



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 111278766 B

(45) 授权公告日 2023.05.23

(21) 申请号 201980004595.9

(22) 申请日 2019.01.31

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 111278766 A

(43) 申请公布日 2020.06.12

(66) 本国优先权数据  
201810135990.8 2018.02.09 CN  
201810136781.5 2018.02.09 CN  
201810136786.8 2018.02.09 CN  
201810136792.3 2018.02.09 CN  
201810136801.9 2018.02.09 CN  
201810136805.7 2018.02.09 CN

(85) PCT国际申请进入国家阶段日  
2020.03.19

(86) PCT国际申请的申请数据  
PCT/CN2019/074087 2019.01.31

(87) PCT国际申请的公布数据  
W02019/154245 ZH 2019.08.15

(73) 专利权人 中国石油化工股份有限公司  
地址 100728 北京市朝阳区朝阳门北大街  
22号

专利权人 中石化安全工程研究院有限公司

(72) 发明人 张婧 牟善军 徐伟 石宁  
张树才 董国胜 张铁 王林  
任君朋 孙峰

(74) 专利代理机构 北京润平知识产权代理有限公司 11283  
专利代理师 陈静 刘依云

(51) Int.Cl.  
C01B 17/04 (2006.01)  
C01B 3/04 (2006.01)  
B01D 53/32 (2006.01)  
B01D 53/74 (2006.01)  
B01D 53/52 (2006.01)

(56) 对比文件  
CN 101510493 A, 2009.08.19 (续)  
审查员 万鹏程

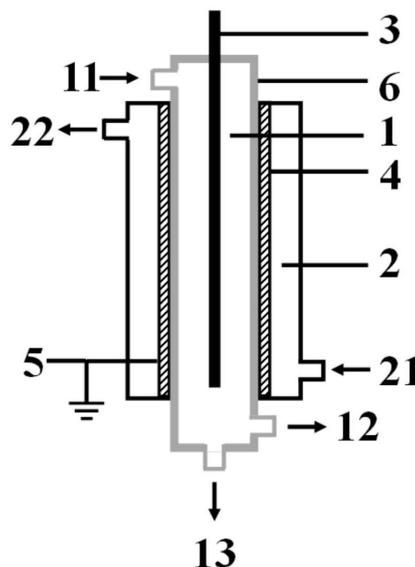
权利要求书4页 说明书25页 附图6页

(54) 发明名称

低温等离子体反应设备和分解硫化氢的方法

(57) 摘要

一种低温等离子体反应设备和分解硫化氢的方法,该反应设备包括:第一空腔(1);第二空腔(2),所述第二空腔(2)嵌套在所述第一空腔(1)的内部或外部;内电极(3),所述内电极设置在所述第一空腔(1)中;外电极(4);设置在外电极和内电极之间的阻挡介质。该分解硫化氢的方法包括:在低温等离子体反应设备的外电极(4)和内电极(3)进行介质阻挡放电,将含有硫化氢的原料气引入至第一空腔(1)中进行硫化氢的分解反应,并且,持续向第二空腔(2)中引入导热介质以控制所述低温等离子体设备的第一空腔(1)的温度。



CN 111278766 B

[接上页]

(56) 对比文件

CN 102239016 A, 2011.11.09

DE 3403651 A1, 1985.08.08

GB 419787 A, 1934.11.19

US 4404180 A, 1983.09.13

AT 102241 T, 1994.03.15

1. 一种低温等离子体反应设备,该反应设备包括:

第一空腔(1),所述第一空腔(1)上分别设置有第一入口(11)和第一出口;

第二空腔(2),所述第二空腔(2)嵌套在所述第一空腔(1)的外部,且所述第二空腔(2)上分别设置有第二入口(21)和第二出口(22);

内电极(3),至少部分所述内电极(3)伸入所述第一空腔(1)中;

外电极(4),形成所述第一空腔(1)的至少部分侧壁或者环绕设置在所述第一空腔(1)的侧壁上;以及

阻挡介质(6),所述阻挡介质(6)设置在所述内电极(3)和所述外电极(4)之间,使得所述内电极(3)和所述外电极(4)之间的放电区域由所述阻挡介质(6)间隔;

该反应设备中还包括:嵌套在所述第一空腔(1)的内部的第三空腔(7),且所述内电极(3)形成所述第三空腔(7)的至少部分侧壁或者环绕设置在所述第三空腔(7)的侧壁上;所述第三空腔(7)上分别设置有第三入口(71)和第三出口(72);

所述第三空腔(7)与所述第二空腔(2)分立所述第一空腔(1)的两侧,并且,所述第三空腔(7)与所述第二空腔(2)中均用于持续导入和导出导热介质,在所述第三空腔(7)中,导热介质能够自所述第三入口(71)引入,并且能够自所述第三出口(72)引出;

所述内电极(3)和所述外电极(4)均为固体电极,且两者的形状相互配合以形成等径结构;

所述内电极(3)的外侧壁和所述外电极(4)的内侧壁之间的距离为 $L_1$ ,所述阻挡介质(6)的厚度为 $D_1$ , $L_2=L_1-D_1$ ,且 $L_2$ 与 $D_1$ 之间的比例关系为 $(0.1\sim 100):1$ ;

所述第一出口包括气体产物出口(12)和液体产物出口(13),且所述气体产物出口(12)设置在所述第一空腔(1)的下部,以及所述液体产物出口(13)设置在所述第一空腔(1)的底部;

所述气体产物出口(12)设置在所述放电区域的下方,且所述气体产物出口(12)的设置位置相对于所述第一空腔(1)底部的高度 $H_1$ 与所述放电区域的长度 $L_3$ 之间的比例关系为: $H_1:L_3=1:(0.05\sim 25000)$ 。

2. 根据权利要求1所述的低温等离子体反应设备,其中,所述 $L_2$ 与所述 $D_1$ 之间的比例关系为 $(0.1\sim 30):1$ 。

3. 根据权利要求1所述的低温等离子体反应设备,其中,所述 $L_2$ 与所述 $D_1$ 之间的比例关系为 $(0.2\sim 15):1$ 。

4. 根据权利要求1所述的低温等离子体反应设备,其中,所述第二空腔(2)嵌套在所述第一空腔(1)的外部,该反应设备中还包括:嵌套在所述第一空腔(1)的内部的第三空腔(7),且所述内电极(3)形成所述第三空腔(7)的至少部分侧壁或者环绕设置在所述第三空腔(7)的外侧壁上。

5. 根据权利要求1或2所述的低温等离子体反应设备,其中,所述阻挡介质(6)形成所述第一空腔(1)的至少部分侧壁,或者

所述阻挡介质(6)环绕设置在所述第一空腔(1)的内侧壁上。

6. 根据权利要求1或2所述的低温等离子体反应设备,其中,所述第一空腔(1)由阻挡介质(6)形成。

7. 根据权利要求1或2所述的低温等离子体反应设备,其中,所述外电极(4)环绕设置在

所述第一空腔(1)的外侧壁上,且所述阻挡介质形成所述第一空腔(1)的至少部分侧壁。

8. 根据权利要求1或2所述的低温等离子体反应设备,其中,所述阻挡介质(6)设置在所述内电极(3)的至少部分外表面上,使得所述内电极(3)的至少部分外表面上包裹有所述阻挡介质(6)。

9. 根据权利要求1或2所述的低温等离子体反应设备,其中,所述阻挡介质(6)环绕设置在所述内电极(3)和所述外电极(4)之间,且分别与所述内电极(3)和所述外电极(4)之间的距离均大于0。

10. 根据权利要求1或2所述的低温等离子体反应设备,其中,所述第一空腔(1)的个数为1个。

11. 根据权利要求10所述的低温等离子体反应设备,其中,所述第一空腔(1)由至少两个平行设置且顶部和底部分别对应相通的反应管构成;且各个所述反应管中分别设置有所述内电极(3)、所述外电极(4)和所述阻挡介质(6)。

12. 根据权利要求11所述的低温等离子体反应设备,其中,在各个所述反应管中, $L_2$ 与 $D_1$ 之间的比例关系为: $L_2:D_1=(0.1\sim 100):1$ 。

13. 根据权利要求11所述的低温等离子体反应设备,其中,在各个所述反应管中, $L_2$ 与 $D_1$ 之间的比例关系为: $L_2:D_1=(0.1\sim 30):1$ 。

14. 根据权利要求11所述的低温等离子体反应设备,其中,在各个所述反应管中, $L_2$ 与 $D_1$ 之间的比例关系为: $L_2:D_1=(0.2\sim 15):1$ 。

15. 根据权利要求11-14中任意一项所述的低温等离子体反应设备,其中,各个所述反应管中的内电极(3)彼此并联连接。

16. 根据权利要求11-14中任意一项所述的低温等离子体反应设备,其中,各个所述反应管中的内电极(3)彼此并联连接,各个所述反应管中的外电极(4)彼此并联连接。

17. 根据权利要求1或2所述的低温等离子体反应设备,其中,所述第一空腔(1)的个数为2个以上,且各个所述第一空腔(1)中分别设置有所述内电极(3)、所述外电极(4)和所述阻挡介质(6)。

18. 根据权利要求17所述的低温等离子体反应设备,其中,各个所述内电极(3)彼此并联连接。

19. 根据权利要求17所述的低温等离子体反应设备,其中,各个所述内电极(3)彼此并联连接,各个所述外电极(4)彼此并联连接。

20. 根据权利要求1或2所述的低温等离子体反应设备,其中,所述阻挡介质的材质为电绝缘材料;

所述外电极(4)和所述内电极(3)各自独立地选自导电材料。

21. 根据权利要求1或2所述的低温等离子体反应设备,其中,所述阻挡介质的材质选自玻璃、石英、陶瓷、搪瓷、聚四氟乙烯和云母中的至少一种;

所述外电极(4)和所述内电极(3)各自独立地选自石墨管、石墨粉、金属棒、金属箔、金属网、金属管、金属粉和石墨棒中的至少一种。

22. 根据权利要求1或2所述的低温等离子体反应设备,其中,该反应设备还包括接地线(5),所述接地线的一端与接地电极电连接,所述接地电极为所述外电极(4)或所述内电极(3),且所述外电极(4)和所述内电极(3)中的另一者为高压电极。

23. 根据权利要求1或2所述的低温等离子体反应设备,其中,所述第一入口(11)设置在所述第一空腔(1)的上部,以及所述第一出口设置在所述第一空腔(1)的下部和/或底部。

24. 根据权利要求1所述的低温等离子体反应设备,其中,所述气体产物出口(12)设置在所述放电区域的下方,且所述气体产物出口(12)的设置位置相对于所述第一空腔(1)底部的高度 $H_1$ 与所述放电区域的长度 $L_3$ 之间的比例关系为 $H_1:L_3=1:(0.1\sim 10000)$ 。

25. 根据权利要求1所述的低温等离子体反应设备,其中,所述气体产物出口(12)设置在所述放电区域的下方,且所述气体产物出口(12)的设置位置相对于所述第一空腔(1)底部的高度 $H_1$ 与所述放电区域的长度 $L_3$ 之间的比例关系为 $H_1:L_3=1:(0.5\sim 1000)$ 。

26. 根据权利要求1或2所述的低温等离子体反应设备,其中,所述第二入口(21)和所述第二出口(22)分别设置在所述第二空腔(2)的下部和上部。

27. 根据权利要求1所述的低温等离子体反应设备,其中,所述第三入口(71)和所述第三出口(72)分别设置在所述第三空腔(7)的下部和上部。

28. 一种分解硫化氢的方法,该方法在权利要求1-27中任意一项所述的低温等离子体反应设备中实施,该方法包括:将所述低温等离子体反应设备的外电极(4)和内电极(3)中一者与高压电源接通,另一者接地,进行介质阻挡放电,将含有硫化氢的原料气从所述低温等离子体反应设备的第一空腔(1)的第一入口(11)引入至第一空腔(1)中进行硫化氢的分解反应,分解后获得的物流由第一出口引出,并且,持续由第二入口(21)向所述低温等离子体反应设备的第二空腔(2)中引入导热介质以及由第二出口(22)引出所述导热介质以控制所述低温等离子体反应设备的第一空腔(1)的温度;

该方法还包括:持续由第三入口(71)向所述低温等离子体反应设备的第三空腔中引入导热介质以及由第三出口(72)引出所述导热介质以与持续由第二入口(21)向所述低温等离子体反应设备的第二空腔中引入并由第二出口(22)引出的导热介质协同控制所述低温等离子体反应设备的第一空腔(1)的温度。

29. 根据权利要求28所述的方法,其中,所述介质阻挡放电的条件包括:放电电压为2kV~80kV;放电频率为200~30000Hz;

所述分解反应的条件包括:反应温度为0~800°C,反应压力为0-0.6MPa;

含有硫化氢的原料气在所述低温等离子体反应设备放电区域中的停留时间为 $1\times 10^{-5}\sim 120$ s。

30. 根据权利要求28所述的方法,其中,所述介质阻挡放电的条件包括:放电电压为5kV~30kV;放电频率为500~15000Hz;

所述分解反应的条件包括:反应温度为40~500°C,反应压力为0-0.3MPa;

含有硫化氢的原料气在所述低温等离子体反应设备放电区域中的停留时间为 $2\times 10^{-5}\sim 60$ s。

31. 根据权利要求28所述的方法,其中,所述介质阻挡放电的条件包括:放电电压为5kV~20kV;放电频率为500~13000Hz;

所述分解反应的条件包括:反应温度为119~444.6°C,反应压力为0-0.3MPa,

含有硫化氢的原料气在所述低温等离子体反应设备放电区域中的停留时间为 $2\times 10^{-5}\sim 60$ s。

32. 根据权利要求28所述的方法,其中,所述介质阻挡放电的条件包括:放电电压为5kV

~15kV;放电频率为500~13000Hz;

所述分解反应的条件包括:反应温度为119~444.6℃,反应压力为0-0.3MPa,

含有硫化氢的原料气在所述低温等离子体反应设备放电区域中的停留时间为 $2 \times 10^{-5}$ ~60s。

33.根据权利要求28所述的方法,其中,所述硫化氢的分解反应在载气存在下进行,所述载气选自氮气、氢气、氦气、氩气、水蒸气、一氧化碳、二氧化碳、甲烷、乙烷和丙烷中的至少一种。

