

文章编号: 1000-7598 (2010) 09-2723-06

黏土矿物组构对水化作用影响评价

冒海军^{1,2}, 郭印同¹, 王光进², 杨春和^{1,2}

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071; 2. 重庆大学 资源及环境科学学院, 重庆 400044)

摘 要: 泥页岩水化过程中黏土矿物起着主要的作用, 但目前还缺少相关的定量描述研究。为此, 利用 SEM、X-粉晶衍射技术, 对采自不同地区的泥岩和板岩在干燥状态、不同浸泡时间后的微观结构和含量进行分析及研究, 分析黏土矿物的组构随浸泡时间的变化过程, 并定量地分析其在水化过程的影响规律, 研究泥页岩的软化过程。研究认为, (1) 泥页岩、板岩中影响水化过程的内在因素是蒙脱石、高岭石、绿泥石和伊利石等黏土矿物的含量; (2) 黏土矿物定向排列时水化作用效果较无序排列时的明显; (3) 泥页岩的水化作用是一个渐进的过程, 即在水化过程中流体介质首先使表面的黏土矿物软化, 产生掉块; 随着时间延长, 流体沿裂缝、层理面向岩石内部渗透, 黏土矿物发生膨胀; 无围岩限制作用时坍塌掉块持续发生; (4) 泥浆中加入一定的无机盐有助于抑制水化过程的发生; 压力增加将抑制水化过程的发生; 温度升高则能促进泥页岩的水化过程。

关 键 词: 泥页岩; 黏土矿物; 微观结构; 水化过程**中图分类号:** TU 443**文献标识码:** A

Evaluation of impact of clay mineral fabrics on hydration process

MAO Hai-jun¹, GUO Yin-tong¹, WANG Guang-jin², YANG Chun-he^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. College of Resources and Environment, Chongqing University, Chongqing 430044, China)

Abstract: Clay minerals play important roles in hydration process, while the role was lack of quantitative evaluation at present. Therefore, SEM and X-ray powder diffractometry technology were used to analyze the microstructure, components and contents of clay minerals, and the change of microstructures in dry condition and different wetting times. At the same time, expansion experiments in different conditions were performed to study the variation of mass and the structure during the hydration process. These experiments show that: (1) The inner factors affected the hydration process are the contents of clay minerals such as montmorillonite, kaolinite, chlorite and illite in shales and slates. (2) Water-weakening effect is more distinctive when clay minerals array in order than in disorder. (3) Hydration progress of shales and slates happens in a gradual course. That is to say, clay minerals on the surface absorbed water and expanded firstly, which made the shale and slate fallen; then fluids filtered into the rock inside along the layer surfaces or cracks with time prolonged, and the inner minerals expanded, which made the fall occurred when without confining pressures. (4) During hydration progress, addition of inorganic chemical components in slurry and pressure increase will constrain the water-weakening effect; while the temperature will accelerate the water-weakening rate.

Key words: shale; clay mineral; microstructure; hydration process

1 引 言

黏土矿物广泛存在于泥页岩、泥质砂岩等沉积岩和板岩、千枚岩及部分玄武岩等变质岩中, 在地下水的作下, 这些地层因黏土矿物的吸水作用产生膨胀, 表现出强烈的亲水性, 产生较大的膨胀压力, 对地层中原有的结构产生破坏, 在钻井工程

中表现为井壁的坍塌与失稳, 在地表工程中表现为泥页岩层的软化, 强度降低, 产生软化夹层, 导致工程的失稳。因此, 合理评估黏土矿物的水化膨胀过程, 研究水化失稳机制, 可以为工程的稳定性与治理提供理论基础。

目前对黏土矿物水化过程的研究主要从宏观与微观两方面进行。宏观上, 部分学者^[1-6]通过对含

收稿日期: 2010-01-19

基金项目: 国家 973 项目 (No. 2010CB226701); 国家自然科学基金资助项目 (No. 50904062); 中科院武汉岩土所知识创新工程领域前沿项目 (No. 0715091Q01); 重点开放实验室自选项目 (No. 810101Z02)。

