

超声波碱解预处理促进市政污泥厌氧消化的研究进展

张博^{1,2} 赵益华² 马宁² 马同宇² 季民^{1*}

1. 天津大学环境科学与工程学院 天津 300350

2. 天津生态城水务投资建设有限公司 天津 300467

DOI:

【摘要】随着水资源的需求和利用量逐渐增加,污水处理厂的数量也越来越多,污水处理的副产物剩余污泥的产量也不断增加。剩余污泥中含有大量的多种有机组分,如果不进行妥善处置,会对周边环境带来极大的污染隐患。厌氧消化技术是剩余污泥处理处置领域的研究热点之一,可以实现污泥的无害化、减量化、资源化、稳定化。然而,由于厌氧消化技术存在着水解速率慢、产气效率低等问题,大大的制约了厌氧消化技术的应用和发展。超声波和碱解技术对污泥预处理破解程度较高,可以显著改善污泥的厌氧消化特性。

【关键词】超声波、碱解、预处理、剩余污泥、厌氧消化

0 引言

随着全球经济和工业的不断发展,对水资源的需求也逐渐增加,世界各地建设了越来越多的污水处理厂,以处理在生产生活过程中产生的大量的污水,获得可回用的水资源。作为污水处理的副产物,剩余污泥的产量也不断增加。根据住建部的统计和预测,未来三年内中国污水处理厂剩余污泥的产量将超过六千万吨/年^[1]。剩余污泥中含有大量的多种有机组分,包括碳水化合物、蛋白质、脂肪^[2]等物质,若处理处置不当,极易腐败变质并产生恶臭,此外还包括重金属^[3,4]、难降解有机物^[5]、病原微生物等,如果不进行妥善处置,会对周边环境带来极大的污染隐患。

针对污水处理过程剩余污泥产量多、含大量有机物及有害污染物成分等特点,对剩余污泥的处理处置一直遵循“减量化、稳定化、无害化和资源化”四个原则^[6]。依据该四个基本原则,可经过浓缩脱水、离心/带式/压滤脱水、干化脱水、厌氧/好氧消化、堆肥、焚烧发电、建材制砖、填埋等途径,实现对剩余污泥的处理处置。剩余污泥的稳定化始终是剩余污泥处理处置技术领域研究热点,无论采取哪种处理处置工艺,对于剩余污泥中有机物的处理都是不可避免的,针对剩余污泥的处理,我国相关部门也制定了《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918—2002)^[7],在该标准中也规范了剩余污泥稳定化处理的标准要求。

目前,常用的剩余污泥稳定化处理处置的方法

包括厌氧消化^[8]、好氧消化^[9]、堆肥^[10]、焚烧^[11]等方法。其中,厌氧消化技术能够有效的实现污泥中有机物的稳定化,同时也可以实现污泥减量化、资源化和无害化^[12],因此厌氧消化技术是剩余污泥处理处置领域的研究热点之一。

然而,厌氧消化技术并没有在我国污水处理厂得到大规模的推广应用。数据显示,在2015年6月底,我国的城镇污水处理厂的数量已达到三千八百多个,污水处理能力达1.61亿吨/日(数据来源:住建部)。2015年,年产剩余污泥已超过三千五百多万吨(以含水率80%计)^[13]。然而,由于常规的厌氧消化技术存在着水解速率慢、产气效率低等问题^[14],这些问题大大的制约了厌氧消化技术的应用和发展。

针对活性污泥厌氧消化过程中水解速率慢的问题,常在厌氧消化前对活性污泥进行预处理,主要目的是破解活性污泥中微生物的胞外聚合物(EPS)和细胞壁,使污泥EPS和细胞内的有机物释放进入液相^[50,51]。有机物进入液相后,在液相中存在的水解微生物和相关酶作用下快速水解,大分子有机物转化为小分子有机物,小分子有机物代谢为VFA,从而提高厌氧消化水解酸化过程的效率^[52]。

常用的污泥预处理技术有物理预处理技术、化学预处理技术和生物预处理技术等。物理预处理技术主要包括热水解^[2]、离心破壁^[52]、高压匀化^[53]、研磨法^[54]、超声法^[23]等。化学预处理技术主要包括臭氧预处理^[55]、酸预处理^[56]、碱预处理^[17]等。生物预

处理技术主要是向污泥中投加生物菌剂,该类生物菌剂可以发挥水解酸化的作用,对活性污泥中微生物 EPS 和细胞壁进行水解破壁^[49]。在实际应用中,为了提高污泥预处理的破解程度,降低设备能耗,还常用到两种或更多种联用的方法,如热碱法^[57, 58]、碱解高压法^[59]、热微波法^[60]、电碱法^[61]、超声臭氧法^[62]、超声波碱解法^[63]、超声波酸解法^[56]等。在这些方法中,超声波和碱解技术对污泥预处理破解程度较高,可以显著改善污泥的厌氧消化特性,始终是污泥预处理领域的研究热点。

由于预处理技术对污泥厌氧消化性能的重要影响,近年来,国内外研究人员对超声波和碱解技术进行了大量的研究,包括超声波预处理、超声波反应器的研发、碱解预处理和超声波耦合碱解四个方面。

