

国外技术介绍

# 固体氧化物燃料电池在建筑冷热电联产中的应用

(美)卡内基梅隆大学 V. 哈特科普夫 潘毅群 吴刚 R. 布莱姆

**摘要** 介绍了燃料电池的基本工作原理、特点和种类,以及一种固体氧化物燃料电池在作者所在大学建筑冷热电联产项目中的应用。

**关键词** 燃料电池 建筑冷热电联产 示范应用

## Application of solid oxide fuel cell in building cooling heating and power

By Volker Hartkopf, Pan Yiqun, Wu Gang and Rohini Brahme

**Abstract** Presents the basic principle, features and types of fuel cell and application of a sort of solid oxide fuel cell to a "building as power plant" project in a US university.

**Keywords** fuel cell, building cooling heating and power, pilot application

Carnegie Mellon University, USA

### 0 引言

建筑冷热电联产,是指为建筑物提供电、冷、热的现场能源系统。也就是说,建筑所需的电由位于建筑物现场或附近的发电装置(如内燃机、燃气轮机、微燃机、燃料电池等)提供,发电装置所产生的废热则由余热锅炉、吸收式制冷机、转轮除湿装置等回收利用,转换为蒸汽、热水、冷水等,为建筑供冷、供热,并控制湿度。建筑冷热电联产实际上是一种分散式的热电系统(distributed power generation system)<sup>[3]</sup>。这种系统与传统的大型集中式热电站相比,避免了传输和分配(transmission & distribution)的损失,能够通过回收热量使其综合效率很高(达到 80%),并且减轻了不堪重负的电网的压力。建筑冷热电联产作为传统的大型集中式热电站的补充,为日益增长的电力需求削减峰荷、稳定电价、提高电网安全提供了一个有效的解决方案。同时,还提高了能源利用效率和降低了污染物和温室气体的排放。建筑冷热电联产的核心是热电发生装置。在各种热电发生装置中,燃料电池以其能源利用效率高、污染物排放低、噪声低等特点被认为是 21 世纪最有吸引力的发电方法之一。

### 1 燃料电池简介

#### 1.1 基本原理

燃料电池是一个电化学系统,它能将化学能直接转换为电能和热能。燃料电池由 3 个主要部分组成:燃料电极

(负极)、电解质、空气/氧气(正极),如图 1 所示。其基本工

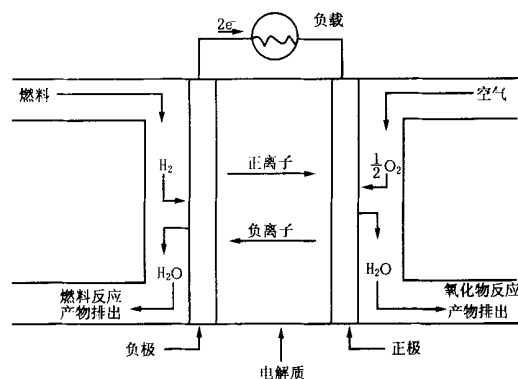


图 1 燃料电池工作原理图

作原理为:气体燃料连续不断地被供入负极,空气(氧气)被连续不断地供入正极,在正负电极处发生电化学反应,从而产生电能。以氢-氧燃料电池为例,在酸性电解质燃料电池中,氢气在负极发生电离,释放出负电子和  $H^+$  离子:

哈特科普夫,男,工学博士,教授,建筑特性诊断中心主任

Dr. Volker Hartkopf, Centre for Building Performance & Diagnostics, School of Architecture, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA 15213, USA

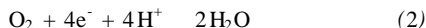
(001412) 2682350

E-mail: hartkopf@cmu.edu

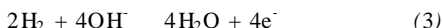
收稿日期:2002-06-25



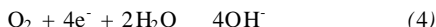
这些负电子通过连接正负极的电路流到正极,同时,氢离子通过电解液也被送到正极。在正极,氧气与负电子、氢离子发生反应,产生水:



而在碱性电解质燃料电池中,在负极,氢气被由电解质传递而来的  $\text{OH}^-$  离子氧化,释放出能量和负电子:



在正极,氧气与负电子、电解质里的水发生反应,生成  $\text{OH}^-$  离子:



在此必须澄清的一点是,燃料电池的“正极(cathode)”和“负极(anode)”的问题。如果我们查阅字典,结果会让人迷惑。例如,《简明牛津英语词典》(Concise Oxford English Dictionary)中对“cathode”的解释为:1. the negative electrode in an electrolyte cell or electron valve or tube. 2. the positive terminal of a primary cell such as a battery. 这样的两个几乎完全相反的定义实在是很容易让人迷惑。查阅了大量的相关文献<sup>[1,2,3]</sup>之后,笔者认为,“cathode”为正极(空气电极),“anode”为负极(燃料电极)。在燃料电池的反应中,负电子由负极流到正极,电流则从正极流向负极。这里特别指出,在很多中文的相关文献中,把燃料电极(anode)作为正极(阳极),而把氧化剂电极(cathode)作为负极(阴极),是不正确的。

燃料电池的构成与一般电池相似,都是由正负电极和电解质所构成,但一般的电池只是一个能量储存装置,其所能产生的电能受到其最大容量的限制,当其所储存的所有的化学反应物都消耗光了之后,它也就停止发电了。对于可充电的电池,其内部的反应物在释放了所有能量之后,能够被外部的电源充电再生,再次反应产生电能。而燃料电池实际上是一个能量转换装置,原则上,只要燃料和氧气源源不断地输入,它就能够连续发电。但在实际应用中,老化、腐蚀和一些部件的故障限制了燃料电池的寿命。

燃料电池的电能是由其化学反应的吉布斯自由焓(Gibbs free energy)转换而来。单体燃料电池的开路电压可以用下式计算:

$$E = \frac{-\dot{g}_f}{nF} \quad (5)$$

式中  $\dot{g}_f$ ——每 mol 燃料的吉布斯自由焓的变化。在氢-氧燃料电池中,即水的自由焓减去氢气和氧气的自由焓:

$$\dot{g}_f = (\dot{g}_f)_{\text{H}_2\text{O}} - (\dot{g}_f)_{\text{H}_2} - \frac{1}{2} (\dot{g}_f)_{\text{O}_2}$$

$n$ ——每 mol 燃料反应所产生的电子 mol 数,在氢-氧燃料电池中,  $n = 2$ ;

$F$ ——96 485 C(Faraday 常数)。

例如,氢-氧燃料电池在标准大气压(0.1 MPa)和 200 下,  $\dot{g}_f = -220 \text{ kJ}$ ,

$$E = \frac{220\ 000\text{J}}{2 \times 96\ 485\text{C}} = 1.14 \text{ V}$$

以上计算得出的单体燃料电池的开路电压是在假定没有任何损失的“可逆”情况下,也就是说吉布斯自由焓的变化可以完全转变为电能。然而,由于化学反应的“不可逆性”,实际的开路电压比理论值要小,而且越是低温低压的燃料电池这种损失就越大,而高温的燃料电池(比如 SOFC)的这种损失就非常小。另外,为了获得一定的电流,单体电池的实际电压一般为 0.6~0.7 V 左右。将很多个单体燃料电池“串联”起来组成的燃料电池堆,就是燃料电池的核心。而燃料电池系统则是由燃料电池堆以及辅助装置所构成的。不同类型的燃料电池的辅助装置有很大的不同,一般情况下,有动力装置、直流电/交流电转换装置、电动机、燃料储存装置、燃料处理装置、脱硫装置、压力控制装置、冷却装置等。因此,可以说燃料电池的原理并不复杂,但燃料电池系统是一个非常复杂的系统。

## 1.2 特点

### 1.2.1 优点

#### 1.2.1.1 效率高

一般来说,燃料电池的发电效率比其他的分散式发电装置(如内燃机、燃气轮机等)高 1/6 到 1/3<sup>[3]</sup>。现有的燃料电池的以低热值(LHV, lower heating value)定义的发电效率在 40%到 55%之间,这样的发电效率在现有的分散式发电系统中应该说是最高的。但是,某些文献中表述的“燃料电池超越卡诺循环”、“不受卡诺循环的限制”、“燃料电池不遵循热力学第二定律”、“电效率比任何其它形式的发电技术的电效率都高”、“理论上能量转换效率为 100%”等观点<sup>[4,5,6,7]</sup>,笔者却不能认同。

首先,笼统地将燃料电池的效率与卡诺循环相比就是不合适的,这关系到其效率的定义。我们知道,卡诺循环的效率极限是

$$\frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad (T_1 \text{ 为高温热源的温度, } T_2 \text{ 为低温热源的})$$

