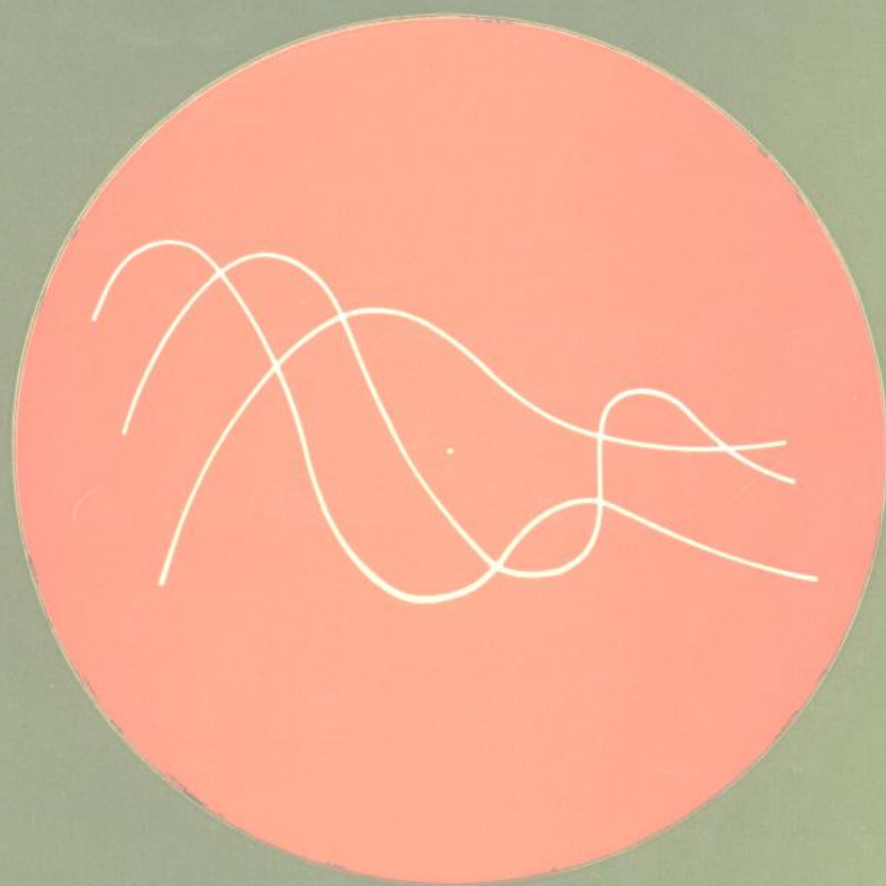


实用油气藏 工程方法

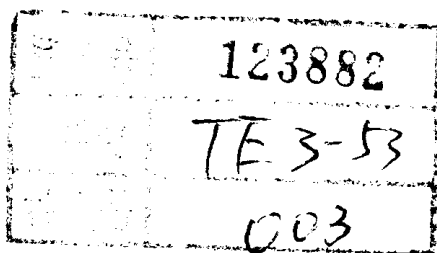
陈元干著



石油大学出版社

北京)

53



实用油气藏工程方法

陈元千 著



石油0117330

石油大学出版社

实用油气藏工程方法

Practical Petroleum Reservoir Engineering Methods

陈 元 千 著

Chen Yuanqian

石油大学出版社
Petroleum University Press

内 容 提 要

《实用油气藏工程方法》这本书,是陈元千教授的一本 52 篇的论文集。全书共有五个部分组成:第一部分是有关矿场试井方面的内容 18 篇;第二部分是有关油气田开发动态预测方面的内容 13 篇;第三部分是有关油气藏储量评价方面的内容 10 篇;第四部分是有关储层物性及其他方面的内容 7 篇;第五部分是有关油气藏工程标准化方面的内容 4 篇。本书具有理论联系实际和实用性强的特点,有一部分内容属于油气藏工程方面的基础理论研究成果。这本书有着较好的可读性和可用性,因此,可供从事油气藏工程方面的矿场技术人员使用,同时也可作为大专院校和科研单位有关人员的参考书。

实用油气藏工程方法

陈元千 著

石油大学出版社出版发行

(山东省东营市)