2.1 超声波预处理

声波按照频率可分为三类,即 20 kHz~100 kHz 的超声波,100 kHz~1 MHz 的高频超声波,和 1 MHz~500 MHz 的诊断超声波,受介质性质影响,超声波在气体和液体介质内传播时以纵波形式传递,而在固体介质中常以横波的形式传递^[64]。当超声波在污泥介质中传播时,受纵波的影响,会产生正压的压缩区域和负压的拉伸区域,在负压的拉伸区域会产生空化气泡,不断膨胀直至爆裂,发生空化作用,当空化气泡爆裂时会产生强烈的流体剪切力,同时会在爆裂点附近有 5000 K 高温和 50 MPa 的高压点,即“热点”,热点周围的水分子容易分解形成 $\cdot\text{OH}$ 和 $\cdot\text{H}$ 自由基^[65]。Wang 等^[66]在研究中发现超声波破解污泥时,破解机制主要是空化作用的流体剪切力,而不是热点和自由基机制。

19 世纪 90 年代超声波首次应用于污泥的破解研究,近年来成为了世界各地科学家在污泥领域的研究热点,目前德国在超声波技术的研究和工业化应用已经位于世界前列^[67],而在我国,超声波技术还处于实验室研究阶段。

低功率、短停留时间条件下超声对污泥脱水能力有提高效果,该条件下细胞裂解程度较低^[68],更强的超声会导致脱水能力恶化。当高功率和长停留时间超声波作用于污泥时,空化作用产生的流体剪切力会破解污泥的微生物细胞和絮体结构,使其胞内聚合物和胞外聚合物都释放进入液相^[69]。

超声预处理可以破解污泥絮体和微生物细胞,因此可以有效的改善污泥水解速率,提高厌氧消化性能。有研究指出,经过 96 秒超声波处理后,污泥

内溶解性化学需氧量(SCOD)溶出率达 30%^[70],30~40 min 超声处理后,SCOD 溶出率达到 50%,90 min 超声条件下,SCOD 溶出率可达 75%~80%^[71],同样,有研究^[72]发现污泥中 SCOD、蛋白质、碳水化合物和 DNA 的浓度随着处理时间的增加而升高。Shimizu 等^[73]发现超声波破解污泥可以提高污泥的厌氧消化性能,在较短的水力停留时间下,产气量明显增加,活性污泥的消化速率和聚合物的水解速率都遵循一级动力学;Chu 等^[74]在研究低功率条件下超声波对污泥的破解情况,研究中发现,虽然低功率超声波仅使污泥中化学需氧量(COD)溶出率有轻微升高,但厌氧消化中产气量大约提高了 290%;Bougrier 等^[75]研究发现随着超声波功率增加,甲烷产量随之增加,但当功率高于 7000 kJ/kg-TS 时,产气量基本持平,证明存在最优功率参数。Tiehm 等^[76]研究了不同频率超声波对污泥的处理效果,结果表明,污泥厌氧消化时间缩短了 14 天,VS 降解率提高了 4.5%,甲烷产率有显著增加。Pilli 等^[51]研究了超声对不同 TS 污泥的破解情况,发现经超声波处理后的污泥相比对照组 VS 降解率由 51.4%提高到了 60.1%。

科学家已经将超声波预处理污泥技术在 50000~750000 人口当量的污水处理厂工业化生产中进行了工业化性能测验,发现可以显著改善挥发性固体(VS)去除率(40%~55%)和产气量(50%)^[77]。Xie 等^[78]报道了一个新加坡的超声波预处理改善厌氧消化性能的工业化应用,厌氧消化停留时间 30 天,6 个月运行后发现预处理后产气量相比对照组提高了 45%,污泥固体去除率提高了 30%。Hogan 等^[79]报道了一个在污水处理厂的超声反应器工业化应用,发现 TS 去除改善了 60%,VS 去除改善了 70%,产气量增加了 50%。Gogate 等^[80]报道了一种低功率槽式超声反应器,包括 18 个超声波换能器探头均匀分布在六个侧壁上,可以获得更均匀的超声波声场。德国 Nickel 等^[81]报道了一种大功率探头式超声波反应器的工业化应用,可以对污泥进行高效的破解。

对于超声波预处理引入厌氧消化工艺,许多科学家也进行了经济性评价。Salsabil 等^[82]研究了超声波预处理和随后的生物消化(好氧和厌氧)消耗能量的总成本,结果表明,超声处理在好氧消化和厌氧消化中分别降低了 48%和 44%的成本。对于超声波预处理成本经济性的评价不但和甲烷产量和固体废物减量密切相关,还和 H_2S 去除、脱水、运输和

填埋密切相关。Dhar 等^[83] 在研究中指出当超声波比能耗输入为 1000 kJ/kg-TSS 时,在经济上是可行的,处理每吨干污泥可以节省 54 美元,但当比能耗输入为 5000 kJ/kg-TSS 和 10000 kJ/kg-TSS 时,处理每吨干污泥要亏损 14 和 112 美元,经济性不可行。

