

变质岩潜山储集层有效性评价

童凯军,程 奇,聂玲玲,房 娜

[中海石油(中国)有限公司 天津分公司 渤海石油研究院,天津 300452]

摘要:长期以来,结晶岩基底潜山的储集层有效性评价都是一个有待攻克的地质难题。以渤海湾盆地 JZ25-1S 变质岩潜山为例,综合利用岩心、薄片、测井、生产测试及实验分析等资料,首先对裂缝特征参数进行了定量描述和表征,同时也从动态和静态两个方面对潜山储集层构成介质(裂缝和基质)的有效性进行了分析与评价。研究表明:区内储集层裂缝发育程度较好,且有效程度高。最有效的裂缝是晚期形成的开启倾斜裂缝,其次是半/充填的垂直裂缝,较差的是早期形成的水平充填裂缝。通过岩石物理特征、生产测井解释及岩心离心实验分析,确立了研究区有效储集层的物性下限;利用静态渗吸实验定量评价了基质动用开发潜力,明确了毛管力是基质岩块排驱过程的主要驱动力,但影响排驱过程的主要因素是微细裂缝的分布状况和发育程度。

关键词:裂缝系统;基质系统;变质岩潜山;储集层有效性;渤海湾盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Evaluation of effectiveness of metamorphosed basement buried hill reservoirs

Tong Kaijun, Cheng Qi, Nie Lingling, Fang Na

(Bohai Oil Research Institute, Tianjin Branch of CNOOC Limited, Tianjin 300452, China)

Abstract: Evaluation of effectiveness of crystalline basement buried hill reservoirs has long been a difficult geological problem. In this paper, JZ25-1S metamorphosed basement buried hill in Bohai Bay Basin is taken as an example. First, fracture characteristic parameters are studied by using various data such as core, thin section, well logging, production test and experimental analysis. Then, the effectiveness of fractures and matrix in the buried hill reservoirs are evaluated based on the analysis of both dynamic data and static data. The research results show that fractures are highly developed in JZ25-1S and their effectiveness is high. The most effective fractures are open oblique fractures which are formed in later period, followed by the half-filled and full-filled vertical fractures, and the worst fractures are the filled horizontal fractures which are formed in early period. With the characteristics of rock physics, PLT and core centrifuge test, the lower limits of physical properties in buried hill reservoirs are determined. By using static imbibition experiment, it is possible to quantitatively evaluate the development potential of Matrix system. Capillary force is the main driving force for drainage process in matrix blocks. And the main factors influencing drainage process are the distribution and growth level of micro-fractures.

Key words: fracture system, matrix system, metamorphosed basement buried hill, effectiveness of reservoirs, Bohai Bay Basin

渤海湾盆地受多期构造运动的改造,形成了各种类型的基底潜山,至今已在太古宇变质岩基底潜山中发现了一系列重要的油气藏,包括辽河坳陷的东胜堡、兴古、曹台、兴隆台及齐家等潜山油藏;渤海海域则发现有辽西低凸起的 JZ25-1S、庙西北凸起的 PL9-1 等亿吨级潜山油藏,这些成果都充分展示出了基岩潜山油藏已成为我国东部盆地油气勘探开发的重要领域^[1]。与常规碎屑岩油藏和裂缝性砂岩油藏不同,潜

山裂缝性储集层具有非均质性强、空间结构复杂、裂缝随机分布及裂缝倾角较大等特点,使得该类油藏开发存在巨大困难^[2]。裂缝既是该类油藏的储集空间,又是流体最为重要的渗流通道。因此,储集层裂缝参数的定量表征及有效性评价便成为制约油田高效开发的关键因素。此外需要注意的是,由于裂缝的储集能力通常是有限的,真正能形成规模性开发的裂缝性油藏还需要发育基质孔隙,而基质系统的有效性评价又

收稿日期:2014-12-05;修订日期:2015-07-20。

第一作者简介:童凯军(1984—),男,工程师,油气藏开发评价与设计。E-mail:tongkaijun714@126.com。

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05057-001);国家自然科学基金重点项目(40772089)。

直接关系到一个油田的开发规模和潜力^[3]。因此在油田开发初期如何客观准确地评价基质系统的有效性也是认识潜山储集层的关键难点。

前人基于钻井、地质、测井、地震与露头资料,主要从区域裂缝发育机制、裂缝分布预测、裂缝识别及裂缝参数定量计算等角度研究了变质岩潜山储集层特征^[4-10],但针对变质岩储集层裂缝及基质系统的有效性评价开展的综合性研究较少。本文以渤海油田首个投入开发的JZ25-1S变质岩潜山作为研究对象,该油藏具有基质岩块致密、物性差的特点,但由于受到多期次构造运动的充分作用,天然裂缝十分发育,属于典型的孔隙-裂缝型油藏,且该油藏各类动静资料较为丰富,资料品质好,是开展变质岩潜山储集层研究的有利场所。通过综合运用岩心、薄片、成像测井、生产测试及室内微观实验分析等多尺度信息对该油藏天然裂缝与基质岩块开展储集层参数定量表征及有效性研究,为该油藏下一步高效开发和产能建设提供参考依据,同时也为国内其他同类型油藏的储集层有效性评价和定量表征提供借鉴。

1 地质概况

1.1 区域地质背景

渤海辽东湾坳陷位于华北板块的东北部,其东西两侧分别为胶辽隆起及燕山褶皱带;南邻渤中坳陷,北与辽河坳陷相连。辽东湾坳陷划分为5个构造单元,整体成三凹两凸的构造格局^[6](图1)。JZ25-1S潜山油藏位于辽西低凸起中段,与辽西凹陷中洼和辽中

