

# 污水处理工艺中活性污泥流变特性的研究

张新瑜,袁一星,伍悦滨

(哈尔滨工业大学市政环境工程学院,黑龙江 哈尔滨 150090)

**摘要:**活性污泥属于非牛顿流体,以流变学作为工具,通过实验研究它的流变特性,建立它的流动方程.对于不同种类的活性污泥进行了流变测定,并采用所得实验数据拟合了相应的流动方程,确定了方程中的参数.研究表明:活性污泥的流变特性符合伪塑性模型;发生膨胀的活性污泥,由于丝状菌过度繁殖而形成的复杂网状结构对剪切率有阻碍作用.研究结果可为生化法中的氧气、污染物传递过程计算和生化反应器设计提供理论基础.

**关键词:**流变特性;非牛顿流体;活性污泥

**中图分类号:**TV131.2

**文献标识码:**A

**文章编号:**1006-7930(2008)03-0388-06

在当前的污水处理技术领域,活性污泥法是应用最广泛的工艺.活性污泥法已有90多年的历史,随着实际生产上的广泛应用和技术上的不断革新,特别是近几十年来,活性污泥法在生物学、反应动力学的理论研究方面得到了长足的发展,出现了多种能够适应各种污水性质的工艺流程,当前活性污泥法已成为污水特别是有机污水处理技术的主体技术<sup>[1]</sup>.

活性污泥的流变特性,影响着曝气池中氧气的转移速率与颗粒的沉降过程.有研究报道,活性污泥流变特性的重要参数:表观粘度与曝气池中絮凝体的沉降过程、废水中污染物的传质规律具有显著的相关性<sup>[2-5]</sup>.因此,研究活性污泥的流变特性对于改善活性污泥工艺的运行条件,优化运行参数有很大的理论和实践意义.

## 1 活性污泥的组成与表征参数

### 1.1 活性污泥的组成

活性污泥是活性污泥处理系统中的主体作用物质,在活性污泥上栖息着具有强大生命力的微生物群体.活性污泥由四部分组成<sup>[1]</sup>:

- (1) 具有活性的微生物群体(Ma);
- (2) 微生物自身氧化的残留物(Me);
- (3) 污水挟入的不能为微生物降解的惰性有机物质(Mi);
- (4) 污水挟入的无机物质(Mii).

其中,栖息在活性污泥上的微生物群体以好氧细菌为主,还包括真菌、放线菌、酵母菌以及原生动物、后生动物等微型动物,这些微生物群体在活性污泥上组成了一个相对稳定的生态系.

### 1.2 表征活性污泥的参数

- (1) 混合液悬浮固体(MLSS)浓度,即单位容积混合液内所含有的活性污泥固体物的总重量.
- (2) 混合液挥发性悬浮固体(MLVSS)浓度,即混合液活性污泥中有机固体物质的浓度.
- (3) 污泥沉降比(SV%)又称30 min沉淀率.混合液在量筒内静止30 min后所形成沉淀污泥的容积占原混合液容积的百分率.
- (4) 污泥体积指数(SVI)曝气池出口处混合液经30 min静沉后,每克干污泥所形成的沉淀污泥所

收稿日期:2007-10-11 修改稿日期:2008-05-16

基金项目:黑龙江省自然科学基金资助项目(ZJ G0503)

作者简介:张新瑜(1976-),男,吉林白城人,博士研究生,主要从事给水管网系统优化和给水管网水质方面的研究.

占的容积。

### (5) 活性污泥的流变参数

表征活性污泥流变特性的主要参数有两个方面:表观粘度和本构方程式。活性污泥属于非牛顿流体,只有通过实验,才能确定活性污泥的流动模型,进而得到具体的流变参数。

## 2 活性污泥的本构方程

对于牛顿流体,在简单剪切流动中,剪切应力与剪切速率成正比,满足关系式(1):

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1)$$

式中:  $\tau$  为切应力;  $\frac{du}{dy}$  为速度梯度;  $\mu$  为粘度系数。

上式即为牛顿内摩擦定律,对于污泥、污水这类流体在作纯剪切流动时不满足牛顿内摩擦定律的流体就是非牛顿流体<sup>[6]</sup>。非牛顿流体的表观粘度  $\mu$  是个变量,只有通过流变实验测得其具体数值<sup>[7]</sup>。

