

水力空化技术在工业废水处理中的研究进展

李磊^{1*}, 陈庆锋^{1,2#}, 赵长盛¹, 郭贝贝¹

¹齐鲁工业大学(山东省科学院)山东省分析测试中心, 山东 济南

²山东师范大学地理与环境学院, 山东 济南

Email: 17862073855@163.com, #chensdcn@163.com

收稿日期: 2021年4月25日; 录用日期: 2021年5月25日; 发布日期: 2021年6月2日

摘要

水力空化(HC)技术是一种新型的废水处理高级氧化技术, 相比其他高级氧化工艺具有成本低、操作简便、无二次污染的优点, 逐渐成为国内外处理工业废水研究的热点。近年来, 在HC技术机理方面没有太多的突破和发现, 大量研究主要集中在水力空化技术与高级氧化工艺的结合、水力空化发生装置之间的组合对废水的处理; 并以COD、TOC、对菌类的杀灭率为指标来衡量该技术的处理效果, 其对各个指标的去除率均可达90%以上。另外, 影响水力空化技术对废水降解程度的因素主要分为三个方面, 分别为装置设计参数、废水参数和耦合工艺条件。最后对于水力空化技术目前存在的不足和未来的发展方向提出了几条建议, 为水力空化技术更深层次的研究和工业化应用提供了一些参考依据。

关键词

水力空化技术, 工业废水, 工艺组合, 难降解物, 杀菌消毒, 影响因子

Review on the Research of Hydraulic Cavitation Technology Applied to Industrial Wastewater Treatment

Lei Li^{1*}, Qingfeng Chen^{1,2#}, Changsheng Zhao¹, Beibei Guo¹

¹Shandong Analysis and Test Center, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Science), Jinan Shandong

²College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan Shandong

Email: 17862073855@163.com, #chensdcn@163.com

Received: Apr. 25th, 2021; accepted: May 25th, 2021; published: Jun. 2nd, 2021

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 李磊, 陈庆锋, 赵长盛, 郭贝贝. 水力空化技术在工业废水处理中的研究进展[J]. 环境保护前沿, 2021, 11(3): 403-415. DOI: 10.12677/aep.2021.113044

Abstract

Hydraulic cavitation (HC) technology is a new advanced oxidation technology for wastewater treatment. Compared with other advanced oxidation processes, it has the advantages of low cost, simple operation and no secondary pollution. In recent years, there are not many breakthroughs and discoveries in the mechanism of HC technology. A large number of researches mainly focus on the combination of hydraulic cavitation technology and advanced oxidation process, and the combination of hydraulic cavitation generator to the treatment of wastewater. In addition, the factors affecting the degree of water degradation by hydraulic cavitation technology are mainly divided into three aspects: device design parameters, wastewater parameters and coupling process conditions. In the end, several suggestions are put forward for the current shortcomings and future development direction of hydraulic cavitation technology, which provides some references for the deeper research and industrial application of hydraulic cavitation technology.

Keywords

Hydraulic Cavitation Technology, Industrial Wastewater, Process Combination, Refractory Material, Sterilization, Impact Factor

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

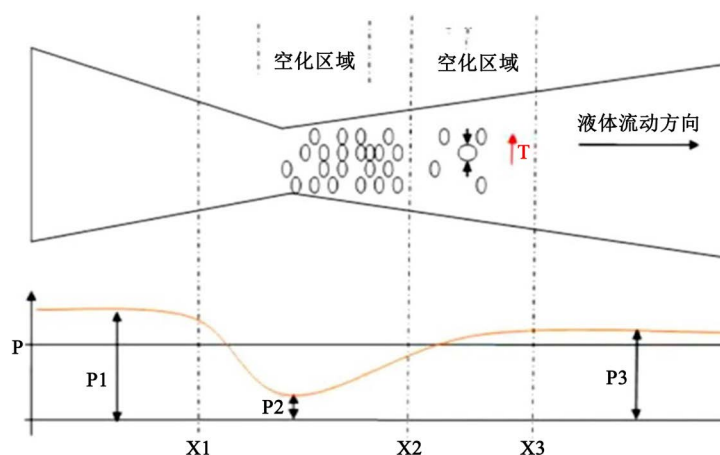
大量工业废水的产生和处理一直是水污染治理的突出问题, 废水在排放到环境中不能得到有效处理将会对水体生物和人类健康造成严重威胁[1]。另外, 部分工业废水经过处理之后仍不能达到排放标准, 给我国工业发展带来极大的阻碍。因此, 亟需开发一种新技术, 以使难处理的工业废水能够达标排放。常规的水处理技术都是基于生物、物理和化学方法, 不能降解所有有机物[2], 尤其是工业中产生的结构和成分十分复杂的有机物。如今许多行业已经将注意力转向使用新型的高级氧化技术, 这种技术通常被称为高级氧化工艺(AOP)。高级氧化工艺通常包括臭氧氧化[3] [4]、芬顿氧化[5]、光催化、过氧化氢[6], 次氯酸盐以及基于声空化(US)和水力空化的气蚀[7] [8]。

国内外学者利用 US 技术在工业废水处理领域已做大量研究[9] [10] [11], 但在实际工业应用中一直未受到足够关注, 这主要是因为声空化反应器内空泡产生范围小, 能量分布集中, 能量利用率低(10%~30%) [7]。除此之外, US 反应器的放大也非常困难[12]。相反, HC 技术具有操作简便、规模易扩大、处理成本低、不会形成二次污染、能量利用率高等优点[13], 逐渐得到了国内外研究者的密切关注[7] [14]。但是, 水力空化技术处理工业废水中难以生物降解的有机物还处于初步探索的阶段, 而对于水力空化的机理理论和试验操作方面还有诸多问题未能解决。因此, 深入研究 HC 技术产生的极端条件和巨大能量处理工业废水具有重要的理论和现实意义。

2. 水力空化技术的机理

HC 是指当液体通过节流元件时(如图 1), 液体内部原有的气泡因压力的减小而增大, 最终气泡溃灭产生高温(10,000 K)、高压(10~500 MPa) [15]。同时, 空化泡的破裂还会带来很多的物化效应, 物理效应

