

## 污泥流变特性分析

曹秀芹

北京建筑大学

2018年4月17日，保定

# 主要内容

1 流变特性

2 流变特性影响因素

3 流变特性在不同工艺中的变化

4 流变特性工程应用

5 总结与展望

# 流变特性

一是基于理化性质层面的描述，例如颗粒浓度、粒径分布、电导率、表面张力等

流  
变  
特  
性

二是基于工程技术层面的描述，例如黏附性、沉降性、脱水性还有泵站特性等

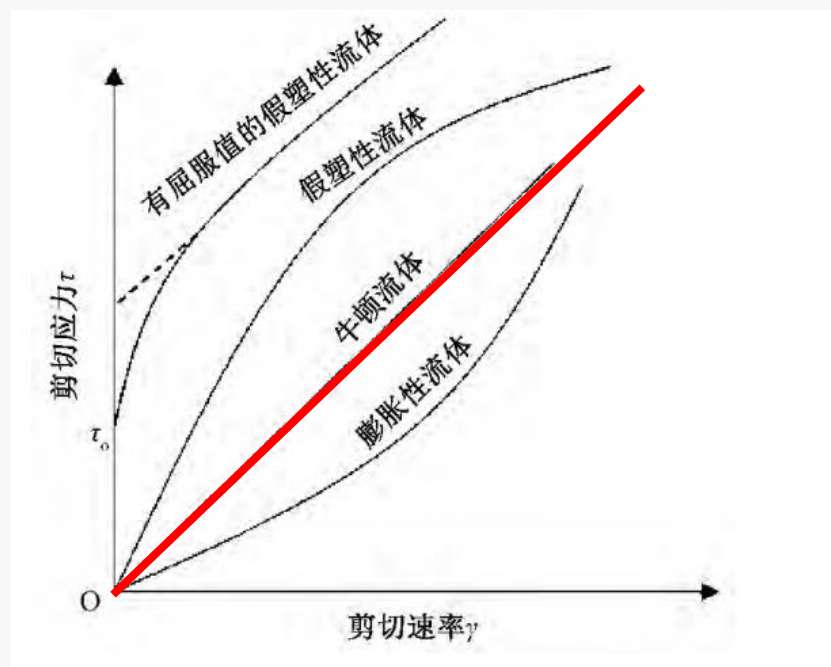
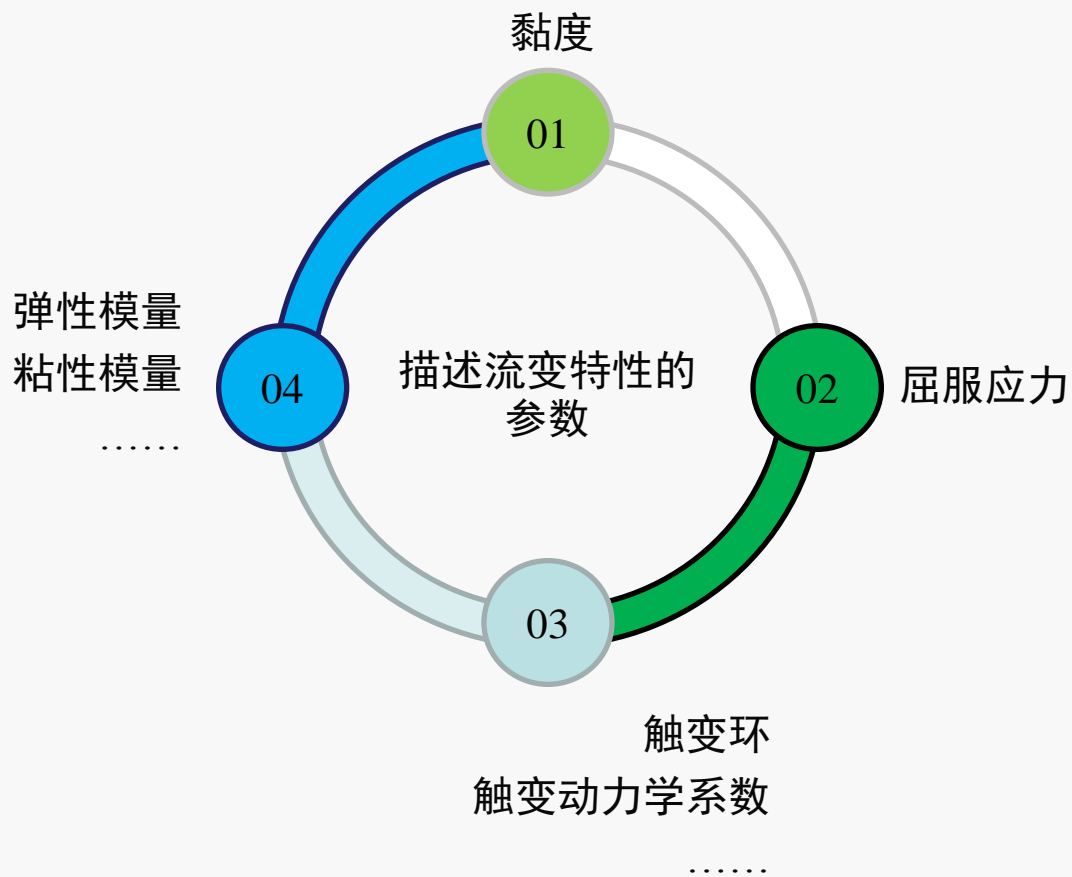
# 流变特性

## 1.1 研究意义

- 随着城镇污水处理及提标改造日趋完善，随之而来的是**含固率更高、流变行为更复杂**的污泥的处理处置问题。高含固污泥属于典型的**非牛顿流体**，相较低固污泥其流变特性发生了巨大变化。
- 流变特性对污泥处理至关重要，直接影响**污泥处理工艺的设计**（传质传热、混合性能）、**管道运输**（压力降计算、泵的选择）、**后续处理**（脱水、储存……）

# 流变特性

## 1.2 流变特性参数



典型流体的流动曲线图

# 流变特性

## 1.3 流变模型

流变模型	模型表达式
Power-law	$\tau = k \cdot \gamma^n$
Bingham	$\tau = \tau_0 + \mu_p \cdot \gamma$
Casson	$\tau^{0.5} = \tau_0^{0.5} + \mu_\infty^{0.5} \cdot \gamma^{0.5}$
H-B	$\tau = \tau_0 + k \cdot \gamma^n$
Sisko	$\mu = \mu_\infty + k \cdot \gamma^{n-1}$
Cross	$\frac{\mu - \mu_\infty}{\mu_0 - \mu_\infty} = \frac{1}{1 + (\lambda \cdot \gamma)^m}$
Carreau	$\frac{\mu - \mu_\infty}{\mu_0 - \mu_\infty} = [1 + (\lambda \cdot \gamma)^2]^{\frac{n-1}{2}}$

