



全国中文核心期刊
中国科技核心期刊

环境工程学报

Chinese Journal of Environmental Engineering



第9卷 第3期

Vol.9 No.3

中国科学院
生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版

3
2015

目次

综 合 评 述

污泥流变学及其厌氧消化混合特性数值模拟研究进展 曹秀芹 杨 平 赵振东 (997)

水 污 染 防 治

臭氧对饮用水管网中溶解性有机物的影响	张锁娜	王海波	李肖肖	朱 莹	胡 春 (1004)
城市污水管网中水质变化特性	金鹏康	郝晓宇	王宝宝	郭海泉	张 荔 (1009)
强化混凝-吸附预处理生活污水	王 忱	金正宇	宫 徽	崔康平	王凯军 (1015)
改性木屑对水中 Cr(VI) 的吸附性能	柳 琴	郝林林	郑 彤	王 鹏 (1021)	
巢湖低温高效聚磷菌的筛选及其特性	邵 啸	毕 潇	吴 涓	王 宁	李玉成 (1027)
强化垂直流可渗透反应墙处理渗滤液污染物	狄军贞	戴男男	江 富	朱志涛 (1033)	
颗粒计数法在高锰酸钾强化常规工艺运行优化中的应用	潘章斌	石容千	周毅震	宋武昌	孙韶华 (1038)
采用水解酸化-复合好氧处理制药工业废水的工艺评价	冯津津	李晓红	曾 萍	宋永会	郭新超 (1043)
两性高分子重金属螯合絮凝剂的合成及其对 Cu(II) 的去除性能	刘立华	刘 星	李艳红	杨刚刚	周智华 (1049)
.....	.....	.....	.....	.....	徐国荣 (1049)
亚甲基蓝在有机酸膨润土上的吸附行为	周 娟	张寒冰	童张法	覃岳隆	陈光浩 (1057)
序批式曝气生物滤池处理含海水污水中的硝化性能	徐 洁	熊小京	郑天凌	黄凌风 (1062)	
改善气液传质效率实现丝状菌膨胀污泥控制的方法	李志华	张云姣	贺春博	朱珂辰 (1067)	
阳宗海沉积物中磷的稳定性	杜诗云	杨常亮	李世玉	刘 楷	鲁 磊 (1072)
预酸化下营养剂添加量对生物沥浸处理洗毛废水的影响	侯庆杰	王振宇	梁剑茹	崔春红	周立祥 (1079)
PVDF/PVA 改性超滤膜抗污染特性的微观作用力评价分析	李江腾	王 磊	苗 瑞	王旭东	吕永涛 (1086)
吹脱法去除深度脱水污泥水中的氨氮	周 振	胡大龙	顾雨婷	乔卫敏	杜兴治 (1093)
.....	.....	.....	.....	.....	李 震 (1093)
氮磷对引黄水库水中小球藻生长的影响	逯南南	刘明辉	宋武昌	李桂芳	孙韶华 (1098)
不同浓度养殖废水对青萍生长能力的影响	顾新娇	杨 闯	王文国	汤晓玉	胡启春 (1103)
不同水动力条件下鲢、三角帆蚌的组合对富营养化水体的净化作用	张毅敏	周 创	高月香	汪龙眠	杨 飞 (1109)
.....	.....	.....	.....	.....	刘海青 (1109)
改进碳纳米管/聚氨酯复合材料吸附硝基苯	谢 刚	毛 宁	周林成	潘 多	李彦锋 (1117)
SBR-混凝处理渗滤液过程中有机物的变化特征	武文会	刘智萍	方 芳	施 萍	程 锦 (1124)
碳源种类对原位生物解耦联污泥减量系统效能影响	陈 湮	周 健	宋艳艳 (1131)		
微孔曝气氧化沟工艺问题诊断及分析	杨亚红	彭党聪	王宝玉	史丽娟 (1136)	
粉末活性污泥处理含铀废水的特性	陈华柏	谢水波	刘金香	肖拾红	李仕友 (1141)
溶解氧对 SBR 脱氮性能与脱氮方式的影响	赵丽君	方 芳	郭劲松	徐宇峰	顾书军 (1148)
BLR 厌氧反应器处理垃圾焚烧厂渗滤液工程运行效能	殷鹏飞	赵明星	阮文权 (1155)		
臭氧氧化降解苯胺黑药模拟废水	李韵捷	梁嘉林	孙水裕 (1161)		
共价键型絮凝剂去除水中水杨酸的性能和机理	裴 旋	朱树华	赵华章 (1166)		
基于均匀实验设计的曝气池柔性设计方法	陈启石	李文卓	杨本勇	刘海芳	王 艳 (1171)
改性糠醛渣吸附脱硫酸废水中钙离子	罗根华	王逸群	于 静	刘 闯	荣 楠 (1177)
常压制备秸秆活性炭对水溶液中磷元素的吸附	黄大成	王惠松	邹亚娟	许 实	赖奕坚 (1183)
共基质下微生物燃料电池同步脱色甲基橙与产电性能	郭 伟	李怡帆	宋 虹	闫 旭	孙剑辉 (1189)
日本污水脱氮除磷深度处理工艺分析	王文明	危建新	刘耘东	左 锋	杨 楠 (1194)
望虞河表层沉积物中氮的分布与形态变化特征	任凌霄	王沛芳	王 超	李丽娜 (1201)	
微波加热再生废弃的净化石油化工废水活性炭	张声洲	夏洪应	张利波	彭金辉	吴 坚 (1209)
聚(苯乙烯-甲基丙烯酸)复合磁性微球的吸附性能	曹洪玉	王 凯	张 曼	黄永刚 (1214)	
稻壳生物质炭对水中氨氮的吸附	李飞跃	谢 越	石 磊	李孝良	李粉茹 (1221)
贵州省已建城镇污水处理厂建设及运行状况	唐忠德	姚晓圆	陆天友	成官文	吴琼芳 (1227)
超声波/Fenton 处理含酚废水的影响因素	李亚峰	高 颖 (1233)			
微波紫外耦合辐射降解间硝基苯磺酸钠及活性炭再生	郑 双	郑 彤	王 鹏 (1238)		
中型污水处理厂中药物和个人护理品的分布与去除	丁紫荣	贺德春	王大娟	吴根义	张素坤 (1247)
活性污泥系统聚糖菌的富集与菌群多样性分析	李建民	麻 倩	傅海霞	董志英	王凯丽 (1253)
基于 K_{La} 、OUR 厨余发酵液对 SBR 硝化作用的影响	程 喆	王晓昌	张永梅	李玉友 (1259)	