有微射流和剪切力的形成,化学效应有 $\cdot\text{OH}$ 和 $\cdot\text{H}$ (水分子分解)的产生[16],产生的 $\cdot\text{OH}$ 会与有毒有害物质反应并将其氧化分解[17]。



其中: P_1 、 P_3 为喉部前后静压, P_2 为喉部静压, P 为液体蒸汽压

Figure 1. Principle of hydraulic cavitation in the formation of bubbles in venturi tubes
图 1. 水力空化在文丘里管中形成气泡的原理[24]

在先前的研究中, HC 技术的形成机理主要有气核理论[18]和空泡动力学[19] [20]。而近年来对于 HC 的形成机理没有很大的研究进展。HC 在废水中的应用主要分为降解有机物和杀菌消毒。降解废水中有机物的机理主要是通过水相燃烧反应机理[21]、自由基反应机理[22]以及机械作用[23];但是 HC 对污染物降解往往是以上机理的共同作用的结果。杀菌消毒的机理主要是通过气泡溃灭产生的高温高压和强力的冲击波达到对细胞壁、细胞膜破裂的效果,造成细胞中各物质的组成成分改变,如糖类、蛋白质、DNA 分子、RNA 分子等的破坏作用[24],从而导致菌类丧失活性。

3. HC 技术的应用研究进展

近年来, HC 与其他工艺耦合处理工业废水一直是研究热点。通过与其他工艺的结合,避免了水力空化技术单独使用时去除效果不佳以及应用常规高级氧化工艺时,试剂用量大、费用高等缺点,遵循了从源头控制污染、绿色治理的原则。

3.1. 工艺组合

3.1.1. 与高级氧化工艺组合比较

HC 技术在与众多的工艺耦合中,与高级氧化技术的结合效果最好。Fenton 和 H_2O_2 法,能直接产生 $\cdot\text{OH}$,大大增加了组合工艺中 $\cdot\text{OH}$ 的量,加大了对有机物的降解程度,从而提升了处理效果。臭氧,光催化、光解,次氯酸钠,过硫酸盐等工艺,虽不能直接产生 $\cdot\text{OH}$,增加 $\cdot\text{OH}$ 的量,但能够强化 HC 技术的氧化能力。表 1 综述了近年来与 HC 技术组合工艺的效果比较,从经济效益和去除效果的角度比较得出, HC + Fenton 和 HC + H_2O_2 组合工艺在实验中更加有优势。

3.1.2. 空化发生器之间的组合

除了与高级氧化工艺的结合,也有少量研究进行了水力空化发生器之间的组合对废水的处理探究。杨杰等[30]研究了孔板与文丘里管组合空化杀灭水中病原微生物;并且其毕业论文研究了圆孔多孔板与文丘里管组合式水力空化杀灭原水中病原微生物的试验研究。张凯[31]进行了文丘里管与三角形孔口多孔板

水力空化处理难降解废水及空化紊动特性的试验研究。国外研究者 Pooja Jain 等[32]使用涡流二极管产生空化消除水中的病原细菌, 并比较了涡流二极管和孔板的去除效果, 但未探究两种发生器结合对废水的去除效果。

Table 1. Comparison of combined processes of hydraulic cavitation technology

表 1. 水力空化技术的组合工艺比较

废水类型	工艺组合	最佳组合工艺	参考文献
染料废水	水力空化 水力空化 + 过氧化氢 水力空化 + 芬顿 水力空化 + 类芬顿 水力空化 + 光解 水力空化 + 光催化 水力空化	水力空化 + 过氧化氢	[25]
酚类废水	臭氧 水力空化 + 臭氧 水力空化 + 过氧化氢 臭氧 + 过氧化氢 水力空化 + 臭氧 + 过氧化氢	水力空化 + 臭氧 + 过氧化氢	[26]
农药废水	水力空化 水力空化 + 臭氧 水力空化 + 过氧化氢	水力空化 + 过氧化氢	[27]
纤维工业废水	声空化 + 过氧化氢 声空化 + 臭氧 声空化 + 芬顿 水力空化 + 芬顿 水力空化 + 次氯酸钠	水力空化 + 芬顿	[28]
制革废水	水力空化 水力空化 + 臭氧 水力空化 + 过氧化氢 水力空化 + 芬顿	水力空化 + 芬顿	[29]

3.2. HC 技术处理废水的效果

3.2.1. 降解有机物

COD 是废水处理的一个重要指标, 可通过 COD 处理前后浓度的变化来评判废水中有机物的去除效果。研究表明, HC 对废水中有机物的降解效果是很显著的。Wang Jihong 等[33]研究了 HC 和 O₃ 结合对纺织废水的降解效果, 对于实际纺织废水, 30 min 内 HC + O₃ 对 COD、TOC、UV254 和色度的去除率分别为 36%、23%、71% 和 90%。表 2 总结了近年来利用水力空化技术对各类工业废水中 COD 的降解效果。HC 技术与高级氧化工艺结合提高了对有机物的降解程度, 减少了化学试剂的使用, 从源头减少了污染和处理费用, 实现了绿色处理。

TOC、B/C 也是生物法前处理的另外两个重要指标。废水通过 HC 技术处理后, 减少了后续生物法运行过程中对菌类产生威胁的有毒有害物质, 有效地将不可生物降解物质转化为易于生化的化合物, 提高废水的可生化性, 为后续工艺运行奠定良好基础。Sneha Korpe 等[38]研究了 HC 结合 H₂O₂ 处理制革废水, TOC 的去除率可达 87%; 还有众多研究以 TOC 为指标[39]。但以 B/C 为指标的研究较为匮乏, 因此在以后的实验中应重点探究。

Table 2. Removal effect of COD by hydraulic cavitation technology
表 2. HC 对 COD 的去除效果研究