综上所述,目前对于超声波预处理工业化应用的尝试很多,但是对于超声波预处理工艺的最优工艺路线并没有完善和统一,需要针对污泥的特性,开发适合的超声波反应器,通过试验运行优化相关参数,才能获得经济收益。

3.2 超声波反应器

超声波反应器由于其特殊声学物理和化学特性而被广泛用于各种应用^[80]。作为超声波反应器最重要的特征,空化现象可以被定义为微气泡的出现,生长和爆裂。在选用或设计研发超声波反应器破解污泥时,需要选择适当的频率、功率强度、换能器数量及换能器在反应器中的布置类型,合适的换能器布置可以优化空化活性、声场强度和超声反应器效率等。

超声波反应器有几种不同类型的换能器,通常都应用于实验室规模的研究。超声波探头式反应器是最常见的一种超声波反应器。Csoka 等^[84] 报道了一种探头式超声波反应器,如图 1-1 所示。超声波换能器为圆柱形探头,部分探头浸没到破解液体中,直接利用声波辐射液体,探头直径常在 5 mm~1.5 cm 之间,该超声波反应器辐射区域较小,但探头直接接触液相内部,辐射强度大,辐射能可以高效利用,但是探头辐射面积有限,辐射角度不均匀,长时间应用容易腐蚀探头,较难满足大规模应用需求,常用于实验室研究。

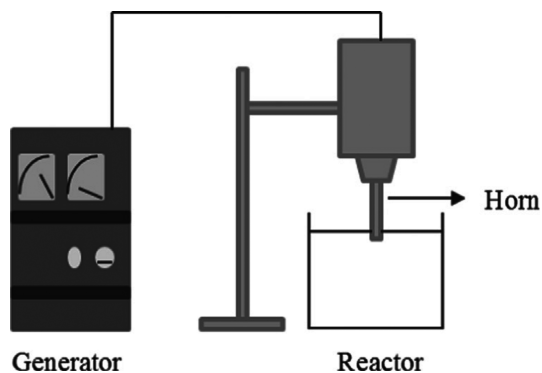


图 1-1 探头式超声波反应器

Bhirud 等^[85] 报道了一种变幅杆式超声波反应器,如图 1-2 所示。整个变幅杆探头浸没在槽式反

应器中,相比传统探头式超声波反应器具有了更大的辐射面积,并具有更高的能量利用效率。

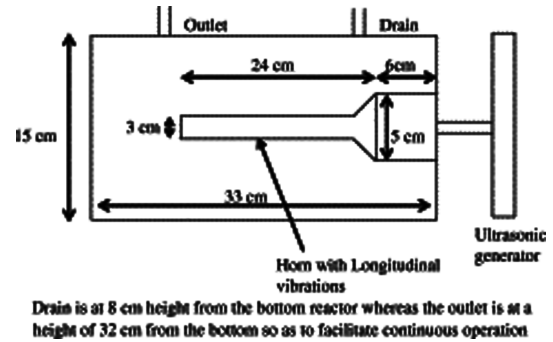


图 1-2 变幅杆式超声波反应器

槽式反应器^[86, 87] 是另一种应用较为广泛的超声波反应器,如图 1-3 所示。换能器常位于反应器槽的底部,可以将破解的液体放置到槽式反应器的槽体内进行超声破解,也可以将破解液体放入烧杯中并将烧杯放置到槽体的声波传感液体中。槽式反应器的操作简洁灵活,反应器换能器功率较低,能实现多换能器布置,因此辐射更均匀,辐射区域较大。

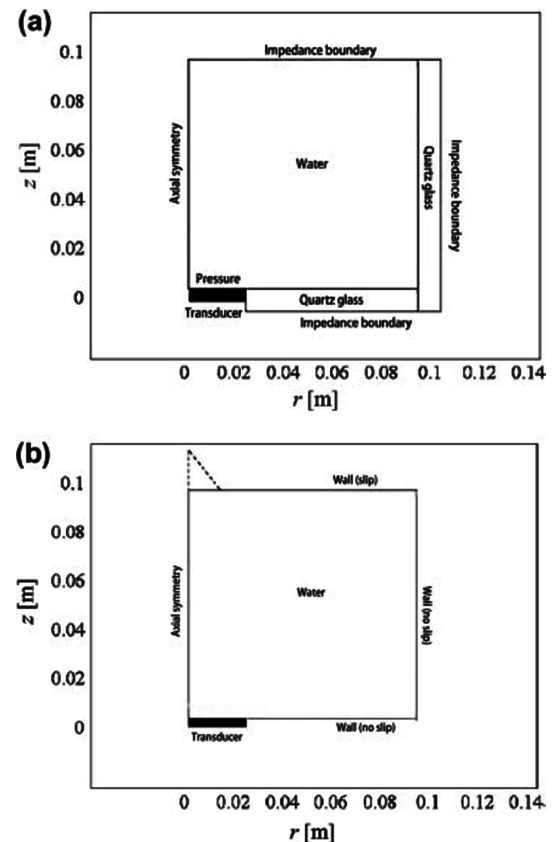


图 1-3 槽式超声化学反应器

Nickel 等^[81] 在研究中报道了一种中试超声波反应器,如图 1-4 所示,共计 12 个探头均匀分布于 4 个侧壁,最大功率为 3.6 kW,体积为 1.3 L,可以

