

ICS 75.180.99

E 10

备案号: 10470—2002

**SY**

# 中华人民共和国石油天然气行业标准

SY/T 6533—2002

---

## 稳定试井测试及解释方法

Testing and interpretation method  
for systematic well testing

2002 - 05 - 28 发布

2002 - 08 - 01 实施

---

国家经济贸易委员会 发布

## 目 次

前言 .....	II
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 稳定试井测试方法 .....	1
4 稳定试井取资料要求 .....	1
5 稳定试井资料整理 .....	2
6 稳定试井资料的定性解释方法 .....	4
7 单相流动稳定试井采油井指示曲线的定量解释方法 .....	5
8 油气两相流动稳定试井曲线的定量解释方法 .....	6
附录 A (规范性附录) 符号注释 .....	7

## 前 言

稳定试井也称系统试井或回压试井，是油、气生产井或注水井现场常用的一种试井方法。稳定试井是建立井的生产能力或注入能力方程，因而实测的稳定试井成果是优化油、气生产井及注入井工作制度的重要基础资料。本标准对采油井和注水井的稳定试井测试方法及资料解释方法做了规定，以规范这方面工作。

本标准的附录 A 是规范性附录。

本标准由油气田开发专业标准化委员会提出并归口。

本标准起草单位：中国石油天然气股份有限公司华北油田分公司勘探开发研究院。

本标准主要起草人：朱亚东、张辉、王皆明。

本标准为首次发布。

## 稳定试井测试及解释方法

### 1 范围

本标准规定了采油井和注水井稳定试井的测试方法和测试成果资料的解释方法。

本标准适用于采油井和注水井的稳定试井测试、现场取资料要求和资料解释方法。

### 2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单（不包括勘误的内容）或修订版均不适用于本标准，然而，鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。

SY/T 5387 常规原油油藏试采地质技术要求

SY/T 5968 探井试油试采资料质量评定方法

SY/T 6013 常规试油资料录取规范

SY/T 6221 油田开发监测系统设计及动态监测技术要求

### 3 稳定试井测试方法

#### 3.1 稳定试井原理

稳定试井是通过规定的测试及分析解释程序预测储层生产能力和注入能力的大小，这一能力由井的稳定流量与压差关系表示。

#### 3.2 采油井稳定试井测试方法

##### 3.2.1 确定工作制度

本标准规定需要在4个或4个以上不同工作制度下测定井的地面流量及对应的稳定井底压力，绘制指示曲线，确定指示曲线类型，建立生产能力方程。

根据稳定试井设计确定工作制度及测点分布，每一工作制度应得到4~5个测点的井底压力及产量数据，要求均匀分布。

##### 3.2.2 测试程序

测试前先测得稳定的地层压力；流量由小到大依次改变工作制度，测得稳定的产量、流压等有关数据；最后一个工作制度测试结束后关井测地层压力或压力恢复。

#### 3.3 注水井全井视指示曲线测试方法

采用降压法测试。测试前应在最高压力下放大注水量注水8h，第一点选用最高压力的注水量，改变工作制度，测其余各点，需测4个或4个以上工作制度，每一工作制度应达到注入量及井口压力稳定。

#### 3.4 注水井分层视指示曲线测试方法

要求与测全井视指示曲线相同，但需要根据井下配水管柱的不同，做好分层注水量的计算和核实。

### 4 稳定试井取资料要求

#### 4.1 采油井稳定试井取资料要求

#### 4.1.1 探井及试采井

有生产能力的探井及试采井在试油及试采期间都应取得稳定试井资料，录取资料的要求按照 SY/T 5387、SY/T 5968 及 SY/T 6013 执行。

#### 4.1.2 采油井

按开发方案投产后的生产井可根据生产情况及开发动态分析结果确定进行稳定试井，资料录取要求按 SY/T 6221 执行。

#### 4.2 注水井稳定试井取资料要求

投注初期每口注水井都应测一次全井或分层的视指示曲线，以后应根据需要安排全井或分层的视指示曲线的测试。资料录取要求按 SY/T 6221 执行。

### 5 稳定试井资料整理

#### 5.1 稳定试井曲线

稳定试井资料应整理出以下曲线：

- 采油井指示曲线：生产压差与产量的关系曲线；
- 采油井系统试井曲线：产量、流压、含水率、生产气油比等与工作制度的关系曲线；
- 流入动态曲线（IPR 曲线）：流压与产量关系曲线；
- 注水井全井及分层指示曲线或视指示曲线。