式中：

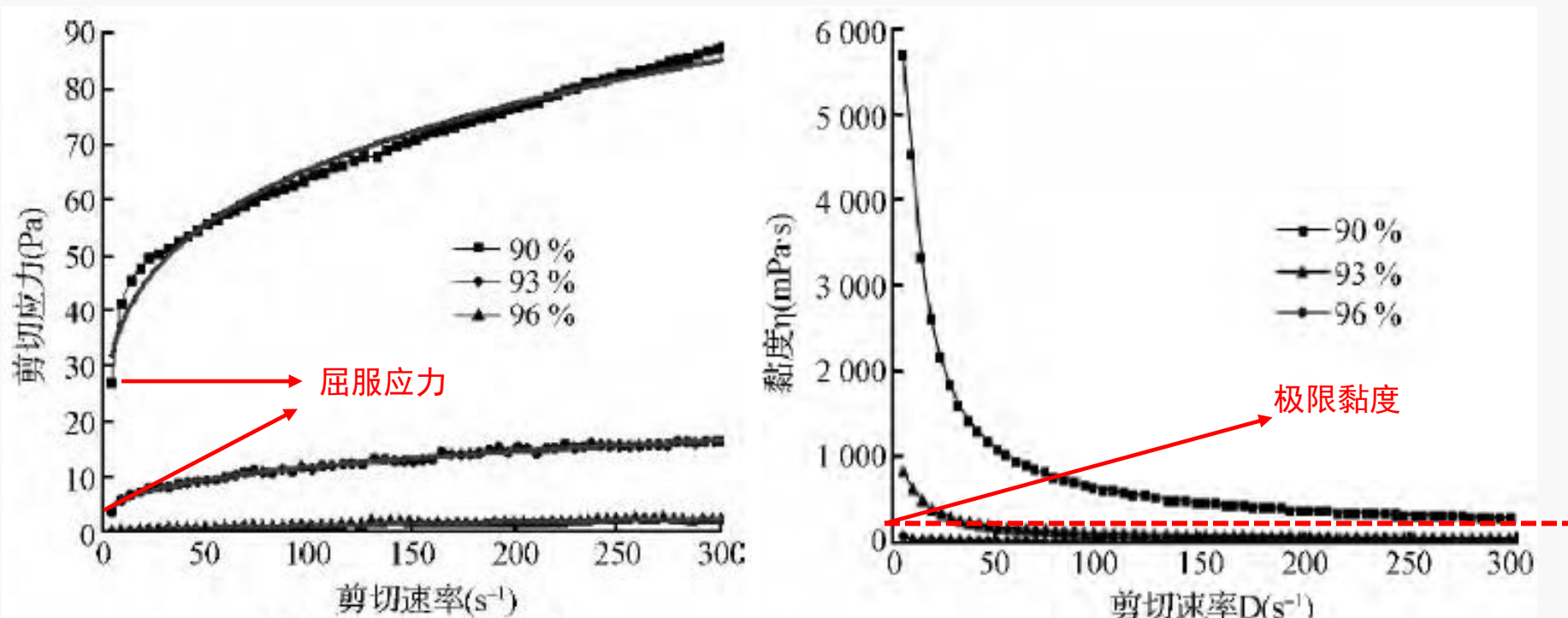
$\tau$ —剪切应力，Pa； $\gamma$ —剪切速率， $s^{-1}$

$\tau_0$ —屈服应力，Pa； $\mu_0$ —零剪切黏度， $Pa \cdot s^n$ ； $\mu_\infty$ —极限黏度， $Pa \cdot s^n$

$k$ —稠度系数， $Pa \cdot s^n$ ； $n$ —流动指数

# 流变特性

含水率分别为90%、93% 和96%的污泥在35℃下流变特性。



35℃污泥流动曲线和黏度曲线

# 流变特性

**低剪切范围污泥黏度急剧下降。**随着含水率的降低，这种趋势更加明显，下降幅度也越来越大，说明**污泥含水率越低，其假塑性特征越强。**

当剪切速率大于某一特定临界点时，黏度值变得很小且下降速度也越来越缓慢，最后基本不再变化，**黏度不再依赖于剪切速率。**



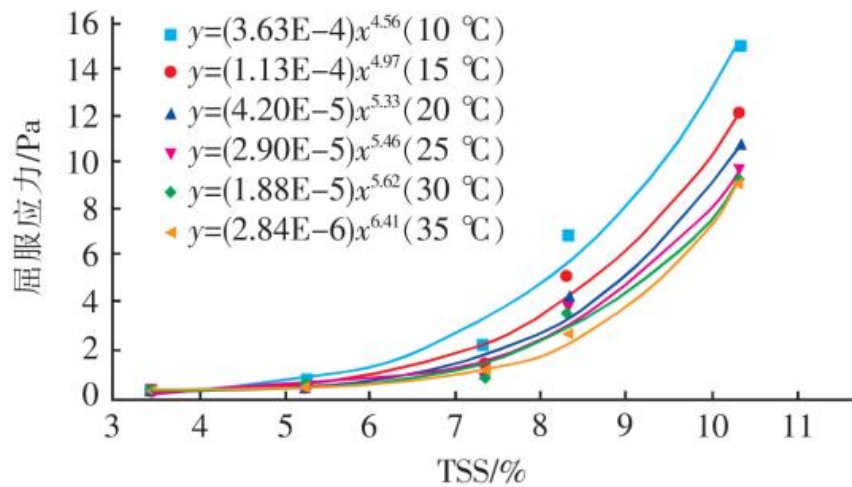
# 流变特性影响因素

1. 污泥浓度
  2. 温度
  3. pH
  4. 表面电荷
  5. EPS
  6. 不同处理方式（热、碱、超声波预处理，厌氧消化等）
- .....

