

quation could not fit for sorting out the isochronal testing and revising isochronal testing data while sorting out the revising isochronal testing data in north Shanxi gas field. This paper analyzes its reasons on this basis, presents a method indirectly obtaining exponential gas production equation, using isochronal testing or revising isochronal testing data.

**Subject Headings:** exponential equation, well testing data, open flow potential, calculation method.

*Kuang Junchao, Shi Naiguang and Yang Zhengwen; Performance Rule Prediction in Gas Production by Water Withdrawal for Water Drive Gas Reservoir, NGI 12(4), 1992: 64~69*

This paper introduces the performance rule prediction for water withdrawal in gas production in water drive gas reservoir, using the material balance method. Through the prediction of ten development indexes in three aspects including various recovery rates, various water withdrawal ways and various water withdrawal scales for Xu-2 gas reservoir of Zhongba gas field, the performance rules of water withdrawal in gas production in water drive gas reservoirs are revealed, providing the theory basis and investigation method for determining the plan of water withdrawal in gas production.

**Subject Headings:** water drive gas reservoir, material balance method, performance rule prediction, recovery rate, water withdrawal way, water withdrawal scale.

## STORAGE/TRANSPORTATION/SURFACE CONSTRUCTION

*Li Changjun; An Analysis of the Unstable Flow of Natural Gas in Pipeline, NGI 12(4), 1992: 69~71*

When analyzing the unstably working conditions of the natural gas in pipeline by use of analytical method, a linearized coefficient is generally introduced, making the equations linearization and then solving them. But this method applied to some pipelines often brings about more considerable error. Therefore, this paper introduces a linearized function in light of the flow conditions of natural gas and obtains an analytic solution through solving nonlinear equations. An example for this calculation is presented in this paper and its relative error is less than 5%, comparing with the result of numerical method. Thereby this calculation method can be applied to the practical engineering calculation.

**Subject Headings:** natural gas, gathering pipeline, unstable flow, analytical method.

*Chen Ji and Yao Anlin; Discussion on the Reasons Causing Corrosion of Chimney of the Stove Heated by Water Sleeve, NGI 12(4), 1992: 72~75*

Through the experiment and theoretical analysis, this article inquires into the main reasons of corrosion cracking of chimney of the stove heated by water sleeve and proposes the basis for developing corrosion-resistant materials of chimney of the stove heated by water sleeve.

**Subject Headings:** stove heated by water sleeve, chimney, corrosion, mechanism analysis.

## GAS PROCESSING AND CHEMICAL TECHNOLOGY

*Sheng Binglin; Characteristics of Self-Control System of MCRC Sulfur Recovery Facility, NGI 12(4), 1992: 75~80*

MCRC sulfur recovery facility imported from Delta Corporation (Canada) has high rate of sulfur recovery and advanced technology and technique. According to the characteristics of technological process, this paper evaluates and analyzes the main control system of this facility.

# 水驱气藏排水采气 动态规律预测

匡建超\* 史乃光

(成都地质学院石油系)

杨正文

(四川石油管理局川西北矿区)

**内容提要** 本文介绍了应用物质平衡法进行水驱气藏排水采气动态规律预测的方法。通过对中坝须二气藏在不同开采速度、不同排水方式、不同排水规模下三方面10个开发指标的预测,揭示了水驱气藏排水采气的动态规律,为排水采气方案的确定提供了理论依据和研究方法。

**主题词** 水驱气藏 物质平衡法 动态规律预测 开采速度 排水方式 排水规模

水驱气藏开采到中后期,由于边(底)水大规模地侵入气区,将导致气藏水淹面积不断扩大,水淹井数也相应增多,这不但给矿场正常生产带来了很大压力,而且也会降低气藏的采收率。因此,目前大力提倡排水采气,以起到控制水淹面积扩大,减少水淹井数增加,保障正常生产,提高采收率的作用。但是,不同的排水方式和不同的排水规模,对气藏各个开发指标有何影响?排水量越大是否对气藏开发就一定有利?排水以什么方式为最合理等等,是人们非常关切而又不十分明白的问题。反过来说,对于一个急待进行排水的水驱气藏,只有事先弄清排水采气的动态变化规律后,才能提出合乎气藏实际情况的排水采气方案,这说明排水采气动态规律预测在排水采气方案确定中处着重要的地位。

