

# PEM 燃料电池供电系统“单耗分析”及其减排效应

阎 秦, 杨勇平, 徐二树, 翟融融

(华北电力大学 电站设备状态监测与控制教育部重点实验室, 北京 102206)

**摘 要:** 在介绍了属于低温燃料电池系列的质子交换膜燃料电池(PEMFC)工作原理、特性及 PEMFC 供电系统组成的基础上, 运用“单耗分析”理论对系统进行了环节划分, 分别建立了燃料单耗与成本单耗分析模型。以某实际 PEMFC 供电系统运行数据为依据, 对系统进行了单耗分析, 并与大电网供电比较分析了温室气体 CO<sub>2</sub> 与污染物 NO<sub>x</sub> 的减排效应。结果指出了 PEMFC 供电系统中各环节效率对燃料单耗与成本的影响程度; 系统发供电年 CO<sub>2</sub> 减排率 25% 左右, NO<sub>x</sub> 减排率达到了 99.96% 以上。具有较好的发展前景。

**关 键 词:** 质子交换膜燃料电池; PEMFC; 单耗分析; 减排效应

中图分类号: TM911.4 文献标识码: A

## 引 言

燃料电池(Fuel Cell)是一种高效、环境友好的发

电类型, 它将燃料和氧化剂之间的化学能通过电化学反应直接转化成电能。质子交换膜燃料电池(Proton Exchange Membrane Fuel Cell, 本文简称为 PEMFC 或 PEM 燃料电池)属于低温燃料电池, 电化学反应在 100 °C 下进行。它以全氟磺酸型固体聚合物为电解质, 铂/炭或铂-钌/炭等为电催化剂, 纯氢气或净化重整气为燃料, 空气或纯氧气为氧化剂。

最先将 PEM 燃料电池实用化的是美国 20 世纪 60 年代的航天飞机, 之后在 1983 年加拿大国防部资助巴拉德动力公司进行了研究, 并取得突破性进展<sup>[1]</sup>。PEM 燃料电池除具有一般燃料电池的特点外还具有室温快速启动、无电解液流失、水易排出、寿命长、比功率及比能量高等突出优点。本研究所分析的是作为分布式电源的燃用天然气 PEM 燃料电池供电系统, 系统简图如图 1 所示。

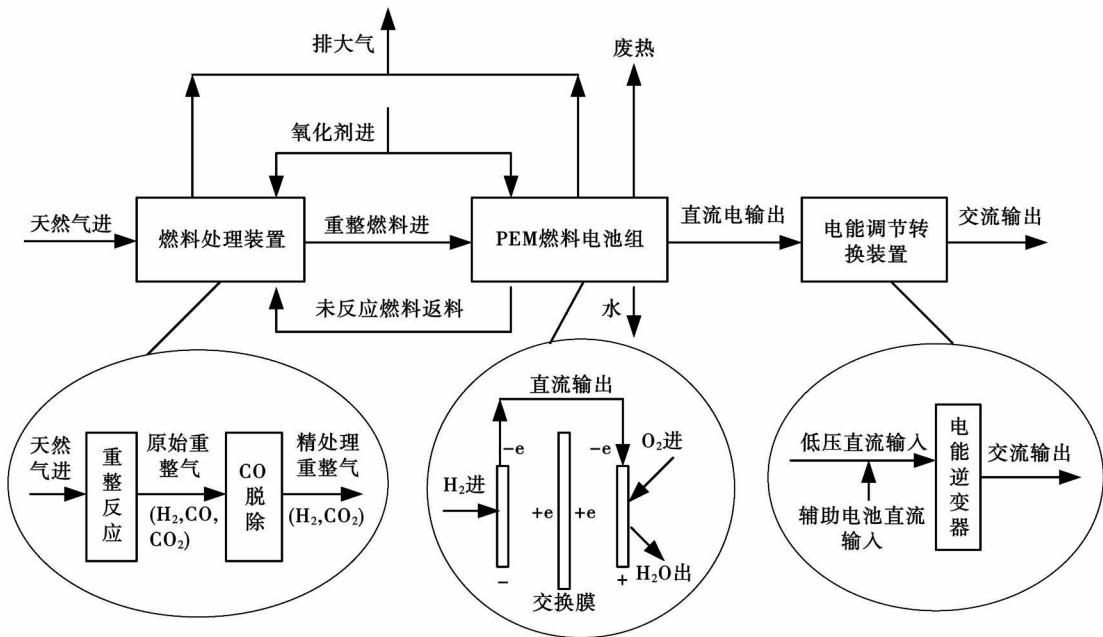


图 1 质子交换膜燃料电池系统供电系统

收稿日期: 2007-10-18; 修订日期: 2007-11-07

基金项目: 教育部科学技术研究重大项目基金资助(2006-2008)