尽管表征活性污泥流变特性的参数因场合不同而不同,但是在流变学研究领域内,有三种的典型流场足以研究其流变特性,这三种典型的流场是:简单剪切流场、小振幅震荡流场和拉伸流场<sup>[8]</sup>。

定义活性污泥的流动如下:每一个物质点  $p$  承受剪切率的简单剪切变形(加平移和转动),如活性污泥试样在测量转筒中的流动和圆管中的流动<sup>[9]</sup>。如图中流体沿半径为  $a$  的长圆管的流动,取柱坐标系  $(r, \theta, z)$ ,  $z$  轴与管轴重合<sup>[10]</sup>。设速度分布为:

$$v(r) = 0, v(\theta) = 0, v(z) = u(r) \quad (2)$$

剪切率  $\dot{\gamma}$  和偏应力张量  $D$  的物理分量都是  $r$  的函数,运动方程组是

$$\begin{aligned} -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr}(rD_{(r)}) - \frac{1}{r} D_{(\theta)} &= 0 \\ -\frac{\partial p}{\partial \theta} &= 0 \\ -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr}(rD_{(z)}) &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

边界条件为:  $u(a) = 0$ ,  $r \rightarrow 0$  时,  $u$  有界。积分方程

(3) 并应用  $D_{(ij)}$  有界的条件得到:

$$D_{(ij)} = \dot{\gamma}(r) = \frac{1}{2} C_0 r \quad (4)$$

设  $\tau_w$  是管壁处的切应力  $\tau_w = -\frac{1}{2} C_0 a$ ,

$$Q = \int_0^a \frac{a^3}{-3} \tau_w^{-2} r(\dot{\gamma}) dr \quad (5)$$

在(5)式对  $\tau_w$  求导得到:  $\frac{dQ}{d\tau_w} = -\frac{3Q}{\tau_w} + \frac{a^3}{\tau_w} r(\dot{\gamma}_w)$

(6)

$$r(\dot{\gamma}_w) = \frac{Q}{a^3} \left( 3 + \frac{\tau_w}{Q} \frac{dQ}{d\tau_w} \right) = \left[ 3 + \frac{d(\log \frac{Q}{\tau_w})}{d(\log \tau_w)} \right] \quad (7)$$

其中:  $\frac{dQ}{d\tau_w} > 0$  实验表明,像活性污泥这一类的非牛顿流体的  $\frac{d(\log \frac{Q}{\tau_w})}{d(\log \tau_w)}$  是常量,因而  $r$  和  $\tau_w$  的关系可以写成:  $r = K \tau_w^m$ , 将此式代入式(7)中,得到:

$$r(\dot{\gamma}_w) = \frac{Q}{a^3} (3 + m) = \frac{K}{a^3} (3 + m) \tau_w^m \quad (8)$$

由式(8)经过变形,可得活性污泥的本构方程:  $\tau = k \dot{\gamma}^n$  (9)

## 3 活性污泥的流变实验及数值模拟

进行流变测量时,材料的粘度受剪切速率、温度、压力和剪切时间的影响极大,因此,确定对粘度测

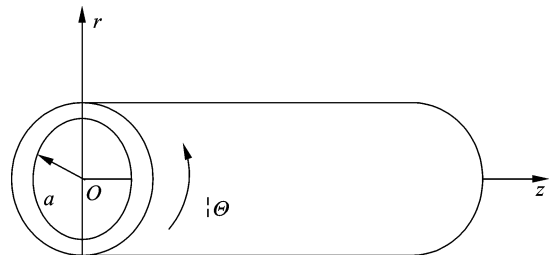


图1 圆管流动

Fig. 1 The flow inside circular pipe

定有影响的因素是非常重要的.对于活性污泥,主要考虑温度对其粘度的影响很大,根据资料显示,室温下水的温度敏感度是3%,因此,对于精确度要求为1%的活性污泥试样,温度变化的应该控制在 $\pm 0.3$ 以内<sup>[11]</sup>.所以在进行流变实验时,必须严格控制温度,才能得到精确的结果.

