



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102718290 A

(43) 申请公布日 2012. 10. 10

(21) 申请号 201210230204. 5

(22) 申请日 2012. 07. 04

(71) 申请人 北京理工大学

地址 100081 北京市海淀区中关村南大街 5 号

(72) 发明人 吴玉凯 周智明 李汉军 陈祥光
王国青 王雪梅 刘厚丽 丁春淡
艾庆祝 张衍文 唐崇新

(51) Int. Cl.

C02F 1/461 (2006. 01)

C02F 1/72 (2006. 01)

权利要求书 1 页 说明书 8 页

(54) 发明名称

一种催化氧化节电的电解处理废水的方法

(57) 摘要

本发明涉及一种催化氧化节电的电解处理废水的方法,属于电化学电解技术领域,采用了直流电解装置,该装置包括:电解槽、直流电源系统,电解方法,包括如下步骤:1) 将物料引入电解槽,电解槽中电极板间距为 1 ~ 10mm,电解物料的电导率应大于 0. 5S/m,调节 pH 值为 0. 5 ~ 3. 5,添加铁的无机盐,使铁离子含量为 10 ~ 1000mg/L;2) 通电进行电解氧化还原反应,电流密度 5 ~ 50A/m²,本发明的电解处理废水的方法实现了降低电解的副反应效果,高效利用了电解过程中产生的双氧水,进一步提高了电解效率,降低了去除单位质量 COD 所消耗的电能,有效地解决了电解耗电问题,显著降低了采用电化学方法电解处理废水的成本。

1. 一种催化氧化节电的电解处理废水的方法,采用了直流电解装置,该装置包括:电解槽、直流电源系统,电解方法,包括如下步骤:1)将物料引入电解槽,电解槽中电极板间距为1~10mm,电解物料的电导率应大于0.5S/m,调节pH值为0.5~3.5,添加铁的无机盐,使铁离子含量为10~1000mg/L;2)通电进行电解氧化还原反应,电流密度5~50A/m²。

2. 按照权利要求1所述的一种催化氧化节电的电解处理废水的方法,其特征在于直流电源系统是交流变直流的直流电源、可进行光电转换的直接产生直流电的光伏板、蓄电池或燃料电池。

3. 按照权利要求1所述的一种催化氧化节电的电解处理废水的方法,其特征在于电解物料可加入无机盐电解质调节电导率。

4. 按照权利要求3所述的一种催化氧化节电的电解处理废水的方法,其特征在于电解质为硫酸钠。

5. 按照权利要求1所述的一种催化氧化节电的电解处理废水的方法,其特征在于调节pH值应采用无机酸和无机碱。

6. 按照权利要求5所述的一种催化氧化节电的电解处理废水的方法,其特征在于调节pH值采用无机酸为硫酸,无机碱为氢氧化钠。

7. 按照权利要求1所述的一种催化氧化节电的电解处理废水的方法,其特征在于铁离子为二价或三价。

8. 按照权利要求7所述的一种催化氧化节电的电解处理废水的方法,其特征在于铁离子为二价。

9. 按照权利要求1所述的一种催化氧化节电的电解处理废水的方法,其特征在于铁的无机盐为硫酸盐。

一种催化氧化节电的电解处理废水的方法

技术领域

[0001] 本发明涉及电化学电解氧化废水技术领域，具体地说是一种催化氧化节电的电解处理废水的方法。

技术背景

[0002] 电化学电解水处理技术的基本原理是通过外加电场的作用，在特定的电化学反应器中，通过化学反应、电化学过程或物理过程，通常产生羟基自由基 ($\cdot\text{OH}$)、臭氧 (O_3)、过氧化氢 (H_2O_2)、次氯酸根 (ClO^-)、氯气 (Cl_2) 或原子氧等强氧化剂，进而对废水中的污染物进行降解，电化学电解技术是一种高级氧化技术。电化学电解处理方法作为一种“环境友好技术”已经在一些难生化降解污染物处理中得到广泛的研究和应用。作为清洁处理工艺，电化学电解法具有高度的灵活性，既可单独应用，又可与其他处理方法相结合。