新华书店经销

石油大学印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/16 24.75 印张 618 千字

1998 年 4 月第 1 版 1998 年 4 月第 1 次印刷

印数 1—2000 册

ISBN7-5636-1040-5/TE·164

定价:32.00 元

序 言

承蒙北京石油科技书店和石油大学出版社的热情支持和帮助,《实用油气藏工程方法》一书,即将正式出版发行,与广大读者见面。这本书是我的第三本论文集,前两本论文集的名称为《油气藏工程计算方法》,是由石油工业出版社,分别于1990年和1991年出版发行,受到广大读者的认可和欢迎,成为石油科技书中的畅销书。这对作者本人来说,无疑是一种激励和鞭策,因而,也就促使我再下决心,作出努力,完成这本文集的整理和编写工作。在我和北京石油科技书店的董成经理和石油大学出版社的周洁韶主任的工作接触当中,使我深感他们两位对“科学技术是第一生产力”和“尊重知识、尊重人才”的认识至深。他们非常理解知识分子的苦衷,珍视科技图书的价值,热心于石油科技出版事业,积极支持我的文集出版发行。对此,我本人十分感激,并能为找到事业上的真挚朋友而高兴。

《实用油气藏工程方法》一书,共有五部分内容组成:第一部分是矿场试井,共有18篇文章;第二部分是开发动态预测,共有13篇文章;第三部分是储量评价,共有10篇文章;第四部分是储层物性及其他,共有7篇文章;第五部分是附录,共有4篇文章。在这五个部分的52篇文章中,我相信会有若干内容能引起大家的兴趣。这本书的内容,是我多年来奋力从事科研工作所取得成果的一部分。它来源于实际,形成于研究,回归于生产,因此,具有明显的针对性和实用性,并有不少新意和好读的篇章。

油气藏工程,是一门实用性很强的学科。它的主要任务在于,正确地认识油气藏和科学地开发好油气藏,因而受到广大油气藏工程师和科研工作者的重视。这门学科,在我国虽然时盛的时间不算太长,但随着我国石油工业的迅速发展、改革开放的进程和对外科技交流的扩大,它的内容和作用,逐渐被人们认识和掌握,并在油气田的开发实践中,得到了广泛的应用,取得了许多开拓性进展。我是一名油气藏工程师。我热爱自己的祖国,喜欢自己从事的事业,多年来为它孜孜不倦地追求和探索,并从中得到了许多令人欣慰的感受。在我从事科研、教学和生产工作中,常常接触到一些热心的青年朋友,他们提出希望了解我的工作经验,我想这都是好意。我们的心是相通的,想借此机会,谈一点我个人的粗浅体会。科学研究是探求未知、艰苦细致、老老实实的学问,来不得半点虚假,每前进一步,每取得一点收获,都需要全心的投入、执着的追求和忘我的拚搏,不遗余力地付出自己的热情和劳动。少说空话,多干实事,切勿好高骛远,定要脚踏实地,也是事成的重要之举。创新是科研的精髓,没有创新的意志,没有探索的热情,没有敢闯的精神,科研就无从谈起,赶超也只是一句空话。善于学习,敢于实践,勤于思考,乃是创新的重要条件。我的文章谈不上有多高的理论水平,它不是“阳春白雪”,但乐谓“下里巴人”。只要大家喜欢,可读可取可用,能解决生产实践中的实际问题,也就足矣!祖国日益繁荣昌盛,我们的事业在前进,寄希望于青年朋友的成长、建树和立业。最后,我热忱地希望,从事油气藏工程研究和实践的新、老朋友,能关注这本书的出版,并对书中可能存在的问题和不足之处,提出宝贵的指正意见。对此,我本人表示诚挚的感谢。

陈元千

1994年5月15日北京

目 录

1. 矿场试井	1
1.1 IPR 方程适用范围的判断方法及应用	3
1.2 IPR 方程的分解及对 Fetkovich 方程的推证	10
1.3 确定油井产能的简单方法	15
1.4 确定油井流动效率的两点法	22
1.5 确定油井流动效率的新方法	26
1.6 “一点法”在陕甘宁大气田上的应用	32
1.7 拟压力在“一点法”中的应用	39
1.8 利用单点测试资料建立气井产能方程的方法	46
1.9 对划分油井产能级别的建议	51
1.10 气井的绝对无阻流量及对气井产能级别划分的建议	54
1.11 油井压降曲线拟稳定阶段关系式的推导及判断方法	55
1.12 压力导数法在压降曲线解释中的新应用	64
1.13 探测半径和断层距离计算公式的推导及应用	72
1.14 利用典型曲线拟合数据确定原始地层压力的方法——对马强同志方法的补充	80
1.15 确定油气井原始地层压力和表皮系数的新方法	85
1.16 新型压力恢复曲线方程的推导及其对比与应用	94
1.17 答钟老师的质疑及讨论	106
1.18 确定气井 Vogel 参数的简单方法	113
2. 开发动态预测	119
2.1 一种新型水驱曲线关系式的理论推导及应用	121
2.2 对 Назаров(纳扎洛夫)确定可采储量经验公式的理论推导及其应用	131
2.3 Назаров(纳扎洛夫)经验公式的扩展及其应用	142
2.4 预测油气田产量和可采储量的新模型	152
2.5 面积注水的概算法(考虑油层的非均质性和水驱油的非活塞性)	161
2.6 定容气田开发规划概算法	178
2.7 确定水驱开发油田废弃产量的方法	188
2.8 水驱曲线法在大庆油田小井距开发实验井组的应用	194
2.9 水驱曲线法的分类、对比与评价	199
2.10 判断递减类型的新型典型曲线图	210
2.11 新型递减曲线方程的推导及应用	219
2.12 产量递减分析的典型曲线图及应用	224
2.13 对 Mian 经验公式的推导、扩展和应用	229
3. 储量评价	235
3.1 确定不同压力系统类型定容气藏原始地质储量的方法	237
3.2 确定异常高压气藏地质储量和有效压缩系数的新方法	244

