

一种车载燃料电池控制系统、方法、电动汽车、重型车辆

技术领域

本发明属于燃料电池技术领域，尤其涉及一种车载燃料电池控制系统、方法、电动汽车、重型车辆。

背景技术

目前，随着对环境的要求越来越严格，电动汽车逐渐成为了主流运输工具，然而，采用纯电池系统无法达到高续航里程的要求。燃料电池发电系统可满足电动汽车的续航里程需求，尤其是重型车辆。燃料电池是一种新型的清洁能源供能系统，通常使用氢气和氧气为原料，通过电化学反应对外供给电能和热能。但是，燃料电池对原料要求苛刻，虽然氢气也可采用甲烷、甲醇等碳氢化合物燃料替代，但目前其技术受到积碳的制约，尚不能广泛应用；而氢气在安全性、可运输性方面，给实际应用带来了极大困难。液化石油气（LPG）是石油炼制过程中的副产物，由低碳烃类所组成，其中包括甲烷、乙烷、丙烷、丁烷、戊烷等，主要成分是丙烷和丁烷。炼厂副产的石油气在一定压力下以常温液态的方式储存，由于其运输、操作、使用方便，已广泛地进入人们的生活领域。采用液化石油气为燃料，耦合重整过程，应用于燃料电池系统，可有效解决氢气运输困难的问题。此外，液化石油气在绝热膨胀过程中吸热降温，可为冰箱、空调等制冷装置供给冷量。因此，采用液化石油气为燃料的燃料电池系统不仅可为车辆、小型住宅提供电能、热能，还可为冷藏设备提供冷量，达到节能降耗的目的。

目前应用较广泛的燃料电池主要有两种，一种为质子交换膜燃料电池（PEMFC），其对氢气浓度要求极高，微量 CO 即可使电极材料中毒，PEMFC 长时间高效率使用必须依赖于高纯度氢气以及高纯氢分离技术；另一种为固体氧化物燃料电池（SOFC），其对燃料要求不高，石油气经重整后含有 H₂、CO、

说明书

CO₂，均可进入电堆，对电极材料影响不大，且 SOFC 功率密度高、可实现热电联产，对小型车载系统和家用系统提供热量，能量利用率高。SOFC 的结构有三种：平板式、管式和扁管式。其中，平板式对密封工艺要求较高，实际运行中存在泄漏的风险；管式的效率较低；而扁管式结合了平板式和管式的优点，在保持高效率的同时降低了泄漏的风险。燃料电池系统中各个模块对热量的需求各式各样，需设计精巧的换热系统，使能量利用最大化。

现有技术一公开了一种使用液化石油气运行的燃料电池系统，该发明直接将石油气供给给燃料电池的阳极反应室，其装置复杂性较低，但对阳极材料要求高。

现有技术二公布了一种用于冷藏车的氢燃料电池供能系统，原料为氢气，运输和储存成本高，泄露后的爆炸风险高；氢气膨胀后的冷量，需经过冷媒系统二次换热供给冷藏车厢，换热效率降低；所用冷媒为氟利昂类，对环境不友好；所用燃料电池为 PEMFC，对原料氢气的纯度要求极高。

通过上述分析，现有技术存在的问题及缺陷为：

(1) 现有技术一直接将石油气供给给燃料电池的阳极反应室，其装置复杂性较低，但对阳极材料要求高。

(2) 现有技术二原料为氢气，运输和储存成本高，泄露后的爆炸风险高；氢气膨胀后的冷量，需经过冷媒系统二次换热供给冷藏车厢，换热效率降低；所用冷媒为氟利昂类，对环境不友好；所用燃料电池为 PEMFC，对原料氢气的纯度要求极高。

发明内容

针对现有技术存在的问题，本发明提供了一种车载燃料电池控制系统、方法、电动汽车、重型车辆。

本发明是这样实现的，一种车载燃料电池控制方法，所述车载燃料电池控制方法包括：

说明书

液化石油气、二甲醚或二者的混合物经过解压单元绝热膨胀后，释放冷量，通过第一换热系统直接为制冷设备制冷；由第一换热系统管出来的石油气在脱硫单元中脱除含硫组份；纯化后的石油气经第二换热系统与燃料电池电堆尾气换热；