本实验在对活性的测量过程中,为了减少温度对实验结果的影响,采取了恒温测量,因而保证了实验数据的精确度.

### 3.1 实验仪器

HAAKE-CV100 流变仪;101-1 型电热干燥箱;FA1003 电子天平.

### 3.2 实验材料

活性污泥来自某城市污水处理厂的曝气池、二沉池,啤酒废水处理工艺的生化池.

### 3.3 活性污泥的流变实验

#### 3.3.1 活性污泥的粘度测定

图2给出了在不同污泥浓度条件下测定的体系动力粘度.由图中可以发现测定时剪切速率由大到小,体系动力粘度的变化规律相似.体系动力粘度均随着污泥浓度的增大而增大,随着剪切速率的增大而减小,表现出剪切稀化的现象.一般地,当剪切速率从0增大到 $20\text{ s}^{-1}$ ,体系动力粘度下降较快,当剪切速率大于 $20\text{ s}^{-1}$ 后,体系动力粘度基本保持不变.因此,在反应器设计时,体系的动力粘度可采用剪切速率大于 $20\text{ s}^{-1}$ 时的数据.

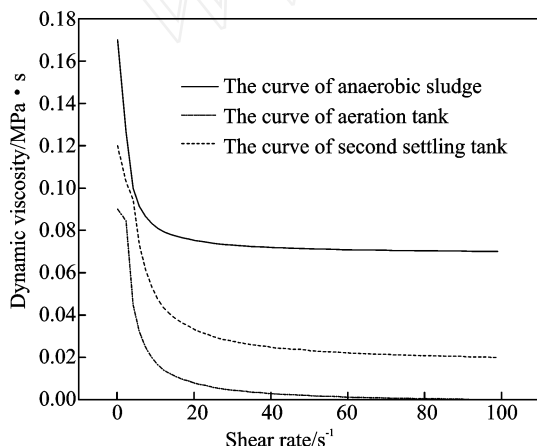


图2 活性污泥的粘度曲线

Fig. 2 The curve of activated sludge

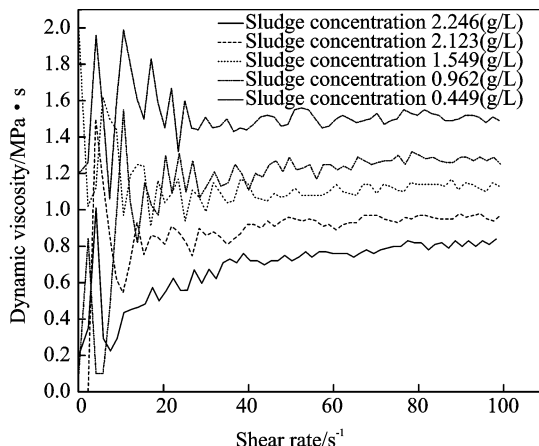


图3 不同浓度活性污泥的粘度曲线

Fig. 3 The flow curve of aerobic sludge at different thickness

#### 3.3.2 不同浓度好氧活性污泥的流动曲线测定

污泥浓度不同,它的流动特性也不同.通过实验测定不同浓度下给水污泥的流动曲线,测定温度为 $20^\circ\text{C}$ .如图3所示,图中共有5条曲线,曲线1至曲线5,浓度是由高向低变化的.可以得出结论:剪切速率由低到高变化时,各个曲线的粘度变化规律基本一致.体系的粘度是随着污泥浓度的增加而增大的,表现出幂率流体的特性<sup>[12]</sup>.

#### 3.3.3 不同浓度的厌氧活性污泥的流动曲线测定

在通常的活性污泥法处理废水过程中,厌氧污泥的浓度比好氧污泥的浓度大.测定温度 $20^\circ\text{C}$ ,污泥的浓度为 $4.635\text{ g/L}$ .由图4可看出,在剪切率由低到高的变化过程中,随着污泥浓度的变大,污泥的粘度也相应的增加.而当剪切率低于 $20\text{ s}^{-1}$ 时,厌氧污泥的粘度曲线的波动很大.