有效改善污泥厌氧消化性能。该反应器又称管道式超声波反应器,换能器常置于管道内侧或外侧,液体流经管道时,可直接接收超声波的破解作用。反应器考虑到了流量的问题,液体连续流经破解腔体的设计使其具备满足工业需求的条件,然而当换能器置于管道内侧时,仍容易腐蚀探头,置于管道外侧时,增加了能耗损失,同时如果流速过快,不能高效接收超声辐射,流速过慢,设计流量不能满足。

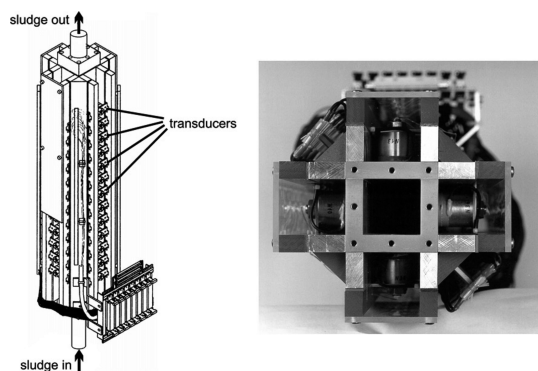


图 1-4 中试超声波反应器

Gogate 等^[88, 89]先后设计了双频率、三频率多探头超声波槽式反应器,反应器如图 1-5 所示,双频反应器上有 6 个不同频率的探头均匀布置于双侧壁,三频超声波反应器共计 18 个不同频率的探头均匀布置于 6 角侧壁,该三频超声波反应器在工业化应用上进行了尝试,结果表明,相比传统探头式超声波反应器,同等功率下多探头式反应器的声场强度更大,声场分布更均匀,能量利用效率更高。

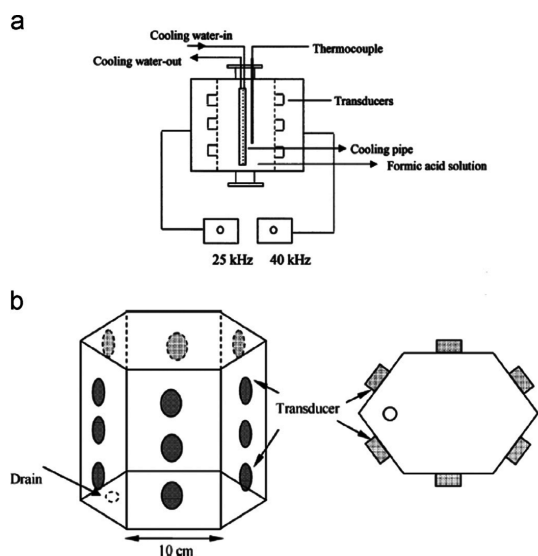


图 1-5 双频(a)、三频(b)槽式超声波反应器

Nickel 等^[81]研发了一种大规模探头式超声波反应器,如图 1-6 所示,体积为 29 L,共计 5 个频率

20 kHz、功率 2 kW 的超声波换能器,停留时间为 30 s,主尺寸为 1300 mm * 1200 mm * 400 mm,可以根据需要增减超声换能器数量,也可根据需要增加设备数量,污泥从设备下端进入,上端流出。该设备设计思路为大功率超声和短水力停留时间,可实现较优的破解效果和较大的设计流量,然而探头直接浸入液体中,受液体冲压及液体腐蚀性影响,探头容易腐蚀。

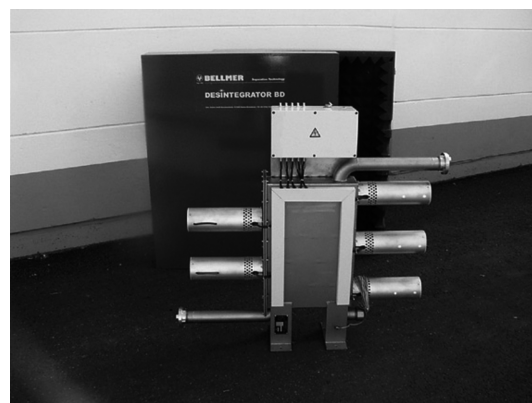


图 1-6 大规模探头式超声波反应器

Gogate 等^[90]总结了超声波反应器的类型,包括探头式超声波反应器和槽式超声波反应器,并总结了如何选择超声波反应器的频率、功率、几何结构、超声波反应器类型、破解时间等参数,最后给出了结论和建议:

(1)超声波频率应根据具体应用的期望效果选择,即超声波频率的破解机理主要是化学效应,较低频率时主要是物理破解;

(2)单个传感器不适宜于较大规模的超声反应器,更推荐使用更大辐射面积的多个换能器的超声反应器,较大辐射面积可以实现更多的活性空化区域;

(3)如果是利用超声波破解液体,最好选择低蒸汽压力、低粘度和较高的表面张力的液体,以便最大化空化强度;

