

小型汽油机改装用于CCHP的实验研究

□ 同济大学机械与能源工程学院 (201804) 周宇 秦朝葵 童超 马飞

摘 要: 以小型汽油机改装为天然气原动机, 配置热水型溴化锂吸收式制冷机及发电机, 搭建了一套小型的CCHP系统。对余热回收能力、发电品质及发动机稳定性、溴冷机热力特性进行了实验研究和分析。根据溴冷机温度的变化情况, 将其启动至达到名义工况之间的过程分为3个阶段, 并进行了运行参数分析。此外, 提出几点建议以提高发电品质。

关 键 词: CCHP 汽油机改装 溴冷机 发电品质

Experimental Research of CCHP System Based Upon Retrofitted Petroleum Engine

Mechanical and energy school of Tongji University Zhou Yu, Qin Chaokui, Tong Chao, Ma Fei

Abstract: A small-size petroleum engine was retrofitted to fuel natural gas and LiBr absorption chiller, electricity generator were integrated to set up a small CCHP system. Recoverable amount of waste-heat, performance of absorption chiller, quality of electricity generated were experimentally researched and analyzed. Three stages were divided between start-up and stable operation for absorption chiller. Some measures were discussed to improve electricity quality.

Keywords: CCHP (Combined cooling heating and power) Engine retrofitting LiBr absorption chiller Electricity quality

1 前言

表1和表2列出了按一次能源种类划分的2010年中国与世界消耗量和结构占比情况。显然, 煤炭仍是我国的主导能源^[1], 占70.45%。以煤为主的能源结构造成严重的环境污染。作为一种清洁且储运方便的矿物燃料, 天然气具有很高的经济性。自“西气东输”开始, 我国天然气工业已进入快速发展初期。目前我国大规模的天然气利用还处于起步阶段, 技术空白多, 与发达国家相比差距比较大。安全、经济性和设备国产化是当前需要解决的关键问题^[2]。

表1 按能源种类划分的消耗量对比 (亿吨石油)

	石油	天然气	煤炭	核能	水电	可再生	总计
中国	428.6	98.1	1 713.5	16.7	163.1	12.1	2 432.1
世界平均	4 028.1	2 858.1	3 555.8	626.2	775.6	158.6	12 002.4

表2 按能源种类划分的结构对比 (%)

	石油	天然气	煤炭	核能	水电	可再生	总计
中国	17.62	4.03	70.45	0.69	6.71	0.50	100
世界平均	33.56	23.81	29.63	5.22	6.46	1.32	100

发展和推广冷热电三联供（Combined Cooling Heating and Power，下简称CCHP）系统是解决我国能源结构不合理，电网分布不均衡和改善环境的一个有效途径。CCHP技术通过能量的梯级利用，可显著提高能源利用率^[3]。根据国际能源署（IEA）的最新报告，全球CCHP总装机容量已达到了330GW。文献^[4-7]介绍了CCHP在国内外的的发展状况，美国、日本、丹麦、荷兰等地发展迅速，丹麦CCHP项目在电力系统总装机中的比重已经超过60%，荷兰的装机容量占总装机的40%。我国在燃气CCHP系统的工程应用方面起步较晚，近年来得到了更多的关注和重视。2010年我国制订了发展1 000个不同CCHP应用技术示范工程加快其应用转化的方案。

本文通过将小型汽油机改装成天然气发动机，并选配小型溴化锂吸收式制冷机，初步开发了一套基于国产化设备的CCHP系统，较之进口设备具有很大的经济优势^[8]，而且启动快、运行灵活、调节方便。其具体流程如图1所示。本文对实验测试的机组性能进行分别讨论，包括发动机改装、余热回收情况、小型溴冷机的制冷性能等。

2 发动机改装

小功率天然气发动机大多由汽油机改装而成，大功率发动机多由柴油机加装点火装置。改装天然气发动机的基本原则是保持基本结构不变，如曲柄连杆机构、配气机构、机体、缸盖、冷却系统、润滑系统及发动机主要配件等，通过合理设计和选择改制的零部

件，达到高性能、低成本的改制目的。与传统汽油机相比，其具有排放低、燃料经济性好、运转柔和及噪音小等特点。本实验选用JL465Q1型汽油机，参数如表3所示。

表3 JL465Q1汽油机主要参数

缸径×行程 mm	总排量 L	压缩比	最低空 载转速 r/min	标定 转速 r/min	标定 功率 kw	最大扭 矩转速 r/min	最大 扭矩 N·m
65.5×72	0.97	8.8:1	900±50	5 300	31.5	3 000~5 000	69

