

赵兰兰,郭占斌,王心语,等.全混式厌氧发酵反应器(CSTR)研究进展[J].江苏农业科学,2019,47(21):95-99.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.21.021

全混式厌氧发酵反应器(CSTR)研究进展

赵兰兰,郭占斌,王心语,刘新鑫,盛晨绪,沈景德,代敏仪

(黑龙江八一农垦大学,黑龙江大庆 163319)

摘要:国内关于全混式厌氧发酵反应器(CSTR)的研究较为匮乏,对其结构各方面的设计参数大多是参考国外设计。重点对 CSTR 的结构等应用进展进行综述,主要针对在沼气工程应用以及实验装置中的全混式厌氧发酵反应器的形状进行对比,概述圆柱形反应器和卵形反应器的研究进展;同时还对反应器的高径比与挡板结构进行归纳;最后对厌氧发酵过程中混合技术(搅拌器)的主要类型和搅拌速率进行一定的整理,分析各搅拌形式的优缺点以及适用范围。综合梳理全混式厌氧发酵反应器的主要结构及搅拌的研究现状,以期 CSTR 反应器的结构优化设计提供参考。

关键词:CSTR;反应器形式;混合技术;综述

中图分类号:S216.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2019)21-0095-05

厌氧发酵是处理农业废弃物的主要手段,全混式厌氧发酵反应器(CSTR)是当今工程实践中厌氧发酵的主要形式。而且,目前农业领域的沼气工程湿法发酵工艺占主要地位^[1]。但就目前而言,我国沼气工程的运行效率相对较滞后,如何提升现有 CSTR 的运行效率,盘活现有沼气工程是我们面临的一个重要问题。这主要是由于国内缺少对 CSTR 的建设和运行的优化研究。

首先,国内的 CSTR 反应器结构相对单一,在发酵过程中存在缺陷^[2];其次,适用于秸秆与牛粪共同反应的湿法厌氧发酵十分有限,大多使用传统的处理有机废水、餐厨垃圾等流动性较强原料的反应装置,并易造成进出料困难、料液分层、结壳等问题,导致产气不稳定、连续运行能力差^[3]。这些因素均阻碍了 CSTR 装置在沼气工程中的进一步发展。可见,CSTR 进行结构优化对于提高全混式厌氧发酵效果的稳定、连续、高效运行具有重要意义。本文重点对 CSTR 的形式、结构与搅拌的应用进展进行综述,以期 CSTR 反应器的结构优化提供借鉴。

1 反应器形式

CSTR 为带有搅拌装置的密封反应器,根据形状不同,主要可以分为圆柱形和卵形两大类^[4]。起初,国内大多数沼气工程大多选择建立正方形或矩形的反应器,但是由于反应液角落部分流动受限,从而导致反应物反应不完全,因此圆柱形反应器和卵形反应器被广泛推广使用^[5]。根据不同反应器内部应力研究进行一定整理。

1.1 圆柱形反应器

因圆柱形反应器外形设计较为简单、便于操作,在国内得

到了广泛的应用,尤其在大型的沼气工程中。1984 年我国第 1 座预应力钢筋混凝土混合物料反应器就是圆柱形反应器,图 1 为圆柱形反应器工程实例。



图1 圆柱形反应器工程实例

圆柱形反应器作为大型污水厂混合物料系统的关键构筑物,工况较为复杂,其自身体形大、高度较高,是个典型的薄壁壳巨型结构^[6]。圆柱形反应器一般以旋转壳体、圆环梁及底板作为主要结构,旋转壳体组合结构不仅受力性能好、刚度大,还节省材料。但目前为止,设计人员对圆柱形反应器的设计与计算主要还停留在以经验设计为主,以简单的理论验证为辅的阶段。

目前,主要采用 ANSYS 软件对圆柱形反应器进行研究,郭淑卿主要分析了单环预应力筋张拉测试,得到的计算值与实测值比较吻合,为今后采用理论计算直接配置预应力筋提供了依据^[7];而刘传卿等则扩大了研究范围,分析了圆柱形反应器在 5 种工况下的受力情况,认为无黏结预应力钢筋对反应器壁有较大影响,并且得出静水压力及壁面温差是结构设计中的控制荷载^[8]。