磁场强化臭氧液相传质	张波	孙鑫	吴春笃	徐岗(1264)
外置管式 MBR 处理垃圾焚烧渗沥液中的膜污染	薛怡亭	党岩	郭慧雯	孙德智(1269)
活性炭纤维生物膜帘修复污染源水			廖娟	金腊华(1276)
旋流除砂系统排砂管路改造与优化运行		朱甲华	张辉	叶勇(1281)
APSFZn 在富营养化湖泊型水体中的应用	王利平	章滢	许霞	倪可(1285)
分子筛吸附法脱除废水中的聚丙烯酰胺	王豪	杨清	吴雁	唐怡(1289)
电-Fenton 法降解 TNT 弹药销毁废水		李定昌	柴涛	宋宇超(1297)
硫酸亚铁用于污水厂二沉池出水化学除磷	马玉萍	陈立爱	叶勇	侯红勋(1303)
电化学氧化法处理垃圾渗滤液纳滤浓缩液	王庆国	乐晨	卓瑞锋	邓鹏
ZnO-TiO ₂ 光催化还原亚硝酸盐	张永勇	贾瑛	许国根	贺亚南
				侯若梦(1313)

大气污染防治

高温滤袋的有效清灰强度	王沁淘	张明星	赖小林	陈海焱	钱云楼(1318)
柠檬酸强化钢渣湿法烧结烟气脱硫及机理	刘盛余	邱伟	汪雪婷	能子礼	超廖建权(1323)
Ce-Sn-W-O _x 催化剂的配伍优化及脱硝影响因素	纵宇浩	沈岳松	王玉云	韩冰	祝社民
新型低气阻高效除尘器的研究与应用		黄亿革	李伟曼	刘海弟	陈运法(1337)
不同植物和吸附剂对室内甲醛的去除效果	王兵	王丹	任宏洋	李永涛	刘光全
飞灰-氢氧化钙/聚苯硫醚(PPS)滤料对烟气中单质汞的脱除		陈强	刁永发	刁永发	范红兵(1349)
气体循环条件下等离子体催化氧化吸附苯	党小庆	周宇翔	黄家玉	朱海瀛	秦彩虹(1355)
利用卫星遥感评估广西壮族自治区 SO ₂ 减排成效			宋华湘	杨敏华	(1361)
烧结机细颗粒物 PM _{2.5} 排放特性	赵亚丽	赵浩宁	范真真	梁兴印	杨金兵
烹饪油烟羰基化合物排放特征	史纯珍	姜锡	姚志良	李靖	郝雪薇
					阴勇
					曹鑫悦(1376)

固体废物处置

厨余垃圾好氧堆肥与污泥厌氧消化一体化处理	李 果	何 强	吴正松	彭 晨(1381)
微生物燃料电池与好氧堆肥协同处理餐厨垃圾	张 军	潘晓玥	左 薇	苏欣颖(1389)
基于 Ansys APDL 的废旧印刷电路板基板破碎分析	张 尚	朱目成	陈俊冬	陈海焱
废柴油再生工艺废弃物的固化实验	刘宇程	徐俊忠	袁建梅	陈明燕(1403)
广州城市污泥中重金属的含量、排放通量及农用风险评价				
..... 李海燕 胡晓东 吴启航 伍志跃 黄雪夏 张发根 Leung Y. S. Fu Jie			黄铸颖	熊奉康
添加秸秆对废橡胶/塑料共热解制油特性的影响	李厚洋	李 刚	张秀丽	杨 林
添加炭基材料对蔬菜废物好氧堆肥进程和腐熟度的影响	吕 潇	常瑞雪	毛瑞鑫	姜平雄
餐厨垃圾单相厌氧酸化系统恢复参数		何清明	李 蕾	彭绪亚
热解温度对污泥生物炭的表面特性及重金属安全性的影响		卢欢亮	叶向东	汪永红
广西城镇污泥掺烧利用组分特性的分析	杨宏斌	洗 萍	杨龙辉	李 平
不干胶废弃物热解焦燃烧特性	付兴民	徐国欢	杨 迪	贾晋炜
机械淋滤-厌氧生物组合工艺处理有机生活垃圾中试研究				
..... 彭明国 朱卫兵 杜尔登 史东晓 张进锋				
	李月中(1451)			

土壤污染防治

石油污染土壤胶体特征及其稳定性	许端平	郭春华	崔芳菲	李晓波(1456)
重金属-多氯联苯复合污染土壤同步洗脱	孙贝丽	党志	郭楚玲	易筱筠
非饱和土壤渗透系数空间不确定性对溶质运移的影响	李世峰	白顺果	王月影	王彩侠
电解液对直流电场处理石油污染土壤的影响		杨欣欣	林增森	廖波
射频加热强化土壤气相抽提技术的应用	杨伟	宋震宇	李野	袁珊珊
大田条件下施加组配改良剂对蔬菜吸收重金属的影响	刘丽	吴燕明	周航	邓贵友
				廖柏寒(1489)

环境生物技术

光照条件对跑道池光生物反应器内蛋白核小球藻生长特性的影响	张楠	陈蓉	王永忠	廖强	朱恂(1496)
酵母细胞对溶液中 Co ²⁺ 和 Cd ²⁺ 的生物富集	李成鹏	张超	刘玉倩	汤花梅	张晓华
一种除臭复合菌剂的功能菌鉴定	陈进斌	谢翼飞	李旭东	冯叶	朱德文(1507)
沉积物中 2 株多环芳烃降解菌的分离鉴定及其对菲、荧蒹的降解特性					
..... 许晓毅 苏攀 姬宇 叶姜瑜 徐璇(1513)					

