微电解技术在印制电路板生产综合废水处理中的应用

贺启环
（南京理工大学环境科学与工程系，江苏 南京 210094）

摘 要 文章从微电解的功能和作用机制出发，介绍了微电解技术的特点、工艺和对处理印制电路板生产和电镀综合废水的适用性与优势，也介绍了改进与强化微电解作用机制的方法，对作为微电解关键技术的各种反应器作了比较性阐述，并较详细地介绍了先进的微电解膨松床的工作原理、特点、技术经济指标和操作参数。对微电解法较敏感的泥量问题，也作了分析与计算，并指出了减少泥量的途径。

关键词 微电解；印制电路板；电镀；废水处理；膨松床
中图分类号：TN41，X38 **文献标识码**：A **文章编号**：1009-0096（2008）09-0042-07

Application of Microcell Electrolysis in Integrated Wastewater Treatment of Printed Circuit Board Production

HE Qi-huan

Abstract The characteristics, process, applicability and advantages of microcell electrolysis in integrated wastewater treatment of printed circuit board production and plating were presented based on the function and mechanism of microcell electrolysis in this paper. The methods of improving and strengthening microcell electrolysis effects were also introduced. Some kinds of microcell reactors were compared and the mechanism, characteristics, technical economical indexes and operating parameters of advanced microcell expanded bed were also introduced in this paper. Author analyzed and calculated the sensitive quantity of sludge and gave the approaches of reducing the sludge.

Key words microcell electrolysis; printed circuit board; plating; wastewater treatment; expanded bed

1 微电解技术简介

微（内）电解法是利用铁－碳粒料在电解质溶液中腐蚀形成的微（电池）电解过程来处理废水的一种电化学技术，又称腐蚀电池法。

其基本原理是两种电位不同的物质（如铁－碳，铝－碳等）在电解质溶液中接触浸泡就会形成原电池，并在周围空间形成电场。在电场力作用下，水中带电的污染物分子移向相反电荷的电极，并吸附在电极表面上发生氧化还原反应，降解成小分子物质或使胶体电中和脱稳。同时，电极反应生

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

成的产物也能与溶液中的污染物发生氧化还原反应。微电解系统中也可发生一系列化学物理过程，并产生络合、置换、吸附、絮凝沉淀等作用，达到进一步去除污染物的目的[1]。

由于微电解过程作用机制多，因此十分适合用于电路板和电镀综合或混排废水的处理。尤其对于国家刚刚颁布实施的《电镀污染物排放标准》(GB21900-2008)，该标准不仅对重金属，而且也对COD、总磷、总氮及总氰化物和氟化物指标都提出了更为严格的排放要求，微电解几乎就成为处理印制电路板综合或混排废水的必备工艺单元了。因此，深入了解微电解技术的工艺原理和正确地使用这项技术具有十分重要的现实意义。

2 微电解处理废水的一般工艺

石灰乳
↓
废水→调pH → 计量→ 微电解床 →调pH中和絮凝→
↑
空气
沉淀 →（过滤）→出水去生化
↓
污泥→去污泥浓缩池

3 微电解的作用机制

微电解的基本电极反应如下。

阳极反应：

$Fe=Fe^{2+}+2e$　　$E^0(Fe^{2+}/Fe)=-0.44V$

阴极反应：

$2H^+ + 2e=2[H]=H_2$　　$E^0(H+/H_2)=0.00V$

$M^{n+} + ne = M$　(还原金属离子)

当有O_2时：

$O_2+4H^++4e=2H_2O$(酸性溶液)　$E^0(O_2/H_2O)=1.23V$

$O_2+2H_2O + 4e=4OH^-$ (中性或碱性溶液)