第一作者简介: 冒海军, 男, 1978 年生, 助理研究员, 主要从事岩土工程、地下空间与工程等领域的科研工作。E-mail: hjmao@whrsm.ac.cn

有黏土矿物较多的泥页岩、粉砂质泥岩进行不同介质条件下岩石的水化实验，研究岩石力学参数随含水率的变化而降低的过程，分析了温度、围压等因素对水化过程和影响，建立了相应的变化规律公式。部分学者认为，岩石发生软化作用是由于黏土矿物与溶液发生离子交换作用引起，可以将岩石浸泡在不同溶液中研究液体中化学成分与离子浓度的变化规律，分析黏土矿物的水化膨胀压^[7-8]。微观方面，目前主要利用各种岩矿测试手段如扫描电镜、压汞、X-衍射、比表面分析仪等对泥页岩进行分析，研究泥页岩中黏土矿物的组成和含量，测试水化过程中泥页岩的膨胀率，定性分析黏土矿物组构对水化过程的影响^[9-11]。

从已有研究成果可以看出，影响泥页岩水化作用的基础在于泥页岩中含有的黏土矿物含量及其内部的组构，而目前这些因素还只是进行了定性分析，远未能达到定量分析的阶段。因此本文通过对选自几个地区的板岩、泥岩等进行微观结构测试与宏观力学实验相结合分析，研究岩石的水化作用，初步评价黏土矿物的组构对水化过程的影响。

2 黏土矿物成分及其含量分析

泥页岩由泥质颗粒和非泥质颗粒组成，泥质颗粒由由各种黏土矿物片组成，包括高岭石(K)、绿泥石(C)、伊利石(I)、蒙脱石(M)及一些混层。非泥质颗粒由石英、长石、方解石等颗粒组成，颗粒与颗粒之间、黏土片与片之间、晶片层与层之间会有各种不同的孔隙。不同地区由于沉积环境不同，泥页岩中的黏土矿物含量与内部结构差异很大，因此在与不同介质溶液接触时，水化过程也将有较大的差异。选择南水北调西线的板岩、川东北地区的泥岩与华北油田的泥页岩作为研究对象，分析黏土矿物差异所引起的水化过程的差异。

对采集的 3 种试样，利用中国地质大学(武汉)分析测试中心的 SEM、X-粉晶衍射等设备进行岩石成分分析和含量确定。表 1 为实验测试结果，图 1 和图 2 分别为典型的泥页岩在自然干燥状态下内部结构的扫描照片和粉晶衍射测试曲线。

表 1 不同岩石中黏土矿物含量
Table 1 Clay mineral contents in different rocks

岩样	黏土矿物含量/%					非黏土矿物含量/%
	K	C	I	M	I/S	
板岩	5	25	25		1.5	45
川东北泥岩	4.5	5.2	23.8			65
华北油 2 450 m	7.9		6.4		38.7	47
田泥岩 2 852 m	7.1		7.1		44.8	41

由实验结果可以看出，几种泥页岩具有如下特征：(1) 泥页岩由含各种黏土片的泥质团状颗粒、非泥质颗粒、多种孔隙与裂缝、各种形式的水、化学离子组成。(2) 几种泥岩中，由于沉积环境的不同，黏土矿物的含量变化较大，川东北地区采集的泥岩中非黏土矿物含量达到了 65%左右，必将影响到水化机制和结果。(3) 板岩中黏土矿物呈现定向排列，宏观上表现为层理面发育，部分地区有裂缝；一般的泥页岩中，黏土矿物在完整区块中杂乱无序排列，局部地区呈现定向排列。(4) 黏土矿物主要为伊利石、绿泥石、高岭石与伊蒙混层，缺少蒙脱石；黏土矿物为结晶形态，颗粒大小从 8 μm 至 25 μm 之间变化。(5) 几种岩石内部，黏土矿物与石英、长石之间为泥质胶结，层理面附近胶结程度低，强度较低；泥岩块体内部颗粒间胶结密实，孔隙率较低，强度相对较高。(6) 岩石内部孔隙呈不规则形态，孔隙率为 14%左右，最大孔喉半径 30 μm，平均半径为 20 μm 左右。