#### 5.2 绘制试井曲线时地层压力的处理

当稳定试井测试前后测得的两个地层压力  $p_{R1}$  和  $p_{Rn}$  的差别在测压误差范围内时，所有工作制度中的地层压力可取同一个地层压力值。

当上述  $p_{R1}$  和  $p_{Rn}$  的差别超过测压误差范围内时，除第一个工作制度取  $p_{R1}$  值，最后一个工作制度取  $p_{Rn}$  值外，其余工作制度的地层压力由式（1）确定：

$$p_{Ri} = p_{R1} - \frac{N_{pi} - N_{pl}}{N_{pn} - N_{pl}} (p_{R1} - p_{Rn}) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

#### 5.3 采油井指示曲线

油井指示曲线分为以下 4 类：直线型（见图 1 曲线 I）、曲线型（见图 1 曲线 II）、混合型（见图 1 曲线 III）和异常型（见图 1 曲线 IV）。利用上述指示曲线可以分析油井的流动状况。

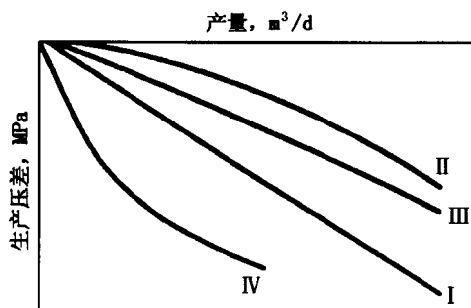


图 1 采油井指示曲线类型

#### 5.4 采油井系统试井曲线

典型的采油井系统试井曲线见图 2，可利用该曲线确定采油井的合理工作制度。

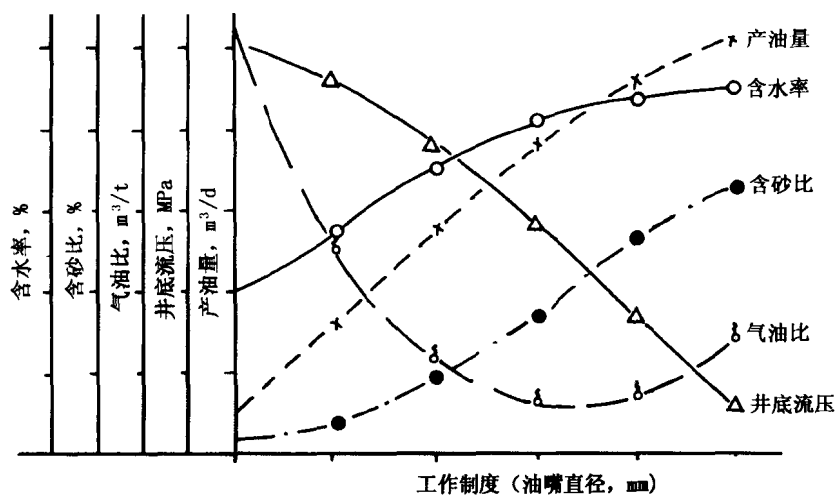


图2 系统试井曲线

### 5.5 油井流入动态曲线 (IPR 曲线)

图3 是不同地层压力条件下的采油井流入动态曲线示意图, 可用于采油井产能预测。

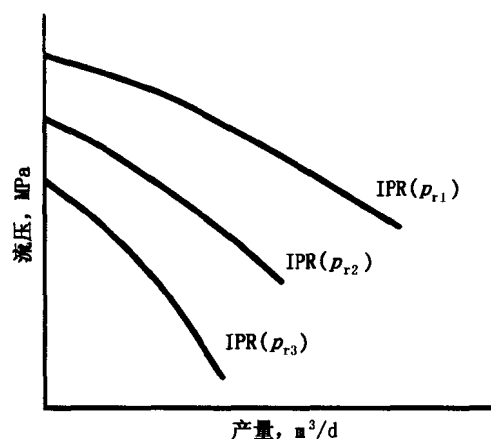


图3 预测不同地层压力的 IPR 曲线

### 5.6 注水井指示曲线

#### 5.6.1 注水井真指示曲线

如果每一工作制度下都测得注水井的稳定流压, 则可和上述采油井一样, 做出注水井指示曲线, 称为真指示曲线。

