



DOI: 10.11885/j.issn.1674-5086.2022.09.19.02

文章编号: 1674-5086(2024)01-0089-08

中图分类号: TE377

文献标志码: A

基于产量损失率的气井合理配产方法研究

罗建新^{1*}, 赵茂林¹, 张烈辉¹, 刘继柱², 范梓煊³

1. 油气藏地质及开发工程全国重点实验室·西南石油大学, 四川 成都 610500

2. 中国石油塔里木油田公司勘探事业部, 新疆 库尔勒 841000

3. 中国石油新疆油田公司采油一厂, 新疆 克拉玛依 834000

摘要: 合理配产对气井生产具有非常重要的作用。现有的配产方法一般是按照无阻流量的 1/6~1/3 来进行。在研究气体在地层中的非达西效应的基础上, 提出了产量损失率的概念, 通过量化非达西效应造成的产量损失, 建立了气井产量损失率与无因次产量的图版。对于每一个配产, 可得到与其相应的产量损失率, 非达西效应对气井产量的影响就有了量化的表征。因此, 可根据产量损失率来进行合理配产。对于某些高压气藏, 由于地层压力高, 气体压缩程度大, 地层条件下非达西效应并不强, 产量损失率比较低, 这类气井就可以将产量配高一些。该配产方法可实现量化储层气体非达西渗流损失, 实现气井合理配产。该研究成果能在气井常规配产方法的基础上, 进一步优化气井配产制度, 更好地满足气井长期稳产、高效开发的需求, 为气藏开发提供有益的借鉴。

关键词: 产能方程; 非达西渗流; 产量损失率; 合理配产; 气藏

Research on Production Allocation Method of Gas Well Based on Production Loss Rate

LUO Jianxin^{1*}, ZHAO Maolin¹, ZHANG Liehui¹, LIU Jizhu², FAN Zixuan³

1. National Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploration, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China

2. Exploration Department, Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla, Xinjiang 841000, China

3. No.1 Oil Production Plant, Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay, Xinjiang 834000, China

Abstract: Production allocation plays a very important role in gas well production. The existing production allocation are generally done based on 1/6~1/3 of the open flow rate. On the basis of studying the non-Darcy effect of gas in the formation, the concept of production loss rate was proposed. By quantifying the production loss caused by the non-Darcy effect, a chart of gas well production loss rate and dimensionless production was established. For each production allocation, the corresponding yield loss rate can be obtained. Therefore, reasonable production allocation can be carried out based on the yield loss rate. For certain high-pressure gas reservoirs, due to high formation pressure and high gas compression, the non-Darcy effect is not strong under formation conditions, and the rate of production loss is relatively low. This type of gas wells can increase production by a certain amount. This production allocation method can quantify the non-Darcy flow loss of reservoir gas and achieve reasonable production allocation of gas wells. This research achievement can further optimize the reasonable production allocation system of gas wells on the basis of conventional production allocation methods, better meet the long-term stable and efficient development needs of gas wells, and provide useful reference for gas reservoir development.

Keywords: productivity equation; non-Darcy flow; yield loss rate; optimal production allocation; gas reservoirs

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms2/detail/51.1718.TE.20230702.1400.002.html>

罗建新, 赵茂林, 张烈辉, 等. 基于产量损失率的气井合理配产方法研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2024, 46(1): 89-96.

LUO Jianxin, ZHAO Maolin, ZHANG Liehui, et al. Research on Production Allocation Method of Gas Well Based on Production Loss Rate[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2024, 46(1): 89-96.

* 收稿日期: 2022-09-19 网络出版时间: 2023-07-03

通信作者: 罗建新, E-mail: jxluo1597@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金(51534006)

引言

气井生产过程中,合理的气井配产制度能保证气井安全高效地生产,保护地下的天然气资源,实现气田整体的高效开发并获得最大经济效益^[1]。目前,气井配产方法众多并处于不断完善过程中。气井常用配产方法主要有无阻流量经验配产法、采气指示曲线法、节点分析法、数值模拟法与临界携液流量法等^[2-3]。各种合理配产方法适用条件存在差异,针对不同的气井所考虑的影响因素也不同^[4]。其中,高速非达西效应对气井产能有着重要影响,这已经是行业内的共识,大量的学者对这一问题进行了卓有成效的研究工作。但高速非达西效应对产能的影响程度到底有多大,在气井配产时候应该如何考虑这一作用?这些问题目前研究还不够充分,为了完善气井合理配产方法,实现气井高效平稳生产,获得较长时期的平稳供气^[5-7],取得更好的经济效益,研究并形成考虑了非达西效应产能损失的配产方法。