储水箱中的水经过蒸汽发生器，吸收燃料电池电堆产生的热量，被加热为过热蒸汽；在混合器中与由第二换热系统出来的石油气混合；

混合气体进入重整单元发生水蒸气重整反应，分解为 H_2 、 CO_2 和 CO ；重整单元的所有尾气经由第一气体分布器进入固体氧化物燃料电池电堆的阳极管路，空气经过第三换热系统与电堆尾气换热后，进入固体氧化物燃料电池电堆的阴极室；

阳极室未反应完全的气体在阳极气路出口处燃烧，燃烧火焰直接为重整单元供热；燃烧后的尾气进入阴极室，与未反应的空气混合后进入电堆尾气的排放管路；电堆尾气经过第二换热系统和第三换热系统为石油气和空气预热后，经过车载的车内加热系统为车内加热系统供热，尾气中的水经冷凝后返回储水箱，其他尾气对环境无害，直接排空。

进一步，所述车载燃料电池控制方法冷启动时，石油气从液化石油气储罐经由管路进入燃烧室，通过直接燃烧为燃料电池供给热量；

燃烧室中的空燃比为 15.8-17.2。

所述车载燃料电池控制方法的重整单元，包括预热区和重整区，重整反应为水蒸气重整；气体在预热区被加热到 200-400 °C，进入重整区；预热区包含 ZnO 、 Fe_2O_3 、改性分子筛中的一种或多种组合，预热区出口燃料的硫含量小于 5ppm；重整区反应温度为 300-800 °C，水分子/碳原子摩尔比为 1.8-4。

进一步，所述车载燃料电池控制方法包括预热区和重整区，重整反应为水蒸气重整；气体在预热区被加热到 300-400 °C，进入重整区；预热区可包含 ZnO 、 Fe_2O_3 、改性分子筛中的一种或多种组合，实现深度脱硫，出口燃料的硫含量小于 1ppm；重整区反应温度对贵金属催化剂 300-500 °C，对非贵金属催化剂

说明书

500-700℃；水分子/碳原子摩尔比为 2-3。

进一步，所述车载燃料电池控制方法的重整单元通过流量计控制添加微量氧气，氧气添加量为氧分子/碳原子摩尔比为 0.01-0.4。

进一步，所述车载燃料电池控制方法的重整单元通过流量计控制添加微量氧气，氧气添加量为氧分子/碳原子摩尔比为 0.1-0.25。

进一步，所述车载燃料电池控制方法的重整单元中的催化剂为 Ni、Rh、Ru、Pd、Pt 基催化剂，可添加 Ce、Zr、La、Pr、Mg、Ti、Tb、Sm、Gd、Nb 中的一种或多种组合为助剂；

固体氧化物燃料电池电堆为扁管式固体氧化物燃料电池单体所组成的电堆，工作温度为 650-800℃；扁管式燃料电池单体结构为：阳极以中空孔道结构贯穿单体纵截面，阳极分布在单体外表面，燃料通过气体分布器进入阳极气路，空气进入单体外部的阴极室；

本发明的另一目的在于提供一种实施所述车载燃料电池控制方法的车载燃料电池控制系统，所述车载燃料电池控制系统包括：

制冷模块，用于液化石油气经过解压单元绝热膨胀后，释放冷量，通过第一换热系统直接为制冷设备制冷；

石油气纯化模块，用于由第一换热系统管出来的石油气在脱硫单元中脱除含硫组份；纯化后的石油气经第二换热系统与燃料电池电堆尾气换热；

石油气混合模块，用于实现储水箱中的水经过蒸汽发生器，吸收燃料电池电堆产生的热量，被加热为过热蒸汽；在混合器中与由换热器第二换热系统出来的石油气混合；

第一能量转化模块，用于将混合气体进入重整单元发生水蒸气重整反应，分解为 H_2 、 CO_2 和 CO ；

第二能量转化模块，用于将重整单元的尾气在固体氧化物燃料电池中转化为电能，重整单元所有尾气经由第一气体分布器进入固体氧化物燃料电池电堆的阳极管路，空气经过第三换热系统与电堆尾气换热后，进入固体氧化物燃料