汽油机改装为天然气发动机时，首要问题是进气混合装置的改装。其中最关键的技术是燃料供给系统的改装，即将供油系统改装为供气系统。改装的供气系统主要有两种，一种是直喷混合方式，另一种是进气道混合器预混合方式。本实验采用后者，充分考虑系统在建筑中的可应用性，利用混合器（将减压器输出的常压燃气和空气混合形成可燃混合气的装置）前后的压差控制燃气的进气量及空气的混合比例，再由进气总管吸入气缸。混合器下游设置节气门，根据工况要求调节其开度、实现对混合气量的控制，同时保证发电电压和频率的稳定。供气系统如图2所示。

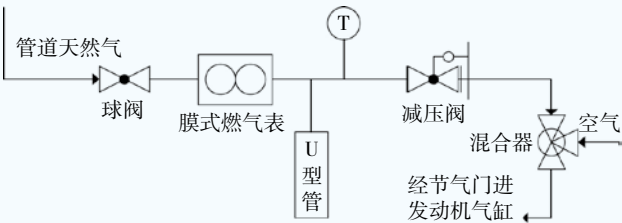


图2 天然气供气系统简图

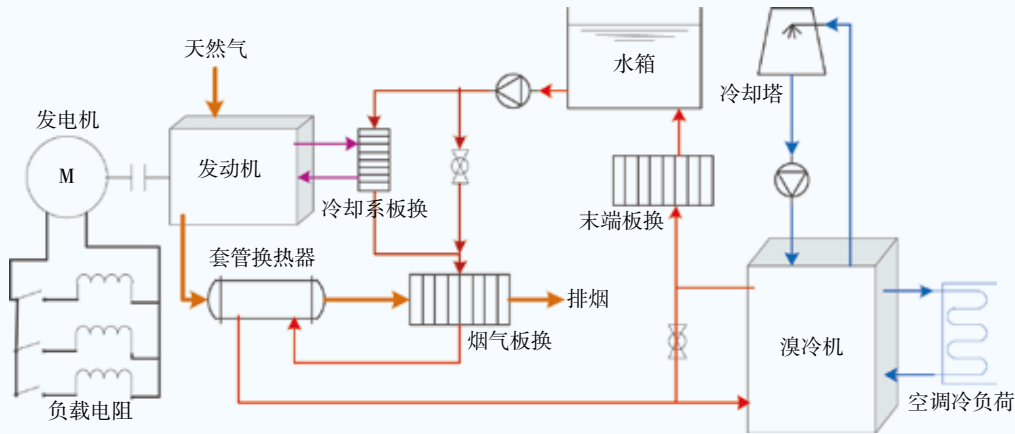


图1 天然气发动机CCHP系统设计图

根据发动机运行时的空气流量需求来选择合适的混合器非常重要；若混合器选择过小，会影响发动机功率输出；混合器过大则会使发动机启动困难、不能维持怠速状态甚至无法正常启动，且空燃比也会不正确。本试验选用IMPCO Model 60型比例式混合器。

3 发电机侧及余热回收系统

CCHP实验系统由发电机和改装的天然气发动机连接构成，根据发动机的额定功率并考虑发电机的效率损失，选用一台额定功率18kW的无刷励磁AVR发电机，采用双支点、双轴承安装。发电时工频和中频电压互不干扰，电压波形下弦性好，供电品质优良。此外，实验中使用负载电阻模拟用电负荷，每组负载的电阻值为57.6Ω左右。根据发电机功率，采用12根负载电阻并联的方式与发电机连接，在低功率段（0kW~6kW）每两组负载电阻用独立的开关进行控制，高功率段（6kW~10kW）每一组负载电阻用独立的开关进行控制以调节发电机输出功率。

发动机的余热回收系统包括两部分，一部分回收发动机缸体冷却系产生的热量，另一部分回收发动机尾气热量。前者采用板式热交换器，在满足压力降条件下，可达到要求的换热效果。为保证较高的余热回收效率和较紧凑的结构，采用钎焊板式换热器，结构紧凑、传热系数较高。发动机尾气余热则采用两级热回收，对应常规天然气的含硫量，尾气温度可以降到120℃~150℃^[8]。为深度回收余热，在气缸出口设置套管式换热器（一级热回收）和板式换热器（二级热回收）。冷却系侧换热器与烟气侧换热器之间的连接方式也是需要考虑的因素。为使整个余热回收系统的

