

文章编号:1000-582X(2011)07-102-05

污泥的滑移现象及其特性分析

冯民权¹, 张丽¹, 张晓斌¹, Hansong TANG²

(1. 西安理工大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. Department of Civil Engineering, City College, The City University of New York, New York 10031)

摘要:为了确定对于脱水污泥是否存在滑移现象以及影响壁面滑移的可能因素,采用平行板旋转流变仪(AR2000)并借助高速摄像机进行实验,采用直线标记法观察滑移现象,考察了应力-应变数据对平行板间距的依赖性,同时研究阶跃应变扫描时间-应力曲线的趋势。结果表明,剪切试验表明随着应变增大,含水率80%的污泥,剪切应力在某一处发生分叉,即剪切应力依赖于间距,说明发生了滑移现象,同时将其用来研究临界剪切应力以及计算滑移速度的大小,初步拟合出剪切应力和滑移速度的公式。而含水率90%的污泥应力-应变污泥曲线重合较好,即没有滑移发生。同时对含水率80%的污泥在不同剪切速率下进行了5 s和60 s的扫描,5 s与60 s情况下剪切速率分别于大于 10 s^{-1} 和 0.5 s^{-1} 时时间-应力曲线出现峰值情况,即均有滑移现象发生,故浓度、剪切速率和时间均对滑移有一定影响。

关键词:污泥;壁面滑移;浓度;剪切速率;时间

中图分类号:X703.3

文献标志码:A

Analysis on wall slip phenomenon and characteristics of sewage sludge

FENG Min-quan¹, ZHANG Li¹, ZHANG Xiao-bin¹, Hansong TANG²

(1. Key Laboratory of Northwest Water Resources and Environmental Ecology, Education of Ministry, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, P. R. China; 2. Department of Civil Engineering, City College, The City University of New York, New York 10031, USA)

Abstract: Wall slip of sewage sludge and possible slip influencing factors are studied experimentally by using a rotational rheometer with parallel plate fixtures and by high speed camera. The technique involves placing a straight line marker to monitor wall slip, checking the gap dependence of the stress-strain data and studying the time-stress data trend of strain stepped scanning. In the shearing flow it is found that, for sewage sludge of water content 80%, as the strain amplitude increases, the stress data starts to diverge at a certain strain amplitude, indicating that wall slip occurs. Meanwhile, it has been utilized for studying the critical shear stress and calculating the slip velocity, and the formulation of shear stress and slip velocity are fitted. But for sewage sludge of water content 90%, these curves are superimposed, indicating no slip occurs. While scanned sewage sludge water content 80% at different shear rates in 5 s and 60 s, it is found that under 5 s and 60 s, when the shear rate is greater than 10 s^{-1} and 0.5 s^{-1} respectively, peak appears in time-stress curves, i. e. slip occurs. Therefore, concentration, shear rate and time have influence on wall slip.

Key words: sewage sludge; wall slip; slip velocity; shear rate; time

收稿日期:2011-03-25

基金项目:教育厅重点实验室科学研究计划项目(2010-9)

作者简介:冯民权(1964-),男,西安理工大学教授,博士生导师,主要从事环境模拟与污染控制研究,
(E-mail)mqfeng@xaut.edu.cn.

通过对污泥输送方式的比较,管道运输对当前日益增长的污泥量是比较有利的,在国内外已受到了很大的关注^[1]。从现有的城市污水处理厂到污泥利用单元的管道输送实例可以看出,国内目前还很少见,而国外在很早就开始使用管道来输送污泥,污泥长距离管道输送实际应用在 1902 年始于英国伯明翰,该系统管长约 6 km,管径为 225 mm。随后,在欧美和日本等国相继建成多条管输系统。但其中也存在一定缺陷,实例中的输送浓度一般都采用 1%,用此较低的浓度来输送污泥很重要的目的是减少输送阻力,并不将污泥这样复杂的性质一一考虑,是象输送清水一样进行处理。通过翻阅大量文献资料未能找到中国管道输送污泥的相关事例资料,说明中国的这部分输送成果还十分稀少,但中国在实验室已经开展了将污泥作为试验对象的研究。北京中矿机电工程技术研究所从输送角度将污泥看成是高浓度黏稠物料的一种,截止到目前为止,该实验室已经对城市污泥(含水率 80%)、造纸废渣污泥(含水率 40%)和煤泥(含水率 30%)3 种高浓度黏稠物料进行过输送实验并进行了一些测试研究。

