

# 试气求产制度快速确定方法

许金江

中石化中原石油工程有限公司井下特种作业公司 河南濮阳 457164

通讯作者: Email: 605059036@qq.com

引用: 许金江. 试气求产制度快速确定方法[J]. 油气井测试, 2022, 31(5): 70-74.

Cite: XU Jinjiang. Method for quickly determining production system during gas testing [J]. Well Testing, 2022, 31(5): 70-74.

**摘要** 为改变现场试气节流油嘴及孔板尺寸的选择基本依靠施工设计及测气经验获得的现状, 提出了试气求产制度优、快实用的确定方法。根据天然气能量方程式和天然气性质, 推导出元坝探区及焦石探区油嘴与井口油压、气产量的关系式; 以达西流动和最大理论产量为基础, 应用节点分析技术, 确定序列求产油嘴及孔板尺寸方法。实践表明, 该方法现场应用适用率 98%, 油嘴尺寸一次选择适用率 100%, 更换孔板操作最多 3 次, 可确保施工顺利进行。试气求产制度快速确定方法提高了现场资料录取质量, 有效控制并降低了测气期间可能产生的施工风险。

**关键词** 试气; 节流油嘴; 孔板尺寸; 优化方法; 求产; 工作制度; 分离器; 孔板压差

**中图分类号:** TE353 **文献标识码:** B **DOI:** 10. 19680/j. cnki. 1004-4388. 2022. 05. 014

## Method for quickly determining production system during gas testing

XU Jinjiang

Sinopec Zhongyuan Petroleum Engineering Co., Ltd. Downhole Special Operation Company, Puyang, Henan 457164, China

**Abstract:** During gas testing on site, the selections of throttling nozzle and orifice plate size basically depend on operation design and gas testing experience. In this paper, an optimal, fast, and practical method for determining production system during gas testing was proposed. According to the energy equation and properties of natural gas, the relationships between nozzles and wellhead tubing pressure/gas production in the Yuanba and Jiaoshi exploration areas were derived. Based on the Darcy flow and the maximum theoretical production, the production nozzle and the orifice plate size were determined sequentially by applying node analysis technology. Practices have shown that the applicability rate of this method is 98% on-site, the applicability rate of the nozzle size for one-time selection is 100%, and the operation of replacing the orifice plate is at most 3 times, which can ensure a smooth operation progress. The method for quickly determining production system during gas testing improves the quality of on-site data acquisition, and effectively controls and reduces the operation risks that may occur during the gas testing.

**Keywords:** gas testing; throttle nozzle; orifice plate size; optimization method; production; system; separator; orifice plate pressure difference

目前现场测气油嘴及孔板的选择, 并没有一套系统的方法, 基本依靠施工设计及操作者的现场施工经验, 依据井口压力和放喷出口火焰高度, 感性判断气产量大小。由于操作者存在经验差异, 选择油嘴及孔板误差大, 经常发生地层出砂堵塞井内工具或砂埋井内工具串、高压刺漏井口, 以及孔板多次试验性选择, 增加现场施工危险系数<sup>[1-2]</sup>。前人对试气工作制度进行了研究, 杨宝君<sup>[3]</sup>探讨了试气油嘴的流动规律, 给出了油嘴直径与气产量之间的关系。李宝君<sup>[4]</sup>采用节点分析方法, 应用 WTES 现代试井软件进行敏感参数分析, 给出了系统试气或

“一点法”试气油嘴大小的选择方法。马华丽<sup>[5]</sup>提出了根据节点分析技术预测不同油嘴下气井生产动态的方法。庄惠农<sup>[6]</sup>对试气产能测试点序列提出了具体要求, 通常采用递增序列, 对于修正等时试井, 必须采取递增序列。何晓波<sup>[7]</sup>针对页岩气井按照常规天然气井试气工作制度求产, 产量波动幅度大, 求产时间长, 冬季施工井口易产生天然气水合物, 提出了从大到小油嘴求产优化技术。本文在前人研究成果的基础上, 结合历年现场试气资料, 梳理动态资料之间的相互关系, 建立了现场试气求产制度优、快确定方法。

## 1 油嘴尺寸确定

气井产能测试,至少录取4个油嘴下的气产量和井底压力,据此绘制产能曲线,建立二项式和指数式产能方程<sup>[8]</sup>。

### 1.1 首个油嘴尺寸确定

在储层改造或射孔后,初期放喷,一般采用3~6 mm油嘴控制放喷排液,待放喷曲线出现拐点或裂缝闭合,开始以0.3~0.5 m<sup>3</sup>/min控制放喷排液,当井口出液量连续4 h小于5 m<sup>3</sup>/d,且呈逐渐减少趋势,即进入测试求产程序。