说明书

电池电堆的阴极室；

第三能量转化模块，用于将未完全转化的化学能转化为热能，未完全反应的气体在阳极气路出口处燃烧，燃烧火焰直接为重整单元供热；燃烧后的尾气进入阴极室，与未反应的空气混合后进入电堆尾气的排放管路；电堆尾气经过第二换热系统和第三换热系统为石油气和空气预热后，经过车载的车内加热系统为车内加热系统供热；

尾气回收排放系统，尾气中的水经冷凝后返回储水箱，其他尾气对环境无害，直接排空。

本发明的另一目的在于提供一种安装有所述车载燃料电池控制系统的车载燃料电池控制装置，所述车载燃料电池控制装置包括：液化石油气储罐、解压单元、第一换热系统、制冷设备、脱硫单元、第二换热系统、混合器、重整单元、第一气体分布器、固体氧化物燃料电池电堆、第三换热系统、第二气体分布器、尾气、第四换热系统、车内加热系统、储水箱、蒸汽发生器、管线、燃烧室、流量计、阳极、阴极、连接体、单体、阳极管路、阴极室、筛板、进气口；

液化石油气储罐通过管道与解压单元连接，解压单元通过管道与第一换热系统连接，第一换热系统与制冷设备连接，第一换热系统通过管道与脱硫单元连接，脱硫单元通过管道与第二换热系统连接，第二换热系统通过管道与第三换热系统连接，第三换热系统通过管道与第二气体分布器、第四换热系统连接，第四换热系统与车内加热系统连接，第四换热系统通过管道与储水箱连接，储水箱通过管道与蒸汽发生器连接，蒸汽发生器通过管道与混合器连接，混合器通过管道与第二换热系统、重整单元连接，第二气体分布器通过管道与流量计连接，流量计通过管道与重整单元连接，重整单元通过管道与第一气体分布器连接，燃烧室通过管道与液化石油气储罐连接；

阳极位于贯穿的管路中，阴极位于扁管外侧，连接体位于扁管一侧；单体通过连接体连接，安装于气体分布器之上，单体以单排、双排或多排的形式排

布。

本发明的另一目的在于提供一种电动汽车，所述电动汽车安装有所述的车载燃料电池控制装置。

本发明的另一目的在于提供一种电动汽车，所述重型车辆安装有所述的车载燃料电池控制装置。

结合上述的所有技术方案，本发明所具备的优点及积极效果为：本发明的车载燃料电池系统，与现有的车载纯电池系统相比，续航里程更高，可达到 1000 km 甚至更高的续航里程；与目前已商业化的车载燃料电池系统相比，本发明所提出的技术对原料纯度要求低，原料更易获得，储存设备简单，运输更方便，安全性更高。

本发明的燃料电池系统的体积能量密度更高，易于在乘用车上组装。市场上较成熟的燃料电池技术是采用压缩氢气储罐为储能模块，其体积能量密度低，如 70 MPa 的氢气储罐，能量密度只有 0.8 kWh/L，而采用液化石油气作为原料，能量密度可达 6.5 kWh/L。

本发明所采用的液化石油气，解压膨胀过程吸热，可为车载冷却系统（如空调、冰箱、冷却水等）提供冷量，实现与氟利昂冷媒相似的效果，且比氟利昂系列冷媒更环保。在冷启动阶段，可直接将液化石油气通入燃烧室为燃料电池供热，减少冷启动时间。

本发明所使用的固体氧化物燃料电池与车载常用的 PEMFC 相比，对原料要求低，能量转化效率更高；与直接甲醇燃料电池相比，使用寿命和能量转化效率更高。其优势之一是阳极催化剂并不存在 CO 中毒问题，相反还可以高效地将 CO 中的化学能转化为电能，进一步提高燃料能量转化效率。

本发明使用的扁管式固体氧化物燃料电池可实现高效发电且没有泄露的风险；燃料电池入口处使用精巧设计的气体分布器，电极反应效率提高。本发明将在重整单元中通入微量空气，可有效提高催化剂寿命，提高催化剂的抗积碳和抗硫能力，减少更换脱硫单元的吸附剂或催化剂的次数，此外，还可降低出

说明书

现在自热重整或部分氧化重整中由于氧气量多引起的燃爆风险。

本发明所提出的换热系统，可最大程度减少能量损失；燃料电池出口尾气直接燃烧的方法可避免催化氧化方法中贵金属催化剂的使用，节约系统成本；SOFC 热电联产，可实现车载加热系统的热量自供应。

