

高庙子膨润土悬浮液的抗冲蚀流变特性

陈 宝, 田昌春, 郭家兴, 陈建琴

(同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 采用流变仪对高庙子膨润土悬浮液在不同水固比、掺加盐溶液类型及浓度的条件下的抗冲蚀流变特性进行了研究, 得到了各种情况下膨润土悬浮液的屈服应力, 再结合 Stoke 公式计算了引起膨润土悬浮液冲蚀的初始水流速度. 研究表明: 随着水固比的增加, 膨润土流变曲线逐渐下移; 对于水固比小于 5.0 的膨润土悬浮液, 当剪切速率较小时呈现假塑性流体特征, 而当剪切速率达到一定值时, 流变曲线斜率趋于定值; 对于水固比大于 5.0 的膨润土悬浮液, 则始终表现为假塑性流体特征, 且随着水固比的增大, 膨润土悬浮液牛顿流体特征逐渐增强; 随着 NaCl 浓度的增加, 膨润土悬浮液屈服应力先减小后增大, 而随着 CaCl_2 浓度的增加, 膨润土悬浮液屈服应力则不断减小; 引起膨润土悬浮液发生冲蚀破坏所需的最低水流速度在 $10^{-4} \sim 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内.

关键词: 膨润土; 冲蚀; 流变性; 屈服应力

中图分类号: TU411

文献标志码: A

Anti-erosion Rheological Characteristics of Gaomiaozi Bentonite Suspension

CHEN Bao, TIAN Changchun, GUO Jiaxing, CHEN Jianqin

(Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The rheological characteristics of Gaomiaozi (GMZ) bentonite suspension with different water-solid ratio, salt type and concentration were investigated by using Brookfield DV-III rheological device, and the yield stresses of bentonite suspensions were obtained from rheological curves, then the yielding initial water velocity was calculated with a consideration of the Stoke law. The results showed that the rheological curves of bentonite suspension moved lower with the increase of water-solid ratio. For the bentonite suspension with a water-solid ratio below 5.0, the suspension presented a characteristic of pseudoplastic fluid when shearing rate was slow, while the rheological curve slope tended to be constant when shearing rate exceeded a certain value. For the bentonite suspension with a water-solid ratio above 5.0, the

suspension gradually presented a characteristic of newtonian fluid with the increase of water-solid ratio; when the concentration of NaCl solution increased, the yielding stress of bentonite suspension firstly decreased and then increased, while the yielding stress would be reduced all through the test with the increase of CaCl_2 solution's concentration; the yielding initial water velocity of bentonite suspension was between $10^{-4} \sim 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ under the condition in this study.

Key words: bentonite; erosion; rheological characteristic; yield stress

高庙子 (GMZ) 膨润土由于其优异的低渗透性、高膨胀性及足够的力学强度等优点, 已经被我国初步确定为高放废物的首选缓冲回填材料^[1]. 在处置库的开挖施工过程中, 不可避免地会对地下的岩体进行扰动而产生裂隙, 地下水就会沿着这些裂隙对膨润土缓冲材料产生冲蚀作用, 膨润土颗粒就会被带走, 进而影响处置库的安全. 因此, 很有必要对膨润土在地下水流冲刷作用下的流变特性进行研究, 进而探究在不同环境下膨润土悬浮液的屈服应力和引起膨润土冲蚀破坏的最小水流速度的变化规律.

国外学者已对膨润土悬浮液的抗冲蚀流变特性开展了一定的研究: Basin^[2] 通过对钠基、钙基膨润土的研究, 发现膨润土悬浮液的流变特性与 $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 含量有关, $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 含量越高, 悬浮液越早进入假塑性流体阶段, 膨润土悬浮液的触变性也会越强. Vassilios^[3] 对美国怀俄明州的膨润土进行研究后发现, 在不同碱性条件下, 悬浮液流变曲线均呈现非线性宾汉姆流体特征, 随着掺加 NaCl 量的增加, 悬浮液屈服应力先缓慢减小, 再急剧减小, 随着膨润土悬浮液中膨润土含量的增加, 悬浮液的冲蚀屈服应力逐渐增加. Jisuk^[4] 在膨润土中掺加焦磷酸钠后

