

Microwave Environmental Chemistry

Fangfang Zou^{1,2}, Jingyuan Hao^{1,2}, Xingcheng Zhang^{3*}, Wenxiang Hu^{1,2,4*}

¹School of Chemical Engineering and Pharmacy, Wuhan Institute of Technology, Wuhan Hubei

²Jingdong Xianghu Microwave Chemistry Union Laboratory, Beijing Excalibur Space Military Academy of Medical Sciences, Beijing

³College of Chemistry and Chemical Engineering, Xinyang Normal University, Xinyang Henan

⁴Aerospace Systems Division, Strategic Support Troops, Chinese People's Liberation Army, Beijing

Email: *zxc791114736@163.com, *huwx66@163.com

Received: Apr. 16th, 2019; accepted: May 1st, 2019; published: May 9th, 2019

Abstract

This paper reviews the application and research progress in microwave technology in the field of environmental protection, and introduces the application of microwave technology for wastewater treatment, waste gas treatment, solid waste treatment in particular, and also comparison in the advantages of microwave heating environmental treatment technology with traditional treatment technology.

Keywords

Microwave Chemistry, Waste Solid, Wastewater, Flue Gas, Dispose

微波环境化学

邹芳芳^{1,2}, 郝静远^{1,2}, 张行程^{3*}, 胡文祥^{1,2,4*}

¹武汉工程大学化工与制药学院, 湖北 武汉

²北京神剑天军医学科学院京东祥鹤微波化学联合实验室, 北京

³信阳师范学院化学与化学工程学院, 河南 信阳

⁴中国人民解放军战略支援部队航天系统部, 北京

Email: *zxc791114736@163.com, *huwx66@163.com

收稿日期: 2019年4月16日; 录用日期: 2019年5月1日; 发布日期: 2019年5月9日

摘要

本文综述了微波技术在环境保护领域中的应用概况, 着重介绍了微波技术在废水治理、废气处理和固体废物处理中的应用, 并比较了微波加热环境处理技术相对于传统处理技术的优势。

*通讯作者。

文章引用: 邹芳芳, 郝静远, 张行程, 胡文祥. 微波环境化学[J]. 微波化学, 2019, 3(1): 7-13.

DOI: 10.12677/mc.2019.31002

关键词

微波化学, 固体废物, 废水, 废气, 处理

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

微波是一种电磁波, 一般指波长在 1 mm~1 m 范围频率为 300 MHz~300 GHz 的超高频电磁波。电磁波对物质有较强的穿透作用, 直接从物质的内部开始加热, 更加的均匀、高效、环保。微波加热的本质是将微波能转化为热能, 该过程为能量传递过程, 不同于传统加热的热传递过程。目前, 微波技术已被广泛应用于化学的各个领域, 如微波有机合成化学、微波无机化学、微波分析化学、高分子材料分解等。近年来, 微波技术已被应用到环境科学领域, 在污染治理工程、环境监测与分析、清洁生产与绿色工艺等方面取得了成功, 并获得了一定程度的技术创新和突破, 新兴的微波环境化学学科正在形成, 并且臻完善。

2. 微波在固体废弃物处理中的应用

2.1. 微波技术处理废旧高分子材料

PET 是一种人工合成的高分子聚合物, 广泛应用于饮料瓶、涤纶、绝缘膜、产品包装等。PET 具有难以被微生物自然降解的特性, 随着 PET 使用量的不断增大, 造成环境的污染日益严重。目前, PET 聚酯的解聚主要有水解、醇解、氨解等方法, 但这些方法都存在一定的缺陷, 如反应条件苛刻, 后处理较难等[1]。

王禹[2]等以微波作为热源对 PET 水解反应进行了研究, 相比较于其它解聚方法, 只有在纯水中解聚 PET 才能得到合成 PET 聚酯的原料苯二甲酸和乙二醇, 实现了真正的物质再利用。作者考察了反应压力、反应时间、微波辐射功率和解聚水量等因素对 PET 解聚率的影响, 采用正交试验确定最佳实验条件, 在反应时间为 105 min, 反应压力为 19 MPa, 微波输出功率为 500 W, 水与 PET 质量比为 6 的条件下, PET 解聚率高达 99.27%。将微波技术应用到聚酯解聚反应对于环境保护和资源的有效利用具有重要现实意义。