34.根据权利要求28所述的方法,其中,所述硫化氢的分解反应在载气存在下进行,所述载气选自氢气、氩气、氦气和氮气中的至少一种。

## 低温等离子体反应设备和分解硫化氢的方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及等离子体化学领域,具体涉及一种低温等离子体反应设备和一种分解硫化氢的方法。

### 背景技术

[0002] 硫化氢( $H_2S$ )是一种剧毒、恶臭的酸性气体,不仅会引起金属等材料的腐蚀,而且会危害人体健康,污染环境。目前我国大中型炼油厂均采用传统的克劳斯法(Claus)处理含 $H_2S$ 的尾气,并回收硫磺。该方法只回收了硫化氢中的硫,却将宝贵的氢转化为水。从资源的综合利用角度考虑,在传统的硫化氢回收工艺中,氢资源并没有得到有效的利用。

[0003] 因此,将硫化氢分解为硫磺和氢气逐渐成为了国内外科研工作者重点关注的技术领域。

[0004] 目前,硫化氢分解方法主要包括:高温分解法、电化学法、光催化法和低温等离子体法等。在前述多种方法中,高温热分解法在工业技术上相对成熟,但硫化氢热分解强烈地依赖于反应温度,并且受热力学平衡限制,即使反应温度在 $1000^{\circ}C$ 以上,硫化氢的转化率也仅为20%。另外,高温条件对反应器材质的要求较高,这也会增加运行成本。此外,由于硫化氢热分解转化率低,需要将大量的硫化氢气体从尾气中分离并在系统中循环,因此也降低了装置效率并且增加了能耗,这些均给其大型工业化应用带来困难。采用膜技术虽然可以有有效的分离产物从而打破平衡限制,提高硫化氢转化率,但热分解温度往往会超过膜的极限耐热温度,使膜材料结构遭到破坏。电化学法则存在操作步骤多、设备腐蚀严重、反应稳定性差和效率低等缺点。光催化法分解硫化氢主要借鉴光催化分解水的研究,研究重点集中在开发高效半导体光催化剂等方面。利用太阳能来分解硫化氢,具有能耗低、反应条件温和、操作简单等优点,是较为经济的方法。但这种方法存在处理量小、催化效率低并且催化剂容易失活等问题。

[0005] 与其他分解方法相比,低温等离子体方法具有操作简单,装置体积小,能量效率高等优点,而且其中涉及的反应具有高度的可控性,可在小处理量、难以集中处理情况下灵活地被应用。此外,由于其具有高能量密度和可缩短反应时间的特点,能够在较低温度下将硫化氢进行有效的分解,适合于不同规模、布局分散、生产条件多变的场合。而且,在回收硫磺的同时,低温等离子体方法将氢资源回收,能够实现硫化氢资源化的利用。

[0006] 目前,国内外研究人员对低温等离子体分解硫化氢技术进行了广泛的研究,使用的放电形式主要包括辉光放电、电晕放电、滑动电弧放电、微波等离子体、射频等离子体和介质阻挡放电等。

[0007] CN102408095A使用介质阻挡放电和光催化剂协同分解硫化氢,其方法是将具有光催化活性的固体催化剂填充在等离子体区。然而该方法存在硫化氢分解产生的硫磺会沉积在催化剂床层下方的缺点。

[0008] CN103204466A公开了一种控温式硫化氢分解装置和方法,该装置的特点是中心电极为金属、接地电极为温度可控的循环液体,通过液体接地电极的温度控制,使得硫化氢分

解过程能够连续稳定的进行。另外, CN103204467A公开了一种硫化氢持续稳定分解制取氢气的装置和方法, 该现有技术的特点是以中心电极为金属、接地电极为温度可控的循环液体, 通过液体接地电极进行温度控制, 原料进气方向为周向进气、并以螺旋模式沿轴向逆向通过放电区, 使得产生的硫磺被及时离心分离出来。然而, CN103204466A和CN103204467A公开的方法中为了保证硫化氢尽可能充分地被分解, 需要控制硫化氢的流速使得其在反应器内筒中的停留时间更长以及控制内筒的尺寸使得内筒中单位体积的气体获得的电能更多, 并且, 由于目前的现有技术无法提供功率更大的电源, 使得采用CN103204466A和CN103204467A公开的方法即便是控制硫化氢的停留时间更长以及控制内筒的尺寸以使得内筒中单位体积的气体获得的电能更多也仅仅能够使得硫化氢的最高转化率达到20%左右, 并且, 当硫化氢的最高转化率达到20%左右时, 硫化氢分解反应的能耗相当高, 并不适合于大型工业应用。进一步地, CN103204466A和CN103204467A公开的方法中还存在可用液体接地电极的种类极少的缺陷, 其所公开的盐溶液等一般仅能维持反应器的温度为100℃以下, 而在100℃以下, 单质硫一般为固态, 容易造成反应器的堵塞。

## 发明内容

[0009] 本发明的目的是为了克服现有技术提供的低温等离子体反应设备在用于硫化氢的分解时存在的硫化氢转化率低以及分解能耗高的缺陷, 提供一种新的能够提高硫化氢转化率以及降低分解能耗的低温等离子体反应设备及应用该反应设备分解硫化氢的方法。

[0010] 本发明的“侧壁”与“外侧壁”和“内侧壁”之间的区别为: “外侧壁”和“内侧壁”分别表示“侧壁”外表面和内表面, 若为“侧壁”则表示“外侧壁”和/或“内侧壁”。

[0011] 为了实现上述目的, 第一方面, 本发明提供一种低温等离子体反应设备, 该反应设备包括:

[0012] 第一空腔, 所述第一空腔上分别设置有第一入口和第一出口;

[0013] 第二空腔, 所述第二空腔嵌套在所述第一空腔的外部或内部, 且所述第二空腔上分别设置有第二入口和第二出口;

[0014] 内电极, 至少部分所述内电极伸入所述第一空腔中;

[0015] 外电极, 所述外电极形成所述第一空腔的至少部分侧壁或者环绕设置在所述第一空腔的侧壁上; 以及

[0016] 阻挡介质, 所述阻挡介质设置在所述内电极和所述外电极之间, 使得所述内电极和所述外电极之间的放电区域由所述阻挡介质间隔;

[0017] 所述内电极和所述外电极均为固体电极, 且两者的形状相互配合以形成等径结构;

[0018] 所述内电极的外侧壁和所述外电极的内侧壁之间的距离为 $L_1$ , 所述阻挡介质的厚度为 $D_1$ ,  $L_2 = L_1 - D_1$ , 且 $L_2$ 与 $D_1$ 之间的比例关系为 $(0.1 \sim 100) : 1$ 。

[0019] “等径结构”表示: 当所述内电极的外侧壁光滑时, 所述内电极的外侧壁的任意一点到所述外电极的内侧壁之间的最小距离与所述内电极的外侧壁的其他点到所述外电极的内侧壁之间的最小距离相等的结构; 以及, 当所述内电极的外侧壁不光滑时, 所述内电极的外侧壁上的任意凸起部分的尖端到所述外电极的内侧壁之间的最小距离与所述内电极的外侧壁上的其他凸起部分的尖端到所述外电极的内侧壁之间的最小距离相等的结构; 同

样地,当所述外电极的内侧壁不光滑时,所述外电极的内侧壁上的任意凸起部分的尖端到所述内电极的外侧壁之间的最小距离与所述外电极的内侧壁上的其他凸起部分的尖端到所述内电极的外侧壁之间的最小距离相等的结构。

[0020] 优选地, $L_2$ 与 $D_1$ 之间的比例关系为 $(0.1\sim 30):1$ ;更优选为 $(0.2\sim 15):1$ 。

[0021] 优选地,所述第二空腔嵌套在所述第一空腔的外部,该反应设备中还包括:嵌套在所述第一空腔的内部的第三空腔,且所述内电极形成所述第三空腔的至少部分侧壁或者环绕设置在所述第三空腔的侧壁上;更优选所述内电极形成所述第三空腔的至少部分侧壁或者环绕设置在所述第三空腔的外侧壁上。

[0022] 优选地,所述第二空腔嵌套在所述第一空腔的内部,且所述内电极形成所述第二空腔的至少部分侧壁或者环绕设置在所述第二空腔的侧壁上;更优选所述内电极形成所述第二空腔的至少部分侧壁或者环绕设置在所述第二空腔的外侧壁上。

[0023] 优选情况下,所述第二空腔嵌套在所述第一空腔的内部,该反应设备中还包括:嵌套在所述第一空腔的外部的第三空腔。

[0024] 优选地,所述第三空腔上分别设置有第三入口和第三出口。

[0025] 在本发明中,所述第一空腔、所述第二空腔、所述第三空腔、内电极、外电极、阻挡介质的形状例如可以为圆筒形、蛇形、翅片形、S形、波浪形、螺纹形、狼牙棒形(也即侧壁上具有凸起结构)。

[0026] 根据一种优选的具体实施方式,所述阻挡介质形成所述第一空腔的至少部分侧壁,或者所述阻挡介质环绕设置在所述第一空腔的内侧壁上;更优选所述第一空腔由阻挡介质形成。

[0027] 根据另一种优选的具体实施方式,所述外电极环绕设置在所述第一空腔的外侧壁上,且所述阻挡介质形成所述第一空腔的至少部分侧壁。

[0028] 根据另一种优选的具体实施方式,所述阻挡介质设置在所述内电极的至少部分外表面上,使得所述内电极的至少部分外表面上包裹有所述阻挡介质。所述阻挡介质可以以任何能够固定的方式固定在所述内电极的外表面上,或者,所述阻挡介质也可以以涂层的形式涂覆于所述内电极的外表面上。

[0029] 根据另一种优选的具体实施方式,所述阻挡介质环绕设置在所述内电极和所述外电极之间,且分别与所述内电极和所述外电极之间的距离均大于0。在该优选的具体实施方式中,优选所述阻挡介质固定连接所述第一空腔的顶部和/或底部;更优选,所述阻挡介质中固定连接所述第一空腔的一端设置有孔结构。所述孔结构能够使得所述第一空腔中的物流能够由所述孔结构出入。本发明对所述阻挡介质的固定方式没有特别的限定,只要能够使得所述阻挡介质环绕设置在所述内电极和所述外电极之间即可。

[0030] 在本发明中,所述内电极例如可以为圆柱形,第一空腔为沿轴向等径延伸的空心圆筒,且所述内电极和第一空腔同轴。

[0031] 本发明提供的前述低温等离子体反应设备优选为具有同轴结构的夹套型介质阻挡放电反应设备,其基本结构主要包括内电极、外电极及阻挡介质等,该套筒式结构能够使得导热介质对放电反应设备进行循环加热或冷却,从而实现对放电区域的灵活温度控制。特别地,本发明通过控制 $L_2$ 与阻挡介质的厚度 $D_1$ 的比例关系在特定范围内,以及应用固体内电极和固体外电极时,能够相对于现有技术显著地提高硫化氢的转化率以及降低分解能

耗。

[0032] 本发明的夹套结构设计,能够使得导热介质在壳层循环流动,在保证放电强度的同时可使整个反应设备维持在一定温度范围内,使生成的硫磺以液态形式流出反应设备,能够有效避免硫化氢分解生成的硫磺凝固,可在达到较高的转化率的同时使此分解过程持续、稳定的实现长周期运行。

[0033] 优选地,所述第一空腔的个数为1个。

[0034] 根据一种特别优选的具体实施方式,所述第一空腔由至少两个平行设置且顶部和底部分别对应相通的反应管构成;且各个所述反应管中分别设置有所述内电极、所述外电极和所述阻挡介质。在该特别优选的具体实施方式中,在各个所述反应管中,优选 $L_2$ 与 $D_1$ 之间的比例关系为: $L_2:D_1 = (0.1 \sim 100):1$ ;优选 $L_2:D_1 = (0.1 \sim 30):1$ ;更优选 $(0.2-15):1$ 。在该特别优选的具体实施方式中,优选各个所述反应管中的内电极彼此并联连接。在该特别优选的具体实施方式中,优选各个所述反应管中的外电极彼此并联连接。

[0035] 根据另一种特别优选的具体实施方式,所述第一空腔的个数为2个以上,且各个所述第一空腔中分别设置有所述内电极、所述外电极和所述阻挡介质。在该特别优选的具体实施方式中,优选地,各个所述内电极彼此并联连接。在该特别优选的具体实施方式中,优选地,各个所述外电极彼此并联连接。

[0036] 优选地,所述阻挡介质的材质为电绝缘材料。更优选选自玻璃、石英、陶瓷、搪瓷、聚四氟乙烯和云母中的至少一种。所述玻璃可以为石英玻璃或硬质玻璃;形成所述阻挡介质的材料还可以为其它具有高压电绝缘设计的金属和非金属复合材料等。所述陶瓷可以为氧化铝陶瓷。

[0037] 优选地,所述外电极和所述内电极为导电材料。优选所述外电极和所述内电极可以各自独立地选自石墨管、石墨粉、金属棒、金属箔、金属网、金属管、金属粉和石墨棒中的至少一种。

[0038] 所述金属棒、金属管可以包括单质金属棒、合金金属棒、单质金属管、合金金属管。金属粉可以包括单质金属粉、合金金属粉或单质金属粉和/或合金金属粉的机械混合物。本发明的形成所述电极(包括内电极和外电极)的材料也可以为其它具有导电性能的棒状及管状材料。

[0039] 在本发明中,优选所述内电极和所述外电极中的一者为接地电极,而另一者为高压电极。本领域技术人员可以根据应用需要确定所述内电极和所述外电极的材质。

[0040] 优选地,本发明的反应设备还包括接地线,所述接地线的一端与所述外电极或所述内电极电连接。

[0041] 优选地,所述第一入口设置在所述第一空腔的上部,以及所述第一出口设置在所述第一空腔的下部和/或底部。

[0042] 优选情况下,所述第一出口包括气体产物出口和液体产物出口,且所述气体产物出口设置在所述第一空腔的下部,以及所述液体产物出口设置在所述第一空腔的底部。

[0043] 优选地,所述气体产物出口设置在所述放电区域的下方,且所述气体产物出口的设置位置相对于所述第一空腔底部的高度 $H_1$ 与所述放电区域的长度 $L_3$ 之间的比例关系为: $H_1:L_3 = 1:(0.05 \sim 25000)$ ;优选为 $H_1:L_3 = 1:(0.1 \sim 10000)$ ;更优选为 $H_1:L_3 = 1:(0.5 \sim 1000)$ 。