[0003] 电化学电解是在电极表面上发生氧化 - 还原反应，该反应的特殊性表现在电极表面上存在双电层和表面电场。电极上主要发生两种类型的反应过程，一类是电荷经过金属 - 溶液界面进行的传递过程，这种电子的传递实现氧化或还原反应。因为这些反应由法拉第定律（即由电流流过所引起的化学反应的量与通过的电量成正比）所支配，故称为法拉第过程。另一类是在一个给定的电极 - 溶液界面，将会显现出这样的电势范围，在此范围内不发生电荷传递，然而，像吸附和脱附这样的过程则可能发生。电极 - 溶液界面的结构可以借改变电势或溶液组成而改变，这些过程称为非法拉第过程。尽管在这些情况下电荷不通过界面，但是当电势、电极面积或溶液组成改变时，仍有外电流流过。当发生电极反应时，法拉第和非法拉第两种过程都存在。

[0004] 电化学电解法是近年来新兴的一种污水处理方法，主要是利用阴阳极上发生的电极氧化还原反应，实现处理废水的目的。人们应用电化学方法去除废水中生物难降解有机物进行了大量研究。阳极氧化可分为直接氧化和间接氧化两类。在直接氧化过程中，有机物首先吸附到电极表面，然后通过阳极氧化反应而使有机污染物和部分无机污染物转化为无害物质；间接氧化是通过阳极反应产生具有强氧化作用的物质或发生阳极反应之外的反应，使被处理污染物氧化，最终转化为无害的物质。对于阳极直接氧化而言，如反应物浓度过低会导致电化学表面反应受传质步骤限制；对于间接氧化，则不存在这种限制。根据被氧化物质氧化程度的不同，直接氧化法又分为 2 类：一是电化学转化，即被氧化物质发生部分氧化。对有机污染物而言，电化学转化可以把有毒物质转变为无毒物质，或把难生物降解的有机物转化为可生物处理的物质；二是电化学燃烧，即被氧化物质完全氧化为无机物，如 CO_2 和 H_2O 。

[0005] 阴极还原是利用阴极还原反应使 O_2 还原为具有氧化活性的 H_2O_2 ，氧化有机污染物。通过阴极的直接还原作用，水可以在阴极表面放电生成吸附态氢原子与吸附在阴极表面的卤代烃分子发生取代反应，使其脱卤等。阴极还原可处理多种污染物，同时也是回收有价值物质的一种方法。

[0006] 直接、间接电化学电解过程并不是绝对的，实际上有机物直接和间接电解反应往

往同时发生。利用电极表面产生的强氧化性自由基,可以无选择的对有机物进行氧化处理;且可以通过电极的电催化活性的控制,使有机物降解氧化到某一特定阶段,使电化学转化控制在完全降解或部分降解,是电化学方法最具有吸引力和挑战性的应用。

[0007] 申请号为 200820157652.6 实用新型涉及一种难降解有机废水电解氧化装置,由电解催化氧化装置和电源组件构成,电解催化氧化装置中包含有进水管、出水管、电解槽和电极板组件,阳极板由 Ti/RuO₂+TiO₂ 网状三元电极,阴阳极板间距 20cm 最佳,工作时,利用阳极的直接氧化作用和溶液中的间接氧化作用对溶液中的污染物氧化,只要保证电解槽内有足够的极水比和电流密度,就能取得较稳定的处理效果。该实用新型采用的阳极价格昂贵,工业化实施成本高,且涂层易脱落失效,因此工业化有困难。