(4)超声反应器中液体的流动特性对于选择超声反应器几何结构和换能器位置十分重要,液体可以采取连续式流动破解;

(5)对于大规模超声反应器的设计,具有管状或六边形的几何形状是扩大规模的关键,推荐使用多个换能器,可以节约能耗。

Asgharzadehahmad 等^[67]总结了超声反应器的功能、优点和缺点,总结得出:

(1)对于不同的超声波应用,必须根据不同的处

理要求选择适当的超声波反应器,包括超声波探头式、槽式反应器、变幅杆式和多换能器反应器;

(2)不同类型的超声波反应器适用于不同的情况,超声波槽式反应器处理效果更均匀,但能量较低,且容易衰减,不能应用于需求稳定能量的情况;超声波探头式反应器可以将能量聚焦在特定区域,但辐射区域较小,辐射不均匀;

(3)单换能器超声波反应器不适宜于工业化应用,对于大型超声波系统,推荐使用多换能器超声波反应器,可以对破解区域有足够的空化效应。

综上所述,超声波破解污泥预处理装置依据换能器探头类型和布置方式,分为探头式和槽式两种,探头式反应器换能器探头浸没于液面下,该装置声强大,处理效果好,但处理量有限,探头易腐蚀,而槽式反应器将换能器探头置于反应器底部,该种装置能耗较小,处理量较大,应用简单方便。根据 Gogate 和 Asgharzadehahmad 的研究结论,宜选用低频率、槽式、多换能器均匀布置、连续式流动破解、管状结构的大规模超声反应器,可以获得更高的能量利用效率。

4.3 碱解预处理

碱解是污泥预处理技术一种极为常用的方法,有研究显示,相比酸预处理,碱解预处理对污泥厌氧消化过程中水解速率提升更明显^[91]。当碱作用于污泥时,较高的 pH 可以使微生物细胞渗透压失衡而破裂,同时,碱性物质可以和污泥中微生物细胞的胞外聚合物(EPS)和细胞壁上的脂类物质发生反应,使其膨胀肿大发生皂化形变,EPS 和胞内的有机物质从而释放进入液相^[53, 92]。

碱解预处理可以有效破解污泥,释放有机物进入液相从而促进其水解,进而改善污泥的厌氧消化性能^[93, 94]。Raja 等^[95]将碱解应用于污泥预处理,发现通过添加 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 或 NaOH 可以提高污泥厌氧消化的气体产率和有机物质的去除率。Uma Rani 等^[96]在污泥预处理的研究中,发现 KOH 和 NaOH 比 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 具有更好的 COD 破解效果和更高的产气量。Kim 等^[93]同样证实了 KOH 和 NaOH 对污泥 COD 的破解效果比 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 要好, KOH 、 NaOH 、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 可以使污泥 COD 溶出率分别达到 39.8%、36.6%、10.8% 和 15.3%。虽然大部分的文献中都证实了 NaOH 对污泥的破解效果确实优于 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,然而,这些文献中并没有对不同碱种类对厌氧消化产气的影响进

行分析。Zhang 等^[97]在研究中发现, KOH 和 NaOH 在厌氧消化过程中获得了比 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 更低的甲烷产量和较高的 VFA 浓度,结合 KCl 、 NaCl 和 CaCl_2 的试验,证实了 Na^+ 和 K^+ 对厌氧消化过程存在抑制,因此 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 获得了更好的厌氧消化结果。同时,污泥厌氧消化后的沼渣常被利用作为土地回收肥料,如果利用 KOH 和 NaOH 处理污泥,易溶解的 Na^+ 和 K^+ 会使土壤盐碱化,透气性降低,导致土壤板结恶化^[98]。并且 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的价格相比 NaOH 要低 8~10 倍^[99],因此在生产性试验时, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 比 KOH 和 NaOH 更适合。

5.4 超声耦合碱解预处理

超声波和碱解对污泥破解机理不同,因此当两个方式同时应用时,会获得更好的破解效果^[9]。Park 等^[100]在研究中得出结论,相比单独超声波和碱解预处理,超声波耦合碱解预处理可以获得更好的破解效果。Zawieja 等^[101]发现,将超声波和碱解联用,可以有效提高破解效果,同时相应的降低了超声波预处理所需的能耗以及需要的 NaOH 的量。Kim 等^[102]得出结论,单独超声波和碱解可以获得最大 50% 的 COD 溶出率,而超声波耦合碱解预处理可以获得 70% 的 COD 溶出率,证实了当超声波耦合碱解时存在协同作用。

5 小结

对污泥进行厌氧消化可以实现污泥“减量化、稳定化、资源化和无害化”的处理处置目的,然而污水厂剩余污泥成分复杂,水解速率慢,厌氧消化性能较差,如果污泥不经过预处理直接进行厌氧消化,往往需要很长的水力停留时间。对污泥进行超声波、碱解预处理可以有效的破解污泥中微生物细胞,使其胞内有机物质释放进入液相,可以提高其水解速率和厌氧消化性能,缩减水力停留时间,提高产气量。