目前国内外进行排水采气动态预测的方法主要是数值模拟,但数值模拟存在计算工作量大,时间长,费用高,且对水驱非均质性极强的气藏,计算精度又不很令人满意的弱

点。笔者以中坝须二水驱气藏为例,应用物质平衡法就不同开采速度、不同排水方式、不同排水规模下,地层压力、水侵量、地下净剩水量、置换系数等10个开发指标的预测分析,定量揭示了水驱气藏排水采气的动态特征,为须二气藏排水采气方案的确定提供了理论依据。

## 动态预测的理论公式

水驱气藏开采到第 $n+j$ 年的物质平衡方程为:

$$G_{pn+j}B_{gn+j} + W_{pn+j} = G(B_{gn+j} - B_{gi}) + GB_{gi}(S_{wi}C_w + C_i)(p_i - p_{n+j})/(1 - S_{wi}) + W_{in+j} + W_{en+j} \quad (1)$$

式中水侵量项可改写为:

$$W_{en+j} = B \sum_{k=1}^{n+j-1} \Delta p_k F_D(\tau_D, t_{Dn+j} - t_{Dk-1}) + \frac{1}{2} B (p_{n+j-2} - p_{n+j}) F_D(\tau_D, t_{Dn+j} - t_{Dn-1}) \quad (2)$$

故第 $n+j$ 年的地层压力可表示为:

\* 610059,成都市十里店。

$$p_{n+j} = A/C \quad (3)$$

其中:

$$A = G \left[ B_{gn+j} - B_{gi} + \frac{B_{gi}(S_{wi}C_w + C_f)}{(1 - S_{wi})} p_i \right] + B \sum_{k=1}^{n+j-1} \frac{p_{k-2} - p_k}{2} \cdot F_D(r_D, t_{Dn+j} - t_{Dk-1}) + \frac{1}{2} B p_{n+j-2} F_D(r_D, t_{Dn+j} - t_{Dn-1}) + W_{in+j} - B_{gn+j} G_{pn+j} - W_{pn+j}$$

$$C = \frac{GB_{gi}(S_{wi}C_w + C_f)}{1 - S_{wi}} + \frac{1}{2} BF_D(r_D, t_{Dn+j} - t_{Dn-1})$$

设气藏开采第  $n$  年的累积产气量和累积产水量分别为  $G_{pn}$  和  $W_{pn}$ , 气藏年生产有效天数为 330d, 则有:

$$G_{pn+j} = G_{pn} + 330 \times j \times q_g$$

$$W_{pn+j} = W_{pn} + 330 \times j \times q_w$$

式中  $q_g$  为气藏待预测(可变)的每天配产气量,  $q_w$  为待预测(可变)的每天产水量。以上各式其它符号意义见后。

在已知气藏储量  $G$ 、水侵参数( $B$ 、 $r_D$ 、 $\Delta t_D$ ) 和前  $n$  年的累积产气量  $G_{pn}$ 、累积产水量  $W_{pn}$  的前提下, 根据公式(3)可以预测不同开采速度  $q_g$ 、不同排水方式和不同排水量  $q_w$  下, 以后各年的地层压力。并由压力预测结果, 相应地求出其它各项开发指标。

然而, 由于气体体积系数  $B_{gn+j}$  取决于地层压力  $p_{n+j}$ , 所以公式(3)中实际上有两个未知数:  $p_{n+j}$  和  $B_{gn+j}$ 。只有用迭代方法予以求解。即先给出一个初值压力  $p_1$ , 由  $p_1$  算出  $B_{g1}$ , 将  $B_{g1}$  代入公式(3)中再求出  $p_2$ , 并进一步求出  $B_{g2}$ ……, 依此类推, 直到  $|p_k - p_{k-1}| \leq 0.001 \text{MPa}$ , 则  $p_k$  即为气藏第  $n+j$  年的地层压力  $p_{n+j}$ 。