作者简介: 阎 秦(1983-)男, 山西朔州人, 华北电力大学博士研究生

所分析的 PEM 燃料电池氢源为天然气自重整后脱除影响反应的 CO 后得到。自重整是部分氧化反应和绝热蒸汽重整过程的结合。首先天然气(主要成分为 CH<sub>4</sub>)、氧化剂(在此为空气)与水蒸气混合,发生部分氧化反应,然后高温混合气再与催化剂接触发生重整反应生成包含氢气、CO、CO<sub>2</sub> 的合成气<sup>[2-3]</sup>,经脱除 CO 后送入燃料电池。该过程使用非催化部分氧化过程释放的反应热来供给强吸热重整反应所需的大量热量,不需要像蒸汽重整那样从外界提供热源<sup>[4]</sup>,因此可以实现绝热操作。工作时向阳极供给氢气,向阴极供给氧化剂(空气或氧气)。氢在阳极分解成氢离子 H<sup>+</sup> 和电子 e<sup>-</sup>,氢离子进入电解质中,而电子则沿外部电路移向正极,形成电流。在阴极上,氧、电解质中的氢离子与抵达阴极上的电子结合形成水。直流电经逆变器转变为交流电,升到标准压力频率后供用户。

### 1 PEMFC 供电系统单耗分析

“单耗分析”是宋之平教授在焓和焓经济学的基础上所设计的能量系统分析的理论和方法,以产品单耗作为降耗节能的主要指标,分析单耗的构成及

其分布和变化,为节能降耗技术提供实用的理论依据。本研究将“单耗分析”理论应用于 PEM 燃料电池供电系统,分析其燃料与成本单耗特性。

#### 1.1 燃料单耗分析

单耗理论认为就燃料消耗而言,消耗可分为三类。第一类为:完全可逆时所需的理论最低消耗量;第二类为:由于系统中各环节的不可逆性所造成的附加燃料消耗(从第 1 个环节到最后的第 n 个环节中附加的不可逆燃料消耗的总和);第三类为:无产品输出的燃料消耗(例如:启动过程),称为额外附加燃料单耗<sup>[5-8]</sup>。

依据单耗理论思想,PEM 燃料电池燃料单耗仍由理论最低燃料单耗与附加燃料单耗组成。附加燃料单耗在研究中忽略电池组空运行不供电(如启动过程)等的额外附加燃料单耗,仅考虑由不可逆因素引起的不可逆附加燃料单耗。把从燃料输入到电能输配到电用户中间各环节按“单耗分析”思想划分为电能输配环节、直流电逆变环节、PEMFC 电环节、CO 脱除环节与重整制氢环节,如图 2 所示。理论最低燃料单耗  $b_{min}$  仍定义为单位产品所蕴含的焓值与输入的单位燃料蕴含的焓值的比值<sup>[5,9]</sup>。

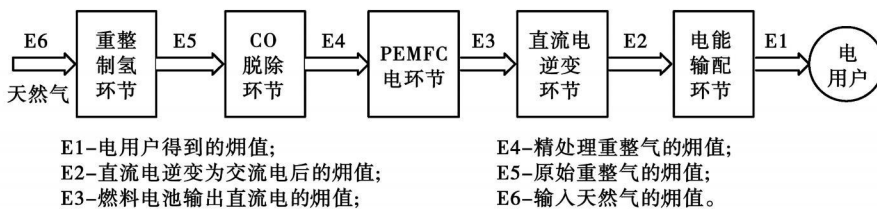


图 2 PEMFC 供电系统单耗分析环节划分简图

各环节单耗模型如下:

(1) 理论最低燃料单耗,  $m^3 / (kW \cdot h)$

$$b_{min} = (F_e / e_f) / (p_e / e_p) = e_p / e_f = \frac{3600}{Q_{LHV} \times 1.04} \quad (1)$$

式中:  $e_p$ 、 $e_f$ —单位产品和单位燃料的焓值;  $Q_{LHV}$ —天然气低位发热量,  $kJ/m^3$ ; 1.04—燃料焓与发热量的换算系数<sup>[5,10]</sup>。

(2) 电能输配环节附加燃料单耗:

$$b_1 = b_{min} [E_2 / E_1 - 1] \quad (2)$$

(3) 直流电逆变环节附加燃料单耗:

$$b_2 = (b_{min} + b_1) [E_3 / E_2 - 1] \quad (3)$$

(4) PEMFC 电环节附加燃料单耗:

$$b_3 = (b_{min} + b_1 + b_2) [E_4 / E_3 - 1] \quad (4)$$

(5) CO 脱除环节附加燃料单耗:

$$b_4 = (b_{min} + b_1 + b_2 + b_3) [E_5 / E_4 - 1] \quad (5)$$

(6) 重整制氢环节附加燃料单耗:

$$b_5 = (b_{min} + b_1 + b_2 + b_3 + b_4) [E_6 / E_5 - 1] \quad (6)$$

最终 PEM 燃料电池供电系统单耗为:

$$b = b_1 + b_2 + b_3 + b_4 + b_5 \quad (7)$$

结合上述式(2)~式(7)化解得:

$$b = b_{min} \cdot \frac{E_2}{E_1} \cdot \frac{E_3}{E_2} \cdot \frac{E_4}{E_3} \cdot \frac{E_5}{E_4} \cdot \frac{E_6}{E_5} \quad (8)$$

参照图 2 中各符号所释,定义如下:电能输配环节焓效率;  $\eta_1 = E_1 / E_2$ ; 直流电逆变环节焓效率  $\eta_2 = E_2 / E_3$ ; PEMFC 电环节焓效率  $\eta_3 = E_3 / E_4$ ; CO 脱除环节焓效率  $\eta_4 = E_4 / E_5$ ; 重整制氢环节焓效率  $\eta_5 =$

$E_5/E_6$ 。式(8)可表示为:

$$b = b_{\min} \cdot \frac{E_2}{E_1} \cdot \frac{E_3}{E_2} \cdot \frac{E_4}{E_3} \cdot \frac{E_5}{E_4} \cdot \frac{E_6}{E_5} = b_{\min} / (\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3$$

$$\times \eta_4 \cdot \eta_5) \quad (9)$$

### 1.2 成本单耗分析

在单耗分析理论中,费用的单耗(成本)由两部分构成,即理论最低成本和附加成本。产品的理论最低成本是指在生产中,没有任何不可逆现象发生,各环节没有任何损耗且设备的寿命期为无穷长,不消耗任何费用<sup>[5]</sup>。因此,理论最低成本就等于生产单位产品的理论燃料量  $b_{\min}$  的费用:  $c_p^{\min} = c_f b_{\min}$ , 其中  $c_f$  为燃料价格。

在实际系统中,从燃料输入到产品输出每个环节都在成本中体现着一定的附加费用,构成理论最低成本以外的附加成本。附加成本包括不可逆附加成本、额外燃料附加成本、子环节固定费附加成本和额外固定费附加成本。

$c_{f1}$ —子环节的不可逆附加成本;  $c_{f0}$ —额外燃料附加成本,表示无产品输出过程中的燃料费用;  $c_g$ —由于折旧维修造成的各环节固定费附加成本;  $c_{z0}$ —由工资、福利、税金、经营管理费等费用造成的附加成本称为额外固定费附加成本;在一般分析中,对于给定时段,可以将固定费视为不随时间/工况而变的常数<sup>[8]</sup>。固定费用附加成本计算采用“系统全寿命折旧”方法,具体参见文献[10]。该方法由确定初投资、确定全寿命系统总投资、确定平均折旧率,最后得到各设备的年折旧率,进而求得系统固定费附加成本。所以产品的成本可由下列各项构成:

$$c_p = c_p^{\min} + c_{f0} + c_{z0} + c_g + c_{f1} \quad (10)$$

对于 PEM 燃料电池供电系统子环节的不可逆附加成本应当按图 2 划分方式划分,即:  $c_{f1} = c_1 + c_2$

+  $c_3 + c_4 + c_5$ , 对应如下 5 个附加成本单耗: (1)电能输配环节附加成本单耗  $c_1 = c_f \cdot b_1$ ; (2)直流电逆变环节附加成本单耗  $c_2 = c_f \cdot b_2$ ; (3)PEMFC 电环节附加成本单耗  $c_3 = c_f \cdot b_3$ ; (4)CO 脱除环节附加成本单耗  $c_4 = c_f \cdot b_4$ ; (5)重整制氢环节附加成本单耗  $c_5 = c_f \cdot b_5$ 。综上,PEM 燃料电池供电系统成本单耗为:

$$c_p = c_p^{\min} + c_{f0} + c_{z0} + c_g + c_f \cdot \sum_{i=1}^5 b_i \quad (11)$$

## 2 单耗结果分析

以美国环保组织 (Environmental Protection Agency) 公布的 Plug Power 公司 5 kW PEMFC 供电系统运行数据为分析基础,该系统以自热催化重整方式制取氢气,电效率可达 26 %。由式(9)可知,计算整个燃料电池供电系统燃料单耗只需计算得到理论最低燃料单耗及各子环节的焓效率,即可得到每个环节的附加燃料单耗。

对天然气作燃料的发电系统理论最低燃料单耗为 ( $m^3 / (kW \cdot h)$ ):

$$b_{\min} = \frac{3600}{Q_{LHV} \times 1.04} = 0.09925 \quad (12)$$

天然气低位发热量  $Q_{LHV}$  采用系统取样分析得到的发热量数据  $34876.63 \text{ kJ}/m^3$ , 燃料价格  $c_f = 1.8 \text{ 元}/m^3$ ,  $c_p^{\min} = c_f b_{\min} = 0.1786 \text{ 元}/(kW \cdot h)$ 。当  $\eta_1 = 0.94$ <sup>[11]</sup>、 $\eta_2 = 0.85$ 、 $\eta_3 = 0.6$ <sup>[11]</sup>、 $\eta_4 = 0.9$ 、 $\eta_5 = 0.78$ <sup>[12]</sup>, 根据式(1~9)对各环节附加燃料单耗及 PEM 燃料电池总燃料单耗的计算结果列于图 3。

图 3 同时列出了附加成本中不可逆附加成本的五部分子环节单耗计算分析结果,附加燃料单耗  $b$  单位为  $m^3 / (kW \cdot h)$ , 附加成本单耗单位为  $\text{元}/(kW \cdot h)$ 。

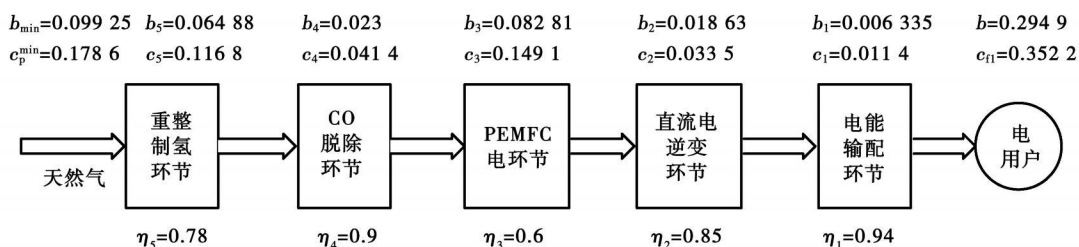


图 3 燃料单耗及不可逆附加成本单耗计算结果

由于所分析的燃料电池系统属自备发电系统, 计算中忽略额外燃料附加成本  $c_{f0}$  与额外固定费附加成本  $c_{z0}$ 。系统典型投资及计算结果如表 1 所示。

