

焚烧、水泥窑和安全填埋法处置 PCBs 污染物技术优选

邢颖^{1,2,3}, 吕永龙^{1*}, 史雅娟¹, 王铁宇¹, 罗维¹, 汪光^{1,2}, 马骅^{1,2}, 孙亚梅^{1,2}

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 中国科学院文献情报中心, 北京 100080)

摘要:应用层次分析法和专家调查法, 综合考虑环境、技术、社会和经济因素, 建立了 PCBs 处置技术选择与评估的层次模型, 分析了影响 PCBs 处置技术方案选择的重要因素. 针对 3 种有较大应用前景的 PCBs 污染物处置技术, 开展定性定量相结合的方案评价. 在处置对象为低浓度与高浓度 PCBs 污染物 2 种情况下, 分别进行方案的优选. 研究指出, 环境影响是最重要的因素, 在目前中国现有国情条件下, 焚烧法是最适宜的 PCBs 处置技术. 对高浓度 PCBs 污染物, 或低浓度污染物具备经济条件或处理量较大, 宜采取专用焚烧炉焚烧处置. 对低浓度污染物, 在不具备经济条件且处理量不大的情况下, 可考虑利用水泥窑法或安全填埋法进行处置, 并且参考就近处理的原则. 此外, 对不同技术方案的适用条件和改进措施也进行了探讨, 并在此基础上提出了提高 PCBs 处置水平的政策建议.

关键词:多氯联苯; 焚烧炉; 水泥窑; 危险废物填埋; 层次分析法

中图分类号: X592 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)03-0673-06

Assessment on PCBs Wastes Treatment Technologies Including Incineration, Cement Kiln and Secure Landfill

XING Ying^{1,2,3}, LÜ Yong-long¹, SHI Ya-juan¹, WANG Tie-yu¹, LUO Wei¹, WANG Guang^{1,2}, MA Hua^{1,2}, SUN Ya-mei^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Library of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: Analytic hierarchy process and a specialist investigation were applied to value the three PCBs treatment technologies qualitatively and quantitatively, in which the environmental, technological, social and economic factors were considered. The most important factor is thought to be environmental impact. Incineration is proved to be the most suitable technology in this period according to the research. For the high concentration of PCBs pollutants, or the low concentration of PCBs pollutants with good economic performance and large quantity of waste, incineration is considered the best. For the low concentration of PCBs pollutants in the area with bad economic performance and with little quantity of waste, cement kiln and landfill are thought to be suitable. It is also suggested that pollutants be treated at the nearest place. What's more, the measures to improve the three technologies are discussed and the policy comments on PCBs treatment are presented.

Key words: polychlorinated biphenyls (PCBs); incinerator; cement kiln; hazard waste landfill; analytic hierarchy process

PCBs 污染物的处置手段主要分为焚烧法^[1~4]、水泥窑焚烧法^[5~7]、安全填埋法、化学降解法^[1, 7~10]、物理降解法^[1, 7, 8, 11~14]和生物降解法^[8, 15, 16]等. 其中焚烧法、水泥窑法和安全填埋法是国际上工业化应用较好的处置技术. 焚烧法应用最广泛, 工艺比较成熟, 处理量大, 效果稳定, 可以处理固体、液体、淤渣和泥浆等多种形式污染物^[12]. 水泥窑法是在水泥生产过程中, 利用水泥回转窑焚烧处置少量的 PCBs 废弃物和其它危险废物. 水泥回转窑炉内温度可达到 1 700 ℃, 烟气停留时间可到 7 s, 炉内有湍急气流使废物焚烧更加彻底, 具备焚烧危险废物必须的基本条件^[17]. 安全填埋法是处置危险废物最常用的方法

之一, 工程投资与运行成本相对较低, 工艺及设备相对简单, 也是其他处置方式残渣的最终和必不可少的处理手段. 但 3 种方法都存在各种缺点影响其使用.

