

# 泥页岩水化作用对岩石强度的影响

刘厚彬, 孟英峰, 李 皋, 李 平<sup>2</sup>, 邓元洲<sup>3</sup>

(1 油气藏地质及开发工程国家重点实验室·西南石油大学2中石化西北油田分公司科技处

3 川庆钻探工程公司钻采工程技术研究院)

刘厚彬等. 泥页岩水化作用对岩石强度的影响. 钻采工艺, 2010, 33(6): 18-20

**摘 要:** 在常规水基钻井过程中, 泥页岩地层一旦与水基钻井液接触, 岩石便发生水化膨胀作用, 岩石强度降低, 井壁稳定性下降。因此, 评价水化作用对泥页岩岩石强度的影响是开展泥页岩地层井壁稳定性研究的关键内容之一。大量的室内实验和现场实践证实, 水化作用对泥页岩地层井壁稳定性的影响程度与泥页岩黏土矿物组分分布、钻井液体系离子类型和摩尔浓度密切相关。文章深入研究了泥页岩水化作用的微观机理, 基于扩散双电层理论和范德华理论, 理论模拟了水化作用对泥页岩岩石强度的影响, 并与室内实验结果进行了对比分析, 理论模拟结果与室内实验结果较为吻合。

**关键词:** 泥页岩; 岩石强度; 水化作用; 扩散双电层; 理论模拟

**中图分类号:** TE 21 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1006-768X.2010.06.007

大量的室内实验和现场实践经验证实泥页岩强度降低的程度与岩石水化作用的相对强弱密切相关, 水化作用越加强烈, 岩石强度降低幅度越大, 反之, 岩石强度降低幅度较小。本文结合前人的研究成果, 利用扩散双电层理论和范德华理论评价了离子类型和离子摩尔浓度对泥页岩黏土矿物质微观结构单元之间力学分布及变化的影响, 并初步形成了一套理论数学模型, 与室内实验结果对比, 两者较为吻合。

## 一、泥页岩水化作用的微观机理和理论模型

### 1. 微观机理

从1941年Derjaguin、Landau、Verwey和Overbeek首次利用DLVO理论研究了不同离子类型和不同摩尔浓度溶液对胶体稳定性的影响, 至2002年孟英峰教授首次利用DLVO理论数值模拟了泥页岩地层水化学反应, 人们逐渐对泥页岩水化作用微观机理有了初步的认识: 水基钻井液与泥页岩地层接触后, 钻井液滤液在压力势差和化学势差的驱动下侵入近井壁地带, 在引起孔隙压力增加的同时, 也改变了近井壁地层孔隙流体的离子类型和摩尔浓度分布, 进而

影响到黏土矿物土片和晶片之间离子类型和离子摩尔浓度的分布情况。由于不同类型离子与黏土片(黏土晶片)表面物理化学吸附势不同, 不同离子之间存在吸附与置换作用。同时, 黏土矿物土片(黏土晶片)表面存在扩散双电层, 扩散双电层的厚度与表面吸附离子类型和离子摩尔浓度密切相关。因此, 黏土片和黏土晶片之间离子类型和摩尔浓度的变化均导致扩散双电层分布发生改变, 扩散双电层厚度增加或变薄, 扩散双电层斥力大小随之改变, 最终, 黏土片和黏土晶片之间力学平衡被打破。那么, 相邻黏土片和黏土晶片只有通过调整晶间距来重新达到力学平衡状态, 宏观上则表现为水化膨胀应变, 在遇有外力束缚时, 水化膨胀应变转化为水化膨胀应力。在泥页岩水化膨胀的同时, 泥页岩岩石强度降低, 岩石强度的改变必然与泥页岩黏土矿物土片和晶片之间作用力的改变密不可分。

### 2. 理论数学模型

若要评价水化作用对泥页岩岩石强度的影响, 首先要从微观上研究水化作用影响岩石强度的机理。泥页岩是以黏土矿物为主的固结程度较高的沉积岩, 含有部分石英、长石、方解石等, 泥页岩岩石强度则主要体现了单位体积内黏土矿物的联接强度。

