

利用电动技术强化有机污染土壤 原位修复研究

马建伟¹ 王 慧^{1*} 罗启仕² 范向宇¹

(1. 清华大学环境科学与工程系环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084;

2. 上海市环境科学研究院, 上海 200233)

摘 要 电动修复技术是近几年发展起来的一种新型土壤修复技术, 由于其处理的高效性受到了越来越多的关注。本文介绍了利用电动技术强化土壤有机污染物原位修复的原理及其最新进展。电动强化有机物污染修复的基本原理是利用电动效应对有机物的迁移作用或者强化生物修复过程(注入营养物、电子受体和活性微生物等)达到去除污染物的目的。研究表明, 该技术不破坏生态环境, 安装操作简单成本低廉, 具有广泛的应用前景, 其中电动强化原位生物修复和能够适应于各种不同成分污染(如有机物-重金属复合污染)的多技术联合是今后电动技术发展的重要方向。

关键词 电动技术 原位修复 强化 有机物污染土壤

中图分类号 X53 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2007)07-0119-06

Enhancement of in-situ remediation of organics by electrokinetics

Ma Jianwei Wang Hui Luo Qishi Fan Xiangyu

(1. State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, Department of

Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084;

2. Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233)

Abstract Electrokinetic enhancement of in situ remediation is a new and innovative technology. Because of its high efficiency in removing contaminants from soil and groundwater, in recent years, electrokinetic remediation has been paid more and more attention to. This paper reviewed the principle of enhancement of in situ remediation of soils contaminated with organics by electrokinetics and its newest advances in research and applications, expatiated on the advantages of this technology over other technologies, pointed out the obstacles to overcome in using this technology, and discussed the possibilities in full-scale commercial applications. The electrokinetics is able to, by use of electroosmosis, electromigration and electrophoresis, control the transport of pollutants toward a certain direction in subsurface or enhance the bioremediation process (inject nutrients, electron acceptor, active microbe). It is effective, no damage to the environment, simple in installation and operation, much cheaper, and thus has great potential for application. Electro-bioremediation and combined technologies are the most promising ones.

Key words electrokinetics; in-situ remediation; enhancement technology; organics-contaminated soil

有机污染物是土壤污染的主要成分之一, 目前针对有机污染物污染土壤已经研发了一系列的修复技术。传统的异位处理技术耗资大、成本高、破坏生态环境, 其应用受到限制。由于克服了异位处理的不足, 原位修复技术成为近年来备受关注的绿色修复方法。在低渗致密性土壤体系中, 传统的原位处理方法(如淋洗等)效率极低。电动修复技术是近几年发展起来的一种新型的土壤原位修复技术, 该技术不受土壤异质与低渗透性的限制, 能够增强有机物的迁移, 强化生物修复过程, 从而达到快速

原位修复的目的。特别是该技术安装运行简易, 成本低廉, 非常有望成为一种主流环境修复技术。目前报道的可通过电动方法去除的有机污染物包括苯

基金项目: 国家“973”重点基础研究发展规划资助项目(2004CB418506); 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2004AA64920)

收稿日期: 2006-05-24; **修订日期:** 2007-04-19

作者简介: 马建伟(1981~), 男, 硕士研究生, 主要从事环境修复方面的研究工作。E-mail: mjw04@mails.tsinghua.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: wanghui@tsinghua.edu.cn

酚、甲苯、己酸、苯、p-硝基酚、三氯乙烯(TCE)、石油类物质(BTEX)、六氯丁二烯、六氯苯和丙酮等。本文详细阐述了电动修复技术的基本原理及其在有机物修复中最新研究进展,以引起更多国内同行对该技术的关注。

1 电动强化的基本原理

电动修复(electrokinetic remediation)的基本原理是将电极插入受污染土壤或地下水区域,通过施加微弱电流形成电场,利用电场产生的各种电动效

应(包括电渗析、电迁移和电泳等)驱动土壤污染物沿电场方向定向迁移,从而将污染物富集至电极区然后进行集中处理或分离^[1,2];或利用动电效应增强土壤中有机污染物和降解菌的传质过程,将各种添加物如活性微生物、营养物和电子受体等输送至污染区或生物活性区,以强化原位的生物降解反应^[3]。前者主要针对重金属污染物的去除,后者主要为有机污染物的原位生物修复。图1为电动修复原理示意图。

