

气驱特征曲线在气窜模式识别中的应用

岳宝林 孟智强 赵兴刚 耿松鹤 赵健男

中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300459

摘要:水驱特征曲线法分析生产动态普遍应用于水驱油田的开发实践中,但针对渤海气驱油藏缺乏相似的研究手段。基于稳定渗流理论,进行了气驱特征曲线公式的推导,公式表明,达到稳定气驱阶段后,可以认为气顶累积产出量与累积产油量在半对数坐标上成一条直线关系。实际气驱曲线受前期无气采出阶段和后期气携油阶段的影响,为反S型。锦州X油田结合气驱特征曲线划分出3种气窜模式:快速气窜型、稳定气驱型、高气油比型。快速气窜型油井产量递减快、累计产油量低,无稳定生产阶段;稳定气驱型油井气油比上升平缓、持续稳产、累计产油量高;高气油比型油井开发效果介于快速气窜型与稳定气驱型的开发效果之间,开发后期由于气顶气突破与原油脱气,油井逐渐以产气为主,仅携带少量原油,井别性质从油井向气井过渡。在明确气窜规律的基础上,结合控气技术应用实践,提出分气窜模式、分开发阶段的开发策略,针对快速气窜型油井,优化井位,原井眼向下侧钻,改善了开发效果;针对稳定气驱型油井,初期控制合理采油速度,中后期跟踪气油比上升幅度配套控气措施,气油比呈现出波动式上升规律;高气油比型油井受高气油比影响,仅携带少量原油,井别性质从油井向气井过渡,计算实施屏障注水,解决气窜问题。研究成果对渤海气驱油藏的生产开发具有一定的指导意义,可实现相似油田动态跟踪与开发调整。

关键词:气驱特征曲线;气窜模式;生产动态;控气技术

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2023.03.012

Gas drive characteristic curve in gas channeling pattern recognition

YUE Baolin, MENG Zhiqiang, ZHAO Xinggang, GENG Songhe, ZHAO Jiannan

CNOOC China Ltd., Tianjin Branch, Tianjin, 300459, China

Abstract: The water drive characteristic curve method to analyze production performance is widely used in the development practice of water drive oil fields, but there is a lack of similar research methods for Bohai gas drive reservoirs. Based on the theory of stable seepage flow, the gas drive characteristic curve formula is derived. The formula shows that after reaching the stable gas flooding stage, the cumulative gas cap production and the cumulative oil production can be considered to be in a straight line relationship on a semi-logarithmic coordinate. The actual gas drive curve is affected by the early gasless production stage and the later gas-carrying stage, and it is inverse S-shaped. The JZ-X oilfield is divided into three gas channeling modes based on the gas drive characteristic curve: fast gas channeling type,

收稿日期:2022-10-21

基金项目:国家重大科技专项“渤海油田加密调整及提高采收率油藏工程技术示范”(2016ZX05058001)

作者简介:岳宝林(1986-),男,山东济宁人,工程师,硕士,主要从事油气田开发工作。E-mail:282565118@qq.com

stable gas drive type, and high gas-oil ratio type. Fast gas channeling oil wells have a rapid decline in production, low cumulative oil production, and no stable production stage; stable gas drive oil wells have a gentle rise in gas-oil ratio, sustained stable production, and high cumulative oil production; development effects of high gas-oil ratios are between fast gas channeling type and the stable gas flooding type. Due to gas breakthrough in gas cap and crude oil degassing in the later stages of development, oil wells gradually produce gas mainly, carrying only a small amount of crude oil. The nature of the well transits from oil well to gas well. On the basis of clarifying the gas channeling pattern, combined with the application of gas control technology, the development strategy of dividing gas channeling mode and development stage is proposed. For rapid gas channeling type, well position is optimized and original wellbore is sidetracked, and the development effect is improved; for stable gas drive type, rational oil production speed shall be controlled at the initial stage, following the gas-oil ratio increase in the middle and late stages to support gas control measures. The gas-oil ratio shows a fluctuating upward pattern; for high gas-oil ratio type, the oil well is only affected by the high gas-oil ratio, carrying a small amount of crude oil. The nature of the well transits from oil well to gas well. Barrier water injection method is implemented to solve the problem of gas channeling. The research results provide guidance for the production and development of Bohai gas drive reservoirs and can realize the dynamic tracking and development adjustment of oil fields of the same nature.

