

污泥管道输送沿程阻力影响因素分析

陆 海^{1,2}, 尹 军¹, 袁一星¹, 王建辉¹, 林英姿², 吴 磊¹

(1. 哈尔滨工业大学 市政环境工程学院, 150090 哈尔滨; 2. 吉林建筑大学 松辽流域水环境教育部重点实验室, 130118 长春)

摘 要: 为识别污泥管道输送过程中沿程阻力的变化及影响因素,以长春市某污水处理厂浓缩后储泥池污泥为对象,考察污泥质量分数、温度、减阻剂用量、平均流速等因素对污泥管道输送过程沿程阻力的影响效应,并进行机理分析. 结果表明:污泥质量分数对沿程阻力影响显著,质量分数分别为 2.38%、3.94%、5.39% 时,沿程阻力随质量分数增加而增大,输送过程中控制污泥质量分数小于 2.38% 可达最佳输送效果;温度对沿程阻力有显著影响,适当升温或采取保温措施有利于减小沿程阻力;减阻剂用量对沿程阻力影响显著,用量过低减阻效果不明显,用量过高会降低减阻效果,实际使用中需测算减阻剂最佳用量,污泥质量分数为 3.94% 时的减阻剂最佳用量为 0.588%;污泥管道输送应在平均流速略高于不淤流速的紊流条件下进行,质量分数为 2.38%、3.94%、5.39% 的 3 种污泥的输送平均流速分别为 1.35~1.45、1.20~1.30 及 1.10~1.20 m/s.

关键词: 污泥;管道输送;沿程阻力;影响因素;减阻

中图分类号: TU990.3 文献标志码: A 文章编号: 0367-6234(2013)06-0029-04

Influencing factors of on-way resistance in sludge transportation pipelines

LU Hai^{1,2}, YIN Jun¹, YUAN Yixing¹, WANG Jianhui¹, LIN Yingzi², WU Lei¹

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China; 2. Key Laboratory of Songliao Aquatic Environment, Ministry of Education, Jilin Jianzhu University, 130118 Changchun, China)

Abstract: To understand the changes and influencing factors of on-way resistance in sludge transportation pipelines, the influence effects of sludge concentration, temperature, drag reduction agent dosage and mean velocity on on-way resistance were investigated and the mechanisms were analyzed using the sludge concentrated in storage basin in a wastewater treatment plant in Changchun City as object. The results showed that the sludge concentration significantly affected the on-way resistance, and when the concentrations were 2.38%, 3.94% and 5.39%, the resistance increased as the concentration increased, therefore, to achieve the best conveying effect, the sludge concentration should be controlled less than 2.38% during transportation process. Temperature has significant effect on the on-way resistance, therefore, appropriate heating or insulation measures will be beneficial to the reducing of resistance; Drag reduction agent dosage significantly affects the on-way resistance. The drag reduction effect will both be reduced when the drag reduction agent dosage is too low or too high, therefore, the drag reduction agent optimum dosage should be calculated in the actual use, and the best dosage for 3.94% concentration sludge is 0.588%; The mean transportation velocity of sludge should be slightly higher than the non-deposition velocities under turbulent conditions which are determined to be 1.35–1.45 m/s, 1.20–1.30 m/s and 1.10–1.20 m/s for 2.38%, 3.94% and 5.39% concentration sludge respectively.

Key words: sludge; pipeline transportation; on-way resistance; influencing factors; drag reduction

收稿日期: 2012-06-12.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50978118).
作者简介: 陆 海(1981—),男,讲师,博士研究生;
尹 军(1954—),男,教授,博士生导师;
袁一星(1957—),男,教授,博士生导师.
通信作者: 尹 军, hitjunyin@163.com.

