

多油嘴制度下产量递减特征拟合及产量预测

刘鑫, 黄小云, 于书新, 贾丹枫, 刘刚, 程晓刚

中国石油大庆油田有限责任公司试油试采分公司 黑龙江大庆 163412

项目支持: 中国石油集团大庆油田有限责任公司试油试采分公司研发项目“凉高山组页岩油排采制度研究”(25DQYTSG004-16-07)

引用: 刘鑫, 黄小云, 于书新, 等. 多油嘴制度下产量递减特征拟合及产量预测[J]. 油气井测试, 2026, 35(2): 10-16.

Cite: LIU Xin, HUANG Xiaoyun, YU Shuxin, et al. Fitting of production decline characteristics and production forecasting under multi-choke systems [J]. Well Testing, 2026, 35(2): 10-16.

摘要 为优化油气井工作制度、实现不同油嘴下产量的准确预测,解决现场依赖经验调整油嘴、预测偏差大的问题,以提升单井开发效益。基于单井多油嘴生产制度下的实际生产数据,拟合产量递减规律并分析参数关联性,通过整理各油嘴制度下的产量时序数据,采用 Duong 递减模型对不同油嘴对应的产量变化曲线进行拟合,建立油嘴参数与递减模型参数的定量关联模型。研究表明, Duong 模型对各单级油嘴产量史的拟合平均误差为 0.6%。建立的耦合模型对全部历史产量数据进行回代拟合,平均相对误差为 3.13%,能准确反映油嘴切换引起的产量变化,油嘴尺寸显著影响初始产量,但对控制递减趋势的衰减系数与递减指数影响微弱,其数值在不同油嘴下保持稳定。所建立的定量关联模型可有效预测未知油嘴尺寸下的产量递减规律,为油气井工作制度的优化与定产提供了直接技术依据。

关键词 油嘴尺寸; Duong 模型; 工作制度; 产量预测; 产量递减; 页岩油**中图分类号:** TE353 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19680/j.cnki.1004-4388.2026.02.002

Fitting of production decline characteristics and production forecasting under multi-choke systems

LIU Xin, HUANG Xiaoyun, YU Shuxin, JIA Danfeng, LIU Gang, CHENG Xiaogang

Testing Branch of PetroChina Daqing Oilfield Co., Ltd., Daqing, Heilongjiang 163412, China

Abstract: To optimize the working system of oil and gas wells, achieve accurate production forecasting under varying choke sizes, and resolve the issues of large forecasting deviation arising from empirical choke adjustment in the field—thereby enhancing single-well development efficiency—this study fits the production decline behavior and analyzes parameter correlations based on actual single-well production data under multi-choke working system. By organizing time-series production data for each choke setting, the production variation curves corresponding to different chokes were fitted using the Duong decline model, and a quantitative correlation model linking choke parameters with decline model parameters was established. The research demonstrates that the average fitting error of the Duong model for the production history under each choke size is 0.6%. The established coupled model, when back-substituted to fit all historical production data, achieves an average relative error of 3.13%, accurately reflecting the production variations induced by choke switching. The choke size significantly influences the initial production rate yet exerts a weak impact on the decline coefficient and decline exponent that governs the overall decline trend; these values remain stable across different choke sizes. The established quantitative correlation model can effectively forecast the production decline behavior under unknown choke sizes, providing a direct technical basis for the optimization of working system and production allocation in oil and gas wells.

Keywords: choke size; Duong model; working system; production forecasting; production decline; shale oil

在油气井开发过程中,油嘴作为调控井底流压、优化产能释放的关键井下工具,其尺寸选择与工作制度制定直接影响单井生产效率、开发寿命及经济效益。不同油嘴尺寸通过改变流体流动阻力,进而影响产量递减规律,合理匹配油嘴制度是实现油气井高效开发的核心环节之一^[1-3]。当前现场生

产中,油嘴调整多依赖操作人员经验,缺乏科学的理论支撑与数据指导,易出现油嘴尺寸与地层供液能力不匹配、产量预测偏差较大等问题,不仅可能造成产能浪费,还可能因盲目调整油嘴导致井况异常,增加开发成本。