3.3	影响油田采收率因素的分析方法	252
3.4	确定人工注水开发油田伴生产(气顶气和溶解气)采收率的方法	259
3.5	油田高含水期预测采收率的方法	264
3.6	双曲线递减的简化及确定可采储量的截距法	270
3.7	利用递减参数确定可采储量的方法	279
3.8	确定凝析油当量气体体积和凝析油含量及地质储量的方法	284
3.9	确定水驱凝析气藏采收率的方法	289
3.10	凝析气藏储量和采收率的计算方法	295
4.	储层物性及其他	313
4.1	法国 IFP 型渗透率仪计算方法的推导及应用	315
4.2	岩石压实与弹性膨胀对孔隙度和饱和度影响的研究	322
4.3	油水相对渗透率比与含水饱和度函数关系的修正及应用	332
4.4	关于平均相对渗透率曲线标准化方法的改进——兼与张凤久同志讨论	340
4.5	试谈实现注水开发油田稳产的两张“王牌”	346
4.6	谈谈发现油气探井应取得的基础动态资料	350
4.7	对屈先生文章的商榷与讨论	352
5.	附 录	357
5.1	油气藏工程常用参数(量)的符号及计量单位(SY5155—87)	359
5.2	油气藏工程常用单位之间的换算关系	371
5.3	油气藏工程常用公式单位变换举例	373
5.4	气、油、水和岩石的相关经验公式	378

1. 矿场试井

1.1 IPR 方程适用范围的判断方法及应用

提 要

IPR (Inflow Performance Relationship) 方程, 是确定油、气井产能和预测油、气井产量变化的重要方法之一, 在国内外得到了广泛的应用。但是, 由于 IPR 方程是一个二次抛物线方程, 它既带有峰值, 又有对称性变化的特点。因此, 它必然涉及到合理的应用范围问题。本文从理论上, 得到了判断 IPR 方程适用范围和确定油、气井有效测试范围的方法。通过实例的应用结果对比表明, 本文提供的方法是实用有效的。

引 言

IPR 方程是确定油、气井产能的有效方法之一。所谓油井的产能, 应包括油井的采油指数、绝对无阻流量和不同生产压差下的产量变化。然而, IPR 方程却是一个二次抛物线方程, 它具有峰值和对称性变化的特点, 因此, 就必然存在一个合理的适用范围及相应的油、气井的合理测试范围问题。本文就此问题进行了理论上的分析与讨论, 并得到了判断的标准。这对 IPR 方程的正确和合理使用是重要的。

IPR 方程有效应用范围的判断

在文献[1]中, 对于一口非完善井, 它的无因次 IPR 方程表示为:

$$q_D = (2 - V)FE p_D - (1 - V)FE^2 p_D^2 \quad (1)$$

式中未饱和油藏 ($p_R > p_b$) 和饱和油藏 ($p_R \leq p_b$) 的无因次参量及 FE 计算法列于表 1。

表 1

油藏类型	未饱和油藏 ($p_R > p_b > p_{wf}$)	饱和油藏 ($p_R \leq p_b > p_{wf}$)
q_D	$\frac{q_o - q_b}{q_{AoF}^{FE-1} - q_b}$	$\frac{q_o}{q_{AoF}^{FE-1}}$
p_D	$\frac{p_b - p_{wf}}{p_b}$	$\frac{p_R - p_{wf}}{p_R}$
FE	$\frac{p_b - p_{wf}^*}{p_b - p_{wf}}$	$\frac{p_R - p_{wf}^*}{p_R - p_{wf}}$