也可以通过井口压力考虑水柱压力、管损、嘴损等求得吸水层的注入流压, 从而在未实测流压的条件下做出注水井真指示曲线。

#### 5.6.2 注水井视指示曲线

如果每一工作制度下不测注水井井底流压, 只测井口压力及对应的注入量, 则可做出注水井视指示曲线。

注水井全井视指示曲线通常分为直线型和折线型。分层视指示曲线分为直线型、折线型及垂直型 (见图4、图5、图6)。在利用指示曲线分析吸水能力及判断井下工具工作状况时, 需将同一井、层

不同时间的指示曲线画在同一图上,以便对比分析。

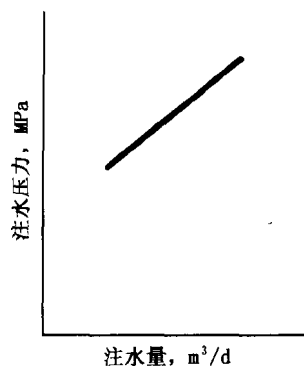


图4 直线型指示曲线

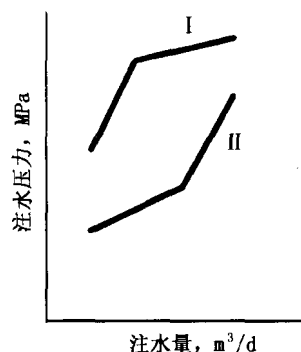


图5 折线型指示曲线

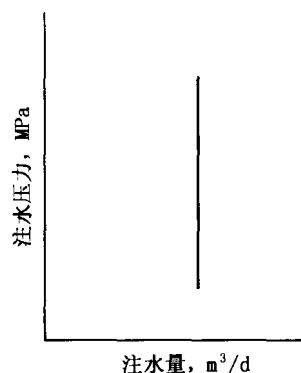


图6 垂直型指示曲线

## 6 稳定试井资料的定性解释方法

### 6.1 采油井指示曲线

#### 6.1.1 直线型

特征为过原点的直线(见图1曲线I),一般是较小生产压差条件的单相渗流形成的。

#### 6.1.2 曲线型

特征为过原点凸向产量轴的曲线(见图1曲线II)。这类曲线一般反映了单相非达西或油气两相渗流的流动特点,在较大生产压差或流压小于饱和压力时形成。

#### 6.1.3 混合型

特征为先是过原点的直线,然后紧接着是凸向产量轴的曲线(见图1曲线III)。直线部分为单相达西渗流,曲线部分包括单相非达西渗流及油气两相渗流等。

#### 6.1.4 异常型

特征为过原点凸向压力轴的曲线(见图1曲线IV)。产生该类曲线的原因包括测试工作制度未达稳定、新井井壁污染在测试过程中逐渐下降,以及随着生产压差的增加有新的层位投入生产等。因此异常曲线并非一定是不存在的,应根据实际情况具体分析,若为测试未达稳定所致,则应重测。

