

研究论文

DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20181165

采用地下水预热新风的热泵空调系统的适用性

王林, 何慧, 王占伟, 宋尊, 梁坤峰, 马爱华

(河南科技大学制冷热泵空调研究所, 河南 洛阳 471003)

摘要: 传统地下水源热泵是直接利用地下水加热蒸发器, 没有有效利用地下水低品位热能。为此, 提出一种利用地下水预热新风的地源热泵空调系统, 实现地下水低品位热能的梯级利用, 即先利用地下水预热新风, 再进入地下水源热泵机组二次利用, 提高了地下水热能的利用率并显著节省机组能耗。分析新系统工作原理及供热空气处理方法, 运用 DeST 软件对夏热冬冷和寒冷地区 4 个典型城市 (武汉、常德、北京、郑州) 的某学术交流中心在整个供暖季 (120 d) 的逐时热负荷进行模拟, 并与传统地下水源热泵空调系统的供热特性及能耗进行比较。新系统能耗远远低于传统地下水源热泵空调系统并且适用于我国夏热冬冷地区和寒冷地区, 节能率均超过 50%, 且夏热冬冷地区节能效果更好。

关键词: 地下水源热泵; 新风预热器; 地下水温度; 再生能源; 热力学过程; 数值模拟; 能耗

中图分类号: TK 51

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157 (2018) S2—0485—07

Applicability of heat pump air-conditioning system with groundwater preheating fresh air

WANG Lin, HE Hui, WANG Zhanwei, SONG Zun, LIANG Kunfeng, MA Aihua

(Institute of Refrigeration and Air Conditioning, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, Henan, China)

Abstract: The traditional groundwater source heat pump air conditioning system directly uses groundwater to heat the evaporator of the heat pump unit, and the low-grade thermal energy stored in the groundwater is not effectively utilized. Given those problems, a novel groundwater source heat pump air-conditioning system preheating fresh air with groundwater was proposed. The primary feature of the presented system is the cascade utilization of low-grade energy, namely the novel system preheats fresh air by groundwater at first, then the groundwater is recycled by the heat pump unit for the secondary utilization, which is beneficial to improve the utilization rate of low-grade thermal energy of groundwater and remarkably save energy consumption of heat pump unit. The operational principle of the novel system and air treatment method in the heating mode was analyzed and the hourly heat loads of an academic communication center in the whole heating season (120 days) in four selected typical cities (Wuhan, Changde, Beijing, Zhengzhou) was simulated with DeST, moreover, a comparative study on heating characteristic and energy consumption between the novel system and conventional groundwater source heat pump air-conditioning was conducted. The results showed that the energy consumption of the novel underground water source heat pump air conditioning system is much lower than that of the conventional groundwater source heat pump air conditioning system. The innovative groundwater source heat pump air conditioning system is preferred for hot summer and cold winter area and cold region in China. Moreover, the

2018-10-09 收到初稿, 2018-10-29 收到修改稿。

联系人及第一作者: 王林 (1973—), 男, 教授。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51641604); 河南省高等学校重点科研项目计划 (15A480001)。

Received date: 2018-10-09.

Corresponding author: Prof. WANG Lin, wlhust@163.com

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (51641604) and the Henan Provincial Higher Education Key Research Project Plan (15A480001).

energy saving rate is more than 50% in each region, and it should be noted that the energy saving effect is better in hot summer and cold winter area than cold region.

Key words: groundwater heat pump; fresh air preheater; groundwater temperature; renewable energy; thermodynamics process; numerical simulation; energy consumption