收稿日期: 2010-06-08; 修回日期: 2010-08-20

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2006AA06AA103)资助。

作者简介: 刘厚彬(1980-), 博士, 现从事岩石力学、井壁稳定方面研究工作。地址: (610500) 四川省成都市新都区西南石油大学国家重点实验室, 电话: 028-83032459, 13980532266, E-mail: liuhoubin523@sina.com

从微观上讲,泥页岩水化作用与黏土矿物自身微观特征密切相关,水化作用导致黏土矿物连接强度减弱,是泥页岩力学强度减弱的根本原因。黏土矿物是由无数黏土矿物土片和黏土晶片组成,黏土矿物强度则是无数黏土片和黏土晶片之间连接强度之和。不配伍钻井液滤液侵入泥页岩地层后,黏土矿物土片和黏土晶片之间双电层斥力发生改变,进而引起黏土片和黏土晶片之间连接强度减弱。那么,黏土片和黏土晶片之间连接强度的改变量与双电层斥力的改变量有着直接的关系。因此,可以用泥页岩单位体积内所有黏土矿物土片和黏土晶片之间双电层斥力改变量之和来描述水化作用对泥页岩岩石强度的影响。根据扩散双电层理论,相邻黏土矿物土片和黏土晶片之间双电层斥力可表示为:

$$F = 4KTNa \sum_i C_i \left( \cosh\left(\frac{z_i e \psi_d}{kT}\right) - 1 \right) \quad (1)$$

式中: $k$ —波尔兹曼常数; $T$ —温度, K ; $Z$ —离子化合价; $e$ —电荷单位; $\psi_d$ —相邻黏土片中间位置电势, V ; $C$ —离子摩尔浓度; $Na$ —阿伏加德罗常数; $h$ —相邻黏土片(黏土晶片)之间距离。

由式(1)便可得到不同类型黏土矿物在不同离子类型溶液或不同摩尔浓度溶液中相邻黏土片(晶片)之间双电层斥力变化情况,图1给出了在不同摩尔浓度 KCl 溶液中蒙脱石晶片之间双电层斥力分布情况。

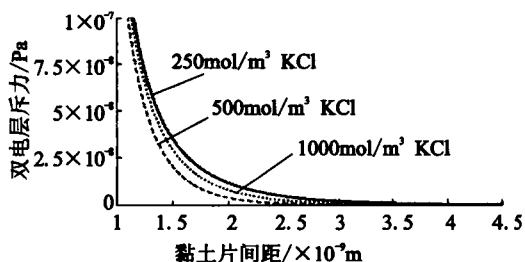


图1 蒙脱石晶片之间双电层斥力分布情况图

从图1上可以看出,相同晶间距、不同钾离子摩尔浓度条件下,蒙脱石晶片之间双电层斥力大小有着明显的差异。随着钾离子摩尔浓度的增加,黏土晶片之间的双电层斥力逐渐减小;反之,双电层斥力增加。双电层斥力的增加导致泥页岩黏土矿物膨胀,强度降低,这也是增加钻井液钾离子摩尔浓度能够在一定程度上稳定井壁的根本原因。

假设在原始地层水条件下, $j$ 类黏土矿物土片之间双电层斥力为  $F_j^0$ , 钻井液滤液侵入泥页岩地层后, $j$ 类黏土矿物土片之间双电层斥力变为  $F_j'$ , 双电层斥力改变量则可表示为: $F_j' - F_j^0$ , 在  $i$  方向的分量