凹陷中、北洼毗邻^[4]。构造是由西部边界辽西1号断层西倾与东部太古宇地层东倾共同形成的不对称翘倾单面山,其地形南高北低,展布南宽北窄。在单面山的背景下,被断层复杂化为具有一系列南倾-东南倾的抬斜断块。从目前的勘探开发成果来看,油气主要聚集在研究区北部高点。

JZ25-1S潜山储集层岩性主要为浅灰色片麻岩及其形成的碎裂岩,储集空间为裂缝、粒间及晶间溶蚀孔隙,总体上潜山裂缝较为发育且以构造裂缝为主。由于岩性相对较均一,构造裂缝的发育主要受构造应力场的控制,是断裂形成时的统一应力场和断裂活动时由于断层两盘相对错动引起的派生应力场共同作用的产物。

1.2 变质岩储集层裂缝特征

1.2.1 裂缝的组系和期次

渤海湾盆地在地质历史发展过程中经历了多期次强烈的构造运动,中生代中期的燕山运动影响了整个华北地台,JZ25-1S潜山构造也不例外。研究区发生褶皱抬升遭受剥蚀,造成古生界、中生界、古近系孔店组、沙四段等地层的缺失,前新生代的构造特征已无法恢复,而该时期产生的裂缝由于后期的充填作用也基本堵塞闭合。

对现今储集层裂缝的发育起主要作用的是新生代喜马拉雅山期的构造应力作用。新生代以来,JZ25-1S潜山构造经历了两期主要的构造应力作用,分别为:古近纪早期(沙三段沉积时期)的拉张断陷作用,形成了研究区一系列NNE和NE向正断层,该时期也是潜山裂缝的主要形成时期之一,该期构造应力的作用表现在储集层裂缝上为一组全区普遍发育的NNE和NE向的裂缝和局部发育的NW向裂缝;古近纪晚期(东营组沉积末期)的右旋张扭作用形成一系列NEE和近EW向雁列式正断层和近SN向的褶皱,该期构造应力形成的裂缝主要为一组EW向的裂缝,其次为走向NW和NEE向的裂缝,其对早期形成的裂缝有一定的改造作用,使裂缝具有开启性,同时多期应力场作用增加了裂缝的密度。

1.2.2 裂缝的产状

裂缝的产状决定着裂缝分布,并影响地下流体流动方向、层间连通程度^[11]。基于岩心观察,结合7口井的成像测井裂缝解释统计结果,区内潜山发育NE-SW向、NW-SE向及少量的近EW向的裂缝,并以发育NE-SW向裂缝为主。裂缝的产状主要以低-高角度倾斜缝为主,占总裂缝数的80%以上,同时还有部分水平缝及垂直缝。

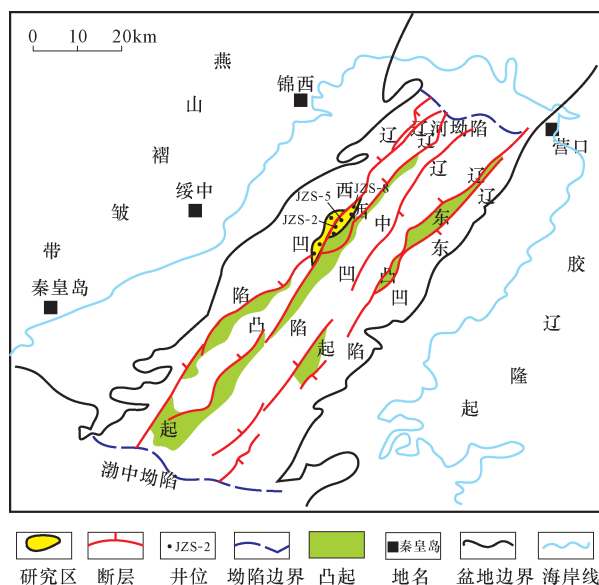


图1 渤海辽东湾坳陷构造位置

Fig. 1 Structural location of Liaodongwan depression in Bohai Bay Basin

1.2.3 裂缝发育的分带性

裂缝在垂向上分布具有分带性,因而潜山储集层在纵向上也具有分带特征。根据岩石风化程度,结合化学、生产测井等资料,由表及里可将JZ25-1S潜山划分为3个带,分别为半风化壳上段、半风化壳下段和基岩段,且研究区储集层基本以半风化壳下段储集层为主,半风化壳上段次之,基岩段不发育。由于该区风化作用太过强烈,基本缺失传统意义上的风化粘土层段。

2 裂缝参数定量描述及有效性评价

2.1 裂缝参数定量描述

2.1.1 裂缝密度

1) 岩心裂缝描述获取裂缝密度

① 宏观裂缝密度

统计JZS-2井半风化壳下段1.91 m岩心裂缝密度,结果表明:水平裂缝密度6.28条/m、低角度倾斜裂缝密度12.04条/m、高角度倾斜裂缝密度10.47条/m、垂直裂缝密度2.61条/m。对JZS-5井半风化壳上段10.22 m岩心进行裂缝密度统计,结果有:水平裂缝密度3.62条/m、低角度倾斜裂缝密度5.58条/m、高角度倾斜裂缝密度6.36条/m、垂直裂缝密度5.97条/m。以上结果表明:JZS-2井倾斜裂缝最为发育,JZS-5井垂直裂缝和倾斜缝相对较为发育;JZS-2井裂缝密度整体较JZS-5井高。