从气井二项式产能方程出发,引入非达西效应系数来刻画非达西强弱程度,推导了无因次气井产能方程,提出了产量损失率的概念,用于量化非达西效应造成的气井产能损失。这样,可以对每一个配产下非达西效应造成的产量损失能做到心中有数。根据产能损失率来实现对气井的差异化配产,使高速非达西效应对气井产量的影响控制在可接受的范围内。当然,在实际生产过程中,还需要根据能量合理利用、压降均衡、有效控水及经济效益等^[8],综合考虑气藏的具体条件,形成一套适用于气藏高效开发的气井合理配产方法,为气田合理开发、长期稳产提供技术支持。

1 常规配产法特点分析

目前,气井合理配产方法有无阻流量经验配产法、采气指示曲线法、数值模拟法等^[8-11],各种方法适用条件有差异,对于不同气藏计算结果准确性及可靠程度不同。结合各种方法特点,对各种配产方法做简要分析。

1.1 无阻流量经验配产法

气井配产经验法,即根据产能试井,结合二项式或指数式产能方程,得到气井无阻流量,结合相

似气田开采经验,取无阻流量的 1/6~1/3 作为气井的配产。依据经验采用不同配产比例,该方法简便快捷,现场适用较广但并未充分考虑各项影响因素^[12-15]。

1.2 采气指示曲线法

采气指示曲线法是根据气井产能测试结果,绘制生产压差和产量关系曲线,选取气井渗流不产生非线性流效应,即直线段上最后点所对应产量为气井合理配产^[2]。该方法计算准确度相对较高,但配产结果受地质条件影响较大,且测试频率要求高,尤其对于复杂气藏适用性较差。

1.3 数值模拟法

数值模拟法是优化气井配产的主要方法之一,通过建立相关数值模拟模型,分析预测气井在不同配产条件下的稳产能力,优选出最终配产。该方法相对于其他各种方法准确性更高,但需要充分的静、动态资料支撑^[16-19]。然而,在复杂气藏的开发早期,难以获取大量准确的地质及开发资料。

2 气井配产新方法推导分析

生产实践表明,对于某些特殊气藏,比如深层低孔低渗、火山岩凝析气藏等复杂气藏,常规一点法测试资料分析方法存在一定局限。本文从另一角度出发探索适合复杂气藏气井配产的新方法,具体推导分析过程如下。

非达西渗流状态下,二项式产能方程为^[20]

$$p_R^2 - p_{wf}^2 = Aq_g + Bq_g^2 \quad (1)$$

式中: p_R —气藏地层压力, MPa;

p_{wf} —井底流压, MPa;

q_g —非达西渗流状态下的气井产量, $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;

A —产能方程一次项系数, $\text{MPa}^2/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$;

B —产能方程二次项系数, $\text{MPa}^2/(\text{m}^6 \cdot \text{d}^{-2})$ 。

根据上述二项式产能方程,当井底流压为大气压时, $p_{wf}=0.101 \text{ MPa}$,所对应的气产量就是气井的无阻流量,即

$$p_R^2 - 0.101^2 = Aq_{g\text{AOF}} + Bq_{g\text{AOF}}^2 \quad (2)$$

式中: $q_{g\text{AOF}}$ —气井无阻流量, $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

当地层中气体渗流服从达西流动时,二项式产能方程中系数 B 值为 0,则有

$$p_R^2 - 0.101^2 = Aq_{\text{AOF-Darcy}} \quad (3)$$

$$q_{\text{AOF-Darcy}} = \frac{p_R^2 - 0.101^2}{A} \quad (4)$$

式中: $q_{\text{AOF-Darcy}}$ —达西渗流状态下气井的无阻流量, $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

通常情况下, 实际气藏储层压力远高于大气压值, 大气压平方值可忽略不计, 联立式(1)和式(3), 则有

$$\frac{p_R^2 - p_{\text{wf}}^2}{p_R^2} = \frac{Aq_g + Bq_g^2}{Aq_{\text{AOF-Darcy}}} \quad (5)$$

或

$$\frac{p_R^2 - p_{\text{wf}}^2}{p_R^2} = \frac{q_g}{q_{\text{AOF-Darcy}}} + \frac{Bq_{\text{AOF-Darcy}}}{A} \left(\frac{q_g}{q_{\text{AOF-Darcy}}} \right)^2 \quad (6)$$

