

能量指示曲线叠合图版

提高碳酸盐岩油藏采收率应用研究

陈明仁, 蒋林, 李成刚, 程露, 刘聪, 芦海涛

(中国石化西北油田分公司采油三厂, 新疆轮台 841604)

摘要:塔河油田碳酸盐岩油藏是以溶孔、溶洞和裂缝为主要储集空间, 裂缝为主要渗流通道, 具有埋藏深、非均质性强的特点。前期通过对生产油井动态数据的研究发现, 在生产过程中由于地层能量下降等因素, 出现地层垮塌、裂缝闭合等现象, 导致油井生产后期出现供液不足, 并研究出了能量指示曲线来指导生产, 取得一定效果。目前塔河油田存在复杂的油水关系以及部分油井井筒异常等情况, 前期的能量指示曲线具有一定的局限性。该文对目前的能量指示曲线进行进一步细化研究, 将其划分为不同类型, 针对不同曲线类型分析了其对应油藏地质原因, 通过将其与含水率、注水以及将压力转变为载荷等方式, 建立了能量指示曲线叠合图版, 可指导更多的油藏类型生产。

关键词: 能量指示曲线; 叠合图版; 碳酸盐岩油藏; 塔河油田

中图分类号: TE344

文献标识码: A

Superimposed plates of energy curves to enhance oil recovery of carbonate reservoirs

Chen Mingren, Jiang Lin, Li Chenggang, Cheng Lu, Liu Cong, Lu Haitao

(No.3 Oil Production Plant, SINOPEC Northwest Company, Luntai, Xinjiang 841604, China)

Abstract: Carbonate reservoirs in the Tahe oil field are composed of dissolved pores, karst caves and fractures, among which the fractures are the main seepage pathways. The reservoirs are deep buried and usually have a strong heterogeneity. The study of pre-production and well performance data indicated that, formations collapsed and cracks closed in production process due to the decrease of formation energy, resulting in insufficient liquid supply during post-oil production. Therefore, we applied energy indicating curves to guide production, and made some achievements. The Tahe wells have a complicated oil and water contact, and some well bores have abnormal conditions, which are restrictive for energy indicating curves. We divided the curves to several different types, and analyzed their corresponding reservoir geological reasons. We also considered water content and water flooding, and converted pressure to load, and finally made a superimposed plate of energy curves to guide production.

Key words: energy indicating curve; superimposed plate; carbonate reservoir; Tahe oil field

1 研究概况

塔河油田位于塔里木盆地北部沙雅隆起中段阿克库勒凸起西南部, 从构造上呈现北东高、南西低的构造格局, 油藏埋藏深, 是中国第一个以奥陶系为主产层的大油田^[1]。由于奥陶系油藏储集体非均质性强, 油藏储集体具有孔、缝、洞并存等现象, 储集体空间尺度变化大, 且分布不连续等特征^[2-6]。由于油藏埋藏深, 运用目前的勘探手段, 无法精细刻画储集体内部结构, 从而制约了油藏的高效开发。

塔河油田开发至今, 目前取得的认识是储集体

及油气富集区域主要靠近深大断裂或水系, 同时构造高部位更有利于油气富集。但随着多年的开发, 有利部位井控程度变高, 且油井弹性能量日趋衰竭, 在强能量区域, 大多数油井已经进入了底水驱阶段; 而在弱能量区域, 也已经开展了多轮次注水替油。前期由于对储集体识别方法及手段的欠缺, 开发遇到很多困难。近几年随着能量指示曲线的提出, 对储集体内部空间变化取得了较大认识, 能对部分油井, 特别是能量较弱区域的储集体内部变化做到精准判断, 并通过有效手段, 实现油井有效或高效开发。

