

回压应力敏感性评价测试方法研究

田 巍¹, 朱维耀¹, 朱华银², 张雪龄¹, 王瑞明³, 李 勇³

(1. 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083;

2. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 河北 廊坊 065007; 3. 华北油田勘探开发研究院, 河北 任丘 062552)

摘要:为了寻求回压应力敏感性评价合理的测定方法,对现行部颁标准中的方法进行详细分析,并指出其存在的问题,分析认为:现行部颁标准和原标准相比有改进,但仍不具体,仅对围压作了规定,测定结果不能排除净围压变化的影响,在气藏实际开采过程中,井底压力降低导致的有效应力变化由近井地带向远处延伸,并在压降漏斗控制下越来越弱。基于上述分析,设计出一套测定回压应力敏感性的方法,该方法要求围压和上游压力恒定,并分别等于实际储层上覆压力和原始地层压力,回压从原始地层压力降低至废弃压力,分别测定各回压下渗透率变化情况,通过将该方法应用到致密砂岩,测得渗透率伤害率为 21% 左右,弱敏感,实验曲线分为陡峭段和平缓段,存在拐点,测定结果符合预期,可以将该方法推广到以后的实验和研究中。

关键词:评价;回压;应力敏感;净应力;上覆压力;渗透率变化率

中图分类号:TE37 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-1926(2015)02-0377-07

引用格式:Tian Wei, Zhu Weiyao, Zhu Huayin, *et al.* Study on testing method of back-pressure stress sensitivity evaluation[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(2): 377-383. [田巍, 朱维耀, 朱华银, 等. 回压应力敏感性评价测试方法研究[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(2): 377-383.]

0 引言

在油气藏开采过程中,随着开采的进行,储集层的孔隙压力会逐渐降低,使多孔介质颗粒原有的受力平衡状态被打破,建立新的压力平衡状态,这将使得储集层的渗流效果发生改变,这种改变是岩石变形和流体渗流相互作用和影响的结果。目前采用应力敏感性来反映岩石变形的效果,实验室可以通过改变围压渗流实验和改变回压渗流实验来评价储层的应力敏感性,2 种测试方法各有利弊,前者不能模拟储层岩石实际受力情况,只能反映岩石在不同应力作用下渗流效果的状况,但操作较为方便,后者是目前比较认可的最能反映实际储层开采过程的方法。

目前室内研究应力敏感性的文献^[1-26]很多,但大多集中在围压应力敏感实验上,对于回压应力敏感实验研究较少。有学者^[6-22]对回压应力敏感实验

进行了探索性研究,主要集中在简单变内压^[14-22]以及内压多次升降^[6,14,17-18,22]实验研究上,严格来说,仍然不能算是回压应力敏感实验。目前施行的部颁标准^[27]对该研究方法表述很不具体,这为油田工作者开展研究带来很大困难。本文在详细分析部颁标准的基础上,结合现有文献方法,并综合各方面因素,设计出了一套测试回压应力敏感性的方法,并就某油田致密砂岩岩心开展了室内研究。

1 部颁标准评价方法及问题分析

目前,由国家能源局 2010 年发布的《储层敏感性流动实验评价方法》^[27]是正在施行的储层敏感性评价方法,已经取代了 2002 年由国家经济贸易委员会颁布的标准。2 个标准都比较系统地阐述了储层敏感性实验方法,但 2010 标准和 2002 标准一样其实并不完善,尤其是回压应力敏感实验评价方法部

收稿日期:2014-06-30;修回日期:2014-09-29.

基金项目:国家重点基础研究发展计划("973")(编号:2013CB228002)资助.

作者简介:田巍(1981-),男,河南太康人,工程师,博士,主要从事油气田开发、三次采油技术等研究. E-mail:tw811227@163.com.

通讯作者:朱维耀(1960-),男,辽宁沈阳人,教授,博士生导师,主要从事渗流流体力学和油气田开发研究. E-mail:Weiyaook@sina.com.