根据排液末期井口油压及产量,结合天然气能量方程式和天然气性质<sup>[9]</sup>,推导首个求产油嘴尺寸与井口油压和气产量的关系。

根据天然气能量方程式,得到过油嘴流速为

$$v = \left( \frac{2n}{n-1} \times \frac{p}{\rho} \times (1 - \varepsilon^{\frac{n-1}{n}}) \right)^{1/2} \quad (1)$$

过油嘴实际体积流量为  $CvA$ , 质量流量为

$$q_m = CvAp \quad (2)$$

(1) 式代入(2)式得

$$q_m = CA\rho \left( \frac{2n}{n-1} \times \frac{p}{\rho} \times (1 - \varepsilon^{\frac{n-1}{n}}) \right)^{1/2} \quad (3)$$

根据  $PV = ZRT$  和  $\rho = \frac{MP}{ZRT}$ , 当压力比达到临界压力比( $\varepsilon \leq 0.546$ ) 时, 过油嘴质量流量为

$$q_m = CAp_h \times \sqrt{\frac{M}{ZRT}} \times \sqrt{n \left( \frac{2}{n+1} \right)^{\frac{n+1}{n-1}}} \quad (4)$$

当多变指数  $n = 1.3$ ,  $\varepsilon \leq 0.546$ , 则

$$q_m = 0.524Cd^2p_h \times \sqrt{\frac{M}{ZRT}} \quad (5)$$

孔板系数  $C$  考虑摩阻损失, 取  $C = 0.865$ , 则

$$q_m = 0.453d^2p_h \times \sqrt{\frac{M}{ZRT}} \quad (6)$$

式中:  $C$  为孔板系数;  $A$  为油嘴孔道的断面积, m<sup>2</sup>;  $n$  为多变指数;  $\varepsilon$  为油嘴前后压力比值;  $p_h$  为井口油压, MPa;  $M$  为摩尔质量, 常数;  $R$  为常数;  $v$  为天然气流动速度, m/s;  $\rho$  为天然气相对密度;  $q_m$  为天然气产量, 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d。

#### 1.1.1 焦石探区

统计焦石探区试气井天然气特性, 相对密度 0.566 9, 压缩系数 0.998 1, 流体平均流温 302.679 8 K, 则以油田实用单位, 推导油嘴与井口油压、气产量的关系为

$$d^2 = \frac{q_g}{170.05p_h} \quad (7)$$

#### 1.1.2 元坝探区

统计元坝探区试气井天然气特性, 相对密度 0.586 9, 压缩系数 1.076, 流体平均流温 315.698 K, 则以油田实用单位, 推导油嘴与井口油压、气产量的关系为

$$d^2 = \frac{q_g}{217.86p_h} \quad (8)$$

### 1.2 序列求产油嘴尺寸确定

当录取到第一个工作制度下的气产量、井口油压后, 用气井相关公式估算井底流压, 得到一组产量、流压数据, 粗略估算一个无阻流量。以这一组产量、流压资料为基础, 应用节点分析方法绘制(预测)气井的流入动态曲线(见图1), 以达西流动(稳定流动)和最大理论产量为基础, 进一步预测不同油嘴生产下的产量和流压, 即等间距内插1~2个或2~3个油嘴, 获得求产油嘴尺寸系列(见图2)。

