

离散裂缝网络建模技术在大庆油区泥岩 裂缝性油气藏的应用浅析

魏旭¹, 张永平², 薄云鹤¹, 郭昊¹, 郭宇航¹, 吴森昊²

(1. 东北石油大学石油工程学院, 黑龙江 大庆 163318;

2. 中国石油大庆油田有限责任公司采油工程研究院, 黑龙江 大庆 163454)

摘要:泥岩裂缝性油气藏是一种特殊的非常规油气藏,其油气储集空间主要以裂缝为主。较多的储量使该类油气藏具有很高的工业开采价值,但由于地质情况复杂,其开发效果并不理想。为了在压裂施工前,还原地质构造并准确分析泥岩裂缝性油气藏的产能情况,充分考虑了岩心特性、井下微地震以及生产动态等资料。根据大庆地区泥岩裂缝发育层段和产状特征,结合地震等构造研究结果,以裂缝强度属性作为模型约束条件构建裂缝网络模型,并在网络模型的基础上建立人工裂缝与天然裂缝的耦合模型,从而进行压前压后产能效果分析。研究表明,该裂缝模型能较好地描述实际地层中天然裂缝的数量、走向等情况,并且能准确地预估压前压后的油气产量。该研究可作为大庆A地区泥岩裂缝性油气藏压前压后产能评价方法,为该区块其它井的压裂施工提供依据。

关键词:泥岩裂缝性油气藏;裂缝强度属性;天然裂缝;耦合模型;产能评价

中图分类号:TE357.1

文献标识码:A

Application of discrete fracture network modeling technology in mudstone fractured reservoir in Daqing oil region

Wei Xu¹, Zhang Yongping², Bo Yunhe¹, Guo Hao¹, Guo Yuhang¹ and Wu Senhao²

(1. College of Petroleum Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China; 2. Research Institute of Oil Production Engineering, Daqing Oilfield Co., Ltd., PetroChina, Daqing, Heilongjiang 163454, China)

Abstract: The mudstone fractured oil and gas reservoir is a kind of special unconventional reservoirs and its hydrocarbon mainly exists in fractures. This kind of reservoirs has industrial exploitation value due to the large reserves, but the complex geological condition leads to its poor develop effects. In order to reconstruct the geological condition and analyze the production capacity of the mudstone fractured oil and gas reservoir before fracturing, the core characteristics, downhole microseismic and dynamic information of production are fully considered. According to the characteristics and production of the development layer with mudstone fractures in Daqing area, and combined with the seismic and other structural research results, we established the fracture network model, which was constrained by the crack strength attribute. Based on the network model, the coupling model of the artificial fracture and natural fracture is established, so that to analyze the effect before and after fracturing. The results show that the fractured model can accurately describe the numbers and direction of the natural fractures, and estimate the oil and gas production before and after fracturing. The study is used as a method for evaluating the productivity of mudstone fractured oil and gas reservoirs in area A of Daqing, and to provide the basis for the fracturing construction of other wells in this zone.

Key words: mudstone fractured oil and gas reservoir, crack strength attribute, natural fracture, coupling model, productivity evaluation

随着油气勘探开发的不断进行与开采技术的持续进步,岩性油气藏、非常规致密砂岩油气藏以及裂

缝性油气藏受到人们越来越多的关注^[1-2]。裂缝性储层大概占陆地油气藏储量的10%以上^[3]。泥岩裂缝

收稿日期:2017-09-11。

第一作者简介:魏旭(1992—),男,在读博士研究生,油气藏增产理论与技术。

基金项目:国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”(2016ZX05046-006);东北石油大学研究生创新科研项目“徐深火山岩气田扩大改造体积数值模拟研究”(YJSJD2017-002NEPU)。

性油气藏中,油气主要储集在以泥页岩为主的混合岩体裂缝中,是一种特殊的裂缝性油气藏,主要分布于大庆A地区^[4-7]。该类油气藏集储集、运移为一体,裂缝的连通情况直接决定储层的产能^[8-10]。泊松比和弹性模量也是影响储层产能的重要因素,通常在低泊松比和高弹性模量层段分布的裂缝数量越多,裂缝储层的产能越高^[11-12]。目前泥岩裂缝型储层的勘探面积大约为645 km²,石油资源量约为 $(1.8 \sim 4.4) \times 10^8$ t^[13]。但由于该类储层具有较小的孔隙度,且岩石物性参数变化不灵敏,储层可采储量非常少。因此,资源量的探明落实及有效动用是今后勘探的主攻方向之一^[14]。

