

(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 101983260 B

(45) 授权公告日 2013. 11. 27

(21) 申请号 200980111988. 6

(51) Int. Cl.

(22) 申请日 2009. 02. 09

C25D 17/00 (2006. 01)

(30) 优先权数据

61/026, 963 2008. 02. 07 US

(56) 对比文件

61/034, 242 2008. 03. 06 US

US 4201635 A, 1980. 05. 06,

12/167, 771 2008. 07. 03 US

US 5607562 A, 1997. 03. 04,

(85) PCT申请进入国家阶段日

US 4125439 A, 1978. 11. 14,

2010. 09. 30

审查员 程三飞

(86) PCT申请的申请数据

PCT/US2009/033598 2009. 02. 09

(87) PCT申请的公布数据

W02009/100455 EN 2009. 08. 13

(73) 专利权人 麦卡钦公司

地址 美国俄勒冈州

(72) 发明人 W·H·麦卡钦 大卫·J·麦卡钦

(74) 专利代理机构 北京安信方达知识产权代理

有限公司 11262

代理人 武晶晶 郑霞

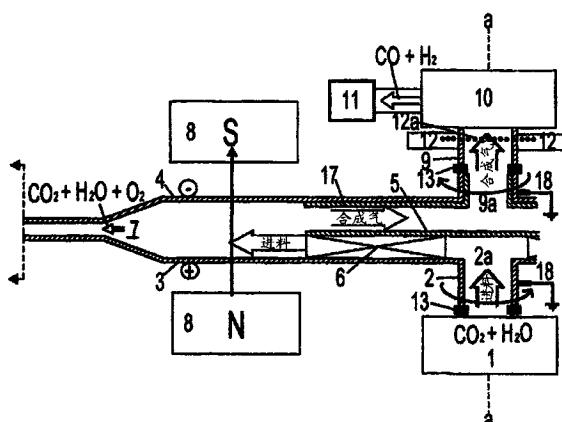
权利要求书2页 说明书22页 附图7页

(54) 发明名称

径向逆流剪切电解

(57) 摘要

通过轴向磁场反向旋转的同轴的圆盘电极用作轴向进料的电解电极和高剪切离心叶轮。进料可以是二氧化碳、水、甲烷或需要电解的其它物质。二氧化碳和水可以被连续地处理成合成气和臭氧，使得碳和氧能够在发电厂回收。在反向旋转的圆盘电极之间的空间内，包括分形树网状的径向漩涡的剪切层为例如合成气的轻馏分提供了径向向内的汇流通路，而诸如臭氧和元素碳的重馏分在靠着圆盘的边界层内和在圆盘外周之外径向向外流动，在圆盘外周之外，重馏分作为诸如碳纳米管的有价值的产物被回收。



1. 一种用于连续剪切电解的径向逆流反应器,包括:

(a) 近似平行且近似圆盘形状的叶轮电极:

所述叶轮电极能够围绕共同的旋转轴反向旋转,并且被隔开以便界定在其之间的工作空间,以及

所述叶轮电极包括导电材料,所述导电材料在所述反向旋转的过程中被相对放置横跨所述工作空间,以及

所述叶轮电极中的一个具有在其中心附近的轴向进料口,并且另一个叶轮电极具有在其中心附近的轴向排放口,所述口与所述工作空间相通;

(b) 用于反向旋转的设备,所述用于反向旋转的设备用于使所述叶轮电极围绕所述共同的旋转轴反向旋转;

(c) 用于使所述叶轮电极带相反电荷的设备,以便在所述反向旋转的过程中在所述工作空间中形成电场;

(d) 用于连续地引入进料的设备,所述用于连续地引入进料的设备用于在所述叶轮电极的反向旋转的过程中,将用于电解的进料连续地引入通过所述轴向进料口并且进入所述工作空间;

(e) 用于离心泵送所述进料的设备,所述用于离心泵送所述进料的设备用于从所述旋转轴径向向外离心地泵送所述进料;

(f) 用于径向向内平流输送轻馏分和用于连续提取的设备,在反向旋转过程中,朝着所述旋转轴径向向内平流输送电解的轻馏分产物,以及通过所述轴向排放口从所述工作空间连续地提取轻馏分;以及

(g) 用于回收重馏分产物的设备,所述用于回收重馏分产物的设备用于从所述工作空间的外周回收电解的重馏分产物。

2. 如权利要求 1 所述的反应器,所述反应器还包括脉冲电场设备,所述脉冲电场设备用于在所述工作空间中引起脉冲电场,所述脉冲电场设备包括相对的反向旋转的所述叶轮电极上的相对的带相反电荷的有皱褶的表面。

3. 如权利要求 1 所述的反应器,其中,所述用于反向旋转的设备包括一个或多个可旋转的外周驱动轮。

4. 如权利要求 1 所述的反应器,所述反应器另外包括位于所述轴向进料口和所述轴向排放口之间的折流板。

5. 如权利要求 1 所述的反应器,所述反应器还包括收缩部分,在所述收缩部分,所述叶轮电极之间的分隔距离是减少的。

6. 如权利要求 1 所述的反应器,其中所述用于使所述叶轮电极带相反电荷的设备包括电流流动设备,所述电流流动设备用于使相反的径向电流在所述叶轮电极中流动,所述电流流动设备包括至少一个横跨的磁体,在所述反向旋转的过程中,所述至少一个横跨的磁体用于引起通过所述导电材料的横向的磁场。

7. 一种连续剪切电解进料的方法,所述方法包括以下同时的步骤:

(a) 将所述进料轴向注入工作空间,所述工作空间在反向旋转的同轴的带相反电荷的近似圆盘形状的叶轮电极之间;

(b) 将所述进料径向向外平流输送通过所述工作空间,同时在所述叶轮电极之间剪切

所述进料,以便在所述工作空间中形成剪切层;

(c) 将电解的轻馏分产物径向向内朝着所述叶轮电极的旋转轴平流输送通过在所述剪切层中的径向漩涡的核心;

(d) 从所述工作空间轴向提取电解的所述轻馏分产物;以及

(e) 外周地从所述工作空间提取电解的重馏分产物。

8. 如权利要求 7 所述的方法,其中,所述进料是二氧化碳和水的混合物,并且电解的所述轻馏分产物包括一氧化碳和氢气。

9. 如权利要求 7 所述的方法,其中,所述进料是水,电解的所述轻馏分产物是氢气。

10. 如权利要求 7 所述的方法,其中,电解的重馏分产物是臭氧。

11. 如权利要求 7 所述的方法,其中,电解的重馏分产物包括选自由以下组成的组的材料的纳米结构:碳、氮化硼、金、金属二硫属化合物、金属氧化物和金属二卤化物。

12. 如权利要求 11 所述的方法,其中, $M = Mo, W, Nb, Ta, Hf, Ti, Zr, Re$; $X = S, Se$ 。

13. 如权利要求 7 所述的方法,其中,所述进料包括选自由以下组成的组的含碳化合物:一氧化碳(CO)、甲烷(CH₄)、烷烃、二氧化碳(CO₂) 和挥发性有机化合物(VOC)。

14. 如权利要求 7 所述的方法,其中,所述进料包括选自由以下组成的组的化合物:硫化氢(H₂S)、氨(NH₃)、硫醇和含氯氟烃(CFC)。

径向逆流剪切电解

[0001] 申请历史

[0002] 本申请要求在 2008 年 3 月 6 日递交的美国临时专利申请第 61/034,242 号和 2008 年 2 月 7 日递交的美国临时专利申请第 61/026,963 号的权益。

发明领域

[0003] 本发明适于在连续过程中机械辅助的电离作用。一个特定的应用是同时电解二氧化碳和水以产生合成气，合成气是一氧化碳和氢气的混合物，因此提供了用于在 IGCC 发电厂回收碳和氧气的设备。另一个应用是电解水或甲烷以产生用于燃料的氢气。还有另一个应用是作为碳螯合技术的可选方案的 CO₂ 的裂化。以及另一个应用是碳纳米管或其它纳米管的高体积的连续合成。

[0004] 发明背景

[0005] 二氧化碳排放

[0006] 普遍认同的是必须使二氧化碳排放处于控制之下，但是技术上还不能与政策步调一致。特别关注的是燃煤发电厂，它是电的必不可少的提供者。非氢可再生的，如风和太阳能是可忽略不计的能源，不到美国 2006 年的煤的半个百分点。在煤厂没有经济的设备用于碳捕获和螯合。

[0007] 全球气候变化的警报已导致碳税计划，碳税预计为每吨二氧化碳 20–200 美元。现有煤厂的所有者可能合理地选择不对减少排放做任何事，但是却交纳碳税并将成本以增加的比率转移给使用的顾客。胺洗涤(amine scrubbing)和地下储存是目前最主要的用于碳捕获和螯合的提议，它们过于昂贵且有正当的理由怀疑它们是可靠的。煤厂的烟气包含粉煤灰、大的氮气砂囊(large nitrogen ballast)、以及酸雨前体 NO_x 和 SO_x。废流的体积是非常大的。

[0008] 如果存在普遍采用的补救方案来避免因无节制地排放 CO₂ 引起的灾难性的全球气候变化，那么必须有一些经济鼓励而不是惩罚性税收。

[0009] IGCC 发电厂

[0010] 整体煤气化联合循环(IGCC)发电厂依靠称为煤气化的工艺将煤或生物质转化为易燃的合成气(一氧化碳(CO)和氢气(H₂)的混合物)。联合循环是：(1)布雷顿循环(Brayton cycle) (其中合成气燃烧产生的废气驱动燃气涡轮机)，和(2)兰金循环(Rankine cycle) (蒸汽涡轮机，其中来自燃气涡轮机的废热用于蒸汽)。对于相同的能量输出，IGCC 厂需要比大型煤粉发电厂少 10–20% 的燃料。IGCC 厂也使用比燃煤发电厂少约 30% 的水。IGCC 厂占用的面积也小得多。

[0011] 煤气化是将含碳材料转化为合成气的工艺。甚至高硫煤、褐煤、塑料和垃圾都可以是 IGCC 的燃料。气体发生器可以按照空气–鼓风或氧气–鼓风运行。空气–鼓风气体发生器不如使用纯氧气的气体发生器。空气–鼓风气体发生器的燃料转化效率仅为 46% 对 79%，且产生的合成气的能量密度或热值仅为 5.3MJ/kg 对 12.55MJ/kg。用于氧气–鼓风气体发生器的氧气通常通过低温蒸馏从空气中提取，巨大的能量吸取(energy drain)。

[0012] 连同合成气，煤气化工艺还产生二氧化碳(CO_2)。因为不存在氮气砂囊，所以在氧气 - 鼓风气体发生器中的煤气化之后捕获二氧化碳比从空气 - 鼓风气体发生器进行燃烧后的燃气碳捕获或燃烧前的捕获更简单。空气是 78% 氮气(N_2)，且空气或燃料气中的此惰性部分称为氮气砂囊。合成气燃烧产生的用来运转燃气涡轮机的废气还包含必须也被捕获的 CO_2 。胺洗涤是碳捕获的一种方法，且冷冻胺(chilled ammonia)是另一种方法。

[0013] 碳螯合

[0014] 一旦二氧化碳被捕获，必须对它采取一些行动。碳捕获随后的事情称为螯合。如政策制定者目前所预想的，螯合是一种隐蔽性的倾倒方案。目的是将二氧化碳储存在地下或海洋中，而不是储存在空气中。需要运输和注入巨大的体积和重量、以及缺乏碳倾倒将保持安全可靠的任何把握性使得应优先在厂里进行某种处理而不是倾倒，但是目前对公用事业和工业所排放的大量热而脏的废气进行二氧化碳处理依然是不可行的。

[0015] 如果捕获由一个平均 250-MW 的燃煤发电厂在一年内排放的所有二氧化碳，那么将需要处理 1.7 百万公吨。二氧化碳气体的密度在标准温度和压力下是 1.98kg/m^3 ，因此在温暖的天气的海平面压力下，每公吨(1000kg) CO_2 占据 554 立方米，约为一套房子的大小。每年，来自这个平均煤厂的二氧化碳废气流将装满一立方千米。

[0016] 大型煤厂每年排放多达 6 百万吨。水泥厂和精炼厂以及钢厂也是重度污染者。例如，旧金山湾区域的壳牌 Martinez 炼油厂每年向大气中倾倒超过 4.4 百万公吨 CO_2 。2005 年美国的总 CO_2 负荷(load)超过 6 百万公吨。那是超过 3 万亿立方米，或 117 万亿立方英尺。每年运输如此大的重量和将如此大的体积放入地下将是昂贵的工作。

[0017] 掩埋的二氧化碳气体可能渗透回到表面且泄漏出来而伤害人类或至少散逸到空气中。关于任何螯合方案的政治可行性，美国螯合核废弃物的经验应该是有益的。核废弃物还没有用于永久螯合的场所，且它的体积与仅仅一个厂的二氧化碳废气的体积相比是极小的。Nevada 的市民坚定地拒绝了在 Yucca Mountain 进行核废弃物倾倒的荣幸，且可以预料到其它地方对碳倾倒也是同样的反应。

[0018] 如果增大压力以将更多的二氧化碳填塞进可利用的倾倒空间中，那么发生泄漏、移动和爆发的危险增加。当人为错误、不诚实和贪婪 - 以及地震和其它自然灾害的可能性也被考虑时，没有理由期望可以获得公众对设置碳倾倒场所的赞同。

[0019] 总的说来，螯合不仅过于昂贵而且作为长期的解决办法是不可行的。必须找到一种方法将 CO_2 转化为无害的材料。

[0020] 通过同时电解 CO_2 和水来合成合成气

[0021] 合成气是一氧化碳(CO)和氢气(H_2)的混合物，合成气可以直接燃烧或用作使用众所周知的费托合成工艺来制造合成燃料、润滑剂或塑料的进料。二氧化碳裂化为合成气可提供用于在发电厂进行碳回收的方法，利用这样回收的合成气的能量密度(热值)以便直接燃烧以助于向燃气涡轮机提供动力。或者可以合成合成气来制造交通工具的燃料。合成气的能量密度在 5MJ/kg 到 12MJ/kg 内变动，这取决于煤气化中使用的工艺(氧气 - 鼓风产生最高的能量密度，用于较好的燃烧)。为了对比的目的，天然气的能量密度是 45MJ/kg ；汽油是 46.9MJ/kg 或 34.6MJ/l (131MJ/加仑)；褐煤是 $14\text{--}19\text{MJ/kg}$ ；以及木材是 $6\text{--}17\text{MJ/kg}$ 。

[0022] 如果税收和斥责证明了在激励电力生产者和其它人减少 CO_2 排放方面是无效的，那么从碳回收重新获得的能量可在经济上证明二氧化碳处理是有道理的。沥青煤的能量密

