

粘土沉积物流变性能的研究*

林渊^{1†}, 朱海¹, 王威¹, 陈家旺¹

(1. 浙江大学海洋学院, 舟山 316021)

摘要: 在粘土沉积物(粘土-水体系)中, 由于粘土片状颗粒间存在复杂的相互作用力, 颗粒之间可形成多种微结构, 因此, 相较于简单的悬浮液体系(中性球微粒-牛顿流体), 粘土沉积物的流变性质非常复杂。其存在屈服现象, 以及剪切变稀等行为。通过流变实验可发现, 粘土沉积物的屈服应力随粘土浓度的升高而增大, 而在高剪切速率范围内, 其粘度随粘土浓度的变化不明显。

关键词: 粘土沉积物; 静电力; 屈服应力; 粘度

1 引言

粘土沉积物为粘土颗粒和水组成的悬浮液体系。粘土颗粒为片状纳米颗粒, 片状颗粒的面(face)上带有永久负电荷, 而在边缘(edge)上, 在酸性条件下所带电荷为正, 碱性条件下为负。因此, 在此悬浮体系中, 粘土颗粒之间存在非常复杂的相互作用力, 其相互作用力有面和边缘之间(Face-Edge)的静电吸引力以及面和面之间(Face-Face)的静电排斥力。此外, 如果粒子浓度较高, 由于粘土颗粒之间的距离较小, 还需考虑范德华(van der Waals)吸引力的影响。为达到粒子之间作用力的平衡, 颗粒之间可形成面-面(Face-Face)和面-边缘(Face-Edge, 或称纸牌屋)等多种结构, 使体系形成凝胶^[1-2]。因此, 相较中性颗粒组成的悬浮液, 粘土是更为复杂的多相流流体, 如在静止状态下为凝胶态固体, 当剪切应力达到临界值后发生流动, 因此存在屈服现象和屈服应力; 剪切流动过程中存在显著的剪切变稀行为, 研究发现粘度随流速(剪切速率)的增大而减小; 由于粘土颗粒之间作用力的性质和强度易受到环境条件, 如 pH 值、盐度的影响, 粘土悬浮液的力学性质随着环境因素的改变发生显著变化^[3]。在深海开采作业, 如深海多金属结核的开采以及深海钻进过程中, 需要考虑粘土沉积物的复杂流变性质的影响。

2 实验

实验仪器为美国 TA 公司生产的 DHR-1 旋转流变仪, 采用平行板测试系统, 平行板的直径为 25mm。实验温度精确控制在 25℃。实验中采用控制剪切应力的模式, 测量剪切速率的变化; 采用四川省仁寿宏瑞泰膨润土科技有限公司生产的膨润土粘土模拟深海沉积物粘土进行研究。其基本的物性参数见表 1。

表 1 膨润土土样的物性参数

* 基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(11702246); 中央高校基本科研业务费专项资金资助

† 通讯作者: 林渊, 副教授, E-mail: samylin@zju.edu.cn

粒度 (%)	含水率 (%)	砂石量 (%)	胶质价 (ml/15g)	膨胀倍 (ml/g)	吸兰量 g/100g 土
95	12.5	≤10	500	26	31.5

表 2 膨润土土样的组成成分

SiO ₂	AL ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	烧失量
60.77	17.11	2.26	0.15	0.78	3.85	0.33	5.85

实验中，将膨润土样品放入去离子水中进行充分搅拌，样品的 pH 值约为 9.5。为避免水分散失对实验样品的流变性质测试造成的影响，每次取用的样品只测试一次（时长约 3 分钟），在此时间内，未见样品的流变性质随时间有明显变化。

在控制剪切应力模式下，不同质量分数（5%-25%）下粘土沉积物的应力应变曲线如图 1 所示。可见，随着剪切应力的增大，在剪切应力超过一临界值后，剪切速率均存在跃变的过程，在此过程中，剪切速率的变化在 2 个数量级以上，即为屈服现象。此临界值即为屈服应力。可见屈服应力随粘土浓度的增大而显著增大。由于本实验中，样品为天然碱性，粘土颗粒的面和边缘均带有负电荷，我们认为屈服现象是由粘土颗粒之间的面-面（Face-Face）静电排斥作用形成，可用基于 DLVO 胶体理论发展的模型进行预测^[4]。此外，在样品发生屈服后，从剪切速率-剪切应力变化曲线可见显著的剪切变稀现象，此外，随着剪切速率增大，剪切速率-剪切应力曲线趋向于重合，因此，可以推断出其高剪切速率下的粘度趋向于重合，即高剪切速率下的粘度不随浓度的变化发生显著改变，这与高剪切速率下，片状的粘土颗粒沿流动方向取向排列有关^[5]。

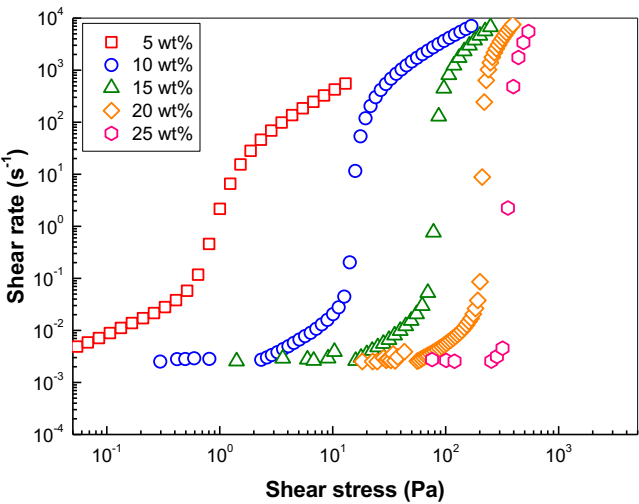


图 1 不同浓度的膨润土沉积物样品的剪切速率-剪切应力变化曲线

参考文献

- [1] Nasser M S, James A E. Degree of flocculation and viscoelastic behaviour of kaolinite-sodium chloride dispersions[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2008,315:165-175.
- [2] Du J, Morris G, Pushkarova R A, Smart R S. Effect of surface structure of kaolinite on aggregation, settling rate, and bed density[J]. Langmuir 2010,26:13227-13235.
- [3] The E J, Leong Y K, Liu Y, Fourie A B, Fahey M, Difference in the rheology and surface chemistry of kaolin clay slurries: The source of the variations[J]. Chemical Engineering Science, 2009,64:3817-3825.
- [4] Lin Y, Phan-Thien N, Lee J P B, Khoo B C, Concentration dependence of yield stress and dynamic moduli of kaolinite suspensions[J], Langmuir, 2015,31: 4791-4797.
- [5] Paineau E, Michot L J, Bihannic I, Baravian C, Aqueous suspensions of natural swelling clay minerals. 2. Rheological characterization[J], Langmuir, 2011,27:7806-7819.

Study on the rheological behavior of clay sediment

Yuan LIN¹, Hai ZHU¹, Wei WANG¹, Jiawang CHENG¹

(1. Ocean Collage, Zhejiang University, Zhoushan, Zhejiang, 316021, China)

Abstract: In clay sediments, due to the complicated interparticle forces between disk-shaped clay particles, which form different microstructures, the rheological properties of clay sediments are complicated compared to simple non-colloidal suspensions (neutral micro-spheres in Newtonian fluid). Yield phenomenon and shear thinning can be discovered in clay sediments. By rheological experiment, it is found that the yield stress increases with increasing concentration of clay, while at high shear-rate range, the viscosity is insensitive to the concentration.

Key Words: clay sediment; electrostatic force; yield stress; viscosity