产量递减规律是反映油气井生产动态、评估产

能潜力的重要依据,通过对不同油嘴制度下的产量递减数据进行拟合分析,挖掘油嘴尺寸与递减参数的内在关联,是实现油嘴制度优化与产量精准预测的有效途径^[4-5]。目前,国内外学者针对产量递减规律已开展了大量研究,形成了覆盖常规与非常规储层的完整方法体系^[6]。王怒涛等^[7]提出一种新的产量递减模型,通过理论验证,确定新模型既包含 Arps 递减规律,也涵盖 SEPD 模型和 Duong 模型。实际生产数据分析表明,该方法拟合精度高,适用范围广,可有效避免模型选择问题。赵玉龙等^[8]通过对现有气井生产数据处理方法的综合分析,开展了变工作制度下波动数据降噪方法的研究,提出了一套页岩气井 EUR 评价新方法。Arps 经典递减模型公式简洁、参数易获取,成为常规油气藏产量预测与可采储量评价中应用最广泛的基础模型^[9]。针对 Arps 模型在非常规储层的应用局限, Duong 递减模型专门适配低渗、致/页岩油气藏的线性流阶段,可精准刻画早期瞬态流的产量衰减规律^[10-11]。扩展指数递减(SEPD)模型进一步融合了早期线性流与晚期边界控制流特征,实现了油气藏全生命周期的一体化产量预测^[12]。幂律递减模型通过时变递减指数修正了 Arps 双曲模型的长期预测偏差,提升了非常规储层长期递减预测的可靠性^[13]。分段递减模型则针对油气井多阶段生产特征,通过分阶段匹配模型解决了单一模型适配性不足的问题^[14]。Blasingame 递减模型基于物质平衡原理构建,可在变产量、变压力工况下实现产量预测与储层参数反演^[15]。针对复杂工况下的递减分析,学者们开展了进一步的针对性研究,赵康等^[16]针对含水页岩气藏产量递减快、能量消耗大的特点,建立了可描述气藏生产全过程的产量递减预测模型,为复杂工况下的产量递减分析提供了技术参考。张丹等^[17]针对工作制度变动频繁、产量预测难度大的问题,基于双曲递减模型提出了适用于井丛分析的时变递减模型,显著提升了复杂工况下的产量预测精度。樊友宏等^[18]系统剖析了产量递减率与产能递减率的物理意义及影响因素,明确了不同递减模型下两类递减率的差异规律。金子一等^[19]针对高产井生产动态受工作制度影响大、常规评价方法适用性受限的问题,提出了基于产量递减分析的变产量生产动态评价方法,为工作制度变动条件下的产量递减分析提供了技术参考。现有研究多数聚焦于单一油嘴制度下的产量递减特征分析,或

侧重油嘴尺寸对产量的定性影响,缺乏对多油嘴制度下产量递减参数的系统拟合与定量关联,难以满足现场对下一油嘴产量及递减趋势的精准预测需求。

针对上述问题,结合现场生产实际需求,本文以单井多油嘴制度下的实测生产数据为基础,开展产量递减特征拟合与参数关联研究。通过采用 Duong 递减模型对不同油嘴对应的产量曲线进行拟合,获取关键递减参数,建立油嘴尺寸与递减参数的定量映射关系,进而外推预测下一油嘴尺寸下的产量变化及递减趋势。本研究旨在为油气井油嘴制度的科学制定、产能优化及生产调控提供实用技术支撑,解决现场油嘴调整盲目性、产量预测不准确的难题,对提升单井开发效益、推动油气田高效开发具有重要的理论意义与工程应用价值。

1 产量递减预测模型原理

要实现多油嘴制度下的产量精准预测,关键在于构建油嘴尺寸与产量递减参数之间的定量关联模型。这首先需要选取能够准确描述单级油嘴下产量随时间衰减规律的数学模型,并在此基础上进一步耦合油嘴尺寸的影响。为此依次介绍适用于页岩油井裂缝线性流特征的 Duong 递减模型,以及由此衍生的油嘴-产量耦合建模方法。