发现,随着焦磷酸钠掺加量的增加,膨润土悬浮液屈服应力先减小后稳定,流变曲线的斜率随着剪切速率的增加逐渐减小,最后降为零,流变曲线呈现假塑性体特征。

综上所述,国外学者们对于膨润土悬浮液的抗冲蚀流变特性已有一定程度的研究,但因我国 GMZ 膨润土在矿物组成、基本物理化学性质上与国外研究中用到的膨润土有较大差别^[1],相关研究尚未见报道,因此很有必要对我国 GMZ 膨润土的抗冲蚀流变特性进行深入研究。

本文结合我国拟建高放废物深地质处置库——甘肃北山预选区的水文地质条件,借助 Brookfield DV-III 流变仪对 GMZ 膨润土悬浮液在不同水固比、掺加盐溶液类型及浓度的条件下的抗冲蚀流变特性进行研究,试验获取了各种环境下膨润土悬浮液的屈服应力,再依据 Stoke 公式计算引起膨润土悬浮液屈服的初始水流速度,研究成果对于采用 GMZ 膨润土作为缓冲/回填材料的核废料处置库的安全性评价和选址都将有重要的参考价值。

1 试验仪器

试验采用 Brookfield 公司生产的 DV-III Ultra 型双筒旋转式流变仪(图 1),其工作原理为:由同步微型电动机带动转筒以一定速率在被测流体中旋转,由于受到流体黏滞力的作用,转筒会产生滞后,与转筒连接的弹性元件则会在旋转的反方向上产生一定的扭转,通过测量扭转应力的大小就可以计算得到流体的黏度值、屈服应力值等。



图 1 Brookfield DV-III Ultra 数字流变仪

Fig. 1 Brookfield DV-III Ultra digital rheological device

该仪器能够测量包括剪切速率、剪切应力、扭矩、转速、粘度和流体温度等数据,并可利用 EZ-Yield 软件计算获取屈服应力,实时显示和记录并测量数据变化情况,如扭矩-时间、应力-应变等关系的曲线和表格等。

2 试验过程

2.1 试验材料

研究样品为高庙子钠基膨润土(GMZ01),主要矿物为蒙脱石(75.4%),杂质矿物主要为石英(11.7%)、长石(4.3%)与方英石(7.3%)等^[5-6]。此外,其他粘土矿物主要有高岭石和伊利石等,杂质矿物为碳酸盐(白云石与方解石等)等,GMZ 膨润土的物理化学性质见表 1。

表 1 GMZ 膨润土的基本物理化学性质^[5-6]

Tab.1 Basic physical-chemical properties for GMZ bentonite^[5-6]

参数	数值	
G_s	2.66	
pH	8.68~9.86	
液限/%	276	
塑限/%	37	
总比表面积/($m^2 \cdot g^{-1}$)	570	
主要交换离子/($mmol \cdot 100 g^{-1}$)	Na ⁺ (43.36),Ca ²⁺ (29.14) Mg ²⁺ (12.33),K ⁺ (2.51)	
主要矿物	蒙脱石/%	75.4
	石英/%	11.70
	长石/%	4.3
	方石英/%	7.3

2.2 试样制备

膨润土悬浮液的水固比是一定体积的悬浮液中水的质量与膨润土质量的比值。随着到废物罐距离的不同,裂隙中填充的膨润土的密实度不同,进而水流冲蚀时膨润土悬浮液的水固比也就不同。根据韦红钢^[7]的研究,甘肃北山预选区的地下水阳离子主要为 Na⁺、Ca²⁺,阴离子主要为 Cl⁻,为了真实地模拟实际情况,故试验在膨润土悬浮液中掺加不同量的膨润土、CaCl₂ 和 NaCl,以探究水固比、CaCl₂ 和 NaCl 对膨润土悬浮液的流变性和屈服应力的影响规律。

