

# 沁南地区高煤阶煤储层水敏效应及其控制因素

左银卿<sup>1</sup>, 张学英<sup>1</sup>, 周 勰<sup>1</sup>, 李 松<sup>2</sup>

(1. 中国石油华北油田分公司 勘探开发研究院, 河北 任丘 062552;  
2. 中国地质大学(北京) 煤层气国家工程中心煤储层实验室, 北京 100083)

**摘要:**在煤层气开发过程中,工作液与煤储层不匹配时会造成水敏效应,导致煤储层渗透率降低,影响煤层气井产能。对煤储层进行水敏效应评价并探讨其主控因素,对提高煤层气开发效率具有重要意义。沁南地区高煤阶煤储层具有低孔低渗透特征,常规水敏实验方法已不适用,因此研究提出了煤储层水敏评价的新方法,采用气测渗透率取代传统的水测渗透率来表征煤岩水敏损害程度,并对沁南地区典型煤岩样品进行了测试。结果表明:沁南地区煤储层水敏损害率介于弱敏感到中等偏强之间,且以弱敏感为主;制约水敏效应的因素有煤储层渗透率、粘土矿物含量和粘土矿物赋存方式;煤储层渗透率越低,粘土矿物含量越高,水敏损害率越大。煤储层中粘土矿物的赋存方式有2种:煤岩裂隙填充与煤岩基质中植物细胞腔填充,且粘土矿物填充于煤岩裂隙的水敏损害程度高于填充于煤岩基质的水敏损害程度。

**关键词:**高煤阶煤储层 水敏效应 渗透率 粘土矿物 沁南地区

**中图分类号:** TE353.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-9603(2014)05-0107-04

在油气勘探开发过程中,储层会与外来流体接触,由于这些流体与粘土、碳酸盐岩等储层矿物性质不相匹配,往往发生物理和化学反应产生水敏效应,导致储层渗流能力下降,从而在不同程度上降低了储层的生产能力<sup>[1-2]</sup>。尹先清等对于水敏效应的研究大多集中在常规砂岩和碳酸盐岩储层<sup>[3-6]</sup>。汪伟英等通过岩心流动实验研究了注入流体盐度及盐度递减速率、pH值对岩石水敏性的影响<sup>[7]</sup>。朱玉双等利用真实的砂岩模型进行了单、双及组合模型3种类型的水驱油实验,并对有、无水敏2种条件下的驱油效果进行了评价<sup>[8]</sup>。贾忠伟等通过天然岩心注水伤害实验,总结出了低渗透率油层条件下,注入水中悬浮物粒径、悬浮物含量、含油量、硫酸还原菌含量与岩心渗透率下降幅度的关系<sup>[9]</sup>。刘大伟等通过碳酸盐岩水敏性实验评价,发现随着流体矿化度的逐渐降低,岩心渗透率持续下降,且当流体矿化度急剧降低时,岩样水敏性损害加剧<sup>[10]</sup>。郑军等指出煤岩在不含水敏性粘土矿物时为无或弱水敏<sup>[11]</sup>。由于前人对煤储层水敏效应研究薄弱,笔者选择沁水盆地南部(简称沁南)地区的高煤阶样品进行煤岩水敏效应评价,分析了煤储层中矿物遇淡水后引起煤储层渗透率的变化程度,同时对样品进

行了X衍射分析和扫描电镜观察,探讨了煤储层水敏效应的主控因素,以期为煤层气开发工作液的配制以及避免储层损害的发生提供依据。

## 1 水敏产生机理

常规储层的水敏现象主要归因于低矿化度条件下粘土矿物的膨胀,以及流体作用下的颗粒运移堵塞孔道<sup>[12]</sup>。在常见粘土矿物中,蒙脱石是最主要的水敏矿物,由于其遇水后体积会膨胀数十倍,造成孔隙堵塞,加上水化后其表面薄膜会松散解体乃至破碎,造成颗粒运移而使渗透率下降,但是颗粒膨胀还是其水敏性最主要的表现形式。伊利石的膨胀能力相对较弱,主要呈桥塞状在孔隙中交织分布,使原始的粒间孔隙变成许多微孔隙,渗流通道变得迂回曲折,伊利石晶体遇水容易破碎,并运移到孔隙的喉道处形成颗粒堵塞。绿泥石膨胀性很小,且晶体结合力及颗粒的附着力均较强,一般不会表现出颗粒的运移性。高岭石则无膨胀性,在孔隙中多呈分散质点分布,其集合体彼此之间的附着力以及对碎屑颗粒的附着力都很差,因而在高速流体的剪切力作用下极易形成松散的颗粒碎屑,随流