② 微观裂缝密度

采用面积法统计了JZS-2井17块岩心样品的微观裂缝面密度,结果表明:微观裂缝面密度分布在0.055~0.34 mm/mm²,平均为0.17 mm/mm²,且随着深度增加,潜山风化作用由强变弱,充填微构造的裂缝密度增大,张开微构造的裂缝密度减少。

2) 成像测井解释裂缝密度

成像测井获取裂缝密度的步骤是:首先应用取心井的裂缝描述成果标定该井的成像资料,在成像井中定性识别裂缝相应的图像样式,继而在非取心井中应用成像测井识别裂缝。在单井有效裂缝划分的基础上,根据成像测井识别的裂缝,统计出裂缝发育段裂缝的密度。根据7口井有效裂缝密度统计数据,JZ25-1S太古宇潜山储集层有效裂缝密度以1.0~3.5条/m为主。

2.1.2 裂缝开度

1) 岩心裂缝张开度测量

裂缝的张开程度直接决定了裂缝开度,但从岩心或薄片上量取并不能直接反映地下裂缝的真实开度,因为地面测量的开度值其为天然裂缝压力释放后的状态,只能作为地下裂缝开启的上限值,因此需要修正才能得到真实的裂缝开度,其计算公式为^[12]:

$$b_u = 2b_s \cos(\theta/\pi) \quad (1)$$

式中: b_u 为裂缝真实开度,mm; b_s 为裂缝视开度,mm; θ 为测量面与裂缝面的夹角,(°)。

图2a为JZS-2井取心段裂缝开度统计直方图,可以看出:裂缝开度主要集中在0.15~0.55 mm,表明裂缝的开启性较好,有利于油气储集与运移。

2) 常规测井裂缝张开度计算

常规测井裂缝开度解释模型是基于不同探测深度的电阻率测井系列进行的,其电流束主要沿裂缝通过,对有效裂缝敏感。根据电阻率测井解释结果可以看出(图2b),裂缝开度与地层孔隙度相关关系较好。裂缝开度一般在0.01~0.76 mm,平均值为0.15 mm,中等以上储层裂缝开度在0.1~0.5 mm,与岩心及薄片观察结果基本一致。

2.1.3 裂缝孔隙度

由于JZ25-1S太古宇潜山地层非均质性强,在裂缝发育段岩心收获率很低,利用岩心分析获得的孔隙

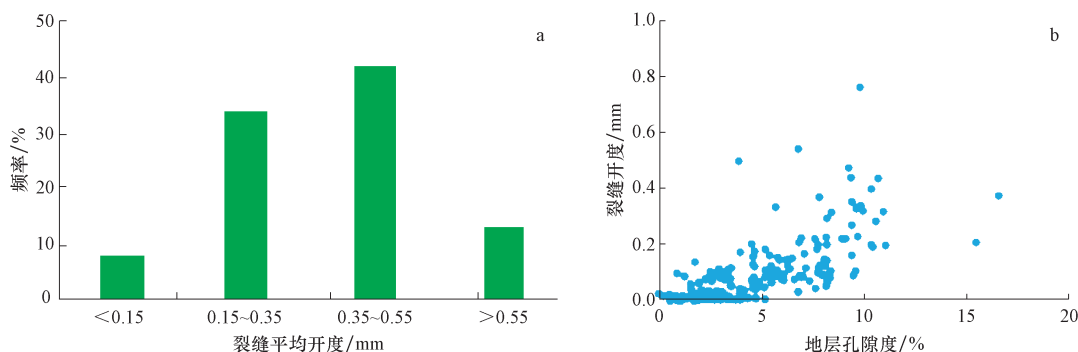


图2 不同方法获取裂缝开度

Fig. 2 Fracture aperture calculated by different methods

a. 岩心测量裂缝开度分布;b. 常规测井解释裂缝开度与地层孔隙度关系

度可靠性有限,因此该项参数主要由代表性较强的测井方法计算获取。本文利用双侧向电阻率的相对变化确定了裂缝系统孔隙度平均值为 1.08%。对该参数与相似油田也进行了对比,辽河东胜堡油田太古宇片麻岩地层岩心裂缝描述裂缝孔隙度为 1.09%,应用双侧向电阻率计算的裂缝孔隙度为 1.06%;胜利埕北 30 潜山太古宇片麻岩地层压力恢复测试计算裂缝孔隙度平均为 1.2%,二者与 JZ25-1S 油田确定的裂缝孔隙度值相差不大。

2.1.4 不同来源裂缝参数差异性分析

从前文描述的通过各类资料获取的裂缝参数计算结果对比来看,不同资料对同一参数的获取结果并非完全一致,主要原因在于各类资料获取的裂缝参数所反映的含义有所差异:①岩心分析及薄片鉴定是在地表卸载条件下获取的,而成像测井、常规测井等资料获取的裂缝参数是在地层条件下求取的;②根据岩心分析及成像测井所获取的裂缝参数是对单条裂缝的具体刻画,而常规测井解释结果则是对井筒附近所有裂缝的一个综合反映,是井筒附近裂缝网络系统内裂缝参数的一个综合表现形式。