本发明的燃料电池室中，采用尾气富氧燃烧的方法除去尾气中的有害物质（如 CO、碳氢化合物等），排空尾气不含有对环境有害的物质，低廉便捷，降低系统成本。

由于石油气碳链少，通过控制空气/燃料比，在燃烧室中燃烧充分，无需添加后处理环保设备，尾气可直接排放。本发明采用储存安全性高、易运输、体积能量密度高的液化石油气为原料，通过燃料电池系统，为乘用车提供高续航里程。

附图说明

为了更清楚地说明本申请实施例的技术方案，下面将对本申请实施例中所需要使用的附图做简单的介绍，显而易见地，下面所描述的附图仅仅是本申请的一些实施例，对于本领域普通技术人员来讲，在不付出创造性劳动的前提下还可以根据这些附图获得其他的附图。

图 1 是本发明实施例提供的车载燃料电池控制方法流程图。

图 2 是本发明实施例提供的车载燃料电池控制装置的结构示意图。

图 3 是本发明实施例提供的扁管式燃料电池单体结构示意图；(a) 侧视图；(b) 俯视图。

图 4 是本发明实施例提供的扁管式燃料电池堆结构示意图；(a) 侧视图；(b) 俯视图。

图 5 是本发明实施例提供的第一气体分布器的结构示意图；(a) 侧视图；(b) 俯视图。

图 6 是本发明实施例提供的第二气体分布器的结构示意图；(a) 进气口；(b)

筛板。

图中：1、液化石油气储罐；2、解压单元；3、第一换热系统；4、制冷设备；5、脱硫单元；6、第二换热系统；7、混合器；8、重整单元；9、第一气体分布器；10、固体氧化物燃料电池电堆；11、第三换热系统；12、第二气体分布器；13、尾气；14、第四换热系统；15、车内加热系统；16、储水箱；17、蒸汽发生器；18、阳极管路；19、燃烧室；20、流量计；21、阳极、22、阴极；23、连接体；24、单体；25、阳极管路；26、阴极室；27、筛板；28、进气口。

图 7 是本发明实施例提供的制备的扁管式单体 SOFC 及其放电性能图。

图 8 是本发明实施例提供的所设计的 SOFC 发电系统示意图。

具体实施方式

为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白，以下结合实施例，对本发明进行进一步详细说明。应当理解，此处所描述的具体实施例仅仅用以解释本发明，并不用于限定本发明。

针对现有技术存在的问题，本发明提供了一种车载燃料电池控制系统、方法、电动汽车、重型车辆，下面结合附图对本发明作详细的描述。

如图 1 所示，本发明提供的车载燃料电池控制方法包括以下步骤：

S101：液化石油气经过解压单元绝热膨胀后，释放冷量，通过第一换热系统直接为制冷设备制冷；由第一换热系统出来的石油气在脱硫单元中脱除含硫组份；纯化后的石油气经第二换热系统与燃料电池电堆尾气换热；

S102：储水箱中的水经过蒸汽发生器，吸收燃料电池电堆产生的热量，被加热为过热蒸汽；在混合器中与由换热器第二换热系统出来的石油气混合；

S103：混合气体进入重整单元发生水蒸气重整反应，分解为 H_2 、 CO_2 和 CO ；重整单元的所有尾气经由第一气体分布器进入固体氧化物燃料电池电堆的阳极管路，空气经过第三换热系统与电堆尾气换热后，进入固体氧化物燃料电池电堆的阴极室；

S104：阳极室未反应完全的气体在阳极气路出口处燃烧，燃烧火焰直接为

说明书

重整单元供热；燃烧后的尾气进入阴极室，与未反应的空气混合后进入电堆尾气的排放管路；电堆尾气经过第二换热系统和第三换热系统为石油气和空气预热后，经过车载的车内加热系统为车内加热系统供热，尾气中的水经冷凝后返回储水箱，其他尾气对环境无害，直接排空。