效率达到最优，本实验中采用旁通连接（如图3），既增加了烟气侧换热器的回收热量，又可有效降低冷却液的温度水平，保证余热回收系统的安全性。

4 溴化锂制冷机组

综合考虑试验设施、余热回收效率及安全方面的因素，确定热水温度在80℃~90℃为佳，最终选用的溴冷机技术参数见表4。

溴冷机吸收器内灌注制的制冷剂为50%的溴化锂溶液50L，密度1.52kg/L（30℃），比热容2.1kJ/（kg·K）^[3]。

表4 溴冷机名义工况下主要技术参数

热水		冷冻水		冷却水		制冷量
进水温度	90℃	出水温度	10℃	进水温度	30℃	11.5kW
出水温度	85℃	回水温度	15℃			
流量	3.1t/h	流量	2t/h	流量	5t/h	

5 实验结果及分析

5.1 实验条件

根据发电机转速要求，设定发动机转速3 000r/min；天然气压力2 000Pa；根据溴冷机要求，控制给水流量在3.1t/h。实验时的天然气气相色谱分析结果见表5，低热值为34.9MJ/Nm³。

表5 天然气成分

甲烷	乙烷	丙烷	异丁烷	正丁烷	氧气	氮气	二氧化碳
93.73	4.01	0.47	0.07	0.08	0.04	1.17	0.43

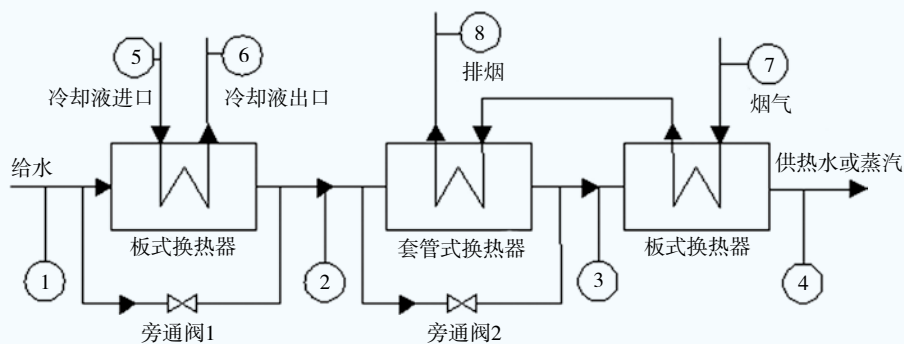


图3 余热回收流程图（1~8为温度测点）

5.2 余热回收情况

实验测试了发电机带动负载数分别为1-12组时的余热回收情况,见表6。其中发电功率最大为10.15kW,维持发动机转速在3 000±50r的范围内,并保持稳定。

可见:烟气温度从500℃以上降到110℃左右,余热回收系统基本达到了设计要求,同时也避免了烟气中水蒸气的冷凝,烟气套管出口处的水温90℃±0.5℃,

可满足热水型溴化锂吸收式制冷机组工作需求。

通过测试天然气流量、烟气中氧含量,计算得到对应负载个数下的发电量、热回收效率,如表7所示。显然,随着负载个数的增加,输入总能量增加,余热回收量和发电功率也增加,发电效率也呈递增的趋势,在12组负载时,发电效率达25%;余热回收效率则呈减少趋势,总效率基本上维持在80%左右,在

表6 高负载0~12组时余热回收系统温度及流量数据

负载 个数	热水回路测点温度(℃)				流量	烟气测点温度(℃)			天然气	α
	进冷系	出冷系	出烟板	出套管	t/h	出气缸	中间	排烟	Nm ³ /h	
0	85.4	87.3	88.0	89.4	3.11	567	247	112	1.80	1.06
1	85.2	87.3	88.1	89.5	3.10	571	259	113	2.13	1.06
2	84.9	87.0	87.9	89.4	3.11	578	274	114	2.32	1.07
3	85.0	87.2	88.1	89.7	3.11	578	278	112	2.51	1.08
4	85.0	87.2	88.3	89.9	3.12	578	291	112	2.73	1.10
5	84.9	87.3	88.4	90.1	3.11	576	298	111	2.89	1.12
6	84.2	86.6	87.8	89.6	3.11	571	303	111	3.09	1.15
7	84.5	86.9	88.2	90.1	3.08	560	305	108	3.31	1.20
8	84.3	86.7	88.1	90.1	3.11	557	318	111	3.45	1.28
9	84.2	86.5	88.1	90.1	3.11	548	327	109	3.62	1.37
10	83.9	86.2	87.9	90.0	3.12	539	336	111	3.84	1.48
11	84.0	86.3	88.1	90.3	3.11	529	345	114	4.08	1.51
12	84.3	86.7	88.5	90.8	3.11	521	348	115	4.23	—