通过关键裂缝参数分析,与国内同类型潜山储集层相比^[3,12],JZ25-1S 潜山储集层裂缝密度更大,也反映出该区裂缝发育程度整体较强。

2.2 储集层裂缝有效性评价

地层裂缝有效与否,取决于它的张开程度、径向延伸和连通情况,因此裂缝有效性的评价就是围绕这三个因素开展定性-半定量的描述与评价。

2.2.1 利用裂缝的充填性及切割关系定性评价裂缝有效性

一般在裂缝形成的同时或之后不久,地下含矿物热液即可将其溶解物质沉淀于裂缝之中从而填充裂缝。根据裂缝中矿物的充填程度,一般可分为完全充填、半充填及局部充填三种,其充填程度依次由强变弱。就改善储集层的储渗能力而言,裂缝的充填性与裂缝的有效性是负相关的。

通过对 JZ25-1S 潜山储集层典型取心井岩心观察,工区内储集层中构造裂缝的充填矿物以方解石和石英为主,其次还有绿泥石、泥质及铁质矿物。统计 JZS-2 井半风化壳下段 1.91 m 岩心及 5 井半风化壳上段 10.22 m 岩心充填裂缝密度及开启裂缝密度,结果表明(图 3):开启倾斜裂缝比充填倾斜裂缝更为发育,对于水平裂缝、垂直裂缝,大多数被充填。

同时通过岩心观察,还可见区内各类裂缝的相互切割现象:开启的倾斜裂缝切割充填的水平裂缝、垂直裂缝,表明倾斜裂缝形成时期晚于水平裂缝、垂直裂

缝,同时它也是区内最有效的裂缝类型。

2.2.2 利用原油包裹体资料定性评价裂缝有效性

通过在 3 口井水平裂缝、倾斜裂缝及垂直裂缝处拾取 14 块包裹体,进行了有机包裹体荧光观察,并计算了各类裂缝样品的烃类包裹体颗粒指数。从图 4 中可以看出,开启倾斜裂缝和碎裂岩中的烃类包裹体颗粒指数最高,其次为垂直裂缝,而水平裂缝中的烃类包裹体颗粒指数最低。表明区内最有效的裂缝是晚期形成的开启倾斜裂缝,其次是半/充填的垂直裂缝,较差的是早期形成的水平充填裂缝。

2.2.2 利用测井资料计算地层渗透率定量评价裂缝有效性

裂缝渗透率体现在由裂缝引起的流体渗流能力,由于裂缝型潜山储层基质渗透率较低,通常岩心常规物性分析结果显示渗透率大都小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,因此由试油、试采所求得的地层有效渗透率基本上反映了地层的裂缝渗透率。考虑到多极子阵列声波测井能够很好的指示地层渗透率,这里主要研究了利用全波列

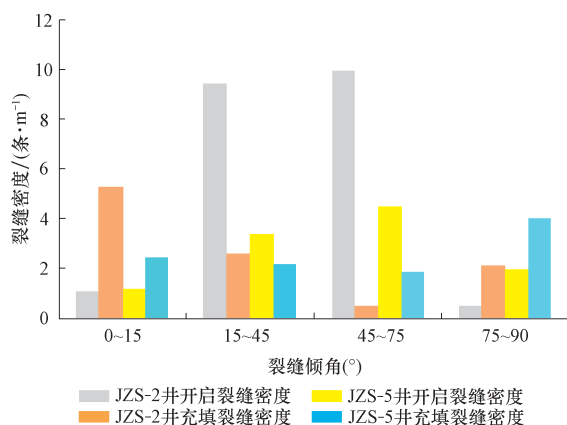


图3 岩心开启裂缝/充填裂缝密度统计直方图
Fig. 3 Statistics histogram of density of open fractures and filled fractures in cores

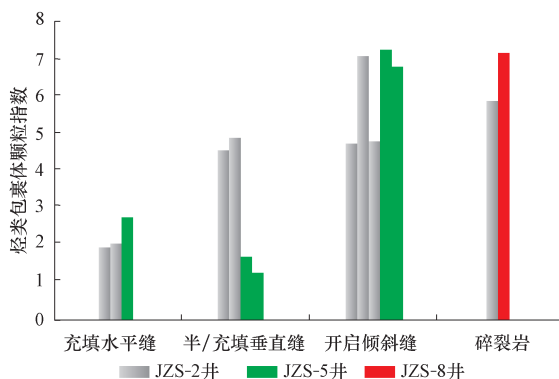


图4 不同裂缝类型样品烃类包裹体颗粒指数分布
Fig. 4 Distribution of hydrocarbon inclusion grain index for different fracture types

测井资料的斯通利波来对地层渗透率进行计算^[13]。实测斯通利波的直达波除受地层的渗透性影响之外,还受地层弹性、井径变化、泥饼和各向异性等其它因素的影响。为了消除这些影响,通过输入地层纵波和横波速度、地层密度及井径等曲线,计算出实测斯通利波时差(S , $\mu\text{s}/\text{m}$)和理论上(假设地层没有渗透性)斯通利波时差(S_e)的差值能指示地层的渗流能力和裂缝的连通性,该差值称为流体移动指数(QFM)。当斯通利波的频率处于低频时,研究表明有下式成立:

$$S^2 - S_e^2 \approx 2S \times QFM = A \sqrt{\frac{K}{\mu}} \quad (2)$$

式中: K 为渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; μ 为原油粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; QFM 为流体移动指数, $\mu\text{s}/\text{ft}$; A 为常数。