度(热值)是 24MJ/kg。12MJ/kg 的回收的合成气将回收煤的一半能量。通过碳回收减少的煤成本将抵消二氧化碳处理的一些成本。此外,二氧化碳处理将避免过高的成本和碳螯合的其它问题。不仅煤厂而且天然气厂可使用碳回收来抵消二氧化碳处理的成本。

[0023] 如果二氧化碳的裂化是可利用的,那么除碳之外氧气也可以被回收。在煤气化过程中纯氧气优于空气,因为纯氧气避免了氮气砂囊问题且产生了具有更高能量密度(约 12MJ/kg)的合成气。对于 IGCC,吹气分离器用来产生氧气 - 鼓风气体发生器用的氧气。吹气分离器占厂的运行和维护成本的约 30%。依靠氧气回收而减少的吹气分离器成本将抵消二氧化碳处理的成本。

[0024] 爱达荷国家实验室已研制出一种工艺,他们把该工艺称为“syntrolysis (合成电解)”,其通过在稀有金属和陶瓷材料的静态的电解槽中于高温(830°C)下同时电解二氧化碳和蒸汽来合成合成气。该电解槽不仅昂贵,而且小。对于大体积的二氧化碳,依照此装置的合成电解的可扩展性仍不清楚。

[0025] 废气的电离

[0026] 分子离解(也称为裂化)所需的能可以以许多形式转移,包括热能、机械能或电能。电能可以在电弧放电中转移,如在闪电将氧气转换成臭氧的情况一样。通常,气体诸如二氧化碳是绝缘的,但是足够强的电场将电子从分子分离,称为离子化的过程,剩下带正电离子和称为等离子体的自由电子的混合物。等离子体是良好的导体,所有电流在电弧放电中流过离子化的气体。电弧放电将能量转移到气体且增加离子化。

[0027] 根据公式 $P=I^2R$,能量通过电阻耗散(resistive dissipation)转移到气体的比率与电流的平方成比例,其中 P 是能量, I 是电流,而 R 是电流流过电极之间的气体的电阻。连接阳极和阴极的电弧放电是不期望的,不仅因为它们导致能量的短路所以能量不能耗散到气体中,而且因为它们引起电极腐蚀。防止这些问题的常规方法是在进料气体和电极之间插入电介质例如玻璃,如在臭氧发生器领域众所周知的介质阻挡放电(DBD)反应器中所实践的一样。介质阻挡具有平均分布在它的与进料气体接触的表面上的电荷,所有没有局部的电荷浓度,如在裸露的金属电极中一样,这可能引起电弧放电和腐蚀。来自电介质的放电是大量的灯丝,称为辉光(glow)或电晕(corona),而不是一个集中的电弧。丝状电流在大量的极小的路径中将电能转移到气体,这对于电阻耗散是有益的。然而,插入的电介质的电阻削弱了电极之间的气体中的 E 场,所以驱使电能到达气体中的电动势是微弱的。

[0028] 需要高压的热等离子工艺用于工业规模的二氧化碳的裂化是不现实的。可选方案是称为冷的或非等温的等离子工艺,这是因为虽然电子温度是几千度,如在热等离子中一样,但是气体温度是温和的,因为气体没有和电子达到热平衡。荧光灯是一个例子。低(大气)压意味着通过电子碰撞激发的气体分子不能足够频繁地互相碰撞而达到热平衡。

[0029] 滑动电弧(滑动弧)冷等离子体反应器在近似大气压下运行,且在电极之间使用瞬态电弧(transient arc)将能量转移到气体中用于裂化。避免了削弱电介质阻挡的电阻。电弧的运动而不是电介质阻挡防止集中的电弧放电,并且因此保护电极不被腐蚀和将电能扩散到进料气体中。在分开的电极之间流动的气体的对流冷却保持气体的温度温和。滑动弧通过使电弧与其导电通过的气体一起移动而解决了电解腐蚀的问题,从而移动滑动弧末端所以气体不会停留和腐蚀电极。该领域已知的滑动弧反应器在高压下以低电流运行。改进的滑动弧版本(滑动弧 II)包括一个嵌套着共轴的静态电极的旋转的圆柱形电极,以及在

电极之间的轴向进料流。A. Czernichowski 等人,美国专利 6,924,608 (2005)。

[0030] 已研究了滑动弧反应器作为二氧化碳裂化为合成气的设备。A. Czernichowski, Oil&Gas Science and Technology-Rev. IFP, Vol. 56, p. 181, 第 189-196 页 (2001)。

[0031] 另一个改进的在高压下运行的滑动弧反应器引入反向涡流(轴向逆流,如在旋风中一样),如在兰克 - 赫尔胥涡流管中所进行的一样。切线喷射的进料沿着管旋转向下,并且然后以轴向的等离子体喷射通过管底部的环状阴极回弹至管上部的盘状阳极。管可由裸手拿住,极好地证明了它的冷等离子体的特性。C. S. Kalra 等人,Rev. Sci. Instruments76, 025110 (2005)。

[0032] 已知的滑动弧反应器的不足在于进料气体在电极之间的处理区域的停留时间是短暂的。进料气体仅仅吹过,这需要用来移动电弧以便防止电极腐蚀。

[0033] 上述的滑动弧 II 和由 Hayashi 等人的美国专利 5,817,218 (1998) 公开的反应器是反应器的实施例,其中在电极之间存在剪切,使用剪切代替加压气流来防止腐蚀。两者都显示了单一的移动电极。在滑动弧 II 中旋转的电极是圆柱形的。Hayashi 显示了包括旋转的圆盘电极的冷等离子体反应器,所述圆盘电极具有催化剂层且与涂有催化剂的固定板电极相对。进料对电极之间的湍流间隙(turbulent gap)是不重要的。将 30-50kHz 的交流电应用于 Hayashi 电极以产生等离子体,尽管可以使用直流电。Fleischmann 等人的美国专利 4,125,439 (1978) 公开了一种用于电解的反应器,该反应器包括共同旋转的圆盘电极之间的轴向进料的工作空间。在 Fleischmann 等人的设备中电解产物的分离依靠位于电极之间的环状分流器(splitter)。圆盘发电机

[0034] Michael Faraday 在 1831 年发现:通过在磁极之间的空间旋转铜盘,他能从圆盘的旋转轴附近引出电流。这是第一代发电机。Tesla 和许多其他人研究了后来变得著名的同极发电机。N. Tesla, "Notes on a Unipolar Dynamo (关于单极发电机的注释)", The Electrical Engineer, Sep. 2, 1891。在此,其将指的是圆盘发电机。圆盘发电机的电压可以小(<3 伏特),但电流是大的(高达数百万安培)。电流应用包括焊接和轨道炮(rail guns)。用于电解半反应(half reaction)的电势在可用圆盘发电机得到的范围内。

[0035] J. Bockris 等人, Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 10, 第 179 页在 185 (1985) 公开了一种单一的通过轴向磁场旋转的圆盘发电机。用于水裂化的电势在同一个圆盘的外周和轴之间。

[0036] 当圆盘旋转通过磁场时,在圆盘轴和圆盘外周之间的电荷分离由圆盘中的自由正电荷和自由负电荷上的相反的力产生。圆盘的运动是方位角的(azimuthal),并且磁场或 B 场是轴向的,所以电动势(电压)是径向的,并且正电荷和负电荷是相反的,引起它们向相反的径向方向迁移。依据旋转方向和横向磁场的极性形成电流,所述电流可能径向向内,将圆盘外周变成阴极,或径向外向,将圆盘外周变为阳极。

[0037] 碳纳米管合成

[0038] 通常称为碳纳米管的管状富勒烯是商业上非常有价值的碳形式,该碳形式具有许多非凡的特性。碳纳米管具有 100 倍的钢的抗拉强度,且可能是地球上最结实的材料。在其金属(不切实际的对称)形式时,碳纳米管可以携带高电流而具有很少的热量,使得其近似超导体。对于热传导,碳纳米管是已知最有效的材料。每一个碳原子在卷成管的六边形格子中连接到其它三个碳原子。沿着其长度,碳纳米管具有对腐蚀的高的抵抗度,这是因为

它们粘结性的分子结构。

[0039] 目前的碳纳米管合成方法的缺点包括：无定形炭黑和与期望的结构混合的有缺陷的结构、小批量、短的管长度、扭结和生成的纳米管的缠结。

[0040] 无机纳米管、纳米线和其它细丝结构也已被合成。除由碳制造之外，纳米结构也可从以下材料制造：氮化硼、金、金属二硫属化物(MX_2 ($M=Mo$ 、 W 、 Nb 、 Ta 、 Hf 、 Ti 、 Zr 、 Re ; $X=S$ 、 Se))、金属氧化物和金属二卤化物。

[0041] 退火(annealing)被认为在纳米管合成中是有益的。退火通常理解为成型之后的热处理，但是机械退火或振动退火也是已知的。退火的目的是改善原子填塞入期望的格子中；分离杂质；以及消除结构中的缺陷。

[0042] 发明概述

[0043] 本公开内容的目的是将二氧化碳转化为有用的某种东西，像合成气或碳纳米管(管状富勒烯)。另一个目的是改善冷等离子体或滑动弧反应器的进料停留时间，该反应器具有能量转移到进料的高的比率、电极之间的进料的长的停留时间、最小的电极腐蚀、电极的最小的气体覆盖和电解产物的良好分离。另一个目的是提供一种二氧化碳裂化器，该裂化器将能够连续地将大量的 CO_2 废气流处理为有价值的产物，例如合成气和诸如碳纳米管的纳米结构。另一个目的是改善纳米管在合成过程中的退火。用于连续合成碳纳米管或其它纳米管的大体积反应器是本发明的另一个目的。如果纳米管可从 CO_2 裂化残留物中回收，即使是以很低的量回收，其也胜过抵消减少二氧化碳排放的代价。捕获和裂化二氧化碳的动机也可变得获利而不是受到强迫。

[0044] 本公开内容描述了用于连续剪切电解的径向逆流反应器，包括：近似平行且近似圆盘形状的叶轮 / 电极，所述叶轮 / 电极能够围绕共同的旋转轴反向旋转，并且被隔开以便界定在其之间的工作空间，且所述叶轮 / 电极包括导电材料，所述导电材料在所述反向旋转的过程中被相对放置横跨所述工作空间，并且所述叶轮 / 电极中的一个具有在其中心附近的轴向进料口，且另一个叶轮 / 电极具有在其中心附近的轴向排放口，所述轴向进料口和所述轴向排放口与所述工作空间相通；用于反向旋转的设备，所述用于反向旋转的设备用于使所述叶轮 / 电极围绕所述共同的旋转轴反向旋转；用于使所述叶轮 / 电极带相反电荷的设备，以便在所述反向旋转的过程中在所述工作空间中形成电场；用于连续地引入进料的设备，所述用于连续地引入进料的设备用于在所述叶轮 / 电极的反向旋转的过程中，将用于电解的进料连续地引入通过所述轴向进料口并且进入所述工作空间；用于离心泵送所述进料的设备，所述用于离心泵送所述进料的设备用于从所述旋转轴径向向外离心地泵送所述进料；用于径向向内平流输送轻馏分和用于连续提取的设备，其在反向旋转过程中，朝着所述旋转轴径向向内平流输送电解的轻馏分产物，以及通过所述轴向排放口从所述工作空间连续地提取轻馏分；以及用于回收重馏分产物的设备，所述用于回收重馏分产物的设备用于从所述工作空间的外周回收电解的重馏分产物。

[0045] 所述用于使所述叶轮 / 电极带相反电荷的设备可包括电流流动设备，所述电流流动设备用于使相反的径向电流在所述叶轮 / 电极中流动，所述电流流动设备可包括至少一个横跨的磁体，在所述反向旋转的过程中，所述至少一个横跨的磁体用于引起通过所述导电材料的横向的磁场。所述反应器还可包括脉冲电场设备，所述脉冲电场设备用于在所述工作空间中引起脉冲电场，所述脉冲电场设备可包括反向旋转的叶轮 / 电极上的相对的带

相反电荷的有皱褶的表面。所述用于反向旋转的设备可包括至少一个可旋转的外周驱动轮，所述至少一个可旋转的外周驱动轮同时与叶轮 / 电极两者啮合并且连接到用于引起所述驱动轮旋转的设备。所述用于径向向内平流输送轻馏分的设备包括轴向吸入泵。所述反应器还可包括位于所述轴向进料口和所述轴向排放口之间的折流板。所述反应器还可包括收缩部分，在所述收缩部分，所述叶轮 / 电极之间的分隔距离是减少的。所述反应器还可包括静态的并且包括径向的喷嘴的折流板。

[0046] 本公开内容还描述了一种用于气体的分子分解的反应器，所述反应器包括：近似平行且近似圆盘形状的叶轮 / 电极，所述叶轮 / 电极能够围绕共同的旋转轴反向旋转，并且隔开以便界定在其之间的工作空间，每一个叶轮 / 电极包括至少一个导电部分，所述导电部分在所述反向旋转的过程中横跨所述工作空间被相对地放置，以及所述叶轮 / 电极中的一个具有在其中心附近的轴向进料口以便轴向注入所述气体，并且另一个叶轮 / 电极具有在其中心附近的轴向排放口以便轴向提取气态的轻馏分，所述轴向进料口和所述轴向排放口与所述工作空间相通；折流板，所述折流板位于所述轴向进料口和所述轴向排放口之间；用于反向旋转的设备，所述用于反向旋转的设备用于使所述叶轮 / 电极围绕所述共同的旋转轴反向旋转；用于带相反电荷的设备，所述用于带相反电荷的设备用于使所述叶轮 / 电极的所述导电部分带相反的电荷，以便在所述反向旋转的过程中，在所述工作空间中形成电场；用于连续地引入所述气体的设备，所述用于连续地引入所述气体的设备用于在所述反向旋转的过程中，将所述气体连续地引入通过所述轴向进料口并且进入所述工作空间中；用于离心泵送所述气体的设备，所述用于离心泵送所述气体的设备用于在所述反向旋转的过程中从所述旋转轴径向向外离心泵送所述气体；用于径向向内平流输送轻馏分和用于轴向提取的设备，其在反向旋转过程中，朝着所述旋转轴径向向内平流输送电解的轻馏分产物，以及通过所述轴向排放口从所述工作空间连续地轴向提取轻馏分；以及用于回收重馏分的设备，所述用于回收重馏分的设备用于从所述工作空间的外周回收重馏分。

