

X5  
33

环境工程新技术丛书

# 电化学技术在环境工程中的应用

冯玉杰 李晓岩 尤宏 丁凡 编著



化学工业出版社

环境科学与工程出版中心

·北京·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

电化学技术在环境工程中的应用 / 冯玉杰等编  
著. —北京: 化学工业出版社, 2002.5  
(环境工程新技术丛书)  
ISBN 7-5025-3784-8

I. 电… II. 冯… III. 电化学-应用-环境工程  
IV. X5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 020312 号

---

环境工程新技术丛书  
电化学技术在环境工程中的应用  
冯玉杰 李晓岩 尤宏 丁凡 编著  
责任编辑:路金辉 管德存  
责任校对:郑捷  
封面设计:于兵

\*  
化学工业出版社 出版发行  
环境科学与工程出版中心  
(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)  
发行电话:(010)64982530  
<http://www.cip.com.cn>

\*  
新华书店北京发行所经销  
北京市昌平振南印刷厂印刷  
三河市前程装订厂装订  
开本 850×1168 毫米 1/32 印张 12 $\frac{3}{4}$  字数 343 千字  
2002 年 5 月第 1 版 2002 年 5 月北京第 1 次印刷  
ISBN 7-5025-3784-8/X·184  
定 价: 30.00 元

---

版权所有 违者必究  
该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

## 序

随着我国社会经济的高速发展，城乡面貌发生了深刻的变化。人们对改善环境污染状况、提高生活质量、建设生态城市的要求与呼声与日俱增。我国的环境污染经过长期治理，虽然部分地区已经有所改善，但总体上还是比较严重的。在有些地区要寻找一个合格的饮用水源也不容易。工业“三废”的治理依然存在很多技术、工艺及经济可行性方面的难点。针对这种状况，近几年来，国家和地方政府加大了环境项目的投资力度，同时允许社会力量参与投资和建设，用市场经济的方式运作，形成了多元投资的格局。投资的多元化，排污收费的市场化，大大推动了环境项目的建设。缺少投资、缺少运行费用的状况得到了很大的改善。

环境问题很复杂，涉及众多学科，需要很多技术。它的科学研究和开发已远远超出了传统的学科范畴和科研单位范围。多学科交叉，多单位合作已经成为环境工程学科发展的重要方向。社会对环境的需求为环保事业的发展提供了动力，使环境工程成为目前发展最快的学科之一，近几年来取得了不少新的成果。化学工业出版社为了大力宣传环保知识，推动环保的科技进步，及时组织了一套环境工程新技术丛书。这套书能在一定程度上反映国内外环境技术的进展状况，供有关人员参考。应该说化工出版社是一个很有活力的出版社，及时出版了不少有参考价值的新书，深受读者的欢迎，是一座沟通作者与读者的很好的桥梁。在科学技术日新月异，人类进入数字化、信息化的时代，我们希望这座桥梁更为宽广通畅，共同为推动我国环保技术的发展做出贡献。

顾国维

2002年3月

## 前 言

电化学在 100 多年的发展中，不但自身发展迅速，已形成了较完善的理论与应用体系，且电化学技术作为一门应用技术在许多工业领域中均获得了应用。其应用领域涉及传感器、自动控制、分析、腐蚀与防护、表面技术、能源生产、材料和化学品制造、物质循环利用、污染物处理等。

近年来电化学技术在环境化工中的应用得到快速、广泛的发展，其原因主要是因为人们对环境保护的意识逐年增强，对一些具有潜在危害的污染物和有毒物质的处理的要求也更加严格，此外从经济或其他方面考虑，有价值化学物质和试剂的回收利用逐渐受到重视，而在污染物回收、污染去除方面，电化学技术具有其独特的优势。这些均使环境电化学在理论、技术和工程方面取得了快速的进展，尤其是用于电化学装备的电极材料和膜材料等的发展更是日新月异。电化学装备的生产也逐渐形成规模，且商业化的应用也逐渐扩大。