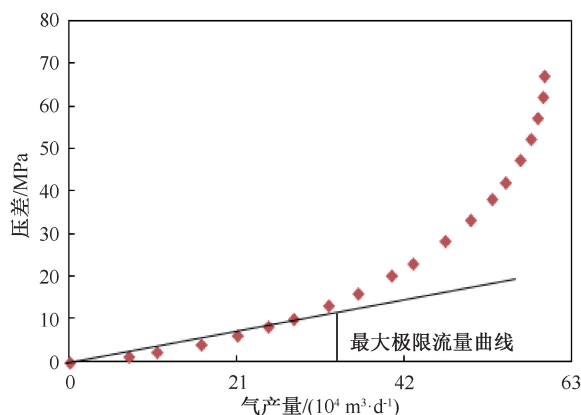


图1 产能指示曲线

Fig. 1 Productivity indicative curve

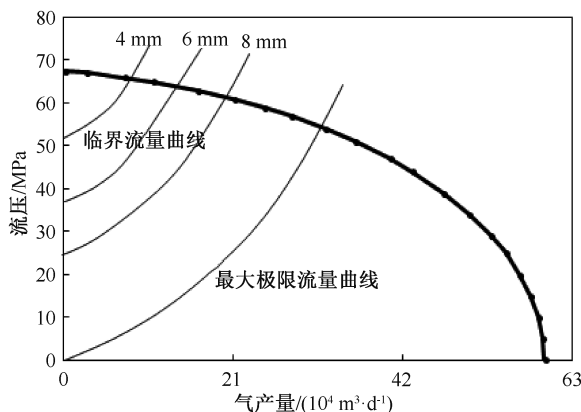


图2 IPR曲线-油嘴尺寸优化确定

Fig. 2 Determination of IPR curve and optimal nozzle size

2 孔板尺寸的确定

使用估算气产量反推孔板尺寸。预测气产量、分离器  $\Delta p/p_i$  及孔板尺寸与天然气产量的关系,确定孔板尺寸。

2.1 气产量与上游压力的关系曲线

统计元坝探区 18 口井(52 层)及焦石探区 20 口井试气求产资料数据,将不同油嘴下的天然气产量与上游压力绘制散点图(见图 3),并进行线性回归,线性系数 0.985 4,二者拟合关系式见表 1。

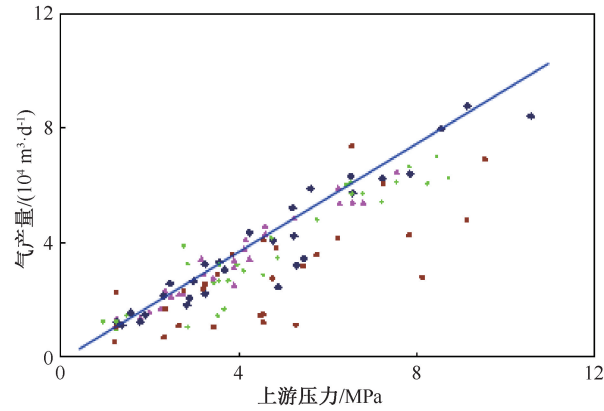


图 3 天然气产量与上游压力关系  
Fig. 3 Relationship between natural gas production and upstream pressure

表 1 不同油嘴下的气产量与上游压力线性拟合公式  
Table 1 Linear fitting equation between gas production and upstream pressure under different nozzles

油嘴/mm	拟合经验公式	线性系数	孔板尺寸/m
缝插针 3	$q_g = 0.152\ 7 + 0.014\ 5p_f$	$R = 0.947\ 1$	12~20
4	$q_g = 0.102\ 3 + 0.012\ 6p_f$	$R = 0.953\ 2$	22~26
6	$q_g = 0.250\ 3 + 0.017\ 6p_f$	$R = 0.825\ 1$	24~30
8	$q_g = 0.108\ 1 + 0.028\ 2p_f$	$R = 0.985\ 4$	26~31
10	$q_g = 0.106\ 3 + 0.002\ 1p_f$	$R = 0.965\ 1$	26~39
12	$q_g = 0.428\ 4 + 0.002\ 7p_f$	$R = 0.870\ 1$	41~50
14	$q_g = 0.021\ 4 + 0.004\ 1p_f$	$R = 0.942\ 1$	55~68
16	$q_g = 0.478\ 0 + 0.006\ 1p_f$	$R = 0.954\ 1$	69~76

可以看出,油嘴大小,与测试气产量和上游压力呈正相关性。

$$q_g = a + bp_f \tag{9}$$

式中:  $q_g$  为天然气产量,  $10^4\ m^3/d$ ;  $p_f$  为上游压力, MPa;  $a$  为截距;  $b$  为斜率。

2.2 孔板尺寸的确定

一体化流量计测气公式为

$$q_g = C\sqrt{\Delta p \cdot p_i} \tag{10}$$

式中:  $\Delta p$  为孔板压差, MPa;  $p_i$  为地层静压, MPa。

根据式(10),天然气产量大小主要由孔板尺寸、分离器工作压力及孔板压差决定,受天然气性质、分离器温度等影响很小<sup>[11-13]</sup>。表 2 是依据元坝探区 18 口井(52 层)及焦石探区 20 口井试气求产资料数据,推算出的分离器  $\Delta p/p_i$  及孔板尺寸与天然气产量三者之间的关系。