本发明提供的车载燃料电池控制方法业内的普通技术人员还可以采用其他的步骤实施，图 1 的本发明提供的车载燃料电池控制方法仅仅是一个具体实施例而已。

本发明提供的车载燃料电池控制系统包括：

制冷模块，用于液化石油气经过解压单元绝热膨胀后，释放冷量，通过第一换热系统直接为制冷设备制冷。

石油气纯化模块，用于由第一换热系统管出来的石油气在脱硫单元中脱除含硫组份；纯化后的石油气经第二换热系统与燃料电池电堆尾气换热。

石油气混合模块，储水箱中的水经过蒸汽发生器，吸收燃料电池电堆产生的热量，被加热为过热蒸汽；在混合器中与由换热器第二换热系统出来的石油气混合。

第一能量转化模块，用于将混合气体进入重整单元发生水蒸气重整反应，分解为 H_2 、 CO_2 和 CO ；

第二能量转化模块，用于将重整单元的尾气在固体氧化物燃料电池中转化为电能，重整单元所有尾气经由第一气体分布器进入固体氧化物燃料电池电堆的阳极管路，空气经过第三换热系统与电堆尾气换热后，进入固体氧化物燃料电池电堆的阴极室；

第三能量转化模块，用于将未完全转化的化学能转化为热能，未完全反应的气体在阳极气路出口处燃烧，燃烧火焰直接为重整单元供热；燃烧后的尾气进入阴极室，与未反应的空气混合后进入电堆尾气的排放管路；电堆尾气经过第二换热系统和第三换热系统为石油气和空气预热后，经过车载的车内加热系统为车内加热系统供热；

说明书

尾气回收排放系统，尾气中的水经冷凝后返回储水箱，其他尾气对环境无害，直接排空。

下面结合附图对本发明的技术方案作进一步的描述。

如图 2-图 6 所示，本发明提供的车载燃料电池控制装置包括：液化石油气储罐 1、解压单元 2、第一换热系统 3、制冷设备 4、脱硫单元 5、第二换热系统 6、混合器 7、重整单元 8、第一气体分布器 9、固体氧化物燃料电池电堆 10、第三换热系统 11、第二气体分布器 12、尾气 13、第四换热系统 14、车内加热系统 15、储水箱 16、蒸汽发生器 17、阳极管路 18、燃烧室 19、流量计 20、阳极 21、阴极 22、连接体 23、单体 24、阳极管路 25、阴极室 26、筛板 27、进气口 28。

液化石油气储罐 1 通过管道与解压单元 2 连接，解压单元 2 通过管道与第一换热系统 3 连接，第一换热系统 3 与制冷设备 4 连接，第一换热系统 3 通过管道与脱硫单元 5 连接，脱硫单元 5 通过管道与第二换热系统 6 连接，第二换热系统 6 通过管道与第三换热系统 11 连接，第三换热系统 11 通过管道与第二气体分布器 12、第四换热系统 14 连接，第四换热系统 14 与车内加热系统 15 连接，第四换热系统 14 通过管道与储水箱 16 连接，储水箱 16 通过管道与蒸汽发生器 17 连接，蒸汽发生器 17 通过管道与混合器 7 连接，混合器 7 通过管道与第二换热系统 6、重整单元 8 连接，第二气体分布器 12 通过管道与流量计 20 连接，流量计 20 通过管道与重整单元 8 连接，重整单元 8 通过管道与第一气体分布器 9 连接，燃烧室 19 通过管道与液化石油气储罐 1 连接。

如图 3 所示，扁管式燃料电池单体，阳极 21 位于阳极管路 18 中，阴极 22 位于扁管外侧，连接体 23 位于扁管一侧。阳极管路 18 位于固体氧化物燃料电池电堆 10 中的单体中，即固体氧化物燃料电池电堆 10 由单体组成，单体包括阳极管路和阴极室。

