

# 应力敏感特低渗气藏绝对无阻流量计算新方法

王美楠, 蔡晖, 何新容, 牟春荣, 吴宗勇

中海石油(中国)有限公司天津分公司 天津 300459

通讯作者: Email: wangmn2@cnoc.com.cn

项目支持: 中海石油(中国)有限公司重大科技专项“渤海油田强化水驱及增产挖潜技术”(CNOOC-KJ 135 ZDXM 36 TJ 01 TJ)

引用: 王美楠, 蔡晖, 何新容, 等. 应力敏感特低渗气藏绝对无阻流量计算新方法[J]. 油气井测试, 2024, 33(1): 67-71.

Cite: WANG Meinan, CAI Hui, HE Xinrong, et al. A new method for calculating absolute open flow rate of stress sensitive ultra-low permeability gas reservoirs[J]. Well Testing, 2024, 33(1): 67-71.

**摘要** 为准确评价特低渗气藏产能, 推导考虑应力敏感效应的气井产能方程, 建立了特低渗气藏绝对无阻流量计算新方法。通过产能方程左端项数值与产气量的线性关系, 确定方程系数  $A$  和  $B$ , 建立考虑应力敏感效应的气井产能方程和绝对无阻流量计算公式, 提高特低渗气藏产能预测精度。经 S 气藏 A1、B1、B2 井现场应用, 相比于忽略应力敏感影响, 应力敏感的气井绝对无阻流量下降 19%, 设计产能精度达到 90.4% 和 95.0%, 表明应力敏感效应对气井产能影响较大。新方法更适用于特低渗气藏的产能评价, 具有较大的推广应用价值。

**关键词** 特低渗气藏; 异常高压; 应力敏感效应; 渗流理论; 气井产能方程; 二项式; 绝对无阻流量; 产能评价

**中图分类号**: TE373 **文献标识码**: A **DOI**: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2024.01.012

## A new method for calculating absolute open flow rate of stress sensitive ultra-low permeability gas reservoirs

WANG Meinan, CAI Hui, HE Xinrong, MU Chunrong, WU Zongyong

CNOOC China Limited Tianjin Branch, Tianjin 300459, China

**Abstract:** In order to accurately assess the productivity of stress-sensitive ultra-low permeability gas reservoirs, a productivity equation for gas wells considering the stress-sensitive effect was derived, and a new method for calculating absolute open flow in such reservoirs was established. By establishing a linear relationship between the numerical values of the left-hand side of the productivity equation and the gas production, coefficients  $A$  and  $B$  were determined. Then, a productivity equation for gas wells considering stress-sensitive effects and a formula for calculating absolute open flow were established, which enhanced the productivity predicting accuracy in ultra-low permeability gas reservoirs. The new method was applied to wells A1, B1, and B2 in the S gas reservoir. Compared to cases where stress-sensitive effects are ignored, the absolute open flow in stress-sensitive gas wells decreased by 19%, and the designed productivity accuracy exceeded 90.4% and 95.0%, indicating a significant impact of stress-sensitive effects on gas well productivity. The new method is more suitable for evaluating the productivity of ultra-low permeability gas reservoirs, which holds a significant promotion and application value.

**Keywords:** ultra-low permeability gas reservoirs; abnormally high pressure; stress-sensitive effect; flow theory; gas well productivity equation; binomial; absolute open flow; productivity assessment

渤海 S 气藏为特低渗异常高压气藏, 埋深 3 566.80~3 634.00 m, 静压 45.711 MPa, 压力系数为 1.334, 渗透率 0.7 mD。该类气藏在开发过程中, 压力逐渐下降, 孔隙结构易变形, 渗透率降低, 具有应力敏感特性<sup>[1-3]</sup>。为高效推动 S 气藏开发, 需要对气井产能进行准确预测<sup>[4-5]</sup>。国内外学者对气井产能做过大量研究, PIERCE 等<sup>[6]</sup>和 RAWLINES 等<sup>[7]</sup>提出常规回压试井方法进行气井无阻流量计