$E^0(O_2/OH^-)=0.41V$

由上述电极反应的电极电位可知，在酸性充氧情况下铁腐蚀最甚，而无氧时差得多。

通常情况下微电解过程在酸性充氧条件下进行，出水需加碱中和至偏碱性，此时并有铁或铝的絮凝体产生。

（1）电场作用

废水中的胶体粒子和细小分散的污染物一般都带有电荷，在微电场的作用下产生电泳，向相反电荷的电极移动，在电极上交换电子发生氧化还原和电中和等反应，并使胶体脱稳。例如利用铁屑处理卤代烃的原理主要是依据下列反应（卤代烃以R-X表示）：

阳极过程：$Fe \rightarrow Fe^{2+}+2e$

阴极过程：$[R-X]+2e+H_2O \rightarrow [R-H]+X^-+OH^-$

脱卤过程中会有大量OH^-产生，使附近溶液pH上升，若溶液偏碱性则在阳极铁表面形成$Fe(OH)_2$、$Fe(OH)_3$、$Ca(OH)_2$等沉淀物。研究结果表明铁屑能与其中的13种卤代烃（12种氯代烃）发生反应[2]；并且发现铁屑对氯代烃的降解速度要比氯代烃的天然降解速度快得多（约快5~15个数量级）[3]。研究还表明：其降解速度与铁屑含量和铁屑比表容积（单位体积的溶液所接触到的铁屑表面积）有关，即铁屑含量越多，比表容积越大，其降解速率就越快[4]。废水中的氯代烃不仅难于生物降阶，而且对微生物的毒性也很大，零价铁对氯代烃的转化与脱氯作用可以大大提高废水的可生化性。

（2）氢、铁、Fe^{2+}的还原作用

铁是活泼金属，有较强还原能力，因而在偏酸性水溶液中能够发生如下反应：

$Fe + 2H^+=Fe^{2+} + 2[H]$

电极反应和化学反应中得到的新生态氢[H]以及Fe和Fe^{2+}都具有很高的化学活性，能与印染废水中的许多污染物发生氧化还原反应。如使偶氮基断裂而破坏发色基团，使大分子降解为小分子，具有脱色和提高废水可生化性的作用，反应式为：

$R-N=N-R'+4Fe^{2+}+4H_2O = RNH_2+R'NH_2+ 4Fe^{3+}+4OH^-$

Fe和Fe^{2+}也可将硝基化合物还原为胺基化合物等，同时提高了废水的可生化性[5][6]。反应式为：

$C_6H_5NO_2 +3Fe+6H^+ = C_6H_5NH_2+3Fe^{2+}+2H_2O$

有研究认为Fe^0在上述还原过程中具有反应物和由H_2诱发的还原反应催化剂的双重作用[7]。

铁被氧化生成的Fe^{2+}也具有较高的还原性，可将氧化性较强的离子或化合物还原及某些有机物还原，对Cr(VI)的还原如下式所示：

$6Fe^{2+}+Cr_2O_7^{2-}+14H^+ = 6Fe^{3+}+2Cr^{3+}+7H_2O$

铬由毒性较强的氧化态($Cr_2O_7^{2-}$)转化成毒性较弱

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的(Cr^{3+})还原态，并在后续碱中和的碱性条件下形成$Cr(OH)_3$沉淀而得到去除。

也有人利用铁屑的还原性来处理水中的硝酸盐和亚硝酸盐，还原产物为铵离子[8]。

Fe^{2+}也具有还原性，$E^0(Fe^{3+}/Fe^{2+})=0.771V$，因而当水中有强氧化剂存在时，$Fe^{2+}$可进一步氧化成$Fe^{3+}$。

（3）铁离子的络合和混凝作用。

在酸性条件下，用铁-炭微电解处理废水时，会产生Fe^{2+}和Fe^{3+}离子。新生态的Fe^{2+}和Fe^{3+}具有很好的絮凝作用，溶液在碱性条件下且有O_2存在时，会形成$Fe(OH)_2$和$Fe(OH)_3$，反应式为

$$Fe^{2+}+2OH^- = Fe(OH)_2$$

$$4Fe^{2+}+8OH^-+O_2+2H_2O = 4Fe(OH)_3$$

生成的$Fe(OH)_2$和$Fe(OH)_3$的吸附能力高于一般药剂水解得到的$Fe(OH)_3$吸附能力。同时其中的Fe离子能与许多有机物形成墨绿色的络合物。这样，废水中原有的悬浮物、胶体和油类等及通过内电解反应产生的不溶物和构成色度的染料及相当一部分水溶性有机物均可被其络合、吸附凝聚而从废水中分离去除。废水中具有负电位的油珠在外电场作用下，很快完成电泳沉积和聚结，经过$Fe(OH)_3$絮状胶体的吸附与絮凝作用[9]，除油率达到70%~80%[10]。