污泥流变学及其厌氧消化混合特性数值模拟研究进展

曹秀芹 杨 平 赵振东

(北京建筑大学城市雨水系统与水环境省部共建教育部重点实验室, 北京 100044)

摘 要 污泥作为一种非牛顿流体,其流变特性对厌氧消化过程中的传质、传热、搅拌和物料输送等有着重要影响。系统阐述了污泥流变学属性,如流变特性的影响因素、流变模型以及其测试方法。由于污泥在厌氧消化反应器中流场的复杂性及其本身的不透明性,难以对其流场进行高效的实验测试,利用计算流体力学(CFD)技术结合流变学参数对流场进行数值模拟是一种有效工具。因此,综合分析了CFD技术在污泥厌氧消化过程中的研究现状及其搅拌混合过程中旋转桨叶处理方法的选择,并对污泥厌氧消化过程中进行数值模拟存在问题及进一步研究方向进行了展望。随着深入研究,以污泥流变学、计算流体力学为基础结合污泥厌氧消化生化反应过程联合数值模拟研究,将会为控制污泥的厌氧消化工艺提供更加全面和重要的技术措施。

关键词 污泥 非牛顿流体 流变特性 流场 数值模拟

中图分类号 X824 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2015)03-0997-07

Research progress of sludge rheology and numerical simulation of mixing characteristics in anaerobic digestion reactors

Cao Xiuqin Yang Ping Zhao Zhendong

(Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment, Ministry of Education,
Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract Sludge as a kind of non-Newtonian fluid, its rheological characteristics has a significant effect on mass and heat transfer, material mixing and transport in the process of anaerobic digestion. The rheology properties, such as influencing factors, rheological models and measurement of sludge rheological characterization were summarized. Due to the complexity of flow distribution in anaerobic digestion reactors and the opaqueness of sludge, numerical modelling is a much effective approach to describe the flow distribution by combining computational fluid dynamics (CFD) technology with the rheological parameters, instead of traditional experimental methods. Thereby, it's of great value to demonstrate the current research situation concerning the application of CFD technology on the anaerobic digestion and the choice of rotating blades handling during the mixing process. Besides, the problems of numerical simulation applied in anaerobic digestion were also discussed. With further study, the numerical modelling of biochemical reaction on the basis of sludge rheological and computational fluid mechanics would provide more comprehensive and important technical measures for the process control of the sludge anaerobic digestion.

Key words sludge; non-Newtonian fluid; rheological characteristic; flow field; numerical simulation

物料的流变特性在厌氧消化传质、传热等过程中发挥重要作用^[1,2]。如物料的流变特性是厌氧消化系统中热交换设备设计的一项重要参数,同时,物料的流变特性也决定了泵的尺寸、类型和功率等^[3]。污泥作为一种非牛顿流体,其流变特性对流动特性有显著影响^[4]。在管道输送、搅拌、混合以及热交换等厌氧消化单元过程设计中,必须清楚污泥的流体类型,计算出污泥的流变参数,才能对厌氧

消化进行合理的工艺设计以及设备选用与开发。

基金项目:北京市自然科学基金科技重点项目(KZ201310016017);
北京建筑大学科研基地建设-科技创新平台项目
(PXM2014_014210_000057)

收稿日期:2014-07-20; **修订日期:**2014-08-19

作者简介:曹秀芹(1965—),女,教授,主要研究方向:废水处理理论与技术、污泥及固体废弃物减量与资源化技术等。

E-mail: caoxiuqin@bucea.edu.cn

O'Neil^[5]认为:生物泥浆(污泥)的流变特性和行为对于减少反应器的操作费用、优化设计、控制和运行厌氧消化反应器而言,就像生物和化学过程机理揭示一样重要。目前污泥在厌氧消化过程中的流变特性研究正处于发展阶段,对实验尚没有现成规程供参考。探讨其流变特性的实验方法、变化规律以及其流动特性对厌氧消化的影响具有一定的现实意义。

由于相间的相互作用及其非牛顿流体的特性,污泥在厌氧消化反应器中的流场是很复杂的,尽管传统的实验方法(如示踪实验)可以了解厌氧消化反应器中的一些流场信息,但由于实验操作和工程放大的限制,无法获得全面信息。另外,由于污泥的不透明,通常情况下无法获得污泥在厌氧消化反应器中的流动类型及其相关流动特性。计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)技术正是顺应这种趋势而在流体混合过程的研究中得到广泛应用的,已证明其在多相流流体力学特征上是一种非常有用和有效的工具^[4]。CFD技术能够通过计算机数值计算和图像显示,对涉及到流动和热传导等相关物理现象的系统进行分析^[6]。这一技术的出现和发展,解决了流体参量在反应器中均化分布的缺陷,也使利用数学模型精确模拟水处理单元在设计条件下的流动特性和行为成为可能,为反应器模拟和数学模型的建立提供了一种有效手段^[7]。Nisipeanu等^[8]认为,在污水处理厂处理单元构筑物的设计和运行中,使用CFD技术优化了反应器的设计,解决了运行中存在的问题,反应器的处理效率提高了10%~35%。并且许多研究者利用CFD技术进行数值模拟得到流场形态、速度、浓度分布等微观信息,可进一步得到与之相关的参数如桨叶排量、功率消耗、混合时间、黏度、剪切速率等,数值模拟数据与实验结果吻合很好,模拟结果令人满意^[9-11]。因此,将污泥流变特性结合CFD技术运用于污泥厌氧消化过程流动特性的数值模拟,将会为污泥厌氧消化过程在线控制提供有效手段。