算; CULLENDER<sup>[8]</sup>提出单点试井和多点等时试井的方法计算气井产能; KATZ<sup>[9]</sup>采用修正等时试井法预测气井产能。上述方法均以二项式法或指数法为基础, 常规气藏的应用效果较好, 但在低渗、特低渗等复杂气藏的气井产能评价中误差较大<sup>[10-12]</sup>。针对传统二项式法不适用于特殊类型气藏产能评价问题, 国内学者在气井产能与压差关系方面进行了大量研究<sup>[13-15]</sup>, 杨慧<sup>[16]</sup>利用闪蒸模型预测气井

产能与流压的关系式,陈元千等<sup>[17]</sup>提出基于压差与产量的线性关系的绝对无阻流量算法。为准确评价S凝析气藏气井产能,本文基于渗流理论,考虑应力敏感影响,开展特低渗异常高压气藏产能评价研究,推动S气藏有效开发。

## 1 储层应力敏感效应

S气藏储层岩心铸体薄片如图1所示,其应力敏感性实验表明:岩心原始渗透率为0.666 mD,围压从3 MPa升至50 MPa后,渗透率变为0.405 mD,下降39%;降压至3 MPa后,渗透率变为0.537 mD,恢复到原始的80%(见图2)。S气藏储层的异常高压特征和特低渗的物性特点,具有应力敏感特征,随着生产压差的增加,储层骨架发生弹塑性形变,改变了微观孔隙结构,导致孔隙度、渗透率等储层物性参数,发生不可逆的降低。

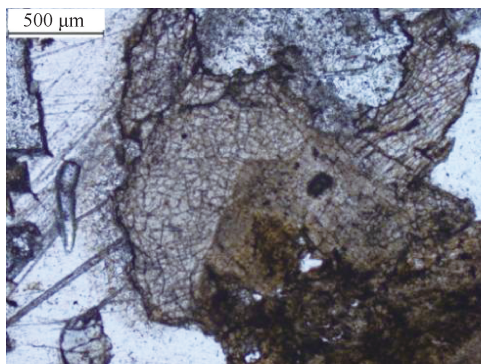


图1 岩心铸体薄片

Fig.1 Core casting thin section

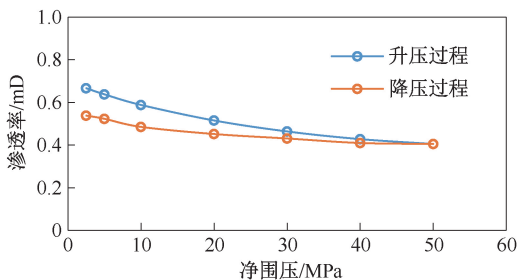


图2 岩心渗透率变化曲线(岩心变围压实验)

Fig.2 Change curve of core permeability (core variable confining pressure experiment)

岩心实验表明,岩心渗透率随压力的变化关系可用指数函数表示,即

$$K = K_i \cdot e^{-\alpha(P_e - P)} \quad (1)$$

式中: $P_e$ 为原始地层压力,MPa; $P$ 为地层压力,MPa; $K$ 为空气渗透率,mD; $K_i$ 为覆压 $P$ 下的有效渗透率,mD; $\alpha$ 为渗透率变异系数,无量纲。

## 2 应力敏感特低渗气藏绝对无阻流量计算新方法

基于渗流理论,以岩心应力敏感性实验结果为基础,考虑应力敏感效应的影响,推导应力敏感特低渗气藏产能方程,建立气井绝对无阻流量计算方法,指导应力敏感特低渗气藏产能评价。

### 2.1 应力敏感特低渗气藏产能方程

储层中气体流速较高,气体运动方程通常采用二项式表达

$$\frac{dP}{dr} = \frac{\mu_g}{K} \cdot V + \beta \cdot \rho_g \cdot V^2 \quad (2)$$

式中: $r$ 为储层某点距气井的径向距离,m; $\mu_g$ 为地层条件下气体黏度,mPa·s; $\rho_g$ 为地层条件下气体密度,kg/m<sup>3</sup>; $V$ 为气体流速,m/s; $\beta$ 为湍流系数,m<sup>-1</sup>。