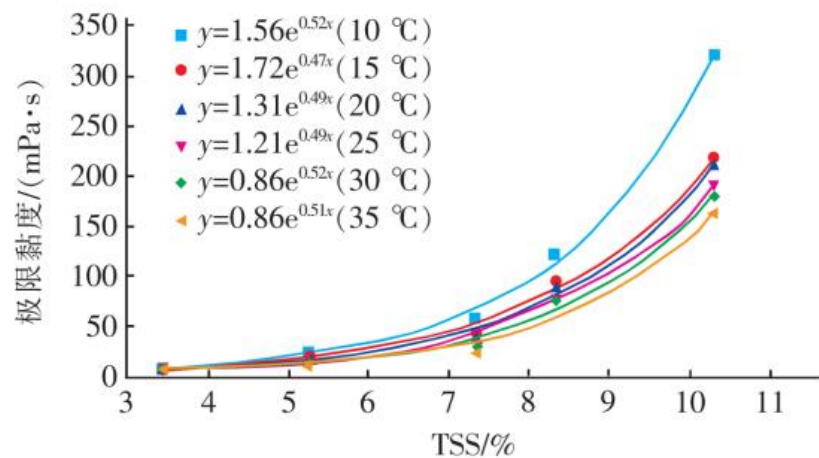
# 流变特性影响因素

## 2.1 污泥浓度对流变特性的影响

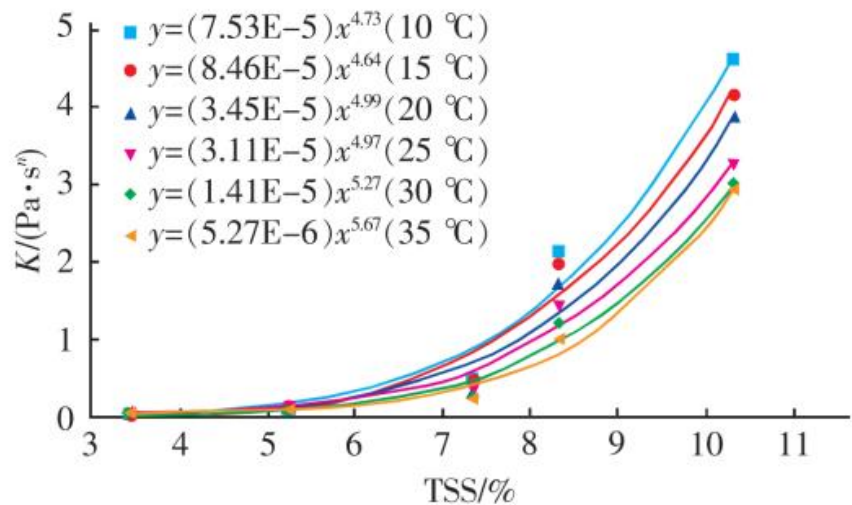
**污泥浓度是影响流变特性的最主要因素。**以厌氧消化为例，反应器内往往会出现上浮、结壳、沉淀而出现分层现象，因此考察浓度对流变特性的影响，显得格外重要。研究表明，污泥的极限黏度、屈服应力、稠度系数 $K$ 、流动指数 $n$  均与浓度呈**指数关系**。



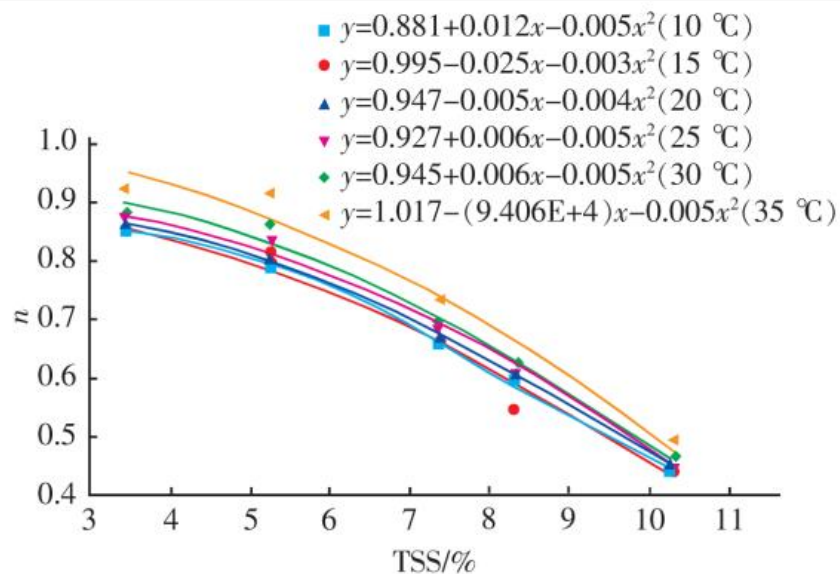
a. 屈服应力的变化



b. 极限黏度的变化



c. K 值的变化



d. n 值的变化

# 流变特性影响因素

## 2.2 温度对流变特性的影响

温度是影响污泥流变特性的主要因素之一，黏度与温度的关系一般

可用**阿伦尼乌斯形式公式**描述：

$$\eta_{\infty} = A \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right)$$

式中： $\eta_{\infty}$  — 极限黏度, Pa·s;

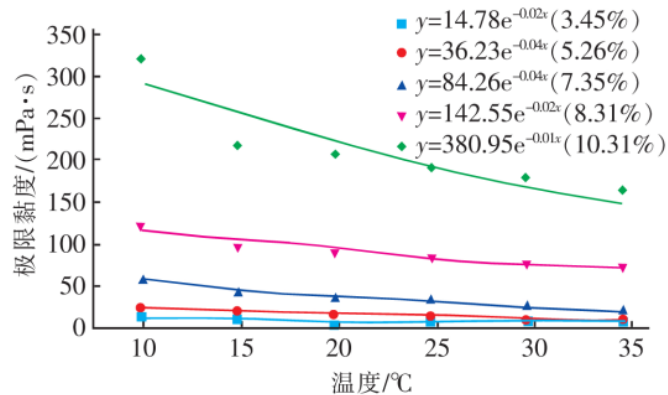
A — 频率因子, Pa·s;

T — 绝对温度, K;

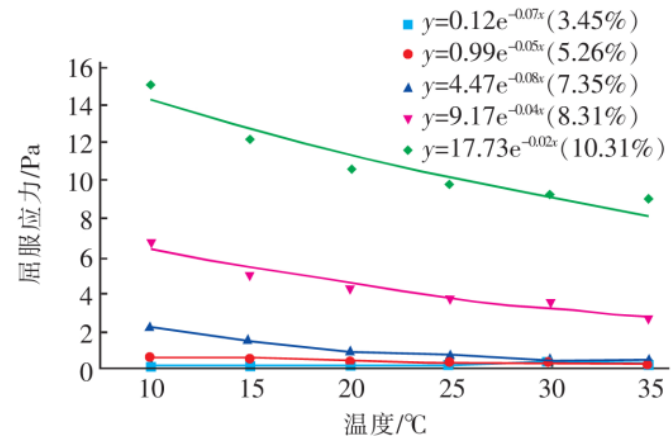
R — 通用气体常数, 8.314J/(mol·K);

