文章编号:0253-4339(XXXX)XX-0001-08
doi:10.12465/issn.0253-4339.20260904003多分区吸收式机组的运行性能实测与调节特性分析

多分区吸收式机组的运行性能实测与调节特性分析

段颢俊　谢晓云

(清华大学建筑节能研究中心　北京　100084)

摘　要　多分区吸收式机组可在1台机组内集成多个独立二次网回路,在保持吸收式换热大温差优势的同时实现分区供热,但该型机组目前缺乏实际运行数据支撑。本文针对山西省某市2台双分区吸收式机组开展采暖季实测,连续监测机组各节点温度并进行流量测试。结果表明:在一网供水温度低于设计值的变工况下,2台机组均能将一网水深度冷却至20~25 ℃,二网供水稳定在35~42 ℃,整体效能系数分别为1.33和1.36,性能系数(COP)维持在0.6~0.8,达到普通双级吸收式换热器水平,运行效果良好。热平衡校验显示,B小区一二次侧换热量不平衡率为13.12%,满足±15%的可靠性要求;A小区不平衡率达23.84%,略超阈值,其数据仅供参考,后续分析以运行稳定的B小区为主。分区调节方面,高、低区二网在回水温度差异明显的条件下供水始终接近,两区换热量可按实际需求独立分配,表明机组具备良好的分区独立调节能力。

关键词　吸收式换热器;多分区供热;实测研究;运行性能;调节特性
中图分类号:　　**文献标识码:**

Field Measurement of Operating Performance and Analysis of Regulation Characteristics of a Multi-Zone Absorption Heat Exchanger Unit

Duan Haojun　Xie Xiaoyun

(Building Energy Research Center, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract

Objective　Multi-zone absorption heat exchanger (AHE) units integrate multiple AHE modules sharing a primary water circuit while serving independent secondary heating zones, thereby combining large-temperature-difference heat transfer with zone-specific heating. However, field operating data and an understanding of zone regulation characteristics remain scarce. This study aims to experimentally investigate the operational performance and independent zone regulation capability of dual-zone AHE units in actual district heating projects.

Methods　Field tests were conducted on two dual-zone AHE units serving two residential districts (Community A and Community B) in a city in Shanxi Province, China, during the 2025–2026 heating season. Both units use lithium bromide-water ($LiBr-H_2O$) solution as the working pair, with design primary network temperatures of 105/20 ℃ and secondary network temperatures of 47/37 ℃. The rated heating capacities are 16 200 kW for Community A (model AHE162) and 10 800 kW for Community B (model AHE108). Temperatures at 18 measurement points covering the inlets and outlets of all generators, condensers, evaporators, absorbers, and plate heat exchangers (PHEs) were continuously recorded at 5-min intervals using temperature loggers with an accuracy of ±0.2 ℃ from January 23 to April 1, 2026. Two flow measurement campaigns were performed using clamp-on ultrasonic flow meters with an accuracy of ±0.5%. The coefficient of performance (COP) of each absorption stage and the overall unit effectiveness were evaluated, and a heat balance check was conducted. A temperature-heat flow (T-Q) diagram was constructed for the Community B unit, and the zone regulation characteristics in terms of temperature and load independence were analyzed.

Results and Discussions　Throughout the test period, the primary supply temperature ranged from 55 to 95 ℃, substantially below the design value of 105 ℃. Nevertheless, both units achieved deep cooling of primary water to 20–25 ℃, while secondary supply

收稿日期:XXXX-XX-XX;修回日期:XXXX-XX-XX;录用日期:XXXX-XX-XX　　责任编辑:
基金项目:国家重点研发计划项目(2024YFC3810000)资助项目。(The project was supported by the National Key R&D Program of China(No. 2024YFC3810000).)

移动阅读

temperatures remained stable at 35–42 ℃, satisfying space heating demands. The overall effectiveness values were 1.33 for Community A and 1.36 for Community B, and the COP ranged from 0.6 to 0.8, comparable to reported values for conventional dual-stage AHEs (effectiveness of 1.2–1.43). The heat balance discrepancy was 13.12% for Community B, within the ±15% acceptance threshold, and 23.84% for Community A, which was attributed to large primary water temperature fluctuations during testing. For Community B, the low-zone COP (0.79) was notably higher than the high-zone COP (0.62). This was explained by the smaller log mean temperature difference (LMTD) of the low-zone solution heat exchanger (2.89 K versus 4.77 K), indicating more effective internal heat recovery that brought the dilute solution closer to saturation before entering the generator. The T-Q diagram revealed nearly parallel temperature profiles and small vertical gaps between hot and cold streams in the generator and absorber, indicating uniform heat transfer temperature differences, good thermal matching, and low entransy dissipation. Regarding zone regulation, the mean temperature difference between the high- and low-zone secondary returns was 2.01 ℃, whereas that between the secondary supplies was only 0.36 ℃, demonstrating that the two zones maintained nearly identical supply temperatures despite different return conditions. The zone heat loads could be independently adjusted: at Community A the high- and low-zone heat duties were similar (598 kW versus 589 kW), while at Community B they differed substantially (508 kW versus 852 kW, approximately 68% higher in the low zone), with the low-zone PHE carrying proportionally more primary flow (16.18 t/h versus 5.98 t/h), confirming adaptive load allocation between zones.

Conclusions The dual-zone AHE units maintained high effectiveness and COP under off-design conditions with primary supply temperatures well below the design value, achieving deep primary cooling comparable to conventional single-zone AHEs while simultaneously satisfying the heating demands of two independent zones. The two zones exhibited independent temperature and load regulation, confirming the feasibility and operational flexibility of multi-zone AHE technology for high-rise building district heating.

Keywords absorption heat exchanger; multi-zone heating; field test; operational performance; regulation characteristics

集中供热是我国北方城镇冬季供暖的主要方式。传统热力站采用板式换热器换热,受传热端差限制,一次网回水温度必须高于二次网供水温度,供回水温差难以扩大,管网输送能力受限,也不利于低品位余热回收[1]。随着供热面积持续增长,如何在不改变管网管径的前提下增大一次网温差、提升供热能力,成为亟待解决的关键问题。

为突破传统换热过程的端差限制,付林等[1]于2008年提出了基于吸收式换热(Co-ah循环)的热电联产集中供热方法,在热力站采用吸收式换热器替代常规板式换热器,利用溴化锂溶液的吸收-发生循环实现热量的温度对口梯级利用,从而将一次网回水温度降低至二次网进水温度以下;Li Yan等[2]进一步阐述了该技术的系统流程与节能机理,指出吸收式换热可将一次网回水温度降至约25 ℃,显著增大管网供回水温差,并为热电厂回收汽轮机凝汽器余热创造条件;Xie Xiaoyun等[3]从热力学角度证明,该技术在不消耗额外高品位能量的前提下即可实现一次网回水深度冷却。N. Mirl等[4]将氨-水吸收式热泵集成于区域供热热力站,以一次网供水驱动发生器,在蒸发器中冷却一次网回水,从理论上揭示了该方案降低回水温度、提升管网供热能力的可行运行区间。此后,吸收式换热技术在太原、赤峰等地得到广泛工程应用[5-7]。

在结构优化方面,研究者围绕降低机组内部传热损失开展了大量研究。针对单级吸收式换热器内部的"三角形"传热不匹配问题,王升等[8]提出多级立式大温差吸收式变温器,将一次网回水温度从26 ℃降至20 ℃以下;Zhu Chaoyi等[9]开发了多段立式原型机,现场测试表明回水温度可稳定低于30 ℃,较二次网进水温度低10~15 K;Yi Yuhao等[10]提出双级立式流程,以两级不同压力的吸收式热泵串联改善温度匹配,实测表明,机组在5%~98%负荷率内稳定高效运行,温度效率为1.2~1.43[5];张承虎等[11]分析串联补燃型机组的最大供热能力,指出串联结构可将回水温度降至22 ℃,管网输送能力达到传统板式换热器的1.76倍。国外学者也进行了实验探索,W. Rivera等[12]研制了水-溴化锂双吸收式热变换器,经分级吸收实现48~74 ℃的总温升,运行稳定、重复性好。运行调节方面,Wang Xiaoyin等[13]用熵分析研究了二次网流量的最优分配规律;Yi Yuhao等[14]进一步优化了溶液流量与传热面积分配。变工况与部分负荷方面,A. Chorak等[15]实验评估了双效溴化锂机组在名义与变工况下的性能及各参数影响;C. W. Park等[16]基于210 RT机组部分负荷实验,指出其性能对冷却水进水温度的敏感性高于流量。

上述研究均针对单一二次网回路。实际工程中高层建筑常按高度分为多个独立分区,各分区静压等级和负荷需求差异显著[17],传统方案需为每个分区单独配置换热设备,存在设备数量多、占地面积大等问题。若在1台机组内集成多个独立二次网回路,使一次网水串联流经各吸收式换热器,各分区二次

网水独立升温，便可在保持大温差优势的同时实现多分区供热。Yi Yuhao等[18]提出可灵活调节的分区流程，并进一步设计3分区立式机组，实测各分区进水温度相对标准偏差小于5%[19-20]。

但多分区机组尚处于工程应用起步阶段，公开运行数据与调节特性分析较为缺乏：各分区共享一次网水路，1个分区的负荷变化可能影响其他分区，耦合规律尚不明确，且现有研究多基于模拟，缺乏不同负荷下的实测验证。为此，本文对2台实际运行的双分区机组开展供暖季温度监测与流量测试，考察其运行效果与大温差换热性能，重点分析分区独立调节特性，为工程应用提供参考。

1 多分区吸收式机组工作原理

1.1 吸收式换热器的基本原理

吸收式换热器以溴化锂-水溶液为工质对，由第一类吸收式热泵与板式换热器组合而成，可将一次网回水温度降至二次网进水温度以下[1]。机组内部包含发生器、冷凝器、蒸发器、吸收器4个主要部件：一次网高温水进入发生器加热稀溶液产生冷剂蒸汽；冷剂蒸汽在冷凝器中凝结放热加热二次网水；冷剂水节流后在蒸发器中蒸发吸热，进一步冷却一次网水；蒸汽在吸收器中被浓溶液吸收，吸收热再次加热二次网水，溶液经溶液换热器回到发生器完成循环。由此，一次网热量在发生器和蒸发器中被分级利用，二次网水在冷凝器和吸收器中被逐级加热。

1.2 多分区机组的系统构成与双分区工艺流程

多分区吸收式机组将多台吸收式换热器模块集成于1台机组中，各模块共享一次网水路但拥有独立的二次网回路，通过“一次网串-并-串联、二次网多回路独立”的方式，在保持大温差换热优势的同时实现多分区独立供热。

双分区机组系统如图1所示（红色为一次网水，黑色为1分区二次网水，蓝色为2分区二次网水），系统包含2台吸收式换热器模块，每台由发生器（G1/G2）、冷凝器（C1/C2）、蒸发器（E1/E2）、吸收器（A1/A2）及板式换热器（PHE1/PHE2）组成，一次网水沿水流方向形成逐级降低的压力梯度。

一次网水进入机组后先串联通过G1、G2驱动两级发生、温度逐级降低，再分2路并联通过PHE1、PHE2与各分区二次网水显热交换，汇合后反向串联通过E2、E1被两级蒸发深度冷却。发生器正串、蒸发器反串的布置使各级压力与水温匹配，降低了内部传热损失。

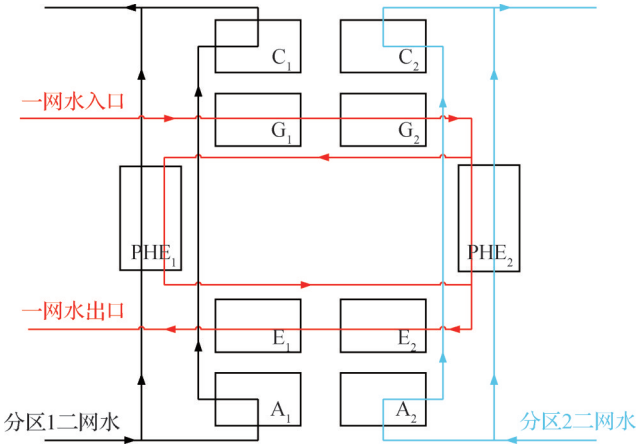


图1 双分区吸收式机组系统

Fig.1 Schematic of the dual-zone absorption heat exchanger unit system

二次网侧设2套独立回路。以分区1为例，回水分2股：一股依次流经A1、C1，被吸收热和冷凝潜热加热，另一股经PHE1与一次网水显热交换，2股混合后送出，分区2同理。2套回路互不连通，流量和供水温度可独立控制；各分区另设旁通管路，由旁通阀调节进入换热主路的水量，从而独立调节供热量和供水温度。

1.3 多分区吸收式机组的技术意义

多分区吸收式机组的技术意义体现在3方面：节能上，其继承吸收式换热大温差优势，可将一次网回水温度降至二次网进水温度以下，提升管网输送能力并为低品位余热回收创造条件；供热上，1台机组集成多个独立二次网回路，替代传统分区站多台设备并联的配置，减少设备数量与机房占地，降低初投资和维护成本；调节上，各分区回路独立并配合旁通调节，可灵活控制流量、供水温度和供热量，解决高层建筑分区供热的水力失调与静压差异问题，且负荷波动时具有自调节能力，可减少人工干预。该机组拓展了吸收式换热技术的应用场景，有助于推动集中供热系统高效低碳运行。

2 测试方案与分析方法

2.1 工程概况

实测依托山西省某市2处采用双分区吸收式机组的住宅小区供热工程（A小区和B小区）。2个小区均为高层住宅，按建筑高度分为低区、高区2个独立分区，低区供热面积和设计流量均大于高区；机组替代传统分区换热设备，1台同时满足2个分区的独立供热需求。2台机组分别于2024年10、11月投入运行，测试在2025—2026年采暖季进行。

2.2 双分区吸收式机组参数

2个小区均采用常规型双系统吸收式换热机组，型号分别为AHE162（A小区）和AHE108（B小区），工质对为溴化锂-水溶液，主要设计参数如表1所示，机组实物如图2所示。

表1 两台双分区吸收式机组的主要设计参数

Tab.1 Main design parameters of the two dual-zone absorption heat exchanger units

参数	A小区	B小区
机组型号	AHE162	AHE108
额定换热量/kW	16 200	10 800
一次网设计供、回水温度/℃	105、20	105、20
二次网设计供、回水温度/℃	47、37	47、37
一次水流量/(t/h)	160	107
二次水流量(低区、高区)/(t/h)	722、670	567、361
一次水承压/MPa	2.5	2.5
二次水承压/MPa	1.6	1.6
制造年月	2024年11月	2024年10月
运转质量/kg	58 000	43 200
电源功率/kW	9.0	7.8

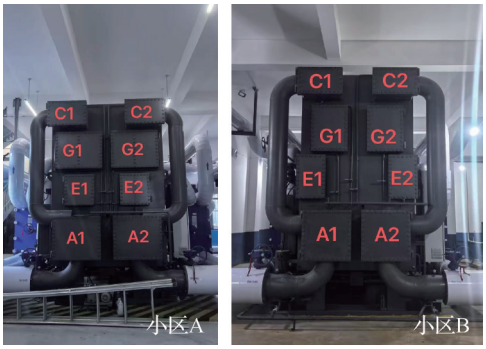


图2 被测试机组实物

Fig.2 Photograph of the test unit

由表1可知，2台机组一次网设计供、回水温度均为105、20 ℃，二次网设计供、回水温度均为47、37 ℃；A小区额定换热量为16 200 kW，B小区为10 800 kW；二次水流量均为低区大于高区，A小区低、高区分别为722、670 t/h，B小区低、高区分别为567、361 t/h。

2.3 测试方案

为考察机组在实际采暖季的运行性能与调节特性，对2台机组进行长期温度监测和短期流量测试。采用温度自记仪连续记录各主要节点温度，测温精度±0.2 ℃，记录间隔5 min，监测时段为2026年1月23日20:00至4月1日23:55，覆盖严寒期末段与末寒期；采用外夹式超声波流量计测量一次网总供水流量及低、高区二次网循环流量，流量精度±0.5%。采暖季内共开展2次流量监测，选取不同负荷水平下的典型日开展测试，流量测试与温度记录同步进行。

2.3.1 测点布置

双分区吸收式机组测点布置如图3所示。为掌握一次网水逐级降温与二次网水分区升温过程，在每台发生器、冷凝器、蒸发器、吸收器和板式换热器的进出口均布置温度测点（T_1～T_{18}）；流量测点4个，分别位于一次网2分管和2个分区二次网回水总管（G_1～G_4）。

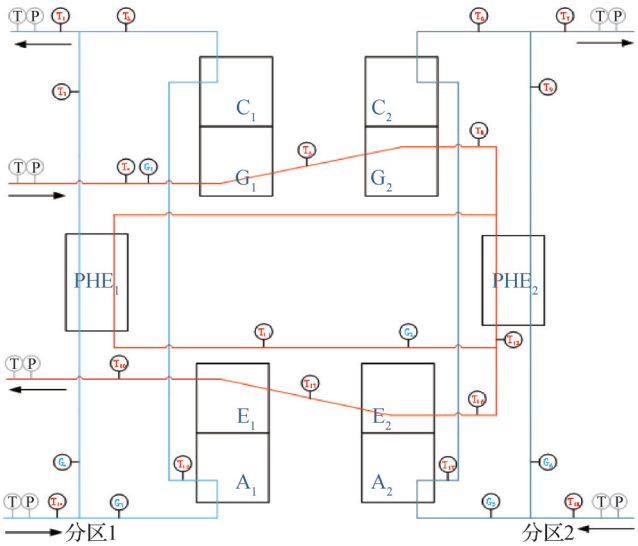


图3 双分区吸收式机组测点布置

Fig.3 Layout of measurement points on the dual-zone absorption heat exchanger unit

2.3.2 数据处理方法

基于上述监测数据，首先通过热平衡校验验证数据可靠性，再采用COP（性能系数，coefficient of performance）和吸收式换热器效能系数评价机组运行性能。

机组总换热量可分别由一次网侧和二次网侧分别进行计算：

$$Q_{\mathrm{pri}} = c_p m_{\mathrm{pri}} (T_{\mathrm{pri,in}} - T_{\mathrm{pri,out}}) \tag{1}$$

$$Q_{\mathrm{sec}} = \sum_i c_p m_{\mathrm{sec},i} (T_{\mathrm{sec,out},i} - T_{\mathrm{sec,in},i}) \tag{2}$$

式中：c_p为水的比定压热容，取4.18 kJ/(kg·K)；m为质量流量，kg/s；$T_{\mathrm{pri,in}}$、$T_{\mathrm{pri,out}}$分别为一次网供、回水温度，℃；$T_{\mathrm{sec,in},i}$、$T_{\mathrm{sec,out},i}$分别为第i分区二次网供、回水温度，℃。

理论上一次网侧放热量与二次网侧吸热量相等，两者的相对偏差可用于检验测试数据的热平衡，偏差在±15%以内即认为数据可靠，不平衡率δ由一

二次侧换热量进行计算:

$$\delta = \frac{|Q_{\mathrm{pri}} - Q_{\mathrm{sec}}|}{Q_{\mathrm{pri}}} \times 100\% \tag{3}$$

式中:δ为测试数据的不平衡率;Q_{pri}为一次网侧的换热量,单位kW;Q_{sec}为二次网侧的换热量,单位kW。

对于第i级吸收式热泵,其性能系数COP_i定义为一次网水在该级蒸发器中的温降与在该级发生器中的温降之比:

$$\mathrm{COP}_i = \frac{Q_{\mathrm{e},i}}{Q_{\mathrm{g},i}} = \frac{T_{\mathrm{E,in},i} - T_{\mathrm{E,out},i}}{T_{\mathrm{G,in},i} - T_{\mathrm{G,out},i}} \tag{4}$$

式中:$T_{\mathrm{E,in},i}$、$T_{\mathrm{E,out},i}$分别为一次网水进、出第i级蒸发器的温度,单位℃;$T_{\mathrm{G,in},i}$、$T_{\mathrm{G,out},i}$分别为一次网水进、出第i级发生器的温度,单位℃。

由于同一级内一次网水流量相同,温降之比即等于蒸发器吸热量与发生器加热量之比。COP_i越大,表明该级吸收式热泵对发生器热量的利用效率越高。

对于整体多分区机组,其吸收式换热器效能系数ε定义为一次网水在该机组的总温降与一网水入口水温与二网入口水温的加权平均数之差的比值:

$$\bar{T}_{\mathrm{sec,in}} = \frac{\sum_i m_{\mathrm{sec},i} T_{\mathrm{sec,in},i}}{\sum_i m_{\mathrm{sec},i}} \tag{5}$$

$$\varepsilon = \frac{T_{\mathrm{pri,in}} - T_{\mathrm{pri,out}}}{T_{\mathrm{pri,in}} - \bar{T}_{\mathrm{sec,in}}} \tag{6}$$

大温差换热效果越好。

式中:$\bar{T}_{\mathrm{sec,in}}$为二网水入口水温的加权平均数;$m_{\mathrm{sec},i}$为第$i$分区二网水流量,℃;$T_{\mathrm{sec,in},i}$为第$i$分区二网水入口水温,℃。

反映了该多分区机组对一次网水的冷却深度,ε越大表明一次网回水温度越低、大温差换热效果越好。

3 实测机组运行效益分析

3.1 机组运行整体概况

图4所示为2台机组测试期间一、二次网供回水温度的变化。虽然一网供水温度均未达设计值105 ℃(B小区主要为55~80 ℃、A小区主要为60~95 ℃),但2台机组均能将一网水冷却至20~25 ℃,二网供水稳定在35~42 ℃,满足供暖需求,表明机组在变工况下仍能实现一网水深度冷却和双分区独立供热。

3.2 COP与吸收式换热器效能系数分析

图5、图6所示为2台机组高、低区COP及整体效能系数的日均值变化。由图5、图6可知,A小区高、低区COP均值分别为0.77、0.69,效能均值为1.33;B小区高、低区COP均值分别为0.62、0.79,效能均值为1.36。效能越高,一网回水温度越低,管网输热量越多,也越有利于低品位余热回收;COP越高,表明发生器热量越多地用于冷剂发生而非溶液升温,循环热力完善度越好。2台机组效能均大于1.3,COP维持在0.6~0.8,整体运行良好。

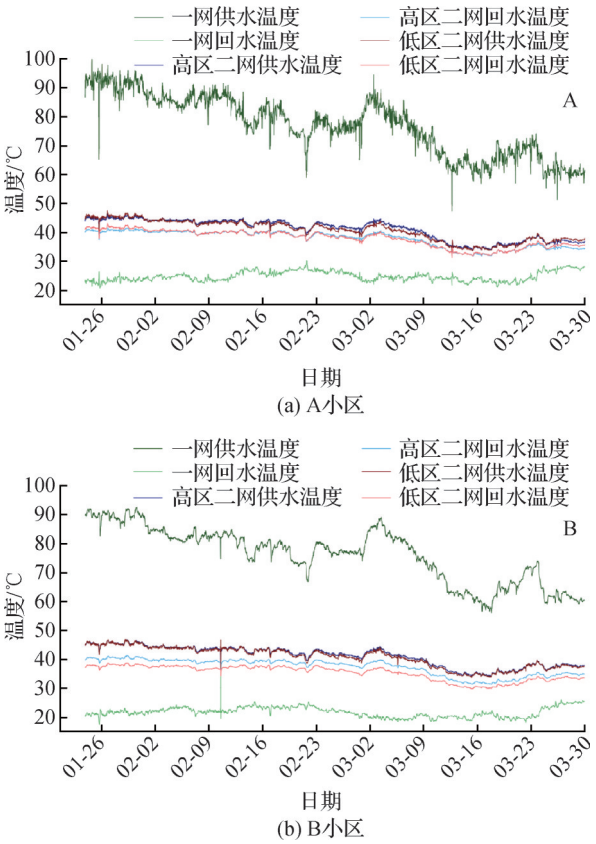


图4 A小区和B小区一网及二网供回水温度变化

Fig.4 Variations of supply and return temperatures in the primary and secondary networks at community A and community B

现有双级大温差吸收式换热器效能系数为1.20~1.43[5,10],一次网回水温度可低于二次网进水10~25 K[5-6];多级立式机组回水温度可稳定低于30 ℃[8-9]。本文2台机组效能系数为1.30~1.40,一次网回水温度较二次网回水低约10~15 K,达到普通双级机组水平,说明增加分区供热功能并未降低机组性能。

B小区低区COP显著高于高区,原因在于两级溶液换热器热回收效果存在差异。溶液换热器利用发生器流出的高温浓溶液预热返回发生器的稀溶液,其对数平均温差(log mean temperature difference,LMTD)越小,浓、稀溶液换热越充分,稀溶液进入发生器时越接近饱和状态,用于溶液升温的显热越少、

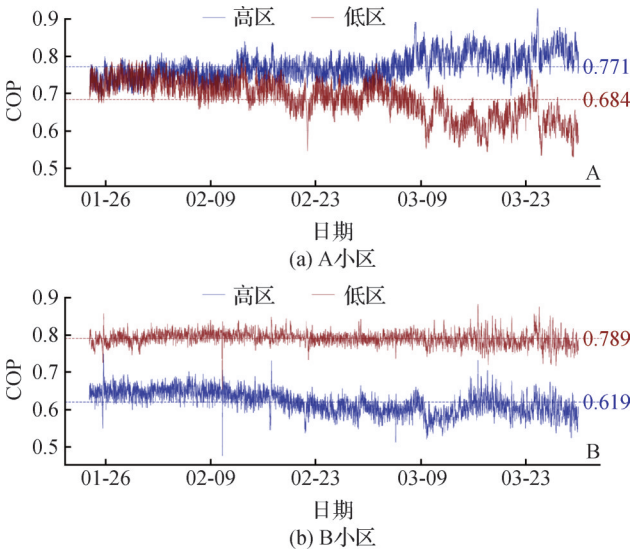


图5 A小区和B小区高、低区吸收机COP变化

Fig.5 COP variations of the absorption machines in the high and low zones at community A and community B

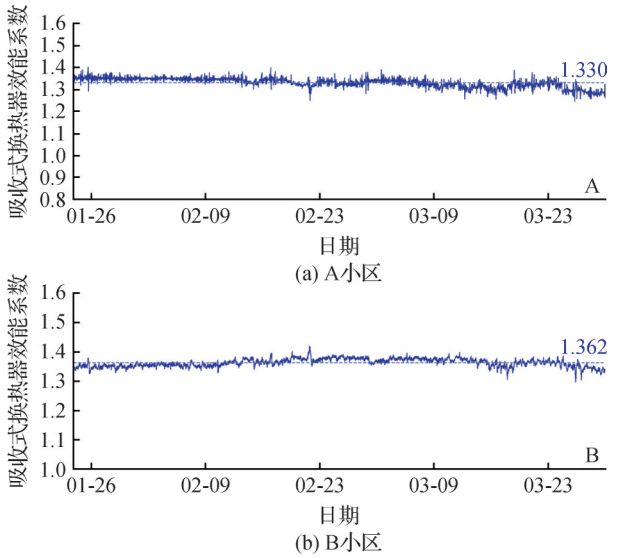


图6 A小区和B小区机组整体吸收式换热器效能系数变化

Fig.6 Variation of the overall effectiveness of the unit at community A and community B

用于冷剂发生的热量越多，COP越高。

图7所示为B小区高、低区溶液板换对数平均温差的变化。由图7可知，高区LMTD在全测试时段均高于低区，二者均值分别为4.77、2.89 K；因此，低区溶液板换热回收更充分、COP更高。A小区高、低区COP在测试初期接近（约0.75），末寒期则呈高区升高、低区降低的相反趋势，推测是机组调整了高、低区溶液流量（高区增大、低区减小）所致。

3.3 热平衡校验

采暖季中期采用超声波流量计实测2台机组的一、二次网流量，据此计算换热量及热平衡偏差以验

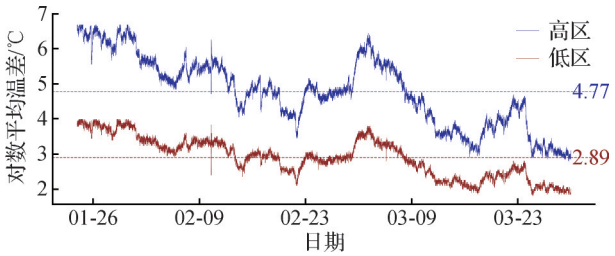


图7 B小区高、低区溶液板换对数平均温差的变化

Fig.7 LMTD variations of the solution plate heat exchangers in the high and low zones at community B

证数据可靠性。B小区工况下，一网总流量为22.16 t/h，一网水由71.9 ℃冷却至18.8 ℃，高、低区二网流量分别为106.3、138.2 t/h，一、二次侧换热量不平衡率为13.12%，满足±15%要求，数据可靠。A小区工况下，一网总流量为23.70 t/h，一网水由67.9 ℃冷却至24.4 ℃，高、低区二网流量分别为135.6、149.7 t/h，不平衡率为23.84%，略超±15%允许范围；该工况下一网水温波动较大，且测试时段恰处高、低区COP变化期，流量测量误差可能偏大，故其数据仅供参考，后续分析以运行稳定、数据可靠的B小区机组为重点。

3.4 *T*–*Q*图分析

图8所示为B小区机组流量测试工况（末寒期）下的*T*–*Q*图。横坐标为累计换热量，纵坐标为温度，红、蓝线段分别表示一网水和二网水，紫、黄线段分别表示发生器和吸收器中的溶液。该图仅代表末寒期特定工况，不同负荷和一网温度下温度匹配特性可能变化。由图8可知，发生器和吸收器中冷热流体温度线段接近平行，换热温差沿程分布均匀，传热匹配性良好；线段间垂直距离小、传热充分；PHE段二网水温升较大，与一网水形成较大换热温差，承担主要的直接换热负荷；蒸发器段一网水被梯级冷却至18.8 ℃，实现深度余热回收。总体而言，该工况下机组各部件传热匹配合理，不可逆损失较小，达到大温差换热的设计预期。

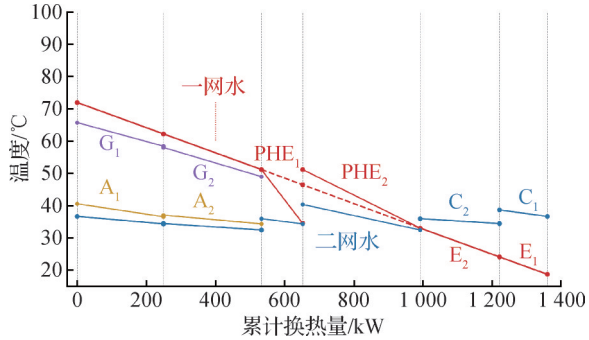


图8 B小区双分区机组*T*–*Q*图

Fig.8 *T*–*Q* diagram of the dual-zone unit at community B

3.5 分区调节特性

高、低区吸收式换热器在结构上完全对称：一网水串联通过两级发生器和蒸发器，高、低区二网水则各自独立循环，分别进入对应的吸收器、冷凝器和板式换热器，因而2个分区的二网温度和承担负荷均可独立调节。对于入住率差异引起的分区负荷变化，可通过调节对应分区的二网水流量适应（入住率升高则增大流量以提高该分区负荷，反之亦然）；对于室外温度变化引起的整体负荷变化，则通过调节一网水流量或供水温度实现。

温度独立性方面，图9所示为B小区全测试时段高、低区二网供回水温度的日均值变化。高、低区回水温度差异明显，差值均值为2.01 ℃、采暖季内维持在1.3~2.6 ℃，反映两分区因建筑高度和管网阻力不同而存在持续的回水温度差异；而供水温差均值仅0.36 ℃、大部分时间低于0.8 ℃，两区供水始终接近。这表明回水温度不同时机组仍能将二网水加热至相近供水温度，两区温度水平相对独立、互不干扰。

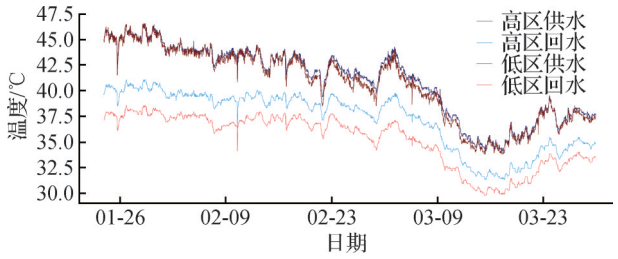


图9 B小区高、低区二网供回水温度变化

Fig.9 Variations of secondary-network supply and return temperatures in the high and low zones at community B

负荷独立性方面，末寒期流量测试中，A小区高、低区一网侧换热量分别为598、589 kW，两区负荷基本一致；B小区则分别为508、852 kW，低区比高区高约68%。相近一网温度下2台机组呈现截然不同的负荷分配比例，说明机组能按各分区实际需求自动分配换热量。B小区低区PHE一次流量为16.18 t/h，远大于高区的5.98 t/h，表明一次网流量经PHE支路自适应地向低区倾斜、使其承担更多热负荷，进一步验证了分区负荷调节的灵活性。

4 结论

本文对山西省某市2个采用双分区吸收式机组的住宅小区供热工程进行了采暖季实测研究，得到结论如下：

1）一网供水温度低于设计值的变工况下，2台机组均能将一网水深度冷却至20~25 ℃，COP和效能系数均维持较高水平；*T*-*Q*图显示各部件冷热流体温度线段接近平行、间距小，传热温差均匀、火积耗散低、内部匹配合理。机组整体效能与普通双级大温差吸收式换热器相当，在深度冷却一网水的同时满足了高、低两区的供热需求。

2）双分区机组高、低区二网水各自独立循环，两区的供水温度和承担负荷均可独立调节。实测表明，在两区回水温度存在明显差异的情况下，机组仍能将二网水加热至相近的供水温度；且不同工况下两区负荷分配比例可自动调整，体现了良好的分区调节灵活性。

实测结果验证了多分区吸收式机组在实际工程中的可行性与调节灵活性，为其在高层建筑多分区供热中的推广提供了运行数据支撑；后续可进一步研究不同负荷率下的优化运行策略及3分区以上机组的运行特性。

参考文献

[1] 付林，江亿，张世钢. 基于Co-ah循环的热电联产集中供热方法[J]. 清华大学学报（自然科学版），2008，48（9）：1377-1380.（Fu Lin，Jiang Yi，Zhang Shigang. District heating system based on co-ah cycles in combined heating and power systems [J]. Journal of Tsinghua University（Science and Technology），2008，48（9）：1377-1380.）

[2] Li Yan，Fu Lin，Zhang Shigang，et al. A new type of district heating method with co-generation based on absorption heat exchange （co-ah cycle）[J]. Energy Conversion and Management，2011，52(2)：1200-1207.

[3] Xie Xiaoyun，Jiang Yi. Absorption heat exchangers for long-distance heat transportation[J]. Energy，2017，141：2242-2250.