[0047] 所述带相反电荷的设备可包括用于产生轴向磁场的设备，所述用于产生轴向磁场的设备用于在其反向旋转过程中产生通过所述相对的导电部分的轴向磁场。所述用于轴向提取的设备可包括轴向吸入泵，所述轴向吸入泵通过所述轴向排放口与所述工作空间相通。所述用于反向旋转的设备可包括至少一个可旋转的外周驱动轮，所述至少一个可旋转的外周驱动轮同时与叶轮 / 电极两者啮合并且连接到用于引起所述驱动轮旋转的设备。

[0048] 本公开内容还描述了一种连续剪切电解进料的方法，所述方法包括以下同时的步骤：(a) 将所述进料轴向注入工作空间，所述工作空间在反向旋转的同轴的带相反电荷的近似圆盘形状的叶轮 / 电极之间；(b) 将所述进料径向向外平流输送通过所述工作空间，同时在所述叶轮 / 电极之间剪切所述进料，以便在所述工作空间中形成剪切层；(c) 将电解的轻馏分产物径向向内朝着所述叶轮 / 电极的旋转轴平流输送通过在所述剪切层中的径向漩涡的核心；(d) 从所述工作空间轴向提取电解的所述轻馏分产物；以及(e) 外周地从所述工作空间提取电解的重馏分产物。

[0049] 在所述方法中，所述进料可以是二氧化碳和水的混合物，并且电解的所述轻馏分产物可包括一氧化碳和氢气。

[0050] 在所述方法中，所述进料可以是水，电解的所述轻馏分产物可以是氢气，并且电解的所述重馏分产物可以是氧气。

[0051] 在所述方法中,电解的重馏分产物可以是臭氧。

[0052] 在所述方法中,电解的重馏分产物可包括选自由以下组成的组的材料的纳米结构:碳、氮化硼、金、金属二硫属化物(MX₂)、金属氧化物和金属二卤化物,其中M=Mo、W、Nb、Ta、Hf、Ti、Zr、Re;X=S、Se。

[0053] 在所述方法中,所述进料可包括选自由以下组成的组的含碳化合物:一氧化碳(CO)、甲烷(CH₄)、烷烃、二氧化碳(CO₂)和挥发性有机化合物(VOC)。

[0054] 在所述方法中,所述进料可包括选自由以下组成的组的化合物:硫化氢(H₂S)、氨(NH₄)、硫醇和含氯氟烃(CFC)。

[0055] 本公开内容还描述了一种用于合成长的纳米结构的径向剪切反应器装置,所述长的纳米结构包括碳纳米管和选自由以下组成的组的材料的纳米结构:碳、氮化硼、金、金属二硫属化物(MX₂)、金属氧化物和金属二卤化物,可选地,M=Mo、W、Nb、Ta、Hf、Ti、Zr、Re;X=S、Se,所述反应器装置包括:反向旋转的同轴的隔开的近似圆盘形状的离心的叶轮/电极,所述叶轮/电极围绕共同的旋转轴是可旋转的,并且界定在其之间的用于径向逆流的工作空间,所述叶轮/电极中的一个具有在其中心附近的轴向进料口,并且另一个叶轮/电极具有在其中心附近的轴向排放口,所述轴向进料口和所述轴向排放口与所述工作空间相通,每一个叶轮/电极包括至少一个导电部分,所述叶轮/电极的所述导电部分在所述反向旋转的过程中跨过所述工作空间彼此相对地放置,并且连接到用于带相反电荷的设备,以便在所述工作空间中形成电场,以及每一个叶轮/电极包括用于离心泵送流体的设备,所述用于离心泵送流体的设备用于通过所述工作空间径向向外地离心泵送流体;折流板,所述折流板位于所述轴向进料口和所述轴向排放口之间;用于反向旋转的设备,所述用于反向旋转的设备连接到所述叶轮/电极,用于引起围绕其共同的旋转轴的同时的反向旋转;用于连续地引入进料的设备,所述用于连续地引入进料的设备用于在所述反向旋转的过程中,将进料连续地引入到所述工作空间中并通过所述轴向进料口;用于径向向内平流输送轻馏分和用于连续提取的设备,其在反向旋转过程中,朝着所述旋转轴径向向内平流输送进料分解的轻馏分产物,以及通过所述轴向排放口从所述工作空间连续地提取所述轻馏分;以及用于提取纳米结构的设备,所述用于提取纳米结构的设备用于在轻馏分的所述轴向提取和进料的所述径向向外的平流输送的过程中,从所述工作空间的外周提取纳米结构。

[0056] 所述用于使所述叶轮/电极带相反电荷的设备可包括至少一个横跨的磁体,在所述叶轮/电极反向旋转时,所述至少一个横跨的磁体用于引起通过所述导电材料的横向的磁场,且由此在所述叶轮/电极内引起相反的径向电流流动。所述反应器装置还包括在所述带相反电荷的叶轮/电极上的相对的有皱褶的导电表面。所述径向剪切反应器装置另外包括用于在所述进料引入到所述工作空间之前,使所述进料离子化的设备。

[0057] 本公开内容还描述了用于使衬底径向镀覆电解的重馏分产物的装置,包括:反向旋转的同轴的隔开的近似圆盘形状的离心的叶轮/电极,所述叶轮/电极可旋转地围绕共同的旋转轴,并且界定在其之间的用于径向逆流的工作空间,所述叶轮/电极中的一个具有在其中心附近的轴向进料口,并且另一个叶轮/电极具有在其中心附近的轴向排放口,所述轴向进料口和所述轴向排放口与所述工作空间相通,每一个叶轮/电极包括至少一个导电部分,所述叶轮/电极的所述导电部分被设置成彼此相对地横跨所述工作空间,并且

连接到用于带相反电荷的设备，以便在所述工作空间中产生电场，以及每一个叶轮 / 电极包括用于离心泵送流体的设备，所述用于离心泵送流体的设备用于通过所述工作空间径向向外地离心泵送流体；折流板，所述折流板被设置在所述轴向进料口和所述轴向排放口之间；用于反向旋转的设备，所述用于反向旋转的设备连接到所述叶轮 / 电极，以便引起同时围绕其共同的旋转轴的反向旋转；用于连续地引入进料的设备，所述用于连续地引入进料的设备用于在所述反向旋转的过程中，将进料连续地引入到所述工作空间中并且通过所述轴向进料口；用于径向向内平流输送轻馏分和用于连续提取的设备，其在反向旋转过程中，朝着所述旋转轴径向向内平流输送进料分解的轻馏分产物，以及通过所述轴向排放口从所述工作空间连续地提取所述轻馏分；以及用于放置所述衬底的设备，所述用于放置所述衬底的设备用于在所述轴向提取轻馏分和所述在所述带相反电荷的反向旋转的叶轮 / 电极之间径向向外泵送进料的过程中，将所述衬底近似垂直于所述工作空间的外周放置，以便引起在电解的重馏分产物和所述衬底之间的碰撞。

[0058] 所述用于带相反电荷的设备可包括用于在所述工作空间内产生脉冲电场的设备。

[0059] 在所描述的装置中，导电圆盘通过横向的磁场反向旋转，变成圆盘发电机和动态电容器 (dynamic capacitor) 的极板。因为其反向旋转，圆盘中感应电流的方向是相反的；由于相反的径向电流流动，一个变成阴极且另一个变成阳极。在带相反电荷的反向旋转的圆盘之间是工作空间，其中高剪切引起包括径向漩涡的剪切层以便当更多进料轴向进入工作空间时，连续地轴向提取诸如合成气的电解的轻馏分产物，而诸如碳纳米管的电解的重馏分产物在外周离开工作空间时。

[0060] 当圆盘发电机反向旋转时，圆盘发电机上的波纹状的电极表面剪切工作空间中的气体且引起峰和谷周期性地相反的脉冲电场。工作空间中的进料的径向向外的流动被此高能环境中的湍流阻碍，直至进料裂化成电解的轻馏分产物和重馏分产物。剪切通过以机械方式向分子键施加应力来协助分子分解，而剪切叶轮之间的电场以电方式向分子键施加应力。电场把分子固定在圆盘叶轮 / 电极之间且在它们之间排成行，而剪切把它们拆散。

[0061] 一种径向逆流推动体系 (radial counterflow forcing regime)，包括离心式叶轮和轴向吸入泵，在工作空间同时形成源流 - 汇流：电解的轻馏分产物的汇流朝着叶轮 / 电极的旋转轴，而进料的源流和重馏分产物远离所述轴。径向逆流 (开放系统中的冯 · 卡门旋转流) 保证了高的连续的质量流通过反应器和用于裂化和产物的离心分离的长的保留时间。叶轮 / 电极之间的剪切层中的小规模漩涡实施离心分离，与小规模的漩涡相通的更大规模的漩涡提供电解的低密度轻馏分产物的径向汇流通路，例如来自水或甲烷的氢气。

[0062] 来自叶轮 / 电极的动量输送在叶轮 / 电极的旋转轴从轴向进料口径向向外平流输送进料和重馏分。同时，在剪切层中诱发的漩涡使进料或重馏分产物离心地远离漩涡轴 (axes)，从剪切层出来且进入靠着叶轮 / 电极的向外流动的层流边界层。在边界层中，进料和重馏分产物得到动量提高。诸如合成气的轻馏分产物被取代远离边界层而聚集在剪切层，不会从叶轮得到同样的动量转移。因此，具有比轻馏分产物高的动量的进料和重馏分产物随着与叶轮旋转轴的距离的增加而具有越来越高的浓度。

[0063] 径向向外流动的进料的湍流阻抗填充靠着电极的边界层，去掉电解产物且靠着电极补充进料，从而防止产物气体覆盖电极。进料 (例如 CO₂ 和水) 和重馏分产物 (例如臭氧和固体碳) 比电解产生的轻馏分 (例如 CO 和 H₂) 密度大。电解的低密度、低动量的轻馏分产物

被叶轮 - 离心和剪切 - 离心的进料和重产物取代远离边界层。因此，气态的电解产物被连续地从电极表面去除，为将要在这些表面进行电解的新的进料让路。电解的轻馏分产物在剪切层的漩涡核心浓缩，并且被径向向内平流输送，以便在叶轮 / 电极的旋转轴处通过轴向吸入泵提取。这些提取的轻馏分产物又可以是用于串联的另一个反应器的进料流，以产生增加的浓度的期望的输出产物。

[0064] 在反向旋转的叶轮 / 电极之间的工作空间的剪切层包括大规模的漩涡树形物的径向阵列，漩涡树形物是会聚在叶轮 / 电极的旋转轴处的低压力梯度的网络，其中汇流由轴向吸入泵产生。剪切层的湍流中的每一个小规模的漩涡都用作离心分离器。通过轴向吸入泵的作用，漩涡核心内收集的电解的轻馏分产物通过此分支的毛细管网络被提取。工作空间的外周的小规模的漩涡将碳卷成纳米管，而氢气、氧气或来自碳质进料裂化的其它气体径向向内被吸入通过漩涡核心且远离逐渐形成的连贯的(coherent)碳结构。

[0065] 漩涡 - 壁相互作用也协助通过径向漩涡径向向内平流输送电解的轻馏分产物，径向漩涡是汇流通路。剪切层的漩涡一旦遇到在工作空间的外周的收缩部分，就经历通过其漩涡核心的轴向回弹喷射。因为轻馏分由于其低密度而在漩涡核心浓缩，此回弹喷射驱使轻馏分朝着叶轮 / 电极的旋转轴，并且将诸如碳的电解的重馏分产物的漩涡挤压成长的、牢固的管状结构。

[0066] 横跨工作空间的是在由相对的圆盘发电机形成的动态电容器的极板之间的电势，相对的圆盘发电机由于其通过轴向磁场的反向旋转具有相反的径向电流流动。此电容器的极板是裂化二氧化碳或其它进料的反应器的电极。通过电极的反向旋转防止了集中的电弧放电对极板的电极腐蚀。能量密度从未有时间在电极表面处成为破坏性的点，因为初期的电弧通过使电弧端和剪切维持电弧的进料机械分离的电极的反向旋转而受到不断地干扰。所以存在无数的小的、短暂的、细丝放电而不是一些高电流的浪费的和腐蚀性的电弧将电能转移到进料中，以引起通过电能的电阻耗散的分子分解。

[0067] 通过重馏分电解产物逐渐形成导电的管状结构的放电将其结合在一起，并且将其转变成指向进料和吸引更多碳原子到其逐渐形成的端的阴极。导电性较低的碳结构例如煤烟由于其更大的电阻而通过电流蒸发和回收，并且因此不弄乱高质量的金属纳米管的生产。

[0068] 通过使电极旋转，防止落下的离子对电极的腐蚀，使得落下的离子追赶移动的目标，并且其轨道变为与电极相切。电极之间的剪切层中的气体的高的湍流破坏电极之间的任何初始的电流路径，且作为动态的电介质使用。

[0069] 由于动态的电介质的保护和电极的旋转，碳不会沉积在电极上，并且防止了催化剂焦化。碳离子和碳粒子在剪切层中的自紧的(self-tightening)连贯的径向漩涡中旋转。碳离子漩涡的旋转引起螺线管磁场，碳离子通过螺线管磁场旋转。因而产生正反馈回路，其中来自离子旋转的磁力挤压离子到漩涡核心中，从而加速漩涡和引起更大的磁力。当自紧的碳离子旋风在径向压缩力下结合成连贯的结构时，碳纳米管在剪切层中形成。由于圆盘发电机通过磁力学振动使纳米管退火，同时因为纳米管在其螺线管磁场中自紧，漩涡旋转着通过磁场。这个磁力学振动也协助气体裂化。

[0070] 在外周接近逐渐形成的纳米管的臭氧用来氧化碳结构中的缺陷，并且用来通过产生氧化部位使纳米管官能化，其它的分子可以在之后连接到此氧化部位。

[0071] 本发明使得目前比无价值还不如的二氧化碳变成有价值的资源。二氧化碳的排放者具有一种避免螯合问题的方法,以及防止全球气候变化的获利的动机。

[0072] 附图简述

[0073] 图 1 显示反应器的轴向部分的约一半的横截面示意图。

[0074] 图 2 显示反应器的外周部分的约一半的横截面示意图,如箭头所显示的与图 1 连接。图 1 和图 2 一起显示反应器的约一半。讨论的示例性的应用是二氧化碳和水的裂化以产生合成气以及臭氧和碳。

