

# 分布式冷热电联供系统变工况性能实验研究

蒋润花, 黄斯珉, 尹辉斌, 杨敏林

(东莞理工学院 能源与化工系 广东 东莞 523808)

**摘要:**在分布式冷热电联供系统试验平台上,实验分析了系统各单元设备及系统随内燃机输出功率变化的变工况运行特性。该实验平台动力机采用柴油机,额定功率为50 kW,随着柴油机输出功率的增加,系统一次能源利用率和相对节能率先增加后减少,存在最大值。当柴油机输出功率为40 kW左右,一次能源利用率达到最大为76.0%,相对节能率最大达到29.5%;当负荷过低时,相对节能率为负值,系统相对于分产系统不节能。探讨了提高冷热电联供系统变工况性能的措施。

**关键词:**变工况;冷热电联供系统;溴化锂吸收式制冷机组;能源利用率

中图分类号:TM611.3 文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2016.11.014

## 引言

CCHP(冷热电联供系统)是分布式能源系统的主要内涵,符合“温度对口,梯级利用”准则,直接面向用户,按用户需求提供电、冷和热,同时解决多重用能需求,满足建筑和工业能源需求的总能系统。根据动力系统不同进行分类,主要包括汽轮机、往复式内燃机(以下简称为内燃机)、燃气轮机、微型燃气轮机、斯特林机和燃料电池等,其中燃气轮机和内燃机是冷热电联供系统采用的主要设备。由于冷热电联供系统各子系统运行现场的大气条件一般为非标准大气条件,且用户所需负荷时时变化,联供系统经常处于非设计工况运行状态,因此研究冷热电联供系统变工况性能对推动分布式供能技术发展具有重要意义。目前,以燃气轮机为动力系统的冷热电联供系统的变工况性能研究已做了大量的工作,而对内燃机冷热电联供系统变工况性能研究还处于理论研究阶段。本研究对内燃机冷热电联供系统部分

变工况性能展开实验,改变内燃机输出功率,研究系统一次能源利用率和相对节能率变化规律,根据实验结果分析,初步探讨了提高冷热电联供系统变工况性能的措施<sup>[1-3]</sup>。

## 1 分布式冷热电联供系统流程介绍

分布式冷热电联供系统流程如图1所示,系统采用内燃机为动力机组,燃料为柴油,柴油在内燃机中燃烧,驱动发电机发电,从内燃机出来的烟气驱动烟气型制冷机组进行制冷,提供用户所需的制冷量。从溴化锂制冷机组出来烟气温度在100℃以上,经过下一级的换热器加热给水,提供生活热水。由于气缸冷却的冷却水温度太低,难以利用,本实验只考虑回收排气余热<sup>[4-5]</sup>。



图1 分布式冷热电联供系统流程图  
Fig. 1 Flow chart of a distributed CCHP cogeneration system

## 2 实验平台搭建

搭建分布式冷热电联供系统试验平台,由内燃机、制冷机组、模拟负载、换热器、数据采集系统、各种测量仪器和烟气管道等组成,其中内燃机为动力系统,制冷机组为供冷系统。

收稿日期:2015-10-20; 修订日期:2015-12-01

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51506031);国家自然科学基金重点资助项目(51236008)

作者简介:蒋润花(1984-),女,湖南衡阳人,东莞理工学院助理研究员、博士。

通讯作者:尹辉斌(1980-),男,湖南衡阳人,东莞理工学院副教授、博士。

内燃机为 1 台康明斯 50 kW 涡轮增压中冷柴油机,额定排烟温度  $T_4 = 521\text{ }^\circ\text{C}$ ,如图 2 所示,柴油机型号为 4BTA3.9 - G2,冲程数为 4,额定转速为 1 500 r/min,发电机组型号为 KDGC50S,干重 320 kg,外形尺寸为 65 mm × 582 mm × 908 mm,冷却方式采用强制水冷循环,实验过程采用的燃料为国标 3 号柴油,热值为  $46.04 \times 10^3\text{ kJ/kg}$ ,设计工况下大气环境条件为:大气温度  $T_0 = 25\text{ }^\circ\text{C}$ ,大气压力  $P_0 = 100\text{ kPa}$ ,相对湿度  $\varphi_0 = 30\%$ 。