无论从污染物治理、有机电合成，还是从能源、资源角度讲，电化学作为一门“清洁技术”，其应用领域正在逐渐扩大，例如：清洁能源体系、有机及无机物的电合成、电化学传感器等，使得电化学技术成为了解决人类面临的环境问题的有利武器。

本书是在近年来哈尔滨工业大学和香港大学在环境电化学领域所开展的科研工作的基础上完成的，书中对作者近几年来在电催化电极开发、电化学消毒、电分析等方面的内容也做了总结。编写过程中，既充分体现了电化学学科自身的特点及研究方法，又详细介绍了相关领域的研究现状和今后的发展方向。书中多处讨论了电催化电极的开发与研制问题，强调功能性电极在环境电化学体系中的重要性。

本书共分9章，除绪论外，全书分为5部分。电化学理论（第2章、第3章）、电化学处理（第4章、第5章）、电化学清洁生产（第6章）、电化学防护（第7章）、环境中的电分析技术（第8章）、电化学清洁能源（第9章）等。全书由哈尔滨工业大学冯玉杰、尤宏，香港大学李晓岩、丁凡共同完成。第1、2、3、6、7章由冯玉杰执笔，第4、5章及第3章的部分内容由李晓岩、丁凡共同完成，第8、9两章由尤宏执笔。全书由冯玉杰统稿。在编写过程中，引用了一些参考文献中的图、表和数据，在此向相关作者表示感谢。

由于编者水平有限，书中错误和疏漏之处在所难免，请有关专家和广大读者批评指正。

作者  
2002年4月

# 目 录

|                            |    |
|----------------------------|----|
| <b>第 1 章 绪论</b> .....      | 1  |
| 1.1 电化学及其研究与应用内容 .....     | 1  |
| 1.2 环境问题 .....             | 3  |
| 1.2.1 环境污染物与治理 .....       | 4  |
| 1.2.2 资源与环境问题 .....        | 7  |
| 1.2.3 清洁生产 .....           | 9  |
| 1.3 电化学工程与环境问题 .....       | 10 |
| 参考文献 .....                 | 12 |
| <b>第 2 章 电化学基础理论</b> ..... | 13 |
| 2.1 电化学体系的基本结构单元 .....     | 13 |
| 2.1.1 电极 .....             | 13 |
| 2.1.2 电解质溶液 .....          | 15 |
| 2.1.3 隔膜 .....             | 16 |
| 2.2 电化学中的几个基本概念 .....      | 16 |
| 2.2.1 电化学反应及电子、电荷和电流 ..... | 16 |
| 2.2.2 电位与电压 .....          | 17 |
| 2.2.3 法拉第定律 .....          | 24 |
| 2.2.4 电流效率 .....           | 25 |
| 2.2.5 能耗 .....             | 28 |
| 2.3 电极/溶液界面的特性——双电层 .....  | 29 |
| 2.3.1 双电层的结构 .....         | 29 |
| 2.3.2 双电层中剩余电荷的巨大作用 .....  | 32 |
| 2.4 零电荷电势与表面吸附 .....       | 33 |
| 2.5 电化学传质理论 .....          | 34 |
| 2.5.1 扩散 .....             | 34 |
| 2.5.2 电迁移 .....            | 37 |
| 2.5.3 对流 .....             | 41 |

