



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 112752868 B

(45) 授权公告日 2025. 01. 21

(21) 申请号 201980059825.1

(22) 申请日 2019.08.07

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 112752868 A

(43) 申请公布日 2021.05.04

(30) 优先权数据
2018902887 2018.08.08 AU

(85) PCT国际申请进入国家阶段日
2021.03.12

(86) PCT国际申请的申请数据
PCT/AU2019/050827 2019.08.07

(87) PCT国际申请的公布数据
W02020/028949 EN 2020.02.13

(73) 专利权人 联邦科学与工业研究组织
地址 澳大利亚澳大利亚首都领地

(72) 发明人 M·D·霍恩 B·巴亚特萨尔马迪
T·罗多普洛斯 J·特沙那昔地
D·R·古纳加拉姆 C·奥尔南
D·弗拉泽 D·马利 A·J·厄本

(74) 专利代理机构 上海弼兴律师事务所 31283
专利代理师 王卫彬 金学来

(51) Int.Cl.
C25B 9/19 (2021.01)
C25B 11/02 (2021.01)
C02F 1/46 (2006.01)
H01M 8/18 (2006.01)
H01M 50/403 (2021.01)

(56) 对比文件
US 4388162 A, 1983.06.14
US 2018205067 A1, 2018.07.19

审查员 张海平

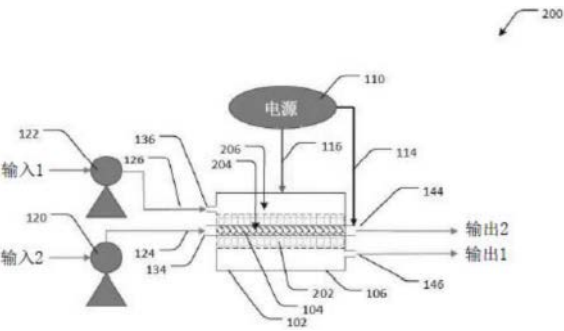
权利要求书2页 说明书22页 附图15页

(54) 发明名称

电化学流动反应器

(57) 摘要

本发明涉及电化学流动反应器, 诸如连续流动电化学管式反应器。本发明还涉及包含电化学流动反应器的工艺、系统和方法。一种电化学流动电池可以包含反应室、第一静态混合器电极、第二对电极和布置在第一电极和第二电极之间的隔膜。



1. 一种连续流动管式反应器,其包含:

反应室;

第一电极;

第二电极;以及

布置在所述第一电极和第二电极之间的分离器,所述分离器至少部分地限定所述反应室内的第一通道和所述反应室内的第二通道,所述第一通道配置成容纳与所述第一电极接触的第一流体流,所述第二通道配置成容纳与所述第二电极接触的第二流体流,

其中所述分离器包含可渗透膜,所述可渗透膜允许所述第一电极和第二电极之间经由所述流体流进行电连通,同时限制所述流体流之间的流体交换,并且

其中,所述第一电极是静态混合器电极,所述静态混合器电极包含导电的整体支架,所述整体支架由互连区段的网格提供,所述整体支架限定多个分流结构,所述多个分流结构在沿着所述第一电极的长度的多个位置处将所述第一流体流分裂成多个子流;

其中所述分离器和第二电极设置成与所述第一电极的中心纵向轴线同心且同轴。

2. 根据权利要求1所述的连续流动管式反应器,其中所述整体支架是金属或金属合金。

3. 根据权利要求1或2所述的连续流动管式反应器,其中,所述整体支架包含导电涂层。

4. 根据权利要求1或2所述的连续流动管式反应器,其中,所述整体支架限定了多个通路部分,所述多个通路部分配置成用于增强传质和混乱平流。

5. 根据权利要求1或2所述的连续流动管式反应器,其中所述第一电极的所述整体支架的直径等于所述第一通道的直径。

6. 根据权利要求1或2所述的连续流动管式反应器,其中所述第一电极设置成与所述分离器接触。

7. 根据权利要求1或2所述的连续流动管式反应器,其中所述分离器和所述第二电极是基本上圆柱形的。

8. 根据权利要求1或2所述的连续流动管式反应器,其中所述第二电极形成所述反应室的壁的至少一部分。

9. 根据权利要求1或2所述的连续流动管式反应器,其中包含所述整体支架的所述第一电极配置成用于在所述第一通道内操作以便为所述第一流体流提供至少0.1ml/min的体积流速。

10. 一种连续流动系统,其包含至少一个第一连续流动管式反应器,所述第一连续流动管式反应器为权利要求1至9中任一项所述的连续流动管式反应器。

11. 根据权利要求10所述的连续流动系统,其进一步包含:第二连续流动管式反应器,所述第二连续流动管式反应器为权利要求1至9中任一项所述的连续流动管式反应器;以及多个流动管线,其将所述第一连续流动管式反应器连接到所述第二连续流动管式反应器,使得所述第一连续流动管式反应器的第一通道与所述第二连续流动管式反应器的第二通道处于流体连通,并且所述第一连续流动管式反应器的所述第二通道与所述第二连续流动管式反应器的所述第一通道处于流体连通。

12. 根据权利要求10或11所述的连续流动系统,进一步包含:

泵,其用于提供所述流体流的流体流动;

电源,其用于控制通过电极的电流或施加到所述电极的电压;

控制器,其用于控制所述系统的一个或多个参数,所述参数包含浓度、流速、温度、压力和停留时间。

13.一种用于流体流的电化学处理的方法,其应用于权利要求1至9中任一项所述的连续流动管式反应器或应用于权利要求10至12中任一项所述的连续流动系统。

14.根据权利要求13所述的方法,其中,所述第一流体流和所述第二流体流包含液体。

15.根据权利要求13或权利要求14所述的方法,其用于处理废水,从流体流中除去溶解的金属离子,或从流体流中回收金属。

16.根据权利要求13或权利要求14所述的方法,其用于从第一流体流中去除溶解的金属物质,其中所述金属物质的去除发生在所述第一电极的所述静态混合器部分的表面上。

17.根据权利要求13或权利要求14所述的方法,其中所述连续流动管式反应器包含所述第一电极,所述第一电极包含所述静态混合器部分,所述连续流动管式反应器被操作以通过将所述第一流体流分裂超过 200m^{-1} 来增强混乱平流,对应于所述第一流体流在沿着所述第一电极的整体支架的给定长度内被分流的次数。

18.根据权利要求13或权利要求14所述的方法,其中所述连续流动管式反应器包含所述第一电极,所述第一电极包含所述静态混合器部分,所述连续流动管式反应器被操作以提供至少10,000的佩克莱(Peclet (Pe))数。

19.根据权利要求13或权利要求14所述的方法,其中所述连续流动管式反应器被操作以提供至少 0.1ml/min 的所述第一流体流的体积流速。

20.根据权利要求13或权利要求14所述的方法,其中所述第一流体流包含浓度小于 0.01mol/L 的溶解金属物质。

21.根据权利要求13或权利要求14所述的方法,其中所述连续流动管式反应器被操作以提供所述第一流体流中最初存在的污染物或金属物质的至少90%的所述污染物或金属物质的回收效率。

22.根据权利要求13或权利要求14所述的方法,其中所述连续流动管式反应器被操作以在所述静态混合器电极和对电极上提供范围从 $1\mu\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$ 至 $1000\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$ 的电流密度。

23.根据权利要求13或权利要求14所述的方法,包含操作第一连续流动管式反应器和第二连续流动管式反应器,其中多个流动管线将所述第一连续流动管式反应器连接至所述第二连续流动管式反应器,使得所述第一连续流动管式反应器的所述第一通道与所述第二连续流动管式反应器的所述第二通道处于流体连通,并且所述第一连续流动管式反应器的所述第二通道与所述第二连续流动管式反应器的所述第一通道处于流体连通。

24.一种用于产物电化学合成的方法,其应用于权利要求1至9中任一项所述的连续流动管式反应器或应用于权利要求10至12中任一项所述的连续流动系统。

电化学流动反应器

技术领域

[0001] 本发明涉及电化学流动反应器,诸如连续流动电化学管式反应器。本发明还涉及包含电化学流动反应器的工艺、系统和方法。

背景技术

[0002] 连续流动反应器通常包含反应室,其中反应物流体被连续进料以进行化学反应以形成来自反应室的连续输出流提供的产物。反应室通常浸没在加热/冷却剂流体中,例如在壳管式热交换器配置中,以促进热量传递到反应/从反应传递热量。

[0003] 连续流动反应器可以使用填充床反应室,其中反应室填充有固体催化剂颗粒,所述固体催化剂颗粒提供在其上可以发生化学反应的催化表面。在与填充床反应室接触之前以及在这些室的下游,静态混合器可用于流体的预混合,以在反应器管的中心区域和外部区域之间传热。静态混合器包含固体结构,其中断流体流动以促进反应物在填充床反应室中反应之前的混合并促进这些室下游的所需传热传质模式。

[0004] 电化学流动反应器已经用于处理流体流,以通过溶解的金属离子的电沉积来除去溶解的金属,从而在电化学流动反应器中容纳的电极表面上形成固体金属产物。用于水处理的水的电化学流动反应器已经涉及具有高表面积电极的低流动系统,用于高效率和控制从具有稀释/低浓度溶解金属离子的含水流体流中除去溶解金属。电化学流动反应器也用于各种产物的电合成,特别是用于形成反应物或中间产物。

[0005] 需要替代的或改进的电化学流动反应器,用于为工业应用提供有效的混合、高传质和/或多用途操作。

[0006] 应当理解,本文提及的任何现有技术出版物并不构成承认任何这些文献在澳大利亚或任何其他国家形成本领域公知常识的一部分。

发明内容

[0007] 本发明人已经对替代的电化学流动反应器进行了研究和开发,并且已经认识到,静态混合器可以配置成作为电化学流动反应器内的电极操作,以实现用于工业应用的有效混合、高传质和/或多用途操作。电化学流动反应器可以包含通过可渗透膜与对电极分离的静态混合器电极。静态混合器电极可以配置成用于增强传质和混乱平流同时提供有效的性能。静态混合器电极可以是包含静态混合器部分的电极。

[0008] 在一个方面,提供了一种电化学流动电池,包含:

[0009] 反应室;

[0010] 第一电极;

[0011] 第二电极;以及

[0012] 布置在第一电极和第二电极之间的分离器,分离器至少部分地限定反应室内的第一通道和反应室内的第二通道,第一通道配置成容纳与第一电极接触的第一流体流,第二通道配置成容纳与第二电极接触的第二流体流,

[0013] 其中分离器包含可渗透膜,可渗透膜允许第一电极和第二电极之间经由流体流进行离子连通,同时限制流体流之间的流体交换,并且

[0014] 其中,第一电极包含静态混合器部分,静态混合器部分限定多个分流结构,多个分流结构在沿着第一电极的长度的多个位置处将第一流体流分裂成多个子流。

[0015] 在一个实施方案中,电化学流动电池是连续流动管式反应器。

[0016] 在一个实施方案中,第一电极的静态混合器部分的直径可大致等于第一通道的直径。第一电极可布置成与分离器接触。分离器和第二电极可设置成与第一电极的中心纵向轴线同心且同轴。分离器和第二电极可以是基本上圆柱形的。第二电极可形成反应室的壁的至少一部分。

[0017] 在一个实施方案中,包含静态混合器部分的第一电极可配置成用于通过限定多个分流结构来增强传质和混乱平流,多个分流结构在沿着第一电极的长度的多个位置处将流体流分裂成多个子流。

[0018] 在一个实施方案中,静态混合器部分的相邻分裂结构可设置成围绕静态混合器部分的中心纵向轴线成不同的旋转角度。静态混合器部分可包含沿着静态混合器部分的长度连续地设置的多个基本上类似的结构模块。包括静态混合器部分的第一电极可配置成通过将第一流体流分裂超过 200m^{-1} 来增强混乱平流,对应于第一流体流在沿着第一电极的静态混合器部分的给定长度内被分流的次数。

[0019] 在另一个实施方案中,包含静态混合器部分的第一电极配置成用于在至少约10,000的Peclet (Pe) 数下操作。包含静态混合器部分的第一电极可配置成用于在第一电极两端的约100至100,000之间的压降 (以Pa/m计) 下操作。包含静态混合器部分的第一电极可配置成用于在第一通道内操作以便为第一流体流提供至少约 0.1ml/min 的体积流速。

[0020] 在另一方面,提供了一种电化学流动系统,该电化学流动系统包含至少一个根据如在此描述的电化学流动电池的任何方面、实施方案或实施例的第一电化学流动电池。

[0021] 在一个实施方案中,电化学流动系统包含根据本文所述的电化学流动电池的任何方面、实施方案或实施例的第一和第二电化学流动电池。可以提供多个流动管线,以将第一电化学流动电池连接到第二电化学流动电池,使得第一电化学流动电池的第一通道与第二电化学流动电池的第二通道处于流体连通,并且第一电化学流动电池的第二通道与第二电化学流动电池的第一通道处于流体连通。

[0022] 在一个实施方案中,电化学流动系统还包含:

[0023] 用于提供流体流的流体流动的泵;

[0024] 电源,其用于控制通过电极的电流或施加到电极的电压;

[0025] 控制器,其用于控制系统的一个或多个参数,一个或多个参数包含浓度、流速、温度、压力和停留时间。

[0026] 在另一方面,提供了一种用于流体流电化学处理的方法,所述方法包含根据本文所述的电化学流动电池、反应器或其系统的任何方面、实施方案或实施例的电化学流动电池。该方法可以用于处理废水,从流体流中除去溶解的金属离子,或从流体流中回收金属。

[0027] 在该方法的一个实施方式中,电化学流动电池包含第一电极,第一电极包含静态混合器部分,电化学流动电池可操作以提供以下中的至少一种:

[0028] 将第一流体流分裂超过 200m^{-1} 来增强混乱平流,对应于第一流体流在沿着第一电

极的静态混合器部分的给定长度内被分流的次数;

[0029] 至少约10,000的Peclet (Pe) 数;

[0030] 第一电极两端的约100至100,000的压降 (以Pa/m计);

[0031] 至少约0.1ml/min的第一流体流的体积流速;

[0032] 约 $1\mu\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$ 至约 $1000\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$ 的第一和第二电极上的电流密度。

[0033] 该方法可以包含根据如在此描述的电化学流动电池的任何方面、实施方案或实施例的第一和第二电化学流动电池的操作,其中多个流动管线将第一电化学流动电池连接至第二电化学流动电池,使得第一电化学流动电池的第一通道与第二电化学流动电池的第二通道处于流体连通,并且第一电化学流动电池的第二通道与第二电化学流动电池的第一通道处于流体连通。

[0034] 在另一方面,提供了一种用于产物电化学合成的方法,包括根据本文所述的电化学流动电池、反应器或其系统的任何方面、实施方案或实施例的电化学流动电池。

[0035] 在另一方面,提供了一种用于从流体流中去除物质的方法,其包含根据本文所述的任何方面、实施方案或实施例的电化学流动电池、反应器或其系统。物质可以是溶解在流体流中的金属物质。

[0036] 应当理解,本文描述了电化学流电池、反应器或系统的其他方面、实施方案和实例。

附图说明

[0037] 以下仅通过示例的方式,参考附图进一步描述和说明本发明的优选实施方案,在附图中:

[0038] 图1示出了根据一些实施方案的电化学流动电池的示意图;

[0039] 图2示出了根据一些实施方案的具有分离器的电化学流动电池的示意图;

[0040] 图3A示出了根据一些实施方案的静态混合器电极的透视图;

[0041] 图3B示出了(隔离地)图3A的静态混合器电极的静态混合器部分的透视图;

[0042] 图3C示出了(隔离地)图3A的静态混合器电极的静态混合器部分的截面图;

[0043] 图3D示出了(隔离地)图3A的静态混合器电极的静态混合器部分的侧视图;

[0044] 图4A示出了根据一些实施方案的电化学流动电池的透视图;

[0045] 图4B示出了图4A的流动电池在分解配置中的透视图;

[0046] 图4C示出了图4A的流动电池的截面图;

[0047] 图5示出了图4A的流动电池的端盖的透视图;

[0048] 图6示出了根据一些实施方案的包含两个电化学流动电池的电化学流动系统的示意图;

[0049] 图7示出了在(a) -1.4V、(b) -1.6V、(c) -1.8V和(d) -2V ($0.001\text{M K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$) 的恒定电势下,在100秒内的计时电流响应,其中在静态模式下间隔50秒并且在10至 400mL min^{-1} 的恒定流速下间隔50秒;

[0050] 图8示出了在(a) -1.4V、(b) -1.6V、(c) -1.8V和(d) -2V ($0.01\text{MK}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$) 的恒定电势下,在100秒内的计时电流响应,其中在静态模式下间隔50秒并且在10至 400mL min^{-1} 的恒定流速下间隔50秒;

[0051] 图9示出了在(a) -1.4V、(b) -1.6V、(c) -1.8V和(d) -2V (0.1MK₃[Fe(CN)₆])的恒定电势下,在100秒内的计时电流响应,其中在静态模式下间隔50秒并且在10至400mL min⁻¹的恒定流速下间隔50秒;