[4] Mirl N，Schmid F，Spindler K. Reduction of the return temperature in district heating systems with an ammonia-water absorption heat pump[J]. Case Studies in Thermal Engineering，2018，12：817-822.

[5] 易禹豪，谢晓云，江亿. 应用于太原市的双级大温差吸收式换热器运行性能实测与分析[J]. 区域供热，2019（5）：11-19.（Yi Yuhao，Xie Xiaoyun，Jiang Yi. Measurement and analysis of operation performance of two-stage absorption heat exchanger with large temperature difference applied in Taiyuan city [J]. District Heating，2019(5)：11-19.）

[6] 李剑，黄国华，谷再丰，等. 双级大温差换热机组运行性能及分析[J]. 区域供热，2022(2)：77-83.（Li Jian，Huang Guohua，Gu Zaifeng，et al. Operation performance and analysis of two-stage large temperature difference heat exchanger unit[J]. District Heating，2022(2)：77-83.）

[7] 付国栋，谢争先，肖常磊，等. 大温差吸收式换热技术换热站应用案例分析[J]. 建筑热能通风空调，2019，38(2)：70-72.（Fu Guodong，Xie Zhengxian，Xiao Changlei，et al. Application of large temperature difference absorption heat transfer technology in a heat transfer station [J]. Building Energy & Environment，2019，38(2)：70-72.）

[8] 王升，谢晓云，江亿. 多级立式大温差吸收式变温器性能分析[J]. 制冷学报，2013，34(6)：5-11.（Wang Sheng，Xie Xiaoyun，Jiang Yi. Performance analysis on the large temperature lift/drop multi-stage vertical absorption temperature transformer [J]. Journal of Refrigeration，2013，34(6)：5-11.）

[9] Zhu Chaoyi，Xie Xiaoyun，Jiang Yi. A multi-section vertical absorption heat exchanger for district heating systems[J]. International Journal of Refrigeration，2016，71：69-84.

[10] Yi Yuhao，Xie Xiaoyun，Jiang Yi. A two-stage vertical absorption heat exchanger for district heating system[J]. International Journal of Refrigeration，2020，114：19-31.

[11] 张承虎，廉雪丽，李亚平. 串联补燃型吸收式换热机组最大供热能力分析[J]. 哈尔滨工业大学学报，2019，51(10)：164-170.（Zhang Chenghu，Lian Xueli，Li Yaping. Analysis of maximum heating capacity of series-type supplemental fired absorption heat exchanger [J]. Journal of Harbin Institute of Technology，2019，51(10)：164-170.）

[12] Rivera W，Huicochea A，Romero R J，et al. Experimental assessment of double-absorption heat transformer operating with H_2O/LiBr[J]. Applied Thermal Engineering，2018，132：432-440.

[13] Wang Xiaoyin，Zhao Xiling，Fu Lin. Entransy analysis of secondary network flow distribution in absorption heat exchanger[J]. Energy，2018，147：428-439.

[14] Yi Yuhao，Xie Xiaoyun，Jiang Yi. Optimization of solution flow rate and heat transfer area allocation in the two-stage absorption heat exchanger system based on a complete heat and mass transfer simulation model[J]. Applied Thermal Engineering，2020，178：115616.

[15] Chorak A，Palenzuela P，Alarcón-Padilla D C，et al. Energetic evaluation of a double-effect LiBr-H_2O absorption heat pump coupled to a multi-effect distillation plant at nominal and off-design conditions [J]. Applied Thermal Engineering，2018，142：543-554.

[16] Park C W，Jeong J H，Kang Y T. Energy consumption characteristics of an absorption chiller during the partial load operation[J]. International Journal of Refrigeration，2004，27(8)：948-954.

[17] GB 50019—2003 采暖通风与空气调节设计规范[S].（GB 50019—2003 Code for design of heating ventilation and air conditioning[S].）

[18] Yi Yuhao，Xie Xiaoyun，Jiang Yi. Process design and analysis of a flexibly adjusted zonal absorption heat exchanger for high-rise building heating systems [J]. Applied Thermal Engineering，2021，195：117173.

[19] Yi Yuhao，Xie Xiaoyun，Jiang Yi，et al. Process design，performance comparison and operating test of the multi-stage vertical absorption heat exchanger realizing independent heating in three zones[J]. Applied Thermal Engineering，2024，255：123907.

[20] 朱超逸，谢晓云，江亿. 楼宇式吸收式换热器的研发及应用[J]. 区域供热，2019(5)：1-10，59.（Zhu Chaoyi，Xie Xiaoyun，Jiang Yi. Development and application of building absorption heat exchanger[J]. District Heating，2019(5)：1-10，59.）

通信作者简介

谢晓云，女，副教授，清华大学建筑节能研究中心，010-62793591，E-mail：xiexiaoyun@tsinghua.edu.cn。研究方向：吸收式热泵、蒸发冷却技术、热学原理。

About the corresponding author

Xie Xiaoyun，female，associate professor，Building Energy Research Center，Tsinghua University，86-10-62793591，E-mail：xiexiaoyun@tsinghua.edu.cn. Research fields：absorption heat pump，evaporative cooling technology，thermal principles.