目前中国对 PCBs 的处理处置还处在起步阶段, 理论与经验都很欠缺. PCBs 污染物处置工程实践只有极少数的单位有能力开展, 而且仍处在试运行阶段. 何种技术更适合在中国发展和推广, 成为专家学

收稿日期: 2006-03-29; 修订日期: 2006-08-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(40471130)

作者简介: 邢颖(1976~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为环境经济与环境管理, E-mail: xingy@mail.las.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: yllu@cees.ac.cn

者和政策制定者最为关注的问题之一.然而对中国现行条件下 PCBs 处置技术选择的研究还没有报道.本研究应用层次分析法和专家调查法,综合考虑环境、技术、社会经济因素,针对 3 种潜在可行的 PCBs 污染物处置技术,开展定性与定量相结合的方案评价,在处置对象为低浓度与高浓度 PCBs 污染物 2 种情况下,分别进行方案的优选,并探讨不同方案的适用条件和提高 PCBs 处置水平的应对措施.

1 研究方法

1.1 PCBs 处置技术评价层次体系的构建

层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)是 1 种广泛应用的多指标决策工具^[18],该方法将决策有关的元素分解成目标、准则、方案等层次,在此基础上进行定性和定量分析.该方法尤其适合对决策结果难于直接准确计量的场合.本研究利用层次分析法,对 PCBs 处置技术方案进行结构化、层次化的分析与评估,构造综合评价模型,以此为基础解决 PCBs 处置技术优选问题.

研究通过分析 PCBs 处置的相关问题,确立技术评价与选择的多层次体系,如图 1 所示.第 1 层为目标层:多氯联苯处置技术方案优选.第 2 层和第 3 层为指标层.第 2 层指标包括方案的技术水平、方案实施造成的环境影响、不同方案的成本效益和技术方案的社会支持度.第 3 层指标具体有:与方案实施技术水平对应的指标,包括衡量技术和工艺的复杂性、可实施性的技术可行性指标,PCBs 废物的去除率,PCBs 处置设备、处置工艺运行的稳定性;与环境影响对应的指标,包括 PCBs 废物处置过程中污染物排入环境带来的环境风险和 PCBs 废物从贮存场所运输到处置地的包装、装卸、运输过程中发生的 PCBs 泄漏入环境引起的环境风险;与成本效益对应的指标,包括 PCBs 处置设施操作运行成本,PCBs 处置设施建设的固定投资,PCBs 处置设施运营的经济收益;与社会因素对应的指标,包括 PCBs 相关政策法规体系的完善程度,是否有适当的法规对相应技术进行规范、约束、支持的指标,公众对各种 PCBs 处置技术的接受认可程度.第 4 层为包括焚烧法、水泥窑法和安全填埋法在内的方案层.

1.2 专家调查

本文向国内多氯联苯研究处于领先地位的 7 家机构共 12 位对 PCBs 有深入研究的资深专家发放了调查表,进行指标间和处置方案间两两比较并打分.目的是应用专家经验,对 PCBs 处置技术评价指标及

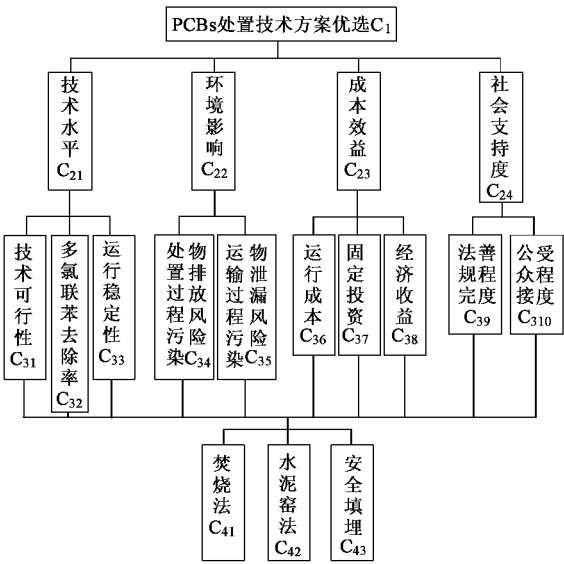


图 1 PCBs 处置技术选择与评价层次

Fig.1 Hierarchy of evaluation on PCBs treatment technology

各方案的相对重要性进行评估.调查回收了 6 家单位的 10 份调查表(回收率 83.3%).接受调查的专家有 5 位研究员、4 位副研究员(均具有博士学位)、1 位来自 PCBs 处置企业的技术副总经理.专家来自 2 所大学(清华大学和北京师范大学)、2 家研究所(中国科学院生态环境研究中心和中国环境科学研究院)、2 家从事 PCBs 处置的企事业单位(沈阳环境科学研究院和浙江省杭州大地环保有限公司).

