h^2}\right)\int_0^L \mathrm{d}x$$

$$p_R^2 - p_{wf}^2 = \frac{2 p_a \overline{Z} T_f}{T_a} \cdot \frac{\mu}{K} \cdot \frac{L}{bh} Q + \frac{2 p_a \overline{Z} T_f}{T_a} \cdot \frac{\overline{\alpha}_2 \gamma_a L}{b^2 h^2} Q^2$$

令

$$A = \frac{2 p_a \overline{Z} T_f}{T_a} \cdot \frac{\mu}{K} \cdot \frac{L}{bh}$$

$$B = \frac{2 p_a \overline{Z} T_f}{T_a} \cdot \frac{\overline{\alpha}_2 \gamma_a L}{b^2 h^2}$$

则 $$p_R^2 - p_{wf}^2 = AQ + BQ^2 \tag{1—4}$$

式中 p_R——气层压力，MPa；

p_{wf}——井底流动压力，MPa；

Q——气井日产气量，万 m^3/d；

A——与岩石渗透率、气体粘度、气层几何及物理参数有关的系数；

B——与天然气的重度、岩石孔隙度、结构、孔道弯曲度有关的系数。

2. 指数式公式

天然气在气层中作非线性渗流的指数阻力定律可写成

$$|\gamma V| = C' \left|\gamma \frac{dp}{dx}\right|^n \tag{1—5}$$

气井以定产量 Q 生产时，重量流量不变，有重量渗流速度

$$V = \frac{G}{\gamma A} = \frac{\gamma_a Q}{\gamma bh}$$

仿二项式的边界条件积分

$$\frac{\gamma_a T_a}{p_a \overline{Z} T_f}\int_{p_{wf}}^{p_R} p\,dp = \left(\frac{\gamma_a Q}{bhC'}\right)^{\frac{1}{n}}\int_0^L dx$$

得

$$\frac{\gamma_a T_a}{2p_a \overline{Z} T_f}(p_R^2 - p_{wf}^2) = \left(\frac{\gamma_a Q}{bhC'}\right)^{\frac{1}{n}} L$$

两端同乘以 n 次方后再整理

$$Q = (bhC') \cdot \left(\frac{T_a}{2p_a \overline{Z} T_f}\right)^n \cdot \gamma_a^{n-1} \frac{1}{L^n}(p_R^2 - p_{wf}^2)^n$$

令 $$C = (bhC') \cdot \left(\frac{T_a}{2p_a \overline{Z} T_f}\right)^n \cdot {\gamma_a}^{n-1} \frac{1}{L^n}$$

则 $$Q = C(p_R^2 - p_{wf}^2)^n \tag{1—6}$$

式中 C——与岩石渗透率、气层厚度、天然气粘度、井底干净程度等有关的系数；

n——决定于天然气渗流方式的指数，$0.5 \leqslant n \leqslant 1$，一般为

0.6～0.8。

(二)非线性平面径向流

1. 二项式公式

气井以定产量 Q 生产时,重量流量不变,有重量渗流速度

$$V = \frac{G}{\gamma A} = \frac{\gamma_a Q}{\gamma \cdot 2\pi h r}$$

代入(1—1)式得

$$-\frac{dp}{dr} = \frac{\mu}{K} \cdot \frac{\gamma_a Q}{\gamma \cdot 2\pi h r} + \overline{\alpha}_2 \gamma \cdot \frac{\gamma_a^2 Q^2}{\gamma^2 \cdot 4\pi^2 h^2 r^2}$$

用压力函数代入,分离变量为 $dP = \gamma dp$ 型得

$$-dP = \frac{\mu}{K} \cdot \frac{\gamma_a Q}{2\pi h} \cdot \frac{dr}{r} + \frac{\overline{\alpha}_2 \gamma_a{}^2 Q^2}{4\pi^2 h^2} \cdot \frac{dr}{r^2}$$