热机的发电效率不可能超过这个极限。而燃料电池的发电效率如果定义为产生的电能与吉布斯自由焓的变化之比,则根据上文所述,理论上吉布斯自由焓的变化可以全部转换为电能,也就是说其效率的极限为 100%。但是这样的效率定义是没有意义的,正确的定义是产生的电能与“生成焓”(enthalpy of formation)  $\dot{h}_f$  之比。例如,氢气和氧气反应生成水蒸气的生成焓  $\dot{h}_f = -241.83 \text{ kJ/mol}$  (低热值, LHV);生成液体水的生成焓  $\dot{h}_f = -285.84 \text{ kJ/mol}$  (高热值, HHV);低热值生成焓与高热值生成焓之差为水的汽化潜热。而燃料电池的最大发电效率或者说其效率极限为:  $\frac{-\dot{g}_f}{\dot{h}_f}$  (LHV 或 HHV)。可见,燃料电池的效率与卡诺

循环的效率实际上没有可比性。如果一定要将两者相比,前者也并不是总是大于后者,在某些状态(温度与压力)下前者比后者小。另外,在实际使用中,由于各种损失,燃料电池的吉布斯自由能的变化并不能全部转换为电能,其最终的直流电发电效率一般在 45%左右,比较好的能够超

过 50%，有些研究人员认为燃料电池的效率能够最终达到 60%。将直流电转换为交流会使其效率损失 2% 左右，再加上实际运行工况的变化等原因，额定效率为 50% 的燃料电池在实际运行中往往效率仅为 45%。燃料电池并不像某些文献中说的那么完美，但是其 45% ~ 55% 的效率在现有的各种分散式发电系统中还是最高的，目前只有一些最先进的大型集中式发电系统的效率能够超过燃料电池。

### 1.2.1.2 清洁

燃料电池是名副其实的清洁能源，因为它对燃料的要求很高，有些燃料电池只能用氢气，有些燃料电池虽然能够用天然气，但必须脱硫。而其内部发生的电化学反应的产物往往只有水蒸气和热空气。因此燃料电池可以做到“零排放”，如果不将其燃料改制所产生的污染物排放计入的话。

### 1.2.1.3 安静

燃料电池靠电化学反应发电，其内部没有任何活动部件，不会发出任何噪声。在尽量减低其动力装置(如泵)的噪声与振动之后，燃料电池系统在运行时的噪声和振动是非常低的。

### 1.2.1.4 废热的再利用价值高

燃料电池所产生的废热非常清洁，基本上就是水蒸气和热空气，而且高温燃料电池(如 SOFC)的废热的温度很高，因此可利用价值非常高。

### 1.2.1.5 模块化、安装时间短

燃料电池的发电效率不随规模的变化而变化，也就是说几 kW 的燃料电池的效率与几 MW 的燃料电池的效率一样，而燃料电池的发电出力由电池堆的出力和电池堆数决定，燃料电池厂家可以生产出几种标准的燃料电池模块，然后根据实际需要进行组合。

## 1.2.2 缺点

### 1.2.2.1 价格昂贵

燃料电池的价格是其他的分散式发电系统(内燃机、燃气轮机)的 2 ~ 10 倍(见表 1)。目前最先进的燃料电池系统的价格相当于太阳能发电系统的价格。

表 1 燃料电池分类及其主要特性

	低温燃料电池			高温燃料电池	
	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
电解质	质子可渗透膜	氢氧化钾溶液	磷酸	锂和碳酸钾	固体陶瓷
适用燃料	氢、天然气	纯氢	天然气、氢	天然气、煤气、沼气	天然气、煤气、沼气
氧化剂	空气	纯氧	空气	空气	空气
运行温度/°C	85	120	190	650	1000
发电效率/%	30+	32+	40	42	45
适用范围	汽车、航天	航天	建筑冷热电联产、集中热电联产		
总价格(包括安装费用)/(\$/kW)	1400	2700	2100	2600	3000

