

基于洛伦兹曲线的调剖选井方法研究与应用

张志军, 郭梦全, 华科良, 魏俊, 石端胜

(中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司, 天津 300452)

摘要:针对传统调剖选井决策方法受测试时间影响大且未考虑压降速率等因素影响的问题,提出一种新的调剖选井决策方法——洛伦兹曲线决策法。该方法既考虑了压降速率的差异,又规避了测试时间的影响,同时数值分布范围相对较宽,且有量化的指标分类标准,能够简单快捷地指导调剖选井。研究表明:洛伦兹曲线越靠近绝对不平衡线,说明注水均衡性越差,对应的注水均衡指数值越大,该井越需要调剖,这与传统决策方法认识一致。矿场应用表明,洛伦兹曲线决策法相较于传统的决策方法,能够直接显示压降曲线所隐藏的下降速率等信息,可更加灵活、准确地指导注入井调剖选井,从而提高决策的准确性。该研究成果为油田调剖选井提供重要的技术支持,可在油田进一步推广应用。

关键词:洛伦兹曲线;注水均衡指数;测试时间;压降速率;调剖选井

中图分类号:TE341 文献标志码:A

Research and application of profile control well selection method based on Lorentz curve

ZHANG Zhijun, GUO Mengquan, HUA Keliang, WEI Jun, SHI Duansheng

(CNOOC Ener. Tech. Drilling & Production Co., Tianjin 300452, China)

Abstract: Aiming at the problem that the traditional profile control well selection decision-making method is influenced by test time, and fails to take into account the effect of pressure drop rate and other factors, it is proposed a new profile control well selection decision-making method—the Lorentz curve decision-making method. This method not only considers the difference in pressure drop rate but also avoids the influence of test time. At the same time, the numerical range is relatively wide, and there are quantitative index classification standards, which can guide the well selection for profile control easily and quickly. The research shows that the closer the Lorentz curve is to the absolute imbalance line, the worse the water injection balance is, and the larger the corresponding water injection balance index value, the more the well needs to be profile adjusted, which is consistent with the understanding of traditional decision-making methods. The field applications show that compared with traditional decision-making methods, the Lorentz curve decision-making method can directly display information such as the descent rate hidden in the pressure drop curve, which can guide injection well selection for profile control more flexibly and accurately, thus improving the accuracy of decision-making. The research results provide important technical support for profile control well selection in oilfields and can be further promoted and applied.

Key words: Lorentz curve; water injection equilibrium index; testing time; pressure drop rate; profile control well selection

我国大多数油田在利用天然能量生产后,转为注水开发,即二次采油。由于地下储层及流体的非均质性,再加上各井生产制度的差异,导致注入水沿某些高渗通道突进,造成部分井含水快速上升。因此需要针对注入突进的井组开展调剖作业^[1-6],封堵已形成的高渗通道,从而扩大后续注入水的波及体积,提高原油采收率。

传统的调剖选井方法多以压降曲线为基础,通过计算压力指数 PI 、 FD ^[7-8]、修正的 PIG 来指导调剖选井。该类方法虽然简单,但存在较多问题。如测

试时间的长短、压降曲线下下降速率^[9-10]等均影响该指数。也有学者采用模糊综合评判法^[11-12]、数值模拟^[13]等方法指导调剖选井,虽然选井的准确性增强,但所需资料多、计算复杂,现场实时操作性差。因此,提出洛伦兹曲线及注水均衡指数,定量表征