收稿日期:2014-07-03。

作者简介:左银卿,女,高级工程师,从事煤层气勘探与开发研究。联系电话:(0355)5550519,E-mail:yjy\_zyq@petrochina.com.cn。

基金项目:国家自然科学基金资助项目“中高煤阶煤储层煤层气产生的煤岩学控制机理研究”(41272175),国家科技重大专项“山西沁水盆地煤层气水平井开发示范工程”(2011ZX05061),教育部博士点基金“高煤阶煤储层物性综合敏感性及其产能响应”(20130022110010)。

体移动而堵塞孔隙,高岭石是颗粒运移水敏性的主要贡献者<sup>[13-17]</sup>。不同粘土矿物引起的水敏效应强弱不同,蒙脱石和伊利石可同时导致静态(颗粒膨胀水敏性)和动态(颗粒运移水敏性)渗透率下降,且蒙脱石引起的静态渗透率下降幅度比伊利石要高得多,绿泥石引起的静态和动态渗透率下降均较小,而高岭石仅能引起动态渗透率的下降。

## 2 样品制备与实验方法

### 2.1 样品采集与制备

实验样品取自沁南地区山西组3号煤层,均为高煤阶样品,采样地点为唐安、永安、天户、卧庄、宇昌、皇联、义城、赵庄和伯方等9个煤矿,编号分别为TA, YA, TH, WZ, YC, HL, YCH, ZZ和BF。首先将原煤制作成长度为3~6 cm、直径约为2.5 cm的圆柱,然后对圆柱样品进行干燥处理,将其放入温度控制在100~105℃的控温箱中,烘8 h后放入干燥器中待用。沁南地区高煤阶煤储层具有低孔、低渗透特征,9个煤岩样品的原始孔隙度为2.11%~5.49%,原始渗透率为 $0.015 \times 10^{-3} \sim 0.54 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (表1)。

表1 沁南地区煤岩样品基础数据

样品编号	长度/cm	直径/cm	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	孔隙度/%
TA	5.19	2.54	0.015	2.11
YA	2.73	2.57	0.137	5.49
TH	3.42	2.56	0.219	5.47
WZ	3.55	2.55	0.098	3.21
YC	2.61	2.55	0.046	2.30
HL	5.11	2.56	0.020	2.36
YCH	2.98	2.56	0.022	4.20
ZZ	2.73	2.57	0.119	5.49
BF	2.71	2.57	0.540	5.49

### 2.2 实验方法

由于煤储层渗透率极低,常规水敏实验方法利用水为流体介质测定煤岩渗透率耗时长且精确度低,有时甚至无法得到实验数据,因此,笔者采用氮气作为流体介质测定煤岩渗透率,从而获得煤岩样品的敏感性评价数据。实验方法如下:①将待测样品在质量分数为8%的标准盐水中浸泡48 h,使其饱和和盐水;②将饱和盐水后的样品放入LDY32-300型岩心流动仪的夹持器中,缓慢将围压加至4 MPa,模拟地层上覆岩层压力;③把气阀打开,在驱替压差分别为0.5, 1和1.5 MPa的条件下向岩心夹持器通入氮气,依次测定相应的渗透率;④关闭气阀,将围

压降至0.1 MPa,然后将样品从岩心夹持器中取出;⑤将样品置于蒸馏水中浸泡48 h,抽真空,使其饱和和蒸馏水;⑥依照步骤②和步骤③,分别测定0.5, 1.0和1.5 MPa驱替压差下的样品渗透率;⑦关闭气阀,结束实验。

对比相同驱替压差标准盐水条件下与蒸馏水条件下的渗透率,可计算得到3种驱替压差条件下的水敏损害率,水敏损害率的计算式为

$$D_w = \frac{|K_i - K_w|}{K_i} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $D_w$  为样品水敏损害率,%;  $K_i$  为标准盐水条件下的渗透率,  $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;  $K_w$  为蒸馏水条件下的渗透率,  $10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