引 言

随着北方城镇雾霾污染问题日趋严重,煤改电供暖方式将成为代替传统农村或城镇家庭燃煤供暖的主要手段之一。地下水源热泵通过利用低品位地下水冷量或热能制取较低温度冷水消除建筑空调负荷或较高温度热水提供房间所需热负荷,与空气源热泵相比,具有更好的节能效果和更大的应用范围,并且没有结霜问题,可作为城镇煤改电供热技术手段之一,较适合于我国北方寒冷地区或夏热冬冷地区^[1-2]。地下水源热泵技术在工程中应用已有几十年历史,国内外研究工作者对地下水源热泵开展研究工作主要集中在地下水抽灌技术、地下水吸放热不平衡问题和系统优化设计等方面^[3-8]。Michopoulos等^[3]研究发现希腊北部使用地下水源热泵的空调系统比传统空调系统更加节能。马聪等^[4]研究发现地下水渗透系数是影响回灌能力的重要因素,在相同含水层厚度条件下,完整井地下水源热泵系统具有优势。王林等^[9]结合工程中地下水源热泵系统实例,采用一抽两灌、100%回灌,加热春秋卫生热水的运行方案,预测结果表明该方案能使地下水源热泵系统长期高效运行。

在制热模式下,地下水地源热泵机组通过吸收地下水所存在热能而使其制热效率明显高于空气源热泵或土壤源热泵,然而,地下水所储存的热能是否得到最有效利用?若将地下水先直接用于预热冬季室外新风再进入热泵机组被吸热,是否会使得热泵机组承担热负荷减少而消耗更少电能呢?

基于此,本文提出一种设置新风预热器的地下水源热泵空调系统,并通过热力计算验证其节能效果,尤其,为了明确该新型地下水源热泵空调系统的推广应用前景,选取寒冷地区(北京、郑州)和夏热冬冷地区(武汉、常德)的4个典型城市,从新型热泵机组制热性能和能耗等方面分析其适用性分析。

1 新型地下水源热泵系统工作原理

新型地下水源热泵空调系统由地下水新风预热器和地下水源热泵空调系统耦合而成^[9],工作原

理如图1所示。在制热工况下,A阀关闭,B阀开启,来自抽水井的地下水先经过旋流除砂器和过滤装置进行过滤净化后,进入新风预热器与室外新风进行热交换,承担了部分新风热负荷,流经新风预热器的地下水再进入热泵机组的蒸发器进行热交换后进入回水井。通过这种循环方式,地下水所储存的天然热能就可以直接来预处理新风,然后被地下水源热泵机组二次利用,实现了地下水储存热能的梯级利用,提高地下水低品位热能的利用率并显著节省热泵机组能耗。

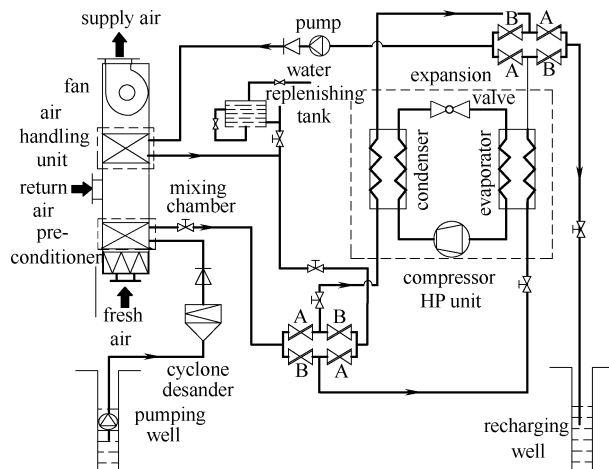


图1 复合式地源热泵系统

Fig.1 Diagram of hybrid ground source heat pump

基于该新型地下水源热泵空调系统的工作过程,空气处理过程如图2所示,室外新风首先经过新风预热器从新风状态点W预热到状态点W₁后,新风与状态点N的回风在混合室内混合至空气状态点H,状态点H的混合空气在加热器内等湿加热到状态点H₁,然后状态点H₁混合空气经加湿器等湿加湿到送风状态点S,最后,经加湿处理后状态点S的空气由风机送入室内,从而满足房间温湿度稳定的要求。

2 数学模型

为简化模型,做出如下假设:①地下水温度不随地下水源热泵机组的运行发生变化,维持恒定;②热泵机组制冷剂节流过程为等焓过程。

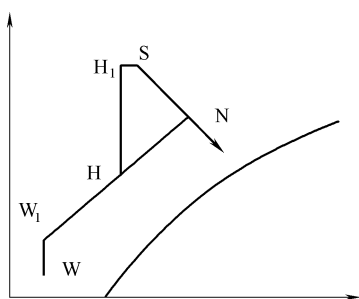


图2 冬季空气处理过程

Fig.2 Winter air treatment process

2.1 空气处理机组数学模型

(1) 新风预热器

新风预热器换热量

$$Q_{\text{flex}} = G_a (h_{\text{flex,ao}} - h_{\text{flex,ai}}) = W c_{pw} (t_{\text{flex,wi}} - t_{\text{flex,wo}}) \quad (1)$$