分,提出的实验方法并不具体,这就为室内实验操作带来很多麻烦。

2002 标准关于回压应力敏感部分提出实验过程中“保持上下游压差和净围压值不变”,由于实验过程中回压是变化的,为保持上下游压差恒定,必须要改变上游压力,而上游压力的改变又要遵循“净围压值不变”这一硬性要求,这就要求实验在改变回压时必须改变围压值,这是一个连锁效应。2002 标准规定:净围压值是围压值和岩心进口压力的差值,这里使用岩心进口压力近似代替孔隙压力,忽略了岩心中压力梯度的存在,这样测得的压力分布曲线(压降漏斗)是一组互相平行的曲线,得到的回压—渗透率损害系数曲线似乎很合理。详细分析会发现:实验过程中,净围压值固定,围压是变化的,每次调整围压都将造成岩心内部压力重新分布,文献[26]表明“在不同围压下,净应力相等的点对应的渗透率值不相等”。因此,不能完全排除围压变化引起的岩石内部压力重新分布带来的对实验结果的干扰,即实验结果有可能不是回压单因素的影响,何况在实际储层开采过程中,降低采出井井底压力,不会对供给边界压力产生大的影响,只是将动用半径扩大,实验过程中保持上下游压差恒定是没有道理的,可见这种方法和实际储层开采过程的差距较大。关于流体注入方式,该标准未提及。

标准中的实验步骤是按照液体注入叙述的,而其中“每个压力点持续 30min 后,按 6.1.2.8 的规定测定渗透率”的要求不合理,如果是气体的话,30min 也许还可以达到渗流稳定,如果是液体的话,这么短的时间估计就很难达到渗流稳定了,可见这个标准中关于回压应力敏感部分的要求有很多漏洞,所幸该标准执行 8 年后已被 2010 标准取代。

2010 标准提到“实验过程中,围压大小不变,岩心出口加回压,初始回压大小与原始储层压力相同,通过改变回压的大小来实现岩心所承受净应力的变化”,“回压降低导致的净应力增加首先作用于岩石骨架颗粒”,该标准对净应力的定义是岩石所承受的围压与入口端压力的差值,细读该标准会发现,该标准认同净应力和净围压是同一概念。根据该说法,在围压不变的情况下降低回压要使“净应力增加”,那么进口压力必须是变化(降低)的,否则净应力绝不应该像该标准这样的定义,而该标准对于进出口压力差的数值大小没有规定,是否可以认为,回压降低以后,应该把进口压力也降低点,这样才能保证净应力是增加的,进口压力具体降低多少就不得而知

了,因具体情况而不同,但是最好不要使净应力过大而将岩心压碎。净应力增加会引起围压应力敏感,这样所测得应力敏感结果中围压敏感到底贡献了多少恐怕很难说清,而且有夸张回压对上游压力影响的可能,因此这也不能算是严格意义上的回压应力敏感实验,这就犯了与 2002 标准同样的错误。严格来说,回压降低确实会引起有效应力的增加,而这里有效应力的定义绝不像该标准所述的净应力。在有稳定供源的情况下,回压的降低主要影响出口段,越往进口段影响越小,这是由压力(压降漏斗)分布特点决定的。该标准对于流体注入方式规定为恒压或恒流,恒流量渗流实验过程中,压力的上升,会引起净围压的减小,这样测得应力敏感性是围压和回压综合作用的结果,文献[28]研究表明恒流注入欠妥,最好恒压注入渗流实验;同 2002 标准一样,“在每个设定净应力点处应保持 30min 以上(然后测定该应力下的渗透率)”,液体渗流 30min 真的很难稳定,不如直接表述为“待渗流稳定后,测定该压力点下的渗透率”,可以根据模拟的对象(油藏或气藏)来选取注入介质(液体或气体),然后按照相应介质的渗透率测定方法开展实验,不能一刀切式的统一为“30min 以上”。

不能否认,2010 标准和 2002 标准相比,在回压应力敏感测定方法上有一定改进,也在尽可能排除围压的影响,比如将旧标准的变围压改为现行标准的定围压,但由于其他的一些规定,最终又掉进围压应力敏感的彀里。

综合以上分析,2 个标准都采用改变进口压力的实验方法,旧标准可以归结为“三变两定”,现行标准归结为“三变一定一不定”,见表 1。表中的“变化”都是按照设定的规律改变,而表中的“不一定”则可以认为是随意的,或增加、或减小、或不变。

在实际气藏开采过程中,井底压力的降低首先作用于近井地带,并逐渐向外延伸,假设存在稳定的供给边界,便形成如示意图 1 中曲线 5—曲线 2 的“压降漏斗式”压力分布曲线,图中, a 点为供给边界, b 点为采出井井底,直线 c 为上覆压力对应的压力线,上覆压力线与压力分布曲线之间的部分即为有效应力,可以形象看出距采出井不同渗流距离的点对有效应力的变化情况,如图 1 中箭头所示部分。开采过程中,井底压力的降低导致采出井附近储层的压力大幅降低,越远处下降幅度越小,地层压力的降低,导致有效应力的增大,离采出井越远的地方净应力越小;随着开采的进行,供给边界的位置可