表7 实验数据汇总

负载数	燃气流量 Nm/h	烟气中氧含量 %	过剩空气 系数	总输入能量 kW	发电功率 kW	余热回收量 kW	发电效率 %	热回收效率 %	总效率 %
1	2.15	1.4	1.06	20.84	0.86	15.35	4.15	73.65	77.79
2	2.34	1.6	1.07	22.69	1.73	16.33	7.62	71.99	79.6
3	2.54	1.8	1.08	24.62	2.59	17.02	10.53	69.12	79.65
4	2.76	2.06	1.10	26.76	3.46	18.11	12.92	67.68	80.6
5	2.92	2.52	1.12	28.31	4.32	18.79	15.26	66.38	81.64
6	3.12	2.97	1.15	30.25	5.18	19.56	17.14	64.67	81.81
7	3.35	3.9	1.20	32.48	6.05	20.06	18.62	61.77	80.39
8	3.49	5.02	1.28	33.83	6.91	20.83	20.43	61.57	82
9	3.66	6.15	1.37	35.48	7.78	21.3	21.92	60.03	81.95
10	3.88	7.27	1.48	37.61	8.64	22.06	22.97	58.65	81.62
11	4.12	7.57	1.51	39.94	9.5	22.89	23.8	57.31	81.1
12	4.27	8.24	1.54	41.4	10.37	23.37	25.05	56.46	81.5

8组负载时,总效率达到最大82%。

5.3 溴冷机热力分析

受试验环境的制约,溴冷机未进行长时间的稳定运行测试,而着重于测试溴冷机启动时的非稳定过程对整个CCHP系统平衡的影响。根据溴冷机各测点温度的变化情况,将其开机启动直至冷媒水出口温度达到名义工况之间的过程分为3个阶段,依次为启动阶段、预热阶段和准平衡阶段。实验测试环境见表8:

表8 溴冷机测试环境参数

燃气 耗量 Nm ³ /h	输入 功率 kW	发电 电压 V	发电 功率 kW	流量 (t/h)			环境 温度 ℃
				热水	冷却水	冷媒水	
3.138	30.33	221.5	5.98	3.13	6.05	1.99	30.3

5.3.1 溴冷机启动阶段

当余热回收系统出口温度,即烟气板换出口水温达到90℃时,切换三通阀,热水通入溴冷机的发生

器。因溴冷机内部溴化锂溶液的初始温度低,需吸热一部分热源热量提高其溶液温度,才能正常运行制冷工况。所以在切换三通阀后,余热回收热水的温度在一段时间内下降,同时溴化锂溶液温度不断升高,这段过程称之为“启动阶段”。热水温度的实测变化情况见图4。

因溴冷机内的溴化锂溶液的升温,启动阶段对整个CCHP系统的温度水平有较大的影响,耗热量在前期急剧增加,超过了系统的余热回收量,热水温度迅速下降,在测试过程中降幅接近10℃。这些设计之外的耗热量使系统的温度水平降低,并影响了溴冷机的运行效率。

5.3.2 溴冷机预热阶段

当溴冷机耗热量降低至余热回收量以下,直至冷媒水进口温度降低到溴冷机名义工况15℃的这段时间,称其为溴冷机的预热阶段。在此阶段,溴冷机各个部件内部的传热、传质过程趋于稳定,温度、压力逐渐达到正常工作时的水平,如图5所示。