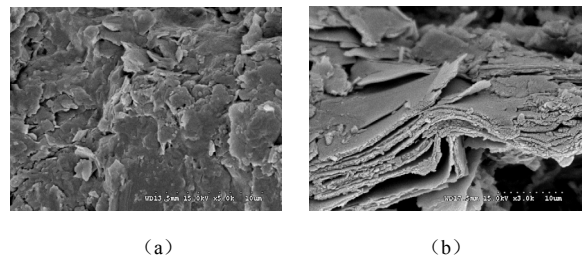


图 1 泥页岩 SEM 微观结构图
Fig.1 Typical SEM images of clays in dry conditions

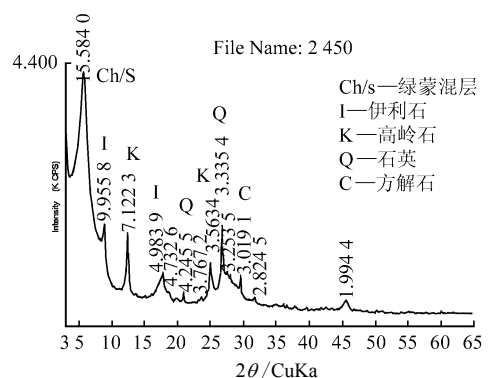


图 2 X-粉晶衍射图谱
Fig.2 Typical X-ray powder diffractometry spectra of clays

3 岩样浸泡后结构分析

将现场采集的 3 种岩石样按不同的实验要求加工制备成标准试件，分为多组，分析在不同的溶液中岩石的水化过程。浸泡过程中隔一段时间将试样

取出,进行微观结构分析、测试含水率、膨胀实验,分析岩石水化过程中力学强度与微观结构的变化,研究黏土矿物的组构对水化作用的影响。浸泡实验前后总共有60 d。微观结构观测在中国地质大学进行,膨胀试验测试在长江科学院岩基所内进行,力学实验在本所内进行,实验取样与过程均按相关规范进行。

通过电子扫描电镜测试结果可知,在泥岩页浸泡后黏土矿物和水发生水化反应和离子交换作用,微观结构产生了变化。

3.1 黏土矿物颗粒形态变化

泥页岩中各种黏土矿物的微观结构是某种板、片状单元有序或无序排列堆积。由黏土矿物的电学特征可知,各种黏土矿物均为表面带负电荷的晶片或晶片构造层;不同矿物,晶片形状不同,大小厚薄不同,带电量不同,阳离子交换能力不同。在黏土矿物与水接触后,首先表面的颗粒晶片吸水,形成水化膜,矿物颗粒产生膨胀,随着吸水量的增加,矿物表面产生泥化,图3为泥页在水中浸泡3 d与35 d后观测到的微观结构照片。对比干燥状态下的结构显示,泥页岩中黏土矿物颗粒由棱角状逐渐产生钝化现象,到后期颗粒边界逐渐消失,小颗粒基本看不出具体形态,大颗粒仅中心部位可见。由此反映出水化过程是由表层向内部扩展,在没有围岩限制时,将会产生膨胀掉块现象。非黏土矿物因不吸水膨胀,其颗粒边界没有变化。

由SEM照片可以看出,泥岩块体内部较层理面附近胶结程度好,黏土矿物颗粒的边界泥化程度低,颗粒形态变化不明显。

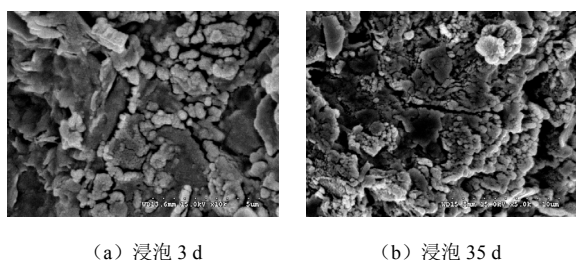


图3 不同浸泡时间后黏土矿物微观结构

Fig.3 SEM images of clays after different wetting times

3.2 孔隙率的变化

从不同浸泡时间后泥岩微观结构图中可以看出,由于黏土矿物吸水产生泥化膨胀,岩石内部的孔隙减小,泥岩中孔隙率由14%减小到10%左右,板岩中孔隙率则由10%减小到8%;最大孔喉半径也分别由30 μm和24 μm减小到24 μm和20 μm,