（4）铁的置换作用

铁是活泼金属，电极电位E^0 (Fe^{2+}/Fe)＝-0.44V，它具有还原能力，可将在金属活动顺序表中排于其后的金属置换出来而沉积在铁的表面，如镍、锡、铅、铜、银等；如用铝－碳填料，还可置换出锰、锌。当铁屑不断被腐蚀变成铁粉时，这些微小的沉积金属粉粒也一起随废水流出，而在后续的碱中和絮凝沉淀时一同被分离去除。

（5）沉淀与共沉淀作用

微电解床出水加碱中和絮凝沉淀是微电解工艺中必不可少的组成部分，通常用石灰乳[$Ca(OH)_2$]作为中和用碱液，石灰乳本身就是一个助凝剂，它不仅价格便宜，而且形成的沉淀污泥也易于脱水，更重要的是Ca^{2+}能与许多污染物反应形成沉淀物而被分离除去，如S^{2-}、PO_4^{3-}、F^-及磺酸基SO_3^-等。

微电池反应产物Fe^{2+}和Fe^{3+}也能通过沉淀反应去除某些无机物，以减少其对后续生化工艺段的毒害，如与S^{2-}、CN^-等反应生成FeS、$Fe_3[Fe(CN)_6]_2$（铁氰化亚铁）、$Fe_4[Fe(CN)_6]_3$（亚铁氰化铁）等沉淀而被去除。

对于含有重金属的废水，重金属离子还可与铁离子形成稳定的铁氧共沉淀物而被去除。微电解法不仅可以处理单一的含Cr^{6+}的废水，还可以处理含Cr^{6+}、Cu^{2+}、Ni^{2+}、Zn^{2+}、pb^{2+}等多种重金属离子的综合性电镀废水，无需分流，一次处理达标，大大地简化了处理流程，且处理后的水质稳定。处理后出水中的Cr^{6+}浓度有望达到0.3mg/L。Fe^{2+}的吸附和共沉淀作用也可经济地去除废水中的As、F，去除效果分别达到93%和99%[11]。

此外，沉淀后废水中残留的少量Fe离子对后续的生化处理过程有促进作用。

微电解法处理废水正是通过以上有关过程与机制共同作用的结果。

归纳起来，微电解技术处理废水的作用机制相当丰富，可以去除大量的COD，而且可以提高废水的可生化性，其脱色效果也十分显著；并且对各种金属离子都有极好的共沉淀去除效果，还能脱硫、磷，除氰、氟和去砷。微电解工艺与后续生化处理单元的匹配性也相当好。不仅如此，微电解过程只消耗一些铁屑（废料）和酸（视废水而定，不一定是必须投加的）及碱[$Ca(OH)_2$]，因此处理费用也相当低廉（通常只相当化学法的1/10~1/5），投资和运行费用的经济性都很好。可见，微电解技术用于处理印制电路板生产综合或混排废水是一项最佳实用技术。

4 微电解法的特点

4.1 优点

（1）所用的铁是废弃的（铸）铁屑，符合“以废治废”的理念。

（2）可同时处理多种污染物，占地面积小，系统构造简单，整个装置易于定型化及设备制造工业化。

（3）适用范围广，如处理制药废水、染料生产废水、印染废水、有机与石油化工废水、电镀及电路板生产废水等。

（4）使用寿命长，操作维护方便，先进的微电解床只要定期地添加铁屑便可。

（5）造价合理、处理费用低廉，经济性好。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

微电解法的特点是作用机制多、协同性强、综合效果好、脱色效果尤其明显，还可提高废水的可生化性，与二级生化处理工艺匹配性好、操作简便、以废治废、运行费用低。其 COD 去除率可达 20%~60%，脱色率在 50%~96%。在许多工程中已成为生化处理前的主导一级处理工艺单元。