表 1 5 kW 级 PEMFC 供电系统投资数据及计算结果

|                 |   | 数值     |           |        | 数值    |
|-----------------|---|--------|-----------|--------|-------|
| 系统<br>初投资<br>/元 | 天然气重整投资   | 20 000 | CO 脱除环节投资 | 10 000 |       |
|                 | PEM 燃料电池投资  | 60 000 | 逆变环节投资    | 20 000 |       |
|                 | 输电环节投资  | 5 000  | 寿命期维修费用   | 30 000 |       |
|                 | 系统寿命周期/ $\alpha$  | 20     | 年运行时间/h   | 5 000  |       |
|                 | 全寿命折旧费用即固定费附加成本 $c_g$ /元 $\cdot$ (kW $\cdot$ h) $^{-1}$ |        |           |        | 0.290 |

根据式(11)及图 3 与表 1 中计算数据计算得到 PEM 燃料电池供电系统成本单耗为:

$$c_p = c_p^{\min} + c_{f0} + c_{z0} + c_g + c_f \cdot \sum_{i=1}^5 b_i = 0.178 6 + 0.290 + 0.352 2 = 0.820 8 \text{ 元}/(\text{kW} \cdot \text{h})$$

以上分析结果与台湾电机电子工业同业工会 2007 年统计数据中燃料电池发电成本 11~14 美分/(kW $\cdot$ h)比较吻合。

分析图 3 数据看出, 对应高焓效率的环节燃料单耗就低, 例如提高 PEMFC 环节焓效率由 60% 到 61% 就可将此环节附加单耗由 0.082 81 m<sup>3</sup>/(kW $\cdot$ h) 降低到 0.079 42 m<sup>3</sup>/(kW $\cdot$ h), 因此提高设备能量利用程度对节能有直接关系。PEMFC 系统五个环节中 PEMFC 电生成环节单耗最大, 天然气重整环节次之。

成本分析中理论燃料成本仅为总成本的 21.8%, 而不可逆附加成本达到 42.9%, 可见降低各环节设备不可逆度对降低总成本至关重要。考虑系统初投资及折旧的固定费用附加成本占总发电成本的 35%, 远高于理论燃料成本。与常规火力发电类似, 随着机组容量增大, 各种单耗都将显著下降。例如, 国外开发的 200 kW 级 PEM 燃料电池综合利用系统将反应副产物—热水—用于采暖及其它热利用方式, 实现系统热电联供, 其能源利用率及发电效率都有较大幅度提高。目前 PEMFC 系统的关键材料还不能实现完全国产化, 价格昂贵且易受控制。系统复杂及部件较多也是其走向市场化的关键障碍。但在可以预见的将来, 随着规模化、产业化发展, 各项固定投资费用必将大幅下降, 整个系统发电成本也必下降。

### 3 减排效应分析

以天然气重整为氢源的 PEM 燃料电池的排放

物包括各种碳化合物、氮氧化物及碳氢化合物(包括未反应的 CH<sub>4</sub>), 因此需要监视系统废气排放中的 NO<sub>x</sub>、CO、CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 及其它碳氢化合物的含量与排放速率, 我们主要分析温室气体 CO<sub>2</sub> 与污染物 NO<sub>x</sub> 在采用 PEMFC 供电与大电网供电时相对排放减少量及相对减少百分率:

$$R = H_h \cdot Con \cdot F \cdot O_{2d} \cdot 20.9 \quad (13)$$

式中:  $R$ —排放质量速率, g/h;  $H_h$ —对应高位发热量热输入总量, kJ/h;  $Con$ —所测排放物含量, g/m<sup>3</sup>;  $F$ —排气体积热量, kJ/m<sup>3</sup>;  $O_{2d}$ —干式状态下排气中氧含量百分率, %; 20.9—大气中氧含量, %;

若不采用 PEMFC 供电、系统故障或 PEMFC 功率小于负荷需求时, 建筑物用电(或不足部分)来自当地大电网。如果电网中发电厂 CO<sub>2</sub> 与 NO<sub>x</sub> 排放指标高于 PEMFC, 则采用 PEMFC 可以有效减少排放量。根据我国电力系统结构, 定义当地大电网典型火电厂的年排放量为基准量, 与 PEMFC 系统排放比较, 确定年排放减少量。

$$\text{年排放减少量 (g/a)} = \text{基准排放量} - \text{PEMFC 排放量} \quad (14)$$

$$\text{年排放减少率 (\%)} = (\text{基准排放量} - \text{PEMFC 排放量}) / \text{基准排放量} \quad (15)$$