定义拟压力为

$$\varphi = 2 \int_{P_a}^P \frac{P}{\mu_g} dP \quad (3)$$

$$\varphi_2 - \varphi_1 = \frac{1}{\mu_g z} (P_2^2 - P_1^2) \quad (4)$$

式中: $\varphi$ 为拟压力,MPa<sup>2</sup>/(mPa·s); $P_a$ 为平均地层压力,MPa; $Z$ 为气体偏差系数,无量纲。

拟压力与压力在高压条件下符合线性关系,根据式(1)可知,渗透率随拟压力的变化关系同样可用指数函数表达

$$K = K_i \cdot e^{-\alpha_\varphi(\varphi_e - \varphi)} \quad (5)$$

$$\alpha_\varphi = \alpha \cdot \frac{P_e - P}{\varphi_e - \varphi} \quad (6)$$

式中: $\alpha_\varphi$ 为拟压力渗透率变异系数,无量纲; $\varphi_e$ 为原始地层拟压力,MPa<sup>2</sup>/(mPa·s)。

由式(1)和式(2)可得

$$\frac{d\varphi}{dr} = \frac{2P}{\mu_g z} \frac{dP}{dr} = \frac{2P}{\mu_g z} \left( \frac{\mu_g}{K} \cdot V + \beta \cdot \rho_g \cdot V^2 \right) \quad (7)$$

由于随着压力变化,气体的体积流量变化较大,采用气体的质量流量进行公式推导。当气体的质量流量不变时,气体流速与压力的关系为

$$V = \frac{F}{A \cdot \rho} = \frac{Q_{sc} P_{sc} \cdot TZ}{2\pi r h \cdot T_{sc} \cdot P} \quad (8)$$

式中: $F$ 为气体质量流量,t/d; $A$ 为截面积,m<sup>2</sup>; $\rho$ 为密度,kg/m<sup>3</sup>; $Q_{sc}$ 为气井地面标况下的产量,10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d; $P_{sc}$ 为地面标况下的压力,MPa; $T$ 为气层温度,K; $T_{sc}$ 为地面标况下的温度,K; $h$ 为气层厚度,m。

将式(8)代入式(7)可得

$$\frac{d\varphi}{dr} = \frac{2P}{\mu_g z} \left( \frac{\mu_g}{K} \cdot \frac{Q_{sc} P_{sc} \cdot TZ}{2\pi r h \cdot T_{sc} \cdot P} + \beta \cdot \rho_g \cdot \left( \frac{Q_{sc} P_{sc} \cdot TZ}{2\pi r h \cdot T_{sc} \cdot P} \right)^2 \right) \quad (9)$$

地层条件下气体密度与地面标况下气体密度的关系为

$$\rho_g = \frac{T_{sc} \cdot Z_{sc} \cdot \rho_{sc}}{P_{sc}} \cdot \frac{P}{TZ} \quad (10)$$

式中: $\rho_{sc}$  为地面标况下气体密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $Z_{sc}$  为地面标况下气体偏差系数, 无量纲。

将式(10)代入式(9)可得

$$\frac{d\varphi}{dr} = \frac{1}{K} \cdot \frac{P_{sc} \cdot T}{\pi r h \cdot T_{sc}} Q_{sc} + \frac{\beta \cdot Z_{sc} \cdot \rho_{sc} \cdot P_{sc} \cdot T}{2\pi^2 r^2 h^2 \cdot T_{sc} \cdot \mu_g} Q_{sc}^2 \quad (11)$$

$\beta$  值可用以下经验公式确定<sup>[12]</sup>

$$\beta = \frac{\mu_g \cdot h \cdot r_w}{2.212 \times 10^{-14} \cdot K \cdot \gamma_g} \cdot D \quad (12)$$