由式(2)可看出, QFM 与 K/μ 具有较好的正相关关系,具有流体移动指数越大,裂缝连通性越好,地层渗透率也就越大的特点。因此在利用阵列声波测井资料计算得到流体移动指数的基础上,可估算地层渗透率值。图5为流体移动指数与生产测井、试井分析及全直径分析关系图,可以看出,流体移动指数与渗透率成良好的正相关关系,二者之间关系式如下:

$$K = 2.1814 QFM^{1.5142} \quad (3)$$

由图5可以看出,有效储集层流体移动指数的下限在3.0左右,即流体移动指数大于3.0的地层才具有一定的产出能力,而流体移动指数小于3.0的地层则产出能力较差。

3 潜山储集层基质有效性评价

潜山储集层包含裂缝和基质两部分,裂缝作为主要的渗流通道,在渗流方面起着举足轻重的作用,但对储集能力方面的贡献有限。因此,在潜山储集层中,基质的储渗能力及有效性评价至关重要。下面将从储集层物性与生产测试分析、岩心离心实验及静态渗吸实验等多角度信息来综合评价 JZ25-1S 潜山储集层中基质岩块储渗性能的有效性及其开发潜力。

3.1 利用常规物性与生产测试分析定性评价基质储渗下限

储集层岩石物性直接反映其储渗能力,对于一般的孔隙性储集层来说,储集层岩石的物性都比较好且孔渗关系也比较好,主要通过孔隙网络进行渗流。但对于变质岩裂缝性储集层来说,基质岩块通常具有低孔、低渗的特点,在没有裂缝沟通的情况下很难形成高产能。利用钻井取心与井壁取心资料,对多口井样品进行了系统的物性分析。图6为常规岩心分析孔隙度与渗透率关系图,可以看出,岩心常规物性分析基质渗透率大都小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,整体有随孔隙度增大渗

透率也增大的趋势。进一步分析发现,当孔隙度小于3.5%时,孔渗关系很差;当孔隙度大于3.5%时,孔渗关系相对较好,表明了3.5%的孔隙度是该区变质岩储集层基质岩块的门槛值,对于孔隙度小于3.5%的储集层,如果没有发育的天然裂缝沟通,储集层基质基本上无效的。

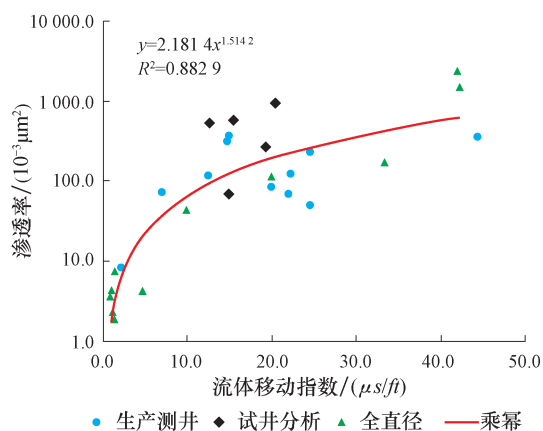


图5 流体移动指数与渗透率关系

Fig. 5 Relationship curve of QFM and permeability

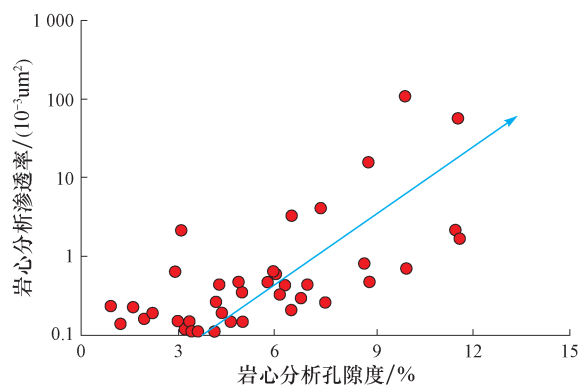


图6 基质岩块孔隙度-渗透率交会图

Fig. 6 Cross-plot of porosity and permeability in matrix blocks

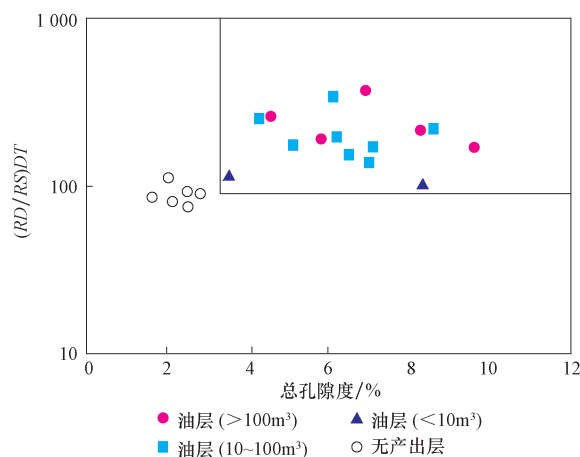


图7 生产测井解释与孔隙度及 $[(RD/RS)DT]$ 关系

Fig. 7 Relation plot of production logging result and porosity vs. $[(RD/RS)DT]$

表 1 测试岩心样品物性及不同转速下可动流体百分数

Table 1 Physical property and percentage of mobile fluid of core sample under different rotational speeds