收稿日期:2021-04-30; 改回日期:2021-09-27。

第一作者简介:张志军(1989—),硕士,工程师,现从事提高采收率技术研究。E-mail: zhangzhj43@cnoc.com.cn。

基金项目:国家科技重大专项示范工程58“渤海油田高效开发示范工程”(编号2016ZX05058)经费资助。

注水均衡程度,可直观、定量地评估注入井调剖的迫切性,从而更加准确地指导调剖选井。

1 传统决策方法存在的不足

传统决策方法^[14]是指通过测定注水井井口压降曲线,计算注水压力指数 PI 、 PI^c 、 FD 来直接指导调剖选井。其计算公式分别为:

$$PI = \frac{\int_0^{t_0} p dt}{t_0} \quad (1)$$

$$PI^c = PI \frac{h}{Q} G \quad (2)$$

$$FD = \frac{PI}{p_0} \quad (3)$$

式中, PI 为压力指数,MPa; p 为注入井关井后的井口压力,MPa; t_0 为压降测试时间(通常取90 min),min; PI^c 为修正后的 PI 值,MPa; h 为地层厚度,m; Q 为关井前注水量, m^3/d ; G 为区块吸水强度平均值, $m^3/(d \cdot m)$; FD 为充满度,无量纲; p_0 为关井

前井口压力,MPa。

传统计算的压力指数在不同程度上表征注入井的吸液能力,其值越小,越需要调剖。但二者在指导调剖选井时存在以下问题:1)根据 FD 的定义可知, FD 指数在0~1之间,多数情况下小于0.5,数值差异小,不利于对比。2)压降测试时间 t_0 影响调剖选井的判断,特别是当测试时间小于90 min时,如图1(a)所示。当包络面积 $S1 \geq S2$ 时,图1由 PI 决策法 $PI_{w1} > PI_{w2}$,W2井较W1井需要调剖。但实际上根据压降曲线变化趋势,W1井压力下降速率更快,说明W1井目前渗流能力更强,更需要调剖。只有当 $S1 < S2$ 时, PI 决策结论才有可能与实际情况一致。3)传统决策方法未考虑压降曲线下降速率的影响,如图1(b)所示,即使测试时间一致,包络面积 $S1 \geq S2$ 时,其调剖选井的结论依旧与实际相悖,这主要是因为传统决策法未考虑压降曲线的下降速率,即曲线变化的剧烈程度,仅仅是基于压降曲线所包络的面积,难以准确反映实际的调剖需求。

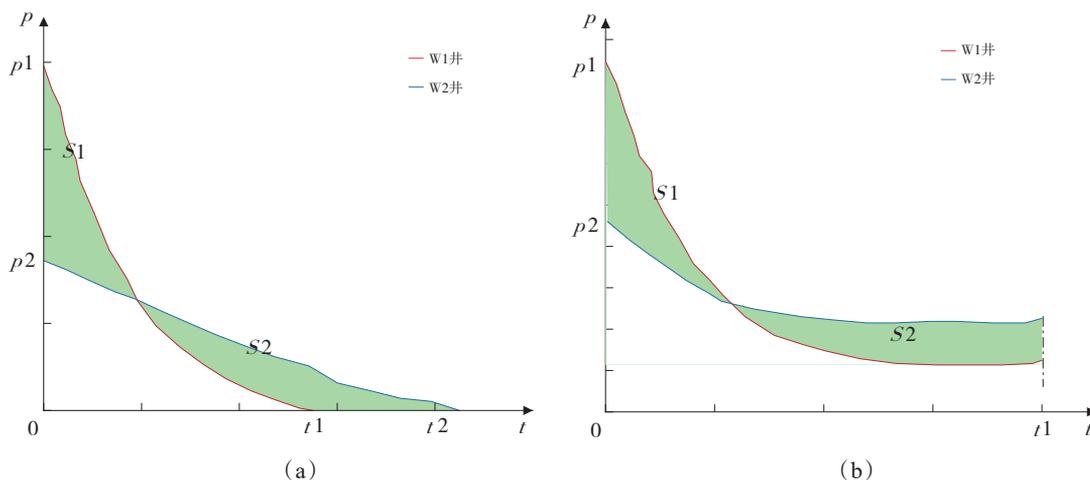


图1 井口压降曲线示意(图中 $S1$ 、 $S2$ 分别表示W1、W2井压降曲线包络面积)

由以上条件分析可知:采用传统决策方法指导调剖选井时,只有在部分情况下才能准确,在其他情况下容易造成选井偏离实际情况而达不到最优的调剖效果。因此需要完善传统决策方法,以更好地指导调剖选井工作。

