

低渗透油藏压降漏斗影响因素研究

陆 辉¹ 杨胜来¹ 谢 丽²

(中国石油大学石油工程教育部重点实验室¹,北京 102249;长江大学物理科学与技术学院²,荆州 434023)

摘要 压降漏斗对油井产量具有重要影响。一方面压降漏斗扩大了储层的生产压差,使得更多的储层储量被动用;另一方面压降漏斗在供给边缘附近下降很缓慢,而在井底附近变陡,说明流体从供给边缘到井底其能量大部分消耗在近井地带。而与常规油藏相比,低渗透油藏的压降面更陡,能量补充更为困难。在此背景下,提出了描述低渗透油藏压力分布的公式。通过油藏实例,系统分析了影响低渗透油藏压降漏斗的因素。

关键词 低渗透油藏 压降漏斗 影响因素 压力分布 启动压力梯度

中图法分类号 TE327; **文献标志码** A

油井投产之后,地层压力下降,从井壁到供给边缘,压力逐渐下降,其压降面为漏斗形的曲面,即为压降漏斗。压降漏斗对油井产量具有重要影响,一方面压降漏斗扩大了储层的生产压差,使得单井动用范围扩大、更多的储层储量逐步被动用;另一方面压降漏斗在供给边缘附近下降很缓慢,而在井底附近变陡,说明流体从供给边缘到井底其能量大部分消耗在近井地带(如图1所示)。

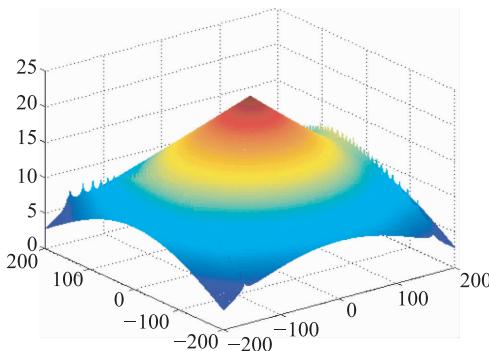


图1 某时刻一注采井组压力分布示意图

与常规油藏相比,低渗透油藏储层渗流阻力大,更多能量都消耗在注水井近井地带,同时在开发过程中能量补充更为困难。而我国陆上已开发油田的地质储量中特低渗透油藏储量约占10%,已探明未动用储量中有一半以上是特低渗透储量,在此背景下,研究低渗透油藏压降漏斗的影响因素具

有重要意义^[1]。在前人研究的基础之上,本文提出了描述低渗透油藏压力分布的公式,通过油藏实例,系统分析了影响低渗透油藏压降漏斗的因素。

1 低渗透油藏非线性渗流数学模型

前人对低渗透油藏非达西渗流做了相当多的研究。姚约东和葛家理(2000年)运用无因次分析法对岩心渗流实验数据进行了分析和研究,按雷诺数将渗流区分为三段,并给出各段的数学表达式^[2]。邓英尔和刘慈群(2001年)依托实验,提出了低渗透非线性渗流规律的连续函数模型,确定了非线性定常渗流压力分布、非定常渗流压力分布及影响半径发展的规律^[3]。燕良东等人(2007年)利用非线性数学模型,描述低渗透油藏的非线性流动规律,从理论上给出了低渗透油藏中流态分布的计算,指出了流体在低渗透油藏中以特低速度流动时压力分布的特点^[4]。本文在前人研究的基础上,提出了考虑表皮因子的渗流模型。

考虑启动压力梯度后的非线性渗流方程为

$$\begin{cases} v = -\frac{k}{\mu} \frac{dp}{dr} \left(1 - \frac{G}{\frac{dp}{dr}} \right), & \frac{dp}{dr} > G \text{ 时} \\ v = 0, & \frac{dp}{dr} \leq G \text{ 时} \end{cases} \quad (1)$$