即孔隙因膨胀变形减小了将近10%,随着浸泡时间延长,孔隙减少增大,不过在浸泡后期,孔隙基本保持不变。

3.3 膨胀变形

根据膨胀试验结果可知,微观结构上显示出黏土矿物的膨胀率接近10%,而宏观膨胀试验测试(图4)显示,板岩、泥页岩在自由膨胀的开始阶段,膨胀变形速率较快,在2、3 d后基本保持不变^[11-12],膨胀变形率为1.3%、5.7%。宏观上膨胀变形与微观上的变形量存在较大的差异,其原因在于泥岩与板岩中含有较多的非黏土矿物,不会产生膨胀,微观上的膨胀变形仅反映的是局部变形。

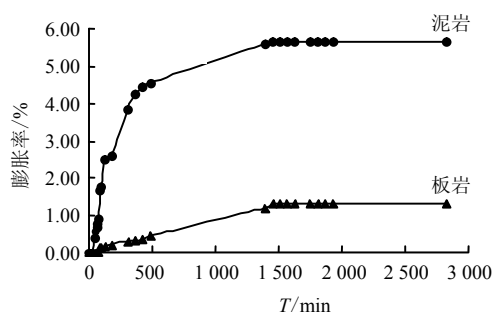


图4 泥岩与板岩自由膨胀曲线

Fig.4 Free expansion curves of clays and slates

4 黏土矿物组构对水化作用影响分析

影响水化过程的因素包括有内因与外因两种,其内因是组成岩石的黏土类型和含量、排列程度、胶结程度,外因则与浸泡的介质、时间、温度、压力等,以下初步分析对这些因素的作用。

4.1 黏土矿物成分对膨胀率的影响

由本次实验结果可知,板岩绿泥石含量为25%,伊利石为25%,其膨胀变形为1.2%,泥页岩中高岭石含量为4.5%,绿泥石含量为5.2%,伊利石的含量为23.8%,膨胀变形为7%,二者中其他黏土矿物含量较少,非黏土矿物含量近50%。

表2为南堡油田馆陶组玄武岩与玄武质泥岩的黏土矿物含量与膨胀变形的数据^[13],结果显示该区样品中的黏土矿物为风化蚀变的火山碎屑物质凝灰岩类,黏土矿物含量超过60%,黏土矿物中蒙脱石含量达82%~98%,绿泥石含量为1%~7%,高岭石含量为1%~7%,伊利石含量为2%~4%。水化结果显示,该层段的泥岩、凝灰岩、玄武质泥岩具有极强的膨胀性,膨胀率达30%~90%。表3为塔中隆起区块不同地质年代中泥岩中黏土矿物的含量及膨胀变形率^[14],可见泥岩中含有较多的高岭石与

伊蒙混层, 其膨胀率在 10%~20%之间变化。

这些实验测试结果说明, 黏土矿物中蒙脱石的吸水程度最高, 高岭石次之, 绿泥石与伊利石则基本不水化, 伊蒙混层与绿蒙混层的吸水膨胀变形处于高岭石与绿泥石之间。其原因在于, 蒙脱石矿物阳离子交换容量高, 水化作用好, 分散度高; 高岭石矿物, 阳离子交换容量低, 水化作用差, 分散度低; 伊利石矿物, 由于其层间阳离子 K^+ 的特殊作用, 水化作用极弱, 属非膨胀性矿物。

表 2 南堡油田馆陶组玄武岩黏土矿物含量

Table 2 Clay mineral contents of basalts in Nanbao oil field

岩样	黏土矿物含量/%					膨胀率/%
	K	C	I	S	I/S	
玄武质泥岩(2 401 m)	7	4	5	93		7.87
玄武岩掉块(2 683 m)	3	3	1	89		43.24
灰黑色玄武质泥岩	5	5	1	89		38.65
灰黑色玄武质泥岩	6	4	1		84	40.35
玄武岩(2 040 m)	6	6	2	86		32.58
玄武岩(2 160 m)	7	7	4	82		28.12
玄武岩(2 240 m)	1	1	0	98		46.95
玄武岩(2 290 m)	6	5	4	85		33.26