1 污泥的流变特性研究

非牛顿流体,是指不满足牛顿黏性实验定律的流体,即其剪切应力与剪切速率之间不是线性关系的流体。近来,国内外学者对非牛顿流体的流变特性开展了大量的研究。比如对聚合物和表面活性剂溶液、食品生产辅助材料、以及对聚合物溶液和石油等流变特性的研究等,但对污泥流变特性的研究还

是甚少。

1.1 污泥流变特性影响因素的研究

描述物质流变特性的参数有黏度、剪切应力和剪切速率等,其中黏度是最常用的参数,它描述的是流体抵抗剪切引发流动的物理特性。污泥的产量巨大、来源广泛、成分复杂,其结构组成、絮体强度、粒径大小、表面电荷等物理性质以及废水处理的工艺流程和运行条件都会对其流变特性产生影响^[12]。针对污泥流变特性影响的众多因素,国内外对各个影响因素都有一定研究。从目前学者的研究来看,最主要影响因素有以下几种^[12-15]:1)温度;2)含水率;3)总悬浮固体浓度或混合液污泥浓度(TSS或MLSS);4)污泥的理化特性等。

大量学者都对污泥流变特性的影响因素(污泥浓度、温度和结合水等)进行了深入分析。普遍认为,污泥的极限黏度随污泥浓度的增加而增加^[16,17]。尤其在高含固率污泥中,污泥团块结构尺寸较大并且彼此靠近,从而导致更强的粒子间的相互作用,因此污泥具有较高表观黏度^[18]。Pevere等^[19]进一步研究发现,同一固体浓度的污泥降低其粒径,但其极限黏度增加,因此认为颗粒尺寸减小增大颗粒的表面积,从定量的角度突显了粒子相互作用的重要性。普遍认为,随着温度升高黏度降低^[16,20,21]。但是Moreau等^[17]认为,如果温度变化范围不是很大,其污泥黏度变化不明显。多数学者研究认为,厌氧消化污泥的黏度和温度的关系可以用Arrhenius方程(式1)来描述^[17,20-22]。

$$\tau_{\infty} = k \exp(E_a/RT) \quad (1)$$

式中: τ_{∞} 为极限黏度, k 为经验常数, T 为绝对温度, R 是通用气体常数, E_a 为活化能。

然而,也有人指出,热历史可能对污泥的黏度有很大的影响。Baudez等^[21]研究厌氧消化加热和冷却后的污泥,发现污泥黏度都增加,其认为,固体可能已转化为溶解化合物并且该处理对污泥黏度的影响是不可逆的。也有学者研究了结合水对污泥黏度的影响,污泥黏度随着结合水含量的增加而降低,并且这种关系可以用指数函数来表征^[23]。Liao等^[24]认为,出现上述流变行为可能是由于污泥表面絮状结构的变化和胞外聚合物而引起的。在国内,倪哲等^[25]认为,TSS(或MLSS)和温度是影响物料流变特性的最主要因素,其影响可以用数学公式加以描述,如消化过程中TSS的改变和微生物种群变化导致的絮体结构的改变可能是消化污泥流变特性改变的直接原因。从目前的研究来看,影响污泥流变特

性因素众多,比如还有搅拌、混合、压力以及预处理方法等^[26,27],这些因素都对其污泥厌氧消化过程的流动性及其稳定性有一定影响。国内外很多学者对厌氧消化物料的流变特性的研究成果这里不再一一赘述,今后可以针对污泥厌氧消化影响因素和流变参数之间的关系进行深入的研究。

1.2 污泥流变模型(本构方程)的研究

深入地非牛顿流体的流变学研究有助于我们更好地理解非牛顿流体的流动和流场变化规律,对建立非牛顿流体的流变模型,从数学上描绘非牛顿流体特性具有重要的意义^[28]。根据多数学者在各个领域对流变特性的研究表明,污泥的流变模型研究与开发也大体有2种方法:一是从微观角度出发,从悬浮液的各个组分的性质和它们之间的相互作用出发。通过理论分析的方法建立相应的关联式,用此方法建立的本构方程虽能在一定程度上反映污泥的流变机理,但使用极不方便,而且很难得到在大范围内应用的普适关联式方程。二是从所研究的对象和悬浮液的宏观流动行为出发,通过实验观察悬浮液的流变特性,提出包含多个参数的流变模型,进而用实验的方法确定这些参数。其模型有:Ostwald de Vaele 模型、Herschel-Bulkley 模型、Bingham 模型、Casson 模型、Sisko 模型、Carreau 模型和 Cross 模型等,其中污泥研究最常用的主要模型有:

(1) Ostwald de Vaele(幂律)模型^[29-32]

$$\tau_{\infty} = K \cdot (D)^n \quad (2)$$

(2) Herscher-Bulkly 模型^[9, 33-35]

$$\tau = \tau_H + K \cdot (D)^n \quad (3)$$

(3) Bingham 模型^[36,37]

$$\tau = \tau_H + \mu_B \cdot D \quad (4)$$

式中: D 为剪切速率; τ 为剪切应力; τ_H 为屈服应力; μ_B 为刚度系数; K 为稠度系数; n 为流变指数。

目前,文献报道污泥流变模型的比较研究还很少,研究结果还没有统一的结论用于表征污泥的流变特性。Baudez 等^[34]认为,Herschele-Bulkley 模型适用于描述污泥作为剪切稀化特点,最常用作来表征浓缩污泥。Garakan 等^[35]研究表明,Herschele-Bulkley 模型可以用来描述高浓度活性污泥的流变行为,Bingham 模型适用于描述含水率高的稀污泥,同时也指出幂律模型可描述在低剪切速率范围内的污泥。Martin 等^[36]指出,Bingham 模型适用于描述介于膜生物反应器和厌氧消化之间的具高剪切速率范围的污泥。Pevee 等^[37]选择了3种流变模型对取自厌氧 MBR 和 CSTR 生物反应器的污泥悬浮液