Keywords: Gas drive characteristic curve; Gas channeling mode; Production dynamics; Gas control technology

0 前言

气顶边水油藏的典型特征是油层内同时存在着上部的气藏、中部的油藏以及下部的边底水。油层内的流体在成藏过程中,已经处于压力平衡、热力学平衡、组分平衡的状态^[1-5]。当油田投产后,伴随着流体流动、压力传递、界面移动,生产动态显现出气窜、水窜、压力下降等动态特征。海上针对此类特殊油气藏开发,以平行于油气水界面的方式部署水平井,取得了较好的实践效果^[6-10],但油藏开发中后期也面临着地层压力下降快、气油比快速上升、采油速度低等难题^[10-15]。针对油藏的水驱、气驱动态特征,应用水驱特征曲线可以实现水窜等生产动态的研究^[16-19],但针对气窜问题缺乏相似的手段,如何对气窜模式进行分类、从而针对性地采取控气策略有待总结。

1 气驱特征曲线建立

水驱特征曲线是以油水相对渗透率曲线为基础推导而来,基本假设认为在油—水两相稳定渗流条件下,中含水阶段 $K_{rw}/K_{ro} - S_w$ 呈半对数直线关系,该研究思想同样适用于气驱油的情况,二者的区别主要是黏度比的差异,对于油—气两相渗流时,认为 $K_{rg}/K_{ro} - S_g$ 也满足指数函数关系:

$$\frac{K_{rg}}{K_{ro}} = me^{nS_g} \quad (1)$$

式中: K_{rg} 为气相相对渗透率; K_{ro} 为油相相对渗透率; S_g 为含气饱和度; m, n 为方程回归系数。

在忽略毛管力影响时,储层出现气驱的稳定渗流条件下,由平面径向流公式,产油量、产气量与流体黏度、体积系数和相对渗透率之间存在如下关系:

$$\frac{Q_g - Q_o R_{si}}{Q_o} = \frac{\mu_o \cdot B_o \cdot K_{rg}}{\mu_g \cdot B_g \cdot K_{ro}} \quad (2)$$

式中: Q_g 为地面条件下产气量, m^3/d ; Q_o 为地面条件下产油量, m^3/d ; R_{si} 为气油比; μ_o 为地层原油黏度, $mPa \cdot s$; μ_g 为地层天然气黏度, $mPa \cdot s$; B_o 为原油体积系数; B_g 为天然气体积系数。

根据物质平衡方程,气驱油下,水相仅以束缚水形式存在于地层中,气驱油藏任意时刻含油饱和度为油藏中剩余油体积与油藏孔隙体积之比,气驱油过程中油藏含气饱和度为:

$$S_g = \frac{N_p}{N} (1 - S_{wi}) \quad (3)$$

式中: N_p 为累积产油量, $10^4 m^3$; N 为地质储量, $10^4 m^3$; S_{wi} 为束缚水饱和度。

油田的累积产气量,可由式(4)表示

$$G_p = \int_0^t Q_g \cdot dt \quad (4)$$

式中: G_p 为累积产油量, $10^4 m^3$; t 为生产时间, d 。

由式(1)~(4)可得:

$$G_p = \int_0^t Q_o \cdot \left[\frac{m\mu_o B_o}{\mu_g B_g} e^{\frac{nN_p}{N}(1-S_{wi})} + R_{si} \right] \cdot dt \quad (5)$$

油田瞬时产油量与累积产油量的关系可得:

$$Q_o = \frac{dN_p}{dt} \quad (6)$$

将式(6)代入式(5),通过积分、求对数可得:

$$\lg(G_p - R_{si}N_p + C) = A + BN_p \quad (7)$$

$$B = \frac{3n(1 - S_{wi})}{4.606N} \quad (8)$$

式中: A 、 B 、 C 为常数项。

与水驱曲线相比,累积产气量与累积产油量的关系受溶解气油比的影响。伴随着油田的持续开发及生产气油比的不断放大,常数项的影响越来越小。达到稳定气驱阶段后,可以认为气顶累积产出量与累积产油量在半对数坐标上成一条直线关系:

$$\lg(G_p - R_{si}N_p) = A + BN_p \quad (9)$$

实际气驱曲线受前期无气采出阶段和后期气携油阶段的影响,应为反S型,见图1,符合水驱特征曲线直线段特征的为Ⅱ段。

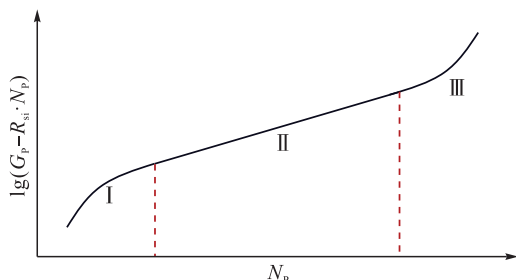


图1 标准气驱特征曲线图

Fig.1 Standard gas drive characteristic curve

I段:无气采出阶段逐渐见气,气驱不稳定。过程中伴随着生产气油比的提高,气窜占据渗流通道,气体在近井地带体积膨胀会进一步降低液量产出,造成该阶段液量急剧递减,见气后初期气油比上升速度快,后趋向稳定。