$E_a$  — 活化能, J/mol

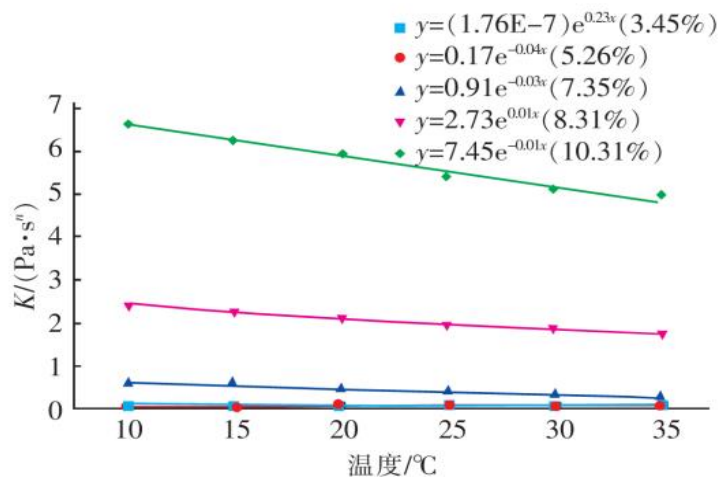
# 流变特性影响因素



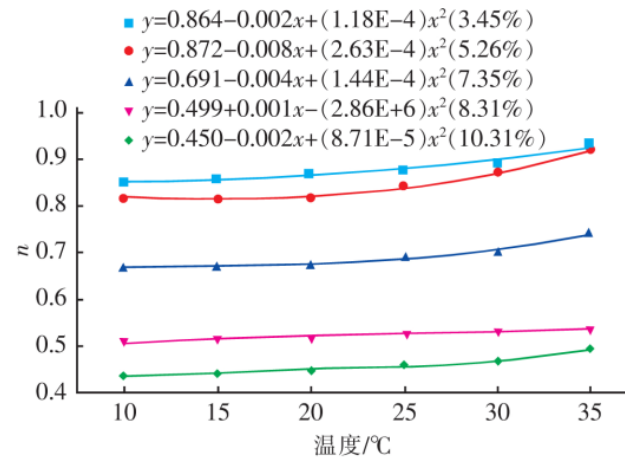
b. 极限黏度的变化



a. 屈服应力的变化



c. K 值的变化



d. n 值的变化



# 流变特性在不同工艺中的变化

热水解-厌氧消化联合工艺，适用于高含固率污泥的集中处理。对低温热水解（55℃，3d）—中温厌氧消化联合工艺中调配污泥（FMS）、热水解污泥（THS）和消化污泥（ADS）的流变特性进行分析。

污泥基本参数

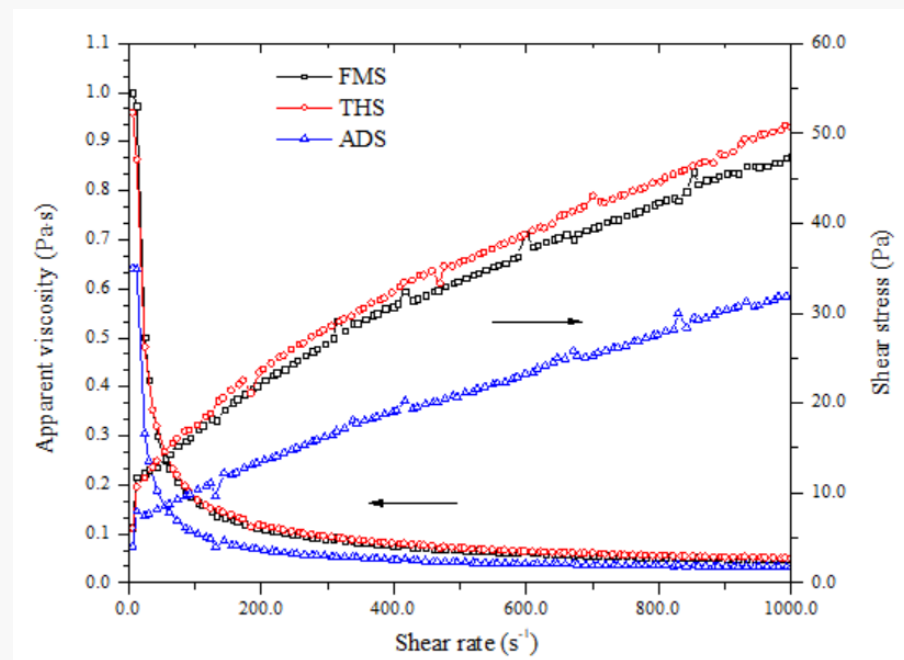
Sludge type	TSS (%)	pH	SCOD (mg·L <sup>-1</sup> )	TAN (mg·L <sup>-1</sup> )
FMS	7.46±0.06	8.20±0.10	1257.27±21.85	151.19±9.35
THS	7.35±0.05	8.52±0.10	3495.21±30.50	224.29±9.50
ADS	7.12±0.06	8.95±0.10	1027.32±18.70	159.67±8.75

# 流变特性在不同工艺中的变化

## 3.1 流变特性变化

### (1) 表观黏度与流变图

- 低速率范围内，黏度主要取决于污泥固体颗粒间的相互作用力，高速率范围内则取决于液相黏度。



# 流变特性在不同工艺中的变化

## (2) 屈服应力

3种污泥的屈服应力

调配污泥	热水解污泥	消化污泥
6.32 Pa	5.78 Pa	3.88 Pa

污泥经过热水解后，黏度和屈服应力减小，大约能降低16.5%的运输成本。屈服应力对污泥的储存和运输意义重大，屈服应力的降低不仅能节约污泥泵送和运输成本，消除厌氧反应器内污泥结壳的现象，改善传质传热效果，增加沼气产量。同时提高消化出泥的脱水性能，有利于污泥的后续处置利用。



