高效低温热水系统的研究进展

李先庭*, 吴伟

清华大学建筑技术科学系, 北京 100084

* 联系人, E-mail: xtingli@tsinghua.edu.cn

2015-01-19收稿, 2015-03-27接受, 2015-05-04网络版发表

国家杰出青年科学基金(51125030)资助

摘要 我国城镇建筑热水能耗约占建筑总能耗的27%, 目前热水制取以化石燃料和电能直接利用为主, 存在能源利用效率低、污染物排放量大的问题. 遵循“高品位能作为驱动热源、低温热水满足低温需求、自然能源合理充分利用”的原则, 本团队构建了多种高效低温热水系统: (1) 燃料驱动型空气源热泵系统, 传统供热系统作为热泵驱动力, 可实现20%~40%的节能率, 投资回收期在3~7年; (2) 燃料驱动型水源热泵系统, 缓解土壤源系统热不平衡并减少埋管数量, 减少水源系统取水量和水泵能耗; (3) 复合补热型土壤源热泵系统, 利用热管和热泵高效蓄存空气热能, 维持土壤热平衡和系统长期高效运行; (4) 复合太阳能空气源热泵系统, 充分利用不同强度的太阳能和不同品位的空气热能, 提高能效并降低初投资; (5) 蓄热型空气源热泵系统, 实现了太阳能与空气热能的优势互补, 提高了可靠性和经济性; (6) 数据中心余热回收热水系统, 热管/热泵复合空调从机房取热进入水环, 水源热泵从水环取热制取低温热水供热, 节能率高达60%. 上述高效低温热水系统均具有较高的节能性、可靠性和经济性, 是建筑热水领域节能减排的有效技术路径.

关键词

低温热水
建筑节能
自然能源
热泵
蓄热
热回收

我国社会能耗主要包括工业能耗、交通能耗和建筑能耗3大部分, 1996~2008年, 我国建筑总商品能耗从 2.59×10^8 tce(吨标准煤)增长到 6.55×10^8 tce, 建筑能耗约占当年社会总能耗的23%^[1]. 而在建筑总能耗中, 采暖和生活热水的能耗则占很大比例. 根据《中国建筑节能年度发展研究报告》, 1996年以来北方地区城镇采暖能耗、夏热冬冷地区城镇采暖能耗和全国城镇住宅生活热水能耗的变化情况如图1所示. 2008年我国北方城镇采暖能耗为 1.53×10^8 tce, 约占我国建筑总能耗的23%. 目前夏热冬冷地区城镇采暖能耗还不小, 但是由于该地区冬季湿冷, 室内热舒适性较差, 因此近年来该地区的供热需求也在不断增长. 生活热水的用量目前还比较小, 每日户均用水量仅为发达国家的20%左右^[2], 随着人们生活水平的提高, 生活热水的用量也会不断增加. 总体来看, 城镇建筑热水能耗(采暖和生活热水)约占建筑总能耗的

27%, 中国的人口城镇化率预计在2020~2040年达到70%, 将来热水能耗还会继续大幅增长^[3].

我国北方城镇集中采暖最主要的系统形式为燃煤锅炉和热电联产系统, 以燃煤消耗为主的方式会造成大量的CO₂排放, 2009年我国集中供热的CO₂排放占我国总排放的4.4%^[4]. 此外, 燃煤锅炉排放的PM_{2.5}, NO_x和燃气锅炉排放的NO_x, 也被认为是导致雾霾天气的直接和间接因素之一^[5]. 大规模的采用燃气采暖替代燃煤采暖虽然能在一定程度上提高能效、减少污染, 但其改善程度有限, 且我国的燃气供应能力也存在不足. 对于夏热冬冷地区城镇采暖, 目前多采用分散式系统且形式多样, 其中以空调器和电加热所占比重最大. 而对于城镇生活热水, 燃气热水器和电热水器因其安装和运行简单而广泛采用, 太阳能热水器次之^[2].

综上所述, 我国建筑热水需求量大、热水系统能

引用格式: 李先庭, 吴伟. 高效低温热水系统的研究进展. 科学通报, 2015, 60: 1661-1677

Li X T, Wu W. Research progress of high-efficiency, low-temperature hot water systems (in Chinese). Chin Sci Bull, 2015, 60: 1661-1677, doi: 10.1360/N972015-00063

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N972015-00063>

图1 (网络版彩色)我国热水能耗变化趋势^[1,2]. (a) 北方城镇采暖能耗; (b) 夏热冬冷城镇采暖能耗; (c) 全国城镇住宅生活热水能耗

Figure 1 (Color online) Trends of China's energy consumption of different hot water applications^[1,2]. (a) Space heating for urban buildings in north China; (b) space heating for urban buildings in hot summer and cold winter zone; (c) domestic hot water for urban residential buildings in China

耗也很大, 且仍在持续快速增长. 目前的热水制取方式以化石燃料的直接燃烧和电能直接利用为主, 存在能源利用效率低、污染物排放量大的问题. 做好热水系统的节能减排能为整个建筑领域的节能减排做出较大的贡献.