虽然北美地区对泥岩裂缝性储层的天然气开采技术比较成熟^[15-17],但该类油气藏的开发仍然缺乏合理的依据^[18-19]。目前,预测储层裂缝分布的方法主要包括:结合定性分析与相干体的方法、计算构造应力与体曲率的预测方法以及根据井下微地震测量纵波方位各向异性的预测裂缝分布情况的方法^[20-22]。为了有效动用泥岩裂缝性油气藏,提高该类储层的油气产量,根据岩心特性等资料以裂缝强度属性作为模型约束条件构建了人工裂缝与天然裂缝的耦合模型,从而对泥岩储层天然裂缝分布状态以及压前压后产能情况进行分析,丰富裂缝性油气藏的理论研究,为该类油气藏的开采提供理论依据。

1 储层裂缝描述

1.1 裂缝发育层段与产状特征

该次研究对大庆A地区八口井进行岩心裂缝观察描述(HA14、HA16、HA18、YING12、YING15、YING16、YING18、GUPING1),总进尺687.91 m。共识别和描述裂缝590条;通过岩心观察描述,明确了天然裂缝的赋存状态和主要发育层段。根据分层段裂缝统计结果,A地区裂缝发育层段以G4和K1qn1为主,其中G4裂缝条数所占的比例是55%,K1qn1裂缝条数所占的比例是41%。

根据岩心裂缝产状统计结果,A地区的裂缝产状主要以层理缝为主,所占的比例为62%;高角度缝次之,所占的比例是32%;另外还有少量低角度斜交缝所占的比例是6%。

1.2 裂缝特征

1.2.1 层理缝

层理缝是A地区地层中最常见的裂缝类型,研究区内取心井均大量发育层理缝。这类裂缝主要分布在泥岩、粉砂岩和介形虫层之中^[7]。根据录井岩心描述资料,这类裂缝中常见含油显示,断面上均可见一层黄绿色的油膜,荧光照射呈亮黄色(图1)。



图1 层理缝含油显示(HA14井,2 219.95 m,黑色泥岩)
Fig. 1 Layer fracture with oil display
(well HA14, 2 219.95 m, Black mudstone)

1.2.2 高角度缝

从裂缝规模及产状来看,高角度缝主要包括两种类型^[8]:一种规模较大、数量较少,其分布不受岩性控制,产状为75°~90°,多为单一缝,与岩心纵轴线相切;长度为15~106 cm,缝宽一般为0.1~0.5 mm;表现为中间宽,两头尖,在泥岩段断面多平直光滑,切过砂质、钙质薄层时断面或可呈参差状,少数断面弯曲;多未充填,少数为方解石半充填,推测它们是与近南北向断层相关的一种构造成因裂缝。

另一种规模较小、数量较多,多分布在泥岩之中,在泥岩段与砂质、钙质薄层相变多见,出现在层界面处并向泥岩段延伸,产状近乎垂直于层面,多成组出现,密度为1条/(1~3 cm),纵切岩心;长度为2~15 cm,缝宽一般为0.05~0.1 mm;裂缝上不穿顶,下不透底,中间宽,两头尖,断面弯曲,具有张裂缝的特点,有时可见裂缝分叉的现象;一般未充填,根据录井岩心描述资料,缝中多含油(图2)。

1.2.3 低角度斜交缝

低角度斜交缝在岩心中见到的非常少。裂缝面与层理斜交,倾角20°~50°不等,裂缝宽一般为0.5~2 mm。

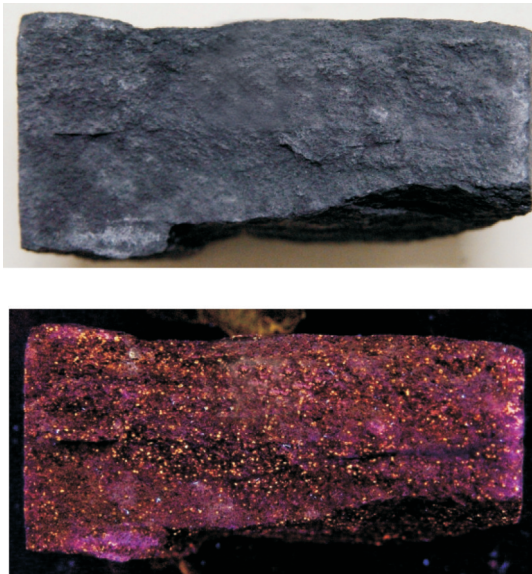


图2 高角度缝含油显示(介形虫层HA14井,2 198~2 192.4 m)
Fig. 2 High angle fracture with oil display
(Ostracodia layer, well HA14, 2 198 ~ 2 192.4 m)