1.2 卵形反应器

20 世纪 50 年代开始,西欧(德国、奥地利等)国家开始对卵形反应器进行研究和应用。国内当时受材料、施工技术的制约,限制了卵形反应器的应用^[9]。随着预应力技术的发

收稿日期:2018-06-21

基金项目:国家重点研发计划子课题(编号:2017YFD0800800-05)。

作者简介:赵兰兰(1993—),女,新疆阿勒泰人,硕士研究生,主要研究方向为沼气工程方向机械。E-mail:martin962464@163.com。

通信作者:郭占斌,博士,教授,主要从事水稻插秧机研究。E-mail:329984136@qq.com。

展,带动了卵形反应器的推广^[10]。卵形反应器也属于典型的薄壁旋转壳体,图 2 为卵形反应器的工程应用实例,国内外学者和工程技术人员根据这一特点,展开大量研究。



图2 卵形反应器工程实例

Zingoni 等对卵形反应器的应力和变形情况作了详尽的分析,研究了开口薄壁球壳在不同的对称荷载、不同边界和变化的壳几何参数,特别是壳厚对壳中峰值应力的影响作用^[11-12];Pavlovic 等分析了边界条件、材料因素对卵形反应器结构性能的影响^[13]。

而国内对卵形反应器的研究和应用起步相对较晚,20 世纪 80 年代至今,陆续有学者对卵形反应器的应力等方面进行研究,为后人对卵型反应器结构设计提供了重要参考。姜忻良等在大型沼气工程中对卵形反应器设计和施工中的诸多问题进行了讨论,认为施加合理的预应力,使池壁环向竖向均受压,抵消了大部分由于其他荷载在池壁下部产生的竖向弯矩,从而使反应器处于有利的受力状态^[14];宋红玉则运用大型通用有限元计算软件 ANSYS,采用参数化建模的方法对多种规格的卵形反应器在静力荷载作用下的内力进行对比分析,发现反应器半径越小越经济^[15];陈华明等则在进行有限元分析后,明确指出在动力作用下卵形反应器的 2 个应力危险区域,使技术人员对卵型反应器的结构设计获得重要参考^[16]。

虽然圆柱形反应器结构形式简单,但空间结构内部各构件的缺陷带来混合的局限性,导致混合效果并不理想^[17];与传统形式的圆柱形反应器相比,卵形反应器受力性能较好,而且形状特征更能满足沼气工程技术特点的要求,所以在发酵过程中日益受到重视^[18]。2 种反应器特点对比如表 1 所示。目前,我国的反应器发展尚处于初期阶段,可供设计参考的试验资料比较匮乏,相关规范对设计的指导也明显滞后,对于不同混合原料厌氧发酵的反应器装置结构设计方面存在些许不足,因此,以提高混合效果与增加反应器原料适应性为目的,

对反应器的结构特性等参数需进一步深入研究。

2 CSTR 结构

CSTR 是在常规厌氧反应内安装了搅拌装置,使发酵原料和微生物处于完全混合状态,活性区域面积与常规厌氧反应器相比大大增加,因而其效率有明显提高,而且非常适合总固体浓度(total solid, TS)为 10% ~ 12% 的高浓度混合原料发酵^[19]。同时 CSTR 装置占地面积较小,可节省 30% 的占地面积;如若应用在工程中,其建设周期缩短近 50%。

CSTR 运行过程中,物料稳定连续进入反应器,并立即与反应物料完全混合,反应器内的混合液连续排出^[20]。对于厌氧反应器的设计要使反应器体积最小化的同时产生最大体积的甲烷^[21]。但是目前的 CSTR 结构还存在些许不足,不能完全达到理想状态。