## 须二气藏开展排水的必要性和可行性

须二产层为致密低孔低渗裂缝性砂岩储层。气藏为一背斜边水气藏, 水侵模型为线性水侵模型, 水侵方向为北北东向, 由北向南。

从气藏开采的现状, 边水活动的特点和水侵的严重程度综合分析, 表明气藏开展排水采气是必要的, 也是可行的。

(1) 近几年来, 除气藏北区遭受严重的水淹外, 主产区的南区明显地出现北水南侵的势头。由于气藏的大多数高产气井和部分中产井位于构造的低部位和裂缝发育带上, 且与气藏水侵方向相通, 如果加强气藏北区排水, 则可以延长部分高中产气井的无水采气期, 保住或推迟主产区水淹, 实现继续稳产。

(2) 在北区的水淹井中 4 井开展排水, 结果表明: 连续排水 2~3 月后, 气井又重新间断采气, 说明低渗透储层排水解除水锁后, 是可以把气重新解放出来; 另外该井产水稳定, 结合气藏开采以来边水活动特点, 证明边水的补给强度有限, 这说明在须二气藏开展排水是可行的。

## 排水采气动态规律预测

根据排水采气动态预测的理论公式, 以中坝须二气藏为例在已知储量  $G = 113.293 \times 10^8 \text{m}^3$ 、水侵常数  $B = 61.584 \text{m}^3/\text{MPa}$ , 无因次时间步长  $\Delta t_D = 3.58 \times 10^{-3}$  的线性水侵模型下, 进行不同采气速度、不同排水方式、不同排水规模 2005 年前 10 个开发指标预测。

### 1. 不同开采速度下的动态规律

根据须二气藏目前自喷产水能力加上现已进行的人工排水工作, 预计在 2000 年以前气藏产水量为  $200 \text{m}^3/\text{d}$ ; 2000 年以后, 由于部分井水淹, 产水量有所降低, 为  $150 \text{m}^3/\text{d}$ 。根据公式(3)分别进行  $50 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ 、 $60 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ 、 $70 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$  三种开采速度的动态预测, 预测结果见表 1。从这些结果可以看到:

(1) 随着开采速度的增高, 同期地层压力越低(图 1), 年压降速度增大, 水侵速度、累积水侵量增加, 地下净剩水量( $W_e + W_i - W_p$ )也增大(图 1), 排侵比( $Q_w/\Delta W_e$ )降低。对于

表 1 三种采气速度下动态指标预测数据表

采气速度 ( $10^4\text{m}^3/\text{d}$ )	地层压力 $P_i$ (MPa)	年压降 $\Delta P_i$ (MPa)	累积采气量 $G_p$ ( $10^4\text{m}^3$ )	累积产水量 $W_p$ ( $10^4\text{m}^3$ )	累积水侵量 $W_e$ ( $10^4\text{m}^3$ )	净剩水量 $W_e + W_i - W_p$ ( $10^4\text{m}^3$ )	年水侵速度 $\Delta W_e$ ( $10^4\text{m}^3/\text{a}$ )	年单位压降采气量 $Q_g/\Delta P_i$ ( $10^4\text{m}^3/\text{MPa}$ )	置换系数 $\frac{\Delta W_e}{Q_g B_g + Q_w}$	排径比 $Q_w/\Delta W_e$	
											(1)
50	1990	19.214	0.415	382492	41.2057	492.807	475.392	29.3246	39759	0.3188	0.225
	1995	16.779	0.478	464992	74.2057	643.903	593.489	30.5346	34518	0.3090	0.216
	2000	14.307	0.507	547492	107.206	800.254	716.84	31.8621	32544	0.2872	0.207
	2005	11.717	0.532	629992	131.956	964.257	856.093	33.8474	31015	0.2692	0.146
60	1990	19.012	0.512	389092	41.2057	502.2	484.786	33.7615	38671	0.3069	0.203
	1995	16.122	0.58	488092	74.2057	682.464	632.05	36.7503	34137	0.3030	0.18
	2000	13.12	0.621	587092	107.206	872.153	788.739	39.2001	31884	0.275	0.168
	2005	9.839	0.697	686092	131.956	1078.52	970.351	43.3972	28407	0.250	0.114
70	1990	18.813	0.608	395692	41.2057	511.514	494.1	38.6377	37993	0.3010	0.171
	1995	15.456	0.681	511192	74.2057	721.391	670.977	42.7766	33920	0.2938	0.154
	2000	11.882	0.749	626692	107.206	946.842	863.428	47.1032	30841	0.2621	0.14
	2005	7.751	0.907	742192	131.956	1204.67	1096.51	56.1259	25468	0.229	0.088