### 3.4 活性污泥流变模型的数值模拟

#### 3.4.1 曝气池活性污泥实验数据的曲线拟合

在温度为 $20^\circ\text{C}$ 的条件下,对取自污水处理厂曝气池的活性污泥进行流变实验,利用所得的实验数据进行数值拟合,如图5,图中得到两条曲线,散点图为实验数据直接得到的图形,而曲线图为拟合后的曲线.

通过数值拟合 ,得到的曲线方程如下 :

$$Y = A + B_1 X + B_2 X^2 + B_3 X^3$$

式中:  $A = 0.001\ 29$  ,  $B_1 = -\ 2.240\ 28\text{E} - 4$  ,  $B_2 = 2.370\ 74\text{E} - 5$  ,  $B_3 = -\ 1.262\ 59\text{E} - 7$  .

从方程的形式可以看出 ,活性污泥的流变特性符合幂率模型:  $= k^n$  .

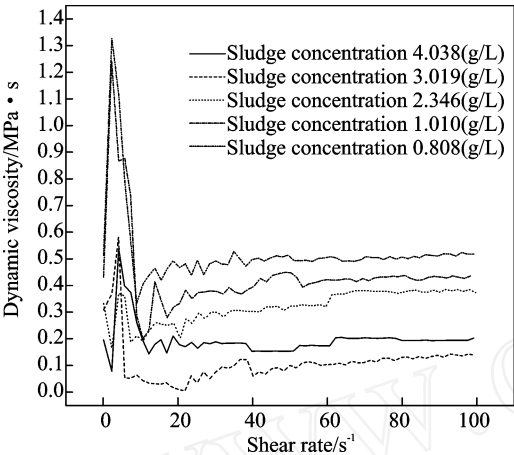


图 4 不同浓度的厌氧污泥曲线

Fig. 4 The curve of anaerobic sludge at different thickness

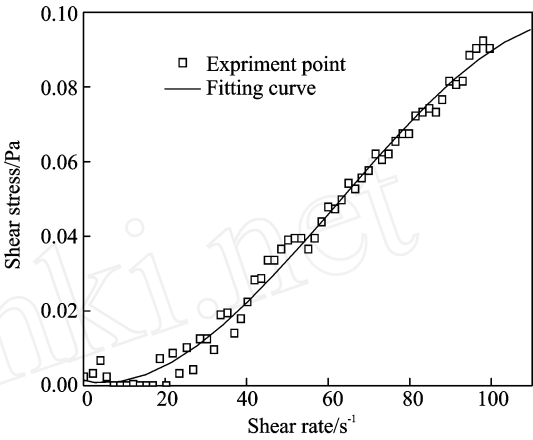


图 5 二沉池污泥的曲线拟合

Fig. 5 The fitting curve of sedimentation-pool sludge

3.4.2 啤酒废水处理工艺活性污泥实验数据的曲线拟合

对处理啤酒废水污泥进行流变测量 ,测定温度为 20℃ ,污泥的浓度为 1.635g/L ,如图 6 所示 :使用所得数据进行数值拟合 ,得到曲线的方程:  $Y = A + B_1 X + B_2 X^2 + B_3 X^3$  . 式中:  $A = 0.018\ 43$  ,  $B_1 = 7.866\ 4\text{E} - 4$  ,  $B_2 = 1.420\ 19\text{E} - 5$  ,  $B_3 = -\ 1.807\ 02\text{E} - 7$  .

从方程的形式可以看出 ,活性污泥流变特性符合幂率模型 ,即:  $= k^n$  .

3.4.3 丝状菌过度繁殖污泥的流变测定

污泥膨胀主要是丝状菌大量繁殖所引起的 ,一般污水中碳水化合物较多 ,缺乏氮、磷、铁等养料 ,溶解氧不足 ,水温高或 pH 值较低等都容易引起丝状菌大量繁殖 ,导致污泥膨胀<sup>[1]</sup> .

在图 7 中的两条曲线分别表示丝状菌过度繁殖的污泥和正常的活性污泥 . 在增加和降低剪切率时 ,丝状菌过度繁殖的污泥产生的剪切率/切应力曲线与正常的活性污泥是不同 . 上行和下行的曲线构成一个滞后环 ,这个滞后环的面积大小可以用来指示活性污泥中的丝状菌过度繁殖现象 .