表 2 分离器  $\Delta p/p_i$  及孔板尺寸与天然气产量的关系

Table 2 Relationship between separator or orifice plate size and gas production 气产量/( $10^4\ m^3 \cdot d^{-1}$ )

孔板尺寸/mm	$\Delta p/p_i = 0.25$	$\Delta p/p_i = 0.51$	$\Delta p/p_i = 1.01$	$\Delta p/p_i = 1.53$	$\Delta p/p_i = 2.03$	$\Delta p/p_i = 2.54$	$\Delta p/p_i = 3.04$
14	9.23	10.23	11.12	12.81	13.25	14.52	15.68
16	12.35	12.62	13.02	13.67	15.36	16.81	17.81
18	13.64	14.91	15.57	15.94	17.81	18.51	19.65
20	15.10	16.47	16.73	17.88	19.01	20.16	21.29
21	16.56	18.09	18.39	19.67	20.94	22.21	23.47
22	18.06	18.06	20.10	21.54	22.94	24.35	25.74
24	19.60	21.47	21.88	23.48	25.03	26.60	28.13
26	21.18	23.25	23.74	25.52	27.22	28.96	30.64
28	22.82	22.82	25.67	27.65	29.52	31.44	33.29
30	24.51	27.02	27.69	29.89	31.95	35.77	36.10
36	26.26	29.03	29.81	32.24	34.51	38.65	39.07
38	28.08	28.08	32.04	34.73	35.31	41.69	42.23
40	29.97	33.31	34.38	37.36	38.08	44.92	45.58
45	31.93	35.61	36.84	40.14	41.02	48.34	49.14
48	33.99	33.99	39.43	43.08	44.13	49.77	52.94
50	36.13	40.55	42.17	46.19	47.45	53.52	56.98
54	38.37	43.20	45.06	49.49	50.98	57.52	61.29
57	43.71	43.71	48.11	53.00	54.74	61.78	65.88
60	46.29	48.95	51.34	56.71	61.35	66.31	70.77

由表 2 可以看出,使用估算气产量反推孔板尺寸,只需要考虑分离器工作压力和孔板压差<sup>[14-15]</sup>。

3 现场应用

2020 年以来,该方法成功推广应用于焦石及元坝探区共 13 口井试气求产油嘴及孔板尺寸的确定,应用成功率 98%,更换孔板操作最多 3 次,资料录取全准率 100%。

3.1 JY-1HF 井油嘴及序列确定

该井压裂排液结束,根据初始放喷油嘴(14 mm)测试气产量及井口油压,折算井底流压、目前地层压

力,按“一点法”估算无阻流量为  $78.22 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,应用节点分析方法绘制 IPR 产能指示曲线见图 4,考虑流体达西流动,确定的气井最大极限产量为  $41.32 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ;等间距内插 8 mm、10 mm、12 mm 油嘴系列,预测气产量分别为  $11.084 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 、 $20.485 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 、 $31.828 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

3.2 孔板尺寸确定

根据预测气产量、分离器  $\Delta p/p_i$  及孔板尺寸与天然气产量的关系(表 2),确定 8 mm、10 mm、12 mm 油嘴对应孔板尺寸分别为 14 mm、22 mm、30 mm(见表 3)。根据预测油嘴及孔板,现场求产曲线见图 5~图 7。

表 3 JY-1HF 井油嘴、孔板尺寸选择及应用  
Table 3 Selection and application of nozzle and orifice plate size for well JY-1HF

井号	油嘴/mm	上游压力/ MPa	分离器工作 压力/MPa	气产量/(10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )			选择 孔板	选择 次数
				预测	实测	误差/%		
JY-1HF 井	8	3.71	0.84	11.084	9.982	9.94	14	1
	10	3.93	0.94	20.485	18.962	7.43	22	1
	12	3.62	1.14	31.828	30.115	5.38	30	1

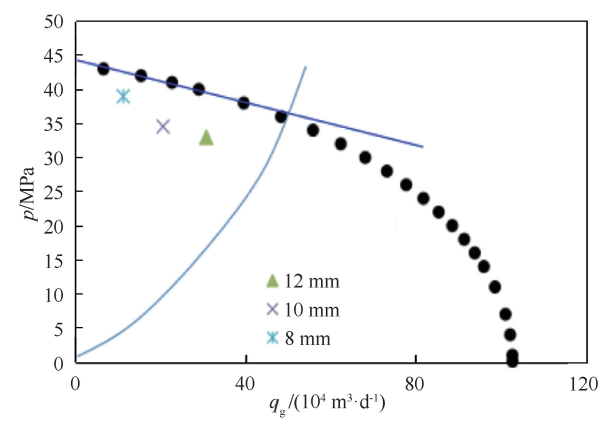


图 4 JY-1HF 井 IPR 产能指示曲线  
Fig. 4 IPR productivity indicative curve for well JY-1HF

