

◀ 钻井完井 ▶

doi:10.3969/j.issn.1001-0890.2013.06.011

## 温度和压力对黏土矿物水化膨胀特性的影响

毛 惠, 邱正松, 黄维安, 沈忠厚, 杨丽媛, 钟汉毅

(中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东青岛 266580)

**摘 要:**为进一步认识黏土矿物水化膨胀特性,利用新型高温高压泥页岩膨胀仪,通过试验分析了温度、压力及二者共同作用对怀俄明钠基膨润土和钙膨润土水化膨胀性能的影响,并从黏土矿物含水量、颗粒形态、毛管力及颗粒间相互作用等方面进一步分析了黏土矿物水化膨胀过程的微观变化特征。结果表明:温度和压力对黏土矿物水化膨胀性能影响显著,温度越高,黏土矿物水化膨胀量越大,且初始膨胀速率较快;压力对黏土矿物水化膨胀有 2 方面的作用(促进黏土矿物水化膨胀和抑制其水化膨胀),且与温度密切相关,压力越高初始膨胀速率越小;黏土矿物中含水量、颗粒形态及毛细管力等的变化均影响黏土矿物水化膨胀特性,当黏土矿物中的含水量上升时,黏土颗粒间的粘结力发生较大变化,且颗粒形态产生不均匀变化致使黏土矿物遇水产生不均匀膨胀和强大的膨胀压。

**关键词:**温度 压力 黏土矿物 水化 膨胀 泥页岩 实验室试验

**中图分类号:**TE254 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2013)06-0056-06

## The Effects of Temperature and Pressure on the Hydration Swelling Characteristics of Clay Mineral

Mao Hui, Qiu Zhengsong, Huang Weian, Shen Zhonghou, Yang Liyuan, Zhong Hanyi

(School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Huadong), Qingdao, Shandong, 266580, China)

**Abstract:** In order to find out the effects of temperature and pressure on the hydration swelling characteristics of clay mineral, based on the hydration of Wyoming sodium bentonite and calcium bentonite which is influenced by different temperature and pressure, the lab investigation of the hydration expansion characteristics of two clay mineral were carried by new HTP-3A dilatometer, and the microscopic changes in hydration expansion was analyzed from water content in clay mineral, particle morphology, capillary force and inter-particle interactions, etc. The results show that, temperature and pressure have an significant effect on hydration expansion characteristics of clay mineral and follow some certain rules. The higher the temperature, the greater the swelling capacity is and the faster the initial expansion rate is. There are two aspects of the role of pressure on the clay mineral hydration expansion closely related with temperature. And higher the pressure, the smaller the initial expansion rate is. Besides, the changes of water content in clay mineral, particle morphology, capillary force and inter-particle interactions are the important factors that the clay mineral has strong water swelling characteristics. The adhesive force between the clay particles changed greatly while the water content in clay mineral increases. The clay mineral has strong uneven water swelling characteristic and big swelling pressure which is led by the uneven changes of particle morphology.

**Key words:** temperature; pressure; clay mineral; hydration; swelling; shale; laboratory testing

油气钻探过程中,经常会钻遇复杂泥页岩地层。由于泥页岩中的蒙脱石、伊/蒙混层等水敏性黏土矿物具有极强的亲水性,其吸水膨胀后会产生很大的膨胀压,最终导致泥页岩强度降低,这是井壁失稳的直接原因<sup>[1-2]</sup>。黏土矿物水化是一个十分复杂的、动态的物理化学过程,黏土矿物水化膨胀性的影响因素不仅与其所接触流体的特性有关,也受钻井液组成及相互作用的环境影响,如接触时间、温度和压力等<sup>[3-8]</sup>。随着钻井技术的发展,钻遇地层的地质条件