[0052] 图10示出了在三种不同浓度的Cu²⁺下从0.01M硫酸溶液中去除铜离子的电化学流动电池效率;

[0053] 图11显示(a)静态混合器工作电极处理前和处理后的光学图像,(b)EDS分析和(c-e)电解5小时后静态混合器电极的SEM图像;以及

[0054] 图12示出了根据电化学流动电池的分离配置实施方案在24小时操作中铜浓度与时间的关系。

具体实施方式

[0055] 本发明描述了以下各种非限制性实施方案,其涉及进行研究以鉴定能够为工业应用提供有效混合、高传质和/或多用途操作的电化学流动反应器。令人惊奇地发现,包含静态混合器部分的电极可以配置在电化学流动电池内以实现用于工业应用的有效混合、高传质和/或多用途操作。还发现可以提供有效的电化学反应器,其中包含静态混合器部分的电极被配置用于增强传质和混乱平流。通过在包含静态混合器部分的电极和对电极之间配置分离器以在离子连通和单独的流体通道中提供每个电极,鉴定了关于系统操作和性能的进一步令人惊讶的优点。

[0056] 术语

[0057] 在整个说明书中,除非另有特别说明或上下文另有要求,提及单个步骤、物质组合物、一组步骤或一组物质组合物应理解为包含一个和多个(即一个或多个)那些步骤、物质组合物、一组步骤或一组物质组合物。此外,如本文所用,单数形式的“一(a)”、“一(an)”和“该”包括复数指示物、除非上下文另外清楚地指示。例如,提及“一(a)”包括单个以及两个或更多个;提及“一(an)”包括单个以及两个或更多个;提及“该”包括单个以及两个或更多个等。

[0058] 术语“和/或”,例如“X和/或Y”意为“X和Y”或“X或Y”,并且被理解为对这两种含义或无论哪种含义。

[0059] 如本文所用,除非另有说明,否则术语“约”通常是指指定值的+/-10%,例如+/-5%。

[0060] 在整个说明书中,单词“包含(comprise)”或诸如“包含(comprises)”或“包含(comprising)”的变体将被理解为暗示包括陈述的元素、整数或步骤,或元素、整数或步骤的组,但不排除任何其他元素、整数或步骤,或元素、整数或步骤的组。

[0061] 本领域技术人员将理解,本文的发明除了具体描述的之外,还可以进行变化和修改。应当理解,本发明包括所有这样的变化和修改。本发明还单独或共同包括本说明书中提及或指出的所有步骤、特征、组合物和化合物,以及所述步骤或特征中的任何和所有组合或任何两个或更多个。

[0062] 除非另外具体说明,否则本文描述的本发明的每个示例将作必要的变通而应用于每个其他示例。本发明的范围不受这里描述的特定实施例的限制,这里描述的特定实施例仅用于示例的目的。如本文所述,功能上等同的产品、组合物和方法显然在本发明的范围

内。

[0063] 除非另有定义,本文所用的所有技术和科学术语具有与本发明所属领域的普通技术人员通常理解的相同的含义。尽管在本发明的实践或测试中可以使用与本文所述的那些类似或等同的方法和材料,但是下面描述了合适的方法和材料。在冲突的情况下,以本说明书包括的定义为准。此外,材料、方法和实施例仅仅是说明性的而不是限制性的。

[0064] 电化学流动反应器

[0065] 可以提供电化学流动电池,其包含:反应室;包含静态混合器部分的第一电极;第二电极;以及分离器,其布置在第一电极和第二电极之间。

[0066] 该分离器可以至少部分地在反应室内限定第一通道以容纳与第一电极接触的第一流体流,并且在反应室内限定第二通道以容纳与第二电极接触的第二流体流。应当理解,分离器允许第一和第二电极之间经由流体流的离子连通。分离器可以是可渗透膜,其限制流体流之间的流体交换。静态混合器部分可以限定多个分流结构,该多个分流结构在沿着该第一电极的长度的多个位置处将流体流分割成多个子流。应当理解,作为电极的一部分的静态混合器部分是导电的。电化学流动电池的其他实施方案和细节描述如下。

[0067] 参考图1,电化学流动电池100(没有示出分离器)包含含有第一电极104和第二电极106的反应室102。第二电极106可以形成反应室102的壁的至少一部分,如图1所示。第一电极104可包含静态混合器。第二电极106可包含静态混合器。第一和第二电极104、106可以同心地布置,其中一个围绕另一个,或者并排配置。

[0068] 电源110可以经由相应的第一和第二电导体或电缆114、116连接到第一和第二电极104、106,以在电极104、106上施加电势差或电压。在一些实施方案中,第一电极104可用作阳极,并且第二电极106可用作阴极。在一些实施方案中,第一电极104可用作阴极,并且第二电极106可用作阳极。在一些实施方案中,可以向第一电极104施加负电势,并且可以向第二电极106施加正电势。在一些实施方案中,可以向第一电极104施加正电势,并且可以向第二电极106施加负电势。

[0069] 第一和第二电极104、106可以由导电材料形成,或者可以包含导电表面涂层。下面根据各种实施例和示例描述电极104、106的进一步特性。

[0070] 泵120可以布置为使流体经由第一流体流动管线124通过反应室102中的第一入口134流入反应室102,以使流体流动通过或围绕第一电极104。泵120还可以被布置为使流体经由第二流体流动管线126通过反应室102中的第二入口136流入反应室102,以使流体在第一电极104和第二电极106之间流动。然后流体可以经由邻近第一电极104的第一出口144和更靠近第二电极106的第二出口146流出反应室102。

[0071] 在一些实施方案中,第一和第二流动管线124、126可以独立于第一泵120和第二泵122被供应流体,如图2所示。在一些实施方案中,第一和第二流动管线124、126可以向反应室102提供不同的流体。例如,流动管线124、126可包含管道或管。

[0072] 参照图2,根据一些实施方案提供电化学流动电池200(其中示出分离器)。流动电池200类似于关于图1描述的流动电池100,并且相同的附图标记用于相同的部件。除了流动电池100中所示和上述的部件之外,流动电池200包含分离器202。如图2所示的实施例中的分离器在第一电极104和第二电极106之间至少部分地将第一电极104中、周围或附近的第一流体与邻近第二电极106的第二流体分开。分离器202可以与反应室102的壁协作以限定

第一通道204和第二通道206。第一电极104可以布置在第一通道204中并且第二电极106可以布置在第二通道206的壁中或形成第二通道的壁。入口134、136和出口144、146可以配置成使得第一流体流动通过第一通道204并且第二流体流动通过第二通道206。在一些实施方案中,第一通道204和第二通道206的横向截面积之间的比率可以在例如0.01至100、0.1至10、0.5至5、0.3至1、0.5至0.9、0.5至1.5或0.8至1.2的范围内。

[0073] 分离器202可允许电荷在电极104、106之间流动,但限制大部分流体通过分离器202。在一些实施方案中,分离器202可以允许第一和第二电极104、106之间的离子连通。例如,可以允许离子从第一通道204流到通道流体206,或从第二通道206流到第一通道204,同时可以防止或基本上限制流体的其他组分通过分离器202。在一些实施方案中,少量流体可以穿过分离器202,尽管分离器202可以配置成基本上阻止流体流动通过分离器202。在一些实施方案中,分离器202可以包含可渗透膜、半透膜或选择性可渗透膜。下面根据各种实施方案更详细地描述分离器202的特性。

[0074] 在一些实施方案中,分离器202和反应室102的壁可以布置成以并排关系限定通道204、206。分离器202可以是在通道204、206之间延伸的基本上平坦的。在一些实施方案中,通道204、206可以基本上平行地延伸。在一些实施方案中,第二通道206可以部分地包围第一通道204。在一些实施方案中,第一和第二通道204、206可以同心地布置。在一些实施方案中,第一通道204可以完全由分离器202的内表面限定。在一些实施方案中,分离器202和室102可以是基本上圆柱形的。在一些实施方案中,室102可以基本上与分离器202同轴。在一些实施方案中,第二电极106可以与第一电极104基本上同轴。在一些实施方案中,室102和分离器202的壁可以都是基本上圆柱形的并且与第一电极104的中心纵向轴线同轴。

[0075] 在一些实施方案中,分离器202可限定表面变化或起伏以增加分离器202的表面积。在一些实施方案中,分离器202可以是波纹状的。在一些实施方案中,分离器202可以是具有纵向波纹的大致圆柱形。在一些实施方案中,分离器202可以是具有周向波纹的大致圆柱形。

[0076] 第一电极104(和/或第二电极106)可包含静态混合器部分(例如,静态混合器元件或SME),该静态混合器部分限定了一个结构,该结构具有配置成促进在该流体的主体与电极表面之间以及在流体自身内流过静态混合器的流体的混合的几何形状。该第一电极可以是静态混合器电极。该静态混合器电极104可配置成在沿着电极104的长度的多个不同分割位置处分裂该流动,以便经由混乱平流来促进彻底混合。

[0077] 该静态混合器可以限定多个分流结构,这些分流结构被安排在每个分流位置处以对流动进行分流。这些分流结构可以被安排在不同位置处的不同方位角处以不同角度分流。在一些实施方案中,分流结构可以被配置为在每个分流位置处将流动分成两个子流。在一些实施方案中,分流结构可以配置成在每个分流位置处将流动分裂成至少三个子流,诸如三个、四个、五个、六个、七个或八个子流。

[0078] 该静态混合器的几何形状可配置成用于基于特定流体的特性来增强混乱平流。该静态混合器的结构可包含元件的网络,包括以下中的一个或多种:相交的叶片或轮叶、支柱、微凸体、起伏和突起、螺旋、波纹板、开放构型、闭合构型、孔、通道、孔、管、以及多层设计。

[0079] 该几何形状可以沿着混合器的长度有规律地重复,或者它可以在尺寸、类型和/或

形状上变化。该几何形状的特征长度也可以从混合器的刻度到纳米变化,并且可以在其间的所有长度刻度处提供特征。

[0080] 参照图3A至3D,示出了根据一些实施例的静态混合器电极104。电极104包含在第一端部334和第二端部344之间延伸的静态混合器部分304。端部334、344可限定管或管道以引导流体通过静态混合器。

[0081] 第一端部334可限定流动电池的第一入口134并且第二端部344可限定流动电池的第一出口144,诸如以上关于图1和图2描述的流动电池100、200。端部334、344还可提供电接触区域以将电极104连接到电源110。

[0082] 根据一些实施例,在图3B至3D中示出了没有端部334、344的静态混合器部分304以更清楚地示出几何形状。静态混合器部分304包含布置在重复模块中的多个直线分流结构,其中每个后续模块相对于先前模块围绕从一端延伸到另一端的静态混合器部分的中心纵向轴线旋转90°。静态混合器部分334通过在沿着静态混合器部分334的长度的多个分流位置处分裂和重新组合流动,来促进流过静态混合器部分334的流体在沿着中心纵向轴线的大致方向上的混乱平流。这些分流结构在每个分流位置将该流动分裂成多个子流,且这些子流随后在被下一个分流位置处的下一个分流结构分裂之前被重新组合。

[0083] 每次流动被分裂和重新组合,它都使来自流动的大部分的不同流体包与电极104的表面接触,并且沿着静态混合器的长度将流动多次分裂增加了与电极104接触的流体量。

[0084] 在一些实施方案中,静态混合器电极104的直径可接近分离器202的内径。即,第一电极104可以紧密地配合在分离器202内。第一电极104的静态混合器几何形状的外部封套可以基本上完全占据由分离器202限定的内部体积。在一些实施方案中,第一电极104的体积可以在通道204的内部体积的1%至99%、任选地10%至90%、20%至80%、30%至70%或40%至60%的范围内。在一些实施方案中,第一电极104的体积可以是通道204的内部体积的至少约10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%、90%、95%、98%或99%。下面根据各种实施方案描述静态混合器的进一步特征。

[0085] 参照图4A至图4C,根据一些实施方案,电化学流动电池400示出为组装配置(图4A)、拆卸配置(图4B)和截面(图4C)。相同的部件用相同的附图标记表示,并且可以包括流动电池100、200的任何特征以及关于图1和2描述的部件或者关于图3A到3D描述的静态混合器电极104。

[0086] 该流动电池可包含第一电极104、第二电极106和布置在第一电极104和第二电极106之间的分离器202。例如,第一电极104可包含如关于图3A至3D所描述的静态混合器电极104。

[0087] 分离器202可包含可渗透的、半渗透的或选择性可渗透的膜,该膜基本上是圆柱形的并且紧密地包围第一电极104的静态混合器部分304。分离器202和第一电极104可协作以限定第一通道204,流体可沿着第一通道流动,接触第一电极104,并且由静态混合器部分304混合(参见图4C)。

[0088] 第二电极106也可以是基本上圆柱形的并且限定了围绕分离器202和第一电极104的反应室102的外壁。分离器202和第二电极106可协作以限定第二通道206,流体可以沿着第二通道206流动并接触第二电极106(参见图4C)。

[0089] 分离器202和第二电极104可设置成与第一电极104的中心纵向轴线基本上同心

和/或同轴。

[0090] 根据一些实施例,分离器202和电极104、106通过两个相对的端盖500保持在适当位置,这在图5中更详细地示出。每个端盖500包含限定分离器座502、第一电极座504和第二电极座506的主体501。

[0091] 第二电极座506由主体501中的环形凹部限定,该环形凹部配置成接纳第二电极106的一端的至少一部分。流动电池400可包含布置在第二电极106和每个端盖500之间的第二电极垫圈426,以在第二电极106和第二电极座506之间形成密封(参见图4B)。

[0092] 分离器座502由环形凹部(或在一些实施方案中为圆形凹部)限定,该环形凹部配置成分别接收分离器202的第一端部232或第二端部242(参见图4B)。主体501限定位于分离器座502和第二电极座506之间的开口516和来自开口516的通路,以分别限定第二出口136或第二入口146。

[0093] 第一电极座504由圆柱形钻孔或通路限定,该圆柱形钻孔或通路配置成用于接纳第一电极104的各个端部334、344。第一电极座504可以由主体501的一侧上的倒角514围绕,以帮助将第一电极104定位在第一电极座504中。通路可以从倒角514延伸到主体501的另一侧上的第一电极座开口524(参见图4B)。第一电极104的第一和第二端部334、344可以延伸通过通路和开口524并且分别限定第一入口134或第一出口144。

[0094] 可以在端部334、344和端盖500之间利用密封板或压盖410和第一电极垫圈424形成密封(参见图4B)。压盖410可限定电极开口414以允许端部334、344的至少一部分通过,并且限定多个紧固件孔口(未示出)以接收多个紧固件412。端盖500的主体501可限定配置成接收紧固件412的相应的多个紧固件凹部512。紧固件412可接合(例如,通过螺纹)紧固件凹部512以抵靠端盖500拉动压盖410,从而压缩端盖500与压盖410之间的第一电极垫圈424并且抵靠端部334、344,由此在第一电极104与端盖500之间形成密封。

[0095] 端盖500可通过多个系杆440保持在一起,系杆在端盖500之间延伸并穿过限定在每个端盖500的主体501中的相应多个系杆开口542。系杆440可配置成在每个系杆440的每个端部处接收系杆紧固件442,以将端盖500拉向彼此并且将分离器202以及第一和第二电极104、106保持在端盖之间以限定反应室102和流动电池400。

[0096] 与传统的电化学流动电池相比,电化学流动电池100、200和400可提高电化学反应的效率,这是由于第一电极104(和/或第二电极106)的静态混合器几何形状诸如举例而言通过混乱的平流促进了流体的增强混合,以增加与第一电极104和/或第二电极106接触的流体的体积。

[0097] 电化学流动电池200和400可以提供进一步的优点,因为流体流可以在分离器202的任一侧上的通道204、206中保持基本上分离。这允许独立的输入流体保持基本上分离,同时仍允许电化学反应发生。例如,在一些工艺中,诸如金属离子的特定物质可以经由电沉积被沉积在电极104、106之一的表面上。

[0098] 参照图6,示出了根据一些实施例的电化学流动系统600。系统600包含串联设置并分别由两个电源110a和110b供电的第一流动电池200a和第二流动电池200b。虽然,在一些实施方案中,单个电源110可向两个流动电池200a、200b供电。电化学流动电池200a、200b可基本上类似于流动电池200或400并且包括以上关于图2至5描述的部件的任何特征。

[0099] 系统600可包含:第一泵120,其将第一流体从第一源(输入1)经由第一流动电池

200a的第一流动管线124a供应到第一流动电池200a的第一入口134a中;以及第二泵122,其经由第一流动电池200a的第二流动管线126a将第二流体从第二源(输入2)供应到第一流动电池200a的第二入口136a中。第二流动电池200b的第一和第二电极104b、106b可提供有与施加到第一流动电池200a的第一和第二电极104a、106a的电压极性相反的电压。