[0008] 申请号为 200910050788.6 的发明涉及一种一体化电解脱氮除磷废水处理方法,实现在同一个电解槽中去除废水中的氮、磷营养盐以及有机污染物。采用石墨和铁板作为电极,通过间歇调换电极极性,交替改变电解除磷和电解脱氮过程,从而去除废水中的氮、磷营养盐以及有机污染物。该发明根据电解除磷和电解脱氮过程中的电解时间、电流密度、pH 值、污染物去除率等参数的变化特点进行优化整合,过程中无需添加药剂即可在短时间内高效去除废水中的氮、磷营养盐以及有机物,具有占地面积小、处理时间短、污染物去除效率高的特点。其特征包含以下步骤:1) 在电解槽中放置 1-2 排电极,共有 4-20 对电极对,每对电极由铁板电极和石墨电极构成;将废水由进水管引入电解槽中,开启电解槽底部的曝气装置;2) 首先,以石墨电极为阳极,铁板电极为阴极,对废水进行电解脱氮处理;溶液 pH 值低于 5 时,调换电流方向使得铁板电极为阳极,石墨电极为阴极,对废水进行电解除磷处理;溶液 pH 值高于 8 时,再次调换电流方向;如此循环进行电解脱氮和电解除磷的处理过程 2-3 次;处理过程中 pH 值始终维持在 5~8 之间;3) 处理结束,关闭曝气装置,静置 10-20 分钟;4) 打开阀门将沉积污泥由排泥管排出,同时通过排水管排水。该发明在电解槽底部采用了曝气,由于气泡会增大废水的电阻,使电解耗电增加,同时其极板间距在 10~50mm 间,极板电流密度在 5~150mA/cm²,也将增加其耗电量。该发明中间歇调换电极极性是在溶液 pH 改变后再调换,一般要 20~120 分钟。

[0009] 申请号为 200610040664.6 公开了一种电解法降解废水中苯胺或 / 和硝基苯的方法,它采用一个中间有阳离子交换膜分隔的电解槽,阳极室中加入含有苯胺或 / 和硝基苯及盐的废水,阴极室中加入稀 NaOH 溶液,分别用循环泵进行循环,阳极材料选用钛基涂敷钌或钛基涂敷二氧化铅,阴极材料为不锈钢或石墨,通直流电电解,苯胺或 / 和硝基苯被氧化降解除去,同时,废水中盐离解的阳离子,在直流电场的作用下穿过阳离子交换膜进入阴极室,与 OH⁻ 结合生成氢氧化物,不仅能回收碱液,还能对原废水起到脱盐的作用,有利于后续的生化处理单元。阳极室和阴极室料液经一定时间循环后,取样,当阳极室料液中苯胺或 / 和硝基苯浓度下降到要求值时,停止操作,放出料液。该发明中采用了氯碱工业用的隔膜分室电解槽,氯碱工业中电解的食盐水是要经过多种工序处理的,而废水中杂质非常多,如盐类和有机物等,都易使隔膜塞,失去作用,如像氯碱工业一样对废水进行处理是不可能的。因此,该方法工业化不太容易实现。

[0010] 申请号为 03151224.0 的中国专利公开了一种含苯酚废水的电解氧化处理工艺,该发明属环境电化学中难降解有机废水的无搅拌、内循环、双协同电解氧化处理工艺,尤其是含苯酚废水的电解氧化处理工艺。采用内循环板框式电解槽,以 Ti 基 PbO₂ 电极为阳极,

不锈钢为阴极,含苯酚的废水为电解液,通过电解,在阳极上放电产生强氧化基团羟基自由基($\cdot\text{OH}$)、阴极得到电子形成 H_2O_2 ,阴阳两极协同作用实现对苯酚污染物的深度氧化分解,进而达到处理含苯酚废水的目的。其中阳极和阴极交替排列,阴极板数量比阳极板数量多1块,相邻极板间距20mm,电解的电源采用稳压直流电源,电流密度为 $30\text{mA}/\text{cm}^2$ 。

[0011] 申请号为02223848.4的中国专利公开了一种脉冲循环电解气浮式污水处理装置,它是采用折流式电解气浮室,在气浮室中设置分段式多电极结构的电极组,其电极组为凸凹形或均布的W形结构,电极组是由过电位低的不锈钢丝网阳极和石墨材料制作的阴极及电极隔片组成,其电极极板距离为 $1.8\text{mm} \sim 2.5\text{mm}$ 。该实用新型具有结构简单,占地少,无运动件。微气泡密度大,泡径小,能耗小,处理效率高。电极损耗小,不易钝化,污泥处理方便,无需脱水浓缩处理,采用可编程控制器的分段式多电极脉冲周期循环供电方式,采用漏磁保护调压变压器,电气系统安全可靠,操作及控制简单,它是一种新型电解气浮式污水处理装置,用于制药、印染、造纸和化工等工业废水处理中。