2.1 高径比

反应器几何特征主要为反应器形状和高径比(H/D)^[22]。 H/D 作为反应器最主要的结构特征参数,对混合效果的提高具有重要意义。

不同的高径比对不同反应器内混合效果的提高作用不同。Meironke 发现高径比越大,轴向温度差异越明显^[23]。但是黄英超等在 20 ℃ 室温的实验室条件下对牛粪进行批量式高浓度厌氧发酵,发现不同高径比未对牛粪高浓度厌氧水解酸化过程产生影响^[24]。同时芦汉超认为卵形反应器流态特征也不受高径比影响^[25]。因此,须要针对不同反应器的高径比进行工艺优化设计,以期达到最佳设计方案。

高径比对混合效果产生的影响也大不相同,但是在一定范围内增大高径比,可提高混合效果。一般标准式发酵罐的 H/D 为 1.75 ~ 3.00,常用的为 2.0 ~ 2.5^[26]。陈余认为沼气工程中以微生物为细菌的发酵罐, H/D 为 3.0 左右混合效果最佳^[27];田小峰等运用计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)进行实验室条件下发酵罐内流场的模拟分析后,认为反应器的 $H/D > 7$,混合效率才开始逐渐下降^[28]。因此, H/D 对不同反应器内原料混合效果的影响还须进行深入研究。

2.2 挡板

目前,国内外对于挡板的研究大部分集中在侧壁直立挡板^[29],对于反应器底部挡板的研究少且单一,主要包括十字型和曲线型 2 种,在底部挡板条件下的流场特性、混合效果和能耗方面的研究并不多^[30]。同时关于挡板系数对搅拌效果影响的研究较多,但挡板安装方式对搅拌效果和混合时间的影响较少^[31],大多是从试验中得出数据并进行优劣比较。因此,须要进行深一步的研究探讨。

大多数学者都认同在湍流搅拌过程中,传统的搅拌器存在削弱混合效果的“圆柱状回转区”这个观点^[32]。季浪宇认为在反应器侧壁增设挡板得以消除这种现象^[33]。但同时,固体悬浮的过程中,这种侧挡板容易形成固体颗粒堆积在反应器底部,刘志炎等认为改善这种情况可采用底部挡板,是因为挡板周边区域流速较慢,可以在很大程度上消除搅拌作用引起的漩涡区^[34]。

许卓等则借助 Fluent 软件 $\kappa - \varepsilon$ 湍流模型,分别对标准、倾斜挡板的工作状态进行了数值模拟^[35],得出以下结论:挡

表 1 2 种反应器特点对比

反应器形式	优点	缺点	样图
圆柱形反应器	设计简单,便于操作	混合不均匀,存在低速死区,易产生结壳	
卵形反应器	水力条件好,搅拌均匀,清洗方便,能耗低,沼气产量高	维护费用高,结构和施工较复杂,造价昂贵	

板系数一定时,安装方式对直叶涡轮桨的功耗变化较斜叶涡轮桨(PBT)变化小,倾斜挡板的功耗均比标准挡板功耗小,底部十字挡板功耗较大。

3 混合方式

物料混合的过程极其复杂,不同的物料特性对混合效果都有很大的影响^[36]。在 CSTR 内部混合厌氧发酵过程当中,秸秆浮渣与微生物产生的结壳对产气效率与运行稳定性产生直接影响,而搅拌是使微生物与发酵原料混合充分的有效手段^[37]。搅拌不仅能够使反应器内的组成变得更均匀,改变物相的关系,还能促进物理和化学反应^[38]。添加搅拌装置可以将厌氧发酵反应的混合反应周期缩短,因此对混合技术进行一定的分析研究,包括混合方式与混合速率这 2 个主要方面。

3.1 机械搅拌

CSTR 内,通常以搅拌作为主要混合方式。机械搅拌通过设置搅拌周期、搅拌持续时间和搅拌强度等参数而达到最佳混合效果,但同时机械搅拌运行过程中存在不易维修和能量消耗较大的弊端^[39]。因此在有机物厌氧发酵产气过程中,要根据发酵底物的特点选择合适的混合方式。目前国内外 CSTR 常用的混合方式主要为机械搅拌与气液回流搅拌。