[0044] 在本发明中,所述“放电区域”表示内电极、外电极以及阻挡介质三者完全重合的区域。

[0045] 本发明的所述第一空腔的内径与所述第一出口的孔径之比可以为(0.1~100):1。

[0046] 本发明的所述第一入口的孔径与所述第一出口的孔径之比可以为(0.1~120):1。

[0047] 本发明的所述第一空腔的长度与所述第一空腔的内径之间的比例可以为(0.5~500):1。该第一空腔的内径表示第一空腔的轴芯到该第一空腔的外侧壁的距离。

[0048] 优选地,所述第二入口和所述第二出口分别设置在所述第二空腔的下部和上部。

[0049] 本发明的所述第一入口可以设置为使得进入所述第一空腔中的原料气与所述第一空腔的内径平行或者呈一定的角度,例如可以切向设置。

[0050] 优选地,所述第三入口和所述第三出口分别设置在所述第三空腔的下部和上部。

[0051] 本发明能够通过所述第二空腔或者以及所述第三空腔内引入导热介质而使得具有夹套结构的反应设备的温度维持在例如119~444.6℃之间。在该情况下,生成的硫磺能够以液体形式持续流出。

[0052] 本发明的所述低温等离子体反应设备中还可以装填有能够催化硫化氢分解成单质硫和氢气的催化剂,所述催化剂优选装填在所述反应设备的第一空腔中。本发明对所述催化剂的装填体积以及装填种类没有特别的要求,关于催化剂的种类,例如可以为CN102408095A、CN101590410A和CN103495427A中公开的催化剂中的任意一种或者多种。

[0053] 本发明提供的前述低温等离子体反应设备能够用于硫化氢的等离子体分解,该反应设备能够产生均匀、高效的介质阻挡放电,从而将硫化氢直接分解生成氢气和硫磺。

[0054] 第二方面,本发明提供一种分解硫化氢的方法,该方法在本发明第一方面所述的低温等离子体反应设备中实施,该方法包括:将所述低温等离子体反应设备的外电极和内电极中一者与高压电源接通,另一者接地,进行介质阻挡放电,将含有硫化氢的原料气从所述低温等离子体反应设备的第一空腔的第一入口引入至第一空腔中进行硫化氢的分解反应,分解后获得的物流由第一出口引出,并且,持续由第二入口向所述低温等离子体反应设备的第二空腔中引入导热介质以及由第二出口引出所述导热介质以控制所述低温等离子体反应设备的第一空腔的温度。

[0055] 本发明的方法优选还包括:持续由第三入口向所述低温等离子体反应设备的第三空腔中引入导热介质以及由第三出口引出所述导热介质以与持续由第二入口向所述低温等离子体反应设备的第二空腔中引入并由第二出口引出的导热介质协同控制所述低温等离子体反应设备的第一空腔的温度。

[0056] 优选情况下,所述介质阻挡放电的条件包括:放电电压为2kV~80kV,优选为5kV~30kV,进一步优选为5kV~20kV,更进一步优选为5kV~15kV;放电频率为200~30000Hz,优选为500~15000Hz,进一步优选为500~13000Hz。

[0057] 优选地,所述分解反应的条件包括:反应温度为0~800℃,优选为40~500℃,进一步优选为119~444.6℃;反应压力为0~0.6Mpa,优选为0~0.3MPa。

[0058] 优选地,含有硫化氢的原料气在所述低温等离子体反应设备放电区域中的停留时间为 $1 \times 10^{-5}$ ~120s,优选为 $2 \times 10^{-5}$ ~60s。

[0059] 优选情况下,所述硫化氢的分解反应在载气存在下进行,所述载气选自氮气、氢气、氦气、氩气、水蒸气、一氧化碳、二氧化碳、甲烷、乙烷和丙烷中的至少一种;更优选地,所

述载气选自氢气、氩气、氦气和氮气中的至少一种。

[0060] 特别优选地,所述载气选自氢气、氩气、氦气和氮气中的至少一种。

[0061] 优选情况下,所述原料气中的硫化氢气体的含量使得所述低温等离子体反应设备的第一入口处的硫化氢气体的含量为 $1 \times 10^{-8}$ ~100%体积%;更优选为10~100%体积%。

[0062] 在本发明中,所述原料气并不包括本发明的前述载气,所述原料气为纯的硫化氢气体或者为工业生产中获得的含有硫化氢以及其它气体的工业废气等,虽然所述原料气中可能会含有与本发明定义的载气相同种类的气体,但是,本发明定义的载气为主动加入以与所述原料气混合的气体,并且,本发明的方法能够对加入的载气量按需进行控制。

[0063] 以下提供一种应用本发明前述的低温等离子体反应设备分解硫化氢的优选的具体实施方式:

[0064] 从第一入口向低温等离子体反应设备的第一空腔中通入保护气体例如氮气,以清除放电区域中的空气,并且气体从第一出口引出。同时,从第二入口向第二空腔中引入导热介质,引入的导热介质从第二出口引出。导热介质的温度保持为系统反应需要的温度。然后从第一入口向低温等离子体反应设备的第一空腔中通入含有硫化氢的原料气,待原料气流平稳之后接通高压电源,通过调节电压和频率使内电极和外电极之间形成等离子体放电场。硫化氢气体在放电区域发生电离,分解为氢气和单质硫,放电产生的单质硫沿第一空腔壁缓缓流下,并从第一出口流出。

[0065] 以下提供另一种应用本发明前述的低温等离子体反应设备分解硫化氢的优选的具体实施方式:

[0066] 从第一入口向低温等离子体反应设备的第一空腔中通入保护气体例如氮气,以清除放电区域中的空气,并且气体从第一出口引出。同时,从第二入口向第二空腔中引入导热介质,引入的导热介质从第二出口引出;以及从第三入口向第三空腔中引入导热介质,引入的导热介质从第三出口引出。导热介质的温度保持为系统反应需要的温度。然后从第一入口向低温等离子体反应设备的第一空腔中通入含有硫化氢的原料气,待原料气流平稳之后接通高压电源,通过调节电压和频率使内电极和外电极之间形成等离子体放电场。硫化氢气体在放电区域发生电离,分解为氢气和单质硫,放电产生的单质硫沿第一空腔壁缓缓流下,并从第一出口流出。

[0067] 本发明提供的低温等离子体反应设备能够在明显较高的硫化氢转化率下实现硫化氢分解过程的持续和稳定进行,并且装置能够实现长周期运行。

[0068] 以及,本发明提供的低温等离子体反应设备还能够用于大流量、高浓度的硫化氢处理过程。

## 附图说明

[0069] 图1a是本发明提供的低温等离子体反应设备的一种优选的具体实施方式的结构示意图,该图中,第二空腔设置在第一空腔的外部。

[0070] 图1b是本发明提供的低温等离子体反应设备的一种优选的具体实施方式的结构示意图,该图中,第二空腔设置在第一空腔的内部。

[0071] 图1c是本发明提供的低温等离子体反应设备的一种优选的具体实施方式的结构示意图,该图中,设置有第三空腔,且第二空腔和第三空腔分立第一空腔的内外两侧。

[0072] 图2a是本发明提供的低温等离子体反应设备的另一种优选的具体实施方式的结构示意图,该图中,第二空腔设置在第一空腔的外部。

[0073] 图2b是本发明提供的低温等离子体反应设备的另一种优选的具体实施方式的结构示意图,该图中,第二空腔设置在第一空腔的内部。

[0074] 图2c是本发明提供的低温等离子体反应设备的另一种优选的具体实施方式的结构示意图,该图中,设置有第三空腔,且第二空腔和第三空腔分立第一空腔的内外两侧。

[0075] 图3a是本发明提供的低温等离子体反应设备的一种优选的具体实施方式的结构示意图,该图中,第二空腔设置在第一空腔的外部。

[0076] 图3b是本发明提供的低温等离子体反应设备的一种优选的具体实施方式的结构示意图,该图中,第二空腔设置在第一空腔的内部。

[0077] 图3c是本发明提供的低温等离子体反应设备的一种优选的具体实施方式的结构示意图,该图中,设置有第三空腔,且第二空腔和第三空腔分立第一空腔的内外两侧。

[0078] 图4a是本发明提供的低温等离子体反应设备的一种优选的具体实施方式的结构示意图,该图中,第二空腔设置在第一空腔的外部。

[0079] 图4b是本发明提供的低温等离子体反应设备的一种优选的具体实施方式的结构示意图,该图中,第二空腔设置在第一空腔的内部。

[0080] 图4c是本发明提供的低温等离子体反应设备的一种优选的具体实施方式的结构示意图,该图中,设置有第三空腔,且第二空腔和第三空腔分立第一空腔的内外两侧。

[0081] 附图标记说明

[0082] 1、第一空腔 2、第二空腔

[0083] 11、第一入口 21、第二入口

[0084] 12、气体产物出口 22、第二出口

[0085] 13、液体产物出口

[0086] 3、内电极

[0087] 4、外电极

[0088] 5、接地线

[0089] 6、阻挡介质

[0090] 7、第三空腔 71、第三入口

[0091] 72、第三出口

## 具体实施方式

[0092] 在本文中所披露的范围的端点和任何值都不限于该精确的范围或值,这些范围或值应当理解为包含接近这些范围或值的值。对于数值范围来说,各个范围的端点值之间、各个范围的端点值和单独的点值之间,以及单独的点值之间可以彼此组合而得到一个或多个新的数值范围,这些数值范围应被视为在本文中具体公开。

[0093] 以下结合图1a提供本发明的低温等离子体反应设备的一种优选的具体实施方式的结构,具体地:

[0094] 该反应设备具有同轴夹套筒式结构,且该反应设备包括:

[0095] 第一空腔1,所述第一空腔1上分别设置有第一入口11和第一出口;

[0096] 第二空腔2,所述第二空腔2嵌套在所述第一空腔1的外部,且所述第二空腔2上分别设置有第二入口21和第二出口22;

[0097] 内电极3,所述内电极3设置在所述第一空腔1中;

[0098] 外电极4,形成第一空腔1的至少部分侧壁或者所述环绕设置在所述第一空腔1的外侧壁上;以及

[0099] 阻挡介质,所述阻挡介质形成第一空腔1的至少部分侧壁或者所述阻挡介质环绕设置在所述第一空腔1的内侧壁上,且所述阻挡介质设置在所述内电极3和所述外电极4之间,使得所述内电极和所述外电极之间的放电区域由所述阻挡介质间隔;

[0100] 所述内电极3和所述外电极4均为固体电极,且两者的形状相互配合以形成等径结构;

[0101] 所述内电极3的外侧壁和所述外电极4的内侧壁之间的距离为 $L_1$ ,所述阻挡介质6的厚度为 $D_1$ , $L_2=L_1-D_1$ ,且 $L_2$ 与 $D_1$ 之间的比例关系为 $(0.1\sim 100):1$ ,优选 $L_2$ 与 $D_1$ 之间的比例关系为 $(0.1\sim 30):1$ ;更优选为 $(0.2\sim 15):1$ 。

[0102] 本发明优选所述外电极4环绕设置在所述第一空腔1的外侧壁上,且所述阻挡介质形成第一空腔1的至少部分侧壁。

[0103] 以下结合图1b提供本发明的低温等离子体反应设备的一种优选的具体实施方式的结构,具体地:

[0104] 该反应设备具有同轴夹套筒式结构,且该反应设备包括:

[0105] 第一空腔1,所述第一空腔1上分别设置有第一入口11和第一出口;

[0106] 第二空腔2,所述第二空腔2嵌套在所述第一空腔1的内部,且所述第二空腔2上分别设置有第二入口21和第二出口22;

[0107] 内电极3,所述内电极3设置在所述第一空腔1中;

[0108] 外电极4,形成第一空腔1的至少部分侧壁或者所述环绕设置在所述第一空腔1的外侧壁上;以及

[0109] 阻挡介质,所述阻挡介质形成第一空腔1的至少部分侧壁或者所述阻挡介质环绕设置在所述第一空腔1的内侧壁上,且所述阻挡介质设置在所述内电极3和所述外电极4之间,使得所述内电极和所述外电极之间的放电区域由所述阻挡介质间隔;

[0110] 所述内电极3和所述外电极4均为固体电极,且两者的形状相互配合以形成等径结构;

[0111] 所述内电极3的外侧壁和所述外电极4的内侧壁之间的距离为 $L_1$ ,所述阻挡介质6的厚度为 $D_1$ , $L_2=L_1-D_1$ ,且 $L_2$ 与 $D_1$ 之间的比例关系为 $(0.1\sim 100):1$ ,优选 $L_2$ 与 $D_1$ 之间的比例关系为 $(0.1\sim 30):1$ ;更优选为 $(0.2\sim 15):1$ 。

[0112] 图1c提供了本发明的低温等离子体反应设备的一种优选的具体实施方式的结构,图1c中提供的低温等离子体反应设备与图1a和图1b中提供的低温等离子体反应设备所不同的是:图1c中的低温等离子体反应设备中还包括第三空腔7,该第三空腔7与第二空腔2分立第一空腔1的两侧,并且,第三空腔7与第二空腔2中均持续导入和导出导热介质。在第三空腔中,导热介质自第三入口71引入,并且自第三出口72引出。

[0113] 以下结合图2a提供本发明的低温等离子体反应设备的一种优选的具体实施方式的结构,具体地:

[0114] 该反应设备具有同轴夹套筒式结构,且该反应设备包括:

[0115] 第一空腔1,所述第一空腔1上分别设置有第一入口11和第一出口;

[0116] 第二空腔2,所述第二空腔2嵌套在所述第一空腔1的外部,且所述第二空腔2上分别设置有第二入口21和第二出口22;

[0117] 内电极3,所述内电极3设置在所述第一空腔1中;

[0118] 外电极4,形成第一空腔1的至少部分侧壁或者环绕设置在所述第一空腔1的内侧壁上;以及

[0119] 阻挡介质6,所述阻挡介质6设置在所述内电极3的至少部分外表面上,使得至少部分伸入所述第一空腔1中的内电极3的外表面上包裹有所述阻挡介质6,以及所述阻挡介质的设置位置使得所述内电极和所述外电极之间的放电区域由所述阻挡介质间隔;

[0120] 所述内电极3和所述外电极4均为固体电极,且两者的形状相互配合以形成等径结构;

[0121] 所述内电极3的外侧壁和所述外电极4的内侧壁之间的距离为 $L_1$ ,所述阻挡介质6的厚度为 $D_1$ , $L_2=L_1-D_1$ ,且 $L_2$ 与 $D_1$ 之间的比例关系为 $(0.1\sim 100):1$ ,优选 $L_2$ 与 $D_1$ 之间的比例关系为 $(0.1\sim 30):1$ ;更优选为 $(0.2\sim 15):1$ 。