1 高效低温热水系统的构建原则

无论是供热还是生活热水, 通常需要的热水温度为30~60℃: 地板辐射供暖需要的热水温度通常不超过40℃; 风机盘管系统需要的热水温度通常为45℃; 各类生活热水温度则不超过45℃; 即使是大量使用的暖气片, 绝大多数情况下的实际热水温度为50~60℃. 目前满足这些低温热水需求的常用做法为: 将燃料燃烧或电能直接利用, 产生高温热水或蒸汽, 然后通过换热或混水的方式得到低温热水. 在典型的集中供热系统中, 一次侧制取130℃的高温热水, 通过中间换热器将二次侧供热回水加热到60~70℃, 该过程中能量虽然基本没有量上的损失, 但是在质上有较大的损失.

可见, 传统热水系统普遍存在能源品位不对口的问题, 即采用高品位能源(燃料、电能、高温媒介等)直接用于满足低品位热水需求, 这样的做法存在能源品位上的较大浪费. 此外, 传统热水系统也没有充分利用低品位热源: 如空气、水和土壤中蕴藏量巨大的低品位热能. 由此看来, 热水系统的能源利用效率还存在较大的提升空间.

建筑热水的节能减排可从降低热水需求和提升热水制取能效两个方面来考虑. 在降低热水需求方面, 过去常采用加强围护结构的保温和气密性来实现, 近年来关于采用非均匀环境营造技术来降低热水需求的研究相继开展^[6,7]. 本文从提升热水制取系统的能效着手, 针对传统热水系统出现的问题, 本团

队构建了合理的热热水系统用能原则(图2(a)): 燃料、电能、高温媒介等高品质能源并不直接利用, 而是作为热水系统的驱动力; 制取低温热水用于满足采暖和生活热水的低温需求, 不是先制取高温媒介再进行换热或混合后得到低温热水; 环境、土壤、地表水、可再生能源和废热等自然能源通过经济合理的技术手段进行充分利用.

由于供热和生活热水所需要的热水均为低温热水, 根据热力学第二定律(图2(b)), 为了满足这种低品位的需求, 热源温度越低则热水系统效率越高、热水制取所需能耗越小. 遵循上述原则构建高效低温热水系统, 既能避免高位能源的品位浪费, 又能从自然环境中提取低品位能源, 是建筑热水系统节能减排的有效技术路径.

2 高效低温热水系统的研究进展

基于上述高效低温热水系统构建原则, 围绕建筑供热和生活热水供应, 提出了多种适用于不同应用条件的新型热水系统. 下面分别介绍这些不同高效低温热水系统的工作原理及研究进展.

图2 (网络版彩色)高效低温热水系统构建原则. (a) 系统用能原则; (b) 热水系统能耗

Figure 2 (Color online) Principles to construct high-efficiency low-temperature hot water systems. (a) Energy utilization principles; (b) system energy consumption

2.1 燃料驱动型空气源热泵系统

基于燃料驱动型空气源热泵的热水系统, 根据空气源热泵的循环类别分为吸收式热泵和蒸汽压缩式热泵。

燃料驱动型空气源吸收式热泵系统的原理图如图3所示^[8~13]。图3(a)为锅炉或热网驱动的空气源吸收式热泵系统, 驱动热源的温度一般在90~130℃, 吸收式热泵宜采用图3(b)中的单效吸收式循环^[9]。对于采用燃气供热的地方, 也可采用如图3(c)所示的直燃型空气源吸收式热泵系统, 由于此时驱动热源的温度较高, 吸收式热泵宜采用图3(d)中的发生吸收换热(GAX)吸收式循环^[10]。该系统中, 锅炉/热网提供的高温热水或蒸汽不是直接用于供热, 燃气燃烧的热量也不是直接用于制取热水, 而是将这些高品位能源作为吸收式热泵的驱动热源, 驱动吸收式热泵从周围环境中提取低品位热能, 热用户侧的回水在吸收器和冷凝器中加热到所需温度。若室外温度很低, 空气源吸收式热泵无法制取所需温度的热水或机组处于维修时, 则可切换到传统的供热模式, 从而保

证供热的可靠性。

为了提高空气源吸收式热泵在低温环境下的制热量和性能指数(COP), 本团队提出了多种循环类型^[14~18], 包括双级吸收空气源吸收式热泵、双级耦合空气源吸收式热泵和增压型空气源吸收式热泵, 如图4所示。这些技术方案均能有效提高吸收式热泵的低温性能, 在-30℃的低温环境下仍能正常制热, 具有较好的低温适用性。

单效氨水空气源吸收式热泵和GAX空气源吸收式热泵的制热性能系数COP、一次能源效率PEE和制热量 Q_h 随室外空气温度的变化情况分别如图5(a)和(b)所示, 不同热水系统的一次能源效率对比如图5(c)所示。由图可知, 空气源吸收式热泵能明显提高传统供热系统的一次能源效率, 且在温度较低情况下的一次能源效率比电热泵要高, 直燃型吸收式热泵的一次能源效率在-30~24℃气温范围内均高于电热泵。相对于传统热水系统, 燃料驱动型空气源吸收式热泵系统在不同地区应用的节能率为20%~40%, 如表1所示。

图3 (网络版彩色)燃料驱动型空气源吸收式热泵热水系统。(a) 锅炉/热网型空气源吸收式热泵热水系统; (b) 单效空气源吸收式热泵; (c) 直燃型空气源吸收式热泵热水系统; (d) GAX 空气源吸收式热泵

Figure 3 (Color online) Hot water systems based on fuel-driven air source absorption heat pump. (a) Air source absorption heat pump system driven by boilers or heating network; (b) single-effect air source absorption heat pump; (c) direct gas-fired air source absorption heat pump system; (d) GAX-cycle air source absorption heat pump