井号	岩心号	长度/cm	直径/cm	孔隙度/%	气测渗透率/ ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	最大驱出可动 流体比例/%	转速/(r/min)					
							0	3 000	5 000	7 000	8 000	12 000
							可动流体百分数/%					
JZS-2 井	1	2.79	2.46	5.8	0.13	38.79	22.04	16.12	14.55	15.06	14.79	13.49
	2	2.49	2.52	6.7	0.12	47.33	23.37	14.44	13.35	13.14	12.29	12.31
	3	2.99	2.51	8.6	0.21	61.52	17.54	10.18	8.80	8.79	7.62	6.75
	4	2.91	2.5	10.7	0.20	47.13	20.37	14.67	12.98	12.41	11.48	10.77
JZS-5 井	5	2.63	2.47	12.8	0.34	25.43	30.56	27.67	26.14	25.06	23.81	22.79
	6	2.93	2.51	4.7	0.07	51.66	21.66	13.27	12.00	11.56	11.86	10.47

岩心物性分析还表明:基质孔隙度较大时仍有对应很低的渗透率的情况出现,因此有效储集层应有裂缝发育。对潜山储集层的评价既要考虑基质的储油能力,又要考虑裂缝的发育程度。鉴于深、浅双侧向的分开程度与声波时差均对裂缝反应敏感,因此引入深、浅侧向电阻率比值与声波时差的乘积 $[(RD/RS)DT]$ 来进行储集层有效性评价。图 7 为生产测井解释层产出情况与测井解释孔隙度及 $[(RD/RS)DT]$ 的关系图,可以看出,当孔隙度大于 3.5%,并且 $[(RD/RS)DT]$ 大于 90 时为产出层,从而确定了潜山储集层有效产出下限。

3.2 利用岩心离心实验定量评价基质启动渗透率下限

基质系统水驱开发渗透率界限是潜山裂缝性油藏储层评价及开发的难点和关键。国内外实验研究表明,流体在特低渗透储层孔隙中流动时,存在启动压力梯度,当驱动压力梯度达到能够克服启动压力梯度时,流体才开始流动^[14]。同理,在基质系统注水开发过程中,注采井间不同半径处必然存在临界启动渗透率,只有当储层渗透率大于该值时,储层流体才能参与流动。

核磁共振技术(NMR)配合驱替、离心等实验手段定量分析岩心可动流体、束缚流体及渗透率等参数,在储层评价方面已经得到了广泛的应用。对 JZ25-1S 变质岩潜山油藏 JZS-2 井和 JZS-5 井共计 6 块基质岩心进行了核磁共振和高速离心实验,即将饱和后岩心放置于离心机中,变化不同转速依靠离心力来驱动流体,岩心经过离心后再进行 NMR 测试。表 1 为不同离心转速下的可动流体百分数,由于岩石物性的差异性,同一转速下不同岩心启动毛细管的尺度不同;此外,在相同贡献率下,随转速增加,毛细管半径将减小,表明增加驱替压差,启动了较小尺寸的毛细管,等效于降低了启动渗透率的门槛值。

如果将可动流体百分数对应于初始含油饱和度,则该实验最大驱出可动流体比例则对应于岩心的驱油效率,由表 1 可以看出,所测试的 6 块岩心的等效驱油

效率范围为 25%~62%,主要分布在 45%左右。另外,根据流体在多孔介质中的流动特征,在累积贡献率范围内将毛细管尺寸从大到小进行贡献加权平均,计算出所对应的平均渗透率,同时将不同的离心机转速转换得到两相流体的驱替压力梯度。进一步研究后,制作出了变质岩岩心驱油效率为 45%条件下的不同驱替压力梯度所对应的启动渗透率下限值图版(图 8)。由图 8 可以看出,若驱压力梯度替为 2.5 MPa/m 时,启动渗透率下限值为 $6 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;若驱压力梯度替为 10 MPa/m,启动渗透率下限值为 $3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

3.3 利用静态渗吸实验定量评价基质动用的开发潜力

渗吸效应是指一种润湿相流体在多孔介质中只依靠毛管力作用置换出另一种非润湿相流体的过程,它作为低渗透亲水裂缝油藏中基质岩块的一个重要开采机理而备受关注^[15-17]。通过对研究区所取基质岩心开展室内静态渗吸实验可以定性-半定量地分析储集层基质在毛管力作用下的开发潜力(表 2)。

图 9a 为 JZ25-1S 潜山储集层基质岩块静态渗吸实验结果。结果表明,该油田基质岩心的渗吸采收率曲线整体呈指数曲线形态,5 块岩心最终渗吸采收率在 11.7%~34.7%,平均分布在 26%左右。总体渗吸

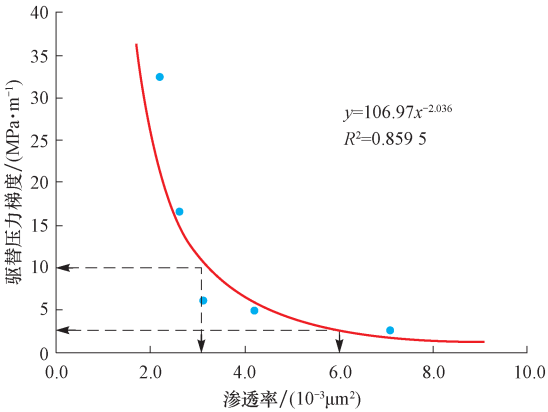


图 8 潜山储集层驱替压力梯度与渗透率关系

Fig. 8 Relation plot of displacement pressure gradient and permeability of buried hill reservoir

表 2 油藏实际可动流体饱和度条件下岩心物性及渗吸效果

Table 2 Physical property and imbibition recovery under reservoir saturation of mobile fluid