2 新方法的提出

2.1 洛伦兹曲线原理

洛伦兹曲线是经济学中用来描述一个国家收入及分配情况的曲线,将每一等分的人口占据的财富比例累计绘制出来即可直观地看出财富分配信息的平等程度,对角线上的均等线即为分配绝对平

均线。在油藏工程中,研究人员将其应用于储层非均质性评价、产液/吸水剖面分析及各层产能差异分析等方面。本文以洛伦兹曲线为基础,研究调剖选井,原理如下:首先统计压降测试曲线的共计测试组数为 m ,按照压力降序排列后对各压力值 i 依次编码,曲线第 j 个点坐标 (a_j, b_j) 可表示为:

$$\begin{cases} a_j = \frac{j}{m} \times 100\% \\ b_j = \frac{\sum_{i=1}^j p_i}{\sum_{i=1}^m p_i} \end{cases} \quad (4)$$

式中, $i=1, 2, 3, \dots, m$; p_i 表示第*i*个测试点的压力值,MPa。

以计算得到的累计压力为纵轴,测试组数比例累计百分数为横轴,建立直角坐标系(见图2)。其中对角线*AB*即为洛伦兹曲线中的绝对平均线,若由各测试数据绘制的曲线与线段*AB*重合,则说明该井的压降曲线是一条水平线,即该井压力在测试时间内没有减小,无需调剖。反之,折线*ABC*为注入井压力瞬间降为0时的极端现象。通常状况下,实际注入井的洛伦兹分布曲线在*ABC*包围形成的三角形区域内,其中每一点的物理意义为部分测试的压力占全部测试压力的百分比。

分析洛伦兹曲线可知:整个过程中舍去了测试时间,减小了压降测试时间对调剖选井的影响;同时因为直接进行压力计算,不同压降速率下得到的洛伦兹曲线形态不同,可以从曲线形态上直接指导调剖选井。

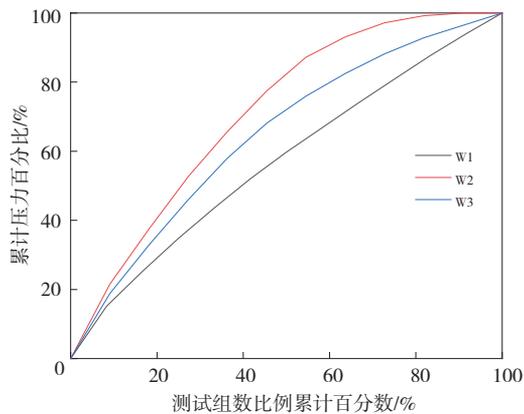
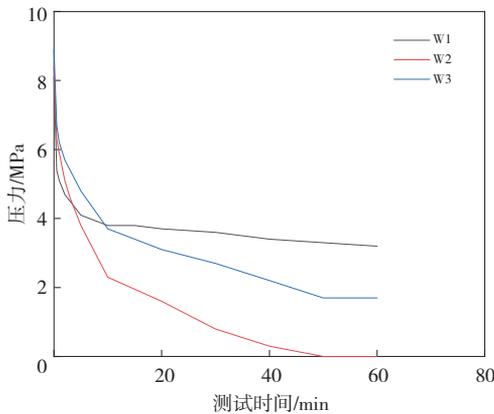


图3 三口注入井压降曲线(左图)及洛伦兹曲线(右图)