(1)水固比试验试样:取固定质量为 300g 的蒸馏水,通过改变 GMZ 膨润土粉末的质量,得到水固比分别为 3.25~7.0 的膨润土悬浮液试样。

(2)不同类型、浓度掺加盐试样:将膨润土粉末分别混合不同掺加盐浓度(不同 NaCl 浓度,不同 CaCl₂ 浓度)至所需含水量,根据韦红钢^[7]的研究结果和实验对比的需要,试验中掺加 NaCl 的对比浓度为 0.01 mol · L⁻¹, 0.1 mol · L⁻¹, 0.5 mol · L⁻¹, 3.0 mol · L⁻¹, 而掺加 CaCl₂ 对比浓度为 0.05 mol · L⁻¹, 0.25 mol · L⁻¹, 0.5 mol · L⁻¹, 1.5 mol · L⁻¹, 根据 GMZ 膨润土的液限和不同水固比试验结

果,反复调节含水率,最终确定试验含水率为500%。

(3)用GJ-B12K单轴变频高速搅拌器以11 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的速度搅拌试样10 min,保证所有试样在进行试验前搅拌充分,且搅拌条件一致。

(4)将搅拌好的试样倒入密闭容器中静置24 h,使其在室温条件下水化完全,再将试样以11 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的速度搅拌5 min,把试样搅拌均匀。

(5)将试样倒入流变仪测试容器中,开始进行流变试验。

2.3 流变性测试

(1)打开流变仪,预热10 min,调节机身顶部的水平气泡在黑色圆圈内。

(2)将转子浸入样品中至转子杆上的凹槽刻痕处。开启电脑,打开EZ-Yield软件,设置参数,确认转子接到流变仪上,样品放好后,按Enter键,开始测试。

3 试验结果分析

3.1 水固比对膨润土悬浮液流变特性的影响

对于剪切后期流变曲线接近线性段的部分(图2),具有宾汉流体的特征,可以延长曲线的直线部分与剪应力轴相交得到膨润土悬浮液的冲蚀屈服应力 τ_B ,该屈服应力表示剪切力达到该值时,颗粒间的连接刚开始破坏。

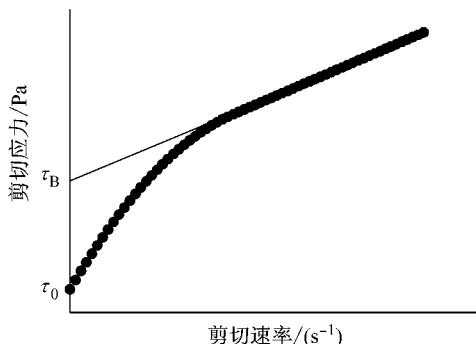


图2 依据流变曲线确定屈服应力
Fig.2 Identification of yielding stress with rheological curve

水固比范围设置在3.5~7.0,以0.5为增量,设置了8组对照组,以研究水固比对膨润土悬浮液流变曲线的影响。高庙子膨润土在不同水固比条件下悬浮液的流变曲线根据形状分为两大类,分别是水固比小于5和水固比大于5,如图3和图4所示。

由图3和图4可见:

(1)膨润土悬浮液流变曲线在水固比5.0处发生明显变化,水固比大于5.0的膨润土悬浮液表现

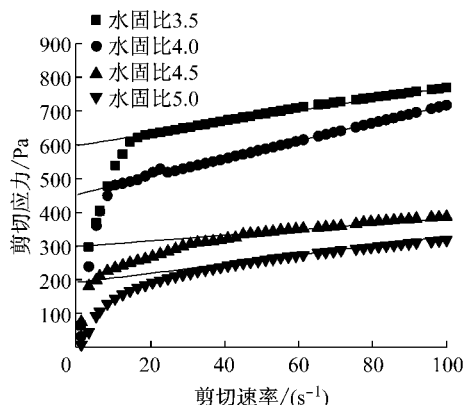


图3 水固比小于5.0的膨润土悬浮液流变曲线
Fig.3 Rheological curves of bentonite suspensions with the water solid ratio below 5.0

