



## (12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 104428937 A

(43) 申请公布日 2015. 03. 18

(21) 申请号 201380036574. 8

(51) Int. Cl.

(22) 申请日 2013. 03. 06

H01M 8/06(2006. 01)

(30) 优先权数据

C01B 3/38(2006. 01)

61/645, 963 2012. 05. 11 US

H01M 8/04(2006. 01)

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2015. 01. 08

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/US2013/029410 2013. 03. 06

(87) PCT国际申请的公布数据

W02013/169329 EN 2013. 11. 14

(71) 申请人 百拉得动力系统公司

地址 加拿大不列颠哥伦比亚

(72) 发明人 M·柳博夫斯基 A·巴尔加夫

B·哈比卜扎德

(74) 专利代理机构 中国国际贸易促进委员会专

利商标事务所 11038

代理人 蒋旭荣

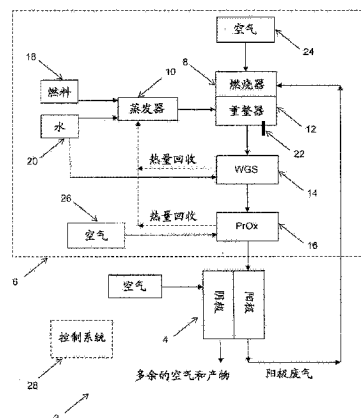
权利要求书2页 说明书10页 附图12页

### (54) 发明名称

操作燃料电池电力系统的方法

### (57) 摘要

一种操作燃料电池电力系统的方法,包括:将烃燃料供给燃料处理系统;将空气和水供给燃料处理系统;将来自燃料处理系统的、富含氢气的重整产物供给一个燃料电池组;将来自该燃料电池组的阳极废气供给燃烧器;从该至少一个燃料电池组抽取负载;以及检测燃料重整器的操作温度;其中,将空气和水供给燃料处理系统包括根据从该燃料电池组中抽取的负载来调节要供给的空气和水的量;将烃燃料供给燃料处理系统包括根据燃料重整器的检测操作温度来调节要供给的烃燃料的量。



1. 一种操作燃料电池电力系统的方法,该燃料电池电力系统包括与燃料处理系统连接的至少一个燃料电池组,该燃料处理系统包括燃料重整器和燃烧器,该燃料重整器用于将烃燃料转变成富含氢气的重整产物,该燃烧器与燃料重整器热连通,该方法包括:

将烃燃料供给燃料处理系统;

将空气和水供给燃料处理系统;

将来自燃料处理系统的、富含氢气的重整产物供给该至少一个燃料电池组;

将来自该至少一个燃料电池组的阳极废气供给燃烧器;

从该至少一个燃料电池组抽取负载;以及

检测燃料重整器的操作温度;

其中,将空气和水供给燃料处理系统包括根据从该至少一个燃料电池组中抽取的负载来调节要供给的空气和水的量;

将烃燃料供给燃料处理系统包括根据燃料重整器的检测操作温度来调节要供给的烃燃料的量。

2. 根据权利要求1所述的方法,其中:烃燃料是天然气或液化石油气。

3. 根据权利要求1所述的方法,还包括:确定燃料重整器的设置点操作温度,且当燃料重整器的检测操作温度与燃料重整器的设置点操作温度不同时调节向燃料重整器供给的烃燃料的量。

4. 根据权利要求3所述的方法,其中:燃料重整器的设置点操作温度在大约650和大约750摄氏度之间。

5. 根据权利要求1所述的方法,其中:将空气和水供给燃料处理系统还包括只根据从该至少一个燃料电池组中抽取的负载来调节要供给的空气和水的量。

6. 根据权利要求1所述的方法,其中:将烃燃料供给燃料处理系统还包括只根据燃料重整器的检测操作温度来调节要供给的烃燃料的量。

7. 根据权利要求1所述的方法,其中:燃料处理系统还包括在燃料重整器下游的水天然气转换反应器以及在该水天然气转换反应器下游的一氧化碳清除装置。

8. 一种操作燃料电池电力系统的方法,该燃料电池电力系统包括与燃料处理系统连接的至少一个燃料电池组,该燃料处理系统包括燃料重整器和燃烧器,该燃料重整器用于将烃燃料转变成富含氢气的重整产物,该燃烧器与燃料重整器热连通,该方法包括:

将烃燃料供给燃料处理系统;

将空气和水供给燃料处理系统;

将来自燃料处理系统的、富含氢气的重整产物供给该至少一个燃料电池组;

将来自该至少一个燃料电池组的阳极废气供给燃烧器;

从该至少一个燃料电池组抽取负载;

检测燃料重整器的操作温度;以及

检测在燃烧器中的燃烧器当量比;

其中,将空气和水供给燃料处理系统包括根据从该至少一个燃料电池组中抽取的负载来调节要供给的空气和水的量;

将烃燃料供给燃料处理系统包括根据在重整器燃烧器中的检测燃烧器当量比来调节要供给的烃燃料的量。

9. 根据权利要求 8 所述的方法,还包括:确定燃料重整器的设置点操作温度,且当燃料重整器的检测操作温度与燃料重整器的设置点操作温度不同时调节燃烧器当量比。

10. 一种操作燃料电池电力系统的方法,该燃料电池电力系统包括与燃料处理系统连接的至少一个燃料电池组,该燃料处理系统包括燃料重整器和燃烧器,该燃料重整器用于将烃燃料转变成富含氢气的重整产物,该燃烧器与燃料重整器热连通,该方法包括:

将烃燃料供给燃料处理系统;

将空气和水供给燃料处理系统;

将来自燃料处理系统的、富含氢气的重整产物供给该至少一个燃料电池组;

将来自该至少一个燃料电池组的阳极废气供给燃烧器;

从该至少一个燃料电池组抽取负载;

检测燃料重整器的操作温度;以及

确定在供给的烃燃料和从至少一个燃料电池组中抽取的负载之间的比例系数;

其中,将空气和水供给燃料处理系统包括根据从该至少一个燃料电池组中抽取的负载来调节要供给的空气和水的量;

将烃燃料供给燃料处理系统包括根据比例系数和从该至少一个燃料电池组中抽取的负载来调节要供给的烃燃料的量。

11. 根据权利要求 10 所述的方法,还包括:确定燃料重整器的设置点操作温度,且当燃料重整器的检测操作温度与燃料重整器的设置点操作温度不同时调节该比例系数。

## 操作燃料电池电力系统的方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种操作燃料电池电力系统的方法，特别是包括燃料处理系统和燃料电池组的燃料电池电力系统。

### 背景技术

[0002] 对于交流电源的研究已经集中关注使用燃料电池来产生电力。与普通化石燃料动力源不同，燃料电池能够由燃料流和氧化剂流产生电力，同时并不产生大量不希望的副产品，例如氧化硫、氧化氮和一氧化碳。

[0003] 目前，小型的固定质子交换隔膜燃料电池系统设计成用于偏远地区的备用电、充电和组合热电，特别是在偏远和没有电网的地区。由于与氢气向系统位置就地传送相关联的高成本和可靠性问题，燃料电池电力系统的实际应用需要包括燃料处理系统，该燃料处理系统能够将正常基础燃料转变成纯度足够用于燃料电池消耗的氢气。

[0004] 不过，大部分商品燃料（例如天然气（NG）、液化石油气（LPG）、汽油、柴油或混合酒精）实际上是多个化学组分的混合物，这些化学组分的相对浓度可以随时间以及随地理位置和市场而有非常大变化。例如，LPG 系统预计对丙烷 - 丁烷燃料混合物进行操作，该混合物在不同市场上能够变化为从几乎纯丙烷到纯丁烷，具有变化量的烃和芳香烃组分，还在系统操作过程中由于更轻组分在各罐顶部处汽化而产生变化。类似的，天然气能够包含直到 10% 的乙烷以及可能由氮和二氧化碳来稀释。

[0005] 燃料组分的这种不确定性对于设计燃料处理系统和燃料电池电力系统的控制策略产生了严重的挑战，在该系统中，多个系统参数（包括蒸汽重整器的蒸汽 - 碳比率、燃烧器的燃料 - 空气比率、燃料电池组的阳极化学计量等）的值必须控制在相当窄的范围内，以便保证成功的系统操作，如表 1 中所概括的（本领域技术人员应当知道，这些范围可以根据燃料电池组的组分和设计、燃料处理系统的组分和设计以及燃料电池电力系统用途而变化）。例如，燃料组分的不确定性使得很难确定与电负载匹配所需的烃燃料流速，从而导致这些系统参数的较大变化，这又可能导致系统故障或者甚至物理损坏。

[0006] 表 1：用于燃料处理系统和燃料电池组的普通操作参数范围以及偏离影响

[0007]

| 参数                                 | 范围      | 偏离影响                           |                                 |
|------------------------------------|---------|--------------------------------|---------------------------------|
|                                    |         | 太低                             | 太高                              |
| 在燃料重整器进口处的蒸汽:碳 (S:C) 比率            | 3.2-3.8 | 催化剂烧焦的危险                       | 较低系统效率                          |
| O <sub>2</sub> /CO 比率 (在优选的氧化装置进口) | 1.0-2.0 | CO 突破燃料电池组的危险                  | 有用的 H <sub>2</sub> 氧化损失, 较低系统效率 |
| 燃烧器化学计量 ( $\lambda_{BR}$ )         | 1.2-1.5 | 更高燃烧器排气温度损坏催化剂, 高排放            | 燃烧器火焰不稳定的危险                     |
| 燃料电池阳极化学计量 (氢气)                    | 1.3-1.5 | 燃料缺乏, 燃烧器燃料的低发热值引起在燃料重整器中的较低温度 | 燃料浪费 (较低系统效率; 更高燃烧器排气温度损坏催化剂)   |
| 燃料电池阴极化学计量 (空气)                    | 1.8-2.2 | 在阴极中的不均匀氧化 (较低系统效率), 水阻塞在阴极槽道中 | 在压缩机上的高寄生负载导致较低系统效率             |

[0008] 因此, 燃料处理系统和燃料电池电力系统的设计和控制在优选是足够强, 以便应付燃料组分变化, 以避免过早失效。设计用于燃料处理系统和燃料电池电力系统的控制系统的一种方法是测量烃燃料组分, 并确定用于其它系统流速 (例如空气和处理水) 的控制等式的校正系数, 以便补偿可能的变化。不过, 对于以多种市场上的燃料来操作的小型 (1-10kW) 电力系统, 需要持续监测燃料组分和调节控制参数可能严重限制市场的可接收性, 并增加了由于燃料组分中大于预计偏差而失效的危险。尽管已经有燃料电池控制和燃料电池系统动态性能的多种数学建模研究, 但是找到用于稳定控制燃料电池电力系统 (该燃料电池电力系统集成了燃料处理系统和燃料电池组) 的增加算法仍然是重要的研究课题。