高浓度黏稠污泥的管内流动结构和阻力特性是由流体流变特性和壁面滑移^[2-4]特性共同支配的。这些特性会从根本上影响污泥输送过程的压力、阻力等,影响污水处理工艺的运行效果,影响污泥的处理、处置过程。壁面滑移对流量影响较大。壁面滑移现象的研究,对获得准确的污泥流动数据是必要的,在当今世界能源紧缺和环境危机的形式下,对污泥的壁面滑移特性展开预测层面上的研究,进而优化运输及操作条件,科学合理地计算污泥长距离管道输送中的压力损失,实现输送过程的节能减阻,指导生产实际和填补理论空白具有重要的理论意义。

对于其它聚合物滑移现象及特性的研究,国外作为非牛顿流体和流变学方面的基础研究已有不少文献,Ramamurthy^[5]用各种高密度聚乙烯和线性低密度聚乙烯树脂在毛细管流变仪上做实验,并用 Mooney 分析方法计算了作为壁面剪切应力函数的滑移速度,Adeniyi Lawal^[6]采用线性标记法在旋转流变仪上观察到滑移现象,通过挤压流讨论了影响壁面滑移的因素,Herve Tabuteau^[7]使用平行板和同轴圆筒对含水率大约为 85%污泥进行滑移研究。国内关于非牛顿流体壁面滑移的研究报道很少,孟令杰等^[8]发表过关于高浓度水煤浆流动的滑移现象的少数文献,对存在壁面滑移现象的水煤浆管内流动特性进行了研究,提出了所研究范围内的广义雷诺数公式。廖化勇^[9]对导致聚合物滑移的可能因素

进行分析,提出了将大振幅剪切流中的剪切应力分解为弹性应力和粘性应力,认为弹性应力是影响壁面滑移的重要因素。

但目前还鲜有关于污泥壁面滑移的报道,本研究以实验数据为基础,对污泥的滑移条件及滑移速度进行了实验,可以获得准确的污泥流动数据,为研究污泥管道内流动的减阻,降低输送中的能耗并节约能源提供依据。采用线性标记法和应力-应变曲线间距依赖性来判断滑移的发生,在用平行板流变仪进行流变测量时,如果被测试样品在夹具中的流动是均匀的,同时没有壁面滑移发生,测量结果不应依赖于间距。如果样品在夹具中的流动是不均匀的,或者存在壁面滑移,则应力-应变的关系依赖于间距^[7]。在实验过程中用直线标记法观察到滑移现象以及样品的不均匀性,表观剪切速率的间距依赖性为滑移发生的间接依据,同时将其用来测量滑移速度的大小。笔者主要研究流变的间距依赖性,不区分是壁面滑移还是应变非均性。在不同剪切速率下时间扫描,发现剪切应力曲线依赖于时间和剪切速率发生变化,时间-应力曲线出现峰值情况,然后曲线骤然下降。这个实验结果与理论一致,出现峰值时即发生了滑移,滑移本身会提供一定的应变值,出现剪切应力逐渐减小的情况。

1 试验方案

1.1 实验材料及其处理

实验用的污泥为城市污水处理厂的脱水污泥,由西安市第三污水处理厂提供。其特点是浓度高、颗粒细、粘度高、流动性差,为絮状胶体结构。在试验前,先对每一个污泥的样本进行均质化:在以 500 转/分的速度旋转的搅拌器中混合,然后停顿半小时。测定污泥的浓度。

1.2 实验仪器

试验仪器为美国 TA 公司制造的旋转流变仪 (AR2000),见图 1(a),平行板夹具为铝制板材,直径为 25 mm,见图 1(b)。其平行板间距可以控制在 0.4~3 mm 之间,间距太小则平行板的平行度会影响实验结果,间距太大样品容易发生边缘破裂。在等温条件下进行实验,样品内温度波动不超过 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($25\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$)。