图4 (网络版彩色)空气源吸收式热泵低温性能改善途径。(a) 双级吸收;(b) 双级耦合;(c) 增压吸收

Figure 4 (Color online) Performance improvement of air source absorption heat pump in cold conditions. (a) Double-stage absorption cycle; (b) double-stage coupled absorption cycle; (c) compression-assisted absorption cycle

为了提高空气源吸收式热泵系统的经济性,本团队对其相对设计容量进行了优化设计^[19]。考虑到尖峰热负荷出现的时间很短,且该系统具备传统的直接供热功能,可以适当减少吸收式热泵的设计容

图5 (网络版彩色)不同热水系统能效分析。(a) 单效变工况性能;(b) GAX 变工况性能;(c) 不同热水系统能效对比

Figure 5 (Color online) Performance analysis and comparison of different hot water systems. (a) Performance of single-effect air source absorption heat pump; (b) performance of GAX-cycle air source absorption heat pump; (c) performance comparison of different hot water systems

量,从而有效降低初投资。如图6(a)所示,在100%~50%的相对设计容量范围内,热水系统的节能率下降幅度不是很大,50%设计容量的吸收式热泵可以承担80%的总热负荷,故可以略微牺牲节能性以提高经济性。图6(b)表明,按照50%相对容量设计吸收式

表 1 燃料驱动型空气源吸收式热泵系统的节能性分析(建筑面积 8700 m²)^{a)}Table 1 Energy-saving analysis of fuel-driven air source absorption heat pump systems (building area of 8700 m²)

参数	哈尔滨	长春	沈阳	北京
采暖平均气温(°C)	4.5	3.3	1.2	1.7
总热负荷(GJ/(m ² a))	0.483	0.417	0.360	0.226
传统锅炉				
总能耗(GJ/(m ² a))	0.690	0.596	0.515	0.323
单效循环				
总能耗(GJ/(m ² a))	0.547	0.449	0.372	0.221
节能率	20.6%	24.7%	27.6%	31.7%
GAX 循环				
总能耗(GJ/(m ² a))	0.451	0.384	0.324	0.193
节能率	34.6%	35.5%	37.1%	40.2%

a) 标煤低位热值为 0.02927 GJ/kgce, 锅炉平均效率为 70%, 即能源转换效率 48.8 kgce/GJ

图 6 (网络版彩色)燃料驱动型空气源吸收式热泵系统的技术经济性分析. (a) 相对设计容量对节能率的影响; (b) 相对设计容量对投资回收期的影响

Figure 6 (Color online) Techno-economic analysis of fuel-driven air source absorption heat pump systems. (a) Influence of relative design capacity on energy saving rate; (b) influence of relative design capacity on payback period

热泵时, 新型热泵系统的投资回收期在3~7年, 具有较好的经济性.

另一类燃料驱动型空气源热泵系统为燃气型空气源压缩式热泵系统, 如图7(a)所示. 传统蒸汽压缩式热泵由电力驱动, 电能远距离输送存在较大浪费, 并且发电过程产生的余热不能被末端用户回收利用, 造成一次能源利用率低的问题. 该系统用燃气驱动发动机, 带动蒸汽压缩式热泵的压缩机运行, 能源转换效率高, 并且还能充分回收发动机缸套水余热及排烟中的废热. 本团队的模拟结果表明, 由于回收了较多的废热, 该热水系统的一次能源效率高达1.4~1.8^[20,21], 如图7(b)所示.

2.2 燃料驱动型水源热泵系统

燃料驱动型水源热泵系统包括土壤源热泵、地下水源热泵和地表水源热泵. 地源吸收式热泵能有效缓解传统电热泵在寒冷地区应用所存在土壤热不平衡、土壤温度逐年下降的问题(图8(a))^[22]. 由于吸收

式热泵在制冷COP和制热COP的数值上比电热泵都小, 当供应相同的冷量和热量时, 吸收式热泵向地下的排热量较多、取热量较少, 从而减少了土壤全年热不平衡, 如图8(b)所示.

地源吸收式热泵的原理图如图9(a)所示^[23], 哈尔滨地区采用吸收式热泵和电热泵的土壤平均温度逐年变化情况如图9(b)所示, 电热泵的土壤温度在不到10年时间里降低了12℃以上, 而吸收式热泵则能较好地维持土壤温度长期稳定. 2种地源热泵的热平衡分析如表2所示, 采用电热泵时, 长春和哈尔滨的热不平衡率约为-80%, 存在严重的冷堆积; 而采用吸收式热泵之后, 热不平衡率基本被消除. 可见, 吸收式热泵能有效地缓解严寒地区的土壤热不平衡问题.