在鱼粉的生产过程中, 会产生大量的废水鱼汁, 废水中包含 2%~5% 的蛋白质及其它营养物质。我国许多鱼粉加工企业将鱼汁当废水直接排放, 导致周围环境污染严重。汪志君[3]等研究了微波技术对废水鱼汁中蛋白质的水解, 比较了传统加热和微波加热技术对水解度的影响, 结果表明选择蛋白质浓度为 12% 的废水进行实验, 用微波加热 25 min~30 min, 有 65%~70% 的蛋白质被水解, 但使用传统的方式加热 100 min, 仅有 35% 的蛋白质被水解。这是由于微波加热为辐射加热, 极性分子在微波场中运动摩擦产生热量, 使蛋白质分子肽键断裂, 水解速度加快。

2.2. 微波技术处理工业废渣

每年从电话、电视机、计算机及其他电器中拆卸的废旧电路板有数百万件, 通常对这些垃圾的处理方法是填埋, 但这种方法会渗析出有害金属, 污染地下水。D. E. Clark 教授和 George G. Wicks 领导的课

课题组开发了一套使用微波能销毁印刷电路板并回收其中的重金属的装置[4]。首先, 将电路板压碎并将其放入一个熔融石英坩埚中, 在内壁镶有耐火材料的微波炉中加热 30 min~60 min, 可使苯和苯乙烯等物质会先挥发出来, 并被压缩空气带入第二个微波炉中, 剩余的物质在 1000℃以下焦化。随后升高微波功率, 使剩余的物质(玻璃、金属等)在 1400℃的高温下熔化, 形成玻璃状物质。将其冷却后, 金、银及其他金属会以珠状分离出来, 可回收重新利用。被带入第二个微波炉的有机化合物会被加热的碳化硅反应床分解。利用微波技术处理电子垃圾工艺更清洁、更高效、更节省成本, 经处理过的玻璃化产物不会引起二次污染。

2.3. 微波技术在污泥及重金属回收中的应用

随着污水处理技术的不断完善, 我国城市污水得到有效处理, 但是污泥的产量迅速增加, 大量的污泥已经对环境构成巨大的威胁。王同华[5]等对城市污水处理厂生产的污泥进行微波热解处理, 并研究了微波处理过后产生的物质成分与结构。取污泥样品直接在微波炉中辐射一段时间, 污泥发生热解反应, 产生气、液、固三相产物, 其中液体产率较高。分析得出, 热解得到的气体主要为碳氢化合物(H_2 , CO , CH_4 , C_2H_4 等), 既可以用作燃料气使用, 也是良好的合成气原料, 液体产物主要是脂肪族类化合物, 可直接作为燃料油使用。利用微波热解污泥在处理污泥的同时还实现了资源的再回收利用, 足以证明该技术的优势。该实验还研究了不同的吸波介质对热解反应的影响, 对污泥本身进行加热, 温度最高可以达到 300℃左右, 若添加少量的 SiC, 温度可达到 800℃, 明显提高了热解温度, 油品产率也会得到有效提高。方琳等[6]将 SiC 及微波热解产生的固体产物添加到污泥中, 成功实现了高温热解。添加了吸波介质的污泥在微波场中快速升温, 高温热解有利于大分子物质进一步裂解为小分子气体, 使气态产物比例提高, 液体产物热值为原污泥的两倍, 可做液体燃料, 减少对环境的污染。

3. 微波技术处理废气

3.1. 微波气相催化脱硫

煤是中国最丰富的化石燃料之一, 然而, 煤中的硫成分会导致严重的环境问题, 煤炭在燃烧时产生的 SO_2 释放到大气中会腐蚀金属设备。硫以三种形式存在于煤中: 黄铁矿、硫酸盐和有机物, 其中黄铁矿中含硫成分最多。利用微波辐射进行脱硫处理是一种新颖且有效的方法。Weng and Wang [7]将原煤研碎后通入氮气, 以 1.5 KW 的微波功率照射 100 s, 用 5% HCl 和热水洗涤, 并在氮气氛围内干燥 4 小时, 无机硫的脱出率可达 97%。黄铁矿需在 300℃以上才会被分解, 然而, 加热煤中黄铁矿的同时煤也会被加热, 这可能导致煤基质的热解。但是微波电磁能量可以优先沉积在含硫的黄铁矿区域, 正是由于微波能量的这种选择性加热, 产生的局部高温可以引起黄铁矿硫与周围的活化物如 H_2 、 O_2 及吸收的水分等发生热脱硫反应。