4.2 存在问题

（1）当进水 pH 值较低时铁泥产生量较大。污泥一般送至炼铁厂处置或掺合制作建筑材料，也有把铁泥用来制作磁性材料。

（2）固定床经一段时间的运行后易结块，出现沟流、死区及板结等现象，在运行过程中表面沉积沉淀物使铁产生钝化，降低处理效果。

（3）对于固定床，补充铁屑的劳动量很大。

5 微电解法作用机制的改进与强化

为了应对日益严格的废水排放标准，对微电解技术的改进与强化正在受到密切的关注。简单讲，主要有以下几个方面：

（1）改变填料种类、筛选有效催化剂和助剂，以使微电解能在较宽的 pH 范围内发挥电化腐蚀及絮凝吸附最佳效果，并减少污泥量。

（2）对零价铁进行改良，形成双金属系统提高对氯代烃的脱氯速率[12]；用金属催化剂铜作阴极[13]、制备纳米级零价铁来强化微电解过程[14]。

（3）改进微电解反应器，在传统反应器上外加电场以强化微电解过程[15]。

（4）微电解技术与其它处理技术联用。如微电解－光催化法[16]、微电解－Fenton 法[17]、微电解－光催化氧化法[18]、超声波－微电解法[19]、微波－微电解法[20]等。

这些改进与强化虽然有限地提高了微电解去除 COD 的效果和改善了其性能，但也往往以牺牲部分传统微电解法的特点为代价，尤其是其简易性和经济性受到损失，所以目前还没有得到广泛的工业应用。

6 微电解反应器

微电解的关键技术是其反应器，目前微电解反应器大致有如下几种：

6.1 固定床（过滤床）

固定床也称为铁屑过滤床，是最原形和初始的微电解反应器，虽然构造比较简单造价低，但如第 4.2 节中所述，传统微电解法的缺点几乎都是由它引起的[21]。在工程实践中，固定床很容易成为填料结成一大块的死床，如图 1 所示。

图 1 微电解固定床反应器

6.2 转鼓式反应器

转鼓式微电解方法的技术要点是：由反应池和转鼓组成处理装置，把铁屑、活性炭混合装入开孔的转鼓内，转鼓内壁衬有 40 目~16 目的尼龙网，转鼓转动带动铁炭滚动，使铁屑和活性炭之间的位置和铁炭之间形成的微电解电场发生双重位移，有效地防止铁炭床的阻塞结块。被处理的废水在反应池中和滚动的铁炭反应，其中的有机污染物得到有效的降解。根据转鼓浸入水中的深度，又分为半浸入式（图 2 和图 3）和浸入式（图 4 和图 5）转鼓反应器[1]。