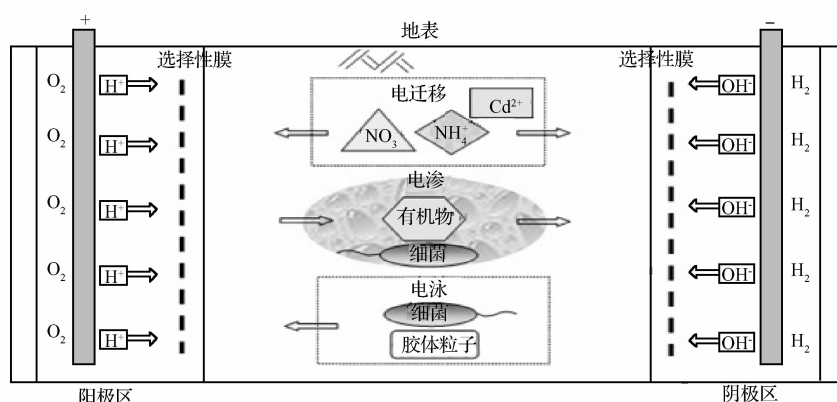


图1 电动修复原理示意图^[3]

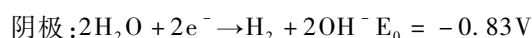
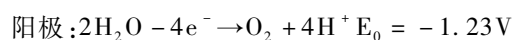
Fig.1 Schematic diagram of electrokinetic remediation principle^[3]

表1列出几种主要的电动效应。

表1 电动修复中的几种主要的电动效应
Table 1 Some primary electrokinetic transports in EK remediation

电动效应	运动物质	速度	与土壤性质关系
电渗析	空隙水	较慢	密切
电迁移	带电离子	快	较小
电泳	胶体粒子	较慢	密切

同时在电动修复过程中会发生电极反应：



由于水的电解作用导致电极附近 pH 值发生变化,其中阳极产生 H^+ 而使得阳极区呈现酸性(pH 值可降至 2 左右),阴极产生 OH^- 而使得阴极区呈现碱性(pH 值可升至 12 左右),同时带正电的 H^+ 向阴极运动,带负电的 OH^- 向阳极运动,分别形成了酸性迁移带和碱性迁移带。

2 利用电动技术强化有机物污染土壤原位修复的主要方法

2.1 直接原位去除

2.1.1 阳极 pH 值调控

电动修复有机物污染与重金属污染的机理是不同的,重金属的迁移主要靠电迁移作用而有机物主要依靠电渗析作用进行迁移;在处理重金属时,需要着重控制阴极电解液反应产生的 OH^- ,以防止发生重金属离子的沉淀,而有机物处理中则重点需要控制阳极电解液反应产生的 H^+ ,因为 H^+ 进入土壤将影响电渗流使电渗流减弱甚至改变其方向,在具有低酸缓冲容量的低渗性土壤中(如高岭土)这点尤为重要。Saichek 等^[4]使用阳极 pH 中和控制法(使用 0.01 mol/L NaOH)研究了菲污染高岭土的修复,并分别比较 3 种冲洗液(去离子水、3% Tween80 和 40% 乙醇)在有 pH 和无 pH 控制下的去除效果。结果发现,使用去离子水加阳极 pH 控制组电渗流有

明显的提高;使用 Tween80、乙醇与去离子水相比对电渗流的影响并不明显,但加 pH 控制的要优于不加 pH 控制实验组。由于有机物在土壤空隙水中的低溶解性,直接的阳极 pH 调控仍然存在效率不高的缺点,如何增大有机物在土壤空隙水的溶解性成为提高效率的关键所在。