实验过程中,采用电热水锅炉为柴油发电机的模拟负载,即柴油机输出电用以驱动电热水锅炉,如图 3 所示,额定功率为 50 kW,型号为 CWDR50 - 85/70,额定进出口温度 70/85  $^\circ\text{C}$ 。



图 2 康明斯柴油发电机组

Fig. 2 Cummins diesel generator unit



图 3 柴油机模拟负载 - 电热水锅炉

Fig. 3 Diesel engine simulation load - electric hot water boiler

制冷机组为烟气补燃型溴化锂吸收式制冷机组,如图 4 所示,用柴油机的烟气余热驱动溴化锂吸收式制冷机。当柴油机烟气余热不足以驱动制冷机组用于提供用户所需冷量,制冷机组中带补燃器,采用补燃,补燃的燃料为天然气,天然气的低位热值为  $54.942 \times 10^3\text{ kJ/kg}$ 。当制冷机组处于设计工况运行

时,额定制冷量为 60 kW,冷媒水出口温度为 7  $^\circ\text{C}$ 、进口温度为 15  $^\circ\text{C}$ ,冷却水进口温度为 32  $^\circ\text{C}$ 、出口温度为 38  $^\circ\text{C}$ 。



图 4 烟气补燃型溴化锂吸收式制冷机组

Fig. 4 Flue gas complementary combustion type LiBr absorption refrigeration unit

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 柴油机变工况性能分析

实验过程中,采用电热水锅炉作为柴油机的模拟负载,模拟功率可调,从 5 kW 开始测试,以模拟负载 5 kW 为步长,测试 10 组数据,大气条件为:大气温度  $T_0 = 26.8\text{ }^\circ\text{C}$ ,大气压力  $P_0 = 101.84\text{ kPa}$ ,相对湿度  $\varphi_0 = 61\%$ 。

图 5 为柴油机燃油量  $B$ 、燃油消耗率  $b_e$  与输出功率  $P$  的关系曲线,随着柴油机输出功率的增加,燃料量  $B$  增加,与输出功率  $P$  几乎成线性变化关系,燃油消耗率  $b_e$  与柴油机输出功率  $P$  几乎成反比例变化关系,随着柴油机输出功率  $P$  的增加,燃油消耗率  $b_e$  先减少后增加。

柴油机的负荷调节采用的是质调节,当负荷增加时,每循环供油量就必须保持增大才能保持转速不变,故每小时耗油量随负荷的增加而增大,从而导致过量空气系数减小,燃烧完善的程度因而下降,柴油机的指示热效率也随之减小,而柴油机的机械效率随负荷的增加而增加。因为柴油机燃油消耗率与柴油机的指示热效率和机械效率的乘积成反比,当柴油机空转不对外做功,则机械效率为零,燃油效率趋于无穷大,随负荷和循环供油量的增大,机械效率增加,而指示效率略有下降,因此指示热效率与机械效率的乘积仍然增大,因此燃油效率随负荷的增加而迅速的降低。当供油量增加到一定值时,即指示

热效率和机械效率的乘积为最大值,燃油消耗率达到最低值,即柴油机输出功率为40 kW,燃油消耗率达到最低。负荷再继续增加,循环供油量进一步增加,过量空气系数进一步减小,燃烧因缺氧而恶化,不完全燃烧及后燃增加,使指示热效率降低较快,虽机械效率仍有所上升,但指示热效率下降的程度超过了机械效率的上升程度,使指示热效率与机械效率的乘积开始下降,因而这使燃油消耗率随负荷的增加而不断上升。