2 裂缝模型的建立与验证

离散裂缝网络模型即DFN模型,是目前世界上描述裂缝的一项先进技术。它通过展布于三维空间中的各类裂缝片组成的裂缝网络集团来构建整体的裂缝模型,实现了对裂缝系统从几何形态直至其渗流行为的逼真细致的有效描述^[23]。

该次裂缝建模研究充分考虑了岩心、测井、地震及生产动态等资料,首先进行了裂缝基础地质研究成果分析,这是裂缝建模的基础,通过这部分基础研究对裂缝的分布规律、产状等进行客观认识,并依此建立裂缝模型的约束条件以及优选参数;再结合地震等构造研究结果,建立裂缝强度属性模型,作为约束模拟得到裂缝网络模型(DFN)。

2.1 三维裂缝建模

2.1.1 取心段裂缝强度曲线生成

将有岩心观察和描述资料的八口井单井常规测井裂缝解释数据(包括井名、深度等)加载到软件中,根据软件的裂缝强度计算功能,生成了表示各井取心井段裂缝发育强度的曲线,为下一步非取心井段裂缝强度的标定奠定了基础。

计算裂缝强度曲线时需要考虑采样区间内的裂缝条数、井轨迹与裂缝间的夹角、有效长度等参数。

同时需选取合理的窗口长度来平均平滑数值。例如消掉单个裂缝的影响,取而代之的是井轨迹段的平均强度。由于该区块裂缝发育程度较低,经过对比分析,该次采样间隔选取0.5 m,窗口长度取值5 m,以使计算的裂缝强度曲线能更加合理地反映裂缝沿井轨迹发育的情况。

裂缝强度曲线的计算公式:

$$Q(L) = (\text{cumulative}(L + w/2) - \text{cumulative}(L - w/2)) / w \quad (1)$$

其中: w 是采样窗口长度; Q 为裂缝强度; L 是测量深度。

裂缝强度曲线可以被粗化到模型中进行模拟,得到的属性体可以作为强度属性来约束产生裂缝网络,产生一条曲线,实际上就是将离散的裂缝观测数据转换为统计值来描述裂缝的过程。

2.1.2 非取心井段裂缝强度的标定

由于取心井数和井段只占A区块井数和层段的小部分,其它未取心井段根据气测等资料解释的三类裂缝发育井段无法直接求取裂缝强度曲线,需要用取心井段的裂缝强度曲线标定。

A地区根据八口井部分井段的岩心裂缝描述数据得到取心井段的裂缝密度曲线;计算出三类裂缝储层对应裂缝密度的范围和均值,这样便可将非取心段的裂缝密度曲线标定。

一类:岩心裂缝密度0.5~1.5,平均1.0;二类:岩心裂缝密度0.2~0.5,平均0.3;三类:岩心裂缝密度0.1~0.2,平均0.15。

2.1.3 裂缝强度属性体

在裂缝网络模型的建立中,非常重要的一个约束条件就是裂缝强度属性体,它是单井裂缝解释与裂缝空间发育规律性研究的充分结合。结合单井裂缝强度曲线,最终建立了比较符合该区块裂缝发育的趋势体如图3所示。

2.1.4 裂缝建模参数设置

在前期裂缝基础地质分析的基础上,利用软件根据裂缝的产状及分布,对裂缝进行参数设置,包括裂缝空间分布、产状、长度、开度等。裂缝的空间分布是通过前面生成的裂缝强度属性体,作为裂缝分布强度重要约束条件。

A地区,层理缝延伸长度0~25 m,均值为10 m,

2.3 裂缝模型与岩心描述的吻合度分析

裂缝DFN模型是基于对研究区地质条件深入认识的基础上,在对天然裂缝的空间发育特征进行预测的情况下建立的,裂缝模型的准确性可以通过与岩心观察描述成果的吻合度来评价。裂缝模型与岩心描述吻合率如表1所示。根据岩心描述吻合率可以发现,该模型准确率较高,可以基于此模型对水平井压前压后产量进行预测与分析。

表1 裂缝模型与岩心描述吻合率统计
Table 1 Statistics of anastomosis rate between fracture model and core description

井号	岩心描述裂缝总条数	裂缝模型与岩心描述吻合条数	裂缝模型与岩心描述不吻合条数	吻合率, %
HA14	52	44	8	85
HA16	112	103	9	92
HA18	31	25	6	81
YING12	28	23	5	82
YING15	140	123	17	88
YING 16	129	116	13	90
YING 18	44	38	6	86
GUPING1	54	51	3	94
平均				87.25
合计	590	523	67	