### 1.2.2.2 维护问题

燃料电池的维护与其他的发电装置有很大的不同，目

前这方面的专业维护人员可以说非常少。燃料电池发生故障之后，往往需要运回生产基地进行维修，目前还无法做到现场更换电池堆。

### 1.2.2.3 燃料问题

燃料电池对燃料非常挑剔，因此往往需要非常高效的过滤器，并且要经常更换。

### 1.2.2.4 尚未成熟

燃料电池进入商业化的时间还很短，可以说还是一种尚未成熟的技术。

如果燃料电池价格能够有所降低，并且经过一段时间使其趋于成熟，它将以其高效、清洁、安静等综合优势成为各种分散式发电技术中最优的技术之一。

## 1.3 燃料电池的种类

依据电解质的不同，燃料电池分为碱性燃料电池(AFC)、磷酸型燃料电池(PAFC)、熔融碳酸盐燃料电池(MCFC)、固体氧化物燃料电池(SOFC)及质子交换膜燃料电池(PEMFC)等。其主要特点如表 1 所示。其中 AFC 的工作温度很低，但对燃料和氧化剂的要求很高，适用面很窄，基本上只在航天工业中有应用。而 SOFC 因工作温度最高，效率也最高，并且可以直接使用天然气(CH<sub>4</sub>)为燃料(在燃料电池内部对燃料进行改制)，产生的废热利用价值很高，非常适合在建筑冷热电联产和集中热电联产中应用。SOFC 的构成材料为固体陶瓷，比液体的可靠性好，但其制造工艺非常复杂，研究开发及制造的成本都非常高。可以说目前的高成本使得 SOFC 的商业化潜力不及 PAFC 和 MCFC。

## 2 固体氧化物燃料电池

美国一家公司开发的管式 SOFC 如图 2 所示。其材料为氧化锆金属陶瓷，单体电池的直径为 2.2 cm，长为 150 cm，开路电压为 0.9 ~ 1 V，在 1000 的工作温度、85% 的燃料利用率和 25% 的空气利用率的条件

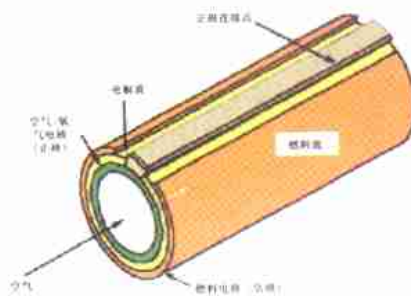


图 2 管式燃料电池

下，单体燃料电池能够产生 200 W 的直流电。这种独特的管式结构解决了板式结构的密封问题，是目前最先进的技术。每个单体电池之间用镍“粘接”起来，形成电池组。目前该公司的燃料电池尚处于示范阶段，其在荷兰安装的 100 kW 的燃料电池已经运行了 7000 多 h，该燃料电池的峰值发电能力为 130 kW，现在将 108 kW 的电投入电网，45 kW 的热水供入当热网。

## 3 BAPP 冷热电联产项目

位于美国宾西法尼亚匹兹堡的卡内基梅隆大学建筑性能与诊断中心将在大学校园内建一座示范教学办公楼，将

包括教室、工作室、实验室、办公室等。而这座建筑的冷、热、电由 250 kW 的 SOFC 提供。该项目的名字“BAPP”是“Building As Power Plant”(以建筑为热电厂)的缩写,也是建筑冷热电联产的另一种表述。在该建筑内将采用各种先进的建筑技术,包括先进的围护结构,HVAC 系统、清洁能源(燃料电池)和可再生能源(太阳能)等。

### 3.1 建筑概况

BAPP 由两部分构成:中庭和主楼。中庭面积 704 m<sup>2</sup>, 高约 18.4 m,西侧和南侧与旧教学楼相连。中庭下方有两层地下室,面积与中庭相等,层高 4.6 m。主楼总面积 5 962 m<sup>2</sup>,共 6 层,每层 645.12 m<sup>2</sup>,层高 4.6 m,西侧与中庭相连。主楼内将包括艺术学院的教室、工作室、实验室和办公室,中庭将作为公共空间。主楼的南北两侧为空调机房。主楼设空调系统,中庭、地下层以及空调机房不设空调系统。图 3 中 IW 为 Intelligent Workplace,即建筑性能与诊断中心的所在地。