**收稿日期:**2013-01-03;**改回日期:**2013-06-03。

**作者简介:**毛惠(1987—),男,甘肃天水人,2010年毕业于中国石油大学(华东)石油工程专业,油气井工程专业在读博士研究生,研究方向为油气井流体力学与工程。

**联系方式:**(0532)86981847,maohui01@163.com。

**基金项目:**国家科技重大专项“复杂地层井壁稳定控制及储层改造技术研究”(2011ZX05005-006-007HZ)、教育部“长江学者和创新团队发展计划”项目“海洋油气井钻完井理论与工程”(编号:IRT1086)、中国石油大学(华东)自主创新科研计划项目“改性纳米二氧化硅聚合物降滤失剂的研制”(编号:14CX06028A)联合资助。

越来越复杂,尤其是深井、超深井钻井过程中,存在井壁稳定性条件复杂、地层压力系统多、高温(超过 240 ℃)、高压等技术难题<sup>[9]</sup>。目前,钻井工程领域涉及泥页岩井壁稳定性的研究较多,但是针对温度和压力对黏土矿物水化特性影响规律的基础研究较少。为此,笔者利用新型高温高压泥页岩膨胀仪,研究了怀俄明钠基膨润土和钙膨润土水化膨胀特性受温度和压力的影响规律,分析了其水化膨胀

的微观特征,以进一步认识黏土矿物的水化膨胀特性。

1 试验仪器与材料

氮气瓶,管汇,怀俄明钠基膨润土,钙膨润土(潍坊华龙),样品全矿物分析及黏土矿物分析结果见表 1、表 2。高温高压泥页岩膨胀仪(型号 HTP-3A,见图 1)。

表 1 试验岩样 X-射线全矿物分析结果

Table 1 Mineral composition with X-ray diffraction analysis results of bentonite							%
样品	石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石	赤铁矿	黏土矿物总量
钙膨润土	30	11	13	4	3	1	38
样品	石英	方石英	斜长石	方解石	石膏	钙片沸石	黏土矿物总量
怀俄明钠基膨润土	4	3	8	3	1	10	71

表 2 样品黏土矿物 X-射线分析结果

Table 2 Clay mineral composition with X-ray diffraction analysis results of bentonite							%
样品	高岭石	绿泥石	伊利石	蒙脱石	伊/蒙间层	间层比	
钙膨润土	1	1	4	94	0	100	
怀俄明钠基膨润土	0	0	3	97	0	100	

试不同温度下怀俄明钠基膨润土和钙膨润土在蒸馏水中膨胀率随时间的变化关系,结果如图 2、图 3 所示。

由图 2、图 3 可知:当岩样模内压力为 0.1 MPa 时,20 和 100 ℃ 温度下怀俄明钠基膨润土在试验时间内的最终膨胀率分别为 166.04% 和 237.21%,差值 71.17%;钙膨润土的最终膨胀率分别为 78.32% 和 106.45%,差值 28.13%。当岩样模内压力为 3.5 MPa 时,20 和 100 ℃ 温度下怀俄明钠基膨润土在试验时间内的最终膨胀率分别为 129.18% 和 180.81%,差值 51.63%;钙膨润土的最终膨胀率分别为 58.94% 和 92.63%,差值 33.69%。可见温度对怀俄明钠基膨润土和钙膨润土水化膨胀特性的影响显著,温度越高岩样线性膨胀率越大,且温度对怀俄明钠基膨润土水化膨胀特性的影响更为显著;另外,随着膨胀时间的延长,测试样品的膨胀率一直呈现出上升趋势。但在 3.5 MPa 条件下,当温度超过 70 ℃ 时,最终膨胀率基本相当。此外,温度对测试样品的初始膨胀速率也有显著影响,在初始 30 min 内,样品的膨胀速率很大,且温度越高初始膨胀速率越大,但随着膨胀时间的延长,膨胀速率减小。

2.2 压力对黏土矿物水化膨胀性能的影响

分别测试了温度为 20 和 100 ℃ 时,不同压力下怀俄明钠基膨润土和钙膨润土在蒸馏水中膨胀率随时间的变化关系,结果如图 4、图 5 所示。

由图 4、图 5 可知:当温度为 20 ℃ 时,0.1 和 4.0 MPa 条件下怀俄明钠基膨润土在试验时间内的最终膨胀率分别为 166.04% 和 119.40%,差值