[0009] 本发明解决了这些问题, 并提供了进一步的相关优点。

## 发明内容

[0010] 简单的说, 本发明涉及操作燃料电池电力系统的方法, 特别是包括燃料处理系统

和燃料电池组的燃料电池电力系统。

[0011] 在一个实施例中,一种操作燃料电池电力系统的方法,该燃料电池电力系统包括与燃料处理系统连接的至少一个燃料电池组,该燃料处理系统包括燃料重整器和燃烧器,该燃料重整器用于将烃燃料转变成富含氢气的重整产物,该燃烧器与燃料重整器热连通,该方法包括:将烃燃料供给燃料处理系统;将空气和水供给燃料处理系统;将来自燃料处理系统的、富含氢气的重整产物供给该至少一个燃料电池组;将来自该至少一个燃料电池组的阳极废气供给燃烧器;从该至少一个燃料电池组抽取负载;以及检测燃料重整器的操作温度;其中,将空气和水供给燃料处理系统包括根据从该至少一个燃料电池组中抽取的负载来调节要供给的空气和水的量;将烃燃料供给燃料处理系统包括根据燃料重整器的检测操作温度来调节要供给的烃燃料的量。

[0012] 在还一实施例中,将空气和水供给燃料处理系统还包括只根据从该至少一个燃料电池组中抽取的负载来调节要供给的空气和水的量。

[0013] 在还一实施例中,将烃燃料供给燃料处理系统还包括只根据燃料重整器的检测操作温度来调节要供给的烃燃料的量。

[0014] 在另一实施例中,一种操作燃料电池电力系统的方法,该燃料电池电力系统包括与燃料处理系统连接的至少一个燃料电池组,该燃料处理系统包括燃料重整器和燃烧器,该燃料重整器用于将烃燃料转变成富含氢气的重整产物,该燃烧器与燃料重整器热连通,该方法包括:将烃燃料供给燃料处理系统;将空气和水供给燃料处理系统;将来自燃料处理系统的、富含氢气的重整产物供给该至少一个燃料电池组;将来自该至少一个燃料电池组的阳极废气供给燃烧器;从该至少一个燃料电池组抽取负载;检测燃料重整器的操作温度;以及检测在燃烧器中的燃烧器当量比;其中,将空气和水供给燃料处理系统包括根据从该至少一个燃料电池组中抽取的负载来调节要供给的空气和水的量;将烃燃料供给燃料处理系统包括根据在重整器燃烧器中的检测燃烧器当量比来调节要供给的烃燃料的量。

[0015] 在还一实施例中,一种操作燃料电池电力系统的方法,该燃料电池电力系统包括与燃料处理系统连接的至少一个燃料电池组,该燃料处理系统包括燃料重整器和燃烧器,该燃料重整器用于将烃燃料转变成富含氢气的重整产物,该燃烧器与燃料重整器热连通,该方法包括:将烃燃料供给燃料处理系统;将空气和水供给燃料处理系统;将来自燃料处理系统的、富含氢气的重整产物供给该至少一个燃料电池组;将来自该至少一个燃料电池组的阳极废气供给燃烧器;从该至少一个燃料电池组抽取负载;检测燃料重整器的操作温度;以及确定在供给的烃燃料和从燃料电池组中抽取的负载之间的比例系数;其中,将空气和水供给燃料处理系统包括根据从该至少一个燃料电池组中抽取的负载来调节要供给的空气和水的量;将烃燃料供给燃料处理系统包括根据比例系数和从该至少一个燃料电池组中抽取的负载来调节要供给的烃燃料的量。

[0016] 通过参考附图和下面的详细说明将清楚这些和其它方面。

## 附图说明

[0017] 附图中,相同参考标号表示类似元件或动作。附图中的元件的尺寸和相对位置并不需要按比例画出。例如,多个元件的形状和角度并不按比例画出,且一些元件任意放大和定位,以便提高附图的清晰度。而且,元件的特殊形状(如图所示)并不传递关于该特殊元

件的实际形状的任意信息,只是选择为容易在图中识别。

[0018] 图 1 表示了根据一个实施例的燃料电池电力系统的示意图。

[0019] 图 2A-2K 表示了控制燃料电池电力系统反应物流速的现有技术方法的建模结果。

[0020] 图 3A-3J 表示了根据一个实施例控制燃料电池电力系统反应物流速的方法的建模结果。

## 具体实施方式

[0021] 除非上下文另外需要,否则在整个说明书和随后的权利要求中,措辞“包括”和它的变化形式将解释为开放、包含的意思,也就是“包括但不限于”。

[0022] 在本文中,燃烧器当量比定义为实际空气-燃料比率除以在燃烧化学计量下的空气-燃料比率。

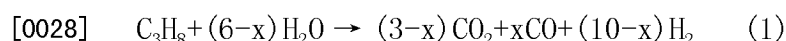
[0023] 根据一个实施例,参考图 1,燃料电池电力系统 2 包括至少一个燃料电池组 4 和燃料处理系统 6。为了简明,图 1 中没有表示压缩机、泵、风扇、阀、传感器、控制电子元件以及其它对于本发明的说明并不重要的平衡设备部件。本领域技术人员应当知道,这些部件通常用于燃料电池系统和燃料处理系统中,且在一些情况下可以根据燃料电池系统的设计而组合或集成。

[0024] 燃料电池组 4 包括多个单元电池,各单元电池包括夹在隔膜电极组件之间的流场板(未示出)。本领域技术人员应当知道适合在本发明的燃料电池电力系统中使用的多种不同类型和结构的燃料电池组。在图 1 中,燃料电池组 4 由单个阳极和阴极来表示。

[0025] 燃料处理系统 6 包括燃烧器 8、蒸发器 10、燃料重整器 12、水-天然气转换(WGS)反应器 14 和一氧化碳(CO)清除装置 16。

[0026] 在操作中,来自烃进料 18 的烃燃料与处理水混合,并一起通入蒸发器 10 中。烃燃料例如可以是天然气(NG)、液化石油气(LPG)、汽油、柴油或混合酒精。在一些实施例中,烃燃料是基本丙烷和丁烷的混合物。蒸发器 10 可以选择地包括用于提高传热和混合的装置,例如螺旋翅片、销-翅片、槽和其它流动槽道。也可选择,在气体燃料的情况下,燃料与来自蒸发器 10 的蒸汽混合,以便产生均匀混合的气体混合物,该气体混合物再供给燃料重整器 12(未示出)。

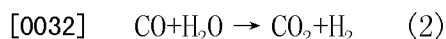
[0027] 蒸发的烃燃料和蒸汽的混合物从蒸发器 10 供给燃料重整器 12,在该燃料重整器 12 中,蒸发的烃燃料进行重整,以便形成主要包括氢气、二氧化碳和一氧化碳的重整产物。例如,对于丙烷燃料,在燃料重整器 12 中的反应能够表示为如下:



[0029] 对于基于烃的燃料,在燃料重整器 12 的出口处的设置点操作温度通常控制在大约 650 至 750 摄氏度之间,例如在大约 670 和 700 摄氏度之间,尽管本领域技术人员应当知道,燃料重整器的合适设置点操作温度可以根据燃料或燃料混合物的组分而变化。热电偶 22 检测燃料重整器 12 的操作温度。

[0030] 因为在燃料重整器 12 中的重整反应是吸热反应,因此通常使用燃烧器 8 来向燃料重整器 12 提供热量,以便将燃料重整器温度保持在合适温度或温度范围。燃烧器 8 供给有阳极废气(离开燃料电池组 4 的阳极侧的气体,该气体包含未使用的氢气以及未重整的烃燃料)和来自空气源 24 的空气,它们再燃烧以便产生热量。

[0031] 离开燃料重整器 12 的重整产物通常包含相对大量的一氧化碳,该一氧化碳并不合适,因为它将使得在燃料电池组中使用的催化剂中毒。因此,燃料处理系统 6 包括 WGS 反应器 14,该 WGS 反应器 14 与燃料重整器 12 流体连接,用于通过水-天然气转换反应而将来自燃料重整器 12 的重整产物流中的至少一部分一氧化碳转变成二氧化碳和氢气,该水-天然气转换反应可以表示如下:



[0033] WGS 反应器 14 的温度优选是在大约 200 至 400 摄氏度之间,例如在 250 和 300 摄氏度之间。在这些温度下,在离开 WGS 反应器 14 的重整产物流中的一氧化碳浓度通常减小至大约 0.5 至大约 1.0 容积%。多余的热量可以选择地导向蒸发器 10。

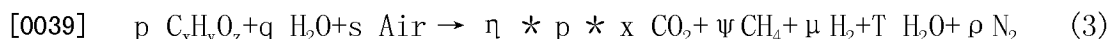
[0034] 与 WGS 反应器 14 流体连接的 CO 清除装置 16 通常用于进一步降低在来自 WGS 反应器 14 的重整产物流中的一氧化碳浓度至可由燃料电池组 4 接受的水平。本领域中已知的多个技术可以用于 CO 清除装置,例如隔膜分离、压力摆动吸附、一氧化碳向甲烷的选择转变以及一氧化碳与来自空气的氧的优先氧化。

[0035] 在一个实施例中,CO 清除装置 16 是优先氧化 (PrOx) 装置。PrOx 装置通常包括用于使得来自重整产物流的一氧化碳与来自空气源 26 的氧气反应的催化剂,以便形成二氧化碳。PrOx 装置的操作温度通常控制在大约 100 至 200 摄氏度之间,例如在大约 100 至 150 摄氏度之间。来自 PrOx 装置的重整产物流的一氧化碳浓度通常等于或小于大约 50ppm,例如等于或小于大约 10ppm,这适合于燃料电池消耗。再有,由 PrOx 装置产生的多余热量可以选择地导向蒸发器 10。

[0036] 为了合适的燃料电池电力系统操作,在燃料处理系统和燃料电池组中的所有化学反应都需要在狭窄的设置反应专用温度和反应物浓度范围内操作,如表 1 中所示。因此,燃料处理器硬件设计以及用于传送燃料、处理水和空气的控制策略的组合是保证燃料电池电力系统的稳定和最佳性能所需。

[0037] 在一个实施例中,控制系统 28 利用燃料电池电流来控制或调节反应物流速,例如空气至燃烧器 8、处理水至燃料重整器 12 和空气至 CO 清除装置 16,除了通向燃料重整器 12 的烃燃料流速。相反,在并不预先知道燃料组分的情况下,烃燃料流速控制或调节成使得在操作过程中保持燃料重整器 12 中的合适设置点操作温度或温度范围。

[0038] 控制策略基于在供给燃料重整器 12 的烃燃料量、燃料电池组电流、来自燃料电池组 4 的阳极废气(该阳极废气返回燃烧器 8)的热值和燃料处理系统 6 中的内部热平衡之间的内在相互关系。对于由通式  $\text{C}_x\text{H}_y\text{O}_z$  (其中,  $x$ 、 $y$  和  $z$  分别是在各分子中的 C、H 和 O 原子的平均数)表示的燃料,进入燃料电池组 4 的气体的燃料组分能够通过总体重整公式 (3) 来计算:



[0040] 其中,  $p$ 、 $q$ 、 $s$ 、 $\psi$ 、 $\mu$ 、 $T$  和  $\rho$  是单位为标准升每分钟 (slpm) 的流速,燃料转变效率  $\eta$  是用户确定的参数(通常在 0.95-1.0 之间变化),  $\psi$ 、 $\mu$ 、 $T$  和  $\rho$  能够计算为:

$$[0041] \quad \psi = (1 - \eta) * p * x$$

$$[0042] \quad \rho = s * 0.79$$

$$[0043] \quad T = p * z + q + 2 * s * 0.21 - 2 * \eta * p * x$$

$$[0044] \quad \mu = 0.5 * p * y + q - 2 * \psi - T$$



[0045] 这提供了在从 CO 清除装置 16 供给燃料电池组 4 的重整产物 ( $\mu$ ) 中存在的氢气量。由燃料电池组消耗的氢气量能够由公式 (4) (见实例) 来计算:

$$[0046] \quad FC_{H_2, \text{cons}} = MCC * 60 * 22.4 / (2 * F)$$

[0047] 当 MCC 是多电池电流 (燃料电池电流乘以电池组中的电池数), F 是法拉第常数。假定不同燃料的热值与它的碳和氢含量 (这是对于烷烃的不同混合物的情况, 该烷烃是 LPG 燃料的主要成分) 近似成正比, 然后阳极废气的热含量能够这样计算:

$$[0048] \quad LHV_{AWG} = LHV_{H_2} * (\mu - FC_{H_2, \text{cons}}) + LHV_{CH_4} * \psi \quad (4)$$

[0049] 因此, 阳极废气的热含量依赖于它的氢气的热值、未重整烃燃料含量以及燃料电池组电流。

[0050] 在一个实施例中, 处理水和空气流速 (例如燃烧空气、燃料重整器空气和处理水、阴极空气等) 控制或调节成与 MCC 成比例 (在实例中通过公式 (11) 至 (14))。当 MCC 响应从燃料电池组取出的变化负载而变化时, 处理水和空气流速将变化, 从而导致燃料重整器的操作温度的变化。当控制系统 28 检测到这样的操作温度变化时, 对烃燃料的流速进行调节, 以便使得燃料重整器保持在合适的设置点操作温度。因此, 不需要计量或预先知道烃燃料的确切组分。在一些实施例中, 处理水和空气流速只根据 MCC 来进行控制或调节。在一些实施例中, 烃燃料只根据燃料重整器的操作温度来进行控制或调节。

[0051] 在一些实例中, 由于燃料重整器的热质量, 燃料重整器温度可以更慢地响应在重整器供给流动参数中的变化。例如, 当 MCC 变化时, 供给燃烧器的空气量将立即变化, 因为空气流速由 MCC 控制。同时, AWG 的热值将因为消耗更大部分的氢气而快速降低 (根据公式 (4)), 因此, 再循环至燃烧器的 AWG 量减少。不过, 因为燃料重整器温度并不立即随着这些流动的变化而变化 (由于重整器的热质量), 因此并不立即调节烃燃料流速。这可能导致燃烧器燃料不足 (当 MCC 增加时) 或者燃料和燃烧器产生的放热过多 (当 MCC 降低时)。

[0052] 因此, 在另一实施例中, 烃燃料流速根据燃烧器当量比  $\lambda_{BR}$  来进行控制或调节。燃烧器当量比可以独立地测量, 例如通过将氧传感器安装在燃烧器排气管线中来确定氧浓度, 然后与燃烧器当量比设置点  $\lambda_{SP}$  来比较。当 MCC 变化, 从而使得燃烧器空气供给相应变化时, 烃燃料流量立即调节成使得燃烧器当量比保持在它的设置点值, 以使得足够量的重整产物在新的 MCC 下供给燃料电池组。经过一段时间, 重整器操作温度可以响应新的系统操作参数而变化或偏离合适操作温度设置点。当检测到燃料重整器中的这种温度变化时, 燃烧器当量比继续通过改变烃燃料流速来调节, 直到检测的操作温度达到合适的操作温度设置点, 从而建立新的燃烧器当量比设置点。使用这种控制方法, 在燃料重整器中由于它的热质量而引起的任何温度变化滞后都将减轻, 且不需要预先知道烃燃料的组分来用于提高燃料处理系统的控制。

[0053] 在操作过程中燃料组分变化的情况下, 用于给定 MCC 和燃料重整器温度的燃料流速将经过一段时间变化。而且, 燃烧器当量比设置点对于不同的燃料处理系统和燃料组分也将不同。

[0054] 也可选择, 为了省略氧气传感器, 比例系数  $K_{PF}$  可以用作调节参数, 以便使得燃料重整器的操作温度保持在它的设置点值。根据公式 (10), 烃燃料流速通过  $K_{PF}$  而设置成与 MCC 成比例。因此, 当 MCC 变化时, 烃燃料流速也变化 (以及全部其它流量, 在实例中根据公式 (11) 至 (14))。当这产生了重整器的操作温度与合适操作温度设置点的偏离时, 调节  $K_{PF}$ ,

从而导致烃燃料流速变化,因此导致燃料重整器的操作温度变化。最终,通过燃料重整器的检测操作温度的连续反馈以及  $K_{PF}$  (因此燃料流速) 的变化,燃料重整器的操作温度将达到它的合适操作温度设置点。本领域技术人员应当知道,该方法将需要实际测量烃燃料流速(或者测量燃料供给促动器位置),但是不需要在燃烧器排气管线中的氧气传感器,因为烃燃料流速将随着 MCC 的改变立即改变,且燃烧器当量比将保持在狭窄范围内。为了补偿可变的烃燃料组分,对  $K_{PF}$  值进行调节,以便将燃料重整器的操作温度保持在它的设置值。

[0055] 控制策略能够通过任意公知的控制系统或装置来进行,例如计算机或处理逻辑芯片,例如使用比例-积分-导数 (PID) 控制器。在这种情况下,PID 控制环路设置成将重整器温度控制在特殊设置点值,并使用向重整器供给的烃燃料(或者燃烧器当量比设置点值或比例系数)作为调节参数。

[0056] 实例

[0057] 如前所述的燃料电池电力系统以两种方式建模:第一方式是通过基于燃料的控制策略,它基于假设烃燃料组分、测量与 FC 系统负载 (MCC) 成比例的燃料流速以及将处理水、燃烧器空气、燃料电池阴极空气和优先氧化装置空气的流速设置成与烃燃料供给流量成比例;第二方式是通过基于电流和温度的控制策略,它直接基于多个电池电流 (MCC) (总燃料电池组电流) 和燃料重整器的温度。

[0058] 对燃料电池电力系统进行建模,以便包括燃料重整器,随后是 WGS 反应器和优先氧化装置,它们渐进地将烃燃料转变成具有小于大约 10ppm 一氧化碳的重整产物。重整产物供给燃料电池组的阳极侧,同时压缩空气供给燃料电池组的阴极侧。来自阳极的排气(阳极废气 (AWG),它包含未使用的氢和未重整的烃燃料)作为燃料供给燃烧器,而没有附加的(调整)燃料。热的燃烧器排气向燃料重整器提供热量,剩余的热量用于蒸发器中。由 WGS 和优先氧化装置产生的放热热量也用于产生蒸汽。

[0059] 在燃料电池电力系统模型中进行以下假设和近似:

[0060] •将燃料重整器建模为在特定出口温度 (675°C) 下平衡的吉布斯 (Gibbs) 反应器。由燃料重整器所需的热量已经从燃烧器排气流中取出。将输入燃料重整器的烃燃料调节成等同于两个热流。

[0061] •将 WGS 反应器也建模为具有固定进口和出口温度(分别为 300°C 和 200°C) 的 Gibbs 反应器,且将处理热量传递给蒸发器。存在于燃料重整器出口处的甲烷将假设在 WGS 反应器中为惰性,以避免甲烷化反应。

[0062] •将优先氧化装置建模为转变反应器,其中,氧气首先用于氧化一氧化碳,然后,剩余的氧气用于氧化氢气。模型假设在重整产物流中的一氧化碳被完全除去,因为估计可能存在的高达 50ppm 一氧化碳预计基本不会影响优先氧化装置的热平衡。进口和出口温度分别固定在 200°C 和 100°C,将处理热传递给蒸发器,与 WGS 反应器类似。

[0063] •将燃料电池组建模为一系列反应器。首先,组分分离操作使得用于 MCC 所需的氢气量与供给阳极的重整产物流分开。然后,在 MCC 和由燃料电池组消耗的氢气之间的相互关系确定如下:

[0064] 
$$MCC[\text{Ampere-cells}] = 2 * H_2[\text{mple/s}] * F \quad (5)$$

[0065] 这种氢气分离基本对应于质子交换隔膜处理。将阴极建模为等温反应器(在预定燃料电池组温度下操作),其中,从阳极横过隔膜至阴极的任何氢气都由来自阴极空气流的

氧气来氧化。根据电流密度（该电流密度确定为 MCC 除以总燃料电池组实际面积），电池电压由制造商提供的极化曲线来确定。然后，由燃料电池组产生的电功率计算为 MCC 和电池电压的乘积，并从总阴极热量释放中减去。剩余的热量部分用于预热阳极和阴极进口流至合适操作温度，且热量的平衡用于加热燃料电池组冷却剂流。操作设备平衡（BOP）部件（气泵和水泵、控制电子元件、冷却风扇等）所需的功率从由燃料电池组产生的电功率中减去，剩余功率被认为是对于消费者有用的负载。系统效率再计算为有用电功率与供给系统的燃料的低热值（LHV）的比率。

[0066] 这种稳定状态模型以燃料电池组电流需求作为主控制参数来运行，因此模拟将电流调节成匹配电负载需求的燃料电池电力系统。在这种研究中，MCC 在 840 和 4400 安培电池（500W 和 2500W）之间变化。产生的电流密度在 0.24 和 1.3A/cm<sup>2</sup> 之间变化（假定燃料电池组有效面积为 3500cm<sup>2</sup>），这对应于在大约 0.77 ≥ V 电池 ≥ 0.65V 之间的每燃料电池电压。