的流变特性进行拟合,认为 Bingham 模型提供了最合适的流变参数。Baudez 等^[34]进一步研究认为,幂律模型不适于表征具有高剪切速率下的流体行为,但可以用 Herschele-Bulkley 和 Bingham 模型耦合(式5)来表示污泥的整个剪切速率范围内的污泥。

$$\tau = \tau_H + K \cdot (D)^n + \mu_B \cdot D \quad (5)$$

Seyssiecq 等^[1]认为,流变模型的选择有着主观性和高度依赖于实验条件,如所施加的剪切应力或剪切速率范围以及污泥的类型。研究者可根据研究的目的、对象和范围选择不同的流变模型。另外,由于污泥流变特性的复杂性,一般模型很难完全反映实际污泥的所有流变特性,因此,在应用上述流变模型描述污泥的流动特性时都会出现一定偏差,可以权衡各方面因素综合考虑对流变方程给予改进以达到并构建新的最优流变模型。

1.3 污泥流变特性的测量研究

流变参数是非牛顿流体固有的物料参数,是表征流变特性的特征量。由于非牛顿流体在物质组成上的复杂性,使得流变测量比牛顿流体复杂得多^[38]。利用流体力学的原理进行流变参数的测量,一般是在一定的条件下,通过对试样施加切应力或变形跟踪受力后的响应或应力与时间的函数关系而得到。测定黏度主要方法:落球黏度计法、毛细管黏计法、同轴圆筒转动黏度计法和锥板转动黏度计法等方法。如何根据被测流体和客观条件,选择适合的测定方法,则需要综合考虑以下几方面^[39]:

(1) 被测物质的黏度范围应对被测流体的黏度有一个大致的估计,选择适当的仪器;

(2) 流变仪的剪切速率范围,黏度的测量应在相同的剪切速率范围内进行;

(3) 温度变化范围;

(4) 对时变性的要求等。

在当前无法对污泥厌氧消化反应器流场进行直接准确测量的条件下,进行污泥流场的数值模拟也是可行的方法。

2 污泥厌氧消化反应器中的混合特性及其数值模拟

目前,以非牛顿流体为研究对象,对污泥在厌氧消化过程中流动特性进行 CFD 数值模拟研究还是很少,主要集中在其他非牛顿流体上,如 Firouzi 等^[40]模拟研究了圆管内满足 Herschel-Bulkley 模型的非牛顿流体对无量纲速度分布有显著的影响。Shekhar 等^[41]采用幂律方程模拟考察了在搅拌过程

中剪切速率和流速的关系,并且发现 Metzner 数 k_s 与搅拌装置的几何尺寸有关,而与流体流变参数 n 无关,并对适用于幂律方程流体的功率消耗计算式进行了修正。然而 CFD 技术的运用不仅仅限于其他非牛顿流体,它在污泥厌氧消化反应器中的运用也受到越来越多地关注。

2.1 CFD 在污泥厌氧消化反应器中的研究现状

厌氧消化反应器中的混合对于从基质到微生物中的传递、平衡 pH 值和温度、防止分层和短流都很重要。其混合行为主要受局部流场的影响,基于此观点,获得流场的局部信息,对于污泥在反应器内混合过程的设计和优化十分必要。大量学者利用 CFD 技术模拟研究了污泥厌氧反应器内流动状况,其模拟值和计算值吻合较好,认为数值模拟与实验相比大大缩短了预测时间,为反应器的在线控制提供了很大的帮助^[42-45]。

目前,把污泥作为非牛顿流体为研究对象进行数值模拟取得了显著成效。例如, Wu 等^[44]利用 CFD 技术分别模拟了小试、放大规模和中试规模厌氧消化反应器,从而确定了中试厌氧消化池中最优能量输入。Terashima 等^[45]利用 CFD 技术结合污泥流变特性,运用其分析实际规模的厌氧消化池的混合行为,从而确定不同含固率和不同混合速率所需时间。Craig 等^[33]研究认为,污泥流变特性对消化池混合和叶轮扭矩有很大的影响,重点研究污泥作为一种非牛顿流体在 Herscher-Bulkly 模型下流变行为是如何影响消化混合性能以及对叶轮扭矩有何要求,同时认为,污泥龄对旋转叶轮的扭矩有着显著影响。Wu^[31]后来也利用 CFD 技术模拟一个蛋形消化池的螺旋桨是最佳安放位置,同时也得出牛顿流体和非牛顿流体的混合整体流动趋势的相似性,在整个消化池中的平均速度随螺旋桨转速的增加而增加,而混合消耗能量呈指数增加。Yu 等^[32]对高含固率物料(符合幂律模型)在厌氧消化中的混合性能进行模拟评估,得出不同含固率物料间能耗、流速和雷诺数等的相互关系,并为混合搅拌器在高含固率条件下厌氧消化池所需最低能耗以及生物组成对能耗影响提供了数据支持。Bridgeman^[46]以奶牛粪便为研究对象,模拟不同叶轮在反应器中相对旋转状况,取得令人满意的结果。在国内,黄河涛等^[47]对市政污泥流变特性及圆管流数值模拟研究取得不错效果,认为管径、流速以及流变指数 n 对管道流动的影响很大。虽然,CFD 技术已经逐渐地应用到非牛顿流体甚至是污泥厌氧消化的数值模拟中,其以

低成本、高效率以及对不同搅拌器形式、搅拌槽几何尺寸和流体流变性的适应性强等模拟方面有着显著优势,开发新型搅拌器和预测搅拌流场特性的变化是计算搅拌混合技术发展的必然趋势。但到目前为止这方面还没取得令人满意的成果,主要是很难找到合适的流变模型的本构方程既符合实际流体的流变特性又具有数学处理上简单性^[48]。因此,如何将针对特定污泥给出其合适的流变参数进行数值模拟分析,为污泥厌氧消化可视化提供可靠的技术支撑将是研究重点。

2.2 混合搅拌桨叶处理方法的研究

对于污泥厌氧消化在反应器中的流场预测,考虑到反应器内三维几何体的复杂性,参考系、湍流模型的选择等方面也都对数值模拟结果有着重要影响。其中最主要就是旋转桨叶的处理上,在面对这些问题时,许多学者都各自提出了不同的解决方法,不断推动 CFD 技术在搅拌反应器中的发展与完善^[49]。从最初“黑箱”模型法,期间经历了内外迭代法、滑移网格法、多重参考系法等的发展。