2.2 注水均衡指数

为了量化洛伦兹曲线,根据前人研究成果,引入了基尼系数的概念,基尼系数越小则分配越均衡。而注水均衡程度的差异直接影响井组的开发效果,在基尼系数的基础上提出了注水均衡指数*EQ*的概念,其含义是指实际洛伦兹曲线与绝对均衡线所包围的面积 S_{ABD} 占绝对均衡线与绝对不均衡线之间的面积 S_{ABC} 的比重,即

$$EQ = \frac{S_{ABD}}{S_{ABC}} \quad (5)$$

因为实际的洛伦兹曲线总是落在绝对均衡线与绝对不均衡线之间,故注水均衡指数*EQ*总在0~1之间,并随洛伦兹曲线弯曲程度的增大而逐渐增大,表示注水不均衡程度加剧。

如图3所示,压降速率越大,洛伦兹曲线向绝对不均衡线偏转越明显,注水均衡程度越低,调剖需求越迫切;压降速率越小,洛伦兹曲线越趋近于绝对均衡线,即注水均衡程度越高,调剖需求越低。因此洛伦兹曲线法相较传统决策方法,既消除了测试时间带来的影响,又明显反映压降速率的差异,从而能够更加准确地指导调剖选井。

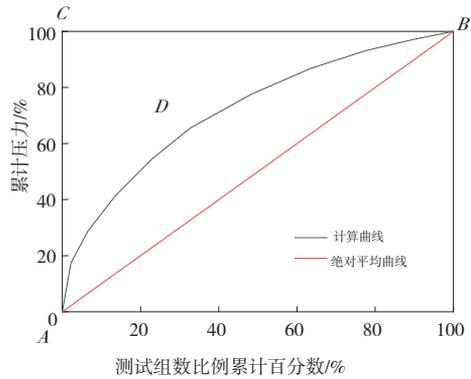


图2 洛伦兹分布曲线示意

由于扇形面积 S_{ABD} 难以直接求取,因此基于洛伦兹曲线的*m*+1个点采用数值积分的方法近似求得。某口注入井的注水均衡指数*EQ*用近似积分可得

$$EQ = \frac{b_0 + 2 \sum_{i=1}^{m-1} b_i + b_m}{100m} - 1 \quad (6)$$

式中, $b_0=0, b_m=100$ 。

把式(4)中的 b_j 代入式(6),可得注水均衡指数*EQ*的关系为

$$EQ = \frac{2}{m} \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^j P_i}{\sum_{i=1}^m P_i} - 1 - \frac{1}{m} \quad (7)$$

根据基尼系数^[15]所反映的分配均匀程度,也可相应地定义注水均衡指数强度指标,如表1所示。

表1 注水均衡指数评价结果

<i>EQ</i> 指数	<0.2	0.2~0.3	0.3~0.4	0.4~0.5	>0.5
评价结果	驱替均衡	驱替较均衡	驱替均衡中等	驱替均衡差	驱替均衡极差

3 实例应用

渤海Z油田是河流三角洲沉积复合体,储层物性好,非均质严重,C区块目前整体高含水,但各井组含水差异相对较大,亟需稳油控水措施。为筛选出优先实施整体调剖的目标井组,基于C区注入井降压曲线,结合传统决策方法及洛伦兹曲线法,筛

选出各自的调剖井组,并进行方法对比与验证。C区块各评价方法结果见表2。

对比表2中*FD*评价方法可知,C区块各井*FD*值绝大多数在0.1~0.2之间,无法利用*FD*值结论进行井组筛选,这也与前文的论述相一致。而*EQ*虽在0~1之间,但各井间差异较大,完全可以根据其数值的大小进行调剖选井。

表2 C区块不同方法调剖选井决策对比

井号	<i>PI</i> /MPa	<i>PI⁰</i> /MPa	<i>FD</i>	传统方法结论	<i>EQ</i>	洛伦兹曲线法结论
C4	2.4	1.7	0.2	不调剖	0.14	不调剖
C9	1.0	0.8	0.1	调剖	0.34	不调剖
C12	1.0	1.4	0.1	不调剖	0.41	调剖
C14	0.2	0.4	0.0	调剖	0.64	调剖
C16	1.7	1.7	0.2	不调剖	0.32	不调剖
C24	1.3	1.0	0.1	不调剖	0.35	不调剖
C33	1.3	1.1	0.1	不调剖	0.37	不调剖
C40	1.6	1.4	0.1	不调剖	0.33	不调剖
C53	1.9	2.5	0.3	不调剖	0.29	不调剖
C55	1.3	2.0	0.2	不调剖	0.24	不调剖
C57	0.2	0.4	0.1	调剖	0.53	调剖