新风预热器传热系数^[10]

$$k = 31.97 v_y^{0.48} \omega^{0.8} \quad (2)$$

传热单元数法^[11]

$$NTU = kA / c_{\min} \quad (3)$$

$$\varepsilon = \frac{1 - e^{-NTU(1 - \frac{c_{\min}}{c_{\max}})}}{1 - \frac{c_{\min}}{c_{\max}}} = \frac{t_{\text{flex,ao}} - t_{\text{flex,ai}}}{t_{\text{flex,wi}} - t_{\text{flex,ai}}} \quad (4)$$

(2) 新回风混合段

$$G_w h_{\text{flex,ao}} + G_h h_h = G_c h_c \quad (5)$$

(3) 加热器

空气与热水之间的换热量

$$Q_c = G_c (h_{M1} - h_c) = W c_{sw} (t_{\text{CSw,o}} - t_{\text{CSw,i}}) \quad (6)$$

(4) 加湿器

$$W_c = G_c (d_s - d_h) \quad (7)$$

2.2 地下水热泵机组数学模型

压缩机功率

$$P = m_r (h_{\text{comr,o}} - h_{\text{comr,i}}) / \eta \quad (8)$$

冷凝器换热量

$$Q_c = m_r (h_{\text{comr,i}} - h_{\text{comr,o}}) = W c_{pw} (t_{\text{comr,i}} - t_{\text{comr,o}}) \quad (9)$$

蒸发器换热量

$$Q_e = m_r (h_{\text{er,i}} - h_{\text{er,o}}) = W c_{pw} (t_{\text{ew,i}} - t_{\text{ew,o}}) \quad (10)$$

膨胀阀绝热节流过程

$$h_{z,i} = h_{z,o} \quad (11)$$

热泵机组制热性能系数 (COP_h)

$$\text{COP}_h = Q_c / P \quad (12)$$

3 结果与讨论

为了评价新系统的节能效果和适用性，考虑同一建筑在不同地域 4 个代表性城市的逐时热负荷模拟，然后对机组的逐时地下水吸热量、逐时地下水

回水温度、热泵机组所承担的逐时热负荷、热泵机组性能系数和能耗等指标进行比较分析。计算给定条件：①建筑：某学术交流中心，三层，占地面积约 577.0 m²，空调面积 1063.6 m²，主要功能间包括多功能厅、会议室、休息室、办公室和大厅等，每天空调系统连续运行时间 8:00~21:00，共 13 h；②室内空气温度 20 ℃、相对湿度 50%；③根据水文地质资料，地下水供水温度：武汉 18 ℃，常德 18.5 ℃，北京 16 ℃，郑州 16 ℃；④热泵机组压缩机指示效率 0.8，电机效率 0.8；⑤不同城市所设定的新风量和地下水流量分别相同。