(1) “黑箱”模型法

“黑箱”模型法首先是由 Middleton 等^[50]提出的。研究过程中把搅拌桨看作是一个“黑箱”。这种方法虽然是一种稳态算法,计算工作量小,不需要考虑桨叶部分的网格,但把搅拌桨叶区域看作是未知领域,首先边界条件的确定离不开实验数据,一种桨叶区域边界条件只能用于与实验条件几何相似的体系,其次这种方法不能得到桨叶区域流动的细节问题。

(2) 内外迭代法

Brucato^[51]采用内外迭代法对搅拌桨流动进行研究。内外迭代法将搅拌流场区域分成 2 个相互重叠的区域,内部区域包括搅拌桨、外部区域包括挡板等,整个流场和搅拌桨区域流场的稳态解进行迭代耦合。

(3) 多重参考系法

多重参考系法(Multi Reference Frame, MRF)是由 Luo 等^[52]于 1994 年提出的,其思想与内外迭代法相同,即采用 2 个参考系分别进行计算,不同的是 MRF 法划分的 2 个区域没有重叠的部分,不再需要内外迭代过程,2 个不同区域内速度的匹配直接通过在交界面上的坐标系转换来实现,因而使计算变得更加简单。MRF 法是一种稳态流场计算方法,这种方法适用于搅拌槽内无挡板或搅拌槽中桨叶和挡板相互作用较弱,桨叶和挡板的相对位置对搅拌槽

中的平均流场影响不大的情况下。很多学者采用 MRF 法模拟搅拌反应器物料流场的分布取得了不错的效果^[46,53,54]。

(4) 滑移网格技术

随着移动变形网格技术、动态多块网格法的应用,形成了滑移网格技术(sliding grid, SG)^[55,56]。SG 法是一种非稳态的计算方法,它在区域划分上与 MRF 法相同,不同的是采用滑移网格法,内部包含桨叶部分的网格是随时间而转动的,因此在两个区域交界面处有网格之间的相对滑动。当桨叶的相对位置对搅拌槽中流场流动影响很大时,宜采用 SG 法进行流场的非稳态计算,SG 法将 2 部分区域设置不同的滑移速度来体现搅拌桨的旋转运动。

目前,MRF 法和 SG 法以其各自的优势,在混合搅拌数值模拟过程中应用最为广泛。很多学者主要集中在 SG 法和 MRF 法中作出选择与判断,也都提出了其各自的使用情况,但都还存在着各自的问题,Kritzing 等^[57]比较 MRF 模型方法和 SG 方法,认为 MRF 方法在更短的时间上提供了可靠的工程答案。Wu^[58]采用 SG 法在大涡模拟中与采用 MRF 法在时均化的 Navier-Stokes 方程模拟比较研究,虽然认为前者模拟结果优于后者,但同时认为其精度略有增加的判断不仅仅是靠计算量增加来衡量的。Bakker 等^[9]研究发现,MRF 方法不能捕捉到叶轮与定子之间随时间变化的相互作用,而 SG 方法可以。无论哪种方法的选择都有着其本身的适应范围,就像 Kelly 等^[10]所认为的那样,MRF 和 SG 都能很好预测搅拌器内的流场分布。相信随着计算机技术发展以及人们更深入的流体力学机理性研究,针对特定厌氧消化污泥的混合搅拌流场模拟,将会取得令人满意的结果。

3 存在问题与展望

目前,以流变特性作为污泥厌氧消化过程的控制参数是研究的重要内容之一,然而研究存在一定的生产放大问题,同时其作用机理也有待于进一步挖掘。运用 CFD 技术在污泥厌氧消化过程进行数值模拟取得不错的效果,但还存在一些问题,主要表现在:

(1) 由于对非牛顿流体的流变特性的影响因素众多,测试手段也不尽相同。因此,改进实验研究方法,提高理论分析手段,从污泥厌氧消化过程中的流体微观结构和流变特性的相互关系,用数学模型模拟其流动规律,非牛顿流体的新机能及相关设备的研究等都是以后将要更深层次研究的主要内容。

(2) 污泥属于不透明流体,大部分学者都是间接地对 CFD 模拟结果进行验证,很难运用实验手段对污泥厌氧消化过程中流场进行直观测试。因此,深入研究实验示踪技术是研究的一大方向,以使 CFD 数值模拟更具说服力。

(3) 污泥在厌氧消化过程中,污泥不断地发生生化反应,以上学者运用 CFD 模拟主要偏向于物理流动过程的研究,很难涉及到动态生化反应过程,因此,运用 CDF 技术将污泥厌氧消化过程中的污泥物理特性与生化反应有机结合起来,将为污泥厌氧消化开辟一条重要评估工具。

(4) 运用 CFD 技术对污泥厌氧消化流场进行数值模拟涉及到复杂的流体力学知识,文中未能进行阐述。因此,从非牛顿流体力学的基本方程出发,结合流体流变特性以及生化反应进行数值模拟,剖析气液固等多相流流动规律和相互作用,得出污泥厌氧消化过程的结构图谱,可为调整污泥的理化特性,控制污泥的厌氧消化工艺,改善污泥的厌氧消化性能提供依据。