能向外延伸,压力曲线由图中曲线 2 过渡到曲线 1,导致渗流距离相等的点对应的压力低于上一开采状态的地层压力,如图 1 中曲线 1 中与原始地层压力相等的点出现在竖坐标轴的左侧,但下降的幅度很小,可以认为是不变的,等于原始地层压力,则其净应力也是不变的,于是采出井井底压力的降低导致压力分布曲线从图中的曲线 5 过渡到曲线 4 或者更

低压力曲线,在实验室模拟该开采过程,是通过回压的控制来模拟采出井井底压力,因此,回压应力敏感和围压应力敏感的最大区别在于前者作用于岩石出口端较大,出口端的应力作用最明显,后者作用于整个岩心,围压的变化使整个岩石的净应力整体变化,该示意图也印证了 2010 部颁标准中关于回压应力敏感测定方法存在的问题。

表 1 2002 标准和 2010 标准回压应力敏感方法对比

Table 1 The comparison with 2002 standard and 2010 standard about the method of back pressure stress sensitivity

标准	上游压力	下游压力	前后压差	围压	净围压	流体注入方式	曲线表达	临界应力
2002	变化*	变化*	定值	变化*	定值	未提及	回压—渗透率损害系数	损害系数拐点对应的压力
2010	变化*	变化*	不一定	定值	变化*	恒速或恒压	净应力—渗透率比值	渗透率变化率 20% 的前一点

注: * 表示由该标准推得的结果

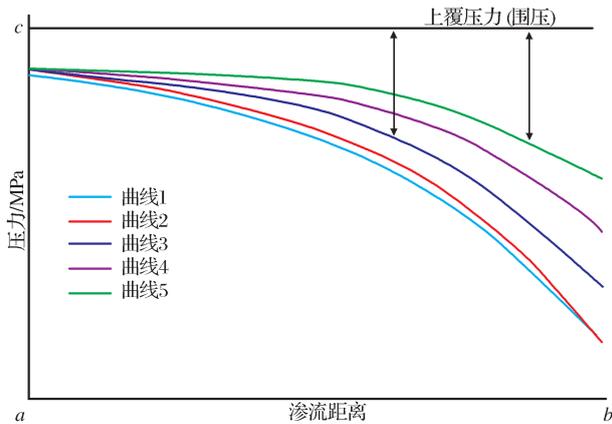


图 1 压力随渗流距离分布示意

Fig. 1 The schematic diagram of the relationship between pressure and seepage distance

示意图 1 中曲线 5—曲线 2 能很好地模拟实际油气藏开采的过程。对于油藏,注采井距是一定的,注入井持续补水补充开采过程中地层能量的损失,所以不会出现图 1 中曲线 1 的情况。因此,实验室在精确模拟地层开采条件下所测得的回压应力敏感性对于现场具有很高的参考价值。

对于应力敏感评价,目前的研究主要侧重于 2 个方面:一是科研,实验目的主要从研究的角度来分析问题,在实验室可以以任意小的净应力大小为起点开展实验,逐渐增大净应力,使岩心从松弛状态逐渐被压缩,从拟塑性形变过渡到弹性形变,从微裂缝完全张开到完全闭合和大孔隙被完全压缩而进入孔隙向中心移动的弹性形变阶段,这样求得的敏感性数值肯定要偏大,虽然对油田现场没有任何意义,但是从科研的角度看也是合理的。2010 标准有关于“净应力的间隔可参照 2.5MPa、3.5MPa、5MPa……”的表述,这么低的净应力在油田实际储层中是

不存在的;二是应用,实验目的主要是为现场应用和储层评价提供有价值的参考数据,实际油气藏都是以原始地层压力为起点开发开采的,或依靠自然能量,或依靠后续注水补充能量,但一般都不会高于原始地层压力,因此实际油气藏的初始有效应力是上覆压力与原始地层压力之差,随着开采的进行,有效应力是逐渐增大的,只有以初始有效应力为起点开展研究得到的结果对于油田现场和储层评价才有参考价值。

2 精确模拟地层评价测试方法

依据上述分析,尽量避开标准中的缺点,并结合油气田开发的实际,设计出一套能够精确模拟油气田开发过程的岩心回压应力敏感测试评价方法,实验过程中围压恒定不变,进口注入压力恒定,回压变化,进出口压差变化,净围压(按围压与进口压力差值)可以认为是定值,因此可以简称为“三定两变”。

2.1 研究方法原理

实验精确模拟实际地层条件,以围压来模拟上覆压力数值,以回压来模拟开采井井底压力大小,使注入压力等于开采初期原始地层压力,以此来模拟整个开采过程中由于采出井井底压力降低而导致的储层渗透率变化,通过渗透率的变化来反映储层在开采过程中受到的应力敏感伤害程度,渗透率数值是在上述实验条件下通过渗流实验获得。