依据上述数学模型，运用 VC++ 语言编写程序进行新型地下水源热泵空调系统的节能效果和逐时工作特性进行计算，程序框图如图 3 所示。

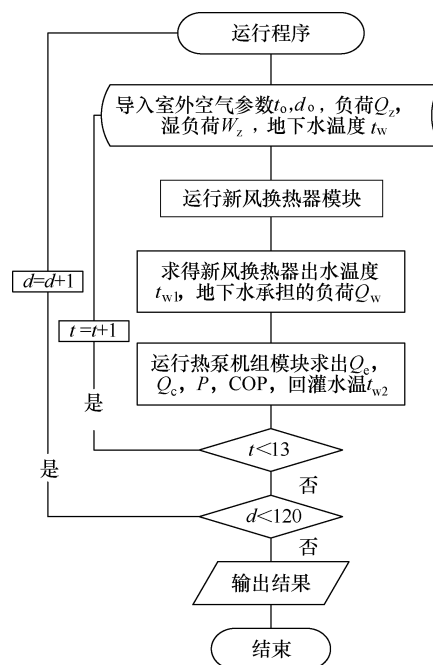


图3 热力计算程序

Fig.3 Thermodynamic calculation program

3.1 不同地域建筑空调热负荷模拟

选取负荷变化趋势相似，且各气候分区的典型城市的热负荷值接近的日子作为典型日，基于夏热冬冷地区（武汉、常德）和寒冷地区（北京、郑州）4 个代表性城市室外气象参数^[12]，运用 DeST 软件对某学术交流中心的逐时热负荷进行模拟，并对整个供热季节（120 d）逐时空调热负荷进行模拟计算。

图 4 是典型日逐时室外气温变化曲线。如图 4 所示，在 8:00~20:00 时段，常德地区室外气温变化最小，最高气温 6.0 ℃，出现在 16:00，最低气温 3.9 ℃，出现在 8:00，二者之差仅为 2.1 ℃；郑

州地区室外气温变化最大,最高气温 4.7 °C,出现在 13:00,最低气温-3.5 °C,出现在 8:00,最高最低温差为 8.3 °C;武汉地区室外气温在 2.4~6.3 °C 之间变化,最大温差 2.9 °C,而北京地区室外气温在-0.3~-3.9 °C 之间变化,最大温差 3.6 °C。室外气温变化趋势表明,夏热冬冷地区室外气温变化较小,而寒冷地区室外气温变化较大。

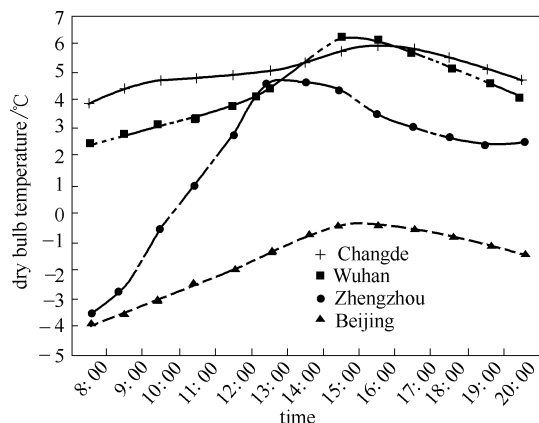


图 4 典型日逐时室外空气温度变化曲线

Fig.4 Hourly outdoor dry bulb temperature on a typical day

图 5 是典型日逐时总热负荷变化曲线。如图所示,在 8:00~20:00 时段,无论是夏热冬冷地区还是寒冷地区,热负荷变化趋势总体上趋于一致,最大热负荷均出现在 8:00,而最小热负荷也均出现在 16:00。夏热冬冷地区(武汉、常德)热负荷较寒冷地区(北京、郑州)更小,这是由于室外气温和太阳辐射强度综合作用引起的不同地区热负荷变化。

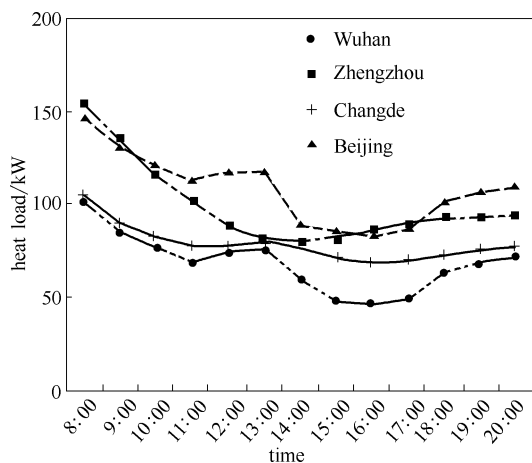


图 5 四城市典型日逐时总热负荷

Fig.5 Typical day of hourly heat load

3.2 新风预热器结构设计

引进室外新风是改善室内环境的重要因素,由

于室外新风和室内空气的温差大,新风负荷占总建筑负荷的比例较大。室外新风的引入会消耗大量高品位能源,而冬季地下水温度较高,可以直接利用地下水来预热新风,从而减少高品位电能的消耗。根据空调设计规范要求,新风量为 30 m³/(h·人),该建筑设计总人数 385 人,总新风量设计值 11550 m³/h,新风预热器拟选用表面式换热器,基于文献^[13]的方法对新风预热器优化设计,拟选用两台 JW10-4 型 6 排表面式换热器作为新风预热器,其设计参数见表 1。