### 6.2 注水井全井视指示曲线

#### 6.2.1 直线型

特征为一斜率大于零的直线,不一定过原点。反映某一渗透层占的比例较大或某一单层为主要吸水层的情况。渗透率高时,直线偏近注水量轴;反之,偏近井口压力轴。

#### 6.2.2 折线型

折线(向下)型反映注水压力增大到一定程度之后,注水量和吸水指数都随压力增大。原因有:吸水层数增多、某些吸水层的注水压力达到该层的破裂压力以及吸水层的非均质等。

折线(向上)型反映地层堵塞增加,吸水层减少或吸水层渗透率下降等原因。

### 6.3 注水井分层视指示曲线

#### 6.3.1 直线型

反映地层吸水量与注水压力成线性关系(见图4)。在层段内吸水层位较少、注入压力小于破裂压力的情况下常出现这一情况。

#### 6.3.2 折线(向下)型

反映注水压力升高到某一值时,油层的吸水能力开始增强,或注水层段中增加了新的吸水层(见

图 5 曲线 II)。

### 6.3.3 折线(向上)型

在水嘴直径较小、油层吸水能力较强的情况下发生(见图 5 曲线 I)。原因是注水压力增高,使水嘴嘴损增大,导致注水量增加缓慢。

### 6.3.4 垂直型

在油层吸水能力强、水嘴直径小(不大于 2mm)的情况下,容易测得此类视指示曲线(见图 6)。此类视指示曲线反映随注水压力的增加,嘴损也相应增加,而注水量变化不大。

## 7 单相流动稳定试井采油井指示曲线的定量解释方法

### 7.1 直线型指示曲线

对于直线型指示曲线或混合型指示曲线的直线部分,可以计算采油指数  $J_o$ 、油层渗透率  $K$  和计算地层压力  $p_{Ro}$ 。

#### 7.1.1 采油指数

在直线上任取一测试点  $(q_o, \Delta p)$ , 则  $J_o$  为:

$$J_o = q_o / \Delta p \quad \dots\dots\dots(2)$$

#### 7.1.2 油层渗透率

利用求得的采油指数  $J_o$ , 由拟稳态流方程可求得储层平均渗透率  $K$  为:

$$K = \frac{1.842 J_o \mu B \left[ \ln \left( \frac{r_e}{r_w} \right) - \frac{3}{4} + S \right]}{h} \quad \dots\dots\dots(3)$$

对于部分钻开的块状油藏,用采油指数  $J_o$  计算储层平均渗透率时,应考虑钻开程度不完善对产量的影响。在这种情况下,可用以下的 Muskat (麦斯凯特) 公式计算储层的平均渗透率:

$$K = \frac{J_o \mu B G}{0.0864 h} \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$G = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{h}{2h_p} (C_1 - C_2) - \ln \left( \frac{4h}{r_e} \right) \right] \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$C_1 = \ln \frac{0.875 h_p + \sqrt{\frac{r_w^2}{4} + (0.875 h_p)^2}}{-0.125 h_p + \sqrt{\frac{r_w^2}{4} + (0.125 h_p)^2}} \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$C_2 = \ln \left[ \left( 1 - 0.875 \frac{h_p}{h} \right) \left( 1 - 0.125 \frac{h_p}{h} \right) \right] \quad \dots\dots\dots(7)$$

#### 7.1.3 地层压力

将指示曲线直线部分外推至  $q_o = 0$  处求得的  $p_{wf}$  即为地层压力  $p_{Ro}$ 。

### 7.2 曲线型指示曲线

对于油藏流体为单相非达西渗流时,曲线型指示曲线可用二项式表示:

$$\Delta p_p = a q + b q^2 \quad \dots\dots\dots(8)$$

由此可以计算油层渗透率  $K$ 、非达西流动系数  $D$ 、湍流系数  $\beta$  以及任一流压  $p_{wf}$  下的产量  $q_o$ 。

#### 7.2.1 油层渗透率

$$K = \frac{1.842 \mu_o B \left[ \ln \left( \frac{r_e}{r_w} \right) - \frac{3}{4} + S \right]}{a h} \quad \dots\dots\dots(9)$$

#### 7.2.2 非达西流动系数

$$D = b K h / (1.842 B \mu_o) \quad \dots\dots\dots(10)$$



## 7.2.3 湍流系数 (或紊流系数)

$$\beta = \frac{Dh^2 r_w}{7.80 \times 10^{-14} B^2 \rho_o} \dots\dots\dots(11)$$

7.2.4 任一流压  $p_{wf}$  下的产量  $q_o$ 

$$q_o = \frac{-a + \sqrt{a^2 + 4b(p_R - p_{wf})}}{2b} \dots\dots\dots(12)$$

此式的条件是地层压力  $p_R$  在试井期间保持不变。若  $p_{wf}$  为油井最小自喷流压, 则式 (12) 可求出油井的最大自喷产量。

## 7.3 混合型指示曲线

可分解为直线型和曲线型两部分求解井和地层参数。

## 8 油气两相流动稳定试井曲线的定量解释方法

## 8.1 地层压力低于饱和压力条件下的稳定试井解释

## 8.1.1 Vogel (沃格) 方程

当油藏流体为油气两相时, 可以用 Vogel 方程整理稳定试井资料。Vogel 方程为:

$$\left(\frac{q_o}{q_{\max}}\right) = 1 - 0.2\left(\frac{p_{wf}}{p_R}\right) - 0.8\left(\frac{p_{wf}}{p_R}\right)^2 \dots\dots\dots(13)$$

