

微波-活性炭联合作用在污染控制中的应用

赵伟^{1,2} 刘希涛^{2*}

(1. 中国科学技术信息研究所资源共享促进中心,北京 100038;
2. 北京师范大学环境学院水环境模拟国家重点实验室,北京 100875)

摘要 近年来,微波技术被越来越多地应用于污染控制方面的研究,其中相当一部分工作是借助于微波与活性炭的相互作用,即利用活性炭在微波辐照下可快速升温的特性,获得较高反应温度,同时活性炭还具有较强的还原能力和催化作用,从而达到分解吸附在活性炭孔隙内部或与活性炭共存于同一体系中的污染物的目的。首先从活性炭在微波场中升温的角度探讨了微波辐照对活性炭的作用,并就微波-活性炭联合作用在气态污染物处理、液态污染物处理、土壤污染修复以及活性炭为载体的催化剂制备等方面的研究进展进行了评述。

关键词 微波 活性炭 污染控制 催化剂制备

中图分类号 X505 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2009)07-1153-07

Application of the combined effect of microwave and activated carbon in pollution control

Zhao Wei^{1,2} Liu Xitao²

(1. Center for Resource Sharing Promotion, Institute of Scientific and Technical Information of China, Beijing 100038, China;
2. State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract In recent years, more and more investigations on the application of microwave technology in pollution control were reported, and many of them utilized the interaction between microwave and activated carbon. Since activated carbon is a very good microwave absorbing material, whose temperature rises very fast under microwave irradiation, and it is also an effective reductant and catalyst, pollutants adsorbed by or existing with activated carbon can be decomposed efficiently by microwave heating. This paper discussed the interaction of microwave and activated carbon from the point of carbon temperature rising in microwave field, and summarized the research progresses of the combined effect of microwave and activated carbon in the treatment of contaminated air, water and soil, along with in the preparation of carbon-supported catalyst.

Key words microwave; activated carbon; pollution control; catalyst preparation

微波是频率在 300 MHz 到 300 GHz(波长 1 m ~ 1 mm)的电磁波。近年来,微波辐射由于其分子水平的加热能力可引发均匀和快速的热反应,引起了化学家的广泛关注^[1]。微波在家庭中、工业上和医药行业中被广泛应用^[2],在有机合成^[3,4]、产品脱水^[5]、无机材料制备^[6]、生物技术开发^[7]、环境样品分析^[8]以及食品灭菌^[9]等领域,都有关于微波应用的报道。微波在污染控制领域的应用也有报道,如微波辐照处理被用于多氯联苯(PCBs)^[10]和多环芳烃(PAHs)^[11]污染的土壤的修复,也被用于含重金属的污泥^[12]和包装废物^[13]的处理。

活性炭作为一种最常见和十分有效的吸附剂,在气态污染物^[14]和液态污染物^[15]处理方面都有十

分广泛的应用。活性炭吸附法是目前城市污水、工业废水深度处理和污染源净化的一种有效手段。另外,活性炭在应对突发性环境污染事故方面也发挥着很大的作用,如在 2005 年底的松花江环境污染事件中就曾使用大量活性炭保障饮用水安全。但活性炭在使用过程中面临一个很重要的问题,就是活性炭的再生,如果用后的活性炭不能得到有效再生,

基金项目:国家“973”重点基础研究发展规划项目(2007CB407302);
国家自然科学基金资助项目(20607003);国家重点实验室专项基金课题资助项目(08K06ESPCT)

收稿日期:2009-01-05; **修订日期:**2009-02-07

作者简介:赵伟(1975~),女,博士,助理研究员,主要从事科技信息资源管理工作。E-mail:zhaowei@istic.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail:liuxt@bnu.edu.cn

不仅会使污染物处理成本增加,还会带来二次污染问题。

鉴于活性炭是一种非常好的微波吸收材料,在微波作用下其温度可迅速升高,并且在高温下碳材料本身具有较强的还原作用,另外,活性炭制备过程中引入的金属元素对各类反应具有一定的催化作用,因此近年来国内外一些学者不断地探索利用微波与活性炭的联合作用处理各种形态的污染物。一种方式是先将气态或液态污染物吸附到活性炭内部孔隙,然后进行微波辐照处理,在污染物分解的同时实现活性炭再生;另一种方式是将活性炭颗粒置于待处理的介质中(水溶液或土壤),启动微波进行处理,期间可能添加其他反应物辅助处理。本文将首先探讨活性炭在微波场中的升温过程,然后结合作者近年来开展的工作对微波-活性炭相互作用在气、水和土壤污染控制以及催化剂制备等方面的国内外研究进行综述,希望能为相关研究的开展提供有益的参考。

