

# 非自喷井螺杆泵求产测试评价技术

封 猛<sup>1</sup>, 丁心鲁<sup>1</sup>, 王金礼<sup>1</sup>, 徐伟红<sup>1</sup>, 张晓文<sup>1</sup>, 卢德唐<sup>2</sup>

(1. 中国石油西部钻探工程有限公司试油公司, 新疆 克拉玛依 834000; 2. 中国科学技术大学近代力学系, 安徽 合肥 230026)

**摘要:**非自喷井间歇求产是一个复杂的求产过程, 利用数值网格分析及全压力历史拟合方法, 解决了间歇求产井地层参数求解问题。为了获取螺杆泵求产时的液面恢复数据, 在螺杆泵底部外挂电子压力计, 得到了螺杆泵求产过程中的地层压力分布及井底压力, 优化了螺杆泵测试工艺。

**关键词:**螺杆泵 地层参数 全压力历史拟合 网格 测试

**中图分类号:**TE353 **文献标志码:**A

## Testing and evaluating technology of screw pump for unflowing wells

FENG Meng<sup>1</sup>, DING Xinlu<sup>1</sup>, WANG Jinli<sup>1</sup>, XU Weihong<sup>1</sup>, ZHANG Xiaowen<sup>1</sup>, LU Detang<sup>2</sup>

(1. Formation Testing Company, Xibu Drilling Engineering Co., Ltd, CNPC, Karamay 834000, China;

2. Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract:** Intermittent production of unflowing well is a complex intermission producing process. Numerical grid analysis and full pressure history fitting method are used to solve the problem of formation parameters in intermittent unflowing wells. In order to get the data of liquid level recovery during the production of screw pumps, an electronic pressure gauge is mounted on the bottom of the screw pump, the formation pressure distribution and bottom hole pressure during screw pump production are obtained, optimizing the testing process of screw pump.

**Key words:** screw pump; formation parameter; pressure history fitting; grid; testing

在油气田勘探与开发中, 针对压力系数低的非自喷稠油井、含硫化氢井、气油比大的井, 多采用螺杆泵求产工艺<sup>[1-2]</sup>。为了获取螺杆泵求产井的地层参数, 现场形成了螺杆泵+偏心井口环空测试、封隔器+MFE (APR) 多流测试器+螺杆泵多联作等技术。但由于受到井下、井口生产工艺及其他多种因素制约<sup>[3]</sup>, 难以推广应用。采用螺杆泵求产, 获取地层参数是现场生产急需解决的问题。

螺杆泵试产分为开泵求产阶段和停泵液面恢复阶段, 井底流动特征符合间歇试产分析条件<sup>[4-8]</sup>, 采用数值方法, 求解地层压力分布及井底压力, 可实现地层参数解释。

## 1 间歇试产试井分析原理

间歇方式采油井有以下几方面特征: ①无论是抽油还是停抽阶段, 地层都不断地有液体产出, 地层的压力分布都不断地变化, 地层压降漏斗是由多次

抽油形成压力波的迭加; ②和段塞流动期间相同, 这种生产方式无法确定井底产量, 即产量和井底压力都是未知的。井筒中的流动和地层渗流是耦合的, 求出各时刻的压力分布、井底压力, 就可以实现对地层进行解释求参。

### 1.1 流体流量的计算

螺杆泵求产的回油量 ( $V_1$ ) 由两部分组成, 一部分为恢复期间已存在的液体, 另一部分是地层流入井筒中的流体, 设生产  $\Delta t$  时间后的井底压力为  $p_1$ , 生产  $\Delta t$  时间后井底压力为  $p_2$ , 则回油量为  $V_2$ :

$$V_2 = \frac{[p_2 - p_1] A}{\rho g} \quad (1)$$

式中:  $A$  为井筒截面积,  $\text{m}^2$ ;  $\rho$  为液体密度,

收稿日期: 2018-03-07, 改回日期: 2018-05-26。

第一作者简介: 封猛 (1985—), 工程师, 从事油气田开发工作。E-mail: fmeapple@163.com.cn。

$\text{g}/\text{cm}^3$ ;其中地层流入井筒的部分为:

$$V_1 - V_2 = V_1 - \frac{[p_2 - p_1]A}{\rho g} \quad (2)$$

利用达西公式,可以得到地层流入井筒里总量:

$$2\pi r_w \frac{kh}{\mu} \int_0^{\Delta t} \frac{\partial p}{\partial r} \Big|_{r=r_w} = V_1 - \frac{[p_2 - p_1]A}{\rho g} \quad (3)$$