1.3 计算指标权重,建立评价模型

根据回收的打分表,综合构造判断矩阵,通过计算,确定各个指标的相对权重,及各层元素对系统目标的合成权重,进行总排序.还要对判断矩阵进行一致性检验以确定求出的特征向量(权值)是否合理.根据得到的指标权重和各方案在某指标下的得分,计算各方案的总得分,并建立多氯联苯处置技术选择评价模型.

$$Z_i = \sum_{j=1}^n \omega_j \delta_{ij}$$

式中, Z_i 为各方案总得分; δ_i 为各方案某一指标的得分; i 为方案; ω_j 为各指标权重; j 为方案评价所用指标.

1.4 不同浓度 PCBs 污染物的情景分析

1991 年国家环保局和国家能源部颁布的《含多氯联苯电力装置及其废物污染环境的规定》和《含多氯联苯废物污染控制标准》(GB 13015-91)分别将 PCBs 污染物分为 50 ~ 500 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和高于 500 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 2 种等级并规定应采取不同措施.本研究据

此将 PCBs 污染物分成高浓度污染物 ($> 500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和低浓度污染物 ($50 \sim 500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 2 种情况分别进行比较研究.

2 结果与讨论

2.1 PCBs 处置技术选择评价指标的权重

根据专家判断, 选择 PCBs 处置技术方案考虑的最重要的因素是处置技术的环境影响, 其权值为 0.401 5, 其次是技术水平和社会影响, 分别为 0.324 8, 0.180 7, 成本效益是最后考虑的因素, 权值为 0.093 1. 第 3 层指标的权重显示于图 2 中.

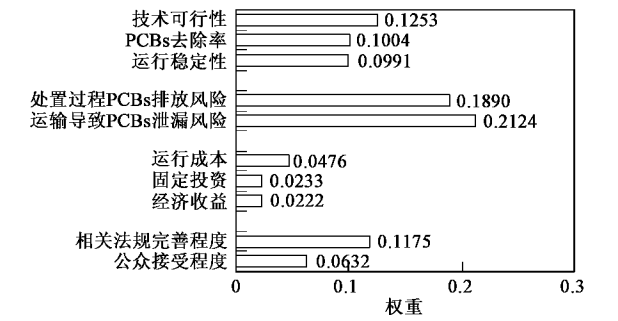


图 2 PCBs 处置技术选择评价指标权重

Fig.2 Weights of evaluation on PCBs treatment technology

相对处置过程, 运输过程 PCBs 的泄漏风险更大, 可能会导致更多的 PCBs 污染. 目前, 国内具有运

输资质的机构极少, 操作过程中, 存在具体情况错综复杂, 相应防护和管理可能出现疏漏等问题. PCBs 设备退出使用后, 按规定集中封存在较偏僻的农村、山区, 由于存放时间长, 外壳腐蚀, 加上交通不便, 路况不良等原因, 在长途运输含 PCB 电力设备的过程中, 必然会造成 PCBs 的泄漏^[19]. 因此在建设 PCBs 处置设施时应考虑就近原则, 即尽量减少运输距离, 分区域建设处置 PCBs 的设施, 将各处的 PCBs 污染物送至最近的设施进行处置.

PCBs 处置技术普遍成本高昂, 经济收益较低, 往往需要国家或地方政府的补贴. 因此在其他技术方案评价中占重要地位的成本效益水平反而不是 PCBs 处置的重要因素.

法规的完善程度相对公众接受程度有较高的权重. 有明确的法规支持和规定对相应技术的发展十分有益, 项目的立项、论证、审批、实施都要依据相关法规的规定. 中国目前公众普遍参与程度不高、公众认知程度较差, 公众对各种技术的接受程度在所分析的各种因素中是除成本效益因素外最不重要的因素.