# 流变特性在不同工艺中的变化

## (3) 触变性

传统的触变环方法不适用于比较不同黏度污泥的触变性。当剪切速率保持恒定，为了更直观地体现黏度随时间的变化，恒定剪切速率下的黏度可以标准化为以下格式：

$$\frac{\eta - \eta_e}{\eta_i - \eta_e} = \exp(-K \cdot t)$$

式中：

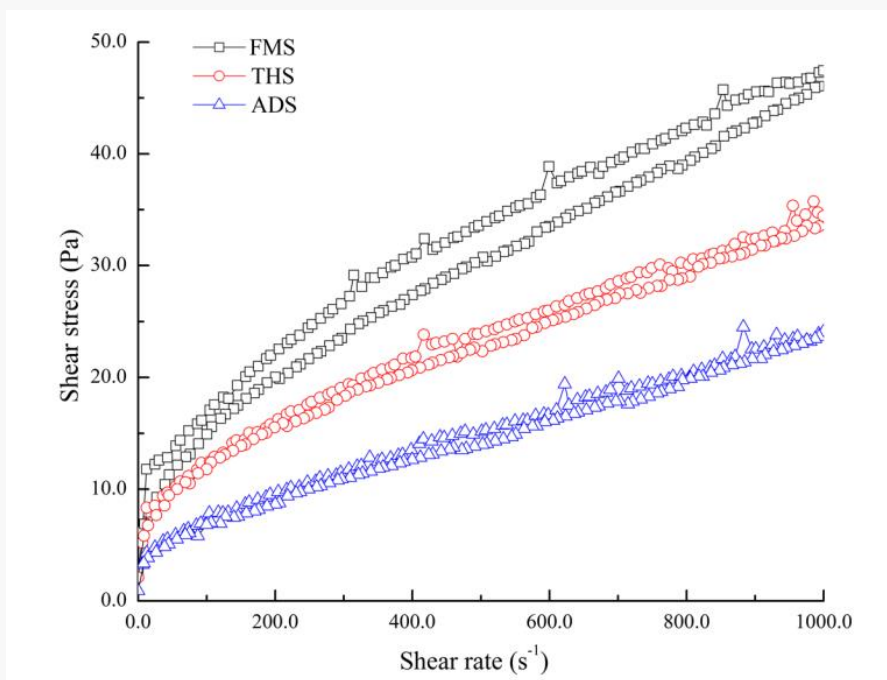
$\eta$ —某一时刻污泥黏度, Pa·s

$\eta_e$ —稳态黏度, Pa·s

$\eta_i$ —初始时刻黏度, Pa·s

$K$ —触变动力学系数,  $s^{-1}$

$t$ —时间, s



可用K表征污泥触变性!

# 流变特性在不同工艺中的变化

3种污泥的K值

调配污泥	热水解污泥	消化污泥
$0.032 \text{ s}^{-1}$	$0.015 \text{ s}^{-1}$	$0.007 \text{ s}^{-1}$

热水解后，污泥的触变性反而增大。触变性增大意味着很长一段时间内污泥结构的重建，不利于混合和生物反应，反应器内易形成死区。而且，如果管道壁面应力不足以维持污泥的均匀流动，触变性会阻碍污泥运输。因此，实际工程中在设计热水解工艺时应充分考虑污泥触变性的影响。