3.1.1 立式双轴搅拌 立式双轴搅拌是典型的机械搅拌方式。目前,单轴立式搅拌器的研究较为成熟,但是其搅拌效率并不够高^[40]。因此,国内外学者为提高混合效果对单轴立式搅拌进行诸多形式的研究以及改进。Thibault 等利用试验和数值模拟的方法深入分析过一种立式同心双轴组合式搅拌器,它的双轴不仅可以对向旋转、交叉搅拌,还能有效避免搅拌死角的出现^[41];李永纲等针对低罐形的立式圆筒储罐提出了多轴立式搅拌方式,而且认为多轴同时搅拌,降低了单个搅拌桨对功率的要求,成本远低于单轴立式和侧式搅拌^[42]。目前而言,立式多轴组合式搅拌器在提高混合效果方面具有诸多优势,因此具有广阔的应用前景。

3.1.2 侧入式搅拌 侧入式搅拌是指搅拌轴从罐体侧面置入的搅拌方式。在消耗同等功率的条件下,侧入式搅拌效果最佳。常安装在特大型厌氧消化池内,国外沼气工程已广泛应用。国内外学者对侧式搅拌不同因素进行详细的分析讨论。Wesselingh 对不同尺寸的单个侧入式搅拌器下搅拌槽内的混合时间进行了试验研究,模拟分析了桨型、推进桨偏角、雷诺数等不同条件下的流场和混合时间,模拟结果与试验测量结果吻合^[43];梁家勇等对双层侧进式搅拌槽固液流动进行研究,结果表明,双层侧进式搅拌器达到临界悬浮转速时的固相悬浮高度为 0.67 H(H 为罐体高度),比单层侧进式搅拌高

37%^[44];陈佳等在对大型侧入式搅拌进行数值模拟分析,结果表明,搅拌桨垂直向下 5.71°或水平偏转 11°安装能明显改善流体运动^[45]。然而,目前国内外对侧入式搅拌的研究分析相对较少,并且诸多学者对其研究多集中在数值模拟方面,关于工程实际应用中大中的应用仍多以经验设计为主要依据,因此需进一步试验研究。

3.2 气液回流搅拌

目前,国内外学者针对机械搅拌对污泥发酵产酸的影响研究较多,而对于气液回流搅拌对污泥发酵产酸的影响研究较少,气液回流搅拌相比于机械搅拌能增强反应器内混合传质效果^[46]。此外,气液适当回流还能够增加原料利用率,提高厌氧发酵效率,增强系统运行稳定性。气液回流搅拌可分为沼气回流搅拌与沼液回流搅拌。

3.2.1 沼气回流搅拌 Du 等研究气体诱导搅拌对甲烷合成水合物生成速率的影响,结果表明,水合物形成速率随着十二烷基硫酸钠(sodium dodecyl sulfate, SDS)浓度从 0 增加到 5×10^{-4} mol/L,约增加 4 倍^[47]。这主要是由于增大了气液接触面积^[48],从而提高了甲烷水合物形成速率。

沼气搅拌会更容易在过度搅拌时通过形成的细小气泡将活性污泥和疏水基物质带到反应器表面,进而形成浮渣层^[49]。此外,由于能够累积更多的气体,相比于其他形状的反应罐,圆柱形反应罐更容易形成浮渣层。

3.2.2 沼液回流搅拌 江皓等以鸡粪和玉米秸秆为混合原料进行干式厌氧发酵研究,结果表明,增加沼液回流后甲烷产量提高了 1 倍以上,实现了 99.99% 的产甲烷潜力^[50];Michelea 等利用 CSTR 进行连续性固态厌氧发酵时发现,沼液回流反应器内甲烷的质量分数超过 80%^[51];张成等在研究回流比对剩余污泥厌氧发酵产酸影响的结果显示,调节回流比为 300% 时挥发性脂肪酸总量(volatile fatty acid, VFA)产量高于不回流搅拌和回流比为 500%,由此提出过度提高回流比并不能提高产气效率^[52];同时邓玉营等经试验证明,过高的回流比会导致氨氮积累,导致发酵产气量下降^[53]。这主要是由于过度回流会使发酵过程中可溶性轻金属盐离子浓度升高,氨氮浓度升高,胶体物质增加等^[54]。