1 微波辐照对活性炭的作用

一般来说,介质在微波场中的加热通过2种机理实现,即离子传导和偶极子转动。在微波加热的实际应用中,2种机理的微波能耗散同时存在^[16]。为了解微波辐照对活性炭的作用,一个比较直接的办法是测定活性炭在微波场中的升温过程。

1.1 微波场测温方法的选择

光纤测温仪和红外测温仪都可用于微波场温度的测量,但光纤测温仪产品稳定性较差,造价高,而红外测温仪测定的是物体表面的温度,且使用不方便,因而限制了它们在微波场测温中的推广应用^[17]。

一般认为传统的热电偶不能应用于微波场测温,因为电磁场和金属探头之间会发生相互作用^[18]。在强电磁场下,金属材料制作的测温探头及导线在高频电磁场下产生感应电流,由于集肤效应和涡流效应,使其自身温度升高,对温度测量造成干扰,使温度示值产生很大误差或者无法进行稳定的温度测量。而有报道称,当热电偶探头与电磁场的方向垂直时不会影响电磁场的分布^[19,20]。另外,由于金属材料对微波辐射具有较强的反射作用,常被用作微波屏蔽材料,可以把这些材料做成屏蔽保护套,加在热电偶及导线外部,以屏蔽微波辐射的干扰^[21]。

1.2 活性炭在微波场中的升温过程

Menéndez等^[1]采用铠装K型热电偶和红外高温计,对微波场中活性炭床层温度进行测定,发现2种方法得到的结果比较接近。

Liu等^[22]利用铠装K型镍铬—镍硅热电偶和XMT数字温度指示仪系统地记录了煤质颗粒活性炭在不同微波功率条件下在微波场中的升温过程。发现对于石英反应器中装填的10g(干重)湿度为52.5%(以干炭重量计)的煤质颗粒活性炭,在微波作用下温度迅速上升,当微波功率为640W时(该功率水平是连续而非间歇的,即不是像家用微波炉那样通过占/空比调节微波功率),活性炭床在4min内温度升至1100℃,而当微波功率为850W时,加热至此温度只需不到3min的时间,如图1所示。

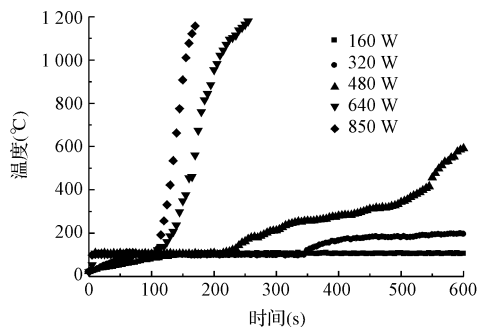


图1 不同功率条件下煤质颗粒活性炭在微波场中的升温过程^[22]

Fig. 1 Temperature rising courses of activated carbon in microwave field at various power levels

这一方面体现出活性炭是非常好的微波吸收材料,另一方面显示了微波加热的特别之处,即微波能直接作用于物料内部的分子或离子,导致偶极分子旋转和离子迁移,吸收的能量被耗散为热,响应快速^[13]。与常规加热比较,微波加热是内加热,而常规加热是外加热,在微波的作用下物料升温速度快,上升的温度高^[23]。

2 气态污染物处理

利用微波-活性炭联合作用进行气态污染物处理一般都是采用先吸附再处理的方式,即污染气体先在常温下通过活性炭床,活性炭吸附饱和后用微波对其进行辐照处理,在处理污染物的同时实现活性炭再生。

2.1 氮氧化物和硫化物

美国怀俄明州的研究人员^[24]较早地开展了微波辐照消除 NO_x 的实验,不过他们使用的是木炭。在研究过程中先让 NO_x 气体通过一炭床吸附 NO_x 饱和,然后进行微波辐照,此时吸附的 NO_x 与 C 反应生成 N_2 和 CO_2 , NO_x 去除率可达 98%。微波辐照除去 NO_x 的同时也使炭床获得再生,而且再生后对 NO_x 的吸附能力和吸附速率有明显的提高。实验发现,随着循环使用次数的增加,木炭的表面积逐渐增大,最初木炭的表面积为 $82 \text{ m}^2/\text{g}$, 9 次循环后增大到 $800 \text{ m}^2/\text{g}$,与此同时每 100 g 木炭对 NO_x 的吸附量也从 10 g 提高到 30 g。实际上此时木炭已经变成了活性炭。