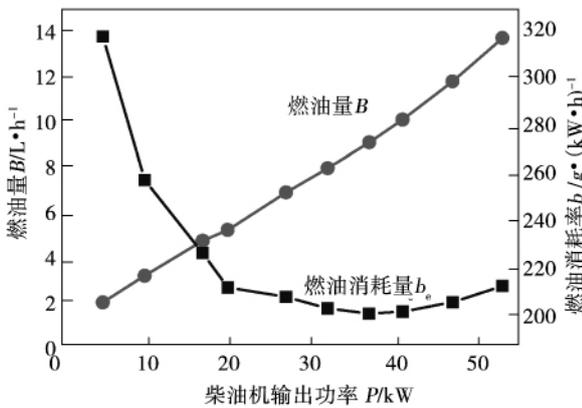


图5 柴油机燃油量、燃油消耗率与输出功率的关系

Fig. 5 Relationship among the fuel oil quantity, fuel oil consumption rate and output power of the diesel engine

图6为柴油机排气流量  $G_g$  与排气温度  $T_4$  随柴油机输出功率  $P$  的变化曲线,随着输出功率的增加,柴油机排气流量增加。输出功率增加,排气温度增加,与输出功率几乎成线性变化关系。图7为柴油机的效率  $\eta$  随柴油机输出功率  $P$  的关系曲线,随着输出功率的增加,柴油机的效率先增加后减少,当功率  $P$  为40 kW左右,内燃机效率存在最大,约为0.38,但在柴油机最佳热效率点后,柴油机效率减少的幅度不大<sup>[6-7]</sup>。

### 3.2 烟气补燃型溴化锂吸收式制冷机组变工况性能

实验时,采用内燃机烟气余热驱动烟气型溴化锂吸收式制冷机组,结合测得内燃机实验数据,研究烟气补燃型溴化锂吸收式制冷机组变工况性能,仅考虑内燃机输出功率对溴化锂制冷机组性能的影响,不考虑大气环境变化对冷热水机组的影响。保

持冷媒水出口温度为7℃,保持冷却水进口温度为32℃,冷媒水和冷却水的流量保持不变。由于内燃机输出功率变化,内燃机的排气流量和排气温度随之发生变化,供给制冷机组高压发生器的加热量发生变化,从而导致制冷机组输出制冷量、制冷机组的排烟温度发生变化,制冷机组的性能发生变化<sup>[8-9]</sup>。

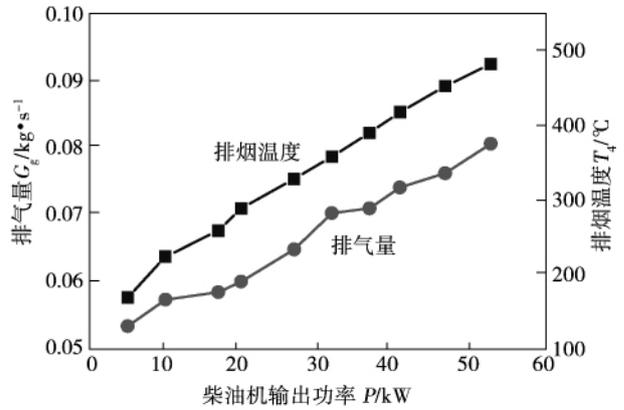


图6 柴油机排气量、排烟温度随输出功率的变化  
Fig. 6 Changes of the exhaust gas flow rate and temperature with the output power of the diesel engine

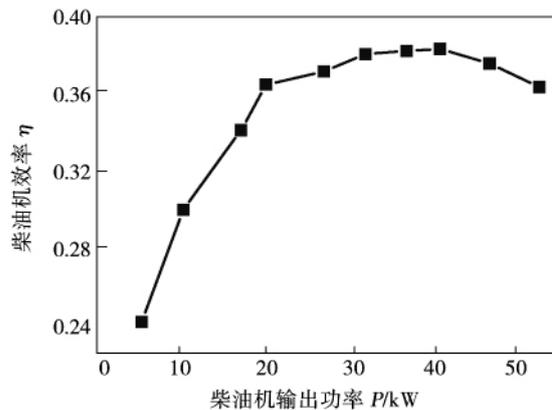


图7 柴油机效率与输出功率的关系  
Fig. 7 Relationship between the efficiency and output power of the diesel engine

图8为吸收式制冷机组所需的加热量与制冷量随柴油机输出功率的变化情况,随着柴油机输出功率的变化,制冷量增加,加热量增加,几乎成线性变化。图9为吸收式制冷机组的排烟温度随柴油机输出功率的变化情况,随着柴油机的输出功率的增加,吸收式制冷机组的排烟温度增加。随着柴油机输出功率的增加,柴油机排气流量增加,柴油机排气温度