分别定义无因次压力和无因次产量

$$p_D = \frac{p_R^2 - p_{\text{wf}}^2}{p_R^2} \quad (7)$$

$$q_D = \frac{q_g}{q_{\text{AOF-Darcy}}} \quad (8)$$

式中: p_D —无因次压力;

q_D —无因次产量。

同时, 将式(6)中的二次项系数定义为非达西效应系数

$$\beta = \frac{Bq_{\text{AOF-Darcy}}}{A} \quad (9)$$

式中: β —非达西效应系数, 无因次。

无因次产能表达式为

$$p_D = q_D + \beta q_D^2 \quad (10)$$

式(10)所示的无因次二项式产能方程非常清楚地给出了非达西效应对产能的影响。当 β 大于 0 时, 无因次压力与无因次产量关系偏离线性关系, 表现出非达西渗流的特征, β 越大, 偏离达西线性渗流的程度就越严重, 反映出非达西效应就越强, 因此, 该系数可用于表征非达西效应对产量的影响程度。当系数 β 等于 0 时, 无因次压力与无因次产量关系为一条斜率为 1、且过原点的直线, 气体在地层中流动完全遵循达西线性渗流规律, 此时, 无因次产能方程为

$$p_D = q_D' \quad (11)$$

式中: q_D' —达西渗流状态下的无因次产量。

非达西渗流状态下, 气井的无因次产量可由求解式(10)得到

$$q_D = \frac{\sqrt{1 + 4\beta p_D} - 1}{2\beta} \quad (12)$$

在此基础上, 结合由式(4)和式(8), 可得非达西渗流状态下的气井产量

$$q_g = \frac{p_R^2 - 0.101^2}{A} q_D \quad (13)$$

根据无因次产能方程, 绘制考虑不同高速非达西效应系数的无因次产能分析图版(无因次产量与无因次压力关系曲线)如图 1 所示。对相同的高速非达西效应系数, 无因次产量随着无因次压力增大而增大; 无因次压力不变时, 随着非达西效应系数的增大, 无因次产量逐渐降低。二项式产能方程中系数 A 值越大, B 值越小, 相应的非达西效应系数就越小, 表明该条件下非达西效应影响就越弱, 无因次压力平方差与无因次产量关系越接近直线; 反之, 系数 A 值越小, B 值越大, 非达西效应系数就越大, 反映非达西流动影响就越强, 无因次压力与无因次产量关系偏离直线越厉害; 当非达西效应系数为 0 时, 无因次产量与无因次压力关系呈一条斜率为 1 的直线, 表明此时气体为达西流动。

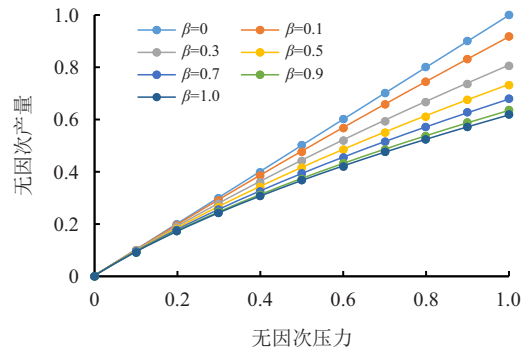


图 1 无因次产量与无因次压力关系

Fig. 1 The relationship between dimensionless production and dimensionless pressure

无因次产能分析图版显示, 无因次产量与无因次压力关系受非达西效应系数影响较大。在确定气井非达西效应系数及无因次压力后, 可以计算出对应的无因次产量, 但是仍无法确定该无因次产量是否合理。换句话说, 对于某个配产可能造成的非达西损失仍然是未知的, 所以这个配产就谈不上是否合理。

对于某个给定的井底压力, 达西渗流状态的气井产量为 q_g , 非达西流状态的气井产量为 q'_{ng} , 这两个产量之差就是由于高速非达西造成的产量损失。将该产量损失与无阻流量之比的百分数定义为产量损失率, 以此定量刻画高速非达西造成的产量损失

$$\alpha = \frac{q_g - q'_{ng}}{q_{gAOF-Darcy}} \times 100\% \quad (14)$$

式中:

α —产量损失率, %;

q'_{ng} —非达西渗流状态的气井产量, $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

将式(14)改写成无因次产量形式

$$\alpha = (q'_D - q'_{nD}) \times 100\% \quad (15)$$

式中: q'_{nD} —非达西渗流状态的无因次产量。

当气体在地层中流动为达西渗流时, 有 $p_D = q'_D$, 结合式(12)和式(15), 可进一步得到产量损失率与无因次压力的关系

$$\alpha = \left(p_D - \frac{\sqrt{1 + 4\beta p_D} - 1}{2\beta} \right) \times 100\% \quad (16)$$