但是对于北方靠南的地区, 吸收式热泵则将电热泵的冷堆积变成了热堆积, 从而导致土壤温度逐年升高的问题. 为了进一步解决该地区的土壤热不平衡问题, 本团队提出采用复合地源吸收式热泵系统: 包括复合冷却塔和复合生活热水. 带生活热水的

图7 (网络版彩色)燃气型空气源压缩式热泵系统原理及性能。(a) 燃气热泵示意图;(b) 燃气热泵性能系数

Figure 7 (Color online) Principle and performance of gas-engine air source compression heat pump. (a) Schematic diagram of gas-engine air source compression heat pump; (b) performance of gas-engine air source compression heat pump

图8 (网络版彩色)土壤热不平衡及减小热不平衡的原理。(a) 电热泵的土壤热不平衡;(b) 减小土壤热不平衡的原理

Figure 8 (Color online) Soil thermal imbalance and the principle for imbalance reduction. (a) Thermal imbalance of ground source electric heat pump; (b) imbalance reduction principle of ground source absorption heat pump

图9 地源吸收式热泵原理及土壤温度变化。(a) 地源吸收式热泵;(b) 吸收式热泵和电热泵土壤温度对比

Figure 9 Principle and soil temperature variation of ground source absorption heat pump. (a) Schematic diagram of ground source absorption heat pump; (b) soil temperature comparison between absorption and electric heat pump

地源吸收式热泵系统如图10(a)所示^[24], 该系统在夏天采用生活热水吸收式热泵回收供冷吸收式热泵的冷凝热和吸收热, 减少了向土壤的排热; 在过渡季和冬季, 生活热水吸收式热泵则能增加从土壤的取热。这样既能提高系统的一次能源效率, 又能缓解热不

平衡问题, 图10(b)表明, 与生活热水复合后, 吸收式热泵的土壤温度的变化很小。

此外, 对于仅采用地源热泵进行供暖的场合, 由于仅是冬天从土壤取热, 而没有夏季排热, 即使吸收式热泵能提供一定程度的缓解作用, 但土壤温度还

表 2 吸收式热泵和电热泵土壤热平衡分析(建筑面积 5000 m²)Table 2 Thermal balance analysis of ground source absorption and electric heat pump (building area of 5000 m²)

参数	沈阳	长春	哈尔滨
总热负荷(GJ)	1747	2327	2641
总冷负荷(GJ)	584	297	320
地源电动热泵			
GSEHP 供热平均 COP	3.69	3.36	3.22
供冷平均 COP	5.47	5.98	6.20
全年热不平衡率	-45.7%	-78.8%	-79.6%
地源吸收式热			
泵 GSAHP 供热平均 COP	1.504	1.494	1.490
供冷平均 COP	0.603	0.613	0.617
全年热不平衡率	62.3%	1.5%	-3.4%

图 10 (网络版彩色)地源吸收式热泵结合冷凝热回收制取生活热水. (a) 地源吸收式热泵结合冷凝热回收; (b) 吸收式热泵和电热泵土壤温度对比

Figure 10 (Color online) Ground source absorption heat pump with heat recovery for domestic hot water. (a) Schematic diagram of ground source absorption heat pump combined with heat recovery; (b) soil temperature comparison between absorption and electric heat pump

是会持续降低. 考虑到寒冷地区夏季土壤温度较低, 地埋管的出水仍具有一定的供冷能力, 如果将这部分冷量免费给室内供冷, 既能提高室内舒适性又能向土壤排热. 东北地区的很多建筑夏季冷负荷很小, 靠地埋管免费供冷可以满足很大一部需求; 对于冷负荷较大的建筑, 则可以采用地埋管免费供冷满足一部分显热负荷, 也能降低空调系统的能耗. 本团队所提系统的原理图、能效分析和动态温度模拟如图 11 所示^[25,26]. 可见, 采用地埋管免费供冷后, 土壤温度和埋管出水温度的衰减得到了明显的缓解, 且在不同地区的一次能源效率均得到了大幅的提高.

由于冬季从土壤取热小, 吸收式热泵与土壤源结合不仅能够维持地源热泵系统长年高效运行, 还可以通过合理设计减少所需埋管数量. 与传统电热泵相比, 埋管数量可以减少 30%~50%, 不仅节省了埋管投资和施工费用, 还减小了埋管的占地面积, 对

地源热泵的推广具有重要意义. 此外, 本团队研究发现, 将吸收式热泵与地下水源和地表水源相结合, 也具有较大的工程应用优势: (1) 减少 30%~50% 取水量和打井数量; (2) 降低水泵的输配能耗.

2.3 复合补热型土壤源热泵系统

地源热泵是一种清洁高效的采暖空调技术, 其中, 土壤源热泵由于具有较强的适应性近年来应用越来越广. 当其应用于热负荷较大的北方地区时, 由于系统全年累计取热量大于排热量将会引发土壤全年热不平衡问题^[27]. 长期运行, 土壤温度将逐年下降, 地源热泵机组供暖性能也随之下降, 系统供暖效果无法保障甚至无法运行. 现有的土壤热不平衡解决方案中, 主要有优化地埋管设计和增加辅助设备 2 大类. 第 1 类方案主要包括增大埋管间距、深度、数量等, 将会造成系统初投资的增加, 且不能从本质上

图 11 (网络版彩色)地源吸收式热泵结合埋管免费供冷. (a) 系统原理图; (b) 一次能源效率对比; (c) 仅供暖的土壤/埋管温度变化; (d) 供暖+免费供冷的土壤/埋管温度变化

Figure 11 (Color online) Ground source absorption heat pump integrated with borehole free cooling. (a) Schematic diagram of ground source absorption heat pump integrated with borehole free cooling; (b) comparison of primary energy efficiency; (c) soil and outlet temperature for heating only; (d) soil and outlet temperature for heating and free cooling

解决土壤取排热量不平衡的问题;第2类方案主要采用锅炉和太阳能集热器等辅助设备^[28-31],其中锅炉的能效比低、系统节能效果大打折扣,太阳能集热器可靠性差、初投资高。

