

裂缝发育的特低渗透砂岩储层特征

宋晓威¹, 齐亚东², 于荣泽³, 卞亚南³, 马洋³, 王博杨³, 魏森³

1. 中国石油天然气勘探开发公司, 北京 100034
2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083
3. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 廊坊 065007

摘要 裂缝的发育对特低渗透砂岩储层有重要影响。基于室内实验数据,从孔渗关系、微观孔隙结构、应力敏感性及油水两相渗流等角度对裂缝发育储层的特征进行了分析,结果表明:与裂缝不发育的储层相比,相同孔隙度下裂缝发育储层的渗透率更高,孔隙度10%~20%时,裂缝发育储层渗透率约为裂缝不发育储层的3~5倍;渗透率相同时,裂缝发育储层喉道半径分布范围更宽,大尺寸的喉道比例更高,主流喉道半径更大,渗透率主要由大喉道贡献;裂缝发育储层应力敏感性更强,有效应力增大引起的渗透率损失约为裂缝不发育储层的2~3倍;裂缝发育储层束缚水饱和度和残余油饱和度均较高,两相共渗区范围窄,随着含水饱和度的增大,油相曲线急剧下降,水相曲线上凸型快速抬升,且幅度很大,无水采油期很短且期内采出程度低,见水后含水率急剧上升,最终采收率很低。

关键词 特低渗透;砂岩储层;裂缝;孔渗关系;微观孔隙结构;应力敏感性;两相渗流

中图分类号 TE348

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.07.002

Characterization of fractured ultra-low permeability sandstone reservoirs

SONG Xiaowei¹, QI Yadong², YU Rongze³, BIAN Ya'nan³, MA Yang³, WANG Boyang³, WEI Sen³

1. China National Oil-Gas Exploration & Development Corporation, Beijing 100034, China
2. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China
3. Langfang Branch, PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Langfang 065007, China

Abstract Ultra-low permeability sandstone reservoirs are significantly influenced by development of natural fractures. Based on laboratory experiments, fractured ultra-low permeability sandstone reservoirs were detailedly characterized in terms of porosity-permeability relationship, micro-pore structure, stress sensitivity, and oil-water two-phase flow. The results show that permeability of fractured reservoir was higher than that of non-fractured one under equal reservoir porosity. When the reservoir porosity ranged from 10% to 20%, the permeability of fractured reservoir was approximately 2-4 times higher than that of non-fractured one. Compared with experiments on non-fractured reservoir, fractured reservoir is featured by larger throat radius span, higher proportion of large-radius throats, larger radius of dominant throats, and major contribution of large-radius throats to permeability under equal permeability. Fractured reservoir is more stress-sensitive, and the corresponding permeability loss of effective stress increase was 1-2 times higher than that of non-fractured one. Oil-water two-phase flow in fractured reservoir is featured by higher bound water and residual oil saturations, shorter common-flow interval, rapid oil relative permeability decline and water relative permeability increase with the increase of water saturation, short water-free production period, rapid water-cut increase after water break-through and low ultimate recovery factor.

Keywords ultra-low permeability; sandstone reservoirs; fractures; porosity-permeability relationship; micro-pore structure; stress sensitivity; two-phase flow

收稿日期:2014-11-05;修回日期:2015-01-30

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05018-005)

作者简介:宋晓威,工程师,研究方向为石油天然气勘探开发,电子邮箱:songxiaowei@cnpcint.com

引用格式:宋晓威,齐亚东,于荣泽,等.裂缝发育的特低渗透砂岩储层特征[J].科技导报,2015,33(7):20-24.

从新增探明油气储量、低-特低渗透油气产量、产能建设规模、剩余油气资源看,低-特低渗透油气资源都将是未来油气发展的主流^[1],其中,砂岩型低-特低渗透油气资源占有主体地位。低-特低渗透砂岩油藏一般都发育有不同程度的裂缝,裂缝的存在直接关系到油田的注水效果、层系划分以及井网部署^[2]。深入认知裂缝发育的特低渗透砂岩储层的特征对于开发好这类油藏意义重大。本文基于室内实验数据,从孔渗关系、微观孔隙结构、应力敏感性以及油水两相渗流等,对裂缝发育储层的特征进行剖析。