2.1.2 使用表面活性剂

疏水性有机物(HOCs),在水相中的溶解度低,对土壤表面和土壤矿物有很强的吸附,因此在处理这类物质时有必要采取措施增大疏水性物质在水相中的溶解度,从而增强其迁移能力,选取一种合适的助溶剂是关键的一步。一种合适的助溶剂既要满足能够增强疏水性有机物的溶解度,其本身又不能在土壤固相中发生吸附。Ko 等^[5]分别使用菲、 β -环式糊精(HPCD)、饱和低渗性高岭土作为模型疏水性有机物、助溶剂、模型土壤,研究电动技术对菲的去除效果,发现使用 HPCD 加 pH 调节的电动修复具有高的去除效率,HPCD 的浓度对去除率的影响很大。Li 等^[6]比较了几种不同的助溶剂(正丁胺、四氢呋喃、丙酮和水)对于冰渍粘土中菲的去除影响,结果表明,投加 20% 的正丁胺促进了菲的解吸附和运移,127 d 后 43% 的菲被去除;丙酮的效果弱于正丁胺,四氢呋喃最弱,在流出液中并未检测到菲的存在;以水为助溶剂的实验并未观测到菲的迁移。Popov 等^[7]用羟基乙叉二膦酸(HEDPA)作为螯合剂进行了苯酚污染低渗自然土壤的研究,表明 HEDPA 对苯酚的去除有很好的增强效果。鉴于目前使用表面活性剂对于有机物去除的强化作用,寻找探求一种能够高效溶解有机物且又“环境友好”的助溶物质对于此技术的发展具有重要意义。

2.2 电化学降解去除有机污染物

当土壤中存在“微导体”即具有电子传导特性的粒子(如金属氧化物等)时,这些粒子能够诱使污染物发生电化学反应,生成烯烃。Röhrs 等^[8]对来自工业污染场址含高沸点氯代碳氢化合物污染的自然土壤进行了修复,结果发现,目标物质减少 80% 或更多,降解产物中检测到低氯取代物质,阴极附近高的 pH 值还原环境强化了脱氯修复过程;研究发现在处理过程中需要持续的水流以保持低的电阻并保证电极反应的进行。目前由于监测手段的缺乏,对于电化学降解有机物的过程及中间产物了解不多,现代监测手段的进一步发展,对于进一步了解电化学降解途径,代谢中间产物的毒性分析无疑将起

到重要的推动作用。

2.3 电动-Fenton 联合处理法

电动-Fenton 联合处理法是一种将电动修复与 Fenton 反应相结合的原位修复方法。其原理是在污染土壤中加入渗透性的铁粉反应“墙”,利用电场的迁移作用以及 H_2O_2 和 Fe^{2+} 或零价铁产生的羟基自由基降解有机污染物。在通常的电动过程中阳极附近的 pH 值将降至 2 左右,阴极附近的 pH 值将升至 12 附近,高效的 Fenton 反应需要的 pH 值在 2 附近,因此电动阳极产生的酸性环境恰好有利于 Fenton 反应的发生。Yang 等^[9]使用此法进行苯酚污染土壤的修复,研究结果表明,随着铁粉数量的减小,电渗流量增大, H_2O_2 消耗量减少,阴极区累计的苯酚增加,同时土壤中的残余苯酚含量下降,证明电动-Fenton 法可以同时迁移、降解苯酚,但其迁移/降解机理需作进一步的研究。在另外的实验中,Yang 等^[10]以 TCE 为模型污染物,考察了电极材料、土壤类型、催化剂类型、催化剂用量及粒径对 TCE 去除效率的影响,结果发现石墨电极优于不锈钢电极;有机质含量高的土壤由于有机质消耗大量的过氧化氢,因此去除效率较低。目前,电动-Fenton 技术由于其降解有机物的高效性、快速性引起了普遍的关注,研究开发一种高效的催化剂将使该技术具有更好的应用前景。同时,目前对于这种方法所涉及到的催化剂物理特性(材料、粒径等)和去除率、降解率以及降解机制的研究方兴未艾。