由考虑拟启动压力梯度模型可得速度为:

$$v = \frac{k}{\mu} \left(\frac{dp}{dr} - G \right) \quad (2)$$

则流量可以表示为:

$$q = vA = 2\pi rh \frac{k}{\mu} \left(\frac{dp}{dr} - G \right) \quad (3)$$

对式(3)变形得到:

$$\frac{dp}{dr} = \frac{q\mu}{2\pi Kh} \frac{1}{r} + G \quad (4)$$

对式(4)积分可得到压力 P 沿半径 r 分布的表达式:

$$p = p_{iwf} - \frac{\mu q}{2\pi Kh} \ln \left(\frac{(L - r_w)r}{r_w(L - r)} \right) - G(r - 2r_w) \quad (5)$$

而考虑表皮系数表示为无限小延伸区域引起的稳定状态的压差:

$$\Delta p_s = \frac{q\mu}{2\pi Kh} S \quad (6)$$

式(6)代入公式(5)可得:

$$p = p_{iwf} - \frac{\mu q}{2\pi Kh} \ln \left(\frac{(L - r_w)r}{r_w(L - r)} + S \right) - G(r - 2r_w) \quad (7)$$

整理后得到:

$$p = p_{iwf} - \frac{\mu q}{2\pi Kh} \ln \left(\frac{(L - r_w)r}{r_w(L - r)e^{-S}} \right) - G(r - 2r_w) \quad (8)$$

变形后可以得到流量公式:

$$Q = \frac{2\pi Kh(p_{iwf} - p - G(r - 2r_w))}{\mu \ln \left(\frac{(L - r_w)r}{r_w(L - r)e^{-S}} \right)} \quad (9)$$

式(9)中: p —任意时刻、任意径向距离处的地层压力, MPa; p_{iwf} —注水井井底流压, MPa; μ —地层原油黏度, mPa·s; B —体积系数, 常数; q —流量, m³/s; k —油层渗透率, μm²; h —油层厚度, m; L —注采井距, m; r_w —井半径, m; r —距水井的距离, m; G —启动压力梯度。

2 启动压力梯度的测定

启动压力梯度的求解方法主要包括室内试验的流量-压差法和现场的试井分析法^[5]。室内试验研究表明, 低渗透油藏启动压力梯度与地层平均渗透率呈幂指数关系, 两者之间的幂指数关系可以表述为:

$$G = \alpha K^{-n} \quad (10)$$

实验采用 T 油田低渗透天然岩心(气测渗透率为 1.52 mD~6.504 mD)进行室内驱替实验, 实验温度 20 ℃。实验利用流量-压差关系, 求取岩心启动压力梯度。

表 1 实验岩心基本数据及启动压力梯度计算一览表

序号	岩心编号	岩心长度/cm	渗透率/mD	启动压力梯度/(MPa·m ⁻¹)
1	T-1	6.82	6.504	0.016 52
2	T-2	6.464	1.52	0.061 58
3	T-3	6.79	2.61	0.038 36
4	T-4	6.76	4.39	0.024 16
5	T-5	6.96	1.71	0.055 43
6	T-6	6.726	3.15	0.032 21
7	T-7	6.585	2.37	0.041 59
8	T-8	6.73	1.38	0.067 09

由表 1 实验数据可见, 岩心渗透率越低, 其对应的启动压力梯度越大。对实验数据回归分析可以得出启动压力梯度与地层平均渗透率间幂指数公式:

$$G = 0.089 4K^{-0.886 9} \quad (11)$$

3 实例分析

T 油田某注水井井底流压为 30 MPa, 油层有效厚度 14.7 m, 平均渗透率为 $1.69 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 注采井距为 200 m, 水井半径为 0.11 m, 启动压力梯度 G 可由公式(7)得到, 压裂前表皮系数设为 0。

图 2 显示的是流量和渗透率恒定情形下, 流体黏度不同时, 对应的注采井间压力分布情况。不同黏度原油的压力分布曲线表明, 在相同的地层渗透率及单井日产量下, 原油黏度高, 则注采井间所需的注采压差要大; 原油黏度低, 注采井间所需的注采压差要小。原油黏度越大, 井底周围压力漏斗所消耗压力降在总注采压差中的比例越大, 剩余给井间地层的有效驱动压力梯度越小。

表 2 不同黏度时压降漏斗消耗一览表

黏度 μ /(mPa·s)	总压差/MPa	距注入井 10 m 压降	距生产井 10 m 压降	近井地带漏斗		剩余压力 /MPa	剩余压力梯度 /(MPa·m ⁻¹)
				总压降	梯度/(MPa·m ⁻¹)		
100	19.97	2.2	3	5.2	0.26	14.77	0.082 1
50	17.11	1.45	1.86	3.31	0.165 5	13.80	0.076 7