[0075] 图 3 显示去除顶部叶轮 / 电极的工作空间的俯视图,显示了用于反向旋转叶轮 / 电极的多个驱动轮。

[0076] 图 4 显示通过工作空间的径向逆流的详细的侧视图。

[0077] 图 5 显示径向漩涡核心的图。

[0078] 图 6 显示工作空间的收缩部分(pinch section)和漩涡 - 壁相互作用的细节。

[0079] 图 7 显示在进料入口的径向逆流的细节。

[0080] 图 8a 和图 8b 显示波纹状的电极在反向旋转过程中产生脉冲电场。

[0081] 图 9 显示在叶轮 / 电极上的叶轮叶片在反向旋转过程中交叉。

[0082] 图 10 显示折流板(baffle)组件的细节。

[0083] 图 11a 显示碳离子漩涡和其固有的磁场。

[0084] 图 11b 显示碳离子上的径向向内的磁力旋转通过漩涡磁场。

[0085] 图 12 显示一部分工作空间的细节和其中逐渐形成的碳纳米管的细节。

[0086] 图 13a 显示反向旋转的叶轮 / 电极之间的工作空间中的同心磁场。

[0087] 图 13b 显示剪切电解过程的简化版。

[0088] 图 14 显示离子的旋转通过磁场的径向漩涡,以及由此引起的纳米管的磁力学退火。

[0089] 图 15 显示反向旋转的叶轮 / 电极上的导电部分的径向阵列的细节。

[0090] 图 16 显示用于水电解的径向逆流剪切电解反应器的简化版。

[0091] 图 17 显示通过径向轨道炮效应从外周喷射的纳米结构撞击衬底(substrate)的细节。

[0092] 附图参考数字

[0093] 1- 进料源

[0094] 2- 轴向进料导管

[0095] 2a- 轴向进料口

[0096] 3- 底部叶轮 / 电极

[0097] 4- 顶部叶轮 / 电极

[0098] 5- 折流板

[0099] 6- 叶片

[0100] 7- 工作空间的收缩部分

[0101] 8- 磁体

[0102] 9- 轴向排放口

[0103] 10- 轴向吸入泵

- [0104] 11- 合成气容器
- [0105] 12- 蒸汽冷凝器冷却筛组件
- [0106] 13- 绝缘的密封件
- [0107] 14- 驱动凸缘
- [0108] 15- 驱动轮
- [0109] 16- 驱动轴
- [0110] 17- 电介质
- [0111] 18- 接触器(contact)
- [0112] 19- 导电部分
- [0113] 20- 衬底
- [0114] 详述

[0115] 术语“电解”意指通过电能引起分子分解的过程，包括分解发生在电极表面的过程和分子分解发生在带相反电荷的电极之间的本体流体(bulk fluid)(气体、液体或其组合)中的过程，包括脉冲电场过程和电容耦合的等离子体过程。

[0116] 图1和图2一起显示了用于同时电解二氧化碳和水以产生合成气的优选实施方案的横截面示意图。图1连接到图2显示了根据本发明的反应器的约一半。余下的部分与所显示的部分对称。

[0117] 根据优选实施方案的本发明的另一个应用是裂化二氧化碳或包括甲烷和其它烷烃的其它含碳进料，用来合成碳纳米管。各种馏分(fraction)的流动路径由箭头表示。

[0118] 另一个应用是裂化气态的污染物质例如硫化氢(H₂S)，氨(NH₃)、硫醇、含氯氟烃(CFCs)和挥发性有机化合物(VOCs)，以使它们是无害的，同时回收有价值的材料。甚至热的和脏的废气流可以供给到反应器中。例如，来自燃煤发电厂的烟气可以直接注入而不需要洗涤，诸如氮气砂囊和水蒸汽的轻馏分与电解污染物质的轻馏分产物一起被轴向提取。

[0119] 合成气应用将作为操作反应器的示例性实施例在下面进行讨论。然而，此实施例的描述不应被理解为对将反应器应用到其它电解或等离子体协助的反应器工作的限制，诸如例如，水的电解以产生氢气和氧气。鉴于本发明的公开内容，本领域的技术人员将能够通过计算和实验使反应器适应工作。

[0120] 用于合成气合成的进料包括二氧化碳和水的混合物，进料从进料源1流过与工作空间相通的轴向进料导管2，工作空间由叶轮/电极3、4界定且在其之间，磁体8横跨叶轮/电极3、4。叶轮/电极围绕轴a-a旋转并且通过磁体8的北极和南极之间的轴向磁场B。在此显示的是一个磁体8，磁体8引起通过两个叶轮的轴向磁场。可选地，单独的磁体可以横跨单独的叶轮/电极。在此显示的底部叶轮包括在其中心的轴向进料口2a。叶轮/电极包括其在磁体8的磁极之间的部分内的导电材料，例如铝，并且优选在其面向工作空间的表面上涂有催化剂，例如镍。

[0121] 适当的设备引起叶轮/电极3、4围绕轴a-a反向旋转。用于引起叶轮/电极3、4反向旋转的优选设备是外周驱动轮15，如在图2和图3中所更具体显示的。驱动轮15啮合每一个叶轮/电极上的驱动凸缘14且由驱动设备(未显示)驱动，例如通过驱动轴16连接到驱动轮的电动机。驱动轮15优选地是充气轮胎，或可选地是啮合凸缘上的齿的齿轮。驱动轮维持叶轮/电极以期望的距离分开并且也将能量从驱动设备转移到叶轮/电极。可以

使用其它适当的设备,例如将发动机连接到叶轮 / 电极的带驱动。

[0122] 反向旋转的叶轮 / 电极 3、4 用作至通过轴向进料口 2a 进来的进料的离心叶轮,从旋转轴 a-a 径向向外朝工作空间的外周平流输送进料,并且也通过轴向进料导管 2 从源 1 提取进料。进料的流动速率可以由未显示的进料泵来协助,或由燃烧产生的进料的压力来协助。动量从叶轮 / 电极传输到进料形成了靠着每一个叶轮 / 电极的边界层和在边界层之间的剪切层。在剪切层内是分形树网状的径向漩涡。

[0123] 轴向吸入泵 10 通过在叶轮 / 电极之间的工作空间中的剪切层的径向的漩涡核心 (vortex core) 将流体径向向内引到轴 a-a,并且通过与大约在顶部叶轮的中心的轴向排放口 9a 相通的轴向排放导管 9 引出工作空间。在本实施例中,此轴向提取的流体是同时电解二氧化碳和水的轻馏分产物,即一氧化碳和氢气,一种被称为合成气的混合物。从工作空间提取的合成气在合成气容器 11 中被收集。合成气可以直接用作燃料或转化为其它产物例如液态交通工具用燃料。对于水电解,轻馏分产物将是氢气。对于甲烷裂化,轻馏分产物将是氢气。

[0124] 横跨轴向排放导管 9 的是用于使夹带的水蒸汽冷凝的冷却筛 12a。冷却筛通过包括流体且与冷却设备(未显示)相通的冷却储存器(reservoir) 12 来保持冷却。从冷却筛滴落的冷凝物落回到折流板 5 上,并且旋转中的折流板从轴 a-a 径向向外平流输送冷凝物返回到工作空间。

[0125] 叶轮 / 电极 3、4 优选地会聚到收缩部分 7。在收缩部分和在工作空间的使叶轮 / 电极进一步会聚的所有位置处,通过漩涡核心朝向轴 a-a 的轴向喷射是由被称为漩涡 - 壁相互作用的现象引起的。见图 6。

[0126] 设置在工作空间中的折流板 5 起到使轴向排放口 9a 与轴向进料口 2a 分隔的作用,以便进料不会直接从轴向排放口出去,而是从轴向进料口被引向径向向外。折流板优选地是电介质材料。在此显示的折流板由叶片 6 连接到底部叶轮 / 电极 3。可选择地,折流板可以是设置在轴向进料口和轴向排放口之间的固定结构,通过适当的设备连接到轴向进料导管和轴向排放导管,而且包括流动引导设备,例如用于改善从漩涡核心提取诸如合成气的轻馏分电解产物的径向喷嘴。连接叶片 6 用来在底部叶轮 / 电极 3 旋转时从轴 a-a 径向向外平流输送进料。折流板、叶片和底部叶轮 / 电极构成了用于进料的离心泵。可旋转的叶片和折流板组件的细节在图 10 中显示。

[0127] 将至少一个磁体 8 设置成使得其磁极在所述导电部分处横跨反向旋转的叶轮 / 电极 3、4。在此显示的是具有所标明极性的两个环状磁体和磁极之间的轴向磁场 B。优选地,每一个磁体 8 都是包括用于控制电流的设备(未显示)以便调整磁场 B 的强度的电磁体。当叶轮 / 电极围绕轴 a-a 反向旋转时,磁场 B 的线与叶轮 / 电极的相对的导电部分相交,并且每一个叶轮 / 电极的通过所述导电部分的电流流动是径向相反的。

[0128] 可选择地,磁体 8 可以是围绕轴向进料导管和轴向排放导管的线圈,且线圈之间有 B 场。在那个可选择的实施方案中,叶轮 / 电极的导电部分在其旋转轴附近,并且通过所述 B 场旋转。

[0129] 由于近似平行的圆盘 3、4 通过磁体 8 的磁极之间的 B 场而反向旋转,所以圆盘变成圆盘发电机(有时称为同极发电机、单极发电机或法拉第圆盘)。每一个圆盘既是发电机的电枢又是电容器的极板。顶部叶轮 / 电极 4 变成具有(常规的)径向向内的电流流动(和

径向向外的电子流动)的阴极,以及底部叶轮 / 电极 3 变成具有径向向外的电流流动(和径向向内的电子流动)的阳极。

[0130] 横跨工作空间的面向彼此的带相反电荷的电极是由所述相反的电流流动引起的。圆盘的反向旋转形成动态电容器,此动态电容器具有在工作空间中的作为其电介质的气体和作为其极板的圆盘发电机的电枢。通过拒绝给予用于电流流过气体的稳定路径,极板之间的剪切层中的湍流防止在叶轮 / 电极 3、4 之间电弧放电(arcing)。电极处的电解以氧化还原反应发生,而本体中的电解通过进入剪切进料的电能发生。所述电解的产物包括轻馏分和重馏分。轻馏分具有小于进料的密度(摩尔质量),而重馏分具有大于轻馏分的密度。例如,甲烷裂化产生的氢气具有 2g/mol 的摩尔质量,而甲烷进料是 16g/mol,以及碳离子是 12g/mol。当进料在其径向向外流动的过程中在高端流中裂化时,从轴 a-a 径向向外穿过工作空间的外周来平流输送电解的重馏分产物,而径向向内至轴向排放口 9a 来平流输送轻馏分产物。

[0131] 当二氧化碳和水被同时电解时,通过轴向排放口 9a 提取的轻馏分产物包括氢气和一氧化碳,一种被称为合成气的混合物。因此二氧化碳被裂化成可以用作燃料的有用的产物。重馏分产物包括氧气和元素碳。氧气可以进一步电解成臭氧,且高 E 场中的受机械力的高剪切下的碳可以被合成为长纳米管。通过工作空间的外周从反应器提取氧气、臭氧和碳。

[0132] 从外周喷射的纳米结构可撞击衬底 20(在此未显示,见图 17)而且变成嵌入在衬底内。衬底是在叶轮 / 电极之间的工作空间的外周用于收集电解的重馏分产物的一种设备。

[0133] 在图 2 中显示的工作空间的外周,由于在分隔的叶轮 / 电极 3、4 上大量的相反电荷,因而在圆盘发电机之间存在强的电场。可以通过调整电磁体 8 的线圈中的电流、叶轮 / 电极 3、4 的旋转速度和其之间的间距来调整电场的强度。

[0134] 用于防止电弧放电的设备被设置在每一个圆盘发电机的轴向部分。所述放电防止设备包括覆盖圆盘的面向工作空间的表面的电介质阻挡物 17,和啮合电极的轴向部分的接触器 18,以便从所述轴向部分引出电流且通过电阻负载使其耗散或将其直接放电到地面上。接触器 18 的接触点的位置优选地在密封件 13 之前,以便防止对密封件 13 的损害。适当的接触器 18 包括可滑动的刷子(brushes)或高电流 DC 发电机领域的技术人员已知的其它设备。所述轴向放电防止设备防止合成气和氧气在反应器里面着火。

[0135] 由于叶轮 / 电极 3、4 之间的,其外周处的,在收缩部分 7 之外的放电,所以发生径向的轨道炮效应。放电磁场与圆盘内的 B 场(叶轮 / 电极 3、4 之间的同心磁场 - 见图 13a)之间的相互作用推动离子化的气体和夹带的诸如固体碳和碳纳米管的逐渐形成的固体结构径向向外远离轴 a-a。由于已知来自轨道炮的效应,其在此将被称为径向轨道炮效应,设置成横跨工作空间的外周的衬底(未显示)被撞击和镀覆高能矛状物的纳米结构。参见图 17。

[0136] 常规的轨道炮是一种线性推进设备,具有连接到 DC 电路中的电源的导电的平行轨道。连接轨道的是导电的保险丝。发射体置于导电的保险丝之前。当使高电流沿着轨道流动时,连接轨道的保险丝被蒸发并且离子化。通过离子化的保险丝的电弧放电引起强的磁场,此强的磁场具有与轨道之间的磁场线相同指向的磁场线,因此,保险丝放电(fuse discharge)和其结合的离子化气体和发射体一起沿着轨道被推出。由于轨道炮效应,加速

度可以非常高,高达 10^6 ,产生大约为每秒数千米量级的速度。

[0137] 本发明可以设想为许多阵列的径向的轨道炮,其中圆盘叶轮 / 电极 3、4 是轨道,在工作空间中的气体是保险丝,并且斥力的方向是从轴 a-a 径向向外。纳米管、纳米线和其它纳米结构变成径向加速的发射物,从外周发射出来且将它们自身嵌入到衬底中。嵌入衬底中的碳纳米管可制造优良的电容器极板和优良的太阳能收集器。

[0138] 由于在叶轮 / 电极中的相反的径向电流,工作空间中的环状磁场中存在同心的磁场线,如在图 13a 中所显示的。

[0139] 工作空间中的碳离子的漩涡具有其通过径向轨道炮中的放电的径向喷射而径向向外延伸的轴,并且由此增大其涡度。相同的情况也适用于碳蒸气。径向轨道炮效应有助于碳纳米管的形成,这是因为工作空间中的碳离子漩涡是自紧的,即,它们的旋转产生它们自身的螺线管磁场,并且离子通过此场的旋转引起将旋转的离子推向漩涡轴的磁力,从而在正反馈回路中加速漩涡和加强螺线管磁场,等等。见图 11a 和 11b。碳离子漩涡的自紧克服类似带电物质的静电排斥且将碳离子漩涡挤压成管状富勒烯或碳纳米管。碳蒸气在漩涡中掠过且变成逐渐形成的纳米管的阴极末端。