式中  $\frac{\partial p}{\partial r} \Big|_{r=r_w}$  是井底压力在井壁处的偏导数。

## 1.2 井底压力的计算

以均质无限大地层为例,停泵期间的方程及其定解条件可以表示成:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \frac{\partial p}{\partial r}) = \frac{\phi \mu c_i}{k} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (4)$$

$$p(\Delta t = 0, r) = f(r) \quad (5)$$

$$p(r \rightarrow \infty, t) = p_i \quad (6)$$

$$\frac{c}{2\pi kh} \frac{dp_{wf}}{dt} - \frac{\partial p}{\partial r} \Big|_{r=r_w} \cdot r_w = 0 \quad (7)$$

则井底压力为:

$$p_{wf} = [p - r_w s \frac{\partial p}{\partial r}] \Big|_{r=r_w} \quad (8)$$

式中  $f(r)$  为地层初始时刻的地层压力分布(即压降漏斗),可由(3)得到。

## 1.3 压力历史拟合

由于存在多个求产及停泵过程,全压力计算较复杂,采用数值方法进行计算。

考虑到油井为圆形,包含井的网格,常称之为井网格。当网格是井网格,其它网格与井网格的传导系数要特殊处理,如图1、图2所示。

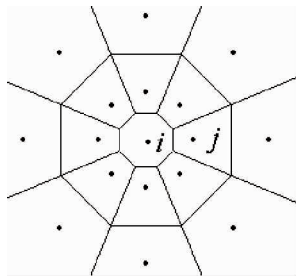


图1 井网格与相邻网格

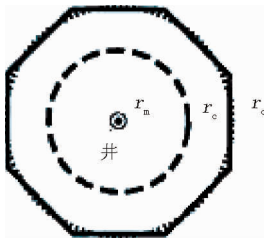


图2 等效外半径,  $r_w$  为井半径

井网格与其相邻网格的流动仍是径向流,相邻

网格  $j$  从  $r_j$  处按径向流方式流向井网格  $i$ 。显然要计算出井网格的平均压力所对应的半径  $r_e$ ,即等效半径  $r_e$ 。对井网格,传导系数应是从  $r_j$  处流到  $r_e$  处。下面给出  $r_e$  的计算方法。

整个井网格  $i$  的面积  $A$  可用等效圆表示,为区别等效半径,称等效圆的半径为等效外接圆半径,如图2所示,即  $r_e$  为:

$$r_e = \sqrt{\frac{2A}{\beta}} \quad (9)$$

其中  $A$  为井网格  $i$  的面积,  $\beta$  为射开的角度,当  $\beta = 2\pi$  为全射开,则井网格的等效半径为

$$r_e = r_w \exp\left[\frac{a^2}{a^2 - 1} \ln a - \frac{1}{2}\right] \quad (10)$$

其中  $r_w$  为井半径,  $a = \frac{r_o}{r_w}$  在上述网格体系下,单相流体的渗流方程可以表示为:

$$\nabla \cdot \left[ \frac{K}{\mu B} (\nabla p - \gamma \nabla Z) \right] = \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\phi}{B} \right) + q_{osc} \quad (11)$$

在网格  $i$  中,对方程(11)作体积分:

$$\iiint_{V_i} \nabla \cdot \left[ \frac{K}{\mu B} (\nabla p - \gamma \nabla Z) \right] d\Omega = \iiint_{V_i} \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\phi}{B} \right) d\Omega + \iiint_{V_i} q_{osc} d\Omega \quad (12)$$

应用高斯定理,则方程(12)左边的体积分可以变为面积分,

$$\iiint_{V_i} \nabla \cdot \left[ \frac{K}{\mu B} (\nabla p - \gamma \nabla Z) \right] d\Omega = \oint_s \frac{K}{\mu B} (\nabla p - \gamma \nabla Z) \cdot \vec{n} ds \quad (13)$$

相邻网格中心点的连线垂直两个网格的相邻面,因而每个面的法线与流动方向平行,这使面积分大大简化。由于认为压力、粘度等参数在相邻面上是常数,因而有

$$\oint_s \left[ \frac{K}{\mu B} (\nabla p - \gamma \nabla Z) \right] \cdot \vec{n} ds = \sum_j \left[ \left( \frac{K}{\mu B} \right)_{ij} \omega_{ij} (\nabla p - \gamma \nabla Z) \right] \quad (14)$$

式中  $\sum_j$  表示对每个面进行求和,  $\omega_{ij}$  为流动截面积。将相邻面上的偏导数值用相邻网格点处的值近似表示,则方程(14)可进一步改写为:

$$\oint_s \left[ \frac{K}{\mu B} (\nabla p - \gamma \nabla Z) \right] \cdot \vec{n} ds = \sum_j \left[ \left( \frac{K}{\mu B} \right)_{ij} \frac{\omega_{ij}}{d_{ij}} (p_j - p_i - \gamma(Z_j - Z_i)) \right] \quad (15)$$