表 1 设计参数

Table1 Design parameters

Technical parameter	Design value
radiator area per row /m ²	12.15
frontal area /m ²	0.944
water cut area /m ²	0.00407
number of rows	6
structure size /mm	776×1030×459

3.3 新型地下水源热泵空调系统与传统地下水源热泵空调系统的热力性能比较

选取郑州 1 月 21 日 11:00 作为典型工况,新型地下水源热泵空调系统与传统地下水源热泵空调系统的各部件进出口状态点热力参数如表 2 所示。在该时刻,新型地下水源热泵机组的制热 COP_h 值为 3.95,比传统地下水源热泵机组的制热 COP_h 降低了 0.16,这是由于地下水先经新风预热器预热新风后,地下水温度下降为 14.31 °C,流入新型机组的地下水温度比传统机组降低 1.69 °C,引起蒸发温度下降,从而导致机组制热 COP_h 有所下降。与传统机组相比,新型机组的制热 COP_h 下降,但能耗却比传统机组低,这是因为地下水直接承担 48.25 kW 预热新风的热负荷,新型机组仅承担 53.70 kW 热负荷,能耗为 13.50 kW,比传统机组能耗下降 11.29 kW,可见,虽然新型机组的制热 COP_h 比传统机组略有降低,但因地下水直接预热新风承担了部分热负荷,新型机组所承担热负荷比传统机组明显减少,使得新型机组所节省能耗远大于因机组能效比下降所引起能耗增加,综合起来,新型地下水源热泵空调系统较传统地下水源热泵空调系统节能效果更显著。新型机组地下水回水温度比传统机组的低 0.23 °C,为 12.75 °C,建筑总负荷所需热量来源于地下水所储存热能和热泵机组消耗电能转化成热能,新型机组能耗较传统机组更低,在建筑热负荷相同条件下,则需要从地下水吸收更多热量,所以地下水回水温度会更低。

表 2 系统运行数据

Table2 System state parameters

Thermal parameter	New unit	Traditional unit
outdoor air temperature /℃	0.9	0.9
fresh air moisture content / (g/kg)	2.41	2.41
inlet temperature of heater for air handling unit /℃	17.85	14.30
outlet temperature of heater for air handling unit /℃	26.86	30.00
humidifying capacity of air handling unit / (kg/h)	3.86	3.86
groundwater temperature /℃	16	16
groundwater recharge temperature/℃	12.75	12.98
inlet temperature of fresh air preheater /℃	0.9	—
groundwater outlet temperature of fresh air preheater /℃	14.31	—
outlet temperature of fresh air preheater /℃	11.93	—
hot water inlet temperature of heat pump unit /℃	45	45
hot water outlet temperature of heat pump unit /℃	50	50
evaporation temperature of heat pump unit /℃	9.31	11
evaporation pressure of heat pump unit /kPa	405.14	428.63
heat absorption of evaporator of heat pump unit /kW	40.12	77.16
condensing temperature of heat pump unit /℃	55	55
condensing pressure of heat pump unit /kPa	1491.51	1491.51
heat release of condenser of heat pump unit /kW	53.70	101.95
compressor power of heat pump unit /kW	13.50	24.79
heat production of heat pump unit /kW	53.70	101.95
COP	3.95	4.11
building total heat load /kW	101.95	101.95
heat load born by air preheater /kW	48.25	—
heat load born by heat pump unit /kW	53.70	101.95

3.4 不同地区两种系统的逐时性能比较分析

为了分析地下水预处理新风的地下水源热泵空调系统推广应用的可行性，以武汉、常德、北京、郑州 4 个典型城市为例，分析该新系统逐时性能变化关系，并与传统地下水源热泵空调系统进行比较。