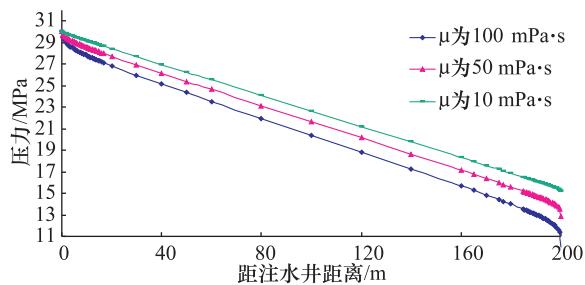


图 2 定流条件下不同黏度流体注采井间压力分布图

图 3 显示的是流量和流体黏度恒定情形下,压裂前后,表皮系数变为 -4.5 时,所对应的注采井间压力分布情况,压降漏斗同样有缩小的趋势。

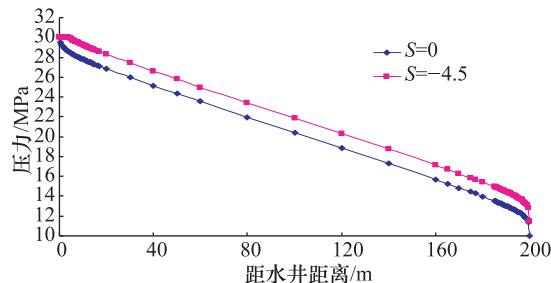


图 3 定流条件下压裂后注采井间压力分布图

图 4 显示的是流量和流体黏度恒定情形下,不同渗透率条件下,所对应的注采井间压力分布情况。在相同的地层渗透率及单井日产量下,渗透率越低,井底周围压力漏斗所消耗压力降在总注采压差中的比例越大。

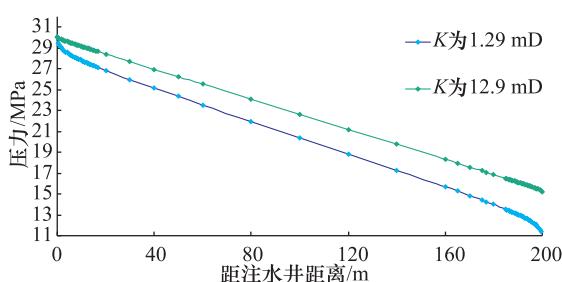


图 4 定流条件下不同渗透率间注采井间压力分布图

从以上各图可看出,在近井地带(例如距注水井或生产井井底 $0 \sim 10 \text{ m}$ 内)压力变化较快(具体数值见表 2)。

从表 2 中的数据可以得到,当黏度为 $100 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 时,近井地带的压力梯度是剩余压力梯度 3 倍,黏度为 $50 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 时,近井地带的压力梯度也达到剩余

压力梯度 2 倍。这说明有相当大一部分能量消耗在井底附近,在另一方面也进一步证实原油黏度越高,近井地带的压降漏斗压差更大,注采井间所需的注采压差也更大。

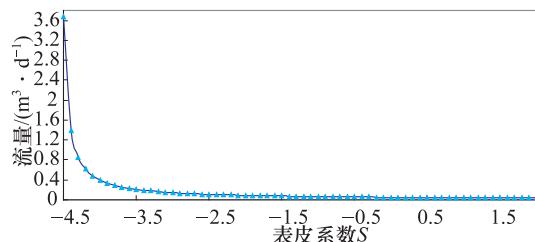


图 5 距井筒 10 米处流量随表皮系数变化示意图

鉴于此,如压裂、酸化等增产措施就主要着眼在近井地带,实施措施后,表皮系数变为负值,虽然作用距离不长,但其对油井产量的增加作用却很明显^[6]。由公式(8)可得,对于定流量 q ,当表皮系数为负值时,可以允许 p_{iwf} 较低,一定程度上降低了低渗透油藏的驱动压力梯度。由公式(9)则可以看出,在压力恒定的情形下,表皮系数为负值时,有利于生产和注入(如图 4 所示)。