则可表示为: $(F_j' - F_j^0) \cos\alpha_i$ 。

假设泥页岩单位体积内有  $n_j$  个  $j$  类黏土片, 那么所有  $j$  类黏土片在  $i$  方向双电层斥力改变量之和为:

$$\Delta F_j^i = n_j \cdot (F_j' - F_j^0) \cdot \cos\alpha_i \quad (2)$$

那么,泥页岩单位体积内所有黏土片之间双电层斥力改变量为:

$$\Delta F_1 = \sum_j n_j \cdot (F_j' - F_j^0) \cdot \cos\alpha_i \quad (3)$$

由于伊利石、高岭石和绿泥石黏土晶片之间连接强度较高,晶片之间不存在水化作用,双电层斥力也不会发生改变。蒙脱石黏土晶片之间只存在范德华吸引力,连接强度较弱,水分子和离子很容易进入蒙脱石晶片之间,引起水化作用。因此,只考虑蒙脱石晶片之间水化作用。假设原始条件下蒙脱石晶片之间双电层斥力为  $F_m^0$ , 钻井液滤液侵入地层后,蒙脱石晶片之间双电层斥力为  $F_m'$ , 泥页岩单位体积内有蒙脱石土片  $n_m$  个, 每个蒙脱石土片由  $n_{mm}$  个蒙脱石镜片组成, 那么,泥页岩单位体积内所有蒙脱石晶片之间双电层斥力改变量表示为:

$$\Delta F_2 = n_m \cdot n_{mm} \cdot (F_m' - F_m^0) \cos\alpha_m \quad (4)$$

泥页岩单位体积内所有黏土片和黏土晶片之间双电层斥力改变量在  $i$  方向的分量表示为:

$$\begin{aligned} \Delta F &= \Delta F_1 + \Delta F_2 \\ &= \sum_j n_j \cdot (F_j' - F_j^0) \cdot \cos\alpha_i + \\ & n_m \cdot n_{mm} \cdot (F_m' - F_m^0) \cdot \cos\alpha_m \end{aligned} \quad (5)$$

利用式(5)评价了川西蓬莱镇组泥岩在不同摩尔浓度 NaCl、KCl 溶液中,单位体积内所有黏土片和黏土晶片双电层斥力改变量之和分布情况,如图2所示。

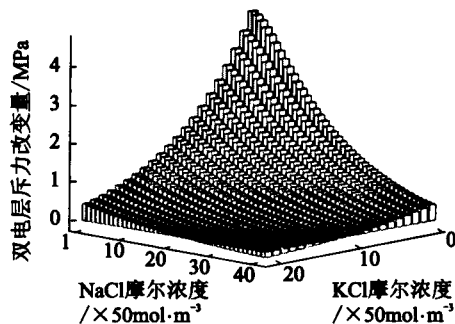


图2 双电层斥力改变量分布情况图

从图2上可以看出,随着 NaCl、KCl 摩尔浓度的增加,单位体积内所有黏土片和黏土晶片之间双电层斥力增加量逐渐减小,当离子摩尔浓度达到地层原始状态,双电层斥力增加量为零;反之,双电层斥力增加量逐渐增大,在无离子蒸馏水条件下双电层

斥力增变量为最大值。

## 二、室内实验评价

理论上认为可以间接利用泥页岩单位体积内所有黏土片和黏土晶片之间双电层斥力改变量之和在某方向上的分量来评价水化作用对泥页岩岩石强度的影响。为了验证理论认识和理论数学模型的准确性,需要开展室内实验评价,对比分析理论模拟结果与室内实验结果的吻合度。图3、图4和图5分别评价了不同摩尔浓度 NaCl 和 KCl 溶液浸泡后川西地区蓬莱镇组泥岩内聚力、单轴抗拉强度和单轴抗压强度分布情况,并与理论模拟结果进行对比。