如图 4 所示，燃料电池单体以两列排布平行排布。单体 24 通过连接体 23 连接，安装于第一气体分布器之上，单体 24 可以单排、双排或多排的形式。

说明书

如图 5 和图 6 所示，分别为第一气体分布器和第二气体分布器的一种实施形式。

本发明提供的车载燃料电池控制装置的液化石油气经过解压单元 2 绝热膨胀后，释放冷量，通过第一换热系统 3 直接为制冷设备 4 制冷；由第一换热系统 3 出来的石油气在脱硫单元 5 中脱除含硫组份；纯化后的石油气经第二换热系统 6 与燃料电池电堆尾气 13 换热；储水箱 16 中的水经过蒸汽发生器 17，吸收燃料电池电堆产生的热量，被加热为过热蒸汽；在混合器 7 中与由第二换热系统 6 出来的石油气混合；混合气体进入重整单元发生水蒸气重整反应，分解为 H_2 、 CO_2 和 CO ；重整单元的所有尾气经由第一气体分布器 9 进入固体氧化物燃料电池电堆 10 的阳极管路 25，空气经过第三换热系统 11 与电堆尾气 13 换热后，进入固体氧化物燃料电池电堆 10 的阴极室 26；阳极室未反应完全的气体在阳极气路出口处燃烧，燃烧火焰直接为重整单元 8 供热；燃烧后的尾气进入阴极室 26，与未反应的空气混合后进入电堆尾气 13 的排放管路；电堆尾气 13 经过第二换热系统 6 和第三换热系统 11 为石油气和空气预热后，经过车载的车内加热系统 15 为车内加热系统供热，尾气中的水经冷凝后返回储水箱 16，其他尾气对环境无害，直接排空。

冷启动时，石油气从液化石油气储罐 1 先经由管路 18 进入燃烧室，通过直接燃烧为燃料电池供给热量。

液化石油气储罐 1，灌装压力为 0.8-1.5 MPa。

制冷设备 4，为车载空调系统、冰箱系统的一种或多种组合。

脱硫单元 5，采用湿法、干法、吸附或反应脱硫的方法脱除石油气中的含硫组分。

重整单元 8，包括预热区和重整区，重整反应为水蒸气重整。气体在预热区被加热到 200-400 °C，优选 300-400 °C，进入重整区；预热区可包含 ZnO 、 Fe_2O_3 、改性分子筛中的一种或多种组合，实现深度脱硫，硫含量小于 5ppm，优选小于 1ppm；重整区反应温度为 300-800 °C，对贵金属催化剂优选 300-500 °C，对非

说明书

贵金属催化剂优选 500-700℃；水分子/碳原子摩尔比为 1.8-4，优选 2-3。

重整单元 8 可通过流量计 20 控制添加微量氧气，氧气添加量为氧分子/碳原子摩尔比为 0.01-0.4，优选 0.1-0.25。

重整单元 8 中的催化剂为 Ni、Rh、Ru、Pd、Pt 基催化剂，可添加 Ce、Zr、La、Pr、Mg、Ti、Tb、Sm、Gd、Nb 中的一种或多种组合为助剂。

固体氧化物燃料电池电堆 10，为扁管式固体氧化物燃料电池单体所组成的电堆，工作温度为 650-800℃。

扁管式燃料电池单体结构为：阳极以中空孔道结构贯穿单体纵截面，阳极分布在单体外表面，燃料通过气体分布器进入阳极气路，空气进入单体外部的阴极室 26。

燃烧室 19 中的空燃比为 15.8-17.2。

下面结合具体实施例对本发明的技术方案作进一步的描述

本发明实施例采用固体氧化物燃料电池为核心发电系统，其单体结构为扁管式，其中一种实施方式如图 3 所示，阳极管路 18 位于固体氧化物燃料电池电堆 10 中的单体中，即固体氧化物燃料电池电堆 10 由单体组成，单体包括阳极管路和阴极室。阳极 21 位于阳极管路 18 中，阴极 22 位于扁管外侧，连接体 23 位于扁管一侧。这种扁管式结构同时兼具管式 SOFC 和平板式 SOFC 的优势，即无需高温密封材料，又能够显著提高单位长度的功率密度以及体积功率密度。

国内外固体氧化物燃料电池较多使用平板式设计，其加工过程容易，造价较低，集成度高，但其电池组件边缘要求进行密封来隔离氧化气和燃料气，对连接板材料要求很高，密封困难。另一种管式固体氧化物燃料电池在美国军事领域得到了一定应用，但其电极之间的间距大，电流通过电池的路径较长，内阻损失大，因此相应的功率密度较低。扁管式结构与管式结构相似，都具有密闭的一端，可以为整个电池提供完整的空气流通通道，从而不必采用任何密封手段。不同的地方在于，扁管式结构扁平的表面，可有效增大输出功率密度；内部构建的一些“肋条”作为电流的通路，显著地缩短了集流路径，从而大大