注: () 中数据为取样深度。

表 3 塔中隆起黏土矿物含量

Table 3 Clay mineral contents in Tazhong upheaval (%)

地质年代	黏土矿物含量			混层比	晶态矿物	碎屑颗粒	膨胀率
	K	C	I/S				
E	3.60	9.31	9.77	60	43.5	37.7	14.87
J		5.45	12.75	60	40.6	47.8	17.58
T		5.98	29.69	70	49.6	41.2	18.22
P	5.13	3.63	40.87	75	48.7	35.9	16.67
C	5.14	3.68	23.97	45	50.1	31.4	19.24
S	2.55	16.38	14.54	40	46.4	35.8	13.39
D	2.57	21.26	14.87	35	45.9	36.4	16.05
O	2.57	22.13	12.30	35	36.4	26.7	11.28

4.2 黏土矿物排列与胶结程度的影响

泥页岩与板岩中黏土矿物有两种排列: 定向有序排列与无序堆积。由微观 SEM 照片可知, 当黏土矿物定向排列时, 宏观上表现为层理面发育, 局部地方发育有裂纹; 当黏土矿物无序堆积排列时, 岩石表现为一个完整的块体。通过标准试件的吸水膨胀测试, 分析其中含水率变化可知, 当层理面发育时, 含水率增长很快, 并且很快就达到饱和状态; 当为完整块体时, 含水率增长缓慢, 吸水程度低, 饱和度较含层理面的泥岩小。由此可以反映出定向排列时更利于岩石的水化, 如图 5 所示。

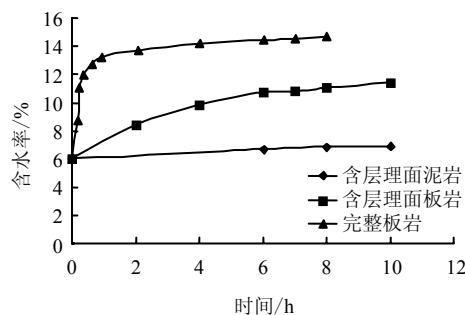


图 5 泥岩试样含水率随时间变化

Fig.5 Relationship between water-contents and wetting time

同样, 岩石内部各种晶体颗粒之间的胶结物及胶结程度对水化作用也有很大的影响。一般而言, 颗粒之间的胶结根据胶结物的成分有泥质胶结、钙质胶结、硅质胶结、铁质胶结等多种。矿物学方面的研究成果表明, 这几种颗粒间胶结的黏土结力有: 铁质胶结大于硅质胶结大于钙质胶结大于泥质胶结。当黏土矿物储量较高时, 多以泥质胶结为主, 此时胶结作用的黏土结力很小, 易受水的作用, 与水分子及其中的离子形成氢键作用, 颗粒分散, 岩石的强度降低, 如板岩由泥岩经过变质作用形成, 颗粒之间胶结作用部分由泥质胶结向铁质胶结转化, 因此在同样条件下板岩较泥岩难于遇水软化。

4.3 非黏土矿物影响

组成岩石的成分中非黏土矿物含量同样对水化作用过程有较大的影响, 选取板岩与泥岩进行了浸泡垮塌试验, 分析岩石的掉块过程。图 6 为实验过程中岩石破坏掉块过程质量变化曲线, 图中 N3、N4 代表泥岩, N5 代表板岩。板岩中含有较多的石英、长石及少量的方解石晶体颗粒, 黏土矿物含量 45%~50%。泥岩中非黏土矿物含量相对较少, 胶结物以泥质为主。