由此可见,在沼气工程中运用沼液回流技术能促进物料和温度的均匀,提高沼气的产气效率。但是沼液的浓度过低或过高,又会影响沼气发酵的正常进行。因此目前须要针对回流搅拌沼液的浓度进行深度研究。

综合对比分析 4 种搅拌方式的优缺点如表 2 所示。

3.3 搅拌速率

在运用机械搅拌的厌氧发酵过程中,搅拌速率对有机物

表 2 4 种搅拌类型方式的优缺点对比

序号	搅拌方式	优点	缺点	适用范围
1	立式双轴搅拌	搅拌时间与转速可控,作用半径大,搅拌效果好	实际生产中,制造成本较高;能耗较大,不易密封	适应湿式发酵、大型搅拌等
2	侧式搅拌	搅拌桨直径小,搅拌功率小,节省能耗	轴封困难并容易泄漏,维修保养成本较高 ^[55]	适应容器体积较大、物料黏度大的反应器
3	沼液回流	作用范围较大,大幅度提高产气率	设备密封性要求较高,费用大	适应中小试验条件研究,原料适应性强
4	沼气回流	反应器构造简单,机械性磨损小,运行费用低,效率高	设备费用高,气温控制性低,压缩和释放气体技术需求严格	适应低固体浓度物料的搅拌

厌氧发酵产气效率显得尤为重要。研究表明,以适度速率搅拌混合能增加微生物与底物的接触程度,使得反应器内温度场更加均匀,然而搅拌速率过高,则可能会影响微生物的活性,导致产气率下降^[56]。

Stroot 等研究发现,搅拌速率过高会破坏反应器中形成的微生物群的结构,从而破坏厌氧环境中各菌群间的空间分布关系^[57];Kaparaju 等认为搅拌速率调整不当则会减少沼气产量^[58],余亚琴等指明这是由于过大或者不足的搅拌强度会使系统中不同种属厌氧微生物的协同作用受到局部破坏所致^[59]。

同时搅拌过于频繁不仅会导致反应器运行成本的增加,严重情况下,会破坏厌氧反应系统的正常运行。苏宜虎等认为搅拌的速率不能超过 5 m/s ^[60];Cubas 等通过研究人工合成废水厌氧反应过程发现,随着机械搅拌转速的提高,化学需氧量(chemical oxygen demand,COD)的去除效果则随之提高,当搅拌转速为 800 r/min 时混合效果最佳^[61];Rodrigues 等通过研究人工合成废水厌氧反应搅拌过程发现,六叶涡轮式的搅拌强度为 $0\sim 75\text{ r/min}$,搅拌转速为 50 r/min 时混合效果最佳,过滤和未经过滤的物料去除率分别达到 80% 、 88% ^[62]。

合理的搅拌速率有利于物料的分散,多数学者认为厌氧反应的每次搅拌时间不应超过 1 h ,且混合物料最佳的搅拌混合均匀时间以 30 min 左右为宜^[63]。因此,不同混合原料的最佳的搅拌速率必须通过试验进行验证,过高或过低的搅拌速率都会影响反应器的厌氧反应性能。

4 结论与展望

本文综述了国内外全混式厌氧发酵制沼气技术的应用现状,主要以 CSTR 反应器的结构优化进行研究,主要内容包括反应器形式、结构以及混合方式等。

(1)CSTR 形式设计以卵形反应器为主,卵型反应器更有利于底部沉淀物的排除和浮渣的消除,对于提高厌氧发酵混合效果较圆柱形反应器更佳,但是对于卵形反应器的结构具体设计及工程应用还需深入研究。

(2)CSTR 结构中 H/D 与挡板的设计对混合效果的影响极其显著。目前研究表明,根据混合原料的浓度不同,CSTR 的 H/D 范围大不相同,但 H/D 过高将会影响发酵效率;对挡板的诸多研究表明,底部挡板对发酵效果的提高更明显。但对于反应器高径比、挡板增设位置等不同条件还需进行深入研究。