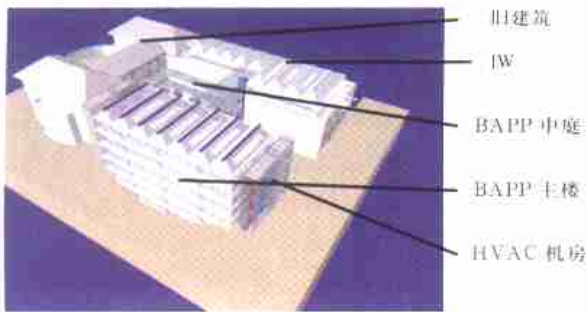


图 3 BAPP 模型示意

### 3.2 BAPP 能源系统分析

#### 3.2.1 热电发生系统

BAPP 的热电发生系统是 250 kW 固体氧化物燃料电池。其主要特性参数为:净直流发电量(总发电量扣除燃料电池电力系统用电量)226 kW,净低热值发电效率(AC/LHV)46%,燃料流量 45.4 kg/h,空气流量 0.73 kg/s,废气排量 2 340 kg/h,废气温度 755 ℃,进气温度 500~550 ℃,废气余热回收后热水/蒸汽热量 150 kW。

由 SOFC 电池堆排出的 755 ℃ 的废气并不能够直接加以利用,而要首先经过热回收装置(参见图 4)变成 315 ℃ 的废气,然后再送入余热回收锅炉与冷水进行换热,使其变为总热量为 150 kW 的蒸汽或热水。这家公司计划在 2003

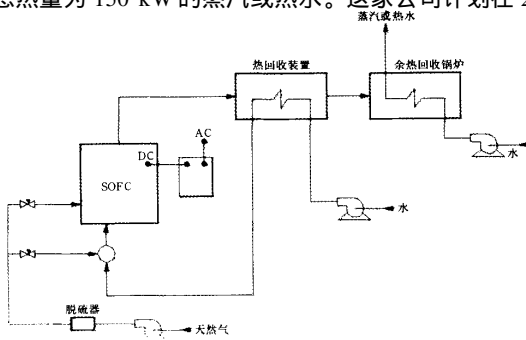


图 4 SOFC 废热回收系统示意图

年底推出 CHP250(产出 80 ℃ 热水),在 2004 年底推出 BCHP250(产出 185 ℃ /800 kPa 高温高压蒸汽),这两种产品之一将在 BAPP 项目中使用。因 SOFC 产生的电和热不一定能够完全满足 BAPP 的需要,在不足时要从电网供电以及从校园的蒸汽管网供蒸汽。反之,SOFC 产生的电和热在非峰值时段被 BAPP 用下来的余量,需要考虑返回电网和校园蒸汽管网。

#### 3.2.2 冷热源系统

SOFC 产生的热水或蒸汽就可以直接作为热源。而冷源考虑采用热驱动式的制冷装置,如吸收式制冷机或吸附式制冷机,为建筑提供所需冷量。有三种吸收式制冷机适合在该项目中使用:单效热水吸收式、双效蒸汽吸收式和废气直燃吸收式。如果是 CHP250,可以采用制冷量约为 106 kW 的单效热水吸收式制冷机组;如果是 BCHP250,因其排出蒸汽的温度和压力完全符合双效蒸汽吸收式制冷机的要求,优先考虑采用双效蒸汽式,冷量为 196 kW;还可以用从热回收装置排出的 315 ℃ 的废气驱动直燃式吸收式制冷机,冷量约为 99 kW。吸附式制冷机的驱动热源为 50~90 ℃ 的热水,可以利用 CHP250 排出的热水。

#### 3.2.3 能源储存系统

本项目涉及三种能源储存系统:电、冷、热。因为 SOFC 将一天 24 h 满负荷运行,产生 226 kW 左右的恒定电量和恒定的废热。而建筑的负荷是随着时间变化的,有高峰和低谷,尤其是办公楼,晚间的负荷很低,峰谷负荷之间的差比较大。这就意味着有很多时间 SOFC 所产生的电和热无法被 BAPP 消耗光。除了考虑将多余的电和热返回电网和校园蒸汽管网,供校园内其他的建筑使用之外,也非常有必要考虑采用能源储存装置,如蓄电池、冰蓄冷、热水罐等。我们知道,能源储存装置的最重要的功能就是削峰填谷,也就是把负荷低谷时段的多余能量储存起来,在负荷高峰时段释放出来。比如可以采用蓄电池将 SOFC 发的多余的电储起来,在白天释放给校园内的建筑使用。这样就可以尽量减少校园白天的城市电网的用电量,利用峰谷电价差为学校节省下大笔的开支,城市电网也能够因为峰时电力需求的减少而受益。另外,也可以考虑用夜间多余的电制冰,储存起来,在白天融冰放冷,即冰蓄冷系统。