由实验结果可知, 板岩中层理面明显, 因此吸水产生膨胀破坏时首先从层理面开始, 表面产生微裂纹, 后期裂纹向内部发展, 产生多条裂纹, 至最后沿层理面产生贯穿的裂缝, 试样发生断裂掉块, 在层理面发育处和表面更易产生掉块现象; 质量变化曲线上表现为出现一个明显的转折点, 表明有掉块出现, 泥岩则从表面开始泥化, 逐渐向内部发展, 当黏土矿物含量较多时, 吸水后质量增加, 随后出现少量的掉渣, 质量缓慢降低, 没有明显的掉块出现, 表明非黏土矿物含量较多的岩石遇水作用后以坍塌掉块破坏为主。

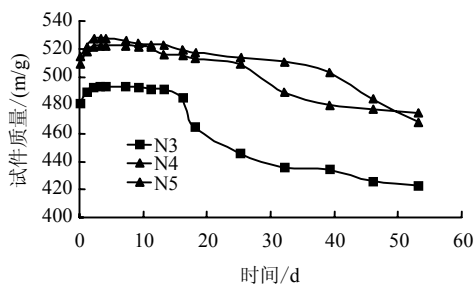


图 6 泥岩与板岩试样质量随浸泡时间变化曲线
Fig.6 Relationship between mass and wetting time

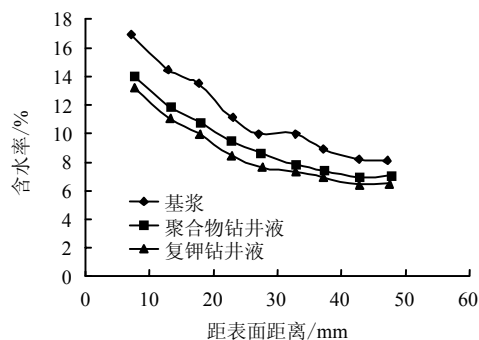


图 7 不同钻井液浸泡后含水率变化曲线
Fig.7 Curves of water contents in different drilling fluids

4.4 水中电解质类型及浓度的影响

介质中电解质通过离子交换吸附压缩双电层，并产生渗透作用，影响泥页岩的水化。采用室内实验方法，将泥岩样浸泡于清水、基浆、聚合物钻井液与复钾基钻井液中，分析泥岩含水率与质量随时间的变化规律，揭示泥岩的垮塌过程。

实验结果显示，①用清水浸泡和泥浆浸泡后，吸水后泥页岩的含水率变化规律相似，均表现为开始时增加较快，2~3 d 后达到饱和状态，后期泥岩完全饱和和后基本不再变化。②用清水浸泡后的泥岩样较用泥浆浸泡后的泥岩样更快地达到饱和状态，表明泥浆吸附与试样表面，阻碍了黏土矿物的吸水作用，减弱了水化效应。③短间内即在试样表面出现大量的破裂面，并伴随有掉块的出现；泥浆溶液浸泡的试样随浸泡时间的延长，其表面也开始逐渐出现裂纹，后扩展成贯通的裂纹，掉块也随之出现，但相对于清水浸泡试样，所需时间更长，这也能够反映出泥浆在钻井中起到维护井壁稳定的作用；④几种不同基质的钻井液中，复钾基的钻井液抑制作用最强，聚合物钻井液次之，基浆有部分抑制作用，具体的表现为：在相同半径与浸泡时间条件时，基浆液浸泡岩石的含水率大于聚合物和复钾钻井液。由此表明，在钻井液中加入无机盐抑制剂，可以抑制泥页岩的水化，不同的无机盐种类与浓度影响着水化过程的进行。因此，钻井过程中选择合适的钻井液类型可以较好地控制井壁稳定性。

4.5 压力与温度对膨胀变形的影响

黏土矿物的水化过程还受温度和压力等因素的影响。黏土的水化膨胀易被机械负荷抑制。在不同的压力作用下，岩石的膨胀变化差异较大。和冰^[15]的研究成果表明，当围压从 10 MPa 增大到 20 MPa 时，膨胀应变从 1.6%减小至 1.1%，此结果表明，在钻井过程中，围压急剧降低，将使得泥岩地层易于发生膨胀变形，产生破坏。