2.4 Lasagna 处理法

Lasagna 复合处理法使用电动方法并设置若干个吸附/降解区而类似意大利宽面条因而得名,主要包括如下几个要点:(1)污染土壤中设置几个高透过性的处理区,处理区中添加的物质可以为吸附剂、接触反应剂、氧化剂、微生物和缓冲液等物质;(2)通过电场作用将污染物质迁移至处理区;(3)可以通过切换电极的方法周期性的改变液流方向,这种方法可以创造污染物质的多路径吸附/降解,还可以避免电场单向运行带来的问题;另外通过将阴极高 pH 值的电解液和阳极低 pH 值的电解液混合,可以达到酸碱中和和简化对水的处理的目的。根据电极和处理区的排布有 2 种处理形式:水平 Lasagna 和垂直 Lasagna,修复浅层土壤(< 15 m)适合使用垂直形式,深层且过度固结的土壤适合水平形式。

1995 年 Lasagna 技术被成功用于美国肯塔基州一个受 TCE 污染能源部场址 Paducah 的修复。Ho

等^[11-14]研究了 Lasagna 技术修复硝基苯酚污染高岭土,探讨污染物的迁移状况及过程的运行特征,评价了控制条件下的电化学特征、土壤温度、阴极流出液的 pH 值和电导以及处理区的排布等对于处理效率的影响,实验对于目标污染物都有很好的去除效果且具有高的成本效率。Lasagna 方法通过在土壤中设立反应区,污染物质可以直接被吸附、反应等原位去除;可以处理重金属、有机物或同时重金属-有机物复合污染的土壤,具有宽的污染物适应性;同时可以将微生物负载在反应区介质表面与原位生物修复相结合;周期性的切换电极极性可以使得污染物周期性的振荡式迁移达到完全去除的目的同时,可以很好地控制电极反应以及土壤 pH 值的变化,该方法具有很好的处理效果,因此该技术具有良好的发展与应用前景。对它的进一步研究有可能使该技术成为今后污染土壤治理中最为实用的技术之一。但在该过程中诸多因素,诸如处理区试剂的选择、处理区的间距,电解生成气体的极化作用(导电性)需要进一步的研究考证。

2.5 电动强化原位生物修复

利用电场作用为土壤中的微生物高效输送营养物质、水分和电子受体,向土壤中分散活性微生物、表面活性剂和共代谢基质等,解决传统水力传输的不足,促进微生物与污染物质的有效接触,提高传质速率,提高微生物的降解活性。针对低渗性土壤,电动技术具有独特的优势,电动作用下产生的温度效应也可能有利于生物过程的进行。

2.5.1 直接原位强化

当土壤或地下水被污染后,经过一定时间的适应,很多土著微生物能够形成具有降解特定污染物能力的优势菌群;因此可以利用土壤和地下水系统中丰富的土著微生物来降解土壤或地下水中的有机污染物。由于疏水性的有机物被强烈吸附在土壤颗粒表面,同时活性微生物难以进入土壤微孔,微生物与有机物接触有限,这种生物处理效率极低。电动修复技术通过在受污染土壤或地下水加入直流电场形成的各种电动效应,能够促使污染物从土壤表面的解吸附,强化污染物和土著菌的相对运动,达到有效接触并降解除去的目的。该过程不需要外源物质,但需要对过程的电极反应加以控制,以防止极端 pH 值对活性微生物和土壤性质产生不良影响^[3]。

2.5.2 注入外源物质

当污染场址中缺乏能够降解有机污染物的活性微生物或其数量不足,抑或缺乏微生物代谢活动需要的氮、磷等营养物质、电子受体等(O_2 、 CO_2 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 和一些阳离子如 Mn^{2+} 、 Fe^{3+} 等),修复过程变得非常缓慢。利用电动方法可以加入这些外源物质从而加速生物修复过程。DeFlaun 等^[15]用电动方法向沙土中注入和分散外源微生物,结果表明,外源菌能够在沙土中向阳极迁移;并且在电动迁移过程中保持对 TCE 的降解能力。Acar 等^[16]在阳极注入 NH_4OH 阴极注入稀硫酸,考察了 2 种物质在细沙土和高岭土中的迁移效率。实验表明,由于两者对于电极反应的去极化作用使得土壤中的 pH 值维持在 6.5~7.4; NH_4^+ 和 SO_4^{2-} 可同时注入到土壤中。传统的向地下环境中输送外源活性微生物的方法是水力梯度法,此方式对微生物的分散性差,所注入的微生物通常保持在注入点的局部位置,微生物在局部生长形成“生物垢”,堵塞土壤空隙,使强化过程失败,电动力学方法能够克服传统方法的不足,提高传质效率。当土壤中缺乏氮磷等营养物质以及电子受体时,同样可以利用电动效应往地下高效输送这些物质。