3 压裂效果分析

HA14井是A地区的一口预探井。录井显示本井泥岩中纵横裂缝十分发育,形成了泥岩裂缝储集层。在1 951.70~2 081.70 m连续钻井取心中共见棕灰色

油浸粉砂岩0.45 m/层,灰色油迹粉砂岩0.17 m/层,深灰色含气含钙粉砂岩0.77 m/层。气测录井在Q组见9层异常显示,全烃最大含量1.8%~8.0%,一般1.0%~2.5%,基值0.3%~1.5%。另外,该井完钻井壁取心后,在循环钻井液过程中曾发生气浸现象,从原油颜色和槽面显示时间推断,发生油气浸的原油气泡来自于泥岩裂缝。

钻井取心显示裂缝较为发育,钻井取心在泥岩中延伸长度超过5 cm的纵向裂缝就达18条,其中最长的两条长达74 cm,水平裂缝由于多呈闭合状态,且断面不规则,肉眼不易观察确定,但该井仅见到含油的水平裂缝就达26层,说明该井的水平裂缝是极为发育的。纵向含油裂缝2条,相对比较起来是发育的。

根据裂缝建模可知,HA14井所处部位G4-K1qn1层段泥岩裂缝储层物性较好,孔隙度、渗透率相对较高,水平渗透率 K_h 的高值在 $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 左右,水平渗透率 K_h 略小,约为 $0.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,垂向渗透率的高值在 $0.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 左右。HA14井水平应力差较小,与上下地层之间有一定的应力遮挡,南北向的高角度构造缝占54%,有利于压裂改造形成缝网。根据微地震资料解释结果,压裂后形成的人工裂缝形态较为复杂,网状裂缝发育,单条裂缝的走向以近南北向和近东西向为主。

HA14井射孔后试油平均产能为0.43 t/d,利用前面建立的三维裂缝模型采用油藏数值模拟方法进行产量计算得到的日产油为0.45 t/d(图6a),获得地层的有效渗透率为 $0.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,预测结果与实际结果相差很小,再一次验证了模型的准确性。

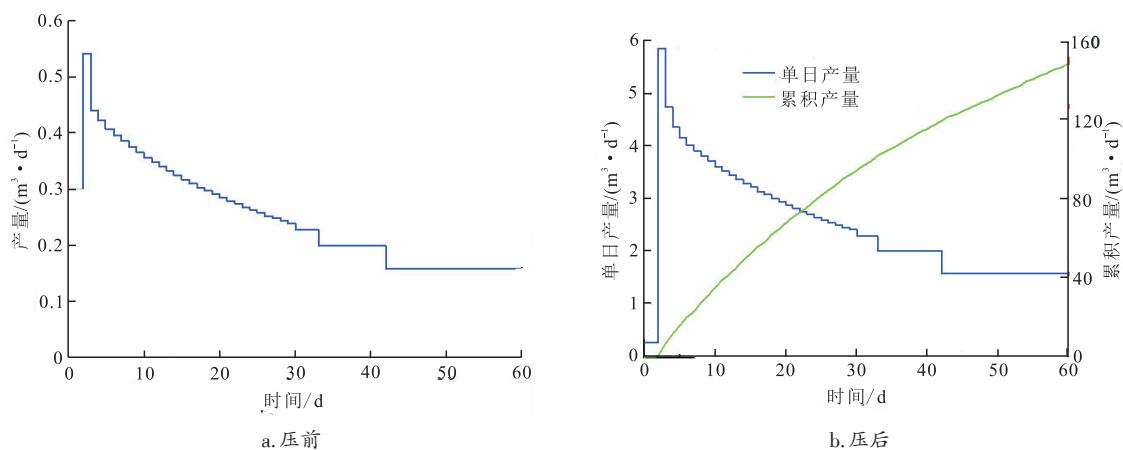


图6 HA14井压前压后产量计算曲线

Fig. 6 Productivity calculated curves before and after fracturing of well HA14

HA14井为一类储层井,在三维裂缝模型中实现天然裂缝与人工裂缝的耦合,通过数值模拟计算得到HA14井压后理论产量为4.1 t/d,理论增产效果明显(图6b)。对于一类储层可通过这种方法模拟计算,从而对单井压裂设计进行优化。