1 孔渗关系特征

对采自大庆油田的80块特/超低渗透砂岩样品进行了孔隙度、渗透率等基础参数的测试,测试结果显示,样品渗透率分布范围为 $0.10 \times 10^{-3} \sim 5.60 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,孔隙度分布范围为9.80%~20.11%。就全样本而言(图1所有数据点),随孔隙度的增大,渗透率呈现增大趋势,但二者相关性较差。部分样品中发育有微小裂缝是导致孔渗关系规律性不强的根本原因。外观及镜下统计结果表明,20%的样品发育有微小裂缝,这些微小裂缝对改善储集空间(对应于孔隙度)影响有限,但可以有效沟通孔隙,进而降低流体渗流阻力,显著提高储层的渗透性。当然,这一特点在其他岩性中同样有所表现^[4]。

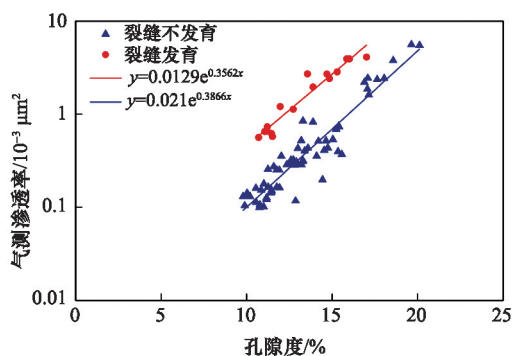


图1 裂缝发育对孔渗关系的影响

Fig. 1 Influence of fractures on porosity-permeability relationship

按照裂缝发育与否对样品进行分类统计,每类样品的孔-渗相关性明显增强。由图1可见,渗透率与孔隙度呈现良好的指数关系;孔隙度取值相同时,裂缝发育样品的渗透率明显高于裂缝不发育样品。例如,孔隙度取值10%~20%范围时,裂缝发育样品的渗透率约为裂缝不发育样品渗透率的3~5倍,且孔隙度越小,渗透率相差的倍数越高。典型样品306[#]发育有微小裂缝,其实测孔隙度为10.87%,实测渗透率为 $1.089 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

2 微观孔隙结构特征

部分样品进行了恒速压汞测试,通过对测试数据的分

析,可以清晰地获得样品微观孔隙结构的详细信息。所有喉道中,对渗透率累积贡献率达到80%以前的喉道半径加权平均值称为主流喉道半径,可见,该值定量反映了对渗流起主控性作用的通道的主体尺寸,是最重要的喉道评价参数。图2给出了岩样主流喉道半径与渗透率的关系曲线,由图2可知,对于裂缝发育的砂岩样品,主流喉道半径与渗透率之间呈现良好的半对数关系,且随着渗透率的增大主流喉道半径增大。渗透率相同而裂缝发育的砂岩样品主流喉道半径明显要大。

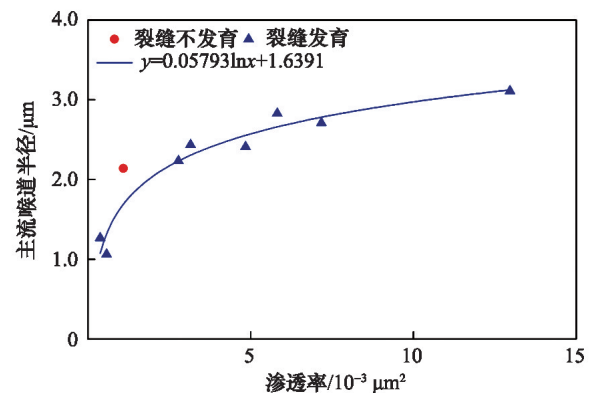


图2 主流喉道半径与渗透率关系

Fig. 2 Relationship between permeability and the average radius of dominant throats

以306[#]样品为例,其实测主流喉道半径为2.14 μm ,假设其不发育裂缝,按实测渗透率($1.089 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)推算出的主流喉道半径应为1.69 μm ,明显小于实际数值,导致这一现象的根本原因在于样品喉道半径分布特征上的差异。如图3(a)所示,306[#]样品的喉道半径分布曲线形状较为复杂,1.00 μm 以下的较小喉道占有比例较高,但对渗透率的贡献程度较小;而1.00 μm 以上的较大喉道占有比例虽无明显优势,但分布范围广泛,曲线上表现出明显的拖尾现象,最大喉道半径接近3.00 μm ,且对渗透率做出主要贡献。比较上述306[#]样品与48-3[#]样品($0.425 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)测试结果,其喉道半径分布曲线(图3(b))光滑且形状简单,参照此特征推断,如果306[#]样品未发育有裂缝,其喉道半径本应按照图3(a)中的蓝色虚线分布。由此可见,这段较长的“拖尾”正是微裂缝在微观上的具体体现,也正是这些微裂缝对渗流起着主导性的贡献,相应地,其主流喉道半径更偏向于大喉道值。