增加,吸收制冷机组的排烟温度也随之增加,但在溴化锂制冷机组高压发生器的温差增大,溴化锂制冷机组的加热量增加,制冷量增加。

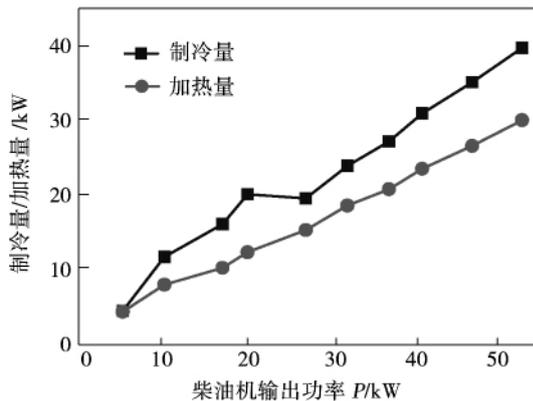


图 8 吸收式制冷机组的制冷量随柴油机输出功率的变化

Fig. 8 Changes of the quantity of cooling energy refrigerated by the absorption type refrigeration unit with the output power of the diesel engine

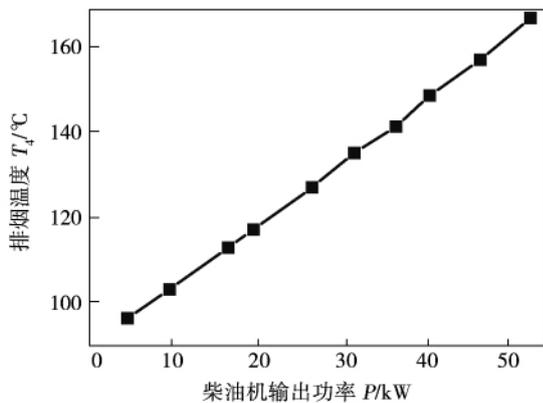


图 9 吸收式制冷机组排烟温度随柴油机输出功率的变化

Fig. 9 Changes of the exhaust gas temperature of the absorption type refrigeration unit with the output power of the diesel engine

图 10 为吸收式制冷机组的 COP 随柴油机输出功率的变化情况,随着柴油机输出功率的增加,制冷机组的 COP 先增加后减少,当柴油机输出功率为 40 kW 左右,存在最大值,约 1.33,因为随着柴油机输出功率增加,制冷机组高压发生器加热量增加,制冷量随之增加,但制冷量增加速度先快后慢,而加热量几乎成线性变化,因此制冷机组的性能系数 COP 先

增加后减少。

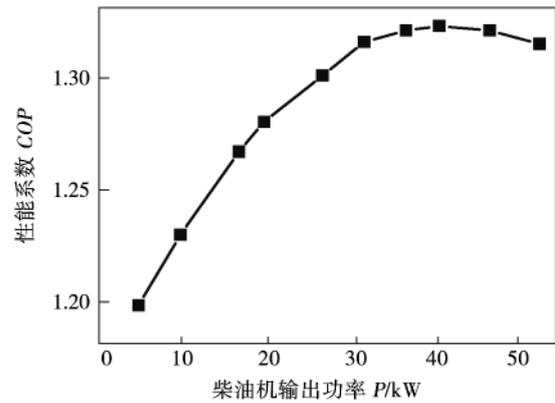


图 10 吸收式制冷机组的性能系数 COP 随柴油机输出功率的变化

Fig. 10 Changes of the performance coefficient COP of the absorption type refrigeration unit with the output power of the diesel engine

### 3.3 分布式冷热电联供系统变工况性能实验结果

本文采用一次能源利用率 PER 和相对节能率 RPESR 作为内燃机分布式冷热电联供系统评价准则。

一次能源利用率主要反映的是各种形式能源输出总量与系统输入一次能源总量的比值,定义式为:

$$PER = \frac{W + C + Q}{f_{CCHP} H_u} \quad (1)$$

式中:W—联供系统对外输出的电量,kJ;C—联供系统对用户输出的冷量,kJ;Q—联供系统为用户提供的热负荷,kJ; $f_{CCHP}$ —联供系统输入的一次燃料总量,kg; $H_u$ —燃料低位发热值,kJ/kg。