[0012] 申请号为200620032114.5的中国专利公开了一种倒极运行的电化学反应器,该反应器至少由两个栅状阳极组和两个栅状阴极组组成,其中一个栅状阳极组与一个栅状阴极组相互插合排列在一个平面或者圆弧面组成复合电极组A,另一个栅状阳极组与另一个栅状阴极组也排列成对应的平面或者圆弧面组成复合电极组B,在同一个复合电极组中的栅状阳极组和栅状阴极组交替通电,不同时工作;在相邻的复合电极组中两个栅状阳极组也是交替通正向直流电,不同时工作;该装置在通直流电时可以达到气浮选去除水介质悬浮物、电催化氧化废水COD、软化水介质中的硬度(Ca^{2+} 、 Mg^{2+})、去除水中大部分的离子、电解杀灭水介质中菌藻的作用。

[0013] 80年代以来,人们已对电化学电解技术处理难降解有机物进行了广泛的研究,已被实验证明是最有效的手段,其中电极催化特性、电极结构与电化学反应器结构等操作条件是影响电化学氧化效率的重要因素。直接电氧化通常采用较大的电流密度,如大于 $100\text{A}/\text{m}^2$,使得电解过程非常耗电。

[0014] 陈繁忠等人1999年《中国给水排水》第15卷第3期发表的“电催化氧化法降解水中有机物的研究进展”中报道了1991年S. Stuki等人研制了复极式平板电解槽。电极基体为钛,阳极涂覆 $\text{SnO}_2\text{-Sb}_2\text{O}_5/\text{Ti}$,阴极涂覆铂,极板间距为0.5cm。运用该电解槽处理含酚废水,当电流密度为 $30\text{mA}/\text{cm}^2$ 时,电流效率达到40%,电耗为 $44\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{kgCOD}$ 。

[0015] 吴星五等人2000年9月在《环境科学学报》第20卷增刊发表的“电化学法水处理新技术——降解有机废水”中用电化学方法降解生物难降解有机物。用石墨等5种阳极对苯酚等模拟有机废水进行电降解实验,筛选出 $\text{Ti}/\text{SnO}_2+\text{Sb}_2\text{O}_3$ 钛基金属氧化物修饰电极,对浓度 $1000\text{mg}/\text{L}$ 的有机废水电解2h,COD降至 $40\text{mg}/\text{L}$ 以下,偶氮染料脱色率100%,去除 1kgCOD 耗能约 $52\text{kW}\cdot\text{h}$,费用约44元/kg(COD)。

[0016] 王敏和李小明2002年3月在《环境科学与技术》第25卷第2期发表的“催化电解法处理垃圾渗滤液的研究”中对垃圾渗滤液的SBR处理出水进行了催化电解的正交实验研究。结果表明,其最佳工艺条件:pH为8,电极材料为 $\text{RuO}_2\text{-IrO}_2\text{-TiO}_2/\text{Ti}$,电流密度为 $10\text{A}/\text{dm}^2$,电极间距为0.5cm, $[\text{Cl}^-]$ 为 $10000\text{mg}/\text{L}$, SA^*/L 为 $50\text{cm}^2/\text{L}$ 。在此条件下,电解48min时,COD去除率达82.6%,电流效率为31.6%,耗电量为 $32.4\text{kWh}/\text{t}$ 水。

[0017] 兰州大学2006届硕士俞晟的毕业论文《电解催化技术在高浓度有机废水中的研

究与应用》中研究了 Ti/PbO₂ 电极对模拟有机废水的催化氧化实验,用 3% 的 HF 对商品 Ti 进行预备处理,去除表面的氧化膜,随后用 10% 的 HF 进行化学刻蚀,最后用 0.5mol/L 的 Pb(NO₃)₂ 加入 0.005mol/L Fe³⁺,在 pH=2 ~ 3 之间进行电沉积。并且利用自制的 Ti/PbO₂ 电极在实验室条件下进行实验,实验结果表明:以 NaNO₃ 为支持电解质而且加入量控制在 10g/L ~ 15g/L (质量百分比浓度为 1.0% ~ 1.5%) 时更具有明显优势。溶液本身的性质(如,pH 值和 COD 浓度等)也是电解催化氧化效果的重要的影响因素之一,酸性或碱性条件下废水中 COD 去除效果都明显优于中性条件的,而且发现去除效率与 COD 的浓度呈正比例关系。并且进一步考察了电解时间、电解电压和电极间距等的影响因素,实验中可以看出在一定的实验条件下电解时间和电解电压与 COD 的去除量几乎成直线关系,说明电极催化氧化情况稳定,性能良好。对于可溶性的胺类和酚类有机化合物,用 Ti/PbO₂ 电极催化氧化,主要是在 •OH 和 HO₂• 等强氧化性基团作用下,将其氧化成转变为其他有机物(电化学转换),此时溶液中的 COD 下降的量不多,但是其可生化性却大大增加,从原先的 B/C 比=0.08 ~ 0.13 上升到 B/C 比=0.28 ~ 0.36。处理能耗大概在 146kWh/kgCOD 左右,每千克 COD 的总处理成本在 94.80 元左右。

