

[美] E.H.Timmerman

实用油藏工程

第 二 卷

利用方程式与计算机分析结果的方法

武若霞 崔耀南 周成勋 译 陈元千 校

石油工业出版社

TE34
021

069923

实用油藏工程

第二卷

利用方程式与计算机分析结果的方法

〔美〕 E.H.Timmerman

武若霞 崔耀南 周成勋 译 陈元千 校



200421935

石油工业出版社

内 容 提 要

本套书分两卷。第一卷叙述了如何确定最佳岩性参数、流体物性、工程参数和试井参数。第二卷系统介绍了不同类型油气藏的驱替机理、提高采收率的方法和开发经济分析。较好地解决了用计算机求解油藏工程的关键问题。

本书系第二卷，内容全面、实用。既可作为油气藏工程技术人员的参考书，又可供院校师生参考。

Practical Reservoir Engineering

PART II

Methods for analyzing output from equation and computers

E. H. Timmerman

PennWell Publishing Company Tulsa, Oklahoma, 1982

实用油藏工程

第 二 卷

利用方程式与计算机分析结果的方法

〔美〕 E. H. Timmerman

武若霞 崔耀南 周成勋 译 陈元千 校

石油工业出版社出版

（北京安定门外安华里二区一号楼）

北京地质印刷厂排版

北京市顺义县曙光印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092 毫米 16 开本 28 印张 703 千字 印 1—2,000

1992 年 8 月北京第 1 版 1992 年 8 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-0605-7/T·E·576

定价： 14.20 元

目 录

第六章 天然气藏的分析	1
§ 1 p/z 方法	1
§ 2 四点法	3
§ 3 应用方程式分析	3
§ 4 气井开采晚期的指数递减	13
§ 5 不稳定流阶段的流动测试分析	14
§ 6 气井的非达西流动	22
第七章 油、气地质储量的确定	26
§ 1 容积法公式	26
§ 2 物质平衡法	27
§ 3 物质平衡图解法	31
§ 4 向边水区注水维持压力时扩展的物质平衡方程式	36
§ 5 产量相对稳定时扩展的物质平衡方程式	40
第八章 相对渗透率的概念	54
§ 1 计算气驱油采收率的 Welge 方法	58
§ 2 根据实验室气驱资料计算相对渗透率比	60
第九章 油、气和水的锥进	63
§ 1 均质油层水、气指进与锥进的 Arthur 方法	69
§ 2 Muskat 和 Wyckoff 提供的水锥曲线	72
§ 3 Chaney 等人的水锥曲线	74
§ 4 Chierici、Ciucci 及 Pizzi 的水锥曲线	76
§ 5 气井的 Trimble-Rose 方法	78
§ 6 预测水锥进时间的 Sobocinski 及 Cornelius 方法	80
§ 7 Richardson 等人通过注入流体控制水锥的方法	81
§ 8 通过在油水界面以下射孔控制水锥的 Shell 方法	82
第十章 溶解气驱机理	83
§ 1 递减曲线分析	84
§ 2 根据油田动态计算采收率	87
§ 3 溶解气驱机理的相似组合	90
§ 4 理论计算	91
第十一章 重力驱动	106
§ 1 沿层面驱动的基本概念和公式	106
§ 2 理想条件下的重力驱采收率	109
§ 3 沿层面和垂向的重力驱动	109
§ 4 水注入气顶的重力分异	113

§ 5	开采“阁楼”油	115
§ 6	溶解气驱后枯竭油田的重力驱动	118
第十二章	水驱油藏的渗吸开采	122
第十三章	天然水驱开采	130
§ 1	根据类比和矿场研究估算采收率	130
§ 2	确定水驱采收率的理论方法	132
§ 3	预测注水动态的 Hooykass 方法	139
§ 4	分析水驱油藏的曲线	152
§ 5	边水驱动	156
§ 6	薄油柱	158
§ 7	底水驱动	161
§ 8	裂缝油藏	166
第十四章	采收率	170
§ 1	三次采油设计	179
§ 2	实验室及矿场资料的应用	182
§ 3	垂向波及系数	189
§ 4	平面波及系数	194
§ 5	注水试验	201
第十五章	注水	205
§ 1	Chesnut 方法	205
§ 2	类比法和经验法	208
§ 3	理论预测与油田动态的对比	211
§ 4	注水递减曲线的分析	212
§ 5	注水量 (Prats 方法)	216
§ 6	Craig 方法	225
§ 7	注水现场管理工作	244
第十六章	天然裂隙和人工裂缝	249
§ 1	压裂机理	251
§ 2	压裂梯度	261
§ 3	天然裂缝的定位	266
§ 4	天然裂缝	270
§ 5	垂向裂缝对油藏动态的影响	287
§ 6	致密油气层的开发	306
第十七章	提高原油采收率 (EOR) 方法	312
§ 1	聚合物驱	312
§ 2	混相驱	313
§ 3	热采方法	322
§ 4	胶束驱	348
§ 5	采掘法、电加热法和核加热法	349
第十八章	经济	350

§ 1	当今世界各国经济上的互相依赖·····	350
§ 2	收入·····	351
§ 3	通货膨胀·····	352
§ 4	利润准则·····	363
§ 5	年均赢利能力 (AAEP) ·····	366
§ 6	加速型项目·····	368
§ 7	评价风险性所用的数学概念·····	370
§ 8	回归分析和显著性检验·····	375
§ 9	风险分析·····	380
§ 10	能源需求、储量和消费预测·····	389
附录A	应用图、表预测气井的产量—时间—压力 ·····	396
附录B	延期系数或贴现率 ·····	435

第六章 天然气藏的分析

在第一卷中涉及到了运移、特性、流动、试井程序及分析。天然气粘度低,与油相比,能从渗透率很低的储层中经济地将其开采出来。埋藏浅时,原始压力及采收率均低。在中到高压气藏,当压力衰竭时,采收率可达80%至90%以上。水驱会使采收率降低到60%左右。由于水侵与时间有关,因此高速开采是减少水的不利影响的一种途径。