某些有机化合物(如 PAHs 和高卤代物)的生物转化需要适宜的共代谢基质,如甲醇、乙醇和甲苯等。试验表明,用电动方法也可以有效地注入共代谢基质。Rabbi 等^[17]用电动方法向受 TCE 污染土壤中注入安息香酸(作为 TCE 生物降解的共代谢基质),考察强化生物修复的可行性。结果表明,将安息香酸注入长为 1 m 的受 TCE 污染的土柱中,测得外围 TCE 的一级降解速率为 $0.039 \pm 0.007 d^{-1}$,接近 30℃ 时泥浆厌氧摇瓶测试结果 $0.047 \pm 0.009 d^{-1}$,共代谢物质的迁移施加提高了目标污染物的降解效率。另外,土壤中的强疏水性有机物与土壤存在强吸附作用导致在水相中的溶解度较低,单纯的电动迁移效果并不明显,可以通过电动方法加入表明活性剂促使疏水性有机物的溶解,并增大电动迁移效率。

2.5.3 非均匀电动技术强化原位生物修复

目前涉及电动原位强化原为修复技术的研究采用的都是均匀电场,采用均匀电场存在如下的缺点:(1)容易导致土壤酸化和固化;(2)容易产生电极极化现象,导致系统电能消耗增加;(3)对非极性有机物的处理效果较差;(4)系统运行稳定性较低,随着

运行时间增加,处理效率急剧降低。而在非均匀电场中,除了可以产生电渗、电迁移和电泳作用外,非极性物质和微生物细胞也会发生极化并发生介电迁移,因而可能有助于增强土壤中有机污染物和微生物的移动性,加快土壤污染物的原位生物降解,另外,非均匀电场在控制电极反应方面也比均匀电场更弱。

Luo 等^[18-20]探讨了非均匀电场在强化微生物降解有机污染物(氯酚、苯酚、菲)中的作用,对非均匀电场进行了尝试和探索,并得出一些具有启发性的结论,包括:

(1)采用合适的非均匀电场(双向切换)能够有效地避免土壤 pH 值发生急剧变化,保持土壤水分条件,为原位生物修复创造适宜的环境条件,同时提高该技术的运行稳定性;

(2)利用非均匀电场能显著增强土壤微生物、有机污染物和无机离子的移动性,切换电场极性可以方便地控制土壤中物质的运移;

(3)土壤水分通过电渗作用迁移,微生物细胞和无机离子分别主要以电泳和电迁移方式迁移;而有机物的迁移机理则随其类型和土壤 pH 值而变化;介电迁移对微生物细胞和非极性有机物如菲的迁移起重要作用;

(4)采用合适的电极矩阵和运行参数能有效地加快土壤中有机污染物的原位生物降解;

(5)太阳能能够代替工业电源驱动电动生物修复过程,降低该技术的运行成本。

非均匀电场作为一种高效的实用性较强的土壤修复技术,能够为有机污染土壤的治理提供有效的技术支持。可以预测,非均匀电动力学修复技术是今后电动力学技术修复有机污染土壤的重要发展方向。

目前非均匀电动力学修复技术主要是在实验室内采用自配土壤进行研究,自配土壤与实际污染土壤存在差异,在进一步的研究中,可以采用实际污染土壤进行室内或污染现场研究。同时,针对不同有机物的迁移和降解特征,进一步建立和优化电极构型,或者采用更复杂的 2 维电极矩阵^[21]。在太阳能试验方面,可以将太阳能的周期变化与电场的施加方式结合起来,优化实验的运行方式,达到均匀去除土壤污染物的目的。例如,在夜间或者多云天气条件下,当太阳能电池输出电压低于某一值时切断电极控制系统;在白天太阳光充足时,储存多余的能量