[0122] 以下结合图2b提供本发明的低温等离子体反应设备的一种优选的具体实施方式的结构,具体地:

[0123] 该反应设备具有同轴夹套筒式结构,且该反应设备包括:

[0124] 第一空腔1,所述第一空腔1上分别设置有第一入口11和第一出口;

[0125] 第二空腔2,所述第二空腔2嵌套在所述第一空腔1的内部,且所述第二空腔2上分别设置有第二入口21和第二出口22;

[0126] 内电极3,所述内电极3设置在所述第一空腔1中;

[0127] 外电极4,形成第一空腔1的至少部分侧壁或者环绕设置在所述第一空腔1的内侧壁上;以及阻挡介质6,所述阻挡介质6设置在所述内电极3的至少部分外表面上,使得至少部分伸入所述第一空腔1中的内电极3的外表面上包裹有所述阻挡介质6,以及所述阻挡介质的设置位置使得所述内电极和所述外电极之间的放电区域由所述阻挡介质间隔;

[0128] 所述内电极3和所述外电极4均为固体电极,且两者的形状相互配合以形成等径结构;

[0129] 所述内电极3的外侧壁和所述外电极4的内侧壁之间的距离为 $L_1$ ,所述阻挡介质6的厚度为 $D_1$ , $L_2=L_1-D_1$ ,且 $L_2$ 与 $D_1$ 之间的比例关系为 $(0.1\sim 100):1$ ,优选 $L_2$ 与 $D_1$ 之间的比例关系为 $(0.1\sim 30):1$ ;更优选为 $(0.2\sim 15):1$ 。

[0130] 图2c提供了本发明的低温等离子体反应设备的一种优选的具体实施方式的结构,图2c中提供的低温等离子体反应设备与图2a和图2b中提供的低温等离子体反应设备所不同的是:图2c中的低温等离子体反应设备中还包括第三空腔7,该第三空腔7与第二空腔2分立第一空腔1的两侧,并且,第三空腔7与第二空腔2中均持续导入和导出导热介质。在第三空腔中,导热介质自第三入口71引入,并且自第三出口72引出。

[0131] 以下结合图3a提供本发明的低温等离子体反应设备的一种优选的具体实施方式的结构,具体地:

[0132] 该反应设备具有同轴夹套筒式结构,且该反应设备包括:

[0133] 第一空腔1,所述第一空腔1上分别设置有第一入口11和第一出口;

[0134] 第二空腔2,所述第二空腔2嵌套在所述第一空腔1的外部,且所述第二空腔2上分别设置有第二入口21和第二出口22;

[0135] 内电极3,所述内电极3设置在所述第一空腔1中;

[0136] 外电极4,形成第一空腔1的至少部分侧壁或者环绕设置在所述第一空腔1的外侧壁上;以及阻挡介质6,所述阻挡介质6环绕设置在所述内电极3和所述外电极4之间,且分别与所述内电极3和所述外电极4之间的距离均大于0,以及所述阻挡介质的设置位置使得所述内电极和所述外电极之间的放电区域由所述阻挡介质间隔;

[0137] 所述内电极3和所述外电极4均为固体电极,且两者的形状相互配合以形成等径结构;

[0138] 所述内电极3的外侧壁和所述外电极4的内侧壁之间的距离为 $L_1$ ,所述阻挡介质6的厚度为 $D_1$ , $L_2=L_1-D_1$ ,且 $L_2$ 与 $D_1$ 之间的比例关系为 $(0.1\sim 100):1$ ,优选 $L_2$ 与 $D_1$ 之间的比例关系为 $(0.1\sim 30):1$ ;更优选为 $(0.2\sim 15):1$ 。

[0139] 以下结合图3b提供本发明的低温等离子体反应设备的一种优选的具体实施方式的结构,具体地:

[0140] 该反应设备具有同轴夹套筒式结构,且该反应设备包括:

[0141] 第一空腔1,所述第一空腔1上分别设置有第一入口11和第一出口;

[0142] 第二空腔2,所述第二空腔2嵌套在所述第一空腔1的内部,且所述第二空腔2上分别设置有第二入口21和第二出口22;

[0143] 内电极3,所述内电极3设置在所述第一空腔1中;

[0144] 外电极4,形成第一空腔1的至少部分侧壁或者环绕设置在所述第一空腔1的内侧壁上;以及

[0145] 阻挡介质6,所述阻挡介质6环绕设置在所述内电极3和所述外电极4之间,且分别与所述内电极3和所述外电极4之间的距离均大于0,以及所述阻挡介质的设置位置使得所述内电极和所述外电极之间的放电区域由所述阻挡介质间隔;

[0146] 所述内电极3和所述外电极4均为固体电极,且两者的形状相互配合以形成等径结构;

[0147] 所述内电极3的外侧壁和所述外电极4的内侧壁之间的距离为 $L_1$ ,所述阻挡介质6的厚度为 $D_1$ , $L_2=L_1-D_1$ ,且 $L_2$ 与 $D_1$ 之间的比例关系为 $(0.1\sim 100):1$ ,优选 $L_2$ 与 $D_1$ 之间的比例关系为 $(0.1\sim 30):1$ ;更优选为 $(0.2\sim 15):1$ 。

[0148] 图3c提供了本发明的低温等离子体反应设备的一种优选的具体实施方式的结构,图3c中提供的低温等离子体反应设备与图3a和图3b中提供的低温等离子体反应设备所不同的是:图3c中的低温等离子体反应设备中还包括第三空腔7,该第三空腔7与第二空腔2分立第一空腔1的两侧,并且,第三空腔7与第二空腔2中均持续导入和导出导热介质。在第三空腔中,导热介质自第三入口71引入,并且自第三出口72引出。

[0149] 以下结合图4a提供本发明的低温等离子体反应设备的另一种优选的具体实施方式的结构,具体地:

[0150] 该反应设备具有夹套筒式结构,且该反应设备包括:

[0151] 第一空腔1,所述第一空腔由至少两个平行设置且顶部和底部分别对应相通的反

应管构成,所述第一空腔1上分别设置有第一入口11和第一出口;

[0152] 第二空腔2,所述第二空腔2嵌套在所述第一空腔1的外部,且所述第二空腔2上分别设置有第二入口21和第二出口22;

[0153] 内电极3,所述内电极3分别设置在各个所述反应管中;

[0154] 外电极4,形成各个所述反应管的至少部分侧壁或者环绕设置在各个所述反应管的侧壁上;

[0155] 阻挡介质6,在各个所述反应管中,所述阻挡介质6环绕设置在所述内电极3和所述外电极4之间,且所述阻挡介质6的设置位置使得所述内电极3和所述外电极4之间的放电区域由所述阻挡介质间隔;

[0156] 其中,在各个所述反应管中,所述内电极3的外侧壁和所述外电极4的内侧壁之间的距离为 $L_1$ ,所述阻挡介质6的厚度为 $D_1$ , $L_2=L_1-D_1$ ,且 $L_2$ 与 $D_1$ 之间的比例关系为 $(0.1\sim 100):1$ ,优选 $L_2$ 与 $D_1$ 之间的比例关系为 $(0.1\sim 30):1$ ;更优选为 $(0.2\sim 15):1$ 。

[0157] 以下结合图4b提供本发明的低温等离子体反应设备的另一种优选的具体实施方式的结构,具体地:

[0158] 该反应设备具有夹套筒式结构,且该反应设备包括:

[0159] 第一空腔1,所述第一空腔由至少两个平行设置且顶部和底部分别对应相通的反应管构成,所述第一空腔1上分别设置有第一入口11和第一出口;

[0160] 第二空腔2,所述第二空腔2嵌套在所述第一空腔1的内部,且所述第二空腔2上分别设置有第二入口21和第二出口22;

[0161] 内电极3,所述内电极3分别设置在各个所述反应管中;

[0162] 外电极4,形成各个所述反应管的至少部分侧壁或者环绕设置在各个所述反应管的侧壁上;

[0163] 阻挡介质6,在各个所述反应管中,所述阻挡介质6环绕设置在所述内电极3和所述外电极4之间,且所述阻挡介质6的设置位置使得所述内电极3和所述外电极4之间的放电区域由所述阻挡介质间隔;

[0164] 其中,在各个所述反应管中,所述内电极3的外侧壁和所述外电极4的内侧壁之间的距离为 $L_1$ ,所述阻挡介质6的厚度为 $D_1$ , $L_2=L_1-D_1$ ,且 $L_2$ 与 $D_1$ 之间的比例关系为 $(0.1\sim 100):1$ ,优选 $L_2$ 与 $D_1$ 之间的比例关系为 $(0.1\sim 30):1$ ;更优选为 $(0.2\sim 15):1$ 。

[0165] 图4c提供了本发明的低温等离子体反应设备的一种优选的具体实施方式的结构,图4c中提供的低温等离子体反应设备与图4a和图4b中提供的低温等离子体反应设备所不同的是:图4c中的低温等离子体反应设备中还包括第三空腔7,该第三空腔7与第二空腔2分立第一空腔1的两侧,并且,第三空腔7与第二空腔2中均持续导入和导出导热介质。在第三空腔中,导热介质自第三入口71引入,并且自第三出口72引出。

[0166] 在本发明中,当所述第一空腔1的内部设置有第二空腔2或者第三空腔7时,为了描述方便,将该设置在第一空腔1内部的第二空腔2或者第三空腔7命名为“内部空腔”。

[0167] 优选所述内电极3形成所述内部空腔的至少部分侧壁或者环绕设置在所述内部空腔的侧壁上。

[0168] 根据一种优选的具体实施方式,所述内电极3环绕设置在所述第三空腔7的外侧壁上。

[0169] 根据一种优选的具体实施方式,所述内电极3环绕设置在所述第三空腔7的内侧壁上,且所述第三空腔7的至少部分侧壁由阻挡介质6形成。也即,在该具体实施方式中,本发明的反应设备可以为双阻挡介质设备。

[0170] 在上述图1a、1b、1c、2a、2b、2c、3a、3b、3c、4a、4b、4c中,还有如下优选的技术特征:

[0171] 优选该反应设备还包括接地线5,所述接地线5的一端与所述内电极3或外电极4电连接。

[0172] 在本发明中,所述内电极3和外电极4中的一者为接地电极,另一者为高压电极。

[0173] 优选所述第一入口11设置在所述第一空腔1的上部,所述第一出口设置在所述第一空腔1的下部和/或底部。

[0174] 优选所述第二入口21和所述第二出口22分别设置在所述第二空腔2的下部和上部。

[0175] 优选所述第三入口71和所述第三出口72分别设置在所述第三空腔7的下部和上部。

[0176] 优选情况下,在图1a、1b、1c、2a、2b、2c、3a、3b、3c所示的具体实施方式中,所述第一出口包括气体产物出口12和液体产物出口13,且所述气体产物出口12设置在所述第一空腔1的下部,以及所述液体产物出口13设置在所述第一空腔1的底部。

[0177] 优选地,在图1a、1b、1c、2a、2b、2c、3a、3b、3c所示的具体实施方式中,所述气体产物出口12设置在所述放电区域的下方,且所述气体产物出口12的设置位置相对于所述第一空腔1底部的高度 $H_1$ 与所述放电区域的长度 $L_3$ 之间的比例关系为: $H_1:L_3=1:(0.05\sim 25000)$ ;优选为 $H_1:L_3=1:(0.1\sim 10000)$ ;更优选为 $H_1:L_3=1:(0.5\sim 1000)$ 。

[0178] 优选情况下,在图4a、4b、4c所示的具体实施方式中,所述第一出口包括气体产物出口12和液体产物出口13,且所述气体产物出口设置在全部所述反应管的下部,以及所述液体产物出口设置在全部所述反应管的底部。优选情况下,各个所述反应管的尺寸相同。

[0179] 优选情况下,在图4a、4b、4c所示的具体实施方式中,所述气体产物出口设置在全部所述放电区域的下方,且所述气体产物出口的设置位置相对于所述第一空腔1底部的高度 $H_1$ 与所述放电区域的长度 $L_3$ 之间的比例关系为: $H_1:L_3=1:(0.05\sim 25000)$ ;优选为 $H_1:L_3=1:(0.1\sim 10000)$ ;更优选为 $H_1:L_3=1:(0.5\sim 1000)$ 。

[0180] 在没有特别说明的情况下,本发明的压力均表示绝对压力。

[0181] 本发明提供的低温等离子体反应设备还具有如下具体的优点:

[0182] (1) 该反应设备使用导电固体材料作为用于接地的接地电极,与液体接地电极相比,此种固体接地电极配合本发明的结构时放电产生的微放电电流更大,更有利于硫化氢分子的放电分解反应。

[0183] (2) 该反应设备电极外侧和/或内侧设置夹套结构,可通过控制夹套中导热介质温度来对反应设备进行温度控制,可使硫化氢放电分解产生的硫磺顺利流出放电区,避免硫磺凝固堵塞反应设备,使放电持续稳定的进行。

[0184] (3) 该反应设备通过控制 $L_2$ 与所述阻挡介质的厚度 $D_1$ 的比例关系为: $(0.1\sim 100):1$ ,优选为 $(0.1\sim 30):1$ ,更优选为 $(0.2\sim 15):1$ ,配合本发明的反应设备的其余结构,能够使得硫化氢的转化率明显提高且分解能耗降低。

[0185] 以下将通过实施例对本发明进行详细描述。以下实施例中,在没有特别说明的情

况下,使用的各种原料均来自商购。

[0186] 以下实施例和对比例中的阻挡介质的厚度均相同。

[0187] 以下实例中硫化氢的转化率是根据下式计算得到的:

[0188] 硫化氢的分解率% = 转化的硫化氢的摩尔数/初始硫化氢的摩尔数 × 100%

[0189] 以下实例中分解硫化氢的能耗通过示波器检测以及采用利萨如图形计算获得。

[0190] 实施例1

[0191] 采用图1a所示的低温等离子体反应设备进行硫化氢分解反应,低温等离子体反应设备的具体结构及结构参数如下所示,本实施例的内电极即为高压电极:

[0192] 反应设备包括:

[0193] 第一空腔,所述第一空腔上分别设置有第一入口、气体产物出口和液体产物出口,其中,所述第一空腔的全部侧壁均由阻挡介质形成,形成所述阻挡介质的材料为硬质玻璃;