Ferrando and Andre [8]等将原煤用 HI 溶液浸渍后, 通入氢气, 然后用微波照射 10 min, 超过 99% 的黄铁矿硫被去除, 在最佳情况下(20 分钟)有机硫去除率为 64.7%, 可以去除 80.1% 的测试煤中的总硫。

3.2. 微波催化处理汽车尾气

随着汽车工业和经济的发展, 汽车使用数量不断增长, 汽车在给人们带来便利的同时, 汽车尾气也对环境造成了严重污染。尾气的主要成分有 CO , CO_2 , 氮氧化物, 碳氢化合物等, 一般用铂、钯等金属氧化这些气体来处理尾气。唐军旺[9]等将微波辅助催化技术运用到汽车尾气的净化, 并研究了两种模式下反应温度与催化剂性能的关系。结果表明, 经微波加热的催化剂的活性更高, 加热到 270℃便达到起活温度, 但常规加热的催化剂起活温度为 290℃。微波加热降低了催化剂的起活温度, 提升了催化剂的低温活性, 通过比较发现, 微波加热使除 CO 以外的其它气体的转化率均提高了 30%, 微波辅助催化能

够更加简便高效地处理汽车尾气。

除此以外，微波技术还被应用于处理过汽车尾气的废催化剂的回收。目前，从汽车尾气废催化剂中回收铂族金属方法有火法和湿法。湿法流程中金属 Pt, Pd 的浸出率高达 95%，但铑的回收率极低。为了提高铑的浸出率，陈安然[10]等采用了微波煅烧酸浸-水浸提取 Rh 的新工艺，该实验对经湿法浸出的废催化剂与回收剂均匀混合，通过微波加热到预定条件，冷却、加水溶解、抽滤过滤，最后对滤渣中 Rh 的浸出率进行分析。常规焙烧实验铑的浸出率相对较低，若采用微波焙烧，当浸出渣与回收剂比例为 1:8 时，在 600℃下反应 1 小时，铑的浸出率高达 99.79%，主要原因在于微波焙烧时，内部分子震动导致颗粒破裂，使被包裹的铂族金属暴露出来，促进反应进行，而常规焙烧只是在物质表面进行热传递，导致反应效率不高。

3.3. 微波在分子筛制备中的应用

Y 型分子筛可作为催化剂广泛应用于催化裂化和加氢裂化过程中，合成 Y 型分子筛的方法有水热合成法、水热转化法、离子交换法等，常规方法合成的分子筛具有晶粒尺寸较大，费时耗能等缺点。程志林[11]等研究了一种在常压回流微波加热条件下合成 NaY 分子筛。在微波加热条件下，在体系中加入柠檬酸和稀土离子得到的 NaY 分子筛的晶粒尺寸为 40 nm，远远小于常规合成的分子筛晶粒尺寸，且使用微波加热合成反应仅需 60 min，相对于常规合成至少需要 1 天以上，明显的节省了时间及成本。

采用微波辐射合成 MCM-41 介孔分子筛的报道有很多，也表明了微波在分子筛合成中的应用逐渐成熟。用水热法合成晶化需要 7~10 周，随后将样品放入马弗炉中在高温条件下焙烧 7 h，过程繁杂且耗时过长。全微波合成法：将物料按一定的配比进行搅拌混合，制得凝胶，将其放入微波炉中加热 15 min 左右，烘干，得分子筛原粉，再在 650 W 功率下加热脱除模板剂，得到的 MCM-41 介孔分子筛具有热稳定性好、晶粒细小均匀、比表面积大等特点。在多相催化、吸附分离及高等无机材料方面具有潜在的应用价值。

4. 微波在废水处理中的应用

在环境保护领域中，微波主要应用于废水、废气、固体废气物的处理及环保材料的研制，其中对于废水的处理主要有 3 种方式[12]：微波直接作用于废水；微波作用于废水和活性炭(或其他物质)；微波作用于吸附材料。微波技术的高效节能、操作条件简单、无二次污染优点使它广泛应用于废水处理领域并具有良好的前景。但单一的微波法对有机物的去除效果有时有限，与其他污水处理方法联用可以达到更好的效果。

4.1. 微波在废水消毒中的应用

微波消毒是微波照射介质时被介质吸收而产生的热量，以此进行杀菌消毒。强吸收介质对微波的吸收作用明显，升温速度快，消毒效果好。水是最好的微波吸收材料，因此微波也是医疗废水消毒的手段之一。