II段:进入气驱稳定阶段,气窜气给油井补充能量,并在油气藏前缘形成混相驱,促进原油生产。气顶累积产出量与累积产油量在半对数坐标上成一条直线关系。

III段:伴随着气顶气突破与原油脱气,油井逐渐以产气为主,携带少量的原油,并别性质由油井向气井过渡,气油比加速上升。

2 油田应用实例

锦州X油田古近系沙河街组发育了受构造控制的短轴半背斜气顶油藏,以3井区I油组为例,见图2,是一个大气顶、中边水、窄油环为特征的砂岩油藏(气顶指数为2.03,水体倍数为20,油环平面宽度为300 m,储层厚

度为30 m,油柱高度为28 m),沉积相为辫状河三角洲沉积,岩性以细砂岩为主,储层平均渗透率为325 mD,平均孔隙度为25%,属于高孔中渗储层,原油属于轻质原油,地层原油黏度3.21 mPa·s,气顶气组份:CH₄含量为74.62%~87.79%,CO₂含量0.28%~1.37%,N₂含量0.46%~1.34%,原始地层压力16.50 MPa,原始溶解气油比70。

油田部署水平井,利用天然能量开发取得了较好的开发效果和经济效益,但伴随着开发进入中后期阶段(当前地层压力10.25 MPa,采出程度35.1%,气油比1832),高采出程度、高气油比下生产矛盾日益突出,如何认识气窜模式、并匹配相应的控气策略有待研究。

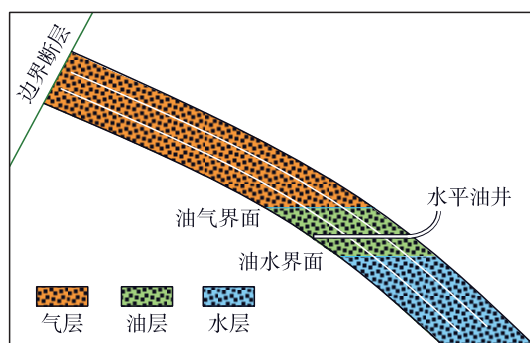


图2 锦州X油田3井区I油组井位示意图

Fig.2 Well location of oil formation I in well block 3 of JZ-X Oilfield

由图2可知,锦州X油田3井区当前水平油井部署于油柱高度的下1/2至下1/3处,受气、水两相驱替,在上下部分原油不发生大幅度窜流的情况下,可以认为水平井上部储量为气驱动用,下部储量为水驱动用。计算水驱、气驱动用储量比例为: $N_1/N_2 = 0.45 : 0.55$,应用数值模拟的储量分区功能,得到各时间段的上部储量气驱驱产量,代入气驱特征曲线方程中,见图3。