由(1)式可以看出, 该无因次 IPR 方程是一个二次抛物线方程。不同 FE 值的 q_D 与 p_D 的无因次关系曲线, 见图 1.1-1 所示。

由图 1 看出,不同 FE 值的无因次 IPR 曲线,是带峰的对称性曲线,并且随着 FE 值的减小,峰值的位置由左向右移动。为了确定不同 FE 曲线峰值所处的位置,对(1)式求导数后得:

$$\frac{\partial q_D}{\partial p_D} = (2 - V)FE - 2(1 - V)FE^2 p_D \quad (2)$$

当取(2)式等于 0 时,即 $\partial q_D / \partial p_D = 0$ 时,可得无因次 IPR 曲线极值(Extreme Value)点的位置为:

$$p_{De} = \frac{2 - V}{2(1 - V)FE} \quad (3)$$

根据文献[1,2]的研究,新井的沃格(Vogel)参数 $V=0.2$,则由(3)式得:

$$p_{De} = \frac{1.125}{FE} \quad (4)$$

由(4)式可以看出,无因次 IPR 曲线极值的位置,取决于流动效率 FE 的大小。随着 FE 数值的增加,无因次 IPR 曲线的峰值位置,由右向纵轴方向移动。例如,当 $FE=0.6$ 时, $p_{De}=1.875$;当 $FE=1.0$ 时, $p_{De}=1.125$;当 $FE=1.5$ 时, $p_{De}=0.75$ (图 1.1-1)。根据无因次 IPR 方程的二次抛物线性质,由图 1 可以看到,对不同 FE 值的无因次 IPR 曲线,在极值之前, q_D 随 p_D 的增加而增加;在极值之后, q_D 随 p_D 的增加而减小。这对于具有某个 FE 值的某口油(气)井来说,在 $p_D < p_{De}$ 之前的测试资料是有效的,而当 $p_D > p_{De}$ 之后的测试资料是无效的。

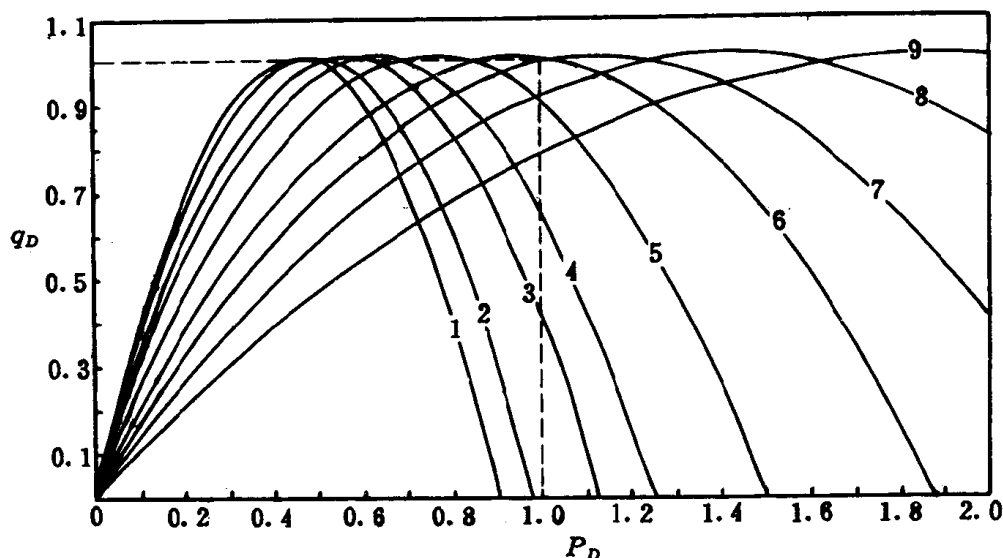


图 1.1-1 不同 FE 值的无因次 IPR 曲线图

注:1— $FE=2.5$;2— $FE=2.3$;3— $FE=2$;4— $FE=1.8$;5— $FE=1.5$;
6— $FE=1.2$;7— $FE=1.0$;8— $FE=0.8$;9— $FE=0.6$

上述分析告诉人们:当利用 IPR 方程确定油井的采油指数、绝对无阻流量和不同生产压差的产量变化时,务必注意油井稳定试井的有效测试范围,否则,不但测试结果失效,而且将会导致错误的计算结果。

对于一口新井($V=0.2$),当 $q_D=1.0$ 时,与其相应的无因次压力为 p_{DM} ,则(1)式可写为:

$$0.8FE^2 p_{DM}^2 - 1.8FE p_{DM} + 1 = 0 \quad (5)$$

解(5)式得:

$$p_{DM} = \frac{1.125(1 \pm 0.1118)}{FE} \quad (6)$$

将(4)式代入(6)式得 p_{DM} 与 p_{De} 的关系式为:

$$p_{DM} = p_{De}(1 \pm 0.1118) \quad (7)$$

由(7)式可以看出,对不同 FE 值的无因次 IPR 曲线, $q_D=1.0$ 的数值,应处在极值点 p_{De} 的两侧即 $p_{DM}=0.888p_{De}$ 和 $p_{DM}=1.1118p_{De}$ 的相应位置上(图 1.1-1)。