同理,在近井地带采取措施如注蒸汽、就地燃烧和化学学生热剂等来降低黏度,能在一定程度上减小压降漏斗压力降,提高地层中部的有效驱动压力梯度,从而提高油井产量,而这对低孔、低渗,补充能量困难的低渗透油藏开发尤为重要。

4 结论

(1) 低渗透油藏压降漏斗在供给边缘附近下降很缓慢,而在井底附近变陡,说明流体从供给边缘到井底其能量大部分消耗在近井地带;

(2) 在前人研究的基础之上,提出了一套确定注采井间压力分布的计算方法。借助此方法,系统分析了影响低渗透油藏压降漏斗的各个因素,结果表明,黏度、渗透率、表皮系数等对压降漏斗的影响较大;

(3) 相同条件下,原油黏度越大,井底周围压力漏斗所消耗压力降在总注采压差中的比例越大,剩余给井间地层的有效驱动压力梯度越小;渗透率越低,井底周围压力漏斗所消耗压力降在总注采压差中的比例越大;

(4) 在近井地带附近,改变影响压降漏斗的影

响因素如黏度、表皮系数等,能有效提高低渗透油藏的单井产量。

参 考 文 献

- 1 李道品. 低渗透油田开发. 北京:石油工业出版社,1997
- 2 姚约东,葛家理. 低渗透油层非达西渗流规律的研究. 新疆石油地质,2000;21(3):213—215
- 3 邓英尔,刘慈群. 低渗油藏非线性渗流规律数学模型及其应用.

石油学报,2001;21(4):72—76

- 4 燕良东,朱维耀,宋洪庆. 低渗透油藏注采井间压力分布与流态响应研究. 岩土力学,2007;28(增刊):366—370
- 5 甘庆明,成 珍,成绥民. 低渗油藏非达西流启动压力梯度的确定方法. 油气井测试,2004;13(3):1—4
- 6 Economides M J, Nolte K G. 油藏增产措施. 张保平,蒋 阖,刘立云,等译. 北京:石油工业出版社,2002

Influence Factors of Low Permeability Reservoir Pressure Drop Funnel

LU Hui¹, YANG Sheng-lai¹, XIE Li²

(MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering, China University of Petroleum¹, Beijing 102249, P. R. China;
School of Physics and Technology, Yangtze University², Jingzhou 434023, P. R. China)

[Abstract] The pressure drop funnel plays an important role for well production. It can expand the drawdown pressure in the reservoir so that more reserves is produced. On the other hand the pressure drop funnel descends very slowly near the external boundary but steepens sharply near the borehole bottom, which indicates most of the energy is consumed near the wellbore. Compared with the conventional reservoirs, the pressure drop surface of the low permeability reservoir is steeper, and the energy is more difficult to complemented. In such conditions, a new pressure distribution formula of low permeability reservoir is proposed and the influence factors are systematically analyzed, based on the reservoir examples.

[Key words] low permeability reservoir pressure drop funnel influence factor pressure distribution
starting pressure gradient

(上接第 753 页)

Design of the Testing System for the Online Temperature Monitoring and the Axial Thermal Growth of High-speed Spindle

ZHOU Jin-fang¹, JIANG Wan-sheng¹, Wang Bin-zhou², CHEN Zi-li¹

(School of Mechtronic, Northwestern Polytechnical University¹, Xi'an 710072, P. R. China;
Xi'an Yingwei Tehesheng Power Sci-Tech Ltd. Co.², Xi'an 710075, P. R. China)

[Abstract] The thermal source and thermal error of the high-speed electric spindle has been studied. The test system for the online temperature Monitoring and the Axial Thermal Growth of High-Speed electric Spindle has been designed based on the IPC and the virtual instrument technology, The testing system hardware composed by the multi-purpose data acquisition card, high accuracy displacement sensor and temperature sensor, used LABVIEW to facilitate the preparation of the operation, powerful test software, and accomplished the real time acquisition, storage and playback of the signal. The experimental results demonstrate the good data acquisition capability of the testing system.

[Key words] high-speed electric spindle online temperature monitoring thermal growth multi-purpose data acquisition card virtual Instrument