2.2 测试流程

根据上述原理,设计出一套测试回压应力敏感的流程,以模拟实际气藏储层开采整个过程的渗透率变化情况,流程主要包括气体供气与调压系统、岩心驱替与气体计量系统、围压和回压控制系统、压力

显示与数据采集系统、温度控制系统等 5 个部分,整套装置除高压氮气瓶和数据采集系统外均置于恒温箱中,实验流程见图 2。

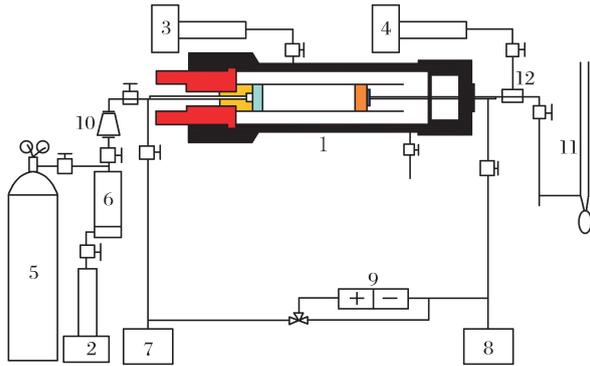


图 2 实验流程

Fig. 2 The flow chart of experiment

1 为三轴岩心夹持器;2,3,4 为多级柱塞泵;5 为高压氮气瓶;6 为中间容器;7,8 为上下游压力传感器;9 为高线性压差传感器;10 为高压调压阀;11 为皂沫流量计;12 为回压阀

在供气系统中,泵 2 的主要作用是中间容器中气体加压,注入泵使用高精度多级柱塞驱动泵(Tele-dyne isco100-DX),可根据需要设置为恒定流量或恒定压力模式,泵流量为 0.01~50.00mL/min(压力不大于 70MPa),精度为 $\pm 0.3\%$;实验采用三轴岩心夹持器来模拟地层应力特征;围压系统和回压阀仍使用高精度多级柱塞驱动泵来控制,并采用美国岩心公司生产的 BP-100 空气弹簧回压阀;压力监测采用 DXD 高精度数字压力传感器,同时采用高线性压差传感器(型号为 Validyne)来精确监测岩心两端压力差,并使用 Auto-floodTM(AFS 300TM)驱动评价系统采集上下游压力和压差;气体计量使用皂沫流量计;恒温箱可调温度 0~180℃。

2.3 测试设计步骤

考虑到实验过程中,岩心受力变化会对岩心造成不可恢复的渗透率伤害,因此,要使围压、进口压力和回压一同提高至实际储层应力状态,实验模拟实际气藏开采过程,采用逐级降低回压的方式开展实验,设计步骤如下:

(1) 接通仪器设备流程,将标准岩心铁块装填入岩心夹持器,对设备检漏,确定无问题后,取出岩心铁块,将经过处理后的实验岩心装填入岩心夹持器,并将升温至实际地层温度;

(2) 给定初始围压 3MPa,而后以 2MPa 为步长,30min 为间隔,使进口压力和回压值相等并与围压一同缓慢提高,直至围压升至实际地层上覆压力,

进口压力和回压升至原始地层压力;

(3) 保持围压值和进口压力值恒定,降低回压值,以 3MPa 为步长逐级降低,直至回压降低至实际储层废弃压力点附近为止,分别测定各回压点下气体渗流稳定时的渗透率,步长可以适当调整,但要保证测试点不低于 7 个;

(4) 待测定完所有设定压力点,关闭气源阀,结束实验。

2.4 数据处理及曲线表达

参照 2010 标准对实验数据处理,分别计算各个回压下渗透率变化率。渗透率变化率按照下列公式^[27]计算:

$$D_i = \frac{K_0 - K_i}{K_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: K_0 为初始回压下的渗透率, $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; K_i 为第 i 个回压下的渗透率, $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

以回压为横坐标、以渗透率变化率为纵坐标绘制应力敏感曲线,以渗透率变化率超过 20% 所对应的前一个点为临界应力。根据最大渗透率变化率(即应力敏感损害率)来判断应力敏感程度,判断标准^[27]如表 2 所示。

表 2 应力敏感程度判断标准

Table 2 The judge standard of stress sensitivity degree

最大渗透率变化率/%	损害程度
$D \leq 5$	无
$5 < D \leq 30$	弱
$30 < D \leq 50$	中等偏弱
$50 < D \leq 70$	中等偏强
$D > 70$	强