(3)混合技术(搅拌)主要概述目前立式双轴搅拌、侧式搅拌与沼液回流式搅拌 3 种搅拌方式的应用进展,并对搅拌速率进行一定的整理。在一定范围内提升搅拌速率可极大提升产气效果。

目前对于国家重点推进规模化沼气技术而言,国内 CSTR 技术还存在很大的发展空间。例如,其外观设计、反应器内部结构形式,如何对于高浓度混合原料适配的 CSTR 结构进行优化、对其适配搅拌器的规格选型等已成为目前我国沼气产业亟需解决的主要问题。

参考文献:

[1]Bilitewski B,Werner P,Dornack C,et al. Trockenfermentation in der

Landwirtschaft – Welche Substrate und Technikenfinden Anwendung. Anaerobe biologische Abfallbehandlung [D]. Dresden: Dresden University of Technology,2008:235–245.

[2]高 磊. 玉米深加工过程废水处理及回用模式研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.

[3]Audrey Favache, Denis Dochain. Power – Shaping control of an exothermic continuous stirred tank reactor (CSTR) [J]. IFAC Proceedings Volumes,2009,42(11):99–108.

[4]龙良俊. 污泥厌氧消化工艺设计探讨[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版),2006,23(3):256–258.

[5]高 海. 消化池结构分析与应用研究[D]. 天津:天津大学,2009.

[6]黑爱卿. 螺旋挡板激流式生物反应器的流场仿真分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.

[7]郭淑卿. 圆柱形预应力混凝土污泥消化池的受力分析[J]. 中国给水排水,2007,23(5):93–96.

[8]刘传卿,李守才,郑 岩,等. 圆柱形消化池多工况数值模拟分析[J]. 建筑构型,2016,46(增刊1):702–706.

[9]Sutter G, Hanskat C S. Word's largest egg – shaped digesters[J]. Water Environment and Technology,1990,29(40):52–55.

[10]Hurd M K, Hanskat C S. Prestressed concrete sludge digesters: word's largest egg – shaped tanks built in Germany [J]. Concrete Construction,1990,35(1):19–21.

[11]Zingoni A. Parametric stress distribution in shell – of – revolution sludge digesters of parabolic ogival form[J]. Thin Walled Structures, 2002,40(7/8):691–702.

[12]Li Y Y, Noike T, Katsumata K, et al. Performance analysis of the full scale egg – shaped digester in treating sewage sludge of high concentration[J]. Water Science and Technology,1996,34(3/4):483–491.

[13]Pavlovic M N, Zingoni A, Geckeler J W, et al. Edge disturbances in spherical shells with varying geometric parameters and support types, with particular reference to the thickness on the peak stress [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers,1991,91(3):495–516.

[14]姜忻良,白玉平,高 海. 无粘结预应力卵形消化池的受力分析及设计[J]. 特种结构,2005,22(2):19–22.

[15]宋红玉. 卵形反应池结构优化分析[C]//中国土木工程学会水工业分会结构专业委员会. 中国市政工程华北设计研究院. 中国土木工程学会水工业分会结构专业委员会四届四次会议论文集,2007:8.

[16]陈华明,范苏榕,姜雷钢. 预应力蛋形消化池流固耦合有限元分析[J]. 地震工程与工程振动,2009,29(2):184–190.

[17]苏 婕,吴胜举,胡淑芳,等. 圆柱形反应器声场分布研究[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版),2009,37(6):35–38.

[18]薛晓荣. 卵形消化池结构设计[J]. 特种结构,2001,18(2):12–15.

[19]费新东,冉奇严. 厌氧发酵沼气的工艺及存在的问题[J]. 中国环保产业,2009(12):30–34.

[20]代 璐. 高含固污泥厌氧消化特性及硫控制技术[D]. 西安:西安建筑科技大学,2016.

[21]李梦洁. 玫瑰秸秆厌氧发酵产沼气特性试验研究[D]. 上海:东华大学,2017.