确定减少量的 4 个步骤依次为:

- (1) 确定建筑物年总电负荷, kW $\cdot$ h;
- (2) 确定 PEMFC 系统的排放量;
- (3) 确定大电网供电排放量;

大型火电厂的排放量由下式计算:

$$E_g = KWh_{e,g} \cdot \delta \cdot ER_g \quad (16)$$

式中:  $KWh_{e,g}$ —电网输电量, kW $\cdot$ h;  $\delta$ —输电线路损;  $ER_g$ —典型火力发电厂排放速率, g/(kW $\cdot$ h);

(4) 确定燃用天然气的 PEMFC 的 CO<sub>2</sub> 与 NO<sub>x</sub> 排放量, g/(kW $\cdot$ h);

PEMFC 供电系统一般为自备电源, 启停比较方便, 在计算年发电量时采用几个典型固定功率年运行 5 000 h 方法, 如表 2、表 3 和表 4 所示。

表 2 PEMFC 系统排放特性

| 输出功率 / kW | 年发电量 / kW $\cdot$ h            | CO <sub>2</sub> 排放量 / g $\cdot$ (kW $\cdot$ h) $^{-1}$ | NO <sub>x</sub> 排放量 / g $\cdot$ (kW $\cdot$ h) $^{-1}$ | CO <sub>2</sub> 年排放总量 / t $\cdot$ a $^{-1}$ | NO <sub>x</sub> 年排放总量 / g $\cdot$ a $^{-1}$ |
|-----------|--------------------------------|--|--|---|---|
| 4.75      | 2.375 $\times$ 10 <sup>4</sup> | 753.64   | < 7.4456 $\times$ 10 <sup>-4</sup>                     | 17.899                                      | < 17.683                                    |
| 3.91      | 1.995 $\times$ 10 <sup>4</sup> | 730.94   | < 3.1599 $\times$ 10 <sup>-4</sup>                     | 14.582                                      | < 6.304                                     |
| 2.57      | 1.285 $\times$ 10 <sup>4</sup> | 730.94   | < 5.7658 $\times$ 10 <sup>-4</sup>                     | 9.393                                       | < 7.409                                     |

表 3 典型常规火力发电厂排放特性

| 等额发电量<br>/kW·h        | CO <sub>2</sub> 排放量<br>/g·(kW·h) <sup>-1</sup> | NO <sub>x</sub> 排放量<br>/g·(kW·h) <sup>-1</sup> | CO <sub>2</sub> 年排放<br>总量/t·a <sup>-1</sup> | NO <sub>x</sub> 年排放<br>总量/kg·a <sup>-1</sup> |
|-----------------------|--|--|---|--|
| 2.375×10 <sup>4</sup> |  |  | 23.75                                       | 42.75  |
| 1.995×10 <sup>4</sup> | 1 000  | 1.8  | 19.95                                       | 35.91  |
| 1.285×10 <sup>4</sup> |  |  | 12.85                                       | 23.13  |

表 4 PEMFC 系统减排分析

| 燃料电池<br>负荷/kW | 等额发电量                        | 等额发电量                        | 等额发电量                         | 等额发电量                        |
|---------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
|               | CO <sub>2</sub> 年排放<br>减少量/t | CO <sub>2</sub> 年排放<br>减少率/% | NO <sub>x</sub> 年排放<br>减少量/kg | NO <sub>x</sub> 年排放<br>减少率/% |
| 4.75          | 5.851                        | 24.64                        | 42.75                         | > 99.96                      |
| 3.91          | 5.368                        | 26.91                        | 35.91                         | > 99.98                      |
| 2.57          | 3.457                        | 26.90                        | 23.13                         | > 99.96                      |