某一固定的开采速度而言,随着开采时间增长,以上结论同样成立。这说明随着开采速度的增高以及开采时间的增长,地层能量的消耗也增大,气区与水区的压差增加,造成水侵速度增大,而产水量几乎不变,则地下净剩水量自然就增大。

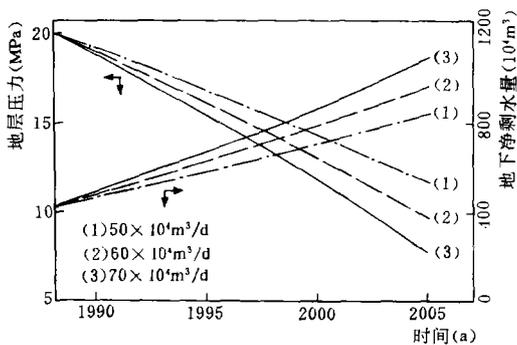


图 1 三种采气速度下地层压力、净剩水量与时间关系

(2)随着开采速度的增高,同期单位压降采气量下降,置换系数 $[\Delta W_e/(Q_g B_g + Q_w)]$ 下降,就某一开采速度而言,以上两个指标随时间增长而下降。这是由于随着气藏的高速开采或开采时间增长,水侵的补偿体积小于气

藏采出的亏空体积的缘故。即水侵速度的增长幅度远远小于年采出量地下亏空体积的增加幅度,这是符合客观实际的。

(3)高速开采在水驱气藏开发早期,是可以减缓水的危害,但是在开发中晚期,显然会加快气藏水淹,从表 1 的结果可以证实。要达到控制气藏水淹面积扩大的目的,70 $\times 10^4\text{m}^3/\text{d}$  开采速度 1995 年地下净剩水量比 1990 年多 38.4%,这对控制水淹面积扩大是不利的;另外,按现有气井生产能力要达到这个速度还需补打一定数量的新井,这是不现实的。50 $\times 10^4\text{m}^3/\text{d}$  与 60 $\times 10^4\text{m}^3/\text{d}$  两者比较,后者 1995 年的地下净剩水量比前者多 6.4%,如果在气藏采取一定规模的排水,是可以弥补这一不足的。因此,目前继续实施 60 $\times 10^4\text{m}^3/\text{d}$  的开采速度是恰当的,再稳产五年是有把握的。

## 2. 不同排水方式下的动态规律

目前认为排水方式主要是三种:内排、外排和内外排结合。外排是指将排水井布在气水边界之外的水区中进行排水,这样似乎可以直接减少进入气区的水侵量;内排主张将排水井布在气水边界之内的气区水淹区,进行排水,这样似乎可以减缓已侵入气区的水