2.2 不同技术方案技术水平的比较

根据表 1 计算结果, 焚烧法处置 PCBs 污染物的技术分值最高, 水泥窑法、安全填埋法的技术分值较低, 焚烧法在技术可行性上有更明显的优势.

表 1 各方案技术水平得分
Table 1 Technological scores of options

方案	高浓度污染物				低浓度污染物			
	技术可行性	PCBs 去除率	运行稳定性	小计	技术可行性	PCBs 去除率	运行稳定性	小计
焚烧法	0.087 9	0.049 2	0.044 7	0.181 8	0.070 9	0.047 7	0.039 8	0.158 4
水泥窑法	0.021 7	0.037 4	0.022 3	0.081 4	0.038 0	0.036 3	0.031 0	0.105 3
安全填埋	0.015 7	0.013 8	0.032 0	0.061 5	0.016 4	0.016 4	0.028 3	0.061 1

目前, 国内采用焚烧法处置 PCBs 污染物已经有一定的工业实践. 沈阳环境科学研究院从上世纪 90 年代开始, 已经开展了相关的试验和示范项目, 并在一定范围内处置了部分 PCBs 废物, 获得了较多经验. 水泥窑法虽然在加拿大、美国和瑞典等国家已有处置 PCBs 的成功经验^[7, 20], 但在国内还没有进行过真正的 PCBs 处置, 目前仅是理论上的探讨. 填埋法也是较晚才开展少量的 PCBs 处置研究和示范. 因此, 焚烧法在技术可行性方面获得了较高的得分, 而该法在 PCBs 去除率和运行稳定性上的优势则没有那么突出. 另外, 针对高浓度污染物, 焚烧法较其他 2 种方法的优势比针对低浓度污染物的优势更明显.

3 种技术方案 PCBs 去除率指标的比较表明填

埋法得分较差. 应用填埋法, PCBs 污染物不能立即销毁, 只是在填埋场与环境隔离, 即使填埋场封场, 如果维护不力, 仍有可能污染环境, 造成潜在的威胁. 因此填埋前应进行必要的稳定化固定化处理, 封场后应加强维护和管理, 以降低 PCBs 对环境的危害.

水泥窑法处置低浓度 PCBs 污染物好于高浓度污染物. 处置高浓度 PCBs 污染物, 水泥窑法的运行稳定性最差. 大量研究结果表明, 原燃料中氯离子含量过高, 氯离子在水泥窑内循环富集导致窑炉内结皮堵塞, 会影响生产线窑系统的正常运行, 可造成停窑, 降低水泥产量, 影响正常生产^[21, 22]. 针对高氯原料, 通过优化操作, 加强机械清吹, 合理调整配料, 或者引入旁路放风等系列技术措施, 在一定范围内可

以基本消除氯对系统的影响,维持系统的连续稳定正常运行^[22,23]。

2.3 不同技术方案环境影响的比较

由表 2 综合看来,处置过程污染排放以焚烧法最少,其次是安全填埋,水泥窑法最多,但 3 种方案分值相差不多,各种方法都存在易发生的污染问题,

焚烧法和水泥窑法都易引起空气污染,水泥窑还有可能导致产品污染,填埋法易导致地下水污染和土壤污染,虽然理论上,污染可以避免或达标,例如专用焚烧炉和水泥窑都能达到彻底销毁 PCBs 的温度和条件,但实际处置过程往往不能保证整个体系始终处于良好的工况状态。

表 2 各方案环境影响的得分
Table 2 Environmental scores of options

方案	高浓度污染物			低浓度污染物		
	处置过程污染排放	运输过程污染排放	小计	处置过程污染排放	运输过程污染排放	小计
焚烧法	0.070 3	0.108 1	0.178 4	0.065 6	0.103 9	0.169 5
水泥窑法	0.055 2	0.064 7	0.119 9	0.060 0	0.068 2	0.128 2
安全填埋	0.063 6	0.039 7	0.103 3	0.063 4	0.040 3	0.103 7