§1 p/z 方法

天然气的有效体积可用体积公式确定。当没有水侵入气藏时,天然气的地质储量与随时间而下降的压力有关。如果测定了足够的压力数据,能够得到不同时间的可靠平均气藏压力及累积产量,利用 p/z 与累积产气量的关系图,可以得到原始天然气地质储量。如果能估算井底流压,则可用公式确定任何压力下的产量。这些数据与产量有关。

图6-1描述了气藏的压力动态,但当存在水驱时,不能反映采收率。水明显地降低了

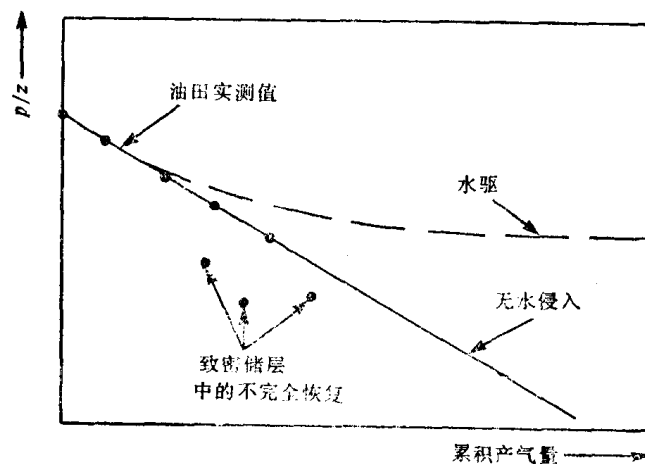


图 6-1 典型的 p/z 曲线

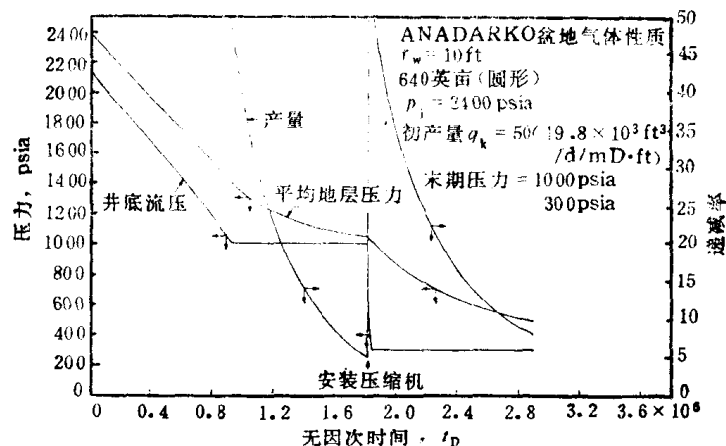


图 6-2 典型的气藏动态

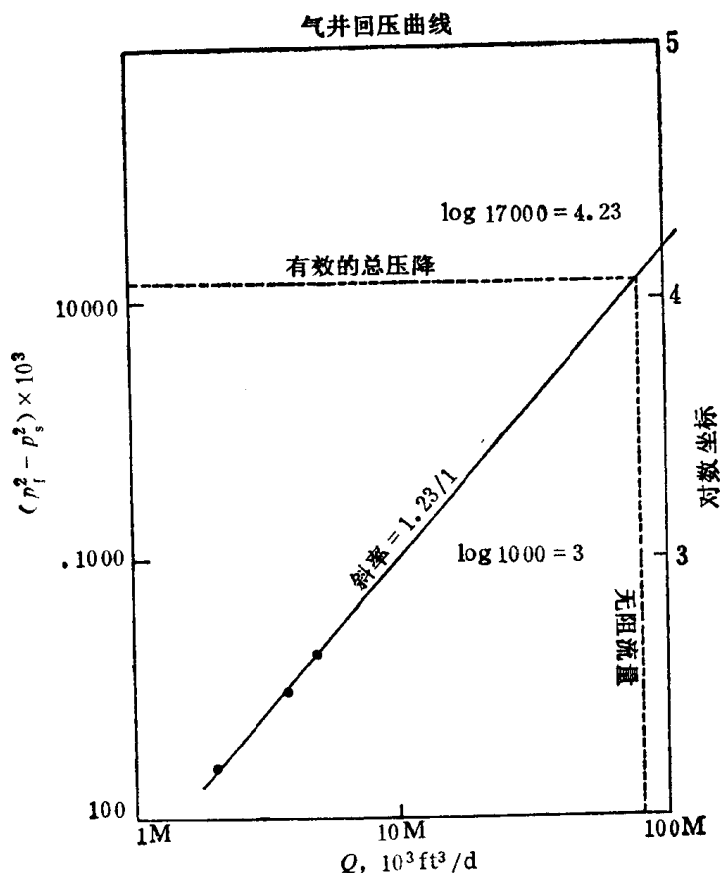


图 6-3 气井的四点压力流量测试

回压试井数据

国王 1 号井

油田: Mims 县; Lavaca 州; 得克萨斯 试井日期: 1944.9.25—26; 射孔井段: 7716—7750 ft

井况: 井底压力: 3493 psia (计算的)

井底温度: 230 (估算的)

液柱相对密度: 0.72 (分析的)

所下油管: 2 in 油管下至 7660 ft 4 in × 2 1/2 in 挡板; 压力为 14.4 psia 时点燃气相对密度为 0.683

— in × — in 挡板: 大罐蒸汽相对密度为 1.15

油嘴尺寸	油压	套压	压差	静压	温度 °F	气量 10 ³ ft ³ /d
3/8①	2379	2747	48.5	520	73	6500
5/16	2592	2787	36.0	390	71	4900
1/4②	2684	2802	23.5	360	64	3853
3/16	2788	2819	7.2	358	73	2100
S. l.	2815	2837	—	—	—	—