|                                |           |
|--------------------------------|-----------|
| 2.6 电极反应动力学简介 .....            | 42        |
| 参考文献 .....                     | 46        |
| <b>第3章 电极结构与电催化特性 .....</b>    | <b>47</b> |
| 3.1 电极对电化学过程的影响 .....          | 47        |
| 3.1.1 电极材料的基本要求 .....          | 47        |
| 3.1.2 电极材料对电极反应及电化学工程的影响 ..... | 48        |
| 3.2 电催化及电催化电极 .....            | 51        |
| 3.2.1 电极材料的发展 .....            | 51        |
| 3.2.2 电极材料的种类 .....            | 53        |
| 3.2.3 电催化反应与电催化电极 .....        | 58        |
| 3.3 半导体电化学基础 .....             | 63        |
| 3.3.1 半导体材料结构与导电机理 .....       | 63        |
| 3.3.2 半导体材料的双电层结构 .....        | 71        |
| 3.3.3 半导体的电催化过程 .....          | 74        |
| 3.4 电极结构与难降解有机物的电催化降解 .....    | 75        |
| 3.4.1 电极材料与有机物的电化学转化效率 .....   | 77        |
| 3.4.2 电极表面状态与有机物的电化学转化 .....   | 89        |
| 参考文献 .....                     | 92        |
| <b>第4章 环境污染物的电化学去除 .....</b>   | <b>94</b> |
| 4.1 电化学方法及特点 .....             | 94        |
| 4.2 污染物的电化学处理方法及原理 .....       | 96        |
| 4.2.1 电沉积——溶解性金属离子回收 .....     | 96        |
| 4.2.2 电化学氧化 .....              | 100       |
| 4.2.3 电化学还原 .....              | 102       |
| 4.2.4 光电化学氧化 .....             | 102       |
| 4.2.5 电吸附 .....                | 103       |
| 4.2.6 电凝聚 .....                | 103       |
| 4.2.7 其他电化学污染物处理方法 .....       | 105       |
| 4.3 电化学技术在溶解性金属离子回收中的应用 .....  | 106       |
| 4.3.1 溶解性金属离子回收与再利用方法简介 .....  | 106       |
| 4.3.2 电沉积技术用电解槽基本结构 .....      | 107       |
| 4.3.3 几种常用电沉积槽的电极结构 .....      | 110       |
| 4.3.4 多种金属离子混合液中的金属沉积 .....    | 116       |

|            |                            |            |
|------------|----------------------------|------------|
| 4.3.5      | 电沉积与其他过程的结合的应用 .....       | 118        |
| 4.3.6      | 粘固 .....                   | 124        |
| 4.3.7      | 电沉积与电合成的结合 .....           | 125        |
| 4.4        | 电化学技术在水中无机污染物处理中的应用 .....  | 126        |
| 4.4.1      | 氰化物的电化学去除 .....            | 126        |
| 4.4.2      | 含铬溶液的电化学处理 .....           | 128        |
| 4.4.3      | 其他无机化合物的电化学去除 .....        | 130        |
| 4.5        | 水中有机污染物的电化学处理 .....        | 131        |
| 4.5.1      | 水中有机污染物电化学氧化的类型 .....      | 131        |
| 4.5.2      | 基本概念及公式 .....              | 132        |
| 4.5.3      | 电化学去除有机污染物的原理 .....        | 134        |
| 4.5.4      | 电化学去除有机污染物的应用 .....        | 141        |
| 4.5.5      | 利用金属氧化还原媒质的间接氧化过程 .....    | 150        |
| 4.6        | 气态污染物的电化学处理 .....          | 152        |
| 4.6.1      | 二氧化硫的氧化 .....              | 153        |
| 4.6.2      | 氮氧化物的电化学处理 .....           | 162        |
| 4.6.3      | 硫化氢的处理 .....               | 163        |
| 4.6.4      | 二氧化碳的电化学还原 .....           | 167        |
| 4.6.5      | 氯气的去除和浓缩 .....             | 168        |
| 4.6.6      | 电焚烧器简介 .....               | 169        |
| 4.7        | 电化学在土壤原位修复中的应用 .....       | 169        |
| 4.7.1      | 电化学法修复污染土壤的作用原理 .....      | 170        |
| 4.7.2      | 电化学法对土壤污染物的去除 .....        | 171        |
| 4.7.3      | 电动力学原位土壤修复应用过程的设计和运行 ..... | 172        |
| 参考文献       | .....                      | 174        |
| <b>第5章</b> | <b>电化学消毒</b> .....         | <b>176</b> |
| 5.1        | 电化学消毒研究与应用发展概述 .....       | 176        |
| 5.1.1      | 电化学消毒 .....                | 176        |
| 5.1.2      | 电化学消毒技术的发展 .....           | 177        |
| 5.2        | 电化学消毒原理 .....              | 178        |
| 5.2.1      | 间接电化学氯消毒 .....             | 178        |
| 5.2.2      | 直接电化学消毒原理 .....            | 181        |
| 5.2.3      | 关于电场作用的相关研究 .....          | 182        |