煤岩样品的水敏损害率取3种驱替压差下的水敏损害率最大值,按照文献[18]的水敏损害率评价指标进行水敏效应评价:当水敏损害率小于等于5%时,为无水敏;当水敏损害率为5%~40%时,为弱水敏;当水敏损害率为40%~70%时,为中等偏强水敏;当水敏损害率为70%~90%时,为强水敏。

## 3 结果与讨论

### 3.1 水敏效应评价

沁南地区9块煤岩样品的水敏测试结果(图1)表明,其水敏损害率为5.60%~63.63%,平均值为23.69%,卧庄煤岩样品水敏最大损害率最低,为5.60%,皇联煤岩样品水敏最大损害率最高,为63.63%。9块煤岩样品的水敏损害程度从弱水敏—中等偏强,其中唐安煤矿和皇联煤矿水敏损害程度为中等偏强,其他7个煤岩样品均为弱水敏,占总样品的77.8%,未出现强水敏。

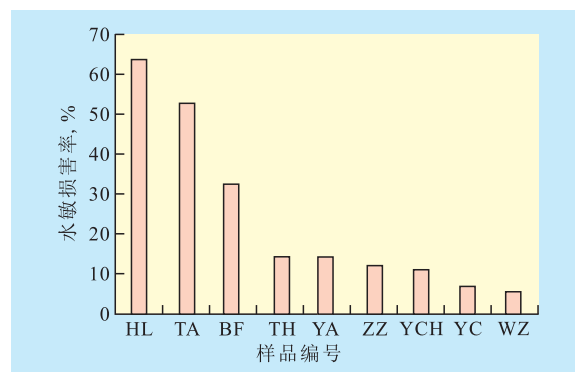


图1 沁南地区煤岩样品水敏损害程度评价结果

### 3.2 水敏控制因素

#### 3.2.1 煤储层渗透率

在煤岩水敏实验中,当驱替压力为1.5 MPa时,

煤岩样品发生相应的水敏损害,且煤岩样品中的气水关系基本稳定,因此选取驱替压力为1.5 MPa时的气测渗透率、气体流量与水敏损害率进行相关性分析。分析结果(图2)表明:气测渗透率和气体流量越大,其水敏损害率越小,说明水敏损害率与气测渗透率和气体流量均成负相关关系。这是由于在相同的驱替压力下,煤岩样品的渗透率越高,其通过的气体流量越大,说明煤岩孔裂隙中的粘土含量越少,且煤岩孔裂隙有效宽度较宽,粘土矿物的膨胀对煤储层渗透率影响较小,导致煤岩的水敏损害率相应降低。

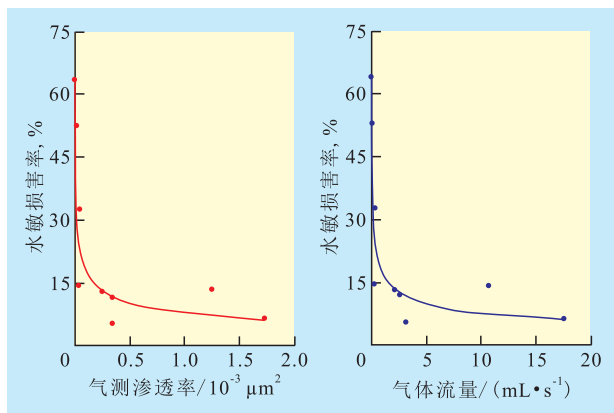


图2 气测渗透率和气体流量与水敏损害率的相关性

### 3.2.2 矿物成分及含量

沁南地区9块煤岩样品的X衍射结果表明:其粘土矿物含量为11.9%~89.2%,白云石含量为0~62.2%,方解石含量为0~47.4%(表2)。

样品编号	粘土矿物	白云石	方解石
TA	58.6	14.9	5.1
YA	26.8	62.2	0
TH	39.3	23.0	37.1
WZ	31.8	22.2	46.0
YC	20.8	0	31.2
HL	89.2	4.6	0
YCH	11.9	40.7	47.4
ZZ	33.0	46.6	20.4
BF	41.7	10.3	5.7

通过粘土矿物含量、碳酸盐岩矿物含量与水敏损害率相关性(图3)分析可知:随着粘土矿物含量的增加,煤岩样品水敏损害率也增大;而随着碳酸盐岩矿物含量的增加,裂隙中的粘土矿物含量相应减小,煤岩样品水敏损害率相应降低,说明水敏损害率与粘土矿物含量成线性正相关,与方解石和白云石2种碳酸盐岩矿物的总含量成负相关关系。