1.1 单级油嘴下的产量递减模型

针对单级油嘴稳定生产阶段的产量动态,采用适用于页岩油、气井多级油嘴试井的 Duong 产量递减模型,表征单油嘴下产量随时间的演化规律,其核心形式为^[20]

$$q(t) = q_1 t^{-m} e^{\left[\frac{a}{1-m}(t^{1-m}-1)\right]} \quad (1)$$

式中: $q(t)$ 为生产 t 时刻的产量, m^3/d ; q_1 为初始产量, m^3/d ; t 为该级油嘴下的累计生产时间, d ; m 为递减指数,反映产量递减的非线性程度; a 为衰减系数,表征地层能量的衰减速率。

对每一级油嘴的独立生产段,通过非线性最小二乘法拟合产量-时间数据,即可得到该油嘴对应的初始产量 q_1 与递减参数 m 、 a ,为后续油嘴-产能关联分析提供基础参数。

1.2 油嘴-产量耦合模型

在单级油嘴产量递减模型的基础上,为实现多油嘴交替调整制度下的产量精准预测,关键是构建每个油嘴下初始产量与油嘴尺寸、地层能量状态之间的定量关联关系。根据排采规律,多油嘴逐级试

采过程中,单级制度下的初始产量并非仅由当前油嘴尺寸单独控制,前期持续生产会造成地层能量逐步衰减、供给能力发生损耗,进而对本级初始产能产生明显间接影响。油嘴限流作用与地层能量衰减的叠加效应,是相同油嘴尺寸在不同生产阶段产能表现差异显著的根本原因。因此,本文打破单一因素表征初始产量的局限,将初始产量 q_1 拆解为油嘴主控项与历史修正项两部分,建立耦合形式的初始产量预测模型。

对于“油嘴主控项”,根据节流原理,油嘴过流流量与油嘴直径呈显著的幂函数关系,其一般形式为^[21-22]

$$Q = A \cdot d^2 \quad (2)$$

式中: Q 为流量, m^3/d ; A 为常数项; d 为油嘴尺寸, mm 。

在式(2)基础上,采用更具普适性的幂函数形式 $Q = A \cdot d^B$,通过现场数据拟合得到系数 A 、 B ,以便更好地反映实际生产规律,提升模型的预测精度与工程适用性。

对于“历史修正项”,其核心是构建一个能定量反映前期生产对当前地层能量累积影响的状态指标。本文从渗流产能指数基本物理概念出发开展指标构建。常规产能指数定义为产量与生产压差的比值,能够客观反映单位压差下地层的供液能力,是评价储层能量高低、导流能力强弱的核心动态参数。

多级油嘴逐级调控排采过程中,储层压力持续衰减,各油嘴制度下产量均呈递减变化,每一级生产过程均存在地层流体动用与能量消耗。为表征排采全过程的累计能量损失,将各级油嘴对应阶段的产能指数 $q/(p_i - p)$ 进行时间积分,构建前期产能损耗状态指标,定义为

$$F = \int_0^t \frac{q}{p_i - p} dt \quad (3)$$

式中: F 为前期产能状态指标, $m^3/d/MPa$; p_i 为初始压力, MPa ; p 为压力, MPa ; t 为当前时间, d 。

该指标的物理意义为:到当前时刻为止,地层单位压差下供液能力的时间累积量,代表了地层在整个排采过程中能量消耗程度。 F 值越大,说明前期生产中储层能量消耗越多、供液能力衰减越严重,地层当前的产能状态越差。

随着排采持续,地层累计能量衰减不断增大,储层渗流条件持续变差,在相同压降变化下产量产

出水平逐步降低,累计能量衰减与后续初始产能之间呈现显著非线性关系,因此选取指数形式 e^{CF} 作为历史修正项,最终初始产量模型形式为

$$q_1 = A \cdot d^B \cdot e^{C \cdot F} \quad (4)$$

式中: A 、 B 、 C 均为模型拟合系数; d 为油嘴尺寸, mm 。

通过将油嘴主控项与历史修正项耦合,模型实现了油嘴尺寸与地层状态的协同作用:油嘴主控项保证了油嘴越大、产能越高的基本物理规律,符合现场生产常识;历史修正项显性化了前期生产历史的叠加效应,准确反映了同一油嘴在不同生产阶段的产能差异。