运输过程污染排放也以焚烧法最少,其次是水泥窑法,安全填埋法最多,水泥窑在生产水泥为主、处置危险废物为辅的情况下,能否具备管理良好的运输体系和技术设备受到专家的质疑,同样,安全填埋目前在中国也是处置多种危险废弃物,其运输安全保障在当前管理水平较低、监管能力不足的情况下,部分专家认为其可靠性不如专用的 PCBs 焚烧厂,现阶段,各种技术的污染排放仍是专家重视且争

论的焦点问题,须加强相关管理,找出其存在的深层原因并加以改进。

2.4 不同技术方案成本效益的比较

由表 3 可知,无论是处理低浓度还是高浓度 PCBs 污染物,焚烧法成本效益最差,水泥窑法次之,安全填埋法成本效益最好,处理高浓度污染物,水泥窑法的成本效益略好于焚烧炉法,处理低浓度污染物,水泥窑法的成本效益有更好的趋势。

表 3 各方案成本效益的得分
Table 3 Cost-effective scores of options

方案	高浓度污染物				低浓度污染物			
	固定资产投资	运行成本	经济收益	小计	固定资产投资	运行成本	经济收益	小计
焚烧法	0.005 4	0.012 0	0.006 4	0.023 8	0.004 9	0.012 5	0.006 1	0.023 5
水泥窑法	0.006 2	0.011 1	0.009 5	0.026 8	0.006 7	0.013 0	0.010 6	0.030 3
安全填埋	0.011 7	0.024 4	0.006 3	0.042 4	0.011 6	0.022 1	0.005 4	0.039 1

为了有效消除 PCBs 废物,最大限度减少对环境的影响,维护设备正常使用,用于处置 PCBs 的专用焚烧炉与常规焚烧炉相比,有很多的技术改进,例如,对酸性气体去除装置和设备的抗腐蚀能力的要求明显增高,需要配备效果更好的去除二噁英类及其他有害气体排放的设备,此外,焚烧炉的炉型、结构、都要有相应的改进,水泥窑如果想用于处置 PCBs 等含氯废物,也必须投入资金技术,进行一定的设备改进和工艺调整,包括增加酸性气体去除装置、增加旁路放风系统、合理调整配料等措施。

污染物处理运行成本以安全填埋法最低,焚烧法和水泥窑法相近,都比较高,对高浓度污染物,焚烧法比水泥窑法运行成本略低,而低浓度污染物焚烧法比水泥窑法略高,为达到所需处理温度和稳定工况,焚烧法和水泥窑法都需要大量的燃料、电、水、日常维护等,需要较高的运行成本,对低浓度的污染物,水泥窑运行会更稳定,相应节省部分运行成本。

而经济收益以水泥窑法最高,焚烧法和安全填埋法较低,水泥厂回转窑处置废物,收取处置费的同时能够获得水泥产品,取得额外的经济收入。

2.5 不同技术方案社会支持度的比较

各种技术方案的社会支持度得分列在表 4 中,《防止含多氯联苯电力装置及其废物污染环境的规定》和《含多氯联苯废物污染控制标准》中规定了应对 PCBs 废物进行焚烧或安全填埋处理,针对焚烧法处置 PCBs,近年来国家相继出台的《危险废物焚烧污染控制标准》、《危险废物集中焚烧处置工程建设技术要求(试行)》、《危险废物污染防治技术政策》对焚烧法给予了较大支持,水泥窑处置 PCBs 废物目前还没有相关规定,只有 2004 年出台的《水泥工业大气污染物排放标准》规定了水泥窑焚烧危险废物时排放烟气中 PCBs 的控制值,《危险废物填埋污染控制标准》和《危险废物安全填埋处置工程建设技术要求》对危险废物的填埋作了相关规定,但没有对

PCBs 的安全填埋作具体规定. 总体来说, 焚烧法处置 PCBs 获得一定的法规支持, 相关法规较完善, 而水泥窑法和安全填埋法目前存在无法可依的状况, 有待进一步发展和规划法规建设.