表2 总排水量为800m<sup>3</sup>/d时内、外排水方式预测结果

方案	地层压力 $p_f$ (MPa)	年压降 $\Delta p_f$ (MPa)	累积采 气量 $G_p$ (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> )	累积产 水量 $W_p$ (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> )	累积水 侵量 $W_w$ (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> )	净剩水量 $W_w + W_i - W_p$ (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> )	年水侵 速度 $\Delta W_w$ (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> /a)	年单位压 降采气量 $Q_g/\Delta p_f$ (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> /MPa)	置换系数 $\frac{\Delta W_w}{Q_g B_g + Q_w}$ (9)	排侵比 $Q_w/\Delta W_w$ (10)		
											(m <sup>3</sup> /d)	(年)
1	内排	1990	19.012	0.512	389092	41.2057	502.2	484.786	33.7615	38671	0.3069	0.203
		1995	16.157	0.551	488092	41.2057	654.767	637.353	34.9338	35935	0.305	0
	外排	2000	13.282	0.591	587092	41.2057	836.333	818.918	37.5931	33503	0.2806	0
		2005	10.055	0.68	686092	41.2057	1038.92	1021.50	42.7991	29118	0.262	0
2	内排	1990	19.012	0.512	389092	41.2057	502.2	484.786	33.7615	38671	0.3069	0.203
		200	1995	16.037	0.578	488092	74.2057	668.154	617.739	36.5895	34256	0.3003
	外排	2000	13.046	0.62	587092	107.206	857.107	773.693	38.8555	31935	0.2722	0.1698
		2005	9.753	0.689	686092	140.206	1064.48	948.062	43.4499	28737	0.2492	0.1518
3	内排	1990	19.012	0.512	389092	41.2057	502.2	484.786	33.7615	38671	0.3069	0.203
		600	1995	15.802	0.628	488092	140.206	694.702	578.288	39.954	31529	0.2920
	外排	2000	12.602	0.652	587092	239.206	897.51	682.096	41.340	30368	0.2578	0.4789
		200	2005	9.191	0.71	686092	388.206	1112.76	798.344	44.732	27887	0.2278
4	内排	1990	19.012	0.512	389092	41.2057	502.2	484.786	33.7615	38671	0.3069	0.203
		800	1995	15.687	0.653	488092	173.206	707.836	558.422	41.5095	30322	0.2883
	外排	2000	12.386	0.669	587092	305.206	917.093	635.678	42.2825	29596	0.2500	0.6244
		0	2005	8.93	0.714	686092	437.206	1135.78	722.366	45.0464	27731	0.2172

的扩张;内外排结合则为以上两种形式兼顾。到底选择哪一种排水方式为好,应该给出定量指标之后,方能说明。

在物质平衡法预测中,外排是通过在累积水侵量项上减去假设的外排水量来实现;内排是以内排累积排水量直接代替方程中的累积产水量项来实现。在须二气藏的预测中,按 $60 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ 开采速度,以 $800 \text{m}^3/\text{d}$ 总排水量,分别以外排、内排、内外排结合四种情况进行预测,各项指标列于表2中。

将外排与内排(方案1与方案4)予以对比:方案4 1995年的地层压力比方案1多降0.47MPa,而水侵量也增加 $53.069 \times 10^4 \text{m}^3$ (8.1%),但是地下净剩水量方案4比方案1减少 $78.931 \times 10^4 \text{m}^3$ (12.38%)。

由此说明:(1)外排在一定程度上可以减小气藏压力下降速度,起到降低水侵速度的作用,但是降低幅度不大,又由于外排不能直接减少已侵入气藏内部的水量,因而气藏内部净剩水量反而增加。(2)内排虽然地层压力比外排下降多,水侵速度比外排略有增加,但

内排可直接减少面侵入气藏的水量,因而起到了降低气藏内部净剩水量的作用。这个结论从内外排结合的两个方案(方案2、3)预测结果也可证实。各方案地下净剩水量如图2所示。

由此可见,内排就控制气藏水侵面积扩大而言,比外排和内外排结合方式更为有效,因此排水方式选择内排最为合理。

### 3. 不同排水规模下的动态规律

在气藏开采速度和排水方式确定后,必须进一步论证多大的排水规模方能满足气藏排水采气的原则。由此,我们以 $60 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ 的开采速度,内排方式,按七种排水规模(500、800、1000、1300、1500、1800、2000 $\text{m}^3/\text{d}$ )进行各项开发指标的动态预测。其动态特征归纳如下:

(1)随着排水规模的增大,同期气藏地层压力不断降低,年压降幅度、年水侵速度、累积水侵量均不断增加,置换系数不断减小。这是由于气藏主要依靠气、水和岩石的弹性膨胀能量开采,排水同采气含义一样,均消耗地

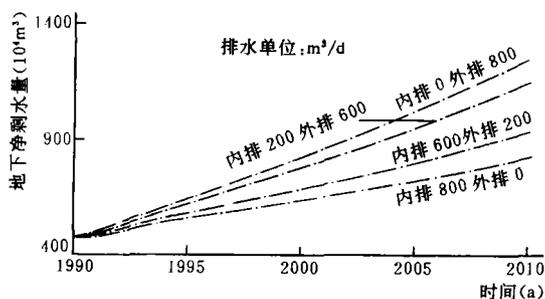


图2 总排水量为  $800\text{m}^3/\text{d}$  下内外变排量的净剩水量与时间关系

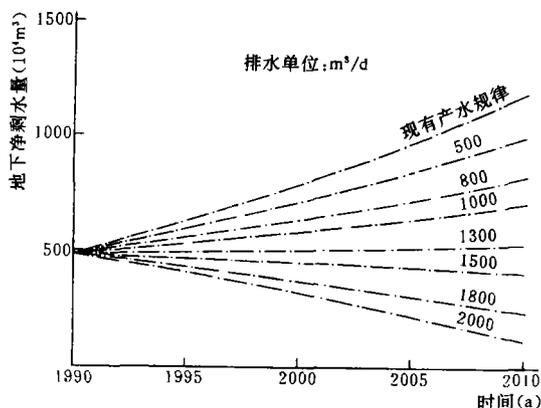


图3 不同排水规模下地下净剩水量与时间关系

层能量。随着排水规模的不断增大,导致气藏能量不断减小,相应的年压降幅度增加,地层压力降低。与此同时,由于气区与水区的压差增加,又造成水侵速度增加,反过来又对气藏能量起到一定的补偿作用。但是,这种“亏空”与“补偿”的差异不是日趋减小,而是不断加大。即是说,年水侵速度的“增加值”不足以补偿气藏日益增多的“总亏空值”,因而气藏地层压力仍然不断下降,这是符合客观实际的。

(2)随着排水规模的不断增大,同期排侵比相应增大,地下净剩水量减小(图3)。这是因为随着排水规模的增大,其水侵速度的增

加幅度不是太大。当排水规模超过某一值后 ( $1300\text{m}^3/\text{d}$ ),不但可以把目前侵入气藏的水排掉,而且可以把以前积累在地下孔隙中的水排出一部分,因此地下净剩水量可以减少。从图3看出:排水  $1300\text{m}^3/\text{d}$  在1995年以前地下净剩水量将保持在1990年的  $484.786 \times 10^4\text{m}^3$  的水平上,排侵比近似等于1。该排水量是理论上最佳的排水规模,它将有效地控制水淹面积的扩大。

然而,气藏的排水规模或排水方案的最终确定,它受多方面因素的制约。除了考虑控制水淹面积扩大这个重要条件外,还必须同时考虑矿场的经济承受能力和气藏实际情况,这包括实施排水和水处理的费用,各排水井的出水能力以及相应的配排水量、气水前缘的见水时间预测,各井排水后地层压力和井口压力变化特征、各排水规模下气藏最终采收率的高低变化等等。通过这些因素的综合分析,才可能得出气藏最合理的排水方案。

