

压裂液浸润对页岩储层应力敏感性的影响

游利军¹,王巧智¹,康毅力¹,刘洪林²,方朝合²

(1.油气藏地质及开发工程国家重点实验室 西南石油大学,四川 成都 610500;

2.中国石油勘探开发研究院 廊坊分院,河北 廊坊 065007)

摘要:页岩储层微裂缝发育,粘土矿物丰富,潜在较强应力敏感性。页岩储层压裂液返排率低,滞留在储层中的压裂液的浸润作用可能使页岩储层应力敏感行为复杂化,从而影响增产改造效果。选取四川盆地南部志留系龙马溪组出露的富有机质页岩,开展支撑与无支撑裂缝的干岩样、压裂液滤液浸润岩样的渗透率随有效应力变化实验。实验结果表明,页岩应力敏感性由强到弱依次为压裂液浸润无支撑裂缝岩样、无支撑裂缝干岩样、支撑裂缝干岩样、压裂液滤液浸润的支撑裂缝岩样。分析认为,压裂液与页岩的物理化学作用会降低页岩裂缝表面强度,使页岩微裂缝更易压缩闭合,强化了页岩的应力敏感性;支撑剂的有效支撑能够减弱页岩的应力敏感性。通过控制压裂液滤失、促进滤液返排、优化支撑剂铺置方式以及确定合理生产压差可有效保护页岩储层。

关键词:页岩 有效应力 应力敏感 压裂液 支撑剂

中图分类号: TE258

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2014)06-0102-05

巨大的页岩气资源量以及美国页岩气的成功开发,掀起了中外页岩气开发的热潮。资源评价结果表明,全世界页岩气资源量大约等于煤层气与致密砂岩气资源量的总和。页岩气是一种可实现经济勘探开发的天然气资源,已在北美地区形成了较成熟的评价方法和勘探开发技术^[1-3]。中国四川盆地南部志留系龙马溪组富有机质页岩分布广泛,且在许多方面与北美地区具有可比性^[4]。四川盆地龙马溪组页岩基块渗透率低、微裂缝发育,但仍需要水力压裂才能获得工业气流。威远、长宁和昭通等地区的多口页岩气井压裂规模大,缝网面积可达 10^7 m^3 ,水力裂缝形成的裂缝网络虽可改善储层的渗流条件,但由于页岩储层存在超低含水饱和度及纳微米孔喉,导致压裂后6个月返排率仅为12%~55%。长期滞留在储层的压裂液浸润裂缝面,致使页岩储层岩石物理化学性质发生变化,改变了储层岩石的力学性能,从而影响了储层的应力敏感性。

Vairogss等证实应力敏感性损害能导致致密砂岩渗透率降低90%,产量下降50%^[5-6]。大量实验表明,裂缝岩样的应力敏感性强于基块岩样。以往研究多以致密砂岩或碳酸盐岩为研究对象,考虑岩石组分、裂缝、含水饱和度等地质因素以及重复施压

等工程因素对应力敏感性的影响^[7-12],对页岩主要探讨的是水化、矿物与微结构、流体敏感性对应力敏感性的影响^[13-15],而对大量滞留在储层中的压裂液对页岩储层裂缝应力敏感性影响的研究甚少。为此,笔者以四川盆地南部志留系龙马溪组出露的富有机质页岩为研究对象,开展了支撑与无支撑裂缝的干岩样、压裂液浸润岩样的渗透率随有效应力变化的实验,以期认识页岩储层裂缝的动态变化,为有效保护页岩储层提供依据。

1 实验材料与实验方法

1.1 实验材料

岩样选取 实验选取四川盆地南部志留系龙马溪组出露的富有机质页岩。该页岩储层的石英和长石等脆性矿物含量约为60%,粘土矿物含量约为35%,其中伊利石、高岭石、绿泥石和伊蒙间层矿物含量分别约为52.13%,5.12%,18.84%和23.91%;有机碳含量为0.5%~3%,有机质成熟度为2%~3%;渗透率为 $0.01 \times 10^{-3} \sim 0.05 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;孔隙度为1%~3%。龙马溪组页岩储层发育水平缝、层理缝、交叉网状缝、垂直缝、斜交缝,部分裂缝被方解石充填。