与306[#]相比,渗透率相似的163[#]样品($1.128 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)喉道半径分布特征明显不同,从图3(c)看,163[#]样品喉道半径分布曲线和渗透率贡献曲线均表现出近似正态分布的特征,且二者的峰值对应的喉道半径相差较小,换言之,占比最大的喉道级别对渗透率的贡献程度相应地也大,因而,其主流喉道半径接近于占比最大的喉道半径值。

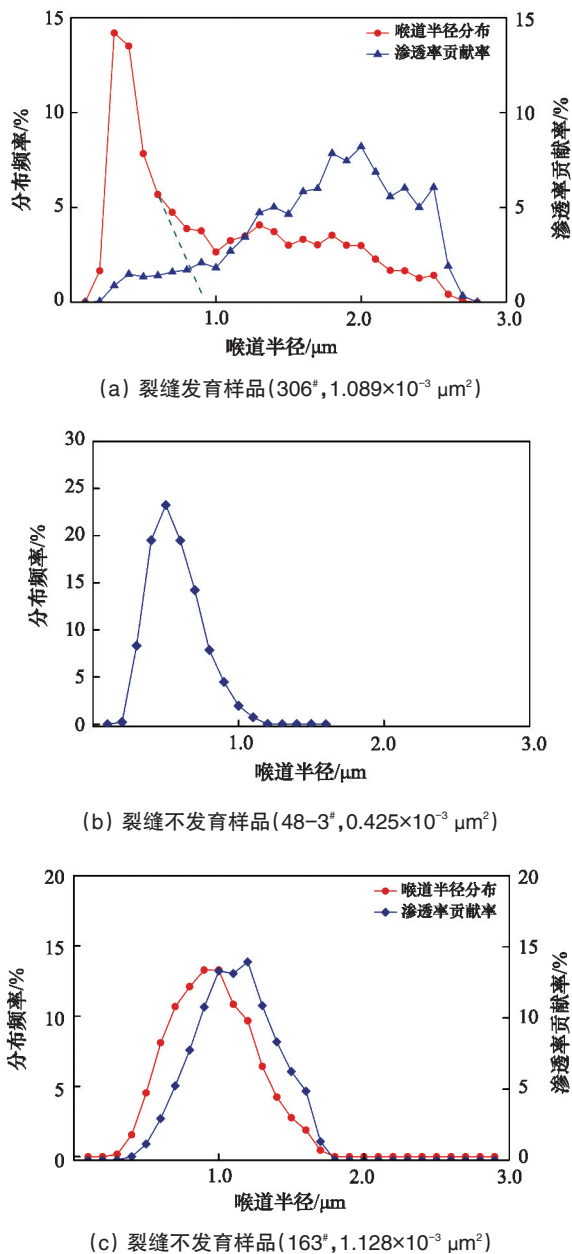


图3 裂缝发育与否在喉道半径分布曲线上的表现特征
Fig. 3 Throat radius distribution of fractured and non-fractured samples

3 应力敏感性特征

选取22块不发育裂缝的样品和8块发育裂缝的样品进行应力敏感性测试,并对两类样品的应力敏感特征进行了对比分析,结果表明裂缝发育与否对储层的应力敏感程度有很大的影响^[5]。

实验过程中,有效应力由5 MPa逐渐增大至29 MPa,从图4(a)看,有效应力增至最大值后,8块裂缝发育样品的渗透率最终损失率分布在36.91%~82.03%,均值57.37%。裂缝不发育的样品渗透率最终损失分布在10.45%~82.58%,均值28.62%。结合表1中的对比数据可以看出,裂缝发育时,有效

应力增加引起的渗透率损失更大,约为裂缝不发育时的2~3倍。从图4(b)看,有效应力从29 MPa降至5 MPa后所有样品的渗透率均不能完全恢复,渗透率仍有损失。裂缝发育的样品渗透率损失率范围在28.31%~62.89%,平均为45.47%,而裂缝不发育的样品渗透率损失率范围在3.28%~64.00%,平均为18.55%。结合表1结果可知,有效应力减小后渗透率虽有所恢复,但裂缝发育的样品无法恢复的渗透率损失约为裂缝不发育样品的5倍。