[0140] 通过根据本发明的径向反应器,使用适当的原料,例如氮化硼、金、金属二硫属化合物(metal dichalcogenide) (MX_2 ($M=Mo、W、Nb、Ta、Hf、Ti、Zr、Re$; $X=S、Se$))、金属氧化物、金属二卤化物和其它无机纳米管、纳米卷(nanoscrolls)、纳米芽(nanobuds)或纳米纤维,可以合成除纯碳外的其它纳米纤维或纳米管。即使呈无定形的形式,从本发明的反应器发射的固体是从工作空间的外周以径向轨道炮效应产生的高径向加速度发射的,此固体将具有非常高的动能。这可能使它们适用于强粘合的、厚的和牢固的镀覆,例如金刚石镀覆,即使是在非金属衬底上进行镀覆。另一个应用是用于太阳能电池板,此太阳能电池板具有用于将太阳能收集到衬底中的碳纳米管的嵌入的细毛(fuzz)。

[0141] 绝缘密封件 13 将叶轮 / 电极与轴向进料导管 2 和轴向排放导管 9 的固定部分分隔。绝缘密封件是电介质材料。电介质 17 使顶部电极 4 的轴向部分和轴向排放导管 9 与由轴向吸入泵 10 平流输送的流体分隔。折流板 5 优选地也用电介质防护。电介质 17 的目的是当通过轴向排放导管 9 轴向提取合成气时防止通过合成气放电。接触器 18 在叶轮 / 电极的在工作空间和密封件 13 之间的轴向部分上滑动,刷子连接到地而且具有或不具有中间的电阻负载,这将使轴向圆盘电荷放电,造成工作室内通过合成气进行的放电。

[0142] 在工作空间中,当叶轮 / 电极 3、4 反向旋转时,存在靠着每一个叶轮 / 电极的边界层,其中由于动量从叶轮 / 电极的粘性扩散(viscous diffusion),流体径向向外流动。在边界层之间是剪切层,其中流动是湍流的。这是开放系统中的冯·卡门旋转流($s \sim -1$),具有连续的质量流入(通过轴向进料口 2a)和流出(通过轴向排放口 9a,并且也通过工作空间的外周流出)。注意到,这和封闭系统(无质量流入或流出)不同,例如通常结合冯·卡门旋转流研究的磁流体动力学装备。

[0143] 湍流障碍妨碍径向向外流过剪切层,迫使到来的进料围绕剪切层并且靠着发生氧化还原反应的电极。虽然单个圆盘发电机的外周和轴之间的电压可能小(小于 3 伏特),但是此小电压大于足够用于在叶轮 / 电极 3、4 的表面进行氧化还原反应的电压。动态电容器的每一个圆盘发电机中的电流是非常大的,所以大的相反的电荷横跨工作空间。电荷间距是叶轮 / 电极的表面之间的距离而不是圆盘发电机的半径。通过改变外周的驱动轮的直径,

可以改变电荷间距。外周的驱动轮也防止叶轮 / 电极由于它们的大的相反的电荷的吸引而聚集在一起。

[0144] 叶轮 / 电极 3、4 之间的高剪切防止横跨工作空间的电弧放电和引起各向异性的湍流。工作空间的剪切层中的大规模的漩涡分叉成分形的分支网状，从轴 a-a 辐射的漩涡树状阵列。每一个径向树状漩涡是低压力梯度的网络，其中低压力梯度是将毛细管细结构连接到粘合的大规模结构的汇流通路。轴向吸入泵 10 将这些漩涡核心中的电解的轻馏分产物径向向内引到轴 a-a，而同时将电解的重馏分产物在边界层中径向向外靠着叶轮、围绕剪切层来平流输送。叶轮 / 电极 3、4 与轴向吸入泵 10 相结合构成了由机械能驱动的径向逆流推动体系。径向逆流的细节在图 4、图 5 和图 7 中显示。

[0145] 另外，被称为漩涡 - 壁相互作用的现象将汇流穿过剪切层的漩涡核心径向向内挤压到轴 a-a。漩涡 - 壁相互作用的细节在图 6 中显示。在工作空间的收缩部分 7 处，叶轮 / 电极 3、4 会聚且变成更紧密地分隔，遇到收缩部分 7 的漩涡驱动轴向的回弹喷射，通过漩涡核心径向向内至轴 a-a 而远离收缩部分 7。从而，在工作空间的此区域的小规模的漩涡被挤出它们的轻馏分产物，例如一氧化碳(摩尔质量 28g/mol)和氢气(2g/mol)。例如氧气(32g/mol)、臭氧(48g/mol)、固体碳和液态水的重馏分产物因其高密度而被旋转出剪切层。

[0146] 总的来说，由于工作空间的有序湍流的密度差，因此相对于叶轮 / 电极的旋转轴 a-a，存在进料和电解的重馏分产物径向向外的连续的迁移，以及电解的轻馏分产物径向向内的连续的迁移。当进料在轴 a-a 处连续流入且电解的重馏分产物流出外周时，径向逆流推动体系和剪切层的径向漩涡提供了用于连续地轴向提取电解的轻馏分产物的设备。

[0147] 从收缩部分 7 径向向外是外周环状物，其中反向旋转的叶轮 / 电极一起靠近。优选地，电极包括径向的波纹状物，如在图 8a 和 8b 中所显示的。波纹状峰的周期性相对 (periodic opposition) 在工作空间内引起脉冲电场。频率取决于叶轮 / 电极的旋转速度和每一个叶轮 / 电极上的峰的数量。对于具有 1000 个峰的叶轮 / 电极来说，每一个都以 2 转每秒旋转，那么在叶轮 / 电极之间的脉冲电场的频率将是 4kHz。在工作空间内，电能电容耦合到气体中有助于二氧化碳和水的裂化以便产生合成气，并且也有助于臭氧和纳米管的形成。

[0148] 可选择地，电极包括相对弯曲的叶片 6，而不是径向波纹状物或除径向波纹状物之外。这在图 9 中显示。在反向旋转中，叶轮 / 电极 3、4 造成许多位置相互作用，在这些位置处，叶片靠的足够近以引起在叶片之间的放电，当反向旋转继续时，相互作用的所述位置从轴 a-a 径向向外移动。相对的叶片的实施方案是滑动弧反应器，因为流过电极的进料在收缩部分 7 处被湍流妨碍，所以滑动弧反应器具有长的停留时间的优势，而相互作用的位置处的电弧反复冲击着通过收缩部分 7。

[0149] 在工作空间的外周环形物之间存在径向指向的电势，其中相隔紧密的高度带电的叶轮 / 电极之间，存在大量的自由电子，并且工作空间的轴向部分，即到来的进料提供了场地。用于电子径向向内通过工作空间的路径是沿着任何导电的碳结构，使导电的碳结构转变成在指向进料的结构末端附近电解进料的阴极。微小的阴极使碳原子依附在其阴极末端处以聚积成管状富勒烯或碳纳米管。此细节在图 12 中显示。

[0150] 如在图 13a 中所显示的，在圆盘电枢(叶轮 / 电极 3、4)之间是具有在顶部圆盘 4 的旋转方向上的同心场线的磁场(在外周处的阴极，在轴处的阳极，所以与电子流动相反的

常规的电流在圆盘反电极中是径向向内的)。当带电的物质在漩涡中旋转时,随着带电的物质通过圆盘之间的磁场,它们发生振动。这是磁力学振动,在图 14 中更详细地显示。当漩涡的每一次旋转的下行程(downstroke)时,诸如碳的正离子受到径向向内朝着轴 a-a 的推动力,并且负离子受到径向向外的推动力。

[0151] 湍流漩涡中的磁力学振动使动能转移到分子中,并且从而协助分解。在二氧化碳中旋转通过此同心磁场的碳原子被径向向内牵拉朝向轴 a-a,而氧原子被径向向外牵拉。当上行程(upstroke)时,方向是相反的。每一个漩涡旋转是分子键上的一个应力循环,分子键在那个频率下弯曲直到它们断裂。

[0152] 以与碳离子漩涡旋转通过圆盘发电机之间的同心磁场相同的方式,发生逐渐形成的碳纳米管的磁力学退火。高频磁力学退火改善了填塞(packing)和减少了缺陷。

[0153] 如一氧化碳一样,一些裂化的二氧化碳通过径向的漩涡轴向地提取。二氧化碳的余下部分,加上一些一氧化碳,连同氧气继续径向向外流动通过收缩部分 7。碳化合物的进一步离解脱去第二个氧原子,留下裸露的碳离子。由于叶轮 / 电极 3、4 之间的剪切,碳离子在漩涡中旋转。

[0154] 碳离子的漩涡引起螺线管磁场,如在图 11a 中所显示的。旋转通过它们自身的磁场的碳离子经受磁力,如在图 11b 中所显示的,磁力具有径向向内朝漩涡轴的方向。在正反馈回路中,径向向内的力使旋转速度增加,这使磁场和磁力增加,等等。

[0155] 自紧的碳离子旋风克服类似的带电碳离子的静电排斥以塞进碳纳米管。这些碳离子存在于等离子体中,来自等离子的电子流过逐渐形成的碳离子漩涡,远离在外周的高电子等离子体区域且朝着轴 a-a。每一个逐渐形成的碳结构变成了阴极末端,此阴极末端在工作空间内摇晃且减少在其附近的二氧化碳和一氧化碳。当纳米管的固化端被挤压通过外周且由纤维合成领域已知的适当的设备(未显示)收集时,碳原子聚集到每一个电极末端,连续地逐渐形成大量的碳纳米管。因为旋风旋转,碳离子旋风的螺线管磁场具有相同的极性,因此逐渐形成的纳米管的漩涡保持分离。产生的是平行的纳米管,而不是缠结的束状物。

[0156] 通过逐渐形成的碳结构的电流通过电阻加热使煤烟和半导电结构蒸发。金属的(不切实际的对称)碳纳米管遭受小的电阻加热,因为它们是优良的导体。然后,蒸发的碳结构被回收到金属纳米管中。因此,获得了高期望比例的、高度导电的碳纳米管,而没有混乱的煤烟和有缺陷的结构。成功地通过工作空间而不被蒸发的碳纳米管从工作空间的外周挤出,如在图 12 中所显示的。

[0157] 径向向外通过工作空间中的等离子体的氧气变成臭氧(48g/mol),另一种密实的馏分和纳米管一起被挤压。臭氧氧化无定形碳和有缺陷的结构,但是因为碳原子之间的非常牢固的键,所以合适形成的纳米管耐氧化。断裂的纳米管的端被臭氧氧化,这称为官能化。官能化的位置可在后来用于使其它原子连接到纳米管,或用于使纳米管连接到一起形成织物或结实的电缆。

[0158] 图 3 显示底部叶轮 / 电极 3 的俯视图。显示的是由驱动轴 16 驱动的四个驱动轮 15。驱动轮在底部叶轮 3 上啮合驱动凸缘 14,引起底部叶轮如箭头所示地旋转。可以使用更多或更少的驱动轮。顶部叶轮 4(未显示)在其驱动凸缘处啮合驱动轮,并且通过驱动轮 15 的旋转在与底部叶轮 3 相反的方向上旋转。在图 3 中显示的外周驱动设备允许叶轮 / 电极 3、4 的近似精确的反向旋转,并且允许高转矩来使它们开始旋转。驱动轮也维持紧密相

隔的高度带电的电极之间的分离，并且防止相反的电荷吸引而使电极合在一起。可以使用多于或少于四个的驱动轮。

[0159] 图 4 是当叶轮 / 电极 3、4 围绕轴 a-a 反向旋转时，工作空间的一部分的详细的侧视图。显示的是径向逆流。诸如一氧化碳和氢气(合成气)的电解的轻馏分产物的汇流，以及同时的进料和重馏分产物(例如氧气和元素碳)的源流，发生在工作空间中。汇流通过开放系统中的冯·卡门旋转流中的径向漩涡的核心。冯·卡门旋转流是由径向逆流推动体系引起的，径向逆流推动体系包括同时的轴向泵的吸入和反向旋转的叶轮 / 电极的离心泵送。源流在层流边界层(laminar boundary layer)中沿着叶轮 / 电极 3、4，层流边界层围绕叶轮 / 电极之间的包括汇流通路的剪切层。

[0160] 图 5 显示了一部分工作空间的另一个细节，这次从轴 a-a 观察。流体流动的方向通过磁场的规则来显示：交叉用于流走，并且点用于流向观察者。朝着轴 a-a 流动或汇流是由如在图 1 中所显示的轴向吸入泵 10 的作用以及在图 6 中所显示的漩涡 - 壁相互作用引起的。从轴 a-a 流走是由平流输送引起的，这是由于动量在边界层中从叶轮 / 电极 3、4 转移，叶轮 / 电极 3、4 如箭头所示反向旋转。在层流边界层之间是包括用于汇流的连贯的径向漩涡的剪切层。许多规模的无数漩涡在剪切层中。所有漩涡核心，无论漩涡旋转的方向是什么，都指向轴 a-a。

[0161] 剪切层对漩涡核心中的轻馏分产物的汇流是可渗透的。汇流由在图 1 中显示的轴向吸入泵 10 的作用推动。在漩涡核心中，由于离心漩涡分离，诸如氢气(2g/mol)和一氧化碳(28g/mol)的具有低摩尔质量的馏分是高浓度的，而诸如二氧化碳(44g/mol)的重馏分是低浓度的。低摩尔质量馏分具有低密度，并且在漩涡旋转中离心分离。因此，富含合成气的流体将被轴向泵轴向提取。

[0162] 在层流边界层中，轻馏分是低浓度的，并且重馏分是高浓度的，这是由于所述离心漩涡分离和因剪切层中的湍流障碍对到来的进料产生的障碍。因此，动量将从叶轮 / 电极主要转移到重馏分和进料，留下轻馏分滞后在从轴 a-a 径向向外的流(源流)中。从轴 a-a 径向向内，电解的轻馏分产物是高浓度的，并且从轴 a-a 径向向外，电解的重馏分产物是高浓度的。进料被搁置在重馏分浓度和轻馏分浓度之间，直至其被裂化。进料在叶轮 / 电极之间的处理区中的长的停留时间是由剪切层的湍流障碍和由在收缩部分 7 的漩涡 - 壁相互作用引起的，在图 6 中显示。进料在此反应器中的长的停留时间和电解产物的有效提取是比如滑动弧或滑动弧 II 反应器的现有设备领先的重要一步。