#### 3.2.4 空调系统

为了提高室内空气品质、减少能耗、降低初投资,考虑在 BAPP 中采用独立新风系统。这里的独立新风系统并非传统意义上的独立新风系统,而是由美国宾西法尼亚州立大学建筑工程系的 Stanley A. Mumma 提出的 DOAS 系统(dedicated outdoor air system)<sup>[12]</sup>。这种独立新风系统将室内的潜热负荷和显热负荷分解,由 DOAS 承担新风负荷、室内所有的潜热负荷以及部分室内显热负荷,而余下的室内显热负荷则由另外的并行空调系统承担。这样能够保证室内各空间的新风量始终达到标准,能够很好地控制室内的湿度,防止细菌繁殖,这些都能够提高室内空气品质。

而且,由于并行空调系统只需承担室内的显热负荷,则可以考虑采用冷却吊顶,从而达到节能和提高舒适度的双重目的。并行空调系统的冷水温度高于室内露点温度,可以将冷水循环管与消防喷淋水管合并,大大节省初投资。DOAS 一般由被动式转轮、除湿冷盘管和显热转轮式换热器构成,首先由被动式转轮用室内排风对新风进行预处理(夏季冷却并除湿,冬季加热并加湿),然后由除湿冷盘管对新风进行除湿,使其足以抵消所有的室内潜热负荷(露点温度为 7 )。显热转轮的作用是利用室内排风对新风再热,如果新风经过冷盘管处理后温度低于要求的话。可见,DOAS 对室内排风有两道回收措施,充分利用排风的能量,以达到节能的目的。

### 3.3 BAPP 能源系统整合

由以上的分析可以知道,BAPP 的能源系统是相当复杂的,有很多种组合方式。而我们就要找出其中的一种系统效率最高的方式。具体的研究步骤为:a)对 BAPP 能源系统进行模拟,得到其全年逐时的冷、热、电负荷;b)根据 BAPP 的设计日负荷设计其能源系统,做出几种可能的方案;c)对这几种方案分别进行模拟,得到系统全年净一次能耗、系统总效率、排放量;d)对几种方案进行比较,得到最为合理的一种方案。目前我们已基本完成前两个步骤,刚刚开始第三个步骤。我们采用两个专业软件对 BAPP 进行模拟,它们是 DOE2.1e 和 EnergyPlus。

#### 3.3.1 建筑负荷模拟结果

美国政府长期以来分别支持两个建筑能源模拟软件:DOE2 和 BLAST。这两个软件各有优缺点。而 EnergyPlus<sup>[13]</sup>是在这两个软件的基础上,将它们优点综合而成的一个新软件,因此 EnergyPlus 克服了 DOE-2 的很多缺点,而且具有一些 DOE-2 所没有的功能。比如,EnergyPlus 是开放式结构,允许模拟人员自己开发一些模块,合并进去。而且 EnergyPlus 在空调系统的模拟上可以做得更精确。鉴于 DOE-2 基本已成熟,而 EnergyPlus 尚处于开发阶段,我们决定采用这两个软件同时对 BAPP 进行模拟。模拟参数设定为:外墙热阻  $R = 1.94 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ,屋顶热阻  $R = 7.044 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ,窗(Low-e 双层窗)遮阳因数  $S_c = 0.4325$ ,可见光穿透率  $V_t = 0.73$ ,  $U = 1.4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,中庭天窗(单层透明玻璃)  $S_c = 1.00$ ,可见光穿透率  $V_t = 0.90$ ,  $U = 6.31 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,渗透风量  $0.2 \text{ h}^{-1}$ ;主楼、中庭下方的地下室、HVAC 机房照明负荷  $5 \text{ W}/\text{m}^2$ ,中庭照明负荷  $10 \text{ W}/\text{m}^2$ ,办公室(主楼第 5,6 层)设备负荷  $20 \text{ W}/\text{m}^2$ ,娱乐技术中心(主楼第 1,2 层)设备负荷  $50 \text{ W}/\text{m}^2$ ,工作室(主楼第 3,4 层)设备负荷  $70 \text{ W}/\text{m}^2$ 。在模拟中设定室内照明随日光照明而自动调节。模拟得出的建筑负荷如表 2 所示。由表 2 可知,DOE-2 和 EnergyPlus 的模拟得出的冷负荷和电负荷非常接近,但热负荷相差比较多。