式中: $\gamma_g$  为气体相对密度, 无量纲; $r_w$  为气井的井筒半径,  $\text{m}$ ;  $D$  为非达西流动常数。

将式(12)代入式(11)可得

$$\frac{d\varphi}{dr} = \frac{1}{K} \cdot \frac{P_{sc} \cdot T}{\pi r h \cdot T_{sc}} Q_{sc} + \frac{\mu_g \cdot h \cdot r_w \cdot D}{2.212 \times 10^{-14} \cdot K \cdot \gamma_g} \cdot \frac{Z_{sc} \cdot \rho_{sc} \cdot P_{sc} \cdot T}{2\pi^2 r^2 h^2 \cdot T_{sc} \cdot \mu_g} Q_{sc}^2 \quad (13)$$

$$\frac{d\varphi}{dr} = \frac{1}{K_i \cdot e^{-\alpha_\varphi(\varphi_e - \varphi)}} \left( \frac{P_{sc} \cdot T}{\pi r h \cdot T_{sc}} Q_{sc} + \frac{4.52 \times 10^{13} \cdot r_w \cdot D}{\gamma_g} \cdot \frac{Z_{sc} \cdot \rho_{sc} \cdot P_{sc} \cdot T}{2\pi^2 r^2 h \cdot T_{sc}} Q_{sc}^2 \right) \quad (14)$$

$$e^{-\alpha_\varphi(\varphi_e - \varphi)} d\varphi = \frac{P_{sc} T}{\pi h T_{sc} K_i} \frac{dr}{r} Q_{sc} + \frac{4.52 \times 10^{13} \cdot r_w D Z_{sc} \rho_{sc} P_{sc} T}{2\pi^2 h K_i \gamma_g T_{sc}} \cdot \frac{dr}{r^2} Q_{sc}^2 \quad (15)$$

将式(15)积分可得

$$\int_{\varphi_{wf}}^{\varphi_e} e^{-\alpha_\varphi(\varphi_e - \varphi)} d\varphi = \frac{P_{sc} T}{\pi h T_{sc} K_i} \int_{r_w}^{r_e} \frac{dr}{r} Q_{sc} + \frac{4.52 \times 10^{13} r_w D Z_{sc} \rho_{sc} P_{sc} T}{2\pi^2 h K_i \gamma_g T_{sc}} \cdot \int_{r_w}^{r_e} \frac{dr}{r^2} Q_{sc}^2 \quad (16)$$

$$\frac{1 - e^{-\alpha_\varphi(\varphi_e - \varphi)}}{\alpha_\varphi} = \frac{P_{sc} T}{\pi h T_{sc} K_i} \ln \frac{r_e}{r_w} Q_{sc} + \frac{4.52 \times 10^{13} r_w D Z_{sc} \rho_{sc} P_{sc} T}{2\pi^2 h K_i \gamma_g T_{sc}} \cdot \left( \frac{1}{r_w} - \frac{1}{r_e} \right) Q_{sc}^2 \quad (17)$$

令

$$A = \frac{P_{sc} \cdot T}{\pi h \cdot T_{sc} \cdot K_i} \ln \frac{r_e}{r_w} \quad (18)$$

$$B = \frac{4.52 \times 10^{13} \cdot r_w \cdot D \cdot Z_{sc} \cdot \rho_{sc} \cdot P_{sc} \cdot T}{\pi^2 h \cdot K_i \cdot \gamma_g \cdot T_{sc}} \cdot \left( \frac{1}{r_w} - \frac{1}{r_e} \right) \quad (19)$$

式(17)可简写为

$$\frac{1 - e^{-\alpha_\varphi(\varphi_e - \varphi)}}{\alpha_\varphi} = A \cdot Q_{sc} + B \cdot Q_{sc}^2 \quad (20)$$

将式(6)代入式(20), 可得

$$\frac{1 - e^{-\alpha(P_e - P)}}{\alpha_\varphi} = A \cdot Q_{sc} + B \cdot Q_{sc}^2 \quad (21)$$

式(21)即为应力敏感特低渗气藏产能方程。

## 2.2 气井绝对无阻流量计算方法

式(21)的两端同时除以  $Q_{sc}$ , 气井产能方程改写为

$$\frac{1 - e^{-\alpha(P_e - P)}}{Q_{sc} \alpha_\varphi} = A + B \cdot Q_{sc} \quad (22)$$

当  $P=0.101 \text{ MPa}$  时, 应力敏感特低渗气藏绝对无阻流量可由下式表示, 即

$$Q_{AOF} = \frac{-A + \sqrt{A^2 + 4B \cdot \frac{1 - e^{-\alpha(P_e - P)}}{\alpha_\varphi}}}{2B} \quad (23)$$

