

油气两相渗流的试井解释方法

刘振宇 刘洋 翟云芳

(大庆石油学院)

摘要 当油田开发到中后期,由于地层压力的下降,实际上往往有气相参与流动。而目前的试井分析方法多数并未考虑气相的影响。本文利用 H 函数建立了油气两相条件下的试井理论模型,给出了解释方法,并用实际试井资料进行了验证,结果表明,本方法计算的地层平均压力比原方法准确可靠。

主题词 油井 两相流动 H 函数 地层压力 试井解释

作者简介 刘振宇,1964年生。1988年毕业于中国科学院化学研究所,获硕士学位,现任石油工程系讲师。刘洋,1967年生。1988年毕业于大庆石油学院,现任助理工程师。翟云芳,1938年生。现任石油工程系教授,国家有突出贡献专家。

目前的试井分析方法多是建立在单相流动的条件下,这在油田开发早期地层压力较高的情况下比较适合,原因是这时地层中的气由于地层压力高于饱和压力被溶解在油中,无多相流动。但在油田开发的中后期由于地层压力的下降,油中的气不断分离出来,并逐渐形成流动的气相,将对压力变化特性产生较大影响,这时若仍用单相流的理论模型,则会导致较大误差。特别是在推算地层平均压力时,往往出现地层平均压力低于关井末点压力的不合理结果,大庆油田的许多井的解释结果表明了这个问题非常突出。

本文针对油气两相渗流条件,利用 H 数值的方法建立了试井解释理论模型,给出了解释方法,实例说明本方法是可行的,与原方法相比,计算的地层平均压力更加可信,为油田的开发分析动态提供了比较可靠的依据。

一、数学模型

油气两相渗流时,油相基本微分方程为

$$\nabla \cdot \left[\frac{K_{ro}}{\mu_o(P)B_o(P)} \nabla P \right] = \frac{\varphi}{K} \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{S_o}{B_o(P)} \right] \quad (1)$$

引入 H 函数
$$\nabla H = \frac{K_{ro}}{\mu_o(P)B_o(P)} \nabla P \quad (2)$$

得

$$\nabla^2 H = \frac{\varphi}{K} \cdot \frac{\partial H}{\partial t} \quad (3)$$

对于径向流有
$$\frac{\partial^2 H}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial H}{\partial r} = \frac{\varphi}{K} \cdot \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{S_o}{B_o} \right) = \frac{1}{\eta} \cdot \frac{\partial H}{\partial t} \quad (4)$$

$$\text{式中 } \eta = \frac{K_o}{\mu_o \varphi} \cdot \frac{\partial P}{\partial S_o}$$

对(4)式求解,并应用压力迭加原理可得压力恢复时的井底 H 函数公式为

$$H_{ws} = H_i + 0.183 \frac{q}{Kh} \lg \left(\frac{\Delta t}{\Delta t + t_p} \right) \quad (5)$$

由(5)式可见,井底的 H 函数与 $\lg[\Delta t/(\Delta t + t_p)]$ 成线性关系,斜率为

$$m = 0.183q/(Kh) \quad (6)$$

平均 H 函数的计算公式为

$$\bar{H} = H_{wf} + 0.87m[\ln(r_e/r_w) - 3/4 + S] \quad (7)$$

由(7)式和(2)式可得平均地层压力 \bar{P} 。

表皮系数的计算公式为

$$S = 1.151 \left(\frac{H_{ws} - H_{wf}}{m} + \lg \frac{2.25\eta}{r_w^2} + 3.092 \right) \quad (8)$$

二、 H 函数的计算

$$\text{由 } H \text{ 函数的定义得 } H(P) = \int_0^P \frac{K_{ro}}{\mu_o(P) \cdot B_o(P)} dP \quad (9)$$

在不稳定条件下,假设气体为理想气体,油相和气相的基本微分方程在油藏边界处简化,可得压力、饱和度及生产油气比的关系

$$GOR = \frac{d \left[S_o \frac{R_s(P)}{B_o(P)} P_* + (1 - S_o) P \right]}{P_* \cdot d \left[\frac{S_o}{B_o(P)} \right]} \quad (10)$$

用逐次替代法求解上式,即把整个 P 及 S_o 的范围分成许多小区间,每个小区间中生产油气比视为常数,取其平均值,对上式积分化简得

$$S_{oi+1} = \frac{P_* \cdot \overline{GOR} \cdot \frac{S_{oi}}{B_o(P_i)} - (1 - S_{oi}) P_i - S_{oi} \frac{R_s(P_i) P_*}{B_o(P_i)} + P_{i+1}}{\frac{\overline{GOR} \cdot P_*}{B_o(P_{i+1})} - \frac{R_s(P_{i+1}) P_*}{B_o(P_{i+1})} + P_{i+1}} \quad (11)$$