3 应用实例

实验分别选取吐哈油田致密砂岩^[29]储层岩心 5 块,覆压渗透率范围在 $(0.01 \sim 0.1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间,直径为 2.50cm,长度不少于 10.00cm 的长岩心,实验精确模拟实际地层条件,上覆压力为 45MPa,原始孔隙压力为 29MPa,地层温度为 65℃。按照上述设计方法开展实验,选取回压降低步长为 3MPa,实验结果见表 3。

从 5 块岩心的实验结果可以看出,按照本文设计的实验方法开展实验所得应力敏感损害率在 20.52%~21.53% 之间,损害程度为“弱”,5 块岩心中只有渗透率为 $0.054 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的岩心在回压降到 8MPa 时渗透率伤害率超过 20%,其余 4 块岩心都是

在回压降到 11MPa 时渗透率伤害率就已经超过了 20%，因此只有渗透率为 $0.054 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的岩心临界回压为 11MPa，其余 4 块岩心的临界回压均为 14MPa，所以现场开采过程中不要片面强调无限制降压以提高压差开采，当压力降压到临界压力以后，渗流效果也会变差，产量也会受到影响。由于选取的岩心为致密砂岩，其具有结构致密、渗流效果较差、多伴有微裂缝等特点，在较低的应力下，岩石骨架很难被压缩，在降压开采过程中，岩石受到的伤害也较小。

表 3 实验结果汇总

Table 3 The summary table of experimental results

编号	渗透率 / $(\times 10^{-3} \mu\text{m}^2)$	应力敏感 损害率/%	临界回压 /MPa	损害 程度
柯 21-11	0.013	21.53	14	弱
柯 19-13	0.029	21.03	14	弱
柯 24-05	0.054	21.30	11	弱
柯 24-18	0.077	20.52	14	弱
柯 19-17	0.098	21.33	14	弱

图 3 为回压应力敏感曲线，渗透率变化率随回压的降低先是急剧升高而后逐渐趋于平缓，并且曲线存在明显的拐点，因此可以以曲线拐点对应的回压点为节点将整个降压开采过程分为 2 个阶段：A 阶段（渗透率变化陡峭段）和 B 阶段（渗透率变化平缓段）。A 阶段渗透率变化幅度较大，是回压从原始压力降压的阶段，对于实际储层中岩心本体来说，岩石受到的上覆压力较大，岩石所受的原始有效应力为 16MPa，在此有效应力下，岩石处于大孔隙被部分压缩、微裂缝发生部分闭合的阶段，岩心受力变形严重，渗透率变化幅度较大，降压开采过程中，岩石本体受到的有效应力从 16MPa 逐渐增加，在岩心出口处岩石受到的有效应力最大，出口段也首当其冲在原始有效应力受压变形基础上发生大孔隙继续被压缩、微裂缝继续受力闭合，而后出现大孔隙和微裂缝的变形的是离出口稍远的岩石段，而且这种变形状态逐渐向上游延伸，根据压降漏斗分布曲线特征，越往上游其有效应力变化幅度越小，这种形变作用就越不明显，因此该阶段对渗透率变化贡献最大的是靠近岩石出口段部分。B 阶段渗透率变化幅度较小，且有逐渐趋于稳定的趋势。在此阶段初期，回压的降低仍能使得出口段和离出口稍远段岩石发生微小的弹性变形，主要是小孔隙被压缩向中心移动的变形，会出现渗透率变化率的小幅增加，而后即使再降低回压，岩石骨架也很难再被压缩，能闭合的裂缝已经完全闭合，大孔隙的压缩程度也已经达到最大，

此时，渗透率变化已经很小，甚至趋于稳定。

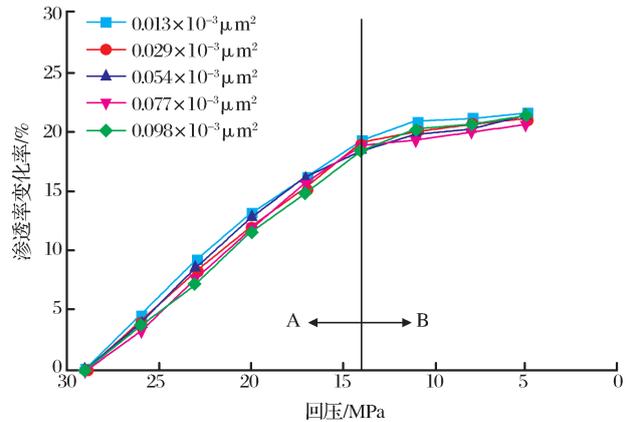


图 3 回压应力敏感曲线

Fig. 3 The curve of back pressure stress sensitivity

4 结论

详细分析了回压应力敏感产生条件，指出了现行标准中存在的问题，并结合油田现场实际提出了合理的测定方法，得到的主要认识如下。

(1) 回压变化引起的内压应力直接作用于岩石孔隙周围骨架颗粒上，是模拟油气藏开采过程并更接近于开采实际的方法；现行标准关于回压应力敏感测试方法的表述并不具体，仅提出围压不变的要求，这样所得结果影响因素并不单一，不能算是严格意义上的回压应力敏感。