[0163] 图 6 显示工作空间的收缩部分 7 处的示例性的漩涡 - 壁相互作用的细节，其中叶轮 / 电极 3、4 会集成靠近的分离。见 V. Shtern 等人，Ann. Rev. Fluid Mech. 1993, 31:537-66。径向漩涡由叶轮 / 电极 3、4 的反向旋转和轴向泵 10 的吸入推动，径向漩涡从轴 a-a 径向向外靠近收缩部分 7。弯曲的点线流线表示漩涡旋转。向外受限的漩涡遇到障碍物，且漩涡旋转突然停止，这引起轴向的回弹喷射，由直的实心流线显示。轴向的回弹喷射在与到来的漩涡相反的方向上，即朝着轴 a-a，而不是从轴 a-a 径向向外。轴向的回弹喷射具有高的轴向涡度和高的轴向动量。“旋转导致朝向轴的压力降，因此吸引其它的流线到轴；这进一步使旋转集中，从而进一步增加核心内的压力。此正反馈导致轴向涡度和动量的强的积累，即导致漩涡核心的形成。” Id. at p. 551。漩涡核心包括合成气，合成气是通过轴向吸入泵 10 (未显示) 的作用和漩涡 - 壁相互作用的推动力朝着轴 a-a 平流输送的。

[0164] 可选择地,收缩部分可由电介质材料制得,从而把叶轮 / 电极分为两个或更多个环状的同心部分,每一个同心部分通过其自身的磁体带电,且具有其自身的接地设备。这样,工作空间的内部部分和外部部分的放电特征可以根据需要独立地改变。

[0165] 在收缩部分 7 之外,在叶轮 / 电极会聚得更靠近的地方,由于漩涡 - 壁相互作用,高的轴向湍度把碳离子旋风自紧成纳米管,如根据图 11a、11b 和 12 所讨论的。朝着旋转的轴 a-a 的高的轴向动量防止碳漩涡被清除出工作空间,且保持阴极末端在工作空间内摇晃以逐渐形成纳米管。因此漩涡 - 壁相互作用协助碳纳米管的形成。

[0166] 来自电解的氧气径向向外流动通过收缩部分 7,如箭头所表示的。一些氧气可能与合成气一起被轴向提取,这使得在工作空间的轴向区域的抗 - 电弧放电测量尤其重要。氧气可在其到达工作空间的外周的通道中通过电解变成臭氧。未反应的氧气因其较低的密度而被回收返回,而在外周回收臭氧。

[0167] 图 7 显示到来的进料的附近的径向漩涡。漩涡核心处的合成气是通过轴向吸入泵 10 (未显示) 的作用朝着轴 a-a 径向向内平流输送的。同时地,二氧化碳是通过底部叶轮 / 电极 3 和其连接的叶片 6 和折流板 5 (它们构成了离心泵) 的作用径向向外平流输送的。二氧化碳的边界层靠着叶轮电极 3、4 形成,这是因为二氧化碳比合成气密度大,并且因此被从径向漩涡核心退回。冷凝物也被退回到边界层。

[0168] 图 8a 和图 8b 显示了叶轮 / 电极 3、4 之间的一部分工作空间的细节,叶轮 / 电极 3、4 的旋转由箭头显示。显示了叶轮 / 电极两者的波纹状横截面。在图 8a 中,峰与峰相对,引起峰之间的放电。在图 8b 中是 1 秒后的部分,峰与谷相对,并且放电消失。脉冲电场把电能转移到叶轮 / 电极之间的气体,并且把放电脉冲电流转移到逐渐形成的碳纳米管,以便使它们成为指向进料的阴极。优选地,峰由电介质 17 形成,用来防止电极被峰之间的电弧腐蚀。

[0169] 图 9 显示具有交叉的弯曲叶片而不是相对的波纹状物的可选择的实施方案。显示的是一部分底部叶轮 / 电极 3 的俯视图。在底部叶轮 / 电极 3 上的弯曲的叶片 6 由实线显示。在顶部叶轮 / 电极 4 上相对地弯曲的叶片的位置由虚线显示。旋转的方向由箭头显示。交叉点存在于顶部叶轮 / 电极和底部叶轮 / 电极的叠置的叶片之间,且当叶轮 / 电极反向旋转时,这些交叉点径向向外移动。在交叉点处是遍布工作空间的高的电场。由于与电弧连接的叶片的反向旋转,由此高的 E 场引起的任何电弧从轴 a-a 径向向外快速地滑动。因此,电弧不会停留在叶片上,并且防止了腐蚀。与常规的滑动电弧反应器相比,进料在电极之间的停留时间长,以便得到良好的裂化效率,这是因为电弧滑动不依靠气体流动。

[0170] 图 10 显示折流板 5 和叶片 6 的仰视图。折流板 5 可通过叶片 6 连接到底部叶轮 / 电极 3 (未显示)。如由箭头所表示的旋转将进料作为源流从轴向进料导管 2 径向向外平流输送到工作空间中。折流板和叶片形成离心泵的一部分。

[0171] 图 11a 显示碳离子的螺线管漩涡。漩涡由上述径向逆流推动体系推动。漩涡按箭头所表示的进行旋转且漩涡中的正电荷即碳原子的运动引起螺线管磁场,螺线管磁场的北极和南极分别用 N 和 S 表示。显示了远离漩涡核心的碳离子在漩涡中旋转时被磁力 F_B 吸引。

[0172] 图 11b 显示了图 11a 所示的漩涡和磁场中的碳离子。碳离子在漩涡中以速度 v 通过磁场 B 旋转,并且因此经受垂直于其它两个矢量的磁力 F_B 。磁场的方向是对于漩涡轴径

向向内。增加的速度使螺线管 B 场增强，并且因此使磁力增加，这使速度更进一步增加，等等。这就是漩涡流动中的管状碳离子结构的自紧。与用于引起碳离子漩涡的依靠进料压力的常规设备相比，本发明由机械设备中的高剪切推动漩涡。漩涡轴的方向是高度定向和平行的，而不是任意定向的和缠结的。

[0173] 图 12 显示存在等离子体和通过等离子体放电的区域内，通过工作空间的外周被挤压到左边的逐渐形成的碳纳米管的细节。进料和合成气的径向逆流由箭头表示，进料和合成气的径向逆流由反向旋转的叶轮 / 电极 3、4 和轴向吸入泵 10（未显示）的推动体系引起。电解用于纳米管合成的含碳进料的轻馏分产物通过径向漩涡连续地被去除出处理区域。

[0174] 显示了在带相反电荷的电极之间通过等离子（自由电子 e^- ）的短暂的丝状放电（锯齿形线）。碳离子漩涡依靠如根据图 11a 和图 11b 讨论的碳离子漩涡的自紧会聚成牢固的管状结构。碳离子上的力是将带正电荷的离子牵引到阴极的电力 F_E 和将离子径向向内牵引朝着漩涡轴的磁力 F_B 。金属碳纳米管是优良的导电体，所以放电将电子传输通过逐渐形成的金属碳纳米管而远离等离子体和朝着轴 a-a，即，朝着碳离子漩涡中的带正电荷的碳离子并且进入到来的进料中。

[0175] 电子通过逐渐形成的纳米管或其它纳米结构流入进料中，使得逐渐形成的端变成优良的阴极，此优良的阴极减少阴极末端附近的二氧化碳和一氧化碳，并且当离子落入阴极末端且聚合时，使碳离子漩涡结合成具有金属特性的连贯的结构。通过非金属碳结构例如无定形碳或半导体纳米管的放电，蒸发这些结构，因为它们具有比金属碳纳米管高的电阻。蒸发允许在有缺陷的结构中的碳被回收成金属纳米管。根据本发明的反应器产生长的金属碳纳米管，不受过量的半导体纳米管、变形的纳米管或煤烟的妨碍。纤维合成领域已知的适当的设备（未显示）在工作空间的外周之外或之内收集逐渐形成的纳米管。

[0176] 在上面的图 6 中讨论的漩涡 - 壁相互作用维持在工作空间内摇晃的碳纳米管的逐渐形成的阴极末端。轴向回弹喷射使纳米管定向为关于轴 a-a 的径向的，并且因此防止其缠结。

[0177] 与纳米管一起从外周出来的臭氧用来氧化缺陷，并且因此保证生产高质量的纳米管。臭氧也氧化碳纳米管的端盖，使其官能化以便后来组装成有用的结构。臭氧以其自身来说是有价值的材料，并且易于在气化器中借助增加的热量转变成臭氧。

[0178] 图 13a 显示由于在圆盘电极中的径向电流流动而引起的环状磁场，圆盘电极是叶轮 / 电极 3、4。场线是同心的，围绕叶轮 / 电极的旋转轴 a-a。圆盘内的环状 B 场的方向与顶部叶轮 / 电极 4 的旋转方向相同。横穿圆盘的轴向 B 场线指向页面内。

[0179] 图 13b 显示剪切电解过程的示意图。圆盘内的环状 B 场线指向页面内。电极 / 叶轮围绕共同的轴 a-a 反向旋转，并且因此引起在其之间的径向漩涡。显示了一个径向漩涡轴 b-b。

[0180] 图 14 显示旋转通过磁场线 B 的纳米管的退火。逐渐形成的纳米管的漩涡轴是 b-b。正的物质上的磁力 F_B 由箭头表示。磁力的方向随着正的物质通过 B 场的每半个旋转而改变，因此磁力学振动由推动的漩涡引起，并且 B 场横穿漩涡。可能导致逐渐形成的碳纳米管的振动退火和二氧化碳或其它分子的振动分解。

[0181] 图 15 显示叶轮 / 电极的相对的反向旋转的导电部分 19。顶部叶轮 / 电极的导电

部分由实线表示,且底部叶轮 / 电极的导电部分由交叉平行线表示。在这个实施例中,导电部分 19 是相对于叶轮 / 电极的旋转轴径向设置的金属棒。叶轮 / 电极的反向旋转使得每一个叶轮 / 电极的导电部分变成横跨工作空间的周期性相对。两组导电部分旋转通过轴向磁场,且场线指向页面外,并且因此在金属棒中引起相反的径向电流。棒的旋转和与其有关的磁场驱使离子在径向漩涡中旋转。

[0182] 图 16 显示当本发明应用于水电解时的简化图。在此应用中不需要折流板。水的进料进入轴向进料口 2a,并且通过反向旋转的电极 / 叶轮从轴 a-a 被径向向外离心泵送。轴向 B 场存在于磁体 8 的北极和南极之间,磁体 8 横跨反向旋转的叶轮 / 电极的导电部分 19。旋转的方向由弯曲的箭头表示。水分子分解成氢气和氧气。通过径向漩涡朝着轴 a-a 径向向内平流输送氢气,并且通过轴向排放口 9a 被轴向提取。用于这种径向向内的平流输送的合适的设备是轴向吸入泵 10 和漩涡 - 壁相互作用。一个径向漩涡是汇流通路,其轴是 b-b。比氢气密度大的氧气被离心远离漩涡核心并且不能跟随氢气。当水的进料在剪切电解中被裂化时,来自电解的氧气径向向外朝着外周被浓缩。臭氧可能与氧气一起在这个反应器中产生,并且沿着氧气的路径从轴 a-a 径向向外以在外周处收集。

[0183] 第 8 页上的图 17 显示设置横跨叶轮 / 电极 3、4 之间的工作空间的外周的衬底 20 的细节,以便衬底 20 由于上述的径向轨道炮效应与纳米结构撞击。

[0184] 进一步注释

[0185] 讨论已集中在二氧化碳作为纳米管合成的进料,但是,可选择地,进料可以是甲烷、VOC、水、HAP 或交通工具废气。甲烷将裂化成氢气气体和碳,并且氢气气体将作为轻馏分产物被轴向地提取。氢气具有非常低的摩尔质量(2g/mol),所以它将在剪切层的漩涡核心中浓缩且通过轴向泵吸出。或者一氧化碳可以是用于纳米管的进料,氧气气体被轴向地提取。甲烷和二氧化碳的混合物也可以是用于生产合成气和纳米管的合适的进料。

[0186] 包括工艺气体流和燃烧废气的废气可以是进料。气态污染物例如有害的空气污染物(HAP)、二氧化碳、一氧化碳、氮氧化物(NO_x)、硫氧化物(SO_x)、硫化氢(H_2S)、硫醇、挥发性有机化合物(VOC)、含氯氟烃(CFC)和氨通过剪切电解裂化,产生有价值的轻馏分电解产物氢气、氧气、碳和硫。轴向提取的轻馏分可包括具有比进料低的摩尔质量的电解产物,例如氢气,和氮气砂囊以及烟气中的水蒸汽或其它废气体进料。当进料流入且轻馏分被轴向提取时,重馏分例如元素碳、元素硫、水银、粉尘和飞灰可流出外周。径向逆流推动体系中的馏分的离心分离允许高的流速。

[0187] 热废气流例如烟气、发动机废气、燃气涡轮废气和工艺蒸汽可以被裂化,使用进料热量从电场和从剪切中增加能量输入以达到需要的能量以克服待裂化的污染物的键能。这将消除对洗涤器的需求和其伴随的废水和淤积物的处理问题。飞灰将冲刷电极并且防止焦化。

[0188] 本发明公开了一种用于连续剪切电解的反应器,以足够规模化地使二氧化碳转化为合成气来提供碳螯合的备选方案以便解决全球气候变化。连续意指当反应器运行时,在稳定的流动通过过程中,进料进入而产物离开。连续的不是必然地意味着反应器是一直开着的。相对的是分批处理过程(batch process),其中进料停止而该批次继续工作,然后倾倒产物,然后更多的进料被引入用于下一次批次。

[0189] 剪切电解是一个新的概念,使用机械能和电能的组合,加入到进料的焓用来裂化

分子,例如一氧化碳和水,同时防止电极腐蚀和有效地提取径向逆流中的电解产物。实施例不作为限制给出,而是用来说明本发明的重要应用。碳螯合是全球气候变化中主要的未解决的问题,并且剪切电解可以解决碳螯合问题。

[0190] 双圆盘发电机组件在图 1 和图 2 中显示。当叶轮 / 电极 3、4 围绕它们共同的轴 a-a 旋转通过横向的磁场线时,平行的同轴的反向旋转的叶轮 / 电极 3、4 变成平行的圆盘发电机,并且带相反电荷的电极界定在叶轮 / 电极 3、4 之间的工作空间。反向旋转通过共同的横向磁场在图 1 和图 2 中显示。那里的场线来自具有其横跨叶轮 / 电极两者的磁极的单个电磁体。可选择地,每一个叶轮 / 电极可具有其自身的横跨的磁体,或每一个叶轮 / 电极可通过与电源相通的滑动接触器带电。可以使用横跨的磁体的许多不同的构造,例如多个小半径螺旋状电磁体的相对的环形物,或具有宽半径的相对的线圈。

[0191] 根据已知的法拉第圆盘或圆盘发电机的原理,叶轮 / 电极通过无论什么类型的横跨的磁体的横向磁场进行反向旋转,使得电流关于叶轮的旋转轴径向地流入或流出。在反向旋转的叶轮 / 电极中的电流的相反的流动在其上形成相反的电荷,并且因此形成遍布工作空间的电场。反向旋转的电极的波纹状的轮廓引起此电场产生脉冲。见图 8a 和 8b。