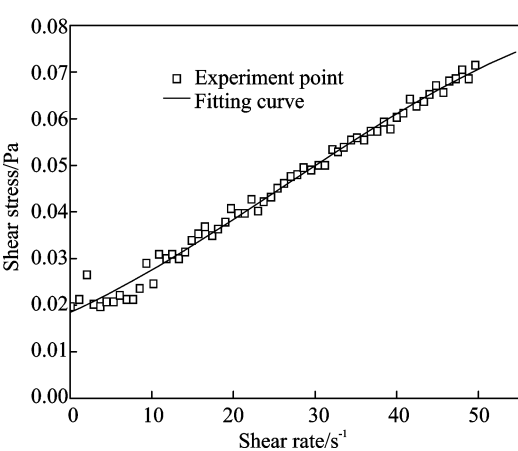


图 6 啤酒废水污泥的曲线拟合

Fig. 6 The fitting curve of beer wastewater sludge

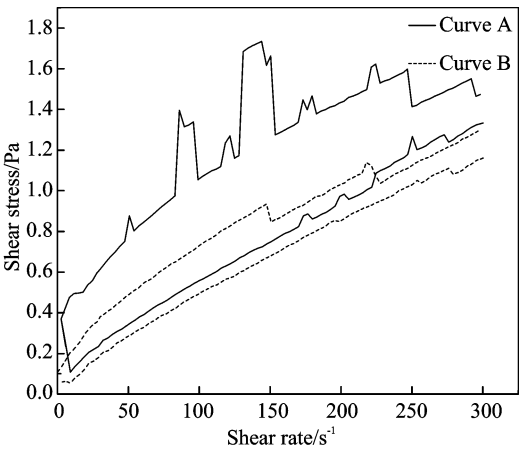


图 7 活性污泥的触变环

Fig. 7 The hysteresis loop of aerobic sludge

## 4 结 论

(1) 通过实验,发现活性污泥体系的动力粘度随着剪切速率的增大而减小,表现出剪切稀化的现象,从而验证了活性污泥的非牛顿流体特性——剪切稀化特性。

(2) 通过实验测定,验证了污水处理工艺中活性污泥的流变特性符合塑性模型:  $\tau = k \dot{\gamma}^n$ 。

(3) 在不同污泥浓度条件下,测量活性污泥的粘度时发现,体系动力粘度的变化规律与其剪切速率的变化规律相似,且体系动力粘度均随着污泥浓度的增大而增大。

(4) 当剪切速率从 0 增大到  $20 \text{ s}^{-1}$ ,体系动力粘度下降较快,当剪切速率超过  $20 \text{ s}^{-1}$  后,体系动力粘度基本保持不变。因此,在反应器设计时,体系的动力粘度可采用剪切速率大于  $20 \text{ s}^{-1}$  时的数据。

(5) 丝状菌过度繁殖的污泥产生的滞后环很大,这与丝状菌之间形成的复杂网状结构有关,这个网状结构对流动产生阻碍,只有剪切率增加时才能克服这个阻碍,即显示出流变效应。

(6) 管道输送污泥是污水处理厂污泥处置的常用方法,由于污泥的成分多样,具有沉降性和粘滞性,导致污泥流动的阻力增加,在层流条件和紊流条件下差别很大。通过实验,得到活性污泥的本构方程,可以确定活性污泥的流变参数,为管道设计和选择合理的污泥输送方式提供理论依据。