收稿日期:2014-08-29。

作者简介:游利军,男,副教授,博士,从事油气层保护理论与技术、非常规天然气、岩石物理教学和科研工作。联系电话:(028)83032118, E-mail:youlj0379@126.com。

基金项目:国家“973”计划“深井复杂地层漏失与井壁失稳机理及预测”(2010CB226705),国家科技重大专项“页岩气层工程作业适应性及储层保护对策研究”(2011ZX05018)。

在露头岩块上钻取矿物组成和物性相近的岩心柱塞,利用巴西劈裂法进行人工造缝,人工裂缝为沿岩样轴线的单条裂缝,以模拟页岩储层裂缝。分别采用无支撑裂缝干岩样、支撑裂缝干岩样、压裂液滤液浸润无支撑裂缝岩样和压裂液滤液浸润支撑裂缝岩样(表1)进行应力敏感性实验。支撑裂缝岩样采用支撑剂进行单层铺置,以模拟水力压裂支撑裂缝;压裂液滤液浸润的岩样使用现场页岩气井压裂液滤液浸润48 h。

岩样	长度/cm	直径/cm	气测渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	液测孔隙度,%	裂缝支撑方式	处理方式
CT1-29	5.06	2.50	0.000 876	2.2	无支撑	干燥
CT7-1A	3.24	2.51	0.009 76	2.4	无支撑	干燥
CT5-9B	5.97	2.51	0.000 855	1.0	无支撑	压裂液滤液浸润
CT7-23	6.14	2.50	0.000 502	2.3	无支撑	压裂液滤液浸润
CT4-04	5.12	2.50	0.008	2.8	支撑	干燥
CT7-06	5.66	2.50	0.000 453	1.9	支撑	干燥
CT1-9B	5.62	2.51	0.002 54	2.6	支撑	压裂液滤液浸润
CT5-10	5.94	2.50	0.012 8	4.9	支撑	压裂液滤液浸润

实验试剂 实验选用的压裂液为长宁地区某页岩气井使用的滑溜水压裂液,其由质量分数为0.04%~0.09%降阻剂、0.05%~0.1%杀菌剂和清水组成,pH值为7.7。支撑剂为该井现场用的40目陶粒。

1.2 实验方法

采用SCMS-C型高温高压岩心多参数自动测试系统,首先测定3,5,7,10,15,20和30 MPa加载过程各有效应力点对应的渗透率,然后测定30,20,15,10,7,5和3 MPa卸载过程各有效应力点对应的渗透率,再利用应力敏感系数评价应力敏感程度,其计算式为

$$S_s = \frac{1 - \left(\frac{K_i}{K_0}\right)^{\frac{1}{3}}}{\lg \frac{\sigma}{\sigma_0}} \quad (1)$$

式中: S_s 为应力敏感系数; K_i 为不同有效应力下渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; K_0 为初始有效应力下渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; K_i/K_0 为无因次渗透率; σ 为各测试点的有效应力,MPa; σ_0 为初始有效应力,MPa。

2 应力敏感性实验结果

支撑剂支撑对裂缝干岩样应力敏感性的影响 裂缝干岩样的无因次渗透率与有效应力的关

系(图1)表明:在有效应力由3 MPa升至20 MPa的加载过程中,无支撑裂缝干岩样CT1-29的无因次渗透率降幅较大,支撑裂缝干岩样CT7-06的无因次渗透率变化幅度较小,而随着有效应力的继续增加,无支撑裂缝干岩样CT1-29的无因次渗透率降幅逐渐变缓,而支撑裂缝干岩样的无因次渗透率降幅较大;无支撑裂缝干岩样CT1-29卸载过程的无因次渗透率小于加载过程相同有效应力的无因次渗透率。