[0192] 用于引起叶轮 / 电极反向旋转的设备可以是连接到发动机的一个或多个外周驱动轮 15,如在图 1 和尤其在图 2 中所显示的,或连接到每一个叶轮 / 电极的单独的驱动设备,诸如例如,连接到电动机的带驱动。外周驱动轮的优势是简单、高转矩、耐用、其提供用于驱动叶轮 / 电极的近似精确的反向旋转的设备的事实、和其提供用于保持叶轮 / 电极分离(尽管有来自其相反的电荷的吸引力)的设备的事实。

[0193] 反向旋转的叶轮 / 电极的离心泵送是从轴 a-a 径向向外平流输送流体,该离心泵送提供了用于引入进料流过轴向进料导管并进入工作空间的设备。可通过轴向进料导管上游的一个或多个进料泵提供另外的设备。平流输送意指通过压力或响应机械设备来引起流动。

[0194] 折流板不是本发明的基本的元件,而是用于气态进料的处理时,折流板是优选的。折流板 5 可连接到具有轴向进料口 2a 的叶轮 / 电极,以便形成离心泵的一部分,或者可静态地放置在轴向进料口 2a 和轴向排放口 9a 之间。折流板提供用于防止从轴向进料口到轴向排放口的直接流动的设备,使得进料被叶轮 / 电极径向向外平流输送。静态的折流板也可包括喷嘴或用于引导吸力从轴向吸入泵更直接地朝着向内指向漩涡核心的其它设备,以提取出漩涡核心的内容物以便轴向排放,同时排除具有围绕其的更重产物的区域。

[0195] 当通过反向旋转的叶轮 / 电极的离心泵送将进料径向向外平流输送通过工作空间时,工作空间的剪切层中的径向漩涡,与轴向吸入泵和 / 或漩涡 - 壁相互作用结合,提供了用于同时径向向内朝着轴 a-a 平流输送轻馏分的设备。轻馏分径向向内前行通过漩涡核心,而进料围绕漩涡核心径向向外流动,以径向逆流由叶轮 / 电极 3、4 的旋转和轴向吸入泵 10 的吸力产生的驱动通过工作空间,轴向吸入泵 10 的吸力通过轴向排放导管 9 产生。当进料通过轴向进料导管 2 流入工作空间时,轻馏分流过漩涡核心且连续地流出轴向排放导管。这就是径向逆流推动体系。

[0196] 径向逆流推动体系径向向内驱动轻馏分,径向逆流推动体系也提供了在进料通过轴向进料导管 2 流入工作空间时用于从轴 a-a 径向向外平流输送重馏分和连续地输出到工作空间的外周之外的设备。叶轮 / 电极的离心泵送作用把动量转移到靠着其表面的流体,

由于在剪切层的漩涡中的离心分离，靠着其表面的流体富含进料和重馏分产物。因为进料被电解和轻馏分产物(例如合成气)被径向向内去除，从轴 a-a 径向向外的流体愈加富含重馏分产物。在外周，主要是重馏分产物(例如臭氧和元素碳)。超出叶轮 / 电极的边缘，在外周终止的地方，挤压重馏分产物并且可捕获用于使用。特别感兴趣的是使纳米结构嵌入在衬底中。

[0197] 通过电解产生的氧气可在外周回收，并且重新用于 IGCC 厂，节省从空气中分离氧气的费用，所以本发明提供了用于氧气回收和碳回收的设备。通过从电极和从径向逆流的进料中分离电解产物，防止了产物变回进料的逆反应，并且有利于向前的电解反应。氧气甚至可以被进一步氧化成从这个反应器的外周出来的臭氧。

[0198] 元素碳如煤烟、石墨或富勒烯是反应器的另一种有价值的副产物。用于碳纳米管生产的含碳进料包括二氧化碳、甲烷、丙烷和其它有机化合物。甲烷电解产生的氢气被径向向内除去，并且碳被径向向外平流输送且在高剪切中被挤压出反向旋转的带相反电荷的叶轮 / 电极之间的工作空间的外周。用于使反应器产生纳米管的进料可以是引入的来自另一个反应器的已离子化的进料，使得将不需要电解设备。紧密相隔的反向旋转的圆盘将提供小规模的漩涡，径向地排成行而不是混杂在一起，如在常规的各向同性的湍流中一样，用于把离子卷成纳米管、对其进行退火、清除有缺陷的纳米管或非导电纳米管、以及在连续的过程中从外周挤压出长的纤维。由于径向轨道炮效应，碳纳米管从外周像矛状物射出，嵌入在衬底中。

[0199] 当进料通过轴向进料口被引入时，漩涡 - 壁相互作用和轴向吸入泵的作用驱动电解的氢气和其它轻馏分产物径向向内通过剪切层的漩涡核心，并且连续地离开工作空间。在被引入工作空间之前，可以通过适当的设备使进料离子化。在工作空间的外周，极小规模的漩涡将离子化的进料卷成长的连贯的纳米管、纳米线或其它纳米结构(统称纳米结构)，叶轮 / 电极在工作空间的外周紧密地相隔。

[0200] 当离子的径向漩涡在反向旋转的叶轮 / 电极之间的磁场中旋转时，发生纳米管的磁力学退火。叶轮 / 电极的导电部分中的相反的径向电流引起磁场。扫过漩涡的离子的场线驱使旋转和拉紧被从外周挤压出的纳米结构。

[0201] 对于水电解，氢气(2g/mol)被作为轻馏分产物径向向内除去，并且氧气可能如臭氧一样被径向向外平流输送，并且从工作空间的外周出来而回收。当液态水在高剪切中在电极 / 叶轮之间被离心泵送时，液态水在电极 / 叶轮的表面取代气态电解产物，因为液态水比气态产物密度大，且因此在靠着电极 / 叶轮的边界层中流动。剪切层是收集气态产物的地方，并且剪切层的漩涡离心地分离氧气和氢气，且氢气径向向内流过漩涡核心以便轴向提取，并且氧气径向向外流过外周。氧气进一步被氧化成在外周被回收的臭氧。

[0202] 本发明提供了用于在发电厂和二氧化碳的其它排放场所进行碳和氧气回收的设备。也提供了用于高体积裂化污染物的设备和用于回收有价值的材料例如碳纳米管和氢气的变废为宝的设备。