(2) 实际气藏开采过程中，井底压力降低导致的有效应力变化从近井储层向远处延伸，且在压降漏斗控制下越来越弱，正是基于此过程，设计出一套更符合油气藏开发实际的回压应力敏感测试方法和流程，该方法用围压和上游压力分别模拟上覆压力和供源压力，其数值恒定分别等于实际上覆压力和原始地层压力，回压从原始地层压力以一定步长降低至废弃压力点，并以渗透率变化来反映储层受伤程度。

(3) 通过将该方法应用到某油田致密砂岩测试中，测得渗透率变化率在 21% 左右，为弱应力敏感，敏感曲线分为陡峭段和平缓段，并存在明显的拐点，测定结果符合预期，说明该设计方法可行，可以推广到以后的实验研究中。

参考文献 (References):

- [1] Zhu Huayin, Jiang Desheng, An Laizhi, et al. An experimental analysis of sensitivity of the Jiulongshan conglomerate reservoirs in west Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(9): 40-43. [朱华银, 蒋德生, 安来志, 等. 川西地区九龙山构造砾岩储层敏感性实验分析[J]. 天然气工业, 2012, 32(9): 40-43.]

- [2] Li Chuanliang. Evaluation method for stress sensitivity of reservoir rock[J]. *Petroleum Geology & Oil Field Development in Daqing*, 2006, 25(1): 40-42. [李传亮. 储层岩石的应力敏感性评价方法[J]. 大庆石油地质与开发, 2006, 25(1): 40-42.]
- [3] Li Lezhong, Li Xiangfang. Error analysis of experimental evaluation methods for stress sensitivity of reservoir[J]. *Natural Gas Industry*, 2013, 33(2): 48-51. [李乐忠, 李相方. 储层应力敏感实验评价方法的误差分析[J]. 天然气工业, 2013, 33(2): 48-51.]
- [4] Li Min, Qiao Guoan, Chen Hao. Experimental and theoretical study on rock stress sensitivity in low permeability sandstone[J]. *Drilling & Production Technology*, 2006, 29(4): 91-93. [李闽, 乔国安, 陈昊. 低渗砂岩储层岩石应力敏感实验与理论研究[J]. 钻采工艺, 2006, 29(4): 91-93.]
- [5] Ren Heai, Zhao Shixu, Li Chengfu, *et al.* Experiment evaluation of stress sensitivity of Low-Permeability sandstone to confining pressure[J]. *Marine Geology Frontier*, 2012, 28(6): 60-64. [任和爱, 赵世旭, 李成福, 等. 低渗砂岩的变围压应力敏感性实验评价[J]. 海洋地质前沿, 2012, 28(6): 60-64.]
- [6] Liu Zhongqun, Li Lijun, Wang Nianxi, *et al.* Laboratory study on the stress sensitivity in EB tight rock[J]. *Drilling & Production Technology*, 2008, 31(5): 86-89. [刘忠群, 李丽君, 王念喜, 等. 鄂北低渗致密砂岩应力敏感性实验研究[J]. 钻采工艺, 2008, 31(5): 86-89.]
- [7] Zhu He, Wang Jia, Shi Kun, *et al.* Experimental study on pressure-sensibility of fractured shale reservoir[J]. *Science Technology and Engineering*, 2011, 11(35): 8862-8864. [朱贺, 汪佳, 施坤, 等. 泥岩裂缝性储层应力敏感性实验研究[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(35): 8862-8864.]
- [8] He Jingang, Kang Yili, You Lijun, *et al.* Effects of Mineral composition and microstructure on stress sensitivity of mudrocks[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2012, 23(1): 129-134. [何金钢, 康毅力, 游利军, 等. 矿物成分和微结构对泥岩储层应力敏感性的影响[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(1): 129-134.]
- [9] Kang Yili, Zhang Hao, Chen Yijian, *et al.* Comprehensive research of tight sandstones gas reservoirs stress sensitivity in Daniudi Gasfield[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2006, 17(3): 335-338. [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.]
- [10] Zhou Sibin, Bai Ling. Chang 8 ultra low permeability reservoir stress sensitivity lab experiment in Zhenjiang Oilfield[J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2012, 26(4): 110-112. [周思宾, 白玲. 镇泾油田长 8 超低渗油藏应力敏感性实验研究[J]. 石油地质与工程, 2012, 26(4): 110-112.]
- [11] Yang Chaopeng, Gao Shusheng, Guo Lihui, *et al.* Effect of stress sensitivity on well productivity in tight gas reservoir[J]. *Drilling & Production Technology*, 2013, 36(2): 58-61. [杨朝蓬, 高树生, 郭立辉, 等. 致密砂岩气藏应力敏感性及其对产能的影响[J]. 钻采工艺, 2013, 36(2): 58-61.]