若给定 P_i, P_{i+1} 及 S_{oi} ,则可计算 S_{oi+1} ,其中 \overline{GOR} 近似为

$$\overline{GOR} = \frac{P}{\bar{P}} \varphi(S_{oi}) \frac{\mu_o(\bar{P})}{\mu_g(\bar{P})} B_o(\bar{P}) + R_s(\bar{P}) \quad (12)$$

$$\text{式中 } \bar{P} = (P_i + P_{i+1})/2$$

由式(12),利用 $\mu_o \sim P, \mu_g \sim P, B_o \sim P, R_s \sim P$ 的高压物性参数及相对渗透率曲线,可得到 $K_{ro}/[B_o(P)\mu_o(P)] \sim P$ 的关系曲线,再应用数值积分可得在不稳定条件下 $H(P) \sim P$ 的关系

曲线。计算任一点压力下的 $H(P)$ 时可由插值的方法求得。

三、实例分析

大庆油田 A 采油井的实际测压数据列于表 1, 其基本参数为: $q=40\text{t/d}$, $h=4.7\text{m}$, $P_{wt}=4.15\text{MPa}$, $r_w=0.1\text{m}$, $\gamma_o=0.86$, $\mu_o=9\text{mPa}\cdot\text{s}$, $t_p=4320\text{h}$, $C_i=3.85\times 10^{-4}\text{MPa}$ 。计算得压力与饱和度的关系见图 1, $K_{ro}/[B_o(P)\mu_o(P)]\sim P$ 的关系见图 2, $H(P)\sim \lg[\Delta t/(\Delta t+t_p)]$ 的关系曲线见图 3。由所得直线计算的结果见表 2。

表 1 A 井的压力恢复数据

序号	时间 (h)	压力 (MPa)	序号	时间 (h)	压力 (MPa)	序号	时间 (h)	压力 (MPa)
1	0.092	7.909	10	4.4118	8.364	19	27.352	8.874
2	0.320	8.012	11	5.292	8.399	20	37.027	8.8993
3	0.680	8.090	12	6.140	8.427	21	46.711	9.078
4	1.099	8.106	13	7.182	8.462	22	56.402	9.160
5	1.754	8.128	14	7.971	8.497	23	66.078	9.236
6	2.169	8.245	15	9.233	8.534	24	75.763	9.295
7	2.456	8.260	16	13.379	8.644	25	85.446	9.341
8	3.086	8.297	17	17.651	8.729	26	95.141	9.400
9	3.713	8.330	18	23.437	8.829			

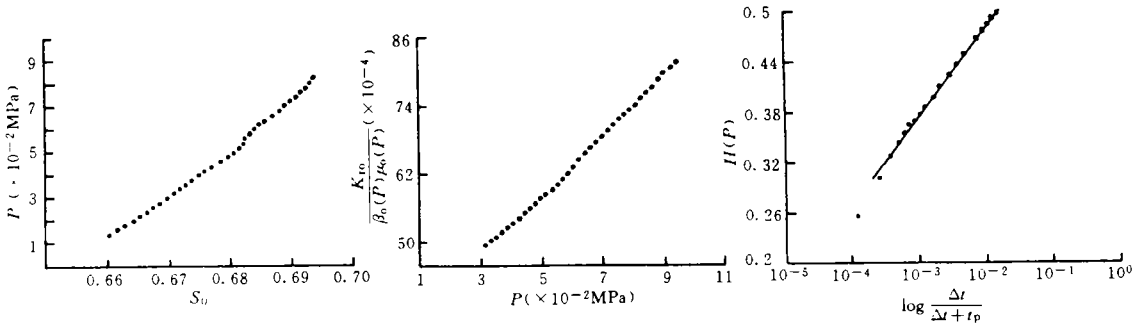


图 1 $P\sim S_o$ 关系曲线 图 2 $\frac{K_{ro}}{B_o(P)\mu_o(P)}\sim P$ 关系曲线 图 3 $H(P)\sim \lg \frac{\Delta t}{\Delta t+t_p}$ 关系曲线

表 2 A 井的计算结果比较

井号	$K(\times 10^{-3}\mu\text{m}^2)$	S	$\bar{P}(\text{MPa})$	$P_{\max}(\text{MPa})$	$\bar{P}_*(\text{MPa})$
A	241	-3.04	8.53	8.17	

用同样的方法对另外 3 口井(B、C 和 D 井)的解释结果见表 3。

表 3 B 井、C 井、D 井的解释结果

井号	$K(\times 10^{-3}\mu\text{m}^2)$	S	$\bar{P}(\text{MPa})$	$P_{\max}(\text{MPa})$	$\bar{P}_*(\text{MPa})$
B	96	-4.49	7.38	7.36	7.01
C	79	-3.16	8.20	8.16	7.38
D	240	-5.56	6.72	6.71	4.04