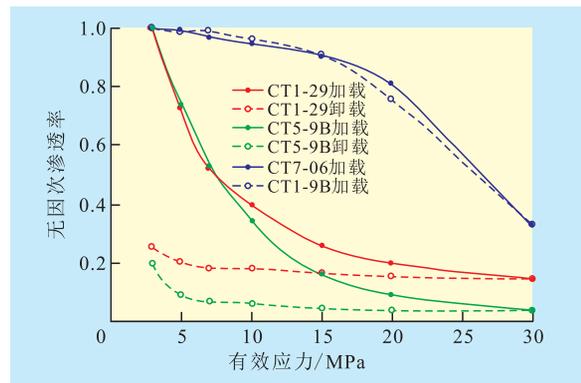


图1 不同支撑和处理方式下页岩裂缝有效应力与无因次渗透率的关系

应力敏感性评价结果表明:CT1-29的加载应力敏感系数为0.53,应力敏感性为中等偏强;CT7-06的加载应力敏感系数为0.15,应力敏感性为弱。因此,支撑剂的有效支撑减弱了页岩的应力敏感性。

压裂液浸润对无支撑裂缝岩样应力敏感性的影响 对比分析无支撑裂缝干岩样CT1-29和压裂液浸润无支撑裂缝岩样CT5-9B加载和卸载下的无因次渗透率与有效应力的关系(图1)发现:在加载过程中,当有效应力小于20 MPa时,无支撑的裂缝干岩样和压裂液滤液浸润裂缝岩样的无因次渗透率降幅均较大;加载过程和卸载过程的无因次渗透率变化曲线不重合,且卸载过程的渗透率低于加载过程中相应有效应力下的渗透率,说明应力敏感损害具有不可逆性;在卸载过程中,无支撑裂缝干岩样的渗透率恢复率大于压裂液滤液浸润的无支撑裂缝岩样,但是二者渗透率恢复率均较低。

应力敏感性评价结果表明,CT5-9B和CT1-29的加载应力敏感系数分别为0.64和0.53,应力敏感性均为中等偏强,说明压裂液的浸润作用增强了无支撑裂缝页岩的应力敏感性。

压裂液浸润对支撑裂缝岩样应力敏感性的影响 由CT7-06和CT1-9B加载下的无因次渗透率随有效应力的变化曲线可知,当有效应力小于20 MPa时,在支撑剂支撑下,裂缝干岩样与压裂液滤液

浸润裂缝岩样的无因次渗透率随有效应力变化均不明显,无因次渗透率降低均主要发生在有效应力大于20 MPa之后(图1)。CT7-06和CT1-9B的加载应力敏感系数分别为0.15和0.13,均呈现出弱应力敏感性,说明压裂液浸润作用对支撑裂缝岩样的应力敏感性影响甚微。实验岩样仅用压裂液浸泡48 h,而实际上滞留于页岩储层的压裂液长期浸润页岩储层岩石矿物,这对支撑裂缝岩样应力敏感性影响将逐渐体现。