[0194] 第二空腔,所述第二空腔嵌套在所述第一空腔的外部,且所述第二空腔上分别设置有第二入口和第二出口;

[0195] 内电极,所述内电极设置在所述第一空腔的中心轴线位置,形成所述内电极的材料为不锈钢,将内电极连接高压电源;

[0196] 外电极,所述外电极包裹在所述第一空腔的外侧壁上,形成所述外电极的材料为不锈钢金属箔,将所述外电极接地,且本实施例中的内电极的下沿比所述外电极的下沿更低;

[0197]  $L_2$ 与阻挡介质的厚度 $D_1$ 的比值为6:1;以及 $H_1:L_3=1:46$ ;

[0198] 本实施例的反应设备第一空腔的容积为0.2L。

[0199] 本实施例中混合气从反应设备的第一空腔的上部进入反应设备第一空腔中,且从位于反应设备第一空腔下部的气体产物出口引出气体产物,单质硫从位于反应设备底部的液体产物出口引出;以及本实施例的导热介质从反应设备的第二空腔的下部引入,且从反应设备的第二空腔的上部引出。

[0200] 低温等离子体反应设备的操作步骤:

[0201] 从第一入口向低温等离子体反应设备的第一空腔中通入氮气,以清除放电区域中的空气,并且气体从气体产物出口和液体产物出口引出。同时,从第二入口向第二空腔中引入导热介质(具体为二甲基硅油),引入的导热介质从第二出口引出,导热介质的温度保持为145℃。

[0202] 然后从第一入口向低温等离子体反应设备的第一空腔中通入 $H_2S/Ar$ 混合气,其中 $H_2S$ 体积分数为20%,控制混合气流速使得气体在放电区的平均停留时间为9.5s,本实施例保持反应器第一空腔中的反应压力为0.03MPa。 $H_2S/Ar$ 混合气通入反应设备30min后,接通交流高压电源,通过调节电压和频率使内电极和固体接地电极之间形成等离子体放电场。其中放电条件为:电压为16.8kV、频率为7.5kHz、电流为0.75A。硫化氢气体在放电区域发生电离,分解为氢气和单质硫,放电产生的单质硫沿第一空腔壁缓缓流下,液体产物间歇放出。反应后气体从气体产物出口流出。

[0203] 结果:本实施例的硫化氢分解反应持续进行20min后测得 $H_2S$ 转化率为73.9%;且持续放电100h仍未见异常,放电状态和 $H_2S$ 转化率均保持稳定。且本实施例的分解能耗为13eV/ $H_2S$ 分子(每分解1分子 $H_2S$ 消耗的能量为13eV)。

[0204] 对比例1

[0205] 本对比例采用与实施例1相似的低温等离子体反应设备进行硫化氢分解反应,所不同的是:

[0206] 本对比例中的接地电极为液体接地电极,且为熔融状态的摩尔比为1:1的LiCl和 $\text{AlCl}_3$ ,该液体接地电极也是导热介质,保持温度为145℃,且放置在反应设备第二空腔中。

[0207] 控制混合气流速使得气体在放电区的平均停留时间为18.5s。

[0208] 本对比例的反应设备第一空腔的容积为0.05L。

[0209] 其余均与实施例1中相同。

[0210] 并且本对比例采用与实施例1相同的操作方法进行硫化氢分解反应。

[0211] 结果:本对比例的硫化氢分解反应持续进行20min后测得 $\text{H}_2\text{S}$ 转化率为15.6%,持续放电1.5h后 $\text{H}_2\text{S}$ 转化率降低至5.1%。

[0212] 本对比例的分解能耗为102eV/ $\text{H}_2\text{S}$ 分子。

[0213] 对比例2

[0214] 本对比例采用与对比例1相似的低温等离子体反应设备进行,所不同的是:

[0215] 本对比例中的 $L_2$ 与阻挡介质的厚度 $D_1$ 的比值为0.08:1。

[0216] 控制混合气流速使得气体在放电区的平均停留时间为7.3s。

[0217] 本对比例的第一空腔的容积为0.02L。

[0218] 其余均与对比例1中相同。

[0219] 结果:本对比例的硫化氢分解反应持续进行20min后测得 $\text{H}_2\text{S}$ 转化率为17.1%,持续放电1.5h后 $\text{H}_2\text{S}$ 转化率降低至3.9%。

[0220] 本对比例的分解能耗为125eV/ $\text{H}_2\text{S}$ 分子。

[0221] 实施例2

[0222] 本实施例采用与实施例1相似的等离子反应设备进行硫化氢的分解反应,所不同的是,本实施例中:

[0223] 第一空腔的全部侧壁均由外电极形成,形成所外电极的材料为不锈钢金属箔,将所述外电极接地,以及将内电极接高压电源;

[0224] 阻挡介质环绕设置在第一空腔的内侧壁上;

[0225]  $L_2$ 与阻挡介质的厚度 $D_1$ 的比值为20:1;以及 $H_1:L_3=1:100$ 。

[0226] 本实施例中从第一入口向低温等离子体反应设备的第一空腔中通入 $\text{H}_2\text{S}/\text{Ar}$ 混合气,其中 $\text{H}_2\text{S}$ 体积分数为30%,控制混合气流速使得气体在放电区的平均停留时间为7.8s,本实施例保持反应器第一空腔中的反应压力为0.04MPa。 $\text{H}_2\text{S}/\text{Ar}$ 混合气通入反应设备30min后,接通交流高压电源,通过调节电压和频率使内电极和固体接地电极之间形成等离子体放电场。其中放电条件为:电压为19.8kV、频率为10.5kHz、电流为1.25A。

[0227] 其余均与实施例1中相同。

[0228] 结果:本实施例的硫化氢分解反应持续进行20min后测得 $\text{H}_2\text{S}$ 转化率为72.8%;且持续放电100h仍未见异常,放电状态和 $\text{H}_2\text{S}$ 转化率均保持稳定。且本实施例的分解能耗为14.2eV/ $\text{H}_2\text{S}$ 分子。

[0229] 实施例3

[0230] 本实施例采用与实施例1相似的等离子反应设备进行硫化氢的分解反应,所不同

的是,本实施例中:

[0231] 第一空腔的全部侧壁均由外电极形成,形成所述外电极的材料为铜箔,将所述外电极接地,以及将内电极连接高压电源;

[0232] 阻挡介质环绕设置在第一空腔的内侧壁上;

[0233]  $L_2$ 与阻挡介质的厚度 $D_1$ 的比值为0.5:1;以及 $H_1:L_3=1:200$ 。

[0234] 本实施例中从第一入口向低温等离子体反应设备的第一空腔中通入 $H_2S/Ar$ 混合气,其中 $H_2S$ 体积分数为25%,控制混合气流速使得气体在放电区的平均停留时间为10.3s,本实施例保持反应器第一空腔中的反应压力为0.05MPa。 $H_2S/Ar$ 混合气通入反应设备30min后,接通交流高压电源,通过调节电压和频率使内电极和固体接地电极之间形成等离子体放电场。其中放电条件为:电压为12.8kV、频率为4.7kHz、电流为1.12A。

[0235] 其余均与实施例1中相同。

[0236] 结果:本实施例的硫化氢分解反应持续进行20min后测得 $H_2S$ 转化率为73.2%;且持续放电100h仍未见异常,放电状态和 $H_2S$ 转化率均保持稳定。且本实施例的分解能耗为14.8eV/ $H_2S$ 分子。

[0237] 实施例4

[0238] 本实施例采用与实施例1相似的等离子反应设备进行硫化氢的分解反应,所不同的是,本实施例中:

[0239]  $L_2$ 与阻挡介质的厚度 $D_1$ 的比值为35:1。

[0240] 其余均与实施例1中相同。

[0241] 结果:本实施例的硫化氢分解反应持续进行20min后测得 $H_2S$ 转化率为71.6%;且持续放电100h仍未见异常,放电状态和 $H_2S$ 转化率均保持稳定。且本实施例的分解能耗为22.3eV/ $H_2S$ 分子。

[0242] 实施例5

[0243] 采用图2a所示的等离子体反应设备进行硫化氢分解反应,等离子体反应设备的具体结构及结构参数如下所示:

[0244] 反应设备包括:

[0245] 第一空腔,所述第一空腔上分别设置有第一入口、气体产物出口和液体产物出口;

[0246] 第二空腔,所述第二空腔嵌套在所述第一空腔的外部,且所述第二空腔上分别设置有第二入口和第二出口;

[0247] 内电极,所述内电极设置在所述第一空腔的中心轴线位置,形成所述内电极的材料为不锈钢,将所述内电极连接高压电源;

[0248] 外电极,所述外电极设置在所述第一空腔的内侧壁上,形成所述外电极的材料为不锈钢金属箔,将所述外电极接地,且本实施例中的内电极的下沿比所述固体接地电极的下沿更低;

[0249] 阻挡介质,所述阻挡介质设置在所述内电极伸入至所述第一空腔中的那部分的外表面上,且阻挡介质的上沿高于固体接地电极的上沿,形成所述阻挡介质的材料为硬质玻璃。

[0250]  $L_2$ 与阻挡介质的厚度 $D_1$ 的比值为8:1;以及 $H_1:L_3=1:40$ ;

[0251] 本实施例的反应设备第一空腔的容积为0.2L。

[0252] 本实施例中混合气从反应设备第一空腔的上部进入反应设备第一空腔中,且从位于反应设备第一空腔下部的的气体产物出口引出气体产物,单质硫从位于反应设备底部的液体产物出口引出;以及本实施例的导热介质从反应设备的第二空腔的下部引入,且从反应设备的第二空腔的上部引出。

[0253] 等离子体反应设备的操作步骤:

[0254] 从第一入口向等离子体反应设备的第一空腔中通入氮气,以清除放电区域中的空气,并且气体从气体产物出口和液体产物出口引出。同时,从第二入口向第二空腔中引入导热介质(具体为二甲基硅油),引入的导热介质从第二出口引出,导热介质的温度保持为145℃。

[0255] 然后从第一入口向等离子体反应水杯的第一空腔中通入 $H_2S/Ar$ 混合气,其中 $H_2S$ 体积分数为20%,控制混合气流速使得气体在放电区的平均停留时间为9.2s,本实施例保持反应器第一空腔中的反应压力为0.03MPa。 $H_2S/Ar$ 混合气通入反应设备30min后,接通交流高压电源,通过调节电压和频率使内电极和固体接地电极之间形成等离子体放电场。其中放电条件为:电压为18.5kV、频率为1.5kHz、电流为1.05A。硫化氢气体在放电区域发生电离,分解为氢气和单质硫,放电产生的单质硫沿第一空腔壁缓缓流下,并从液体产物出口流出。反应后气体从气体产物出口流出。

[0256] 结果:本实施例的硫化氢分解反应持续进行20min后测得 $H_2S$ 转化率为74.2%;且持续放电100h仍未见异常,放电状态和 $H_2S$ 转化率均保持稳定。且本实施例的分解能耗为12.5eV/ $H_2S$ 分子(每分解1分子 $H_2S$ 需要的能量为12.5eV)。

[0257] 对比例3

[0258] 本对比例采用与实施例5相似的等离子体反应设备进行硫化氢分解反应,所不同的是:

[0259] 本对比例中的接地电极为液体接地电极,且为熔融状态的摩尔比为1:1的 $LiCl$ 和 $AlCl_3$ ,该液体接地电极也是导热介质,保持温度为145℃,且放置在反应设备第二空腔中。

[0260] 控制混合气流速使得气体在放电区的平均停留时间为20.1s。

[0261] 本对比例的反应设备第一空腔的容积为0.05L。

[0262] 其余均与实施例5中相同。

[0263] 并且本对比例采用与实施例5相同的操作方法进行硫化氢分解反应。

[0264] 结果:本对比例的硫化氢分解反应持续进行20min后测得 $H_2S$ 转化率为16.0%,持续放电1.5h后 $H_2S$ 转化率降低至6.3%。

[0265] 本对比例的分解能耗为105eV/ $H_2S$ 分子。

[0266] 对比例4

[0267] 本对比例采用与对比例3相似的等离子体反应设备进行,所不同的是:

[0268] 本对比例中的 $L_2$ 与阻挡介质的厚度 $D_1$ 的比值为0.08:1。

[0269] 控制混合气流速使得气体在放电区的平均停留时间为17.3s。

[0270] 本对比例的第一空腔的容积为0.02L。

[0271] 其余均与对比例3中相同。

[0272] 结果:本对比例的硫化氢分解反应持续进行20min后测得 $H_2S$ 转化率为19.5%,持续放电1.5h后 $H_2S$ 转化率降低至4.7%。

[0273] 本对比例的分解能耗为135eV/H<sub>2</sub>S分子。

[0274] 实施例6

[0275] 本实施例采用与实施例5相似的等离子反应设备进行硫化氢的分解反应,所不同的是,本实施例中:

[0276] 第一空腔的全部侧壁均由外电极形成,形成所述外电极的材料为不锈钢金属箔,将所述外电极接地,以及将内电极连接高压电源;

[0277]  $L_2$ 与阻挡介质的厚度 $D_1$ 的比值为25:1;以及 $H_1:L_3=1:120$ 。

[0278] 本实施例中从第一入口向等离子体反应设备的第一空腔中通入H<sub>2</sub>S/Ar混合气,其中H<sub>2</sub>S体积分数为30%,控制混合气流速使得气体在放电区的平均停留时间为8.5s,本实施例保持反应器第一空腔中的反应压力为0.04MPa。H<sub>2</sub>S/Ar混合气通入反应设备30min后,接通交流高压电源,通过调节电压和频率使内电极和固体接地电极之间形成等离子体放电场。其中放电条件为:电压为19.5kV、频率为5.5kHz、电流为1.45A。

[0279] 其余均与实施例5中相同。

[0280] 结果:本实施例的硫化氢分解反应持续进行20min后测得H<sub>2</sub>S转化率为73.5%;且持续放电100h仍未见异常,放电状态和H<sub>2</sub>S转化率均保持稳定。且本实施例的分解能耗为13.2eV/H<sub>2</sub>S分子。

[0281] 实施例7

[0282] 本实施例采用与实施例5相似的等离子反应设备进行硫化氢的分解反应,所不同的是,本实施例中:

[0283] 所述外电极设置在所述第一空腔的内侧壁上,形成所述外电极的材料为铜箔,将所述外电极接地,以及将内电极连接高压电源;