针对现有土壤热不平衡问题解决方案的不足,本团队研发了一种新型热管/蒸汽压缩式复合补热机组(简称“补热机组”)^[32-35]。补热机组耦合了空气源热管与热泵,可实现2种功能的运行和自由切换,机组原理如图12(a)所示。当室外空气温度较高时,机组运行热管模式,制冷剂进行自然循环,以极低的电耗将高温空气中的热量蓄存在土壤中。当室外空气温度降低时,机组运行热泵模式,制冷剂在压缩机的驱动下从空气中取出大量的热蓄存在土壤中。补热机组利用热管和热泵高效地将非采暖期空气中的热量蓄存在土壤中供冬季供暖使用,实现了能量跨季节、跨空间的高效蓄存和利用,有效解决了土壤源热泵系统的热不平衡问题。目前已生产出名义制热量为170 kW的补热机组样机,如图12(b)所示,热管模式额定工况制热COP实测可达12.86。

本团队将补热机组与传统土壤源热泵系统结合构建了基本复合补热土壤源热泵系统,如图13(a)所

图 12 (网络版彩色)补热机组原理及样机. (a) 补热机组工作原理图; (b) 补热机组样机图

Figure 12 (Color online) Principle and prototype of heat compensator with thermosyphon. (a) Principle of heat compensator with thermosyphon; (b) prototype of heat compensator with thermosyphon

示^[32]。为研究带补热机组的复合补热土壤源热泵系统长期运行性能,利用动态模拟软件TRNSYS搭建系统模型。长期的模拟结果表明,新系统能较好地维持土壤全年热量平衡(图13(b)),保持供热性能的长期稳定高效(图13(c))。相对于北方地区广泛应用的传统“锅炉+分体空调系统”可节能15%以上,相对于太阳能复合土壤源热泵系统,该系统在30年的运行周期内更经济。

图13 (网络版彩色)基本复合补热土壤源热泵系统及运行模拟。(a) 基本复合系统原理图; (b) 土壤温度变化; (c) 制热 COP 变化

Figure 13 (Color online) Schematic and simulation of basic ground source heat pump with heat compensation. (a) System schematic diagram; (b) soil temperature variation; (c) heating COP

补热机组除具备基本的补热功能外,还能提供生活热水和初末期供暖,基于此构建了多功能复合补热土壤源热泵系统,其原理图如图14(a)所示,各模式的补热COP和补热时间如图14(b)和(c)所示^[36,37]。在多功能复合系统中,复合补热机组在补热、直接供生活热水、直接供暖功能下均具有良好的能效比:热管补热的年平均COP为5.9~8.6,热泵补热年平均COP大于4.8;直接供生活热水热源系统COP大于3.2;直接供暖热源系统COP大于2.9。相对于基本复合系统而言,采用多功能复合系统可进一步提高节能率5%~6%。

目前,复合补热土壤源热泵系统在山西某铁路站房得到实际应用,实测结果表明补热机组具有较好的补热性能,系统的长期运行性能将持续跟踪监测。带补热机组的复合补热土壤源热泵系统是一种有效解决北方地区土壤源热泵系统土壤热不平衡问题、保证系统长期高效运行的有效方案,将会促进土壤源热泵系统在北方地区的合理推广和应用。

2.4 复合太阳能空气源热泵系统

近年来,太阳能热水系统和空气源热泵热水系统都得到了较大的发展,但仍有一些局限:(1) 当太

阳辐射不足时,太阳能热水器或供热系统的制热效果将大打折扣,通常需要一套辅助系统来保障阴雨天气和夜晚的供热可靠性,降低了其节能效果;(2) 空气源热泵只能利用空气中的热能,无法有效利用太阳辐射。而将太阳能和热泵技术相结合的技术方案得到了越来越多的青睐。目前这类技术方案主要分为3类:(1) 太阳辐射不够强时,将太阳能集热器制取的低温热水作为水源热泵的蒸发侧热源,提高集热器的效率和热泵的效率,太阳辐射强的时候则切换到太阳能直接制热^[38,39]。该类方案只是提高了太阳能集热器的效率,没有解决无太阳能时的制热问题;(2) 采用直膨式的太阳能集热器,即制冷剂直接通入太阳能集热器中,这样可以实现太阳能直接制热和太阳能热泵制热模式,能减少一定的压缩机电耗^[40,41],但仍然没有解决无太阳能时的制热问题;(3) 采用一个直膨式太阳能集热器和一个风冷蒸发器,太阳辐射足够的时候太阳能直接制热,没有太阳或辐射较弱的条件下运行空气源热泵模式,但是该类方案不能利用低辐射下的太阳能,也不能实现空气热能的直接制热以及太阳能和空气热能的联合制热,对太阳能和空气热能的有效利用程度还不够高。

图14 (网络版彩色)多功能复合补热土壤热泵系统及运行模拟。(a) 多功能复合系统原理图; (b) 补热 COP; (c) 补热时间

Figure 14 (Color online) Schematic and simulation of multi-function ground source heat pump with heat compensation. (a) System schematic diagram; (b) COP of heat compensation modes; (c) operation time of heat compensation modes

总而言之,目前的太阳能热泵和空气源热泵技术方案在以高效充分地利用不同辐射强度的太阳能和不同温度品位的空气热能方面还存在较大的改进空间。

基于上述问题,本团队提出太阳能空气源复合热泵^[42],其系统如图15所示。系统在热泵循环的基础上有2点改进:(1)蒸发器采用太阳能空气源蒸发器,可同时利用太阳能和空气热能;(2)系统流程具有热泵和热管2种模式,以适应不同的蒸发温度和负荷需求。