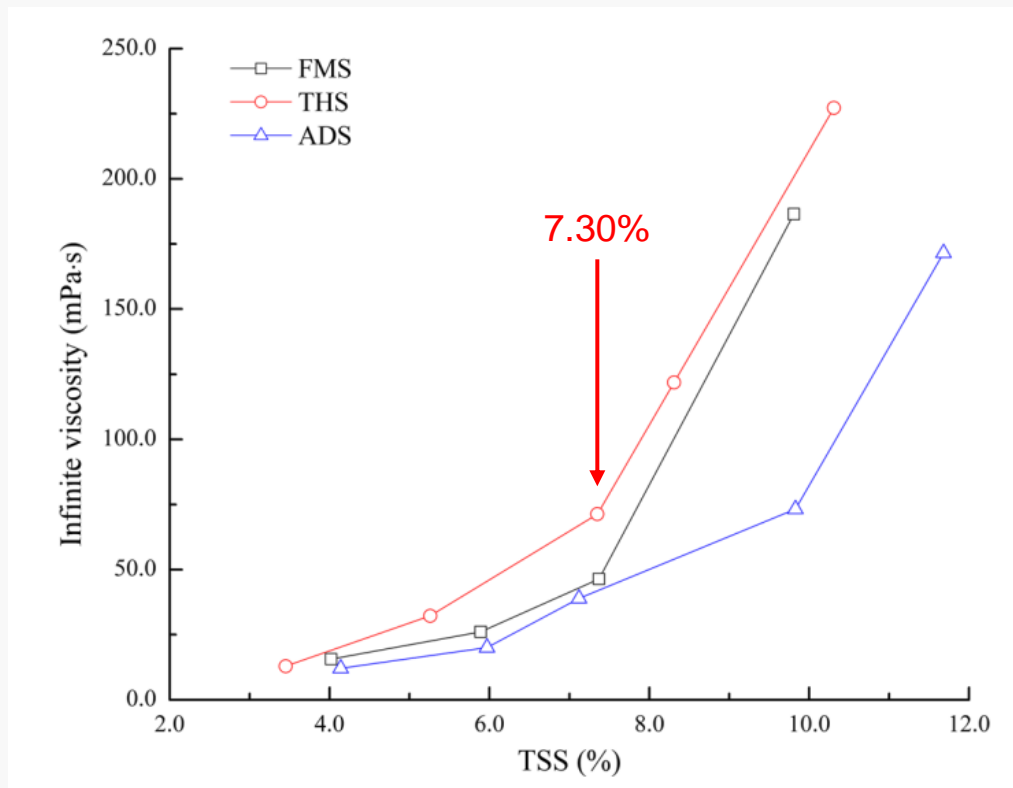
# 流变特性在不同工艺中的变化

## 3.2 TSS 对污泥流变特性的影响

### (1) 极限黏度

一旦THS的TSS超过**7.30%**，极限黏度显著增加，不利于污泥的管道运输。

为了保证消化过程中的传质传热效果，需要更多能耗。

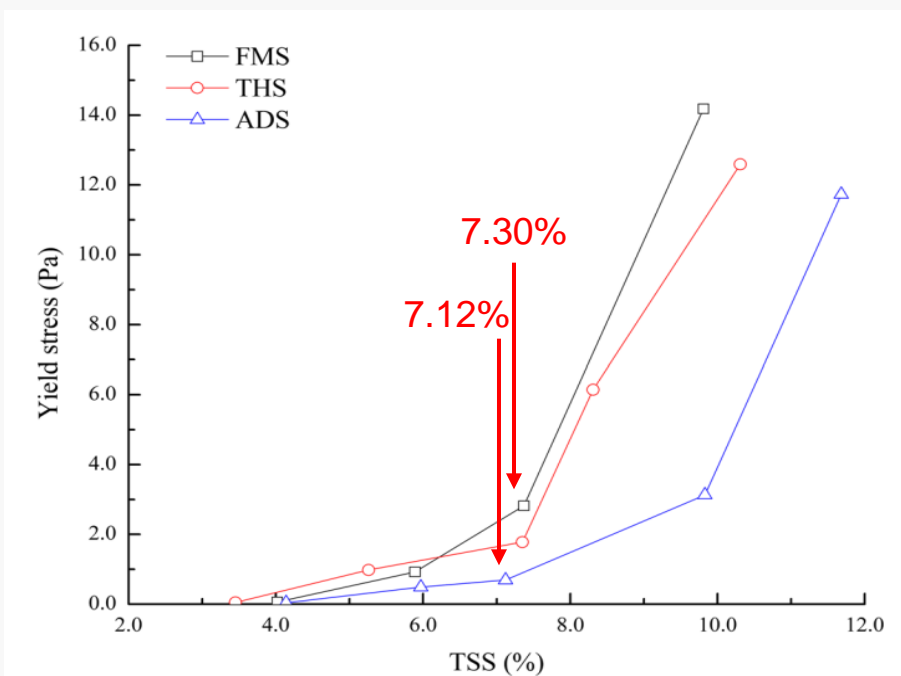


不同污泥极限黏度随TSS的变化

# 流变特性在不同工艺中的变化

## (2) 屈服应力

- 同样，THS的TSS超过7.30%，屈服应力显著增加。所以，**7.30%**可以作为工程中初步判断是否适合热水解预处理的临界条件，但仍需进行经济可行性分析。
- TSS超过7.12%，ADS的屈服应力急剧上升，这种趋势对ADS的极限黏度同样适用。高黏度和屈服应力对后续脱水不利，因此，根据本研究结果厌氧消化后污泥的浓度不宜超过**7.12%**。

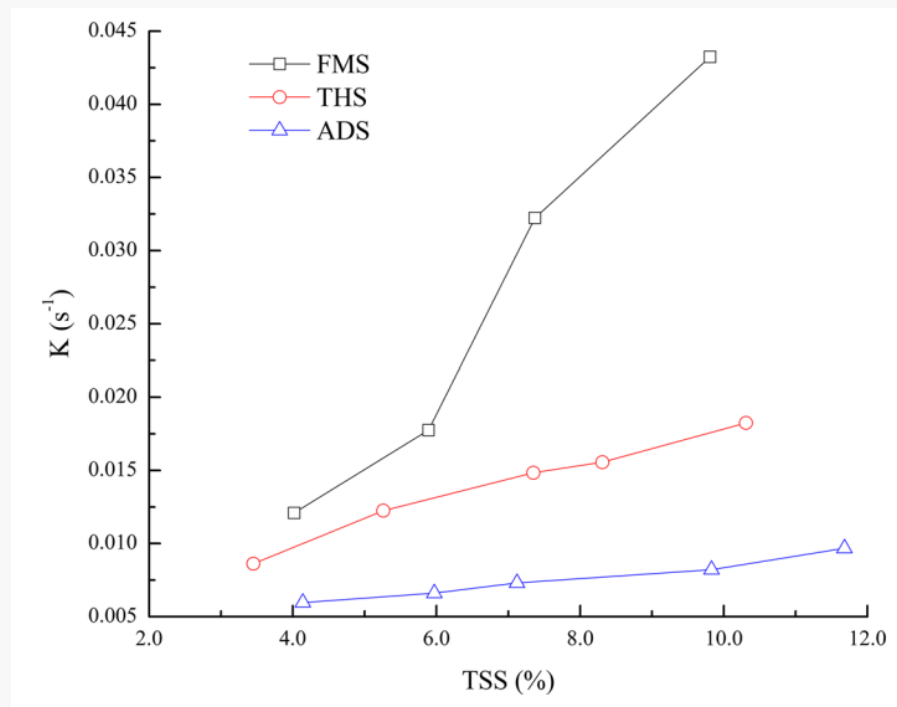


不同污泥屈服应力随TSS变化

# 流变特性在不同工艺中的变化

## (3) 触变性

- K均随TSS的增加而增大
- 相比于FMS，THS的触变性受TSS的影响较小，进一步表明**热水解利于实现高含固污泥的厌氧消化。**



不同污泥触变动力学系数K随TSS变化

# 流变特性工程应用

## 4.1 污泥流变与管道运输

- 在设计污泥管道运输系统时，污泥作为非牛顿流体，目前国内外缺乏统一的摩阻计算方法，难以准确估计水头损失，通过经验公式估算往往造成能源的浪费。
- 在管道运输及泵送过程中，污泥的水力流动状态与高剪切速率状态下的流动相似。因此，**极限黏度可为泵的选型及管道输送摩阻的估算提供可靠依据。**

# 污泥流变与管道运输

## 流变特性用于判断污泥流态

准确判断污泥的流态（层流还是紊流）是计算水头损失的前提。由于污泥流动的复杂性，其对应的雷诺数定义也不尽相同。研究表明，**对污泥这种非牛顿流体而言，雷诺数公式与流变参数紧密相关。**适用于H-B模型的雷诺数公式为：

$$R_e = \frac{8\rho V^2}{\tau_0 + K\left(\frac{8V}{D}\right)^n}$$

式中：

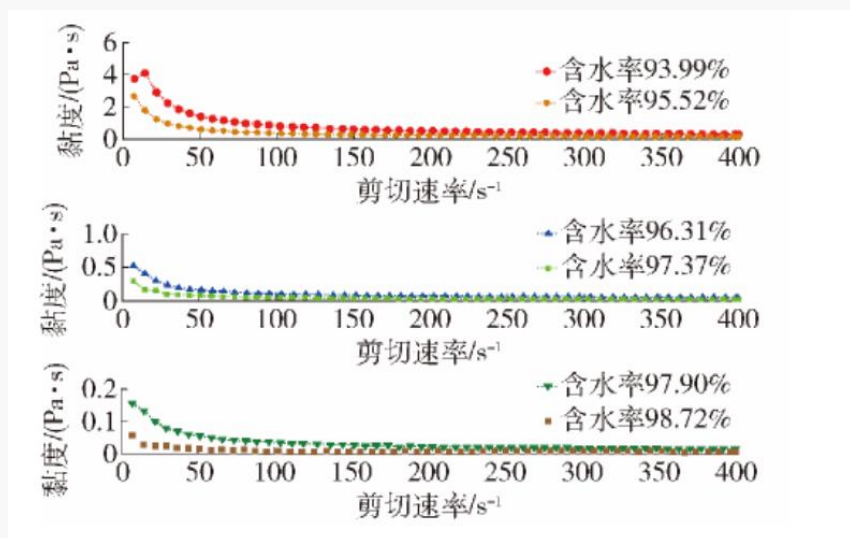
$\rho$ —污泥密度， $\text{kg/m}^3$ ； $V$ —污泥流速， $\text{m/s}$ ； $D$ —管径， $\text{m}$ ； $K$ —稠度系数， $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$ ； $n$ —流动指数