|            |                         |            |
|------------|-------------------------|------------|
| 5.2.4      | 关于自由基作用的相关研究            | 184        |
| 5.3        | 污水氯消毒效率的主要影响因素          | 188        |
| 5.3.1      | 氯杀菌效率的表征                | 188        |
| 5.3.2      | 初始混合对杀菌效率的重要性           | 189        |
| 5.3.3      | 污水特性对杀菌效率的影响            | 189        |
| 5.4        | 间接电化学氯消毒法——在线消毒剂生产系统与应用 | 190        |
| 5.4.1      | 消毒剂在线生产类型               | 190        |
| 5.4.2      | 消毒剂在线生产设备               | 192        |
| 5.4.3      | 现场次氯酸钠的制备               | 195        |
| 5.4.4      | 在线消毒系统的设计与选择            | 207        |
| 5.5        | 单程反应式直接电化学消毒            | 209        |
| 5.5.1      | 有关原理研究                  | 209        |
| 5.5.2      | 工作原理及运行参数               | 209        |
| 5.6        | 电化学消毒的应用                | 211        |
| 5.7        | 其他消毒技术的研究与应用            | 213        |
| 5.7.1      | 臭氧消毒                    | 213        |
| 5.7.2      | 二氧化氯消毒                  | 217        |
| 5.7.3      | 多种消毒方法的简单比较             | 220        |
|            | 参考文献                    | 221        |
| <b>第6章</b> | <b>清洁生产与有机物的电化学合成</b>   | <b>224</b> |
| 6.1        | 有机电合成简介                 | 224        |
| 6.1.1      | 有机电合成的概念与特点             | 224        |
| 6.1.2      | 有机电合成的发展与应用             | 226        |
| 6.2        | 电有机合成反应概述               | 230        |
| 6.2.1      | C=C 双键的阴极还原反应           | 230        |
| 6.2.2      | 羰基化合物及其衍生物的电还原          | 231        |
| 6.2.3      | 硝基或氰基化合物的还原             | 232        |
| 6.2.4      | 电环化反应                   | 233        |
| 6.2.5      | 烃类的电氧化                  | 234        |
| 6.2.6      | 电消除反应                   | 234        |
| 6.2.7      | 电置换反应                   | 235        |
| 6.2.8      | 提高电合成效率的几项措施            | 235        |
| 6.3        | 间接电合成                   | 236        |