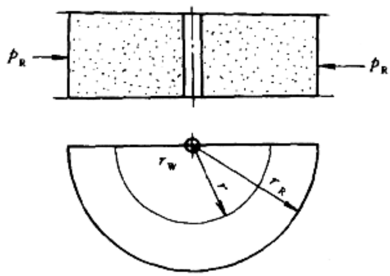

图 1－2　平面径向流模型

如图 1－2 所示,边界条件为

$$r = r_W 时, p = p_{wf};$$

$$r = r_R 时, p = p_R。$$

积分上式

$$\int_{P_{wf}}^{P_R} dP = \frac{\mu}{K} \cdot \frac{\gamma_a Q}{2\pi h} \int_{r_W}^{r_R} \frac{dr}{r} + \frac{\overline{\alpha}_2 \gamma_a^2 Q^2}{4\pi^2 h^2} \int_{r_W}^{r_R} \frac{dr}{r^2}$$

得

$$P_R - P_{wf} = \frac{\mu}{K} \cdot \frac{\gamma_a Q}{2\pi h} \cdot \ln \frac{r_R}{r_W} + \frac{\overline{\alpha}_2 \gamma_a^2}{4\pi^2 h^2}\left(\frac{1}{r_W} - \frac{1}{r_R}\right) Q^2$$

把压力函数换成压力，$P_R^2 - P_{wf}^2 = \frac{\gamma_a T_a}{2\overline{Z} p_a T_f}(p_R^2 - p_{wf}^2)$代入整理得

$$p_R^2 - p_{wf}^2 = \frac{\mu}{\pi K h} \cdot \frac{\overline{Z} p_a T_f}{T_a} \ln \frac{r_R}{r_W} Q + \frac{\overline{\alpha}_2 \gamma_a}{2\pi^2 h^2} \cdot \frac{\overline{Z} p_a T_f}{T_a}\left(\frac{1}{r_W} - \frac{1}{r_R}\right) Q^2$$

令
$$A = \frac{\mu}{\pi K h} \cdot \frac{\overline{Z} p_a T_f}{T_a} \ln \frac{r_R}{r_W}$$

$$B = \frac{\overline{\alpha}_2 \gamma_a}{2\pi^2 h^2} \cdot \frac{\overline{Z} p_a T_f}{T_a}\left(\frac{1}{r_W} - \frac{1}{r_R}\right)$$

则
$$p_R^2 - p_{wf}^2 = AQ + BQ^2 \tag{1—7}$$

式中 p_R、p_{wf}、Q、A、B 均与前面公式意义相同。

2. 指数式公式

与二项式公式相仿，如(1—5)式

$$|\gamma V| = C' \left|\gamma \frac{dp}{dr}\right|^n$$

当引用重量渗流速度时，(1—5)式变成

$$\frac{G}{2\pi h r} = C' \left|\gamma \frac{dp}{dr}\right|^n$$

分离变量用压力函数代入

$$dP = \left(\frac{G}{2\pi h C'}\right)^{\frac{1}{n}} \cdot \frac{dr}{r^{\frac{1}{n}}}$$

用与径向流相同的边界条件代入积分，得

$$P_R - P_{wf} = \left(\frac{G}{2\pi h C'}\right)^{\frac{1}{n}} \left(\frac{n}{1-n}\right)\left(\frac{1}{r_W^{\frac{1-n}{n}}} - \frac{1}{r_R^{\frac{1-n}{n}}}\right)$$

用压力函数和 $G = \gamma_a Q$ 代入，得

$$Q = (2\pi hC')\left(\frac{T_a}{2p_a\overline{Z}T_f}\right)^n \cdot \gamma_a^{\ n-1} \cdot \left(\frac{1-n}{n}\right)^n \left[\frac{1}{\frac{1}{r_W^{\frac{1-n}{n}}} - \frac{1}{r_R^{\frac{1-n}{n}}}}\right]^n$$

$$\cdot (p_R^2 - p_{wf}^2)^n$$

令
$$C = (2\pi hC') \cdot \left(\frac{T_a}{2p_a\overline{Z}T_f}\right)^n \cdot \gamma_a^{\ n-1} \cdot \left(\frac{1-n}{n}\right)^n$$

$$\cdot \left[\frac{1}{\frac{1}{r_W^{\frac{1-n}{n}}} - \frac{1}{r_R^{\frac{1-n}{n}}}}\right]^n$$