[0284] 阻挡介质设置在所述内电极伸入至所述第一空腔中的那部分的外表面上,且阻挡介质的上沿高于外电极的上沿,形成所述阻挡介质的材料为陶瓷;

[0285]  $L_2$ 与阻挡介质的厚度 $D_1$ 的比值为0.7:1;以及 $H_1:L_2=1:250$ 。

[0286] 本实施例中从第一入口向等离子体反应设备的第一空腔中通入H<sub>2</sub>S/Ar混合气,其中H<sub>2</sub>S体积分数为25%,控制混合气流速使得气体在放电区的平均停留时间为12.5s,本实施例保持反应器第一空腔中的反应压力为0.05MPa。H<sub>2</sub>S/Ar混合气通入反应设备30min后,接通交流高压电源,通过调节电压和频率使内电极和固体接地电极之间形成等离子体放电场。其中放电条件为:电压为8.5kV、频率为2.5kHz、电流为1.08A。

[0287] 其余均与实施例5中相同。

[0288] 结果:本实施例的硫化氢分解反应持续进行20min后测得H<sub>2</sub>S转化率为73.8%;且持续放电100h仍未见异常,放电状态和H<sub>2</sub>S转化率均保持稳定。且本实施例的分解能耗为13.8eV/H<sub>2</sub>S分子。

[0289] 实施例8

[0290] 本实施例采用与实施例5相似的等离子反应设备进行硫化氢的分解反应,所不同的是,本实施例中:

[0291]  $L_2$ 与阻挡介质的厚度 $D_1$ 的比值为35:1。

[0292] 其余均与实施例5中相同。

[0293] 结果:本实施例的硫化氢分解反应持续进行20min后测得H<sub>2</sub>S转化率为71.0%;且

持续放电100h仍未见异常,放电状态和 $H_2S$ 转化率均保持稳定。且本实施例的分解能耗为23.8eV/ $H_2S$ 分子。

[0294] 实施例9

[0295] 采用图3a所示的低温等离子体反应设备进行硫化氢分解反应,低温等离子体反应设备的具体结构及结构参数如下所示:

[0296] 反应设备包括:

[0297] 第一空腔,所述第一空腔上分别设置有第一入口、气体产物出口和液体产物出口,其中,所述第一空腔的侧壁由外电极形成,且形成所述外电极的材料为不锈钢金属箔,将所述外电极接地,

[0298] 第二空腔,所述第二空腔嵌套在所述第一空腔的外部,且所述第二空腔上分别设置有第二入口和第二出口;

[0299] 内电极,所述内电极设置在所述第一空腔的中心轴线位置,形成所述内电极的材料为不锈钢,将所述内电极连接高压电源;

[0300] 本实施例中的内电极的下沿比所述固体接地电极的下沿更低;

[0301] 阻挡介质,形成所述阻挡介质的材料为硬质玻璃;

[0302]  $L_2$ 与阻挡介质的厚度 $D_1$ 的比值为6:1;以及 $H_1:L_3=1:46$ ;

[0303] 本实施例的反应设备第一空腔的容积为0.2L。

[0304] 本实施例中混合气从反应设备的第一空腔的上部进入第一空腔中,且从位于反应设备第一空腔下部的气体产物出口引出气体产物,单质硫从位于反应设备底部的液体产物出口引出;以及本实施例的导热介质从反应设备的第二空腔的下部引入,且从反应设备的第二空腔的上部引出。

[0305] 低温等离子体反应设备的操作步骤:

[0306] 从第一入口向低温等离子体反应设备的第一空腔中通入氮气,以清除放电区域中的空气,并且气体从气体产物出口和液体产物出口引出。同时,从第二入口向第二空腔中引入导热介质(具体为二甲基硅油),引入的导热介质从第二出口引出,导热介质的温度保持为145℃。

[0307] 然后从第一入口向低温等离子体反应设备的第一空腔中通入 $H_2S/Ar$ 混合气,其中 $H_2S$ 体积分数为20%,控制混合气流速使得气体在放电区的平均停留时间为11.2s,本实施例保持反应器第一空腔中的反应压力为0.03MPa。 $H_2S/Ar$ 混合气通入反应设备30min后,接通交流高压电源,通过调节电压和频率使内电极和固体接地电极之间形成等离子体放电场。其中放电条件为:电压为17.2kV、频率为8.5kHz、电流为0.80A。硫化氢气体在放电区域发生电离,分解为氢气和单质硫,放电产生的单质硫沿第一空腔壁缓缓流下,液体产物间歇放出。反应后气体从气体产物出口流出。

[0308] 结果:本实施例的硫化氢分解反应持续进行20min后测得 $H_2S$ 转化率为74.1%;且持续放电100h仍未见异常,放电状态和 $H_2S$ 转化率均保持稳定。且本实施例的分解能耗为13.2eV/ $H_2S$ 分子(每分解1分子 $H_2S$ 需要的能量为13.2eV)。

[0309] 对比例5

[0310] 本对比例采用与实施例9相似的低温等离子体反应设备进行硫化氢分解反应,所不同的是:

[0311] 本对比例中的接地电极为液体接地电极,且为熔融状态的摩尔比为1:1的LiCl和 $AlCl_3$ ,该液体接地电极也是导热介质,保持温度为145℃,且放置在反应设备第二空腔中。

[0312] 控制混合气流速使得气体在放电区的平均停留时间为18.5s。

[0313] 本对比例的反应设备第一空腔的容积为0.05L。

[0314] 其余均与实施例9中相同。

[0315] 并且本对比例采用与实施例9相同的操作方法进行硫化氢分解反应。

[0316] 结果:本对比例的硫化氢分解反应持续进行20min后测得 $H_2S$ 转化率为15.4%,持续放电1.5h后 $H_2S$ 转化率降低至5.0%。

[0317] 本对比例的分解能耗为104eV/ $H_2S$ 分子。

[0318] 对比例6

[0319] 本对比例采用与对比例5相似的低温等离子体反应设备进行,所不同的是:

[0320] 本对比例中的 $L_2$ 与阻挡介质的厚度 $D_1$ 的比值为0.08:1。

[0321] 控制混合气流速使得气体在放电区的平均停留时间为16.9s;

[0322] 本对比例的第一空腔的容积为0.02L。

[0323] 其余均与对比例5中相同。

[0324] 结果:本对比例的硫化氢分解反应持续进行20min后测得 $H_2S$ 转化率为19.4%,持续放电1.5h后 $H_2S$ 转化率降低至5.1%。

[0325] 本对比例的分解能耗为147eV/ $H_2S$ 分子。

[0326] 实施例10

[0327] 本实施例采用与实施例9相似的等离子反应设备进行硫化氢的分解反应,所不同的是,本实施例中:

[0328] 外电极设置在第一空腔的内侧壁上,形成所述外电极的材料为不锈钢金属箔,将所述外电极接地,以及将内电极连接高压电源;

[0329]  $L_2$ 与阻挡介质的厚度 $D_1$ 的比值为20:1;以及 $H_1:L_3=1:300$ 。

[0330] 本实施例中从第一入口向低温等离子体反应设备的第一空腔中通入 $H_2S/Ar$ 混合气,其中 $H_2S$ 体积分数为30%,控制混合气流速使得气体在放电区的平均停留时间为9.6s,本实施例保持反应器第一空腔中的反应压力为0.04MPa。 $H_2S/Ar$ 混合气通入反应设备30min后,接通交流高压电源,通过调节电压和频率使内电极和固体接地电极之间形成等离子体放电场。其中放电条件为:电压为18.5kV、频率为10.5kHz、电流为1.05A。

[0331] 其余均与实施例9中相同。

[0332] 结果:本实施例的硫化氢分解反应持续进行20min后测得 $H_2S$ 转化率为73.4%;且持续放电100h仍未见异常,放电状态和 $H_2S$ 转化率均保持稳定。且本实施例的分解能耗为14.1eV/ $H_2S$ 分子。

[0333] 实施例11

[0334] 采用图4a所示的低温等离子体反应设备进行硫化氢分解反应,低温等离子体反应设备的具体结构及结构参数如下所示:

[0335] 反应设备包括:

[0336] 第一空腔,所述第一空腔上分别设置有反应器入口、气体产物出口和液体产物出口,并且,所述第一空腔中含有4个并列设置的反应管,各个所述反应管的顶部和底部分别

对应相通,使得由所述反应器入口进入的原料能够分别进入到各个所述反应管中,以及使得各个所述反应管中产生的气态产物能够由所述气体产物出口引出,并且使得各个所述反应管中产生的液态产物能够由所述液体产物出口引出,4个反应管的尺寸完全相同,所述反应管的全部侧壁均由阻挡介质形成,形成所述阻挡介质的材料为硬质玻璃;

[0337] 第二空腔,所述第二空腔嵌套在所述第一空腔的外部,且所述第二空腔上分别设置有第二入口和第二出口,由所述第二入口引入的导热介质能够分布在所述第一空腔的各个所述反应管之间,并且所述导热介质由所述第二出口引出;

[0338] 内电极,所述内电极设置在各个所述反应管的中心轴线位置,形成所述内电极的材料为不锈钢,各个反应管中的内电极并联连接,将所述内电极连接高压电源;

[0339] 外电极,所述外电极分别环绕设置在各个所述反应管的外侧壁上,形成所述外电极的材料为不锈钢金属箔,将所述外电极接地,且本实施例中的内电极的下沿与所述外电极的下沿齐平。

[0340]  $L_2$ 与所述阻挡介质的厚度 $D_1$ 的比值为8:1;以及 $H_1:L_3=1:32$ ;

[0341] 本实施例的整个反应器第一空腔的容积为1L。

[0342] 本实施例中混合气从反应器第一空腔的上部进入反应器第一空腔中,且从位于反应器第一空腔下部的气体产物出口引出气体产物,单质硫从位于反应器底部的液体产物出口引出;以及本实施例的导热介质从反应器的第二空腔的下部引入,且从反应器的第二空腔的上部引出。

[0343] 操作步骤:

[0344] 从反应器入口向高通量低温等离子体反应器的第一空腔中通入氮气,以清除放电区域中的空气,并且气体从气体产物出口和液体产物出口引出。同时,从第二入口向第二空腔中引入导热介质(具体为二甲基硅油),引入的导热介质从第二出口引出,导热介质的温度保持为145℃。

[0345] 然后从反应器入口向高通量低温等离子体反应器的第一空腔中通入 $H_2S/Ar$ 混合气,其中 $H_2S$ 体积分数为65%,控制混合气流速使得气体在放电区的平均停留时间为9.7s,本实施例保持反应器第一空腔中的反应压力为0.15MPa。 $H_2S/Ar$ 混合气通入反应器30min后,接通交流高压电源,通过调节电压和频率使内电极和固体接地电极之间形成等离子体放电场。其中放电条件为:电压为13.8kV、频率为0.8kHz、电流为2.2A。硫化氢气体在放电区域发生电离,分解为氢气和单质硫,放电产生的单质硫沿第一空腔壁缓缓流下,并从液体产物出口流出。反应后气体从气体产物出口流出。

[0346] 结果:本实施例的硫化氢分解反应持续进行20min后测得 $H_2S$ 转化率为73.6%;且持续放电100h仍未见异常,放电状态和 $H_2S$ 转化率均保持稳定。且本实施例的分解能耗为14.2eV/ $H_2S$ 分子(每分解1分子 $H_2S$ 需要的能量为14.2eV)。

[0347] 对比例7

[0348] 本对比例采用与实施例11相似的低温等离子体反应设备进行硫化氢分解反应,所不同的是:

[0349] 本对比例中的接地电极为液体接地电极,且为熔融状态的摩尔比为1:1的 $LiCl$ 和 $AlCl_3$ ,该液体接地电极也是导热介质,保持温度为145℃,且放置在反应器第二空腔中。

[0350] 控制混合气流速使得气体在放电区的平均停留时间为20.5s。

- [0351] 本对比例的整个反应器第一空腔的容积为0.05L。
- [0352] 其余均与实施例11中相同。
- [0353] 并且本对比例采用与实施例11相同的操作方法进行硫化氢分解反应。
- [0354] 结果:本对比例的硫化氢分解反应持续进行20min后测得H<sub>2</sub>S转化率为14.9%,持续放电1.5h后H<sub>2</sub>S转化率降低至6.9%。
- [0355] 本对比例的分解能耗为111eV/H<sub>2</sub>S分子。
- [0356] 对比例8
- [0357] 本对比例采用与对比例7相似的低温等离子体反应设备进行,所不同的是:
- [0358] L<sub>2</sub>与阻挡介质的厚度D<sub>1</sub>的比值为0.08:1。
- [0359] 控制混合气流速使得气体在放电区的平均停留时间为18.4s。
- [0360] 本对比例的第一空腔的容积为0.02L。
- [0361] 其余均与对比例7中相同。
- [0362] 结果:本对比例的硫化氢分解反应持续进行20min后测得H<sub>2</sub>S转化率为21.7%,持续放电1.5h后H<sub>2</sub>S转化率降低至7.8%。
- [0363] 本对比例的分解能耗为151eV/H<sub>2</sub>S分子。
- [0364] 实施例12
- [0365] 本实施例采用与实施例11相似的等离子反应设备进行硫化氢的分解反应,所不同的是,本实施例中:
- [0366] L<sub>2</sub>与阻挡介质的厚度D<sub>1</sub>的比值为35:1。
- [0367] 其余均与实施例11中相同。
- [0368] 结果:本实施例的硫化氢分解反应持续进行20min后测得H<sub>2</sub>S转化率为67.2%;且持续放电100h仍未见异常,放电状态和H<sub>2</sub>S转化率均保持稳定。且本实施例的分解能耗为23.6eV/H<sub>2</sub>S分子。
- [0369] 实施例13
- [0370] 采用图1b所示的低温等离子体反应设备进行硫化氢分解反应,本实施例的低温等离子体反应设备与实施例1的图1a所示的低温等离子体反应设备不同之处在于:
- [0371] 本实施例中将第二空腔设置于第一空腔的内部,且第一空腔的侧壁均由阻挡介质形成,外电极环绕设置在第一空腔的外侧壁上,形成所述外电极的材料为不锈钢金属箔,将所述外电极接地;
- [0372] 第二空腔的侧壁均由内电极形成,形成所述内电极的材料为不锈钢,将所述内电极连接高压电源;
- [0373] L<sub>2</sub>与阻挡介质的厚度D<sub>1</sub>的比值为20:1;以及H<sub>1</sub>:L<sub>3</sub>=1:100。
- [0374] 其余具体结构及结构参数均与实施例1中相同。
- [0375] 本实施例中从第一入口向低温等离子体反应设备的第一空腔中通入H<sub>2</sub>S/Ar混合气,其中H<sub>2</sub>S体积分数为30%,控制混合气流速使得气体在放电区的平均停留时间为16.7s,本实施例保持反应器第一空腔中的反应压力为0.2MPa。H<sub>2</sub>S/Ar混合气通入反应设备30min后,接通交流高压电源,通过调节电压和频率使内电极和固体接地电极之间形成等离子体放电场。其中放电条件为:电压为21.3kV、频率为8.0kHz、电流为1.17A。
- [0376] 其余均与实施例1中相同。