[0100] 系统600可配置成使得流入第一流动电池200a的第一入口134a的第一流体流动通过第一通道204a并且通过第一流动电池200a的第一出口144a流出;然后经由第二流动管线126b进入第二流动电池200b的第二入口136b;通过第二流动电池200b的第二通道206b并且通过第二出口146b流出进入第一贮存器(输出1)。系统600可进一步配置成使得流入第一流动电池200a的第二入口136a的第二流体流动通过第二通道206a并且通过第一流动电池200a的第二出口146a流出;然后经由第一流动管线124b进入第二流动电池200b的第一入口134b;通过第二流动电池200b的第一通道204b并且通过第一出口144b流出进入第二贮存器(输出2)。

[0101] 例如,第一流体源可包括污染物金属,诸如铜,并且可能期望从第一流体源去除污染物并将污染物传输到第二流体。当流动通过系统600时,污染物将从第一流体沉积到第一流动电池200a的第一电极104a上,并且如果在穿过第一流动电池200a之后有任何污染物留在第一流体中,则随着第一流体流动通过第二流动电池200b的第二通道206b时,污染物也将沉积在第二流动电池200b的第二电极106b上。第二流体将穿过第一流动电池200a的第二通道206a和第二流动电池200b的第一通道204b,以允许电接触并完成每个流动电池200a、200b的电流回路。

[0102] 在传统的系统中,当污染物已经经由电沉积在电极上累积时,从系统中去除电极,并且从电极的表面机械地去除所沉积的污染物。然而,当使用系统600时,不必去除电极。

[0103] 一旦污染物已经沉积在第一流动电池200a的第一电极104a和第二流动电池200b的第二电极106b上,就可以通过交换流动管线124a、126a或使用在线阀或门(未示出)切换流体源,使得第一流体流动通过第一流动电池20a的第二通道206a和第二流动电池200b的第一通道204b,并且第二流体流动通过第一流动电池200a的第一通道204a和第二流动电池200b的第二通道206b。这样,污染物将从第一流动电池200a的第一电极104a和第二流动电池200b的第二电极106b的表面去除,并且更多的污染物将从第一流体去除并沉积在第一流动电池200a的第二电极106a和第二流动电池200b的第一电极104b上。

[0104] 与常规系统相比,电化学流动系统600允许电化学反应以相对短的中断无限地进行以切换流体路径,常规系统需要在沉积于电极上的材料已达到某一阈值时对电极进行物理移除和替换。

[0105] 电化学管式反应器

[0106] 电化学流动反应器,例如上述电化学流动电池,可以以连续流动电化学管式反应器的形式提供。该连续流动电化学管式反应器可根据如本文对于电化学流动电池描述的任何实施例或示例来提供。

[0107] 应了解,可提供各种形状、伸长和配置的管式反应器。例如,管式反应器可包括圆形或非圆形形状的反应器室,或者其中反应器室包含一个或多个圆形或非圆形圆周形状的流体通道。非圆形形状的示例可包括矩形、等腰三角形、椭圆形、梯形和六边形。在一个实施方案中,管式反应器或反应器室是基本上圆形或圆柱形的。

[0108] 连续流动电化学管式反应器可包含反应器壳体,反应器壳体限定了用于容纳与至少一个对电极间隔开的至少一个静态混合器电极的反应器室。静态混合器电极可由包含如在此描述的静态混合器部分或静态混合器元件的电极提供。应当理解,静态混合器部分或静态混合器元件、或其上任何涂层的至少一部分可以是导电的。反应器还包含用作分离器的可渗透膜,分离器用于将静态混合器电极与对电极流体分离,同时在电极之间提供电连接。该反应器可以提供用于容纳静态混合器电极的流体通道,该流体通道与容纳对电极的流体通道分开。这对电极可以提供用于驱动管式反应器中的电化学反应的阴极和阳极对。取决于电化学电池中的电流,静态混合器电极和对电极可以是阴极或阳极。例如,可以通过切换电流来反转电极对。静态混合器电极还可以被配置用于增强传质和混乱平流。

[0109] 应当理解,管式反应器配置成允许至少第一流体流在出口处离开之前流过静态混合器电极以经历混乱平流和电化学反应。还将理解的是,管式反应器中的每个流体通道都可以具有至少一个入口和至少一个出口。

[0110] 反应器可包含彼此流体连通的一个或多个室部分。静态混合器电极可配置为用于插入连续流电化学反应器中的可替换电极或配置为永久电极。一个或多个反应器,或反应器的一个或多个室部分,可以配置用于串联或并联操作。

[0111] 反应室102,分离器202和电极104、106的长度可以在2mm至100m、10mm至10m、50mm至1m、100mm至500mm、或200mm至300mm的范围内。反应器壳体或室的直径可以在5mm与5m之间,其中对电极和工作电极的尺寸被确定成维持一种有效的电化学安排。在一些实施方案中,反应器的长径比(L/d)可以为至少约5、10、15、20、25、30、40、50、60、75或100。

[0112] 分离器

[0113] 分离器202可包含允许离子传输但阻止流体流动的任何多孔材料。分离器可包含可渗透膜、半透膜或选择性可渗透膜。在一些实施方案中,分离器202可以由以下材料中的任何一种或多种形成:非织造纤维(棉、尼龙、聚酯、玻璃),聚合物膜(聚乙烯、聚丙烯、聚四氟乙烯、聚氯乙烯),陶瓷和天然存在的物质(橡胶、石棉、木材)。在一些实施方案中,分离器202可包括具有小于 $20 \text{ \AA}$ 的孔的聚合物材料。可以使用干法和/或湿法制造工艺形成分离器202。非织造分离器202可包含定向或随机定向纤维的制造片、网或垫。

[0114] 在一些实施方案中,分离器202可包含负载的液体膜,包括含在微孔结构内的固相和液相。

[0115] 在一些实施方案中,分离器202可包含与碱金属盐形成络合物的聚合物电解质,其产生用作固体电解质的离子导体。固体离子导体既可以作为分离器又可以作为电解质。

[0116] 分离器202可以由单层或多层材料形成。

[0117] 在一些实施方案中,分离器202可通过将粉末材料烧结成膜结构而制成,粉末材料诸如陶瓷、玻璃、塑料、金属陶瓷及其组合。

[0118] 在一些实施方案中,分离器202可配置成允许离子通过,同时阻止流体流动。在一些实施方案中,分离器202可允许少量流体通过。

[0119] 分离器202可具有配置成紧密地配合在第一电极104周围的内径。例如,分离器202的内径可以在0.5mm至5m、5mm至1m或5mm至10mm的范围内。

[0120] 分离器202的厚度可以取决于其孔隙率而变化。对于纳米多孔分离器,厚度可以在1微米和100微米之间,并且对于微孔膜,厚度可以在100微米和10mm之间。分离器材料内的

平均孔径可在10 Å和100微米之间变化。

[0121] 应当理解,可渗透膜通常为静态混合器电极和对电极中的每一个建立单独的流体通道,同时保持电化学流动电池所需的电连接。可渗透膜通常在允许离子传输的同时抑制流体流过膜。例如,如果在操作期间静态混合器电极作为负电极(即,阴极)操作并且对电极作为正电极(即,阳极)操作,则用于流过静态混合器电极(即,阴极)的阴极电解液流可以被制备用于不同于用于流过正的对电极(即,阳极)的阳极电解液流的特定应用。换句话说,可渗透膜允许两个电极之间的离子连通以提供电连接,同时分离流过每个阴极和阳极的两个单独的流体流,这提供了性能优点和工艺灵活性。

[0122] 可渗透膜可以沿着管式反应器同心地定位以将静态混合器电极与对电极分离。反应器可包含容纳一个电极的内部同轴流动通路和容纳另一个电极的外部同心流动通路。静态混合器电极可容纳在内部同轴流动通路、外部同心流动通路中,或容纳在内部同轴流动通路和外部同心流动通路两者中。流动通路在此还可以被称为流体通道。

[0123] 分离器可以是半透膜。半透膜可以是多孔管状膜、多孔陶瓷过滤管或紧密包围静态混合器电极的多孔塑料管。应当理解的是,半透膜基本上限制了流体通过膜,同时使得离子能够输送穿过膜以保持分离的静态混合器电极和对电极之间的电连通。

[0124] 分离器可以是选择性渗透膜。选择性渗透膜可以在允许输送通过膜的情况下提供选择性,例如特定的流体或离子。应当理解,选择性渗透膜选择性地限制什么可以通过膜,同时使特定离子能够输送穿过膜,以保持分离的静态混合器电极和对电极之间的电连通。

[0125] 应当理解,每个单独的流动通路设置有至少一个入口和至少一个出口。可以为内部同轴流动通路和外部同心流动通路提供分开的流体流。例如,可以为容纳静态混合器电极的内部同轴流动通路提供阴极电解液流体流,并且可以为容纳对电极的外部同心流动通路提供阳极电解液流体流。如前所述,静态混合器电极也可以基本上沿管式反应器的轴线同轴对齐。

[0126] 静态混合器电极

[0127] 如上所述,第一电极104或第二电极106或者第一和第二电极104、106可包含限定几何形状的静态混合器部分,以促进流过或围绕静态混合器部分的流体的混合。这可以称为静态混合器电极或SME。

[0128] 反应器可包含多于一个静态混合器电极和/或多于一个对电极。对电极也可以由静态混合器电极提供,例如电化学流动反应器中的阴极和阳极可以各自由单独的静态混合器电极提供。静态混合器电极可以同心地容纳在该内部同轴流动通路内并且对电极可以容纳在外部同心流动通路内。

[0129] 应当理解,静态混合器电极可包含导电表面。静态混合器电极可以作为阳极或阴极来操作,这取决于所施加的电流的方向。对于电化学流动电池,通常应理解的是,阳极是发生氧化并且由反应物释放电子的正电极,并且阴极是发生还原并且由另一种反应物消耗电子的负电极。

[0130] 静态混合器电极可以由能够在任一电极上提供 $1\mu\text{A m}^{-2}$ 至约 1000A m^{-2} 范围内的电流密度的材料制备。静态混合器电极或其支架可包含导电材料,例如导电碳材料,诸如石墨、玻璃碳或硼掺杂金刚石,金属,合金或金属间化合物,诸如粉末、片材、棒或坯料,半金属或掺杂或低带隙半导体,金属涂覆颗粒,导电陶瓷。可替代地,支架可由非导电材料制成并

且随后涂覆有电导体。非导电材料可以是颗粒非导体,诸如塑料、陶瓷、玻璃或矿物、热固性树脂、热塑性树脂,和天然产品,诸如橡胶和木材。导电涂层可由金属、金属合金、金属间化合物、导电化合物或由如上所述的任何导电材料形成。

[0131] 静态混合器电极可以通过以下来生产:减材制造,使用诸如以下加工技术中的一种或组合:铣削、切割、钻孔、车削、旋压、弯曲和扭转,通过铸造、模制或锻造,通过挤出,通过压制,通过微机电系统机加工(MEMS),增材制造工艺,激光或电子束焊接,选择性激光烧结,选择性激光熔融,直接金属激光烧结,激光工程网状成形,材料挤出,片材层压,聚合和光聚合,材料或粘合剂喷射和印刷。

[0132] 在一些实施方案中,静态混合器电极的主体或支架可以是导电的,例如金属或金属合金,诸如镍、钛或不锈钢。在一些实施方案中,导电涂层可以施涂到电极表面,例如涂覆有铂的钛支架。涂层可由金属、半金属或掺杂或低带隙半导体,导电陶瓷或化合物,碳的导电形式(例如石墨、石墨烯或掺杂碳材料),导电聚合物(例如聚苯胺),或其组合形成。涂层可以通过以下方法中的一种或多种施涂到表面:电化学方法、金属喷涂、冷喷涂、化学或物理气相沉积、浸涂、喷涂、旋涂、烧结或其他热处理、或导致施加合适材料的薄层的任何此类方法。

[0133] 静态混合器电极可以配置成用于增强混合,该混合包括用于在横向于该主流动的方向上,例如在相对于静态混合器电极的中心纵向轴线的径向和切向或方位角方向上,重新分布流体的传热和传质特性。特别地,静态混合器电极可以配置成增强混乱平流,从而减少对由扩散施加的反应速率的限制。静态混合器电极可配置成确保尽可能多的表面积呈现给流动以促进电化学反应并且改善流动混合,使得反应物分子更频繁地接触静态混合器电极的表面。静态混合器电极可设置有用于与特定应用相关联的各种几何构型或长径比。静态混合器电极可配置成增强流体流的湍流、混合和传质特性。这些构型还可以被设计成提高效率,化学或电化学反应的程度,或其他特性,诸如压降(同时保持预定流速),停留时间分布,或传热与传质系数。

[0134] 该静态混合器电极可以包含导电的整体支架,该支架限定了多个通路区段,这些通路区段配置成用于例如通过将在这些通路区段中的每一个之间流动的流体流分裂来增强传质和混乱平流。支架表面的主要部分可以是导电的。

[0135] 静态混合器电极可配置成沿着长度同轴地延伸并且横穿流动通路的直径。在一个示例中,静态混合器电极的包络可配置成沿内部同轴流动通路的长度同轴地延伸并且横向穿过内部同轴流动通路的直径以基本上占据内部同轴流动通路。

[0136] 第一电极104可以具有被配置为紧密地配合在分离器202内的外径。例如,第一电极104的外径可以在0.5mm至5m、5mm至1m、或5mm至10mm的范围内。在例如关于图4A至图4C描述的流动电池400的实施例中,其中第一电极和第二电极彼此同心地并且同轴地布置,第二电极106的内径可在0.5mm至5m、5mm至1m、或10mm至20mm的范围内。

[0137] 例如,分离器202的内径与第二电极106的内径之间的比率可以在0.02至0.99、0.1至0.9、0.3至0.7或0.4至0.6的范围内。

[0138] 静态混合器电极的导电整体支架可以包含固体导电元件的邻接网络,该固体导电元件分布遍及内部同轴流动通路并且配置成用于诱导流经内部同轴流动通路的流体的混乱平流。固体导电元件的邻接网络可以由配置成限定多个孔的互连区段的网格提供,这些

孔用于引起流过内部同轴流动通路的流体的混乱平流。

[0139] 静态混合器电极可以以选自以下一般非限制性示例配置中的一个或多个的配置提供：

- [0140] • 具有螺旋的开放配置；
- [0141] • 具有叶片的开放配置；
- [0142] • 波纹板；
- [0143] • 多层设计；
- [0144] • 具有通道或孔的闭合构型；
- [0145] • 支柱、粗糙、起伏和突起的互锁网络。

[0146] 在一个实施例中，静态混合器电极的支架可以以具有限定多个通路的多个整体单元的网格构型提供，多个通路配置成用于促进一种或多种流体反应物的混合。

[0147] 在另一个实施例中，静态混合器电极可包含支架，该支架由配置为限定多个孔的互连区段的网格提供，多个孔口用于促进流过反应器室的流体的混合。支架还可配置成用于促进传热和传质递以及流体混合。

[0148] 在一些实施方案中，静态混合器电极可配置成增强混乱平流，以及例如湍流混合，诸如横截面的、横向的（相对于流动）或局部的湍流混合。该静态混合器电极或其支架的几何形状可配置成改变局部流动方向或在沿着该静态混合器元件的纵向轴线的给定长度内将流动分裂超过一定次数，诸如大于 100m^{-1} 、任选地大于 200m^{-1} 、任选地大于 400m^{-1} 、任选地大于 800m^{-1} 、任选地大于 1500m^{-1} 、任选地大于 2000m^{-1} 、任选地大于 2500m^{-1} 、任选地大于 3000m^{-1} 、任选地大于 5000m^{-1} 。静态混合器电极，其支架的几何形状或构型可以在静态混合器的给定体积内包含超过一定数目的分流结构，诸如超过 100m^{-3} 、任选地超过 1000m^{-3} 、任选地超过 $1 \times 10^4\text{m}^{-3}$ 、任选地超过 $1 \times 10^6\text{m}^{-3}$ 、任选地超过 $1 \times 10^9\text{m}^{-3}$ 、任选地大于 $1 \times 10^{10}\text{m}^{-3}$ 。

[0149] 静态混合器电极或其支架的几何形状或构型可配置成伴随反应器电池（诸如管式反应器）的通道。如前所述，应当理解，术语“管状”包括非圆形构型，例如椭圆形。静态混合器电极或其支架可由多个区段形成或包含多个区段。这些区段中的一些或全部可以是直的区段。这些区段中的一些或全部可包含多边形棱柱，诸如举例而言矩形棱柱。支架可包含多个平坦表面。直的区段可相对于彼此成角度。直的区段可相对于支架的纵向轴线以多个不同的角度布置，诸如举例而言两个、三个、四个、五个或六个不同的角度。静态混合器电极或其支架可包含重复结构。静态混合器电极或其支架可包含沿着支架的纵向轴线周期性地重复的多个类似结构。几何形状或构型可沿着静态混合器电极或其支架的长度是一致的。几何形状可沿着静态混合器电极或其支架的长度变化。直的区段可通过一个或多个弯曲的区段连接。静态混合器电极或其支架可包含一个或多个螺旋区段。静态混合器电极或其支架通常可以限定螺旋面。该静态混合器电极或其支架可包含螺旋面，包括在螺旋面的表面中的多个孔。