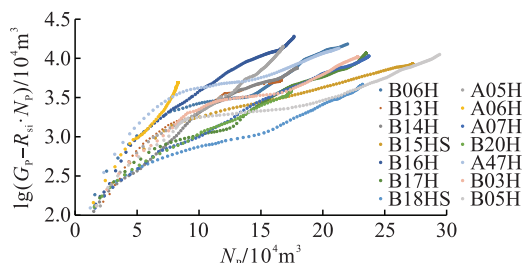


图3 锦州X油田单井气驱特征曲线图

Fig.3 Single well gas drive characteristic curve of JZ-X Oilfield

由于锦州X油田不同井气油比上升规律差异大,根据气油比上升速度、气油比变化形态与气驱阶段,结合气驱特征曲线划分出3种气窜模式,见图4。

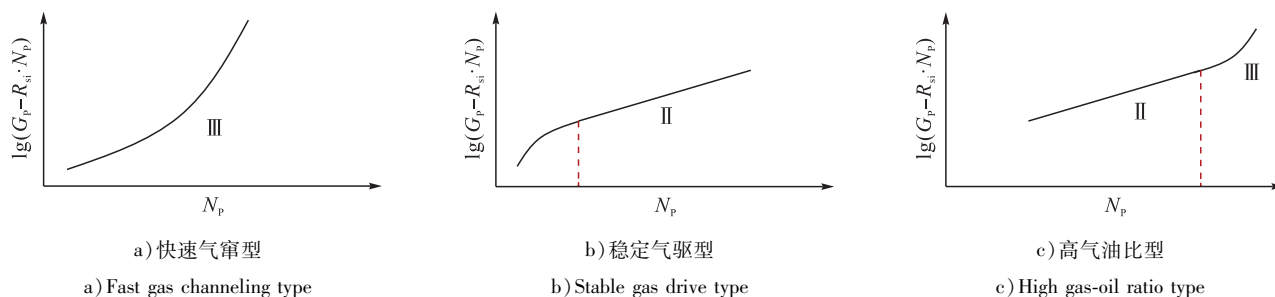


图4 气窜模式分类图

Fig. 4 Classification of gas channeling modes

2.1 快速气窜型

快速气窜型油井气油比上升速度大于 $400 \text{ m}^3 / (\text{m}^3 \cdot \text{a})$, 油井投产 1~7 个月后发生气窜, 气油比快速上升, 导致油气界面推进不均匀, 气驱效率差, 平均产油量低于 $10 \text{ m}^3 / \text{d}$ 。因此, 快速气窜型油井具有产量递减快、累计产油量低, 无稳定生产阶段的开发特点, 见图 5。

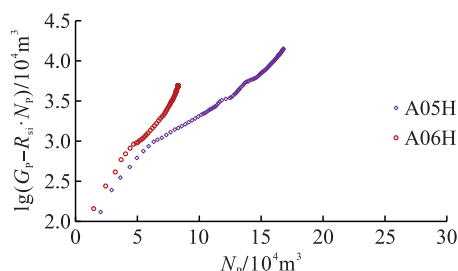


图5 快速气窜型气驱曲线图

Fig. 5 Fast gas channeling gas drive curve

2.2 稳定气驱型

稳定气窜型油井气油比上升速度小于 $200 \text{ m}^3 / (\text{m}^3 \cdot \text{a})$, 油井投产 7~24 个月后才发生气突破, 该类型油井开发初期通过控制合理的采油速度, 使油气界面推进比较均匀, 气驱效率高。目前该类油井平均产油量高于 $30 \text{ m}^3 / \text{d}$ 。因此, 稳定气驱型油井具有气油比上升平缓、持续稳产、累计产油量高的特点, 见图 6。

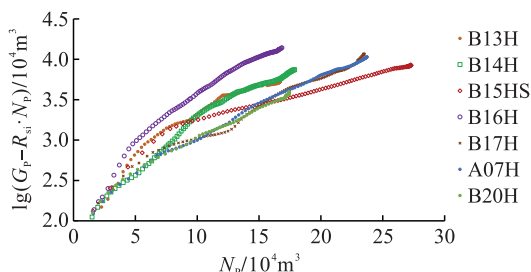


图6 稳定气驱型气驱曲线图

Fig. 6 Stable gas drive curve

2.3 高气油比型

高气油比型油井气油比上升速度平均 $200 \sim 400$

$\text{m}^3 / (\text{m}^3 \cdot \text{a})$, 油井投产 4~9 个月出现明显气窜, 初期气油比上升较快, 后期控气采用缩油嘴、关井轮采等策略, 延缓了气油比上升速度。伴随着地层压力不断下降 (降低到 80% 以下后), 由于气顶气突破与原油脱气, 油井逐渐以产气为主, 仅携带少量原油, 井别性质从油井向气井过渡。伴随着采出程度的继续提高, 气油比上升速度呈加快趋势, 见图 7。