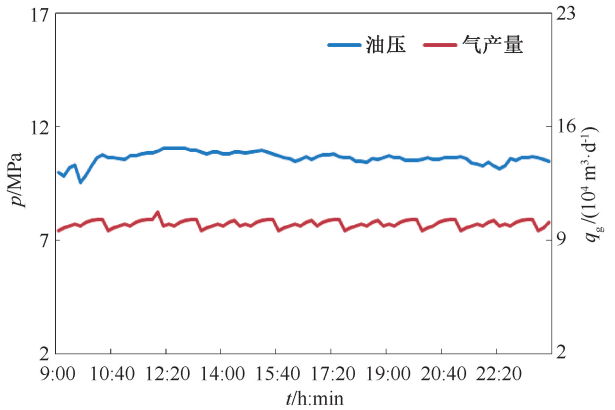


图 5 JY-1HF 井 8 mm 油嘴求产数据  
Fig. 5 Production data of well JY-1HF with 8 mm nozzle

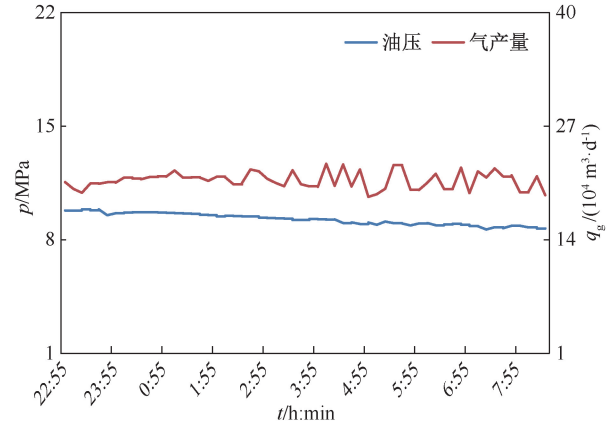


图 6 JY-1HF 井 10 mm 求产数据  
Fig. 6 Production data of well JY-1HF with 10 mm nozzle

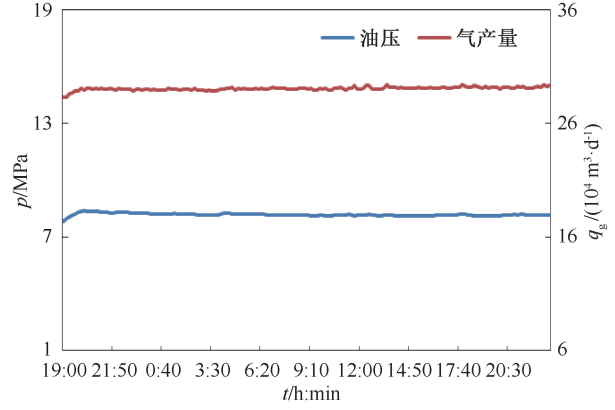


图 7 JY-1HF 井 12 mm 求产数据  
Fig. 7 Production data of well JY-1HF with 12 mm nozzle