[0067] 利用上述假设，研究了两种控制向燃料电池电力系统供给的各种供料的流速的方法：基于燃料的控制策略以及基于电流和温度的控制策略。

[0068] 对比实例：基于燃料的控制策略

[0069] 基于燃料的控制策略是基于测量烃燃料供给流速以及将处理水、燃烧器空气、燃料电池阴极空气和优先氧化装置空气的流速设置成与烃燃料流速成比例，它们由公式（6）至（9）表示。通向蒸发器和燃料重整器的处理水流速（PW）根据在燃料分子中的碳原子的平均数目来确定，且将设计的蒸汽-碳比率设置为 3.5。燃烧器空气流速（BA）由设计燃烧器化学计量（λ<sub>BR</sub>）和包含在来自燃料电池组的阳极废气（该阳极废气供给燃烧器作为燃料）中的氢气量来确定。阴极空气流速（CA）由设计阴极化学计量和由燃料电池组消耗的氢气量来确定。优先氧化装置空气流速（PA）根据在来自 WGS 反应器的重整产物中的假设一氧化碳浓度（通常为大约 0.75%，干基）以及朝向一氧化碳氧化的优先氧化反应选择性（该选择性假设为大约 50%）来确定。烃燃料流速（PF）设置成与 MCC 成比例（公式（10）），其中，比例系数 K<sub>PF</sub> 是调节的系统操作参数，以便将燃料重整器温度调节至特定值。

$$[0070] \quad PW[g/min] = K_{PW} * PF[slpm]; K_{PW} = C_{av} * StoC * 18/22.4 \quad (6)$$

$$[0071] \quad BA[slpm] = K_{BA} * PF[slpm]; K_{BA} = \lambda_{BR} * K_{H_2} * (\lambda_{AN}-1)/\lambda_{AN}/2/0.21 \quad (7)$$

$$[0072] \quad CA[slpm] = K_{VA} * PF[slpm]; K_{CA} = K_{H_2} * \lambda_{CA}/\lambda_{AN}/2/0.21 \quad (8)$$

$$[0073] \quad PA[slpm] = K_{PA} * PF[slpm]; K_{PA} = K_{mole} * CO\% * S\% / 2/0.21 \quad (9)$$

$$[0074] \quad PF[slpm] = K_{PF} * MCC[A] \quad (10)$$

[0075] 其中：

[0076] C<sub>av</sub>：在燃料中的每个烃分子的平均碳原子数；

[0077] StoC：在燃料重整器中的设计蒸汽：碳比率；

[0078] K<sub>H<sub>2</sub></sub>：在重整处理中每摩尔燃料产生的 H<sub>2</sub> 摩尔数。

[0079] λ<sub>AN</sub>：设计燃料电池组阳极化学计量；

[0080] λ<sub>CA</sub>：设计 FC 阴极化学计量；

[0081] λ<sub>BR</sub>：设计燃烧器化学计量；

[0082] K<sub>mole</sub>：每摩尔燃料的二氧化碳和氢气（干）的摩尔数；

[0083] CO%：在通向优先氧化装置的进口处的假定 CO%（干）；以及

[0084] S% :优先氧化反应的选择性。

[0085] 这种控制策略需要计量燃料供给流速和已知燃料组分,以便合适设置其它流动参数。在这种研究中,将控制系数设置成假定 LPG 燃料为丙烷和丁烷的等摩尔混合物 ( $C_{3.5}H_9$ )。对于该混合物,在公式 (6) 至 (9) 中的参数为:

[0086]  $C_{av} = 3.5$

[0087]  $K_{H_2} = 11.5 (C_{3.5}H_9 + 7H_2O \rightarrow 3.5CO_2 + 11.5H_2)$

[0088]  $K_{mole} = 15 (C_{3.5}H_9 + 7H_2O \rightarrow 3.5CO_2 + 11.5H_2)$

[0089]  $\lambda_{AN} = 1.35$

[0090]  $\lambda_{CA} = 2.0$

[0091]  $\lambda_{BR} = 1.7$

[0092] 将在公式 (10) 中的  $K_{PF}$  参数调节成保持特定燃料重整器出口温度。在该模型中,这通过改变  $K_{PF}$  参数来模拟,以便在由燃烧器提供的热量和燃料重整器在 675°C 的特定出口温度下的热需求之间获得合适的平衡。

[0093] 本发明实例:基于电流和温度的控制策略

[0094] 基于电流和温度的控制策略是基于直接根据 MCC 值来确定全部系统流速(公式 (11) 至 (14)),除了烃燃料流速之外,如前面的说明中所述。在变化的流速和 MCC 之间的系数设置成与相应流速匹配,与在基于燃料的控制策略中对于丙烷和丁烷的等摩尔混合物相同。

[0095]  $PW[g/min] = 1 + 0.00883 * MCC[A]$  (11)

[0096]  $BA[slpm] = 0.013 * MCC[A]$  (12)

[0097]  $CA[slpm] = 0.03 * MCC[A]$  (13)

[0098]  $PA[slpm] = 0.0006 * MCC[A]$  (14)

[0099] 因为流速只根据 MCC 来确定,不需要计量烃燃料供给流速,且没有专门用于它的公式。实际上,烃燃料供给流速用作控制燃料重整器温度的参数。与在先前算法中的  $K_{PF}$  参数类似,将烃燃料供给流速的值上下调节,以便保证在由燃烧器提供的热量和燃料重整器在设置为常量 675°C 的燃料重整器出口温度下的热需求之间平衡。

[0100] 建模结果

[0101] 对于两种控制策略,模型对于三种燃料进行测试: $C_3H_8$ (纯丙烷)、 $C_4H_{10}$ (纯 n 丁烷)、50-50(等摩尔  $C_3H_8/C_4H_{10}$  混合物)。另外基于电流和温度的控制模型与纯甲烷( $CH_4$ )一起进行。对于各燃料,MCC 在 840 和 4400 安培-电池之间变化,这近似对应于在 500 和 2500We 之间的净系统电功率。图 2 和 3 中分别表示了系统的性能参数,该性能参数作为两种不同控制策略的净系统电功率的函数。

[0102] 如图 2A-K 中所示,由基于燃料的控制策略的结果表明系统操作参数保持在只用于等摩尔 50-50 燃料的所需范围,为此设置控制公式。燃料组分的改变引起操作参数的剧烈摆动,从而使得它们处于对于纯丙烷和纯丁烷的燃料电池电力系统操作可接受的值之外(见表 1)。参考图 2C 和 2D 很清楚,对于丙烷和丁烷燃料,在燃料重整器中的 S:C 比率和在优先氧化装置中的  $O_2:CO$  比率处于可接受的范围之外。如前所述,较低 S:C 比率可能导致重整催化剂烧焦,在优先氧化装置中的低空气流速可能导致一氧化碳不能充分地除去至合适浓度水平,而高 S:C 比率将导致低效率,并可能对燃料重整器温度有负影响,因为多余的

处理水将不能合适蒸发,在优先氧化装置中的高空气流速将导致过多氢气消耗,这同样使得优先氧化装置过热和导致总体较低的燃料电池电力系统效率。因此,基于燃料的控制策略只能够在燃料组分变化成对应于特定燃料混合物时在调节控制参数时操作。不过,这对于经济使用并不合适,因为在不同国家对于液体丙烷气的燃料规格不同,且丙烷和丁烷在使用过程中在储罐内以不同比例沸腾(例如在储罐开始使用时丙烷浓度更高,在储罐使用结束时丁烷浓度更高)。

[0103] 对于基于电流和温度的控制策略,尽管烃燃料的流速对于不同类型的烃燃料明显不同,如由于变化的热值而可预期,但是全部其它系统参数保持在与独立于燃料组分操作的系统(用于丙烷和丁烷的任意混合物)类似的范围内,如图 3A-J 中所示。结果表明,全部燃料电池电力系统操作参数都在合适范围内,如表 1 中所示。因此,如前所述,基于电流和温度的控制策略能够处理较宽范围的、基于丙烷和丁烷的燃料混合物。本领域技术人员应当知道,用于公式 (11) 和 (14) 中的处理水流速和优先氧化装置空气流速的系数的精细调整能够分别根据实际系统测试来进行,以便在所需系统调低的全部范围中进一步调节这些值。

[0104] 基于电流和温度的控制策略还使用纯甲烷( $\text{CH}_4$ )来建模。图 3A-J 表示了当 S:C 比率、优先氧化装置空气比率  $\lambda_{\text{AN}}$  和  $\lambda_{\text{BR}}$  保持在用于全部 LPG 燃料的狭窄范围内,它们与甲烷有较大偏离,因为用于甲烷的 H:C 比率明显不同。因此,与公式 (11) 至 (14) 中所示不同的关联系数将用于天然气系统。不过,通过变化设置的系数,系统将能够处理一定范围的天然气组分变化,因此能够以非特定的天然气燃料来操作。类似的,用于控制系统的变化设置系数同样能够用于其它类型的燃料,例如混合酒精。

[0105] 通过比较两种控制策略,本领域技术人员应当知道,基于燃料的控制策略需要严格设置用于系统质量平衡的相互关系。因此,可以预期,烃燃料的组分是管理燃料电池电力系统操作的公式的重要组分。在整个操作过程中已知烃燃料组分和能够测量烃燃料流速的情况下,基于燃料的控制策略能够良好地控制燃料电池电力系统。不过,在燃料组分随不同地理地区和市场和 / 或在操作过程中变化时,基于电流和温度的控制策略提供了燃料电池电力系统的简化和提高的控制。

[0106] 在本说明书中参考和 / 或在申请数据页中列出的全部上述美国专利、美国专利申请文献、美国专利申请、外国专利、外国专利申请和非专利文献都整个由本文参引。

[0107] 尽管已经表示和介绍了本发明的特殊元件、实施例和应用,但是应当知道,本发明并不局限于此,因为本领域技术人员在不脱离本发明的精神和范围的情况下可以进行变化,尤其是参考了前述的教导可以进行变化。