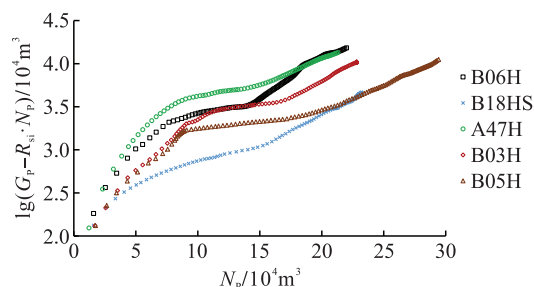


图7 高气油比型气驱曲线图

Fig. 7 High gas oil ratio gas drive curve

3 不同气窜模式下的开发策略

在明确单井气窜规律的基础上, 结合锦州 X 油田控气技术应用实践, 提出分气窜模式、分开发阶段的开发策略^[20]。

3.1 快速气窜型开发策略

锦州 X 油田由于古地貌相对比较平缓, 主要发育辫状河三角洲前缘水下分流河道和河口坝沉积, 砂体的横向展布范围比较稳定, 储层非均质性较弱, 水平井布井位置是快速气窜型模式形成的主要因素。开发方案制定阶段, 为规避油井的气窜、水淹, 结合数值模拟, 制定了气顶边水油藏不同油藏类型下的水平井位置部署标准: 大气顶中等边水油藏水平段部署于油柱高度中 $1/2 \sim 1/3$ 处; 大气顶边水油藏水平段部署于下 $1/3 \sim$ 下 $1/4$ 处; 小气顶强边水油藏水平段部署于上 $1/3 \sim$ 上 $1/4$ 处; 小气顶边水油藏水平段部署于上 $1/3 \sim$ 中 $1/2$ 处。A06H 井 2010 年实施投产, 由于对水侵风险预估过高和流体界面认识不清, 油井部署于油柱高度上 $1/3$ 处, 投

产后气顶气沿高渗通道垂向快速窜进,仅15个月产油量由 $112\text{ m}^3/\text{d}$ 递减至 $18\text{ m}^3/\text{d}$,气油比达到2 013,基本不存在稳定气驱阶段。常规措施控气程度有限,该油井投产4 a后,产油量已低至 $4\text{ m}^3/\text{d}$,2014年开展低产低效井治理,A06H井原井眼侧钻至油柱高度下 $1/3$ 处,初期投产 $61\text{ m}^3/\text{d}$,气油比116,后期跟踪气油比变化,井组由快速气窜型转为稳定气驱型,有效改善了开发效果,截至2020年12月,侧钻累增产 $9.7 \times 10^4\text{ m}^3$,见图8。

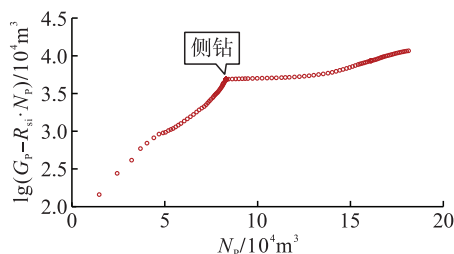


图8 A06H井侧钻实施后气驱特征曲线图

Fig. 8 Gas drive characteristic curve after side tracking of A06H

3.2 稳定气驱型开发策略

天然气具有溶于原油的性质,原始状态下,带气顶的油藏原油处于饱和状态,伴随着油井投入开发,井筒附近形成压力降,低于饱和压力下的原油溶解气开始析出,气窜气一方面是产出物,另一方面也是能量传导介质,气顶至井筒产生的压力差与原油溶解气的析出,驱油前缘天然气溶于原油形成混相驱,促进原油生产。对气顶油藏开发而言,应尽可能稳定油气界面推进,延长稳定气驱阶段。初期控制合理采油速度,锦州X油田应用填砂建立二维可视化物理模型,通过对比不同采油速度的实验,发现采油速度越小时,油气界面稳定性越好,气脊波及范围越广,采出程度越高,2%采油速度时最终采收率为40.4%,5%采油速度时最终采收率为33.7%。出于提高采收率的目的,应该以相对小的采油速度进行生产,可以更加合理地控制油气界面的运移,满足长远开发效果。另外伴随着采油速度的降低,提高采收率程度变缓,3%采油速度下的采收率已经接近2%采油速度下的采收率。综合考虑下,建议油田投产后控制采油速度为3%。中后期跟踪气油比上升幅度配套控气措施:低速上升阶段,及时缩油嘴控气;中速上升阶段,成对轮采间歇开发(气窜井成对以3个月为周期,轮流关井控气,一方面保证产量供给,另一方面延缓气窜的加剧);高速上升阶段,关井压气锥控气。通过配套控气措施,气油比呈现出波动式上升规律,单井措施累增油 $1.8 \times 10^4\text{ m}^3$,见图9。

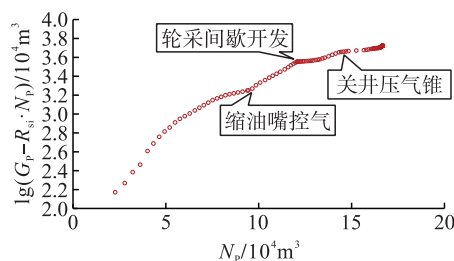


图9 B13H井控气措施下气油比波动上升曲线图

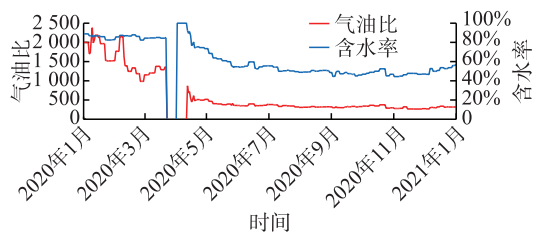
Fig. 9 Rising curve of gas oil ratio fluctuation under gas control measures of B13H