张达欣等^[25]采用 2 种方式研究了活性炭吸附-微波辐照对 NO 和 SO_2 的处理。一种方式是待处理气体连续通过反应器,另一种方式是 NO 或 SO_2 常温下通过活性炭,吸附一定时间后微波辐照。对产物检测发现,无论采用何种方式,NO 和 SO_2 的去除率随微波功率的增加而增加,在活性炭中掺入 CuCl_2 后,去除率亦增加。他们还将微波辐照与电炉加热还原 NO 和 SO_2 做了比较,结果无明显差异,表明微波辐照主要是热效应。

活性炭吸附-微波辐照工艺对于还原态硫化物的处理也取得了较好的效果,如研究发现微波辐照再生吸附饱和硫化氢的活性炭比用常规的硫化铵溶液浸取法、过热蒸气再生法等更具优势,再生时间仅是常规方法的 $1/10 \sim 1/20$,解吸效率 $> 90\%$ ^[26];而对于粘胶纤维厂含有 CS_2 和 H_2S 的废气,该工艺处理后出口气体浓度达到国家排放标准,并且微波再生后活性炭性能有很大的改善^[27]。

2.2 挥发性有机化合物

台湾学者在应用活性炭吸附-微波辐照分解工艺处理挥发性有机化合物方面起步较早,对三氯乙烯^[28]和苯系物^[29]的处理都得到了较高的处理效率。Cha 等^[14]将该工艺应用于对甲乙酮、丙酮和四氯乙烯的处理,对活性炭重复吸附和微波再生 20 次发现,微波方式的再生不但不会对活性炭的吸附能力造成很大的影响,还能恢复活性炭的吸附能力接近它的初始值,这与前述处理氮氧化物和硫化物所得到的结果是一致的。宁平等^[30]对载有甲苯的饱和活性炭进行微波辐照再生研究,也发现微波辐照再生具有再生时间短、效率高等优点,同时用冷凝法冷却微波再生后的气流回收甲苯,回收率及纯度均

较高。

微波辐照对活性炭具有如此好的再生作用,主要是由于微波加热是一种内加热,活性炭中的水分子及吸附的有机物等迅速被加热而急剧挥发,产生蒸气压,从原料内部向外部爆炸般地压出,由于这种剧烈作用,活性炭具有更显著的多孔结构^[31]。

3 液态污染物处理

3.1 吸附-再生处理法

利用微波和活性炭的相互作用处理液态污染物的研究近年来发展很快。邹宗柏等^[32]采用活性炭吸附-微波辐照的方式处理了废水中的磺基水杨酸,通过碘值的变化计算得出,活性炭上磺基水杨酸去除率可达 97.4%。Tai 等^[33]采用该种方式处理了溶液中的苯酚,结果表明,微波辐照 4 min 后苯酚被完全降解成 CO_2 和 H_2O 。实验发现在微波辐照下,活性炭粒子间产生弧光并且很快变得火红,此时的温度可达 1200°C 以上。但该报道存在的一个问题是未阐明所采用的反应器是何种形式,若是开放的,应对反应过程中产生的气体及液体物质收集或处理;若是封闭的,在微波辐照时反应器内会产生大量蒸气,容易发生爆炸。

Liu 等^[34]在前人工作的基础上,设计了一个半封闭的微波辐照装置。装置的主体是一经改装的家用微波炉,微波功率连续可调,炉腔上下开口,内置柱状石英玻璃反应器,反应器顶端与冷凝系统相连接,用于冷却收集微波处理过程产生的蒸气,尾气经碱液或有机溶剂分 2 级吸收后排空。该装置的优点一方面是反应基本在常压下进行,可保证安全;另一方面反应器内部呈半封闭状态,微波启动后对反应器内待处理物料(如吸附饱和活性炭或污染土壤等)加热产生的蒸气及热量可将存在于反应器内部的空气排空,而外部空气无法进入,反应基本在惰性条件下进行。采用该装置对吸附污染物的活性炭进行处理时不需要通入惰性气体来防止活性炭烧毁。在利用该装置处理吸附了水溶液中五氯酚(PCP)的活性炭时发现:微波辐照几分钟后,绝大多数吸附在活性炭上的 PCP 被彻底分解或炭化,虽然产生了少量中间产物,但与所处理的 PCP 的量相比可忽略^[34];在负载铜催化剂的活性炭上 PCP 的分解更为快速,体现了铜的催化分解作用^[22]。对吸附饱和酸性橙 II 溶液^[35]和 PCB 溶液^[36]的活性炭的处理也得到相似结果,即一方面污染物被分解,另一方面活性