废水类型	研究内容	研究结果	参考文献
木材加工工业废水	水力空化作为木材加工工业废水处理的新途径。	随着操作参数达到最佳值，废水的 COD 会随之减小。	[7]
医药废水	结合空化射流冲击和多种协同方法的抗生素废水降解新技术。	比较了水力空化技术与多种方法协同对医药废水的 COD 降解效果，实验结果表明，水力空化组合最佳工艺会导致 COD 的最大减少量达到 79.92%。	[34]
纤维工业废水	基于超声波、水力空化和化学氧化剂的组合氧化工艺处理来自纤维素纤维制造部门的真实工业废水。	水力空化技术结合的最佳工艺对 COD 的最大去除率可达 86%。	[27]
工业废水	水力空化与高级氧化联合强化处理 70 L 工业废水。	在 180 min 内，COD 的去除率可达 63%。	[35]
含氰化物工业废水	基于水力空化的硫氰酸钾废水处理新方法。	最佳降解途径对 COD 的去除率为 92.9%。	[36]
软木废水	超声波和水力空化对絮凝 Fenton 法处理软木废水的影响。	空化将 Fenton 氧化 COD 去除率提高了 26%~34%，最终的去除率达到了 83%~90%。	[16]
炼油废水	水力空化是处理炼油废水的必要技术。	在 5 Bar 的操作压力下，COD 的去除率可达 59.17%。	[37]

3.2.2. 杀菌消毒

HC 技术杀菌消毒是应用于废水的另一个重要研究。表 3 总结了不同类型的空化发生装置对工业废水中不同菌类的杀灭效果。研究表明，HC 技术对菌类的杀灭率可达到 99%，非常适合应用于水体的杀菌消毒。

Table 3. Hydraulic cavitation technology research on sterilization
表 3. 水力空化技术的杀菌消毒研究

杀菌类型	空化发生装置	研究内容	研究结果	参考文献
大肠杆菌、金黄色葡萄球菌	涡流二极管	采用涡流二极管对革兰氏阴性大肠杆菌和革兰氏阳性金黄色葡萄球菌两种模型微生物菌株进行消毒评价。	空化 1 小时内实现了非常的大肠杆菌去除率(99%)，但对金黄色葡萄球菌的去除率只有 60%。	[32]
蓝细菌	新型的水力空化装置	利用新型的水力空化装置选择性的去除蓝细菌	在 10 秒内从水柱中去除了 99% 的蓝细菌生物量，并在不破坏细胞的情况下抑制了 98% 的光合作用。	[40]
嗜肺军团菌 大肠杆菌	新型的水力空化旋转发生器	开发了一种新型的水力空化旋转发生器，并对其针对嗜肺军团菌和大肠杆菌的效力进行了各种类型的水力空化(附着稳定空化、发展不稳定空化和超空泡)的测试。	空泡和高剪切力的混合物对细胞的破坏能力最强，减少了 3 倍对数的细菌数，相比于文丘里管装置有了很大的改进。	[41]

Continued

大肠杆菌	三角形孔口多孔板和文丘里管构成的组合式水力空化装置	以菌落总数和大肠杆菌作为病原微生物的指示菌,对杭州市区胜利河原水不同体积比水样进行灭菌处理。	选取合适的扩散角和原水体积比,适当增加孔口数量,采用交错式孔口排列方式多孔板和降低空化数可以提高菌落总数和大肠杆菌杀灭率。	[42]
大肠杆菌	圆孔多孔板与文丘里管组合式水力空化装置	研究了空化数、孔口排布、孔口数量、运行时间、原水配比浓度、喉部长短对病原微生物杀灭率的影响。	提高孔口流速和喉部流速,延长运行时间,降低空化数,增多孔口数量,改进孔口排布,选取合适配比浓度,延长喉部长度等可以进一步提高大肠杆菌和菌落总数的杀灭率。	[43]

4. HC 的影响因子

在 HC 的组合工艺中,影响有机物降解程度的因子有三大方面:耦合工艺条件、废水和装置设计参数。

4.1. 耦合工艺条件

4.1.1. H₂O₂ 的负载量

在 HC + H₂O₂ 的组合工艺中, H₂O₂ 的负载量是影响去除率的主要因素。负载量过少会导致羟基自由基的量不足;过多会致使 COD 升高,并且对微生物有害[44]。因此,将 H₂O₂ 的负载量调节至最佳剂量是非常重要的。M. Suresh Kumar 等[28]研究了三元染料与 H₂O₂ 在不同比例下的去除效果,在 1:40 时脱色率达到 100%;当 H₂O₂ 的浓度超过 40 mol 时,三元染料的脱色率降低。较多的 H₂O₂ 加入本身就能消耗生成的·OH。也有较多研究报道了 HC 与 H₂O₂ 结合存在最佳负荷量,如降解敌敌畏[45]、甲基对硫磷[46]和罗丹明 B [47]。

为了使去除效果最好, H₂O₂ 浓度必须保持在最佳值。另外, H₂O₂ 的最佳值与所处理污染物的类型有关。

4.1.2. Fe²⁺ 浓度的影响

HC 和 Fenton 的工艺组合取决于 Fe²⁺ 的负载量,跟 Fenton 工艺相似的是·OH 是通过 Fe²⁺ 催化过氧化氢分解而产生的。优化 Fe²⁺ 的负载量是非常有必要的,因为过量的铁会产生过多的 Fe²⁺,导致消耗大量的羟基自由基,从而降低降解效率。在 Kassim O. Badmus 等[39]人的研究中,在组合工艺中加入 0.5 mg/L Fe²⁺,脱色率可达到 90.8%;同时 Fe²⁺ 量增加到 1 mg/L 和 2 mg/L 时,脱色率分别为 94%和 94.96%。将 Fe²⁺ 的量从 0.5 mg/L 增加到 1 mg/L 会导致显着更高的脱色,而 Fe²⁺ 浓度从 1 mg/L 增加到 2 mg/L 没有对脱色程度产生重大影响。