[0108] 美国专利申请 No. 61/645963(申请日为 2012 年 5 月 11 日)整个被本文参引。

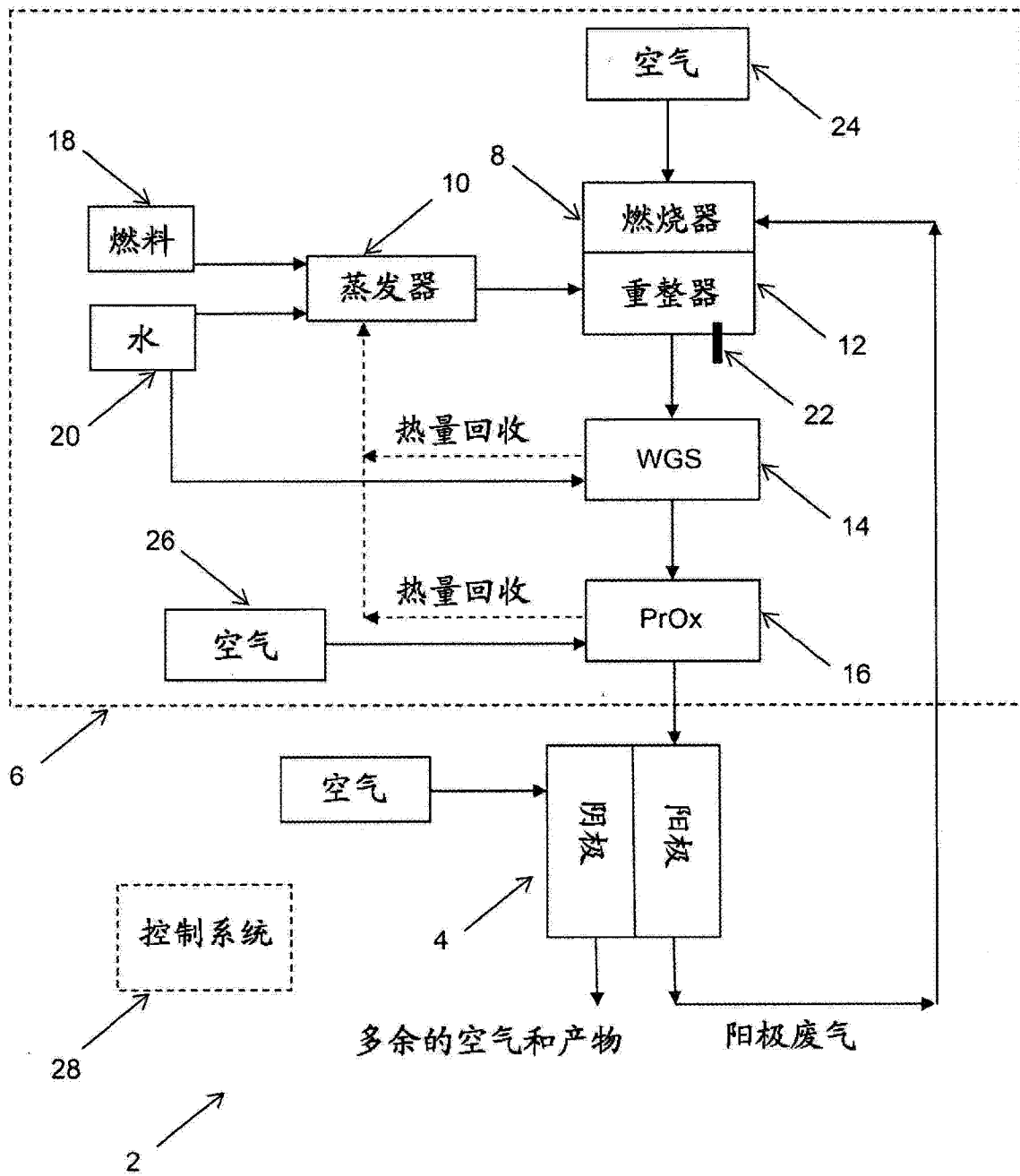


图 1

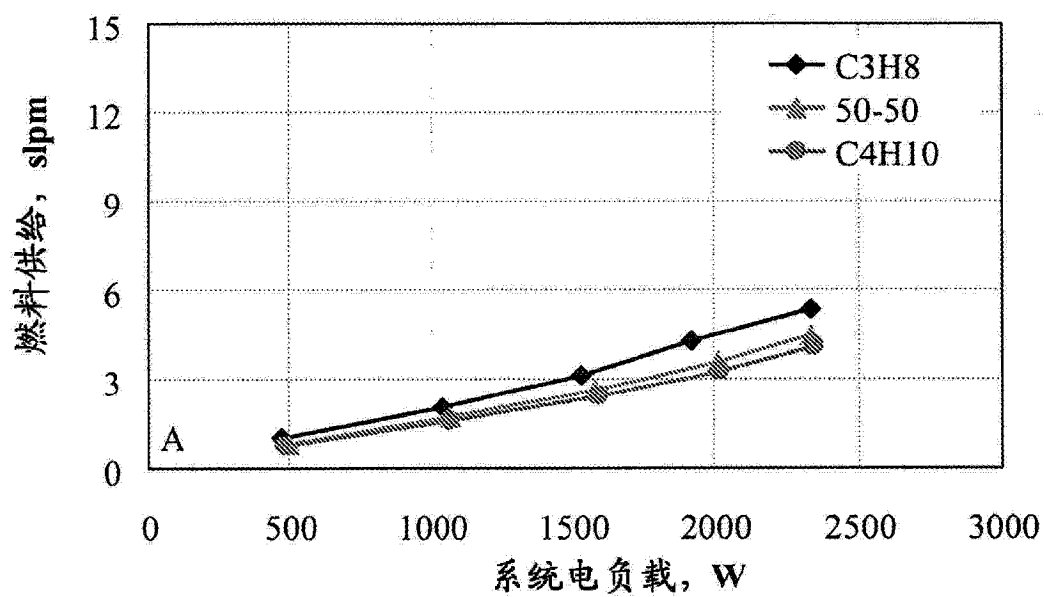


图 2A

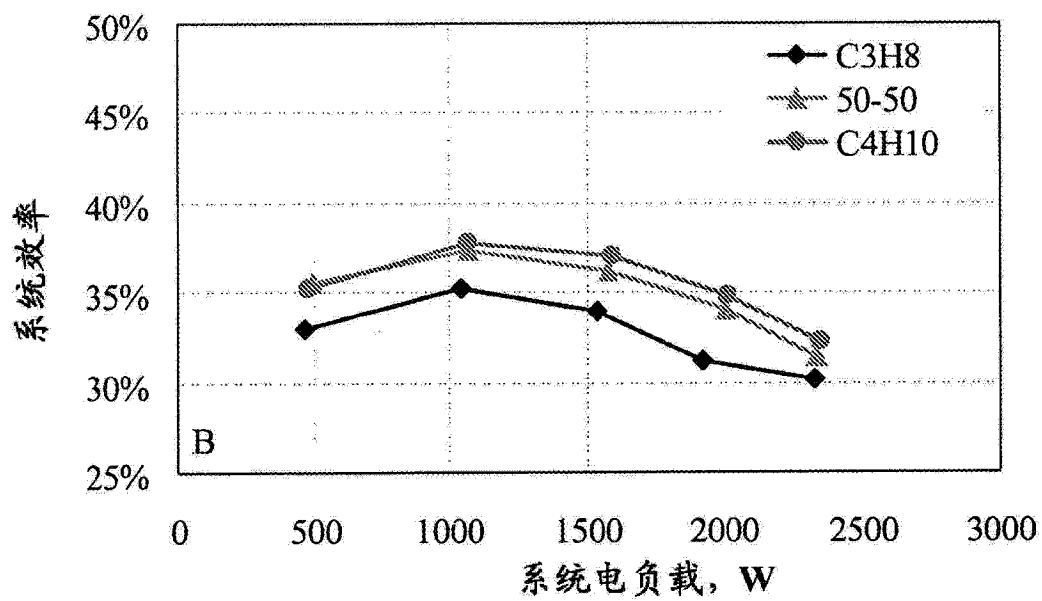


图 2B

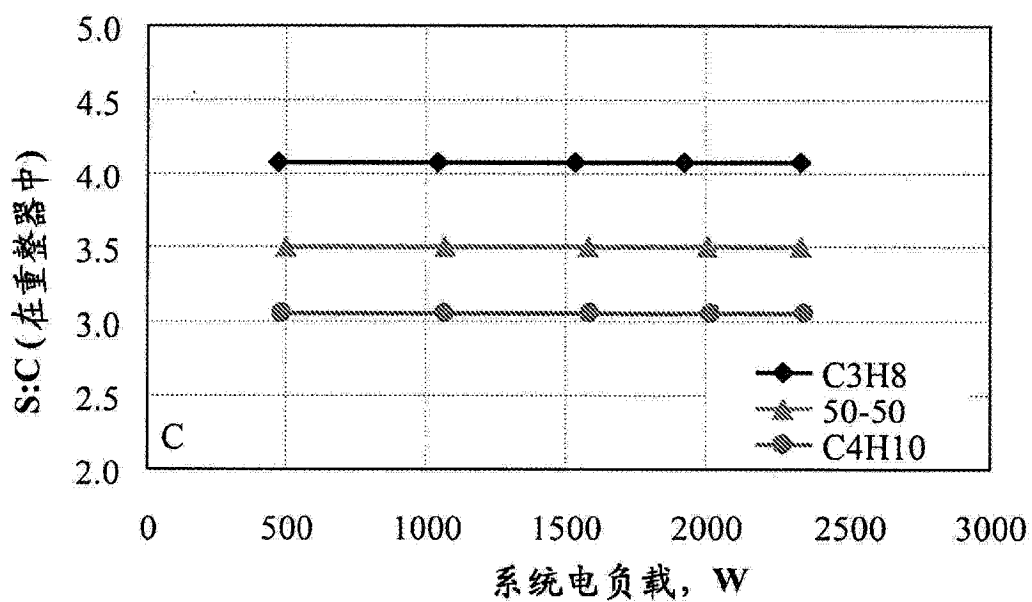


图 2C

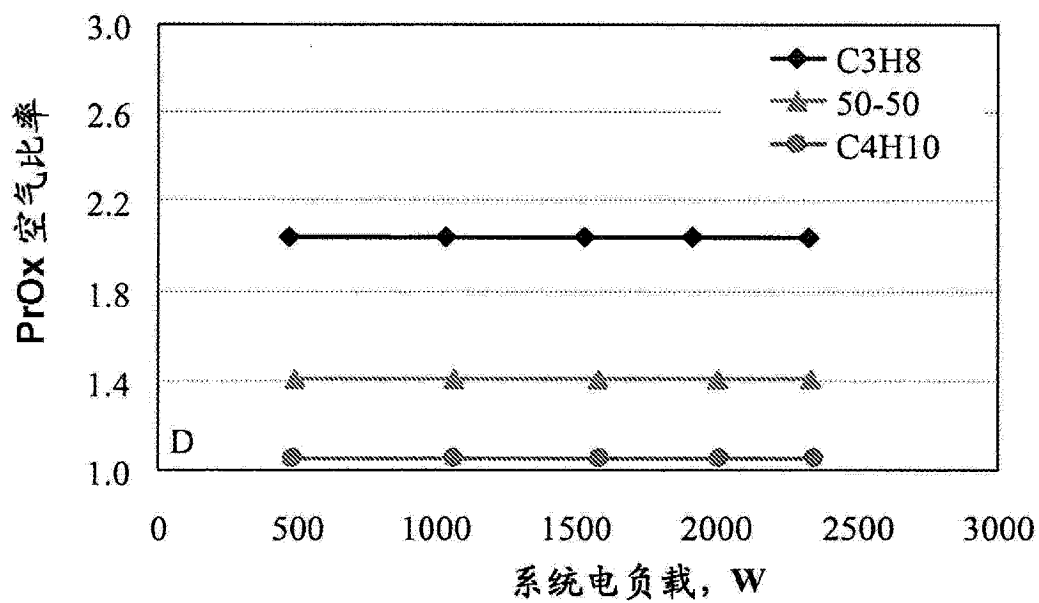