[0150] 静态混合器电极的尺寸可取决于应用而变化。静态混合器电极或包含静态混合器电极的反应器可以是管状的。静态混合器电极或反应器管可例如具有在1至5000、2至2500、3至1000、4至500、5至150、或10至100范围内的直径（以mm计）。静态混合器电极或反应器管可例如具有至少约1、5、10、25、50、75、100、250、500或1000的直径（以mm计）。静态混合器电极或反应器管可例如具有小于约5000、2500、1000、750、500、250、200、150、100、75或50的直

径(以mm计)。静态混合器电极或包含静态混合器电极的反应器室的长径比(L/d)可以在适于特定反应的工业规模流速的范围内提供。长径比可以例如在约1至1000、5至750、10至500、25至250、50至150或75至125的范围内。长径比可以例如小于约1000、750、500、250、200、150、125、100、75、50、25、20、15、10、9、8、7、6、5、4、3或2。长径比可以例如大于约1、2、3、4、5、6、7、8、9、10、15、20、25、30、35、40、45、50、55、60、65、70、75、80、85、90、95或100。长径比可以在以上“小于”和“大于”值中的任何两个的范围内提供。

[0151] 静态混合器电极可配置成用于增强用于层流速率或湍流速率的特性,例如混合以及传热和传质。应当理解,对于在中空管中流动的牛顿流体,层流和湍流与雷诺数(Re)值的关联通常将提供,层流速率,其中 $Re \leq 2300$;瞬时,其中 $2300 \leq Re \leq 4000$;并且通常为湍流,其中 $Re \geq 4000$ 。应当理解,静态混合器电极减少了用于产生湍流的这些典型Re值。静态混合器电极可配置成用于层流或湍流流速以提供选自混合、反应程度、传热和传质、混乱平流和压降中的一个或多个的增强特性。应当理解,进一步增强特定类型的电化学反应将需要其自身的具体考虑。对于管内流动,雷诺数可以定义为 $Re = \rho u D_H / \mu$ (ρ 是流体的密度,以 $kg \cdot m^{-3}$ 计, u 是流体的平均速度,以 $m \cdot s^{-1}$ 计, D_H 是管的水力直径,以米计,且 μ 是流体的动态粘度,以 $Pa \cdot s$ 计)。

[0152] 在一个实施例中,静态混合器电极可以被配置用于在以下的Re下操作:至少0.01、0.1、1、5、50、100、150、200、250、300、350、400、550、600、650、700、750、800、850、900、950、1000、1100、1200、1300、1400、1500、1600、1700、1800、1900、2000、2500、3000、3500、4000、4500、5000、5500、6000、6500、7000、7500、8000、8500、9000、9500、10000、11000、12000、13000、14000、或15000。静态混合器电极可配置成用于在约0.1至2000、1至1000、10至800、或20至500的Re范围内操作。静态混合器电极可配置成用于在约1000至15000、1500至10000、2000至8000、或2500至6000的Re范围内操作。该静态混合器电极可以配置成用于在上述“至少”值中的任何两个之间的范围内的Re下操作。

[0153] 在一些实施方案中,静态混合器电极可以用佩克莱(Péclet)数(Pe)描述,Péclet数是与连续介质中的传输现象相关的另一类无量纲数字。Péclet数提供了由流动引起的物理量的平流速率与由适当梯度驱动的相同量的扩散速率的比率。在物质或传质方面,Péclet数是雷诺数(Re)和施密特数(Sc)的乘积。在热流体的情况下,热Péclet数等于雷诺数(Re)和普朗特数(Pr)的乘积。Péclet数定义为: $Pe = \text{对流输送速率} / \text{扩散输送速率}$ 。对于传质,其定义为: $Pe_L = Lu/D = Re_L \cdot Sc$ 。对于传热,其定义为 $PeL = Lu/\alpha = Re_L \cdot Pr$,其中 $\alpha = k/\rho c_p$ 。L是特征长度,u是局部流速,D是质量扩散系数,且 α 是热扩散率, ρ 是密度,且 c_p 是热容。静态混合器电极可配置成提供更高的Péclet值来增强扩散上的混乱平流以提供更均匀的停留时间分布并且减少分散。换句话说,至少根据本文所述的一些实施例和示例,提供更高的Péclet值的静态混合器电极的配置可以提供改善的性能和过程控制。

[0154] 在一个实施例中,静态混合器电极可配置成用于在至少100、1000、2000、5000、10000、15000、20000、25000、50000、75000、100000、250000、500000、 10^6 、或 10^7 的Péclet(Pe)值下操作。静态混合器电极可配置成用于在小于约 10^8 、 10^7 、 10^6 、500000、250000、100000、75000、50000、25000、20000、15000、10000、5000、2000、或1000的Péclet(Pe)值下操作。静态混合器元件可配置成用于在约 10^3 至 10^8 、 10^3 至 10^7 、或 10^4 至 10^6 的Pe范围内操作。静态混合器元件可配置成用于在上述上限值和/或下限值中的任何两个之间的Pe范围内操作。

[0155] 静态混合器电极相对于容纳电极的流动通路的体积位移%可以在约1至90、5至70、10至30或5至20的范围内。静态混合器电极相对于容纳电极的流动通路的体积位移%可以小于90%、80%、70%、60%、50%、40%、30%、20%、10%或5%。静态混合器电极相对于容纳电极的流动通路的体积位移%可以大于1%、5%、10%、15%、20%、25%、30%、35%、40%、50%、60%、70%或80%。体积位移%可以在以上“小于”和“大于”值中的任何两个的范围内提供。

[0156] 可以提供静态混合器电极的配置以增强反应器中的传热和传质性质,例如在出口横截面处降低的温度差。静态混合器电极的传热和传质可以例如提供具有以下的温度差的截面或横向温度分布:小于约20°C/mm、15°C/mm、10°C/mm、9°C/mm、8°C/mm、7°C/mm、6°C/mm、5°C/mm、4°C/mm、3°C/mm、2°C/mm或1°C/mm。

[0157] 该静态混合器电极或其支架可以配置成使得在使用中,静态混合器电极两端的压降(即压力差或背压)(以Pa/m计)在约0.1至1,000,000Pa/m(或1MPa/m)的范围内,包括其间的任何值或范围。例如,静态混合器电极两端的压降(以Pa/m计)可小于约500,000、250,000、100,000、50,000、10,000、5,000、1,000、750、500、250、100、75、50、25、20、15、10、或5Pa/m。例如,静态混合器电极两端的压降(以Pa/m计)可以为至少约10、100、1000、5,000、10,000、50,000、100,000、或250,000。可以在上述上限值和/或下限值中的任何两个的范围内提供静态混合器电极两端的压降(以Pa/m计)。例如,在一个实施方案中,静态混合器电极两端的压降(以Pa/m计)可以为约10至250,000、100至100,000、或1,000至50,000之间。静态混合器电极可配置成提供相对于特定流速的更低的压降。在这点上,如本文所述的静态混合器电极、反应器、系统和方法可具有适于工业应用的参数。当体积流速为至少0.1、0.5、1、1.5、2、2.5、3、3.5、4、4.5、5、6、7、8、9、10、20、30、40、50ml/min时,可以维持上述压降。

[0158] 在一个实施例中,静态混合器电极可配置成以至少0.1、0.5、1、1.5、2、2.5、3、3.5、4、4.5、5、6、7、8、9、10、20、30、40、50、75、100、125、150、200、250、300、350、400、450、500、600、700、800、900、或1000ml/min的体积流速操作。在另一个实施例中,体积流速可小于约1000、900、800、700、600、500、450、400、350、300、250、200、150、100、75、50、40、30、20、10、或5ml/min。流速可以是由这些上限值和/或下限值中的任何两个提供的范围,例如在约50与400、10与200、或20与200之间的范围。

[0159] 静态混合器电极可配置成用于连续流电化学反应器或其室的模块化插件。静态混合器电极可配置成与在线连续流电化学反应器或其室一起使用。在线连续流电化学反应器可以是循环回路反应器或单程反应器。

[0160] 可以使用计算流体动力学(CFD)软件来确定静态混合器电极的配置,计算流体动力学(CFD)软件可以用于增强反应物混合的配置,以增强反应物在静态混合器电极的表面处的接触和活化。

[0161] 静态混合器电极可以是增材制造的静态混合器电极。任选地具有催化和/或耐腐蚀涂层的静态混合器电极的增材制造可提供配置用于有效混合、传热和传质、电化学反应或另外的催化反应的静态混合器电极。增材制造工艺允许对静态混合器电极进行可靠性和性能的物理测试,并且任选地使用增材制造(例如,3D打印)技术进一步重新设计和重新配置。增材制造提供了初步设计和测试的灵活性,以及静态混合器电极的进一步重新设计和重新配置。可以使用电子束3D打印机或激光束3D打印机。用于3D打印的增材材料可以是例

如:纯金属,诸如铁、钴、镍、铜、锌;或合金,诸如基于钛合金的粉末(例如45-105微米直径范围);钴铬合金基粉末(例如FSX-414或Stellite S21);或不锈钢或铝硅合金或任何镍基合金(例如Inconel, Hastelloy)。与激光束打印机相关的粉末直径通常低于与电子束打印机相关的粉末直径。或者,支架可以由诸如塑料或玻璃的惰性材料增材地制造,然后用合适的导电材料涂覆。除了导电表面之外,静态混合器电极或其支架可任选地进一步包含催化材料,这取决于所需的具体反应或应用。

[0162] 对电极

[0163] 应当理解,对电极是导电的。对电极可以作为阳极或阴极来操作,这取决于所施加的电流的方向。对电极可以由根据以上对于静态混合器电极描述的任何实施例或示例的材料组成或配置。

[0164] 应当理解,对电极可包含导电表面。对电极可以由能够在任一电极上提供 $1\mu\text{A m}^{-2}$ 至约 1000A m^{-2} 范围内的电流密度的材料制备。对电极可包含导电材料,例如导电碳材料,诸如石墨、玻璃碳或硼掺杂金刚石,金属,合金或金属间化合物,诸如粉末、片材、棒或坯料,半金属或掺杂或低带隙半导体,金属涂覆颗粒,导电陶瓷。对电极可由非导电材料制成并且涂覆有电导体。非导电材料可以是颗粒非导体,诸如塑料、陶瓷、玻璃或矿物、热固性树脂、热塑性树脂,和天然产品,诸如橡胶和木材。导电涂层可以由金属、金属合金、金属间化合物、导电化合物形成,或者由上述用于对电极或静态混合器电极的任何导电材料形成。

[0165] 反应器和端盖配置

[0166] 反应器可以作为组件提供,组件包含反应器壳体、第一电极、第二电极、分离器和一个或两个任选的端盖。端盖可配置成密封反应器壳体,并且进一步可任选地配置成用于与第一电极、第二电极、分离器中的一个或多个相关联,用于在该反应器的组装和操作中的结构和对齐支撑。

[0167] 在一个实施例中,管式反应器可包含第一和第二端盖,第一和第二端盖各自协同配置用于固定反应器壳体的相对端并支撑静态混合器电极、对电极和分离器在反应器中的布置。

[0168] 端盖可以是静态混合器电极和/或对电极的整体部分(例如,端盖可以制成电极之一的一部分)。端盖可设置为电化学流动电池或连续流电化学管式反应器的整体部分(例如,整个电化学流动电池通过增材制造工艺制成)。

[0169] 端盖可以根据如在此描述的其任何其他实施方案或实施例来提供。

[0170] 电化学流动系统

[0171] 根据本文所述的任何一个或多个方面、实施例或示例,用于提供连续流动电化学反应的系统可包含电化学流动电池或电化学管式反应器。

[0172] 该系统可以进一步包含用于为一种或多种流体反应物及其任何产物提供穿过该反应器的流体流动的泵。该系统可以进一步包含电气单元,该电气单元用于提供和控制施加到电极上的电压或流过电极的电流,用于驱动在流体流与电极的界面处的电化学反应。系统可进一步包含控制器,控制器用于控制系统的一个或多个参数,一个或多个参数选自一种或多种流体反应物或其源或产物的浓度、流速、温度、压力和停留时间。

[0173] 反应器系统可包含一个流动电池组件,或并联或串联设置的多个组件。每个装置中的电极的极性可以在每个电池中以相同的方式或以交替的方式连接,其中外电极交替地

为阳极,阴极,阳极,阴极…(或反之亦然),并且内电极可选地为阴极,阳极,阴极,阳极…(或反之亦然)。系统可以以这些极性的任何组合来建立。施加到系统中的每个电池的电压或电流的量值可相同或可变化,且通过系统中的电池的泵浦速度可相同或可变化。

[0174] 反应器系统可被构造和控制以接受例如来自可再生能源的随时间变化的功率输入。例如,反应物流速可根据可用于电解的功率而变化,因此当电源波动时,流动反应器保持操作。

[0175] 反应器的长径比可以例如类似于先前针对静态混合器电极描述的那些,使得静态混合器电极模块可配置成用于插入到反应器中。

[0176] 反应器可以包含用于控制反应器、室部分、静态混合器、或其流体部件的温度的任选的热交换器。热交换器可以是壳管式热交换器设计或配置。

[0177] 本发明还提供一种用于连续流动电化学反应工艺的系统,该系统包含:

[0178] 连续流动电化学反应器,其包含一个或多个根据本文所述的任何实施例或示例的静态混合器电极;

[0179] 泵,其用于为一种或多种流体反应物及其任何产物提供通过反应器的流体流;

[0180] 控制装置,其用于控制系统的一个或多个参数,一个或多个参数选自反应物浓度、流速、电流、施加的电压、压力和停留时间。

[0181] 系统可以包含用于控制反应器或其流体部件的温度的任选的热交换器。

[0182] 系统可进一步包含光谱仪,该光谱仪可以用于识别和确定任何一种或多种流体反应物或其产物的浓度。

[0183] 反应器、反应器室、室部分和静态混合器电极中的一个或多个可以各自以模块形式提供以用于它们的互补关联。系统可包含多个反应器,这些反应器可以具有类似或不同的内部和/或外部构型。反应器可以串联或并联、或两者的组合操作。应当理解,系统、反应器或每个室部分可以包括一个或多个入口和出口以提供反应物的供应,获得产物、或再循环各种反应物和/或产物。

[0184] 还将理解的是,反应器或系统可以设计用于将提供给室部分并在室部分中产生的各种反应物、反应物源、中间产物或所需产物再循环。该反应器或系统可以以各种设计和形式提供,例如以管式反应器的形式。在另一个实施例中,反应器是单程反应器。

[0185] 该系统和工艺还可以集成到更复杂的系统中,诸如包括煤气化炉、水净化和网状物、电解槽和/或天然气重整器、化学合成和净化等的系统和方法。

[0186] 电化学应用

[0187] 根据本文所述的任何实施例或示例,电化学流动反应器、电化学流动电池或连续流电化学管式反应器可用于各种应用,包括金属回收,从废水和矿井废水回收重金属和贵金属,废水处理,水消毒或净化(例如饮用水),以及从固体废物(例如污泥、尾矿和处理的废物),以及各种产品的电合成。(例如气体产生、能量储存和转化、试剂再生和聚合)。

[0188] 包含静态混合器电极的反应器可以用于连续流动电化学反应系统和工艺中。该工艺可以是在线连续流动工艺。在线连续流动工艺可以是再循环回路或单程工艺。在一个实施方案中,在线连续流动工艺是单程工艺。

[0189] 如上所述,包含静态混合器电极的电化学反应器能够以连续方式进行反应。电化学反应器可使用单相或多相进料和产物流。在一个实施方案中,底物进料(包含一种或多种

反应物) 可以作为连续流体流提供, 例如液体流, 其含有: a) 在合适的溶剂内作为溶质的底物, 或 b) 具有或不具有共溶剂的液体底物。应当理解, 流体流可以由一个或多个气流提供, 例如氢气或其来源。使用压力驱动流, 例如借助泵, 将底物进料泵入反应器中。在另一个实施方案中, 底物进料可以由悬浮在流体流中的固体提供, 并且在又一个实施方案中, 反应物流体流可包含固体、液体和气体。

[0190] 在一个实施方案中, 提供了一种用于电化学处理流体流的方法, 该方法包含根据如在此描述的其任何实施方案或实施例的电化学流动电池或连续流电化学管式反应器。

[0191] 上述方法可用于通过施加穿过静态混合器电极和对电极的直流电以在静态混合器电极的表面形成包含金属和/或金属化合物的固体沉积物来从流体流中去除溶解的金属离子。该方法可用于从由尾矿获得的流体流中回收金属。该方法可包含如以上对于反应器系统所述的并联和/或串联操作。在一个实施例中, 该方法是串联操作的。

[0192] 在一个实施例中, 该方法包含至少第一和第二连续流电化学管式反应器, 每个反应器配置成使得可渗透膜将静态混合器电极与对电极分离以限定容纳一个电极的内部同轴流动通路和容纳另一个电极的外部同心流动通路, 每个流动通路具有至少一个入口和至少一个出口。该方法可以使得能够将金属装载到第一管式反应器的静态混合器电极上, 同时为第二反应器串联提供反向的电极的极性, 以除去先前装载到第二管式反应器的静态混合器电极上的金属。