该系统中,蒸发器有3种模式:(1)太阳辐射充足

图15 太阳能空气源复合热泵系统形式

Figure 15 Schematic diagram of hybrid solar air source heat pump

时,蒸发器运行太阳能集热模式,相当于平板太阳能集热器;(2)无太阳辐射时,蒸发器运行风冷换热模式,集热板通过强制对流与环境空气换热;(3)太阳辐射较弱且环境温度较高时,蒸发器运行太阳能集热-风冷换热联合模式,集热板在吸收太阳辐射的同时吸收空气中的热量。循环流程有两种模式:(1)当蒸发温度较高时,运行热管模式,此时系统没有压缩机电耗,具有很高的效率;(2)当蒸发温度较低时,运行热泵模式,此时系统可获得较高的制热量。太阳能空气源蒸发器的3种模式和系统流程的两种模式相互组合,可得到太阳能空气源复合热泵的6种工作模式。其中较常用的模式包括太阳能热管模式、太阳能热泵模式、太阳能空气源热泵模式和空气源热泵模式等。

为了定量研究此系统在不同工况下的性能,模拟了系统在设计工况下的运行参数(冷凝温度为50℃,环境温度为15℃),计算结果如表3所示。在设计工况下各模式均能较好地运行:(1)太阳能热管模式下,完全依靠太阳能,没有压缩机和风机耗电,制热量可达1.55 kW,此模式具有很高的制热效率;(2)太阳能热泵模式下,压缩机功率0.25 kW,制热量相比热管模式有较大增加,可达2.08 kW,此模式也具有很高的制热效率;(3)空气源热泵模式下,太阳辐射强度为0,集热-蒸发器只从周围空气中吸收热量,此时系统制热量达1.02 kW, COP为3.58;(4)太阳能

表 3 太阳能空气源复合热泵设计工况运行参数

Table 3 Operation parameters of hybrid solar air source heat pump under design conditions

参数	单位	太阳能热管模式	太阳能热泵模式	空气源热泵模式	太阳能空气源联合热泵模式
太阳辐射强度	W/m^2	600	600	0	200
蒸发温度	$^{\circ}\text{C}$	50.0	30.4	7.0	11.9
冷凝器制热量	kW	1.55	2.08	1.02	1.20
蒸发器太阳能集热量	kW	1.55	1.93	0.02	0.69
蒸发器风冷换热量	kW	0	0	0.87	0.33
压缩机功率	kW	0	0.25	0.28	0.29
COP		—	8.44	3.58	4.09

空气源联合热泵模式,集热器同时吸收太阳辐射和空气中的热量,二者所占比例由具体环境决定,系统制热量1.2 kW, COP为4.09,此模式可充分利用较弱的太阳能和空气热能。

太阳能空气源复合热泵的特点在于其可以充分利用太阳能和空气热能,在不同的太阳辐射条件下均能制取热水,与传统太阳能热水器和空气源热泵相比具有更高的制热效率,对于降低供热和生活热水能耗具有重要意义。

2.5 蓄热型空气源热泵系统

寒冷地区太阳能利用系统存在可靠性与经济性的问题^[43~45]:(1)采暖用热水必须连续稳定可靠供应,而太阳辐射受自然条件和天气情况等因素的影响,存在较大的间歇性和不稳定性;(2)寒冷地区建筑热负荷较大,如完全利用太阳能来实现供暖,势必需要足够大的集热面积和热量蓄存,从而导致初投资大、投资回收期长,且实际工程中可安装集热器的空间往往是有限的。

同样,寒冷地区空气源热泵的应用也存在可靠性与经济性的问题^[46,47]:(1)随着室外温度的降低,压缩机压比增大、排气温度过高,甚至无法正常运行;(2)制冷剂吸气比容增大,热泵制热量和性能系数衰减严重,可靠性和节能性都降低;(3)低温下建筑热负荷很大,而热泵制热量又衰减严重,如完全靠空气源热泵保障供热效果,则其设计容量会很大,初投资也会很高。

为了解决太阳能和空气源热泵在寒冷地区应用的问题,考虑到寒冷地区供暖负荷中有较大比例对应的室外温度相对较高,空气源热泵可以很好地保障供暖需求,最寒冷季的尖峰负荷虽然比较大,但出

现的时间较短,因此本团队提出了带跨季节蓄能的太阳能-空气源热泵联合热水系统^[48~50]。该热水系统的原理图如图16所示,主要包括空气源热泵机组、季节性蓄热水池、水/水热泵机组、太阳能集热器、板式换热器、循环泵等。其中,水池作为季节性蓄热单元用于蓄存非供暖季太阳辐射热。

根据不同的运行工况和实际需求,该系统可分别运行于6种模式:

模式1:太阳能通过板换 I 对水池蓄热,用于空气源热泵难以运行时辅助供暖;

模式2:蓄热水池通过板式换热器 II 直接供暖或供冷,当供冷初期蓄热水池水温较低时,则可以直接进行供冷;在供暖期蓄热水池温度足够时,也可以直接进行供暖;

模式3:蓄热水池作为水/水热泵的冷热源进行供暖或供冷,供暖期内空气源热泵停止运行且水池温度不足以直接供暖时,启动水/水热泵进行供暖;