活性污泥法因其高效、低耗等优点而成为城市污水处理最主要的方法,但随之产生的大量剩余污泥是污水处理厂面临的一大难题^[1]. 这些污水处理过程的副产物降低了污水处理系统的有效

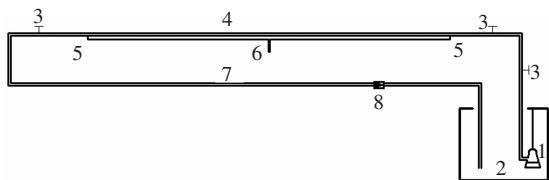
处理能力,若未经恰当处置进入环境后,将直接污染土壤、水体和大气生态系统,并对人类活动造成严重威胁^[2]. 一般而言,剩余污泥需经过浓缩、消化、脱水后进行最终处置. 但对中小型污水处理厂,消化池占地面积大,运行成本高,因此,将污水厂污泥外运并进行集中处理与处置,能有效减小中小型污水处理厂运行费用,减少城市周边占地面积,并降低对环境的污染^[3].

污水厂污泥有压管道输送方式因其运行费用省、自动化控制程度高及清洁、卫生等优点成为污泥输送方式的最佳选择. 日本、美国、英国以及荷兰等国均已修建了若干条污泥输送管道^[4],将污泥输送至固定地点统一处置. 污泥管道输送过程属于复杂的固液两相流问题^[5-7],沿程阻力是该输送过程中的一个关键问题^[8-10]. 因此,需探讨污泥沿程阻力的影响因素,进一步认识污泥流动阻力规律,优化设计污泥输送管道的运行参数,从而节省输送费用. 本研究以长春市某污水处理厂储泥池中污泥为研究对象,考察污泥质量分数、温度、减阻剂用量、平均流速等因素对污泥沿程阻力的影响,并进行机理分析.

1 实 验

1.1 实验材料

实验装置如图 1 所示,污泥泵型号 QW40-15,流量 40 m³/h,扬程 15 m,从污泥泵底部及四周吸泥,保证污泥箱中污泥混合均匀. 污泥箱为 PVC 材质,有效容积 500 L;控制阀门为铜球阀,控制管道中流量;测试管段为不锈钢管材,长度 5.0 m,内径 35 mm,长径比为 143:1;水银压差计以硅胶管与压力测试点连接,测试管段的压差;回流管采用 PPR 管材,内径 51 mm;用涡街流量计计量管道中的污泥流量,最大量程 50 m³/h,最小精度 0.01 m³/h.



1—污泥泵; 2—污泥箱; 3—控制阀门; 4—测试管段;
5—压力测试点; 6—水银压差计; 7—回流管; 8—涡街流量计.

图 1 实验装置示意图

实验所用污泥直接取自长春市某污水处理厂储泥池,为初沉池污泥与二沉池剩余污泥混合体,污泥粒径频度分布如图 2 所示. 污泥中粒径为 204.5 μm 颗粒所占比例最大,体积分数为 4.31%,污泥最大颗粒粒径为 992.2 μm,最小颗

粒粒径为 3.3 μm.

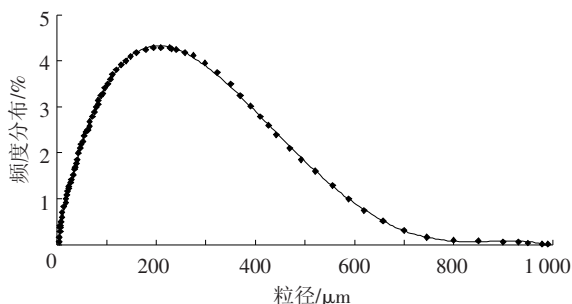


图 2 污泥粒径频度分布

1.2 实验方法

1.2.1 压差的测定

开启污泥泵,通过控制阀门调节测试管段中污泥流速,待水银压差计读数稳定后读取压差值.

1.2.2 流量的测定

在回流管路上安装涡街流量计,每次调节流速后待流量计读数稳定后读取流量值.

1.2.3 污泥质量分数的测定

先取干燥坩埚称质量 m_1 ,盛装待测污泥液并称质量 m_2 ,然后将待测样品在水浴蒸锅上蒸干,并于 105 ℃ 下在烘箱中烘干 2 h,最后在干燥皿中干燥 1 h 后称质量 m_3 ,污泥质量分数 $w = (m_3 - m_1) / (m_2 - m_1) \times 100\%$.

1.2.4 减阻剂的投加

减阻剂用量由电子分析天平称取,保持缓慢投加并充分搅拌.