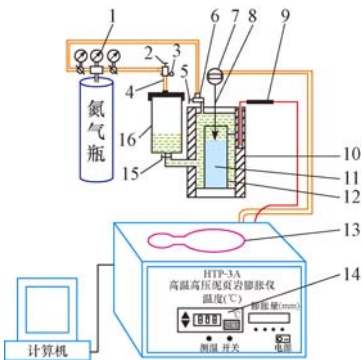


图 1 高温高压泥页岩膨胀仪基本结构

Fig. 1 The schematic diagram of HTP-3A dilatometer

1. 压力表;2. 放气手柄;3. 销钉;4. 连通阀杆;5. 放气螺钉;  
6. 输入三通阀;7. 容栅传感器;8. 导杆;9. 温度传感器;10. 主测杯;  
11. 黏土样品;12. 岩样模;13. 加热套;14. 温控仪;15. 注液阀;16. 注液杯

仪器主要指标及岩样压制条件:气源压力≥5 MPa,工作温度≤120 ℃,工作压力≤5 MPa;测试量程为 15 mm,测量分辨率为 0.001 mm;试样模内径为 25 mm;岩样压制条件为 4 MPa,稳压 5 min。

2 试验与结果分析

2.1 温度对黏土矿物水化膨胀性能的影响

将岩样模内压力分别加至 0.1 和 3.5 MPa,测

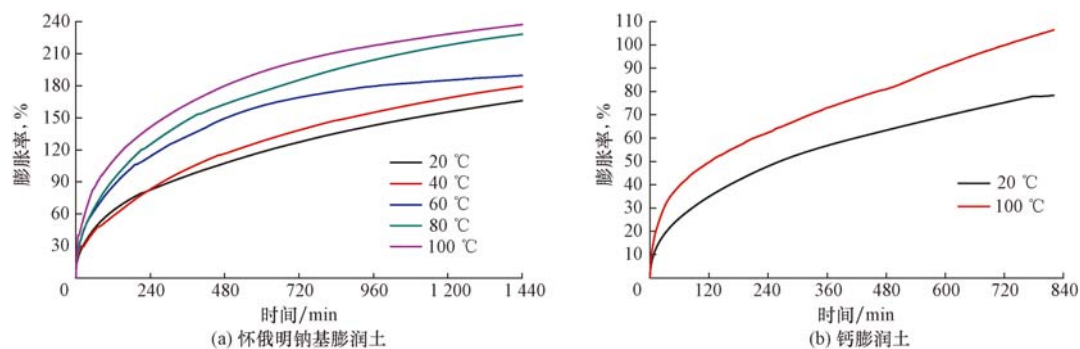


图 2 0.1 MPa 时不同温度下的膨胀率-时间关系曲线

Fig. 2 The curve of swelling rate versus time on different temperature at 0.1 MPa

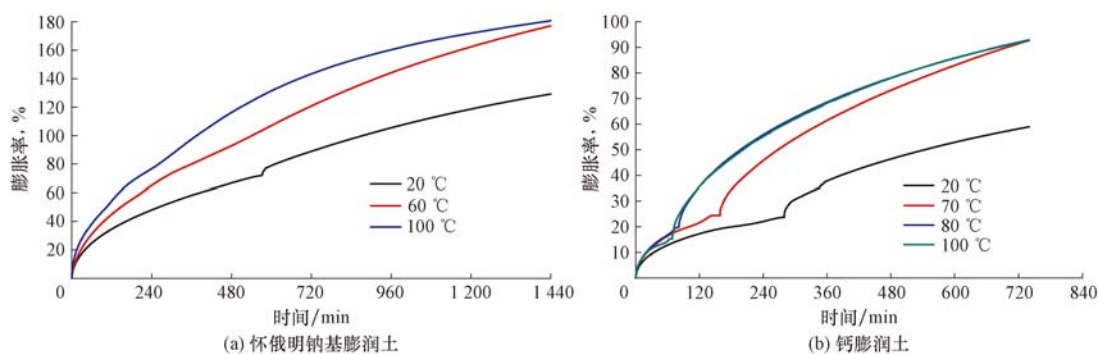


图 3 3.5 MPa 时不同温度下的膨胀率-时间关系曲线

Fig. 3 The curve of swelling rate versus time on different temperature at 3.5 MPa