|            |                       |            |
|------------|-----------------------|------------|
| 6.3.1      | 间接电合成的概念和特点           | 236        |
| 6.3.2      | 间接电合成催化剂——媒质          | 237        |
| 6.3.3      | 均相间接电合成及机理            | 240        |
| 6.3.4      | 非均相间接电合成              | 243        |
| 6.4        | 直接电合成                 | 244        |
| 6.5        | 电合成的应用实例              | 245        |
| 6.5.1      | 己二腈的电合成               | 245        |
| 6.5.2      | 对氟苯甲醛的间接电化学合成         | 250        |
| 6.6        | 电合成新技术与进展             | 250        |
| 6.6.1      | 成对电合成                 | 250        |
| 6.6.2      | 固体聚合物电解质 (SPE) 的制备及应用 | 254        |
| 6.6.3      | 利用反应性电极进行电合成          | 256        |
| 6.6.4      | 利用三维电极进行电合成           | 257        |
| 6.6.5      | 采用修饰性电极进行有机电合成        | 258        |
|            | 参考文献                  | 258        |
| <b>第7章</b> | <b>金属腐蚀与电化学防护</b>     | <b>260</b> |
| 7.1        | 金属腐蚀与防护的基本概念          | 260        |
| 7.1.1      | 金属腐蚀与危害               | 260        |
| 7.1.2      | 金属腐蚀作用的分类             | 261        |
| 7.2        | 电化学腐蚀基础               | 262        |
| 7.2.1      | 电化学腐蚀及原理              | 262        |
| 7.2.2      | 电化学腐蚀热力学基础            | 265        |
| 7.2.3      | 电化学腐蚀动力学基础            | 273        |
| 7.3        | 金属腐蚀的电化学防护            | 277        |
| 7.3.1      | 阴极保护                  | 277        |
| 7.3.2      | 阳极保护                  | 280        |
| 7.3.3      | 阳极保护与阴极保护的比较          | 282        |
| 7.4        | 氧腐蚀及电化学除氧             | 282        |
| 7.4.1      | 电化学除氧原理               | 282        |
| 7.4.2      | 电化学除氧器结构              | 283        |
| 7.4.3      | 电化学除氧技术的发展            | 284        |
|            | 参考文献                  | 284        |
| <b>第8章</b> | <b>环境中的电化学分析技术</b>    | <b>285</b> |

|            |                    |            |
|------------|--------------------|------------|
| 8.1        | 电分析化学原理            | 285        |
| 8.1.1      | 电位分析               | 286        |
| 8.1.2      | 电解和库仑分析            | 288        |
| 8.1.3      | 伏安分析               | 294        |
| 8.2        | 电化学传感器             | 299        |
| 8.2.1      | 电位测量传感器            | 300        |
| 8.2.2      | 电导测量传感器            | 309        |
| 8.2.3      | 电流测量传感器            | 310        |
| 8.3        | 电化学生物传感器           | 316        |
| 8.3.1      | 电化学生物传感器原理         | 317        |
| 8.3.2      | 生物传感器在环境测量中的应用     | 322        |
| 8.4        | 环境监测中的电化学分析仪       | 326        |
| 8.4.1      | 空气质量监测仪器           | 326        |
| 8.4.2      | 水质监测仪器             | 334        |
|            | 参考文献               | 337        |
| <b>第9章</b> | <b>电化学清洁能源</b>     | <b>338</b> |
| 9.1        | 环境问题与能源            | 338        |
| 9.1.1      | 电力生产与燃煤污染          | 338        |
| 9.1.2      | 汽车尾气污染             | 339        |
| 9.2        | 燃料电池发电             | 340        |
| 9.2.1      | 燃料电池的原理            | 341        |
| 9.2.2      | 燃料电池的特点与分类         | 342        |
| 9.2.3      | 燃料电池的发展与应用前景       | 345        |
| 9.3        | 碱性燃料电池             | 346        |
| 9.3.1      | 碱性燃料电池的结构原理        | 347        |
| 9.3.2      | 阿波罗登月飞船用碱性燃料电池     | 350        |
| 9.3.3      | 美国航天飞机用碱性氢氧燃料电池    | 352        |
| 9.3.4      | 我国研制的航天飞行用碱性燃料电池   | 354        |
| 9.4        | 磷酸型燃料电池            | 356        |
| 9.4.1      | 磷酸型燃料电池的原理与结构      | 356        |
| 9.4.2      | 磷酸型燃料电池发电装置        | 359        |
| 9.5        | 质子交换膜型燃料电池         | 362        |
| 9.5.1      | 质子交换膜型燃料电池的材料与制备工艺 | 364        |

|       |                          |     |
|-------|--------------------------|-----|
| 9.5.2 | 质子交换膜燃料电池在牵引动力中的应用 ..... | 368 |
| 9.5.3 | 直接甲醇燃料电池 .....           | 372 |
| 9.6   | 熔融碳酸盐燃料电池 .....          | 376 |
| 9.6.1 | 熔融碳酸盐燃料电池原理与结构 .....     | 376 |
| 9.6.2 | 熔融碳酸盐燃料电池试验电站 .....      | 380 |
| 9.7   | 固体氧化物燃料电池 .....          | 382 |
| 9.7.1 | 固体氧化物燃料电池元件及所用材料 .....   | 383 |
| 9.7.2 | 固体氧化物燃料电池的结构 .....       | 388 |
| 9.7.3 | 中温固体氧化物燃料电池 .....        | 391 |
| 9.7.4 | 固体氧化物燃料电池的电站试验 .....     | 392 |
|       | 参考文献 .....               | 394 |