塔河油田通过多年开发发现, 地层存在裂缝闭

合或垮塌现象,在较大的生产压差、地层能量下降的过程或修井作业、油井生产过程中,由于压差变化等因素,地层出现垮塌或裂缝闭合现象。其中裂缝闭合现象主要由于裂缝表面广泛发育的微凸体,支撑和影响着裂缝的开启和闭合状态,在油气开采过程中,随着裂缝内部流体压力逐渐降低,微凸体承受的有效载荷将逐渐增加,导致其变形增大,直至被压碎,即裂缝发生闭合。随着油气藏内油气不断的采出,地层流体压力随之下降,作用于裂缝及基质上的有效作用力增加,导致裂缝的导流能力下降。当油气藏压力低于裂缝闭合临界流体压力时,裂缝发生不可恢复的塑性闭合^[7-8]。垮塌或裂缝闭合的油井会导致地层供液能力变差的假象,为开发造成很大困扰。

针对塔河油田奥陶系油藏这类特殊的油藏类型及其在生产过程中出现的地层垮塌、裂缝闭合的现象,前期研究人员曾提出了碳酸盐岩油藏能量指示曲线,并将其划分为“7”字形、大“S”型、小“S”型等 3 种类型,并结合不同类型的能量指示曲线,对油井实现精准“把脉”,使得不少油井恢复正常产能。

2 能量指示曲线介绍

目前,我们对油井能量强弱的判断主要通过流压及液面数据体现,研究人员在李传亮^[9]建立的油藏生产指示曲线基础上,结合碳酸盐岩油藏开发的特点,建立累产液与流压/液面的关系曲线,即能量指示曲线,用来反映开采过程中油井能量变化情况(图 1)。能量指示曲线直接反映了油井地层能量随累产的变化情况,不同的储集体类型、泄油半径、裂缝导流能力,形成差异化的能量指示曲线。常见的能量指示曲线由 3 段组成(图 1):(1) a 段稳定阶段,投产初期的近似直线段部分,代表天然

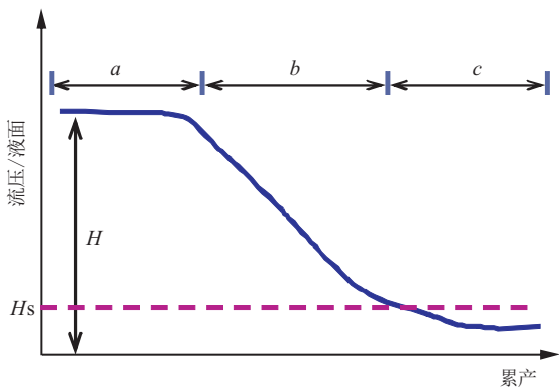


图 1 能量指示曲线

Fig.1 Energy indicating curve

能量强弱;(2) b 段指的是能量下降阶段,是指当油藏的开采速度大于能量的补给速度,有效泄油半径内的能量不足以补充油藏的开采速度时,曲线斜率逐渐增大;(3) c 段指的是低液量(能量)阶段,随着油气的不断采出,储层内流体压力将逐渐降低,作用在裂缝及基质岩块上的有效应力则随之增加,裂缝的导流能力就越差,油藏开发处于低液量阶段,生产较稳定,表明油藏开采速度与能量补给速度达到了一种平衡。

3 能量指示曲线叠合图版的应用

前期能量指示曲线对部分类型油藏,特别是弱能量井区的油井适用性较高,但强底水或稠油井区适用性较差。塔河油田碳酸盐岩油藏油水关系复杂,且部分油井井筒因素也制约了该能量指示曲线的应用。如机抽生产油井带封隔器生产,液面不能反映油井真实能力,这些影响因素制约了原有的能量指示曲线的作用范围。本文对原有的能量指示曲线进行了改进,将它与含水、注水、载荷进行叠合,形成能量指示曲线叠合图版,使得曲线试用范围得到了推广,可指导更多类型的油藏生产。