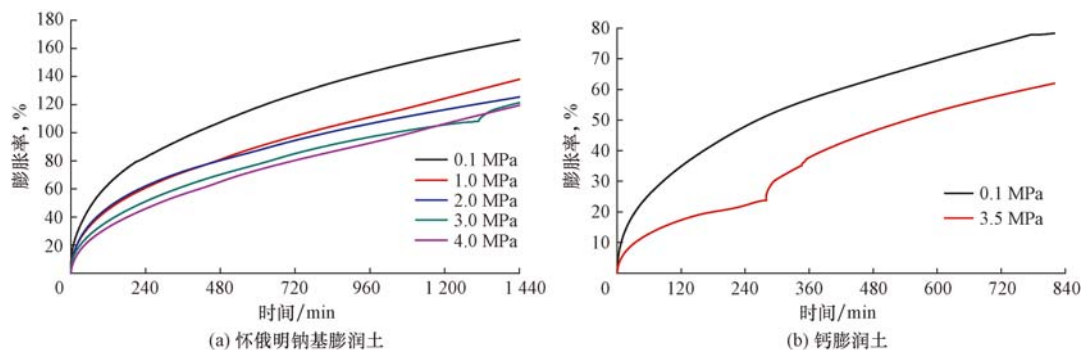


图 4 20 °C 不同压力下的膨胀率-时间关系曲线

Fig. 4 The curve of swelling rate versus time on different pressure at 20 °C

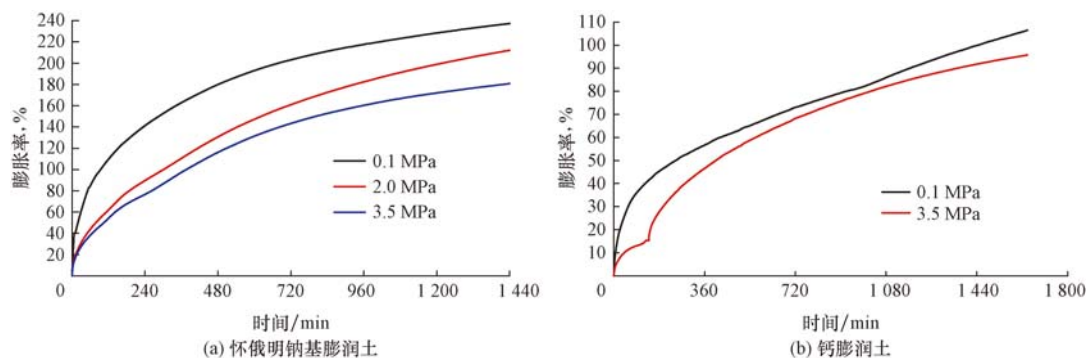


图 5 100 °C 时不同压力下的膨胀率-时间关系曲线

Fig. 5 The curve of swelling rate versus time on different pressure at 100 °C

—46.64%；钙膨润土的最终膨胀率分别为 78.32% 和 61.96%，差值—16.36%。当温度为 100℃ 时，0.1 和 3.5 MPa 条件下怀俄明钠基膨润土在试验时间内的最终膨胀率分别为 237.21% 和 180.81%，差值—56.40%；钙膨润土的最终膨胀率分别为 106.45% 和 95.72%，差值—10.73%。可见压力对怀俄明钠基膨润土和膨润土水化膨胀特性的影响也很明显，即随着膨胀时间的延长，测试样品的线性膨胀率一直呈现出上升趋势，且随着压力升高测试样品的线性膨胀率降低（见图 6）。压力对测试样品的初始膨胀速率也有显著影响，在初始 30 min 内，压力越高，初始膨胀速率越小，但随着膨胀时间延长，膨胀速率均减小。值得注意的是，当压力为 3.5 MPa 时，钙膨润土的膨胀率-时间关系曲线几乎均出现明显的“拐点”。