#### 3.3.2 BAPP 能源系统初步整合方案

表 2 模拟结果比较

	DOE2.1e	EnergyPlus
251.6	最大冷负荷/kW	226
65	最大热负荷/kW	177.9
187	最大电负荷/kW	189.3
505 473	全年冷负荷/(kWh/a)	482 662
29 843	全年热负荷/(kWh/a)	123 141
740 435	全年电负荷/(kWh/a)	738 830

注:表中电负荷仅包括照明和设备用电负荷,不包括能源系统本身用电负荷。

根据模拟得到的建筑负荷(EnergyPlus)结果,我们对 BAPP 的能源系统进行方案设计与整合。图 5 为方案之

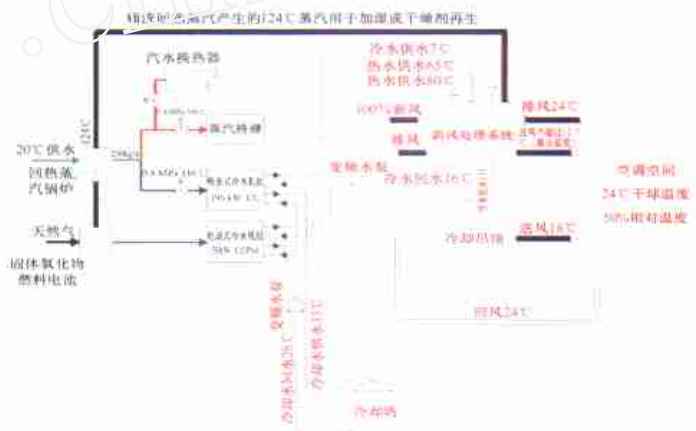


图 5 BAPP 能源系统方案之一

一。由表 2 的 EnergyPlus 模拟结果可知,SOFC 所发的电(226 kW)基本上可以覆盖 BAPP 的照明和设备用电。为了保证安全,也便于多余的电返回电网,SOFC 与校园电网之间必须设置连接。如果采用 BCHP250,则由 SOFC 的余热回收锅炉出来的是高温高压蒸汽,在夏季足以驱动制冷量为 196 kW 的双效蒸汽吸收式制冷机。冷量不足部分由制冷量为 58 kW 的电制冷机提供,电制冷机所耗电能由 SOFC 或电网提供。在冬季,从 SOFC 余热回收锅炉中出来的高温高压蒸汽将用作热源,多余部分回到校园蒸汽管网。夏季 7 的冷水先进入独立新风系统的冷盘管,对新风冷却并除湿,然后 13 的冷水再进入冷却吊顶。最后 16 的冷水回水回到冷水机组,这样的大温差配置有利于提高冷水机组的效率。

以上所述的方案仅为所考虑的多种方案之一,目前正对各种方案进行模拟和比较。

这里必须强调的一点是,SOFC 与校园电网和蒸汽网的连接问题。BAPP 位于卡内基梅隆大学的校园内,多余的电和热可以供校园内的其他建筑使用,这样就基本上避免了与城市电网之间的直接连接以及向城市电网返电的问题。虽然美国的相关法规规定可以向城市电网返电,但这里牵涉到很复杂的技术问题和电网的安全问题,而且卡内基梅隆大学是否可以从中获得收益还值得怀疑。如果从卡内基梅隆整个校园来考虑的话,SOFC 所发的电和

热应该是可以完全被消耗光的,因此只需要与校园电网和蒸汽网连接就可以了。正因为有这样的前提,BAPP 冷热电联产系统才能够取得其最大的能效。这也是在校园内建 BCHP 项目的独有优势。而建筑冷热电联产技术的一个非常关键的问题就是和城市电网和热网的连接问题,有些大型的冷热电联产项目都是因为无法向城市电网返回电而无法真正发挥效益。例如上海黄浦区中心医院的 1 000 kW 的燃气轮机就是长期处于低负荷下运行,远远达不到预期的效益。浦东国际机场的冷热电联产系统也存在这个问题。可以说,建筑冷热电联产要真正成为大型集中热电站的补充,还有许多问题需要解决。