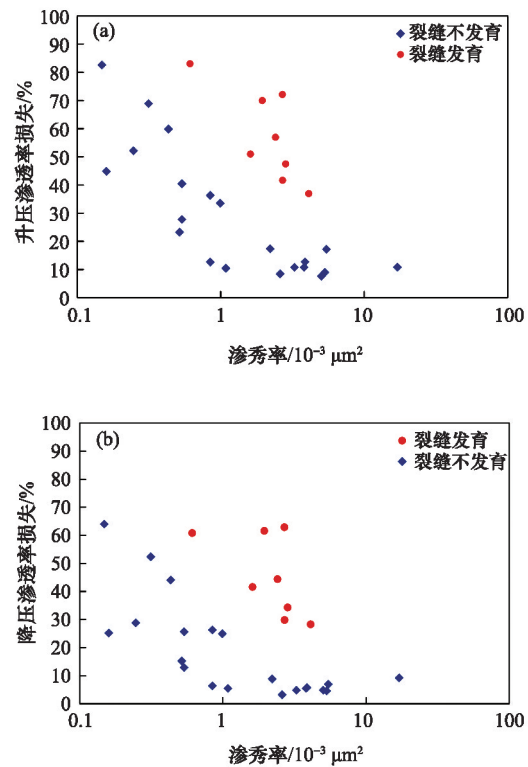


图4 微裂缝发育与否对渗透率损失的影响

Fig. 4 Influence of fractures on permeability loss factor

表1 裂缝发育与否对应力敏感性的影响对比

Table 1 Comparison of stress sensitivity of fractured and non-fractured cores under similar permeability

岩心 编号	气测渗透率/ 10 ⁻³ μm ²	升压后渗透率 最大损失/%	降压后渗透率 依旧损失/%	微裂缝 是否发育
51-2 [#]	0.613	83.03	60.78	是
192-3 [#]	0.537	27.76	12.96	否
316-1 [#]	2.410	56.88	44.42	是
188-2 [#]	2.213	17.35	8.87	否
314-2 [#]	4.106	36.91	28.31	是
191-2 [#]	3.875	12.74	5.77	否

这主要是因为含裂缝的岩心中,对渗透率起主要作用的是裂缝和喉道。当有效应力增加后,裂缝首先闭合,渗透率大幅度降低。裂缝不发育岩心的渗透率主要受到喉道的控制。喉道与裂缝相比,闭合难度大,因而施加相同的有效应力时,裂缝不发育的岩心渗透率降低幅度要小很多。当有效应力降低时,由于喉道的弹性比裂缝要好得多^[6],因此主要

是喉道恢复,而裂缝不易恢复,以致于含裂缝岩心的渗透率恢复程度明显比不含裂缝的岩心差。

4 两相渗流特征

选取典型的裂缝发育样品和裂缝不发育样品进行了油水相对渗透率测试,并对实验结果进行了对比分析(表2)。

表2 裂缝发育与否对相渗曲线特征参数的影响

Table 2 Comparison of characteristic parameters of relative permeability curves of fractured and non-fractured cores under similar permeability

样品	气测渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	基准渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	气测渗透率/基准渗透率	束缚水饱和度/%	残余油饱和度/%	等渗点饱和度/%	两相共渗区宽度/%	最高水相相对渗透率	含水98%时的驱油效率/%	最终驱油效率/%
裂缝发育(306 [#])	1.089	0.049	22.05	44.76	36.45	51.26	18.79	0.410	31.98	34.01
裂缝不发育(230-1 [#])	1.026	0.029	35.76	32.82	29.50	52.63	37.67	0.295	51.52	56.08

从相渗曲线特征参数看,裂缝发育样品的束缚水饱和度较高,达44.76%;残余油比例较大,残余油饱和度达36.45%;两相共渗区宽度较窄,仅为18.79%;等渗点饱和度为51.26%;最高水相相对渗透率较高,为0.410。而裂缝不发育的样品束缚水饱和度较低,为32.82%;残余油比例也较小,为29.50%;两相共渗区范围较宽,达37.67%;等渗点饱和度为52.63%;最高水相相对渗透率较低,为0.295。

从相渗曲线形态来看,裂缝发育的样品(图5(a))油水两相共渗区的跨度很小,随着含水饱和度的增大,油相曲线急剧下降,曲线光滑,水相曲线呈上凸型,抬升幅度很大,含水率增长迅速;而裂缝不发育的样品(图6(a))油水两相共渗区