4 结论

通过对储层裂缝发育层段及产状特征进行分析,充分结合单井裂缝解释与裂缝空间发育规律,构建裂缝强度属性模型以及人工裂缝与天然裂缝的耦合模型,对比裂缝模型与岩心描述吻合度验证模型的准确性较高,得出结论如下。

1) 根据岩心分析结果可知,大庆A地区裂缝产状主要以层理缝为主,并具有一定数量的高角度构造缝。高角度构造缝可以与人工裂缝组成缝网,并切割水平层理缝,使水力压裂达到较好的改造效果。

2) 建立的以裂缝强度属性为约束条件的裂缝模型能很好地预测天然裂缝的数量及走向,基于此模型可对水平井压前压后产量进行预测与分析。

3) 该模型能准确地进行压前压后效果分析,因此,可采用该模型对单井压裂设计进行优化以及为该区块其它井的压裂施工提供指导。

参考文献

- [1] 白玉彬,赵靖舟,陈孝平,等. 蟠龙油田长2储层裂缝分布及油气地质意义[J]. 断块油气田, 2012, 19(1):61-64.
- [2] 董光,邓金根,米海燕,等. 重复压裂前的地应力场分析[J]. 断块油气田, 2012, 19(4):485-488, 492.
- [3] 宋梅远. 渤南洼陷泥岩裂缝油气藏储层发育及成藏规律研究[D]. 中国石油大学, 2011.
- [4] 王秀玲,季玉新,刘玉珍,等. 应用地震吸收分析技术预测裂缝性储层[J]. 油气地球物理, 2003, (02):44-46.
- [5] 刘成斋. 泥岩裂缝油藏地球物理特征与检测方法[D]. 成都理工大学, 2004.
- [6] 朱贺. 泥岩裂缝性储层闭合压力及应力敏感性研究[D]. 东北石油大学, 2012.
- [7] 霍凤龙. 古龙地区泥岩裂缝油藏成藏条件及地球物理特征研究[D]. 浙江大学, 2012.
- [8] 叶成林. 苏53区块天然裂缝特征及对水压致裂的影响[J]. 天然气技术与经济, 2016, 10(1):8-11+81.
- [9] S L Montgomery, D M Jarvie, K A Bowker, et al. Mississippian Barnett Shale, Fort Worth Basin north-central Texas Gas-shale play with multi-trillion cubic foot potential[J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(6): 963-966.
- [10] K A Bowker. Barnett shale gas production, Fort Worth Basin Issues and discussion[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 523-533.
- [11] D G Hill, T E Lombardi, J P Martin. Fractured gas shale potential in New York[C]. Colorado Arvada, 2002.
- [12] Nelson R.A. Geologic analysis of naturally fractured reservoirs contributions in petroleum geology and engineering[C]. Houston Gulf Publishing Company, 1985: 320.
- [13] 陈章明,张树林,万龙贵. 古龙凹陷北部青山口组泥岩构造裂缝的形成及其油藏分布的预测[J]. 石油学报, 1988, 9(4): 7-15.
- [14] 陈佳良. 裂缝性储层的预测及应用[J]. 勘探地球物理进展, 2004, 27(1):35-40.
- [15] D G Hill, C R Nelson. Reservoir properties of the Upper Cretaceous Lew is shale a new natural gas play in the San Juan Basin. AAPG Bulletin, 2000, 84(8):1240.
- [16] Curtis J.B. Fractured shale-gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11):1921-1938.
- [17] D Warlick. Gas shale and CBM development in North America [J]. Oil and Gas Financial Journal, 2006, 3(11):1-5.
- [18] 陈宝玲. 泥岩裂缝油藏勘探试验研究[C]. 大庆油田勘探开发研究院, 1992.
- [19] 吴河勇. 松辽盆地古龙南地区泥岩裂缝及其含油特征的初步研究[C]. 大庆油田勘探开发研究院, 1985.
- [20] 胡望水,雷志诚,许辰,等. 白音查干凹陷锡林好来油田白云质泥岩储层研究[J]. 特种油气藏, 2013, 20(1):11-14.
- [21] 丁文龙,许长春,久凯,等. 泥页岩裂缝研究进展[J]. 地球科学进展, 2011, 26(2):135-142.
- [22] 张奎华. 密度投影技术在页岩裂缝储层预测中的应用—以渤南洼陷罗家地区沙三段下亚段为例[J]. 油气地质与采收率, 2013, 20(3):46-48.
- [23] 苗青,周存俭,罗日升,等. 碳酸盐岩裂缝型油藏裂缝预测及建模技术[J]. 特种油气藏, 2014, 21(02):37-40+152.

(编辑 常燕)