

# 页岩膨胀性及分散性特征实验分析

付永强 曾立新 马发明 黄玲 黄成惠 何亚锐

中国石油西南油气田公司采气工程研究院

付永强等.页岩膨胀性及分散性特征实验分析.天然气工业,2012,32(9):48-51.

**摘 要** 页岩通常含有一定比例的黏土矿物,大液量、大排量压裂施工可能导致黏土矿物膨胀、水化分散,而目前开展的研究工作还没有建立起相关的评价体系。为此,在借鉴前人研究成果的基础上,采用自吸实验法、吸水膨胀实验法、X 射线衍射(XRD)矿物成分分析等方法对其膨胀、分散特征进行了大量的实验研究。结论认为:①对于烃源页岩而言,自吸实验、吸水膨胀实验等可作为页岩气藏膨胀和分散特征评价的有效方法;②具备生、储烃能力的页岩虽然具有较高的黏土含量,但膨胀和分散特征明显不同于常规的泥页岩及黏土含量较高的砂岩;③岩心 CST(毛细管吸入时间)实验结果及膨胀实验结果表明,对于页岩气藏而言,如何有效抑制初期的自吸及膨胀应该引起高度的重视;④对四川盆地的页岩气藏而言,完井及压裂过程中由于化学原因导致的页岩膨胀、分散特征等不属于井壁稳定性及压裂方案设计考虑的主要因素。

**关键词** 四川盆地 页岩气藏 压裂 黏土矿物 膨胀性 分散特征 自吸实验 吸水膨胀实验

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2012.09.011

具备生、储烃能力的页岩必须通过大规模体积压裂才能获得工业开采价值。因此,上万立方米的压裂液使用量成为页岩气藏压裂有别于常规气藏压裂的特点之一。与国外页岩气藏类似,在中国西南地区分布的四川盆地页岩气藏通常具有较高的黏土矿物含量。如某井含气量最高的页岩层段,其黏土矿物含量范围在 34.1%~45.9% 之间,存在膨胀和分散的可能性。而页岩所特有的致密、渗透率极低等特点,往往使人们认为外来液体几乎没有侵入页岩的可能。同时页岩所特有的致密特点,使得在采用常规方法,希望通过渗透率的变化来定量描述黏土矿物膨胀、分散等特征对页岩气藏压裂的影响时,收效甚微。这样的结果,也使得在进行的页岩气藏压裂设计、压后评估中很少考虑页岩中黏土矿物膨胀性和分散性特征产生的影响。

在借鉴前人研究成果的基础上,采用不同的分析方法对页岩膨胀性特征以及分散特征进行研究,分析对比了不同工作液介质可能导致的页岩膨胀、分散特征,为页岩气藏钻井过程中的井壁稳定性、压裂方案的

优化设计、压裂液的优选、压后产量评估等提供有力的技术支持。

## 1 自吸特征对页岩分散性特征的影响

分别采用岩粉 CST(毛细管吸入时间)法、岩心 CST 法、岩面层理面或人工缝的 CST 法来评价不同工作液介质作用下页岩的水化分散特征、吸收外来液体的特征以及不同裂缝特征下页岩吸收外来液体的特征。

### 1.1 岩粉 CST 实验

在高速搅拌器中测定体积分数为 15% 的页岩岩浆(过 100 目筛)<sup>[1]</sup>在剪切不同时间后<sup>[2-3]</sup>的滤失时间,用以表示页岩分散特性。通常将页岩岩浆在 CST 仪器的特性滤纸上运移 0.5 cm 所需的时间称为岩粉 CST 值。根据实验结果可绘制 CST 值与剪切时间的关系曲线,可用式(1)表示页岩分散特性<sup>[4]</sup>:

$$Y = mx + b \quad (1)$$

式中  $Y$  为 CST 值; $m$  为页岩的水化分散速度; $x$  为剪切时间; $b$  为瞬时形成胶体颗粒数目。 $m$  值越大,水化

**基金项目** 中国石油西南油气田公司科研项目(编号:2011ZD0405-02-03)。

**作者简介** 付永强,1975 年生,高级工程师,博士;现任中国石油西南油气田公司采气工程研究院总工程师,主要从事油气田储层增产改造技术研究工作。地址:(618300)四川省广汉市中山大道南二段采气工程研究院。电话:(0838)5151397。E-mail:fuyq@petrochina.com.cn