参考文献

- [1] Seyssiecq I., Ferrasse J. H., Roche N. State-of-the-art: Rheological characterisation of wastewater treatment sludge. *Biochemical Engineering Journal*, **2003**, 16(1): 41-56
- [2] 刘刘, 邓良伟, 王智勇. 几种厌氧消化原料的流变特性及其影响因素. *农业工程学报*, **2009**, 25(8): 204-209
Liu Yi, Deng Liangwei, Wang Zhiyong. Rheological properties of several kinds of feedstocks for anaerobic fermentation and their influencing factors. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, **2009**, 25(8): 204-209 (in Chinese)
- [3] El-Mashad H. M., Loon W. K. P., Zeeman G., et al. Rheological properties of dairy cattle manure. *Bioresource Technology*, **2005**, 96(5): 531-535
- [4] 范笼, 施汉昌, 徐农, 等. 污水处理反应器的计算流体力学. 北京: 中国建筑工业出版社, **2012**
- [5] O'Neil D. J. Rheology and mass/heat transfer aspects of anaerobic reactor design. *Biomass*, **1985**, 8(3): 205-216
- [6] 王福军. 计算流体力学分析-CFD 软件原理与应用. 北京: 清华大学出版社, **2004**
- [7] Newell B. Characterizing bioreactor mixing with residence time distribution (RTD) tests. *Water Science & Technology*, **1998**, 37(12): 43-47
- [8] Nisipeanu E., Harwood R. CFD analysis streamlines equipment design. *Water and Wastewater International*, **2002**, 17(1): 29-30
- [9] Bakker C. W., Meyer C. J., Deglon D. A. Numerical

- modeling of non-Newtonian slurry in a mechanical flotation cell. *Minerals Engineering*, **2009**, 22(11): 944-950
- [10] Kelly W., Gigas B. Using CFD to predict the behavior of power law fluids near axia flow impellers operating in the transitional flow regime. *Chemical Engineering Science*, **2003**, 58(10): 2141-2152
- [11] Karim K., Varma R., Vesvikar M., et al. Flow pattern visualization of a simulated digester. *Water Research*, **2004**, 38(17): 3659-3670
- [12] Sanin D. F. Effect of solution physical chemistry on the rheological properties of activated sludge. *Water SA*, **2002**, 28(2): 207-212
- [13] Baudeza J. C., Ayolb A., Coussot P. Practical determination of the rheological behavior of pasty biosolids. *Journal of Environmental Management*, **2004**, 72(3): 181-188
- [14] 张晓斌, 冯民权, 孙西欢, 等. 温度和浓度对污泥流变特性的影响. *水动力学研究与进展*, **2014**, 29(2): 142-149
- Zhang Xiaobin, Feng Minquan, Sun Xihuan, et al. Effects of temperature and concentration on rheological characteristics of sewage sludge. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, **2014**, 29(2): 142-149 (in Chinese)
- [15] Laera G., Giordano C., Pollice A., et al. Membrane bioreactor sludge rheology at different solid retention times. *Water Research*, **2007**, 41(18): 4197-4203
- [16] Abu-Jdayil B., Banat F., Al-Sameraiy M. Steady rheological properties of rotating biological contactor (RBC) Sludge. *Journal of Water Resource and Protection*, **2010**, 2(1): 1-7
- [17] Moreau A. A., Ratkovich N., Nopens I., et al. The (in) significance of apparent viscosity in full scale municipal membrane bioreactors. *Journal of Membrane Science*, **2009**, 340(1-2): 249-256
- [18] Su K. Z., Yu H. Q. Formation and characterization of aerobic granules in a sequencing batch reactor treating soybean processing wastewater. *Environmental Science & Technology*, **2005**, 39(8): 2818-2827
- [19] Pevere A., Guibaud G., Van Hullebusch E., et al. Viscosity evolution of anaerobic granular sludge. *Biochemical Engineering Journal*, **2006**, 27(3): 315-322
- [20] Mu Y., Yu H. Q., Wang Y. A kinetic approach to anaerobic hydrogen producing process. *Water Research*, **2007**, 41(5): 1152-1160
- [21] Baudez J. C., Gupta R., Eshtiagh N., et al. The viscoelastic behaviour of raw and anaerobic digested sludge: Strong similarities with soft-glassy materials. *Water Research*, **2013**, 47(1): 173-180
- [22] Pevere A., Guibaud G., Goin E., et al. Effects of physico-chemical factors on the viscosity evolution of anaerobic granular sludge. *Biochemical Engineering Journal*, **2009**, 43(3): 231-238
- [23] Sozanski M. M., Kempa E. S., Grocholski K., et al. The rheological experiment in sludge properties research. *Water Science and Technology*, **1997**, 36(11): 69-78
- [24] Liao B. Q., Allen D. G., Droppo I. G., et al. Bound water content of activated sludge and its relationship to solids retention time, floc structure, and surface properties. *Water Environment Research*, **2000**, 72(6): 722-730
- [25] 倪哲, 董琳琳, 牛冬杰. 固体厌氧消化原料流变特性研究综述. *四川环境*, **2012**, 31(1): 123-127
- Ni Zhe, Dong Linlin, Niu Dongjie. Summary of rheological properties of solid raw materials for anaerobic digestion. *Sichuan Environment*, **2012**, 31(1): 123-127 (in Chinese)
- [26] Paulo S. M. The influence of the anaerobic digestion process on the sewage sludges rheological behaviour. *Water Science and Technology*, **1997**, 36(11): 61-67
- [27] Christopher F. F. The rheological and physico-chemical characteristics of sewage sludges. *Enzyme and Microbial Technology*, **2002**, 30(3): 340-345
- [28] 刘海燕, 庞明军, 魏进家. 非牛顿流体研究进展及发展趋势. *应用化工*, **2010**, 39(5): 740-746
- Liu Haiyan, Pang Mingjun, Wei Jinjia. A progress and trend of the non-Newtonian fluids. *Applied Chemical Industry*, **2010**, 39(5): 740-746 (in Chinese)
- [29] Moeller G., Torres L. G. Rheological characterization of primary and secondary sludges treated by both aerobic and anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, **1997**, 61(3): 207-211
- [30] 吴森, 赵学义, 潘越, 等. 城市污泥的特性及管道输送技术研究. *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. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, **2008**, 2(2): 260-265 (in Chinese)
- [31] Wu Binxin. CFD simulation of mixing in egg-shaped anaerobic digesters. *Water Research*, **2010**, 44(5): 1507-1519
- [32] Yu Liang, Ma Jingwei, Chen Shulin. Numerical simulation of mechanical mixing in high solid anaerobic digester. *Bioresource Technology*, **2010**, 102(2): 1012-1018
- [33] Craig K. J., Nieuwoudt M. N., Niemand L. J. CFD simulation of anaerobic digester with variable sewage sludge rheology. *Water Research*, **2013**, 47(13): 4485-4497
- [34] Baudez J. C., Markis F., Eshtiagh N., et al. The rheo-