无阻流量资料

油嘴尺寸	P_s	P_i^2	P_i	P_i^2	$(P_i^2 - P_s^2)$	气量 10 ³ ft ³ /d
5/16	3431	11776	3493	12201	425	4900
1/4	3449	11894	3493	12201	307	3853
3/16	3471	12046	3493	12201	155	2100
S. l.	3493	12201	3493	12201	0	—

由曲线得绝对无阻流量为 80000 × 10³ ft³/d

生产试井数据

油嘴尺寸	燃烧气 10 ³ ft ³ /d	大罐蒸汽 ft ³ /d	蒸馏液 bbl/d	燃烧气蒸馏液比	大罐气蒸馏液比	总比率	bbl/10 ⁶ ft ³ 蒸馏液 水	比重 °API
1/4	3853	21958	93.3	41296	235	41500	24.2 2.0	55

注: ① 该点由于稳定时间不够, 未用于求无阻流量。

② 该油嘴下取样。

驱替效率并增加了作业中的问题。水也降低了岩石的渗透率 and 提高了废弃压力。如果气藏中存在可动水时, 应尽力防止水的侵入, 不要射开水层。图 6-2 表示一口典型气井的动态。

§ 2 四 点 法

当产层非常好且并不要求进行压裂时, 此方法可预测气井动态。如图 6-3 所示, 流量与在半稳态下生产的井的平均气藏压力和井底流压的平方差有关。由于流压可以确定, 因而当井未遇到表皮系数的改变、湍流和水侵入气区等情况时, 流量与不同流动条件下的平均气藏压力有关。该结果可与时间及累积产量相匹配, 以用于经济分析。

遗憾的是, 当渗透率小于 200 md 和气井井网密度为 640 英亩时, 四点法是不可靠的。通过应用四点的连线和等效半稳态流, 等时方法可适用于更低的渗透率情况。使用较长的生产与关井时间, 能使这些方法得以扩展。

大多数国家的管理机构所颁布的细则中, 都提出了气井的四点法试井。其中最好的一个方法是阿尔伯达油气保护委员会发行的“气井试井理论与实践”中提到的。遗憾的是, 尽管如此, 当储层差时, 四点法试井仍然不是一口井产气能力的最好标志。

当前涉及计算机程序的论文

- | | |
|------------|---|
| Burnett | "Calculator Gives Compressibility Factors," <i>O&GJ</i> , June 11, 1979. |
| Carter | "Gas Well Open Flow Potential is Simplified." <i>O&GJ</i> , December 3, 1979. |
| Freeman | "Orifice Gas Flow Calculated Without Tables," <i>O&GJ</i> , March 1981. |
| Hollo | "Computer Program Using Four-Point Procedures," <i>O&GJ</i> , July 27, 1981. |
| Keplinger | <i>TI-59 Reservoir Engineering Manual</i> , Penn-Well Books, 1980. |
| Meehan | "Predicting Gas in Place in Abnormal Reservoirs," <i>Pet. Eng.</i> , June 1981. |
| | "Gas Computations Give Pseudocritical Values." <i>O&GJ</i> , December 8, 1981, |
| Odem | "Natural Gas Physical Properties from Programmable Calculator," <i>O&GJ</i> , May 12, 1980. |
| Rosepiller | "Water Determination." <i>O&GJ</i> , July 13, 1981. |
| Robinson | "Calculation of Gas Condensate," <i>O&GJ</i> , September 17, 1979. |
| Straight | "Routine Evaluation of Gas-Well Performance," <i>O&GJ</i> , June 1, 1981 |
| Turner | "Gas Well Bottom-Hole Pressure," <i>Pet. Eng.</i> , July 1979. |

§ 3 应用方程式分析

将两个基本流动方程表达为 $m(p)$ 函数。径向不稳定流方程为:

$$m(\bar{p}) - m(p_w) = 1637 q_{sc} T/kh (\log kt/\phi \mu c r_w^2 - 3.23 + 0.87 s + 0.87 Dq_{sc})$$

径向半稳态方程为:

$$m(\bar{p}) - m(p_{wf}) = 1423 q_{sc} T/kh [\ln(r_e/r_w) - 0.75 + s + Dq_{sc}]$$

在这两个方程中, p_{sc} 是 14.7 psi, T_{sc} 为 520°R。如果地面压力与产量是以合适的时间记录下来, 对于低产井通常以天或周记录的话, 则每次生产与关井周期, 代表一次不稳定试

井。使用这种资料能消除大多数特殊点的试井资料。

3.1 不稳定试井分析

在一些理想的条件下，下列表格在分析生产和恢复试井资料中是会有帮助的。

3.1.1 用于压力恢复与降落试井不稳定流分析中的时间段

日期_____

井_____

公司_____

(1) 计算所用的资料

K _____ md 气体相对密度 _____ 井密 _____ 英亩/井

ϕO _____ r_e _____ ft r_e^2 _____ ft²

μ _____ cp r_w _____ ft r_w^2 _____ ft²

h _____ ft P _____ psia P_{wf} _____ psia

T _____ F L_i _____ ft = 裸眼段深度

P_i/P_w _____ L_f _____ ft = 两侧总裂缝长度的 1/2

$$C_t = S_o C_o + S_g C_g + S_w C_w + C_f$$

$$= 0. \text{ } \times \text{ } + 0. \text{ } \times \text{ } + 0. \text{ } \times \text{ } + \text{ }$$

$$= \text{ } + \text{ } + \text{ } + \text{ }$$

$$= \text{ } \text{psia}^{-1}$$

(2) 不稳定分析中有时段的计算

通式:

$$t_{De} = 0.000264 kt / \Phi \mu cr_e^2;$$

$$t = t_{De} \Phi \mu cr_e^2 / 0.000264 k$$

假定一个 k 值，若随后的计算有明显错误，则使用尽可能好的值再重复计算。如果压力差别大，则应用平均的 pvt 参数，如必要可加以校正。

A. 不稳定流开始的时间: $t_{De} = 0.005$

$$t = 0.005 \times 0. \text{ } \times \text{ } \times \text{ } \times \text{ } / 0.000264 \times \text{ }$$