4.1.3. 温度的影响

温度是影响 HC 技术降解程度的重要指标。温度升高会导致气蚀率降低,这是由于过量产生气泡,从而降低了气泡坍塌的能量(衰减效应) [46] [48] [49] [50]。Dhanke P. B.等[51]研究了温度为 25℃、30℃、35℃、40℃的条件下,对染料废水脱色率的影响,结果表明,低温有利于增强染料废水的脱色。这可能是因为溶液温度的升高导致液体蒸汽压和空化气泡中的蒸汽含量升高,从而产生缓冲效果。基于单腔的气泡动力学研究[52],也揭示了随着温度的升高,液体表面张力和粘度逐渐降低,但是蒸气压会显著增加,对气泡破裂没有明显的促进作用。

但也有研究发现, 污染物的降解程度随着温度的升高而升高。这可能有两个主要原因: 首先, 随着温度的升高, 水的粘度和表面张力降低, 这有利于气泡的形成, 从而形成更多的 $\cdot\text{OH}$ [53]; 其次, 随着温度的升高, 水分子的能量被认为增加了从液体到气体的转化, 从而促进了反应[54]。因此, 由于高温条件下空化泡中产生了更多的自由基, 最终的去除效果有时是不可预测的。

总体而言, 建议空化现象发生在低温条件下; 而在污染物中的自由基对整体降解程度有显著影响的情况下, 可能存在最佳温度。

4.1.4. 时间的影响

污染物的去除率随着空化作用时间的增加而升高, 这是因为被处理的污染物经过空化区的次数增加 [55] [56]。董志勇等[57]研究了水力空化作用时间对大肠杆菌灭活率的影响, 研究发现在第 15 min 去除率达到 100%。在第 20 min 菌落总数灭活率达到 83.14%, 并有随空化作用时间的增加而继续增大的趋势。但在实际的工业应用中, 通过延长作用时间来提高去除率是需要耗费巨大的能量成本, 因此, 可通过与其他方式结合在短时间内达到较高的去除效果, 减少电力等各方面的成本。比如: M. Suresh Kumar 等[28]在 120 min 内, 单独使用水力空化对废水 TOC 的去除率为 8.53%, HC + H_2O_2 矿化度为 16.95%, HC + Fenton 为 38.42%。这表明在相同时间内是可以通过结合其他方法来协同提升污染物的去除率。总体而言, 可以适当的延长反应时间, 从而减小化学试剂的使用, 同时降低了处理成本。

4.2. 废水参数

4.2.1. pH 的影响

已有的研究发现, HC 对有机物的降解通常发生在酸性条件下。酸性条件通过强化 H_2O_2 的分解和水的自旋转分解能更有效地促进羟基自由基的生成[58]。此外, $\cdot\text{OH}$ 的氧化能力在酸性条件下更高, 这可归因于羟基的重组反应速率较低, 仅在酸性条件下才有可能发生[59] [60]。Rajashree H. Jawale 等[36]研究了 pH 在 2~10 范围内对硫氰酸钾的影响, 研究结果发现, 降解率随着 pH 的升高而降低。M. Suresh Kumar 等[28]研究了 pH 在 3~9 范围内对三元染料废水的去除效果, 结果表明, 当 pH = 3 时去除效果最好。除此之外, 还有大量研究证明了在酸性条件下更有利于水力空化技术对有机物的降解[61] [62] [63] [64]。

然而, 水力空化技术对微生物氧化的条件与对有机物的降解条件不同。HC 对微生物的氧化通常在碱性条件下进行(pH > 7) [7]。碱性条件通过削弱细胞膜来改善氧化剂向微生物内部的运输。此外, 高 pH 值有利于羟基自由基和形成细胞膜的磷脂之间的反应, 导致它们破坏和分解整个细胞[33]。

总体来说, 在酸性条件下对有机物的去除率偏高, 并建议在实验室研究分析, 比较强化程度与 pH 调整所需的化学成本。

4.2.2. 初始浓度的影响

污染物的初始浓度是决定降解过程效率的最重要参数之一[58]。已有研究表明, 污染物的去除效率随着初始浓度的升高而降低[65] [66]。随着污染物初始浓度的升高, 降解过程会消耗大量的 $\cdot\text{OH}$, 从而导致降解率降低。因此, 污染物的初始低浓度是 HC 的最佳选择。

对于实验室研究, 低浓度废水不会对实验研究造成太大的阻碍, 很容易能够将高浓度废水稀释为低浓度废水。但对于工业应用就会造成很大的困难, 一般工业废水大概有几万方, 从成本角度, 将如此大量的废水进行稀释显然是不可能的。因此, 为了 HC 更好的应用, 必须将其他的影响因素进行优化。

4.3. 装置设计参数

水力空化现象的发生主要是通过孔板、文丘里管、新型的旋转水力空化等装置。一套完整的空化装

置主要由水力空化工作段、离心泵、转子流量计、节流阀、压力表以及相应的管道组成，对废水的去除效果除了与废水自身的因素有关之外，还与发生装置的设计参数有关。

4.3.1. 孔板

在利用孔板作为空化发生装置时，孔口形状的设计主要分为三角形、圆形和方形三种，目前孔口形状的设计对于去除率的比较尚未有过研究证明。而主要的影响因素主要有孔口大小、孔口排列、孔口数量。柳文菁等[67]研究了三角孔多孔板水力空化杀灭原水中病原微生物，表明增大孔口数量、减小孔口大小以及改进孔口排列方式(如交错式)时，均可进一步提高原水中病原微生物杀灭率。菌群杀灭率在 5 min 时可达稳定高效杀灭值，15 min 时菌落总数杀灭率可达 80% 以上，总大肠菌群和大肠埃希氏菌杀灭率均可达 90% 以上，甚至完全杀灭。刘昶等[68]、时小芳等[56]研究了圆孔多孔板水力空化对大肠杆菌的杀灭效果，增加孔口数量、减小孔口大小、改进孔口排布可以进一步提高大肠杆菌的杀灭率。并表明水力空化的空化空蚀作用能够杀灭水中的大肠杆菌，是一种饮用水消毒的新技术。也有少部分研究利用方形孔口对难降解废水的试验研究[69]。