[0377] 结果:本实施例的硫化氢分解反应持续进行20min后测得 $H_2S$ 转化率为79.5%;且持续放电100h仍未见异常,放电状态和 $H_2S$ 转化率均保持稳定。且本实施例的分解能耗为11.3eV/ $H_2S$ 分子。

[0378] 实施例14

[0379] 采用图1c所示的低温等离子体反应设备进行硫化氢分解反应,本实施例的低温等离子体反应设备与实施例1的图1a所示的低温等离子体反应设备的不同之处在于:

[0380] 本实施例中将第二空腔设置于第一空腔的内部,且第一空腔的侧壁均由外电极形成,形成所述外电极的材料为铜箔,将所述外电极接地;

[0381] 本实施例中将第三空腔设置在第一空腔的外部,第三空腔的侧壁由不锈钢形成,以及第三空腔和第二空腔中的导热介质相同,导热介质的温度均保持为230℃。

[0382] 第一空腔的侧壁均由阻挡介质形成,固体接地电极环绕设置在第一空腔的外侧壁上,形成所述固体接地电极的材料为铜箔;

[0383] 第二空腔的侧壁均由内电极形成,形成所述内电极的材料为不锈钢,将所述内电极连接高压电源;

[0384]  $L_2$ 与阻挡介质的厚度 $D_1$ 的比值为0.5:1;以及 $H_1:L_3=1:200$ 。

[0385] 其余具体结构及结构参数均与实施例1中相同。

[0386] 本实施例中从第一入口向低温等离子体反应设备的第一空腔中通入 $H_2S/CO_2$ 混合气,其中 $H_2S$ 体积分数为25%,控制混合气流速使得气体在放电区的平均停留时间为11.5s,本实施例保持反应器第一空腔中的反应压力为0.1MPa。 $H_2S/Ar$ 混合气通入反应设备30min后,接通交流高压电源,通过调节电压和频率使内电极和固体接地电极之间形成等离子体放电场。其中放电条件为:电压为13.5kV、频率为2.4kHz、电流为1.34A。

[0387] 其余均与实施例1中相同。

[0388] 结果:本实施例的硫化氢分解反应持续进行20min后测得 $H_2S$ 转化率为76.7%;且持续放电100h仍未见异常,放电状态和 $H_2S$ 转化率均保持稳定。且本实施例的分解能耗为12.9eV/ $H_2S$ 分子。

[0389] 实施例15

[0390] 采用图2b所示的低温等离子体反应设备进行硫化氢分解反应,本实施例的低温等离子体反应设备与实施例5的图2a所示的低温等离子体反应设备的不同之处在于:

[0391] 本实施例中将第二空腔设置于第一空腔的内部,且外电极环绕设置在第一空腔的内侧壁上,形成所述外电极的材料为不锈钢金属箔,将所述外电极接地;

[0392] 第二空腔的侧壁均由内电极形成,形成所述内电极的材料为不锈钢,将所述内电极连接高压电源;

[0393] 并且,本实施例中的导热介质的温度保持为182℃。

[0394] 阻挡介质环绕设置在第二空腔的外侧壁上;

[0395]  $L_2$ 与阻挡介质的厚度 $D_1$ 的比值为25:1;以及 $H_1:L_3=1:120$ 。

[0396] 其余具体结构及结构参数均与实施例5中相同。

[0397] 本实施例中从第一入口向等离子体反应设备的第一空腔中通入 $H_2S/Ar$ 混合气,其中 $H_2S$ 体积分数为30%,控制混合气流速使得气体在放电区的平均停留时间为10.7s,本实施例保持反应器第一空腔中的反应压力为0.21MPa。 $H_2S/Ar$ 混合气通入反应设备30min后,

接通交流高压电源,通过调节电压和频率使内电极和固体接地电极之间形成等离子体放电场。其中放电条件为:电压为25.1kV、频率为13.3kHz、电流为0.86A。

[0398] 其余均与实施例5中相同。

[0399] 结果:本实施例的硫化氢分解反应持续进行20min后测得 $H_2S$ 转化率为77.5%;且持续放电100h仍未见异常,放电状态和 $H_2S$ 转化率均保持稳定。且本实施例的分解能耗为10.3eV/ $H_2S$ 分子。

[0400] 实施例16

[0401] 采用图2c所示的低温等离子体反应设备进行硫化氢分解反应,本实施例的低温等离子体反应设备与实施例5的图2a所示的低温等离子体反应设备的不同之处在于:

[0402] 本实施例中将第二空腔设置于第一空腔的内部,外电极设置在所述第一空腔的内侧壁上,形成所述外电极的材料为铜箔,将所述外电极接地;

[0403] 第二空腔的侧壁均由内电极形成,形成所述内电极的材料为不锈钢,将所述内电极连接高压电源;

[0404] 阻挡介质设置在所述内电极伸入至所述第一空腔中的那部分的外表面上,且阻挡介质的上沿高于固体接地电极的上沿,形成所述阻挡介质的材料为陶瓷;

[0405] 本实施例中将第三空腔设置在第一空腔的外部,第三空腔的侧壁由不锈钢形成,以及第三空腔和第二空腔中的导热介质相同。

[0406]  $L_2$ 与阻挡介质的厚度 $D_1$ 的比值为0.7:1;以及 $H_1:L_3=1:250$ 。

[0407] 其余具体结构及结构参数均与实施例5中相同。

[0408] 本实施例中从第一入口向等离子体反应设备的第一空腔中通入 $H_2S/CO$ 混合气,其中 $H_2S$ 体积分数为25%,控制混合气流速使得气体在放电区的平均停留时间为3.0s,本实施例保持反应器第一空腔中的反应压力为0.16MPa。 $H_2S/Ar$ 混合气通入反应设备30min后,接通交流高压电源,通过调节电压和频率使内电极和固体接地电极之间形成等离子体放电场。其中放电条件为:电压为5.1kV、频率为900Hz、电流为1.15A。

[0409] 其余均与实施例5中相同。

[0410] 结果:本实施例的硫化氢分解反应持续进行20min后测得 $H_2S$ 转化率为76.9%;且持续放电100h仍未见异常,放电状态和 $H_2S$ 转化率均保持稳定。且本实施例的分解能耗为12.7eV/ $H_2S$ 分子。

[0411] 实施例17

[0412] 采用图3b所示的低温等离子体反应设备进行硫化氢分解反应,本实施例的低温等离子体反应设备与实施例9的图3a所示的低温等离子体反应设备的不同之处在于:

[0413] 本实施例中将第二空腔设置于第一空腔的内部,外电极环绕设置在第一空腔的内侧壁上,形成所述外电极的材料为不锈钢金属箔,将所述外电极接地;

[0414] 第二空腔的侧壁均由内电极形成,形成所述内电极的材料为不锈钢,将所述内电极连接高压电源;

[0415] 阻挡介质设置在,固体接地电极和高压电极之间,且不直接与固体接地电极和高压电极接触;

[0416]  $L_2$ 与阻挡介质的厚度 $D_1$ 的比值为20:1;以及 $H_1:L_3=1:300$ 。

[0417] 其余具体结构及结构参数均与实施例9中相同。

[0418] 本实施例中从第一入口向低温等离子体反应设备的第一空腔中通入 $H_2S/H_2$ 混合气,其中 $H_2S$ 体积分数为30%,控制混合气流速使得气体在放电区的平均停留时间为11.4s,本实施例保持反应器第一空腔中的反应压力为0.08MPa。 $H_2S/H_2$ 混合气通入反应设备30min后,接通交流高压电源,通过调节电压和频率使内电极和固体接地电极之间形成等离子体放电场。其中放电条件为:电压为25.4kV、频率为10.5kHz、电流为0.94A。

[0419] 其余均与实施例9中相同。

[0420] 结果:本实施例的硫化氢分解反应持续进行20min后测得 $H_2S$ 转化率为76.2%;且持续放电100h仍未见异常,放电状态和 $H_2S$ 转化率均保持稳定。且本实施例的分解能耗为10.5eV/ $H_2S$ 分子。

[0421] 实施例18

[0422] 采用图3c所示的低温等离子体反应设备进行硫化氢分解反应,本实施例的低温等离子体反应设备与实施例9的图3a所示的低温等离子体反应设备的不同之处在于:

[0423] 本实施例中将第二空腔设置于第一空腔的内部,外电极设置在所述第一空腔的内侧壁上,形成所述外电极的材料为铜箔,将所述外电极接地;

[0424] 第二空腔的侧壁均由内电极形成,形成所述内电极的材料为不锈钢,将所述内电极连接高压电源;

[0425] 本实施例中将第三空腔设置在第一空腔的外部,第三空腔的侧壁由不锈钢形成,以及第三空腔和第二空腔中的导热介质相同。

[0426]  $L_2$ 与阻挡介质的厚度 $D_1$ 的比值为0.5:1;以及 $H_1:L_3=1:280$ 。

[0427] 其余具体结构及结构参数均与实施例9中相同。

[0428] 本实施例中从第一入口向等离子体反应设备的第一空腔中通入 $H_2S/CO$ 混合气,其中 $H_2S$ 体积分数为5%,控制混合气流速使得气体在放电区的平均停留时间为3.0s,本实施例保持反应器第一空腔中的反应压力为0.24MPa。 $H_2S/CO$ 混合气通入反应设备30min后,接通交流高压电源,通过调节电压和频率使内电极和固体接地电极之间形成等离子体放电场。其中放电条件为:电压为10.7kV、频率为900Hz、电流为1.95A。

[0429] 其余均与实施例9中相同。

[0430] 结果:本实施例的硫化氢分解反应持续进行20min后测得 $H_2S$ 转化率为78.7%;且持续放电100h仍未见异常,放电状态和 $H_2S$ 转化率均保持稳定。且本实施例的分解能耗为13.5eV/ $H_2S$ 分子。

[0431] 实施例19

[0432] 采用图4b所示的低温等离子体反应设备进行硫化氢分解反应,本实施例的低温等离子体反应设备与实施例11的图4a所示的低温等离子体反应设备的不同之处在于:

[0433] 本实施例中将第二空腔设置于第一空腔的内部;第二空腔的侧壁均由内电极形成,形成所述内电极的材料为不锈钢,将所述内电极连接高压电源;

[0434] 阻挡介质环绕设置在第一空腔的内侧壁上,以及外电极形成所述第一空腔的侧壁,将所述外电极接地;

[0435] 其余具体结构及结构参数均与实施例11中相同。

[0436] 本实施例中从反应器入口向高通量低温等离子体反应器的第一空腔中通入 $H_2S/Ar$ 混合气,其中 $H_2S$ 体积分数为45%,控制混合气流速使得气体在放电区的平均停留时间为

0.9s。 $\text{H}_2\text{S}/\text{Ar}$ 混合气通入反应器30min后,接通交流高压电源,通过调节电压和频率使内电极和固体接地电极之间形成等离子体放电场。其中放电条件为:电压为12.7kV、频率为1.0kHz、电流为4.1A。硫化氢气体在放电区域发生电离,分解为氢气和单质硫,放电产生的单质硫沿第一空腔壁缓缓流下,并从液体产物出口流出。反应后气体从气体产物出口流出。

[0437] 其余均与实施例11中相同。

[0438] 结果:本实施例的硫化氢分解反应持续进行20min后测得 $\text{H}_2\text{S}$ 转化率为77.6%;且持续放电100h仍未见异常,放电状态和 $\text{H}_2\text{S}$ 转化率均保持稳定。且本实施例的分解能耗为19.3eV/ $\text{H}_2\text{S}$ 分子(每分解1分子 $\text{H}_2\text{S}$ 需要的能量为19.3eV)。

[0439] 实施例20

[0440] 采用图4c所示的低温等离子体反应设备进行硫化氢分解反应,本实施例的低温等离子体反应设备与实施例11的图4a所示的低温等离子体反应设备不同之处在于:

[0441] 本实施例中将第二空腔设置于第一空腔的内部;第二空腔的侧壁均由内电极形成,形成所述内电极的材料为不锈钢,将所述内电极连接高压电源;

[0442] 本实施例中将第三空腔设置在第一空腔的外部,第三空腔的侧壁由不锈钢形成,以及第三空腔和第二空腔中的导热介质相同。

[0443] 其余具体结构及结构参数均与实施例11中相同。

[0444] 本实施例中从反应器入口向高通量低温等离子体反应器的第一空腔中通入 $\text{H}_2\text{S}/\text{Ar}$ 混合气,其中 $\text{H}_2\text{S}$ 体积分数为65%,控制混合气流速使得气体在放电区的平均停留时间为0.9s,本实施例保持反应器第一空腔中的反应压力为0.07MPa。 $\text{H}_2\text{S}/\text{Ar}$ 混合气通入反应器30min后,接通交流高压电源,通过调节电压和频率使内电极和固体接地电极之间形成等离子体放电场。其中放电条件为:电压为10.4kV、频率为1.2kHz、电流为3.1A。硫化氢气体在放电区域发生电离,分解为氢气和单质硫,放电产生的单质硫沿第一空腔壁缓缓流下,并从液体产物出口流出。反应后气体从气体产物出口流出。

[0445] 其余均与实施例11中相同。

[0446] 结果:本实施例的硫化氢分解反应持续进行20min后测得 $\text{H}_2\text{S}$ 转化率为78.4%;且持续放电100h仍未见异常,放电状态和 $\text{H}_2\text{S}$ 转化率均保持稳定。且本实施例的分解能耗为17.9eV/ $\text{H}_2\text{S}$ 分子(每分解1分子 $\text{H}_2\text{S}$ 需要的能量为17.9eV)。