1.3 实验方案

实验考虑了浓度(含水率 80%、87%)、剪切速率(0.5, 1.25, 10, 20, 50, 70 s^{-1})和时间对滑移的影响因素。实验方案见表 1.2。每组实验至少重复做 3 组,以防止扰动对结果带来误差。

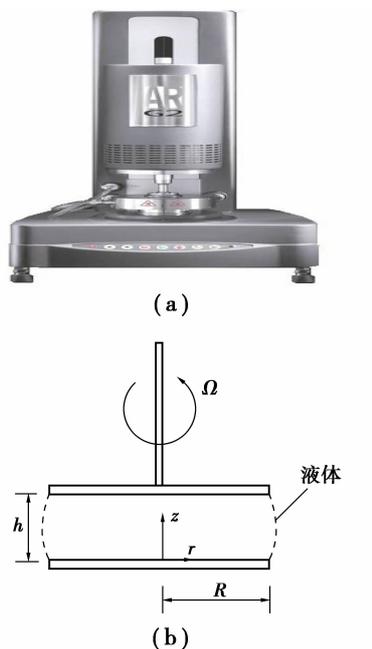


图 1 AR2000 旋转流变仪(a)与平行板结构(b)

表 1 稳态剪切模式扫描

C/%	T/°C	H/mm
20	25	1.5
		2.0
		2.5
13	25	1.5
		2.0
		2.5

表 2 时间扫描

t/s	T/°C	$\dot{\gamma}_{ar}/s^{-1}$
5 s	40	0.50
		1.25
		10
		50
		70
60	40	0.50
		1.25
		20
		50

2 结果分析

2.1 污泥的流变特性

通过对西安第三污水处理厂脱水污泥的粘度测试,如图 2、3 所示。测试结果表明,脱水污泥为假塑性流体,随着剪切速率的增加,粘度值呈下降的趋势,即提高剪切速率可以达到降低粘度的目的。

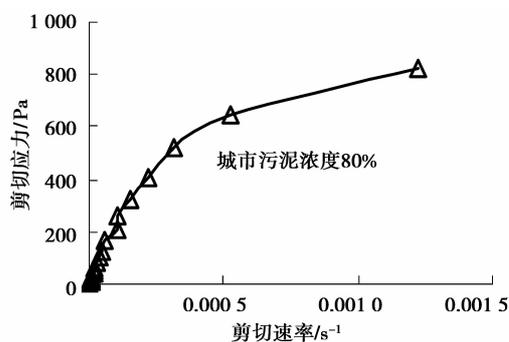


图 2 城市脱水污泥的流变特性曲线

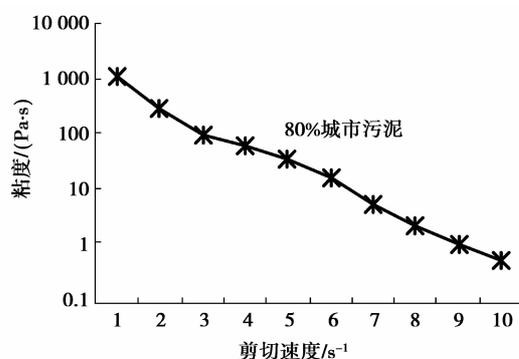


图 3 城市脱水污泥的粘度曲线

2.2 污泥的滑移特性

2.2.1 滑移现象

Kaylon 和 Gevgilili^[10,11]首次在阶跃应变和稳态剪切流中用直线标记技术检测到。我们也用该技术检测到,对于污泥(含水率 80%),应变大于 0.1 时,有壁面滑移发生。但使用标记法检测壁面滑移是受限制的,只能显示测试之初的表面流动情况,平行板转过的角度不能太大,一般为圆周的 1/3,在其它部分作标一记和拍照都很困难(被流变仪挡住)。由于样品表面受表面张力、表面平滑程度等因素的影响,标记只能粗略反映表面某一小部分的流动,所以这种方法的使用并不普及。图 4 描述了在稳态剪切下剪切应力小于屈服应力形成的柱塞流以及大于屈服应力的两种样品的变形情况。图 4(a)为试验前在样品和平板边缘标记的直线;图 4(b)施加的剪切应力小于屈服应力形成的柱塞流,溶体作和固体相似的整体运动,样品在上下平板表面均发生滑移(剪切速率为 $0.1 s^{-1}$);图 4(c)施加的剪切应力超过样品的屈服应力,滑移速度在上下表面占优势地位(剪切速率 $1 s^{-1}$)。图 4(d)施加的剪切应力超过样品的屈服应力,但滑移速度存在下平行板表面,上板没有滑移发生,据分析上板磨损较大,表面较下板粗糙,所以没有滑移发生。