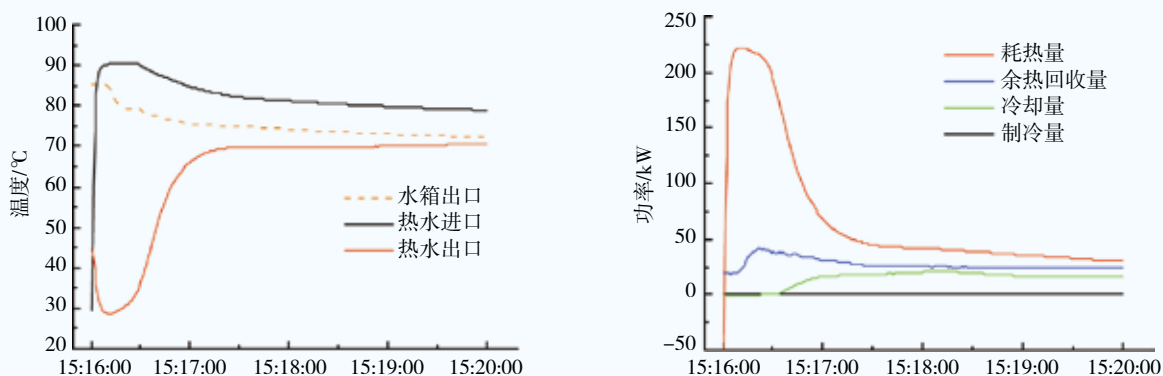


图4 启动阶段热水温度变化曲线(左)及功率变化曲线(右)

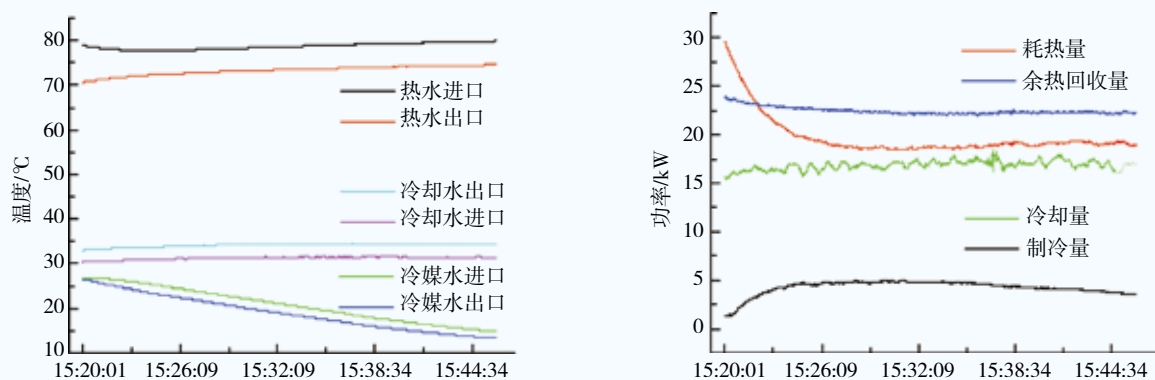


图5 预热阶段温度变化曲线(左)及功率变化曲线(右)

5.3.3 溴冷机准平衡阶段

当溴冷机冷冻水入口温度降低到15℃后,调节冷却水缓冲水箱中缓冲水的流量,利用温度较高的缓冲水来中和冷冻水的冷量,使冷冻水入口温度保持在15℃。此时冷却水进、出口温度及冷冻水进、出口温度均保持稳定,而热水侧温度继续缓慢上升,直到其进口温度上升至溴冷机名义工况90℃,这一阶段称之为“准平衡阶段”。各测点温度及功率变化曲线见图6。

可见在此阶段制冷量与冷却量与溴冷机名义工况相差甚远,原因之一是热水侧温度水平偏低,之二是冷却塔冷却能力不足,因此使得热力系数较低,制冷量不到名义工况下的一半。

5.3.4 水箱水量优化

要使溴冷机运行在名义工况下,热水进口温度达到90℃,需将水箱中热水的温度从75℃加热到85℃。热水回路的净得热功率 $\Delta Q = Q_k - Q_i - Q_x = 1.38\text{kW}$,需要约106min。而在此时间内,溴冷机运行在部分负荷状态,且负荷调节范围有限。为了使溴冷机尽快达到名义工况,提高整个系统的一次能源利用率,可通过调整水箱水量,并提高热水回路初始温度水平来减少溴冷机达到热平衡的时间。