为实现模型参数求解,对公式两侧取自然对数,将非线性乘性模型转化为二元线性回归模型:

$$\ln q_1 = \ln A + B \ln d + C \cdot F \quad (5)$$

令 $y = \ln q_1$, $x_1 = \ln d$, $x_2 = F$, $a_0 = \ln A$, $a_1 = B$, $a_2 = C$,则模型可表示为标准线性形式:

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 \quad (6)$$

通过多元线性回归求解,最终得到模型核心参数。该模型无需额外校正,直接将前期产能历史显性化,可预测任意油嘴、任意地层状态下的初始产量。

由于油嘴尺寸仅对初始产量产生显著影响,对递减参数 m 、 a 的控制作用较弱,各级油嘴下的递减参数波动范围较小。因此取拟合结果的平均值作为预测递减特征参数。将式(4)及递减参数 m 、 a 代入Duong递减模型式(1),即可得到不同油嘴下产量预测经验方程。

2 实例分析

为验证前文所构建理论模型的适用性与预测精度,本章选取某页岩油井的实际生产数据进行案例应用。该井在生产期间采用了逐级放大的多油嘴制度,其完整的生产历史为模型拟合与验证提供了良好基础。本章将依次进行流动阶段诊断以确认模型适用前提,开展单级油嘴的递减规律拟合,建立油嘴尺寸与产量的关联模型,并最终对模型进行历史拟合验证与未来产量预测。

2.1 基础概况及流动阶段诊断

以某页岩油井多级油嘴生产数据为例,如图1所示,生产期间采用逐级放大油嘴制度,涵盖2~6 mm油嘴,初期开井生产不稳定,递减规律不清晰,

自 3.5 mm 油嘴稳定生产后,生产曲线趋于稳定,产量变化规律明确,为后续单级递减拟合及分析提供了可靠的数据基础。

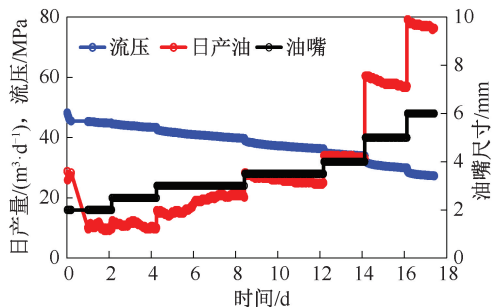


图 1 多级油嘴生产动态曲线

Fig. 1 Production performance curves under multi-stage choke sizes

为确保产量递减模型选取的合理性,采用物质平衡时间双对数诊断法,对生产流动阶段进行识别。物质平衡时间定义为

$$t_c = \frac{N_p}{q} \quad (7)$$

式中: t_c 为物质平衡时间,d; N_p 为累计产量, m^3 。

绘制各油嘴制度下 $q/\Delta p$ 关于 t_c 双对数曲线如图 2 所示。图中红色实线斜率为 1/2,各级油嘴稳定生产段的双对数曲线均与斜率为 -1/2 的参考线高度平行,呈现出典型的裂缝线性渗流特征,未进

入边界控制流阶段。Duong 模型应用条件与本井的流动阶段诊断结果完全匹配,因此采用 Duong 模型对单级油嘴下的产量递减规律进行拟合分析,可精准刻画该井的产量递减特征。

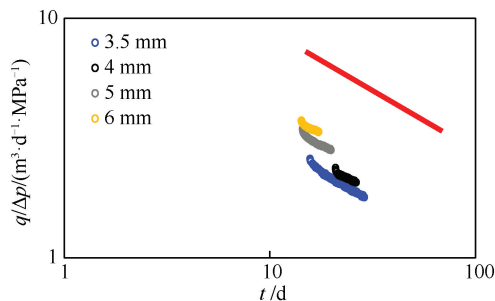


图 2 生产动态双对数诊断曲线

Fig. 2 Log-log production performance diagnostic curve

2.2 单级油嘴产量递减拟合效果分析

对 3.5 mm、4 mm、5 mm、6 mm 共 4 级油嘴生产段采用 Duong 模型进行产量递减拟合见图 3,拟合结果见表 1。结果表明,Duong 模型可精准刻画单级油嘴下的产量递减规律,各级油嘴拟合产量平均误差 0.24 m^3/d ,平均误差百分数 0.6%,同时不同油嘴的递减参数 a 、 m 波动极小,油嘴尺寸仅对初始产量产生显著影响,为后续耦合模型建立与全井递减参数统一提供了依据。