[22]饶彤彤. 好氧颗粒污泥现场中试系统设计建造和运行[D]. 杭州:浙江工业大学,2011.

- [23] Meironke H. Thermo fluidynamics of the multiphase flow inside Cylindroconical fermenters with different scales [C]// MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, 2014, 18: 5.
- [24] 黄英超, 王丽丽, 王忠江. 不同高径比反应器对牛粪高浓度水解酸化特性的影响 [J]. 农机化研究, 2008 (9): 125 – 127.
- [25] 芦汉超. 机械搅拌厌氧反应池流态研究 [D]. 北京: 清华大学, 2015.
- [26] 樊晓宇. 大型发酵罐设计中值得注意的问题 [J]. 医药工程设计, 2011, 32 (5): 1 – 4.
- [27] 陈 余. 浅谈发酵罐的选型设计 [J]. 化学工程与装备, 2011 (10): 86 – 89.
- [28] 田小峰, 张建成, 刘献玲, 等. CFD 在气升式环流反应器结构优化上的应用 [J]. 现代化工, 2013, 33 (7): 121 – 124.
- [29] Zhao Y C, Li X Y, Cheng J C, et al. Experimental study on liquid – liquid macromixing in a stirred tank [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2011, 75 (10): 5952 – 5958.
- [30] Luo J, Lv J M, Shen R C. Effects of baffle on the mixing effectiveness of a crossflowjet mixer [J]. Chemical Reaction Engineering and Technology, 2006, 22 (3): 199 – 205.
- [31] 蒋展志, 刘雪东, 李 岩, 等. 底部对数螺线挡板对搅拌釜流场特性影响的数值模拟 [J]. 常州大学学报 (自然科学版), 2013, 25 (2): 67 – 71.
- [32] Saeed T, Al – Mueyed A, Afrin R, et al. Pollutant removal from municipal wastewater employing baffled subsurface flow and integrated surface flow – floating treatment wetlands [J]. Journal of Environmental Sciences, 2014, 26 (4): 726 – 736.
- [33] 季浪宇. 大颗粒固液两相流碰撞反弹规律及磨损特性研究 [D]. 杭州: 浙江理工大学, 2017.
- [34] 刘志炎, 王星星, 刘雪东. 椭圆底封头异形挡板搅拌釜的混合性能分析 [J]. 化工机械, 2017, 44 (6): 619 – 625.
- [35] 许 卓, 赵恒文, 郑建坤. 立式搅拌槽中挡板结构对搅拌能耗影响的数值模拟 [J]. 水电能源科学, 2013, 31 (5): 162 – 165, 197.
- [36] Gu D Y, Liu Z H, Li J, et al. Intensification of chaotic mixing in a stirred tank with a punched rigid – flexible impeller and a chaotic motor [J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2017, 122: 1 – 9.
- [37] 季立仁, 李布青, 葛 昕. 鸡场沼气工程设计若干问题的探讨 [J]. 中国沼气, 2016, 43 (1): 68 – 71.
- [38] 蔡雅婷. 多相搅拌反应器内桨型对传质的影响 [D]. 北京: 北京化工大学, 2016.
- [39] Evans W T, Cox C, Gibson B T, et al. Two – sided friction stir riveting by extrusion: a process for joining dissimilar materials [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2016, 23: 115 – 121.
- [40] 李永纲, 黄雄斌. 立式圆槽内多轴搅拌器固 – 液悬浮性能 [J]. 过程工程学报, 2012, 12 (2): 181 – 186.
- [41] Thibault F, Tanguy P A. Power draw analysis of coaxial mixer with Newtonian and non – Newtonian fluids in the laminar regime [J]. Chemical Engineering Science, 2002, 18 (57): 3861 – 3872.
- [42] 李永纲, 黄雄斌. 立式圆槽内多轴搅拌器固 – 液悬浮性能 [J]. 过程工程学报, 2012, 12 (2): 181 – 186.
- [43] Wesselingh J A. Mixing of liquids in cylindrical storage tanks with side – entering propellers [J]. Chemical Engineering Science, 1975, 30 (8): 973 – 981.
- [44] 梁家勇, 周勇军, 卢 源, 等. 双层侧进式搅拌槽固液流动研究 [J]. 轻工机械, 2015, 33 (4): 35 – 38.
- [45] 陈 佳, 肖文德. 大型侧进式搅拌釜内湍流流场的数值模拟 [J]. 化学工程, 2013, 41 (8): 38 – 42, 70.