对于某个给定的井底压力, 依据式(7)、式(9)和式(16), 可计算得到该压力下的产量损失率 α , 再依据式(14)得到相应的产量。对于每一个压力都可以得到相应的产量损失率, 这样, 就可以对某个配产可能导致的非达西损程度做到量化掌握, 根据可接受的产量损失率来确定产量, 即为合理配产。与常规的配产方法相比, 本文方法可以对某个配产下的非达西效应损失进行量化评估, 如果产量损失率较低, 就可以综合考虑出砂、产水等其他因素适当放大产量生产。

根据式(16), 结合式(8)和式(10), 产量损失率与无因次产量关系曲线如图2所示。

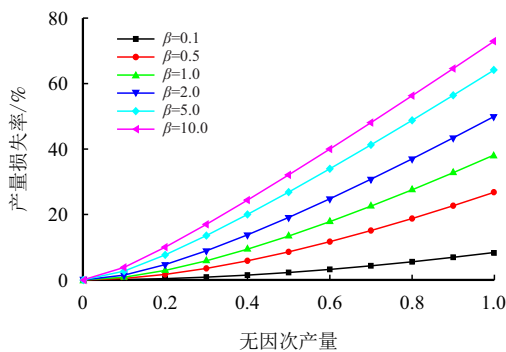


图2 产量损失率与无因次产量关系

Fig. 2 The relationship curve between production loss rate and dimensionless production

由图2可见, 随无因次产量增大, 产量损失率增大; 随着非达西效应系数的增大, 造成的非达西渗流损失增大, 表现为产量损失率增大。对于实际气藏开发, 需结合生产实际需要(在所能接受的产量损失率范围内), 综合考虑各类气藏储层特征、气藏压力高低以及携液等因素, 进行合理配产, 尽量降

低气井产量损失率, 实现气井长期稳产和提高气藏采收率^[21-24]。

值得注意的是, 产量损失率概念的引入, 对高速非达西效应造成的产量影响有了可量化的指标, 其取值范围需根据气藏特征及生产需求而定。例如, 对于一般的复杂气藏, 研究发现, 产量损失率取值在10%~20%, 所求取的气井配产为合理配产, 能够使气井保持较好稳产能力, 气藏开发效果更好。对于不同类型储层, 产量损失率取值可能不同, 则需根据开发效果评价出合理的产量损失率界限值, 指导合理配产。产量损失率界限取值较为关键, 对于储层状况复杂的气藏, 产量损失率取值不同可能造成气井降压损耗、产量递减、见水及水淹等发生较大的波动变化, 导致生产效率较低。

总体而言, 依据此配产方法, 可得产量损失率、无因次产量与非达西效应系数间的关系, 通过试井测试, 可求取非达西效应系数及无阻流量数值, 结合生产需求、储层状况及开发效果, 可取定产量损失率界限值, 从而求取气井合理产量, 指导复杂气藏合理配产。

3 实例计算与分析

3.1 实例1

以某复杂断裂火山岩凝析气藏为例, 结合该气藏实际生产井数据, 得到实际气井产量损失率随气井产量变化关系。当产量损失率超过一定界限时, 地层中气体非达西流动加强, 能量损失增加, 使得开采效率变低。此时应适当下调产量, 保持气井稳产, 减小能量损失。该区域典型井A1和A2井产量损失率与气井产量关系曲线见图3和图4。

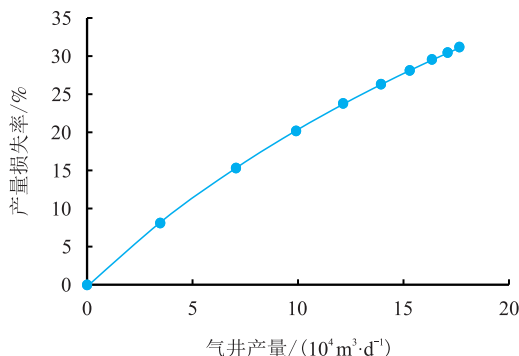


图3 A1井产量损失率与气井产量关系

Fig. 3 The relationship between production loss rate and production of Well A1

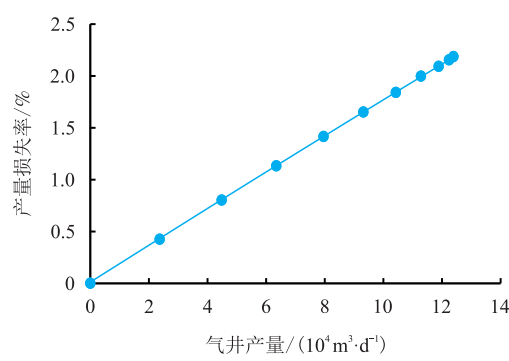


图 4 A2 井产量损失率与气井产量关系
Fig. 4 The relationship between production loss rate and production of Well A2