- logical behaviour of anaerobic digested sludge. *Water Research*, **2011**, 45(17): 5675-5680
- [35] Khalili Garakani A. H., Mostoufi N., Sadeghi F., et al. Comparison between different models for rheological characterization of activated sludge. *Iranian Journal of Environmental Health Sciences & Engineering*, **2011**, 8(3): 255-264
- [36] Martin I., Pidou M., Soares A., et al. Modelling the energy demands of aerobic and anaerobic membrane bioreactors for wastewater treatment. *Environmental Technology*, **2011**, 32(9): 921-932
- [37] Pevere A., Guibaud G., Van Hullebusch E., et al. Identification of rheological parameters describing the physico-chemical properties of anaerobic sulphidogenic sludge suspensions. *Enzyme and Microbial Technology*, **2007**, 40(4): 547-554
- [38] Van Wazer J. R. *Viscosity and Flow Measurement; A Laboratory Handbook of Rheology*. New York: John Wiley & Sons, **1963**
- [39] 徐莹. 城市污水流变与换热特性研究. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学博士学位论文, **2009**
Xu Ying. Research on rheologic and heat transfer characteristics of urban sewage. Harbin: Doctoral Dissertation of Harbin Institute of Technology, **2009** (in Chinese)
- [40] Firouzi M., Hashemabadi S. H. Exact solution of two phase stratified flow through the pipes for non-Newtonian Herschel-Bulkley fluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **2009**, 36(7): 768-775
- [41] Shekhar S. M., Jayanti S. Mixing of pseudo plastic fluids using helical ribbon impellers. *AIChE Journal*, **2003**, 49(11): 2768-2772
- [42] Wu B. X. Large eddy simulation of mechanical mixing in anaerobic digesters. *Biotechnology Bioengineering*, **2012**, 108(3): 804-812
- [43] Meroney R. N., Colorado P. E. CFD simulation of mechanical draft tube mixing in anaerobic digester tanks. *Water Research*, **2009**, 43(4): 1040-1050
- [44] Wu Binxin, Chen Shulin. CFD simulation of non-Newtonian fluid flow in anaerobic digesters. *Biotechnology and Bioengineering*, **2007**, 99(3): 700-711
- [45] Terashima M., Goel R., Komatsu K., et al. CFD simulation of mixing in anaerobic digesters. *Bioresource Technology*, **2009**, 100(7): 2228-2233
- [46] Bridgeman J. Computational fluid dynamics modelling of sewage sludge mixing in an anaerobic digester. *Advances in Engineering Software*, **2012**, 44(1): 54-62
- [47] 黄河洵, 陈汉平, 蔡兴飞. 市政污泥流变特性及圆管流数值模拟研究. *环境工程学报*, **2012**, 6(12): 4642-4648
- Huang Hexun, Chen Hanping, Cai Xingfei. Rheologic properties of municipal sludge and a numerical simulation of pipe flow based on that. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, **2012**, 6(12): 4642-4648 (in Chinese)
- [48] 江体乾. 化工流变学. 上海: 华东理工大学出版社, **2004**
- [49] 周国忠, 施力田, 王英琛. 搅拌反应器内计算流体力学模拟技术进展. *化学工程*, **2004**, 32(3): 28-32
Zhou Guozhong, Shi Litian, Wang Yingchen. Computational fluid dynamics progress in stirred tank reactors. *Chemical Engineering (China)*, **2004**, 32(3): 28-32 (in Chinese)
- [50] Middleton J. C., Pierce F., Lynch P. M. Computations of flow fields and complex reaction yield in turbulent stirred reactors and comparison with experimental data. *Chemical Engineering Research & Design*, **1986**, 64(1): 18-22
- [51] Brucato A., Ciofalo M., Grisafi F., et al. Numerical prediction of flow fields in baffled stirred vessels: A comparison of alternative modeling approaches. *Chemical Engineering Science*, **1998**, 53(21): 3653-3684
- [52] Luo J. Y., Issa R. I., Gosman A. D. Prediction of impeller-induced flows in mixing vessels using multiple frames of reference. *Institution of Chemical Engineers Symposium Series*, **1994**, 136: 549-556
- [53] Murthy B. N., Ghadge R. S., Joshi J. B. CFD simulations of gas-liquid-solid stirred reactor: Prediction of critical impeller speed for solid suspension. *Chemical Engineering Science*, **2007**, 62(24): 7184-7195
- [54] 段所行, 苏红军, 徐世艾. 最大叶片式桨在假塑性流体中的搅拌流场模拟. *化学工程*, **2010**, 38(6): 47-49
Duan Suoxing, Su Hongjun, Xu Shiai. Simulation of flow field of pseudo plastic fluids agitated by max blend impeller. *Chemical Engineering (China)*, **2010**, 38(6): 47-49 (in Chinese)
- [55] Luo Y., Gosman A D, Issa R I, et al. Full flow field computation of mixing in baffled stirred vessels. *Chemical Engineering Research and Design*, **1993**, 71(A): 342-344
- [56] Takeda H., Narasaki K., Kitajima H., et al. Numerical simulation of mixing flows in agitated vessels with impellers and baffles. *Computers & Fluids*, **1993**, 22(2-3): 223-228
- [57] Kritzing H. P. Hydrodynamics of a monolithic stirrer reactor. Delft: Doctor Dissertation of Technical University Delft, **2010**
- [58] Wu Binxin. CFD investigation of turbulence models for mechanical agitation of non-Newtonian fluids in anaerobic digesters. *Water Research*, **2011**, 45(5): 2082-2094