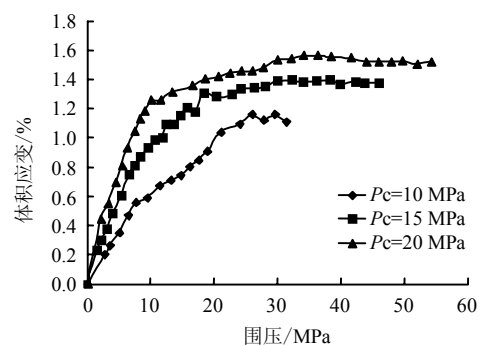


图 8 不同围压时泥页岩的吸水膨胀应变
Fig.8 Curves of expansion strain in different confining pressures

饱和水黏土在温度升高时结合水的能量及性质会发生变化。温度为 55~70 °C 时可使部分吸附结合水转化为自由水；升至 80~90 °C 时，绝大部分单层吸附水可被排除；升至 125~170 °C，甚至高于 200 °C 时，可排除紧靠颗粒表面的吸附结合水。另一方面，干黏土的膨胀也受温度的影响，温度由 20 °C 升至 70 °C 时，黏土的膨胀性指标增加 15%~20%，当然其绝对值与黏土成分、细度、交换性阳离子种类有关。以上结果表明，温度对黏土水化膨胀有一定影响。钻井过程中井壁岩石受到温度的影响，地面常温常压下的膨胀试验不足以反映井下岩石的膨胀情况。李雄威等^[16]的研究同样证明了温度对膨胀土水化过程的促进作用。

5 结 论

- (1) 泥页岩及板岩中影响水化过程的内在因素是蒙脱石、高岭石、绿泥石与伊利石等黏土矿物的含量，当蒙脱石与高岭石含量较高时水化过程更易于发生，伊利石含量较高时不利于水化的发生。
- (2) 黏土矿物定向排列时，水化作用效果较无序排列时的明显，水化过程较易沿着定向排列形成

的层理面发生。

(3) 泥页岩的水化作用是一个渐进的过程。在水化过程中流体介质首先使表面的黏土矿物软化,黏土矿物的粒径增大,孔隙减小,产生掉块;随着浸泡时间延长,流体沿裂缝、层理面向岩石内部渗透,黏土矿物发生膨胀,产生膨胀应力在无围岩限制作用时,坍塌掉块持续发生。