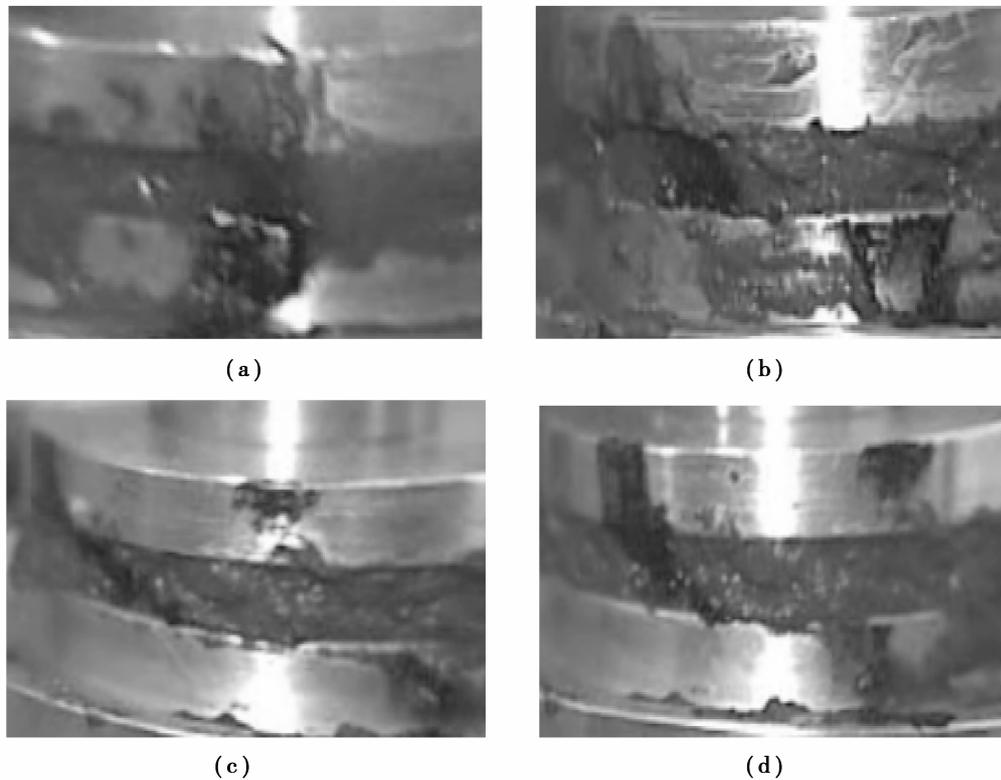


图 4 滑移现象(直线标记法)

2.2.2 浓度影响分析及滑移速度的计算

在稳态剪切模式下,通过数据的整理分析,低浓度(含水率 87%)3 种间距下剪切应力数据重合得较(图 5(b)),本实验范围内没有观察到污泥的表观剪切速率对间距的依赖性,即没有发生壁面滑移现象。高浓度(含水率 80%)污泥在 3 种间距下,板边缘处的表观剪切速率在很小的剪切应力下发生了分叉(图 5(a))(存在间距依赖性),这表明发生了滑移,发生滑移的剪切应力大约为 282 Pa,据此可以计算出滑移速度。在平行板间,样品的剪切速率是依赖于半径的,圆心处为零,沿半径方向线性增大,在同一半径处剪切速率是相等的。如果壁面滑移发生,则滑移速度也是半径的线性函数,假定在同一半径处滑移速度值是相同的。