- [12] Li Chuanliang. A study on the stress sensibility of permeability of reservoir rocks[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2006, 27(3): 348-350. [李传亮. 渗透率的应力敏感性分析方法[J]. 新疆石油地质, 2006, 27(3): 348-350.]
- [13] Wang Ruifei, Duan Yu'an, Lü Xinhua, *et al.* Stress sensitivity experiment of sandstone reservoirs in deep section with high pressure and low-permeability[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2014, 33(1): 90-94. [王瑞飞, 段雨安, 吕新华, 等. 深层高压低渗砂岩油藏应力敏感性实验[J]. 地质科技情报, 2014, 33(1): 90-94.]
- [14] Zhang Li, Zhang Maolin, Mei Haiyan. Influence of stress sensibility on low permeability gas reservoir in different production methods[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2007, 14(2): 53-55. [张李, 张茂林, 梅海燕. 不同开采方式下应力敏感对低渗气藏的影响[J]. 断块油气田, 2007, 14(2): 53-55.]
- [15] Jiao Chunyan, He Shunli, Xie Quan, *et al.* An experimental study on stress dependent sensitivity of ultra-low permeability sandstone reservoirs[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(3): 489-494. [焦春艳, 何顺利, 谢全, 等. 超低渗透砂岩储层应力敏感性实验[J]. 石油学报, 2011, 32(3): 489-494.]
- [16] Guo Ping, Deng Lei, Liu Qiguo, *et al.* Test and application of multiple stress sensitivity of low permeability gas reservoir[J]. *Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition*, 2008, 30(2): 78-82. [郭平, 邓垒, 刘启国, 等. 低渗气藏多次应力敏感测试及应用[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2008, 30(2): 78-82.]
- [17] Zhang Li, Zhang Maolin, Mei Haiyan, *et al.* Stress sensibility analysis of low permeability gas reservoir and its influence on exploitation[J]. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 2007, 14(3): 55-58. [张李, 张茂林, 梅海燕, 等. 低渗透气藏应力敏感性分析及对开采的影响[J]. 特种油气藏, 2007, 14(3): 55-58.]
- [18] Xiao Wenlian, Li Min, Zhao Jinzhou, *et al.* Laboratory study of stress sensitivity to permeability in tight sandstone[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(3): 775-779. [肖文联, 李闽, 赵金洲, 等. 低渗致密砂岩渗透率应力敏感性实验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 775-779.]
- [19] Wang Haiyang, Yang Shenglai, Li Wuguang, *et al.* Study on stress sensitivity of deep dual media tight gas reservoir and its application[J]. *Natural Gas and Oil*, 2013, 31(4): 51-56. [王海洋, 杨胜来, 李武广, 等. 深层致密双重介质气藏应力敏感研究及应用[J]. 天然气与石油, 2013, 31(4): 51-56.]
- [20] Song Chuazhen, Zheng Rongchen. Stress sensitivity of low permeability tight gas reservoir and its effect on single well productivity[J]. *Petroleum Geology & Oil Field Development in Daqing*, 2006, 25(6): 47-49. [宋传真, 郑荣臣. 致密低渗气藏储层应力敏感性及其对单井产能的影响[J]. 大庆石油地质与开发, 2006, 25(6): 47-49.]
- [21] Guo Ping, Zhang Jun, Du Jianfen, *et al.* Study on Core Stress sensitivity for gas reservoir with two experiment method[J]. *Journal of Southwest Petroleum University*, 2007, 29(2): 7-9. [郭平, 张俊, 杜建芬, 等. 采用两种实验方法进行气藏岩芯应力敏感研究[J]. 西南石油大学学报, 2007, 29(2): 7-9.]
- [22] Sun Linjun, Peng Chao, Bai Yang, *et al.* The influence of stress sensitive to fractured gas reservoir production of high temperature and pressure[J]. *University of science and technology*