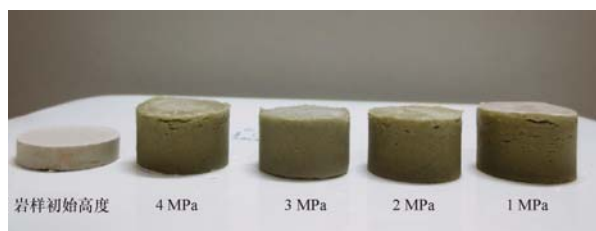


图 6 20℃ 时怀俄明钠基膨润土岩样在不同压力下的膨胀情况

Fig. 6 The sample of wyoming sodium bentonite after hydration swelling on different pressure at 20℃

在 100℃、3.5 MPa 条件下，依据水敏性黏土矿物膨胀率随时间的变化关系曲线，将其膨胀过程划分为初始快速吸水膨胀阶段（a 阶段）、加速膨胀阶段（b 阶段）、缓慢膨胀阶段（c 阶段）和稳定阶段（d 阶段），试验结果如图 7 所示。

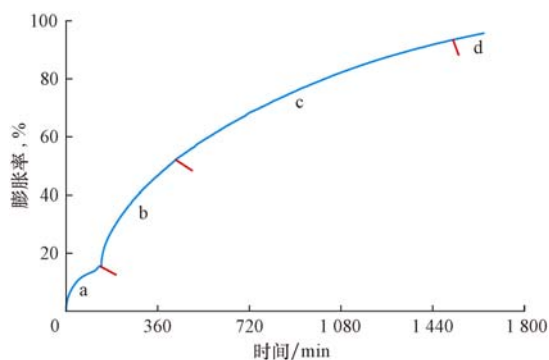


图 7 100℃、3.5 MPa 条件下钙膨润土的膨胀率-时间曲线  
Fig. 7 The curve of swelling rate versus time of calcium bentonite at 100℃ and 3.5 MPa

a 阶段为黏土矿物与水接触初期，主要发生黏

土矿物表面水化膨胀。干燥的黏土矿物单元晶体内部层间被吸附水占据，晶体间的微孔保持干燥，遇水吸力较大，岩样湿化速率较快。一方面，黏土矿物颗粒表面水化膜变厚，部分可交换阳离子发生水化；另一方面，在外部压力作用下，水分子能够较容易进入黏土矿物晶体间，促进水化膨胀，膨胀速率较快，在表面水化阶段黏土矿物膨胀量不大，但是膨胀压极大，约 4~400 MPa。随着水逐渐渗入黏土矿物内部，黏土与水的接触面面积扩大，黏土矿物开始完全膨胀，随之进入加速膨胀阶段。b 阶段主要发生黏土矿物渗透水化，随着黏土矿物晶体继续膨胀，晶体层间距变大，黏土矿物颗粒表面与接触流体间的水活度差，引起化学渗透水化膨胀增强。该阶段的黏土矿物膨胀主要由黏土表面吸附的可交换补偿阳离子形成的扩散双电层引起，双电层越厚，渗透水化越强，水化膜越厚，且与黏土矿物种类和地层水矿化度相关。该阶段黏土矿物膨胀量较大，但是水化膨胀压不大；当黏土矿物水分增加到一定程度，吸水速率减小，此时外部压力抵消黏土膨胀压的作用增强，泥页岩黏土矿物的膨胀速率降低，随之进入缓慢膨胀阶段。在黏土矿物的水化过程经历足够时间之后，最终达到试验岩心的最大膨胀量，即进入黏土膨胀的稳定阶段，d 阶段泥页岩黏土矿物不再发生膨胀，黏土矿物岩样与水接触的端面变得松软，几乎没有强度。