A1 井的非达西效应系数较大($\beta = 0.659$), 在实际生产过程中, 非达西渗流损失更严重, 根据 A1 井产量损失率随气井产量关系曲线, 在可接受的产量损失范围内, 且能保持气井的有效生产, 气井的合理产量应控制在 $(4\sim 10)\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ (产量损失率 10%~20%)。

A2 井的非达西效应系数很小($\beta = 0.023$), 在实际生产过程中, 非达西损失不明显。对于该类气藏配产, 则可根据储层状况及边底水条件进行配产调

控。若储层裂缝发育程度低、避水高度较大、边底水能量较弱, 则气井可依据无阻流量进行配产, 尽可能提高气井产量; 若储层裂缝发育, 避水高度较小, 且边底水较活跃, 则气井应降低配产防止井筒过早积液, 应结合临界携液流量进行合理配产。

结合研究区气井试井数据, 通过对火山岩储层评价分析, 通常在产量损失率为 10% 进行配产较为合理(最大产量损失率小于 10% 时, 气井配产值可设计为无阻流量值), 该配产结果既能防止因配产偏高而造成的压力下降过快、气井见水过早、凝析油损失严重及地层能量损失过大等问题, 也能避免因配产偏低而造成的经济效益过低等问题。

值得注意的是, 该配产方法虽达到量化非达西损失的效果, 配产合理性有所提高, 但火山岩储层特殊性强, 各资料参数不确定性大, 需利用各种配产方法进行综合研究分析, 以确定更合理、适应性更好的配产方法, 保证气井高产、稳产。依据本文方法进行气井配产计算结果如表 1 所示, 结合气藏实际稳产特征及产水状况分析, 该配产方法计算结果相对于前期实际配产更合理。

表 1 气井配产计算结果
Tab. 1 Calculation results of gas well production allocation

井号	测试方法	地层压力/MPa	A/(MPa ² ·m ⁻³ ·d)	B/(MPa ² ·m ⁻⁶ ·d ²)	非达西效应系数	无因次产量	配产/(10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)
A3	修正等时	48.52	25.594	0.612 8	2.202	0.213	19.6
A4	修正等时	48.63	113.690	4.295	0.786	0.357	7.4
A5	修正等时	48.31	74.589	3.519	1.476	0.260	8.1
A6	等时	32.55	55.707	1.190	0.406	0.496	9.4
A7	等时	38.26	6.939	1.634	49.693	0.045	9.5
A8	回压法	38.60	7.124	5.946	174.577	0.024	5.0
A9	回压法	47.78	14.199	9.128	103.355	0.031	5.0
A10	修正等时	48.32	32.865	1.201	2.597	0.196	13.9
A11	回压法	48.93	44.743	3.257	3.895	0.160	8.6
A12	修正等时	47.65	66.368	6.077	3.132	0.179	6.1
A13	回压法	44.14	4.280	5.435	578.011	0.013	6.0
A14	回压法	39.64	12.522	0.752	7.531	0.115	14.5
A15	回压法	29.31	6.529	3.716	74.885	0.037	4.8
A16	回压法	33.40	23.660	2.235	4.454	0.150	7.1
A17	回压法	32.89	3.763	0.494	37.760	0.051	14.8
A18	回压法	39.54	17.995	2.628	12.688	0.089	7.7
A19	回压法	33.72	5.850	1.712	56.881	0.042	8.1
A20	修正等时	34.36	21.401	4.535	11.690	0.092	5.1
A21	回压法	26.16	1.545	0.370	106.032	0.031	13.6
A22	变流量	24.02	4.292	0.800	25.050	0.063	8.5

3.2 实例 2
M 气藏初步投入开发, 气藏埋深 7 400 m, 地

层压力为 145 MPa, 温度为 158 ℃, 压力系数 2.0, 属于深层异常高压凝析气藏。现有一口探井名

为 M1, 经过试井测试, 获取二项式产能方程系数 A 为 $284.290 \text{ MPa}^2/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$, 二项式产能方程系数 B 为 $0.430 \text{ MPa}^2/(\text{m}^6 \cdot \text{d}^{-2})$ 。经公式推导计算, 得气井无阻流量为 $67 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 非达西效应系数 β 值为 0.112。经流体测试, 该气井气体地面密度为 0.824 kg/m^3 , 换算到地下密度为 332 kg/m^3 , 地面与地下气体密度差约 400 倍, 则实际气体在地层中流速慢, 因此, 该井生产时气体非达西流动效应较弱、非达西效应系数较小。按照本文配产新方法, 计算气井产量与产量损失率关系如图 5 所示。