[0193] 在该上述方法的另一实施例中, 可以将第一流体流引入第一管式反应器的内部同轴流动通路中, 并将其输出引入第二管式反应器的外部同心流动通路中。可以将第二流体流同时引入到第一管式反应器的外部同心流动通路中, 并将其输出引入到第二管式反应器的内部同轴流动通路中。第一管式反应器可操作以使第一静态混合器电极处于还原状态以累积固体金属物质, 并且第二管式反应器可操作以使第二静态混合器电极处于氧化状态以去除存在于其上的任何金属物质。

[0194] 根据本文所述的各种实施方案或实施例的电化学流动反应器及其系统的另一个优点是电化学流动电池或管式反应器不需要拆卸和更换阴极, 并且通过切换电流和切换不同流体流以除去在还原反应中在作为阴极的静态混合器电极上形成的金属、金属化合物或其他含金属的产物, 来提供以串联或反向模式操作的灵活性。

[0195] 本发明还提供了通过一种或多种流体反应物的反应来合成产物的工艺, 所述工艺包含以下步骤:

[0196] 提供连续流电化学反应器, 连续流电化学反应器包含根据本文所述的任何实施方案或实施例的静态混合器电极或系统;

[0197] 经由反应物入口向反应器提供至少第一流体反应物;

[0198] 操作反应器或其控制装置, 以提供通过静态混合器电极的至少第一流体反应物的流动和反应; 并且

[0199] 获得包含至少第一反应物的反应产物的输出流。

[0200] 应当理解, 可以取决于工艺的变量范围来选择工艺中使用的各种参数和条件, 诸如电流、压力和材料和反应物的浓度/量, 工艺的变量范围包括待合成的产物、电化学反应或所涉及的机理、反应物源或所使用的反应器类型以及材料和其配置。例如, 当一种或多种流体反应物或助溶剂(例如惰性载体)等是气体、液体、固体或其组合时, 将存在差异。

[0201] 电化学流动反应器可以以 $1\mu\text{Am}^{-2}$ 至约 1000Am^{-2} 范围内的任一电极上的电流密度操作。电流密度(以 Am^{-2} 计)可例如小于约1000、500、200、100、50、20、10、5.0、2.0、1.0、0.5、0.2、0.1、0.05、0.02、0.01、0.005、0.002、0.001、0.0005、0.0002、0.0001、0.00005、0.00002、0.00001、0.000005、0.000002、或0.000001。电流密度(以 A m^{-2} 计)可例如大于约0.000002、0.000005、0.00001、0.00002、0.00005、0.0001、0.0002、0.0005、0.001、0.002、0.005、0.01、0.02、0.05、0.1、0.2、0.5、1.0、2.0、5.0、10、20、50、100、200、或500。电流密度可以在选自任何上述值的两个值的任何范围内提供。应当理解,各种应用和配置可以应用不同的电流密度。

[0202] 在一些实施方案中,施加在电极两端的电压可小于约2.0、1.8、1.6、1.4、1.2、1.0、0.8、0.6、0.4、或0.2。在一些实施方案中,施加在电极两端的电压可为至少约0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、1.2、1.4、1.6、或1.8。电压可以在由这些上限值和/或下限值中的任何两个提供的范围内。

[0203] 在一个实施例中,电化学流动反应器的操作性能可以通过其回收效率来测量。回收效率涉及流体中存在的物质(例如污染物)的量,诸如溶解的金属物质,其可以通过电化学流动电池从流体中除去。在一个实施例中,以从流体回收(或除去)的污染物的%测量的回收效率为至少5、10、15、20、25、30、35、40、45、50、55、60、65、70、75、80、85、90、95、96、97、98或99。在一些实施方案中,可以在小于约48小时、36小时、24小时、12小时、6小时、3小时、2小时或1小时的持续时间内由连续操作(例如在循环环管反应器中再循环)提供任何回收效率。在另一个实施例中,可以从流体中去除物质(例如污染物),诸如溶解的金属物质(例如铜物质),其中该物质以小于约(以 mol/L 计)1、0.5、0.1、0.05、0.01、0.005、0.001、0.0005、0.0001、0.00005、或0.00001的浓度存在于流体中。在另一个实施例中,可以从流体中去除物质(例如污染物),诸如溶解的金属物质,其中该物质以大于约(以 mol/L 计)0.0001、0.0005、0.001、0.005、0.01、0.05、0.1、或0.5的浓度存在于流体中。所除去的物质的浓度可以在这些上限和/或下限中的任何两个之间。上述回收效率和/或循环持续时间可适用于任何这些物质(例如污染物)浓度。例如,反应器、系统或其方法的操作性能可提供从初始浓度小于约 0.01mol/L 的流体中回收至少约50%的溶解金属物质的回收效率。在另一个实施例中,回收效率可以是来自具有小于约 0.005mol/L 的初始浓度的流体的溶解金属物质的至少约60%。在另一个实施例中,回收效率可以是来自具有小于约 0.001mol/L 的初始浓度的流体的溶解金属物质的至少约70%。在另一个实施例中,回收效率可以是来自具有小于约 0.0005mol/L 的初始浓度的流体的溶解金属物质的至少约80%。在另一个实施例中,回收效率可以是来自具有小于约 0.0001mol/L 的初始浓度的流体的溶解金属物质的至少约90%。

[0204] 在另一个实施例中,可以从流体中去除物质(例如污染物),诸如溶解的金属物质(例如铜物质),其中该物质以约或小于约(以 ppm 计)1000、750、500、250、100、75、50、25、10、5或1的初始浓度存在于流体中。在另一个实例中,可以从流体中去除物质(例如污染物),诸如溶解的金属物质(例如铜物质),其中该物质以约或大于约(以 ppm 计)5、10、25、50、75、100、250、500、750或1000的初始浓度存在于流体中。所去除的物质可以在流体中处于这些上限和/或下限范围中的任何两个之间的初始浓度。在一个实施例中,以从流体回收(或除去)的污染物的%测量的回收效率为至少5、10、15、20、25、30、35、40、45、50、55、60、65、70、75、80、85、90、95、96、97、98或99。在一些实施方案中,可以在小于约48小时、36小时、24小

时、12小时、6小时、3小时、2小时或1小时的持续时间内由连续操作(例如在循环环管反应器中再循环)提供任何回收效率。上述回收效率和/或循环持续时间可适用于任何这些物质(例如污染物)浓度。例如,反应器、系统或其方法的操作性能可提供在小于约3小时的连续操作期间从具有约100ppm溶解金属物质的初始浓度的流体中回收至少约50%的溶解金属物质的回收效率。在另一个实例中,在小于约24小时的连续操作期间,回收效率可以为来自初始浓度为约100ppm的流体的溶解金属物质的至少约95%。

[0205] 与工艺相关的温度(°C)可在-50与400之间的范围内,或在其间的任何整数或任何整数范围内。例如,温度(°C)可以为至少约-50、-25、0、25、50、75、100、150、200、250、300或350。例如,温度(°C)可以小于约350、300、250、200、150、100或50。温度还可以在约这些值中的任一个或在这些值中的任一个之间的范围内提供,例如在约0至250°C、约25至200°C或约50至150°C的范围内。

[0206] 在一个实施方案中,工艺可操作以提供以下的Re:至少0.01、0.1、1、5、50、100、150、200、250、300、350、400、550、600、650、700、750、800、850、900、950、1000、1100、1200、1300、1400、1500、1600、1700、1800、1900、2000、2500、3000、3500、4000、4500、5000、5500、6000、6500、7000、7500、8000、8500、9000、9500、10000、11000、12000、13000、14000、或15000。工艺可以在约0.1至2000、1至1000、10至800或20至500的Re范围下操作。工艺可以在约1000至15000、1500至10000、2000至8000或2500至6000的Re范围下操作。工艺可以在由以上“至少”值中的任何两个提供的Re范围下操作。

[0207] 在一个实施方案中,工艺可以在以下Péclet (Pe) 值下操作:至少100、1000、2000、5000、10000、15000、20000、25000、50000、75000、100000、250000、500000、 10^6 、或 10^7 。工艺可以在小于以下的Péclet (Pe) 值下操作:约 10^8 、 10^7 、 10^6 、500000、250000、100000、75000、50000、25000、20000、15000、10000、5000、2000、或1000。工艺可以在约 10^3 至 10^8 、 10^3 至 10^7 、或 10^4 至 10^6 的Pe范围内操作。工艺可以在上述上限值和/或下限值中的任何两个之间的Pe范围下操作。

[0208] 工艺可以提供在静态混合器电极两端的在约0.1至1,000,000Pa/m(或1MPa/m)的范围内的压降(或背压)(以Pa/m计),包括其间的任何值或任何值的范围。例如,静态混合器电极两端的压降(以Pa/m计)可小于约500,000、250,000、100,000、50,000、10,000、5,000、1,000、750、500、250、100、75、50、25、20、15、10、或5Pa/m。例如,静态混合器电极两端的压降(以Pa/m计)可以为至少约10、100、1000、5,000、10,000、50,000、100,000、或250,000。可以在上述上限值和/或下限值中的任何两个的范围内提供静态混合器电极两端的压降(以Pa/m计)。例如,在一个实施方案中,静态混合器电极两端的压降(以Pa/m计)可以为约10至250,000、100至100,000、或1,000至50,000之间。在这点上,如本文所述的静态混合器电极、反应器、系统和方法可具有适于工业应用的参数。可以提供上述压降或其范围,其中体积流速为至少0.1、0.5、1、1.5、2、2.5、3、3.5、4、4.5、5、6、7、8、9、10、20、30、40、50、100、500、1000ml/min。

[0209] 在一个实施例中,可以提供以下的体积流速:至少0.1、0.5、1、1.5、2、2.5、3、3.5、4、4.5、5、6、7、8、9、10、20、30、40、50、75、100、125、150、200、250、300、350、400、450、500、600、700、800、900、或1000ml/min。在另一个实施方案中,可以提供以下的体积流速:小于约1000、900、800、700、600、500、450、400、350、300、250、200、150、100、75、50、40、30、20、10、或

5ml/min。流速可以由这些上限值和/或下限值中的任何两个提供的范围,例如在约50与400、10与200、或20与200之间的范围。

[0210] 该工艺可涉及在静态混合器或反应器中的约0.1秒至约60分钟的平均停留时间。平均停留时间可以例如小于约60分钟、45分钟、30分钟、15分钟、10分钟、5分钟、1分钟、30秒、10秒或5秒。平均停留时间可以例如大于约1秒、5秒、10秒、30秒、1分钟、5分钟、10分钟、15分钟、30分钟或45分钟。平均停留时间可以提供为选自这些前述值中的任何两个的范围。例如,平均停留时间可以在5秒至10分钟、1秒至5分钟、或1分钟至60分钟的范围。

[0211] 该工艺可提供以下的法拉第效率(参与感兴趣反应的通过的电荷%):至少5、10、15、20、25、30、35、40、45、50、55、60、65、70、75、80、85、90、95、98、或99。该工艺可提供以下的法拉第效率(参与感兴趣反应的通过的电荷%):小于99、98、95、90、85、80、75、70、65、60、55、50、45、40、35、30、25、20、15、或10。该工艺可以提供在由上述上限值和/或下限值中的任何两个提供的范围内的法拉第效率(参与感兴趣反应的通过的电荷%)。

[0212] 阳极电解液和/或阴极电解液流可包括任何合适的溶剂、电活性物质和支持电解质。溶解物质的浓度可以从十亿分之几变化到它们的溶解度极限(每升数十摩尔)。除了溶解的物质之外,流体流还可以含有任意组合的多相:未溶解的固体(例如悬浮在流体流中的固体),不混溶液体和气体。因此,流体流可包含水性或非水性溶剂、分子溶剂、熔融盐、离子液体、超临界溶剂或这些的混合物。溶解的物质在溶液中可以是离子的、分子的或基本上离子配对的。它们可以是溶解的固体、气体、可混溶的液体或它们的混合物。存在的其他相可以是悬浮固体或凝胶,有机或无机聚合物,天然产物或这些的混合物。它们可以是故意通过流动和/或电活性作用引入或产生的气体或蒸气。在另一个实施例中,流体是液体或复杂液体,诸如包含固体的溶解和/或悬浮的液体。

[0213] 在一个实施例中,可以提供一种用于从流体流中去除物质的方法,该方法包含根据如在此描述的其任何方面、实施方案或实施例的电化学流动电池或其系统。物质可以是溶解在流体流中的金属物质。应当理解,涉及电化学液流动电池的性能的上述实施方案或实施例中的任何一个都可以应用于该实施方案。

[0214] 实施例

[0215] 通过以下实施方案进一步描述本发明。应该理解的是,以下描述仅出于描述特定实施例的目的,而无意于对以上描述进行限制。

[0216] 实施例1:

[0217] 准备电化学流动反应器,该电化学流动反应器包含分离器200(图2),以及包括蠕动泵(Masterflex L/S变速传动w/Remote I/O;600rpm)120以控制电解质流入电池和电源110(Autolab 302N恒电位仪,购自Metrohm Autolab BV,荷兰乌得勒支(Utrecht))以控制所施加的流过电池的电化学电位/电流。

[0218] 作为工作电极的增材制造金属静态混合器电极(SME)104、204以限定工作隔室的分离模式配置紧密地配合在管状多孔聚合物分离器202(GenPore Reading,美国)内。在电极的任一端处的两个端口结合到该设计中以提供用于流体流动的连接。流体通过这些管进入工作隔室。与所有静态混合器一样,当溶液流过混合器表面的许多成角度的面时,溶液的动量引起混合。在该特定实验中,由玻璃碳制成的惰性管状对电极以与分离器小的距离围绕工作隔室,产生低体积的对隔室并形成电池的外壳。使用两个端盖500(图4A、4B和4C)

密封整个组件。加工到端盖中的端口144提供进入对电极隔室的流体流动。如果实验需要,这种配置允许在两个隔室中使用不同的流体。

[0219] 电池工作的效率可以通过将在不同流速下测量的极限电流与来自相同溶液中的旋转圆盘电极(RDE)的结果进行比较来评估。这些比较是性能的有用指标,并且不用于得出关于静态混合器表面处的流体动力条件的任何结论。

[0220] 为了评价本发明的电化学流动反应器的两种配置的性能,进行了一系列实验,以0.5M氯化钾为支持电解质,采用覆铂静态混合器电极(即工作电极(10^{-3} - 10^{-1} M))和玻碳管(即阳极),研究了铁氰化物($[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3+}$ 溶液(10^{-3} - 10^{-1} M)的电化学还原。在反应器的分离配置上的典型还原反应如下进行。

[0221] 在100秒内将-1.4V、-1.6V、-1.8V和-2V的电势阶跃施加到电池上进行计时电流测量,其中电池在前50秒间隔以静态模式(即, 0mL min^{-1})操作,在后50秒间隔以在10和 400mL min^{-1} 之间的恒定流速操作(图7-9)。对于所有流速观察到稳态电流,并且通过增加流速,记录的电流在所有电势阶跃中增加。尽管所记录的电流随电势增加而增加,但是当施加-1.8V和-2V时,在流出流动电池的溶液中观察到一些气泡。在该实验装置的这些较高电势下,除了 $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3+}$ 还原之外,还在阴极处发生析氢,这会使分析复杂化。

[0222] 实验结果表明,在较低的电活性离子浓度下,反应受质量传输限制(即 $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3+}$ 的浓度为0.001和0.01M),电化学流动电池的配置显着提高了反应速率。在更高的浓度下(即 $0.1\text{M}[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3+}$),其中通过质量传输和动力学因子控制反应(混合控制),反应速率的提高较小,当使用静态混合器电极时更快,为1.5至3.7之间。

[0223] 实施例2:

[0224] 在电化学流动电池的分离配置实施方案中,使用不锈钢静态混合器电极(即工作电极)和玻碳管(即阳极),在 10 - 1000mL min^{-1} 的流速下评价电化学流动电池从在 $0.01\text{M H}_2\text{SO}_4$ 中含有 10 - 100ppm Cu^{2+} 的酸性污染溶液中除去铜离子的效率。如图10所示,通过增加流速超过 50mL min^{-1} ,去除效率降低,这是由于减少了电活性离子在工作电极表面上的停留时间以完成还原反应(图10(a)和10(b))。另一方面,通过增加流速,通过工作电极的电荷已经增加并且电流恢复相应地增加。然而,增加流速是有效的,因为减少了电活性离子在电极表面的停留时间。

[0225] 实施例3:

[0226] 还进行了详尽的电解实验以显示电化学流动电池如何有效地从固定体积的污染水溶液中去铜离子。使用电化学流动电池以 50mL min^{-1} 的恒定流速处理两升铜污染的水溶液(即 $100\text{ppm CuSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 在 $0.01\text{M H}_2\text{SO}_4$ 中的溶液)持续24小时。光学图像和SEM/EDS结果证实了铜离子在静态混合器工作电极上的沉积(图11)并且ICP-MS结果显示,在电化学流动电池的分离配置中,在24小时内实现了铜浓度的99.7%的降低(图12)。