$$= \text{ } \text{小时}; \text{ } \text{天}; \text{ } \text{年}$$

B. 不稳定流结束的时间: $t_{De} = 0.1$

$$t = \text{ } \text{小时}; \text{ } \text{天}; \text{ } \text{年}$$

这个时间 20 倍于上述不稳定流开始的时间。

C. 半稳态流开始的时间: $t_{De} = 0.3$ = 井干扰?

$$t = \text{ } \text{小时}; \text{ } \text{天}; \text{ } \text{年}$$

该时间 3 倍于上述计算的不稳定流结束的时间。

D. 井筒效应可忽略的时间 (线性流开始)

1) $t = 114800 \mu cr_w^2 / L_i / kh$

$$= 114800 \times \text{ } \times \text{ } \times \text{ } \times \text{ } / \text{ } \times \text{ }$$

$$= \text{ } \text{小时}; \text{ } \text{天}; \text{ } \text{年}。$$

2) 当 $BHP-THP$ 与时间关系曲线的斜率等于原始值 10% 的时间

$$t = \text{ } \text{小时}; \text{ } \text{天}; \text{ } \text{年}。$$

3) 当 P 与 $\sqrt{t}$ 的关系呈直线的时间

4) 当 P_D 与 t_{De} 关系偏离斜率 1 (对数坐标) 或井筒效应结束时的时间

5) 当 P_D 与 t_{De} 关系达到斜率的 1/2 时 (对数坐标) 或线性流开始的时间

E. 不稳定径向流开始的时间 (用 P , P^2 或 $m(p)$)

- 1) 当 P 与 $\sqrt{t}$ 从直线开始变曲线的时间
- 2) 当 P 与 $\ln \Delta t$ 呈直线关系的时间
- 3) 当压力降超过线性流压力降 2 倍的时间
- 4) 当 P_D 与 t_{D^*} 曲线偏离 1/2 斜率的时间 (对数坐标)

F. 当压裂井湍流结束的时间: $r_w' = r_w e^{-t} = 1/4$ 裂缝 $= 1/2 L_f$

$$t = 40000 \phi \mu c L_f^2 / k$$

$$= 40000 \times 0. \quad \times \quad \times \quad \times \quad \times \quad / \quad$$

$$= \quad \text{小时}; \quad \text{天}; \quad \text{年}。$$

G. 径向不稳定流开始的时间

$$t = \quad \text{小时}; \quad \text{天}; \quad \text{年}; \quad \text{分}。$$

注: 不稳定阶段可由于储层及所含流体的很多特性而加长和复杂化。

附注:

3.1.2 气井的压降和压力恢复分析〔在常数产量下用 $m(p)$ 方法〕

日期

井号

公司

(1) 计算所用的基本数据

$$P_i/P_{wf} \quad \text{psia} \quad m(p_i) \quad \text{psia}^2/\text{cp} \quad (\text{来自曲线}) \quad m(P_i) \quad \text{psia}^2/\text{cp} \quad q_{sc} \quad 10^3 \text{ ft}^3/\text{d}$$
$$m(P_{wf}) \quad \text{psia}^2/\text{cp} \quad T \quad F, 460 + \quad = \quad ^\circ\text{R} \quad h \quad \text{ft} \quad Q \quad 10^3 \text{ ft}^3/\text{d}$$
$$r_w \quad \text{ft} \quad t \quad \text{h} = 24 Q/q_{sc} = 24 \times \quad / \quad \quad r_w^2 \quad \text{ft}^2 \quad \Delta t \quad \text{h} \quad \phi 0. \quad m \quad \text{psia}^2/\text{cp}$$
$$= (\text{曲线斜率}) \quad c_s = S_g C_g = 0. \quad \times \quad = \quad \text{psia}^{-1}$$

(2) 计算渗透率

通式: $k h = 57900 q_{sc} P_{sc} T/T_{sc} m = 1637 T q_{sc}/m$ (当 P_{sc} 为 14.7, T_{sc} 为 520°R 时)

$$k h = 1637 \times \quad \times \quad / \quad = \quad \text{mD ft}$$

$$k = \quad / \quad = \quad \text{mD}$$

(3) 计算表皮系数 (若有湍流也包括在内)

$$\text{压降试井: } S' = 1.151 [(p_i - p_{1hr}) / m - \lg(k / \phi \mu' c r_w^2) + 3.23]$$

$$\text{压力恢复: } S' = 1.151 [(p_{1hr} - p_{wf}) / m - \lg(k / \phi \mu' c r_w^2) + 3.23]$$

$$S' = 1.151 [(\quad - \quad) / \quad - \lg(\quad / 0. \quad \times \quad \times \quad \times \quad) + 3.23]$$
$$= 1.151 (\quad - \quad + 3.23) = 1.151 \times \quad = \quad (\text{若有湍流, 则与产量有关})$$

(4) 计算非达西流动项 (必用 2 个产量生产过)

$$S' = S + Dq \quad (\text{每个产量 } F), \quad q_1 \quad 10^3 \text{ ft}^3/\text{d}; \quad q_2 \quad 10^3 \text{ ft}^3/\text{d}$$

$$\text{第一个产量 } F: \quad = S + \quad D; \quad S = \quad - \quad D$$

$$\text{第二个产量 } F: \quad = S + \quad D; \quad S = \quad - \quad D$$

$$\quad D = \quad; \quad D = \quad (10^3 \text{ ft}^3/\text{d})^{-1}; \quad S = \quad - \quad \times \quad; \quad S = \quad$$