得
$$Q = C(p_R^2 - p_{wf}^2)^n \tag{1—8}$$

(三)非线性球向流

1. 二项式公式

作球向渗流时的非线性阻力仍有重量渗流速度

$$V = \frac{G}{\gamma A} = \frac{\gamma_a Q}{\gamma \cdot 4\pi r^2}$$

代入(1—1)式得

$$-r\mathrm{d}p = \frac{\mu}{K} \cdot \frac{\gamma_a Q}{4\pi} \cdot \frac{\mathrm{d}r}{r^2} + \frac{\overline{\alpha}_2 \gamma_a^{\ 2} Q^2}{16\pi^2} \cdot \frac{\mathrm{d}r}{r^4}$$

用 $r\mathrm{d}p = \mathrm{d}P$ 代替，代入球向流(如图 1－3)边界条件积分

$$\int_{P_{wf}}^{P_R} \mathrm{d}P = \frac{\mu}{K} \cdot \frac{\gamma_a Q}{4\pi} \int_{r_w}^{r_R} \frac{\mathrm{d}r}{r^2} + \frac{\overline{\alpha}_2 \gamma_a^{\ 2} Q^2}{16\pi^2} \int_{r_w}^{r_R} \frac{\mathrm{d}r}{r^4}$$

得 $P_R - P_{wf} = \frac{\mu}{K} \cdot \frac{\gamma_a Q}{4\pi}\left(\frac{1}{r_W} - \frac{1}{r_R}\right) + \frac{\overline{\alpha}_2 \gamma_a^{\ 2} Q^2}{16\pi^2} \cdot \frac{1}{3}\left(\frac{1}{r_W^3} - \frac{1}{r_R^3}\right)$

用 $P_R^2 - P_{wf}^2 = \frac{\gamma_a T_a}{2\overline{Z}T_f}(p_R^2 - p_{wf}^2)$ 代入，得

$$p_R^2 - p_{wf}^2 = \frac{\mu}{K} \cdot \frac{p_a\overline{Z}T_f}{2\pi T_a}\left(\frac{1}{r_W} - \frac{1}{r_R}\right)Q + \frac{\overline{\alpha}_2 p_a \overline{Z}T_f}{T_a} \cdot \frac{\gamma_a}{24\pi^2}\left(\frac{1}{r_W^3} - \frac{1}{r_R^3}\right)Q^2$$

令
$$A = \frac{\mu}{K} \cdot \frac{p_a\overline{Z}T_f}{2\pi T_a}\left(\frac{1}{r_W} - \frac{1}{r_R}\right)$$

$$B = \frac{\overline{\alpha}_2 \gamma_a}{24\pi^2} \cdot \frac{p_a\overline{Z}T_f}{T_a}\left(\frac{1}{r_W^3} - \frac{1}{r_R^3}\right)$$

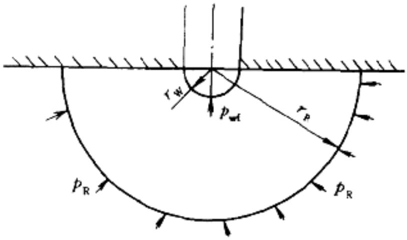

图 1－3　球向流模型

则
$$p_R^2 - p_{wf}^2 = AQ + BQ^2 \qquad (1—9)$$
式中 p_R、p_{wf}、A、B、Q 同径向流公式意义。

作为特例，当为半球向流时：

$$A' = \frac{1}{2}A = \frac{\mu}{4\pi K} \cdot \frac{p_a \overline{Z} T_f}{T_a}\left(\frac{1}{r_W} \cdot \frac{1}{r_R}\right)$$

$$B' = \frac{1}{2}B = \frac{\overline{\alpha}_2 \gamma_a}{48\pi^2} \cdot \frac{p_a \overline{Z} T_f}{T_a}\left(\frac{1}{r_W^3} \cdot \frac{1}{r_R^3}\right)$$

$$p_R^2 - p_{wf}^2 = A'Q + B'Q^2$$

2. 指数式公式

按前面指数式的阻力定律仍有

$$| rV | = C' \, | r \frac{dp}{dr} |^n$$

当引用重量渗流公式时，上式变成

$$\frac{G}{4\pi r^2} = C' \, | \gamma \frac{dp}{dr} |^n$$

用压力函数型式分离变量

$$dP = \left(\frac{G}{4\pi C'}\right)^{\frac{1}{n}} \cdot \frac{1}{r^{\frac{2}{n}}} dr$$