### 2.3 温度和压力对黏土矿物膨胀特性的共同影响

从图 2—5 可以看出，温度和压力共同作用对黏土水化膨胀规律的影响较为复杂，但仍有规律可循。图 8 为温度和压力共同作用下膨润土的膨胀率随时间变化的曲线。

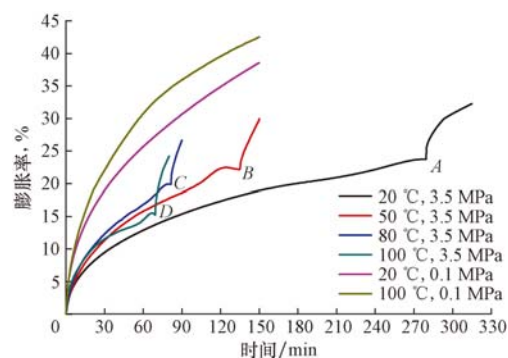


图 8 温度和压力共同作用下钙膨润土的膨胀率-时间曲线  
Fig. 8 The curve of swelling rate versus time on pressure and temperature

由图 8 可知，3.5 MPa 时不同温度下膨润土的



膨胀率随时间的变化曲线均出现了“拐点”(A, B, C和D), 当温度逐渐升高时, 出现“拐点”的时间提前, 20℃下在285 min时出现, 100℃下在70 min时出现; 另外, 温度越高, “拐点”位置相对应的膨胀率越小。

在高温高压条件下, 压力对黏土矿物水化膨胀的影响主要有2方面<sup>[10]</sup>: 一方面, 压力能够促使水分子更容易地进入黏土微孔隙, 进入黏土矿物晶格内部, 促进水化膨胀; 另一方面, 压力能够抵消一部分由于黏土水化膨胀而产生的膨胀压, 阻碍黏土水化膨胀。因此, 对压力影响黏土水化膨胀过程的研究, 关键是看哪一方面的影响占主导地位。对于图8, 可认为在“拐点”前外部压力抵消了黏土矿物表面水化产生的一部分膨胀压, 而在“拐点”之后外部压力则促使水分子进入黏土岩样内部, 促进了水化膨胀。

从试验结果还可以发现, 在“拐点”出现的前后2个阶段中, 第2阶段的黏土岩样水化膨胀量远大于第1阶段, 如图3(b)中第2阶段膨胀量与第1阶段膨胀量之比分别为2.33, 3.70, 4.00和5.50。这是由于温度越高, 水分子的热运动越剧烈, 同时在压力作用下黏土矿物微孔中的气体被压缩, 随着岩样膨胀量的增加, 微小气泡聚集变大, 最终形成气流, 由于黏土矿物岩样发生膨胀的同时其强度降低, 当在底部气流的撞击下能够移动时, 气流可缓慢穿透黏土胶粒, 从而引起黏土矿物膨胀的突变及膨胀速率的陡增。

### 3 黏土矿物水化膨胀的微观特征分析

#### 3.1 黏土矿物中含水量的变化

黏土矿物中的水对泥页岩的物理力学性质有很大影响, 因此, 分析水在黏土矿物中的基本形态至关重要。水在黏土矿物中的存在形态有水蒸气、分子结合水、吸附水、毛细管水和自由水等。在黏土矿物与水接触的过程中, 分子结合水保持不变, 吸附水含量会增加, 毛细管水含量变化最大, 随着岩样与水接触时间的延长, 毛细管水含量增加。因此, 从自然状态下含极少量毛细管水到完全处于饱和状态过程中, 黏土矿物颗粒之间的粘结力产生较大变化, 毛细管力逐渐减小, 宏观上表现为岩石强度降低, 岩样发生软化。