综合分析可知,裂缝页岩应力敏感性由强到弱依次为:压裂液滤液浸润无支撑裂缝岩样、无支撑裂缝干岩样、支撑裂缝干岩样、压裂液滤液浸润的支撑裂缝岩样。

3 裂缝页岩应力敏感性机理

3.1 支撑剂支撑影响裂缝应力敏感性机理

支撑剂支撑影响裂缝应力敏感性,从而影响裂缝导流能力及压裂油气井产量的稳定性。当有效应力小于20 MPa时,无支撑裂缝岩样裂缝面微凸体在有效应力作用下易产生形变,使裂缝趋于闭合,渗透率降低,而支撑裂缝岩样中支撑剂的有效铺置使应力集中在高强度的支撑剂上,裂缝渗透率随有效应力降低不明显;当有效应力由20 MPa增至30 MPa时,由于支撑剂的逐渐嵌入,裂缝宽度逐渐降低,支撑裂缝干岩样与支撑裂缝压裂液滤液浸润岩样的渗透率降低幅度均有所增加^[16],但总体上支撑剂的支撑作用减缓了渗透率降低速率,减弱了裂缝岩样应力敏感性。因此,在压裂液放喷返排时,应当确定合理的生产压差,这样不仅可以防止支撑剂从裂缝中回流返排出,而且可以降低裂缝的有效应力增加幅度,以避免加剧应力敏感性。

室内实验模拟支撑剂支撑裂缝铺置均匀,但实际施工时很难保证裂缝网络均能被均匀支撑,而与水力裂缝连通的天然微裂缝没有支撑剂支撑,导致无支撑裂缝与支撑裂缝共存,随着气体的采出,有效应力增加,无支撑裂缝快速闭合,使气井产量大幅降低,表现为页岩气井初期产量较高,但降幅较快,随后又以较低产量长期稳产。

3.2 压裂液浸润与页岩应力敏感性

四川盆地威远地区某页岩气井,压裂液注入量为 $2.35 \times 10^4 \text{ m}^3$,压裂后15个月返排量为 $6.97 \times 10^3 \text{ m}^3$,返排率仅为29.7%。模拟四川盆地龙马溪组露头含水裂缝性页岩返排过程,返排120 h后,测得页岩含水饱和度仍为32.23%~59.69%(图2)。若裂缝

面附近的大量压裂液不能及时返排,会降低气体流动能力^[17],同时水基压裂液与页岩会发生物理化学反应^[18-20],在长期开发作业过程中会影响裂缝应力敏感性。因此,滞留压裂液的润滑作用、水化作用及侵蚀作用会影响页岩裂缝应力敏感性。

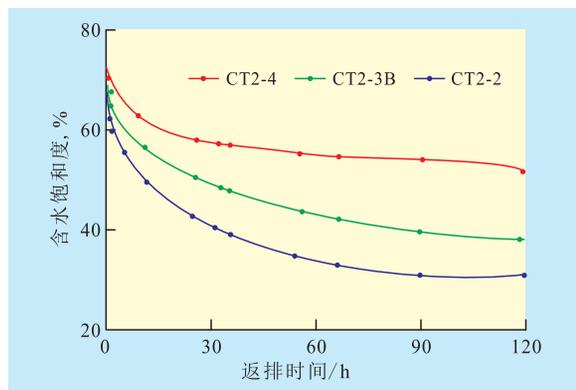


图2 四川盆地南部志留系龙马溪组含水页岩返排能力评价

滞留压裂液的润滑作用 在压裂过程中,压裂液携带支撑剂在高泵压下进入裂缝,支撑剂冲蚀裂缝面,作用在页岩颗粒表面的力大于页岩微粒间的粘着力,页岩裂缝面上的微粒脱落并堆积,渗流通道被堵塞,裂缝面不断被冲蚀打磨,裂缝面接触方式逐渐从点接触变为面接触,致使裂缝更易闭合。同时,压裂液滞留于页岩颗粒表面形成水膜^[21],在有效应力作用下,裂缝面易于发生滑移错动变形,使裂缝宽度变小,从而影响页岩的应力敏感性。

滞留压裂液的水化作用 龙马溪组页岩含有2.5%~10.4%伊蒙间层矿物^[22]。滞留压裂液长期浸润裂缝表面,伊蒙间层遇水会改变颗粒表面能,依次产生表面水化、离子水化以及渗透水化效应,而且页岩水化能量无处释放,造成局部压力升高,裂缝面附近应力场发生变化^[23],导致高含水裂缝对有效应力变化更敏感。虽然压裂液滤液浸润48 h对支撑裂缝岩样的应力敏感性影响不明显,然而在页岩气井长期生产过程中,裂缝有效应力会逐渐增大,加上滞留压裂液的浸润作用时间很长,在支撑剂支撑点处产生应力集中,超过页岩破裂压力,使支撑点附近页岩产生破碎,支撑剂嵌入程度增加,导致裂缝导流能力降低。