以便在夜间能量供应不足时继续运行。

另外,对于有机物-重金属共存的复合污染体系,由于污染物之间以及污染物与土壤中间存在复杂的相互作用对修复产生不可知的结果,目前此方面的研究较少,缺乏系统的实验数据。Maini 等^[22]对一块复合污染的土壤进行了修复研究,土壤中包含重金属(Pb、Zn、Mn、Cu 和 As)和有机污染物(PAHs、BTEX),在小型实验中使用板状电极,经过 23 d,44% 的 Cu、29% 的 Mn 被移除到阴极,阳极区域的 PAHs 降低 94%;在较大型的实验中使用六边形柱状电极的形式,中间为阴极,四周为阳极,重金属发生了迁移,但迁移并不明显,PAHs 和 BTEX 通过电渗析作用向阴极迁移。Chung 等^[23]利用超声强化 Pb 和菲污染自然土壤的电动修复结果发现,超声作用增强了水和污染物的迁移,由此使得土壤体系的 pH 与单独电动时相比降低,超声强化的电动修复比仅用电动方法对 Pb 和菲的去除率分别提高了 3.4% 和 5.9%。电动力学和其他工艺组合的修复工艺有可能成为针对某一特定类型的污染土壤的高效修复技术,但修复过程的耗能是需要考虑的一个因素。

前面介绍的 Lasagna 方法就是一种有效的处理有机-重金属复合污染土壤的组合修复技术,将电动迁移与处理区物质的吸附作用联合起来,实现污染物的原位固定。但是目前缺乏这方面的基础实验研究,加强这方面的研究有可能开发出一种高效的针对复合污染土壤的修复技术。

3 技术展望

电动技术作为一种新兴的原位修复技术已经在污染土壤的修复中显示了其高效性,尤其在传统方法难以治理的细粒致密的低渗性异质土壤修复中有独特的优势,适应无机/有机污染的饱和或非饱和土壤,且成本低于传统方法。但目前其作为一种技术仍存在一些需要改进和进一步研究的方面,如土壤体系中污染物的溶解/增强试剂(螯合剂、表面活性剂)的投加;高电压引起土体发热而导致效率下降;土壤中碳酸盐、铁类矿物、碎石、沙砾等对修复的影响等方面。在机理方面,需要进一步探讨电场作用下污染物与土壤颗粒物理化学作用,施加增强试剂的影响;在电动生物原位修复中,电场作用下微生物对污染物的转化降解机制,电场对微生物活性及迁移影响,微生物群落结构解析,中间产物分析等,微