为了与现有的分产系统能源利用性能进行对比,采用相对节能率作为评价指标:

$$RPESR = \frac{\Delta f}{f_{re}} = \frac{f_{re} - f_{CCHP}}{f_{re}} \quad (2)$$

$$f_{re} = \left( \frac{W}{\eta_{eg}} + \frac{C}{\eta_{eg} \cdot COP_{el}} + \frac{Q}{\eta_{boiler}} \right) / H_u$$

式中: $f_{re}$ —分产系统的总燃料量,kg; $\eta_{eg}$ —电网的平均效率; $COP_{el}$ —电压缩式制冷机的性能系数; $\eta_{boiler}$ —锅炉的效率。

分产系统采用的 3 种参照系统为:(1) 火电厂为电力输出参照系统,目前我国电网平均发电率为 33.3%;(2) 电压缩式制冷系统充当制冷输出参照系统,压缩式空调性能差异比较大,本文选取  $COP_{el}$  为 5;(3) 锅炉和城市热网被视为供热输出参照系

统,锅炉热效率为90%<sup>[10-11]</sup>。

图11和图12分别为联供系统一次能源利用率、相对节能率随柴油机输出功率的变化情况。一次能源利用率和相对节能率随柴油机输出功率的增加先增加后减少,存在最大值,当柴油机输出功率为40 kW左右,一次能源利用率达到最大约为76.0%,相对节能率最大约为29.5%。从图12可以看出,当柴油机输出功率过低,柴油机热力性能急剧恶化,导致联供系统相对节能率下降,当输出功率低于8 kW,相对节能率小于零,即与分产系统相比,联供系统并不节能。

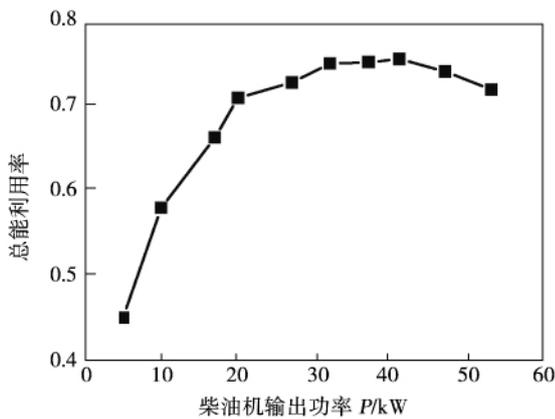


图11 系统一次能源利用率随柴油机输出功率的变化

Fig. 11 Changes of the primary energy source utilization rate of the system with the output power of the diesel engine

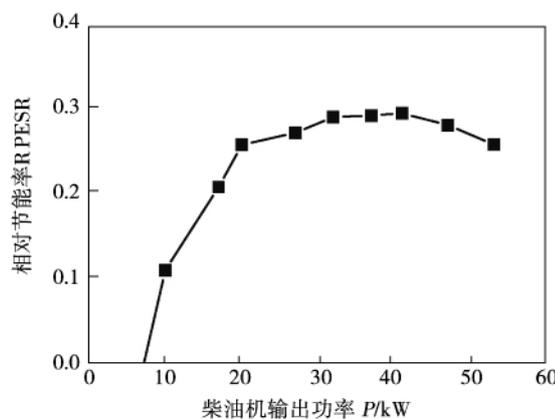


图12 系统相对节能率随柴油机输出功率的变化

Fig. 12 Changes of the relative energy saving rate of the system with the output power of the diesel engine

### 3.4 提高分布式冷热电联供系统变工况性能措施

实验结果表明,当柴油机输出功率为40 kW时,柴油机热效率最大,联供系统一次能源利用率和相对节能率达到最大,该点在最佳运行状态点。因为内燃机冷热电联供系统中动力子系统柴油机是将一次能源转换为电能的关键技术的设备,同时是为制冷子系统和供热子系统提供余热的源头,因此柴油机的性能对冷热电联供系统的变工况性能影响具有至关重要的作用。