**通过污泥流变特性研究，为判断管道系统中污泥流态进而确定管道阻力损失提供条件。**

# 污泥流变与管道运输

## 污泥黏度与管道运输

低表观黏度的污泥在输送过程中不易在管道中沉淀、堵塞管道，而且，表观黏度还与输送转运过程中的稳定性有关。所以，无论从经济方面还是运行稳定性方面考虑，表观黏度较低的污泥适合于长距离运输。研究表明，**当污泥的表观黏度低于 $0.5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 时，适合远距离运输。** 93.99~98.72% 含水率污泥表观黏度随剪切速率的变化如下：

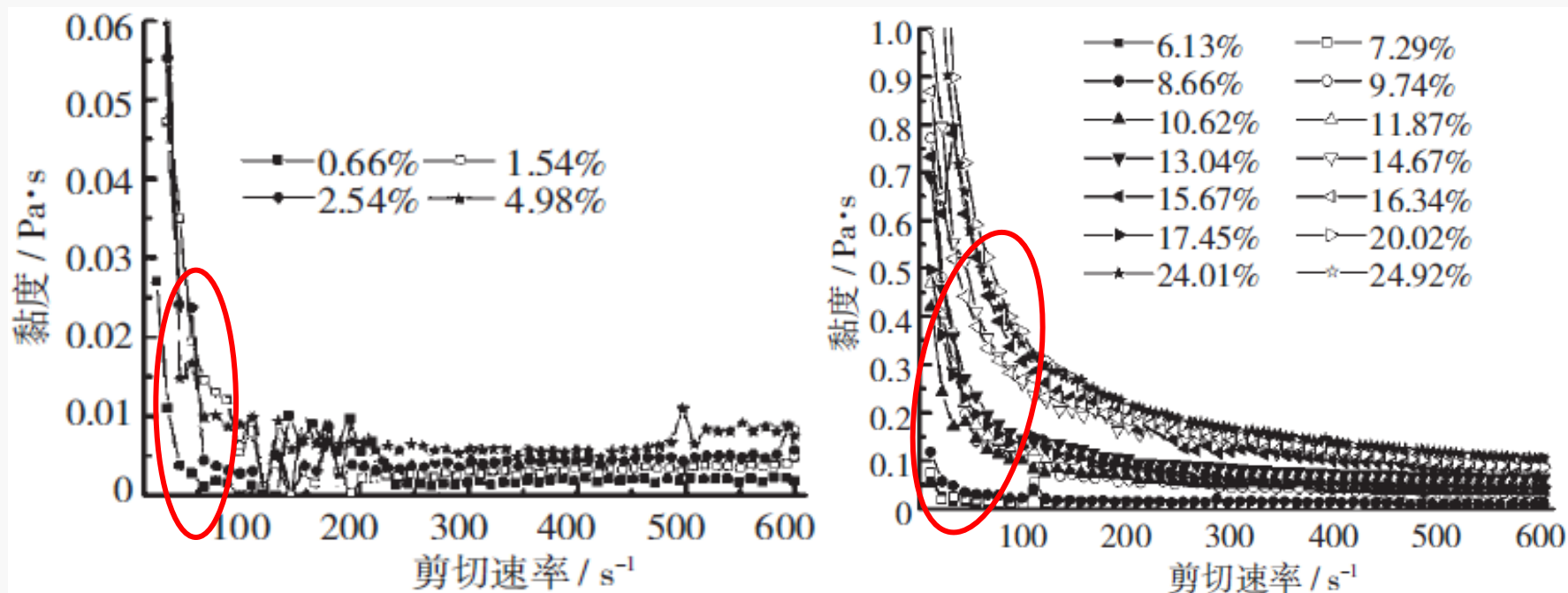


结果表明，含水率为 96.31%~98.72% 的污泥表观黏度在 $0.5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 以下，适合于远距离运输；而含水率 93.99% ~95.52% 的污泥表观黏度偏大，不适合于远距离运输。



# 流变特性工程应用

## 4.2 定义反应器死区



黏度随剪切速率的变化

曲线存在的一系列拐点，低于此剪切速率时， $d\eta/\dot{\gamma}$ 的值较大， $\eta$  值很大且随剪切速率迅速降低；而高于此剪切速率时， $d\eta/\dot{\gamma}$ 几乎为零，黏度很小且几乎不变。

# 流变特性工程应用

可根据污泥表观黏度对剪切速率图**定义搅拌死区**，其分界点应该是图中出现效应拐点的位置。在小于该剪切速率的条件下，可认为底物处于较高的表观粘度状态，未参与沼气池中的循环流场。

## 4.3 流变特性与氧传质的关系

就表观黏度对曝气池液相内氧传质的影响而言，已有研究表明：

$$k_L\alpha \propto \eta_\alpha^{-Z}$$

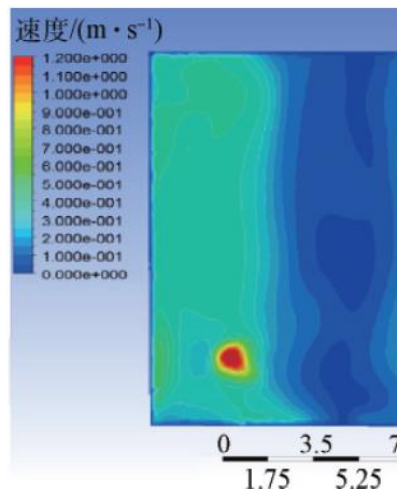
其中 $k_L\alpha$ 为总传质系数， $\eta_\alpha$ 为表观黏度(Pa·s)， $0.25 < Z < 0.84$