#### 3.2 黏土矿物颗粒形态的变化

电子扫描电镜试验发现, 水与泥页岩接触时主

要沿层面附近的微裂缝或孔隙进入泥页岩内部<sup>[11]</sup>, 所以组成泥页岩的黏土矿物颗粒及胶结物颗粒在泥页岩内部与层面附近的变化有所不同。在泥页岩层面附近, 当水与黏土矿物接触时, 细小的黏土矿物颗粒吸附水膜便会增厚, 引起体积膨胀。

黏土矿物颗粒粒径测量结果表明, 伊利石长轴方向粒径为21~25 μm, 短轴方向粒径为11~16 μm; 蒙脱石长轴方向粒径为23~32 μm, 颗粒形态的不均匀变化, 一方面使黏土矿物发生不均匀膨胀, 另一方面使黏土矿物晶体集合体中的微孔隙度减小, 产生强大的膨胀压。

#### 3.3 毛细管力及黏土矿物颗粒间作用力的变化

在高温高压条件下, 水进入测试样品内部后, 孔隙气体被压缩, 黏土颗粒之间的粘结力主要有颗粒与颗粒之间的引力、颗粒与水之间的毛细管力、颗粒表面张力及水的压力<sup>[12]</sup>。当黏土矿物与水接触时, 黏土颗粒之间的相互作用如图9所示。

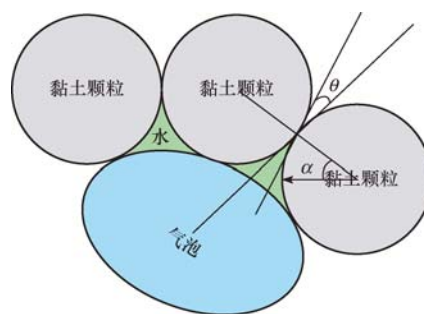


图9 黏土矿物颗粒间相互作用示意

Fig. 9 The Schematic diagram interactions between clay mineral particles

颗粒之间的粘结力为:

$$F = F_g + \pi R_m^2 p_c + 2\pi r p_o + \pi r^2 p \quad (1)$$

根据几何关系, 有:

$$p_c = \frac{\cos(\alpha + \theta)}{1 - \cos \alpha} \frac{\sigma}{r} \quad (2)$$

$$R_m = r \frac{\sin(\alpha + \theta) + \cos \theta - 1 - \sin \theta}{\cos(\alpha + \theta)} \quad (3)$$

式中:  $F$  为黏土颗粒之间的粘结力, N;  $F_g$  为黏土颗粒与颗粒之间的引力, N;  $p_c$  为黏土颗粒表面所受毛细管力, N;  $p$  为黏土颗粒表面所受水的压力, N;  $p_o$  为黏土颗粒所受表面张力, N/m;  $\sigma$  为水珠的表面张力, N;  $\alpha$  为黏土矿物颗粒间轴向连线与颗粒切向半径方向的夹角, (°);  $\theta$  为接触角, (°);  $r$  为毛细管半径, m;  $R_m$  为水珠凹面的半径, m。

颗粒之间粘结力的最终表达式为:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} + \pi r^2 p + 2\pi r \sigma \left\{ \sin \alpha \sin(\alpha + \theta) + \frac{[\sin(\alpha + \theta) + \cos \alpha - 1 - \sin \theta]^2}{2(1 - \cos \alpha) \cos(\alpha + \theta)} \right\} \quad (4)$$

式中:  $G$  为引力常数,  $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$ ;  $m_1$  和  $m_2$  为相邻 2 个黏土颗粒的质量,  $\text{kg}$ 。

当岩样与水接触后, 颗粒会发生体积膨胀, 即  $r$  增大, 颗粒间的引力减小; 接触角  $\theta$  随着吸水率的增加而减小, 造成毛细管压力与表面张力逐渐减小。孔隙中的水量增加后,  $p$  减小, 因此式(4)中黏土矿物颗粒间的粘结力  $F$  减小, 最终在宏观上表现为岩石变软, 强度降低, 与试验结果相符合。