炭得到再生。后来该装置也被用于处理土壤中的 PCBs^[37,38]。

3.2 活性炭-待处理溶液同时辐照法

微波-活性炭相互作用处理液态污染物的另一种操作方式是将活性炭置于待处理的溶液中或使待处理溶液动态流过活性炭床,启动微波进行处理,即活性炭和待处理溶液同时接受微波能照射。这种方式比较直接,处理对象就是液态污染物,但由于水本身是非常好的微波吸收物质,会吸收相当部分的微波能用于其自身温度的升高,因此,这种处理方式可能会存在能耗过高的问题。

王金成等^[39,40]在活性炭存在下用微波辐照活性艳蓝溶液,50 mL 浓度为 300 mg/L 的活性艳蓝溶液中投加 1 g 活性炭,微波辐照 4 min,脱色率达 97.1%。同样的染料溶液在载硫酸镍活性炭存在下,微波辐照 3 min 脱色率可达 97.2%。研究还表明,由于微波辐照条件下活性炭对活性艳蓝的处理量明显高于活性炭常温下对活性艳蓝的饱和吸附量,说明在活性炭存在时微波辐照能使活性艳蓝脱色,除了活性炭的吸附作用外,也发生了某些化学变化。在该工作基础上,张耀斌等^[41]采用流动态反应器研究了微波-活性炭联合作用对酸性萘醌绿染料的处理,发现其脱色率与反应时间、固液比、进样浓度、微波功率密切相关,这些实验现象又通过羟基自由基的测定得到了进一步的确认^[42]。

相关的工作还有张国宇等^[43]和姜思朋等^[44]分别利用活性炭和亚铁改性活性炭在微波辐照下处理了酯化废水和雅格素红废水。雅格素红废水在微波功率 650 W 下辐照 6 min 的脱色率为 99.6%;微波功率 500 W 下辐照 5 min,酯化废水的 COD 去除率为 89%。即该技术不仅能有效脱色,对 COD 也有很好的去除作用。

最近,一些研究人员向微波-活性炭联合作用体系引入其他反应物来处理液态污染物,以期获得更好的处理效果。杨良玉等^[45]将活性炭与铁屑 1:1 混合,吸附染料废水中的活性艳红 X-3B,然后对铁屑/活性炭进行微波辐照,废水脱色率保持在 99% 以上。实验结果表明,炭铁化合物较单独活性炭对染料废水的去除率有明显提高,作者认为反应机理可能有 2 种或是 2 种以上的协同作用:一是铁屑在微波辐照下促进了对活性炭的再生、活化;二是有铁屑的存在时,微波场中的“打火”更剧烈,此时铁屑“打火”产生等离子体 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 及强氧化剂 O_3 、

$\cdot OH$ 等活性物质,同时产生的电弧(紫外)等也有较强的氧化作用,促进了染料的降解。南京理工大学水处理所的研究人员^[46-49]将微波与活性炭、芬顿试剂结合使用,相继处理了实际染料废水、炼焦废水、炼油废水、餐饮废水和白酒废水等,COD 值 1 000 ~ 5 000 mg/L 的实际废水经微波辅助芬顿氧化后,其出水 COD 值达到国家二级排放标准。卜龙利等^[50]通过向微波-活性炭联合作用体系引入氧气,开发了“微波辅助催化氧化工艺”,利用该工艺处理对硝基酚溶液^[51]、H-酸溶液^[52] 和实际含醛废水^[53] 都取得了很好的效果,不仅目标物转化效率高,而且该工艺处理后出水的可生化性提高,为后续的生物处理创造了条件。由此看来,在处理高浓度难降解有机废水时,也可将微波技术作为生物法的前处理技术来使用。

4 土壤污染修复

近年来随着我国城市化进程的加快,一些污染严重的企业逐渐关停或从市中心迁出,而工厂倒闭或搬迁遗留的污染场地在进一步开发前必须进行处理,以降低环境风险。微波-活性炭相互作用为污染场地修复提供了可供选择的方法。