分散速度越快;  $b$  值越大, 瞬时破裂的胶体颗粒越多<sup>[1]</sup>。

岩粉 CST 实验中分别使用了蒸馏水、2% KCl 液体以及添加有降阻剂和防膨剂的滑溜水体系(A 号), 对 3 个不同取心深度的岩粉进行了实验。其主要矿物

成分含量见表 1。1 号岩样的黏土含量 24%; 2 号岩样的黏土含量 18%; 3 号岩样的黏土含量 14%。3 个不同取心深度的样品 CST 结果对比见表 2。图 1 显示了 3 种液体介质下 1 号样品的 CST 拟合直线。2 号和 3 号样品的拟合直线变化规律同 1 号样品。

表 1 不同岩样的主要矿物含量表

岩心 编号	主要矿物含量							
	绿泥石/高岭石	伊利石/蒙脱石	石英	斜长石	方解石	铁白云石	白云石	黄铁矿
1	3.93%	19.43%	49.38%	4.23%	6.55%	6.54%	1.69%	1.93%
2	2.86%	14.79%	56.16%	7.54%	4.02%	5.55%	5.96%	1.84%
3	4.57%	9.98%	24.29%	3.61%	48.57%	1.47%	3.60%	3.08%

注: 采用 XRD 进行矿物成分分析, 矿物含量均为质量分数

表 2 不同工作液介质下岩粉的 CST 自吸实验结果表

页岩样 品编号	蒸馏水		2% KCl 液体		滑溜水 A 号	
	$m$	$b$	$m$	$b$	$m$	$b$
1	0.062	25.99	0.022	24.65	0.156	41.62
2	0.076	30.46	0.055	25.19	0.126	70.49
3	0.069	28.66	0.037	24.89	0.118	50.06

注:  $m$  的单位为  $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $b$  的单位为个

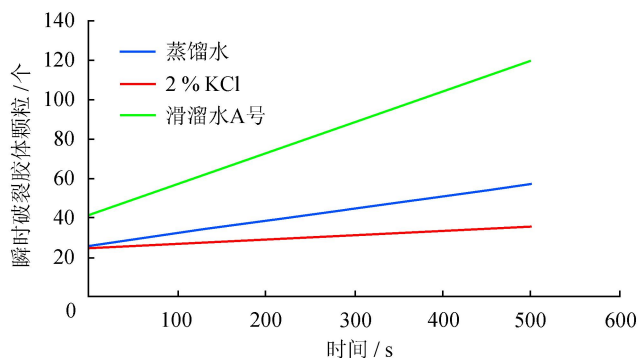


图 1 不同工作液介质下 1 号岩粉的水化分散及膨胀特征图

从表 2 可以看出: ①1 号样品测试结果中, 2% KCl 的页岩的水化分散速度 ( $m$ ) 值最小, 瞬时形成胶体颗粒数目 ( $b$ ) 值也最小; 而滑溜水 A 号两项参数均最高。②2 号和 3 号样品测试结果与 1 号样品结果规律一致。

测试结果表明, 在岩粉状态下, 2% KCl 液体抑制页岩水化分散的性能最好, 而滑溜水 A 号的抑制性能最差。同时, 结合岩粉的矿物成分测试结果, 对岩粉 CST 实验结果与黏土矿物含量相关性进行了分析。

图 2 显示了页岩的水化分散速度 ( $m$ ) 与黏土矿物含量的关系。2% KCl 及蒸馏水在高黏土矿物含量下, 具有较好的抑制性能, 而在低黏土矿物含量下, 其抑制