设平行板间距为 H ,滑移速度为 V_s ,则表观剪切速率 $\dot{\gamma}_{aR}$ 为

$$\dot{\gamma}_{aR}(\tau_R) = \dot{\gamma}_R(\tau_R) + 2V_s/H, \quad (1)$$

式中: $\dot{\gamma}_R(\tau_R)$ 为实际剪切速率。由式(1)可知,通过数据的分析, τ_R 较小时,表观剪切速率 $\dot{\gamma}_{aR}$ 对间距倒数 $1/H$ 曲线的斜率是滑移速度值 V_s 的 2 倍,滑移速度值可由曲线 $\dot{\gamma}_{aR} - 2/H$ 求得,图 6(a)来源于图 5(a),同一剪切应力下 $\dot{\gamma}_{aR} - 2/H$ 呈直线,这表明

滑移速度不依赖于间距。求出滑移速度见图 6(b)。通过对剪切应力和滑移速度数据的分析研究,可判定其经验公式为

$$V_s = \alpha \tau^m, \quad (2)$$

将式(2)转换成线性曲线,用最小二乘法进行拟合处理,得到参数: $\alpha = 0.5 \times 10^{-3}$, ($\text{MPa}^{-1.39} \text{ m/s}$), $m = 1.39$ 。

2.3 剪切速率和时间对滑移的影响

使用旋转流变仪在 40°C 条件下短时间扫描,见图 7。在剪切速率相对较低的情况下,如 $0.5 \sim 1.25 \text{ s}^{-1}$,时间与剪切应力的曲线是相互平行的,剪切应力单调递增不存在峰值情况。在剪切速率相对较高的情况下,例如 10 s^{-1} ,剪切应力与时间曲线在应力达到一个峰值,然后曲线缓慢下降,与此相对应直线标记法观察到样品表面的直线与平板发生中断,可以推断出发生滑移现象。滑移速度提供一定的应变,相应的剪切应力变小。在剪切速率高达 $50 \sim 70 \text{ s}^{-1}$,样品与平行板表面所标记的直线立即发生中断,观察到样品边缘破裂现象,剪切应力发生骤降。

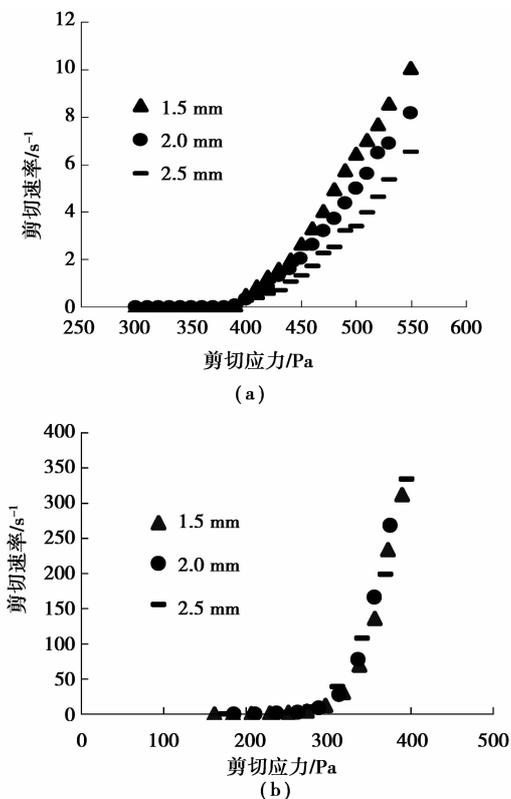


图 5 含水率 80% 的污泥应力-应变曲线 (25 °C) (a) 和含水率 90% 的污泥应力-应变曲线 (25 °C) (b)

随后对样品做了一组长时间的扫描,扫描时间 1 min,见图 8。在剪切速率很小的情况下,如(0.5~70 s⁻¹),剪切应力也发生小幅度的下降,由于使用标记法观察壁面滑移是受限制的,只能显示测试之初的表面流动情况,一般为圆周的 1/3,因此只能通过曲线进行分析,如果没有滑移发生,时间对剪切应力的曲线将是平行的,由图 8 得到剪切应力有一定的下降趋势,因此可以证明滑移速度提供了一定的应变。从实验中得到滑移有时间的依赖性,在低剪切速率下,需要经过一定时间才有滑移现象发生。在高剪切速率下所需的时间较短,甚至 0.1 s。在 10~50 s⁻¹ 之间,下降的趋势比较陡,基本上呈平衡状态,可以推测出滑移速度不受剪切速率的影响。