3.1 “能量-含水叠合型”指示曲线

由于开发过程中存在部分水体发育的油井,针对此类油井,根据含水上升类型以及能量变化情况,提出了 3 类曲线图版(图 2)。

(1)“连通水体作用型”指示曲线(图 2a)显示,油藏能量持续下降,含水不断上升,这种类型油井水体能量相对一般,含水上升主要由于油井开采油藏能量不断衰竭导致。此类油井前期应先以控制压差为手段,控制底水锥进,达到释放更多逐渐趋弱的油藏能量的目的。

(2)“水体快速水侵型”指示曲线(图 2b)显示,油藏能量在衰竭到一定程度后,底水启动,并快速补充能量。该类型油井底水能量相对强,水体快速锥进将导致原本弱势的油体能量被屏蔽而无法动用。此类油藏通过减小压差只能短时间内延缓水淹时间,不能改变最终水淹结果,应提前实施注气等手段,提高油藏能量,保压开采。

(3)“水体逐步抬升型”指示曲线(图 2c)表明,此类型油藏能量先下降,水体补充后,能量与水体逐阶抬升。此类油藏前期油水能量差异不大,随着油藏能量的减弱,水体将储集体逐套水淹,水体呈现类似于缓慢抬升的“台阶上升”,但该含水上升类型,对油藏的水淹程度更高,后期治理难度更大。目前只能通过前期控制压差生产,后期高含水