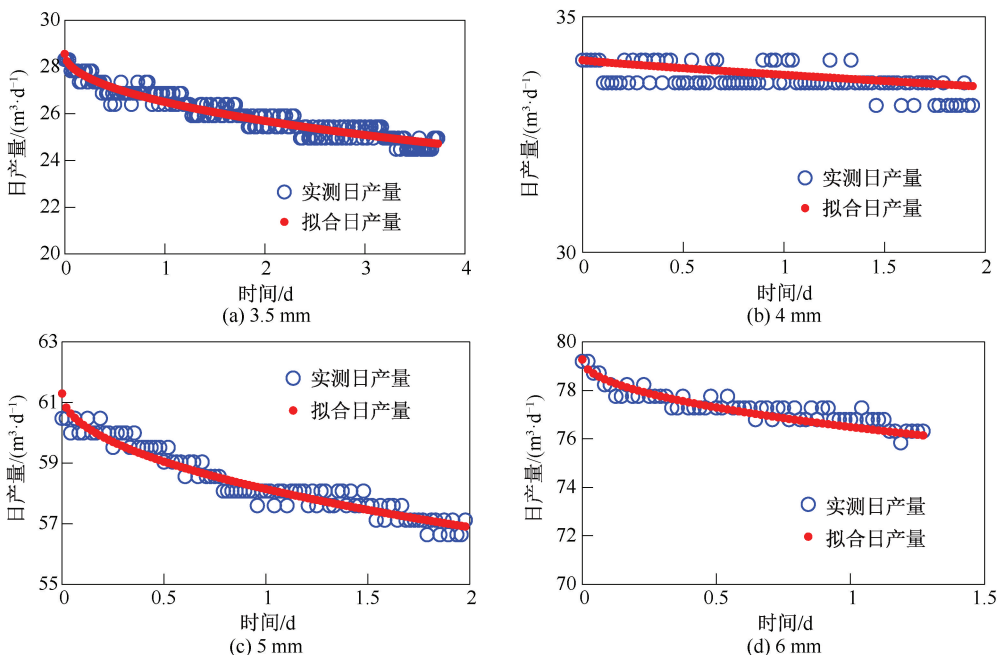


图 3 Duong 模型产量递减拟合曲线

Fig. 3 Production decline fitting curves by Duong model

表1 Duong 模型拟合参数
Table 1 Fitting parameters of Duong decline model

油嘴尺寸 /mm	q_1 $/(m^3 \cdot d^{-1})$	a	m	平均误差 $/(m^3 \cdot d^{-1})$	误差 百分数/%	F $/(m^3 \cdot d^{-1} \cdot MPa^{-1})$	$\ln q_1$	$\ln d$
3.5	26.42	0.97	1.01	0.26	1.03	0	3.27	1.25
4	33.50	0.99	0.99	0.21	0.63	7.62	3.51	1.38
5	58.10	0.98	1.01	0.24	0.41	4.18	4.06	1.61
6	76.80	0.99	0.99	0.23	0.31	5.95	4.34	1.79

2.3 油嘴尺寸与产量递减的关联分析

根据式(4)~(6)进行模型系数拟合,以更换3.5 mm油嘴为起始时刻, F 等计算结果见表1。拟合 Duong 递减初始产量 q_1 关于油嘴 d 及前期产能状态指标 F 相关关系如图4所示。拟合结果为 $A=1.17, B=2.50, C=-0.015$, 拟合优度为0.99, 精准刻画了油嘴尺寸与前期产能历史对初始产量的耦合影响。