由于无因次 IPR 方程的有效应用范围应在极值之前,故由(6)式得:

$$p_{DM} = \frac{1.125(1 - 0.1118)}{FE} = \frac{1}{FE} \quad (8)$$

而实测油、气井的无因次压力 p_D ,必须满足如下条件,才能有效地应用 IPR 方程:

$$p_D \leq p_{DM} \quad (9)$$

为了避免湍流对油、气井稳定测井的影响,在进行多点回压试井时,不同测试点的无因次压力 p_D ,应控制在 p_{DM} 的 30%~60%。若取 $p_D=0.3\sim0.6$,则相应的 $p_{wf}=(0.4\sim0.7)p_R$ 。

有因次 IPR 方程的引导

为进行 IPR 方程适用范围的判断及应用,需对有因次 IPR 方程作以下简化性引导。

1. 未饱和油藏 ($p_R > p_b$)

当 $p_{wf} > p_b$ 时,油井的产量表示为:

$$q_o = J_o(p_R - p_{wf}) \quad (10)$$

式中

$$J_o = \frac{0.543Kh}{\mu_o B_o \left(\ln \frac{r_o}{r_w} + S \right)} \quad (11)$$

当 $p_{wf} = p_b$ 时, $q_o = q_b$, 由(10)式得:

$$q_b = J_o(p_R - p_b) \quad (12)$$

由(10)式除以(12)式得:

$$q_o = \left(\frac{p_R - p_{wf}}{p_R - p_b} \right) q_b \quad (13)$$

当 $p_{wf} < p_b$ 时,油井的产量由(1)式可表示为^[1]:

$$q_o = q_b + (q_{AOF}^{FE=1} - q_b) \left[(2 - V)FE \left(\frac{p_b - p_{wf}}{p_b} \right) - (1 - V)FE^2 \left(\frac{p_b - p_{wf}}{p_b} \right)^2 \right] \quad (14)$$

对(13)式和(14)式分别求导数后得:

$$\frac{dq_o}{dp_{wf}} = - \frac{q_b}{p_R - p_b} \quad (15)$$

$$\frac{dq_o}{dp_{wf}} = - \frac{FE(2 - V)(q_{AOF}^{FE=1} - q_b)}{p_b} \quad (16)$$

在饱和压力点的导数相等,由(15)式和(16)式相等得下式:

$$q_{AOF}^{FE=1} - q_b = \frac{q_b p_b}{FE(2 - V)(p_R - p_b)} \quad (17)$$

将(17)式代入(14)式得:

$$q_o = q_b \left[1 + \frac{p_b - p_{wf}}{p_R - p_b} - \frac{FE(1-V)(p_b - p_{wf})^2}{p_b(2-V)(p_R - p_b)} \right] \quad (18)$$

再将(12)式代入(18)式得:

$$q_o = J_o \left[(p_R - p_{wf}) - \frac{FE(1-V)(p_b - p_{wf})^2}{p_b(2-V)} \right] \quad (19)$$

将(19)式改写为下式:

$$J_o = \frac{q_o}{(p_R - p_{wf}) - \frac{FE(1-V)(p_b - p_{wf})^2}{p_b(2-V)}} \quad (20)$$

当由 PVT 取样分析, 确知油藏的饱和压力 p_b 之后, 利用饱和压力以下任意测试点的 q_o 和 p_{wf} 数值, 可由(20)式计算测试井单相流动条件下的采油指数。该采油指数可用于井间的产能对比。

对于一口非完善井, 当 $p_{wf}=0$ 时, $q_o=q_{AOF}^{FE \neq 1}$, 由(14)式和(19)式分别得:

$$q_{AOF}^{FE \neq 1} = q_b + (q_{AOF}^{FE=1} - q_b)[(2-V)FE - (1-V)FE^2] \quad (21)$$

$$q_{AOF}^{FE \neq 1} = J_o \left[p_R - \frac{FE(1-V)p_b}{(2-V)} \right] \quad (22)$$

由(21)式和(22)式得下式:

$$q_{AOF}^{FE=1} = q_b + \frac{J_o \left[p_R - \frac{FE(1-V)p_b}{(2-V)} \right] - q_b}{(2-V)FE - (1-V)FE^2} \quad (23)$$