跨度很大,随着含水饱和度的增大,油相曲线下降较为缓慢且曲线光滑,水相曲线呈S形抬升,抬升幅度不如裂缝发育的样品大,含水率增大的速度较为舒缓。

从水驱油特征曲线来看,裂缝发育的样品(图5(b))注入水突破很早,无水采出程度很低,仅为7.56%,见水后,含水率突然上升,低含水、中高含水、特高含水阶段均有较为可观的原油采出,但最终采收率很低,仅为34.01%;而对于裂缝不发育的样品而言(图6(b)),注入水突破较晚,无水采出程度较高,可达28.69%,见水后,含水率上升速度比裂缝发育的样品慢,中高、特高含水期采出程度增幅较大,可达22.80%,最终采收率很高,可达56.08%。

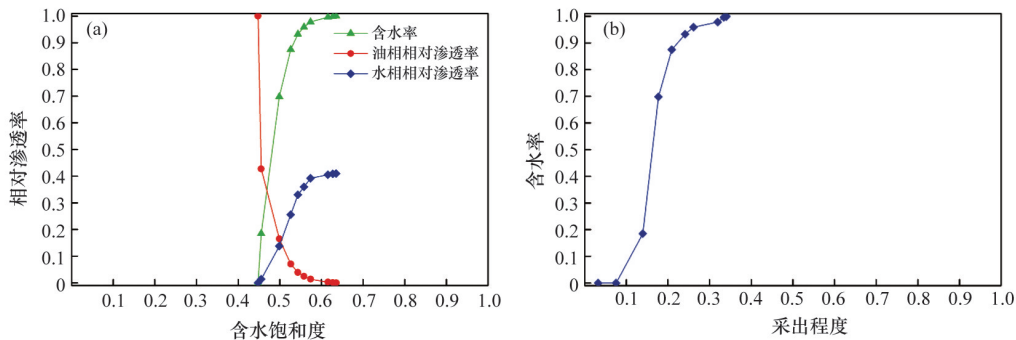


图5 裂缝发育样品(306[#])实验测试相渗曲线(a)及采出程度曲线(b)

Fig. 5 Experimental relative permeability curve (a) and oil recovery curve (b) of fractured sample (306[#])

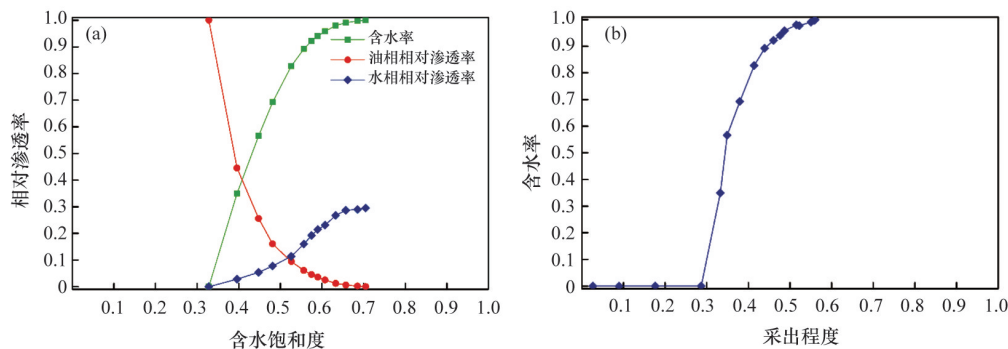


图6 裂缝不发育样品(230-1[#])实验测试相渗曲线(a)及采出程度曲线(b)

Fig. 6 Experimental relative permeability curve (a) and oil recovery curve (b) of non-fractured sample (230-1[#])

由此可见,裂缝发育样品的两相渗流特征明显区别于裂缝不发育的样品,引起这种显著差异的根本原因在于样品的微观孔隙结构特征,306#样品微观喉道半径分布曲线出现拖尾现象,表明样品中发育有微裂缝和大孔隙,且分选较差,注水驱替时,注入水首先沿这些渗流阻力小的通道驱替原油^[7],水相渗透率抬升较快^[8],但由于分选差,这些孔隙和裂缝很快被突破,导致无水采油期很短,无水采出程度很低,优势通道既已形成,注入水继续驱替基质中的原油难度显著增大,因而后期采出程度的增大幅度较为有限,最终采收率很低。