半浸入式转鼓反应器运行时，类似于生物转盘，有氧气带入反应体系，虽然可以加快铁屑的腐蚀速度，但在转速较快或偶尔停运时，仍然会因腐蚀产物的氧化而发生铁屑结块。

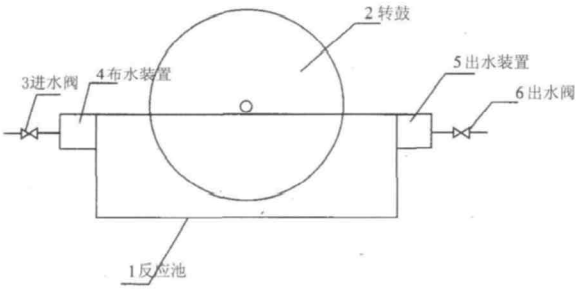

图 2 半浸入式转鼓反应器示意图

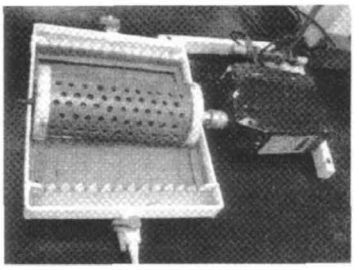

图 3 半浸入式转鼓反应器小型装置图

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

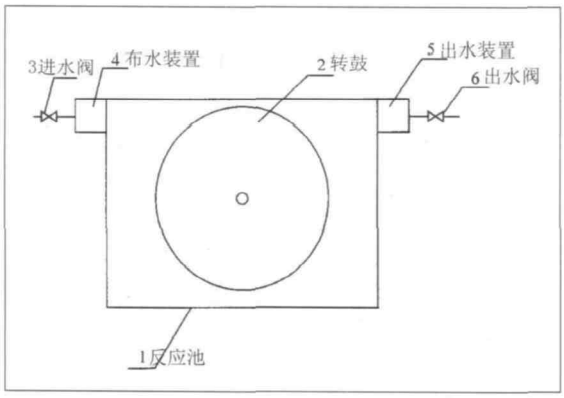

图4　浸入式转鼓反应器示意图

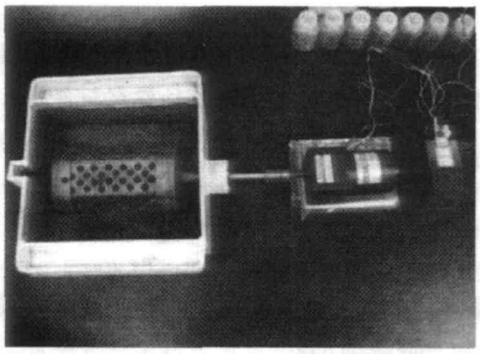

图5　浸入式转鼓反应器小型装置图

与半浸入式转鼓反应器相比，浸入式转鼓反应器只是将转鼓整个置于液面之下，从而减少了铁屑与氧气的接触，虽然可以解决铁屑板结问题，但也使铁屑的氧化速度降低的同时其腐蚀速度也大大降低。

转鼓反应器属于返混型的反应器，为了提高处理效果，一般要采用二级、多级串联或出水回流的方法。

转鼓式反应器容积效率和铁屑与废水的接触效率低，转鼓驱动的动力消耗大，占地面积也大，在实际工程中的应用不多见。

6.3　回转窑式反应器（滚筒絮凝床）

回转窑式反应器（滚筒絮凝床）是一种卧式滚筒型反应床（图6和图7）[22]，铁炭混合填料与废水一起装在滚筒内转动，负载相当大，电耗很高，占地也很可观；而且系统基本上是处在一个封闭环境中，反应产生的氢气常因过多积累而时有爆炸发生，安全性上有隐患，因而这类滚筒床的应用目前基本上处于停滞状态。