2. 饱和油藏($p_R \leq p_b$)

当 $p_b = p_R$ 和 $q_b = 0$ 时, 由(14)式、(20)式、(21)式、(22)式和(23)式, 可以分别得到溶气驱的关系式:

$$q_o = q_{AOF}^{FE=1} \left[(2-V)FE \left(\frac{p_R - p_{wf}}{p_R} \right) - (1-V)FE^2 \left(\frac{p_R - p_{wf}}{p_R} \right)^2 \right] \quad (24)$$

$$J_o = \frac{q_o}{(p_R - p_{wf}) \left[1 - \frac{FE(1-V)(p_R - p_{wf})}{p_R(2-V)} \right]} \quad (25)$$

$$q_{AOF}^{FE \neq 1} = q_{AOF}^{FE=1} [(2-V)FE - (1-V)FE^2] \quad (26)$$

$$q_{AOF}^{FE \neq 1} = J_o p_R \left[1 - \frac{FE(1-V)}{(2-V)} \right] \quad (27)$$

$$q_{AOF}^{FE=1} = \frac{J_o p_R \left[1 - \frac{FE(1-V)}{(2-V)} \right]}{(2-V)FE - (1-V)FE^2} \quad (28)$$

方法应用举例

为了说明本文提供方法的有效性和可靠性, 下面引用文献[3]中的例题进行求解计算, 以方便于结果的对比。

1. 例题 1

已知某未饱和油藏: $p_R = 27.579$ MPa; $p_b = 20.684$ MPa; 油井单点测试的 $q_o = 95.39$ m³/d 和 $p_{wf} = 13.789$ MPa; 由于这是一口完善的新井, 故 $FE = 1.0$ 和 $V = 0.2$ 。试求该井的 J_o 、 q_b 和 $q_{AOF}^{FE=1}$ 的数值, 并预测在 $p_{wf} = 24.131$ MPa 和 $p_{wf} = 6.895$ MPa 的井底流动压力条件下, 油井的

产量 q_o 是多大。

(1) 井底流动压力有效性判断

已知该测试井的 $FE=1.0$, 故由(8)式可得 $p_{DM}=1.0$ 。当 $p_{wf}=13.789$ MPa 时, $p_D=(p_b-p_{wf})/p_b=(20.684-13.789)/20.684=0.333$; 当 $p_{wf}=24.131$ MPa 时, 已大于 p_b 值, 只能用单相流的(10)式求 q_o 的数值; 当 $p_{wf}=6.895$ MPa 时, $p_D=(20.684-6.895)/20.684=0.667$ 。由于饱和压力以下两个 p_{wf} 的 p_D 都小于 p_{DM} 的数值, 故都能用 IPR 方程求 q_o 的数值。

(2) 求 J_o 值

将已知参数代入(20)式得:

$$J_o = \frac{95.39}{(27.579 - 13.789) - \frac{1.0(1 - 0.2)(20.684 - 13.789)^2}{20.684(2 - 0.2)}} \\ = 7.47 \text{ m}^3/(\text{MPa} \cdot \text{d})$$

(3) 求 q_b 值

将已知参数代入(12)式得:

$$q_b = 7.471(27.579 - 20.684) = 51.51 \text{ m}^3/\text{d}$$

(4) 求 $q_{AOF}^{FE=1}$ 值

将已知参数代入(23)式得:

$$q_{AOF}^{FE=1} = 51.51 + \frac{7.471 \left[27.579 - \frac{1.0(1 - 0.2) \times 20.684}{(2 - 0.2)} \right] - 51.51}{(2 - 0.2) \times 1 - (1 - 0.2) \times 1^2} \\ = 137.37 \text{ m}^3/\text{d}$$

(5) 求 $p_{wf}=24.131$ MPa 压力下的 q_o 值

将已知参数代入(10)式得

$$q_o = 7.471(27.579 - 24.131) = 25.76 \text{ m}^3/\text{d}$$

(6) 求 $p_{wf}=6.895$ MPa 压力下的 q_o 值

将已知参数代入(19)式得:

$$q_o = 7.471 \left[(27.579 - 6.895) - \frac{1.0(1 - 0.2)(20.684 - 6.895)^2}{20.684(2 - 0.2)} \right] \\ = 124.03 \text{ m}^3/\text{d}$$