图 2D



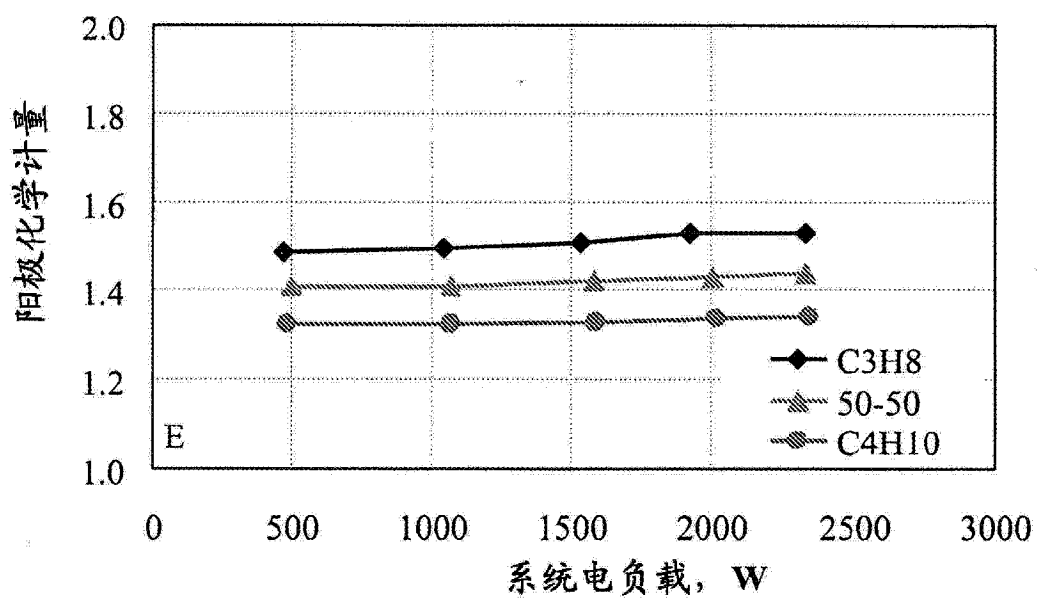


图 2E

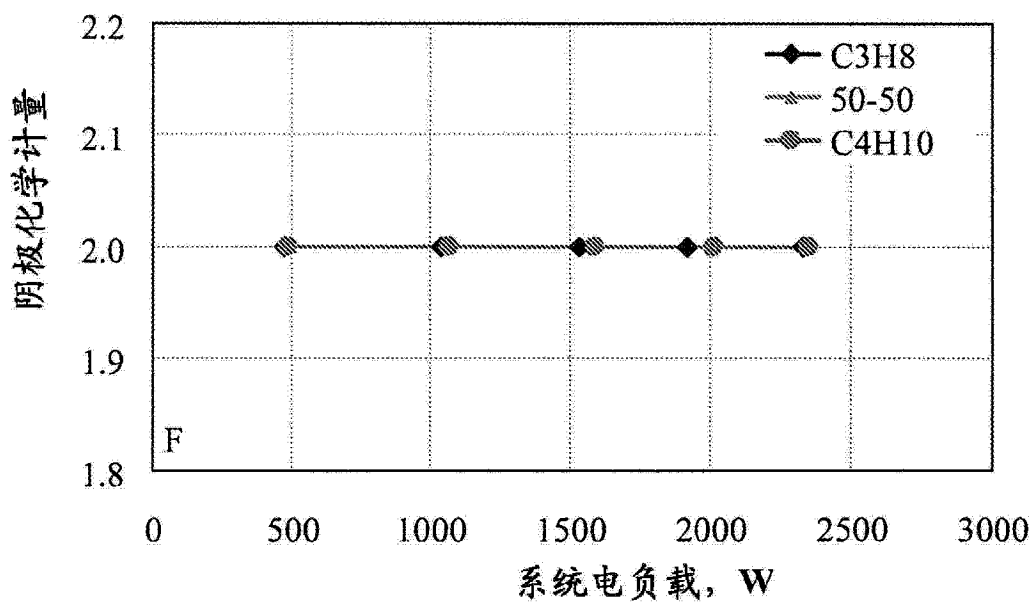


图 2F

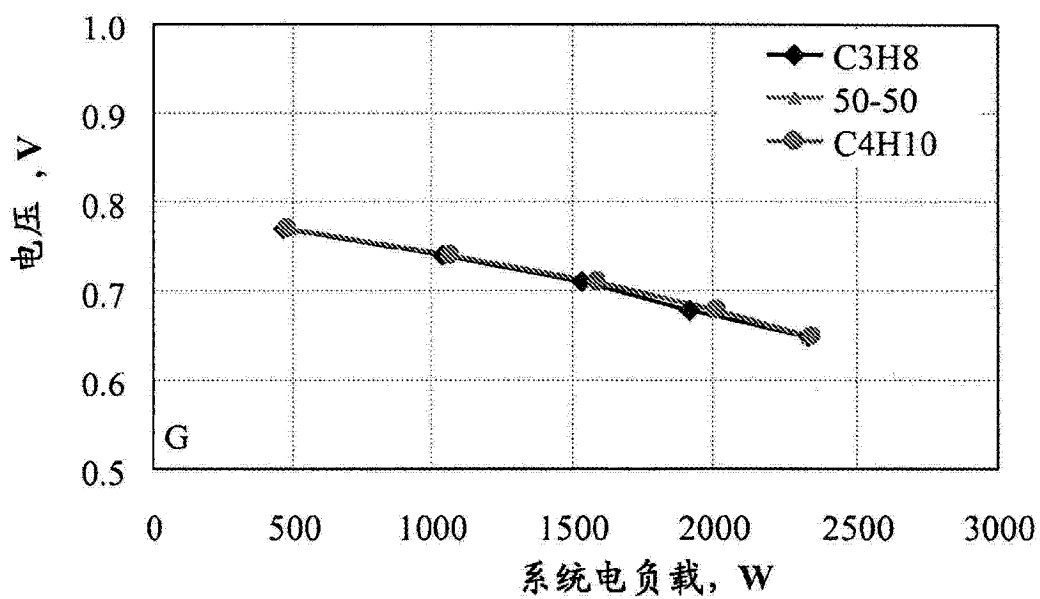


图 2G

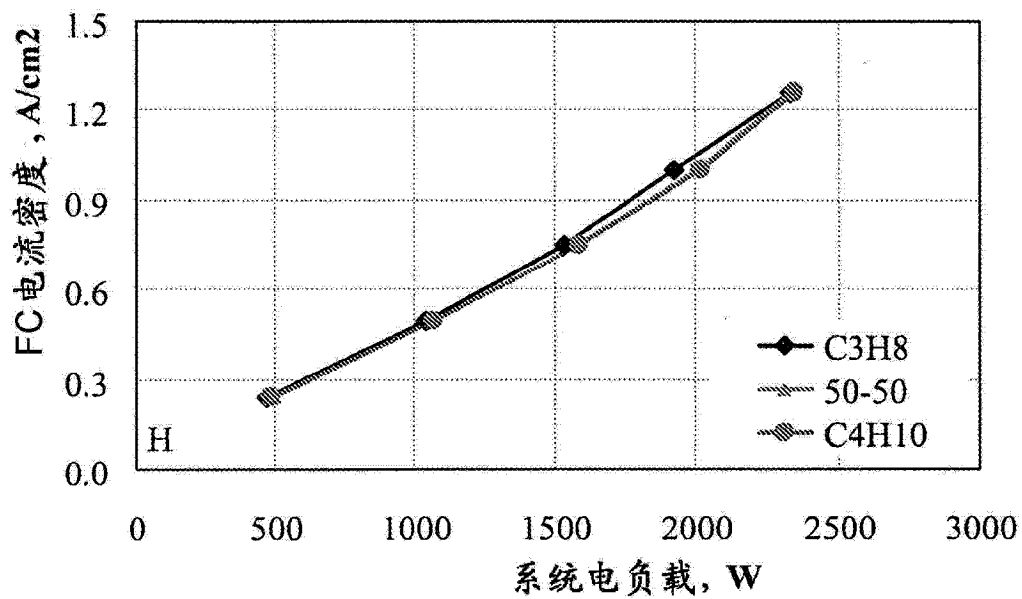


图 2H

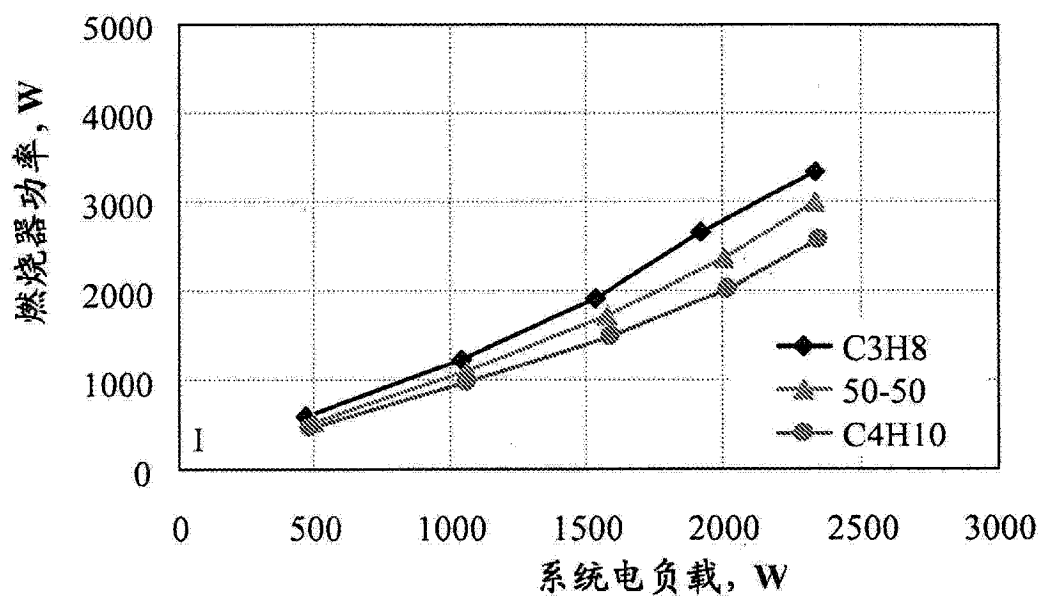


图 2I