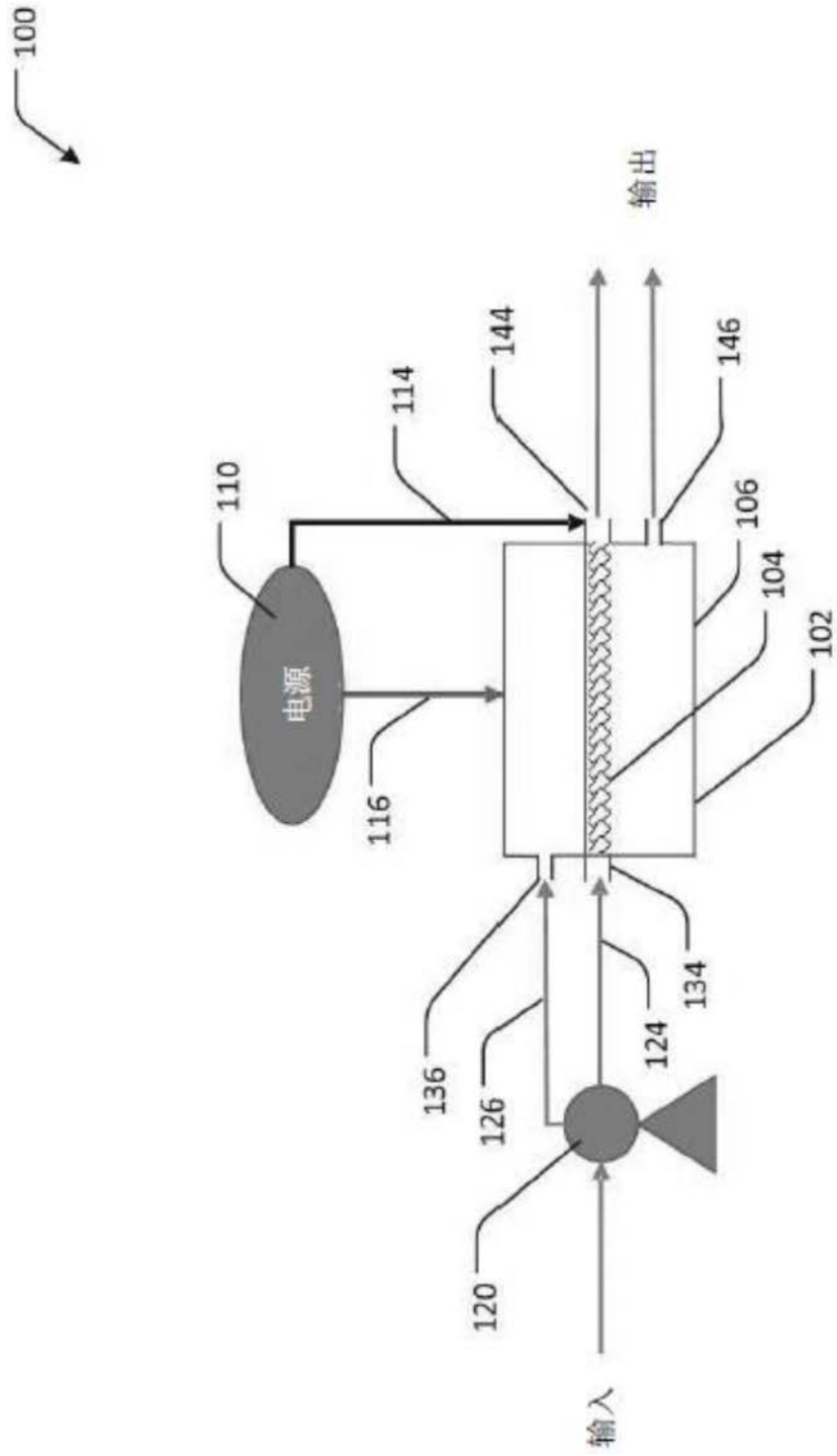


图1

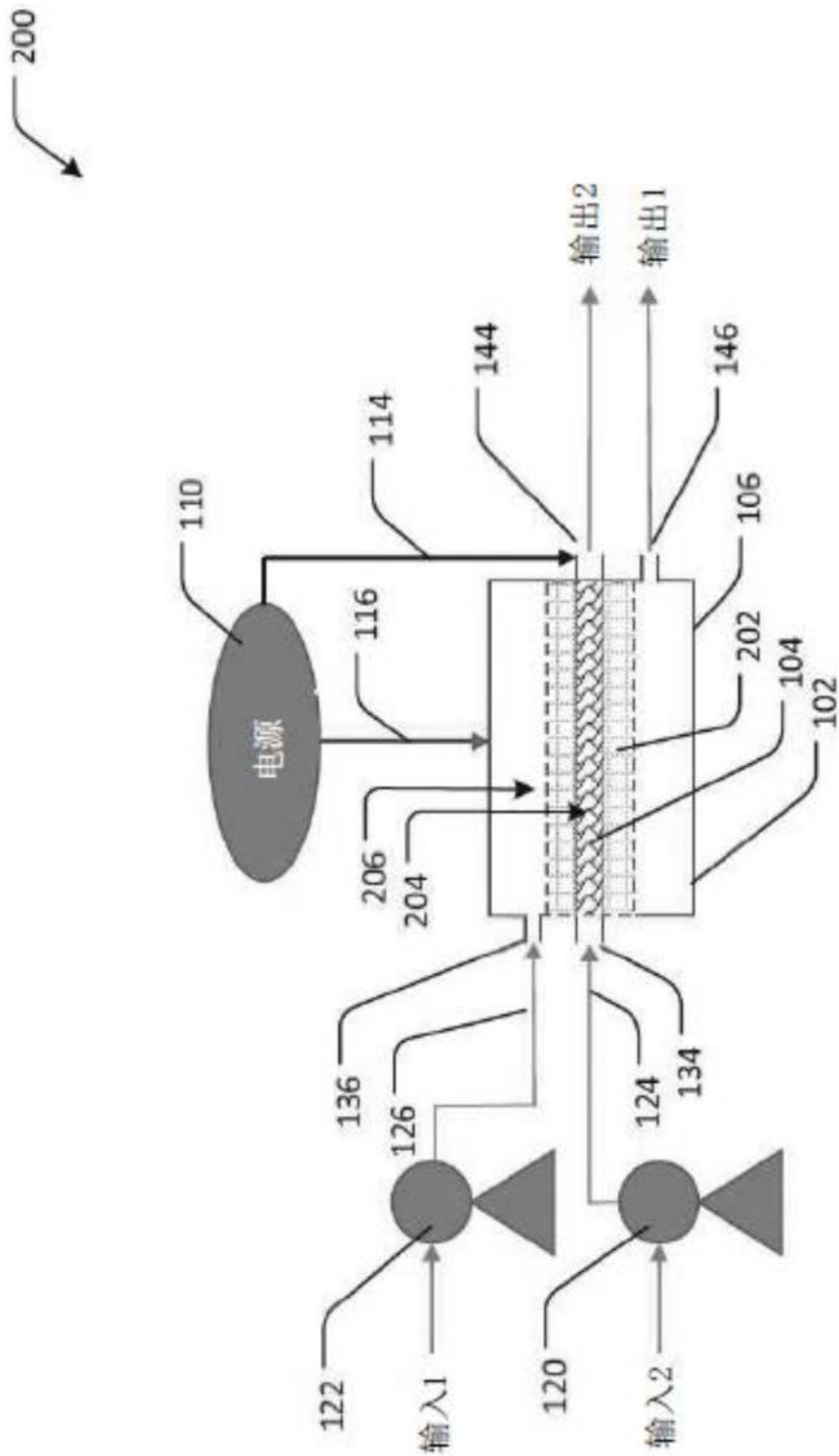


图2

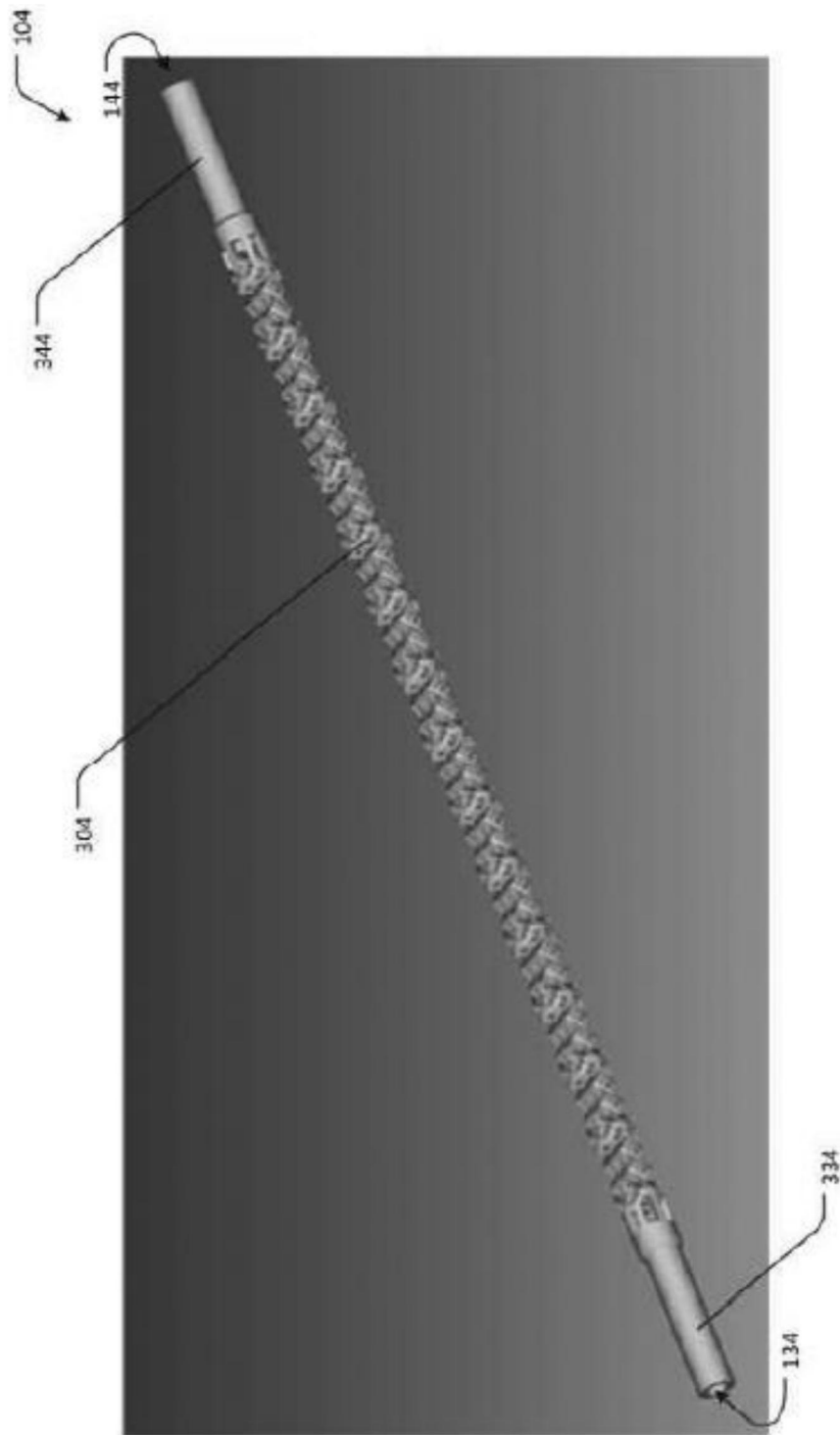


图3A

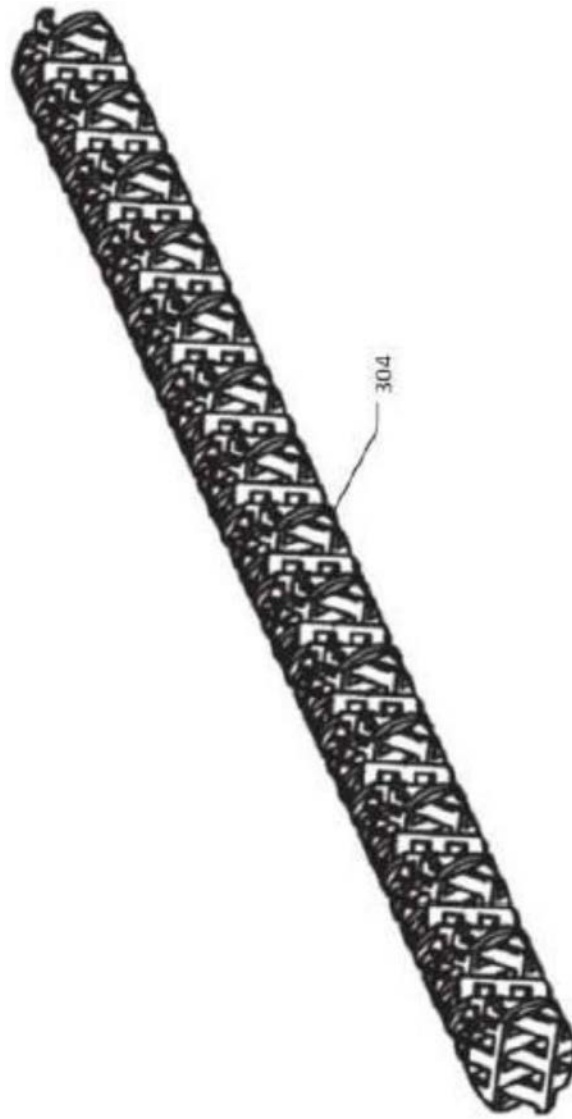


图3B

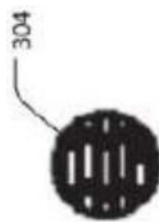


图3C



图3D

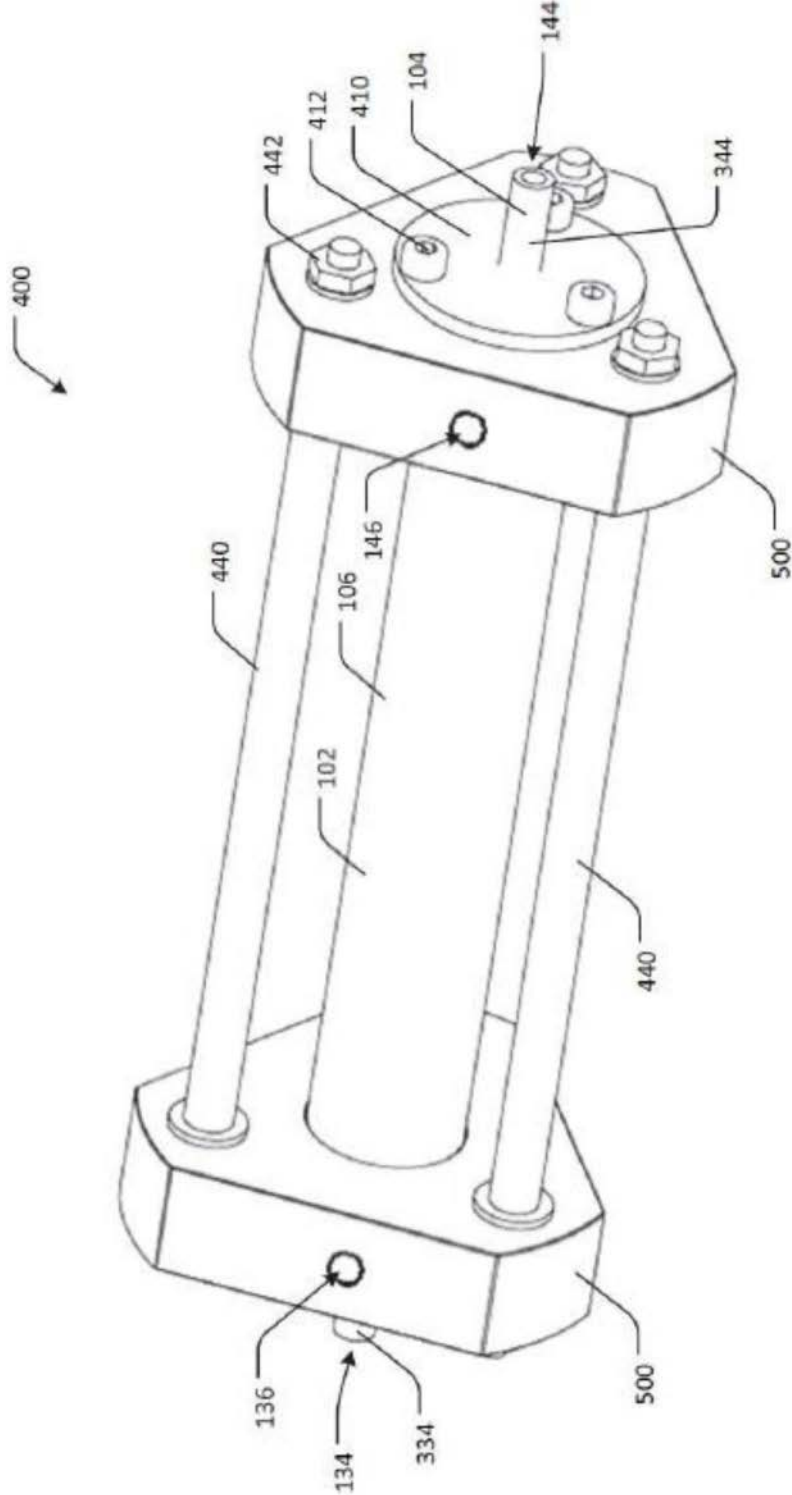
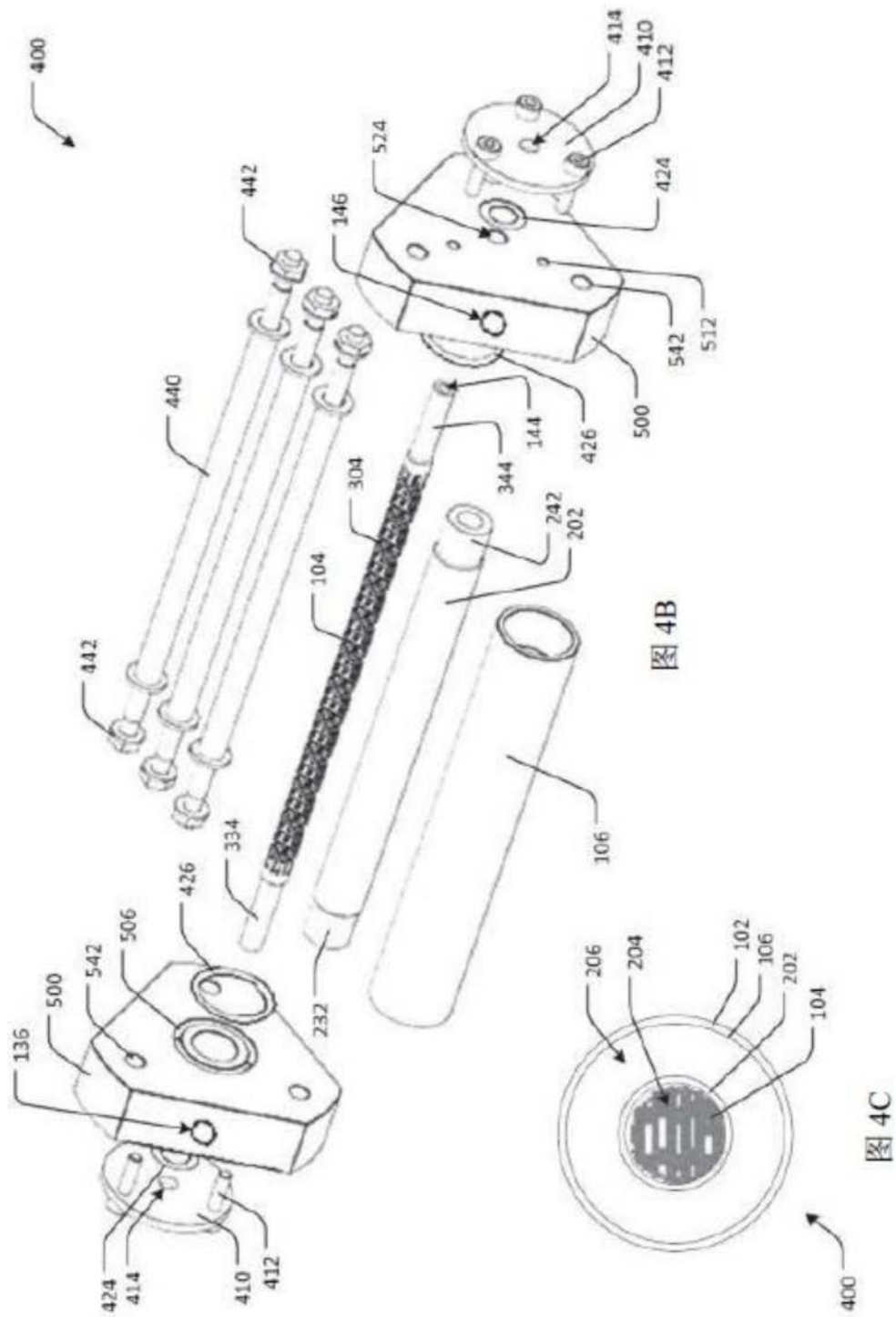