综上所述,下一步关于超声波和碱解预处理的研究方向可基于以下几点开展:

(1)研发新型大规模低能耗超声波反应器,降低反应器能耗和碱消耗成本,同时提高破解效果。新型超声波反应器可参考低频率、槽式、多换能器均匀布置、连续式流动破解、管状结构的大规模超声反应器,可以获得更高的能量利用效率。

(2)碱解污泥可以显著改善厌氧消化性能,但需对碱解影响进行综合评价。需要对不同种类的碱解技术开展深入研究。

(3)超声波耦合碱解时存在协同作用。为降低

反应器能耗和碱消耗成本,同时提高破解效果,宜结合新型低能耗超声波反应器,并耦合碱解预处理技术。

因此,本研究选用超声耦合碱解工艺,对高固污

泥进行预处理,建立厌氧消化小试批试,研究其预处理后的厌氧消化性能,并开展工业化应用试验,对预处理的稳定性和能量平衡进行论证,以期工业化应用的推广提供理论基础。

【参考文献】

- [1]杨春雪. 嗜热菌强化剩余污泥水解及短链脂肪酸积累规律研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2015.
- [2]Zhang J, Xue Y, Eshtiaghi N, et al. Evaluation of Thermal Hydrolysis Efficiency of Mechanically Dewatered Sewage Sludge Via Rheological Measurement[J]. Water Research, 2017, 116:34-43.
- [3]Chen Y, Cheng J J, Creamer K S. Inhibition of Anaerobic Digestion Process: A Review[J]. Bioresource Technology, 2008, 99(10):4044-4064.
- [4]Ahmed M J K, Ahmaruzzaman M. A Review On Potential Usage of Industrial Waste Materials for Binding Heavy Metal Ions From Aqueous Solutions[J]. Journal of Water Process Engineering, 2016, 10: 39-47.
- [5]Stiborova H, Kolar M, Vrkoslavova J, et al. Linking Toxicity Profiles to Pollutants in Sludge and Sediments[J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, 321:672-680.
- [6]王平. 热水解厌氧消化工艺的分析应用探讨[J]. 给水排水, 2015(01):33-38.
- [7]丁瑾. 电化学-生物法结合的污泥稳定化新型技术的研究[D]. 上海交通大学, 2010.
- [8]Yuan H, Yu B, Cheng P, et al. Pilot-Scale Study of Enhanced Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge by Electrochemical and Sodium Hypochlorite Combination Pretreatment[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2016, 110:227-234.
- [9]Jin Y, Li H, Mahar R B, et al. Combined Alkaline and Ultrasonic Pretreatment of Sludge Before Aerobic Digestion[J]. J Environ Sci (China), 2009, 21(3):279-284.
- [10]Kumar Awasthi M, Wang M, Pandey A, et al. Heterogeneity of Zeolite Combined with Biochar Properties as a Function of Sewage Sludge Composting and Production of Nutrient-Rich Compost[J]. Waste Management, 2017, 68:760-773.
- [11]Li R, Teng W, Li Y, et al. Potential Recovery of Phosphorus During the Fluidized Bed Incineration of Sewage Sludge[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 140:964-970.
- [12]晏发春, 汪恂, 张雷. 高温热水解预处理厌氧消化技术实例分析[J]. 中国给水排水, 2016(18): 35-37.
- [13]王涛, 王鑫洁. 污泥厌氧消化技术现状及应注意的问题[J]. 中国环保产业, 2013(05):49-54.
- [14]Duan N, Dong B, Wu B, et al. High-Solid Anaerobic Digestion of Sewage Sludge Under Mesophilic Conditions: Feasibility Study[J]. Bioresource Technology, 2012, 104:150-156.
- [15]Cano R, Pérez-Elvira S I, Fdz-Polanco F. Energy Feasibility Study of Sludge Pretreatments: A Review[J]. Applied Energy, 2015, 149:176-185.
- [16]Pilli S, Yan S, Tyagi R D, et al. Anaerobic Digestion of Ultrasonicated Sludge at Different Solids Concentrations - Computation of Mass-Energy Balance and Greenhouse Gas Emissions[J]. Journal of Environmental Management, 2016, 166:374-386.
- [17]Carrère H, Dumas C, Battimelli A, et al. Pretreatment Methods to Improve Sludge Anaerobic Degradability: A Review[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 183(1-3):1-15.
- [18]Fang W, Zhang P, Zhang G, et al. Effect of Alkaline Addition On Anaerobic Sludge Digestion with Combined Pretreatment of Alkaline and High Pressure Homogenization[J]. Bioresource Technology, 2014, 168:167-172.