降低了电池内阻。

采用扁管式结构作为单体，可进行排布设计组成电堆。图 4 为电堆排布的一种实施方式，单体 24 通过连接体 23 连接，安装于第一气体分布器之上，单体 24 可以单排、双排或多排的形式排布。

经过预处理的石油气（包括 H_2 、 CO 、 CO_2 和微量 CH_4 ）通过第二气体分布器 12 进入阳极管路 25 中，图 5 为气体分布器的一种实施方式，空气通过第二气体分布器进入阴极室 26 中，第一气体分布器 9 的实施方式可以是丝网、筛板 27（图 6）等可以让气体平均分布的装置。燃料电池内发生电化学反应，工作温度为 $650-800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。阳极管路 25 上方出口残余部分燃料气，如 CH_4 、 CO 、 H_2 等，这部分燃料气通过点燃的方式直接燃烧，避免了排放至空气中的污染。由于水蒸气重整反应为强吸热反应，阳极 21 尾气燃烧的火焰可直接为重整器供热。燃烧过的尾气 13 与阴极室 26 未反应的空气混合，经过尾气 13 的管路进行再利用。

石油气直接进入固体氧化物燃料电池中，易使阳极材料积碳，降低电池寿命。本发明所提出的系统中，首先把石油气通过水蒸气重整反应，分解为 H_2 、 CO 、 CO_2 和微量甲烷，再将低碳气体和氢气的混合物通入燃料电池中，可提高能量转化效率，并延长电池稳定性。

本发明所使用的石油气来源广泛，对原料限制不苛刻，可包含二甲醚。但是石油气中广泛存在含硫物质，含硫物质对重整催化剂、阳极材料都有毒害作用，将导致使用寿命显著降低。因此，本系统中设置了脱硫单元 5，该脱硫单元 5 与燃料电池的高温区相隔较远，且采用了便捷的无需使用工具的手动拆卸零件（如快接头等），方便随时更换，脱硫单元 5 可根据原料设置不同的脱硫剂容量。经过脱硫单元 5 的石油气中的硫含量降低至 50 ppm 以下，优选 20 ppm 以下。

水通过泵从储水箱 16 流向蒸汽发生器 17，蒸汽发生器 17 外壳与固体氧化物燃料电池室壁相接，燃料电池发电产生的热量通过壳体传输给蒸汽发生器 17，使水蒸发为水蒸气。水蒸气通过挨着燃料电池室壁的管路输送至混合器 7。水蒸发的过程无需使用外部供热，只需使用燃料电池副产的热量即可。

说明书

重整区分为预热区和重整反应区。

预热区将燃料气和水蒸气加热至接近反应温度的范围，即 200-400℃，优选 300-400℃。为了进一步降低石油气中的硫含量，预热区可添加 ZnO、Fe₂O₃、改性分子筛中的一种或多种组合，以将石油气中的硫含量降至 5ppm 以下，优选 1ppm 以下。

重整反应区发生水蒸气重整反应，虽然可选择重整方式还包括自热重整、部分氧化重整，但是考虑车载安全性，该系统尽量避免氧气与石油气直接混合，以降低燃爆的风险。对于含硫量较高的石油气原料，为提高催化剂的使用寿命，重整反应中可通过流量计 20 引入微量空气，氧气添加量为氧分子/碳原子摩尔比为 0.01-0.4，优选 0.1-0.25。根据石油气的爆炸极限 1.5%-9.5%，该氧气添加量距离爆炸极限的气体组成相差甚远，因此可保证系统的安全性。

重整单元 8 中的催化剂为 Ni、Rh、Ru、Pd、Pt 基催化剂，可添加 Ce、Zr、La、Pr、Mg、Ti、Tb、Sm、Gd、Nb 中的一种或多种组合为助剂。重整区反应温度为 300-800℃，对贵金属催化剂优选 300-500℃，对非贵金属催化剂优选 500-700℃；水分子/碳原子摩尔比为 1.8-4，优选 2-3。