医疗废水主要是加湿后的废物经微波消毒后产生的废液和处理厂清洗，消毒产生的废水，前者大部分变成气态，随废气一起经处理后排放，少量残液体与后者混合，在废水处理过程中，中水处理后的回用水必须消毒使之达到微生物指标，保证公共卫生安全[13]。常用的消毒方法有氯、二氧化氯、臭氧等氧化剂，紫外线，超声波。但这些方法费用高，无后续消毒作用，或者是对某些病毒无效，都不算是理想的消毒方法[14]。而微波技术则速度快、节约能源、作用温度低、环境污染小。同时，微波处理技术也是继焚烧之后经证实并在国际上取得广泛应用的医疗废物处理技术之一，所以它在医疗卫生方面起到重要作用。

4.2. 微波在破乳中的应用

在原油脱水工艺中,微波是一种有效的破乳手段。它可以产生高频变化的电磁场,破坏油水界面膜的 ζ 电位,微波对原油的内加热使界面膜更易断裂,油(水)分子失去作用力后会上下运动、碰撞、聚结,水分子因重力作用沉降在底层。同时非极性的油分子会被电磁场磁化,分子间引力减弱,油的黏度降低,油水的密度差增大,更利于实现油水分离[15]。这种原油脱水的方法相对于重力沉降、热化学法,能显著地加速稠油体系,提高破乳效果以及脱出水的透光率[16]。在其工艺路线的改进方面,可以通过改变温度、微波震荡时间、脱水剂用量等相关因素得出最佳方案[17],也可以二次脱水处理降低原油的含水率,另外也能与无机盐进行加和作用提高破乳率[18]。

4.3. 微波催化氧化处理废水

微波催化氧化技术(Microwave Induced Oxidation Process)作为一种新型的高级氧化技术对于处理高浓度的废水处理行之有效。它避免了之前物化法、生物法和化学法的去除率低、操作条件苛刻等缺点,已经用来处理农药等有毒有害废水和染料等废水。

微波催化氧化反应的原理有三种解释[19]: 1) 热点效应; 2) 非热点效应; 3) 偶极子转动理论。微波诱导催化反应过程主要是载体上的催化剂位点吸收微波,位点温度迅速上升,使有机物在高温下解离或加速反应。因此催化剂和载体的选择至关重要。最适宜的催化剂是微波高损耗物质,而载体宜选用微波低损耗物质,所以往往需要通过实验选择最佳的实验方案。而且实际应用时常与 Fenton 试剂或类 Fenton 试剂联用以达到更好的处理效果。

4.3.1. 微波-Fenton 法处理废水

1894年,英国化学家 Fenton 在实验中发现二价铁离子和双氧水共存的情况下可以快速氧化分解酒石酸,为了纪念 Fenton (芬顿),就把二价铁离子和双氧水组合试剂称为 Fenton 试剂(芬顿试剂),将 $\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$ 体系叫 Fenton 反应。Fenton 法作为一种高级氧化技术,因在工艺简单、反应迅速、可产生絮凝等优点广泛地应用于工业废水处理。国内外学者利用 Fenton 试剂法已成功降解了酚类化合物、多氯联苯、硝基苯、二硝基氯化苯等, H_2O_2 在 Fe^{3+} 的作用下分解为具有强氧化性的 $\text{OH}\cdot$, 能够将水体中的有机污染物氧化以致矿化。但 Fenton 单独使用需要投入量大, pH 适用范围小、氧化剂利用率低,形成的中间产物往往毒性更大,后续处理困难[20]。微波法与 Fenton 试剂联用可以弥补各自的缺点。因此,将微波和 Fenton 法联合应用于有机废水处理,例如酚类、卡巴呋喃、罗丹明 B、亚甲基蓝和有机染料这些都已用试验筛选出最佳试验条件并取得不错的成果[21]。该方法能大大提高反应效率和降解能力,节省成本,具有广阔的发展前景。