性能对黏土矿物含量的变化不敏感; 而滑溜水的抑制性能相对较差, 但其抑制性能与黏土含量相关。图 3 显示了瞬时形成胶体颗粒数目 ( $b$ ) 值与黏土矿物含量的关系。3 种液体都显示出在高黏土矿物含量情况下, 抑制性能较好。

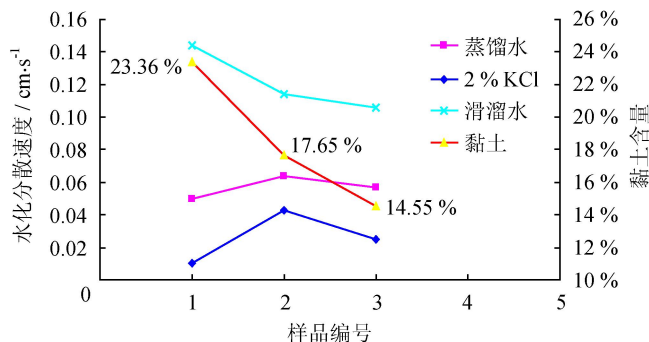


图 2 不同样品在 3 种工作液介质下水化分散速度与黏土矿物含量的关系图

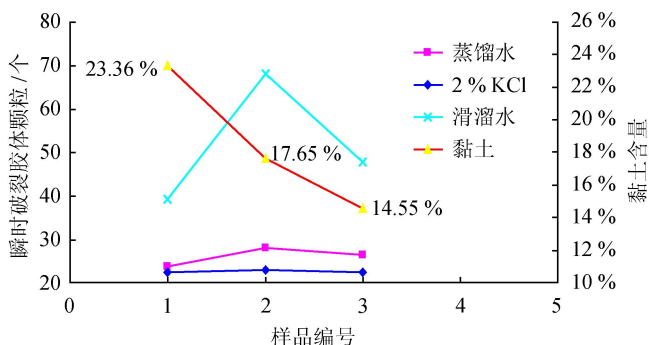


图 3 不同样品在 3 种工作液介质下瞬时破裂胶体颗粒数与黏土矿物含量的关系图

### 1.2 岩心 CST 实验

用模拟地层水利用毛细管自吸法建立初始含水饱

和度,并记录岩样吸水前的重量和电阻;将岩心放置在自吸液中浸泡;直到岩样重量不再发生变化(至少 2 h)。根据实验结果可绘制岩心吸液量与时间的关系曲线,比较不同工作液介质下岩心的自吸特征。

选取两个不同层段的岩心进行了 CST 实验,两个岩心的主要矿物成分见表 3,图 4、5 显示了不同层段页岩的岩心自吸实验结果。

表 3 岩心 CST 实验两个样品的主要矿物成分表

岩心 编号	主要矿物含量						
	黏土总量	石膏	石英	斜长石	方解石	白云石	铁白云石
5	47.2%	0.1%	26.7%	5.3%	10.7%	1.2%	10.5%
6	26.6%	0.7%	27.7%	27.0%	4.7%	2.8%	