当联供系统处于变工况运行时,偏离设计工况,联供系统热力性能恶化,能源利用率低下,为了使系统保持较高的能源利用效率,需要使系统运行在最佳点附近。为了调控内燃机冷热电联供系统变工况性能,优化系统一次能源利用率和相对节能率,在内燃发电机组选型时可以选择两台或多台机组并联运行,当电力需求降低时可以保证一台在设计工况下高效运行,另外一台在变工况下运行,或采用一台运行,一台停运的方式;或联供系统上采用蓄能装置进行主动调控,保证联供系统处于高效设计工况运行,提高冷热电联供系统对用户所需负荷需求的适应性。

## 4 结论

本文实验研究分布式冷热电联供系统各单元设备及系统部分变工况性能,初步探讨了提高冷热电联供系统变工况性能的措施:

(1) 随着柴油机输出功率的增加,燃油量增加,燃油消耗率先减少后增加,排气温度和排气流量增加,柴油机的效率先增加后减少,存在最大值,当内燃机输出功率为40 kW左右,达到最大为0.38。

(2) 随着柴油机输出功率的增加,制冷机组的制冷量增加,排气温度增加,但制冷机组的性能系数COP先增加后减少,存在最大值,当柴油机输出功率为40 kW左右,达到最大为1.33。

(3) 随着柴油机输出功率的增加,联供系统一次能源利用率和相对节能率先增加后减少,存在最大值,当柴油机输出功率为40 kW左右,一次能源利用率达到最大为76.0%,而相对节能率达到最大为29.5%,且当柴油机输出功率过低,联供系统与

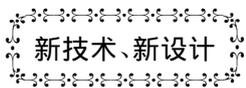
分产系统相比并不节能。

(4) 采用两台或多台动力机组并列运行,或者采用蓄能装置对系统进行主动调控,提高系统能源利用率。

#### 参考文献:

- [1] 能源十一五规划[R]. 北京:国家发展改革委. 2007 4. National Development and Reform Commission. Energy source eleventh-five-year plan [R]. Beijing: National Development and Reform Commission 2007 4.
- [2] D W Wu ,R Z Wang. Combined cooling ,heating and power: A review [J]. Progress in Energy and Combustion Science 2006(32) : 459 - 495.
- [3] Na Zhang ,Ruixian Cai. Analytical solutions and typical characteristic of part-load performances of single shaft gas turbine and its cogeneration [J]. Energy Conversion & Management 2002(43) :1323 - 1337.
- [4] 何晓红 ,蔡睿贤. 内燃机及其热电联产系统的典型变工况解析特性[J]. 工程热物理学报 2008 29(2) :191 - 194. HE Xiao-hong ,CAI Rui-xian. Typical off-design condition analytic characteristics of an internal combustion engine and its heat and power cogeneration system [J]. Journal of Engineering Thermophysics 2008 29(2) :191 - 194.
- [5] Wei Wang ,Ruixian Cai ,Na Zhang. General characteristics of single shaft microturbine set at variable speed operation and its optimization [J]. Applied Thermal Engineering. 2004 24: 1851 - 1863.
- [6] 唐开元 ,欧阳光耀. 高等内燃机学[M]. 北京:国防工业出版社 2008. TANG Kai-yuan ,OUYANG Guang-yao. Advanced theory of internal combustion engines [M]. Beijing: National Defense Industry Press 2008.
- [7] Yun K T. Modeling of reciprocating internal combustion engines for power generation and heat recovery [J]. Applied Energy ,2013 (102) :327 - 335.
- [8] 吴业正 ,韩宝刚. 制冷原理及设备(第二版)[M]. 西安:西安交通大学出版社 ,1997. WU Ye-zheng ,HAN Bao-gang. Refrigeration principles and equipment (Second Edition) [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press ,1997.
- [9] 郑剑娇 ,郭培军 ,隋 军 等. 烟气型吸收式制冷机的变工况特性研究[J]. 工程热物理学报 2012 33(8) : 1275 - 1278. ZHENG Jian-jiao ,GUO Pei-jun ,SUI Jun ,et al. Study of the off-design condition characteristics of a flue gas type absorption refrigerator [J]. Journal of Engineering Thermophysics ,2012 ,33 (8) : 1275 - 1278.
- [10] 蔡睿贤. 功热并供评价准则及燃气轮机功热并供基本分析[J]. 工程热物理学报 ,1987 8(3) :205 - 210. CAI Rui-xian. Criteria for evaluation of concurrent power and heat supply and basic analysis of concurrent power and heat supply by gas turbines [J]. Journal of Engineering Thermophysics ,1987 8 (3) : 201 - 205.
- [11] 冯志兵 ,金红光. 冷热电联产系统的评价准则[J]. 工程热物理学报 2005 26(5) :725 - 728. FENG Zhi-bing ,JIN Hong-guang. Criteria for evaluating a cooling ,heat and power cogeneration system [J]. Journal of Engineering Thermophysics 2005 26(5) :725 - 728.