6.4　微电解膨松床

微电解膨松床可以说是目前最先进、高效的微电解反应器（图8和图9）。

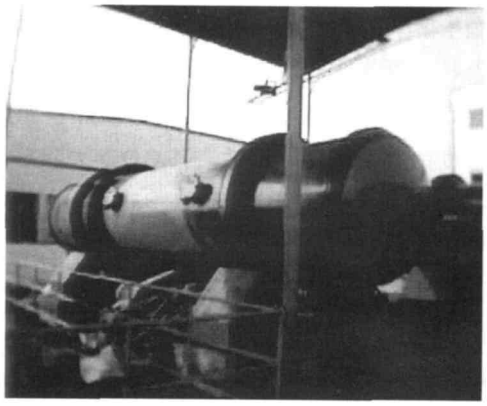

图6　回转窑式反应器（进水端）

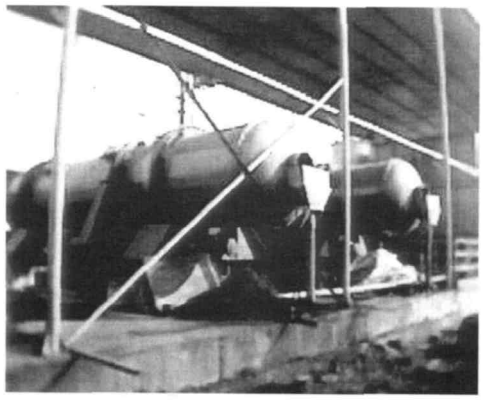

图7　回转窑式反应器（出水端）

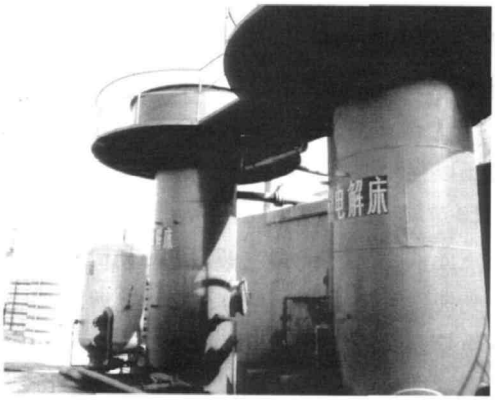

图8　高效微电解膨松床

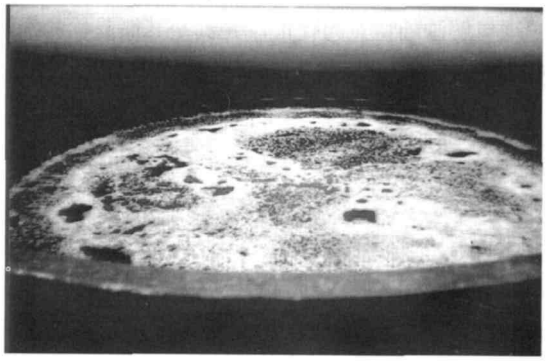

图9　微电解膨松床液面状况

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

6.4.1 微电解膨松床的原理与特点

（1）目前国内常用的固定床，其特点是结构简单，推流性好；但存在不少实用性问题：①效率不高，反应速度不快；②床体易板结或堵塞及钝化，造成短路和死区，效率下降；③铁屑补充劳动强度大。

（2）回转床存在的问题：虽然解决了铁屑补充、板结问题，但“铁－碳”填料跟着床体回转，不仅电耗大、填料磨损严重，回转中废水推流性大大降低，停留时间分布性变差，而且回转时填料中铁、碳分布不匀，与废水有效接触时间缩短；窑式床由于过于封闭，床内大量氢气聚集积累极易发生安全事故。

（3）为了克服上述这些主要缺点，我们以二元三相脉冲流态化技术原理为出发点，由省科委立项（BS98021）进行了高效微电解膨松床试验与开发研究，并通过了省级验收。

高效微电解膨松床是依据先进的二元三相脉冲流态化技术来研究开发的最新一代环保新产品，是对传统固定床的重大改进与提高，其研究与设计思想新颖、技术独特，在国内外处于先进地位。其主要特点与功能是：

① 既具有流化床的优点，又保持固定床工作时推流性、安全性的特点。

② 其脉冲膨松技术可以使床体处于松动均一状态，保持床体均一的空隙率，减少阻力损失，并有效防止床体板结、堵塞、短路和死区。

③ 可以清洁和更新微电极接触面与反应面，有利于提高和保持电化学反应效果。

④ 具有加速电化学反应的机制与功能，显著提高床体的处理效率。

⑤ 填料铁屑可以随时得到补充，保持床体填料的均一性，补铁的劳动强度大大减轻，又延长了设备的使用周期。

⑥ 微电解过程本身并不耗电，而脉冲流态化时间仅几分钟，电耗很低；脉冲操作可以按工况或时间自行进行自控，操作简便。

由此可知新产品既解决了原来固定床和回转床工作时的种种缺点与弊病，又保持与提高了固定床的优良推流性，其平均效率比固定床要高出10%以上，是一种十分先进的新一代水污染治理环保产品