# 第 1 章 绪 论

环境科学与技术近年来取得极大的发展，这种发展一方面是从事环境科学的专家学者与工程技术人员在传统的环境污染治理方面不断努力的结果，另一方面也与环境科学与其他交叉学科的密切合作极为相关。电化学工程在环境污染物检测、环境污染物处理、清洁生产、清洁能源等方面发挥着越来越大的作用，形成了一个新的学科分支——环境电化学或环境电化学工程。本书力求从电化学在环境工程中应用的角度，全面反映这一领域的特点和研究范围。

## 1.1 电化学及其研究与应用内容

电化学是研究化学能与电能之间相互转化的一门古老学科，从学科性质上讲，属于物理化学的一个重要分支，在与无机化学、有机化学、分析化学、化学工程等学科相互渗透、协调发展的过程中逐渐形成了自己完备的理论与应用体系。1799 年伏打 (Valta) 将锌片与铜片折叠，中间用浸有硫酸的毛毡隔开，这就是世界上第一个化学能转化为电能的化学电源装置，1800 年尼克松 (Nichoson) 和卡利苏 (Carlisle) 发现伏打电源电解水溶液时在电极上有气体产生，这也是世界上电解水的第一次实验，此后利用原电池进行电解的电能转化为化学能的电解工作引起了相当的重视，1882 年恩格斯 (Engels) 在自然辩证法中以相当大的篇幅讨论电能、化学能之间的相互转换问题，足见电化学在自然科学发展中占有很重要的地位。伏打电源出现后，大量科学实验的积累推动了电化学理论的发展，1826 年发现了欧姆定律，1833 年反映电流与化学反应关系的法拉第定律被发现，这些都极大地促进了电化学理论与应用的发展。随后，19 世纪 70 年代亥姆霍斯兹 (Helmholtz) 首次提出了双

电层的概念，1887年阿伦尼乌斯（Arrhenius）提出了电离学说，1889年能斯特（Nernst）提出了电位的概念，并建立了电极电位与电极反应各组分浓度之间关系的能斯特方程式，1905年塔菲尔（Tafel）公式被提出，揭示了电流密度与氢过电位的关系，即著名的Tafel曲线，20世纪50年代前后伏卢姆金（ФРУМКИН）和博克瑞斯（Bochris）经过大量艰苦研究，发展了电极过程动力学，使之成为电化学理论的主体。近几十年，电化学理论在其他学科发展的带动下，出现了飞跃发展，例如：以量子理论解释溶液界面的电子转移问题，半导体电极过程特性的研究等丰富了电极与溶液界面双电层特性的有关内容，一些传统的较为模糊的概念逐渐得到澄清，使得电化学逐渐由起初的边缘化学学科发展成为独立于化学学科之外的一个新学科，涉及领域相当广泛，包括电极过程、电合成、电化学腐蚀，以及带有电荷传递、质量传递和离子传递的表面过程等。

将电化学理论应用于生产实际中，形成了应用电化学体系或电化学工程体系。广义上讲，将电化学理论与任何工程体系结合，所形成的以解决工程问题为主的工程技术体系均可以称为电化学工程，它已远远超出了化学或化学工程的领域，其共同的特征就是这些体系均以电化学理论为共同的理论基础。20世纪60年代常常被认为是电化学工程发展的一个转折时期。