1.2.5 温度的控制

实验过程中污泥温度由温度计读取,控制污泥温度波动范围为 ± 0.5 ℃,温度高出 0.5 ℃ 时停泵冷却,待温度下降回所需温度时继续试验.

1.3 实验仪器

包括电子分析天平(岛津,AUY-220 型)、激光粒度仪(岛津,SALD-2201 型)、旋转式黏度计(上海精密,NDJ-7 型)、烘箱(上海博迅,GZX-9146MBE 型)等.

2 结果与分析

2.1 污泥质量分数对沿程阻力的影响

在常温(25 ℃)条件下,考察质量分数为 2.38%、3.94%、5.39% 的 3 种污泥对沿程阻力的影响. 3 种质量分数污泥的基本物理属性如表 1 所示,随污泥质量分数的增大,密度略有增加,动力黏度和运动黏度增加较大. 沿程阻力试验结果如图 3 所示.

由图 3 可知,质量分数分别为 2.38%、3.94% 及 5.39% 时,沿程阻力随质量分数增加而增大,污泥质量分数对沿程阻力影响显著. 采用的

3种质量分数的污泥均属宾汉流体,污泥颗粒之间结成絮网结构而使污泥具有较大的屈服应力,从而产生较大的沿程阻力.同时,随污泥质量分数的增加,污泥内部的絮网结构加固,屈服应力和沿程阻力也随之迅速增大.污泥流动过程中的屈服应力可用白金汉方程表示,即

$$\frac{8v}{D} = \frac{\tau_w}{\mu_B} \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{\tau_0}{\tau_w} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{\tau_0}{\tau_w} \right)^4 \right]. \quad (1)$$

式中: v 为平均流速,m/s; D 为管道内径,m; τ_w 为管壁处剪应力,Pa; μ_B 为刚度系数或动力黏度系数,Pa·s; τ_0 为污泥的屈服应力,Pa.

表1 各质量分数污泥 25 ℃时的基本物理属性

序号	质量分数/ %	密度/ (kg·m ⁻³)	动力黏度/ (mPa·s)	运动黏度/ (m ² ·s ⁻¹)
1	2.38	1 003	1.92	1.91
2	3.94	1 007	2.80	2.78
3	5.39	1 012	4.85	4.79

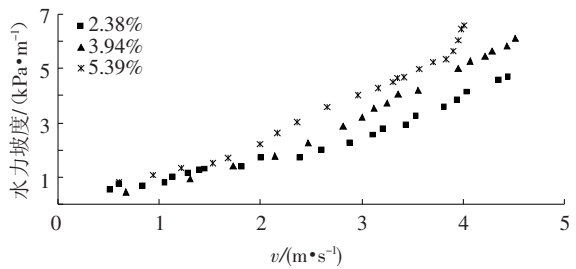


图3 污泥质量分数对沿程阻力的影响

由管道内污泥的受力平衡关系可知

$$J = 4\tau_w/\gamma D. \quad (2)$$

式中: γ 为污泥容重,N·m³; J 为水力坡度.

由式(1)及(2)可知,当 $v=0$ 时, $\tau_w=\tau_0$, $J=4\tau_0/\gamma D$,即在污泥静止时, $J\neq 0$;只有当 $J>4\tau_w/\gamma D$,污泥才能克服屈服应力 τ_0 后产生流动,污泥质量分数增加,屈服应力 τ_0 也随之增大,从而使沿程阻力也随之增大.因此,为减小污泥中的屈服应力,应尽量控制污泥质量分数最低.

2.2 温度对沿程阻力的影响

分别对质量分数为 5.39% 的污泥在 27 和 37 ℃ 条件下及质量分数为 3.94% 的污泥在 19 和 39 ℃ 条件下的沿程阻力进行测定,结果如图 4、5 所示.

由图 4 可知,质量分数为 5.39% 的污泥在 27 ℃ 时的沿程阻力小于 37 ℃ 时. 由图 5 可知,质量分数为 3.94% 的污泥在 19 ℃ 时的沿程阻力小于 39 ℃ 时. 因此,对于不同质量分数的污泥,沿程阻力均随温度升高而明显降低,温度的影响效应显著. 随温度的升高,污泥体积膨胀,污泥中絮网

结构变松散,固体颗粒间的相互作用因其间距增大而减弱,固体颗粒易于摆脱周围颗粒的引力作用而实现在一定空间范围内的自由运动,污泥的黏度降低,进而沿程阻力减小.