但可以得知，去除效率的增加与孔口的形状无关，但增加孔口数量、减小孔口大小、孔口排布越错综复杂，处理效果会更好；主要是因为增加了空泡溃灭产生的射流之间碰撞次数，从而提升了去除率。

4.3.2. 文丘里管

文丘里管的设计参数主要有喉管的长、宽、高、扩散角。杨杰等[43]以文丘里管的喉部长度和扩散角为影响因子研究了对大肠杆菌的杀灭效果，当扩散角为 4.3° 喉部长度为 150 mm 的时杀灭效果最好，文丘里管形成一个较长的负压区，更有利于空泡的产生和发育，增强了空化效应，从而提高了杀灭率。也有研究报道提高文丘里管杀灭率可通过减小喉管的长度和直径之比来实现[70]。

4.3.3. 新型的水力空化发生器

近年来，也有诸多研究者自主研发一些新型的水力空化发生装置。Jurij Gostiša 等[71]研究了一种针盘式水力空化旋转发电机，分别监测了对模拟废水和实际的工业废水的处理效果，结果表明，该新型装置的中试效果可以与实验室规模的最佳状况下的孔板和文丘里管装置处理能力相媲美。Xun Sun 等[72]对新型的旋转式水力空化反应器的性能进行了研究，并进行了中试测试，与先前研究的旋转水力空化发生器相比，处理效果提升了 150 倍，费用减少了 50 倍。表明目前的旋转水力空化发生器在工业规模的应用中具有巨大的潜力。

新型的水力空化器主要通过电动机进行驱动，因此，转速成为了主要的影响因素。除了转速之外，一般认为流速是影响旋转式水力空化发生器空化强度的辅助因素。Mandar Badve 等[27] [73]的研究中当转速为 2200 RPM 时，COD 去除率达到最高的 49%，达到 2700 RPM 时去除率下降至 42%。空化强度随着转速的增加而增加，有机物的降解率也随之升高。但是当转速过高时会产生大量空腔，这些空腔会影响相邻空腔释放能量，导致对有机物的降解率降低。

4.3.4. 入口压力的影响

水力空化的强度是通过空化数决定的，而空化数与入口压力有着密切的关系。由于液体流量和速度的增加，空化数随着入口压力的增加而减少，这导致了空化数密度的增加[74]。Kassim O. Badmus 等[39]研究了利用 HC + Fenton，以入口压力为影响因素对纺织废水中 TOC 的去除效果进行研究。结果表明，在入口压力为 0.4 MPa 的条件下，对 TOC 的去除率最高可达到 74%，该结果与徐世贵[62]和 Rajashree H. Jawale [36]研究结论相似；另一方面，Saurabh M. Joshi 等[35]研究了 HC 与 AOPs 组合强化处理工业废水的效果，探究了入口压力对去除 COD 的影响。研究结果表明，在入口压力为 0.6 MPa 时，

COD 的去除率最高达到 63%；Pooja Thanekar 等[75]研究了入口压力在 0.24 MPa 时，水力空化技术对苯的降解率最高。

以上研究说明，入口压力并不是恒定的，其可能取决于污染物和空化装置的类型[58]。因此，为了获得最大的空化效应，必须优化进口压力。

5. 总结

1) HC 技术单独使用效率较低，与其它工艺结合可提高降解效果。其中，与过氧化氢的结合效果优于其它工艺。

2) 除了工艺之间的组合之外，空化发生器的组合也可提高对废水的处理效果。

3) 水力空化技术与其他工艺的组合对 COD、TOC 等指标的去除率可达到 90%以上，可作为一个有潜力的水处理技术。

4) 水力空化技术对废水的处理效果不是由某单一因素决定的，而是各个影响因素共同决定的。

6. 展望

虽然水力空化技术具有高效、节能、空化效率高等优点。但是由于该技术在工业水处理方面还处于初级阶段，在水力空化机理理论的完整性和大规模应用方面还存在很多问题，需要进一步的探究。

1) $\cdot\text{OH}$ 是 HC 技术降解有机物和杀菌消毒的关键，但在外界条件辅助下产生 $\cdot\text{OH}$ 时需要将运行条件调节至最佳状况，无形间增加了运行难度。因此，利用仪器测出 $\cdot\text{OH}$ 的产率，探究得到 $\cdot\text{OH}$ 和有机物之间的反应摩尔比，会大大减少操作难度和成本。

2) 由于水力空化运行过程中有很多强氧化性物质的产生，长期的运行会对水力空化发生装置造成严重损坏。因此，探究一种适合水力空化装置的新型材料可大规模地推广该技术。

3) 水力空化技术应用到工业中的案例较少，主要是因为其机理还未完全探究清楚。因此，只有在研究中注重于机理研究，才能更有效、更准确地扩大规模应用。

4) 对于水力空化技术的机理研究；空化现象的发生是瞬时、微观、随机的现象，通过肉眼无法观察。因此，可以通过模拟软件等先进设备仪器探究。

基金项目

齐鲁工业大学(山东省科学院)科教产融合创新试点工程项目(2020KJC-ZD13)，山东省泰山学者青年专家基金(TSQN201812086)。

参考文献

- [1] Ashrafi, O., Yerushalmi, L. and Haghghat, F. (2015) Wastewater Treatment in the Pulp-and-Paper Industry: A Review of Treatment Processes and the Associated Greenhouse Gas Emission. *Journal of Environmental Management*, **158**, 146-157. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.05.010>
- [2] Krishnan, S., Rawindran, H., Sinnathambi, C.M. and Lim, J.W. (2017) Comparison of Various Advanced Oxidation Processes Used in Remediation of Industrial Wastewater Laden with Recalcitrant Pollutants. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **206**, 012089. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/206/1/012089>
- [3] Randhavane, S.B. and Khambete, A.K. (2018) Hydrodynamic Cavitation: An Approach to Degrade Chlorpyrifos Pesticide from Real Effluent. *KSCE Journal of Civil Engineering*, **22**, 2219-2225. <https://doi.org/10.1007/s12205-017-2045-0>
- [4] Wang, X.J., Chen, S.L., Gu, X.Y., et al. (2008) Biological Aerated Filter Treated Textile Washing Wastewater for Reuse after Ozonation Pre-Treatment. *Water Science & Technology*, **58**, 919-923. <https://doi.org/10.2166/wst.2008.421>
- [5] Ajmal, A., Majeed, I., Malik, R.N., et al. (2015) Principles and Mechanisms of Photocatalytic Dye Degradation on TiO_2 Based Photocatalysts: A Comparative Overview. *ChemInform*, **45**, 37003-37026.