固体氧化物燃料电池除了将燃料的化学能转化为电能之外，还副产大量热能。这部分热能以尾气（H₂O、CO₂、N₂、O₂）的形式存在。尾气 13 经过第二换热系统 6 和第三换热系统 11 分别对脱硫后的石油气和空气进行预热，以降低重整单元 8 和固体氧化物燃料电池入口处的温度梯度，提高设备效率，并实现余热充分利用。经过第二换热系统 6 的尾气与经过第三换热系统 11 的尾气汇合后，经过第四换热系统 14 为车内加热系统供热，如座椅加热系统、空气加热系统、房车中的热水供应系统等。经过换热盘管的尾气中的水蒸气冷凝后回流至储水箱 16，剩下的气体对环境无危害，直接排放至空气。

液化石油气解压过程中释放冷量，解压后的石油气经过第一换热系统 3 为车载制冷系统提供冷量，如空调系统、车载冰箱等，该换热盘管直接与制冷设备毗邻，无需经过冷媒的二次换热，冷量利用效率高。

说明书

在车辆冷启动时，液化石油气通过管线 18 进入燃烧室，燃烧室 19 中的空燃比控制在 15.8-17.2，通过燃烧石油气为燃料电池提供初始热量，通过控制空燃比，充分燃烧后的石油气转化为 CO_2 和 H_2O ，几乎不含 CO 和其他未充分燃烧的物质，可直接排放至空气，亦可在燃烧室 19 排放部位添加三元催化剂，以保证恶劣情况下的清洁排放。

下面结合对比对本发明的技术效果作详细的描述。

表 1 小型乘用车能量密度与续航里程对比

	供能模块质量 (kg)	供能模块体积(L)	续航里程 (km)
小鹏 (纯电动车)	443	190	520
丰田 Mirai (氢燃料电池汽车)	5	122.4	700
LPG 燃料电池汽车	15.2	30	700

下面结合应用例对本发明的技术方案作进一步描述。

例 1:

采用 100%丙烷原料装载于小型 LPG 燃料电池汽车上，按照第一能量转化模块的转化效率为 99%，第二能量转化模块化学能转化电能的效率为 60%，第三能量转化模块化学能转化热能效率为 99%，其中电能完全用于驱动汽车运行，热能用于供给换热系统（可自给自足，见表 2），按照目前市面常见电动小客车百公里耗电量 15 度计算，则该燃料电池汽车百公里耗丙烷量为 1.87 kg。若按 100 km/h 的速度行驶，每小时消耗丙烷量可为体积为 550 L、功率为 220 W 的冷藏室提供冷量。

考虑其他能量消耗因素，采用更保守的计算结果列于表 1 中，与纯电动车和氢燃料电池汽车想对比，其体积能量密度具有显著优势。如图 7 制备的扁管式单体 SOFC 及其放电性能图。

例 2:

说明书

采用市面常见民用液化石油气装载于重型 LPG 燃料电池汽车上,总车重 3.2 吨,按照第一能量转化模块的转化效率为 99%,第二能量转化模块化学能转化电能的效率为 50%,第三能量转化模块化学能转化热能效率为 99%,其中电能完全用于驱动汽车运行,热能用于供给换热系统(可自给自足),按照目前市面常见电动车百公里吨耗电量 13 度计算,则该燃料电池汽车百公里耗石油气量为 6.2 kg。若按 80 km/h 的速度行驶,每小时消耗丙烷量可为体积为 1450 L、功率为 580 W 的冷藏室提供冷量;若冷藏室体积需求更大,可设置循环冷却装置采用车载液化石油气进行冷却。

本发明所设计的 SOFC 发电系统如图 8 所示,根据此流程图在 AspenPlus 中进行了热平衡模拟计算流程。800 °C 时 SOFC 电池堆的发热量和热消耗量如表 1 所示。由表中可以看出,800 °C 时电池自发热量完全可以满足其热消耗,电池堆可以独立运行。

表 2 800 °C 时 SOFC 电堆 Aspen 模拟计算结果

热消耗		热生成	
燃料预热	5.04 W	燃烧器	10.49 W
蒸汽发生	9.07 W	尾气燃烧	22.62 W
空气预热	27.70 W	SOFC	23.42 W
燃料重整	14.66 W		
总计	56.47 W		56.53 W

以上所述,仅为本发明的具体实施方式,但本发明的保护范围并不局限于此,任何熟悉本技术领域的技术人员在本发明揭露的技术范围内,凡在本发明的精神和原则之内所作的任何修改、等同替换和改进等,都应涵盖在本发明的保护范围之内。