图 6 是不同地区新型地下水源热泵机组和传统地下水源热泵机组所承担逐时热负荷变化曲线。如图所示，无论夏热冬冷地区还是寒冷地区，传统地下水源热泵机组承担全部建筑总热负荷，然而与传统地下水源热泵空调系统不同的是在新型地下水源热泵空调系统中，由新风预热器所直接承担热负荷接近或超过建筑总热负荷的 50%，因此，由新型机组所承担的负荷仅为总热负荷的 1/2，甚至更少，比如夏热冬冷地区。新风预热器另一个特点是由于不同地区流入新风预热器的地下水温恒定，新风预热器所承担逐时热负荷相对稳定。

图 7 是不同地区新型地下水源热泵机组与传统地下水源热泵机组的逐时能耗变化关系。如图所示，无论夏热冬冷地区还是严寒地区，新型机组逐时能耗与传统机组变化趋势一致，新型机组逐时能耗明显低于传统机组，比如武汉、常德、郑州、北京地区新型机

组的日总能耗依次为传统机组的 62.3%、52.1%、48.5%、41.8%。该新型地下水源热泵空调系统在夏热冬冷地区有更大节能潜力。尽管新型机组的制热性能系数（COP_h）略低于传统机组，单位制热量所需能耗增加，但是，新风预热器直接承担热负荷约占建筑总热负荷 50%，新型机组所承担热负荷较传统机组减少 50%，因此，所节省能耗远大于因机组制热效率下降所引起单位能耗增加，即新型机组的能耗较传统机组显著降低，可见，该新型地下水源热泵空调系统适用于我国夏热冬冷地区和寒冷地区。

3.5 不同地区两种系统的供暖季总能耗比较分析

图 8 是不同地域整个供暖季新型地下水源热泵机组与传统地下水源热泵机组的总能耗比较。如图所示，无论是夏热冬冷地区还是寒冷地区，新型地下水源热泵机组总能耗远低于传统地下水源热泵机组，比如武汉地区前者总能耗 5777.7 kW，后者总能耗 13896.1 kW，节能率 58.4%。在常德、北京、郑州地区节能率依次为 59.6%、53.4%、53.4%。可见，新型地下水源热泵空调系统在夏热冬冷地区和寒冷地区分别获得节能率相当，每个地区都超过 50%，夏热冬冷地区比寒冷地区可获得更好的节能效果。