- <https://doi.org/10.1002/chin.201448247>
- [6] Sarto, S., Paesal, P., Tanyong, I.B., *et al.* (2019) Catalytic Degradation of Textile Wastewater Effluent by Peroxide Oxidation Assisted by UV Light Irradiation. *Catalysts*, **9**, 509. <https://doi.org/10.3390/catal9060509>
- [7] Badve, M., Gogate, P., Pandit, A. and Csoka, L. (2013) Hydrodynamic Cavitation as a Novel Approach for Wastewater Treatment in Wood Finishing Industry. *Separation and Purification Technology*, **106**, 15-21. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2012.12.029>
- [8] Grzegorz, B., Michał, G., Marek, K., *et al.* (2018) Effective Method of Treatment of Effluents from Production of Bitumens under Basic pH Conditions Using Hydrodynamic Cavitation Aided by External Oxidants. *Ultrasonics Sonochemistry*, **40**, 969-979. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.08.032>
- [9] Fang, Y., Hariu, D., Yamamoto, T., *et al.* (2019) Acoustic Cavitation Assisted Plasma for Wastewater Treatment: Degradation of Rhodamine B in Aqueous Solution. *Ultrasonics Sonochemistry*, **52**, 318-325. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.12.003>
- [10] Yi, C., Lu, Q., Wang, Y., *et al.* (2018) Degradation of Organic Wastewater by Hydrodynamic Cavitation Combined with Acoustic Cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry*, **43**, 156-165. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.01.013>
- [11] Agarkoti, C., Gogate, P.R. and Pandit, A.B. (2021) Comparison of Acoustic and Hydrodynamic Cavitation Based Hybrid AOPs for COD Reduction of Commercial Effluent from CETP. *Journal of Environmental Management*, **281**, 111792. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111792>
- [12] Kanthale, P.M., Gogate, P.R., Pandit, A.B. and Wilhelm, A.M. (2003) Mapping of an Ultrasonic Horn: Link Primary and Secondary Effects of Ultrasound. *Ultrasonics Sonochemistry*, **10**, 331-335. [https://doi.org/10.1016/S1350-4177\(03\)00104-4](https://doi.org/10.1016/S1350-4177(03)00104-4)
- [13] Chakinala, A.G., Gogate, P.R., Burgess, A.E. and Bremner, D.H. (2008) Treatment of Industrial Wastewater Effluents Using Hydrodynamic Cavitation and the Advanced Fenton Process. *Ultrasonics Sonochemistry*, **15**, 49-54. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2007.01.003>
- [14] Ranade, V.V. and Bhandari, V.M. (2014) Industrial Wastewater Treatment, Recycling, and Reuse. *Industrial Wastewater Treatment, Recycling & Reuse*, **104**, 1-80. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-099968-5.00001-5>
- [15] Musmarra, D., Prisciandaro, M., Capocelli, M., *et al.* (2016) Degradation of Ibuprofen by Hydrodynamic Cavitation: Reaction Pathways and Effect of Operational Parameters. *Ultrasonics Sonochemistry*, **29**, 76-83. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.09.002>
- [16] Wu, Z., Yuste-Córdoba, F.J., Cintas, P., *et al.* (2018) Effects of Ultrasonic and Hydrodynamic Cavitation on the Treatment of Cork Wastewater by Flocculation and Fenton Processes. *Ultrasonics Sonochemistry*, **40**, 3-8. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.04.016>
- [17] Capocelli, M., Prisciandaro, M., Lancia, A. and Musmarra, D. (2014) Hydrodynamic Cavitation of *p*-Nitrophenol: A Theoretical and Experimental Insight. *Chemical Engineering Journal*, **254**, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.05.102>
- [18] 朱孟府, 曾艳, 邓橙, 等. 水力空化在水处理中的应用与研究进展[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(12F): 445-459.
- [19] 付勇. 文丘里管内空泡动力学特性研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2007.
- [20] 李靖. 水力空化多孔孔板流体力学特性研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津科技大学, 2009.
- [21] 魏群, 肖波. 水力空化技术在废水处理中的研究与应用进展[J]. 中国给水排水, 2007, 23(2): 13-16.
- [22] 张凤华, 廖振方, 唐川林, 等. 空化水射流的化学效应[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2004, 19(1): 32-35.
- [23] 姚锐豪. 三角形孔口多孔板水力空化处理难降解废水的试验研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江工业大学, 2015.
- [24] Gągol, M., Przyjazny, A. and Boczkaj, G. (2018) Wastewater Treatment by Means of Advanced Oxidation Processes Based on Cavitation—A Review. *Chemical Engineering Journal*, **338**, 599-627. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.01.049>
- [25] Alfonso-Muniozguren, P., Bohari, M.H., Sicilia, A., *et al.* (2020) Tertiary Treatment of Real Abattoir Wastewater Using Combined Acoustic Cavitation and Ozonation. *Ultrasonics Sonochemistry*, **64**, 104986. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.104986>
- [26] Barik, A.J. and Gogate, P.R. (2018) Hybrid Treatment Strategies for 2,4,6-Trichlorophenol Degradation Based on Combination of Hydrodynamic Cavitation and AOPs. *Ultrasonics Sonochemistry*, **40**, 383-394. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.07.029>
- [27] Badve, M.P., Pinjari, D.V., Saini, D.R., *et al.* (2016) Treatment of the Pesticide Industry Effluent Using Hydrodynamic Cavitation and Its Combination with Process Intensifying Additives (H₂O₂ and Ozone). *Chemical Engineering Journal*, **295**, 326-335. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.03.019>