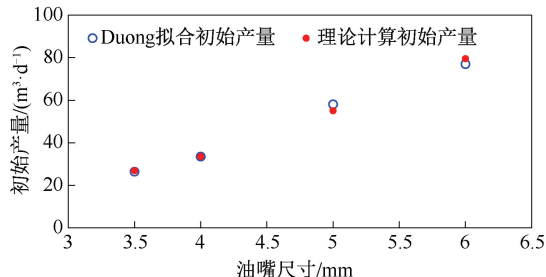


图4 不同油嘴下初始产量拟合曲线

Fig. 4 Fitting curves of initial production rate under different choke sizes

由于递减参数 m 与 a 数值波动范围较小,表明油嘴尺寸对地层递减趋势影响弱。因此计算其平均值作为预测模型参数,得到 $a=0.986, m=1.004$, 为后续产量预测提供可靠模型基础。

2.4 产量递减模型验证及预测分析

根据拟合结果,该井任意油嘴下初始产量为:

$$q_1 = 1.17 \cdot d^{2.5} \cdot e^{-0.015 \cdot F} \quad (8)$$

因此对应产量计算公式为

$$q(t) = 1.17 \cdot d^{2.5} \cdot e^{-0.015 \cdot F} t^{-1.004} e^{\left[\frac{0.986}{1-1.004} (t^{1-1.004} - 1) \right]} \quad (9)$$

重新计算3.5~6 mm油嘴下产量,进行回代拟合验证,如图5所示。模型计算的理论产量与现场实测日产油数据高度吻合,平均相对误差仅为3.13%,从图中可以看出,理论计算历史产量曲线能够精准追踪不同油嘴尺寸切换下的实测产量变化趋势,完整复现了油嘴调大后产量跃升、调小后产量回落的动态特征,证明了模型对油嘴-产量耦合关系的刻画能力。

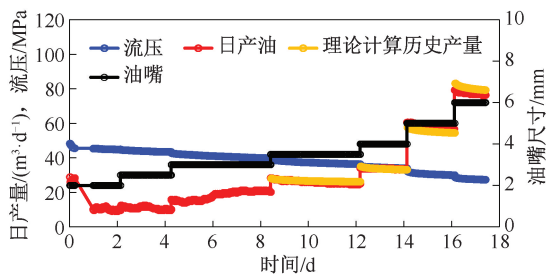


图5 不同油嘴下产量拟合曲线

Fig. 5 Fitted production rate curves under different choke sizes

基于油嘴尺寸与递减参数的关联模型,对目标油嘴尺寸下的产量及递减趋势进行外推预测如图6所示。预测结果清晰量化了不同油嘴尺寸对油井产量动态的调控规律,为现场油井生产制度优化提供了直接依据:可根据油田开发需求针对性选择油嘴,大油嘴适用于短期提产、快速回收投资,小油嘴适用于长期稳产、延长经济寿命,中等油嘴可平衡短期产能与长期开发效益,从而实现油井配产方案的精细化制定,为油嘴调参、生产调控提供前瞻性指导,有效提升油井整体开发效益。

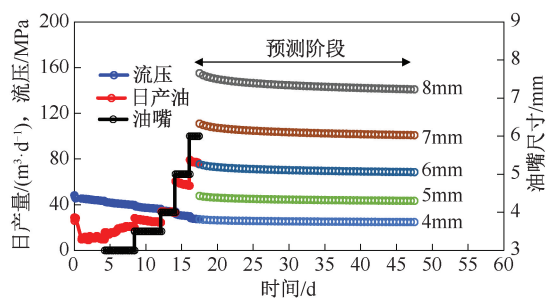


图6 不同油嘴下产量预测曲线

Fig. 6 Predicted production rate curves under different choke sizes

3 结论

(1) 完成了单级油嘴下产量递减规律的精准拟合与模型可靠性验证。针对单井多油嘴生产工况,采用 Duong 递减模型对不同油嘴尺寸下的历史产量数据进行拟合,平均误差0.6%,拟合精度满足油气

工程要求,可精准复现油嘴切换后的产量动态与流压衰减规律,验证了 Duong 模型在多油嘴工况线性流主导下的适用性。

(2)通过关联分析建立了油嘴尺寸与初始产量的定量响应关系,采用幂函数回归构建关联模型: $q_1 = 1.17 \cdot d^{2.5} \cdot e^{-0.015 \cdot F}$ 。结果表明,油嘴越大初始产量越高;而递减参数 m 、 a 波动范围较小,表明油嘴尺寸对地层递减趋势影响相对稳定,最终取平均值作为预测模型参数,为后续产量预测奠定了定量基础。