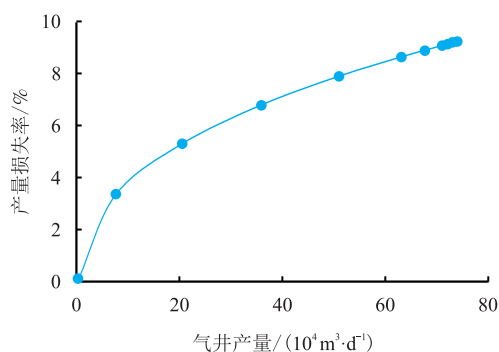


图 5 M1 井产量损失率与气井产量关系

Fig. 5 The relationship between production loss rate and production of Well M1

由于 M1 井为探井试采, 为预防气井出砂、产水等状况, 需控制气井配产。利用本方法进行配产计算时, 按产量损失率为 7%~8% 进行配产, 得到合理产量约为 $(40.0 \sim 50.0) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$; 若按照传统方法(取无阻流量 $1/6 \sim 1/3$)进行配产可得合理产量为 $(11.2 \sim 22.3) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。然而, 实际中 M1 井已按照 $42.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 实现长期稳定生产。因此, 若按传统方法配产会导致配产显著偏低, 本文配产方法计算结果相对更为合理。

4 结 论

1) 鉴于常规配产方法的局限性, 结合产能试井结果, 从气体非达西渗流角度, 通过量化气体非达西渗流损失, 根据产量损失率进行合理配产, 并结合储层状况及生产需求, 进一步优化配产, 保证地层能量合理利用, 提高整体开发效率。

2) 不同类型的气藏, 产量损失率界限取值不同, 需结合生产需求、储层状况及开发效果进行评判确定。若计算的单井产量损失率最大值低于界限值时, 表明该井高速非达西效应对产量的影响较弱,

可综合考虑出砂、携液等其他因素适当提高配产。

3) 基于产量损失率的气井配产方法适用范围更加广泛, 能够根据生产需求实现气井可控化配产。但针对地质规律复杂、储层类型多样的复杂气藏, 应综合考虑地层能量利用、气井产水积液、气田经济效益等因素, 实现气田合理开发、提高开发效果目的。

参考文献

- [1] 邹才能, 杨智, 朱如凯, 等. 中国非常规油气勘探开发与理论技术进展[J]. 地质学报, 2015, 89(6): 979–1007. doi: 10.3969/j.issn.0001-5717.2015.06.001
ZOU Caineng, YANG Zhi, ZHU Rukai, et al. Progress in China's unconventional oil & gas exploration and development and theoretical technologies[J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89(6): 979–1007. doi: 10.3969/j.issn.0001-5717.2015.06.001
- [2] 张建, 官斌. 天然气井合理配产技术研究[J]. 辽宁化工, 2021, 50(12): 1881–1883. doi: 10.3969/j.issn.1004-0935.2021.12.034
ZHANG Jian, GUAN Bin. Research on reasonable production allocation technology for natural gas wells[J]. Liaoning Chemical Industry, 2021, 50(12): 1881–1883. doi: 10.3969/j.issn.1004-0935.2021.12.034
- [3] 张元庆. 徐深气田火山岩气藏合理配产方法研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2011.
ZHANG Yuanqing. Research on reasonably production proration plan in Xu deep volcanic gas reservoir[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2011.
- [4] 王旭, 鲁光亮, 罗程程, 等. 油气水三相流水平井携液临界气量计算方法[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2022, 44(3): 167–175. doi: 10.11885/j.issn.1674-5086.2022.01.026.03
WANG Xu, LU Guangliang, LUO Chengcheng, et al. Method for calculating critical liquid carrying flow rate of oil-gas-water three-phase horizontal wells[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2022, 44(3): 167–175. doi: 10.11885/j.issn.1674-5086.2022.01.026.03
- [5] 赵庆波, 单高军. 徐深气田气井多因素动态配产方法研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2013, 35(3): 111–116. doi: 10.3863/j.issn.1674-5086.2013.03.015
ZHAO Qingbo, SHAN Gaojun. Research of multi-factor dynamic allocation methods of gas wells in Xushen Gas Field[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2013, 35(3): 111–116. doi: 10.3863/j.issn.1674-5086.2013.03.015