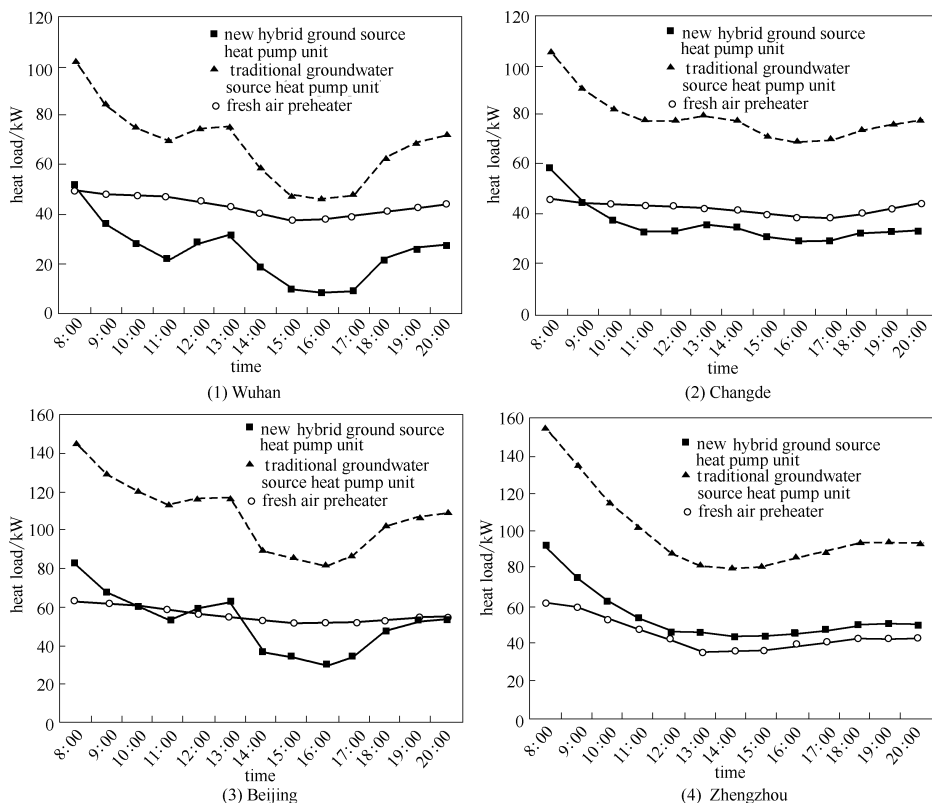


图 6 典型日新型热泵机组和传统热泵机组所承担的热负荷的比较

Fig.6 Comparison of condenser load

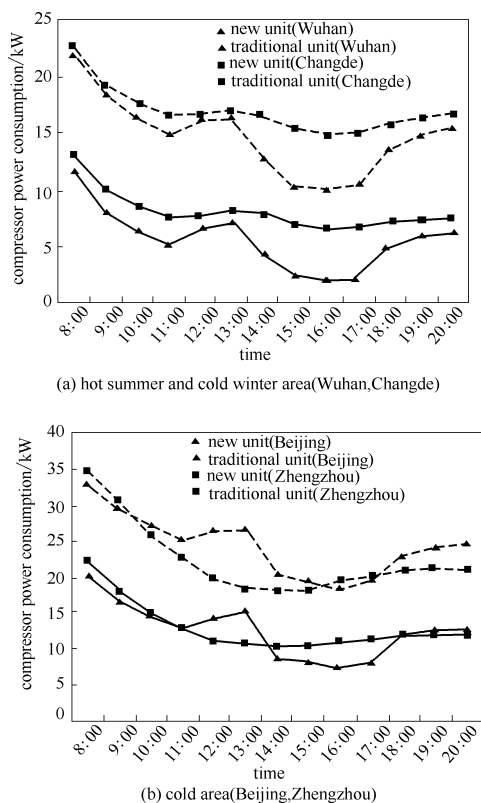


图 7 压缩机耗功的比较

Fig.7 Comparison of compressor power consumption

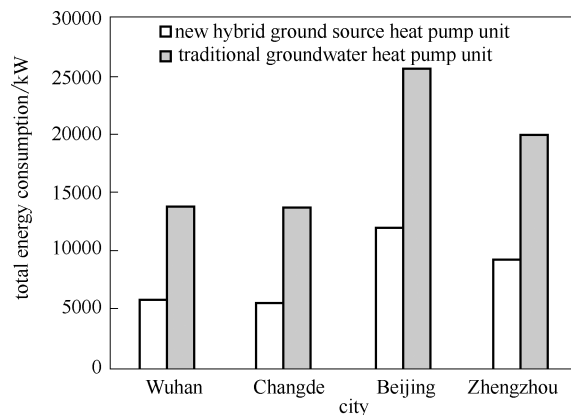


图 8 整个供暖季的总能耗比较

Fig.8 Comparison of total energy consumption

4 结 论

(1) 本文提出一种利用地下水预热新风的地源热泵空调系统, 实现低品位地下水热能梯级利用, 分析其工作过程及空气处理方法。

(2) 新风预热器直接承担热负荷占总热负荷 50% 左右, 新型地下水源热泵机组的制热性能系数略低于传统地下水源热泵机组, 但前者所承担热负荷远小于后者所承担热负荷, 新型地下水源热泵机

组所节省能耗远大于因机组效率下降所引起能耗增加值, 因此, 新型地下水源热泵空调系统能耗远低于传统地下水源热泵空调系统能耗。

(3) 新型地下水源热泵空调系统适用于我国夏热冬冷地区和寒冷地区。在夏热冬冷地区和寒冷地区分别获得的节能率相当, 每个地区都超过 50%, 甚至夏热冬冷地区比寒冷地区获得更好节能效果。