- [19]Cho S, Ju H, Lee J, et al. Alkaline—Mechanical Pretreatment Process for Enhanced Anaerobic Digestion of Thickened Waste Activated Sludge with a Novel Crushing Device; Performance Evaluation and Economic Analysis[J]. *Bioresource Technology*, 2014, 165:183—190.
- [20]Braguglia C M, Gianico A, Mininni G. Comparison Between Ozone and Ultrasound Disintegration On Sludge Anaerobic Digestion[J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, 95:S139—S143.
- [21]Sahinkaya S. Disintegration of Municipal Waste Activated Sludge by Simultaneous Combination of Acid and Ultrasonic Pretreatment[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2015, 93:201—205.
- [22]Xu J, Yuan H, Lin J, et al. Evaluation of Thermal, Thermal—Alkaline, Alkaline and Electrochemical Pretreatments On Sludge to Enhance Anaerobic Biogas Production[J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2014, 45(5):2531—2536.
- [23]Cho H U, Park S K, Ha J H, et al. An Innovative Sewage Sludge Reduction by Using a Combined Mesophilic Anaerobic and Thermophilic Aerobic Process with Thermal—Alkaline Treatment and Sludge Recirculation[J]. *Journal of Environmental Management*, 2013, 129:274—282.
- [24]Zhang Y, Zhang P, Zhang G, et al. Sewage Sludge Disintegration by Combined Treatment of Alkaline+High Pressure Homogenization[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 123:514—519.
- [25]Kuglarz M, Karakashev D, Angelidaki I. Microwave and Thermal Pretreatment as Methods for Increasing the Biogas Potential of Secondary Sludge From Municipal Wastewater Treatment Plants[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 134:290—297.
- [26]Zhen G, Lu X, Li Y, et al. Combined Electrical—Alkali Pretreatment to Increase the Anaerobic Hydrolysis Rate of Waste Activated Sludge During Anaerobic Digestion[J]. *Applied Energy*, 2014, 128: 93—102.
- [27]Tian X, Wang C, Trzcinski A P, et al. Interpreting the Synergistic Effect in Combined Ultrasonication - Ozonation Sewage Sludge Pre—Treatment[J]. *Chemosphere*, 2015, 140:63—71.
- [28]Tian X, Wang C, Trzcinski A P, et al. Insights On the Solubilization Products After Combined Alkaline and Ultrasonic Pre—Treatment of Sewage Sludge[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, 29:97—105.
- [29]Pilli S, Bhunia P, Yan S, et al. Ultrasonic Pretreatment of Sludge: A Review[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2011, 18(1):1—18.
- [30]杨洁. 碱和超声波预处理技术促进污泥厌氧消化效能及机理研究[D]. 天津大学, 2008.
- [31]Wang F, Wang Y, Ji M. Mechanisms and Kinetics Models for Ultrasonic Waste Activated Sludge Disintegration[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2005, 123(1—3):145—150.
- [32]Asgharzadehahmadi S, Abdul Raman A A, Parthasarathy R, et al. Sonochemical Reactors: Review On Features, Advantages and Limitations[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 63: 302—314.
- [33]Gonze E, Pillot S, Valette E, et al. Ultrasonic Treatment of an Aerobic Activated Sludge in a Batch Reactor[J]. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2003, 42(12):965—975.
- [34]Dewil R, Baeyens J, Goutvrind R. The Use of Ultrasonics in the Treatment of Waste Activated Sludge[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2006, 14(1):105—113.
- [35]A. Tiehm K N U N. The Use of Ultrasound to Accelerate the Anaerobic Digestion of Sewage Sludge[J]. *Water Science & Technology*, 1997, 11(36):121—128.
- [36]Shimizu T, Kudo K, Nasu Y. Anaerobic Waste—Activated Sludge Digestion—A Bioconversion Mechanism and Kinetic Model[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 1993, 11(41):1082—1091.
- [37]Wang F, Lu S, Ji M. Components of Released Liquid From Ultrasonic Waste Activated Sludge

Disintegration[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2006, 13(4):334-338.

[38]Wang Q, Kuninobu M, Kakimoto K, et al. Upgrading of Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge by Ultrasonic Pretreatment[J]. 1999, 68(3):309-313.

[39]Chu C P, Lee D J, Chang B V, et al. "Weak" Ultrasonic Pre-Treatment On Anaerobic Digestion of Flocculated Activated Biosolids[J]. *Water Res*, 2002, 36(11):2681-2688.

[40]Bougrier C, Carrère H, Delgenès J P. Solubilisation of Waste-Activated Sludge by Ultrasonic Treatment[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2005, 106(2):163-169.

[41]Tiehm A, Nickel K, Zellhorn M, et al. Ultrasonic Waste Activated Sludge Disintegration for Improving Anaerobic Stabilization[J]. *WATER RESEARCH*, 2001, 35(8):2003-2009.

[42]Tyagi V K, Lo S, Appels L, et al. Ultrasonic Treatment of Waste Sludge: A Review on Mechanisms and Applications[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2014, 44(11):1220-1288.

[43]Xie R, Xing Y, Ghani Y A, et al. Full-Scale Demonstration of an Ultrasonic Disintegration Technology in Enhancing Anaerobic Digestion of Mixed Primary and Thickened Secondary Sewage Sludge[J]. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 2007, 6(5):533-541.

[44]Hogan F, Mormede S, Clark P, et al. Ultrasonic Sludge Treatment for Enhanced Anaerobic Digestion[J]. *Water Science & Technology*, 2004, 9(50):25-32.