表 4 各方案社会支持度得分
Table 4 Social scores of options

方案	高浓度污染物			低浓度污染物		
	法规完善度	公众接受度	小计	法规完善度	公众接受度	小计
焚烧法	0.065 6	0.042 2	0.107 8	0.064 2	0.039 5	0.103 7
水泥窑法	0.022 9	0.010 9	0.033 8	0.022 0	0.011 8	0.033 8
安全填埋	0.029 0	0.010 1	0.039 1	0.031 3	0.011 9	0.043 2

公众对焚烧法的接受程度好于水泥窑法和卫生填埋, 在处理高浓度 PCBs 污染物时更是如此. 由于传统的水泥厂和垃圾填埋场带给公众的印象通常是烟尘满天、臭气弥漫, 对周围环境有很大危害, 严重干扰了周边群众的生活和工作, 而焚烧法在公众的直观感觉上, 是更有效的销毁污染物的方法, 其对环境的潜在影响还较少为公众所知. 水泥窑法在是否可能导致水泥污染的问题上还会引起公众的疑虑.

2.6 不同技术方案综合比较

对于高浓度 PCBs 污染物, 经专家评估并计算得到的焚烧法、水泥窑法和安全填埋法的最终得分分别为 0.491 6, 0.261 9, 0.246 5; 对于低浓度 PCBs 污染物, 3 种技术的最终得分分别为 0.455 2, 0.297 6, 0.247 2. 无论是高浓度还是低浓度 PCBs 污染物, 焚烧法在 3 种技术方案中均具有明显优势. 水泥窑法和安全填埋法相差不多, 水泥窑法相对具有微弱优势, 针对低浓度污染物, 这种优势有一定加强.

建设专用焚烧炉处置 PCBs 在技术上可以通过加强科研与工程实际相结合达到所需水平, 也能够满足对环境产生较小影响的要求, 同时具有一定的社会支持度, 基本上是目前中国最适宜的 PCBs 处置技术. 但焚烧法处置 PCBs 投资大, 运行成本高, 收益低. 在经济实力薄弱、缺少资金来源的地区, 较低的成本效益会限制焚烧法的推广和应用.

利用水泥回转窑处置 PCBs 与建设专用焚烧装置相比有相对较好的成本效益, 但其他方面目前还不具竞争力. 导致水泥厂评分较低的原因主要是由于国内还没有开展水泥窑处置 PCBs 的工程实践, 专家对技术能力、污染消除等问题有较多的疑虑. 同时水泥生产企业是否愿意尝试利用水泥窑处置 PCBs, 如何协调水泥生产和处置 PCBs 的关系也存在诸多问题. 目前急需开展水泥窑处置含氯物质的系统稳定性研究, 探索水泥生产同时销毁 PCBs 废物的工艺研究, 监测处置过程的各种污染问题, 提出应对措施. 我国新型干法水泥生产技术的发展已进入快速

发展阶段, 大批新型干法水泥生产线投入运行. 如果能充分利用现有水泥生产设施, 在各地选取一些大型现代化的水泥生产厂家开展低浓度 PCBs 废物的处置试点, 将为 PCBs 处置开辟新的道路.

安全填埋法的优势体现在总成本、总投资低, 而收益较高. 目前中国持久性有机污染物削减处置任务繁重, 资金来源不足且使用效率偏低, 需要大量的中央和地方支出. 在经济落后或资金紧张地区, 可以考虑应用填埋法处置低浓度 PCBs 污染物. 此外, 填埋法作为所有废弃物的最终处理手段, 在一些情况下仍然必不可少.

3 结论

环境影响是 PCBs 污染物处置技术评价最重要的因素, 其次是技术水平、社会影响和成本效益. 综合来讲, 对高浓度 PCBs 污染物, 宜采取专用焚烧炉焚烧处置. 对低浓度污染物, 具备经济条件或处理量较大, 也推荐采用焚烧法处置. 在不具备经济条件且处理量不大的情况下, 考虑利用水泥窑法或安全填埋法进行处置. 同时参考就近原则, 对 PCBs 污染物的处置进行综合决策.

致谢: 感谢参与调查的各位专家学者对本研究的大力支持以及提出的宝贵意见, 感谢中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室白雪同学在模型运算中给予的帮助.