2. 例题 2

已知某饱和油藏($p_R \leq p_b$): $p_R=17.926$ MPa; 油井单点测式的 $q_o=79.49$ m³/d 和 $p_{wf}=12.410$ MPa; 由压力恢复曲线资料确定的 $FE=0.6$; $V=0.2$ (新井); 试求该井的 J_o 、 $q_{AOF}^{FE=0.6}$ 和 $q_{AOF}^{FE=1}$ 值, 并预测该井在 $p_{wf}=8.963$ MPa 条件下, $FE=0.6$ 、 1.0 和 1.3 时的 q_o 数值。

(1) 井底流动压力有效性判断

已知该井测试的 $FE=0.6$, 故由(8)式得 $p_{DM}=1.667$; 而测试点的 $p_D=(p_R-p_{wf})/p_R=(17.926-12.410)/17.926=0.308$ 。由于 $p_D < p_{DM}$, 故可用 IPR 方程求解。

(2) 求 J_o 值

将已知参数代入(25)式得:

$$J_o = \frac{79.49}{(17.926 - 12.410) \left[1 - \frac{0.6(1 - 0.2)(17.926 - 12.410)}{17.926(2 - 0.2)} \right]}$$

$$= 15.698 \text{ m}^3/(\text{MPa} \cdot \text{d})$$

(3) 求 $q_{AOF}^{FE=0.6}$ 值

将已知参数代入(27)式得:

$$q_{AOF}^{FE=0.6} = 15.698 \times 17.926 \left[1 - \frac{0.6(1-0.2)}{(2-0.2)} \right] = 206.40 \text{ m}^3/\text{d}$$

(4) 求 $q_{AOF}^{FE=1}$ 值

将已知参数代入(28)式得:

$$q_{AOF}^{FE=1} = \frac{15.698 \times 17.926 \left[1 - \frac{0.6(1-0.2)}{(2-0.2)} \right]}{(2-0.2) \times 0.6 - (1-0.2) \times 0.6^2} = 260.6 \text{ m}^3/\text{d}$$

(5) 预测 q_o 的数值

当 $p_{wf}=8.963$ 时,若 $FE=0.6, 1.0, 1.3$ 和 2.0 时,对不同的 FE 值下, p_{wf} 有效性的判断及 q_o 的计算结果列于表 2。

表 2

参数	FE			
	0.6	1.0	1.3	2.0
p_R (MPa)	17.926	17.926	17.926	17.926
p_{wf} (MPa)	8.963	8.963	8.963	8.963
p_{DM} , 由(8)式	1.667	1.0	0.769	0.5
$p_D = \frac{p_R - p_{wf}}{p_R}$	0.5	0.5	0.5	0.5
q_o (m ³ /d), 由(24)式	121.96	182.42	216.82	260.60

在表 2 中,不同 FE 值的 p_{DM} 值都大于 p_D 值,即 $p_D \leq p_{DM}$,因此,皆可利用 IPR 方程求解。由表 2 预测的 q_o 值来看,当改善油井的完善条件时,即增加 FE 的数值,在相同的生产压差下,油井的产量发生明显的增加。因此,对于不完善的油井(当 $FE < 1.0$ 时)应用增产措施,则是必不可少的。

结 论

1. 目前广泛应用于油、气井产能预测中的 IPR 方程,是一个二次抛物线方程,因此,它存在着一个有效的适用范围问题。本文从理论上得到了确定这一适用范围的判断标准,并相应地提出了矿场稳定回压试井的有效压力测试条件。

2. Vogel(沃格)方程的绝对无阻流量 $q_{AOF}^{FE=1}$,是完善井($FE=1$),当 $p_{wf}=0$ 时的最大理论产量。对于不完善井($FE \neq 1.0$),当 $p_{wf}=0$ 时的绝对无阻流量,表示为 $q_{AOF}^{FE \neq 1}$ 。本文得到了两者的关系式。而 Vogel 的 $q_{AOF}^{FE=1}$,是当 $FE=1.0$ 和 $V=0.2$ 时,本文(1)式的特定值。对于新井或投产初期的油井, V 值均可采用 0.2。

3. 通过两个例题的应用表明,本文提供的判断 IPR 方程适用范围的方法是有效的。两个例题的计算结果,同文献[3]第 2 章的例题 8 和例题 11 完全相同。这也表明,本文提供的方法是正确的。