[0447] 由上述结果可以看出,应用本发明提供的低温等离子体反应设备进行硫化氢的分解时能够相对于现有技术显著地提高硫化氢的转化率,以及本发明提供的反应设备能够在低的分解能耗下长周期地保持高的硫化氢转化率。

[0448] 以上详细描述了本发明的优选实施方式,但是,本发明并不限于此。在本发明的技术构思范围内,可以对本发明的技术方案进行多种简单变型,包括各个技术特征以任何其它的合适方式进行组合,这些简单变型和组合同样应当视为本发明所公开的内容,均属于本发明的保护范围。



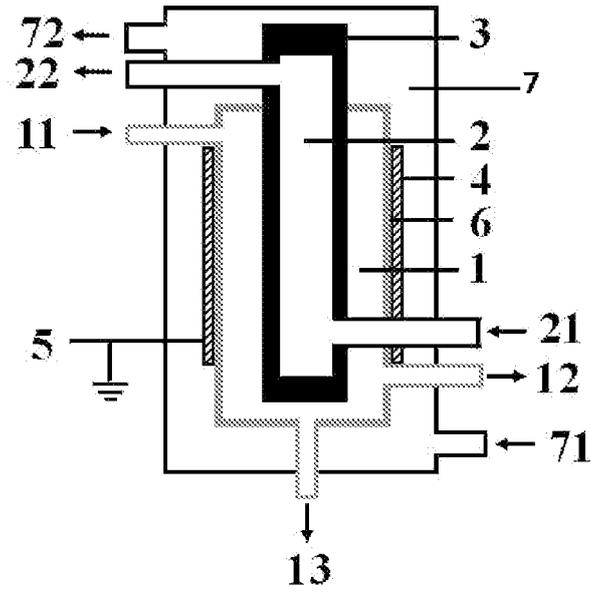


图1c

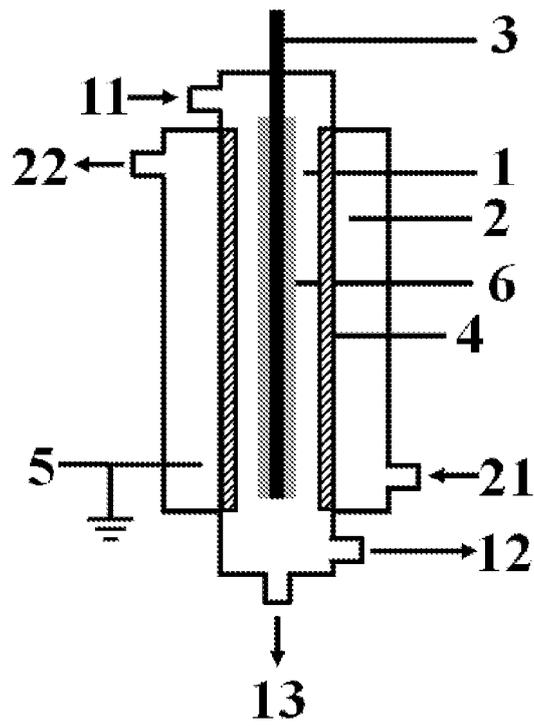


图2a

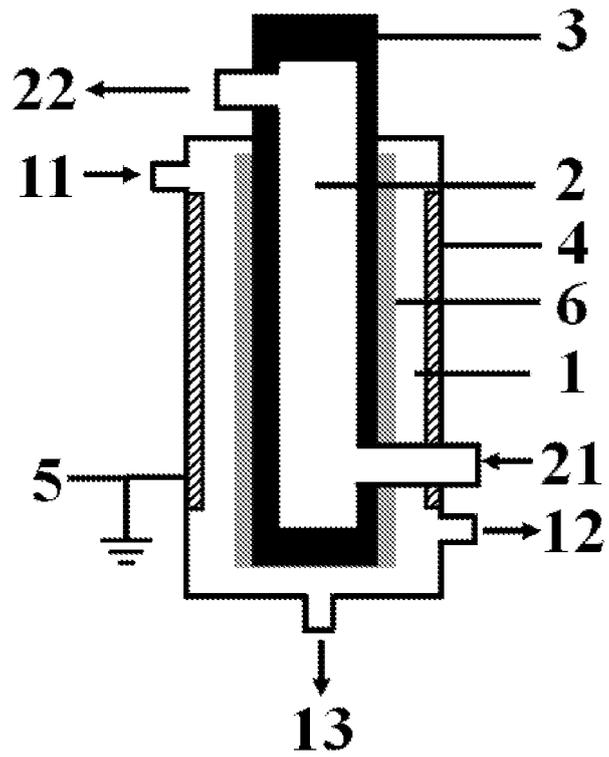


图2b

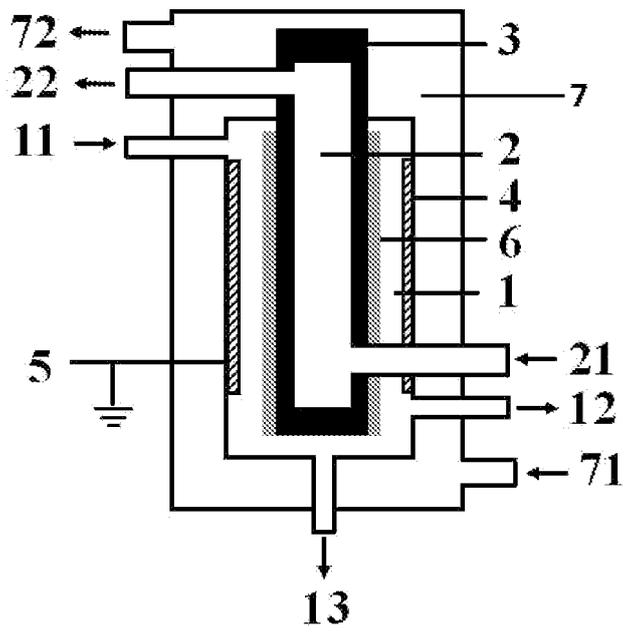


图2c

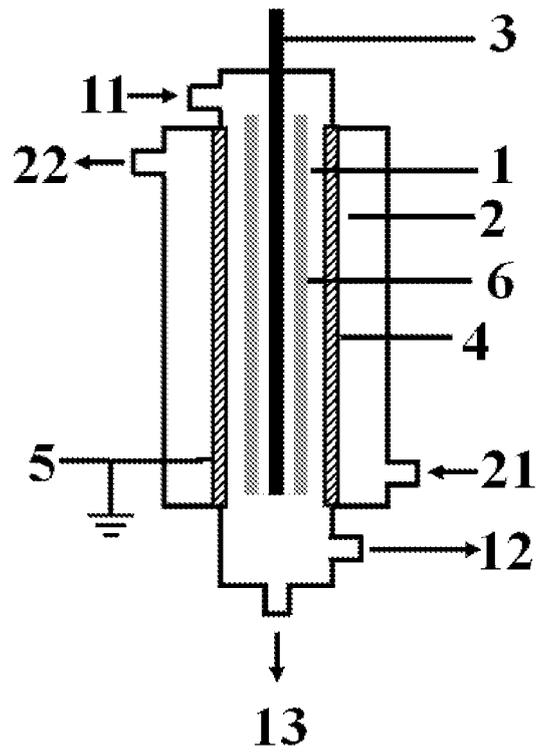


图3a

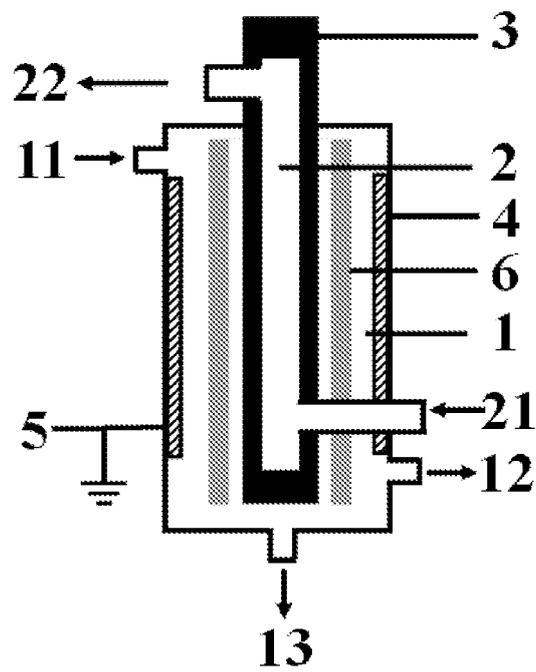


图3b

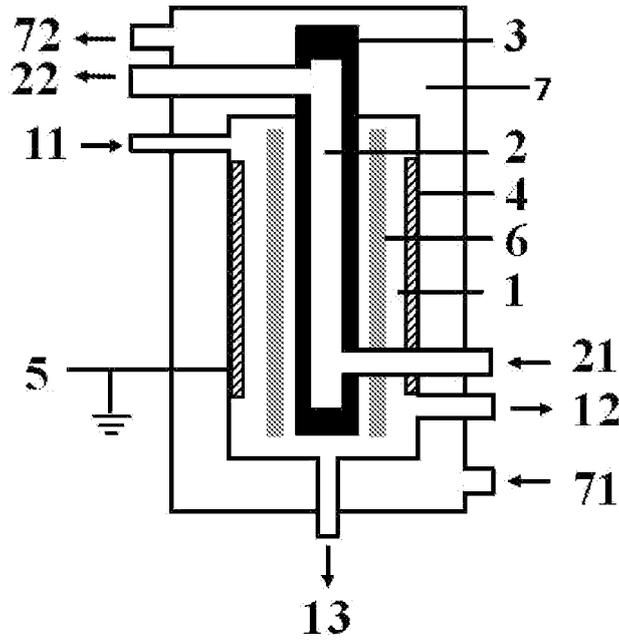


图3c

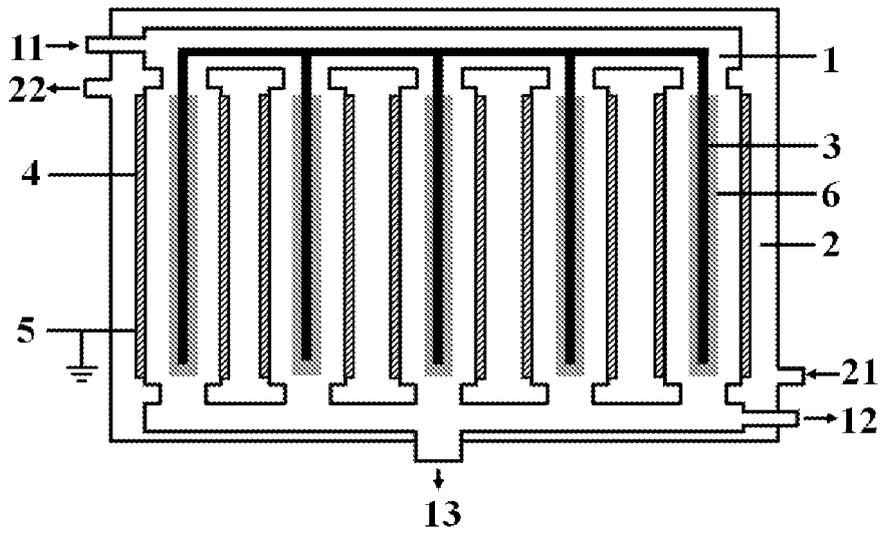


图4a

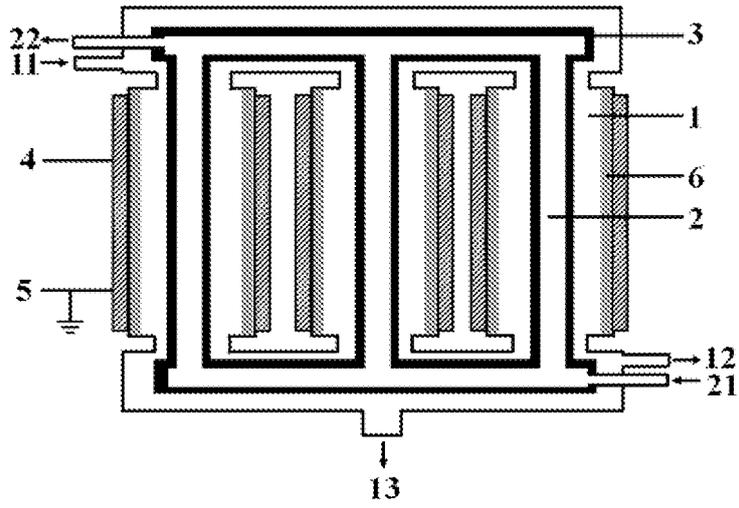


图4b

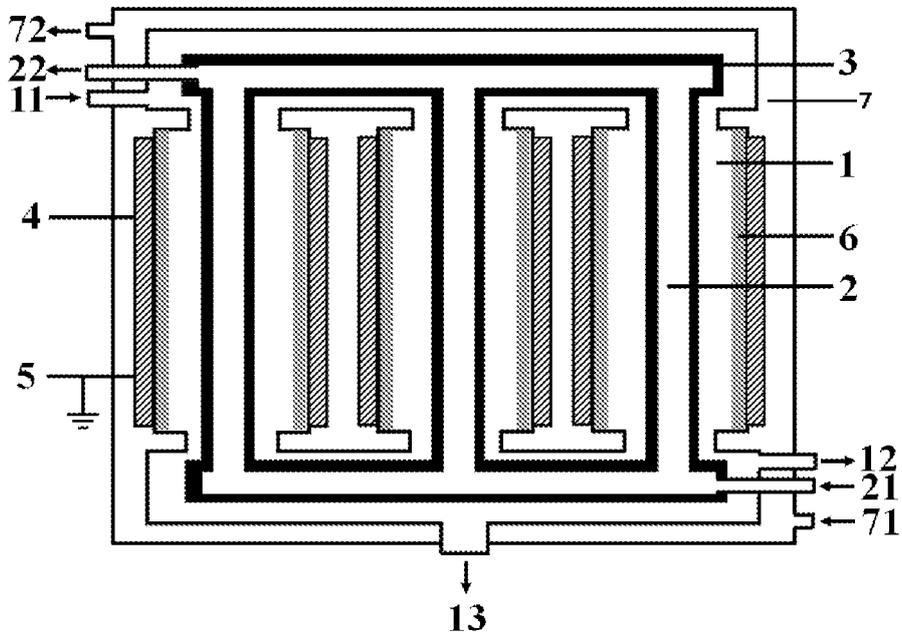


图4c