[0018] 浙江大学 2006 届硕士魏岩岩的毕业论文《电解法、Fenton 试剂法处理有机废气吸收液的比较研究》,对于电解法处理水中的有机污染物,电解时间、电解质浓度、电解质种类、电解电压、电解电流、初始 pH 值、污染物浓度等因素对于电解效果均有影响。实验结果显示,影响电解效果的最重要因素是电解质浓度,电解质浓度在 3.8mmol/L 时电解效果最好。NaNO₃、NaCl、NaCO₃、NaOH 等不同电解质及不同初始 pH 值对电解效果影响不大。在最佳实验条件下,电解 60min,异戊醇、异丙醇、丙酮的去除率分别为 80%、60%、65.1%,扣除电解过程中挥发掉的部分,实际电解处理率为 62.6%、44.2%、32.2%。处理 1L 的有机废气吸收液耗电为 0.247kw·h,核算每吨为 247kw·h。电解法处理有机物,有机物绝大部分被完全氧化成 H₂O 和 CO₂,基本上不出现二次污染物,电解技术可以称为“环境友好技术”。

[0019] 可见,电解技术是环境友好的技术,但耗电量大,成本过高是制约其实际应用的瓶颈,如何降低耗电是本发明要解决的问题。

发明内容

[0020] 本发明的目的在于提供一种催化氧化节电的电解处理废水的方法,降低电解耗电,提高电解效率。采用了直流电解装置,该装置包括:电解槽、直流电源系统,电解方法,包括如下步骤:1)将物料引入电解槽,电解槽中电极板间距为 1 ~ 10mm,电解物料的电导率应大于 0.5S/m,调节 pH 值为 0.5 ~ 3.5,添加铁的无机盐,使铁离子含量为 10 ~ 1000mg/L;2)通电进行电解氧化还原反应,电流密度 5 ~ 50A/m²。

[0021] 直流电源系统是交流变直流的直流电源、可进行光电转换的直接产生直流电的光伏板、蓄电池或燃料电池。

[0022] 电解物料可加入无机盐电解质调节电导率,电解质最好为硫酸钠。

[0023] 调节 pH 值应采用无机酸和无机碱,无机酸最好为硫酸,无机碱最好为氢氧化钠。主要是基于成本考虑。

[0024] 铁离子为二价或三价,最好为二价。

[0025] 铁的无机盐为硫酸盐,其他无机盐也可以,但成本会略高。

[0026] 在技术背景中所应用的电解过程及其他电解处理废水的过程中均可以应用本技术方法,但是电极板应采用在酸性条件下不溶解的电极材料。

[0027] 通过实验我们发现,电解槽电解板距离和电解物料的电导率对电解的耗电影响很大,距离越小越好,但小于 1mm 时由于废水较复杂,容易造成堵塞,1 ~ 5mm 最好。对于污染较大的废水,因电导率超高,如当电解物料的电导率大于 0.9S/m,5 ~ 10mm 也可以,但是超过 10mm 以上耗电增加与极板距离增加成正比。

[0028] 由于加入适量的铁离子,使得在电解过程中产生的双氧水与铁离子发生反应,形成 Fenton 试剂或类 Fenton 试剂,产生氢氧自由基,有效降低废水中的污染物,因而提高了电解效率,进一步降低了电耗。

[0029] 电流密度影响较大,在较大电流密度下副反应较多,但在较低电流密度下反应较慢,因此适中的电流密度很关键。

[0030] 本发明的电解处理废水的方法,通过控制电极板间距、物料的电导率、pH 值和电解的电流密度,实现了降低电解的副反应效果,通过添加铁离子,高效利用了电解过程中产生的双氧水,进一步提高了电解效率,降低了去除单位质量 COD 所消耗的电能,有效地解决了电解耗电问题,显著降低了采用电化学方法电解处理废水的成本。

[0031] 本发明的目的,技术方案及效果将结合实施例进行详细说明。

具体实施方式

[0032] 实施例 1.