George 等^[54]在采用微波辐照处理土壤中的 PCP(沸点为 310 °C)和污泥中的菲(沸点为 340 °C)时,发现土壤中加入炭屑可加快其升温速度,提高对污染物的去除率。实验表明,对 PCP 浓度 300 $\mu g/g$ 的土壤,微波辐照 45 min 其去除率为 20%,当加入 40% 的炭屑后,去除率可提高到 60%。Tai 等^[55]以及 Abramovitch^[56]在研究微波辐照处理重金属污染土壤时发现,在插入炭棒等吸波能力好的介质时,可促进土壤的玻璃化,从而固定土壤中的铬、锰和钴等重金属,金属的浸出浓度低于美国 EPA 标准。Liu 等^[37]研究了微波-活性炭联合作用对人为添加到土壤中的 2,4,5-三氯联苯(PCB29)的降解。研究表明,活性炭颗粒的加入有效地提高了土壤吸收微波的能力,在微波辐照下快速升温,从而促进了土壤中 PCB29 的降解,印证了 George 等^[54]的结论。在处理湿度较大的土壤时,相当数量的 PCB29 随着水蒸气解吸出来。为达到更完全的分解或固化的目的,建议考虑提高微波功率、增加活性炭投加比例以及处理前降低土壤湿度等方式。

美国环保局和海军工程设备研究中心于 20 世纪 90 年代初开发了用于处理氯代有机化合物的碱

催化分解工艺,在 NaOH、氢供体(如 6#燃料油)和催化剂(如活性炭、石墨和铁粉等)存在条件下于 320℃左右持续搅拌处理 1~8 h,可实现氯代有机物的全部或部分脱氯^[57]。该工艺脱氯效果较好,但存在处理时间长、能耗高的问题。通过采用微波-活性炭联合作用可对其进行改进,即以微波加热为热源,利用微波与作为催化剂的活性炭或其他炭载催化剂的直接作用,在 NaOH 和氢供体存在条件下进行处理,形成“微波辅助碱催化分解工艺”,实现对氯代有机物的快速降解,缩短处理时间、降低能耗。本文作者目前正在开展这方面的研究,并已取得较好的结果^[38]。

5 活性炭负载金属催化剂的制备

在污染控制领域,很多技术的使用都需要有催化剂辅助才能获得理想的效果,而活性炭为载体的催化剂是其中比较常用的。微波-活性炭相互作用为开发炭载催化剂提供了一种有效的途径。

微波选择性加热的特性可为物料加热过程节省大量的能量。微波加热的另外一个重要方面是,它形成与常规加热方向相反的温度梯度,也就是说,最高的温度在物体的中心,热由中心向外传递。对于像催化剂干燥这样的操作,这种作用是非常有益的。除了温度梯度的方向相反之外,与常规加热相比,这个梯度较小,因为热在接受辐照的物料的所有部分生成。这种作用减小了物料内部的压力,有助于消除内部压力过大时发生的催化剂破裂等问题^[58]。在制备催化剂的各种新方法中,微波辐照正发展成为一种有效的技术,在催化剂制备过程中具有干燥快速、活性组分分布均匀、与载体结合牢固等优点^[59]。Lingaiah 等^[60]采用常规和微波加热方法制备了系列氧化硅为载体的 Pd-Fe 双金属催化剂,发现与常规方法制得的催化剂相比,微波法制备的催化剂具有不同形貌和较高的水解脱氯活性。

Liu 等^[22]利用前述的微波辐照实验装置制备了以活性炭为载体的铜催化剂,步骤简述如下:颗粒活性炭浸渍于一定浓度的硝酸铜水溶液,悬浮溶液在 250 r/min 的摇床中混合 2 h,滤去水溶液的活性炭在 640 W 间歇功率的微波炉中辐照 2 min 至近干,之后将催化剂置于石英反应器中,在微波功率 850 W 的条件下煅烧 10 min。由于反应器内部在微波启动后形成近似惰性环境,因此催化剂煅烧过程不需要氮气保护。对制备得到的催化剂进行 X-射

线衍射分析发现,在 $2\theta = 43.3^\circ$ 和 $2\theta = 50.4^\circ$ 元素铜结构的特征位置出现尖锐的强吸收峰,扫描电镜图片显示催化剂颗粒分布均匀。与常规制备方法相比较,这种新方法省时(煅烧时间由几小时缩短为几分钟)、节能,不需要氮气保护和氢气还原,制得的催化剂分散性好。