对比表2中传统决策方法与注水均衡指数决策方法可知:二者的结论大部分一致,仅C9、C12井结

论不一致,现针对C9、C12井进行分析。两口井降压曲线及对应洛伦兹曲线如图4所示。

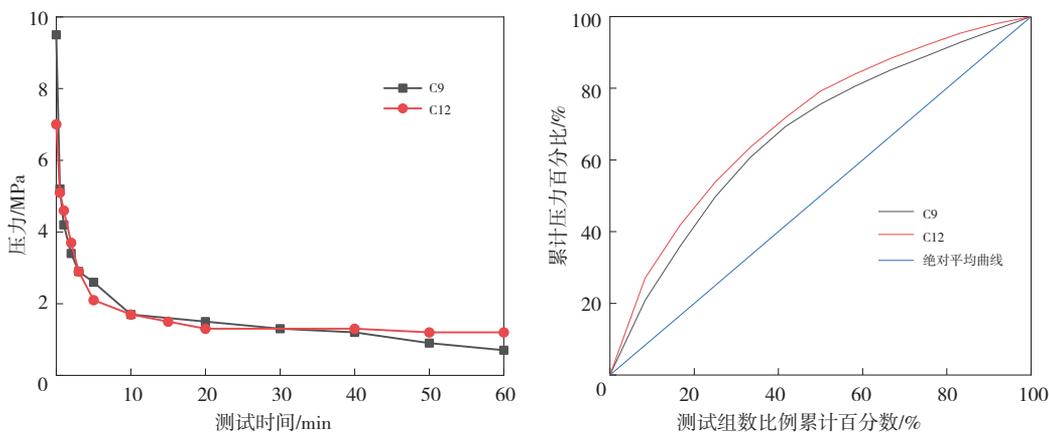


图4 渤海Z油田C9、C12井降压及洛伦兹曲线

由表1、表2指标可知:C12井*EQ*值为0.41,为驱替均衡差;而C9井*EQ*值为0.34,为驱替均衡性中等,仅从指标判断即为C12井先于C9井调剖。

从图4曲线看:测试初期,C12井较C9井压力下降

速率大,测试后期C12井压力明显再次下降,而C9井压力趋于稳定。对应洛伦兹曲线上C12井的实际曲线更加靠近绝对不均衡线,因此更需要先调剖。而对比两井组动态可知,C12井组含水85%,且

部分受益井含水上升速度明显高于C9井组。因此C12井较C9井更应进行调剖。

由以上两种方法对比分析可知:洛伦兹曲线法相较于传统决策方法,可更加准确地反映压降曲线信息,同时规避了测试时间对决策的影响,因此能更加准确合理地指导调剖选井。

根据上述筛选结果,推荐C12、C14、C57三口井进行调剖作业。调剖作业后,三个井组中均有降水增油效果,典型见效井如图5所示。受益井降水最大12.6%(从85.2%下降至72.6%),日增油 $37.1 \text{ m}^3/\text{d}$ (从 $16.8 \text{ m}^3/\text{d}$ 增加至 $53.9 \text{ m}^3/\text{d}$),井组累计增油 $14\,041.9 \text{ m}^3/\text{d}$ 。目前调剖效果仍在持续。