式中: $Q_{AOF}$  为气井的绝对无阻流量,  $\text{m}^3/\text{d}$ 。

在气井产能评价过程中, 可在直角坐标系中绘制  $[1 - e^{-\alpha(P_e - P)}] / (Q_{sc} \alpha_\varphi)$  与  $Q_{sc}$  的关系曲线, 线性回归得到式(22)的常数  $A$  和  $B$ , 进而确定气井产能方程和绝对无阻流量  $Q_{AOF}$ , 评价气井产能。

## 3 实例应用

渤海 S 气藏 A1 井进行了 3 次产能测试, 测试结果见表 1。绘制 A1 井的  $[1 - e^{-\alpha(P_e - P)}] / (Q_{sc} \alpha_\varphi)$  与  $Q_{sc}$  的关系曲线, 如图 3 所示。对图中曲线进行线性回归, 三个数据点的线性回归  $R^2=0.9461$ , 精度较高, 可以准确评价气井产能。根据回归线的斜率和截距, 可计算出  $A=91.672$ ,  $B=14.17$ 。

根据  $A$  和  $B$  的取值, 确定 A1 井的产能方程为

$$\frac{1 - e^{-\alpha(P_e - P)}}{\alpha_\varphi} = 91.672 Q_{sc} + 14.17 Q_{sc}^2 \quad (24)$$

表 1 A1 井产能测试表

Table 1 Production Capacity Test Data of Well A1

静压/ MPa	流压/ MPa	日产气/ (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	应力敏 感因子	气体黏度/ (mPa·s)	气体偏 差因子	产能方程 左端项
43.85	38.910	12.66	0.026 6	0.087	1.241 0	274.70
43.85	35.460	16.85	0.026 6	0.087	1.241 0	318.85
43.85	32.310	18.66	0.026 6	0.087	1.241 0	364.42

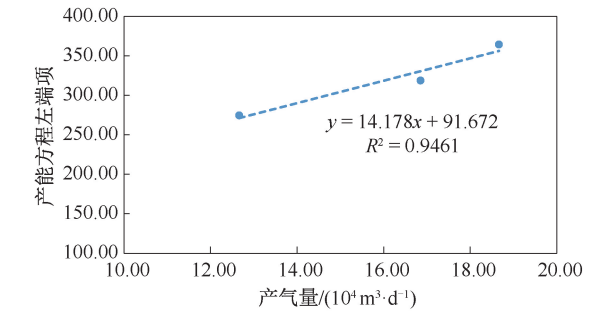


图 3 A1 井产能方程左端项数值与产气量的关系曲线图  
Fig. 3 Curve of the relationship between the left end term value of the productivity equation of Well A1 and gas production

绘制不同条件下的 IPR 曲线,如图 4 所示,考虑应力敏感效应的 IPR 曲线为红线,不考虑应力敏感效应的 IPR 曲线为蓝线,红线明显低于蓝线,考虑应力敏感效应后,井底流压越低,生产压差越大,储层渗透率降低幅度越大,应力敏感效应对气井产能的影响越明显。

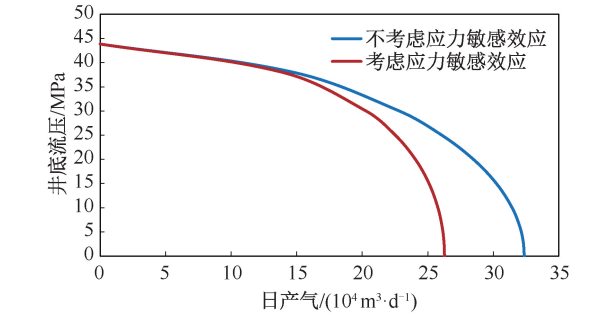


图 4 A1 井不同条件下的 IPR 曲线  
Fig. 4 IPR curves under different conditions of A1 Well

当  $P=0.1$  MPa 时,根据式(23)可得到 A1 井的绝对无阻流量计算式为

$$Q_{\text{AOF}} = \frac{-91.672 + \sqrt{8\,403.76 + 56.68 \frac{1 - e^{-\alpha(P_e - P)}}{\alpha_\phi}}}{28.34} \quad (25)$$