由式 (13) 表示的曲线亦称 IPR 曲线, 即流入动态曲线, 可用于求出任一流压  $p_{wf}$  下的产油量  $q_o$ 。

## 8.1.2 Fetkovich (费特科维奇) 方程

该方程与气井的指数方程类似, 其表达式为:

$$q_o = J'(p_R^2 - p_{wf}^2)^n \dots\dots\dots(14)$$

该式也可求出任一流压下的产量。

## 8.2 流压低于饱和压力、地层压力高于饱和压力条件下的稳定试井解释

此时沃格方程改写为:

$$q_o = q_b + (q_{o,\max} - q_b) \cdot \left[1 - 0.2\left(\frac{p_{wf}}{p_b}\right) - 0.8\left(\frac{p_{wf}}{p_b}\right)^2\right] \dots\dots\dots(15)$$

而  $q_b$ ,  $q_{o,\max}$  可用下式计算:

$$q_b = J(p_R - p_b) \dots\dots\dots(16)$$

$$q_{o,\max} = q_b + \frac{Jp_b}{1.8} \dots\dots\dots(17)$$

式 (16) 中的  $J$  仍是采油指数, 计算公式为

$$J = q / \left\{ (p_R - p_b) + \frac{p_b}{1.8} \left[ 1 - 0.2\left(\frac{p_{wf}}{p_b}\right) - 0.8\left(\frac{p_{wf}}{p_b}\right)^2 \right] \right\} \dots\dots\dots(18)$$

# 附录 A

## (规范性附录)

### 符号注释

- $a$ ——二项式产能方程的系数,  $\text{MPa}/(\text{m}^3/\text{d})$ ;  
 $b$ ——二项式产能方程〔见式(8)〕的系数,  $\text{MPa}/(\text{m}^3/\text{d})^2$ ;  
 $B$ ——原油地层体积系数,  $\text{m}^3/\text{m}^3$ ;  
 $C_t$ ——系统总有效压缩系数,  $\text{MPa}^{-1}$ ;  
 $D$ ——非达西流动系数,  $(\text{m}^3/\text{d})^{-2}$ ;  
 $G$ ——形状系数, 见式(5);  
 $h$ ——储层有效厚度,  $\text{m}$ ;  
 $h_p$ ——钻开厚度,  $\text{m}$ ;  
 $J$ ——采油指数,  $\text{m}^3/(\text{d}\cdot\text{MPa})$ ;  
 $J'$ ——Fetkovich 方程的系数,  $(\text{m}^3/\text{d})/(\text{MPa})^{2n}$ ;  
 $K$ ——有效渗透率,  $10^{-3}\mu\text{m}^2$ ;  
 $N_{pi}$ ——第  $i$  个工作制度末的累积产量,  $\text{m}^3$  或  $\text{t}$ ;  
 $n$ ——Fetkovich 方程的指数;  
 $p$ ——压力,  $\text{MPa}$ ;  
 $p_b$ ——饱和压力,  $\text{MPa}$ ;  
 $p_R$ ——地层压力,  $\text{MPa}$ ;  
 $p_{wf}$ ——流动压力,  $\text{MPa}$ ;  
 $\Delta p = p_R - p_{wf}$ ——生产压差,  $\text{MPa}$ ;  
 $q_o$ ——油井产量,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  
 $r_e$ ——供给半径,  $\text{m}$ ;  
 $r_w$ ——油井折算半径,  $\text{m}$ ;  
 $S$ ——表皮系数;  
 $\mu$ ——地层原油粘度,  $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ;  
 $\rho_o$ ——地层原油密度,  $\text{t}/\text{m}^3$ ;  
 $\varphi$ ——有效孔隙度。
-