[0033] 采用的直流电解装置包括:电解槽、直流电源系统,直流电源系统是交流变直流的直流电源。

[0034] 电解方法:1)将物料染料工业废水引入电解槽,电解槽中电极板间距为 1mm,废水 COD 为 2.5g/L,电解物料的电导率为 0.5S/m, pH 值为 2.5,添加铁的无机盐硫酸亚铁,使铁离子含量为 10mg/L;2)通电进行电解氧化还原反应,电流密度 5A/m²,电解 0.5 小时。

[0035] 实施例 1 对照.

[0036] 与实施例 1 不同的是电解槽中电极板间距为 15mm,未加铁离子,电流密度 100A/m²。

[0037] 去除单位 COD 的耗电量,对照是实施例的 2.8 倍。

[0038] 实施例 2.

[0039] 与实施例 1 不同的是用硫酸调节 pH 值为 0.5,电流密度 9A/m²。

[0040] 去除单位 COD 的耗电量,对照是实施例的 3.8 倍。

[0041] 实施例 3.

[0042] 与实施例 1 不同的是用硫酸调节 pH 值为 1.0,电流密度,7A/m²。

[0043] 去除单位 COD 的耗电量,对照是实施例的 3.7 倍。

[0044] 实施例 4.

[0045] 与实施例 1 不同的是电解槽中电极板间距为 3mm,用硫酸钠调节电解物料的电导率为 0.7S/m。

[0046] 去除单位 COD 的耗电量,对照是实施例的 2.7 倍。

[0047] 实施例 5.

[0048] 与实施例 1 不同的是电解槽中电极板间距为 5mm,用硫酸钠调节电解物料的电导率为 0.9S/m。

[0049] 去除单位 COD 的耗电量,对照是实施例的 2.6 倍。

[0050] 实施例 6.

[0051] 与实施例 1 不同的是电解槽中电极板间距为 8mm,用硫酸钠调节电解物料的电导率为 1.1S/m。

[0052] 去除单位 COD 的耗电量,对照是实施例的 2.8 倍。

[0053] 实施例 6.

[0054] 与实施例 1 不同的是电解槽中电极板间距为 10mm,用硫酸钠调节电解物料的电导率为 1.2S/m。

[0055] 去除单位 COD 的耗电量,对照是实施例的 2.8 倍。

[0056] 实施例 7.

[0057] 采用的直流电解装置包括:电解槽、直流电源系统,直流电源系统是交流变直流的直流电源。

[0058] 电解方法:1)将物料染料工业废水引入电解槽,电解槽中电极板间距为 2mm,废水 COD 为 4.5g/L,电解物料的电导率为 0.7S/m, pH 值为 7.5,用硫酸调节至 3.5,添加铁的无机盐硫酸亚铁,使铁离子含量为 50mg/L;2)通电进行电解氧化还原反应,电流密度 10A/m²,电解 0.5 小时。

[0059] 实施例 7 对照。

[0060] 与实施例 7 不同的是电解槽中电极板间距为 15mm,未加铁离子,电流密度 120A/m²。

[0061] 去除单位 COD 的耗电量,对照是实施例的 2.9 倍。

[0062] 实施例 8.

[0063] 与实施例 7 不同的是用硫酸调节电解物料的 pH 值为 3.0,铁离子含量为 100mg/L;。

[0064] 去除单位 COD 的耗电量,对照是实施例的 3.4 倍。

[0065] 实施例 9.

[0066] 与实施例 7 不同的是用硫酸调节电解物料的 pH 值为 3.0,铁离子含量为 150mg/L;电流密度 12A/m²。

[0067] 去除单位 COD 的耗电量,对照是实施例的 3.6 倍。

[0068] 实施例 10.