注:采用 XRD 进行矿物成分分析,矿物含量均为质量分数

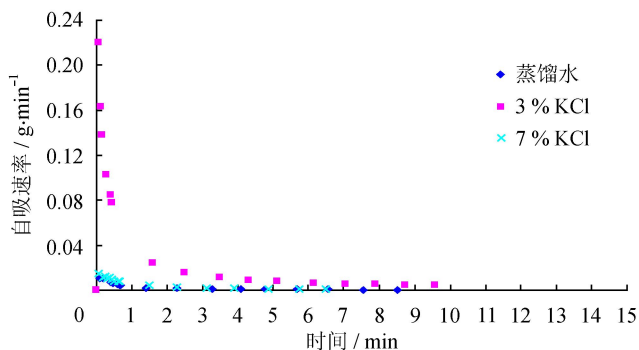


图 4 四川盆地某页岩井 5 号页岩层岩心自吸实验曲线图

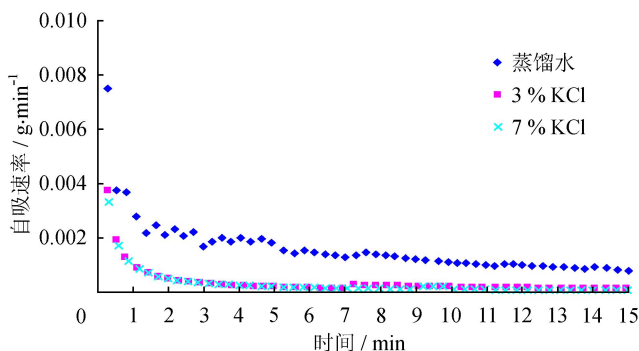


图 5 四川盆地某页岩气井 6 号页岩层岩心自吸实验曲线图

从图 4、5 中可以看出:①总的吸液量极少,均表现为初期的吸液量最大,在前 3 min 吸液速率相对较大,而 3 min 后自吸曲线趋于平直,吸液量基本趋于零。②对于 5 号页岩层,3% KCl 的自吸量最大,7% KCl 及未加任何添加剂的蒸馏水岩心自吸量最小;对于 6 号页岩层,未加任何添加剂的蒸馏水自吸量最大,3% KCl 和 7% KCl 的自吸量最小。③不同层段的页岩吸液量具有明显的差异,与黏土矿物含量相关,黏土矿物含量较

高的 5 号岩心吸液量高于含量较低的 6 号岩心。

### 1.3 岩心层理面或人工缝的岩心自吸实验

页岩基质自吸特征不明显;而层理或天然缝发育的岩心以及人工造缝岩心,均具有一定的沿层理或裂缝的自吸特征,人工缝自吸速率高于天然缝,且在自吸过程中存在微粒脱落、掉块等现象。

人工缝及天然缝的自吸速率对比见图 6。

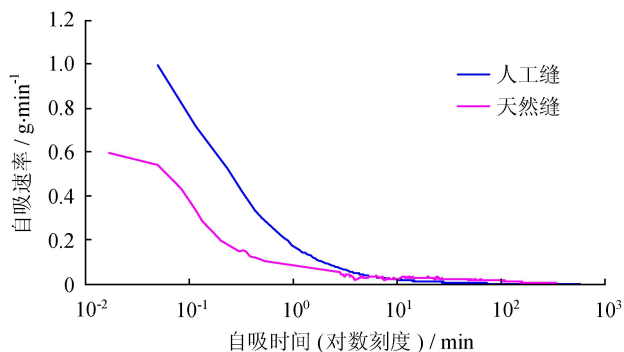


图 6 天然缝及人工造缝岩心自吸实验曲线图

## 2 吸水膨胀特征对页岩膨胀性的影响

通过将人工制备的岩心放置在工作筒中,测试不同工作液介质下岩心的轴向线膨胀率,根据实验结果可绘制岩心线膨胀率与时间的关系曲线,比较不同工作液介质下岩心的膨胀特征。

实验结果表明,页岩岩心 2 h 的膨胀率与 16 h 的膨胀率基本相同,表明页岩遇外来液体将产生膨胀,但随时间的推移,膨胀趋于稳定。不同工作液介质下页岩膨胀率与时间关系见图 7。对页岩线膨胀率与黏土矿物成分的相关性进行了对比分析(图 8)。