符 号 说 明

$c_{\max}$	——最大比热容流体
$c_{\min}$	——最小比热容流体
c_{pw}	——水的比热容, kJ/(kg·K)
d_h	——混合后空气的含湿量, g/kg
d_s	——送风状态点空气的含湿量, g/kg
G_a, G_w, G_c	——分别为新风量、回风量、总风量, kg/s
h_c	——混合后空气的焓值, kJ/kg
h_h	——回风的焓值, kJ/kg
h_{M1}	——热水处理后混合空气的焓值, kJ/kg
m_r	——制冷剂流量, kg/s
NTU	——传热单元数
v_y	——实际风速, m/s
W	——地下水流量, kg/s
ε	——换热器的效能
下角标	
comr	——流经压缩机制冷剂
conr	——流经冷凝器制冷剂
conw	——流经冷凝器的热水
CSw	——流经表面式换热器的热水
er	——流经蒸发器制冷剂
ew	——流经蒸发器的地下水
fex	——室外新风
i	——进口
o	——出口

References

- [1] 张超, 陈永, 王仰慧, 等. 河南濮阳某小区地热供暖站房设计[J]. 暖通空调, 2015, 45(11): 48-52.
ZHANG C, CHEN Y, WANG Y H, *et al.* Geothermal heating station design for a quarter in Puyang city of Henan province [J]. Journal of HV&AC, 2015, 45(11): 48-52.
- [2] 陈子丹, 罗会龙, 刘锦春, 等. 寒冷地区 CO₂ 空气源热泵供暖运行性能分析[J]. 化工学报, 2018, 69(9): 4030-4036.
CHEN Z D, LUO H L, LIU J C, *et al.* Analysis of heating performance of CO₂ air-source heat pump in cold region [J]. CIESC Journal, 2018, 69(9): 4030-4036.
- [3] MICHPOULOS A, BOZIS D. Three-years operation experience of a ground source heat pump system in Northern Greece [J]. Energy and Buildings, 2006, 39(3): 328-344.
- [4] 马聪, 周维博, 云涛, 等. 地下水源热泵对井抽灌系统回灌能力研究[J]. 太阳能学报, 2015, 36(3): 593-598.
MA C, ZHOU W B, YUN T, *et al.* Study of rechargeability for groundwater heat pump with pumping & recharging in two wells [J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2015, 36(3): 593-598.
- [5] NISHIMURA T. "Heat pumps status and trends" in Asia and the Pacific [J]. International Journal of Refrigeration, 2002, 25(4): 405-413.
- [6] O'NEILL Z D, SPITLER J D, REES S J. Performance analysis of standing column well ground heat exchanger systems [J]. ASHRAE Transactions, 2006, 112(2): 633-643.
- [7] 王琰, 骆祖江, 李伟, 等. 浅层地温能开发与地下水环境影响模拟预测[J]. 太阳能学报, 2015, 36(5): 1231-1238.
WANG Y, LUO Z J, LI W, *et al.* Simulation of shallow geothermal energy development and groundwater environmental influence [J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2015, 36(5): 1231-1238.
- [8] NI L, MA Z L. Thermal characteristics of groundwater heat pump with pumping and recharging in the same well [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2006, 27(2): 195-222.
- [9] 王林, 马爱华, 谈莹莹, 等. 一种地源热泵空调系统及其空气处理方法: ZL200910304101.7 [P]. 2011-07-01.
WANG L, MA A H, TAN Y Y, *et al.* A ground source heat pump air conditioning system and its air handling process: ZL200910304101.7 [P]. 2011-07-01.
- [10] 赵荣义, 钱以明, 范存养, 等. 简明空调设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998: 145-153.
ZHAO R Y, QIAN Y M, FAN C Y, *et al.* Concise Air Conditioning Design Manual [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1998: 145-153.
- [11] 章熙民, 任泽霁, 梅飞鸣, 等. 传热学[M]. 5 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998: 294-300.
ZHANG X M, REN Z P, MEI F M, *et al.* Heat Transfer [M]. 5th ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 1998: 294-300.
- [12] 中国气象局气象信息中心气象资料室. 中国建筑热环境分析专用气象数据集[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
China Meteorological Information Center Meteorological Reference Room. Technological Sciences China Building Thermal Environment Dedicate Meteorological Data Set [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005.