滞留压裂液的侵蚀作用 裂缝性页岩流体敏感性实验结果表明,龙马溪组露头页岩水敏性为中等偏弱,碱敏和酸敏性为中等偏强。如果滞留与储层的压裂液与储层岩石矿物不配伍,流体敏感性损害会改变岩石物理化学性质,从而影响页岩应力敏感性。

钻井完井液和压裂液一般均呈碱性,通常pH值大于9。碱性工作液不仅可增强粘土矿物的水化能力,而且对粘土矿物和石英等硅质矿物具有侵蚀作用。分析页岩浸润前后的力学实验结果(图3)发现:经3%KCl模拟地层水和pH值为12的3%KCl模拟地层水浸润7 d后,页岩的抗压强度由浸润前的221.2 MPa分别降至217和167.7 MPa,泊松比由浸润前的0.812分别增至0.218和0.24,而弹性模量变化趋势不同,前者由25 800 MPa增至27 300 MPa,后者降至23 900 MPa。这说明,3%KCl浸润使页岩强度略有降低,而高pH值溶液浸润使页岩强度降低显著,泊松比均增加。从pH值为12的3%KCl浸润后页岩扫描电镜照片可以看出,与干岩样扫描电镜观察的孔隙结构相比,经pH值为12的3%KCl模拟地层水浸润7 d后,侵蚀孔数量增多,方解石与粘土矿物及微晶石英之间的连接被破坏,岩石结构疏松(图4)。由此可见,碱性环境会加速裂缝面的塑性变形^[24-25],使裂缝面抗压强度降低,说明有效应力与碱液的长时间作用导致裂缝面更易发生形变,使裂缝趋于闭合,从而增强了页岩应力敏感性。

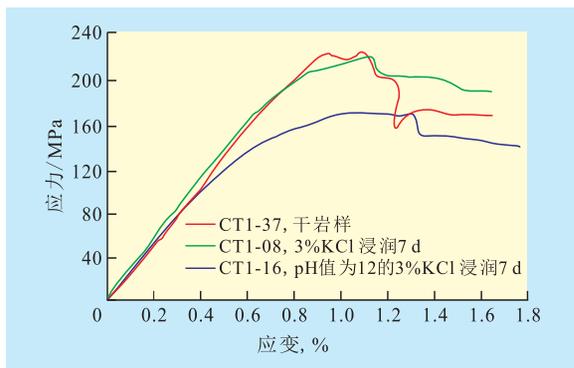


图3 流体浸润的页岩应力与应变的关系

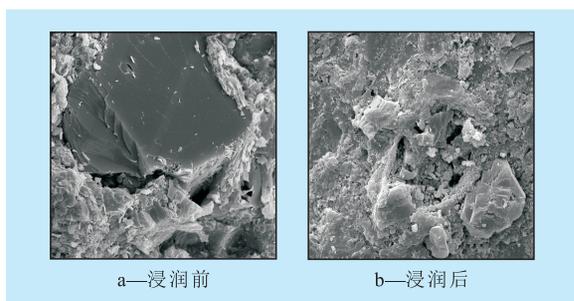


图4 页岩被碱液侵蚀7 d前后扫描电镜结果

4 应力敏感性对页岩气井产量的影响

页岩气产出是经过基块孔喉—天然裂缝—水

力裂缝一系列的串联耦合过程,任何环节受阻,都会造成气井产量降低^[26-27]。由于页岩气藏储层渗透率低,孔喉狭小,气体由基块流向天然裂缝,经过天然裂缝向水力裂缝传递,天然裂缝是天然气产出的枢纽。