(5) 计算采油指数、流动效率和污染比

$$\Delta p_{\text{表皮}} = m \times 0.87 S' = \quad \times 0.87 \times \quad = \quad \text{psia}$$

$$J_{\text{实际}} = q / (p - p_{wf}); \quad J_{\text{理想}} = q / (p - p_{wf}) - \Delta p_{\text{表皮}}$$

$$J_{\text{实际}} = \quad / (\quad - \quad) = \quad \text{B/D/psia 或 } 10^3 \text{ ft}^3/\text{d/psia}$$

$$J_{\text{理想}} = \quad / (\quad - \quad - \quad) = \quad \text{b/d/psia 或 } 10^3 \text{ ft}^3/\text{d/psia}$$

流动效率 = $J_{\text{实际}}/J_{\text{理想}} = \underline{\hspace{1cm}}/\underline{\hspace{1cm}} = \underline{\hspace{1cm}}$

污染比 = $J_{\text{理想}}/J_{\text{实际}} = \underline{\hspace{1cm}}/\underline{\hspace{1cm}} = \underline{\hspace{1cm}}$;

1/F. E. = $\underline{\hspace{1cm}}$

(6) 确定探测半径

通式: $r_{inv} = \sqrt{0.00105 \, kh/\phi \mu c \, ft}$

流动测试: $r_{inv} = \sqrt{0.00105 \times \underline{\hspace{1cm}} \times \underline{\hspace{1cm}} / 0. \underline{\hspace{1cm}} \times \underline{\hspace{1cm}} \times \underline{\hspace{1cm}}}$
 $= \sqrt{\underline{\hspace{1cm}} \, \text{ft}^2} \text{ 或 } \underline{\hspace{1cm}} \, \text{ft}$

压力恢复测试: $r_{inv} = \sqrt{0.00105 \times \underline{\hspace{1cm}} \times \underline{\hspace{1cm}} / 0. \underline{\hspace{1cm}} \times \underline{\hspace{1cm}} \times \underline{\hspace{1cm}}}$
 $= \sqrt{\underline{\hspace{1cm}} \, \text{ft}^2} \text{ 或 } \underline{\hspace{1cm}} \, \text{ft}$

注释: 在 C_i 公式中, 当 $S_g C_g$ 占优势时, 可单独使用。

摘要附注:

3.1.3 压降/压力恢复分析——交替方式

油/气井以常数产量生产 (SPE 专题论文集 1 的方法)

日期 $\underline{\hspace{1cm}}$

井号 $\underline{\hspace{1cm}}$

公司 $\underline{\hspace{1cm}}$

(1) 分析中所用的基本数据

$p^* \underline{\hspace{1cm}} \text{ psia}$ $Q \underline{\hspace{1cm}} \text{ bbl}$ $p(1h) \underline{\hspace{1cm}} \text{ psia}$ $p_{wf} \underline{\hspace{1cm}} \text{ psia}$ $t = 24 \, Q/q \underline{\hspace{1cm}} \text{ h}$ $\mu \underline{\hspace{1cm}}$
 cp $h \underline{\hspace{1cm}} \text{ ft}$ $\bar{p} \underline{\hspace{1cm}} \text{ psia}$ $m \underline{\hspace{1cm}} \text{ psia/cycle}$ $\phi 0. \underline{\hspace{1cm}}$ $\tilde{p} \underline{\hspace{1cm}} \text{ psia} = (\bar{p} + p_{wf})/2$
 $q_{sc} \underline{\hspace{1cm}} 10^3 \text{ ft}^3/\text{d}$ $T \underline{\hspace{1cm}} ^\circ\text{F}$; $460 + \underline{\hspace{1cm}} = \underline{\hspace{1cm}} ^\circ\text{R}$ $q_{sc} \underline{\hspace{1cm}} \text{ bbl/d}$ $B \underline{\hspace{1cm}}$ 地下体积/地面
体积 $Q \underline{\hspace{1cm}} 10^3 \text{ ft}^3$ $r_w \underline{\hspace{1cm}} \text{ ft}$ $r_e \underline{\hspace{1cm}} \text{ ft}$

$C_i = S_o C_o + S_g C_g + S_w C_w + C_f = 0. \underline{\hspace{1cm}} \times \underline{\hspace{1cm}} + 0. \underline{\hspace{1cm}} \times \underline{\hspace{1cm}} + 0. \underline{\hspace{1cm}} \times \underline{\hspace{1cm}} + \underline{\hspace{1cm}}$
 $= \underline{\hspace{1cm}} + \underline{\hspace{1cm}} + \underline{\hspace{1cm}} + \underline{\hspace{1cm}} = \underline{\hspace{1cm}} \text{ psia}^{-1}$

(2) 计算渗透率 (使用 $\tilde{p}$ 确定粘度与体积系数)

通式: 当 q 以桶为单位时, $kh = 162.6 \, q \mu B/m$ (q 以 Mcf 为单位时, 系数用 28900)

$kh = \underline{\hspace{1cm}} \times \underline{\hspace{1cm}} \times \underline{\hspace{1cm}} \times \underline{\hspace{1cm}} / \underline{\hspace{1cm}} = \underline{\hspace{1cm}} \text{ mD ft}$

$k = \underline{\hspace{1cm}} / \underline{\hspace{1cm}} = \underline{\hspace{1cm}} \text{ mD}$

(3) 计算表皮系数 (若有湍流也包括在内, 用 $\tilde{p}$ 确定对数项中的 μ)

对压力降落: $S' = 1.151[(p_i - p_{1h})/m - \lg(k/\phi \mu c r_w^2) + 3.23]$

对压力恢复: $S' = 1.151[(p_{1h} - p_{wf})/m - \lg(k/\phi \mu c r_w^2) + 3.23]$

$S' = 1.151[(\underline{\hspace{1cm}} - \underline{\hspace{1cm}})/\underline{\hspace{1cm}} - \lg(\underline{\hspace{1cm}}/0. \underline{\hspace{1cm}} \times \underline{\hspace{1cm}} \times \underline{\hspace{1cm}} \times \underline{\hspace{1cm}} \times \underline{\hspace{1cm}}) + 3.23]$
 $= 1.151(\underline{\hspace{1cm}} - \underline{\hspace{1cm}} + 3.23) = \underline{\hspace{1cm}}$