[45]Gogate P R, Mujumdar S, Pandit A B. Large-Scale Sonochemical Reactors for Process Intensification: Design and Experimental Validation[J]. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2003, 78(6):685-693.

[46]Nickel K, Neis U. Ultrasonic Disintegration of Biosolids for Improved Biodegradation[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2007, 14(4):450-455.

[47]Salsabil M R, Prorot A, Casellas M, et al. Pre-Treatment of Activated Sludge: Effect of Sonication On Aerobic and Anaerobic Digestibility[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2009, 148(2-3):327-335.

[48]Dhar B R, Nakhla G, Ray M B. Techno-Economic Evaluation of Ultrasound and Thermal Pretreatments for Enhanced Anaerobic Digestion of Municipal Waste Activated Sludge[J]. *Waste Management*, 2012, 32(3):542-549.

[49]Csoka L, Katekhaye S N, Gogate P R. Comparison of Cavitation Activity in Different Configurations of Sonochemical Reactors Using Model Reaction Supported with Theoretical Simulations[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2011, 178:384-390.

[50]Bhirud U. Ultrasonic Bath with Longitudinal Vibrations: A Novel Configuration for Efficient Wastewater Treatment[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2004, 11(3-4):143-147.

[51]Gogate P R, Katekhaye S N. A Comparison of the Degree of Intensification Due to the Use of Additives in Ultrasonic Horn and Ultrasonic Bath[J]. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2012, 61:23-29.

[52]Xu Z, Yasuda K, Koda S. Numerical Simulation of Liquid Velocity Distribution in a Sonochemical Reactor[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2013, 20(1):452-459.

[53]Gogate P R, Sivakumar M, Pandit A B. Destruction of Rhodamine B Using Novel Sonochemical Reactor with Capacity of 7.5 L[J]. *Separation and Purification Technology*, 2004, 34(1-3):13-24.

[54]Gogate P R, Mujumdar S, Pandit A B. Sonochemical Reactors for Waste Water Treatment: Comparison Using Formic Acid Degradation as a Model Reaction[J]. *Advances in Environmental Research*, 2003, 7(2):283-299.

- [55]Gogate P R, Sutkar V S, Pandit A B. Sonochemical Reactors: Important Design and Scale Up Considerations with a Special Emphasis On Heterogeneous Systems[J]. Chemical Engineering Journal, 2011, 166(3):1066-1082.
- [56]Cassini S T, Andrade M C E, Abreu T A, et al. Alkaline and Acid Hydrolytic Processes in Aerobic and Anaerobic Sludges: Effect On Total EPS and Fractions[J]. Water Science and Technology, 2006, 53(8):51-58.
- [57]Li H, Li C, Liu W, et al. Optimized Alkaline Pretreatment of Sludge Before Anaerobic Digestion [J]. Bioresource Technology, 2012, 123:189-194.
- [58]Kim J, Park C, Kim T H, et al. Effects of Various Pretreatments for Enhanced Anaerobic Digestion with Waste Activated Sludge[J]. Journal of Bioscience & Bioengineering, 2003, 95(3):217-275.
- [59]Lin J, Chang C, Chang S. Enhancement of Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge by Alkaline Solubilization[J]. Bioresource Technology, 1997, 62:85-90.
- [60]Rajan R V, Lin J, Ray B T. Low-Level Chemical Pretreatment for Enhanced Sludge Solubilization[J]. Water Pollution Control Federation, 1989, 11(61):1678-1683.
- [61]Uma Rani R, Adish Kumar S, Kaliappan S, et al. Enhancing the Anaerobic Digestion Potential of Dairy Waste Activated Sludge by Two Step Sono-Alkalization Pretreatment[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2014, 21(3):1065-1074.
- [62]Zhang L, Jahng D. Enhanced Anaerobic Digestion of Piggery Wastewater by Ammonia Stripping: Effects of Alkali Types[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 182(1-3):536-543.
- [63]Al-Faifi H, Al-Omran A M, Nadeem M, et al. Soil Deterioration as Influenced by Land Disposal of Reject Brine From Salbukh Water Desalination Plant at Riyadh, Saudi Arabia[J]. Desalination, 2010, 250(2):479-484.
- [64]Khor W C, Rabaey K, Vervaeren H. Low Temperature Calcium Hydroxide Treatment Enhances Anaerobic Methane Production From (Extruded) Biomass [J]. Bioresource Technology, 2015, 176:181-188.
- [65]Park N D, Helle S S, Thring R W. Combined Alkaline and Ultrasound Pre-Treatment of Thickened Pulp Mill Waste Activated Sludge for Improved Anaerobic Digestion[J]. Biomass and Bioenergy, 2012, 46:750-756.
- [66]Zawieja I, Wolny L, Wolski P. Influence of Excessive Sludge Conditioning On the Efficiency of Anaerobic Stabilization Process and Biogas Generation[J]. Desalination, 2008, 222(1-3):374-381.
- [67]Kim D, Jeong E, Oh S, et al. Combined (Alkaline+Ultrasonic) Pretreatment Effect On Sewage Sludge Disintegration[J]. Water Research, 2010, 44(10):3093-3100.