3.3 高气油比型开发策略

根据实验结果与现场动态跟踪可知,开发过程中应尽量均衡开采油气,稳定油气界面,避免过快气窜。但通过以物质平衡方程与气体状态方程为基础推导出的气体侵入油环体积公式表明:伴随着开发的进行,地层压力下降,气顶气不断膨胀,油气界面不断下移,生产气油比不断升高无法避免^[1]。根据气油比情况制定出油气藏不同气窜井的划分标准:正常井,气油比 <300 ;油气井,气油比 $300 \sim 1\,000$;高气油比型油井,气油比 $>1\,000$ 。高气油比型油井受高气油比影响,仅携带少量原油,井别性质从油井向气井过渡,气油比上升速度呈加快趋势。油藏虽然存在开发潜力,但目前的低速开采方式(单井年采油速度已经降低到0.4%)已无法满足经济效益要求。计划天然能量转注水开发,在内油气边界附近,实施注水井。注水后,注入水一方面起屏障功能,将大气顶油藏分割为气藏+小气顶油藏2个独立的开发单元;另一方面下驱油层,水和气混合驱替油环,改善驱替效果,提高采油速度。考虑油田气顶边水窄油环的特殊性,渤海油田尚未有此类油藏转屏障注水的经验,先期实施1口先导试验井。以气窜严重,纵向驱替不平衡、剩余油富集、增产效果显著为优选原则,最终选择D4H、B15HS井组补充实施平行注采井网水平注水井。该井组井控地质储量 $98 \times 10^4\text{ t}$,当前采出程度27.6%,气油比2 370,含水率85%,受气窜影响,产液量由初期的 $250\text{ m}^3/\text{d}$ 降至当前的 $80\text{ m}^3/\text{d}$,产油量 $20\text{ m}^3/\text{d}$,开发效果有待优化。屏障注水井2020年1月实施后,初期注采比为1,后期跟踪油井液量变化灵活调整,预测4个月左右水障基本形成,见图10。此时井组气油比由初期2 370降至1 392,证明1口注水井虽然无法实现油田的水障连片,但对气窜也实现了部分屏障。2020年4月对井组采取提液措施,放大生产压差,在油藏中将水驱引向油井,一方面防止注入水大量驱入气顶,造成气井水侵;另一方面最大化实现水障驱油效果。提液后,井组气油比稳定在500左右,表明水障的形成明显隔离了气顶与油区,起到了缓解气窜的效果。伴随着水障下驱油

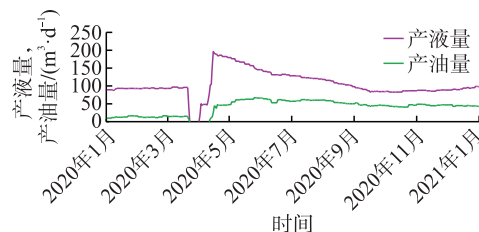
层,水和气混合驱替油环,动用原气驱脊状剩余油,井组含水率由屏障注水前的 85% 下降至 50%,增油 $35 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

预测实施屏障注水后,累增油 $5.4 \times 10^4 \text{ m}^3$,井组提高采收率 5.5%。



a) 气油比、含水率动态曲线图

a) Dynamic curve of gas oil ratio and water content



b) 产液量、产油量动态曲线图

b) Dynamic curve of liquid and oil production

图 10 高气油比井组注水井位、实施效果图

Fig. 10 Water injection well location and implementation effect of well cluster with high gas oil ratio

4 结论

1) 基于稳定渗流理论,进行了气驱特征曲线公式的推导,公式表明,针对大气顶油藏,伴随着油田的持续开发,生产气油比的不断放大,常数项的影响越来越小。达到稳定气驱阶段后,可以认为气顶累积产出量与累积产油量在半对数坐标上成一条直线关系。实际气驱曲线受前期无气采出阶段和后期气携油阶段的影响,应为反 S 型,符合气驱特征曲线直线段特征的为 II 段。