受应力敏感效应影响,气井绝对无阻流量由  $32.36 \times 10^4$  m<sup>3</sup>/d 降为  $26.28 \times 10^4$  m<sup>3</sup>/d,降低 19%。特低渗透异常高压气藏开发初期,生产压差较小时,图 4 中的两条曲线差别不大,可采用常规二项式

法进行产能预测;随着开发的进行,生产压差加大,储层岩石发生不可逆形变,渗透率降低,应力敏感效应不可忽略。

根据图 4 的 IPR 曲线,可预测不同井底流压对应的气井产能。S 气藏设计 2 口开发井 B1、B2 井进行开发,设计稳定生产后的井底流压为 20 MPa,根据图 4 的 IPR 曲线,不考虑应力敏感效应时,采用常规二项式法进行产能预测,设计日产气为  $29 \times 10^4$  m<sup>3</sup>/d;考虑应力敏感效应时,采用本文建立的新方法进行产能预测,设计日产气为  $24 \times 10^4$  m<sup>3</sup>/d。2 口井投产后,日产气分别为  $21.7 \times 10^4$  m<sup>3</sup>/d 和  $22.8 \times 10^4$  m<sup>3</sup>/d,常规二项式法产能设计精度仅为 72% 和 79%;采用新方法,考虑应力敏感效应时,设计精度达到 90.4% 和 95.0%。本文建立的特低渗异常高压气藏气井产能评价新方法,预测精度超过 90%,准确可靠。

4 结论

(1) 基于渗流理论,考虑应力敏感效应影响,推导了适用于特低渗气藏气井二项式产能方程及无阻流量计算公式,经实例井验证,预测精度超过 90%。

(2) 受应力敏感效应影响,气井绝对无阻流量下降幅度可达 19%,影响较大,在特低渗异常高压气藏的产能评价中,应力敏感效应不可忽略。

(3) 特低渗透异常高压气藏开发初期,生产压差较小时,可采用常规二项式法进行产能预测;随着开发的进行,生产压差加大,储层岩石发生不可逆形变,渗透率降低,应力敏感效应明显,可采用本文建立的应力敏感特低渗气藏绝对无阻流量计算新方法进行预测,提高预测精度。

致谢:感谢中海石油(中国)有限公司天津分公司渤海石油研究院同意本文公开发表,感谢同事对本文撰写提供的帮助和支持。

参考文献

[1] 涂兴万,邓瑞健,谷维成,等. 低渗透非均质异常高压深层砂岩油藏的高效开发[J]. 大庆石油地质与开发, 2002,21(6):29-31.  
TU Xingwan, DENG Ruijian, GU Weicheng, et al. High efficiency development of low-permeability heterogeneity uncommonly high-pressure deep sandstone reservoir [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2002,21(6):29-31.  
[2] 宋传真,郑荣臣. 致密低渗气藏储层应力敏感性及其对