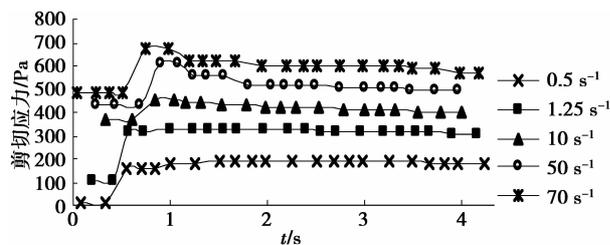


图 7 短时间剪切速率的扫描函数

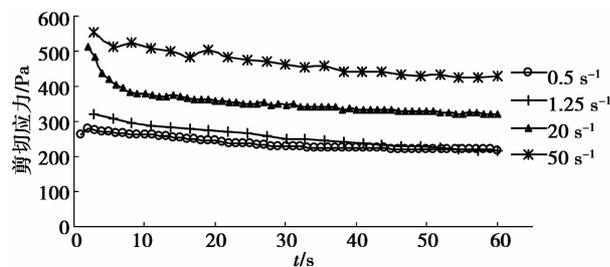


图 8 长时间剪切速率的扫描函数

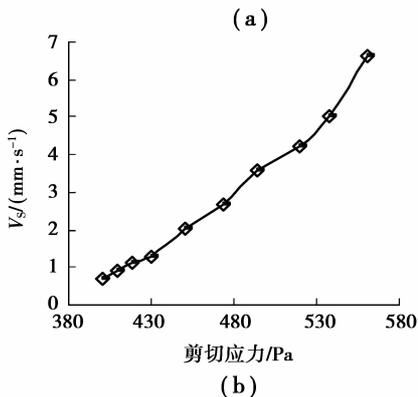
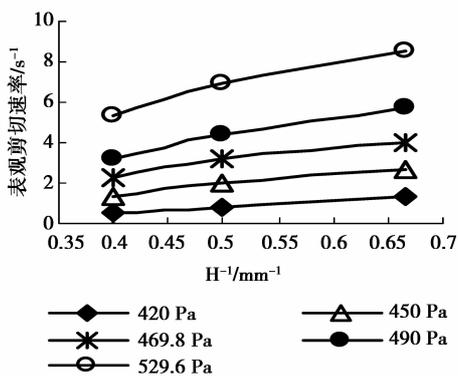


图 6 表观剪切速率对间距倒数的曲线 (25 °C, 含水率 80%) (a) 剪切应力与滑移速度曲线 (b)

3 结 语

1) 在稳态剪切中观察到了壁面滑移现象,根据剪切应力以及平板粗糙度观察到了 3 种滑移现象: a. 剪切应力小于屈服应力的柱塞流; b. 剪切应力大于屈服应力时上下两板均滑移; c. 粗糙度影响壁面滑移,较粗糙的平板没有发现滑移现象,而较平滑的平板发现此现象。

2) 通过对滑移速度的分析计算,大致得到其速度随着剪切应力的增长线性增加,初步拟合出滑移速度与剪切应力的经验公式: $V_s = 0.0005\tau^{1.39}$ 。

3) 通过对 2 种浓度的污泥进行实验研究,浓度是影响滑移的一个重要因素,浓度低的没有滑移发生,是否存在一个临界浓度值需要进一步进行研究。

- [7] CHINE Y C, WANG H P. Fate of bromine in pyrolysis of printed circuit board wastes [J]. *Chemosphere*, 2000, 40(4): 383-387.
- [8] 郭玉文,王松涛,刘景洋,等. 废电线热解过程产物分析[J]. *深圳大学学报:理工版*, 2009, 26(3): 246-250.
GUO YU-WEN, WANG SONG-TAO, LIU JING-YANG, et al. The thermal decomposition of waste computer wire[J]. *Journal of Shenzhen University: Science and Engineering*, 2009, 26(3): 246-250.
- [9] HUANG Y C. Introduction of the resource recycling technology of TFT-LCD waste glass [J]. *Industrial Sustainable Development*, 2006, 16: 50-53.
- [10] LOWE S. Pilot checklists and explanatory memorandum for evaluation of the environmental soundness of an importing facility management of the waste stream; used personal computers [C] // *Proceeding of the 2nd OECD Workshop on Environmentally Sound Management of Wastes Destined for Recovery Operations Austria, Sec. 3, Vienna, Austria*, 2000: 1-18.
- [11] Chien Y C, Shih P H, Hsien I H. Pyrolysis kinetics of liquid crystal wastes [J]. *Environmental Engineering Science*, 2005, 22(5): 601-607.
- [12] Chien Y C, Shih P H. Emission of polycyclic aromatic hydrocarbons on the combustion of liquid crystal display components [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2006, 132(9): 1028-1033.
- [13] 郭玉文,王松涛,刘景洋等. 液晶热处理失重特征及其过程产物初步研究. *环境科学研究*, 2009, 22(9): 1074-1078.
GUO YU-WEN, WANG SONG-TAO, LIU JING-YANG, et al. Weight Loss Properties and Process Production of Liquid Crystal Treatment [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, 22(9): 1074-1078.
- [14] 梁继军. 废液晶显示器热处理过程产物研究[D]. 成都:西南交通大学, 2009.
- [15] 罗渝然 编著. 化学键能数据手册[M]. 2005, 北京: 科学出版社.

(编辑 郑洁)

(上接第 106 页)

4) 剪切速率和时间也是影响滑移的因素。在剪切速率大于 0.5 s^{-1} 时发现滑移现象, 低剪切速率(如 $0.5 \sim 1.25 \text{ s}^{-1}$) 下发现滑移要经过较长的时间, 而剪切速率高达 70 s^{-1} 时, 标记线立即中断, 出现此现象。

参考文献:

- [1] 刘弦. 城市污水处理厂污泥管道输送阻力特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
- [2] BAUDEZ J C, COUSSOT P. Rheology of aging, concentrated, polymeric suspensions: application to pasty sewage sludges [J]. *Journal of Rheology*, 2001, 45(5): 1123-1139.
- [3] SEYSSIECQ I, FERRASSE J H, ROCHE N. State-of-the-art: rheological characterization of wastewater treatment sludge [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2003, 16(1): 41-56.
- [4] LOTITO V, SPINOSA L, MININNI G, et al. The rheology of sewage sludge at different steps of treatment [J]. *Water Science and Technology*, 1997, 36(11): 79-85.
- [5] RAMAMURTHY A V. Wall slip in viscous fluids and influence of materials of construction [J]. *Journal of Rheology*, 1986, 30(2): 337-357.
- [6] LAWAL A, KALYON D M. Single screw extrusion of viscoplastic fluids subject to different slip coefficients at screw and barrel surfaces [J]. *Polymer engineering and science*, 1994, 34(19): 1471-1479.
- [7] TABUTEAU H, BAUDEZ J C, BERTRANDT F, et al. Mechanical characteristics and origin of wall slip in pasty biosolids [J]. *Rheologica Acta*, 2004, 43(2): 168-174.
- [8] 孟令杰, 章名耀. 高浓度水煤浆流动的滑移现象及其对管内流动特性的影响 [J]. *热能动力工程*, 1996, 11(2): 85-88.
MENG LING-JIE, ZHANG MING-YAO. The slip phenomenon of coal water mixture of high concentration and its effect on flow characteristics in pipes [J]. *Journal of engineering for thermal energy and power*, 1996, 11(2): 85-88.
- [9] 廖华勇, 范毓润. 聚合物熔体壁面滑移的流变研究 [J]. *高等化学学报*, 2006, 27(9): 1755-1761.
LIAO HUA-YONG, FAN YU-RUN. A rheological study on wall slip of polymer melts [J]. *Chemical Journal of Chinese Universities*, 2006, 27(9): 1775-1761.
- [10] GEVILILI H, KALYON D M. Step strain flow: wall slip effects and other error sources [J]. *Journal of Rheology*, 2001, 45(2): 467-475.
- [11] KALYON D M, GEVILILI H. Wall slip and extrudate distortion of three polymer melts [J]. *Journal of Rheology*, 2003, 47(3): 683-699.

(编辑 郑洁)