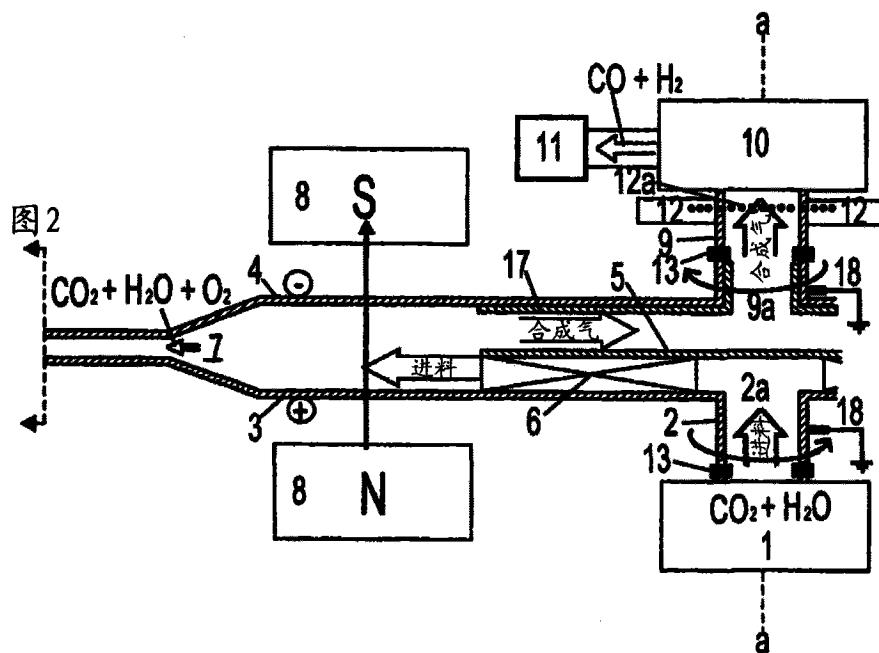


圖 1

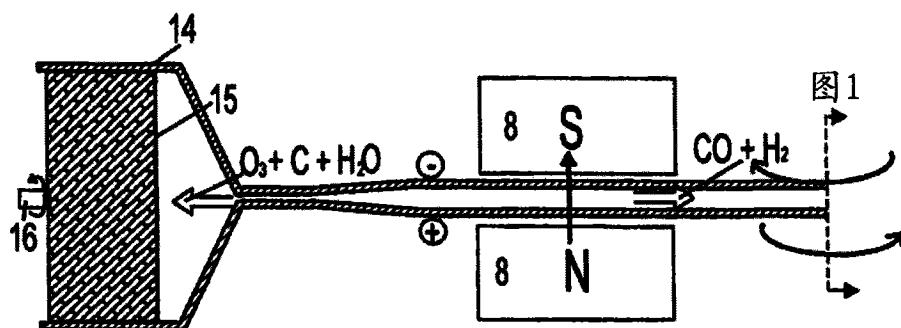


图 2

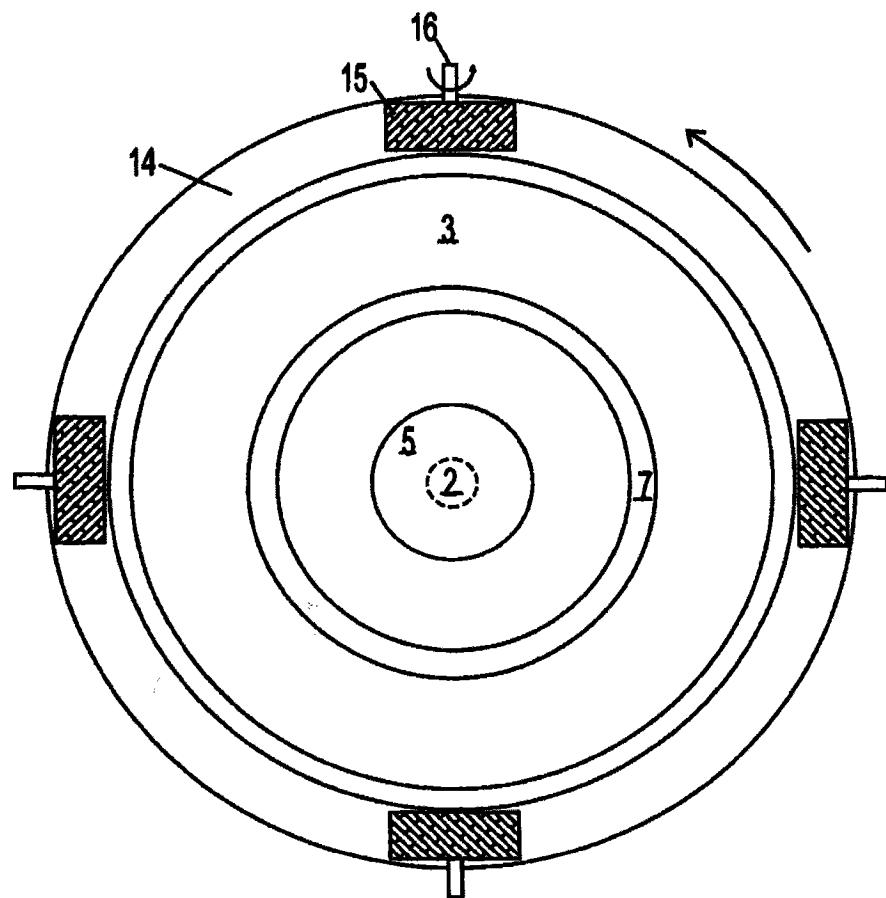


图 3

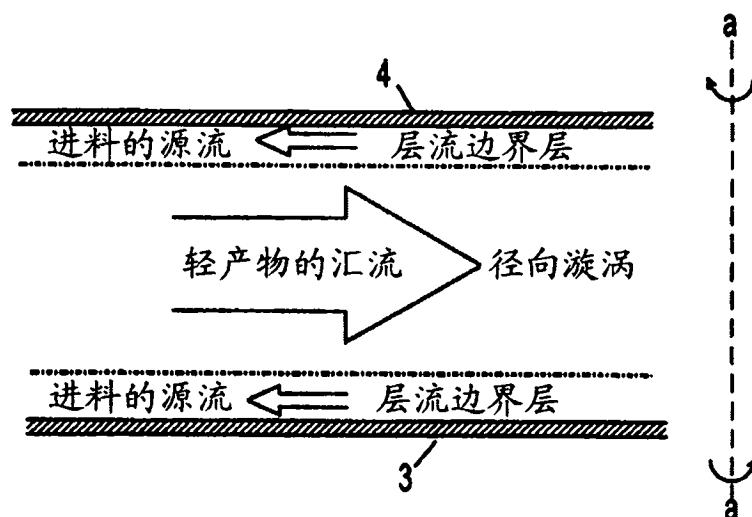


图 4

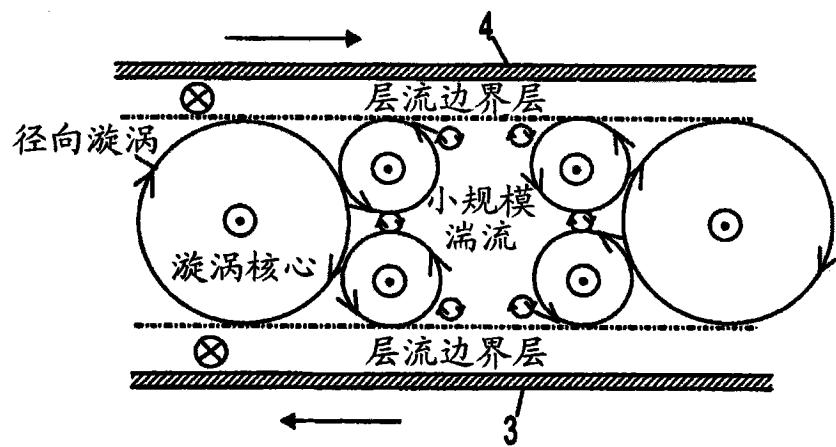


图 5

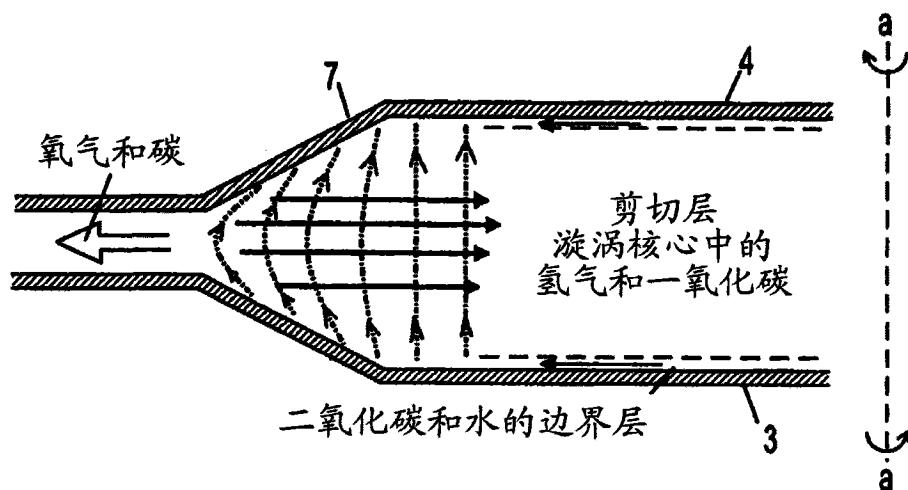


图 6

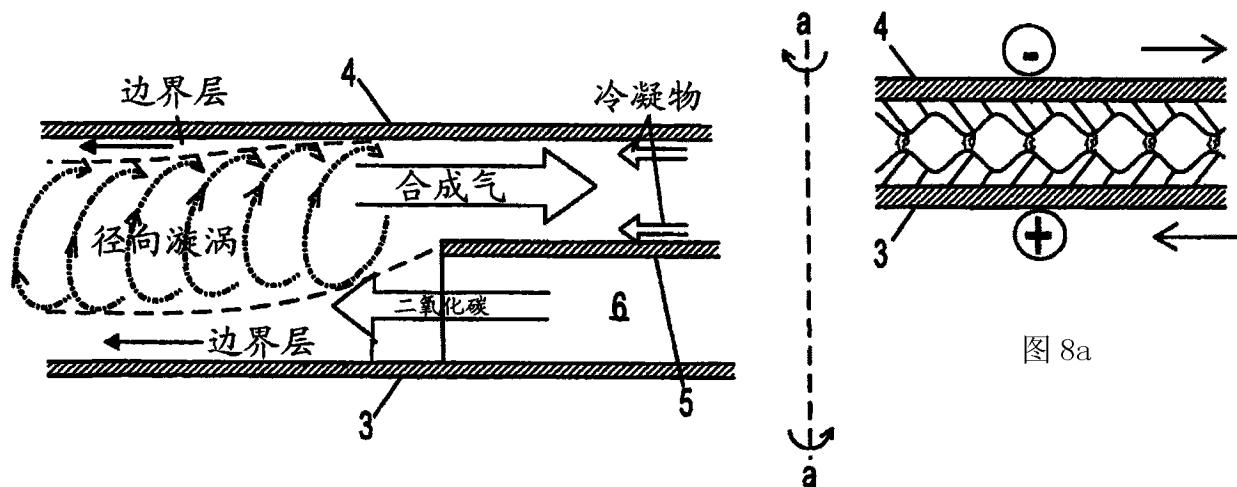


图 7

图 8a

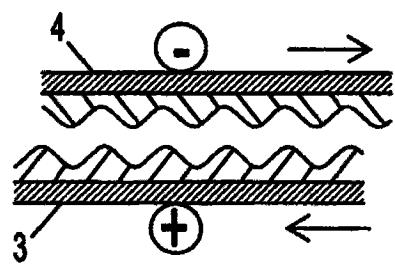


图 8b

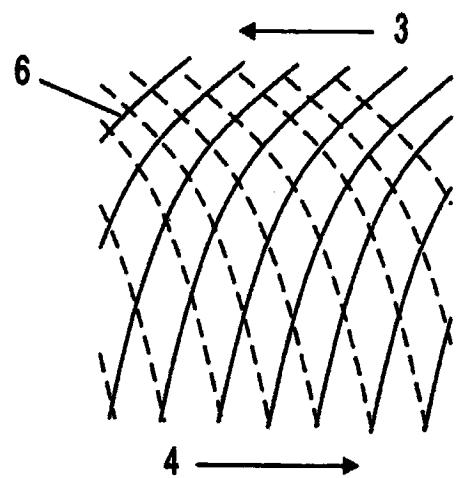


图 9

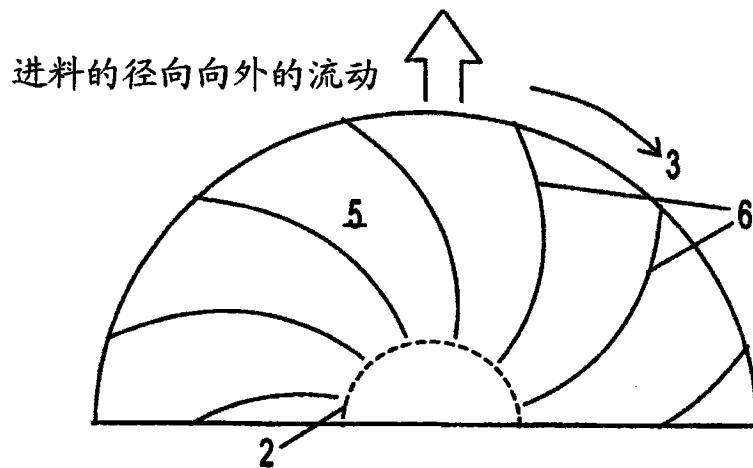


图 10

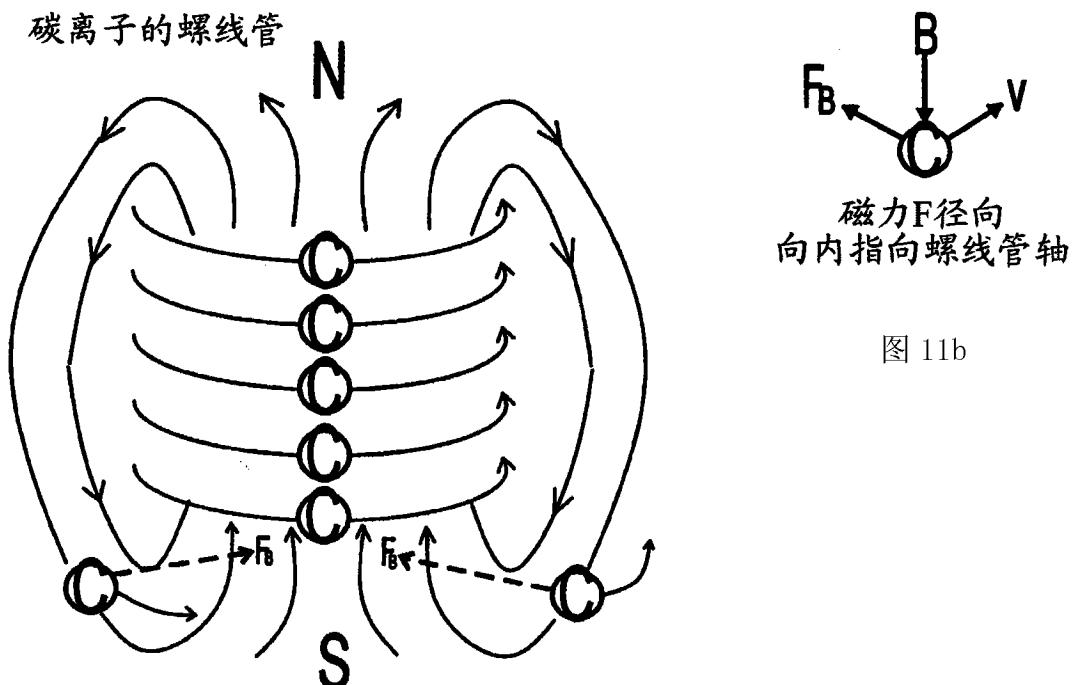


图 11a

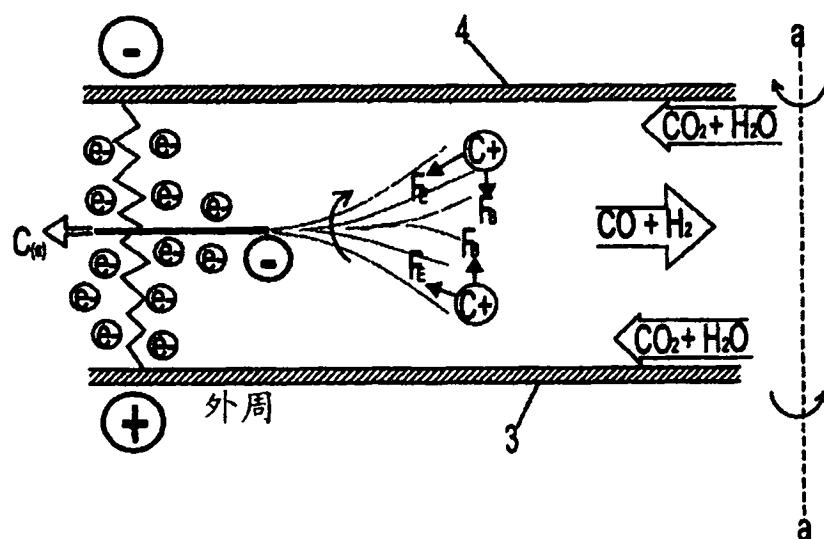
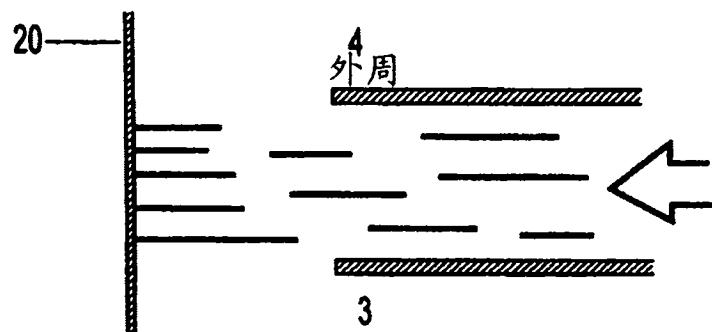


图 12



衬底中嵌入的纳米结构

图 17

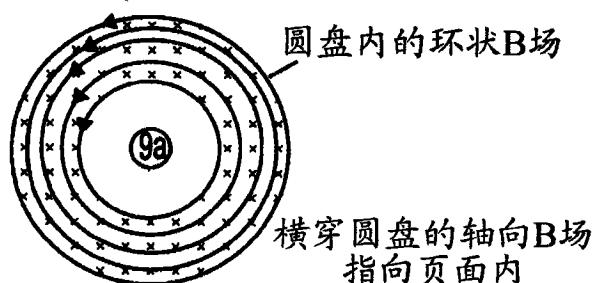


图 13a

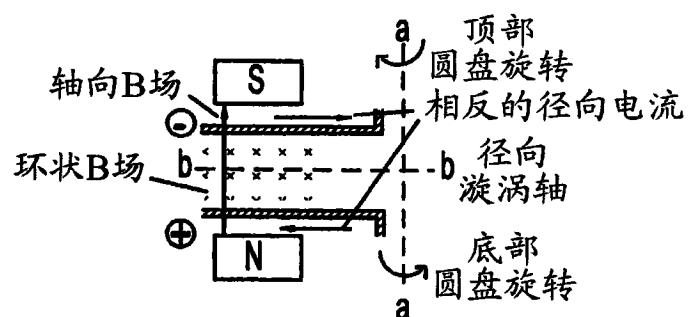


图 13b

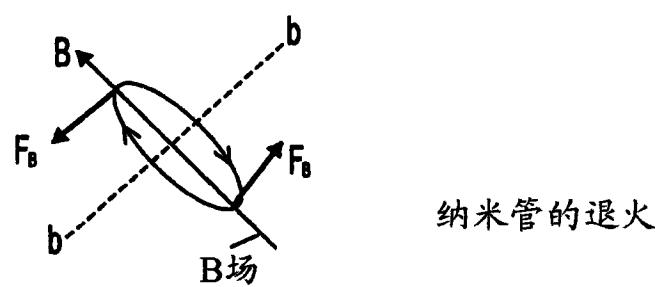


图 14

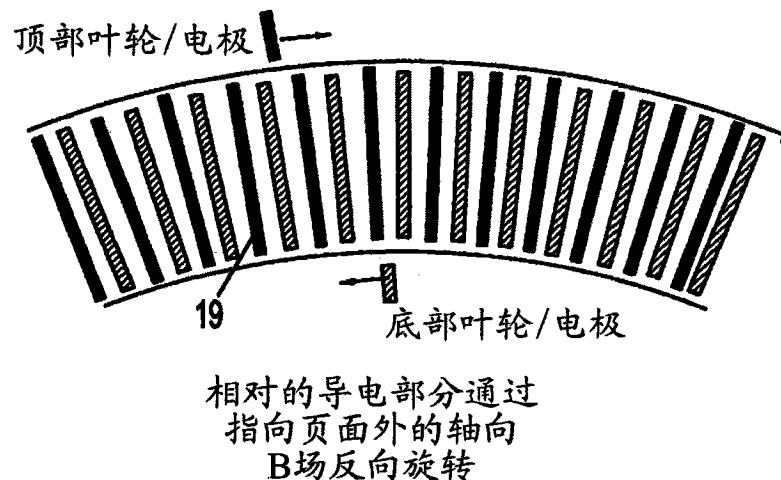


图 15

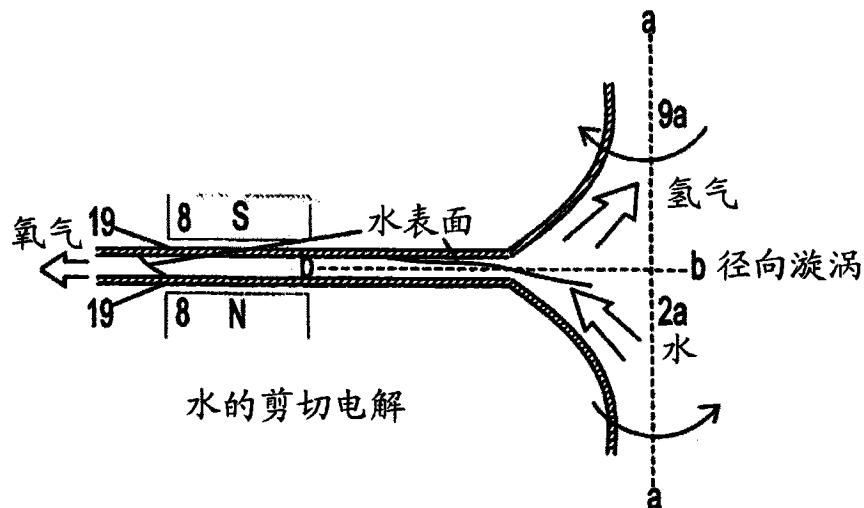


图 16