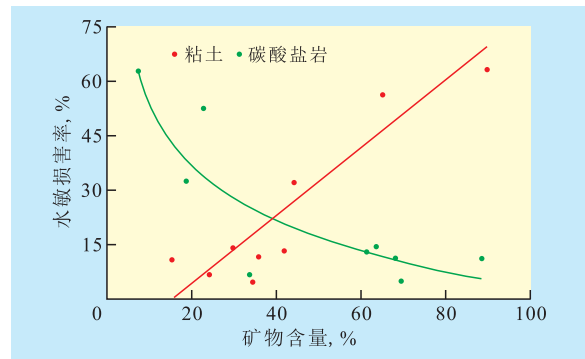


图3 矿物成分及含量与水敏损害率的相关性

### 3.2.3 粘土矿物赋存方式

利用扫描电镜观察煤岩样品中粘土矿物的赋存形态,探讨不同粘土矿物赋存方式对水敏效应的影响。扫描电镜观察结果表明,沁南地区煤岩样品中的粘土矿物赋存方式分为2种:①以层状或似层状充填于裂隙中,②以团窝状、分散颗粒状和粗条带状充填于植物细胞腔中。不同的赋存方式对煤储层水敏效应影响较大。当粘土矿物以层状或似层状充填于裂隙中时,导致的水敏损害程度较严重(图4a,图4b,图4c)。这是因为:一方面由于伊利石

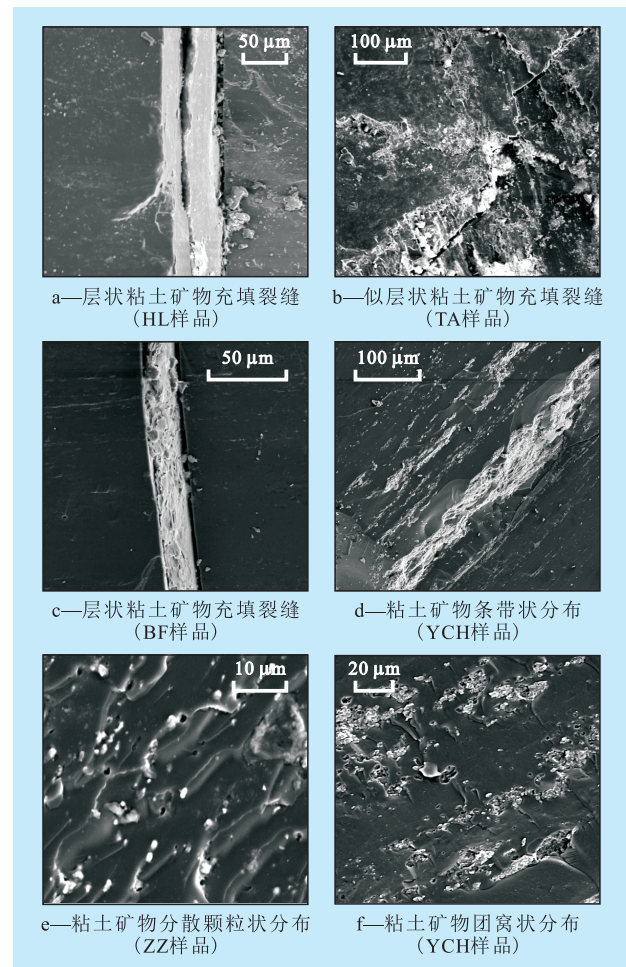


图4 沁南地区煤岩样品中粘土矿物赋存方式



和蒙脱石等粘土矿物遇水膨胀,导致渗透率降低,形成静态渗透率损害;另一方面由于裂隙中赋存的高岭石和绿泥石等粘土矿物在流体剪切作用下,易产生颗粒脱落、运移,形成动态渗透率损害;两者叠加导致煤储层水敏损害加剧。当粘土矿物以团窝状、分散颗粒状和粗条带状充填于植物细胞腔中时,导致的水敏损害程度相对较小(图4d,图4e,图4f)。原因是:该赋存方式导致的水敏损害主要是由于细胞腔内的粘土矿物遇水膨胀,煤岩基质膨胀,致使煤岩裂隙相对挤压,煤岩样品渗透率降低。