- [28] Kumar, M.S., Sonawane, S.H., Bhanvase, B.A. and Bethi, B. (2018) Treatment of Ternary Dye Wastewater by Hydrodynamic Cavitation Combined with Other Advanced Oxidation Processes (AOP's). *Journal of Water Process Engineering*, **23**, 250-256. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.04.004>
- [29] Saxena, S., Saharan, V.K. and George, S. (2018) Enhanced Synergistic Degradation Efficiency Using Hybrid Hydrodynamic Cavitation for Treatment of Tannery Waste Effluent. *Journal of Cleaner Production*, **198**, 1406-1421. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.135>
- [30] 杨杰, 董志勇, 柳文菁, 等. 孔板与文丘里组合空化杀灭水中病原微生物[J]. 中国环境科学, 2018, 38(10): 3755-3760.
- [31] 张凯. 文丘里管与三角形孔口多孔板水力空化处理难降解废水及空化紊动特性的试验研究[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江工业大学, 2017.
- [32] Jain, P., Bhandari, V.M., Balapure, K., et al. (2019) Hydrodynamic Cavitation Using Vortex Diode: An Efficient Approach for Elimination of Pathogenic Bacteria from Water. *Journal of Environmental Management*, **242**, 210-219. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.057>
- [33] Wang, J., Chen, H., Yuan, R., et al. (2020) Intensified Degradation of Textile Wastewater Using a Novel Treatment of Hydrodynamic Cavitation with the Combination of Ozone. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **8**, Article ID: 103959. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103959>
- [34] Tao, Y., Cai, J., Huai, X. and Liu, B. (2018) A Novel Antibiotic Wastewater Degradation Technique Combining Cavitating Jets Impingement with Multiple Synergetic Methods. *Ultrasonics Sonochemistry*, **44**, 36-44. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.02.008>
- [35] Joshi, S.M. and Gogate, P.R. (2019) Intensification of Industrial Wastewater Treatment Using Hydrodynamic Cavitation Combined with Advanced Oxidation at Operating Capacity of 70L. *Ultrasonics Sonochemistry*, **52**, 357-381. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.12.016>
- [36] Jawale, R.H. and Gogate, P.R. (2018) Novel Approaches Based on Hydrodynamic Cavitation for Treatment of Wastewater Containing Potassium Thiocyanate. *Ultrasonics Sonochemistry*, **52**, 214-223. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.11.019>
- [37] Doltade, S.B., Dastane, G.G., Jadhav, N.L., et al. (2019) Hydrodynamic Cavitation as an Imperative Technology for the Treatment of Petroleum Refinery Effluent. *Journal of Water Process Engineering*, **29**, 100768. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.02.008>
- [38] Korpe, S., Bethi, B., Sonawane, S.H. and Jayakumar, K.V. (2019) Tannery Wastewater Treatment by Cavitation Combined with Advanced Oxidation Process (AOP). *Ultrasonics Sonochemistry*, **59**, 104723. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104723>
- [39] Badmus, K.O., Irakoze, N., Adeniyi, O.R., et al. (2020) Synergistic Advance Fenton Oxidation and Hydrodynamic Cavitation Treatment of Persistent Organic Dyes in Textile Wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **8**, 103521. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103521>
- [40] Maršálek, B., Zezulka, Š., Maršálková, E., et al. (2020) Synergistic Effects of Trace Concentrations of Hydrogen Peroxide Used in a Novel Hydrodynamic Cavitation Device Allows for Selective Removal of Cyanobacteria. *Chemical Engineering Journal*, **382**, 103521. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122383>
- [41] Arc, A., Kosel, J., Stopar, D., et al. (2018) Removal of Bacteria *Legionella pneumophila*, *Escherichia coli*, and *Bacillus subtilis* by (Super)Cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry*, **42**, 228-236. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.11.004>
- [42] 李大庆, 董志勇, 杨杰, 等. 组合式水力空化杀灭原水中病原微生物的试验[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(3): 37-47.
- [43] 杨杰. 圆孔多孔板与文丘里管组合式水力空化杀灭原水中病原微生物的试验研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江工业大学, 2018.
- [44] Chakinala, A.G., Bremner, D.H., Gogate, P.R., et al. (2008) Multivariate Analysis of Phenol Mineralisation by Combined Hydrodynamic Cavitation and Heterogeneous Advanced Fenton Processing. *Applied Catalysis B: Environmental*, **78**, 11-18. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2007.08.012>
- [45] Joshi, R.K. and Gogate, P.R. (2012) Degradation of Dichlorvos Using Hydrodynamic Cavitation Based Treatment Strategies. *Ultrasonics Sonochemistry*, **19**, 532-539. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2011.11.005>
- [46] Patil, P.N. and Gogate, P.R. (2012) Degradation of Methyl Parathion Using Hydrodynamic Cavitation: Effect of Operating Parameters and Intensification Using Additives. *Separation and Purification Technology*, **95**, 172-179. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2012.04.019>
- [47] Mishra, K.P. and Gogate, P.R. (2010) Intensification of Degradation of Rhodamine B Using Hydrodynamic Cavitation in the Presence of Additives. *Separation and Purification Technology*, **75**, 385-391.