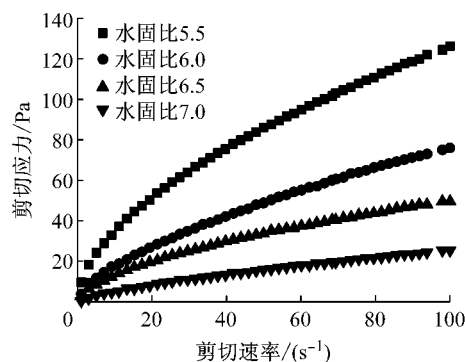


图4 水固比大于5.0的膨润土悬浮液流变曲线
Fig.4 Rheological curves of bentonite suspensions with the water solid ratio above 5.0

假塑性流体特征,且随着水固比的增大,膨润土悬浮液牛顿流体流变曲线特征逐渐增强,其特点为曲线经过原点,斜率为一定值。对于水固比小于5.0的膨润土悬浮液,在剪切速率较小时呈现假塑性流体的特征,随着剪切速率的增加,其流变曲线斜率即黏度将会趋于定值。

(2)随着水固比的增大,流变曲线逐渐下移,表示膨润土悬浮液的抗冲蚀能力减弱,这是由于水固比增大后,膨润土颗粒间距离增大,膨润土颗粒间相互作用力减弱所致。

邱俊^[8]对山东某类型膨润土进行流变性试验后发现,膨润土的质量百分比浓度在21%左右时其流变曲线斜率发生明显变化,与本文得到流变曲线分类点水固比5.0很接近。水固比之所以对膨润土悬浮液流变性产生影响,究其原因,是膨润土悬浮液水固比不同时,膨润土颗粒间距不同,导致颗粒间相互作用力不同,悬浮液的力学性质不同。水固比很大时,膨润土在水中充分水化成细小的薄片,这些薄片相互之间的距离很大,很难相互连接形成稳定的网

状结构,因此流动性较好,随着剪切速率的增加,剪切应力增长缓慢;而膨润土悬浮液水固比减小时,单位体积悬浮液中膨润土颗粒数目增加,膨润土颗粒间距减小,静电引力增大,矿物间相互吸引搭接形成稳定的卡房式结构^[8],悬浮液流动性变差,随着剪切速率的增加,需要施加的剪切应力快速增长。

3.2 掺加盐溶液类型及浓度对膨润土悬浮液流变特性的影响

因甘肃北山预选场地的地下水阳离子主要为 Na^+ 和 Ca^{2+} ,阴离子主要为 Cl^- ^[7],故试验中在膨润土悬浮液里掺加了不同量的 CaCl_2 和 NaCl ,以探究掺加盐溶液类型及浓度对膨润土悬浮液的流变性的影响规律,试验结果如图 5 和图 6 所示。

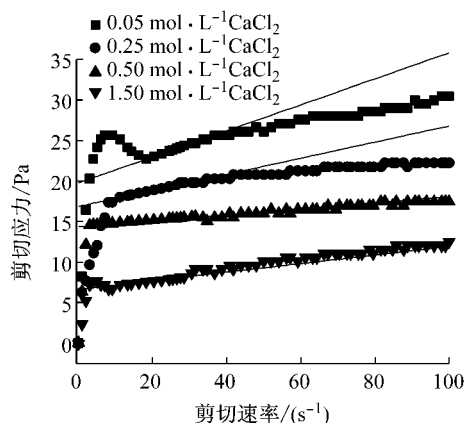


图 5 掺加不同浓度 CaCl_2 溶液的膨润土悬浮液流变曲线

Fig. 5 Rheological curves of bentonite suspensions added with different concentration of CaCl_2 solutions

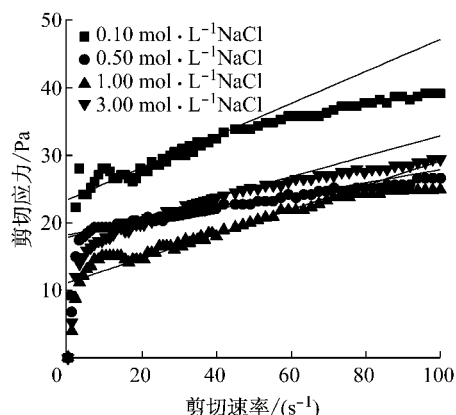


图 6 掺加不同浓度 NaCl 溶液的膨润土悬浮液流变曲线

Fig. 6 Rheological curves of bentonite suspensions added with different concentration of NaCl solutions