(4) 计算非达西流项 (若有湍流, 则与产量有关)

$S' = S + Dq$ (每个产量下): $q_1 \underline{\hspace{1cm}} 10^3 \text{ ft}^3/\text{d}$; $q_2 \underline{\hspace{1cm}} 10^3 \text{ ft}^3/\text{d}$

第一个产量下: $\underline{\hspace{1cm}} = S + \underline{\hspace{1cm}} D$; $S = \underline{\hspace{1cm}} - \underline{\hspace{1cm}} D$

第二个产量下: $\underline{\hspace{1cm}} = S + \underline{\hspace{1cm}} D$; $\underline{\hspace{1cm}} = \underline{\hspace{1cm}} - \underline{\hspace{1cm}} D$

$\underline{\hspace{1cm}} D = \underline{\hspace{1cm}}$; $D = \underline{\hspace{1cm}} (10^3 \text{ ft}^3/\text{d})^{-1}$; $S = \underline{\hspace{1cm}} - \underline{\hspace{1cm}} \times \underline{\hspace{1cm}}$; $S = \underline{\hspace{1cm}}$

(5) 计算采油指数, 流动效率和污染比

$\Delta p_{skin} = m \times 0.87 S' = \underline{\hspace{1cm}} \times 0.87 \times \underline{\hspace{1cm}} = \underline{\hspace{1cm}} \text{ psia}$

$J_{\text{actual}} = q/(\bar{p} - p_{wf})$, $J_{\text{ideal}} = q/[(\bar{p} - p_{wf}) - \Delta p_{skin}]$

$J_{\text{actual}} = \underline{\hspace{1cm}} / (\underline{\hspace{1cm}} - \underline{\hspace{1cm}}) = \underline{\hspace{1cm}} \text{ bbl/d/psia 或 } 10^3 \text{ ft}^3/\text{d/psia}$

$$J_{ideal} = \frac{1}{(\frac{1}{J_{actual}} - \frac{1}{J_{ideal}})} = \frac{1}{\frac{1}{J_{actual}} - \frac{1}{J_{ideal}}} \text{ b/d/psia 或 } 10^3 \text{ ft}^3/\text{d/psia}$$

$$\text{流动效率} = J_{actual}/J_{ideal} = \frac{J_{actual}}{J_{ideal}} = \frac{1}{\frac{1}{J_{actual}} - \frac{1}{J_{ideal}}}$$

$$\text{污染比} = J_{ideal}/J_{actual} = \frac{J_{ideal}}{J_{actual}}; 1/\text{F. E.} = \frac{1}{\text{F. E.}}$$

(6) 确定探测半径

$$\text{通式: } r_{inv} = \sqrt{0.000264 kt / 0.25 \phi \mu c} = \sqrt{0.00105 kt / \phi \mu c} \text{ ft}$$

$$\text{生产测试: } r_{inv} = \sqrt{0.00105 \times \frac{q}{2\pi h} \times \frac{1}{\phi \mu c} / 0.25 \times \frac{1}{\phi \mu c} \times \frac{1}{\phi \mu c}} = \sqrt{\frac{q}{2\pi h} \times \frac{1}{\phi \mu c} / 0.25 \times \frac{1}{\phi \mu c} \times \frac{1}{\phi \mu c}} \text{ ft}^2 \text{ 或 } \frac{q}{2\pi h} \times \frac{1}{\phi \mu c} / 0.25 \times \frac{1}{\phi \mu c} \times \frac{1}{\phi \mu c} \text{ ft}$$

$$\text{压力恢复测试: } r_{inv} = \sqrt{0.00105 \times \frac{q}{2\pi h} \times \frac{1}{\phi \mu c} / 0.25 \times \frac{1}{\phi \mu c} \times \frac{1}{\phi \mu c}} = \sqrt{\frac{q}{2\pi h} \times \frac{1}{\phi \mu c} / 0.25 \times \frac{1}{\phi \mu c} \times \frac{1}{\phi \mu c}} \text{ ft}^2 \text{ 或 } \frac{q}{2\pi h} \times \frac{1}{\phi \mu c} / 0.25 \times \frac{1}{\phi \mu c} \times \frac{1}{\phi \mu c} \text{ ft}$$

注: 在产量为常数时, 该格式可用于求解油井或气井。对气井来说, 须采用 *Russell*¹ 确定的平均压力 $\bar{p}$ 。在表皮系数计算中, 压力恢复试井用 p_{wf} ; 压降试井用 p_i 。

注释:

污染比	井密	正方形边长	圆半径
	<i>ac</i>	<i>ft</i>	<i>ft</i>
$DR = (kh/\mu)_{Bu} / (kh/\mu)_{pi}$	80	1866	1054
在 DST 工作状态下	160	2640	1490
$DR = 0.183(p_{ws} - p_{wf})/m$	320	3734	2106
$DR = (p_{ws} - p_{wf})/m(\lg t + 2.65)$	640	5280	2978

3.1.4 确定气藏平均地层压力

日期_____

井号_____

公司_____

P_{pvt} _____ psia

(1) 圆形气藏的近似方法

$$t = \phi \mu c r_e^2 / 0.00264 k$$

$$= 0. \frac{q}{2\pi h} \times \frac{1}{\phi \mu c} \times \frac{1}{k} \times \frac{1}{0.00264} \times \frac{1}{\phi \mu c} \times \frac{1}{k}$$

$$= \text{_____ h (不稳定流结束); _____ h (稳定流开始)}$$

根据压力或 $m(p)$ 与时间对数关系曲线, 读上述计算的时间点的恢复压力。稳定态 = $3 \times$ 不稳定端点

在不稳定流结束时: $m(\bar{p})$ _____ psia²/c ϕ ; $\bar{p}$ _____ psia

在稳定态开始时: $m(\bar{p})$ _____ psia²/c ϕ ; $\bar{p}$ _____ psia

平均值: $m(\bar{p})$ _____ psia²/c ϕ ; $\bar{p}$ _____ psia

最佳值: $\bar{p}$ _____ psia

(2) *Horner* 和 *Matthews, Brons* 与 *Hazebroek* 方法(SPE 专题论文集 1, p 40)

$$t_{De} = 0.000264 kt / \phi \mu C A (A \text{ 为排泄面积, 单位 } \text{ft}^2)$$

$$= 0.000264 \times \frac{q}{2\pi h} \times \frac{1}{\phi \mu c} \times \frac{1}{k} \times \frac{1}{\phi \mu c} \times \frac{1}{k} \times \frac{1}{\phi \mu c} \times \frac{1}{k}$$