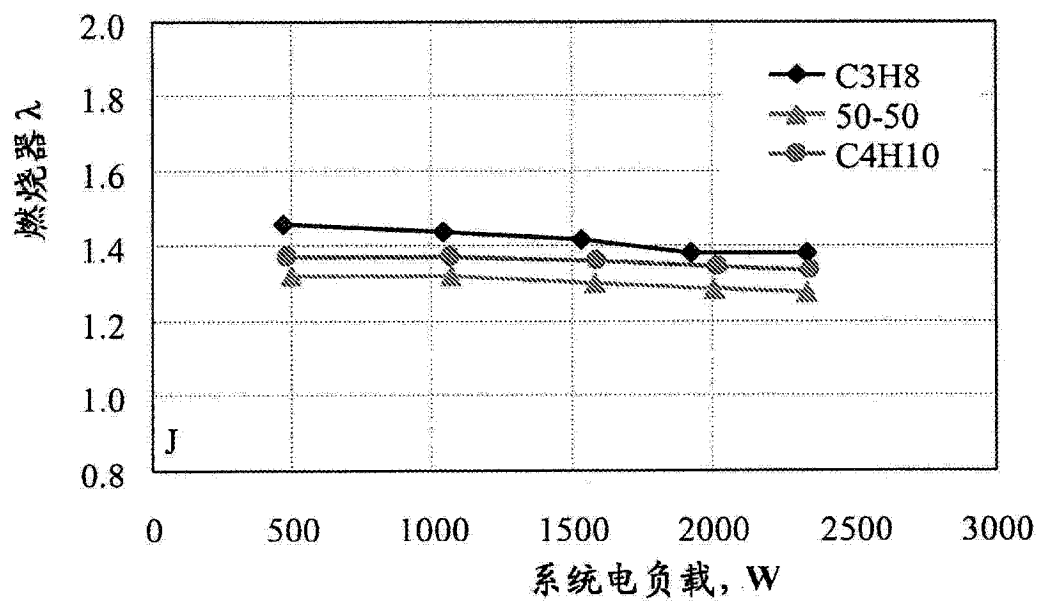


图 2J

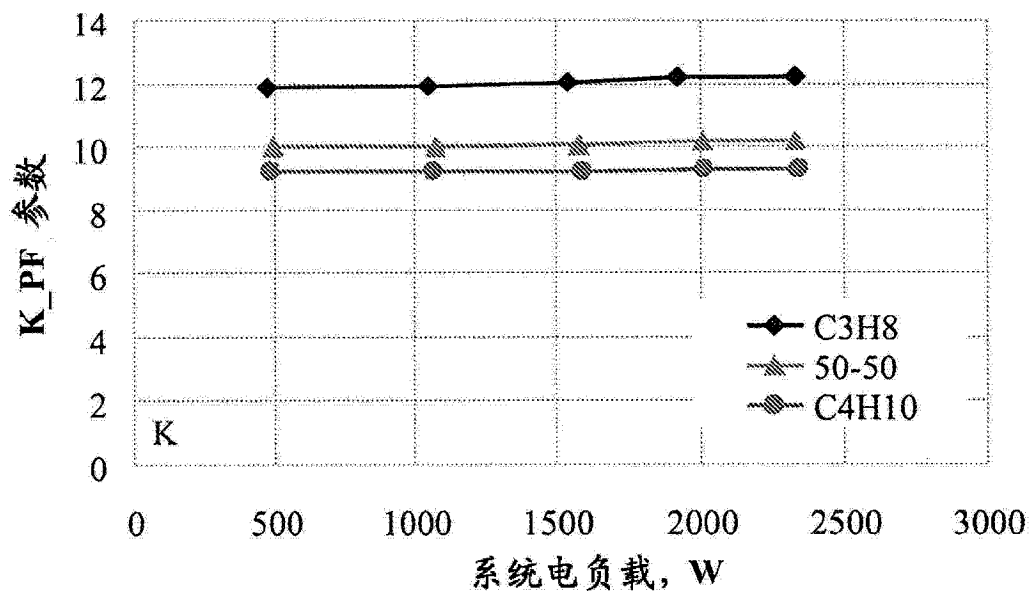


图 2K

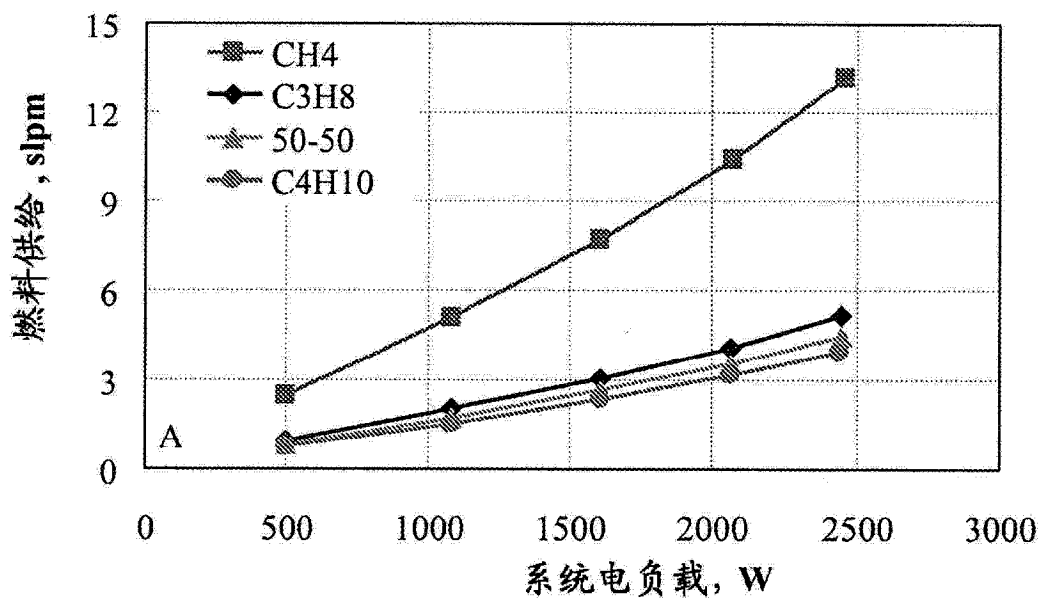


图 3A

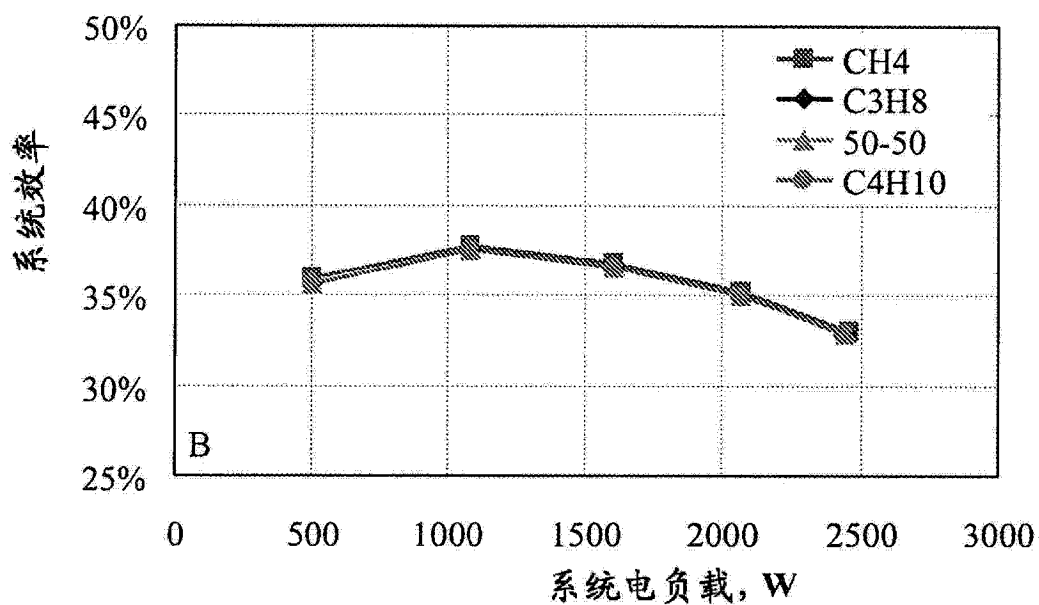


图 3B

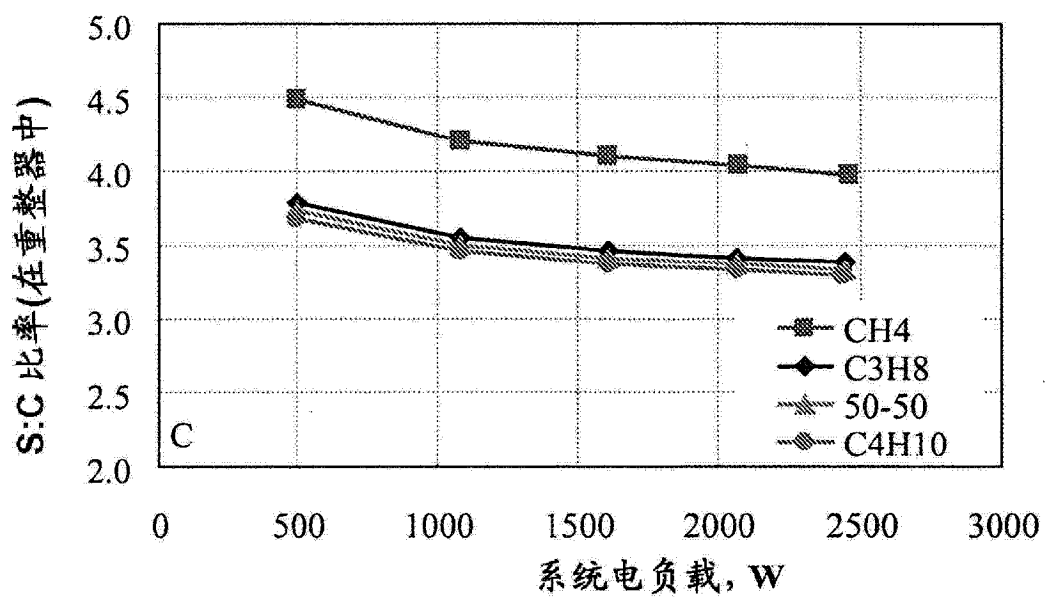


图 3C

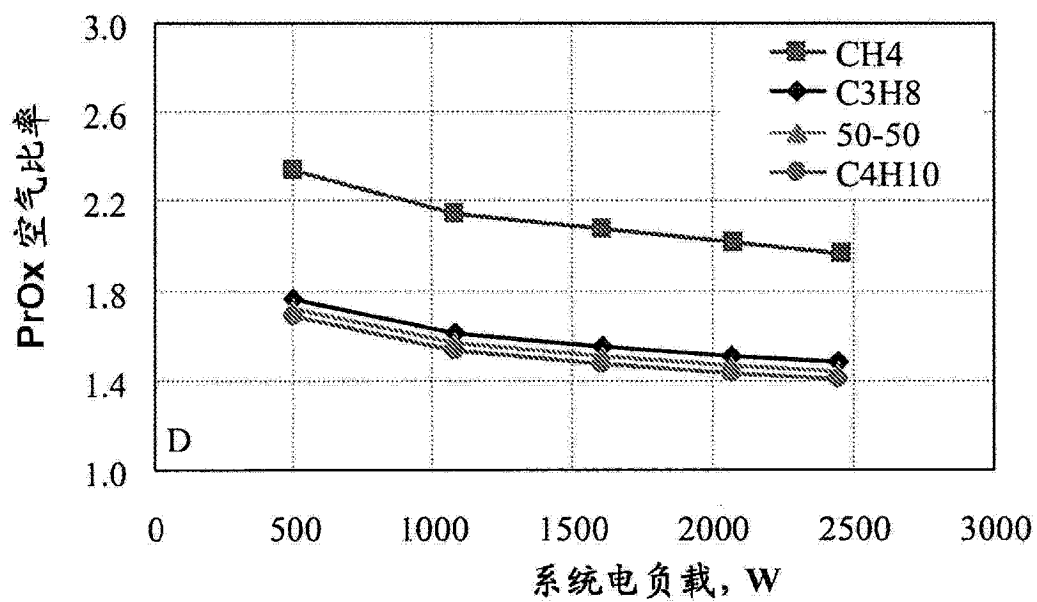


图 3D