图 16 季节性蓄热辅助空气源热泵系统原理图

Figure 16 Schematic diagram of hybrid air source heat pump system aided with seasonal energy storage

在夏季空调时,当水池内温度无法满足直接供冷时,则启动水/水热泵进行供冷;

模式4: 空气源热泵进行供暖或供冷,供暖期内室外温度相对较高时运行空气源热泵进行供暖;夏季蓄热水池温度过高、水/水热泵性能较差时,采用空气源热泵进行供冷;

模式5: 蓄热水池直接供暖与空气源热泵供暖联合运行,供暖期空气源热泵制热能力不足、但蓄热水池水温较高,则利用水池直接供暖辅助空气源热泵系统向建筑供热;

模式6: 水/水热泵供暖与空气源热泵供暖联合运行,供暖期空气源热泵制热能力不足、且蓄热水池水温不足以实现直接供暖时,则利用水/水热泵供暖辅助空气源热泵系统向建筑供热.

以乌鲁木齐地区建筑面积为1609 m²的某餐厅为研究对象,设计蓄热水水池体积为256 m³,夏天和过渡季蓄热后水池温度上升到最高60℃,冬季取热后逐渐降到最低5℃. 该系统的全年运行分析结果如表4所示,蓄热水池全年总蓄热量为91.0 GJ,其中总太阳能蓄热量为79.5 GJ,总空调排热量为11.5 GJ. 蓄热水池供暖总取热量为69.7 GJ,取热率为76.6%,水池净漏热量为18.6 GJ,漏热率为20.4%. 系统供暖平均COP为3.0,空调平均COP为3.56,全年供暖空调平均COP为3.0. 在各种供暖运行模式中,模式4供热量最大,占总供热量的76.9%,加上模式5和6中空气源热泵的供热量后,空气源热泵的总供热量占总供热量的83.9%. 供暖热量主要来自于空气中的取热、水池中的取热、空气源和水/水热泵压缩机的耗电量,其

比例分别为54.7%, 13.3%, 29.1%, 2.9%. 相比于传统的城市热网+房间空调器方案,该系统的节能率为33.4%,运行费用仅为传统方案的48.9%.

相比单一的太阳能供热系统和空气源热泵系统,太阳能与低温空气源热泵的复合系统实现了太阳能与空气热能的优势互补: (1) 对于太阳能供暖系统来说,空气源热泵充分利用了室外的空气热能,减小了太阳能供暖系统所需的集热器面积和蓄热水池的体积,降低了太阳能供暖系统的初投资和安装要求; (2) 太阳能季节性蓄热可以减少空气源热泵在低温条件下的运行时间,弥补了其在低温环境下存在制热能力下降、能效低等问题,提高了系统供暖可靠性. 在该系统中由于空气源热泵仅在室外温度较高时运行,因此可以不用按照供暖期最低温度和最大热负荷确定容量,降低了空气源热泵的初投资. 新型热水系统在显著提高供热可靠性和稳定性的同时,还能显著提高太阳能的综合利用效率,是一种能够对节能减排事业做出很大贡献的太阳能集成应用技术.

2.6 数据中心余热回收热水系统

随着城镇化和信息化的发展,数据机房、通信基站、工艺车间等高发热密度空间在种类上和数量上迅速增加. 这些空间发热密度高(数据机房发热密度约400~1000 W/m²),发热量相对稳定,因此需要全年供冷^[51~56]. 通常情况下,室内的产热会通过空调系统被直接排放到外界环境中. 这种方法虽然简单方便,但热能利用率低,且容易带来局部热堆积等问题. 因此,回收这部分热量产生低温热水,用于北方供暖或

表 4 季节性蓄热辅助空气源热泵系统模拟运行结果^{a)}
Table 4 Simulation of hybrid air source heat pump system aided with seasonal energy storage

参数	结果	参数	结果
总供热量(GJ)	526.0	总供冷量(GJ)	64.7
总热负荷(GJ)	525.8	总冷负荷(GJ)	64.4
模式 2 供热量(GJ)	0.4	模式 2 供冷量(GJ)	0.0
模式 3 供热量(GJ)	32.4	模式 3 供冷量(GJ)	9.3
模式 4 供热量(GJ)	404.7	模式 4 供冷量(GJ)	55.4
模式 5 供热量(GJ)	39.2	空调平均 COP	3.56
模式 6 供热量(GJ)	49.3	太阳能总蓄热量(GJ)	79.5
空气中取热量(GJ)	287.8	蓄热水池总蓄热量(GJ)	91.0
水池中取热量(GJ)	69.7	蓄热平均 COP	23.0
空气源热泵压缩机耗电量(GJ)	153.3	空气源热泵供热量(GJ)	441.1
水水热泵压缩机耗电量(GJ)	15.2	空气源热泵平均 COP	2.88
供暖平均 COP	3.00	空气源热泵贡献率(%)	83.9

a) 全年平均 COP=(总供热量+总供冷量)/(供暖总耗电量+供冷总耗电量+蓄热总耗电量)

图 17 (网络版彩色)结合复合空调的数据机房热回收供热系统示意图

Figure 17 (Color online) Schematic diagram of heat recovery system based on integrated air conditioner in data centers

者生活热水将是一种不错的选择。

结合带热管功能的复合型水冷机房空调,本团队提出了一种机房热回收用于建筑供热的综合系统^[57],如图17所示。分散的复合型机房空调从机房中取热(热管模式或热泵模式)进入水环,水源热泵吸收水环中的热量产生低温热水(40~50℃)用于建筑供热。当建筑热负荷较大时,备用锅炉补充不足的热量,当建筑热负荷较小时,通过冷却塔排出多余的热量。