## 参考文献 References

- [1] 张自杰. 排水工程[M]. 第3版. 北京: 中国建筑工业出版社, 1996.  
ZHANG Zi-jie. Drainage Engineering [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1996.
- [2] Tixer N, Guibaud G, Baudu M. Determination of some rheological parameter for the characterization of activated sludge [J]. Bioresource Technology, 2003, 90: 215-217.
- [3] Guibaud G, Dollet P, Tixer N, Dagot C, et al. Characterisation of the evolution of activated sludges using rheological measurements [J]. Process Biochemistry, 2004, 39: 1803-1805.
- [4] Steven K Dentel. Evaluation and role of rheological properties in sludge management [J]. Wat. Sci. Tech., 1997, 11 (36): 1-3.
- [5] Isabelle, Seyssecq, Jean-Henryerrasse, et al. State of the art rheological characterization of wastewater treatment sludge [J]. Biochemical Engineering Journal, 2003, 16: 45-47.
- [6] 沈仲棠, 刘鹤年. 非牛顿流体力学及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 1989.  
SHEN Zhong-tang, LIU He-nian. Non-Newtonian fluid dynamics and application [M]. Beijing: Higher Education Press, 1989.
- [7] 郭柏灵, 林国广, 尚亚东. 非牛顿流体力学系统 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.  
GUO Bo-ling, LIN Guo-guang, SHANG Ya-dong. Non-Newtonian fluid dynamics system [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2006.
- [8] 江体乾. 化工流变学 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.  
JIANG Ti-qian. Chemical Rheology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [9] 韩式方. 非牛顿流体本构方程和计算解析理论 [M]. 北京: 科学出版社, 2000.  
HAN Shi-fang. Non-Newtonian fluid constitutive equation and calculation analytic theory [M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [10] 陈文芳. 非牛顿流体力学 [M]. 北京: 科学出版社, 1984.  
CHEN Wen-fang. Non-Newtonian fluid dynamics [M]. Beijing: Science Press, 1984.
- [11] 巴勒斯 H A, 赫顿 J H, 瓦尔特斯 K. 流变学导引 [M]. 北京: 中国石化出版社, 1992.  
Barnes H A, Horton J H, Walters K. An introduction to rheology [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 1992.
- [12] Abu-Orf M M, Steven K Dentel. Effect of mixing on the rheological characteristics of conditioned sludge full-scale studies [J]. Wat. Sci. Tech., 1997, 11 (36): 51-60.

(下转第 397 页)

## Study on the pretreatment of municipal wastewater by UASB reactor at ambient temperature

WANG Yi<sup>1,2</sup>, ZHANG Yi-r-zhong<sup>1</sup>, PENG Dang-cong<sup>1</sup>

- (1. School of Envir. and Muni. Eng., Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;  
2. State Key Laboratory of Architecture Science and Technology in West China(XAUAT), Xi'an 710055, China)

**Abstract:** The aim of this research concerns the efficiency of UASB using as a pretreatment reactor for municipal wastewater treatment at ambient temperature. The 3.3 L UASB reactor was operated at about 20 °C at a HRT of 6.4 h in the reacting zone and 5.0 h in the settling zone. The result of a 6-month continuous experiment demonstrated that organic nitrogen and phosphorus were hydrolyzed into ammonia nitrogen and ortho-phosphate mostly, with very little used as nutrient ingredient by microorganisms during hydrolyzation. On the other hand, when the suspended solid concentration in influent had a large fluctuation with average value 283mg/L, a SS removal above 84 % averagely was achieved. Among the removed SS, 48 % was dissolved materials, which made the ratio of SCOD and TCOD increase from 0.30 to 0.71. All this may benefit a successful biological nutrient removal.

**Key words:** ambient temperature condition; UASB reactor; pretreatment, municipal wastewater

**Biography:** WANG Yi, Ph. D., Associate Professor, Xi'an 710055, P. R. China, Tel: 0086-29-82205292, E-mail: wangyi1003@ sina.com

(上接第 392 页)

## Study on rheological characteristics of the activated sludge in wastewater treatment technology

ZHANG Xin-yu, YUAN Yi-xing, WU Yue-bin

(School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

**Abstract:** To study the characteristics of the activated sludge, and make certain the flow model equation rheology is taken as a tool, because activated sludge belongs to non-Newtonian fluid. Some rheological measurements to different kinds of activated sludge were carried out. And the simulated equation and certain parameter of sludge with experimental data were also acquired. Results show that rheological characteristic of the activated sludge fits pseudoplastic model. For the bulking activated sludge, the entanglement network between filaments induces a resistance to the shear rate due to the overgrowth of filamentous bacteria. The results can provide a theoretical basis for computing oxygen and pollution transference in biological wastewater treatment process as well as for designing bioreactors.

**Key words:** rheological characteristic; non-Newtonian flow; activated sludge

**Biography:** ZHANG Xin-yu, Candidate for Ph. D., Harbin 150090, P. R. China, Tel: 0086-451-86284459, E-mail: newfish1976@163.com