6 展望

本文综述了微波-活性炭相互作用在污染控制领域应用的研究进展,今后各种炭载催化剂以及炭与其他载体复合催化剂的开发将在很大程度上扩展微波-活性炭相互作用在污染控制领域的应用空间。由于微波与炭的相互作用在瞬间发生,反应体系在几分钟内即可达到污染物分解或固定化所需的温度,处理时间短、效率高,可有效控制处理成本。通过对微波-活性炭相互作用的深入研究,有望开发出响应速度快、处理能力强、所需时间短且设备小型化的处理装置,这为持久毒性物质的有效处理提供了可能,也将为突发环境污染事件的快速处置提供可供选择的方法。

参考文献

- [1] Menéndez J. A., Menéndez E. M., Pis J. J. Thermal treatment of active carbons: A comparison between microwave and electrical heating. *J. Microwave Power E. E.*, **1999**, 34(3):137~143
- [2] Satoshi H., Hisao H. Environmental remediation by an integrated microwave/UV-illumination method. 1. Microwave-assisted degradation of Rhodamine-B dye in aqueous TiO₂ dispersions. *Environ. Sci. Technol.*, **2002**, 36(6):1357~1366
- [3] Mats L., Anders H. Microwave-assisted high-speed chemistry: A new technique in drug discovery. *Drug Discov. Today*, **2001**, 6(8):406~416
- [4] Correa R., Gonzalez G., Dougar V. Emulsion polymerization in a microwave reactor. *Polymer*, **1998**, 39(6~7):1471~1474
- [5] Funebo T., Ohlsson T. Microwave-assisted air dehydration of apple and mushroom. *J. Food Eng.*, **1998**, 38(3):353~367
- [6] Fang Y., Hu A. O., Shixi J. O. J. The effect of calcinations on the microwave dielectric properties of Ba(Mg_{1/3}Ta_{2/3})O₃. *J. Eur. Ceram. Soc.*, **2001**, 21(15):2745~2750
- [7] Banik S., Bandyopadhyay S., Ganguly S. Bioeffects of mi-