2) 锦州 X 油田不同井气油比上升规律差异大,根据气油比上升速度、气油比变化形态与气驱阶段,结合气驱特征曲线划分出 3 种气驱模式。快速气驱型油井产量递减快、累计产油量低、无稳定生产阶段;稳定气驱型油井气油比上升平缓、持续稳产、累计产油量高;高气油比型油井开发效果介于快速气驱型与稳定气驱型的开发效果之间,开发后期由于气顶气突破与原油脱气,油井逐渐以产气为主,仅携带少量原油,井别性质从油井向气井过渡。

3) 在明确油藏气驱规律的基础上,结合锦州 X 油田控气技术应用实践,提出分气驱模式、分开发阶段的开发策略。针对快速气驱型油井,优化井位,原井眼向下侧钻,井组由快速气驱型转为稳定气驱型,有效改善了开发效果,侧钻单井增产 $9.7 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。针对稳定气驱型油井,初期控制合理采油速度为 3%,中后期跟踪气油比上升幅度配套控气措施,低速上升阶段,及时缩油嘴控气,中速上升阶段,成对轮采间歇开发,高速上升阶段,关井压气锥控气。通过控气措施,气油比呈现出波动式上上升规律,单井措施累增油 $1.8 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。针对高气油比型油井,油井受高气油比影响,仅携带少量原油,井别性质从油井向气井过渡。目前的低速开采方式已无法满足经济效益要求,优选 1 个井组开展先导实验,实施屏障注水后,增油 $35 \text{ m}^3/\text{d}$,预测累增油 $5.4 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

参考文献:

- [1] 岳宝林,祝晓林,刘斌,等. 气顶边水油藏天然能量开发界面运移规律研究[J]. 天然气与石油, 2021, 39 (5): 74-79.
YUE Baolin, ZHU Xiaolin, LIU Bin, et al. Research on migration law of natural energy development interface [J]. Natural Gas and Oil, 2021, 39 (5): 74-79.
- [2] 岳宝林. 海上气顶油藏屏障注水立体井网的构建[J]. 石油钻采工艺, 2022, 44 (4): 468-474.
YUE Baolin. Construction of 3D well pattern for barrier water injection in offshore reservoirs with gas cap [J]. Oil Drilling and Production Technology, 2022, 44 (4): 468-474.
- [3] 张安刚,范子菲,宋珩,等. 气顶油藏油气界面稳定条件研究[J]. 地质科技情报, 2016, 35 (1): 114-118.
ZHANG Angang, FAN Zifei, SONG Heng, et al. Stability condition of oil-gas contact of oil-rim reservoir [J]. Geological Science and Technology Information, 2016, 35 (1): 114-118.
- [4] 曹海丽,张祥忠,陈礼. 小油环大气顶油藏高效开发及稳产策略[J]. 特种油气藏, 2016, 23 (3): 97-101.
CAO Haili, ZHANG Xiangzhong, CHEN Li. Efficient development and production maintenance measures of reservoir with little oil-ring and large gas-cap [J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2016, 23 (3): 97-101.
- [5] 葛丽珍,孟智强,朱志强,等. 气顶边水油藏初期合理采油速度三维物理模拟实验[J]. 中国海上油气, 2019, 31 (6): 103-109.
GE Lizhen, MENG Zhiqiang, ZHU Zhiqiang, et al. Three-dimensional physical simulation experiment of reasonable initial oil recovery rate for the gas cap/edge water reservoirs [J]. China Offshore Oil and Gas, 2019, 31 (6): 103-109.
- [6] 张安刚,范子菲,宋珩,等. 计算凝析气顶油藏油气界面移动距离的新方法[J]. 油气地质与采收率, 2015, 22