从代表气藏形态的理论曲线上, 读出 $(p^* - \bar{p}) / 70.6 q \mu B / kh = (p^* - \bar{p}) / (0.4343 m) =$

m _____ psia/cycle 或 _____ psia²/c ϕ /cycle

$p^* - \bar{p}$ _____ psia $m(p^*) - m(\bar{p})$ _____ psia²/c ϕ

p^* _____ psia $m(p^*)$ _____ psia²/c ϕ (无穷大关井时间的压力)

$\bar{p}$ _____ psia $m(\bar{p})$ _____ psia²/c ϕ (平均油藏压力)

最佳值 $\bar{p}$ _____ psia $\bar{p}$ _____ psia

(3) Miller, Dyce 和 Hutchinson 等人的方法 (SPE 专题论文集 1, p 31)

$$t_{Dc} = 0.000264 k \Delta t / \phi \mu c r_w^2 = 0.000264 \times ___ \times ___ / 0. ___ \times ___ \times ___ \times ___ \times ___ \\ = ___$$

由理论曲线, $1.151(\bar{p} - p_{ws})/m = ___ ; m ___$

在 Δt 时的关井压力, $p_{ws} ___ ; m(\bar{p}_{ws}) ___$

$$(\bar{p} - p_{ws}) ___ \times ___ / 1.151 = ___$$

$$\bar{p} ___ + ___ = ___ \text{ psia}, ___ \text{ psia}$$

(4) 压裂井的 Russell-Truitt 方法

由 $\bar{p} - p_{ws}$ 与关井时间直线关系求 $\bar{p}$ 值 $___ \text{ psia}$

(5) 由前面半稳态流得到的值

$$p_w ___ \text{ psia}; r_D ___ ; q/kh ___ 10^3 \text{ ft}^3/\text{d}/mD \cdot \text{ft}; p ___ \text{ psia}$$

(6) 平均气藏压力的最佳值: $___ \text{ 到 } ___ \text{ 或 } ___ \text{ psia}$

将压力计下入深度的井底压力 (BHP) 换算为基准面压力

a. 压力计下入深度, ft, 低于 $___ \text{ 为 } ___ \text{ ft}$, 海平面以下 $___ \text{ ft}$

b. 当海拔 $___ \text{ ft}$ 时的射孔井段底海平面以下 $___ \text{ ft}$

c. 压力计下入深度与射孔井段间井的压力梯度 $___ \text{ psig/ft}$

d. 压力计下入深度的压力 $___ \text{ psig}$

e. 气藏压力梯度 $___ \text{ psig/ft}$

f. 基准面 $___ \text{ 海平面以下 } ___ \text{ ft}$

g. 射孔井段底减去下入深度 $___ \text{ ft}$

h. 射孔井段底减基准面 $___ \text{ ft}$

$$i. g \times c = ___ \times ___ = ___$$

$$j. d + i = ___ + ___ = ___$$

$$k. h \times e = ___ \times ___ = ___$$

$$l. j - k = ___ - ___ = ___ \text{ psig}$$

m. 换算到基准面的压力为 $1 + 14.7 \text{ 或 } ___ + 14.7 = ___ \text{ psia}$

注释:

k 值及 pvt 参数有部分是假定的。若后来证明有明显错误, 应用尽可能好的值作重复计算。应使用压力恢复与压降曲线求 k , p^* 及 p_{ws} 。

附注:

当渗透率小于 25 mD, 或井以高速生产以便使泄油边界与井筒之间有 明显压力降落时, 预测应以此基本方程为依据。作这些计算时应按此表格进行。尽管可能使用平均压力以外的方法, 但还应采用 $m(p)$ 函数。当压力均高于 3000 psi 时, 可应用简单的压力。当全部压力数据均低于 1000 psi 时, 如果压力以 psi 表示, 则用 p^2 形式是可靠的。如果预测结果与生产历史及输入的计算值的曲线拟合达到要求, 则精度可得到改善。

3.2 不稳定流阶段的预测

下列表格可帮助建立产量、时间及累积产气量间的关系。

3.2.1 气井动态预测

该方法通常用于确定方程参数的最佳值, 以拟合过去的动态, 并用这些数值预测气井的动态。

井号_____

油田_____

有关预测方法的一般说明

公司_____

(1) 平均压力

- a. 自喷井排泄边界压力_____ psia
- b. 排泄区的平均气藏压力_____ psia
- c. 自喷井的井底压力_____ psia
- d. 表皮系数引起的压降_____ psia
- e. 关井油压_____ psia
关井套压_____ psia
- f. 开井油压_____ psia
开井套压_____ psia

(2) 计算所用的值

pvt 测定中所用的压力 _____ psia

$$\bar{p} = (\bar{p} + p_w) / 2 = (\quad + \quad) / 2 = \quad \text{psia}$$

储层温度 _____ °F; $460 + \quad = 625^\circ\text{R}$

$$C_t = S_g C_g + S_w C_w + C_f = \quad \times \quad + \quad \times \quad + \quad = \quad \text{psia}^{-1}$$