4.3.2. 微波-类 Fenton 法处理废水

“类 Fenton 反应是除 $\text{Fe}(\text{II})$ 以外, $\text{Fe}(\text{III})$ 、含铁矿物以及其他一些过渡金属如 Co、Cd、Cu、Ag、Mn、Ni 等可以加速或者替代 $\text{Fe}(\text{II})$ 而对 H_2O_2 起催化作用或者改变一些条件(例如紫外光照及电 Fenton) 的一类反应的总称”。与 Fenton 反应相比不仅增加了 Fenton 试剂的氧化能力,而且节约了 H_2O_2 的用量。而微波-类 Fenton 法可以有效提高对有机聚合物的去除率。

随着聚合物驱油技术的应用,含聚合物的污水成为了废水处理的一个新的难题。以往有采用微波-类 Fenton 法处理聚合物。例如以 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{La}_2\text{O}_3/\text{CNTs}$ 为催化剂, H_2O_2 为氧化剂应用微波强化湿式氧化技术处理聚合物采油污水(ORWPF) [22], 通过实验优化试验条件(微波辐照功率、时间、工作压力、催化剂和 H_2O_2 加入量、pH), 以达到最佳的去除效果。

4.4. 微波在废水处理剂制备中的应用

微波技术不仅可以处理废水,也可以辅助制备废水处理剂。例如,水处理絮凝剂聚丙烯酰胺(PAM)的制备[23]。利用微波加热制备该溶液比常规加热絮团沉降能力强,反应灵敏,对洗煤废水的处理效果好。孙延辉[24]等人制备的含有多种活性组分并以硅铝骨架为分子载体的分子筛在微波反应条件下具有良好的稳定性和催化活性。利用微波技术也可制备具有纳米线晶体结构的自增韧玻璃陶瓷。王冬冬[25]等人便是采用熔融浇铸成型,并通过在工业微波炉中进行析晶处理制备 $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 系玻璃陶瓷。该陶瓷材料生产成本低,性能良好,用途广泛。总之微波技术在废水处理剂的制备工艺优化中起到了重要作用[26]。

4.5. 微波和其他技术联用处理废水

因为单一的微波法对有机物的去除效果有限,所以要与其他技术联用做到优势互补,同时避免各自缺点。例如微波与活性炭联用,可以增加活性炭的重复利用率和有机物的去除率。活性炭作为一种易得和有效的吸附剂,常用于处理污水中的有机污染物。但吸附后的活性炭表面有机物却难以处理,限制了对活性炭的重复利用。而微波再生技术即微波作用于废水和活性炭,能有效地解吸活性炭表面的有机物,使活性炭再生并有利于有机物的消解和回收再利用。微波除了使单独活性炭的再生外,有时在活性炭中加入其他物质,这些物质在微波场中的变化,对活性炭的再生有多方面的影响[27]。

研究表明,污染物吸附到活性炭或其他吸附剂上,再置于微波场中辐射,比直接置于微波场中辐射去除效果更好。Chih [28]等采用低能度的微波辐射,对污水中吸附在颗粒状活性炭表面的有机物三氯乙烯、二甲苯、萘以及碳氢化合物等进行解吸和消解,其最终分解率达 100%,处理后的水质稳定。同时,微波加热解吸还可回收有机物。

5. 结语

微波技术作为一种高效节能、操作简单、无二次污染的环境友好型治理手段,在固体废弃物、废气、污水等处理工艺都有广泛的应用,并且可以与其他传统方法联用,优化反应条件,最大效率地完成环境净化。虽然其技术工艺在某方面还不够成熟,但随着人们对微波技术的不断探索和尝试,相信凭着它在环境处理中的优势会为人类带来巨大的经济效益和社会效益,为可持续发展贡献重大力量[29]。

参考文献

- [1] 岳群峰,廖志刚,李桂春,等.微波辅助废旧PET聚酯解聚反应研究[J].化学工程师,2011,25(5):9-11.
- [2] 王禹.纯水中PET的微波解聚——方法的研究[D]:[硕士学位论文].大庆:大庆石油学院,2006.
- [3] 汪志君,顾林,姜军.废水鱼汁微波水解技术研究[J].美食研究,2005,22(4):57-60.
- [4] 杨强.微波技术在环境保护中的应用[J].环境保护,2001(1):41-43.
- [5] 王同华,胡俊生,夏莉,等.微波热解污泥及产物组成的分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2008,24(4):662-666.
- [6] 方琳,田禹,武伟男,等.微波高温热解污水污泥各态产物特性分析[J].安全与环境学报,2008,8(1):29-33.
- [7] Weng, S. and Wang, J. (1992) Exploration on the Mechanism of Coal Desulfurization Using Microwave Irradiation/Acid Washing Method. *Fuel Processing Technology*, **31**, 233-240. [https://doi.org/10.1016/0378-3820\(92\)90022-I](https://doi.org/10.1016/0378-3820(92)90022-I)
- [8] Ferrando, A.C. (1996) Coal Desulphurization with Hydroiodic Acid and Microwaves. *Coal Science & Technology*, **24**, 1729-1732. [https://doi.org/10.1016/S0167-9449\(06\)80148-5](https://doi.org/10.1016/S0167-9449(06)80148-5)
- [9] 唐军旺,张涛.微波辅助催化净化汽车尾气[J].宁夏大学学报(自然科学版),2001,22(2):197-198.
- [10] 陈安然,张泽彪,王仕兴,等.微波焙烧回收汽车尾气废催化剂湿法浸出渣中铈[J].稀有金属,2012,36(6):979-984.