- (1): 102-105.
- ZHANG Angang, FAN Zifei, SONG Heng, et al. A new computing method of moving range of the oil-gas contact in oil reservoir with condensate gas cap[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22 (1): 102-105.
- [7] 张安刚, 范子菲, 宋 珩, 等. 凝析气顶油藏气顶油环协同开发方式下水侵量计算模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(8): 3040-3045.
- ZHANG Angang, FAN Zifei, SONG Heng, et al. Water influx calculation of oil-rim reservoir with condensate gas cap under concurrent development of gas cap and oil rim[J]. Journal of Central South University (Science and Technology Edition), 2015, 46 (8): 3040-3045.
- [8] 窦松江, 冯小宁, 李炼民. 尼日尔 G 油田气顶油气藏开发策略研究[J]. 非常规油气, 2015, 2(5): 34-37.
- DOU Songjiang, FENG Xiaoning, LI Lianmin. Development strategy for gas cap reservoirs in Niger G oilfield [J]. Unconventional Oil & Gas, 2015, 2 (5): 34-37.
- [9] 伍友佳. 辽河双台子油气藏气顶驱开采特征及气窜模式[J]. 天然气工业, 2000, 20(6): 76-79.
- WU Youjia. Characteristics of gas-cap drive production and gas breakthrough pattern of Shuangtaizi oil and gas reservoir in Liaohu[J]. Natural Gas Industry, 2000, 20 (6): 76-79.
- [10] 王 彬, 朱玉凤. 气顶油气田气顶气窜研究[J]. 天然气工业, 2000, 20(3): 79-82.
- WANG Bin, ZHU Yufeng. A research on gas channelings in gas-cap oil reservoir [J]. Natural Gas Industry, 2000, 20 (3): 79-82.
- [11] 蒋 明, 赫恩杰, 肖 伟. 气顶边水油藏开发策略研究与实践[J]. 石油钻采工艺, 2011, 33(5): 68-71.
- JIANG Ming, HE Enjie, XIAO Wei. Study and practice of developing strategy on reservoirs with gas cap and edge water [J]. Oil Drilling and Production Technology, 2011, 33 (5): 68-71.
- [12] 余 忠, 赵会杰, 李卫京, 等. 正确选择气顶油藏高效开发模式[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(2): 70-72.
- YU Zhong, ZHAO Huijie, LI Weijing, et al. Optimization of development scheme for gas-cap reservoir [J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30 (2): 70-72.
- [13] 岳宝林, 祝晓林, 刘 斌, 等. 气顶边水窄油环油藏开采中后期开发方式[J]. 新疆石油地质, 2022, 43 (1): 102-106.
- YUE Baolin, ZHU Xiaolin, LIU Bin, et al. Research on the mid-and late-stage development methods of the top-gas, edge-water and narrow oil-ring reservoirs [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2022, 43 (1): 102-106.
- [14] 朱志强, 李云鹏, 葛丽珍, 等. 气顶底水油藏水平井垂向位置确定模型及应用[J]. 石油钻探技术, 2016, 44 (5): 104-108.
- ZHU Zhiqiang, LI Yunpeng, GE Lizhen, et al. The model and application in determining the vertical position of horizontal well in gas cap and bottom water reservoirs [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016, 44 (5): 104-108.
- [15] 刘旺东, 杨智刚, 卢志明, 等. 阿里斯库姆大气顶薄油环边底水油田开发方式[J]. 新疆石油地质, 2018, 39 (5): 622-626.
- LIU Wangdong, YANG Zhigang, LU Zhiming, et al. Development methods of aryskum oilfield with large gas cap, thin oil rim and edge /bottom water [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2018, 39 (5): 622-626.
- [16] 岳宝林, 王双龙, 祝晓林, 等. 气驱—水驱联合特征曲线在气顶边水油藏中的应用[J]. 石油钻探技术, 2022, 50 (2): 99-104.
- YUE Baolin, WANG Shuanglong, ZHU Xiaolin, et al. Application of a gas and water drive combined characteristic curve in reservoirs with gas cap and edge water [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50 (2): 99-104.
- [17] 薛 颖. 童氏水驱曲线的改进及应用[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2015, 37(1): 141-145.
- XUE Ying. Improvement and application of Tong's water drive curve [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2015, 37 (1): 141-145.
- [18] 马奎前, 孙召勃, 贾晓飞, 等. 对水驱曲线中童氏“7.5B”公式再认识和改进[J]. 特种油气藏, 2018, 25 (2): 107-110.
- MA Kuiqian, SUN Zhaobo, JIA Xiaofei, et al. Recognition and improvement of Tong's “7.5B” in waterflooding curve [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2018, 25 (2): 107-110.
- [19] 童凯军, 张迎春, 戴卫华, 等. 天然气油藏开发动态评价及可采储量预测新方法[J]. 石油学报, 2015, 36 (6): 740-747.
- TONG Kaijun, ZHANG Yingchun, DAI Weihua, et al. A new method for evaluation of development performance and recoverable reserves estimation in natural gas flooding reservoirs [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36 (6): 740-747.
- [20] 房 娜, 刘宗宾, 吕坐彬, 等. 大气顶油藏气窜规律与全寿命开发策略[J]. 特种油气藏, 2018, 25(3): 117-121.
- FANG Na, LIU Zongbin, LYU Zuobin, et al. Gas channeling pattern and full-life development strategy for oil reservoir with large gas-cap [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2018, 25 (3): 117-121.