- [6] 童凯. P 气藏水侵规律及气井产能与合理配产研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2018.
TONG Kai. Research on water incursion law of P gas reservoir and deliverability and rational proration of gas wells[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2018.
- [7] 吴锦伟, 李勇仁, 曹军, 等. 渭北长 3 裂缝性致密储层渗流特征及产能研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2021, 43(3): 136–145. doi: 10.11885/j.issn.1674-5086.2019.10.28.02
WU Jinwei, LI Yongren, CAO Jun, et al. A study on seepage characteristics and productivity of fractured tight reservoir Chang 3 in Weibei[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2021, 43(3): 136–145. doi: 10.11885/j.issn.1674-5086.2019.10.-28.02
- [8] 米瑛, 王振兴. 四川盆地涪陵页岩气田气井合理配产方法探讨[J]. 天然气勘探与开发, 2017, 40(3): 78–83. doi: 10.12055/gaskk.issn.1673-3177.2017.03.012
MI Ying, WANG Zhenxing. Rational proration method for shale gas wells in Fuling shale gasfield, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Exploration & Development, 2017, 40(3): 78–83. doi: 10.12055/gaskk.issn.1673-3177.2017.03.012
- [9] 张宗林, 赵正军, 张歧, 等. 靖边气田气井产能核实及合理配产方法[J]. 天然气工业, 2006, 26(9): 106–108. doi: 10.3321/j.issn:1000-0976.2006.09.032
ZHANG Zonglin, ZHAO Zhengjun, ZHANG Qi, et al. Jingbian Gasfield well productivity verification & proper production proration[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(9): 106–108. doi: 10.3321/j.issn:1000-0976.2006.09.-032
- [10] 张德政, 王志彬, 于志刚, 等. 高液气比气井临界携液流量计算方法[J]. 断块油气田, 2022, 29(3): 411–416. doi: 10.6056/dkyqt202203021
ZHANG Dezheng, WANG Zhibin, YU Zhigang, et al. Calculation method of critical liquid-carrying flow rate of high liquid-gas ratio gas well[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2022, 29(3): 411–416. doi: 10.6056/dkyqt2022030-21
- [11] 房大志, 刘洪, 庞进, 等. 考虑吸附气影响的页岩气井三项式产能计算方法[J]. 特种油气藏, 2023, 30(3): 137–142. doi: 10.3969/j.issn.1006-6535.2023.03.017
FANG Dazhi, LIU Hong, PANG Jin, et al. A trinomial deliverability calculation method for shale gas wells considering the effect of adsorbed gas[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2023, 30(3): 137–142. doi: 10.3969/j.issn.10-06-6535.2023.03.017
- [12] 徐岩, 曹宝军, 门清萍, 等. 松辽盆地徐深气田火山岩气藏水平井开发合理工作制度的确定[J]. 天然气勘探与开发, 2019, 42(1): 97–102. doi: 10.12055/gaskk.issn.1673-3177.2019.01.015
XU Yan, CAO Baojun, MEN Qingping, et al. Determining rational working system for horizontal-well drilling of volcanic-rock gas reservoirs, Xushen Gasfield, Songliao Basin[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2019, 42(1): 97–102. doi: 10.12055/gaskk.issn.1673-31-77.2019.01.015
- [13] 湛小红. 涪陵页岩气田合理配产方法对比优选研究[J]. 石油地质与工程, 2019, 33(1): 67–71. doi: 10.3969/j.issn.1673-8217.2019.01.017
ZHAN Xiaohong. Comparative optimization of reasonable production allocation methods in Fuling shale gas field[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2019, 33(1): 67–71. doi: 10.3969/j.issn.1673-8217.2019.01.017
- [14] 沈金才. 涪陵焦石坝区块页岩气井动态合理配产技术[J]. 石油钻探技术, 2018, 46(1): 103–109. doi: 10.11911/syztjs.2018035
SHEN Jincai. The technique of rational and dynamic production allocation of shale gas wells in Jiaoshiba Block, Fuling Area[J]. Petroleum Drilling Technology, 2018, 46(1): 103–109. doi: 10.11911/syztjs.2018035
- [15] 李瑞磊, 胡雅君, 徐雁军. 松南地区气井供应能力分析 & 合理配产研究[J]. 石油钻探技术, 2002, 30(4): 60–62. doi: 10.3969/j.issn.1001-0890.2002.04.022
LI Ruilei, HU Yajun, XU Yanjun. Research on gas well producing capacity and the reasonable output in Songnan Area[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2002, 30(4): 60–62. doi: 10.3969/j.issn.1001-0890.2002.04.022
- [16] 刘林松, 李闽, 计曙东. 控制气井地层压降速度配产方法探讨[J]. 钻采工艺, 2016, 39(5): 46–47. doi: 10.3969/J.ISSN.1006-768X.2016.05.15
LIU Linsong, LI Min, JI Shudong. Research on proration method for controlling reservoir pressure descending rate[J]. Drilling & Production Technology, 2016, 39(5): 46–47. doi: 10.3969/J.ISSN.1006-768X.2016.05.15
- [17] 赵阳, 赵冠军, 石志良. 气井配产理论研究进展与展望[J]. 天然气勘探与开发, 2013, 36(2): 44–47. doi: 10.3969/j.issn.1673-3177.2013.02.010
ZHAO Yang, ZHAO Guanjun, SHI Zhiliang. Research Progress and prospect of gas well production allocation theory[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2013, 36(2): 44–47. doi: 10.3969/j.issn.1673-3177.2013.-02.010
- [18] 冯曦, 钟兵, 刘义成, 等. 优化气井配产的多因素耦合分析方法及其应用[J]. 天然气工业, 2012, 32(1): 53–56. doi: 10.3787/j.issn.1000-0976.2012.01.010
FENG Xi, ZHONG Bing, LIU Yicheng, et al. Multi-factor coupling analysis of optimized gas-well production allo-