- <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2010.09.008>
- [48] Suslick, K.S., Mdeleeni, M.M. and Ries, J.T. (1997) Chemistry Induced by Hydrodynamic Cavitation. *Journal of the American Chemical Society*, **119**, 9303-9304. <https://doi.org/10.1021/ja972171i>
- [49] Entezari, M.H. and Kruus, P. (1996) Effect of Frequency on Sonochemical Reactions II. Temperature and Intensity Effects. *Ultrasonics Sonochemistry*, **3**, 19-24. [https://doi.org/10.1016/1350-4177\(95\)00037-2](https://doi.org/10.1016/1350-4177(95)00037-2)
- [50] Vichare, N.P., Senthilkumar, P., Moholkar, V.S., et al. (2000) Energy Analysis in Acoustic Cavitation. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **39**, 1480-1486. <https://doi.org/10.1021/ie9906159>
- [51] Gogate, P.R. and Patil, P.N. (2015) Combined Treatment Technology Based on Synergism between Hydrodynamic Cavitation and Advanced Oxidation Processes. *Ultrasonics Sonochemistry*, **25**, 60-69. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.08.016>
- [52] Gogate, P.R., Wilhelm, A.M. and Pandit, A.B. (2003) Some Aspects of the Design of Sonochemical Reactors. *Ultrasonics Sonochemistry*, **10**, 325-330. [https://doi.org/10.1016/S1350-4177\(03\)00103-2](https://doi.org/10.1016/S1350-4177(03)00103-2)
- [53] Kalkandelen, C., Ozbek, B., Ergul, N.M., et al. (2017) Effect of Temperature, Viscosity and Surface Tension on Gelatine Structures Produced by Modified 3D Printer. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **293**, 012001. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/293/1/012001>
- [54] Zhao, L., Ma, K. and Yang, Z. (2015) Changes of Water Hydrogen Bond Network with Different Externalities. *International Journal of Molecular Sciences*, **16**, 8454-8489. <https://doi.org/10.3390/ijms16048454>
- [55] 张锐, 朱孟府, 邓橙, 等. 水力空化对亚甲基蓝的去除研究[J]. 应用化工, 2018, 47(4): 651-655.
- [56] 时小芳, 朱孟府, 邓橙, 等. 孔板水力空化器对水中大肠杆菌的去除效果[J]. 应用化工, 2018, 47(5): 920-923, 927.
- [57] 董志勇, 张邵辉, 杨杰, 等. 多孔板与文丘里组合式空化灭活致病菌研究[J]. 浙江工业大学学报, 2019, 47(3): 268-272.
- [58] Bagal, M.V. and Gogate, P.R. (2014) Wastewater Treatment Using Hybrid Treatment Schemes Based on Cavitation and Fenton Chemistry: A Review. *Ultrasonics Sonochemistry*, **21**, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2013.07.009>
- [59] Pradhan, A.A. and Gogate, P.R. (2010) Removal of *p*-Nitrophenol Using Hydrodynamic Cavitation and Fenton Chemistry at Pilot Scale Operation. *Chemical Engineering Journal*, **156**, 77-82. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.09.042>
- [60] Patil, P.N., Bote, S.D. and Gogate, P.R. (2014) Degradation of Imidacloprid Using Combined Advanced Oxidation Processes Based on Hydrodynamic Cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry*, **21**, 1770-1777. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.02.024>
- [61] Mukherjee, A., Mullick, A., Vadthya, P., et al. (2020) Surfactant Degradation Using Hydrodynamic Cavitation Based Hybrid Advanced Oxidation Technology: A Techno Economic Feasibility Study. *Chemical Engineering Journal*, **398**, 125599. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125599>
- [62] 徐世贵, 刘月娥, 王金榜, 等. 水力空化-Fenton 氧化联合超声吸附处理煤气化废水[J]. 化工环保, 2019, 39(6): 634-640.
- [63] 王倩. 水力空化强化过硫酸盐氧化处理染料废水的效能和机理研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江工商大学, 2019.
- [64] 黄永春, 李晴, 邓冬梅, 等. 水力空化深度处理焦化废水的实验研究[J]. 工业水处理, 2017, 37(4): 53-57.
- [65] Dhanke, P.B. and Wagh, S.M. (2020) Intensification of the Degradation of Acid RED-18 Using Hydrodynamic Cavitation. *Emerging Contaminants*, **6**, 20-32. <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2019.12.001>
- [66] Ayati, B. and Ansari, M.R. (2019) Reducing the Use of Nanotitanium Dioxide by Switching from Single Photocatalysis to Combined Photocatalysis-Cavitation in Dye Elimination. *Process Safety and Environmental Protection*, **121**, 87-93. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.10.012>
- [67] 柳文菁, 董志勇, 杨杰, 等. 三角孔多孔板水力空化杀灭原水中病原微生物[J]. 中国环境科学, 2018, 38(8): 3011-3017.
- [68] 刘昶, 董志勇, 陈乐, 等. 圆孔多孔板水力空化杀灭大肠杆菌的实验研究[J]. 中国环境科学, 2016, 36(8): 2364-2370.
- [69] 李大炜. 方形孔口多孔板水力空化处理难降解废水的试验研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江工业大学, 2015.
- [70] Gogate, P.R. and Pandit, A.B. (2005) A Review and Assessment of Hydrodynamic Cavitation as a Technology for the Future. *Ultrasonics Sonochemistry*, **12**, 21-27. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2004.03.007>
- [71] Gostiša, J., Širok, B., Repinc, S.K., et al. (2021) Performance Evaluation of a Novel Pilot-Scale Pinned Disc Rotating Generator of Hydrodynamic Cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry*, **72**, 105431. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105431>

-
- [72] Sun, X., Jia, X., Liu, J., *et al.* (2020) Investigation on the Characteristics of an Advanced Rotational Hydrodynamic Cavitation Reactor for Water Treatment. *Separation and Purification Technology*, **251**, 25-29. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117252>
- [73] Gujar, S.K., Gogate, P.R., Kanthale, P., *et al.* (2021) Combined Oxidation Processes Based on Ultrasound, Hydrodynamic Cavitation and Chemical Oxidants for Treatment of Real Industrial Wastewater from Cellulosic Fiber Manufacturing Sector. *Separation and Purification Technology*, **257**, 117888. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117888>
- [74] Saharan, V.K., Badve, M.P. and Pandit, A.B. (2011) Degradation of Reactive Red 120 Dye Using Hydrodynamic Cavitation. *Chemical Engineering Journal*, **178**, 100-107. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.10.018>
- [75] Thanekar, P., Gogate, P.R., Znak, Z., *et al.* (2020) Degradation of Benzene Present in Wastewater Using Hydrodynamic Cavitation in Combination with Air. *Ultrasonics Sonochemistry*, **70**, 105296. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105296>