随着有效应力的增加,天然裂缝受压裂液作用易于压缩闭合,影响页岩气井产量,表现为气井初期产量高并迅速递减;高强度支撑剂的有效支撑,致使人工支撑裂缝的缝宽在长时间内随着有效应力增加变化不明显,表现为气体产出中期稳产,但由于页岩气井生产寿命长,随着气体的不断产出,在逐渐增加的有效应力和压裂液浸润共同作用下,支撑剂可能会沿接触点嵌入,导致裂缝闭合,表现为气井后期低产或无产量。

由于页岩气藏存在超低含水饱和度现象^[28],促使压裂液易毛管自吸侵入且难于返排,因此,应控制压裂液滤失、降低前置液界面张力,以抑制压裂液毛管自吸并促使压裂液快速返排,并且应优选与储层配伍的压裂液、增强支撑剂铺置效率,以有利于长期发挥天然裂缝与水力裂缝在气体传质过程中的桥梁作用。

5 结束语

页岩储层具有较强的应力敏感性,支撑剂的有效支撑减弱应力敏感性,压裂液浸润增强应力敏感性。控制压裂液侵入,促进滤液返排,减少对页岩裂缝面浸润,提高支撑剂铺置效率,优化合理生产压差,可有效保护页岩储层,促进页岩气井长期稳产。

参考文献:

- [1] Jenkins D. Coalbed and shale gas reservoirs [J]. SPEJ, 2008, 60(2): 92-99.
- [2] 孟庆峰, 侯贵廷. 页岩气成藏地质条件及中国上扬子区页岩气潜力[J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(1): 11-14.
- [3] 张金川, 徐波, 聂海宽, 等. 中国页岩气资源勘探潜力[J]. 天然气工业, 2008, 28(6): 136-140.
- [4] 王玉满, 董大忠, 李建忠, 等. 川南志留统龙马溪组页岩气储层特征[J]. 岩石学报, 2012, 33(4): 553-561.
- [5] Vairogs. Pressure transient tests informations having stress sensitive permeability [J]. Journal of Petroleum Technology, 1973, 25(8): 965-970.
- [6] Thomas R D, Ward D C. Effect of over-burden pressure and water saturation on gas permeability of the tight sandstone cores [J]. Journal of Petroleum Technology, 1972, 24(2): 120-124.
- [7] 康毅力, 张浩, 陈一健, 等. 鄂尔多斯盆地大牛地气田致密砂岩气层应力敏感性综合研究[J]. 天然气地球科学, 2006, 17(3):