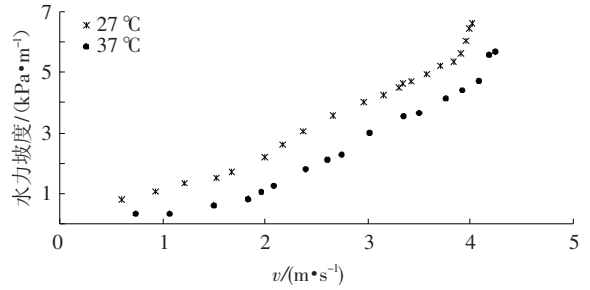


图4 温度对 5.39% 质量分数污泥沿程阻力的影响

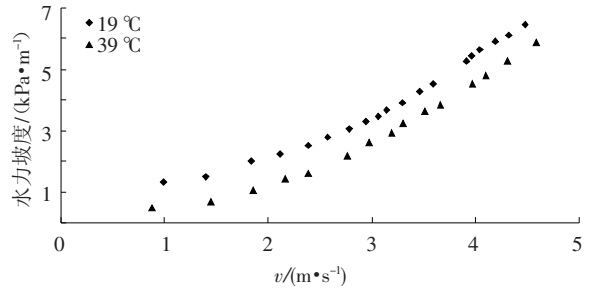


图5 温度对 3.94% 质量分数污泥沿程阻力的影响

2.3 减阻剂用量对沿程阻力的影响

常温(25 ℃)条件下,对质量分数为3.94% 的污泥进行减阻实验. 减阻剂采用 325 目(45 μm) 矿物质材料绿泥石粉末,减阻剂的质量分数分别为 0.294%、0.588% 及 0.882%, 结果如图 6 所示. 减阻剂用量为 0.294% 时达不到减阻目的,用量为 0.588% 和 0.882% 时均有明显减阻效果,减阻剂最佳用量为 0.588%.

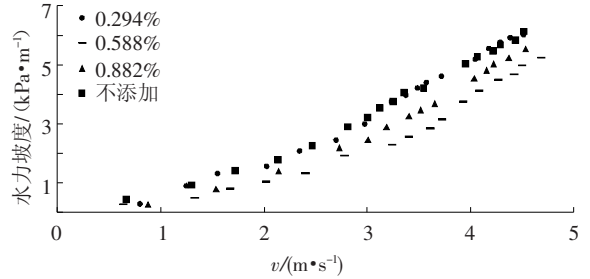


图6 减阻剂用量对 3.94% 质量分数污泥沿程阻力的影响

结合图 2 可知,采用的减阻剂颗粒与污泥颗粒相比属于细颗粒,减阻剂的投加事实上增加了污泥中细颗粒的含量. 用量为 0.294% 时,减阻剂投加前后污泥自身属性未发生明显改变,不产生减阻效果;用量为 0.588% 时,减阻剂颗粒在表面吸附水膜后分散于污泥颗粒之间,能够阻止污泥颗粒间的碰撞和聚集,起到了润滑作用,能够提高污泥的流动性并减小沿程阻力;但当减阻剂用量达 0.882% 时,污泥中固体颗粒含量增加,污泥黏性随之迅速增大,降低了污泥的流动性,同时增加

沿程阻力. 因此, 减阻剂用量对沿程阻力影响显著, 用量过低减阻效果不明显, 用量过高会降低减阻效果, 实际使用中需测算减阻剂最佳用量, 3.94% 质量分数的污泥减阻剂最佳用量为 0.588%.

2.4 平均流速对沿程阻力的影响

不同流速下的沿程阻力测试结果见图 3~6. 可以看出, 污泥沿程阻力随流速的增大呈非线性规律增加, 可用哈森 - 威廉姆斯 (Hazen - Williams) 紊流公式表示, 即

$$h_f = 6.82 \left(\frac{L}{D^{1.17}} \right) \left(\frac{v}{C_H} \right)^{1.85} \quad (3)$$

式中: h_f 为输泥管沿程水头损失, m; L 为输泥管长度, m; D 为输泥管管径, m; v 为污泥平均流速, m/s; C_H 为哈森 - 威廉姆斯系数, 其值取决于污泥质量分数.