6.4.2 微电解膨松床主要技术经济指标

（1）床体尺寸：ϕ1500 × ϕ5000 填料层容积4.9m³

（2）处理水量：3t/h~8t/h（视水质状况而定）

（3）COD 去除率：20%~60%（视水质状况而定）

（4）脱色率：50%~96%（视水质状况而定）

（5）直接运行费用（电耗、材耗）：0.13~1.20元/t（取决于进水pH与材料市场价格）

（6）床体运行重量：19t/台

（7）综合工程直接费：单台套8万元左右（03年）（床、槽、罐、机泵、管道阀门等）；当处理水量较大时，可以数台并联运行而共用一套附属设施，工程费可节省。

（8）装机电容量：10kW；常用进水功率：1kW；间隙脉冲流态化功率：9kW。

6.4.3 微电解膨松床操作参数

（1）填料层空隙率=48%左右(以此计算流量)

（2）有效内电解时间≈10min~50min左右（视水质状况和处理要求而定）

（3）进水pH=3~4　　出水pH=5~6

（4）铁耗和石灰乳用量：

pH=3——Fe耗量≈0.028kg/m³—— $Ca(OH)_2$用量≈0.037kg/m³

pH=3.5——Fe耗量≈0.009kg/m³ ——$Ca(OH)_2$用量≈0.012kg/m³

pH=4——Fe耗量≈0.0028kg/m³——$Ca(OH)_2$用量≈0.004kg/m³

7 微电解的污泥量

污泥量大，一般认为是微电解法的最大缺点，因此计算分析微电解法的泥量有重要指导意义。

7.1 泥量分析与计算

（1）泥量的组成：①$Fe(OH)_2$↓；②$CaSO_4$↓ ③SS；④络合与吸附的有机物(COD)。

（2）在去除SS和COD效果相同的情况下，泥量取决于：①$Fe(OH)_2$↓；②$CaSO_4$↓。

（3）以进水pH＝3.0为例

pH＝3→ $[H^+]$ ＝0.001g/L＝0.001kg/m³→铁耗＝0.028Fe kg/m³＝0.076 $FeSO_4$ kg/m³→

→用石灰乳0.037 $Ca(OH)_2$ kg/m³

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

（4）由此产生的泥量：

$FeSO_4 + Ca(OH)_2 \longrightarrow Fe(OH)_2\downarrow + CaSO_4\downarrow$

56	74	90	136
1	1.321	1.607	2.429
0.028	0.037	0.045	0.068

干泥量＝（0.045＋0.068）kg/m³＝0.113kg/m³ → 含水80%的湿泥量＝0.565 kg/m³

（5）微电解产生的新生态 Fe^{2+} ＝0.028Fe kg/m³＝0.076 $FeSO_4$ kg/m³→其效果不亚于直接投加0.1 $FeSO_4$ kg/m³进行混凝沉淀处理→而其产生的干泥量＝0.149 kg/m³ →是微电解泥量的1.32倍。