- 335-338.
- [8] 廖纪佳,唐洪明,朱筱敏,等.用微观方法研究西峰油田长8油层特低渗透砂岩油藏的岩石应力敏感性[J].中国石油大学学报:自然科学版,2012,36(2):27-33.
- [9] 张浩,康毅力,陈一健,等.岩石组分和裂缝对致密砂岩应力敏感性的影响[J].天然气工业,2004,24(7):55-57.
- [10] You Lijun, Kang Yili. Integrated evaluation of water phase trapping damage potential in tight gas reservoirs [C]. SPE 122034, 2009.
- [11] 游利军,康毅力,陈一健,等.考虑裂缝和含水饱和度的致密砂岩应力敏感性[J].中国石油大学学报:自然科学版,2006,30(2):59-63.
- [12] 王业众,康毅力,张浩,等.碳酸盐岩应力敏感性对有效应力作用时间的响应[J].钻采工艺,2007,30(3):105-107.
- [13] 孟英峰.泥页岩水化反应的系统仿真技术及其在油气田开发领域中的应用[D].成都:西南石油学院,2002:263-281.
- [14] 何金钢,康毅力,游利军,等.矿物成分和微结构对泥质岩储层应力敏感性的影响[J].天然气地球科学,2012,23(1):129-134.
- [15] 何金钢,康毅力,游利军,等.流体损害对页岩储层应力敏感性的影响[J].天然气地球科学,2011,22(5):916-919.
- [16] 温庆志,翟恒立,罗鸣良,等.页岩气藏压裂支撑剂沉降及运移规律实验研究[J].油气地质与采收率,2012,19(6):104-108.
- [17] 姚广聚,彭红利,雷伟,等.低渗透气藏低压低产气井解水锁技术研究及应用[J].油气地质与采收率,2011,18(5):97-99.
- [18] 王稳桃,张红,刘洪升,等.高温低伤害低摩阻压裂液体系研究与应用[J].特种油气藏,2011,18(3):100-102.
- [19] 冯夏庭.岩石破裂过程的化学—应力耦合效应[M].北京:科学出版社,2010:31-48.
- [20] Dunning J, Douglas B, Millar M, et al. The role of the chemical environment in frictional deformation: stress corrosion cracking and comminution[J]. Pageoph, 1994, 143(2): 151-178.
- [21] 郭望,陈践发,曹青,等.油气藏中气态地层水的存在及其意义[J].油气地质与采收率,2013,20(1):36-39,43.
- [22] 陈尚斌,朱炎铭,王红岩,等.四川盆地南缘下志留统龙马溪组页岩气储层矿物成分特征及意义[J].石油学报,2011,32(5):776-782.
- [23] 徐加放,邱正松,王瑞和,等.泥页岩水化应力经验公式的推导与计算[J].石油钻探技术,2004,32(1):33-35.
- [24] Southwick J G. Solubility of silica in alkaline solutions: implications for improving flooding[J]. SPEJ, 1985, 25(6): 857-864.
- [25] 侯吉瑞,刘中春,岳湘安.碱对复合体系启动中、低渗透层的影响及机理[J].油气地质与采收率,2002,9(5):51-54.
- [26] 杨建,康毅力,王业众,等.裂缝性致密砂岩储层气体传质实验[J].天然气工业,2010,30(10):39-41.
- [27] 李前贵,康毅力,张浩,等.致密砂岩气藏原地条件下储层物性与传质方式研究[J].西安石油大学学报:自然科学版,2007,22(s1):171-178.
- [28] 刘洪林,王红岩.中国海相页岩超低含水饱和度特征及超压核心区选择指标[J].天然气工业,2013,33(7):140-144.

编辑 常迎梅

(上接第101页)

参考文献:

- [1] 卢福申,曹书瑜,贺德才,等.凝胶颗粒调剖的模拟实验[J].油气地质与采收率,2004,11(6):61-63.
- [2] 赖南君,梅雪,郭方元,等.绿色交联可动凝胶在油田调剖堵水中的应用[J].钻采工艺,2012,35(3):36-39.
- [3] 沈平平,袁士义,邓宝荣,等.非均质油藏化学驱波及效率和驱替效率的作用[J].石油学报,2004,25(5):54-59.
- [4] 赵明国,刘新荣,王佩华.非均质油藏调剖效果室内物理模拟[J].大庆石油学院学报,2005,29(1):37-39.
- [5] 熊春明,唐孝芬.国内外堵水调剖技术最新进展及发展趋势[J].石油勘探与开发,2007,34(1):83-88.
- [6] 尚朝辉.大孔道非均质油藏调堵封窜参数优化模拟研究[J].油气地质与采收率,2014,21(3):62-65.
- [7] 周虔彧,杨旭,薛丽娜.一种新型调剖剂的研制[J].西南石油学院学报,2005,27(4):47-49.
- [8] 洪玲,王香增,王成俊,等.特低渗透油藏新型高效驱油剂的研究与应用——以延长油区杏子川油田王214试验区为例[J].油气地质与采收率,2013,20(3):92-94.
- [9] 王仲茂,王怀彬,胡之力.高新采油技术[M].北京:石油工业出版社,1989:203-206.
- [10] 吕鹏,王业飞,于海洋,等.振荡剪切下酚醛树脂冻胶成胶规律研究[J].石油化工高等学校学报,2011,24(6):31-35.

编辑 王星