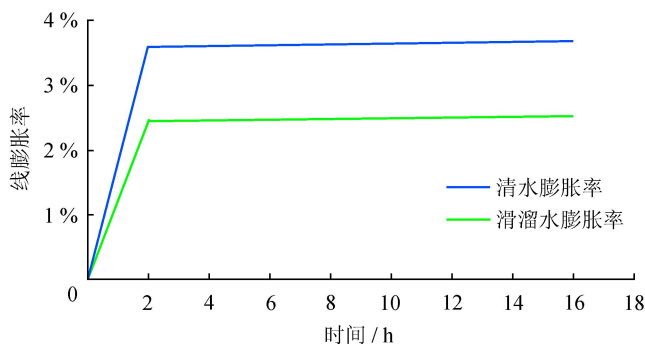


图 7 不同工作液介质下页岩膨胀率与时间的关系图

通过对实验结果的综合分析,认为页岩的膨胀性与黏土矿物含量存在一定的相关性,当黏土矿物含量变化较大时,页岩的膨胀率与黏土矿物含量关系更为密切。

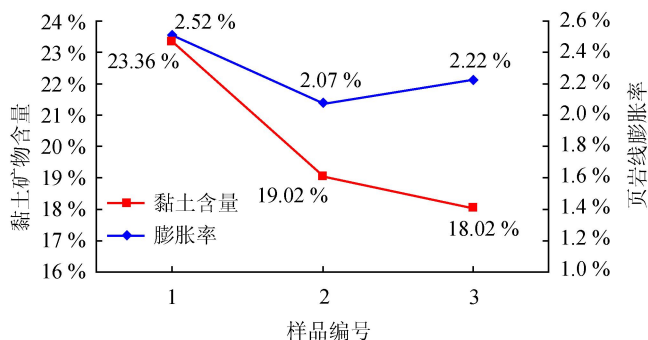


图8 不同页岩岩心在滑溜水中线膨胀率与黏土矿物含量的关系图

### 3 结论

就目前所开展的实验研究工作而言,虽然还未彻底揭示出页岩膨胀以及分散的特征和规律,但通过实验,得到了如下认识:

1)对于烃源页岩而言,采用常规的测量渗透率变化来表征其膨胀及分散特征是不可行的,而自吸实验、吸水膨胀实验等可作为此类页岩气藏评价的有效方法。

2)具备生、储烃能力的页岩虽然具有较高的黏土含量,但各种方法的实验结果表明,其总吸液量、吸液速率及线膨胀率均很小,而初期的吸液量高,可解释为表面润湿特征。其膨胀和分散特征明显不同于常规的泥页岩及黏土含量较高的砂岩。

3)岩粉 CST 实验结果表明,工作液体系对高黏土矿物含量岩心已具有较好的抑制性能,而岩心 CST 实验结果及膨胀实验结果表明,无论黏土矿物含量高低,虽然数量上有差异,但均表现为初期自吸和膨胀较大,而后期很小,且变化趋势基本趋于一致。因此对于页岩气藏而言,如何有效抑制初期的自吸及膨胀应该引起高度重视。

综上所述,初步认为外来液体进入页岩地层后所导致的黏土矿物膨胀和运移、分散是不可避免的,但就四川盆地的页岩气藏而言,完井及压裂过程中由于化学原因导致的页岩膨胀、分散特征等不属于井壁稳定性及压裂方案设计考虑的主要因素。由于页岩组成及成分非常复杂,对其他类型的页岩气藏仍需进行单独评价,但本文所述的方法可作为借鉴。

#### 参 考 文 献

- [1] 蒲晓林,罗兴树,李燕梅,等. 甲酸盐与无机盐抑制性的比较评价[J]. 油田化学, 2000, 17(2): 104-106.
- [2] 黄林基,罗兴树. CST 试验程序标准化探索——与李德江同志商榷[J]. 钻井液与完井液, 1997, 14(2): 35-39.
- [3] 黄林基,罗兴树. 用 CST 仪评价聚合物抑制性实验方法的研究[J]. 钻井液与完井液, 1995, 12(1): 1-5.
- [4] 李德江,邱敏. 关于 CST 试验中几个问题的讨论[J]. 钻井液与完井液, 1996, 13(1): 36-38.

(收稿日期 2012-06-19 编辑 赵 勤)