参考文献:

[1] Edwards B H, Paullin J N, Coghlan-Jordan K. Emerging technologies for the control of hazardous wastes[J]. Journal of Hazardous Materials, 1985, 12(2): 201 ~ 205.

[2] Anastos G J, Noland J W, Johnson N P, et al. Innovative technologies for hazardous waste treatment[J]. Nuclear and Chemical Waste Management, 1988, 8(4): 269 ~ 281.

[3] Leuser R M, Velazquez L S, Janssen A C J. Remediation of PCB soil contamination by on-site incineration[J]. Journal of Hazardous Materials, 1990, 25(3): 375 ~ 385.

[4] Nobbs D, Chipman G. Contaminated site investigation and remediation of chlorinated aromatic compounds[J]. Separation and Purification Technology, 2003, 31: 37 ~ 40.

- [5] Bailey M L. Waste disposal in New Zealand—Applying the environmental procedures[J]. *Waste Management & Research*, 1985, **3**(4): 307 ~ 317.
- [6] Benestad C. Incineration of hazardous waste in cement kilns[J]. *Waste Management & Research*, 1989, **7**(4): 351 ~ 361.
- [7] 何勤伟. 多氯联苯的治理方法[J]. *上海环境科学*, 1990, **9**(6): 20 ~ 22.
- [8] Carpenter B H, Wilson D L. Technical/economic assessment of selected PCB decontamination processes[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 1988, **17**(2): 125 ~ 148.
- [9] 赵毅, 孙伟. 化学法处理多氯联苯[J]. *环境科学进展*, 1997, **5**(1): 43 ~ 49.
- [10] Malkow T. Novel and innovative pyrolysis and gasification technologies for energy efficient and environmentally sound MSW disposal[J]. *Waste Management*, 2004, **24**(1): 53 ~ 79.
- [11] de Percin P R. Application of thermal desorption technologies to hazardous waste sites[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 1995, **40**: 203 ~ 209.
- [12] 金军, 张岱辉, 蒋可. 多氯联苯毒性、分析方法和治理技术的新进展[J]. *上海环境科学*, 1996, **15**(7): 20 ~ 26.
- [13] 张亨. 多氯联苯性质、危害及降解方法[J]. *中国氯碱*, 2001, **6**: 28 ~ 29.
- [14] Jones C G, Silverman J, Al-Sheikhly M, *et al.* Dechlorination of Polychlorinated Biphenyls in Industrial Transformer Oil by Radiolytic and Photolytic Methods[J]. *Environmental Science and Technology*, 2003, **37**: 5773 ~ 5777.
- [15] 赵毅, 陈颖敏, 赵英. 多氯联苯的危害及处理[J]. *电力环境保护*, 1990, **6**(4): 32 ~ 36.
- [16] Borja J, Taleon D M, Auresenia J, *et al.* Polychlorinated biphenyls and their biodegradation[J]. *Process Biochemistry*, 2005, **40**(6): 1999 ~ 2013.
- [17] 朱桂珍. 利用水泥回转窑焚烧处置危险废物的评价研究[J]. *环境保护*, 2000, **3**: 14 ~ 22.
- [18] Vaidya O S, Kumar S. Analytic hierarchy process: An overview of applications[J]. *European Journal of Operational Research*, 2006, **169**(1): 1 ~ 29.
- [19] 金重阳, 杨国兴, 彭万寿. 多氯联苯(PCB)的污染及无害化处理[J]. *环境保护科学*, 1990, **16**(3): 31 ~ 35.
- [20] 谢泽. 利用可燃性危险废弃物作燃料生产水泥[J]. *水泥工程*, 2000, **1**: 1 ~ 3.
- [21] 侯淑英, 许春平, 杜继平, 等. 氯离子对预分解窑操作影响一例[J]. *水泥技术*, 1999, **6**: 44 ~ 45.
- [22] 张卫东. 高氯原料在预分解窑系统中的实践与应用[J]. *水泥工程*, 2003, **5**: 37 ~ 38.
- [23] Farag L M, Kamel H M. 含高氯、硫、碱原料对水泥生产的影响[J]. *水泥·石灰*, 1995, **6**: 36 ~ 40.