## 4 结论

煤储层水敏效应是与储层不匹配的外来流体进入煤储层引起粘土膨胀、分散、运移,堵塞孔裂隙系统,导致储层渗透率降低的现象,包括静态(颗粒膨胀水敏性)和动态(颗粒运移水敏性)的渗透率下降2种形式。沁南地区煤岩样品水敏损害率为5.6%~63.63%,平均值为23.69%,水敏损害程度以弱敏感为主,占总样品的77.8%,其余22.2%的煤岩样品水敏损害程度为中等偏强,未出现强水敏。

水敏效应的控制因素有煤层渗透率、粘土矿物含量和粘土矿物赋存方式。煤储层渗透率越低,裂隙宽度越窄,粘土膨胀导致渗透率降低的程度越大,水敏损害程度越强。粘土矿物含量与水敏损害率成线性正相关,粘土矿物含量越高,水敏损害程度越强。水敏损害以粘土遇水膨胀损害为主,颗粒运移损害为辅,煤储层中的粘土矿物存在煤岩裂隙填充与煤岩基质中植物细胞腔填充2种赋存方式,且粘土矿物填充于煤岩裂隙的水敏损害程度高于填充于煤岩基质的水敏损害程度。

### 参考文献:

[1] 王海洲,王勇,杨琦,等.延长油田保护储层射孔液的研究与应

用[J].油气地质与采收率,2014,21(2):106-110.

- [2] 王欣,杨贤友.储层特性参数对水敏性的影响规律研究[J].钻井液与完井液,2000,17(3):5-8.
- [3] 尹先清,伍家忠,彭松水,等.储层岩心水敏性影响因素分析[J].江汉石油学院学报,2003,25(增刊):74-75.
- [4] 成赛男,田继军,张鹏辉.伊通盆地莫里青断陷西北缘双阳组二段储层敏感性流动实验评价[J].油气地质与采收率,2013,20(3):76-78.
- [5] 胡灵芝,吕剑锋,杨堪阳,等.老君庙油田东低产区水敏储层膨胀增产技术研究[J].特种油气藏,2009,16(4):90-93.
- [6] 赵群.疏松砂岩储层物性参数敏感性物理模拟实验[J].石油学报,2006,27(4):93-96.
- [7] 汪伟英,唐周怀,吕迎红,等.储层岩石水敏性影响因素研究[J].江汉石油学院学报,2001,23(2):49-50.
- [8] 朱玉双,曲志浩,蔺方晓.油层受水敏伤害时水驱油渗流特征[J].石油学报,2004,25(2):59-64.
- [9] 贾忠伟,杨清彦,张江,等.大庆油田低渗透油层注水伤害实验研究[J].大庆石油地质与开发,2007,26(1):72-75.
- [10] 刘大伟,康毅力,何健,等.碳酸盐岩储层水敏性实验评价及机理探讨[J].天然气工业,2007,27(2):32-34.
- [11] 郑军,贺承祖,冯文光,等.煤气储层应力敏感、速敏和水敏性研究[J].钻井液与完井液,2006,23(4):77-78.
- [12] 常学军,尹志军.高尚堡沙三段油藏储层敏感性实验研究及其形成机理[J].石油实验地质,2004,21(1):84-87.
- [13] 彭仕宓,尹旭,张继春,等.注水开发中粘土矿物及其岩石敏感性的演化模式[J].石油学报,2006,27(4):95-96.
- [14] 孙晓飞,张艳玉,石彦,等.深层水敏性稠油油藏开发方式评价[J].油气地质与采收率,2013,20(1):81-84.
- [15] 汪伟英,肖娜,黄磊,等.钻井液侵入引起煤岩膨胀对煤储层的伤害[J].钻井液与完井液,2010,27(3):20-22.
- [16] 许书堂,杨玉娥,顾勤,等.东濮凹陷桥口气藏储层敏感性分析[J].油气地质与采收率,2010,17(3):90-92.
- [17] 吴雄军,蒋官澄,赵琳,等.径向神经网络优化及在储层敏感性定量预测中的应用[J].油气地质与采收率,2012,19(1):107-110.
- [18] 曲岩涛,房会春,朱健,等.SY/T 5358—2010储层敏感性流动实验评价方法[S].北京:石油工业出版社,2010.

编辑 常迎梅

欢迎投稿 欢迎订阅