- 单井产能的影响[J]. 大庆石油地质与开发, 2006, 25(6): 47-49.
- SONG Chuazhen, ZHENG Rongchen. Stress sensitivity of low-permeability tight gas reservoir and its effect on single well productivity [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2006, 25(6): 47-49.
- [3] 何亚宁, 刘莉莉, 王心敏, 等. 苏里格气田压力敏感性分析及对气井动态影响研究[J]. 石油工业技术监督, 2012, 28(1): 1-5.
- HE Yaning, LIU Lili, WANG Xinmin, et al. Pressure sensitivity analysis of Sulige gas field and its impact on gas well performance[J]. Technology Supervision in Petroleum Industry, 2012, 28(1): 1-5.
- [4] 阮敏, 王连刚. 低渗透油田开发与压敏效应[J]. 石油学报, 2002, 23(3): 73-76.
- RUAN Min, WANG Liangang. Low-permeability oilfield development and pressure-sensitive effect[J]. Acta Petrolei Sinica, 2002, 23(3): 73-76.
- [5] 黎洪, 彭苏萍. 高压气井产能评价方法研究[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(6): 77-79.
- LI Hong, PENG Suping. High-pressure gas well productivity evaluation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2001, 28(6): 77-79.
- [6] PIERCE H R, RAWLINS E L. The study of a fundamental basis of controlling and gauging natural-gas wells[J]. U. S. Department of Commerce-Bureau of Mines, Serial 2929, 1929.
- [7] RAWLINS E L, SCHELLHARDT M A. Nacpressure data on natural gas wells and their application to production practices[J]. U. S. Bureau of Mines, 1936, 7: 2-6.
- [8] CULLENDER M H. The isochronal performance method of determining the flow characteristics of wells [J]. Trans. AIME, 1955, 204: 137-142.
- [9] KATZ D L. Handbook of natural gas engineering[M]. New York City: McGraw-Hill Book Co. Inc, 1959: 448.
- [10] 贾永禄, 匡晓东, 聂仁仕, 等. 考虑应力敏感的产水气井产能方程[J]. 世界科技研究与发展, 2016, 38(1): 1-4.
- JIA Yonglu, KUANG Xiaodong, NIE Renshi, et al. Deliverability equation for water-production gas well considering stress-sensitivity[J]. World Sci-Tech R & D, 2016, 38(1): 1-4.
- [11] 罗金丽, 邓美洲, 胡秀玲. 高压高产气井高表皮系数分解方法探讨与应用[J]. 油气井测试, 2009, 18(4): 20-22.
- LUO Jinli, DENG Meizhou, HU Xiuling. A discussion on decomposition of high skin factor in high gas rate and high pressure wells and its application [J]. Well Testing, 2009, 18(4): 20-22.
- [12] 李元生, 李相方, 藤赛男, 等. 气藏高速湍流系数新的经验公式的确定[J]. 断块油气田, 2011, 18(5): 607-610.
- LI Yuansheng, LI Xiangfang, TENG Sainan, et al. A new correlation equation for determining high velocity turbulence coefficient of gas reservoirs [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2011, 18(5): 607-610.
- [13] 董文秀, 王家航, 郑欣, 等. 异常高压定容气藏生产特征及开采措施探讨——以东海X气井为例[J]. 海洋石油, 2022, 42(3): 36-40.
- DONG Wenxiu, WANG Jiahang, ZHENG Xin, et al. Discussion on production characteristics and exploitation measures of abnormal high pressure gas reservoirs with constant volume: A case studied in the East China Sea. Offshore Oil, 2022, 42(3): 36-40.
- [14] 范家伟, 伍藏原, 余松, 等. 异常高压含水凝析气藏有效库容影响因素[J]. 新疆石油地质, 2022, 43(4): 463-467.
- FAN Jiawei, WU Zangyuan, YU Song, et al. Factors influencing effective storage capacity of abnormally high pressure water containing condensate gas reservoirs [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2022, 43(4): 463-467.
- [15] 陈元千, 董宁宇. 确定气井湍流系数和湍流表皮系数的新方法[J]. 断块油气田, 2001, 8(1): 20-23.
- CHEN Yuanqian, DONG Ningyu. New method of determining turbulence factor and turbulence skin factor [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2001, 8(1): 20-23.
- [16] 杨慧. 凝析气藏相态计算与系统分析[D]. 武汉: 长江大学, 2013: 45-51.
- YANG Hui. Phase behavior calculation and systems analysis in gas condensate reservoir [D]. Wuhan: Yangtze University, 2013: 45-51.
- [17] 陈元千, 王鑫, 常宝华. 评价异常高压高产气井产能的新方法[J]. 中国海上油气. 2022, 34(6): 93-100.
- CHEN Yuanqian, WANG Xin, CHANG Baohua. A new method for evaluating the productivity of abnormal high pressure and high production gas wells [J]. China Offshore Oil and Gas, 2022, 34(6): 93-100.

编辑 方志慧

**第一作者简介:**王美楠,男,1988年出生,高级工程师,硕士,2014年毕业于东北石油大学油气田开发专业。现从事油气渗流理论与油藏数值模拟研究工作,电话:022-66501097, Email:wangmn2@cnoc.com.cn。通信地址:天津市滨海新区海川路2121号,邮政编码:300459。