由图 5~图 7 可以看出,测试压差、气产量增量控制合理,气产量、油压均达到了稳定标准;预测气产量与实测气产量误差小于 10%,表明油嘴序列及孔板尺寸确定合理。

## 4 结论

(1) 根据流体过油嘴能量及流体质量流量方程,以及区块天然气物性参数,推导出了气井求产油嘴理论计算公式,建立了试气求产制度优、快确定方法。

(2) 该技术方法现场应用适用率 98%,不仅提高了现场资料录取质量,降低了测气期间可能产生的施工风险,而且确保了施工顺利进行。

(3) 实践证明,方法适用性强,可推广应用于非常规页岩气气藏。

**致谢:** 论文编写过程中,中石化重庆涪陵页岩气勘探开发有限公司试气工程项目部、中石化勘探分公司元坝项目部各位领导给予了大力支持,在此一并表示感谢。

## 参考文献

- [1] 安锦,高联益,陈晓能,等. 三相分离器现场试验及应用评价[J]. 油气井测试,2004,13(2):71-73.  
AN Jin,GAO Lianyi,CHEN Xiaoneng,et al. Field application and evaluation for oil, gas and water separator [J]. Well Testing,2004,13(2):71-73.
- [2] 杨宝君. 天然气经过油嘴的流动规律研究[J]. 油田地面工程,1992,(6):19-22.  
YANG Baojun. Study on the flow law of natural gas through the nozzle[J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 1992,(6):19-22.
- [3] 李宝君. 大庆深层气井试气油嘴的选择与产量预测[J]. 油气井测试,2009,18(3):36-38,41.  
LI Baojun. Optimum choke size determination and production rate prediction in gas well test for deep reservoirs[J]. Well Testing,2009,18(3):36-38,41.
- [4] 李君,王源. 气井节点分析方法及其应用[J]. 油气井测试. 2012,21(6):28-30.  
LI Jun,WANG Yuan. Nodal analysis method and its application of cas well[J]. Well Testing,2012,21(6):28-30.
- [5] 马华丽,蒋凯军. 节点分析技术在深层气井试气生产中的应用[J]. 油气井测试,2008,17(5):24-26,30.  
MA Huali,JIANG Kaijun. Application of node analysis technology in deep gas well test production [J]. Well Testing, 2008,17(5):24-26,30.
- [6] 国亮. 改进多元线性回归模型在某油田产量预测中的应用[J]. 西安电子科技大学学报(社会科学版),2009,19(3):71-75.  
GUO Liang. Application of improved multivariate linear

- regression to output prediction of an oilfield [J]. Journal of Xidian University( Social Science Edition), 2009, 19(3): 71-75.
- [7] 庄惠农. 气藏动态描述和试井[M]. 北京:石油工业出版社,2004:111-113.
- [8] 何晓波. 涪陵页岩气求产试气工艺优化与应用[J]. 江汉石油职工大学学报,2014,27(3):30-33.  
HE Xiaobo. Optimization and application of production-oriented shale gas testing technology infuling[J]. Journal of Jiangnan Petroleum Univrrsity of Staff and Workers,2014, 27(3):30-33.
- [9] 刘能强. 实用现代试井解释方法[M]. 北京:石油工业出版社,2008:11-20.
- [10] 王鸣华. 气藏工程[M]. 北京:石油工业出版社,1997, 12:1-37.
- [11] 周继德. 用抽油井液面计算压力的两种方法及其效果对比[J]. 大庆石油地质与开发,1990,9(4):47-56.  
ZHOU Jide. Comparison between two methods in calculating pressure from fluid level in pumping wells[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 1990,9(4): 47-56.
- [12] 罗银富,马中良,谢剑飞,等. 新的气井定压试井分析方法[J]. 新疆石油地质,2008,29(2):235-237.  
LUO Yinfu, MA Zhongliang, XIE Jianfei, et al. A new method for testing analysis of gas well production at constant pressure [J]. Xinjiang Petroleum Geology,2008, 29(2):235-237.
- [13] 赖枫鹏,李治平,岑芳. 气井风险产能评价计算方法[J]. 新疆石油地质,2007,28(3):348-349.  
LAI Fengpeng, LI Zhiping, Cen Fang. Method for estimation of gas well risk productivity [J]. Xinjiang Petroleum Geology,2007,28(3):348-349.
- [14] 夏明铮. 产能试井过程中不适当调节产量对产能评价的影响[J]. 油气井测试,2009,18(6):39-40.  
XIA Mingzheng. Influence of inappropriate flow rate adjustment during deliverability test to deliverability evaluation[J]. Well Testing,2009,18(6):39-40.
- [15] 李跃刚,郝玉鸿,范继武. “单点法”确定气井无阻流量的影响因素分析[J]. 海洋石油,2003,23(1):36-41.  
LI Yaogang,HAO Yuhong,FAN Jiwu. Factors analysis about non-resistance flow of gas welldefined by “spot measurement”[J]. Offshore Oil,2003,23(1):36-41.

编辑 穆立婷

**第一作者简介:** 许金江,男,1970 年出生,高级工程师,2008 年 7 月毕业于中国石油大学(华东)石油工程专业,主要从事修井、侧钻工艺技术研究工作。电话:13673936279;Email:605059036@qq.com。通信地址:河南省濮阳市中原油田濮阳县柳屯镇井下特种作业公司,邮政编码:457164。