由图 5 和图 6 可见:

(1)各流变曲线在剪切速率 10 s^{-1} 以下均为线

性段,膨润土悬浮液表现牛顿流体特征,掺加盐浓度的改变对膨润土流变曲线的线性段趋势影响不明显。

(2)各流变曲线在初始线性段后,对于掺加低浓度的盐溶液,进入“软化”的非线性段,达到峰值后经历线性段,最后经历“硬化”的非线性段;而其他浓度盐的溶液则达不到峰值,“软化”的非线性段变形特征不明显。

这种剪切过程中流变曲线的变化表征出膨润土颗粒空间排列发生了改变:对于掺加低浓度盐的膨润土悬浮液,在初始线性段,膨润土颗粒排列整齐而有规律,随着剪切速率的增加,颗粒间的排列方式并没有破坏,需要施加的剪切应力逐步增加,当剪切应力达到一定值后,膨润土悬浮液被剪坏,膨润土颗粒空间结构发生了急剧变化,出现“软化”的非线性段,颗粒间的相对位置发生了调整,在流变仪离心力的作用下,膨润土颗粒间距变小,进而导致范德华力、库仑力增大,与离心力达到平衡后,宏观上流变曲线又出现了短暂的线性段,在此阶段膨润土颗粒间的范德华力、库仑力发挥到最大程度,在剪切力继续增大时,该平衡被打破,膨润土颗粒再也不能通过改变颗粒间间距提高范德华力、库仑力来与流变仪施加的剪应力平衡,膨润土悬浮液的空间排列方式难以保持,出现“硬化”的非线性段。掺加中、高浓度盐的膨润土流变曲线并不具有掺加较低浓度盐流变曲线的多样性,主要是由于掺加中、高浓度盐的膨润土颗粒间库仑力较大,能在很大范围内充分发挥进而来与流变仪的剪应力平衡,但库仑力作用效果有限,并不能有效提高膨润土颗粒的抗冲刷屈服应力。

使用激光粒度仪对不同浓度、类型掺加盐作用下膨润土悬浮液颗粒的粒径分布进行了研究,实验结果如图 7 所示。图 7 表明,掺加同类盐溶液时,盐溶液浓度的改变对膨润土悬浮液的颗粒粒径并没有太大影响,故可以得出掺加同类但浓度不同的盐时,膨润土悬浮液流变曲线的差异并不由颗粒粒径的大小所造成,而是上述差异来源于膨润土颗粒间的静电引力的不同。在掺加 CaCl_2 和 NaCl 的膨润土悬浮液中,当盐浓度较小时,由于 Ca^{2+} 、 Na^+ 与膨润土中蒙脱石带负电层面间的静电作用,蒙脱石的卡房式结构被加强,膨润土颗粒间相互作用加强,流变曲线能够达到较高峰值;而当掺加盐浓度增大时, Ca^{2+} 、 Na^+ 开始中和蒙脱石中的负电荷^[8],膨润土颗粒间相互作用减弱,流变曲线的峰值逐渐变小,流变曲线逐渐下移。

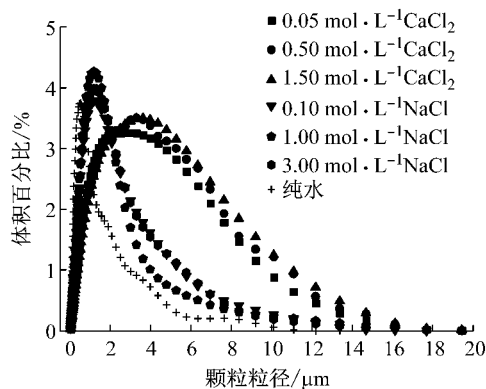


图7 掺加不同类型、浓度盐溶液时膨润土悬浮液颗粒粒径分布

Fig.7 Particle size distribution of bentonite suspensions added with different kind and concentration of salt solutions