用与二项式相同的边界条件代入积分

$$\int_{P_{wf}}^{P_R} \mathrm{d}P = \left(\frac{G}{4\pi C'}\right)^{\frac{1}{n}} \cdot \int_{r_W}^{r_R} r^{-\frac{2}{n}} \mathrm{d}r$$

得 $$P_R - P_{wf} = \left(\frac{G}{4\pi C'}\right)^{\frac{1}{n}} \cdot \frac{n}{2-n} \cdot \left(\frac{1}{r_W^{\frac{2-n}{n}}} - \frac{1}{r_R^{\frac{2-n}{n}}}\right)$$

用压力函数和 $G=\gamma_a Q$ 代入得

$$Q = (4\pi C') \cdot \left(\frac{2-n}{n}\right)^n \cdot \gamma_a^{\,n-1} \cdot \left(\frac{T_a}{2\overline{Z}p_a T_f}\right)^n \cdot \left(\frac{1}{r_W^{\frac{2-n}{n}}} - \frac{1}{r_R^{\frac{2-n}{n}}}\right)^n \cdot (p_R^2 - p_{wf}^2)^n$$

令

$$C = (4\pi C') \cdot \left(\frac{2-n}{n}\right)^n \cdot \gamma_a^{\,n-1} \cdot \left(\frac{T_a}{2\overline{Z}p_a T_f}\right)^n \cdot \left(\frac{1}{\frac{1}{r_W^{\frac{2-n}{n}}} - \frac{1}{r_R^{\frac{2-n}{n}}}}\right)^n$$

则 $$Q = C(p_R^2 - p_{wf}^2)^n \qquad (1—10)$$

式中 Q、C、p_R、p_{wf}、n 均同径向流公式意义。

作为特例，当为半球向流时：

$$C' = \frac{1}{2}C$$

$$Q = C'(p_R^2 - p_{wf}^2)^n$$

(四)纯气井井底压公式的推导

在前面(一)、(二)、(三)中推出的二项式、指数式公式，都是假定 p_R、p_{wf}为已知的。而实际中 p_R、p_{wf}还要通过计算或实测才能获得。

1. 静气柱井底压力计算公式的推导

设有一重度 γ_g(N/m^3)的天然气，在高度 dl 时的无穷小体积作用于井底的压力为

$$\mathrm{d}p = \gamma_g \mathrm{d}l$$

对于无穷少量 dG(N)的天然气，按克拉普朗方程有

$$p\mathrm{d}v = ZRT\mathrm{d}G \qquad (1—11)$$

$$\frac{\mathrm{d}G}{\mathrm{d}v} = \frac{p}{ZRT}$$

式中　v——天然气比容，m^3/kg；

Z——天然气压缩系数；

R——1kg 天然气的气体常数，kg·m/K。

而
$$\frac{dG}{dv} = \gamma_g \tag{1—12}$$

则
$$dp = dl \cdot \frac{dG}{dv} = dl \cdot \frac{p}{ZRT}$$

由于气体常数与重度成反比

$$\frac{\gamma_g}{\gamma_a} = \frac{R_a}{R}$$

于是
$$R = R_a \frac{\gamma_a}{\gamma_g} = \frac{R_a}{\Delta}$$

式中　γ_a——空气的重度，N/m^3；

γ_g——天然气重度，N/m^3；

R_a——1kg 空气在标准状态下的常数，其值为 29.27kg·m/K；

Δ——天然气的相对重度，$\Delta = \frac{\gamma_g}{\gamma_a}$，无因次。

$$\frac{dp}{p} = \frac{\Delta dl}{ZR_a T}$$

积分上式

$$\int_{p_{ch}}^{p_{ws}} \frac{dp}{p} = \frac{1}{R}\int_0^L \frac{\Delta}{ZT} dl$$