- [11] 程志林, 晁自胜, 万惠霖. 微波诱导快速合成纳米 NaY 分子筛[J]. 物理化学学报, 2003, 19(6): 487-491.
- [12] 王翠玲, 谷晋川. 微波技术在废水处理中的应用[J]. 环境监测管理与技术, 2007, 19(4): 36-39.
- [13] 郭宝东, 邢杨, 张欣. 消毒技术在中水回用中的应用[J]. 环境卫生工程, 2006, 14(4): 63-64.
- [14] 何军. 几种常用医疗废水处理方法的比较[J]. 辽宁城乡环境科技, 2004, 24(1): 39-41.
- [15] 范永平, 王化军, 张强. 原油微波辐射破乳技术的研究进展[C]//中国化工学会. 中国化工学会 2005 年石油化工学术年会论文集. 2005: 838-840.
- [16] 夏立新, 刘泉, 张路, 等. 微波辐射破乳研究进展[J]. 化学研究与应用, 2005, 17(5): 588-591.
- [17] 丁洋, 熊祥祖, 魏世轵, 等. 微波破乳法原油脱水技术研究[J]. 武汉工程大学学报, 2010, 32(5): 15-18.
- [18] 杨小刚, 谭蔚, 谭晓飞, 等. 微波化学法原油破乳脱水工艺的优化[J]. 应用化工, 2008, 37(9): 1046-1050.
- [19] 王哲明, 王进明, 臧传利, 等. 微波诱导催化氧化废水处理研究进展[J]. 水处理技术, 2010, 36(7): 24-28.
- [20] 马强. Fenton 试剂在处理难降解工业有机废水中的应用[J]. 工业用水与废水, 2008, 39(1): 27-30.
- [21] 曾丹林, 刘胜兰, 张崎, 等. Fenton 及其联合法处理有机废水的研究进展[J]. 工业水处理, 2015, 35(4): 14-17.
- [22] 史书杰, 王鹏, 赵姗姗, 等. 微波强化类 Fenton 法处理聚合物驱采油废水[C]//全国微波化学会议. 2008 年全国博士生学术论坛——能源与环境领域论文集. 2008: 483-490.
- [23] 马清花, 柴涛. 微波技术在水处理领域的应用[J]. 山东化工, 2005, 34(3): 26-28.
- [24] 孙延辉, 蔡丽娟, 葛德禹. 微波催化氧化处理高浓度有机废水的催化剂、其制备方法及应用[P]. 中国专利: CN106076319A. 2016-11-09.
- [25] 王冬冬, 王刚, 孙小飞, 等. 纳米孔莫来石陶瓷材料的制备[J]. 无机化学学报, 2012, 28(3): 491-494.
- [26] 王建营, 胡文祥, 金钦汉. 微波诱导催化反应[M]//金钦汉, 主编. 微波化学. 北京: 科学出版社, 1999: 86-93.
- [27] 张军军, 白育庭, 邵开元, 胡文祥. 微波化学技术在废水处理中的应用[J]. 微波化学, 2018, 2(3): 57-62.
- [28] Jou, G.C.J. (1998) Application of Activated Carbon in a Microwave Radiation Field to Treat Trichloroethylene. *Carbon*, **36**, 1643-1648. [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(98\)00158-4](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(98)00158-4)
- [29] 胡文祥. 《微波化学》创刊词——唯有微波可壮志 敢教化学换新天[J]. 微波化学, 2017, 1(1): 1-2.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2576-1110, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>
期刊邮箱: mc@hanspub.org