上述关系对优化好氧生物滤池的工艺控制意义重大。可根据污泥流变学，**将表观黏度作为工艺控制参数，用最优的悬浮污泥浓度来处理最大浓度的污水。**

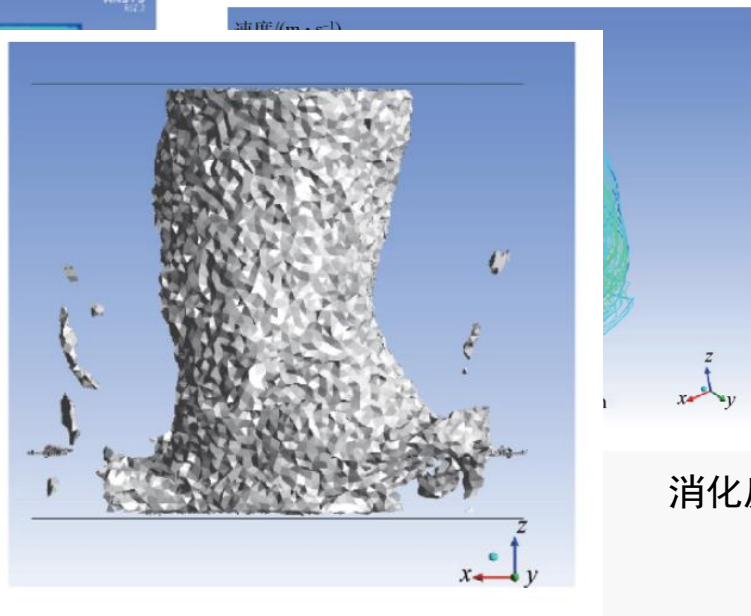
# 流变特性工程应用

## 4.4 用于非牛顿流体污泥反应器优化设计

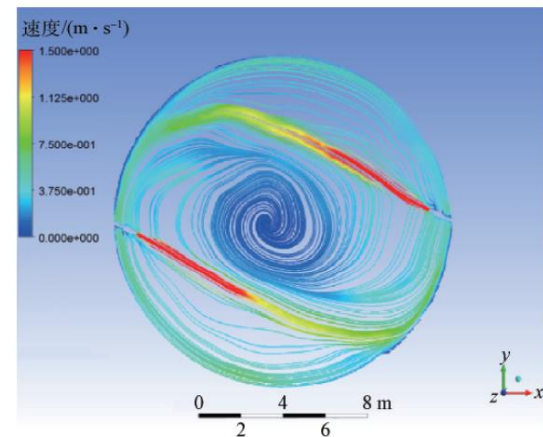
通过研究污泥这种非牛顿流体的流变特性，**确定污泥的流动属性，定义各流变参数**，为反应器的CFD数值模拟提供依据，指导实际工程中污泥反应器的优化设计。



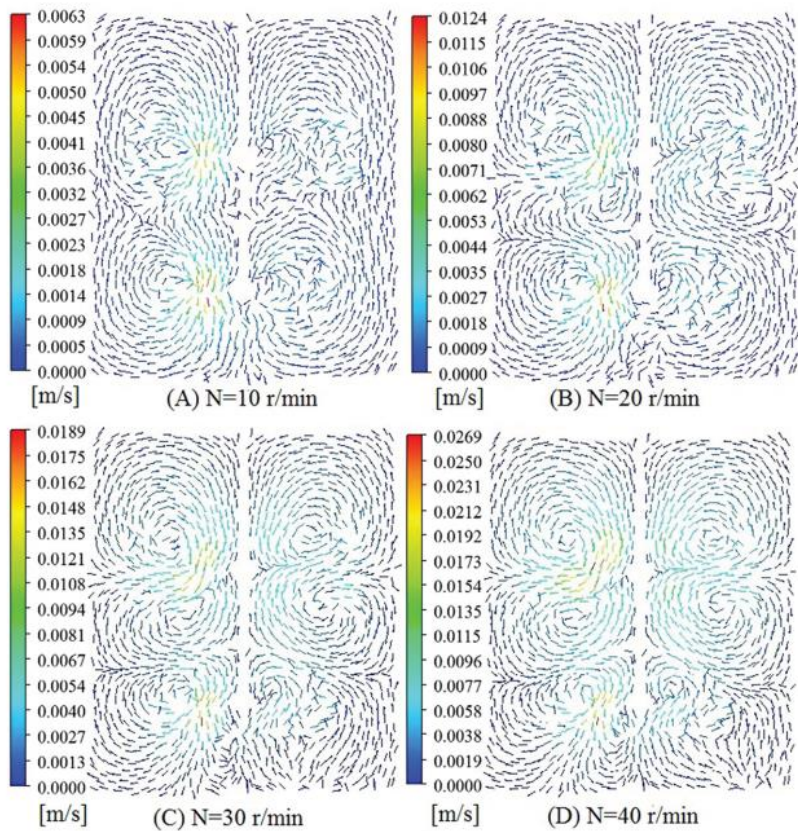
厌氧消化反应器内速度分布图



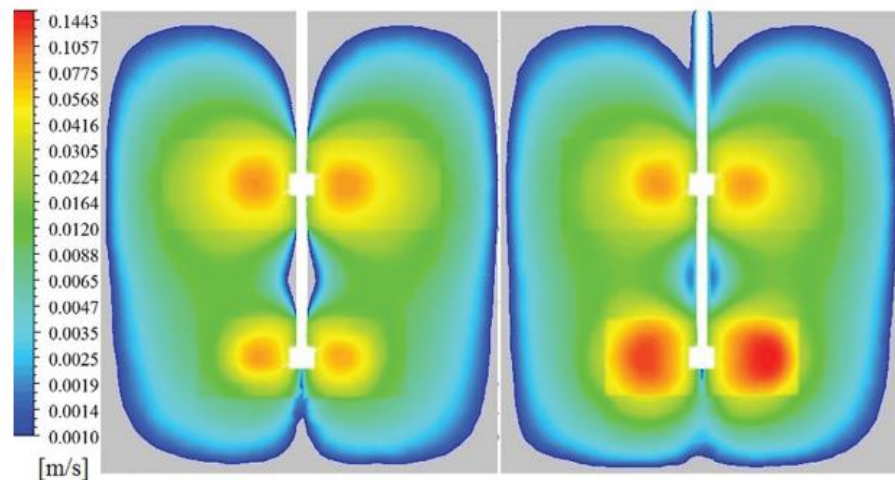
反应器内死区分布图



消化反应器内流线图



不同转速下消化反应器内流线图



不同搅拌方式下反应器内速度云图

# 总结与展望

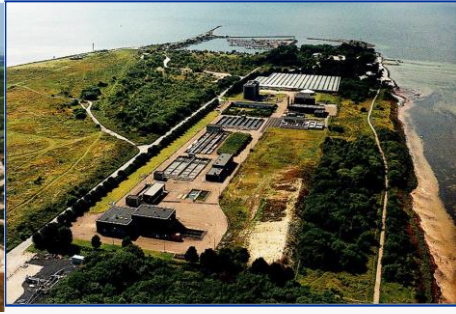
低剪切速率对污泥黏度有较大影响，**含固率越高**，这种影响越显著，表现出**越强的假塑性特征**。

污泥**浓度和温度**是影响流变特性的最主要因素，在设计相关污泥处理工艺时应予以重视。

污泥经过热水解后触变性反而增大，**在设计热水解工艺时应充分考虑污泥触变性的影响**。**7.30%**TSS可以作为工程中初步判断是否适合热水解预处理的临界条件，厌氧消化后污泥的浓度不宜超过**7.12%**。

将污泥的**流变特性**应用于实际工程，如生物反应器的**动力优化**、好氧生物滤池的**工艺控制**、**管道运输**等，将对节能降耗、反应器优化设计起到关键作用。

谢谢！



2018-04-17



北京建筑大学  
BEIJING UNIVERSITY OF CIVIL  
ENGINEERING AND ARCHITECTURE