其中  $d_{ij}$  为网格中心距离, 如图 3 所示。

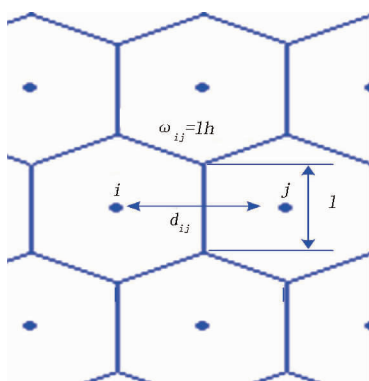


图 3 网格参数示意

对累积项的积分, 有

$$\iint_{V_i} \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\phi}{B} \right) d\Omega + \iint_{V_i} q_{osc} d\Omega = \frac{V_i}{\Delta t} \left[ \left( \frac{\phi}{B} \right)_i^{n+1} - \left( \frac{\phi}{B} \right)_i^n \right] + q_{osc} \quad (16)$$

其中  $\iint_{V_i} q_{osc} d\Omega = q_{osc}$ ,  $q_{osc}$  为源汇强度。

联立方程(15)与方程(16), 单相流体的渗流方程(11)变为:

$$\sum_j T_{ji} [p_j - p_i - (D_j - D_i)] = \frac{V_i}{\Delta t} \left[ \left( \frac{\phi}{B} \right)_i^{n+1} - \left( \frac{\phi}{B} \right)_i^n \right] + q_{osc} \quad (17)$$

其中  $p_j, p_i$  为网格  $i$  与网格  $j$  的压力,  $V_i$  为  $i$  网格的体积,  $D_j = \gamma Z_j$  为地下原油重度与从某一基准面算起的高度  $Z_j$  的乘积。  $T_{ij}$  为传导系数, 是网格流动系数  $\gamma_{ij}$  与其几何因子  $G_{ij}$  的乘积。

建立网格后, 对数值离散后形成的线性方程组进行求解, 可以得到地层压力分布及井底压力, 由井底压力即可以实现压力历史拟合。

## 2 应用实例

C21 井区位于车排子油田北段, 位于克拉玛依市以南约 40 km 处, 该区块石炭系地面原油密度为  $0.902 \sim 0.937 \text{ g/cm}^3$ ;  $50^\circ\text{C}$  时粘度平均为  $363.14 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 。开发区块采用螺杆泵机抽方式求产, 经三个月的试采, 平均日产油  $7.5 \text{ t}$ , 取得较好效果。

C222 井位于 C21 井区内, 目的层位石炭系, 岩性为绿灰色荧光凝灰质细砂岩、深灰色荧光凝灰岩。射孔井段  $1311.00 \sim 1341.00 \text{ m}$ , 射后采用胍胶液  $458.0 \text{ m}^3$ , 石英砂  $60.0 \text{ m}^3$  进行措施改造, 自喷退液时出口发现硫化氢, 采取除硫措施后下螺杆泵(底带电子压力计)机抽求产, 平均日抽出油  $2.12 \text{ m}^3$ , 日抽出压裂液  $2.81 \text{ m}^3$ , (螺杆泵转速  $30 \text{ r/min}$ ), 压

力计监测全过程井下压力、温度(如图 4)。

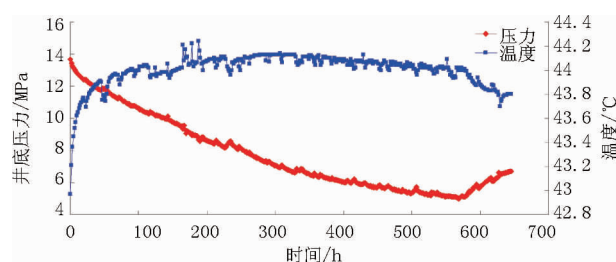


图 4 实测压力、温度曲线

螺杆泵求产期间, 具有多个间歇停泵阶段, 560 小时以后, 间歇求产井底压力曲线相对平滑, 选择该阶段进行地层参数解释。利用全压力历史拟合软件, 在压力的双对数导数图可以看出,  $1/2$  斜率线特征明显, 选择“无限导流垂直裂缝 + 均质油藏 + 无限大边界”模型进行拟合, 见图 5、图 6。