- cation[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(1): 53–56. doi: 10.3787/j.issn.1000-0976.2012.01.010
- [19] 王月杰, 张宏友. 预测天然气斜井临界携液流量新方法[J]. 石油与天然气化工, 2022, 51(4): 69–74. doi: 10.3969/j.issn.1007-3426.2022.04.012
- WANG Yuejie, ZHANG Hongyou. A new approach for predicting critical liquid-carrying flow rate in directional gas wells[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2022, 51(4): 69–74. doi: 10.3969/j.issn.1007-3426.2022.04.012
- [20] 李仕伦. 天然气工程[M]. 北京: 石油工业出版社, 1990. LI Shilun. Natural gas engineering[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1990.
- [21] 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. doi: 10.11935/j.issn.1673-1506.2022.06.009
- CHEN Yuanqian, WANG Xin, CHANG Baohua. A new method for evaluating the productivity of abnormally high-pressured and high-rate gas wells[J]. China Offshore Oil and Gas, 2022, 34(6): 93–100. doi: 10.11935/j.issn.-1673-1506.2022.06.009
- [22] 刘世界, 蔡振华, 丁万贵, 等. 临兴区块“一点法”产能方程[J]. 油气井测试, 2020, 29(5): 74–78. doi: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2020.05.013
- LIU Shijie, CAI Zhenhua, DING Wangui, et al. Deliverability equation with “one-point method” for Linxing Block[J]. Well Testing, 2020, 29(5): 74–78. doi: 10.196-80/j.cnki.1004-4388.2020.05.013
- [23] 冯诚沉. 低渗气藏气井产能及稳产能力研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2017. FENG Chengchen. Research on the productivity and the method of rate maintenance of low permeability gas reservoir[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.
- [24] 李鹏, 范倩倩, 霍明会, 等. 苏里格气田气井配产与递减率关系研究及应用[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2020, 42(1): 126–132. doi: 10.11885/j.issn.1674-5086.2018.12.07.01
- LI Peng, FAN Qianqian, HUO Minghui, et al. Researches on relationship between production allocation and decline rate of gas wells in Sulige Gas Field[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2020, 42(1): 126–132. doi: 10.11885/j.issn.1674-5086.2018.12.07.01
- [25] 刘琦, 孙雷, 罗平亚, 等. 苏里格西区含水气藏合理产能评价方法研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2013, 35(3): 131–136. doi: 10.3863/j.issn.1674-

5086.2013.03.018

LIU Qi, SUN Lei, LUO Pingya, et al. The research on the proper production capacity evaluations on the west of Sulige Gas Field[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2013, 35(3): 131–136. doi: 10.3863/j.issn.1674-5086.2013.03.018

作者简介



罗建新, 1975 年生, 男, 汉族, 四川仁寿人, 副教授, 博士, 主要从事油气藏数值模拟、油气藏工程及油气渗流理论等方面的研究。E-mail: 6641883@qq.com



赵茂林, 1998 年生, 男, 汉族, 四川绵阳人, 硕士研究生, 主要从事油气田开发理论研究。E-mail: 869673676@qq.com



张烈辉, 1967 年生, 男, 汉族, 四川仁寿人, 教授, 博士研究生导师, 主要从事非常规油气藏开发、数值模拟及试井分析等方面的教学与科研工作。E-mail: zhangliehui@vip.163.com



刘继柱, 1996 年生, 男, 汉族, 四川资阳人, 硕士, 主要从事油气井试油和完井等方面的研究工作。E-mail: 3116994190@qq.com



范梓煊, 1998 年生, 男, 汉族, 山东诸城人, 助理工程师, 主要从事油藏动态管理工作。E-mail: 1594233246@qq.com

编辑: 王旭东

编辑部网址: <http://zk.swpuxb.com>