(3)基于油嘴参数与递减模型参数的定量关联关系,充分考虑能量衰减规律,重新对产量历史数据进行拟合,平均相对误差仅为 3.13%,并实现了对未知油嘴工况下产量变化的外推预测,为油气井工作制度优化、配产方案制定与开发效益提升提供了实用技术支撑。

致谢:感谢中国石油大庆油田有限责任公司试油试采分公司同意本文公开发表。

参考文献

[1] 李海, 郑马嘉, 赵文韬, 等. 页岩气压后返排油嘴动态调整技术应用及效果评价——以蜀南地区 Z201 区块 H62 平台为例[J]. 石油地质与工程, 2025, 39 (1): 13-20.

LI Hai, ZHENG Majia, ZHAO Wentao, et al. Application and effectiveness evaluation of dynamic adjustment technology for shale gas pressure flowback nozzle: a case study of the H62 platform of Z201 block in southern Sichuan[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2025, 39 (1): 13-20.

[2] 王才, 李治平, 赖枫鹏, 等. 压裂直井压后返排油嘴直径优选方法[J]. 科学技术与工程, 2014, 14 (14): 44-48.

WANG Cai, LI Zhiping, LAI Fengpeng, et al. Method to optimize choke sizes during back flow [J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14 (14): 44-48.

[3] 宋微立. 大规模压裂水平井压裂液返排方法探讨[J]. 油气井测试, 2013, 22 (4): 37-39.

SONG Weili. Discussed on flow-back method for fracturing fluid of large-scale fracturing horizontal well [J]. Well Testing, 2013, 22 (4): 37-39.

[4] 田立强. 低渗凝析气藏气井产能测试制度优化方法[J]. 油气井测试, 2024, 33 (3): 60-66.

TIAN Liqiang. An optimization method for productivity testing regimes of gas wells in low-permeability condensate gas reservoirs[J]. Well Testing, 2024, 33 (3): 60-66.

[5] 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.

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.

[6] 刘文锋, 张旭阳, 盛舒遥, 等. 致密油产量递减分析新组合方法研究——以玛湖致密油藏为例[J]. 油气藏评价与开发, 2021, 11(6): 911-916.

LIU Wenfeng, ZHANG Xuyang, SHENG Shuyao, et al. Research on a new combination method of production decline analysis for tight oil: cases study of Mahu tight reservoir [J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(6): 911-916.

[7] 王怒涛, 杜凌云, 贺海波, 等. 油气井产量递减分析新方法[J]. 天然气地球科学, 2020, 31(3): 335-339.

WANG Nutao, DU Lingyun, HE Haibo, et al. New method for analysis of oil and gas well production decline [J]. Natural Gas Geoscience, 2020, 31(3): 335-339.

[8] 赵玉龙, 梁洪彬, 井翠, 等. 页岩气井 EUR 快速评价新方法[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2019, 41 (6): 124-131.

ZHAO Yulong, LIANG Hongbin, JING Cui, et al. A new method for quick EUR evaluation of shale gas wells [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2019, 41(6): 124-131.

[9] 王睿, 薛龙龙, 党东琪, 等. 产量递减方程通式的建立及应用[J]. 石油学报, 2023, 44(10): 1693-17058.

WANG Rui, XUE Longlong, DANG Dongqi, et al. Establishment and application of general equation for production decline [J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44 (10): 1693-1705.

[10] 胥德平, 陈聆, 詹泽东, 等. 非常规气藏产量递减模型特征与地质意义[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2023, 50(1): 43-49.

XU Deping, CHEN Ling, ZHAN Zedong, et al. Characteristics and geological significance of production decline model of unconventional gas reservoir [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2023, 50(1): 43-49.

[11] 崔英敏, 郭红霞, 陆建峰, 等. 非常规气井产量递减与 EUR 预测方法评述[J]. 特种油气藏, 2022, 29(6): 119-126.

CUI Yingmin, GUO Hongxia, LU Jianfeng, et al. A review of unconventional gas well production decline and EUR prediction methods [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2022, 29(6): 119-126.