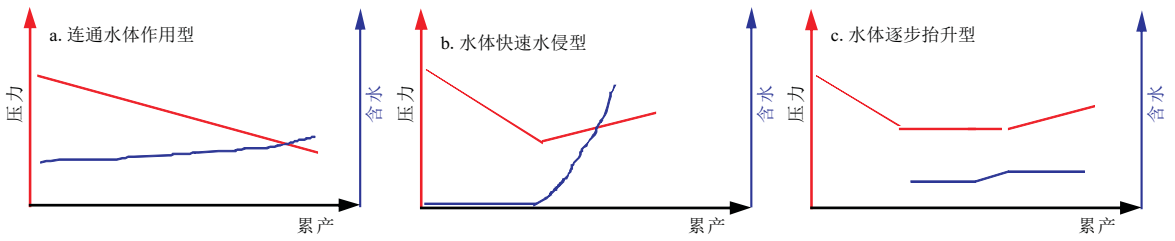


图2 能量-含水叠合型指示曲线类型

Fig.2 Types of superimposed indicating curves of energy and water content

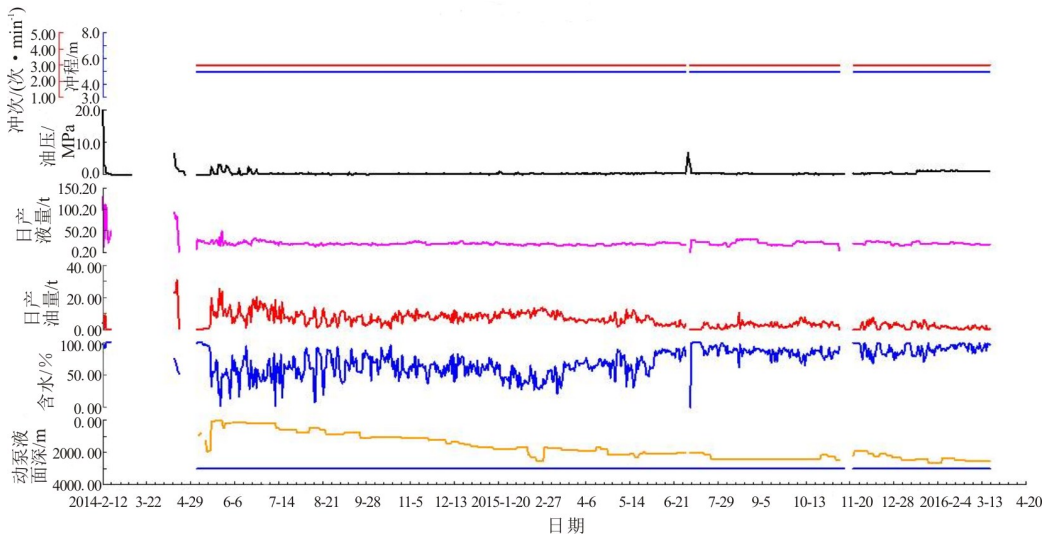


图3 A井日度生产曲线

Fig.3 Daily production curves of well A

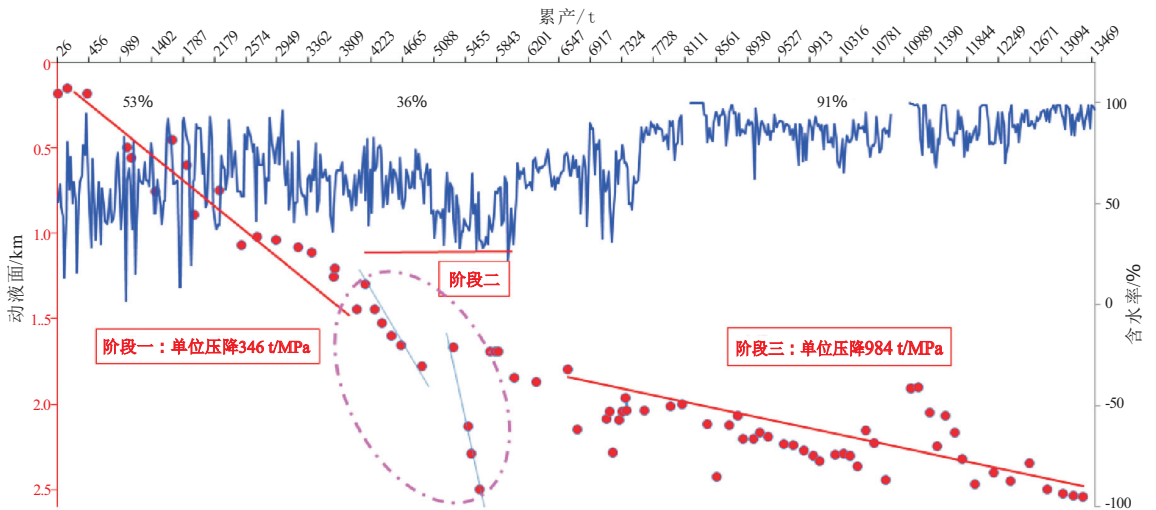


图4 A井“能量-含水叠合型”指示曲线

Fig.4 Superimposed indicating curves of energy and water content in well A

后,通过放大生产压差动用弱勢通道剩余油的目的。

“能量-含水叠合型”指示曲线应用实例:A 井生产过程中含水呈台阶上升(图3),通过该井“能量-含水叠合型”指示曲线(图4)可看出,在阶段二生产压差放大,远端储集体得到动用,含水下降,取得一定增油效果。

3.2 “能量-注水叠合型”指示曲线

随着开发的不断进行,井网密度不断提高,以及井间压差的不断变化,很多井组均建立了一定程度的连通性。单井挖潜潜力随着采出程度的增加,挖潜潜力不断变小,而井间剩余油相比于单井井周剩余油,储量更大,挖潜空间更广。因此如何高效

的挖潜井间剩余油,是接下来塔河油田提高采收率的主要研究方向。下面笔者探讨 3 种类型的“能量-注水叠合”指示曲线图版的含义。

(1)“动用井间储量型”指示曲线(图 5a)。此类油藏原先为相对封闭的油藏,生产过程中能量下降斜率为 K_1 ,注水井通过注水,并使得受效井能量得到补充,在停注期间能量下降的斜率为 K_3 ,且 $K_3 > K_1$,说明动用了新储集体。为了保证受效井能够持续稳定生产,一般将注水排量调整为 $K \approx 1$ 的水准,而该注水排量在一定时间内可以保证油井生产的同时,降低水窜风险,是这一阶段最优注水量。

(2)“注水驱替型”指示曲线(图 5b)。该类油藏注水能增大 K 值,在一定范围内,注水排量加大只能增大 K 值,不能扭转 K 值,即 K 值不能由负转正,这反映区域能量不断减弱的一个过程,但过大的注水排量容易导致因为缺少有效置换时间,水体快速水窜。该类型油藏目前较好的手段是,注水期

间受效井关井,使得油水有充分置换时间,即单元注水替油。

(3)“优势连通型”指示曲线(图 5c)。该曲线反映注水井即使较小排量注水,也能使得受效井能量上升,大排量注水上升速度越快。该类曲线表明,井间连通响应明显,但同时表明注水井与受效井之间存在优势通道,该通道具有易水窜的特点。这种类型的油藏应提前做好调驱引工作,避免水窜。

“能量-注水叠合型”指示曲线应用实例:B-C 井组,从静态上具有一定连片性显示(图 6),但从 B 井日度生产曲线(图 7)上分析,很难发现供液能力有明显改变。运用“能量-注水叠合型”指示曲线(图 8),能清楚地看到在 C 井注水期间,B 井虽能量仍呈下降趋势,但斜率 K_1 明显较 K 值大,即斜率变缓,在 C 井停注后斜率又回到了 K 值,这明确了该井组的连通性,为接下来的水驱开发及调整提供有效依据。

“能量-注水叠合型”指示曲线,将单元注水井与目标受效井的相关参数放在同一图表中,这起到了放大井间响应的作用。这也使得一些响应不明确的井组能够在放大镜下明确,并为后期调整提供依据。

3.3 “载荷-注水叠合型”型能量指示曲线

对机抽井来说,能量指示曲线需要的关键参数是液面,但目前塔河油田以下几种类型的油井并不适用。一种是稠油井,因为需要掺稀生产,泡沫段的存在使得监测到的动液面并不能很好反映地层真实情况;另一种是带封隔器的机抽井,该井的套管液体并未与目的层连通,因此无法反映地层真实供液情况。笔者因此提出对此类油井,将交变载荷

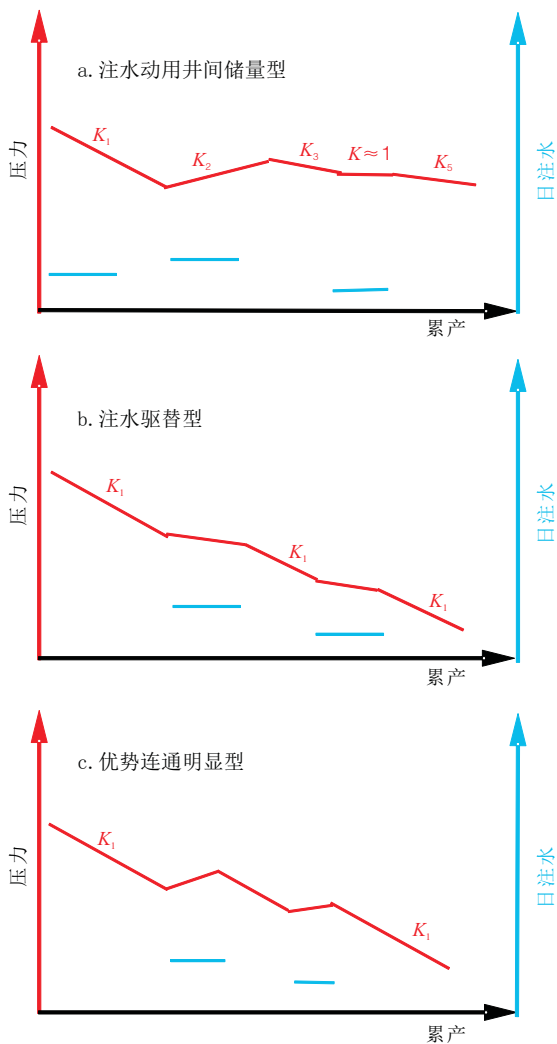


图 5 能量-注水叠合型指示曲线类型

Fig.5 Types of superimposed indicating curves of energy and water flooding

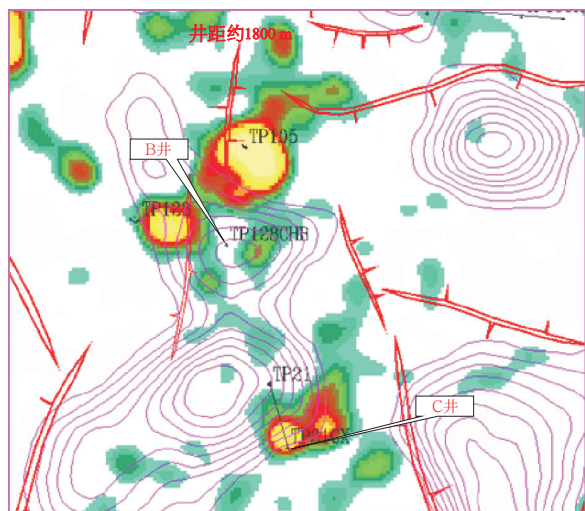


图 6 B-C 井组 0~40 ms 振幅变化率

Fig.6 0~40 ms amplitude change rate of well group B-C

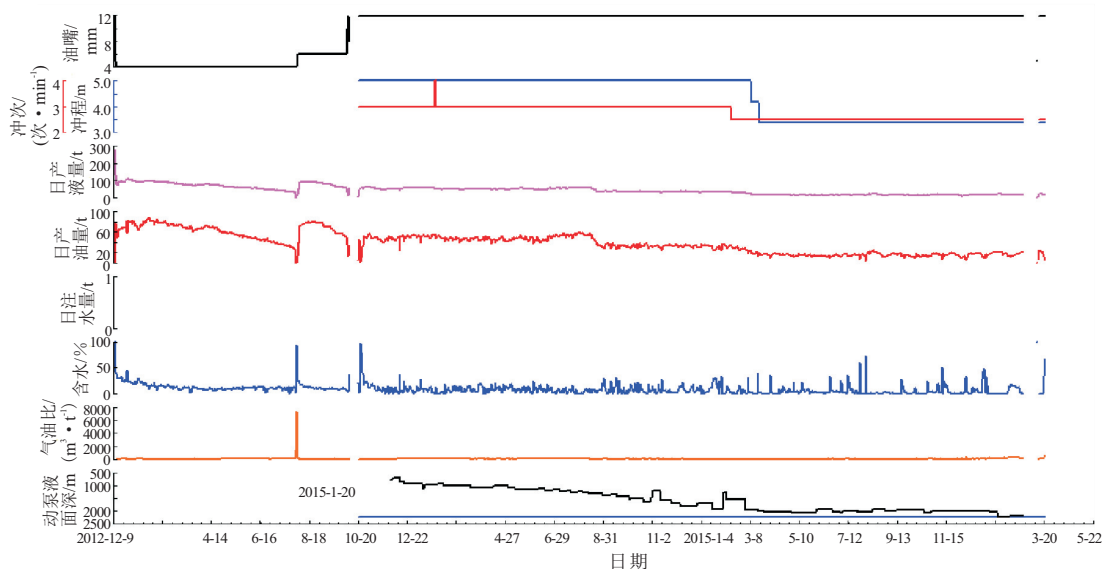


图7 B井日度生产曲线

Fig.7 Daily production curves of well BHT7

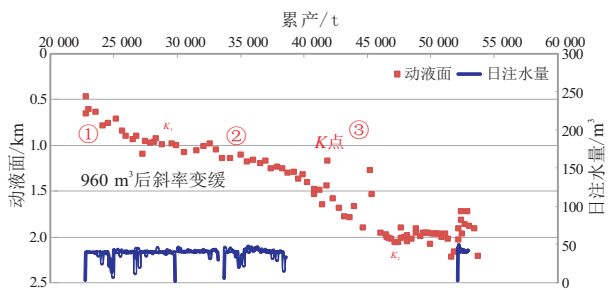


图8 B井区“能量-注水叠合型”指示曲线

Fig.8 Superimposed indicating curves of energy and water flooding in well B

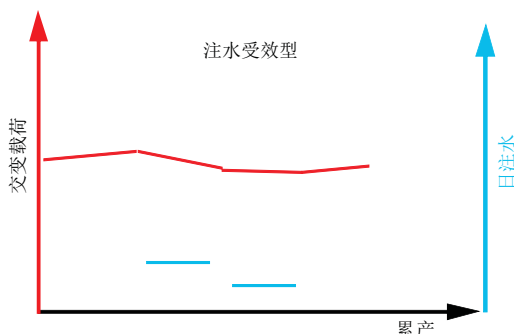


图9 载荷-注水叠合型指示曲线

Fig.9 Superimposed indicating curves of load and water flooding

替代液面,这就能定性地反映地层能量变化情况,再将其与注水曲线叠加,就能用来判断该类型井的连通关系。

交变载荷计算公式: $\Delta P = P_{max} - P_{min} = (W_r + 7.693R^2L\rho \times 10^{-6})(1 + sn^2/1790) - W_r'$, 式中: W_r 、 W_r' 分别为上、下冲程中作用在悬点上的抽油杆柱载荷; L 为液面深度; ρ 为井筒液密度; s 为冲程; n 为冲次。

如图9显示,不注水前油井供液能力变差,交变载荷增大,大排量注水受效后,油井交变载荷变小,反映地层供液能力变化;优化注水量后,交变载荷走平,反映地层供液能力稳定;停注后交变载荷增大,供液能力变差。注水井与受效井间通过载荷的分析,能明确井间连通性,指导后期水驱开发。

4 结论

(1) 利用流压/液面/交变载荷-注水-累产之间关系,提出了新型的能量指示曲线图版,作为油井生产能量评价的新方式。

(2) 能量指示曲线叠合图版,由原来的单井分析转向了井组联动分析。

(3) “能量-含水叠合型”指示曲线图版,对不同含水上层类型以及能量变化类型进行探讨,为后期开发提供思路;“能量-注水叠合型”指示曲线图版,有利于分析井组动态响应情况,为井组合理开发提供依据;“载荷-注水叠合型”能量指示曲线图版,对稠油井区或者井筒液面失真的油井,进行井组联动开发提供了可能。

参考文献:

[1] 易斌,崔文彬,鲁新便,等.塔河油田碳酸盐岩缝洞型储集体动态连通性分析[J].新疆石油地质,2011,32(5):469-472.
 [2] 张抗.塔河油田发现及其地质意义[J].石油与天然气地质,1999,20(2):120-124.
 [3] 鲁新便.岩溶缝洞型碳酸盐岩储集层的非均质性研究[J].新疆石油地质,2003,24(4):360-362.

考虑到 X25 井区气井停喷原因主要是气井积液造成的,因此焖井后的开井工作制度必须满足气井产气速度高于气井携液临界流速。在这里采用西南石油大学李闯等人的椭球型模型计算气井携液临界流量,再根据气体嘴流的等熵原理预测嘴流动态,即产量与节流压降的关系,通过对比选择合理的工作制度,即满足气井产气速度高于气井携液临界速度的工作制度开井生产^[3]。

4 现场应用效果

根据注水采气选井原则,优选了 X25-1 井进行注水提高天然气采收率试验。该井 2013 年 4 月投入试采,2015 年 4 月停喷,累产气 $1\ 596 \times 10^4 \text{ m}^3$,单井天然气采出程度为 48.3%。2015 年 8 月进行第一轮注水采气,周期注水量 $6\ 000 \text{ m}^3$ 。2015 年 9 月开井,截至 2015 年 12 月,累计增气 $200 \times 10^4 \text{ m}^3$,天然气采出程度提升至 54.4%,提高天然气采收率效果明显。截至 2015 年底,X25 井区共开展注水采气 2 井次,累计增气 $396 \times 10^4 \text{ m}^3$,目前注水采气的增气量仍保持在 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的水平生产。该井区 2 井次注水采气试验累计投入 3.7 万元,运行成本低,增气效果好,经济效益高,2016 年注水采气将在 X25 井区及地质特征与生产特征相类似的碳酸盐岩气井全面推广实施。

5 结论

(1) 低压气井积液是凝析气藏气井停喷的主要原因,缝洞型碳酸盐岩的储集空间及流动通道渗透率高,注水采气造成的水锁损害小。注水采气的

机理主要是通过注水补充亏空能量,压缩定容体内天然气体积,使其恢复自喷能力。

(2) 注水采气应选择失去自喷能力后无法通过机采手段继续生产的定容体气井,注水时机定在气井失去自喷能力时,周期注水量为地层亏空体积的五分之一,注水速度在满足合理注水压力与现场供水条件下以最大排量注入。注水后焖井时间根据储集体类型分为 3 类:溶洞型焖井时间 2~3 天,裂缝—溶洞型 5~7 天,裂缝—孔洞型 10~15 天。开井工作制度必须满足气井产气速度高于气井携液临界流速。

(3) 现场试验结果表明,缝洞型凝析气藏通过注水采气提高天然气采收率效果显著,具有在同类型气藏推广应用的价值。

参考文献:

- [1] 李海军,张炜.塔河油田单井注水吞吐实践与认识[M].中国石化出版社,2005:15-70.
- [2] 罗娟,陈小凡,涂兴万,等.塔河缝洞型油藏单井注水替油机理研究[J].石油地质与工程,2007,21(2):52-54.
- [3] 李士伦.天然气工程[M].第二版.北京:石油工业出版社,2006:109-245.
- [4] 姬彦庆,黄平珍,邓刚,等.气藏水锁损害机理研究[J].内蒙古石油化工,2002,9(27):253-254.
- [5] 邓又文.塔中 1 号凝析气藏提高凝析油采收率机理研究[D].四川:西南石油大学,2013:1-95.
- [6] 荣元帅.塔河油田缝洞型油藏注水替油技术研究[J].石油钻探技术,2008,36(4):57-60.
- [7] 李保振,李相方,姚约东,等.注水开发小型断块凝析气藏的方法及适应性[J].天然气工业,2009,29(1):92-94.

(编辑 韩 或)

(上接第 43 页)

- [4] 鲁新便.塔里木盆地塔河油田奥陶系碳酸盐岩油藏开发地质研究中的若干问题[J].石油实验地质,2003,25(5):508-215.
- [5] 宋美虹.塔河油田 4 区奥陶系碳酸盐岩潜山油藏储层预测[J].油气地质与采收率,2005,12(4):23-25.
- [6] 闫相宾,李铁军,张涛,等.塔中与塔河地区奥陶系岩溶储层形成条件的差异[J].石油与天然气地质,2005,26(2):201-207.
- [7] 修乃岭,熊伟,高树生,等.缝洞型碳酸盐岩油藏水动力学模拟研究[J].特种油气藏,2007,14(5):49-51.
- [8] 刘向君,梁利喜,成竹,等.裂缝闭合临界流体压力对油气田开发的影响[J].天然气工业,2005,25(10):89-90.
- [9] 李传亮.油藏生产指示曲线[J].新疆石油地质,2001,22(4):333-334.

(编辑 徐文明)