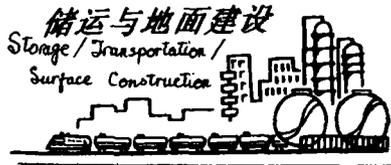
## 结 论

(1)应用物质平衡法对水驱气藏排水采气动态规律的预测是可行的,此方法简单、方便、适用。在地质模型和水侵模型清晰的情况下,预测结果是符合客观实际的。

(2)水驱气藏开发初期适宜采用高速开采;在中晚期则应适当放低开采速度,以减缓边底水对气藏的水淹。

(3)如果以减小地下净剩水量、控制气藏水淹面积扩大为排水采气原则,排水方式以内排最为合理。对于同等排水量,内排比外排、内外排结合更能降低地下净剩水量。

(4)中坝须二气藏如果要使1995年的水淹情况保持在1990年水平上,借助一定规模的排水(理论排水量  $1300\text{m}^3/\text{d}$ )是完全可实现的。且在排水的条件下,实施  $60 \times 10^4\text{m}^3/\text{d}$  的采气速度继续稳产五年是可行的。



# 天然气在管道内的 不稳定流动分析

李长俊\*

(西南石油学院)

**内容提要** 由解析法分析天然气管道不稳定工况时,通常是引入一线性化系数,将方程线性化,然后再对其求解。但这种方法应用于某些管道往往会带来较大误差。对此,本文根据天然气流动情况,引入一线性化函数,通过求解非线性方程得到了解析解。本文还给出了算例,并与数值法结果进行比较,相对误差小于5%。因此,本文的计算方法可用于工程实际计算。

**主题词** 天然气 集输管道 不稳定流动 分析方法

研究天然气在管道中的不稳定流动,对于管道系统的事故分析、优化运行以及调度管理等方面具有很重要的实际意义。从研究方法看,既有数值法,也有解析法。由于两种方法各有独到的优点,在实际生产中都得到了应有的重视。解析法分析管道不稳定工况时,无法直接求解非线性偏微分方程,通常做法是引入一线性化系数,将非线性偏微分方程线性化,然后再根据一定的定解条件,求出

不同时刻气体的压力和流量沿管线的分布<sup>(1,2)</sup>。

实践证明,当气体流速随管长和时间变化不大时,这种方法给出了满意的结果,但对于压降 $\frac{p_1}{p_2}$ (起点压力与终点压力之比)较大的输气管道,如果不考虑气流速度沿管长变化,将引起较大的误差<sup>(2)</sup>。

事实上,对于长输干线,由于起点压力一般都较高,随着气体的流动,压力逐渐降低,

## 符号说明

$G$ ——天然气储量,  $10^8 \text{m}^3$ ;  $G_p$ ——气藏累积采气量,  $10^4 \text{m}^3$ ;  $W_p$ ——气藏累积产水量,  $10^4 \text{m}^3$ ;  $W_i$ ——气藏累积注水量,  $10^4 \text{m}^3$ ;  $W_e$ ——累积水侵量,  $10^4 \text{m}^3$ ;  $p_1$ ——气藏原始地层压力, MPa;  $p$ ——某一年气藏地层压力, MPa;  $B_{g1}$ —— $p_1$ 和地层温度下天然气体积系数;  $B_g$ —— $p$ 和地层温度下天然气体积系数;  $S_{w1}$ ——气藏束缚水饱和度;  $f$ ;  $C_w$ 、 $C_f$ ——水和岩石的压缩系数,  $1/\text{MPa}$ ;  $F_D$ ——无因次水侵量;  $r_D$ ——无因次半径;  $t_D$ ——无因次时间;

$\Delta t_D$ ——无因次时间步长;  $B$ ——水侵常数,  $\text{m}^3/\text{MPa}$ ;  $Q_g$ ——气藏年产气量,  $\text{m}^3$ ;  $q_w$ ——气藏日产水量,  $\text{m}^3$ ;  $\Delta W_e$ ——气藏水侵速度,  $10^4 \text{m}^3/\text{a}$ ;  $n$ ——脚标, 第  $n$  年;  $n+j$ ——脚标, 第  $n+j$  年。

## 参 考 文 献

- 1 张子枢. 天然气采收率, 天然气勘探与开发, 1980; 2
- 2 L. P 达克. 油藏工程原理. 北京: 石油工业出版社, 1984

(本文收稿 1991-12-30)