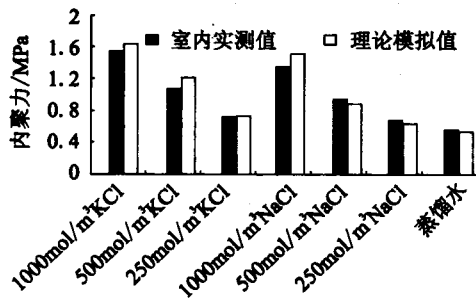


图3 蓬莱镇组泥岩内聚力分布情况图

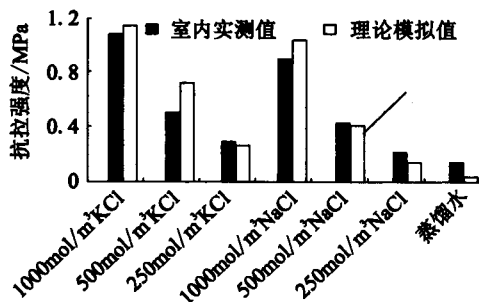


图4 蓬莱镇组泥岩单轴抗拉强度分布情况图

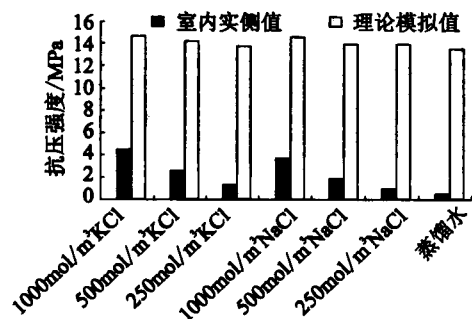


图5 蓬莱镇组泥岩单轴抗压强度分布情况图

从图3、图4和图5上可以看出,蓬莱镇组泥岩单轴抗拉强度和内聚力实验测试结果与理论模拟结

果较为吻合,泥页岩水化作用后岩石单轴抗拉强度和内聚力的改变量近似等于单位体积内所有黏土矿物土片和黏土晶片之间双电层斥力改变量之和在某方向的分量,与前面的理论认识较为吻合。而单轴抗压强度室内实测值与理论模拟值差异较大。

## 三、结论

(1)泥页岩水化膨胀作用是单位体积内所有黏土矿物结构单元之间距离变化的宏观表现。

(2)泥页岩黏土矿物结构单元之间力学变化导致相邻结构单元之间联接强度减弱,是泥页岩水化作用降低岩石强度的根本原因。

(3)水化作用对泥页岩岩石强度的影响程度取决于泥页岩岩体内所有粘土矿物结构单元之间双电层斥力的改变量。

(4)水化作用对泥页岩内聚力、单轴抗拉强度的影响值近似等于泥页岩单位体积内所有黏土矿物结构单元之间双电层斥力改变量之和在某方向的分量。

(5)水化作用对泥页岩单轴抗压强度的影响是泥页岩单位体积内所有黏土矿物结构单元之间双电层斥力改变量之和在某方向分量的数倍关系。

### 参考文献

- [1] 孟英峰. 泥页岩水化学反应的系统仿真技术及其在油气田开发领域中的应用[D]. 西南石油大学,2002.
- [2] 刘厚彬. 超深井井壁稳定性分析[J]. 天然气工业, 2008,28(4):67-69.
- [3] 蒋祖军. 气体钻井井壁稳定性评价方法分析[J]. 天然气工业,2007,27(11):68-70.
- [4] 李皋. 气体钻井的适应性评价技术[J]. 天然气工业, 2009,29(3):57-61.
- [5] 沈明道. 黏土矿物及其微组构与石油勘探[J]. 成都:电子科技大学出版社,1993.
- [6] 黄春. 黏土矿物抑制性和黏土胶体的热稳定性研究[D]. 东营:山东大学,2002.
- [7] 李健鹰. 泥浆胶体化学[M]. 北京:高等教育出版社, 1988.
- [8] 范·奥尔芬. 黏土胶体化学导论[M]. 北京:农业出版社,1982.
- [9] 奥西波夫,编. 李生林,张元一,译. 黏土类土和岩石的强度与变形性能的本质[M]. 北京:石油工业出版社, 1985.
- [10] 刘厚彬. 气体钻井水侵条件下泥页岩井壁稳定性研究[D]. 成都:西南石油大学,2009.