由计算结果可知,本方法计算得到的 K 、 S 与原方法的 K 、 S 接近,而平均压力比原方法的结果合理,即:原方法计算的 $\bar{P}_{\text{原}}$ 比末点压力低,而本方法计算的 \bar{P} 比末点压力略高。因末点压力由于长期关井,已接近真正地层平均压力,可见本文的结果比较可靠。

四、结论

1. 本文给出了利用 H 函数进行油气两相渗流条件压力恢复试井分析的理论公式和分析方法,结果是可靠的。

2. 本方法计算的地层平均压力与原方法相比较准确。

3. 本方法的准确程度受油田高压物性参数影响,高压物性参数愈准确,计算的压力则愈准确。

符 号 说 明

$B_o(P)$ ——油的体积系数,无量纲;

K_{r_o} ——油的相对渗透率,无量纲;

\overline{GOR} ——生产油气比,无量纲;

GOR ——生产油气比,无量纲;

$H(P)$ ——油的 H 函数,1/s;

H_{wf} ——井底的 H 函数,1/s;

H_{ws} ——关井后的 H 函数,1/s;

H_i ——原始 H 函数,1/s;

$H_{w,1}$ ——关井 1 个小时的 H 函数,1/s;

h ——地层有效厚度,m;

K ——地层的绝对渗透率, $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;

m ——直线的斜率,1/s;

$\bar{P}_{\text{原}}$ ——原方法计算的地层平均压力,MPa;

\bar{P} ——本文方法计算的地层平均压力,MPa;

P_{wf} ——流压,MPa;

P_{max} ——实测的末点压力,MPa;

P_s ——标准状态下的压力,MPa;

q ——油井的产量,t/d;

r_e ——供给半径,m;

r_w ——井的半径,m;

R_s ——溶解油气比,无量纲;

S ——表皮系数,无量纲;

S_o ——油的饱和度,无量纲;

Δt ——关井时间,s;

t_p ——关井前的生产时间,s;

C_i ——综合压缩系数,1/MPa;

η ——导压系数, m^2/s ;

μ_o ——油的粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$;

μ_g ——气的粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$;

γ_o ——油的比重,无量纲;

φ ——孔隙度,无量纲;

K_o ——油的相渗透率, $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

(收稿日期 1995-06-09)

[编辑 郑秀娟]

参 考 文 献

- 1 R Raghavan. Well Test Analysis: Wells Producing by Solution Gas Drive. SPE, Aug. 1976:196~208
- 2 R Raghavan. Well Test Analysis for Mutiphase Flow. SPE, 14 908(1986)
- 3 翟云芳等. 渗流力学. 北京:石油工业出版社,1994

by Zhang Shicheng, Wang Hongxun, Zhang Yongping

Abstract This paper introduces the method to optimize fracture parameters of large—scale hydraulic fracturing for Shengl—1 gas well of Daqing oilfield applying type curve method, and then to select fracturing materials and to design operation plan. Good results have been obtained in field applications.

Subject heading Daqing oilfield gas well hydraulic fracturing massive fracturing fracture extension fracture flow conductivity prediction optimizing design

WELL TEST INTERPRETER METHOD FOR OIL—GAS TWO—PHASE FLOW

by Liu Zhenyu, Liu Yang, Zhai Yunfang

Abstract When oilfield development is in medium—later period, gas will occur in fluid flow due to the draw down of reservoir pressure. But most of current well, test interpretation methods take no account of the effect of gas phase. Well test interpretation methods take no account of the effect of gas phase. A new well test interpretation model for oil—gas two—phase flow is established by use of H function, and the interpretation method is presented in this paper. The field application results indicate that the average formation pressure calculated by this method is more accurate than that by original method.

Subject heading oil well two phase flow H function formation pressure well test interpretation

SUPPLY—DISCHARGE COORDINATED CHART OF SUCKER ROD PUMP AND ITS APPLICATIONS

by Geng Yuguang, Zhai Yunhui

Abstract This paper presents the drawing method of supply—discharge coordinated chart of sucker rod pump, analyses the process to select optimally pumping unit, sucker rod pump, pump setting depth, stroke and frequency of stroke with the help of supply—discharge coordinated chart by practical sample. Application results show that the coordinated chart can reflect the dynamic performance of sucker rod pump, and can be used to select pumping unit and pumping parameters. It has the advantages of intuition, convenience, easy to contrast and select etc.

Subject heading sucker rod pump supply—demand relation process parameter optimizing design analytical method

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF JHR NEW TYPE CORE HOLDER SERIES

by Yu Weichu, Hu Sanqing, Liu Gang, Zhang Yihua

Abstract Core holder is a necessary test instrument in core experiments. This paper introduces the construction property, technical key and application results of JHR new type core holder series. New series have many advantages compared with TY series, and have a great application prospect.

Subject heading core laboratory testing gripper technical reform structure application