μ _____ cp ϕ 0. _____ 排泄面积 _____ 英亩

Z _____ K _____ mD r_e _____ ft r_e^2 _____ ft²

B_g _____ h _____ ft Kh _____ md ft r_w^2 _____ ft²

ϕ_g 0. _____ r_w _____ ft r'_w _____ ft $r'_w = r_w e^{-s}$

S _____ S' _____ D _____ (10³ ft³/d)⁻¹

废弃压力: 在 _____ 10³ ft³/d 条件下的井底压力 _____ psia; 井口压力 _____ psia

(3) 不稳定流结束的时间

通式: $t = \phi \mu c r_e^2 / 0.00264 K$

$$t = 0. \quad \times \quad \times \quad \times \quad / (0.00264 \times \quad)$$

$$= \quad \text{h}; \quad \text{d}; \quad \text{a}$$

(4) 半稳态流开始的时间

$$t = \quad \text{h}; \quad \text{d}; \quad \text{a}$$

这些值为上述不稳定流结束时数值的三倍。

(5) 历史拟合

在预测前, 通过将与此些参数有关的公式应用到井的历史中, 来确定这些公式中每个参数的最佳值。要作多次调整, 直到这些公式能令人满意地描述过去的动态为止。必须计算历史模型(计算格式如下表)。

生产方式	定压生产 $q_{sc}, 10^3 \text{ft}^3/\text{d}$		定产生产 压力, psia	
	计算值	实测值	计算值	实测值

容积法公式:

$$Q = \underline{\hspace{1cm}} (\bar{\phi}/Z); \quad Q = \underline{\hspace{1cm}} \times \underline{\hspace{1cm}} / \underline{\hspace{1cm}} = \underline{\hspace{1cm}} 10^3 \text{ ft}^3$$

物质平衡公式:

[illegible]

气井的动态预测

不稳定流阶段的通式

$$m(p_i) - m(p_w) = 57900 (p_{sc} T / T_{sc}) (q_{sc} / Kh) [\lg(Kt / \phi \mu C r_w^2) - 3.23 + 0.87 S']$$

式中： $m(p)$ 值是由曲线读出或计算出来的。

S' 包括湍流影响。湍流对产量敏感, 若湍流存在, 则 S' 值随产量改变。

井底压力 p_{wf} _____ psia; 平均气藏压力 p_i _____ psia

$$(\text{---} - \text{---}) = 57900 (\text{---} \times \text{---} / \text{---}) \times (\text{---} / \text{---} \times \text{---}) \times [\lg(\text{---} / 0. \text{---}) \\ \times \text{---} \times \text{---} \times \text{---}) + \lg t - 3.23 + 0.87 \times \text{---}]$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{\rho_0} [1 + \lg t - 3.23 + \dots]$$

$$q_{sc} = \frac{1}{\alpha} [\frac{1}{\alpha} + \lg t]; \quad m(p_{wf}) = - \frac{1}{\alpha} [\frac{1}{\alpha} + \lg t] + \frac{1}{\alpha}$$

			定压生产		定 产 生 产		
生产方式	时间 h	lg/	计算值 10 ³ ft ³ /d	实测值 10 ³ ft ³ /d	m(p)	计算值 psia	实测值 psia
	1	0.00					
	10	1.00					
	100	2.00					
	150	2.18					
	200	2.30					
	250	2.40					
	300	2.48					

不稳态流应在计算的稳态流开始前结束。

小 时	累 积		时 间 段		产 量		产量, 10 ³ ft ³	
	天	年	天	log	q_{sc} , 10 ³ ft ³ /d	平均	阶 段	累积
1				0				
10				1				
100	4.2		4.2	2				
1000	42	0.11	37.5	3				
10000	417	1.14	375.0	4				

在不稳定流阶段的有效采气量 (小数)

____/____ = ____

近似的平均气藏压力

$$p_i(1 - \text{小数})(z/Z_i) = \bar{p}$$

$$\text{____} \times (1 - \text{____}) \times (\text{____}/\text{____}) = \text{____ psia}$$

只有在井底流压不变时才需要此计算。

附注:

晚期的不稳定流方法尚未涉及, 由于该方法通常限于在不稳定流结束与半稳态流开始之间的时间长达一年以上时才能使用。

当井就要到达排泄边界, 排泄区所有压力以同一速度下降, 且在井底压力为常数的情况下生产的半稳态阶段, 上述方法基于确定早期不稳定阶段方程各项的可靠数值。

该方法是在压力不稳定降落, 达到半稳态时, 应用不稳定流方程进行计算的。这些计算与早期生产阶段产量或压力随时间的变化有关。这些资料也提供了累积产量与时间的关系。天然气地质储量是由容积法公式求得的, 不稳态结束及半稳态流开始的时间可以计算出来。也能确定出有关的气藏平均压力。另外, 可绘制由不稳定流及半稳态方程求得的压力与时间的关系曲线, 以便平滑两组数据, 求出晚期不稳定流阶段的可靠数据。若必要时可重复计算。通常, 晚期不稳定流阶段近似于不稳定流, 其误差在整个预测中是不太重要的。

3.3 半稳态流及井底压力为常数生产时的预测

对于半稳态流阶段的计算, 假定平均气藏压力在一个合适的压力段上, 产量是计算的。在井底压力为常数时的产量计算也同样成立。这些产量与时间有关。这些计算是基于当容积法公式中的参数能确定时, 任何平均气藏压力下天然气地质储量与平均气藏压力成正比。可计算出每个平均气藏压力下的产量。使用任何平均方法, 可计算出任意两压力间的平均产量。累积产气量除以平均产量可得到任意两个平均气藏压力间产出这些气所需时间。

3.3.1 达到排泄边界后气井的动态预测

(1) 径向系统的半稳态流

$$\text{通式: } m(p) - m(p_w) = 50300 p_{sc} T / T_{sc} K h [\ln(r_e / r_w) - 0.75 + S'] q_{sc}$$

式中 S' 包括湍流。径向流动态中的湍流如同表皮系数那样, 它对产量敏感, 因而表皮系数