1962年，卡尔·瓦格纳（Carl Wagner）在他的新书《电化学与电化学工程进展》（Advances in Electrochemistry and Electrochemical Engineering）中对他本人在电化学工程领域所取得的一些研究结果进行了总结，当时他的研究一方面集中在以对流扩散为主的质量传递方面，另一方面集中在电极上的电流密度的分布问题，卡尔·瓦格纳采用最多的是以精密的数学推理解决电化学问题，例如：电解质溶液和电极之间的质量传递和电荷传递等。尽管卡尔·瓦格纳的许多工作并不带有普遍性和系统性，但他在电化学领域提出的鲜明的观点使得在此后的20年间电化学理论成为人们关注的学术焦点之一，也正因为如此，卡尔·瓦格纳被认为是电化学工程的创始人

之一。60 年代的电化学工程大多局限在化学工程领域，例如：到 60 年代氯碱工业已有了近 60 年的发展历史，电化学冶金也有类似的发展历程。这些传统的电化学领域的发展在很大程度上依赖室验结果的直接应用，而对于一些真正影响电化学过程稳定运行的基本现象缺乏深入的理解和认识。60 年代，化工单元操作得到迅速发展，物理或物理化学现象与化学工程之间的关系逐渐被认识清楚，化学工程的这种发展推动了电化学的发展，以氯碱为主要研究对象，对电化学应用中许多现象的研究逐渐深入，对电化学过程的控制也更加主动。此后电化学与许多工业部门结合，开拓了众多新的应用领域，同时电化学学科也与其他学科交叉发展，派生了许多新的边缘学科，如：电分析化学、催化电化学、熔盐电化学、量子电化学、腐蚀电化学、生物电化学等，这些学科中有一些已得到迅速发展，成为相对独立的新的学科体系和工业部门。

不仅如此，1963 年 Grubb 在他的文章中对电极动力学和电催化进行了较深入的讨论，以及 1963 年 H. Beer 发明了 DSA 电极，使得利用电极的电催化特性进行电化学过程成为了电化学工程延续至今的一种共识。今天的电化学应用领域大大超出了瓦格纳 1962 年对电化学工程范围的定义，已成为国民经济中的一大支柱产业。

## 1.2 环境问题

从今天的角度看待环境问题，可以将对人类生存和发展产生严重威胁的环境问题分为两大部分，一是人类活动所排放的废弃物带来的环境污染；二是生态环境的破坏，这些环境问题有些是全球性的，有些是局域性的。温室效应与气候变暖、臭氧层的破坏、酸雨、有毒物质污染、生态环境破坏是目前人类面临的极大挑战。表 1.1 中列出了美国公众和 U.S.EPA (U.S. Environmental Protection Agency, 美国环境保护局) 于 90 年代初期公布的各自所关心的环境问题。1972 年在瑞典斯德哥尔摩召开的人类环境会议和 1992 年在巴西里约热内卢召开的环境与发展大会明确指出，保护环境必须成为全人类一致的行动，保护环境需改变发展的模式，将

经济发展与环境保护协调起来，走可持续发展的道路。环境科学技术体系在新形势下也在发生着变化，由以“末端治理”为主的技术体系到现在的污染预防、清洁生产等新的观念和技术，环境科学发展成了为解决环境问题的各项科学技术体系，以及为保护环境所采取的政治、法律、经济、行政等各项专门知识的庞大的学科体系。