图4A



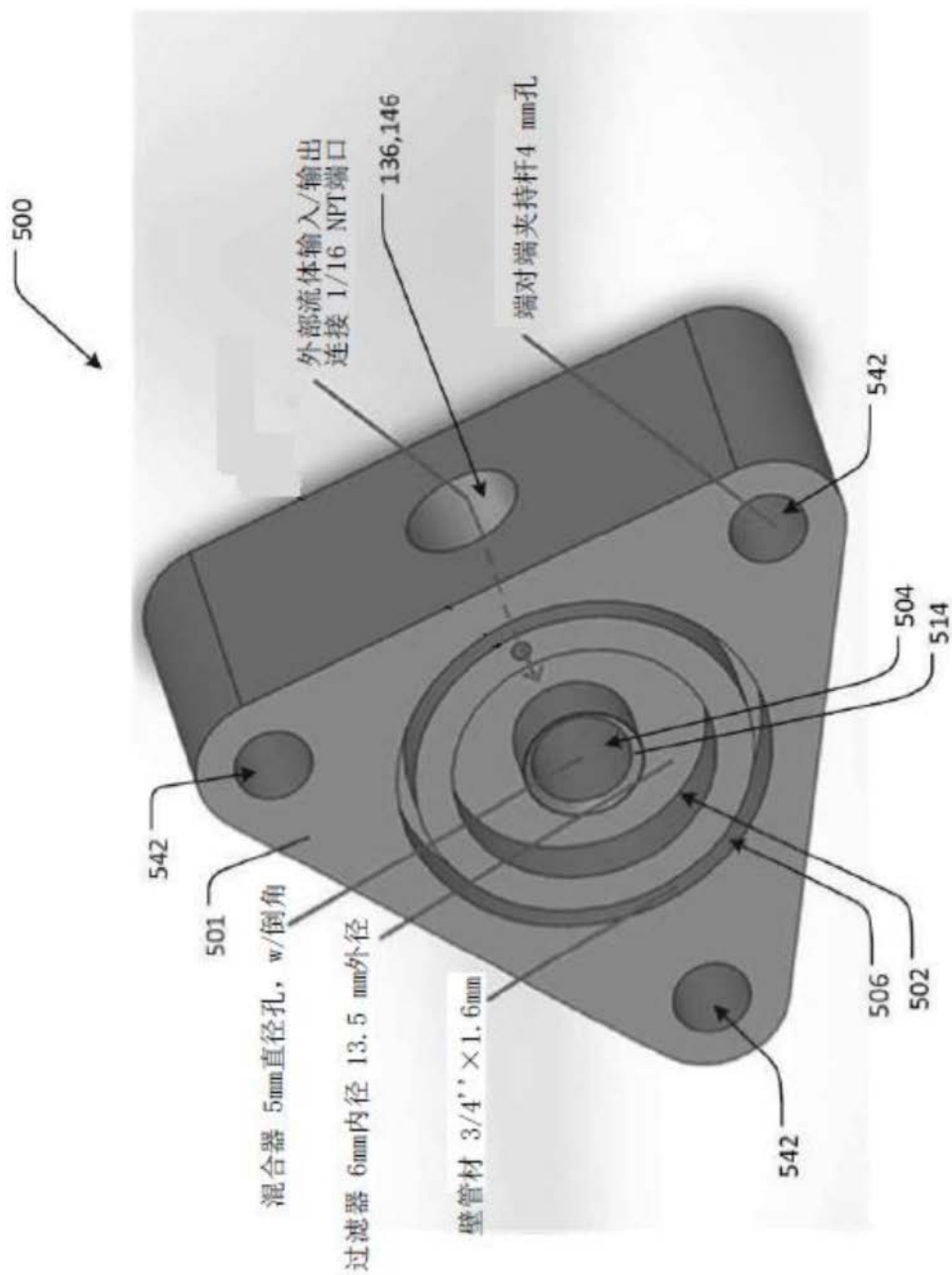


图5

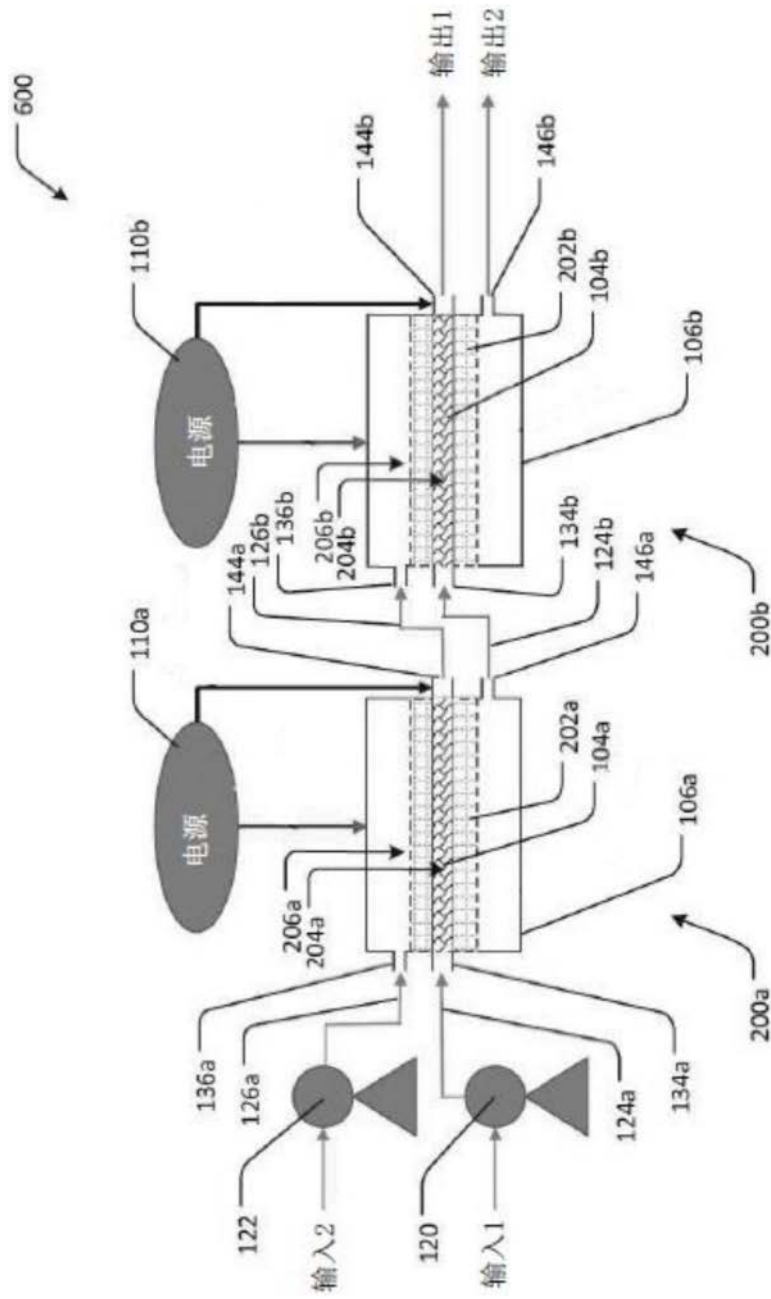


图6

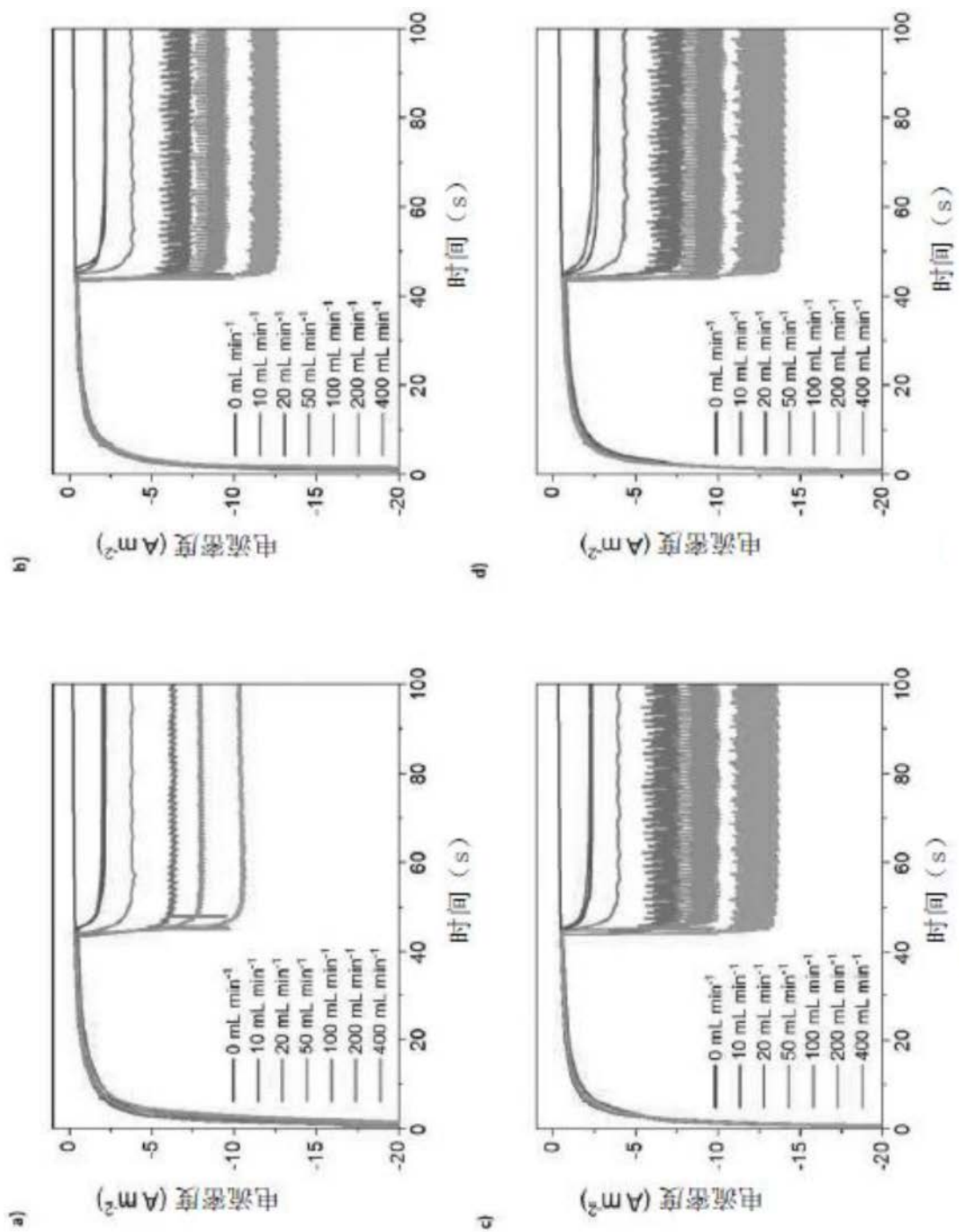


图7

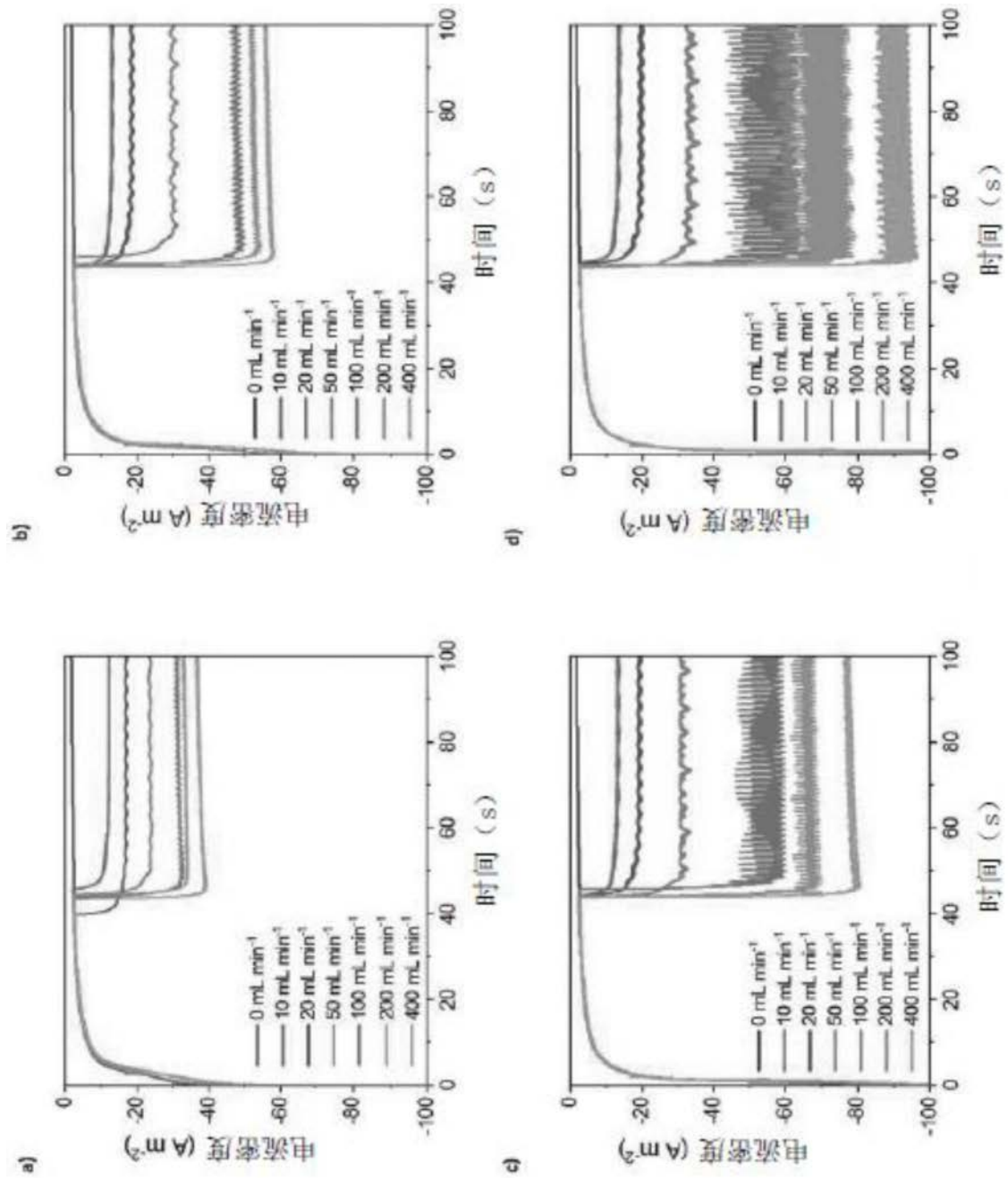