以表 2 与表 3 的数据为基础,用式(14)、式(15)和式(16)分析得到表 4。上述分析虽然是以连续某个功率为条件得出,但对于实际机组可根据负荷变化乘以相应时间份额得到各种不同负荷组合下的机组排放性能。从表 2 可以看出,PEM 燃料电池 CO<sub>2</sub> 排放基本不与是否接近额定功率相关,基本维持在 750 g/(kW·h)左右,这与微型燃气轮机和燃气内燃机等有较大差别;并且 NO<sub>x</sub> 排放接近零排放,千瓦时仅为 10<sup>-4</sup> g 量级,与功率影响关系不大。表 3 为典型火力发电厂在与 PEM 燃料电池系统等量发电情况下的排放特性;表 4 计算分析了两种供电系统的温室气体 CO<sub>2</sub> 与污染物 NO<sub>x</sub> 相对排放比较。采用 PEM 燃料电池发供电年 CO<sub>2</sub> 排放减少率 25%左右,NO<sub>x</sub> 减少率更是达到了 99.96%以上。由此可以得出大力发展 PEM 燃料电池对于我国“节能减排”战略有重要作用。

#### 4 结 论

本研究用“单耗分析”理论针对 PEM 燃料电池供电系统建立了燃料及成本单耗模型,以实际系统运行数据为基础进行了分析,得到的天然气燃料单耗(0.294 9 m<sup>3</sup>/(kW·h))与成本单耗(0.820 8 元/(kW·h))、单位千瓦初投资成本及运行成本与常规火力发电相比仍处于较高水平。但在当前“节能减排”大方针下 PEM 燃料电池发供电年 CO<sub>2</sub> 排放减少率 25%左右、NO<sub>x</sub> 减少率 99.96%以上的较大优势使得其仍有较广阔的前景。

以天然气为燃料的 PEM 燃料电池可以实现天然气的多元化利用,并且与微型燃气轮机、燃气内燃机燃烧做功发电相比有诸如启动更快、排放更清洁等优点,大型化后可以利用反应排水实现热电联供,可作为我国未来分布式电源的一种重要形式。

#### 参考文献:

- [1] 衣保廉. 燃料电池—原理、技术、应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [2] 张 斌, 李 政, 倪维斗. 天然气自热重整器模拟及性能分析[J]. 天然气工业, 2003, 23(5): 95—99.
- [3] 李 艳, 李 帆, 管延文. 天然气制取燃料电池用氢技术的探讨[J]. 煤气与热力, 2006, 26(1): 29—33.
- [4] 徐 威, 林汝谋, 金红光, 等. 应用天然气重整技术的新型动力系统开拓研究[J]. 热能动力工程, 2005, 23(3): 221—225.
- [5] 宋之平. 单耗分析的理论 and 实施[J]. 中国电机工程学报, 1992, 12(4): 15—21.
- [6] 宋之平. 能量系统的单耗分析 // 热力学分析与节能论文集[C]. 北京: 科学出版社, 1993: 2—6.
- [7] 宋之平, 李洪涛. “单耗分析”案例[J]. 工程热物理学报, 1996, 17(2): 397—399.
- [8] 宋之平. 单耗分析中经济因素的处理[J]. 热能动力工程, 1995, 10(2): 78—83.
- [9] 宋之平. 绿色供暖(空调)系统[J]. 热能动力工程, 2000, 15(3): 93—97.
- [10] 李恩峰. 单耗分析理论在热电联产中的应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2004.
- [11] 马一太, 谢英柏, 杨 昭, 等. 空气源燃气机热泵空调系统的应用研究[J]. 工程热物理学报, 2002, 23: 25—28.
- [12] 张 斌, 倪维斗, 李 政. 考虑减排 CO<sub>2</sub> 的几种大规模制氢系统技术经济分析(上)[J]. 天然气工业, 2004, 24(1): 101—106.