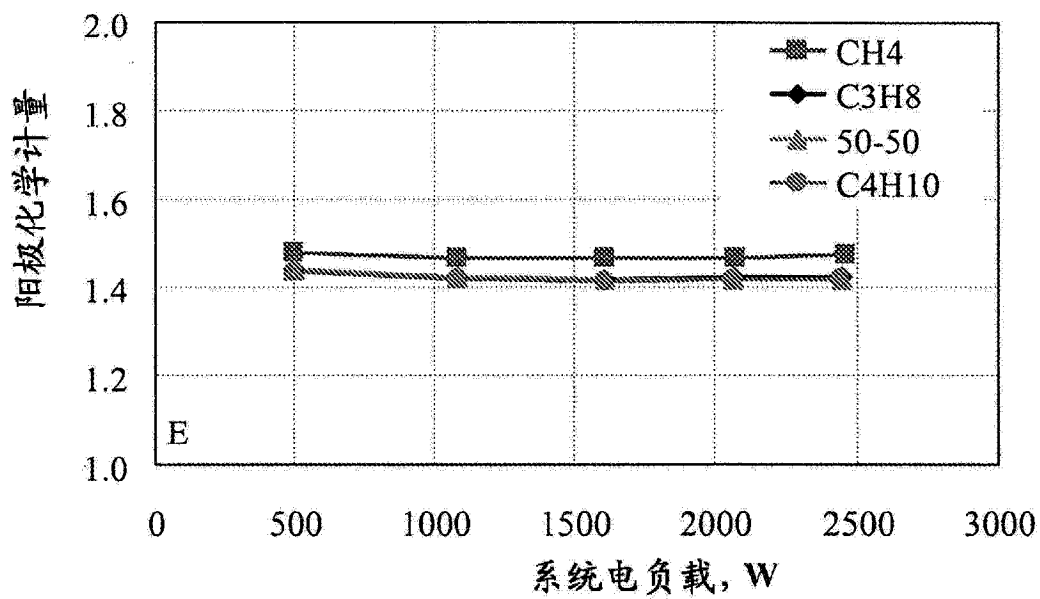


图 3E

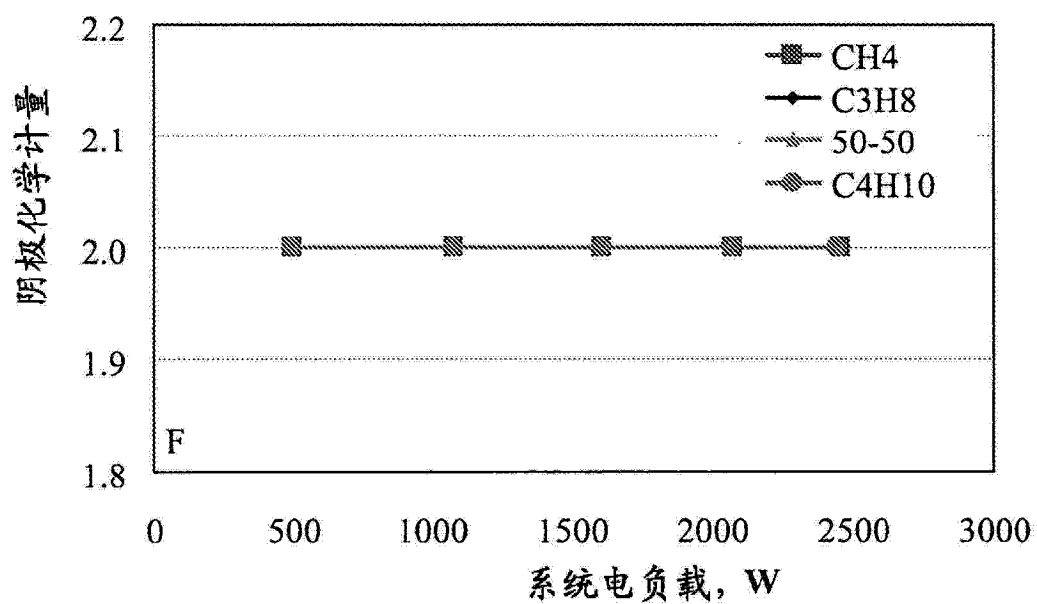


图 3F

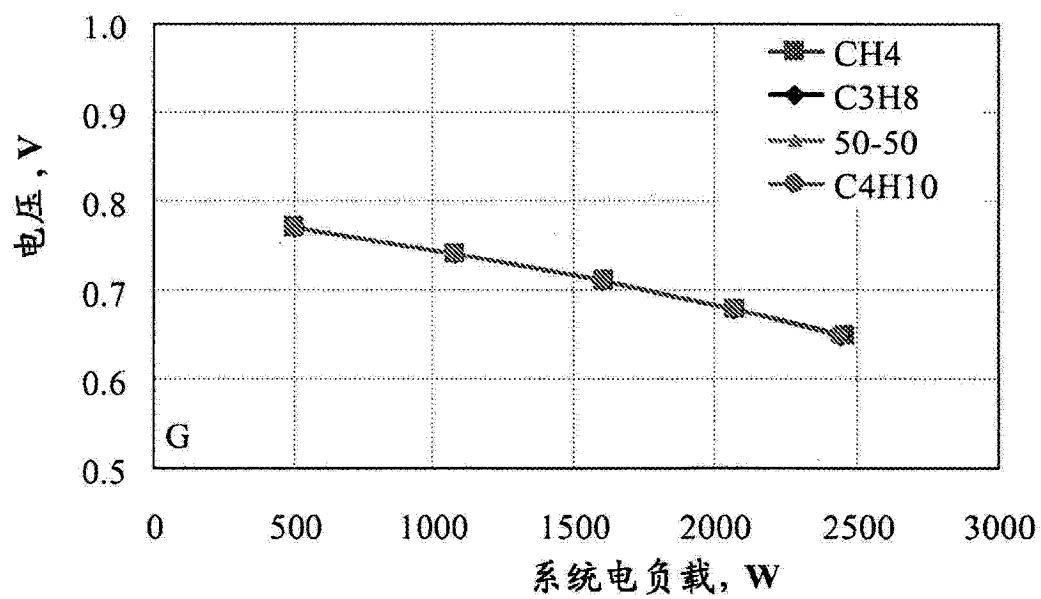


图 3G

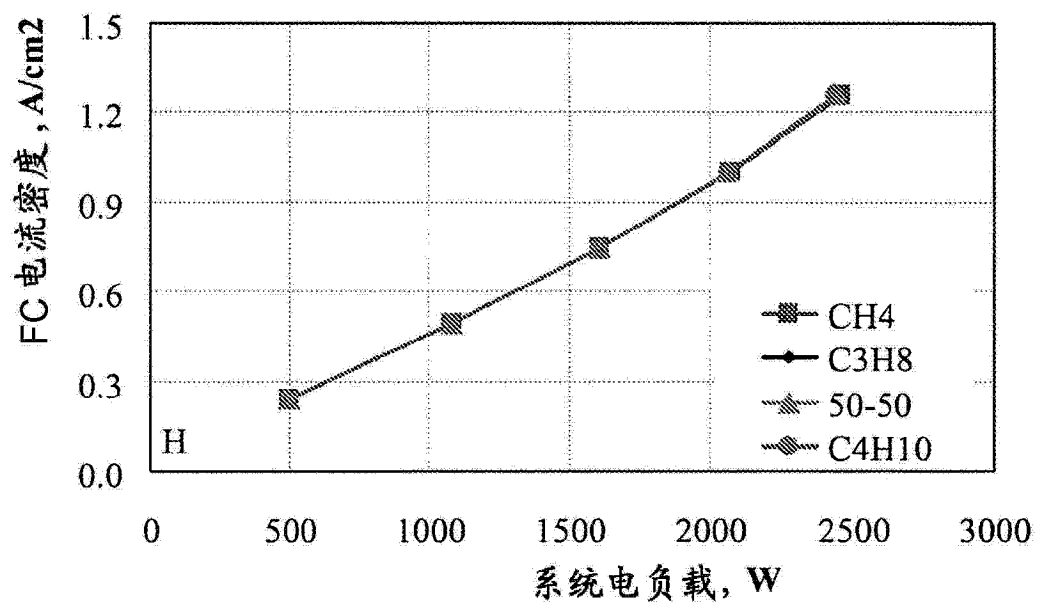


图 3H

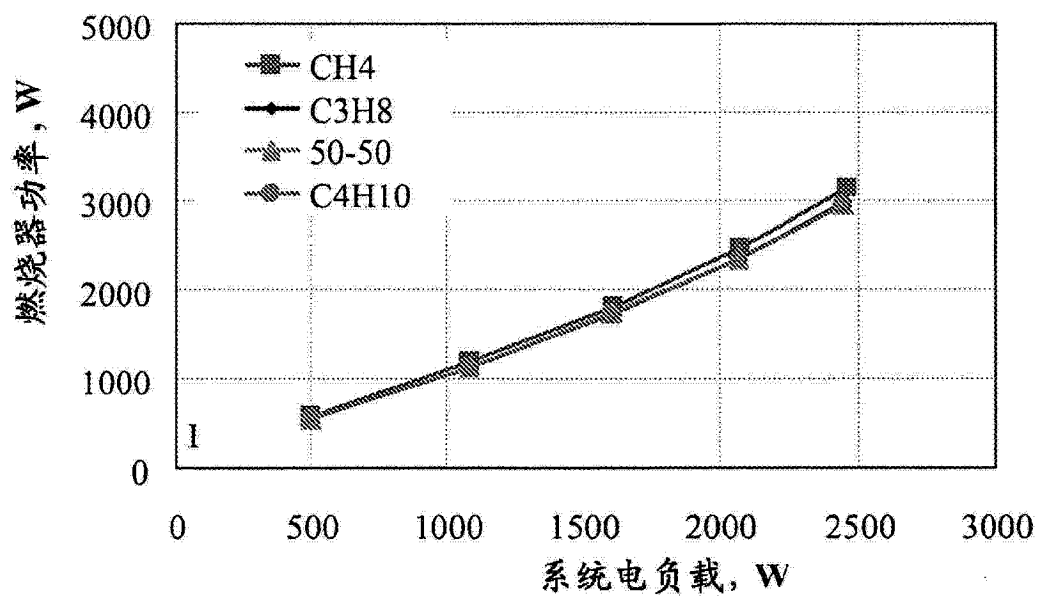


图 3I



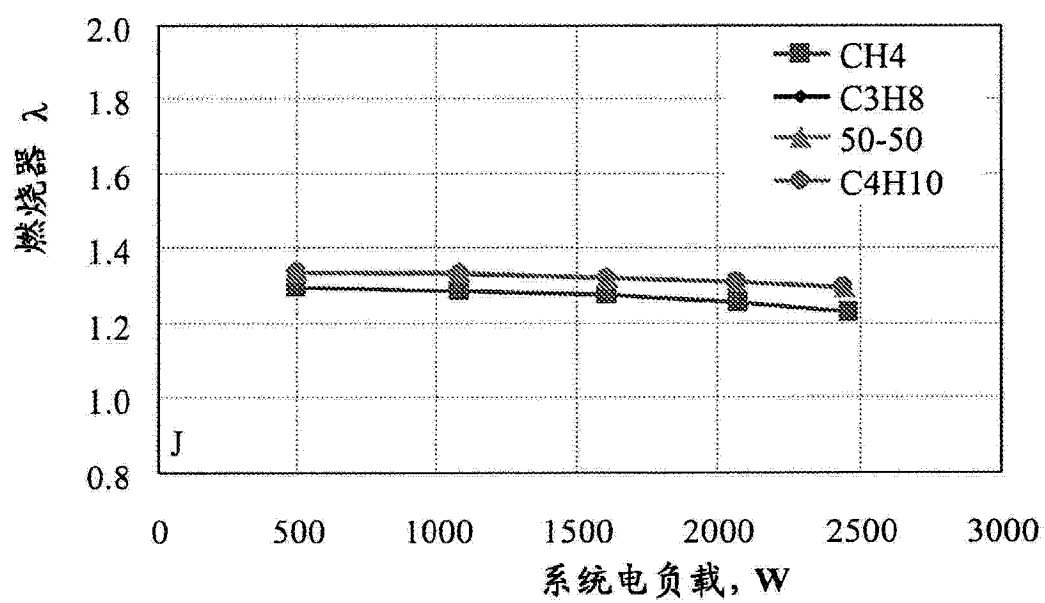


图 3J