设水箱中水量为 $M\text{ kg}$,初始温度 $t_0 = 20^\circ\text{C}$,余热回收侧加热功率为 $Q_k = 23\text{kW}$,经过时间 τ_1 后,温度升至 t_1 。然后启动溴冷机,设启动阶段耗热量 E_f 为溴化锂溶液从20℃上升至80℃的吸收热量, $E_f = 9\,576\text{kJ}$,使热水温度由 t_1 降至 t_2 。之后取其在准平衡阶段的加热量 $\Delta Q = 1.4\text{kW}$,经过时间 τ_2 后,水箱温度上升至84℃,取余热回收热水回路温升 $\Delta t = 6^\circ\text{C}$,此时余热回收系统出口温度为90℃。整个过程可列出以下方程组:

$$\begin{cases} cM(t_1 - t_0) = Q_k g \tau_1 \\ cM(t_1 - t_2) = E_f \\ cM(84 - t_2) = \Delta Q g \tau_2 \end{cases}$$

可得总时间 $\tau = \tau_1 + \tau_2 = 6\,840 + 254.4m - 2.804mt_1(\text{s})$ 。

因 $t_2 < 84$,则有 $t_1 < 89.7$,故取 $200 < M < 400$, $80 < t_1 < 89.7$,利用Matlab得到时间 τ 与水量 M 和最终温度 t_1 的关系,如图7所示。最终温度越高,水箱水量越少时,系统达到热平衡的总时间越少。当水箱水量为200kg,最终温度升高至90℃时,从开机启动到溴冷机达到热平衡共需约7 500s,即2h左右。但应注意水箱最终温度过高会增加余热回收系统沸腾的危险性,同时水箱水量越少,余热回收系统的稳定性也越差。

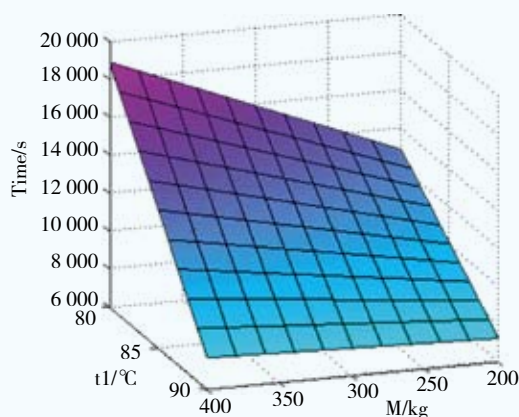


图7 系统平衡总时间与水箱水量及最终温度的关系

5.4 发电特性分析

在发电机输出端连接数显电测表,对发电电压和频率进行测量,选取机组效率最高即9组负载时的数据进行分析,其电压和频率的波动情况如图8所示。其电压波动率在1%以内,频率波动范围在 $\pm 0.5\text{Hz}$ 内,符

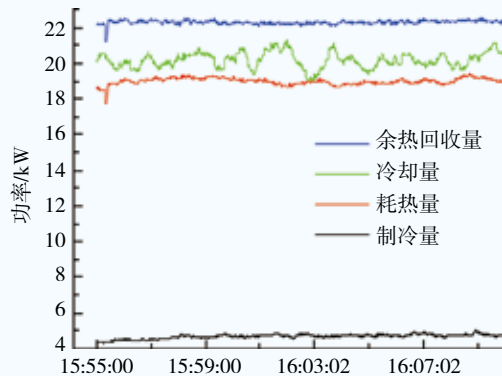
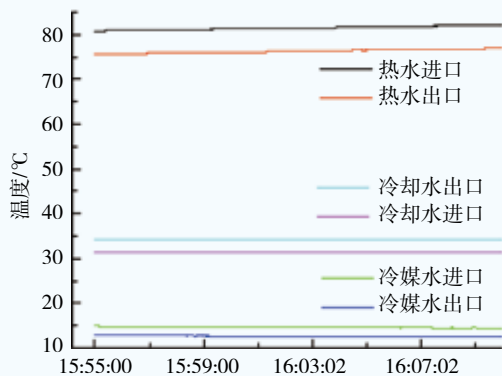


图6 准平衡阶段温度变化曲线(左)及功率变化曲线(右)