$$\ln \frac{p_{ws}}{p_{ch}} = \frac{1}{R}\frac{\Delta L}{ZT}$$

把 Z、T 取成平均值，$\frac{1}{R} = 0.03415$ 代入得

$$p_{ws} = p_{ch} e^{\frac{0.03415\Delta L}{Z_{cp} T_{cp}}} = p_{ch} \cdot e^S \tag{1—13}$$

$$S = \frac{0.03415\Delta L}{Z_{cp} T_{cp}}$$

当作近似计算时，把(1—13)式简化成

$$p'_{ws} = p_{ch}e^{1.25\times10^{-4}\Delta L} \qquad (1\text{—}14)$$

式中 p_{ws}——关井后井底压力(套、油压均可)，MPa；

p_{ch}——关井后井口压力(套、油压均可)，MPa；

Δ——天然气相对重度，无因次；

L——油管下入深度，m；

e——自然对数底，e＝2.718；

Z_{cp}——气井井筒平均压缩系数，无因次；

T_{cp}——气井井筒平均井温，K。

2. 动气柱井底压力公式推导

天然气在垂直管柱中运动，遵守能量守恒定律。对 1N 天然气：

势能＋动能＋内能＋热能＝定值

$$x_1 + \frac{w_1^2}{2g} + u_1 + p_1 v = x_2 + \frac{w_2^2}{2g} + u_2 + p_2 v - q \qquad (1\text{—}15)$$

由热力学知 $$i = u + pv$$

热量 $$q = i_2 - i_1 = \int_1^2 v\mathrm{d}p - F$$

于是 $$x_2 - x_1 + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2g} + \int_1^2 v\mathrm{d}p + F = 0$$

写成微分形式：

$$\mathrm{d}x + \frac{w\mathrm{d}w}{g} + v\mathrm{d}p + \mathrm{d}F = 0$$

由于摩擦力与$\frac{w^2}{d}$成比例，代入守恒方程式得

$$\mathrm{d}x + \frac{w\mathrm{d}w}{g} + v\mathrm{d}p + \lambda\frac{w^2}{2gd}\mathrm{d}x = 0 \qquad (1\text{—}16)$$

式中 w——天然气的气流速度，m/s；

d——管柱内径，m；

g——重力加速度，m/s^2；

λ——摩擦系数，无因次。

日产 GN 重量天然气在标准状态下的体积为

$$Q_g = \frac{G}{\gamma_g}$$

$$\gamma_g = \frac{273}{293}\Delta\gamma_a$$

$$Q_g = \frac{293G}{273\Delta\gamma_a} = \frac{293G}{273\times1.293\Delta} = \frac{G}{1.205\Delta}$$

$$G = 1.205\Delta Q_g$$

在工作状态下生产 GN 天然气折合到标准状态下的体积为

$$Q_{生} = \frac{ZQ_gRT}{p}$$

$$R = \frac{R_a}{\Delta} = \frac{29.27}{\Delta}$$

$$Q_{生} = \frac{1.205ZQ_g\times29.27T}{p} = 35.27\frac{Q_gZT}{p}$$

气流速度 w 为

$$w = \frac{Q_{生}}{86400\frac{\pi d^2}{4}} = \frac{4\times35.27Q_gZT}{3.14\times86400pd^2}$$

$$= 52\times10^{-5}\frac{Q_gZT}{pd^2}$$

$$dw = -52\times10^{-5}\frac{Q_gZT}{d^2}\cdot\frac{dp}{p^2}$$

天然气比容 v 为

$$v = \frac{ZRT}{p} = \frac{29.27ZT}{\Delta p}$$

$$dp = -\frac{1}{v}\left(\frac{wdw}{g} + dx + \lambda\frac{w^2}{2gd^2}dx\right)$$

$$= -\left(\frac{\Delta p}{29.27ZT} + \lambda\frac{(52\times10^{-5})^2Q_g^{\,2}T^2\Delta p}{2\times9.81\ p^2d^5\times29.27ZT}\right)dx$$

$$+\frac{(52\times10^{-5})^2\ Q_g^{\,2}Z^2T^2dp\gamma p}{9.81p^3d^4\times29.27TZ}$$

$$= -\left(\frac{0.03415\Delta p}{ZT} + \lambda\frac{471\times10^{-12}Q_g{}^2TZ\Delta}{pd^5}\right)dx$$