- crowave—A brief review. *Bioresour. Technol.*, **2003**, 87(2): 155 ~ 159
- [8] Ericsson M., Colmsjö A. Dynamic microwave-assisted extraction. *J. Chromatogr. A*, **2000**, 877(1 ~ 2): 141 ~ 151
- [9] Chau T. T., Kao K. C., Blank G., *et al.* Microwave plasmas for low-temperature dry sterilization. *Biomaterials*, **1996**, 17(13): 1273 ~ 1277
- [10] Abramovitch R. A., Huang B. Z., Abramovitch D. A., *et al.* In situ decomposition of PCBs in soil using microwave energy. *Chemosphere*, **1999**, 38(10): 2227 ~ 2236
- [11] Abramovitch R. A., Huang B. Z., Abramovitch D. A., *et al.* In situ decomposition of PAHs in soil and desorption of organic solvents using microwave energy. *Chemosphere*, **1999**, 39(1): 81 ~ 87
- [12] Gan Q. A case study of microwave processing of metal hydroxide sediment sludge from printed circuit board manufacturing wash water. *Waste Manage.*, **2000**, 20(8): 695 ~ 701
- [13] Carlos L. P., Howard A. C. Microwave-induced pyrolysis of plastic wastes. *Ind. Eng. Chem. Res.*, **2001**, 40(22): 4749 ~ 4756
- [14] Cha C. Y., Coss M. Microwave regeneration of activated carbon used for removal of solvents from vented air. *J. Air Waste Manage. Assoc.*, **2000**, 50(4): 529 ~ 535
- [15] Dalmacija B., Tamas Z., Karlovic E., *et al.* Tertiary treatment of oil-field brine in a biosorption system with granulated activated carbon. *Water Res.*, **1996**, 30(5): 1065 ~ 1068
- [16] Mingos D. M. P., Baghurst D. R. Application of microwave dielectric heating effects to synthetic problems in chemistry. *Chem. Soc. Rev.*, **1991**, 20(1): 1 ~ 47
- [17] 郁有文, 常健. 传感器原理及工程应用. 西安: 西安电子科技大学出版社, **2000**
- [18] Cuccurullo G., Berardi P. G., Carfagna R. IR temperature measurements in microwave heating. *Infrared Phys. Technol.*, **2002**, 43(3 ~ 5): 145 ~ 150
- [19] Liu F., Turner I., Bialkowski M. A finite-difference time-domain simulation of power density distribution in a dielectric loaded microwave cavity. *J. Microwave Power E. E.*, **1994**, 29(3): 138 ~ 148
- [20] Roussy G., Jassm S., Thiebaut J. M. Modeling of a fluidized bed irradiated by a single or multimode electric microwave field distribution. *J. Microwave Power E. E.*, **1995**, 30(3): 178 ~ 187
- [21] 崔凤英, 李莉. 微波场的温度测量. 计量测试, **2002**, 12(5): 36 ~ 37
- [22] Liu X. T., Quan X., Bo L. L., *et al.* Temperature measurement of GAC and decomposition of PCP loaded on GAC and GAC-supported copper catalyst in microwave irradiation. *Appl. Catal. A*, **2004**, 264(1): 53 ~ 58
- [23] Berry F. J., Smart L. E., Sai P. P. S. Microwave heating during catalyst preparation: Influence on the hydrodechlorination activity of alumina-supported palladium-iron bimetallic catalysts. *Appl. Catal. A*, **2000**, 204(2): 191 ~ 201
- [24] Cha C. Y., Kong Y. Enhancement of NO_x adsorption capacity and rate of char by microwaves. *Carbon*, **1995**, 33(8): 1141 ~ 1146
- [25] 张达欣, 于爱民, 金钦汉. 微波-炭还原法处理二氧化硫(SO₂)的研究. 微波学报, **1998**, 14(4): 341 ~ 346
- [26] 王学谦, 宁平. 活性炭吸附硫化氢及微波辐照解吸研究. 环境污染与防治, **2001**, 23(6): 274 ~ 279
- [27] 黄妍, 张俊丰. 活性炭吸附/微波技术再生处理粘胶纤维废气的研究. 环境污染治理技术与设备, **2005**, 6(9): 72 ~ 74
- [28] Jou C. J. G. Application of activated carbon in a microwave radiation field to treat trichloroethylene. *Carbon*, **1998**, 36(11): 1643 ~ 1648
- [29] Jou C. J. G., Tai H. S. Application of granular activated carbon packed-bed reactor in microwave radiation field to treat BTX. *Chemosphere*, **1998**, 37(4): 685 ~ 698
- [30] 宁平, 田森林, 王学谦, 等. 微波辐照再生载甲苯活性炭. 化学工业与工程, **2001**, 18(2): 109 ~ 113
- [31] 李黎, 曾庆福, 阮新潮. 微波再生技术在废水处理中的应用. 应用化工, **2004**, 33(5): 1 ~ 3, 7
- [32] 邹宗柏, 傅大放, 张璐. 用微波辐射除碱基水杨酸污染物. 环境污染与防治, **1999**, 21(1): 22 ~ 24
- [33] Tai H. S., Jou C. J. G. Application of granular activated carbon packed-bed reactor in microwave radiation field to treat phenol. *Chemosphere*, **1999**, 38(11): 2667 ~ 2680
- [34] Liu X. T., Quan X., Bo L. L., *et al.* Simultaneous pentachlorophenol decomposition and granular activated carbon regeneration assisted by microwave irradiation. *Carbon*, **2004**, 42(2): 415 ~ 422
- [35] Quan X., Liu X. T., Bo L. L., *et al.* Regeneration of acid orange 7-exhausted granular activated carbons with microwave irradiation. *Water Res.*, **2004**, 38(20): 4484 ~ 4490
- [36] Liu X. T., Yu G., Han W. Y. Granular activated carbon adsorption and microwave regeneration for the treatment of 2,4,5-trichlorobiphenyl in simulated soil-washing solution. *J. Hazard. Mater.*, **2007**, 147(3): 746 ~ 751
- [37] Liu X. T., Yu G. Combined effect of microwave and acti-