(编辑 韩 锋)

#### · 书 讯 ·

### 污水处理项目建设程序与工程设计

本书按照污水处理工程项目的建设步骤,对各个工程设计阶段的任务和内容进行了细致的阐述,并结合实际工程项目,对污水处理工程项目可行性研究阶段的报告内容进行了全面系统的讲解,使读者对所有涉及到的相关专业都有一定程度的认识和了解。此外,本书还介绍了近些年来涌现出来的主要城市污水处理新工艺、新技术,并提供了设计污水处理工程项目的一些主要参考资料。读者对象:大中院校给排水排水专业和环境工程专业学生,给水排水设计工程技术人员、管理人员。

2008 年 7 月出版

单排径向拉拔管集箱的应力分析与评定 = **Stress Analysis and Evaluation of a Single-row Radial-drawn Tube Header** [刊, 汉] / WANG Jian-ping (West Branch of Zhejiang University of Technology, Quzhou, China, Post Code: 324000), WANG Xiu-min (Ningbo University of Technology, Ningbo, China, Post Code: 315000), GAO Zeng-liang (Chemical Machinery Design Research Institute, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, China, Post Code: 310032) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(5). — 539 ~ 541

Under the operating condition featuring a 2.2 MPa pressure, a finite element analysis and stress measurement have been conducted of an innovative butt-welded single-row radial-drawn tube header. The results of the analysis and measurement have been compared and analytically evaluated for the header in question. It is found that the finite element calculation result is in basic agreement with that of the actually measured stress distribution. A maximum stress occurs at the corner of the drawn head of the tube header. However, the stress can meet strength requirements and the fatigue life exceeds  $10^6$  cycles. **Key words:** drawn tube header, finite element analysis, stress measurement, stress strength, fatigue life

PEM 燃料电池供电系统“单耗分析”及其减排效应 = “**Specific Consumption Analysis**” and **Emission-reduction Effect of a Proton-exchange-membrane (PEM) Fuel-cell Power Supply System** [刊, 汉] / YAN Qin, YANG Yong-ping, XU Er-shu, ZHAI Rong-rong (Education Ministry Key Laboratory on Condition Monitoring and Control of Power Plant Equipment, North China Electric Power University, Beijing, China, Post Code: 102206) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(5). — 542 ~ 546

On the basis of a description of the working principle, properties and composition of a power supply system of proton-exchange-membrane fuel-cells (PEMFC) pertaining to a low-temperature fuel cell series, a segment division of the system in question was conducted by using the “specific consumption analysis” theory, establishing respectively analytic models for fuel specific consumption and cost specific consumption. With the operating data of a real PEMFC power supply system serving as a basis, a specific consumption analysis was conducted of the system and the emission-reduction effect of greenhouse gas  $\text{CO}_2$  and pollutant  $\text{NO}_x$ , also analyzed by comparing with the power supply from a large electric grid. The results of the study show the influencing degree of the exergy efficiencies in various links of the PEMFC power supply system on fuel specific consumption and cost. The annual  $\text{CO}_2$  emission-reduction rate of the system in power generation and supply approximates to 25% and  $\text{NO}_x$  emission-reduction rate is over 99.96%, thus, exhibiting relatively bright development prospects. **Key words:** proton exchange membrane fuel cell (PEMFC), specific consumption analysis, emission-reduction effect

硫化氢高温裂解制氢的动力学研究 = **Kinetics Study of Hydrogen Preparation from a Pyrolysis of Hydrogen Sulfide** [刊, 汉] / LING Zhong-qian, ZHOU Hao, QIAN Xin-ping, CEN Ke-fa (National Key Laboratory on Clean Utilization of Energy Source, Zhejiang University, Hangzhou, China, Post Code: 310027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(5). — 547 ~ 550

To investigate the mechanism governing hydrogen preparation from a pyrolysis of hydrogen sulfide, a kinetic model has been established, and kinetic simulation results and test data have been compared with the thermodynamic calculation results. The kinetic model thus established can simulate comparatively well the hydrogen preparation process from the pyrolysis of hydrogen sulfide. The calculated results are in comparatively good agreement with the test data and the thermodynamic calculation results. The results of the study show that with the rise of cracking temperature, the conversion rate of hydrogen sulfide and the production rate of hydrogen will be remarkably enhanced, reaching 56.8% and 10.6% respectively at 1250 °C. When the cracking temperature is lower than 1050 °C, with a longer residence time, the conversion rate of hydrogen sulfide and the production rate of hydrogen will also markedly increase. When the temperature is higher than 1050 °C and the residence time has exceeded 0.2 second, the influence of the residence time on the conversion rate of hydrogen sulfide and the production rate of hydrogen will be very small. **Key words:** hydrogen sulfide, hydrogen preparation, pyrolysis, kinetics