3.3 膨润土悬浮液屈服应力的求解

郭家兴^[9]利用马尔文激光粒度仪测得膨润土悬浮液颗粒的分布曲线,发现纯水中膨润土悬浮液颗粒平均直径在 $0.5 \mu\text{m}$ 左右,每 m^2 上约有 1.245×10^{12} 个颗粒.假设膨润土悬浮液中所有的内部连接被同时激发,并达到同一程度,取 1 m^2 面积进行研究,用屈服应力 τ_B 除以所有的粘结数,可获得单个颗粒之间的粘结力^[10].引起膨润土冲蚀破坏的水流速度 v 由 Stoke 公式计算得到. Stoke 公式如下:

$$\tau_f = 6\pi\eta av$$

其中, η 为水的粘度,取室温下水的粘度 $\eta = 1.0 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$; a 为颗粒直径(m); v 为水流速度($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); τ_f 为颗粒间粘结力(N).由实测流变曲线可得到不同水固比、不同类型和浓度掺加盐情况下膨润土悬浮液的屈服应力,计算得到发生冲蚀破坏所需的最低水流速度如表2所示.

表2 不同环境下膨润土悬浮液的冲蚀最低水流速度

Tab.2 Minimum erosion velocity of bentonite suspensions under different conditions

试样情况	屈服应力 τ_B/Pa	冲蚀最低水流 速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
水固比 3.5	597.96	5.10×10^{-2}
水固比 4.0	453.32	3.86×10^{-2}
水固比 4.5	298.79	2.55×10^{-2}
水固比 5.0	192.18	1.64×10^{-2}
$0.05 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2$	19.78	1.69×10^{-3}
$0.25 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2$	16.89	1.44×10^{-3}
$0.50 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2$	14.39	1.23×10^{-3}
$1.50 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2$	6.65	5.67×10^{-4}
$0.10 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaCl}$	23.50	2.00×10^{-3}
$0.50 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaCl}$	18.43	1.57×10^{-3}
$1.00 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaCl}$	10.99	9.37×10^{-4}
$3.00 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaCl}$	17.77	1.52×10^{-3}

由表2的计算结果可得到:

(1)随着水固比增大,引起膨润土悬浮液冲蚀破坏的屈服应力不断减小,反映出含水量多的膨润土抵抗水流冲蚀能力低,这是由于含水量的增加,膨润土颗粒间距离增加,分子引力减小所致.

(2)随着膨润土悬浮液中 NaCl 掺加盐浓度的增加,膨润土悬浮液屈服应力先减小后增加,而含有 CaCl_2 溶质的膨润土悬浮液屈服应力随着掺加盐浓度的增加不断减小. Van Olphen^[11]认为初始阶段随着 NaCl 和 CaCl_2 等电解质浓度的递增,膨润土颗粒的板面和边面的双电层均被压缩,网架结构被拆散,屈服值明显降低;但当浓度递增至一定量后,双电层进一步压缩,范德华引力增强,有利于网架结构的重新形成,屈服值又上升,本文得出的高庙子膨润土悬浮液屈服应力随着 NaCl 掺加盐浓度的变化规律与 Van Olphen 的解释一致,而在掺加 CaCl_2 溶质的膨润土中却并未见到此现象,可能和 CaCl_2 浓度设置有关,仍需要进行后期的研究论证.

(3)在膨润土悬浮液中掺加同浓度的 NaCl、 CaCl_2 溶液时,掺加 NaCl 的膨润土悬浮液的屈服应力大于掺加 CaCl_2 的膨润土悬浮液屈服应力,这是由于 Ca^{2+} 价位比 Na^+ 高,掺加同浓度的 CaCl_2 盐后,膨润土颗粒表面水化膜变薄,悬浮液体系电位降低^[9],膨润土颗粒趋向于聚沉,颗粒变大,这与图8所示结果一致,进而导致体系稳定性降低,屈服应力降低.

(4)文中研究环境引起高庙子膨润土悬浮液冲蚀破坏的最低水流速度在 $10^{-4} \sim 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围.