5 结论

裂缝的发育对特低渗透砂岩储层有着重要的影响,从室内实验角度来看,与裂缝不发育的储层相比,裂缝发育特低渗透砂岩储层的特征十分显著。

1) 相同孔隙度下裂缝发育储层的渗透率更高,孔隙度10%~20%时,裂缝发育储层的渗透率约是裂缝不发育储层的3~5倍,且孔隙度越小,相差倍数越大。

2) 渗透率相同时,裂缝发育储层的喉道半径分布范围更宽,大尺寸的喉道所占比例更高,主流喉道半径更大,渗透率主要由大喉道贡献。

3) 裂缝发育储层的应力敏感性更强,有效应力增大引起的渗透率损失约是裂缝不发育储层的2~3倍;而有效应力降低后,渗透率无法完全恢复,裂缝发育储层的渗透率损失约为裂缝不发育储层的5倍。

4) 裂缝发育储层的束缚水饱和度及残余油饱和度均较高,两相共渗区范围很窄,随着含水饱和度的增大,油相曲线急剧下降,水相曲线上凸型快速抬升,且幅度很大,无水采油期很短且期内采出程度低,见水后含水率急剧上升,最终采收率很低。

参考文献 (References)

[1] 胡文瑞. 中国低渗透油气的现在与未来[J]. 中国工程科学, 2009, 11(8): 29-37.
Hu Wenrui. The present and future of low permeability oil and gas in China[J]. Engineering Sciences, 2009, 11(8): 29-37.

[2] 王瑞飞, 陈明强, 孙卫. 特低渗透砂岩储层微裂缝特征及微裂缝参数的定量研究——以鄂尔多斯盆地沿25区块、庄40区块为例[J]. 矿物学报, 2008, 28(2): 215-220.
Wang Ruifei, Cheng Mingqiang, Sun Wei. Quantitative research on the characteristics of and parameters for micro cracks in ultra-low permeability sandstone reservoirs: Taking Yan25 and Zhuang40 areas in the Ordos Basin for example[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2008, 28(2): 215-220.

[3] 王景, 凌升阶, 南中虎. 特低渗透砂岩微裂缝分布研究方法探索[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(2): 51-53.
Wang Jing, Ling Shengjie, Nan Zhonghu. Micro-fractures distribution in extremely lower permeable sandstone reservoirs of Yanchang Formation and its geologic significance, Ordos Basin, Northwest China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(2): 51-53.

[4] 王拥军, 李治平, 冉启全, 等. 火山岩储层微裂缝研究[J]. 国外测井技术, 2006, 21(3): 27-29.
Wang Yongjun, Li Zhiping, Ran Qiquan, et al. Study on microfractures in volcanic reservoirs[J]. World Well Logging Technology, 2006, 21(3): 27-29.

[5] 齐亚东, 战剑飞, 李晓明, 等. 特低渗透砂岩储层应力敏感性实验[J]. 科技导报, 2012, 30(3): 49-52.
Qi Yadong, Zhan Jianfei, Li Xiaoming, et al. Experiments on the stress sensitivity of ultra-low permeability sandstone reservoirs[J]. Science and Technology Review, 2012, 30(3): 49-52.

[6] 郝明强, 杨正明, 刘学伟, 等. 裂缝性低渗透油藏应力敏感性研究[J]. 新疆石油地质, 2006, 27(4): 471-473.
Hao Mingqiang, Yang Zhengming, Liu Xuewei, et al. A study on pressure sensitivity of fractured low permeability reservoirs[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2006, 27(4): 471-473.

[7] 张莉, 杨亚娟, 岳乐平, 等. 哈南阿尔善油藏微裂缝特征及其对开发的影响[J]. 石油与天然气地质, 2001, 22(2): 158-160, 193.
Zhang Li, Yang Yajuan, Yue Leping, et al. Characteristics of micro-fractures and their influence on waterflooding in Aershan Reservoir, Hanan Oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2001, 22(2): 158-160, 193.

[8] 张国辉, 任晓娟, 张宁生. 微裂缝对低渗储层水驱油渗流规律的影响[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2007, 22(5): 44-47, 51.
Zhang Guohui, Ren Xiaojuan, Zhang Ningsheng. Experimental study on the effect of micro-fracture on the water displacing oil law in low-permeability reservoir[J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2007, 22(5): 44-47, 51.

(责任编辑 刘志远)

《科技导报》“卷首语”栏目征稿

“卷首语”栏目每期邀请一位中国科学院院士和中国工程院院士就重大科技现象、事件,以及学科发展趋势、科学研究热点和前沿问题等,撰文发表个人的见解、意见和评论。本栏目欢迎院士投稿,每篇文章约2000字,同时请提供作者学术简历、工作照和签名电子文档。投稿邮箱:kjdbbjb@cast.org.cn。