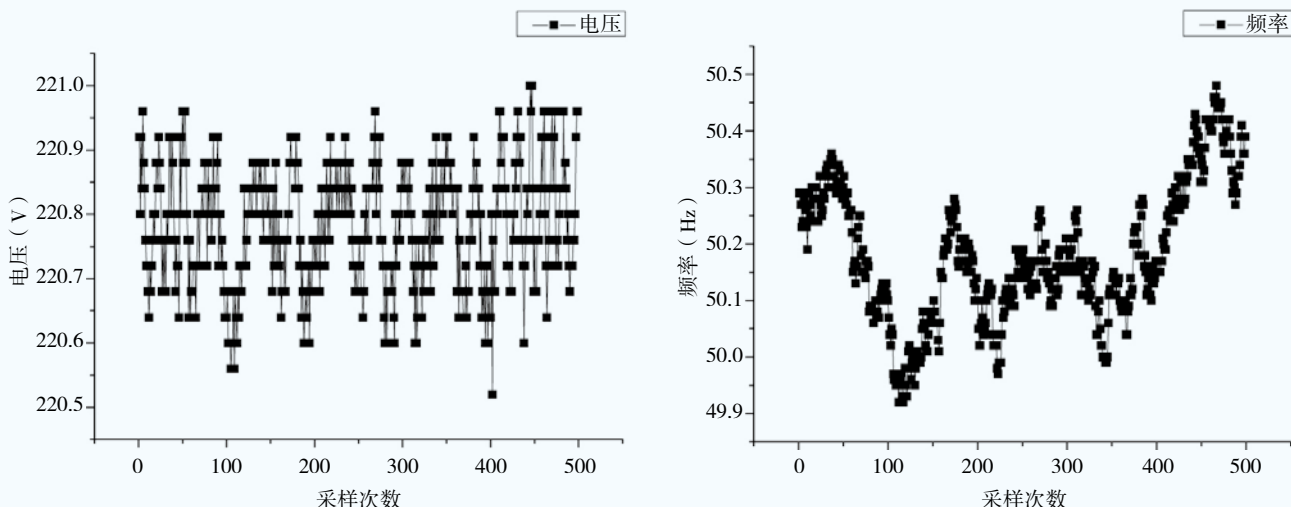


图8 稳态时电压波动情况（左）及稳态时频率波动情况

合国家电力信息网公布供电质量标准。

在本试验测试过程中，发电电压的波动都在允许的偏差范围之内，但发电频率的波动较大、恢复时间较长，发电频率的品质主要受内燃机转速稳定性的影响。因此，提高发动机转速稳定性和负载改变时的响应速度是提升发电品质的有效方法，增加步进电机调节节气门开度的精度是提高发动机转速稳定性的主要方法，提高发动机的响应速度则可以通过缩短负载变化的感应时间、加快节气门调节速度或减少过调量实现。

6 结论

（1）随着负载增加，发电效率增大，热回收率相对减少，而CCHP的总效率变化不大，最大值可达82%，如果选用新型高效机组，其综合效率将会有进一步提升的空间。

（2）根据溴冷机各测点温度的变化情况，将其开机启动直至冷媒水出口温度达到名义工况之间的过程分为3个阶段，依次为启动阶段、预热阶段和准平衡阶段。

（3）提高发动机转速稳定性和负载改变时发动机的响应速度是提升发电品质的有效方法。

（4）天然气用于CCHP是合理使用天然气的有效方式，采用国产内燃机改装和配制相应设备进行小型冷热电联产机组的开发具有可行性。

参考文献

- 1 BP. 2011年BP世界能源统计年鉴[R]. 2011
- 2 田长栓, 马艳霞. 我国城市燃气的现状和发展趋势[C]. 中国土木工程学会燃气分会应用专业委员会2007年年会论文集, 张家界: 中国土木工程学会, 2007: 9-10
- 3 同济大学. 燃气燃烧与应用[M]. 第四版, 北京: 中国建筑工业出版社, 2011
- 4 付林, 李辉. 天然气热电冷联供技术及应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008
- 5 王振铭. 我国热电联产发展状况分析[J]. 热电技术, 2011; 2: 1-5
- 6 Kimber, Adele. Pushing the CHP cause[J]. European Chemical News, 1997; 68 (17): 612-620
- 7 Sharpe, Lorna. Swap Your Boiler for a power Station[J]. IEE Review, 2003; 49 (8): 458-464
- 8 高峰, 秦朝葵. 小型天然气发动机热电联产装置的开发与可行性[J]. 柴油机, 2006; (1): 44-47

欢迎使用《城市燃气》投稿系统

简单方便

在“燃气在线” (www.gas800.com) 网站首页, 点击《城市燃气》在线投稿图标即可。

专为作者设计的“稿件查询”系统, 让作者可以随时查询到所投稿件的审核状态。

投稿系统网址: www.gas800.com