## 4 结论与建议

1) 黏土矿物水化膨胀具有很强的依时性, 且温度和压力对黏土矿物水化膨胀性能的影响显著: 随着膨胀时间的延长, 温度越高, 黏土矿物水化膨胀率越大, 且初始膨胀速率越大; 高压情况下, 压力对黏土矿物水化膨胀有 2 方面的作用, 一方面抑制黏土矿物水化膨胀, 另一方面能促进其水化膨胀; 随着膨胀时间的延长, 压力越大, 黏土矿物水化膨胀率越小, 且初始膨胀速率越小。

2) 高温高压环境下, 黏土矿物水化膨胀率-时间曲线可能出现“拐点”, 这是由温度、压力及黏土矿物孔隙、裂隙中的气泡等共同作用产生的。此外, 黏土矿物中含水量、矿物颗粒形态、毛细管力及颗粒间相互作用等的变化是黏土矿物遇水膨胀且膨胀后强度降低的重要影响因素。

3) 由于条件所限, 未进行压力高于 4 MPa、温度超过 100 °C 条件下膨润土的水化膨胀特性试验, 建议具备条件时进行更高压力和更高温度条件下的相关研究。

## 参 考 文 献

### References

- [1] Yu M, Chen G, Chenevert M E, et al. Chemical and thermal effects on wellbore stability of shale formations[R]. SPE 71366, 2001.
- [2] Mody F K, Hale A H. Borehole-stability model to couple the mechanics and chemistry of drilling-fluid/shale interactions[J]. Journal of Petroleum Technology, 1993, 45(11): 1093-1101.
- [3] 李天太, 高德利. 页岩在水溶液中膨胀规律的实验研究[J]. 石

油钻探技术, 2002, 30(3): 1-3.

- Li Tiantai, Gao Deli. Experimental study on shale swelling in various solutions[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2002, 30(3): 1-3.
- [4] 徐同台, 李家库, 卢淑芹. 影响砂泥岩在清水中分散性能因素的探讨[J]. 钻井液与完井液, 2004, 21(1): 1-4.
- Xu Tongtai, Li Jiaku, Lu Shuqin. Investigation on influencing factors of sandstone/shale dispersing in fresh water[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2004, 21(1): 1-4.
- [5] 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 Xiongwei, Kong Lingwei, Guo Aiguo, et al. Strength characteristics of expansive soil considering effect of hydrous state[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(12): 3193-3198.
- [6] 谭罗荣. 蒙脱石晶体膨胀和收缩机理研究[J]. 岩土力学, 1997, 18(3): 13-18.
- Tan Luorong. Study on mechanism of expansion and shrinkage of the montmorillonite crystal[J]. Rock and Soil Mechanics, 1997, 18(3): 13-18.
- [7] 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, 96.
- Yang Zhenjie. Effects of shale composition and surface properties on borehole stability: a review[J]. Oilfield Chemistry, 2000, 17(1): 73-77, 96.
- [8] 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.
- [9] 曾义金, 刘建立. 深井超深井钻井技术现状和发展趋势[J]. 石油钻探技术, 2005, 33(5): 1-5.
- Zeng Yijin, Liu Jianli. Technical status and developmental trend of drilling techniques in deep and ultra-deep wells[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2005, 33(5): 1-5.
- [10] 刘光法, 苗锡庆. 黏土矿物水化膨胀影响因素分析[J]. 石油钻探技术, 2009, 37(5): 81-84.
- Liu Guangfa, Miao Xiqing. Influence factor analysis on hydration swelling of clay minerals[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2009, 37(5): 81-84.
- [11] 冒海军, 郭印同, 王光进, 等. 黏土矿物组构对水化作用影响评价[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2723-2728.
- Mao Haijun, Guo Yintong, Wang Guangjin, et al. Evaluation of impact of clay mineral fabrics on hydration process[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(9): 2723-2728.
- [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 Haijun, Yang Chunhe, Huang Xiaolan, et al. Experimental study and theoretical analysis of slates under different saturated conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(9): 1637-1642.

[编辑 令文学]