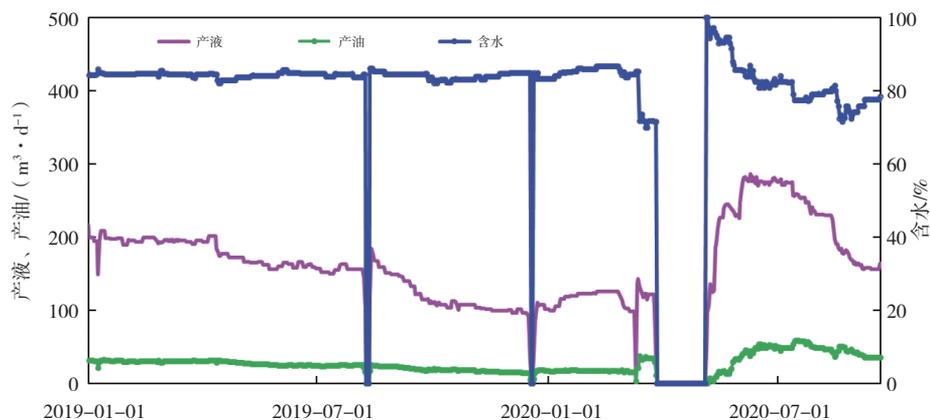


图5 C区调剖井组典型受益井生产曲线

4 结论

(1)针对传统调剖选井决策技术中存在数值区间窄、受测试时间影响大、未考虑压降速率等不足,基于洛伦兹曲线,提出注水均衡指数。该指数既消除了测试时间的影响,又将压降速率在曲线上清晰地展示出来,能够更加准确地反映注入井的压力传播能力,从而指导调剖选井。

(2)分析注水均衡指数可知:该值越大,越需进行调剖;同时压降速率越大,洛伦兹曲线越靠近绝对不平衡线轴,则均衡程度越差,越需要进行调剖。

(3)矿场应用表明,洛伦兹曲线决策法既较为全面地考虑了测试时间及压降速率,又所需资料少,计算方便快捷,同时优选结果更接近矿场实际情况,可进一步推广应用。

参考文献:

- [1] 李海涛. 投球调剖技术在大王庄油田特殊注水区块的应用[J]. 特种油气藏, 2018, 25(6): 155-158.
- [2] 靳彦欣, 史树彬, 付玮, 等. 特高含水油藏深部调剖技术界限研究[J]. 特种油气藏, 2015, 22(3): 77-80.
- [3] 梁守成. 多级调剖调驱技术效果及剩余油分布[J]. 大庆石油地质与开发, 2018, 37(6): 108-115.
- [4] 尹相文, 夏凌燕, 刘承杰, 等. 堵剂井间定位放置深部调剖优化技术及应用[J]. 特种油气藏, 2014, 21(2): 141-143.
- [5] 贾晓飞, 雷光伦, 贾晓宇. 注水井深部调剖技术研究现状及发展趋势[J]. 特种油气藏, 2009, 16(4): 6-12.
- [6] 吕鹏, 阚亮, 王成胜, 等. 海上油田在线组合调驱提高采收率技术——以渤海C油田E井组为例[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(9): 164-167.
- [7] 赵福麟. 压力指数决策技术及其应用进展[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2011, 35(1): 82-88.
- [8] 张琴. 堵水调剖选井选层的方法[D]. 西安: 西安石油大学, 2014.
- [9] 陈存良, 刘英宪, 周凤军, 等. 基于新型压力指数的调剖选井决策方法研究[J]. 特种油气藏, 2019, 26(3): 105-108.
- [10] 冯其红, 王森, 陈存良, 等. 低渗透裂缝性油藏调剖选井无因次压力指数决策方法[J]. 石油学报, 2013, 34(5): 932-937.
- [11] 高冬, 李元, 唐冬, 等. 安塞油田杏河区调剖选井多层次模糊综合评判方法研究[J]. 石油化工应用, 2016, 35(10): 33-36.
- [12] 殷代印, 何瑞, 汪勇. 榆树林油田模糊综合评判经济调剖选井方法[J]. 特种油气藏, 2020, 27(3): 82-87.
- [13] 张勇. 调剖优化决策与效果预测技术研究[D]. 成都: 西南石油学院, 2005.
- [14] 熊显忠, 杨永超, 李乔林, 等. PI决策技术在断块油田调剖中的应用[J]. 河南石油, 2001, 15(4): 22-23.
- [15] 林伶, 景海权. 洛伦兹曲线在微观非均质性研究中的应用[J]. 复杂油气藏, 2016, 9(2): 15-18.

(编辑 谢 葵)