(4) 在泥浆中加入一定的无机盐组分有助于抑制水化过程的发生,压力增加将抑制水化过程的产生,温度升高则能促进泥页岩的水化过程。

参 考 文 献

- [1] NEWMAN G H. The effect of water chemistry on the laboratory compression and permeability characteristic of North Sea Chalks[J]. **Journal of Petroleum Technology**, 1983, 35(5): 976—980.
- [2] HADIZADEH J. Water-weakening of sandstone and quartzite deformed at various stress and strain rates[J]. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci**, 1991, 28(5): 431—439.
- [3] GLOVER P W J, GOMEZ J B. Damage of saturated rocks undergoing triaxial deformation using complex electrical conductivity measurements: Experimental results[J]. **Phys. Chem. Earth**, 1997, 22(1-2): 57—61.
- [4] 李守定, 李晓, 张年学, 等. 三峡库区宝塔滑坡泥化夹层泥化过程的水岩作用[J]. **岩土力学**, 2006, 27(10): 1841—1846.
LI Sou-ding, LI Xiao, ZHANG Nian-xue, et al. Water-rock interaction of clay gouged intercalation sludging process of baota landslides in Three Gorges reservoir area[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(10): 1841—1846.
- [5] 蔡利山, 苗锡庆, 李应有, 等. 川东北地区陆相地层井眼失稳原因分析[J]. **石油钻探技术**, 2008, 36(6): 39—43.
CAI Li-shan, MIAO Xi-qing, LI Ying-you, et al. Analysis of wellbore collapse in continental strata in northeastern sichuan basin[J]. **Petroleum Drilling Techniques**, 2008, 36(6): 39—43.
- [6] 徐同台. 井壁不稳定地层的分类及泥浆技术对策[J]. **钻井液与完井液**, 1996, 13(4): 42—45.
XU Tong-tai. Classification and slurry technical countermeasures in unstable layers[J]. **Drilling Fluid & Completion Fluid**, 1996, 13(4): 42—45.
- [7] 赵峰, 唐洪明, 孟英峰, 等. 微观地质特征对硬脆性泥页岩井壁稳定性影响与对策研究[J]. **钻采工艺**, 2007, 30(6): 16—18.
ZHAO Feng, TANG Hong-ming, MENG Ying-feng, et al. Effect and countermeasure research of microgeology characters on borehole stability in brittle shales[J]. **Drilling & Production Technology**, 2007, 30(6): 16—18.
- [8] 梁大川. 泥页岩水化机理研究现状[J]. **钻井液与完井液**, 1997, 14(6): 29—31.
LIANG Da-chuan. Review on the study of shale hydration mechanism[J]. **Drilling Fluid & Completion Fluid**, 1997, 14(6): 29—31.
- [9] 杨振杰. 泥页岩构成及泥页岩井壁表面和岩屑表面特征对井壁稳定性的影响-文献综述[J]. **油田化学**, 2000, 17(1): 73—77.
YANG Zhen-jie. Effect of shale constitutes and surface characters of shale borehole and cuttings on borehole stability- a review[J]. **Oil field Chemistry**, 2000, 17(1): 73—77.
- [10] 陈军海, 陈勉, 金衍, 等. 确定泥页岩黏土矿物组分的新方法及对钻井液性能的优化[J]. **中国石油大学学报(自然科学版)**, 2008, 32(5): 58—62.
CHEN Jun-hai, CHEN Mian, JIN Yan, et al. New method of determining clay mineral components of mud shale and optimization of drilling fluid performance[J]. **Journal of China University of Petroleum(Nature Science)**, 2008, 32(5): 58—62.
- [11] 杨春和, 冒海军, 王学潮, 等. 板岩遇水软化的微观结构及力学特性研究[J]. **岩土力学**, 2006, 27(12): 2090—2098.
YANG Chun-he, MAO Hai-jun, WANG Xue-chao, et al. Study on the variation on microstructure and mechanical properties of water-weakening slates[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(12): 2090—2098.
- [12] 冒海军, 杨春和, 黄小兰, 等. 不同含水条件下板岩力学实验研究与理论分析[J]. **岩土力学**, 2006, 27(9): 1637—1642.
MAO Hai-jun, YANG Chun-he, HUANG Xiao-lan, et al. Experiment study and theoretical analysis of slate under different saturated conditions[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(9): 1637—1642.
- [13] 冯京海, 徐同台, 王富华, 等. 南堡油田馆陶组玄武岩井壁失稳机理和技术对策研讨[J]. **钻井液与完井液**, 2008, 25(5): 1—4.
FENG Jin-hai, XU Tong-tai, WANG Fu-hua, et al. Research of borehole instability mechanism and technical counter- measures of basalt in Guantao formations in Nanbao oilfield[J]. **Drilling Fluid & Completion Fluid**, 2008, 25(5): 1—4.
- [14] 田乃林, 杨竞, 李爱红, 等. X 盆地塔中隆起黏土矿物分析及理化性能[J]. **承德石油高等专科学校学报**, 2008, 10(1): 6—9.
TIAN Nai-lin, YANG Jin, LI Ai-hong, et al. Mud shale mineral component and its physic-chemical property of Xinjiang Basin Tazhong-upward[J]. **Journal of Chende Petroleum College**, 2008, 10(1): 6—9.
- [15] 和冰. 泥页岩水化试验研究[J]. **断块油气田**, 2008, 15(4): 105—108.
HE Bing. Experimental study on clay shale while under hydration[J]. **Fault-Block Oil & Gas Field**, 2008, 15(4): 105—108.
- [16] 李雄威, 孔令伟, 郭爱国, 等. 考虑水化状态影响的膨胀土强度特性[J]. **岩土力学**, 2008, 29(12): 3193—3198.
LI Xiong-wei, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, et al. Strength characteristics of expansive soil considering effect of hydrous state[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(12): 3193—3198.