[12] 蔡振华, 刘世界, 王文升, 等. 致密砂岩气井修正扩展指数递减模型及其应用[J]. 天然气勘探与开发, 2018, 41(1): 63-68.

CAI Zhenhua, LIU Shijie, WANG Wensheng, et al. Modified SEPD model and its application to tight sandstone gas wells [J]. Natural Gas Exploration and Development, 2018, 41(1): 63-68.

[13] 段永刚, 曹廷宽, 王容, 等. 页岩气产量幂律指数递减

- 分析[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2013, 35(5): 172-176.
- DUAN Yonggang, CAO Tingkuan, WANG Rong, et al. Analysis on shale gas production with the power law exponential decline method [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2013, 35(5): 172-176.
- [14] 王厉强, 王仲林, 于家义, 等. 低渗透气藏产量多分段递减规律[J]. 新疆石油地质, 2010, 31(6): 614-616.
- WANG Liqiang, WANG Zhonglin, YU Jiayi, et al. Multi-section analysis of production decline for low permeability gas reservoirs[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2010, 31(6): 614-616.
- [15] 尹洪军, 袁鸿飞, 付春权, 等. 致密油藏体积压裂水平井 Blasingame 产量递减分析[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2020, 35(2): 194-200.
- YIN Hongjun, YUAN Hongfei, FU Chunquan, et al. Blasingame production decline analysis for a multi-fractured horizontal well in tight reservoirs[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics (Series A), 2020, 35(2): 194-200.
- [16] 赵康, 陈民锋, 王艺文, 等. TY 含水页岩气藏产量递减规律及可采储量预测[J]. 断块油气田, 2024, 31(3): 395-402.
- ZHAO Kang, CHEN Minfeng, WANG Yiwen, et al. Production decline rule and recoverable reserves prediction of TY water-bearing shale gas reservoir[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2024, 31(3): 395-402.
- [17] 张丹, 刘明华, 刘鑫, 等. 致密气藏产量时变递减模型改进及其应用: 以苏南气田为例[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(28): 11969-11977.
- ZHANG Dan, LIU Minghua, LIU Xin, et al. Improvement of time-varying decreasing production model for tight gas reservoirs and its application: Sunan gas field [J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(28): 11969-11977.
- [18] 樊友宏, 刘志军, 裴泽, 等. 气田递减率计算方法及影响因素[J]. 新疆石油地质, 2025, 46(5): 600-605.
- FAN Youhong, LIU Zhijun, PEI Ze, et al. Calculation methods and influencing factors of gas field decline rate [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2025, 46(5): 600-605.
- [19] 金子一, 张小涛, 孔凡伟, 等. 基于产量递减分析的高产井生产动态评价方法[J]. 重庆科技大学学报(自然科学版), 2025, 27(4): 20-28.
- JIN Ziyi, ZHANG Xiaotao, KONG Fanwei, et al. Production performance evaluation method for high-yield wells based on production decline analysis[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2025, 27(4): 20-28.
- [20] DUONG A N. An unconventional rate decline approach for tight and fracture-dominated gas wells [R]. SPE 137748, 2010.
- [21] 田园, 李亚茜, 沈群. 并联孔板计量装置流量动态重分配规律研究[J]. 天然气与石油, 2023, 41(3): 6-13.
- TIAN Yuan, LI Yaxi, SHEN Qun. Research on flow dynamic redistribution pattern of parallel orifice metering device[J]. Natural Gas and Oil, 2023, 41(3): 6-13.
- [22] 李鹏涛, 康勇. 孔板流量计测量天然气质量流量不确定度分析[J]. 仪器仪表标准化与计量, 2015(3): 40-42.
- LI Pengtao, KANG Yong. The uncertainty analysis of measurement of natural gas mass flow by means of orifice plates meter[J]. Instrument Standardization & Metrology, 2015(3): 40-42.

编辑 方志慧

第一作者简介:刘鑫,男,1985年出生,工程师,2011年毕业于中国石油大学(北京)地质工程专业,现主要从事川渝松辽、储气库深层气相关研究工作。电话:15245945992, Email: seddliuxin@petrochina.com.cn。通信地址:黑龙江省大庆市让胡路区乘南十八街铁人大道试油试采分公司地质大队,邮政编码:163412。