随着流速的增加, 污泥内部的絮网结构遭受破坏的程度加剧, 污泥颗粒间及颗粒与管壁间的碰撞概率加大, 导致黏滞力的增加, 即沿程阻力的增加. 实际输送过程中, 层流条件下, 由于屈服应力的存在而使阻力很大, 同时, 输送流速较小容易引起污泥颗粒的分选沉降并产生淤积, 不利于污泥的输送; 紊流条件下, 污泥颗粒因保持悬浮状态而利于长距离输送, 但应避免因流速过高而导致较大的输送阻力. 因此, 污泥管道输送应在平均流速略高于不淤流速的紊流条件下进行. 根据污泥管道不淤流速关系式, 结合试验中管长、管径、污泥密度、污泥质量分数、粒径级配、黏度及雷诺数等数据, 计算出 2.38%、3.94%、5.39% 质量分数的 3 种污泥的不淤流速分别为 1.32、1.19 及 1.06 m/s, 因此, 实际输送平均流速分别确定为 1.35~1.45、1.20~1.30、1.10~1.20 m/s.

3 结 论

1) 污泥质量分数对沿程阻力影响显著, 沿程阻力随质量分数增加而增大, 输送过程中污泥质量分数小于 2.38% 可达最佳输送效果.

2) 温度对沿程阻力的影响效应明显, 升高温度可提高污泥的流动性, 有利于减小沿程阻力. 在寒冷地区应对污泥输送管道采取适当的升温及保温措施.

3) 减阻剂用量对沿程阻力影响显著, 用量过低减阻效果不明显, 用量过高会降低减阻效果, 实

际使用中需测算减阻剂最佳用量, 3.94% 质量分数的污泥减阻剂最佳用量为 0.588%.

4) 污泥管道输送应在平均流速略高于不淤流速的紊流条件下进行, 质量分数为 2.38%、3.94%、5.39% 的 3 种污泥的实际输送平均流速分别确定为 1.35~1.45、1.20~1.30、1.10~1.20 m/s.

参考文献

- [1] WANG Zheng, WANG Lin, WANG Baozhen, *et al.* Experimental study on zero excess sludge production process with ozonation unit in MBR process [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2010, 42 (1): 46-50.
- [2] 李建政, 昌盛, 刘枫. 不同预处理方法对剩余污泥厌氧发酵产氢的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(6): 51-56.
- [3] 刘弦. 城市污水处理厂污泥管道输送阻力特性研究 [D]. 重庆: 重庆大学城市建设与环境工程学院, 2007.
- [4] 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.
- [5] WANG Wuchang, FAN Shuanshi, LIANG Deqing, *et al.* Experimental study on flow characteristics of tetrahydrofuran hydrate slurry in pipelines [J]. Journal of Natural Gas Chemistry, 2010, 19(3): 318-322.
- [6] WANG Wuchang, FAN Shuanshi, LIANG Deqing, *et al.* A model for estimating flow assurance of hydrate slurry in pipelines [J]. Journal of Natural Gas Chemistry, 2010, 19(4): 380-384.
- [7] CHEN Liangyong, DUAN Yufeng, LIU Meng, *et al.* Slip flow of coal water slurries in pipelines [J]. Fuel, 2010, 89(5): 1119-1126.
- [8] MATOUSEK V. Pressure drops and flow patterns in sand-mixture pipes [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2002, 26(6): 693-702.
- [9] FANGARY Y S, GHANI A S A, HAGGARD S M E, *et al.* The effect of fine particles on slurry transport processes [J]. Minerals Engineering, 1997, 10(4): 427-439.
- [10] KAUSHAL D R, KIMHIKO S, TAKESHI T, *et al.* Effect of particle size distribution on pressure drop and concentration profile in pipeline flow of highly concentrated slurry [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2005, 31(7): 809-823.

(编辑 刘 彤)