

不同基质-裂缝耦合模式下致密油生产动态特征

魏漪¹,徐婷¹,钟敏^{2,3},秦学杰¹

(1.中国石化石油勘探开发研究院,北京 100083; 2.中国矿业大学(北京)管理学院,北京 100083; 3.中国石油勘探开发研究院,北京 100083)

摘要:针对致密油生产动态特征复杂、单井产能差异大的特点,基于不同孔缝介质并存的致密油储层特征,研究多重介质耦合下的流动机理,结合地震解释、测井分析和岩心薄片等静态资料,基于裂缝类型、尺度和发育程度的变化,将致密油储层储渗模式划分为多级裂缝-孔隙型、大裂缝-孔隙型、微裂缝-孔隙型和孔隙型4种类型,不同储渗模式具有不同的孔缝介质组合类型,表现出不同的渗流特征和产能特征。利用油藏工程和数值模拟方法,结合动、静态资料,揭示出各类储渗模式下油井的生产动态特征。对比分析得出,只有当不同尺度的大裂缝和微裂缝组成复杂缝网时,储层出油能力最强。针对不同储渗模式,应采用合适的储层改造方式,使天然裂缝与人工压裂裂缝形成缝网,有效沟通基质,在增加初期产量和产量规模的同时,增大基质的动用程度,提高致密油采出程度。

关键词:致密油 裂缝 基质孔隙 储渗模式 动态特征

中图分类号:TE331.1

文献标识码:A

Dynamic characteristics under different matrix-fracture coupling modes in tight oil reservoirs

WEI Yi¹, XU Ting¹, ZHONG Min^{2,3}, QIN Xuejie¹

(1. *Petroleum Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing City, 100083, China*; 2. *School of Management, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing City, 100083, China*; 3. *PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing City, 100083, China*)

Abstract: According to the complex production performance and great productivity difference of individual well in the tight oil reservoir, the flow mechanism under coupling of multiple media was researched based on the reservoir characteristic of the presence of different types of pore and natural fracture. The storage-percolation modes of the tight oil reservoir were divided into four types based on various fracture types, scales and development degree combined with static data of seismic interpretation, well logging analysis and core slice, which are multi-scale fracture-pore type, macro-fracture-pore type, micro-fracture-pore type and pore type. Different storage-percolation modes have various pore-fracture coupling modes with various flow characteristics and productivity characteristics. By means of reservoir engineering and numerical simulation, the performance characteristics under different storage-percolation modes were analyzed based on the static and dynamic data. The comparison of the results shows that the well productivity would be the highest when large and micro fractures with different scales form the complex fracture network. Suitable reservoir reformation mode should be adopted according to various storage-percolation modes. Natural fractures and artificial fractures may form fracture network and the matrix may be connected effectively. The producing degree of the matrix and the recovery degree of the tight oil reservoir may be increased when the initial production and production scale were increased.

Key words: tight oil; fracture; matrix pores; storage-percolation modes; dynamic characteristics

致密油是烃源岩中经二次运移进入致密储层的石油,是赋存于生油岩或与其直接接触的覆压基

收稿日期:2017-12-03。

作者简介:魏漪(1980—),女,湖北潜江人,工程师,博士,从事油气田开发工程方面的研究。联系电话:15210167993, E-mail: weiyi.syky@sinopec.com。

基金项目:国家科技重大专项“中西部盆地页岩油勘探开发目标评价”(2016ZX05049-006)。

质渗透率小于或等于0.1 mD的致密碎屑岩、碳酸盐岩等岩石中的石油聚集^[1-9]。而2014年,国家能源局发布的致密油地质评价方法中标定,致密油的界定标准为覆压基质渗透率小于或等于0.2 mD^[10]。在开发过程中,单井一般无自然产能或自然产能低于工业油流下限^[2-3],经济有效开发难度大。

致密油通常大面积连片分布,但非均质性强^[5],储层物性差,单井产能差异很大,其生产动态规律与储层特征有着密切关系。致密油储层储集空间复杂,以微-纳米级孔喉为主,渗流能力差,同时发育多尺度天然裂缝,不同尺度裂缝的渗流特性不同,发挥的作用也有差异。因此,在整体致密、低丰度、大面积含油的背景下,致密油单井产能对天然裂缝的依赖程度高,自然产能条件下,裂缝是致密油实现高产的必要条件。

在致密油开发过程中,基质孔隙和裂缝分别发挥着不同的作用,并且随着裂缝尺度和发育程度的不同,其对产能的贡献也不同。因此,基质孔隙和裂缝的不同耦合模式对产能影响很大。为此,笔者结合地震解释、测井分析和岩心薄片等静态资料,基于基质-裂缝耦合类型的认识,建立致密油储层的储渗模式,依据生产动态资料,利用油藏工程和数值模拟方法,对比分析各类储渗模式下油井的生产动态特征,以期为有利开发区优选、井位部署以及开发方式的制定提供依据,达到实现致密油规模有效动用的目的。

1 多重介质耦合的流动机理

致密油储层的基质岩块主要发育纳米级孔隙,其次含有少量亚微米级孔隙,而微米级孔隙基本可以忽略。但是,从渗透率贡献率来看,纳米级孔隙对渗透率贡献很小,对渗透率起主要贡献作用的是所占比例较小的亚微米级孔隙^[11-12]。

基质具有较好的储集性,但是渗流能力差,其微-纳米级孔隙中的流体流动距离短,主要是通过裂缝流向井筒。因此,在天然能量开发方式下,致密油产能很大程度上依赖裂缝的发育程度。除了发育微-纳米级孔隙,致密油储层同时发育开度为毫米级的宏观裂缝和微-纳米级的微裂缝等不同尺度裂缝系统。综合利用露头及岩心观测、薄片及扫描电镜、测井及地震识别等手段,揭示致密油储层裂缝类型。致密油储层裂缝主要可分为2大类:
①大尺度裂缝,包括开度为毫米级的宏观裂缝和开度大于100 μm的小裂缝,前者主要为在露头上可观

测、地震可识别的区域性分布的构造缝,以及在测井曲线上可识别的局部发育的构造缝或溶蚀缝;后者为在岩心上和成像测井图上可识别的规模较小的构造缝、溶蚀缝和规模较大的成岩缝,如层理缝和缝合缝等。
②微尺度裂缝,包括开度为1~100 μm的微米级裂缝和开度小于1 μm的纳米级裂缝,前者为在铸体薄片、扫描电镜等条件下可识别的构造分支缝、成岩缝,如层间缝和缝合缝等,后者为在高放大倍数的扫描电镜下可观测的成岩缝,如解理缝和晶间缝等。

致密油储层发育基质孔隙和裂缝两大流动介质,不同介质具有不同的尺度类型,各类尺度空间中的主要作用力和流动状态各不相同,相应的各类介质的流动规律和渗流机理也存在较大差异。在致密油开发过程中,其各自发挥的作用也不同^[13-15]。

大尺度裂缝导流能力强,流体渗流所受惯性力大于粘滞力,流速较高,多表现为高速非线性渗流或者拟线性渗流特征,同时还具有一定的应力敏感性。大尺度裂缝导流能力强,延伸距离长、控制范围大,在生产过程中,其发育程度直接影响着初期产量的大小以及产量规模。

微尺度裂缝渗流能力较弱,流体渗流速度较低,多表现为拟线性渗流或者低速非线性渗流特征,且具有一定应力敏感性。微尺度裂缝渗流能力较弱,延伸距离较短,控制范围有限,在生产过程中,主要起着沟通基质与大尺度裂缝的作用,微尺度裂缝发育的程度决定了基质岩块的动用程度和大小。

基质孔隙介质,即小孔隙、微孔隙和纳米级孔隙,其渗透性差,流速很低,表现为低速非线性渗流特征,且具有较强的应力敏感性。孔隙介质的储集性较好,是控制储量的基础,主要发挥补给作用,但其流体流动距离短,需要依靠裂缝沟通,扩大基质动用范围。裂缝本身的储集性较差,主要起到渗流通道的作用,基质孔隙中的流体通过裂缝流向井筒(图1)。在生产过程中,基质孔隙主要影响中、后期

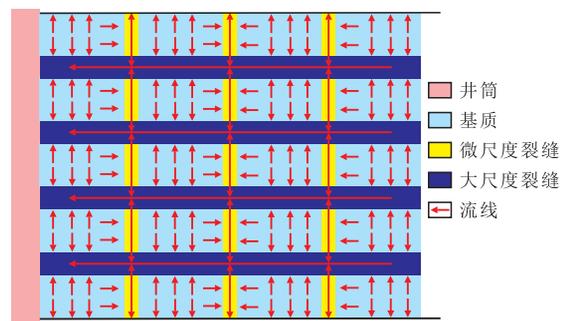


图1 多重介质中流体渗流示意
Fig.1 Fluid seepage diagram of multiple media

生产阶段的产量水平。

2 储渗模式

致密油储层存在多种尺度裂缝和微—纳米级孔隙,孔隙与裂缝的不同耦合模式对产能影响很大。不同类型的孔缝介质组合具有不同的渗流特征和流动机理,表现出不同的产能特征。

裂缝类型、尺度和发育程度决定了储渗模式的变化,结合地震解释、测井分析和岩心薄片等静态资料,基于对微观基质与裂缝耦合模式的认识,将致密油储层划分为多级裂缝-孔隙型、大裂缝-孔隙型、微裂缝-孔隙型和孔隙型4种储渗模式(表1)。

多级裂缝-孔隙型 该类储层发育多种尺度、不同类型裂缝,且大尺度裂缝与微尺度裂缝形成复杂缝网,单井控制范围大,渗流能力强,且微尺度裂

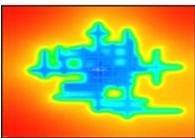
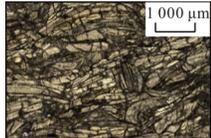
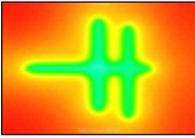
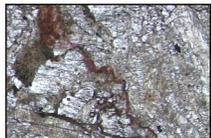
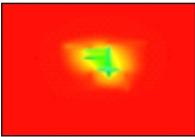
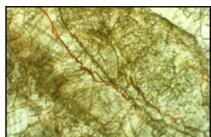
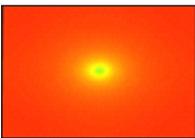
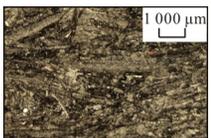
缝发育,可有效沟通大尺度裂缝与基质,基质岩块动用程度高,沟通面积大,基质供给原油充足。

大裂缝-孔隙型 该类储层中以大尺度裂缝为主,单井控制范围较大,渗流能力强,同时发育一定的微尺度裂缝,但数量较少,未形成良好的缝网,无法与基质有效沟通,基质动用程度较低,即基质供给速度慢。

微裂缝-孔隙型 该类储层发育微尺度裂缝,虽控制范围较小、渗流能力较弱,但其可较好地沟通基质,基质岩块动用程度高,基质供给原油充足。

孔隙型 该类储层裂缝基本不发育,主要流动介质是基质孔隙。致密油储层主要发育纳米级孔隙,但对渗透率起主要贡献作用的是占比较小亚微米—微米级孔隙。其基质物性差,渗流能力弱。压力波传播慢,单井控制范围很小,基质岩块动用程度低,供给缓慢,但基质动用程度均衡。

表1 致密油储层的4种储渗模式对比
Table1 Comparison of four storage-percolation modes in the tight oil reservoir

| 储渗模式 | 介质组成 | 渗流通道 | 渗流能力 | 控制范围 | 微裂缝发育程度 | 基质动用程度 |
|----------|------------------|-------------|------|---|---|--------|
| 多级裂缝-孔隙型 | 大尺度裂缝、微尺度裂缝和基质孔隙 | 大尺度裂缝和微尺度裂缝 | 强 |  |  | 高 |
| 大裂缝-孔隙型 | 大尺度裂缝和基质孔隙 | 大尺度裂缝 | 强 |  |  | 较低 |
| 微裂缝-孔隙型 | 微尺度裂缝和基质孔隙 | 微尺度裂缝 | 较弱 |  |  | 高 |
| 孔隙型 | 基质孔隙 | 喉道 | 弱 |  |  | 低 |

3 不同储渗模式下的生产动态特征

选取四川盆地侏罗系某油藏,其大面积含油,岩性复杂,物性差,但发育多尺度天然裂缝^[16-23]。采油井以垂直井为主,采用常规完井方式,未实施压裂改造,在衰竭式开发方式下,采油井产能差异较大。该油藏开发时间较长,便于进行单井生产过程的整体分析和认识。

结合各类静态资料,将该油藏油井钻遇的储层划分为不同的储渗模式,结合生产动态资料,利用

油藏工程和数值模拟方法,对比分析各类储渗模式下油井的生产动态特征。

3.1 多级裂缝-孔隙型

在大尺度裂缝和微尺度裂缝缝网的共同作用下,油井生产动态特征整体表现为初期产量高,基质快速有效供给,高产期产量递减缓慢,且产量规模大,累积产量高,最终采出程度较高。该类储层属于产油能力最强的一类多重介质组合类型。

通过实际生产数据统计结果和数值模拟分析,该类储层的油井通常初期产量大于5 t/d,高产期年递减率小于10%/a,累积产油量大于1×10⁴ t,折算井

控半径大于500 m。

以G101井为例,分析地震解释结果发现,该井钻遇1条大尺度裂缝,该裂缝延伸距离远,并且测井解释和岩心薄片观察显示,其储层还发育局部裂缝和数量较多的微尺度裂缝。综合判断,该井钻遇的储层是由宏观裂缝和微尺度裂缝组成的复杂缝网与基质的有效组合。在生产动态上,表现为初期产量较高,产油量为15.4 t/d。基质被有效沟通,供给能力较强,且保持在合理工作制度和采油速度下生产,压力下降缓慢并长期保持在较高水平,因此,致密油储层应力敏感性对裂缝、基质孔隙渗流能力的损害程度较小,即其储层长期保持较高的渗流能力。生产近10 a,产量一直以较低的速率递减,平均年递减率仅约为9.3%/a,持续保持高产,生产10 a后的产油量仍可达6.5 t/d,10 a累积生产原油高达约4.5×10⁴ t(图2)。

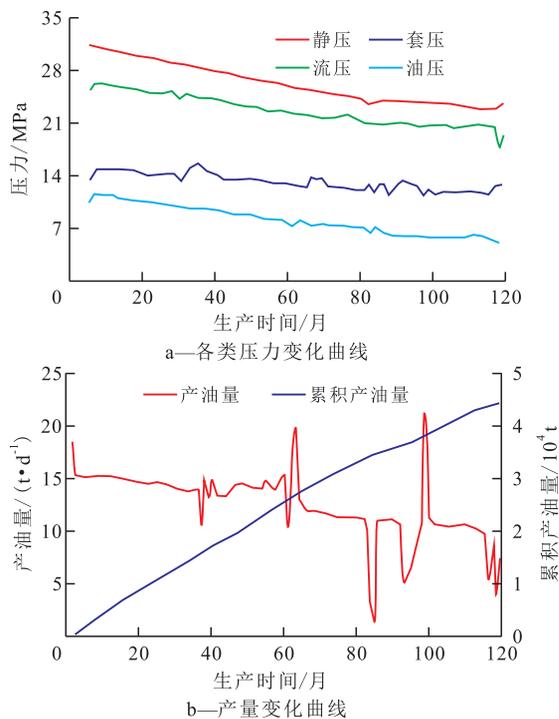


图2 G101井(多级裂缝-孔隙型)生产曲线
Fig.2 Production curve of Well G101 (multi-scale fracture-pore type)

针对致密油储层多尺度裂缝特征,建立了不同尺度裂缝的数值模拟预处理方法,即大尺度裂缝采用长度、高度、方位以及导流能力等效原则,微尺度裂缝采用密度、与储层总接触面积以及导流能力等效原则。通过该方法,模拟得到G101井储层的裂缝分布。针对G101井进行数值模拟,计算得到G101井波及范围为6.1 km²,将该范围折算成径向渗流区域,其渗流半径为1 394 m;该井控制储量为45×10⁴ t,生产10 a的采出程度为10%。

3.2 大裂缝-孔隙型

在大尺度裂缝发育、微尺度裂缝欠发育的前提下,其油井生产动态特征整体表现为初期产量高,基质供给慢,高产期递减快,且后期稳产阶段产量低,最终采出程度略低。

实际生产数据统计结果和数值模拟分析结果表明,该类储层的油井通常初期产量大于5 t/d,高产期年递减率大于30%/a,累积产油量大于0.5×10⁴ t,折算井控半径大于300 m。

以J61井为例,通过岩心观察、测井解释资料发现,该井发育大尺度构造缝,初期产量高,产油量为20.6 t/d;岩心薄片观察结果显示,局部发育构造微裂缝、溶蚀缝以及较小尺度的壳内破裂缝和晶间缝,但数量较少,相互沟通较差,基质动用程度较低,产量快速下降至0.72 t/d,年递减率达36.7%/a。该井共生产16 a,初期高产阶段仅有5 a,累积产油量为1.79×10⁴ t。后期在应力敏感性作用下,压力快速下降,导致裂缝渗流能力大幅度减弱,且通过室内实验和现场实践证实,应力敏感性造成的渗透率损害的恢复程度较小,当压力低至一定值后,储层渗流能力难以恢复。因此,后期阶段基质可动用性较差,产量很低,关井前产油量仅为0.12 t/d,后期低产稳产阶段维持了11 a左右。该井16 a累积生产原油2.15×10⁴ t,其中,初期阶段产量占83.2%(图3)。

通过数值模拟计算得到J61井波及范围为2.12

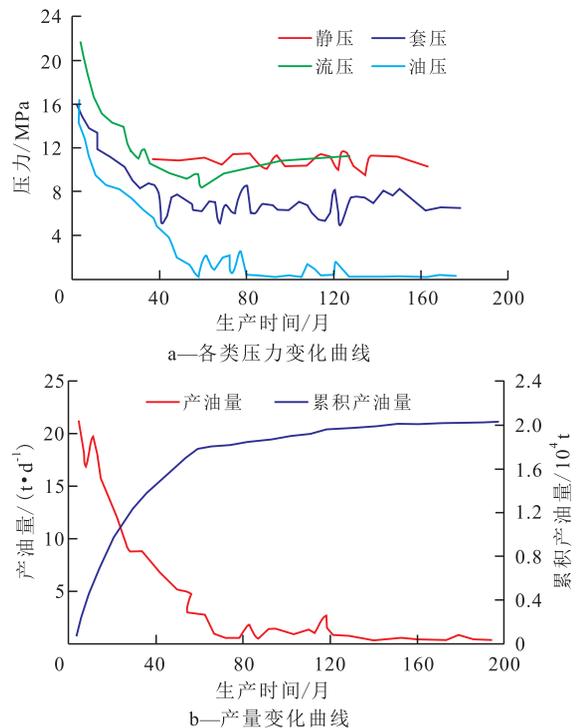


图3 J61井(大裂缝-孔隙型)生产曲线
Fig.3 Production curve of Well J61 (macro-fracture-pore type)

km²,将该范围折算成径向渗流区域,其渗流半径为822.8 m,该井控制储量为31.8×10⁴ t,最终采出程度为6.76%。

3.3 微裂缝-孔隙型

在微尺度裂缝发育的前提下,其油井生产动态特征整体表现为初期产量较低、递减较慢、初期相对高产阶段持续时间较长,但控制范围较小,累积产油量较低;基于微尺度裂缝沟通作用,基质岩块动用程度较高,最终采出程度略高。

实际生产数据统计结果和数值模拟分析结果表明,该类储层的油井通常初期产量为2~5 t/d,高产期年递减率小于20%/a,累积产油量为0.1×10⁴~0.5×10⁴ t,折算井控半径为50~300 m。

以J5井为例,综合测井解释和岩心薄片观察结果,认为该井储层发育构造微裂缝、晶间缝等微裂缝,其渗流能力较弱,初期产量较低,产油量为1.31 t/d;但微裂缝较多,相互沟通较好,基质岩块动用程度较高,基质供给充足,初期阶段在合理工作制度 and 采油速度下,产量递减较慢,年递减率约为17%/a。该井共生产13 a,其中初期高产阶段维持了6 a,产油量降至0.35 t/d,6 a累积产油量为0.14×10⁴ t(图4)。后期地层能量不足,储层渗流能力较差,基质可动用性较差,长期稳定在很低产量,关井前产油量仅为0.017 t/d,后期低产稳产阶段维持了7 a左右。该井13 a累积生产原油0.19×10⁴ t,其中,初期阶段产量占73.7%(图4)。

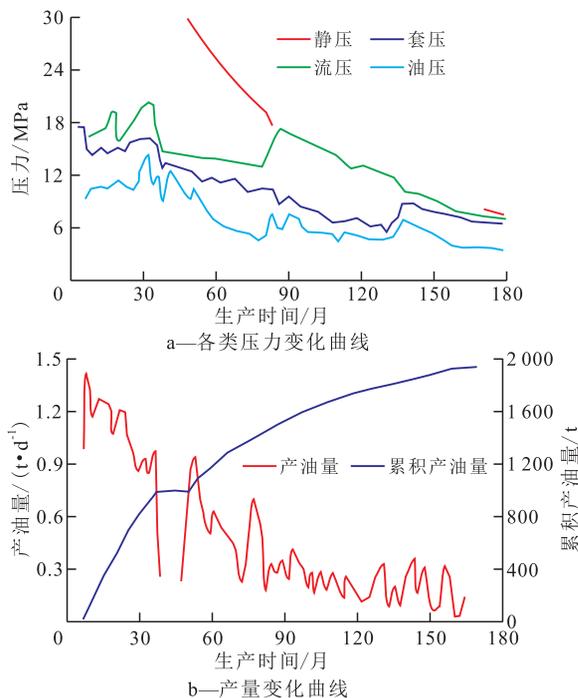


图4 J5井(微裂缝-孔隙型)生产曲线
Fig.4 Production curve of Well J5 (micro-fracture-pore type)

通过数值模拟计算得到J5井波及范围为0.071 km²,将该范围折算成径向渗流区域,其渗流半径为150 m,该井控制储量为2.1×10⁴ t,生产13 a,采出程度为9.1%。

3.4 孔隙型

在天然裂缝不发育的储层条件下,基质孔隙是主要流动介质,其油井生产动态特征整体表现为初期产量很低,但递减率小,始终保持着低产稳产;井控范围小,累积产油量和采出程度均很低。

通过实际生产数据统计和数值模拟分析,发现该类储层的油井通常初期产量小于2 t/d,年递减率小于10%/a,累积产油量小于0.1×10⁴ t,折算井控半径小于100 m。

以J64井为例,录井和荧光薄片观察显示,基质孔隙含油性较好。但无论是地震解释、测井解释,还是岩心薄片观察,天然裂缝均欠发育。因此,基质孔隙既是储集空间,也是渗流通道,而致密油储层主要以微-纳米级孔隙为主,其渗流能力很弱,基质供给缓慢。

J64井初期产量很低,产油量为0.09 t/d,采用间歇式开井、关井的生产方式,由于基质含油性较好,产量一直保持低产稳定状态,关井前产油量为0.02 t/d,共生产约18 a,累积生产原油0.011×10⁴ t(图5)。

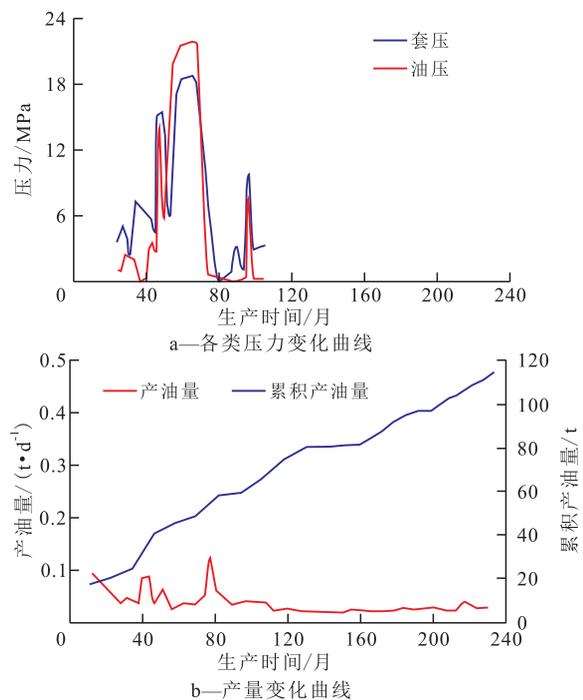


图5 J64井(孔隙型)生产曲线
Fig.5 Production curve of Well J64(pore type)

通过数值模拟计算得到J64井波及范围为0.018 km²,将该范围折算成径向渗流区域,其渗流半径为76 m,该井控制储量为0.24×10⁴ t,采出程度

为4.58%。

3.5 各类产能井生产动态对比分析

在基质与裂缝耦合条件下,致密油生产动态整体呈现初期高产、快速递减和后期低产稳产特征,不同生产阶段的渗流特点不同,基质和裂缝对产能的贡献不同。初期阶段,基质和裂缝共同贡献产能,裂缝中的原油先流向井筒,其导流能力强,初期产量高,但裂缝中储量较小,周围基质向裂缝补给较慢,导致初期阶段产量递减较快;后期阶段,主要是基质孔隙对产能的贡献,在应力敏感性作用下,裂缝趋于变形闭合,渗流能力减弱,产能贡献率变小,基质持续低速供给,产量保持长时间低产稳产。

致密油储层的不同储渗模式具有不同的基质-裂缝耦合类型,其对应的油井表现出的生产动态特征也存在一定差异。通过对比分析发现,对于发育大尺度裂缝的多级裂缝-孔隙型和大裂缝-孔隙型储层的油井,储层渗流能力强,初期产量高,单井控制范围大,产量规模大(表2,图6)。对于微裂缝发育的多级裂缝-孔隙型和微裂缝-孔隙型储层的油井,储层基质岩块被有效沟通,动用程度高,基质供给充足,相比微裂缝欠发育的大裂缝-孔隙型储层,多级裂缝-孔隙型和微裂缝-孔隙型储层的油井产量递减较慢,采出程度较高。但由于微裂缝渗流能力较弱,仅发育微裂缝的微裂缝-孔隙型储层的油井的产量和井控范围均较小。对于裂缝不发育的

孔隙型储层的油井,仅依靠基质孔隙产油,其渗流能力很弱,基质岩块有效动用范围小,原油供给慢,因此,其初期产量和累积产油量均很小。

综合来看,当不同尺度的大裂缝和微裂缝组成复杂缝网并与基质有效组合时,储层产油能力最强,能够实现致密油的高产和有效开发。致密油初期高产阶段产量占比较大,应当采用初期快速收回投资的开发模式。因此,在评价“甜点区”时,应考虑裂缝的发育情况,优选裂缝发育、基质-裂缝耦合较好的区域;而在致密油开发过程中,针对不同的储渗模式,应采用合适的储层改造方式,使天然裂缝与人工压裂裂缝形成缝网,有效沟通基质,在增加初期产量和产量规模的同时,增大基质的动用程度,提高致密油采出程度。

4 结论

致密油储层主要发育微-纳米级孔隙、大尺度裂缝和微尺度裂缝,不同介质具有不同的渗流特征,致密油开发过程中,各介质发挥的作用也不同。其中,基质孔隙是控制储量的基础,主要发挥补给作用;大尺度裂缝是主要渗流通道,起到扩大控制范围、提高初期产量的作用;微尺度裂缝主要起到沟通基质与大裂缝的作用。基质-裂缝的耦合模式直接影响了开发动态和产能的大小。

自然能量条件下,致密油产能依赖裂缝的发育程度。结合地震解释、测井分析和岩心薄片等静态资料,基于裂缝类型、尺度和发育程度,建立了致密油储层的4种储渗模式,即多级裂缝-孔隙型、大裂缝-孔隙型、微裂缝-孔隙型和孔隙型。不同储渗模式具有不同的孔隙介质组合类型,呈现不同的渗流特征和产能特征。

结合各类静态和生产动态资料,利用油藏工程和数值模拟方法,揭示得到各类储渗模式下油井的生产动态特征。对比分析后发现,只有当不同尺度的大裂缝和微裂缝组成复杂缝网并与基质有效组合时,储层出油能力最强,能够实现致密油的高产和有效开发。

致密油初期高产阶段产量占比较大,为了实现初期快速收回投资的目的,在评价“甜点区”时,应当考虑裂缝的发育情况,优选基质-裂缝耦合较好的区域;而在致密油开发过程中,针对不同储渗模式,应采用合适的储层改造方式,使天然裂缝与人工压裂裂缝形成缝网,有效沟通基质,在增加初期产量和产量规模的同时,增大基质的动用程度,提

表2 不同储渗模式下生产动态特征对比

Table2 Comparison of dynamic production characteristics of four different storage-percolation modes

| 储 渗 模 式 | 初期产 油量/ (t·d ⁻¹) | 初期高产 阶段年递 减率/(%·a ⁻¹) | 累积 产油 量/10 ⁴ t | 单井控 制范围 半径/m |
|----------|------------------------------------|---|---------------------------------|--------------------|
| 多级裂缝-孔隙型 | >5 | <10 | >1 | >500 |
| 大裂缝-孔隙型 | >5 | >30 | >0.5 | >300 |
| 微裂缝-孔隙型 | 2~5 | <20 | 0.1~0.5 | 50~300 |
| 孔隙型 | <2 | <10 | <0.1 | <100 |

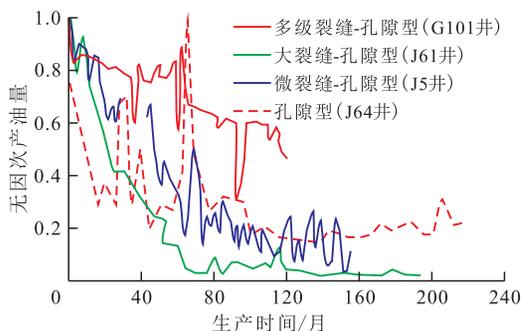


图6 不同储渗模式下无因次产油量变化曲线

Fig.6 Dimensionless production curves of four different storage-percolation modes

高致密油采出程度。

参考文献:

- [1] 贾承造,郑民,张永峰.中国非常规油气资源与勘探开发前景[J].石油勘探与开发,2012,39(2):129-136.
JIA Chengzao, ZHENG Min, ZHANG Yongfeng. Unconventional hydrocarbon resources in China and the prospect of exploration and development [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2): 129-136.
- [2] 贾承造,邹才能,李建忠,等.中国致密油评价标准、主要类型、基本特征及资源前景[J].石油学报,2012,33(3):343-350.
JIA Chengzao, ZOU Caineng, LI Jianzhong, et al. Assessment criteria, main types, basic features and resource prospects of the tight oil in China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(3): 343-350.
- [3] 赵政璋,杜金虎.非常规油气资源现实的勘探开发领域:致密油气[M].北京:石油工业出版社,2012.
ZHAO Zhengzhang, DU Jinhui. Real exploration and development field of unconventional hydrocarbon resource: Tight oil and gas [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012.
- [4] 孙赞东,贾承造,李相方,等.常规油气勘探与开发[M].北京:石油工业出版社,2012.
SUN Zandong, JIA Chengzao, LI Xiangfang, et al. Exploration and development of conventional hydrocarbon [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012.
- [5] 邹才能,杨智,陶士振,等.纳米油气与源储共生型油气聚集[J].石油勘探与开发,2012,39(1):13-26.
ZOU Caineng, YANG Zhi, TAO Shizhen, et al. Nano-hydrocarbon and the accumulation in coexisting source and reservoir [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(1): 13-26.
- [6] 王香增,任来义,贺永红,等.鄂尔多斯盆地致密油的定义[J].油气地质与采收率,2016,23(1):1-7.
WANG Xiangzeng, REN Laiyi, HE Yonghong, et al. Definition of tight oil in Ordos Basin [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(1): 1-7.
- [7] 张威,刘新,张玉玮.世界致密油及其勘探开发现状[J].石油科技论坛,2013,32(1):41-44.
ZHANG Wei, LIU Xin, ZHANG Yuwei. Worldwide tight oil and its current exploration & development conditions [J]. Oil Forum, 2013, 32(1): 41-44.
- [8] 邹才能,陶士振,杨智,等.中国非常规油气勘探与研究新进展[J].矿物岩石地球化学通报,2012,31(4):312-322.
ZOU Caineng, TAO Shizhen, YANG Zhi, et al. New advance in unconventional petroleum exploration and research in China [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2012, 31(4): 312-322.
- [9] 庞正炼,邹才能,陶士振,等.中国致密油形成分布与资源潜力评价[J].中国工程科学,2012,14(7):60-67.
PANG Zhenglian, ZOU Caineng, TAO Shizhen, et al. Formation, distribution and resource evaluation of tight oil in China [J]. Engineering Sciences, 2012, 14(7): 60-67.
- [10] 邹才能,朱如凯,李建忠,等.致密油地质评价方法:SY/T 6943—2013[S].北京:石油工业出版社,2013.
ZOU Caineng, ZHU Rukai, LI Jianzhong, et al. Geological evaluating methods for tight oil: SY/T 6943—2013 [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2013.
- [11] 马世忠,张宇鹏.应用压汞实验方法研究致密储层孔隙结构——以准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组为例[J].油气地质与采收率,2017,24(1):26-33.
MA Shizhong, ZHANG Yupeng. Study on the pore structure of tight reservoir by using method of mercury injection—A case study of the Lucaogou Formation in Jimsar sag, Junggar Basin [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24(1): 26-33.
- [12] 公言杰,柳少波,赵孟军,等.核磁共振与高压压汞实验联合表征致密油储层微观孔喉分布特征[J].石油实验地质,2016,38(3):389-394.
GONG Yanjie, LIU Shaobo, ZHAO Mengjun, et al. Characterization of micro pore throat radius distribution in tight oil reservoirs by NMR and high pressure mercury injection [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016, 38(3): 389-394.
- [13] 刘雄,王磊,王方,等.致密油藏水平井体积压裂产能影响因素分析[J].特种油气藏,2016,23(2):85-88.
LIU Xiong, WANG Lei, WANG Fang, et al. Sensitivity analysis of volume-fractured horizontal well productivity in tight reservoir [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2016, 23(2): 85-88.
- [14] 束青林,郭迎春,孙志刚,等.特低渗透油藏渗流机理研究及应用[J].油气地质与采收率,2016,23(5):58-64.
SHU Qinglin, GUO Yingchun, SUN Zhigang, et al. Research and application of percolation mechanism in extra-low permeability oil reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(5): 58-64.
- [15] 耳闯,赵靖舟,姚泾利,等.鄂尔多斯盆地延长组长7油层组页岩-致密砂岩储层孔缝特征[J].石油与天然气地质,2016,37(2):341-353.
ER Chuang, ZHAO Jingzhou, YAO Jingli, et al. Characterization of pores and fracture networks in organic-rich shale and tight sandstone of the Chang-7 member, Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(2): 341-353.
- [16] 胡宗全,童孝华,王允诚.川中大安寨段灰岩裂缝分形特征及孔隙结构模型[J].成都理工大学学报,1999,26(1):31-33.
HU Zongquan, TONG Xiaohua, WANG Yuncheng. Fractal characteristic of fractures and model of pore structure, Daanzai shelly limestone, lower Jurassic, central Sichuan field [J]. Journal of Chengdu Institute of Technology, 1999, 26(1): 31-33.
- [17] 赵辉,司马立强,颜其彬,等.川中大安寨段裂缝评价及储层产能预测方法[J].测井技术,2008,32(3):277-280.
ZHAO Hui, SIMA Liqiang, YAN Qibin, et al. Assessment of fracture and method of production forecast of Daanzhai reservoir [J]. Well Logging Technology, 2008, 32(3): 277-280.
- [18] 李祖兵,欧加强,陈轩,等.川中地区下二叠统白云岩储层特征及发育主控因素[J].大庆石油地质与开发,2017,36(4):1-8.
LI Zubing, OU Jiaqiang, CHEN Xuan, et al. Characteristics and main development controlling factors for Lower Permian dolomite reservoirs in Chuanzhong region [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2017, 36(4): 1-8.