岩心号	长度/cm	直径/cm	NMR 测			渗吸采收率/%
			孔隙度/%	渗透率/(10 ⁻³ μm ²)	可动流体百分数/%	
C3T1 - F15	8.22	9.9	6.94	0.036	20.98	11.7
C1T4 - F5	8.03	9.8	10.57	0.402	52.28	34.7
C1T6 - F8	7.98	9.8	13.67	0.833	56.61	30.6
C2T2 - F9	8.25	9.8	11.33	1.683	61.99	32.8
C1T4 - F7	8.11	9.8	6.28	0.064	27.60	18.6

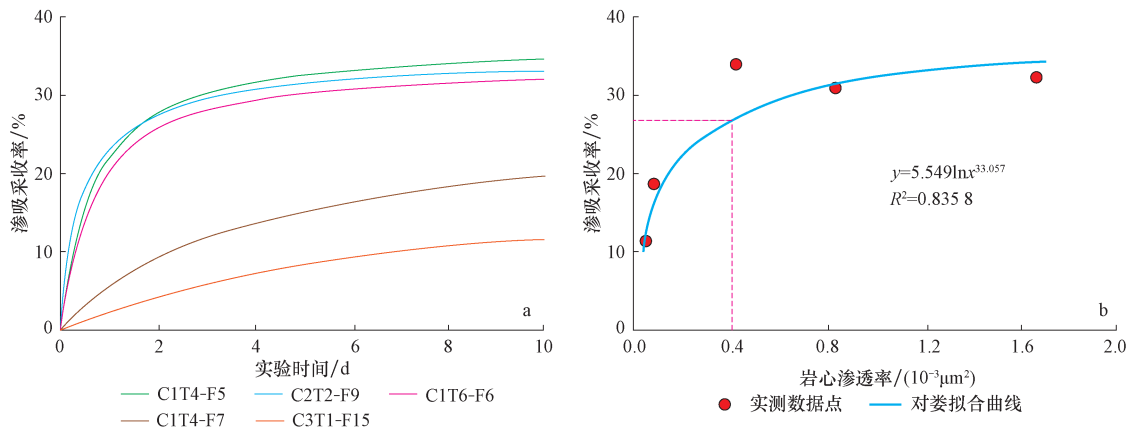


图 9 JZ25 - 1S 潜山油藏基质岩心渗吸实验相关曲线

Fig. 9 Relationship curves of the imbibition experiment for matrix core in JZ25 - 1S buried hill oilfield

a. 基质岩心渗吸实验变化曲线; b. 基质岩块渗吸采收率随岩心渗透率变化

采收率与华北油田碳酸盐潜山基质实验结果(15%~20%)相比较,与国外变质岩基质实验结果(30%~40%)相比稍低。由图 9a 还可以看出,在渗吸早期,相对高渗岩心的渗吸速度较快,相对低渗岩心的渗吸速度较慢,到了渗吸中后期,渗吸速度均逐渐变慢。渗吸采收率与岩心渗透率关系表明(图 9b),随着渗透率增加,渗吸采收率逐渐升高,二者之间呈良好地半对数关系。并且在基质岩心渗透率低于 $0.4 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以后,渗吸采收率急剧下降。

渗吸采收率随岩心渗透率变化的原因为:渗吸主要由毛管力控制。随着岩心渗透率的增加,岩心内部孔隙发育且孔喉性质逐渐变好,此时参与毛管力渗吸的孔隙也相应增多,使得毛管渗吸作用增强,最终渗吸采收率增加。由此可见,低渗透储集层开发中只有微细缝洞发育且连通的含油岩块才有自吸排油能力。同时,应该注重发挥基质系统的渗吸作用,如果基质岩块的渗吸作用利用的好,会显著提高该类型油田的采收率。

4 结论

1) 综合各类资料定量描述了 JZ25 - 1S 潜山储集层裂缝特征参数(裂缝密度、裂缝开度及裂缝孔隙度)。与国内同类型潜山储集层相比,JZ25 - 1S 潜山储集层裂缝发育程度较好,且有效程度高;区内最有效

的裂缝是晚期形成的开启倾斜裂缝,其次是半/充填的垂直裂缝,较差的是早期形成的水平充填裂缝。

2) 通过构建流体移动指数与地层总渗透率的关系图版,明确了 JZ25 - 1S 潜山有效储集层流体移动指数的下限在 3.0 左右;同时,通过分析生产测井解释成果与孔隙度及 $(RD/RS)DT$ 之间的特征关系,提出了潜山储集层有效厚度下限值为孔隙度大于 3.5%,且 $(RD/RS)DT$ 大于 90。

3) 以岩心离心实验定量评价结果为基础,构建起潜山储集层不同驱替压力梯度所对应的启动渗透率下限值图版,并得出:若驱压力梯度替为 2.5 MPa/m 时,启动渗透率下限值为 $6 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;若驱压力梯度替为 10 MPa/m,启动渗透率下限值为 $3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;静态自吸排油实验结果则表明,毛细管力是基质岩块排驱过程主要驱动力,但影响排驱过程的主要因素是微细裂缝的分布状况和发育程度。

致谢:本文在成文过程中,得到了中国石油大学(北京)邹华耀及刘慧卿等老师的大力支持与帮助,在此表示感谢!

参 考 文 献

[1] 邹华耀,赵春明,尹志军,等. 渤海湾盆地新太古代结晶岩潜山裂缝发育的露头模型[J]. 天然气地球科学,2013,24(5): 879 - 885.