符号及单位注释

- $q_{AOF}^{FE=1}$ ——完善井($FE=1.0$), $p_{wf}=0$ 时的绝对无阻流量, m^3/d ;
 $q_{AOF}^{FE\neq 1}$ ——不完善($FE\neq 1.0$), $p_{wf}=0$ 时的绝对无阻流量, m^3/d ;
 q_D ——无因次产量;
 q_o ——油井产量, m^3/d ;
 q_b —— $p_{wf}=p_b$ 时的油井产量, m^3/d ;
 J_o ——油井单相流动时的采油指数, $m^3/(MPa \cdot d)$;
 p_R ——地层压力, MPa ;
 p_b ——饱和压力, MPa ;
 p_{wf} ——不完善井的井底流动压力, MPa ;
 p_{wf}^* ——完善井的井底流动压力, MPa ;
 p_D ——无因次压力;
 p_{De} ——极值点的无因次压力;
 p_{DM} ——与 $q_D^{FE=1}=1.0$ 或 $q_D^{FE\neq 1}=1.0$ 相应的无因次压力;
 FE ——流动效率, 当 $FE=1.0$ 为完善井; 当 $FE<1.0$ 为非完善井; 当 $FE>1.0$ 为超完善井;
 V ——沃格(Vogel)参数, 它与采出程度、压力消耗程度有关。对于新井或投产初期的井, $V=0.2$; 对于老井可由系统式井资料确定其大小^[1];
 K ——有效渗透率, $10^{-3} \mu m^2$;
 h ——有效厚度, m ;
 μ_o ——地层原油粘度, $mPa \cdot s$;
 B_o ——地层原油体积系数;
 r_e ——供给半径, m ;
 r_w ——井底半径, m ;
 S ——表皮系数。

参考文献

- [1] 陈元千: 无因次 IPR 曲线通式的推导及线性求解方法, 石油学报, 1986 年第 2 期第 63~73 页。
- [2] J. V. Vogel: Inflow Performance Relationship for Solution Gas wells, JPT (Jan., 1968) P. 83~92.
- [3] K. E. Brown: The Technology of Artificial Lift Methods, 1984, Vol. 4, Chapter 2, P. 13~22.

1.2 IPR 方程的分解及对 Fetkovich 方程的推证

摘 要

本文通过对文献[1]推导的 IPR 方程进行分解,得到了与 Fetkovich 方程^[2]形式不同,而实质相同的方程式,且证明 Fetkovich 方程是本文提供分解方程的一个特例。

引 言

IPR(Inflow Performance Relationship)方程,是油藏工程中很有用的技术方法。在单点测试的条件下,它可用于确定油井的绝对无阻流量和预测油井产量随井底流压变化的 IPR 曲线。该曲线在我国俗称为指示曲线。对于地层压力高于饱和压力的未饱和油藏和地层压力等于饱和压力的饱和油藏,在考虑油井的非完善性和地层压力消耗程度影响的条件下,IPR 方程的通式,已由文献[1]推导得到。本文对该通式进行分解,可以加深对 IPR 方程的理解,并可对广泛应用的 Fetkovich 方程^[2~4]进行有效的推证。同时,证明了 Fetkovich 方程,是当 $FE=1$ 和 $V=0.1$ 时,本文 IPR 分解方程的一个特例。

IPR 方程的分解及对比

1. 对于地层压力高于饱和压力的未饱和油藏

当井底流动压力大于或等于饱和压力($P_{wf} \geq P_b$)时的 IPR 方程可表示为:

$$q_o = J_o(P_R - P_{wf}) \quad (1)$$

式中

$$J_o = \frac{0.543Kh}{B_o\mu_o \left(\ln \frac{r_e}{r_w} - \frac{3}{4} + S \right)} = \frac{0.543Kh}{B_o\mu_o \left(\ln \frac{0.472r_e}{r_w} + S \right)} \quad (2)$$

当 $P_{wf} = P_b$ 时,由(1)式得:

$$q_b = J_o(P_R - P_b) \quad (3)$$

对于地层压力高于饱和压力,而井底流动压力低于饱和压力,即($P_R > P_b > P_{wf}$),由文献[1]得到的 IPR 通式为:

$$q_o = q_b \left[1 + \frac{P_b - P_{wf}}{P_R - P_b} - \frac{FE(1-V)(P_b - P_{wf})^2}{P_b(2-V)(P_R - P_b)} \right] \quad (4)$$

将(3)式代入(4)式得 IPR 方程的分解形式为:

$$q_o = J_o(P_R - P_{wf}) - \frac{J_o FE(1-V)(P_b - P_{wf})^2}{P_b(2-V)} \quad (5)$$

由(5)式可以看出,当 $P_b > P_b > P_{wf}$ 时,油井的产量由两部分组成:第一部分为,当井底流动压力大于饱和压力时的油井产量;第二部分为,当 $P_{wf} < P_b$ 时,由于在井底附近地带的两相流动区,以及流动效率(FE)和压力消耗程度参数(V)的影响,对油井产量的减少量。

对于新井,当 $FE=1.0$ 和 $V=0.2$ 时,由(5)式得到可以与 Fetkovich 方程对比的简化式如下: