

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2014.03.012

## 污泥屈服特性与壁面滑移临界条件

冯民权, 谭 未

(西安理工大学 陕西省西北旱区生态水利工程重点实验室, 西安 710048)

**摘 要:** 为了确定脱水污泥的屈服特性、发生壁面滑移时的临界剪切应力值, 采用平行板旋转流变仪(R/S+CPS)和高速摄像机(Trouble Shooter)对较低含水率的脱水污泥进行试验, 同时借助直线标记法、屈服应力对剪切速率的敏感度以及通过稳态扫描来分析剪切应力-剪切速率数据对平行板间距的依赖性, 从而判别滑移的存在并得到临界条件。结果表明, 含水率为 83% 的污泥在剪切速率为  $5\sim 60\text{ s}^{-1}$  作用下, 表现出剪切稀化, 并且由于可能是存在壁面滑移的原因, 致使屈服应力对剪切速率敏感, 其值随着剪切速率的增加而减小。对于含水率为 84%、85%、86% 的脱水污泥, 明显地观察到壁面发生滑移, 而且对比多组不同工况下的剪切应力-剪切速率数据, 发现不重叠; 而对于含水率为 88% 的污泥, 其两种现象恰恰相反。产生的壁面滑移速度随着壁面剪切应力的增大而增大。因此含水率以及剪切应力对污泥壁面滑移速度是有一定影响的, 甚至可能存在临界剪切应力值。

**关键词:** 脱水污泥; 含水率; 剪切应力; 滑移速度

中图分类号: X703.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2014)03-071-06

## Yield characteristics and critical condition of wall slip for sludge

FENG Minquan, TAN Wei

(State Key Laboratory of Eco-Hydraulic Engineering in Shaanxi, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** In order to determine the yield characteristics as well as the critical shear stress value of dewatered sludge when wall slip occurs, the rotating rheometer with parallel plate(R/S + CPS) and high-speed cameras(Trouble Shooter) are used for dewatered sludge with low moisture content, at the same time, linear marker and the sensitivity of the yield stress to shear rate as well as the dependence of the shear stress-shear rate data to parallel plate spacing are adopted, thus the existence of the slip and the critical condition can be identified. The results show that the dewatered sludge with the moisture content of 83% under the shear rate of  $5\sim 60\text{ s}^{-1}$  show that the shear thinning, and because there may be the occurrence of wall slip, the yield stress is sensitive to shear rate, and its value decreases with the increase of shear rate. For the dewatered sludge with moisture content of 84%, 85% and 86%, the occurrence of wall slip is obviously observed. Comparing with multiple sets of shear stress-shear rate data under different working conditions finds it isn't overlap; while for the moisture content as 88%, the results is just opposite. The wall slip velocity produced increases with the increase of wall shear stress. So shear stress and moisture content have some influences on wall slip velocity, and there even may be a critical shear stress.

**Key words:** dewatered sludge; moisture content; shear stress; slip velocity

收稿日期: 2013-10-13

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金博导类资助课题(20126118110015)

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.

据资料介绍<sup>[1]</sup>,到 2009 年,全国投运城镇污水处理厂 1992 座,污水处理量 280 亿  $\text{m}^3$ ,产生含水率 80%左右的污泥 2 005 万 t。随着在建的 2 000 多座污水处理厂陆续投入运行,全国年污泥总量将很快突破 3 000 万 t(以含水率 80%计)。这些城市脱水污泥主要来自二沉池,通过添加絮凝剂并机械脱水,使其含水率降到 85%以下,即形成脱水污泥<sup>[2]</sup>。在实际运用中,用汽车、船舶等交通工具运输脱水污泥更为普遍,而在国外用管道输送污泥实例的效率很低,其质量分数只有 1%~2%<sup>[3]</sup>。如何高效环保的处置运输这些含水率较高的污泥,极为关键。采用管道输送从脱水车间出来的较低含水率的脱水污泥,就能解决这一问题。本课题组去年到绍兴污水处理厂进行过调研,该厂通过管道输送的脱水污泥含水率在 82%左右。吴森等<sup>[4]</sup>对含水率 83.26%的污泥进行管道输送研究。因而本次试验所取污泥含水率的范围(83%~88%)对工业应用有指导意义。笔者之所以对较大含水率的污泥进行试验,意义在于不同含水率污泥其壁面滑移速度不同,为了得到最佳的滑移效果而寻求适宜的试验工况。

近年,本课题组成员<sup>[5-9]</sup>用直线标记法和摄像机拍摄到了污泥流动自由表面发生滑移的大致情况,并对脱水污泥的滑移影响因素(剪切速率、含水率、壁面材质)有了初步研究,得到了脱水污泥壁面滑移速度和剪切应力的初步经验公式。目前,除了本课题组成员获得的研究成果外,针对脱水污泥壁面滑移现象的研究还比较少。但某些污泥特性(如可能存在的屈服行为)以及就是是否存在一个滑移发生时的临界剪切应力值以及含水率对滑移的影响还没有深入研究。

笔者针对在不同工况下的流变试验里可能出现的滑移现象,采用拍摄速度和效果更高、更好的高速摄像机(带 25 mm 镜头,其拍摄速度达 1 000 帧/s)进行拍摄观察,通过屈服应力对剪切速率的敏感度来间接判断滑移的发生。为进一步研究污泥管道输送的滑移特性和减阻机制奠定基础。

## 1 试验

### 1.1 材料与条件

污泥取自山西省运城市富斯特污水处理厂。将污泥分别制成 5 种不同含水率的样品。试验开始前,这些样品都需要旋转速度为 500 r/min 的搅拌机将其搅拌均匀,然后静置半个小时。分别测定每种污泥的含水率。

本次试验采用美国博勒飞公司的旋转流变仪(R/S+CPS),使用的平行板夹具是直径为 50 mm 的不锈

钢板。其平行板间距可以控制在 0~4 mm 之间,当采用不同含水率污泥时,所设定间距都有所调整,间距不宜过小或者过大,否则会影响实验结果。所有的试验都是在室温( $13\text{ }^\circ\text{C}\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$ )下进行的。需要做直线标记法的时候,用牙膏在污泥的自由表面和上下平板的边缘作垂直直线。通过摄影技术拍摄到直线的形变,从而观察到污泥样品在剪切试验中的应变场。应用带有 25 mm 镜头的 Trouble shooter 高速摄像机进行了拍摄,其拍摄速度达 1 000 帧/s。

### 1.2 试验方案

首先对含水率为 83%的污泥进行流变测定,并通过应力松弛试验校验屈服应力。再对含水率为 88%、86%、85%、84%的 4 种脱水污泥进行试验,最后得到多组剪切应力与剪切速率的关系。所有的试验采用平板夹具。同时借助直线标记法观察滑移现象。每次试验都要使用新的样品,避免使用预剪切的样品。每个工况要至少重复做 3 次以确保没有扰动效应影响试验结果。同时,所有的试验中装载新样品的过程要保持一致。试验方案见表 1、2。

表 1 应力松弛扫描

含水率/%	温度/ $^\circ\text{C}$	间距/mm	扫描阶段一		扫描阶段二	
			剪切速率/ $\text{s}^{-1}$	t/s	剪切速率/ $\text{s}^{-1}$	t/s
83	13	1.5	①5; ②10; ③25; ④40; ⑤50; ⑥60	20	0	15

表 2 稳态剪切扫描

含水率/%	温度/ $^\circ\text{C}$	间距/mm
88	13	①1.2 ②1.5 ③1.8
86		①1.2 ②1.5 ③1.8
85		①1.5 ②1.8 ③2.0
84		①1.5 ②1.8 ③2.1

## 2 结果与讨论

### 2.1 污泥的流变特性

在一定的压力与温度条件下,污泥的黏度并非恒定的,而是依赖于几个因素,例如:剪切速率。因此污泥的剪切速率或者说是速度梯度与剪切应力不成线性比例,所以是非牛顿流体。

通过对山西省运城市富斯特污水处理厂脱水污泥做流变测试,如图 1、2 所示。结果表明,含水率为

83%的脱水污泥随着剪切速率的增大,表观黏度降低,并且存在屈服应力,其值在 220 Pa 左右,属于屈服假塑性流体。另一方面,对其进行应力松弛测定,使之在多组不同的恒定剪切速率下作用一段时间后使停止稳态剪切,对应的剪切应力陡然减小为一定大小范围的值,即为屈服应力值,试验结果如图 3 所示。结果表明,含水率 83%的脱水污泥的屈服应力值在 220~260 Pa 范围内,与前者稳合。这种流体有剪切变稀行为,有利于管道输送<sup>[10]</sup>。

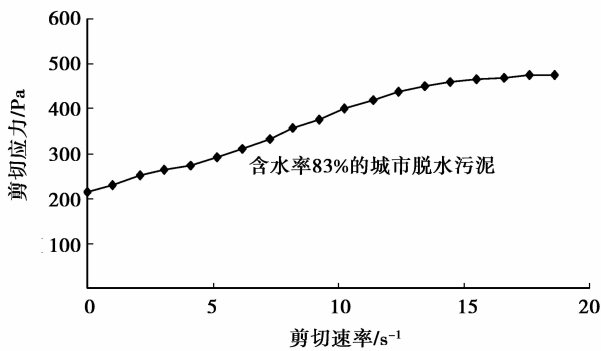


图 1 脱水污泥的流变特性曲线(13 °C)

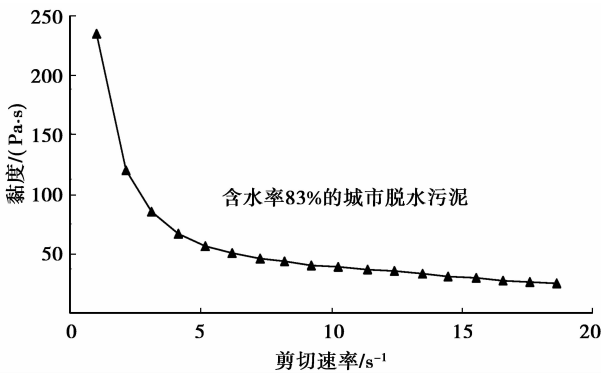


图 2 脱水污泥的黏度曲线(13 °C)

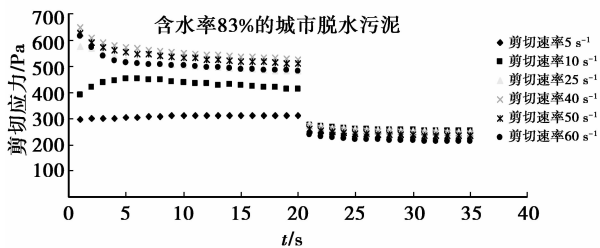


图 3 含水率 83%的污泥应力松弛扫描函数(13 °C)

## 2.2 污泥的滑移特性

### 2.2.1 用直线标记法直接观察滑移现象

用直线标记法,通过稳态剪切扫描直接观察滑移现象。但该方法有一定的局限性,只能拍摄到试

验之初的自由表面流动情况。图 4 为流变仪转子与固定下板的结构图,由于下板比上板转子大,拍摄下板的运动情况有些困难,因而本试验就不对下板的滑移做出考虑。拍摄结果如图 5~8 所示。图 5(a)、图 6(a)、图 7(a)、图 8(a)为试验前用白色牙膏在样品和平板边缘上标记的直线,图 5(b)、图 6(b)、图 7(b)、图 8(b)为试验开始后,平板转子开始转动 1/4 周时所标记直线的变化情况。图 5(b)中直线未出现断裂,即含水率为 88%的污泥未发生明显的滑移现象;而从图 6(b)、图 7(b)、图 8(b)中观察到所标记的直线在上平板处均出现了不连续现象。对于含水率 86%的直线断裂得更快。由于牙膏具有水溶性,可能对标记实验的结果有一定的影响。因而在后期的试验当中,可以考虑采用其他不溶于水的材料代替牙膏,以使直线标记的结果的准确性更高。



图 4 流变仪转子与固定下板的结构图

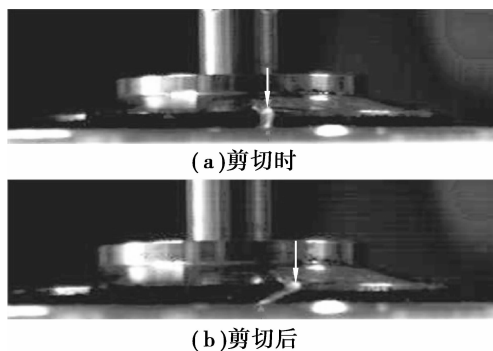


图 5 含水率 88%的污泥滑移现象

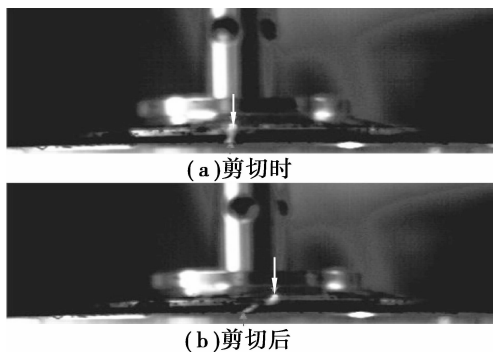
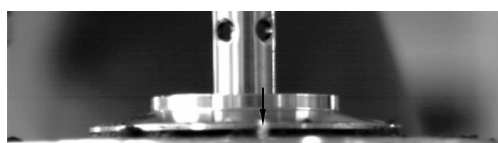
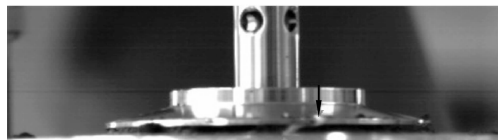


图 6 含水率 86%的污泥滑移现象



(a)剪切时

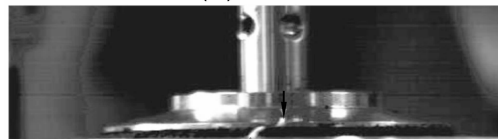


(b)剪切后

图 7 含水率 85% 的污泥滑移现象



(a)剪切时



(b)剪切后

图 8 含水率 84% 的污泥滑移现象

### 2.2.2 间接法体现滑移现象

在应力松弛试验中,如图 9。结果表明松弛应力,即屈服应力随着剪切速率的增加而减小,同时,通过直线标记法也拍摄到直线发生不连续现象,即有滑移发生。屈服应力值本来应该不受应变率的影响,而在存在滑移的情况下,该值就与所受到的剪切速率存在函数关系,使得确定该污泥的真实屈服应力有一定的困难。剪切速率越大,屈服应力越小,滑移就越明显。

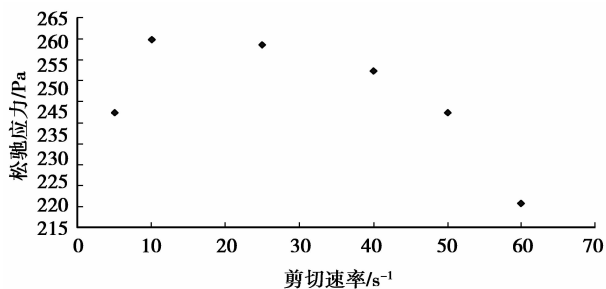


图 9 含水率 83% 的污泥松弛应力-剪切速率曲线(13 °C)

在稳态剪切扫描试验中,对比多组不同含水率污泥的剪切应力-剪切速率数据,如图 10~13 所示。结果表明,对含水率为 88% 的污泥,其剪切应力-剪

切速率数据对板间距没有依赖性,即发生重叠;对含水率为 86%、85%、84% 的污泥,其剪切应力-剪切速率数据在 3 组间距下都是不重叠。故本实验范围内,含水率为 86%、85%、84% 的污泥表现出明显的壁面滑移,而 88% 的污泥没有表现出明显的壁面滑移。

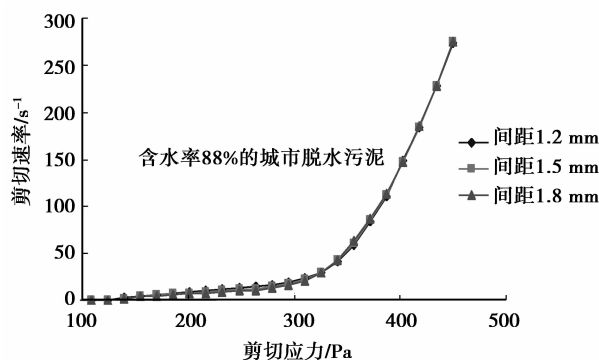


图 10 含水率 88% 的污泥剪切应力-剪切速率曲线(13 °C)

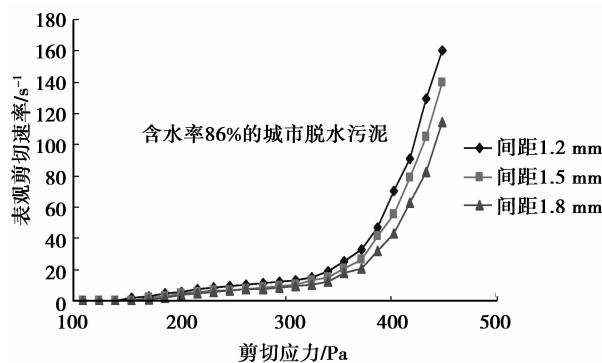


图 11 含水率 86% 的污泥剪切应力-剪切速率曲线(13 °C)

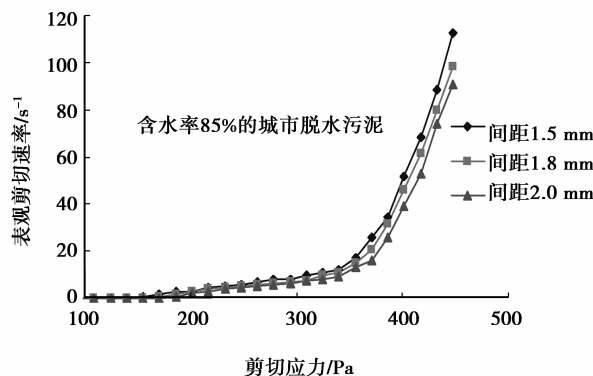


图 12 含水率 85% 的污泥剪切应力-剪切速率曲线(13 °C)

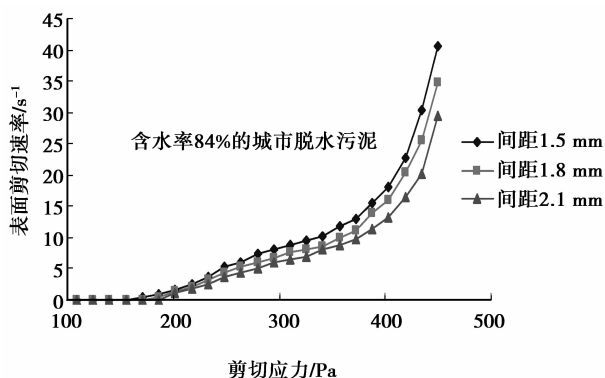


图 13 含水率 84% 的污泥剪切应力-剪切速率曲线(13 °C)

### 2.2.3 滑移速度

研究表明<sup>[11-12]</sup>,水煤浆、水焦浆等高质量分数浆体的滑移速度壁面剪切应力的函数,滑移速度会随着壁面剪切应力的增加而线性增加或者非线性增加。图 14 给出了污泥在不同含水率下滑移速度与壁面剪切应力之间的关系。结果表明,污泥的壁面滑移速度随着壁面剪切应力的增大而增大。然而,在低剪切应力区间污泥的壁面滑移速度随着壁面剪切应力的增加而线性增加,而在较高剪切应力区间,转变成非线性增加。随着剪切应力的不断增加,到一定阶段时出现了由弱滑移向强滑移的转变。含水率越低,产生相同滑移速度所需要的壁面剪切应力越大,滑移速度产生时需要的临界剪切应力也越大。对含水率为 86%、85%、84% 的 3 种污泥,以大约在剪切应力 300 Pa 处分为线性区和非线性区,两者分别采用线性方程和幂律方程拟合滑移速度曲线: $v_s = a\tau + b, v_s = a\tau^\beta$ 。

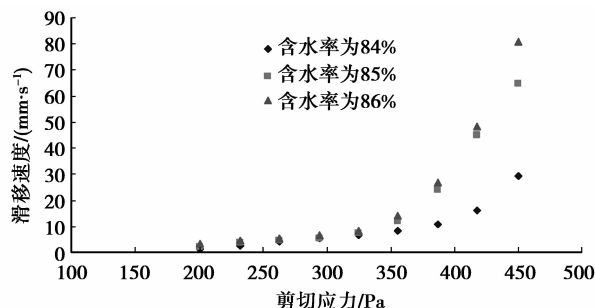


图 14 含水率 84%、85%、86% 的污泥滑移速度-剪切应力曲线(13 °C)

- 1) 86%:  $a = 0.0346 \text{ Pa}^{-1} \cdot \text{mm/s}, b = -3.7641 \text{ mm/s}, \tau < 300 \text{ Pa}; \alpha = 9.9 \times 10^{-18} \text{ Pa}^{-7.1256} \cdot \text{mm/s}, \beta = 7.1256, \tau > 300 \text{ Pa}.$
- 2) 85%:  $a = 0.0356 \text{ Pa}^{-1} \cdot \text{mm/s}, b =$

$-4.8668 \text{ mm/s}, \tau < 300 \text{ Pa}; \alpha = 2.7 \times 10^{-17} \text{ Pa}^{-6.9353} \cdot \text{mm/s}, \beta = 6.9353, \tau > 300 \text{ Pa}.$

3) 84%:  $a = 0.0468 \text{ Pa}^{-1} \cdot \text{mm/s}, b = -8.2126 \text{ mm/s}, \tau < 300 \text{ Pa}; \alpha = 3.0 \times 10^{-11} \text{ Pa}^{-4.4912} \cdot \text{mm/s}, \beta = 4.4912, \tau > 300 \text{ Pa}.$

由低剪切应力区间里线性区域的拟合公式可以得到临界剪切应力值分别为 109、137、175 Pa。Awati 等<sup>[13]</sup>在对聚苯乙烯熔体进行滑移规律研究时发现,在剪切应力极小的时候,滑移速度随着剪切应力增加而线性增加;在更大的剪切应力值时,突然转变成极速的非线性增加。以上公式的规律与其相一致。

## 3 结 语

1)随着剪切速率的增大,污泥的表观黏度降低,并且存在屈服应力,属于屈服假塑性流体,具有剪切变稀行为,有利于管道输送。

2)通过直接法和间接法得到的含水率 84%~86% 的脱水污泥均发生明显的滑移现象,含水率 88% 的脱水污泥未发生明显的壁面滑移。

3)污泥的壁面滑移速度随着壁面剪切应力的增大而增大,在低剪切速率区间内表现出单一的线性关系,而在较高剪切速率区间内,表现出非线性关系。通过本试验的拟合公式得到含水率为 86%、85%、84% 的污泥其临界剪切应力分别为 109、137、175 Pa。对于临界值而言,本研究得到的结果是否具有通用性,以及是否会随污泥样品变化而变化还有待于进一步研究。

4)本试验只在室温为 13 °C 的条件下进行,而温度对其流变特性也可能有一定的影响,因而在不同温度、不同含水率下的污泥特性的研究将纳入下一步试验计划。

5)鉴于实际运用中,采用管道输送含水率 80% 的脱水污泥的情况居多,我们在后续的试验当中,将对更接近含水率 80% 的污泥进行试验研究,以满足实际工业的需要。

### 参考文献:

[1] 孙莹. 水泥窑在市政污泥处理处置中的应用[J]. 给排水, 2011, 37(12): 30-33.  
SUN Ying. The application of cement kiln to the treatment of municipal sludge [J]. Water & Wastewater Engineering, 2011, 37(12): 30-33.  
[2] Eskicioglu C, Kennedy K J, Droste R L. Characterization of soluble organic matter of waste activated sludge before and after thermal

- pretreatment[J]. *Water Research*, 2006, 40 (20): 3725-3736.
- [3] 姜泳文. 城市污水处理厂污泥的管道运输[J]. *冶金矿山设计与建设*, 2000, 32(2): 32-36.  
JIANG Yongwen. Pipeline transportation for sludge in city's waste water treatment plant [J]. *Metal Mine Design & Consrucion*, 2000, 32(2): 32-36.
- [4] 吴淼, 赵学义, 潘越, 等. 城市污泥的特性及管道输送技术研究[J]. *环境工程学报*, 2008, 2(2): 260-265.  
WU Miao, ZHAO Xueyi, PAN Yue, et al. Research on characteristics of municipal sewage sludge and its pipeline transportation technology [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2008, 2(2): 260-265.
- [5] 冯民权, 张丽, 张晓斌, 等. 污泥的滑移现象及其特性分析[J]. *重庆大学学报*, 2011, 34(7): 102-106.  
FENG Minquan, ZHANG Li, ZHANG Xiaobin, et al. Analysis on wall slip phenomenon and characteristics of sewage sludge [J]. *Journal of Chongqing University*, 2011, 34(7): 102-106.
- [6] 冯民权, 张丽, 张晓斌, 等. 复杂流体壁面滑移特性研究及其测量[J]. *西安建筑科技大学学报: 自然科学版*, 2011, 43(2): 208-214.  
FENG Minquan, ZHANG Li, ZHANG Xiaobin, et al. Wallship of complex fluids and its measurement [J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition*, 2011, 43 (2): 208-214.
- [7] Zhang L, Feng M Q, Zhang X B. Experimental analysis of the slip phenomenon of sewage sludge [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 243/244/245/246/247/248/249, 41-44.
- [8] Zhang X B, Zhang L, Feng M Q, et al. Analysis of influence factors on sludge wall slip [C/OL] // *International Conference on Computer and Management*, 2011 [2013-09-10]. [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=5778795](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5778795).
- [9] 张晓斌, 冯民权, 张丽, 等. 污泥壁面滑移特性检测研究[J]. *西安理工大学学报*, 2011, 27(2): 200-204.  
ZHANG Xiaobin, FENG Minquan, ZHANG Li, et al. Testing study of charactertistics of wall slip for sewage sludge [J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2011, 27(2): 200-204.
- [10] 李明, 李伟东, 李伟锋, 等. 污泥与石油焦的共成浆性[J]. *石油学报*, 2008, 24(6): 663-668.  
LI Ming, LI Weidong, LI Weifeng, et al. Co-slurry ability of sewage sludge and petroleum coke [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2008, 24(6): 663-668.
- [11] 陈良勇, 段钰锋, 赵国华, 等. 浓度对水煤浆壁面滑移和流变特性的影响[J]. *中国电机工程学报*, 2008, 28(20): 48-54.  
CHEN Liangyong, DUAN Yufeng, ZHAO Guohua, et al. Effects of concentration on wall slip behavior and rheological characteristics of coal water slurry [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, 28(20): 48-54.
- [12] 马修元, 段钰锋, 刘猛, 等. 水焦浆的流变特性与壁面滑移效应[J]. *化工学报*, 2012, 63(1): 51-58.  
MA Xiuyuan, DUAN Yufeng, LIU Meng, et al. Wall slip behavior and rheological characteristics of coke/water slurry [J]. *CIESC Journal*, 2012, 63(1): 51-58.
- [13] Awati K M, Park Y, Weisser E, et al. Wall slip and shear stresses of polymer melts at high shear rates without pressure and viscous heating effects [J]. *Journal of Non-Newtonian Fluid*, 2000, 89(1): 117-131.

(编辑 郑洁)