- Zou Huayao, Zhao Chunming, Yin Zhijun, et al. Fracture-occurring outcrop model in neo-Archean crystalline rock-buried hill, Bohai Bay Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(5): 879–885.
- [2] 周心怀, 项华, 于水, 等. 渤海锦州南变质岩潜山油藏储集层特征与发育控制因素[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(6): 17–20.
- Zhou Xinhui, Xiang Hua, Yu Shui, et al. Reservoir characteristics and development controlling factors of JZS neo-Archean metamorphic buried hill oil pool in Bohai Sea[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(6): 17–20.
- [3] 柏松章, 唐飞. 裂缝性潜山基岩油藏开发模式[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.
- Bai Songzhang, Tang Fei. The development models of buried hill fractured basement reservoirs[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997.
- [4] 童凯军, 赵春明, 吕坐彬, 等. 渤海变质岩潜山油藏储集层综合评价与裂缝表征[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(1): 56–63.
- Tong Kaijun, Zhao Chunming, Lv Zuobin, et al. Reservoir evaluation and fracture characterization of the metamorphic buried hill reservoir in Bohai Bay[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(1): 56–63.
- [5] 黄保纲, 汪利兵, 赵春明, 等. JZS 油田潜山裂缝储层形成机制及分布预测[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(6): 710–717.
- Huang Baogang, Wang Libing, Zhao Chunming, et al. Formation mechanism and distribution of fractured buried hill reservoir in JZS oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(6): 710–717.
- [6] 刘乐, 杨明慧, 李春霞, 等. 辽西低凸起变质岩潜山裂缝储层及成藏条件[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(2): 188–194.
- Liu Le, Yang Minghui, Li Chunxia, et al. Fractured reservoirs in metamorphic buried-hills in the liaoxi low uplift and their hydrocarbon accumulation conditions[J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(2): 188–194.
- [7] 周东红, 明君, 赵春明, 等. 利用测井资料识别变质岩潜山孔洞缝储层[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2011, 38(3): 277–283.
- Zhou Donghong, Ming Jun, Zhao Chunming, et al. Identification of the porous-cave-fractured reservoirs in metamorphic rocks by logging analysis[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2011, 38(3): 277–283.
- [8] 张吉光, 王金奎, 秦龙卜, 等. 海拉尔盆地贝尔断陷苏德尔特变质岩潜山油藏特征[J]. 石油学报, 2007, 28(4): 21–30.
- Zhang Jiguang, Wang Jinkui, Qin Longbo, et al. Characteristic of metamorphic buried hill reservoir in suderte beir fault depression in hailar basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(4): 21–30.
- [9] 吴智勇, 郭建华, 吴东胜. 大民屯凹陷静安堡西侧低潜山变质岩储层裂缝发育特征[J]. 石油与天然气地质, 2001, 22(4): 322–325.
- Wu Zhiyong, Guo Jianhua, Wu Dongsheng. Fractured characteristic of metamorphic reservoirs in low buried hill in west of jing'anpu, damingtun depression[J]. Oil & Gas Geology, 2001, 22(4): 322–325.
- [10] 肖冬生. 渤海湾盆地南堡凹陷下古生界潜山地层及其储盖组合[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(1): 69–73.
- Xiao Dongsheng. Lower paleozoic burial stratigraphy and reservoir cap assemblages in nanpu sag, Bohai Bay Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(1): 69–73.
- [11] 宋惠珍, 贾承造, 欧阳健, 等. 裂缝性储集层研究理论与方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001.
- Song Huizhen, Jia Chengzao, Ou Yangjian, et al. Theory and method of fractured reservoirs[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001.
- [12] 袁士义, 宋新民, 冉启全. 裂缝性油藏开发技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004.
- Yuan Shiyi, Song Xinming, Ran Qiquan. The development techniques of fractured reservoirs[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004.
- [13] 高坤, 陶果, 王兵. 利用斯通利波计算地层渗透率的方法及应用[J]. 测井技术, 2005, 29(6): 507–510.
- Gao Kun, Tao Guo, Wang Bin. Algorithm for formation permeability from stoneley wave logs and its field application[J]. Well Logging Technology, 2005, 29(6): 507–510.
- [14] 邓玉珍, 刘慧卿. 低渗透岩心中油水两相渗流启动压力梯度试验[J]. 石油钻采工艺, 2006, 28(3): 37–40.
- Deng Yuzhen, Liu Huiqing. Experiment on starting pressure gradient of oil and water two phases flow in permeability core[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2006, 28(3): 37–40.
- [15] 王家禄, 刘玉章, 陈茂谦, 等. 低渗透油层裂缝动态渗吸机理实验研究[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(1): 86–90.
- Wang Jialu, Liu Yuzhang, Chen Maoqian, et al. Experimental study on dynamic imbibition mechanism of low permeability reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(1): 86–90.
- [16] 涂彬, 丁祖鹏, 刘月田. 火烧山油田 H3 层裂缝发育特征与剩余油分布关系[J]. 石油天然气与地质, 2011, 32(2): 229–235.
- Tu Bin, Ding Zupeng, Liu Yuetian. Correlation of remaining oil distribution and fracture development in H₃ reservoir of Huoshaoshan oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(2): 229–235.
- [17] 闫凤林, 刘慧卿, 杨海军, 等. 裂缝性油藏岩心渗吸实验及其应用[J]. 断块油气田, 2014, 21(2): 228–231.
- Yan Fenglin, Liu Huiqing, Yang Haijun, et al. Imbibition experiment and its application of cores in fracture reservoirs[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2014, 21(2): 228–231.

(编辑 张亚雄)