（6）感到微电解泥量大的原因：

①新生态 Fe^{2+} 和石灰乳助凝后产生的絮凝体体积大。

②石灰乳 $Ca(OH)_2$ 纯度差、杂质多，加大了投加量。

③没有控制好微电解的铁溶出量。

④废水中有大量的 SO_4^{2-}，产生的沉淀物 $CaSO_4$ 较多。

7.2 减少污泥量的对策

（1）调进水pH时用HCl，而不用 H_2SO_4，避免引入 SO_4^{2-}。

（2）用NaOH或 Na_2CO_3 代替 $Ca(OH)_2$，避免引入 Ca^{2+}；消除了 $CaSO_4\downarrow$，泥量可减少60%。

（3）减少石灰乳中的杂质，提高石灰乳纯度。

（4）控制好微电解的铁溶出量。注意：进水pH下降1，泥量增加10倍。

8 结语

（1）微电解技术作用机制丰富、功能综合、操作简单、费用低廉、与二级生化处理匹配性好、优势突出，是处理印制电路板生产综合或混排废水的最佳实用工艺。

（2）微电解的关键技术是微电解反应器，推荐使用高效微电解膨松床，它基本上克服了传统微电解反应器的缺点，而又保留了它的优点，是目前比较理想的一种微电解反应器。

（3）控制好操作参数和药剂种类，减少污泥量。PCI

参考文献

[1]曲久辉，刘会娟等．水处理电化学原理与技术[M]．北京：科学出版社，2007

[2]Gillham R W, O'Hannesin S F. Enhanced degradation of halogenated aliphatics by zerovalent iron.Ground Water, 1994, 32(6): 958~967

[3]Jeffers PM,Ward I M,Woytowitch LMeta1. Homogeneous hydrolysIs rate constants for selected chlorinated methanes. ethanes. ethenes and propanes. Environ Sci. Techno1.,1989, 23 (8): 965~969

[4]Matheson L J, Tratnyek P G. Reductive deha-logenation of chlorinated methanes by iron metal. Environ.. Sci. Technol., 1994, 28(12): 2045~2053

[5]Hung H M. Kinetics and mechanism of the enhanced reductive degradation of nitrobenzene by elemental iron in the presence of ultrasound, Environ, Sci, Technol., 2000, 34: 1758~1763

[6]贺启环，陈立伟．微电解－生化工艺处理化工制药废水的试验与实践[J]．污染防治技术，1998，11(4):237~239

[7]Matheson L J. Reductive dehalogenation of chlorinated methanes by iron metal, Enviror.Sci. Technol., 1994, 28: 2045~2053

[8]Rahaman A, Agrawal A .Reduction of nitrate and nitrite by iron metal: Implications for ground water remediation. In 213th American Society National Meeting.Preprints of extended abstracts, 1997, 37(1): 157~159

[9]汤心虎，甘复兴，乔淑玉．铁屑腐蚀电池在工业废水处理中的应用[J]．工业水处理，1998，(6)：4~6

[10]韩洪军．微电池滤床法处理含油废水[J]．化工环保，2000，20(5)：19~21

[11]彭根槐．电石渣－铁屑法去除硫酸废水中的氟和砷[J]．化工环保，1995，15(5)：280~284

[12]Muftikian R. Fernaando Q. Korte N E. A method of the rapid dechlorination of low molec-ular weight chlorinated hydrocarbons in water. Water Res.,1995, 29(10):2434~2439

[13]刘剑平，周荣丰，高廷耀．酸性橙II废水催化铁内电解法脱色研究[J]．化工环保，2004，25(6)：391~395

[14]梁震，王焰新．纳米级零价铁的制备及其用于污水处理的机理研究[J]．环境保护，2002，4：14~16

[15]叶亚平，唐牧，王丽华等．动态强化微电解装置处理染料废水[J]．中国给水排水，2004，20(6)：50~52

[16]程沧沧，胡德文，周菊香．微电解－光催化氧化法处理印染废水[J]．水处理技术，2005，31(7):46~47

[17]王永广，前元阳．微电解－Fenton法处理2-3酸生产废水的研究[J]．水资源保护，2004，1:18~20

[18]张智宏，宋封琦．铁屑过滤－光催化氧化处理染料废水[N]．江苏工业学院学报，2003，25(3)：27~29

[19]宋勇，戴友．超声波与零价铁联合降解五氯苯酚的初步研究[N]．湖南工程学院学报，2005，15(2)：78~79

[20]杨良玉，曾庆福，杨俊等．微波强化内电解处理活性艳红染料废水[J]．环境污染治理技术与设备，2005，6(8)：57~60

[21]周家艳，陈金龙，李爱民．内电解法处理染料废水的研究进展[J]．江苏环境科技，2005，18(2)：43~45

[22]沈滨．新型滚筒内电解法絮凝床[J]．中国给水排水，2002，18(6)：40~41

作者简介

贺启环，南京理工大学环境科学与工程系教授。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net