4 结论

(1)膨润土悬浮液的流变曲线在水固比 5.0 处发生明显变化,水固比大于 5.0 的膨润土悬浮液表现假塑性流体特征,且随着水固比的增大,膨润土悬浮液牛顿流体流变曲线特征逐渐增强,而对于水固比小于 5.0 的膨润土悬浮液,在剪切速率较小时即呈现假塑性流体的特征,且随着剪切速率的增加,其流变曲线斜率将会趋于定值.

(2)随着膨润土悬浮液中掺加盐 NaCl 浓度的增加,膨润土悬浮液屈服应力先减小后增加,而掺加 CaCl_2 的膨润土悬浮液屈服应力随着 CaCl_2 浓度的增加不断减小,掺加盐浓度通过影响膨润土颗粒的双电层厚度和范德华力来影响其屈服应力的大小.

(3)高庙子膨润土掺加的 NaCl 浓度在 3.0

$\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 以内, CaCl_2 掺加浓度在 $1.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 以内, 水固比在 3.50~7.0 范围, 引起冲蚀破坏的初始地下水流速在 $10^{-4} \sim 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内, 当地下水流速超过该范围, 高庙子膨润土就可能发生冲蚀破坏。

参考文献:

- [1] 刘月妙, 温志坚. 用于高放射性废物深地质处置的粘土材料研究[J]. 矿物岩石, 2003, 23(4): 42.
LIU Yuemiao, WEN Zhijian. Study on clay materials used in high level radioactive waste repository [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2003, 23(4): 42.
- [2] Basin Abu-Jdayil. Rheology of sodium and calcium bentonite-water dispersions; effect of electrolytes and aging time[J]. International Journal Mineral Processing, 2011, 98: 208.
- [3] Vassiliou C K. Effect of pH and electrolyte on the rheology of aqueous Wyoming bentonite dispersions [J]. Applied Clay Science, 2007, 38(1/2): 89.
- [4] Jisuk Yoon. Rheological properties of sodium pyrophosphate modified bentonite suspensions for seepage control [J]. Engineering Geology, 2014, 179: 32.
- [5] 温志坚. 中国高放废物处置库缓冲材料物理性能[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(4): 794.
WEN Zhijian. Physical property of China's buffer material for high-level radioactive repositories[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(4): 794.
- [6] 叶为民, 钱丽鑫, 陈宝, 等. 侧限状态下高压实高庙子膨润土非饱和渗透性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(1): 105.
YE Weimin, QIAN Lixin, CHEN Bao, *et al.* Laboratory test on unsaturated hydraulic conductivity of densely compacted Gaomiaozhi bentonite under confined conditions [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(1): 105.
- [7] 韦红钢. 核素在高放废物地质处置预选场的迁移行为研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2012.
WEI Honggang. Research on radionuclide migration in the groundwater of the geological disposal preliminary site of HLW [D]. Beijing: China University of Geoscience, 2012.
- [8] 邱俊, 张言贵, 吕宪俊. 膨润土浆体流变性的变化规律研究[J]. 有色矿冶, 2006, 22(增刊): 158.
QIU Jun, ZHANG Yangui, LÜ Xianjun. Study on bentonite's rheological laws [J]. Non-Ferrous Mining and Metallurgy, 2006, 22(S): 158.
- [9] 郭家兴. 处置库区地下水对膨润土的冲蚀作用及其机理研究[D]. 上海: 同济大学, 2015.
GUO Jiaxing. Erosion of bentonite by groundwater flow in the site of geological disposal repository for HLW [D]. Shanghai: Tongji University, 2015.
- [10] 陈建琴. 地下水流对高压实膨润土的冲蚀作用与机理研究[D]. 上海: 同济大学, 2013.
CHEN Jianqin. Mechanism of highly compacted bentonite erosion by groundwater flow [D]. Shanghai: Tongji University, 2013.
- [11] 范·奥尔. 粘土胶体化学导论[M]. 许冀泉, 马毅杰, 许祖诒, 等译. 北京: 农业出版社, 1982 年.
Van Olphen. An introduction to clay colloid chemistry for clay technologists, geologists and soil scientists [M]. Translated by XU Jiquan, Ma Yijie, XU Zuyi, *et al.* Beijing: China Agriculture Press, 1982.