- [46] 傅国志. 搅拌和沼液回流对麦秸序批式厌氧消化性能影响的试验研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2010.
- [47] Du J W, Li H J, Wang L G. Cooperative effect of surfactant addition and gas – inducing agitation on methane hydrate formation rate [J]. Fuel, 2018, 230: 134 – 137.
- [48] Goshika B K, Majumder S K. Entrainment and holdup of gas – liquid – liquid dispersion in a downflow gas – liquid – liquid contactor [J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2018, 125: 112 – 123.
- [49] 杨安逸. 沼气搅拌式固定床的工艺及其生物膜特性 [D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2015.
- [50] 江 皓, 沈 怡, 聂 红, 等. 鸡粪与玉米秸秆的干式厌氧发酵实验研究 [J]. 可再生能源, 2018, 36 (5): 639 – 643.
- [51] Michelea P, Giulianaab D, Carloc M, et al. Optimization of solid state anaerobic digestion of the OFMSW by digestate recirculation: a new approach [J]. Waste Management, 2015, 35: 111 – 118.
- [52] 张 成, 黄天寅, 冯延申, 等. 回流比对剩余污泥厌氧发酵产酸的影响 [J]. 环境工程学报, 2016, 10 (8): 4529 – 4533.
- [53] 邓玉营, 黄振兴, 阮文权, 等. 沼液回流比与有机负荷对秸秆厌氧发酵特性的影响 [J]. 农业机械学报, 2016, 47 (11): 198 – 206, 133.
- [54] Hu Y, Shen F, Yuan H, et al. Influence of recirculation of liquid fraction of the digestate (LFD) on maize over anaerobic digestion [J]. Biosystems Engineering, 2014, 127: 189 – 196.
- [55] 刘 刘. 高浓度物料沼气发酵过程混合搅拌及其影响因素的研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2009.
- [56] Weglowski M S, Pietras A. Friction stir processing analysis of the process [J]. Archives of Metallurgy and Materials, 2011, 56 (3): 779 – 788.
- [57] Stroot P G, McMahon K D, Mackie R I, et al. Anaerobic codigestion of municipal solid waste and biosolids under various mixing conditions——I. Digester performance [J]. Water Research, 2001, 35 (7): 1804 – 1816.
- [58] Kaparaju P, Buendia I, Ellegard L, et al. Effects of mixing on methane production during thermophilic anaerobic digestion of manure: lab – scale and pilot – scale studies [J]. Bioresource Technology, 2008, 99 (11): 4919 – 4928.
- [59] 余亚琴, 吴义锋. 蓝藻厌氧发酵产沼气机械搅拌工艺优化及中试验证 [J]. 农业工程学报, 2014, 30 (22): 253 – 259.
- [60] 苏宜虎, 陈晓东, 马洪儒. 搅拌对沼气发酵的影响 [J]. 安徽农业科学, 2007, 35 (28): 8961 – 8962, 9004.
- [61] Cubas A, Foresti E, Rodrigues J D, et al. Influence of liquid – phase mass transfer on the performance of a stirred anaerobic sequencing batch reactor containing immobilized biomass [J]. Biochemical Engineering Journal, 2004, 17 (2): 99 – 105.
- [62] Rodrigues A D, Ratusznei S M, Camargo E M, et al. Influence of agitation rate on the performance of an anaerobic sequencing batch reactor containing granulated biomass treating low – strength wastewater [J]. Advances in Environmental Research, 2003, 7 (2): 405 – 410.
- [63] 张庆华. 纤维质高效水解关键技术及其在木薯燃料乙醇产业中的应用 [D]. 无锡: 江南大学, 2012.