$$+\frac{942\times10^{-12}Q_g{}^2TZ\Delta dp}{p^2d^4}$$

把压力单位由 N/m^2 换为 $10^4N/cm^2$；气量单位由 m^3/d 换为 $10^{-3}km^3/d$；油管直径单位由 m 换为 10^2cm，则有

$$dp = -\left(\frac{0.03415\Delta p}{ZT} + \lambda\frac{471\times10^{-4}\ Q_g{}^2TZ\Delta}{pD^5}\right)dx$$

$$+\frac{942\times10^{-6}Q_g{}^2TZ\Delta}{p^2D^4}dp$$

即

$$dp = -\left(\frac{C_1}{p} + pC_2\right)dx + \frac{C_3}{p^2}dp \qquad (1—17)$$

式中

$$C_1 = \frac{471\times10^{-4}\lambda Q_g{}^2TZ\Delta}{D^5}$$

$$C_2 = \frac{0.03415\ \Delta}{ZT}$$

$$C_3 = \frac{942\times10^{-6}Q_g{}^2TZ\Delta}{D^4}$$

在一般情况下，$\frac{C_3}{p^2}dp$ 项很小，可以略去，原式变成

$$dp = -(\frac{C_1}{p} + pC_2)dx \qquad (1—18)$$

将(1—18)式两端同乘以 $\frac{2}{C_2}$ 并用 $\frac{C_1}{C_2}=K$ 代入得

$$\frac{2p\,dp}{p^2+K} = -2C_2dx$$

积分上式得 $\ln\frac{p_1^2+K}{p_2^2+K}=2C_2L$

或者 $p_1^2+K=(p_2^2+K)e^{2C_2L}$

把 p_1^2 换为 p_{tf}^2，p_2^2 换为 p_{th}^2，K、C_1、C_2 代回原数，得

$$p_{tf} = \sqrt{p_{th}^2e^{\frac{0.0683\Delta L}{Z_{cp}T_{cp}}} + \frac{1.377\lambda Q_g^2Z_{cp}^2T_{cp}^2}{D^5}(e^{\frac{0.0683\Delta L}{Z_{cp}T_{cp}}}-1)} \qquad (1—19)$$

令
$$2S = \frac{0.0683\Delta L}{Z_{cp}T_{cp}}$$
$$\theta = \frac{1.377\lambda Q_g^{\ 2}Z_{cp}^{\ 2}T_{cp}^{\ 2}}{D^5}$$
则
$$p_{tf} = \sqrt{p_{th}^2 e^{2S} + \theta(e^{2S} - 1)} \qquad (1—20)$$
式中 p_{th}——井口油管生产压力，×0.1MPa；

p_{tf}——井底油管流动压力，×0.1MPa；

Δ——天然气相对重度，无因次；

Z_{cp}——天然气在井筒内平均压缩系数；

T_{cp}——井筒平均温度，K；

L——井管下入深度，m；

D——油管直径，cm；

λ——油管摩阻损失系数，无因次。

(五)不完善井

上述三种流态四种公式适用于完善气井。对于不完善气井，作平面径向流和单向流时，应考虑作不完善的修正。

1. 完善度

完善气井是假想气层中任一点气向井筒流动，认为没有阻力损失，就好象在井壁供气一样。

完善系数，一次项定义为$\frac{\text{单位沿程阻力损失}}{\text{井径}}$，二次项定义为$\frac{\text{单位沿程阻力损失}^2}{\text{井径}^2}$，目的是使沿程阻力损失最小，即

$$L = 1; \quad \ln\frac{r_R}{r_W} = 1; \quad \frac{1}{r_W} - \frac{1}{r_R} = 1; \quad \frac{1}{r_W^{\ 3}} - \frac{1}{r_R^{\ 3}} = 1;$$

$$\frac{1}{r_W^{\frac{1-n}{n}}} - \frac{1}{r_R^{\frac{1-n}{n}}} = 1; \quad \frac{1}{r_W^{\frac{2-n}{n}}} - \frac{1}{r_R^{\frac{2-n}{n}}} = 1 \text{ 等。}$$

气井的完善性是对流向距离上的修正，二项式、指数式应均有。具体定义如下：

(1)单向流。