[0069] 与实施例 7 不同的是用硫酸调节电解物料的 pH 值为 1.0,铁离子含量为 200mg/L;电流密,15A/m²。

[0070] 去除单位 COD 的耗电量,对照是实施例的 4.2 倍。

[0071] 实施例 11.

[0072] 与实施例 7 不同的是用硫酸调节电解物料的 pH 值为 0.5,铁离子含量为 250mg/L;电流密度 18A/m²。

[0073] 去除单位 COD 的耗电量,对照是实施例的 4.5 倍。

[0074] 实施例 12.

[0075] 采用的直流电解装置包括：电解槽、直流电源系统，直流电源系统是交流变直流的直流电源。

[0076] 电解方法：1) 将物料二硝基甲苯(DNT)工业废水引入电解槽，电解槽中电极板间距为 5mm，废水 COD 为 4g/L，电解物料的电导率为 0.9S/m，pH 值为 8.5，用硫酸调节至 2.5，添加铁的无机盐硫酸亚铁，使铁离子含量为 350mg/L；2) 通电进行电解氧化还原反应，电流密度 20A/m²，电解 0.5 小时。

[0077] 实施例 12 对照。

[0078] 与实施例 12 不同的是电解槽中电极板间距为 25mm，未添加铁离子，电流密度 160A/m²。

[0079] 去除单位 COD 的耗电量，对照是实施例的 3.3 倍。

[0080] 实施例 13。

[0081] 与实施例 12 不同的是用硫酸调节电解物料的 pH 值为 3.5，铁离子含量为 550mg/L，电流密度 23A/m²。

[0082] 去除单位 COD 的耗电量，对照是实施例的 3.6 倍。

[0083] 实施例 14。

[0084] 与实施例 12 不同的是用硫酸调节电解物料的 pH 值为 1.5，铁离子含量为 750mg/L，电流密度 25A/m²。

[0085] 去除单位 COD 的耗电量，对照是实施例的 3.8 倍。

[0086] 实施例 15。

[0087] 与实施例 12 不同的是直流电源系统是可进行光电转换的直接产生直流电的光伏板。

[0088] 去除单位 COD 的耗电量，对照是实施例的 3.3 倍。

[0089] 实施例 16。

[0090] 采用的直流电解装置包括：电解槽、直流电源系统，直流电源系统是交流变直流的直流电源。

[0091] 电解方法：1) 将物料洗染工业废水引入电解槽，电解槽中电极板间距为 10mm，废水 COD 为 10g/L，电解物料的电导率为 1.3S/m，pH 值为 12.5，用硫酸调节至 1.0，添加铁的无机盐硫酸亚铁，使铁离子含量为 800mg/L；2) 通电进行电解氧化还原反应，电流密度 50A/m²，电解 1.0 小时。

[0092] 实施例 16 对照。

[0093] 与实施例 16 不同的是电解槽中电极板间距为 35mm，未加铁离子，电流密度 260A/m²。

[0094] 去除单位 COD 的耗电量，对照是实施例的 4.2 倍。

[0095] 实施例 17。

[0096] 与实施例 16 不同的是用硫酸调节电解物料的 pH 值为 2.0，铁离子含量为 900mg/L；。

[0097] 去除单位 COD 的耗电量，对照是实施例的 4.5 倍。

[0098] 实施例 18。

[0099] 与实施例 16 不同的是用硫酸调节电解物料的 pH 值为 1.5，铁离子含量

为, 1000mg/L ; 。

[0100] 去除单位 COD 的耗电量, 对照是实施例的 4.5 倍。

[0101] 实施例 19.

[0102] 与实施例 16 不同的是用硫酸调节电解物料的 pH 值为 1.0, 电流密度, $40\text{A}/\text{m}^2$, 。

[0103] 去除单位 COD 的耗电量, 对照是实施例的 4.8 倍。

[0104] 实施例 20.

[0105] 与实施例 16 不同的是用硫酸调节电解物料的 pH 值为 0.5, 电流密度, $30\text{A}/\text{m}^2$, 。

[0106] 去除单位 COD 的耗电量, 对照是实施例的 4.8 倍。