(刘 瑶 编辑)



新技术、新设计

## 清洁的等变率:快速启动联合循环运行的下一个挑战

据《Gas Turbine World》2014年3~4月刊报道, Siemens开发的联合循环装置和控制一体化排放清洁等变率技术,即使以30 MW/min等变率升负荷和降负荷时也能使NO<sub>x</sub>、CO和SCR(选择催化还原)氨排放保持在基本负荷运行等级。

给出了加利福尼亚 El Segundo 2 × 1 联合循环装置的试验报告。

(吉桂明 摘译)

be still relatively uniform. When various single loops are being interrupted and blocked, the law governing changes of the particle concentration in the middle and on the top of the furnace will not be significantly different while the law governing changes of the particle concentration in the dense phase zone will be relatively complicated. **Key words:** six loop, circulating fluidized bed, particle condensation, interruption and blockage of a single loop

分布式冷热电联供系统变工况性能实验研究 = **Experimental Study of the Off-design Condition Performance of a Distributed Type Cooling, Heating and Power Cogeneration System** [刊, 汉] / JIANG Run-hua, HUANG Si-min, YIN Hui-bin, YANG Min-lin (Department of Energy and Chemical Engineering, Dongguan University of Technology, Dongguan, China, Post Code: 523808) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2016, 31(11). - 74 ~ 79

On the test platform of distributed CCHP systems, off-design performance of units and system has been studied according to the output power of internal combustion engine. The power unit of experimental platform was diesel engine, and the rated power was 50 kW. With the output power of the diesel engine increasing, the primary energy rate (PER) and the relative energy saving ratio (RPESR) are the first to increase and then decrease. When output power is 40 kW, the PER is 76%, and RPESR is 29.5%. When the output power was too low, the RPESR was negative. It means that the CCHP system was not energy saving relative to the production system. The measures to improve the performance of CCHP system have been discussed in this paper. **Key words:** off-design; combined cooling, heating and power system; lithium bromide absorption refrigeration unit; energy utilization ratio

湿式电除尘器充电模型建立与收集效率的数值研究 = **Establishment of a Charging Model for Wet Type Electrostatic Precipitators and Numerical Study of the Collection Efficiency** [刊, 汉] / ZHOU Xiao-ying, CHEN Xiao-ping, DOU Hua-shu (College of Mechanical and Automatic Control, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou, China, Post Code: 310018), ZHANG Hai-zhen (Huadian Electric Power Science Academy, Hangzhou, China, Post Code: 310030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2016, 31(11). - 80 ~ 86

The finite volume method was used to calculate the particle movement trajectory inside a wet type electrostatic precipitator and the particle collection efficiency of the precipitator. By making use of the test data obtained from the wet type electrostatic precipitator in a 330 MW coal-fired power generation unit, a particle charging model was established and the particle collection efficiency at various circulating water flow rates were analyzed. The Euler multi-phase flow method was employed to calculate a gas-liquid two-phase flow and in combination with a discrete phase model, the ion trajectories were tracked to simulate the three-phase flow inside the precipitator. It has been found that the results calculated by using the numerical calculation model are in relatively good agreement with the