- vated carbon on the remediation of polychlorinated biphenyl-contaminated soil. *Chemosphere*, **2006**, 63(2): 228 ~ 235
- [38] Liu X. T., Zhang Q., Zhang G. X., *et al.* Application of microwave irradiation in the removal of polychlorinated biphenyls from soil contaminated by capacitor oil. *Chemosphere*, **2008**, 72(11): 1655 ~ 1658
- [39] 王金成, 薛大明, 全燮, 等. 微波辐射处理活性艳蓝 KN-R 染料溶液的研究. *环境科学学报*, **2001**, 21(5): 628 ~ 630
- [40] 王金成, 薛大明, 全燮, 等. 活性艳蓝 KN-R 染料溶液微波催化脱色研究. *大连理工大学学报*, **2001**, 41(5): 545 ~ 548
- [41] 张耀斌, 全燮, 薛大明, 等. 流动态微波催化反应器处理染料废水的工艺稳定性. *中国环境科学*, **2002**, 22(3): 235 ~ 238
- [42] Quan X., Zhang Y. B., Chen S., *et al.* Generation of hydroxyl radical in aqueous solution by microwave energy using activated carbon as catalyst and its potential in removal of persistent organic substances. *J. Mol. Catal. A*, **2007**, 263(1~2): 216 ~ 222
- [43] 张国宇, 王鹏, 姜思朋. 微波辐射处理酯化废水的工艺技术研究. *给水排水*, **2004**, 30(8): 61 ~ 64
- [44] 姜思朋, 王鹏, 张国宇. 微波诱导氧化法处理 BF-BR 染料废水. *中国给水排水*, **2004**, 20(4): 13 ~ 15
- [45] 杨良玉, 曾庆福, 杨俊, 等. 微波再生铁屑-活性炭处理染料废水. *武汉科技学院学报*, **2003**, 16(5): 37 ~ 41
- [46] 吕敏春, 严莲荷, 王剑虹. 光、微波、热催化氧化效果的比较. *工业水处理*, **2003**, 23(8): 36 ~ 38
- [47] 潘爱芹, 严莲荷, 蒋齐光, 等. 微波催化氧化法处理炼油废水. *环境科学与技术*, **2004**, 27(Sup.): 114 ~ 116
- [48] 王剑虹, 严莲荷, 李燕, 等. 微波催化氧化法处理白酒废水. *江苏化工*, **2004**, 32(6): 39 ~ 42
- [49] 严莲荷, 王剑虹, 潘爱芹, 等. 微波催化氧化法处理甲基橙废水. *化工环保*, **2004**, 24(1): 38 ~ 40
- [50] 卜龙利, 陈硕, 全燮, 等. 微波辅助湿式氧化处理对硝基酚溶液的研究. *中国科学(E辑)*, **2005**, 35(3): 324 ~ 336
- [51] Bo L. L., Quan X., Chen S., *et al.* Degradation of p-nitrophenol in aqueous solution by microwave assisted oxidation process through a granular activated carbon fixed bed. *Water Res.*, **2006**, 40(16): 3061 ~ 3068
- [52] Zhang Y. B., Quan X., Chen S., *et al.* Microwave assisted catalytic wet air oxidation of H-acid in aqueous solution under the atmospheric pressure using activated carbon as catalyst. *J. Hazard. Mater.*, **2006**, 137(1): 534 ~ 540
- [53] 卜龙利, 全燮, 陈硕, 等. 微波辅助催化氧化高浓度含醛废水应用研究. *大连理工大学学报*, **2006**, 46(1): 25 ~ 29
- [54] George C. E., Lightsey G. R., Jun I., *et al.* Soil decontamination via microwave and radio frequency co-volatilization. *Environ. Prog.*, **1992**, 11(3): 216 ~ 219
- [55] Tai H. S., Jou C. J. G. Immobilization of chromium-contaminated soil by means of microwave energy. *J. Hazard. Mater.*, **1999**, 65(3): 267 ~ 275
- [56] Abramovitch R. A. In situ remediation of soils contaminated with toxic metal ions using microwave energy. *Chemosphere*, **2003**, 53(9): 1077 ~ 1085
- [57] EPA. A citizen's guide to chemical dehalogenation. EPA/542-F-96-004, **1996**
- [58] Rajesh G., Narasimha R. K., Sai P. P. S. Hydrodechlorination of chloro-benzene on Nb₂O₅-supported Pd catalysts: Influence of microwave irradiation during preparation on the stability of the catalyst. *J. Mol. Catal. A*, **2002**, 181(1~2): 215 ~ 220
- [59] Bond G., Moyes R. B., Whan D. A. Recent application of microwave heating in catalysis. *Catal. Today*, **1993**, 17(3): 427 ~ 437
- [60] Lingaiah N., Sai P. P. S., Kanta R. P. Structure and activity of microwave-irradiated silica supported Pd-Fe bimetallic catalysts in the hydrodechlorination of chlorobenzene. *Catal. Commun.*, **2002**, 3(9): 391 ~ 397