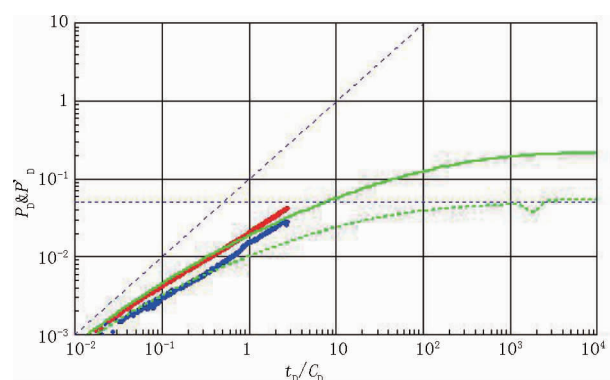


图 5 双对数导数曲线

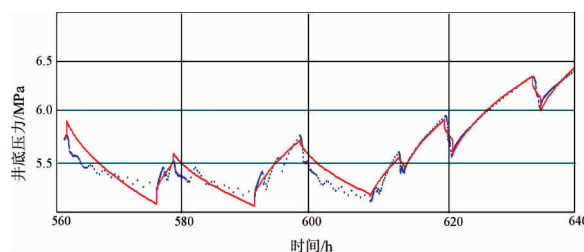


图 6 压力历史拟合

求得地层参数如下: 地层压力为  $14.6123 \text{ MPa}$ , 地层渗透率为  $0.1311 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 表皮系数为  $-6.57$ , 裂缝半长为  $44.52 \text{ m}$ 。分析结果反映储层物性较差, 措施改造增大了泄油面积, 供液能力有所改善, 表皮系数反映井周不存在堵塞。

## 3 结论

(1) 采用全压力历史拟合方法, 可以对螺杆泵间歇求产井的压力资料进行拟合求参, 解决了气油比大的井、非自喷稠油井的地层参数解释, 为下步开发方案提供依据。

(2)全压力历史拟合解释方法,可以不需要关井压力数据进行地层解释,采用螺杆泵底带电子压力计即可实现数据采集,比多流测试器+螺杆泵多联作螺杆泵测试及螺杆泵+偏井口环空测试技术优势明显,优化了螺杆泵测试工艺。

#### 参考文献:

- [1] 杨春华,侯朝晖,赵安军,等. 稠油井水循环加热螺杆泵+STV测射联作试油工艺应用浅析[J]. 油气井测试,2014,23(1): 67-69.
- [2] 刘晓光,吕新才,李孝胜. 渤海油田稠油井优快测试技术[J]. 油气井测试,1999,8(1):31-33.
- [3] 姜滔. 螺杆泵井环空测试工艺研究[J]. 石油机械,2010,38(7):73-75.
- [4] 张衍臣,卢德唐,马华丽,等. 利用 $\delta$ 函数计算间歇试采井压力分布[J]. 石油学报,2006,27(2):98-102.
- [5] 陈岩,王新海,魏雪泉,等. 利用抽汲井液面恢复资料解释双孔介质油藏地层参数[J]. 断块油气田,2012,19(1):110-113.
- [6] 蒋凯军,马华丽,王平,等. 间歇定产试采井产能评价方法[J]. 油气井测试,2005,14(6):13-14.
- [7] 刘波涛,王新海,李国亮,等. 抽汲井液面恢复解释软件的研究与应用[J]. 断块油气田,2012,19(6):775-777.
- [8] 严利咏,王新海,黄海,等. 复合油藏抽汲井测试资料数值试井分析[J]. 石油天然气学报,2009,31(4):334-336.

(编辑 韩 枫)

## 气举辅助机采工艺在江苏油田首次应用成功

经过江苏油田采油一厂工艺研究所持续不懈的技术攻关,气举辅助机采工艺技术日前在联28-5井首次应用成功。

联28-5井为典型的中低渗、高饱和压力挥发性油气藏,油、气、水同出。该井于2016年1月投产,投产仅一周后,因地层能量难以持续有效携液,导致井筒积液而停产。

为了尽快恢复对该井的油、气生产,解决此类高气油比油井油、气开采的技术难题,该厂工艺研究所组织技术力量,经过数月的技术攻关,引进、攻克了多相管流流体、流压预测,机采条件下连续气举优化设计,套压气举阀气嘴低压比临界恒流等多项关键技术,终于形成了气举辅助机采这一油、气开采的新工艺。

该项技术实现了井下节流降压,满足系统管网承压,控制了水合物生产,达到提高泵效及排液效率的目的。实际生产测试结果表明,相比于目前国内油田普遍采用井下分离+有杆抽油泵模式进行生产的高气油比油井,联28-5井在地层出液状态下工作泵效达30%~40%,远超过常规工艺不足15%的工作泵效。

该井自去年12月实施气举辅助机采工艺生产以来,经历两次寒潮,未出现一次水合物冻堵管线的事故。目前,该井已稳定运行4个月,累计产气 $15 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,产油94 t。相比传统工艺近30万元地面生产配套及建设费用,该项工艺综合成本不足5千元,效益非常可观。

据悉,采油一厂现有部分套管气资源丰富、工作泵效受伴生气影响较大、系统管网相对完善油田老区块。气举辅助机采工艺为此提供了一种提高机采系统的全新技术手段。

该项工艺下一步将在联盟庄、真武部分高油气比高饱和压力油藏上推广应用,提高该厂油气高效开发水平。

(石 信)