表 1.1 美国公众与美国环保局公布的关注的环境问题

|                                     |  |
|-------------------------------------|--|
| <p>美国公众关心的 29 个环境问题<sup>①</sup></p> | <p>现行危险品处理场 (67%)、废弃危险品处理场 (65%)、工业水处理 (63%)、职业接触有毒化学品 (63%)、石油泄漏 (60%)、臭氧层的破坏 (60%)、核电站事件 (60%)、工业突发事件释放污染物 (58%)、辐射废物污染 (58%)、工业大气污染 (56%)、地下储油罐泄漏 (55%)、沿海水污染 (54%)、固体废物和垃圾 (53%)、杀虫剂对农民用户的污染 (53%)、农业排水污染 (51%)、工业排水污染 (50%)、交通对空气的污染 (50%)、食物中残存的杀虫剂 (49%)、温室效应 (48%)、饮用水污染 (46%)、湿地破坏 (42%)、酸雨 (40%)、城市排水污染 (35%)、非毒性废物处理场 (31%)、生物技术 (30%)、室内空气污染 (22%)、X 射线辐射 (21%)、室内氡污染 (17%)、微波辐射污染 (13%)</p> |
| <p>EPA 公布的 EPA 最关心的 12 个大的环境问题</p>  | <p>生态系统问题—<br/>全球气候变化、臭氧层空洞、动植物栖息地变化、种群灭绝和生物多样性丧失；<br/>健康问题—<br/>空气污染及标准 (例如：烟雾污染)、有毒空气污染物 (例如：苯)、氡、室内空气污染、饮用水污染、职业性化学药品污染、杀虫剂使用及污染、臭氧层空洞</p>  |

① 括号内数字表示在所调查的数据中列为“很严重”环境问题的比例。

### 1.2.1 环境污染与治理

环境污染物是指由于人类的活动使某种物质的自然存量超过了自然状态下环境中该物质的含量，且对所在环境或所在环境中有用的物质产生净的副作用的一类物质。任何一种污染物均有一个污染物源头，即污染源，污染源可以是天然的，也可能是人类活动带来的。按照污染物在环境中存在状态，将常见的污染物列于表 1.2 中。

传统的环境污染控制方法主要集中在污染源附近的“末端处理”，例如：燃煤燃烧的工厂往往均树立烟囱以使烟气扩散到高空，这样虽然保持了工厂周围大气的清洁，但由此引起的酸雨已成为世

表 1.2 环境中常见的污染物类型

| 有机污染物             |                                   | 无机污染物 |  | 微生物污染物   |  |
|-------------------|-----------------------------------|-------|--|----------|--|
| 类型                | 例子                                | 类型    | 例子   | 类型       | 例子   |
| 除草剂               | 草不绿<br>去草胺<br>莠去津<br>二氧杂芑         | 金属    | 铅<br>镉<br>汞<br>铜<br>铬  | 细菌       | 大肠杆菌<br>沙门氏菌<br>铜绿色假单胞菌<br>肠道沙门氏菌<br>霍乱弧菌等 |
| 杀虫剂               | 狄氏剂<br>七氯                         | 非金属   | 砷<br>硒   | 病毒       | 脊髓灰质炎病毒<br>大肠杆菌噬菌体<br>肝炎病毒<br>轮状病毒 (SA11)  |
| 溶剂                | 丙酮<br>苯<br>甲苯<br>苯乙烯<br>二甲苯<br>氯仿 | 阴离子   | 氟化物<br>氟化物<br>硼化物<br>氟化物<br>氟化物<br>磷酸盐   | 原生动<br>物 | 贾第鞭毛虫等                                     |
| 多环芳烃类碳氢化合物 (PAHs) | 苯并芘                               | 气态污染物 | SO <sub>x</sub><br>NO <sub>x</sub><br>O <sub>3</sub><br>CO <sub>2</sub><br>CO<br>NH <sub>3</sub> |          |  |
| 染料与表面活性剂          |                                   |       |  |          |  |
| 其他工业有机污染物         | 酚类<br>甲醛<br>PCBs<br>CFCs          |       |  |          |  |

界性的一大环境问题。类似的问题还有二氧化碳的释放导致全球气候变暖、CFCs 的大量排放使得臭氧层的破坏日益严重。此外在格陵兰降雪中发现高水平的铅、在远离大陆的北冰洋检测到了 PCBs 和杀虫剂等化学物质，这些环境问题的出现说明环境污染物在环境中的迁移、转化是一种普遍的现象，从某种意义上讲，末端处理不可能从根本上解决污染物带来的环境污染问题。尽管如此，面对目前尚不可能彻底改变的生产与生活方式，环境污染物的分析及处理