图8

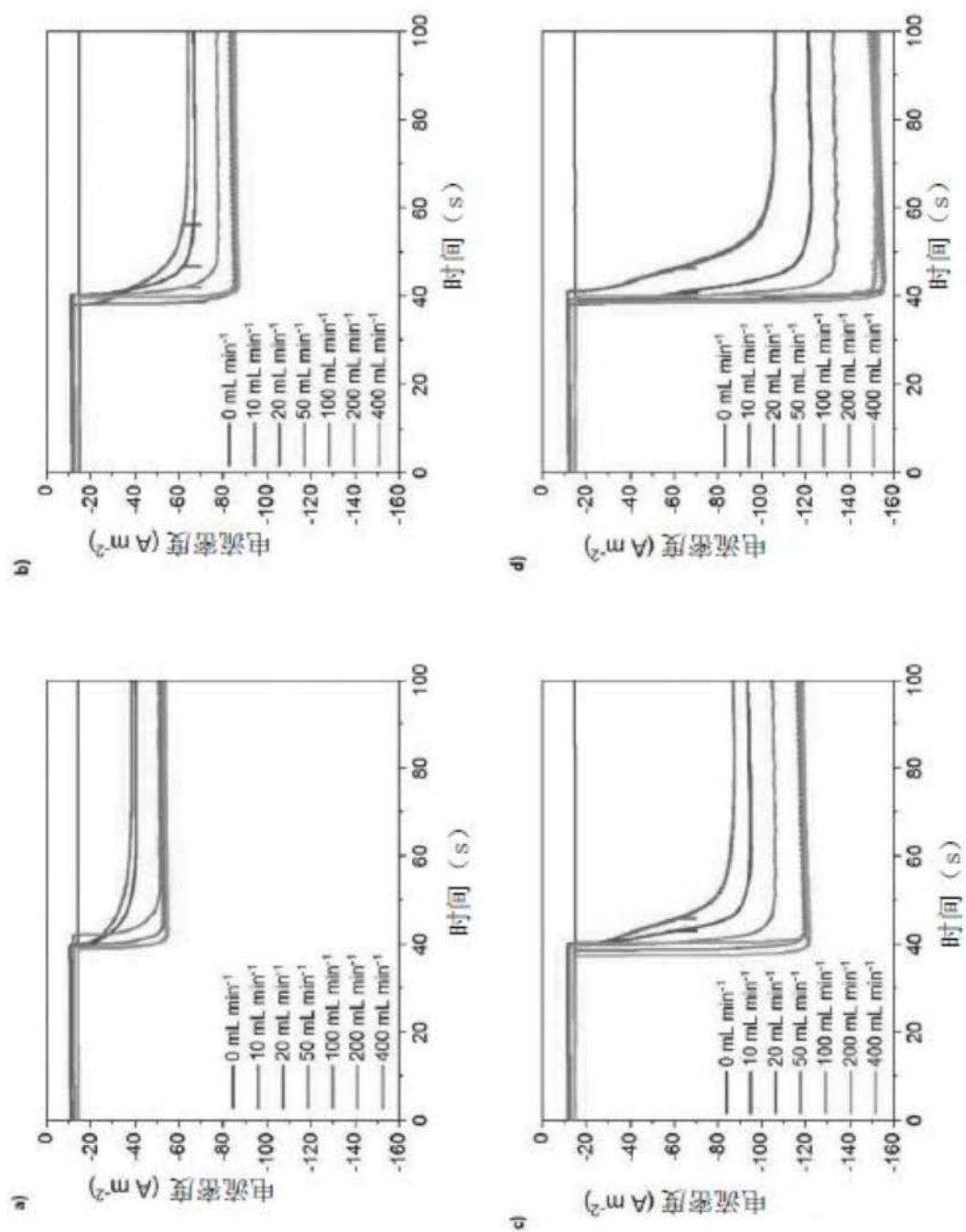


图9

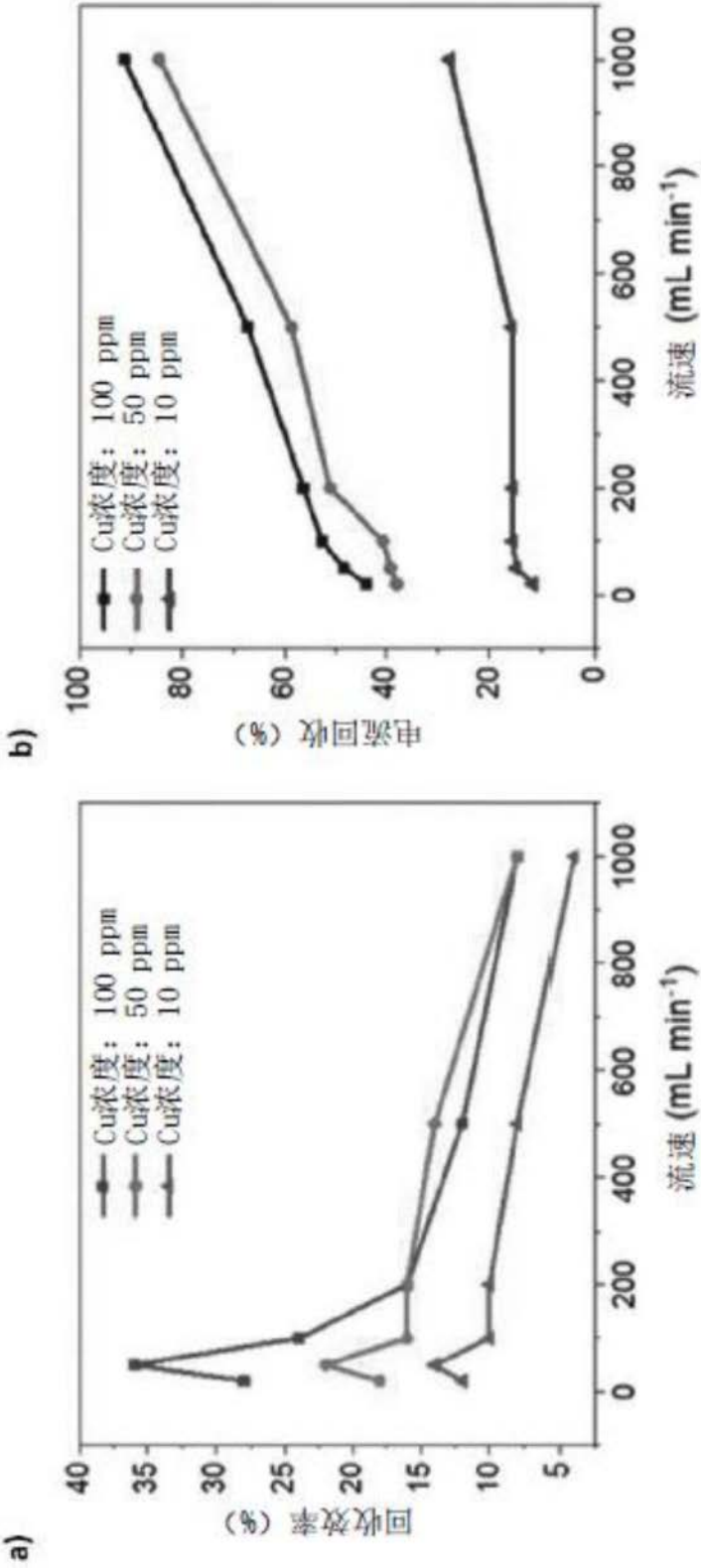


图10

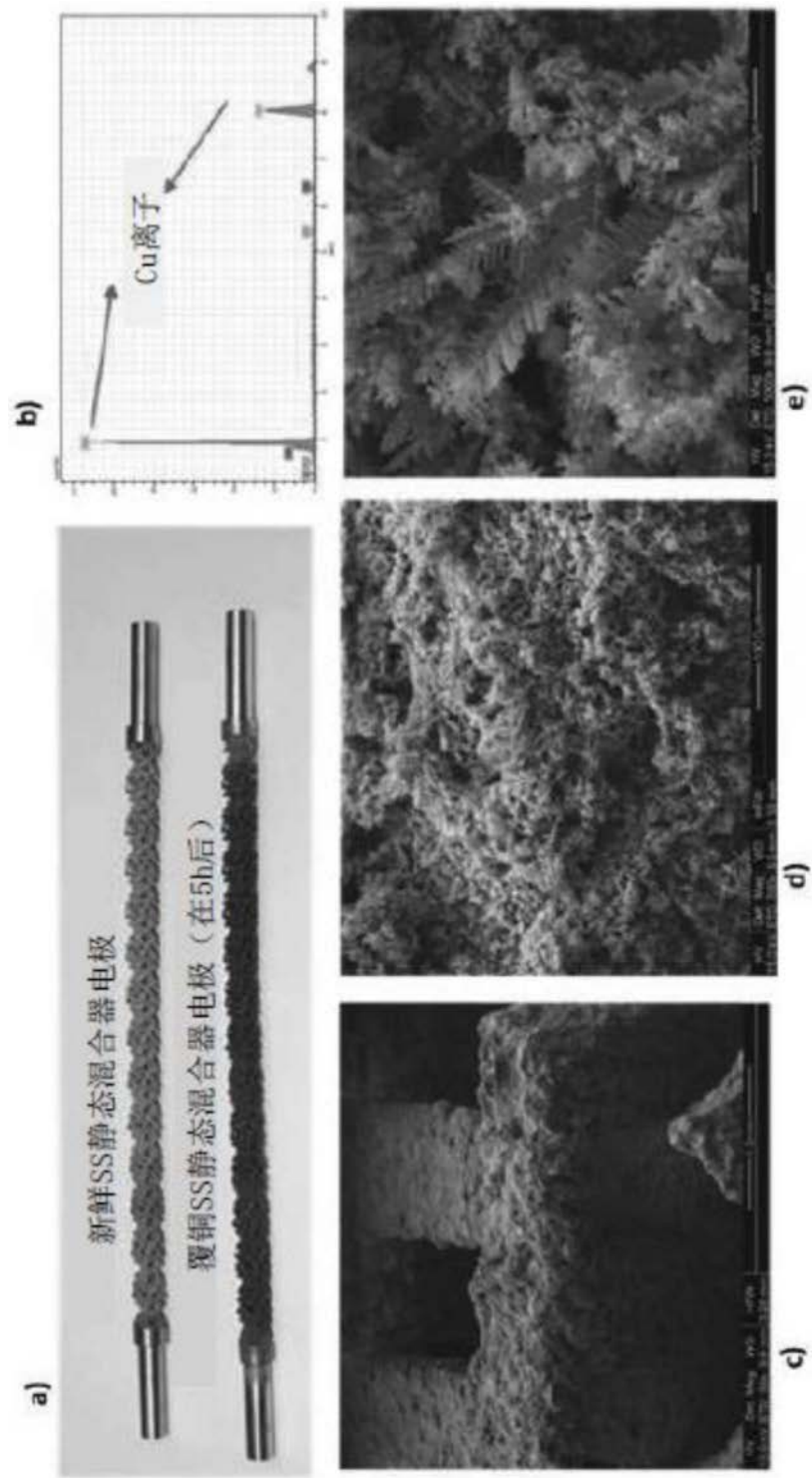


图11

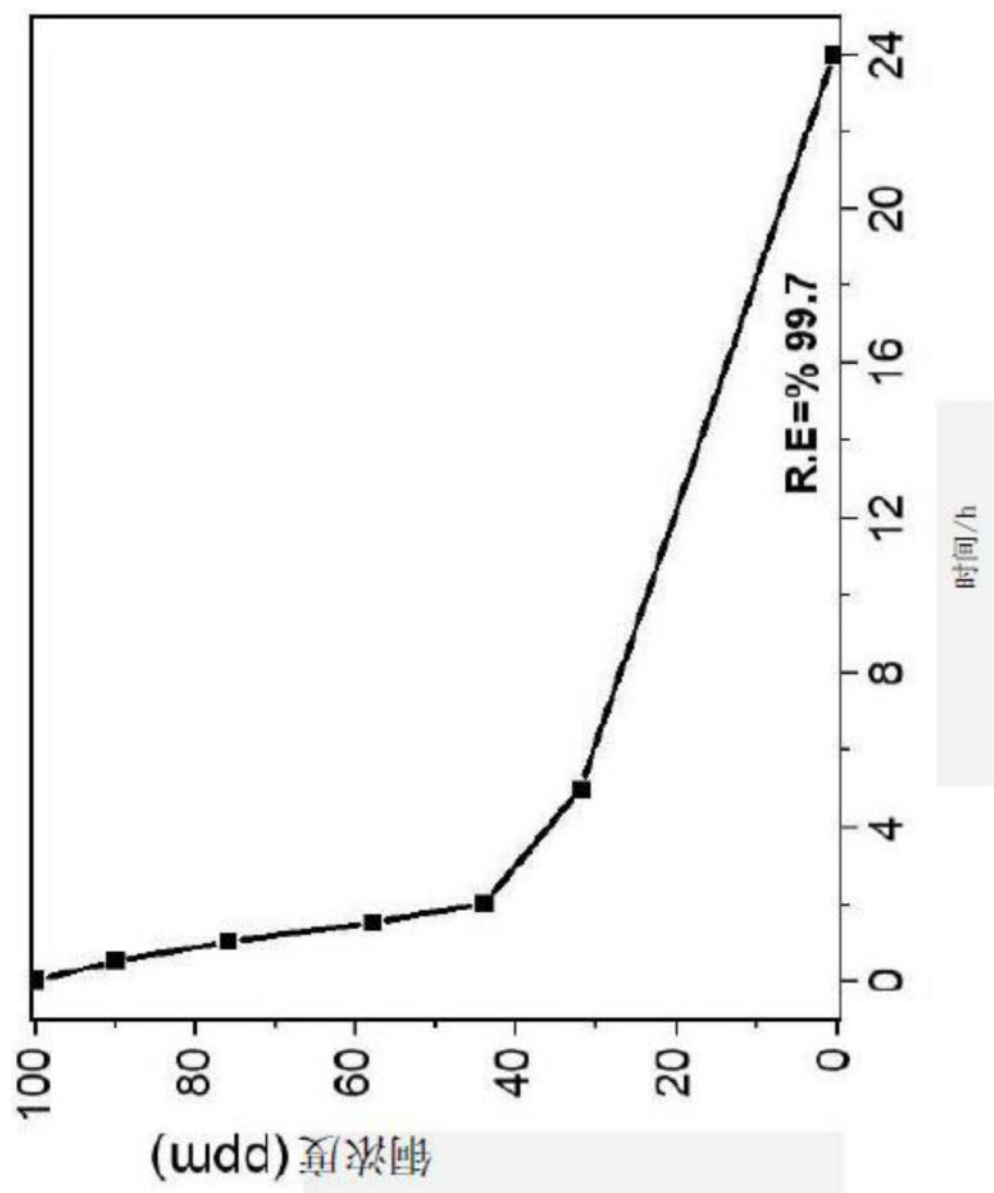


图12