生物/污染物/土壤/空隙水/电场的协同作用机制都是需要深入探讨的问题。

参考文献

- [1] Page M. M. , Page C. L. Electroremediation of contaminated soils. *J. Environ. Eng.* , **2002** , 128 (3) : 208 ~ 219
- [2] Acar Y. B. , Alshawabkeh A. N. Principles of electrokinetic remediation. *Environ. Sci. Technol.* , **1993** , 27 (13) : 2638 ~ 2647
- [3] 罗启仕, 王慧, 张锡辉, 等. 电动力学技术强化原位生物修复研究进展. *环境污染与防治* , **2004** , 26(4) : 268 ~ 271
- [4] Saichek R. E. , Reddy K. R. Effect of pH control at the anode for the electrokinetic removal of phenanthrene from kaolin soil. *Chemosphere* , **2003** , 51 : 273 ~ 287
- [5] Ko S. , Schlautman M. A. , Carraway E. R. Cyclodextrin-enhanced electrokinetic removal of phenanthrene from a model. *Environ. Sci. Technol.* , **2000** , 34 : 1535 ~ 1541
- [6] Li A. , Cheung K. A. , Reddy K. R. Cosolvent-enhanced electrokinetic remediation of soils contaminated with phenanthrene. *J. Environ. Eng.* , **2000** , 126 (6) : 527 ~ 533
- [7] Popov K. , Kolosov A. , et al. A laboratory-scale study of applied voltage and chelating agent on the electrokinetic separation of phenol from soil. *Separation Science and Technology* , **2001** , 36(13) : 2971 ~ 2982
- [8] Röhrs J. , Ludwig G. , Rahner D. Electrochemically induced reactions in soils: A new approach to the in-situ remediation of contaminated soils Part 2: Remediation experiments with a natural soil containing highly chlorinated hydrocarbons. *Electrochimica Acta* , **2002** , 47 : 1405 ~ 1414
- [9] Yang G. C. , Long Y. W. Removal and degradation of phenol in a saturated flow by in-situ electrokinetic remediation and Fenton-like process. *J. Haz. Mat.* , **1999** , B69 : 259 ~ 271
- [10] Yang G. C. , Liu C. Y. Remediation of TCE contaminated soils by in-situ EK-Fenton process. *J. Haz. Mat.* , **2001** , B85 : 317 ~ 331
- [11] Ho S. V. , Sheridan P. W. , Athmer C. J. , et al. Integrated in situ soil remediation technology: The Lasagna process. *Environ. Sci. Technol.* , **1995** , 29 : 2528 ~ 2534
- [12] Ho S. V. , Athmer C. J. , Sheridan P. W. , et al. Scale-up aspects of the LasagnaTM process for in situ soil decontamination. *Journal of Hazardous Materials* , **1997** , 55 : 39 ~ 60
- [13] Ho S. V. , Athmer C. J. , Sheridan P. W. , et al. The Lasagna technology for in situ soil remediation: 1. Small field test. *Environ. Sci. Technol.* , **1999** , 33 : 1086 ~ 1091
- [14] Ho S. V. , Athmer C. J. , Sheridan P. W. , et al. The Lasagna technology for in situ soil remediation: 2. Large field test. *Environ. Sci. Technol.* , **1999** , 33 : 1092 ~ 1099
- [15] DeFlaun M. F. , Condee C. W. Electrokinetic transport of bacteria. *Journal of Hazardous Materials* , **1997** , 55 : 263 ~ 277
- [16] Acar Y. B. , Rabbi M. F. , Ozsu E. E. Electrokinetic injection of ammonium and sulfate ions into sand and kaolinite beds. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* , **1997** , 123 (3) : 239 ~ 249
- [17] Rabbi M. F. , Clark B. , Gale R. J. , et al. In situ TCE bioremediation study using electrokinetic cometabolite injection. *Waste Management* , **2000** , 20 : 279 ~ 286
- [18] Luo Qishi, Zhang Xihui, Wang Hui, et al. Mobilization of phenol and dichlorophenol in unsaturated soils by non-uniform electrokinetics. *Chemosphere* , **2005** , 59 : 1289 ~ 1298
- [19] Luo Qishi, Zhang Xihui, Wang Hui, et al. The use of non-uniform electrokinetics to enhance in situ bioremediation of phenol-contaminated soil. *Journal of Hazardous Materials* , **2005** , B121 : 187 ~ 194
- [20] 罗启仕, 王慧, 张锡辉, 等. 土壤中硝酸盐在非均匀电动力学作用下的迁移与转化. *环境科学* , **2004** , 25 (2) : 107 ~ 113
- [21] Luo Qishi, Wang Hui, Zhang Xihui, et al. In situ bioelectrokinetic remediation of phenol-contaminated soil by use of an electrode matrix and a rotational operation mode. *Chemosphere* , **2006** , 64 : 415 ~ 422
- [22] Maini G. , Sharman A. K. , Knowles C. J. , et al. Electrokinetic remediation of metals and organics from historically contaminated soil. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* , **2000** , 75 : 657 ~ 664
- [23] Chung Ha Ik, Kamon Masashi. Ultrasonically enhanced electrokinetic remediation for removal of Pb and phenanthrene in contaminated soils. *Engineering Geology* , **2005** , 77 : 233 ~ 242