#### 4 总结

本文从燃料电池的基本原理入手,说明其不同于其他的分散式发电装置的特点,对目前的一些有关燃料电池的不准确的想法提出了自己的观点。介绍了 250 kW 固体氧化物燃料电池在卡内基梅隆大学的冷热电联产项目 BAPP 的具体应用,分析 BAPP 的能源系统及其研究方法,给出了一些阶段研究成果。

#### 参考文献

- 1 James Larminie, Andrew Dicks. Fuel cell systems explained, John Wiley & Sons Ltd, 2000
- 2 Fuel cell handbook (5th). EG&G Services Parsons, Inc. Science

- Application International Corporation, 2000
- 3 Willis H Lee, Walter G Scott. Distributed power generation. Planning and Evaluation, Marcel Dekker Inc, 2000
- 4 Los Alamos National Laboratory. Fuel cells - Green power, <http://www.education.lanl.gov/resources/fuelcells>
- 5 孔宪文,桂敏言,冯玉全. 关于燃料电池发电技术调研报告. <http://www.china5e.com/dissertation/newenergy/0058.htm>
- 6 高培德. 燃料电池的新进展. <http://www.china5e.com/dissertation/newenergy/0030.htm>
- 7 Annette Wille, Norbert Ber. 燃料电池——能源转换的新来源. <http://www.china5e.com/dissertation/newenergy/0051.htm>
- 8 Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison. Assessment of solid oxide fuel cells in building applications, 2001 (11)
- 9 Gard Analysis. Assessing combined cooling, heating and power systems in Northeast Wisconsin. 2000(12)
- 10 Christian A Forbes. Solid oxide fuel cell. Siemens Westinghouse
- 11 Stanley A Mumma. Design dedicated outdoor air systems ASHRAE J, 2001(5)
- 12 Crawley, Drury B, et al. EnergyPlus: Creating a new-generation building energy simulation program. Energy & Buildings, 2001, 33(4)

#### 简讯

## 热烈庆祝 中元国际工程设计研究院 (原机械工业部设计研究院) 成立 50 周年

中元国际工程设计研究院始建于 1953 年,是国家甲级工程勘察设计单位。具有机械、建筑、城市规划、医药、船舶、兵器、铁道、市政、商业、智能建筑、环境污染防治等工程设计和工程勘察证书,并具有工程总承包、建设监理、工程咨询、压力管道与压力容器设计等甲级资格。有独立的进出口经营贸易权、对外经济合作资格证书、进出口企业资格证书、自理报关单位注册登记证书、工程造价咨询单位资质、施工图设计文件审查许可证和质量体系认证证书,是全国勘察设计综合实力百强单位之一。

该院十分重视技术进步,近几年自行开发的技术转让项目有 280 多项次,主编和参编的国家技术规范、技术标准、标准图达 39 项,部标准规范 6 项。共获国家级和省部级科学技术成果奖 175 项,专利 16 项。代表项目有:巴基斯坦重机厂,第一重机厂技术改造,第二重机厂技术改造,徐州工程机械集团公司技术改造,柳州工程机械厂技改工程,厦门工程机械厂,山东滨州活塞集团,广州重机集团迁建工程,中国国际航空公司,首都国际机场,上海浦东国际机场,深圳、广州白云机场货运站、配餐中心、飞行员训练中

心、生产运控中心及行李处理系统,BAC 型工业炉微机控制系统,高能 X 射线电子直线加速器定时显相系统无损检测,北京西罗园集中供热厂,首都机场供热厂,北京亦庄供热中心,北京翠微园小区,北京方庄小区,北京新东安市场,北京万通新世界广场,北京远洋大厦,北京中粮广场,北京财富中心,联想(北京)研发大厦,中关村西区 CEC 大厦,北京航空航天大学体育馆,北京朝阳体育馆,北京石景山体育馆,燕山大学,北京科技大学,北京理工大学,广东佛山医院,金华中医院,北京大学眼科中心,北京安贞医院等工程设计项目和人民大会堂维修改造、中华人民共和国外交部办公大楼建设监理,以及自行开发的多层与高层建筑结构 CAD 软件、工业厂房排架计算、平法软件等,赢得了良好的声誉。

地址:北京市西三环北路 5 号 邮编:100089  
电话:(010)68428811  
传真:(010)68458354  
网址:<http://www.ippr.com.cn>  
E-mail:office@ippr.com.cn