- Chongqing: Science & Technology Edition, 2013, 15(1): 64-67. [孙琳钧, 彭超, 白杨, 等. 应力敏感对裂缝性高温高压气藏产能的影响[J]. 重庆科技学院学报: 自然科学版, 2013, 15(1): 64-67.]
- [23] Jones J R. A laboratory study of the effect of confining pressure on fracture flow and storage capacity in carbonate rock [J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1975: 21-27.
- [24] Zhang Haiyong, He Shunli, Gu Daihong, *et al.* The effect of pore pressure on the media deformation of micro-crack low permeability reservoir [J]. *Science Technology and Engineering*, 2014, 14(11): 22-26. [张海勇, 何顺利, 顾岱鸿, 等. 孔隙压力对微裂隙低渗透介质变形的影响实验研究[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(11): 22-26.]
- [25] Li Daqi, Kang Yili, You Lijun. Experimental study on permeability stress sensitivity of carbonate rocks [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2014, 25(3): 409-413. [李大奇, 康毅力, 游利军. 碳酸盐岩储层渗透率应力敏感性实验研究[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(3): 409-413.]
- [26] Li Min, Xiao Wenlian, Zhao Chunlan, *et al.* Net stress can not be used to evaluate the stress sensitivity in the low permeability sandstone [J]. *Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition*, 2009, 31(5): 183-186. [李闽, 肖文联, 赵春兰, 等. 不能用净应力评价低渗砂岩岩石应力敏感性[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2009, 31(5): 183-186.]
- [27] National Energy Board. SY/T5358-2010. Formation Damage Evaluation by Flow Test [S]. Beijing: China Standards Press, 2010: 18-21. [国家能源局. SY/T5358-2010 储层敏感性流动实验评价方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010: 18-21.]
- [28] Tian Wei, Zhu Weiyao, Zhu Huayin, *et al.* the selection of Confining pressure mode in starting pressure test for tight sandstone [J]. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 2014, 21(2): 107-110. [田巍, 朱维耀, 朱华银, 等. 致密砂岩启动压力测试中围压模式的优选[J]. 特种油气藏, 2014, 21(2): 107-110.]
- [29] Tian Wei, Zhu Weiyao, Zhu Huayin, *et al.* The micro-structure and seepage characteristics of condensate gas reservoir for tight sandstone [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2014, 25(7): 1077-1084. [田巍, 朱维耀, 朱华银, 等. 致密砂岩凝析气藏微观结构及渗流特征[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(7): 1077-1084.]

Study on Testing Method of Back-pressure Stress Sensitivity Evaluation

TIAN Wei¹, ZHU Wei-yao¹, ZHU Hua-yin², ZHANG Xue-ling¹, WANG Rui-ming³, LI Yong³

(1. School of Civil and Environmental Engineering, University of Science & Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Langfang Branch, PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Langfang 065007, China;

3. Institute of Exploration and Development, Huabei Oilfield, Renqiu 062552, China)

Abstract: In order to seek for a set of reasonable measurement method for evaluation of back pressure stress sensitivity, current national standards are analyzed and the deficiencies are pointed out. The results show that the current national standard is not concrete although it is advanced compared with the original standard. It demands a constant confining pressure during the measurement process, but did not mention how to control the inlet pressure. The experiment simulated reservoir conditions well. According to the national standard definition for the net confining pressure and net stress, it can be speculated that inlet pressure changed with the changes of back pressure, but there is no confinement for pressure differential between upstream and downstream. A simple experiment is designed for inner pressure, it indicates the measurement process is simultaneously affected by the confining pressure and the back pressure. The current exploration are mostly devoted to the back pressure stress sensitivity considering the inner pressure changes, but it cannot well simulate the actual development process of gas reservoir. The actual situation is that the effective stress increases in the near oil wellbore area as the production well bottom pressure decreases, and extend into far wellbore area. This trend becomes weaker from the near to the distant due to the existence of pressure drop funnel. Based on the above analysis, a new set of measurement method for back pressure stress sensitivity is established, which required a constant confining pressure and upstream pressure. These pressure should equal to the overlying pressure and the original reservoir pressure of the actual reservoir respectively. The back pressure decreases from the original reservoir pressure to abandonment pressure points, which simulates the back pressure reduction process in the actual gas reservoirs development. The permeability is measured under different back pressure. This method is applied to measure the permeability of tight sandstone in Tuha oil field. The result shows that the permeability variation amplitude is about 21%, and the sensitivity degree is weak. The experimental permeability change rate curve is divided into steep section and gentle section, and a inflection point obviously existed. The measurement results agree well with expectations, so this new method can be applied to future tests and scientific research.

Key words: Evaluation; Back pressure; Stress sensitivity; Net stress; The overlying pressure; The change rate of permeability