以北京地区的一个面积为4000 m²的数据机房为例,如果采用所提系统为一栋面积为80000 m²的建筑供暖,与传统的燃煤锅炉相比,一次能源节能率可达59.8%,与此同时,与传统的风冷机房空调为IDC供冷相比,此系统在供冷方面也可节能33.2%,如图18所示。另外,与北京地区热平衡较好的土壤源热泵相比,机房热回收可以提供温度更高、更为稳定的水源用于供热,在更加寒冷的地区,这种优势将更加明显。

通过经济性分析可知,所提机房热回收系统的投资回收期约为2.7年,是一种经济可行的系统形式。另外,通过调研可知,仅北京地区大型的经营性数据机房(不包括机密或自有机房)就有88座,面积379000 m²。如果有1/2的机房采用机房热回收,可为3500000 m²的建筑供暖,每年可节煤76000吨,社会经济效益明显。

综上所述可知,回收数据机房、基站等高发热空间的冷凝热制取低温热水用于供热,具有较大的节能减排潜力,是适宜场合下的一种高效、清洁、经济的低温热水系统。

3 总结与展望

我国北方城镇采暖、夏热冬冷城镇采暖和全国城

图 18 (网络版彩色)机房热回收综合供冷供热系统与传统系统一次能源能耗比较

Figure 18 (Color online) Comparison of primary energy consumption between the proposed and conventional systems

镇住宅生活热水所构成的建筑热水能耗约占建筑总能耗的27%,随着城镇化的发展和人们生活水平的提高还会持续增长。建筑所需热水温度通常为30~60℃的低温热水,目前热水制取以化石燃料和电能直接利用为主,普遍存在高品位能源满足低品位需求的不足,导致能源利用效率低、污染物排放量大等问题。为此,提出热水制取系统应当遵循“高品位能作为驱动热源、低温热水满足低温需求、自然能源合理充分利用”的梯级利用原则,并结合不同应用需求和热源条件,构建了多种高效低温热水系统。所提热水系统从不同方面解决了现有供热及生活热水系统的不足,均具有较高的能源利用效率,同时也具有较好的经济性和可靠性。对所研究低温热水系统的适用范围简要归纳如下: (1) 燃料驱动型空气源热泵系统。适用性比较广,可与大多数现有燃料供热系统结合(如燃煤锅炉、城市热网),也可以是单独供热设备(如直燃型),适合大、中、小不同规模的应用; (2) 燃料驱动型水源热泵系统。适合有足够埋管区域或地下、地表水资源的中、小规模应用; (3) 复合补热型土壤源热泵系统。适合北方地源热泵改造和新建的中、小规模应用; (4) 复合太阳能空气源热泵系统。适合太阳能较充足地区的中、小规模应用; (5) 蓄热型空气源热泵系统。适合北方地区太阳能较充足、有足够蓄热区域的中等规模应用; (6) 数据中心余热回收热水系统。适合北方地区有数据中心的中等规模应用。

为了更好地发挥所提高效低温热水系统的优势, 本团队后续研究工作还需在低蒸发温度和低发生温度的吸收式热泵开发、高效太阳能集热与空气换热器

开发、空气源和水源复合热泵机组开发等方向开展深入研究, 并进一步推动新型低温热水系统的工程应用.

致谢 感谢清华大学建筑技术科学系石文星教授、王宝龙副教授、韩宗伟博士、韩林俊博士, 以及张朋磊、游田和冉思源等博士研究生在文章撰写过程中所提供的帮助.

参考文献

- 1 Tsinghua University Building Energy Saving Research Center. 2011 Annual Report on China Building Energy Efficiency (in Chinese). Beijing: China Architecture and Building Press, 2011 [清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告2011. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011]
- 2 Tsinghua University Building Energy Saving Research Center. 2013 Annual Report on China Building Energy Efficiency (in Chinese). Beijing: China Architecture and Building Press, 2013 [清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告2013. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013]
- 3 Jiang Y, Peng C, Yan D. Technical roadmap of building energy efficiency in China (in Chinese). Constr Technol, 2012, 17: 12–19 [江亿, 彭琛, 燕达. 中国建筑节能的技术路线图. 建设科技, 2012, 17: 12–19]
- 4 Wang L, Chen X, Wang L, et al. Contribution from urban heating to China's 2020 goal of emission reduction. Environ Sci Technol, 2011, 45: 4676–4681
- 5 Jiang Y, Tang X Y, Ni W D, et al. The relationship of $PM_{2.5}$ and heat source for winter heating and the control measurements in Beijing (in Chinese). Energy China, 2014, 36: 7–13 [江亿, 唐孝炎, 倪维斗, 等. 北京 $PM_{2.5}$ 与冬季采暖热源能关系及治理措施. 中国能源, 2014, 36: 7–13]
- 6 Shao X L, Li X T, Ma X J, et al. Optimising the supply parameters oriented to multiple individual requirements in one common space. Indoor Built Environ, 2014, 23: 828–838
- 7 Shao X L, Li X T. Evaluating the potential of airflow patterns to maintain a non-uniform indoor environment. Renew Energy, 2015, 73: 99–108
- 8 Li X T, Wu W, Zhang X L, et al. Energy saving potential of low temperature hot water system based on air source absorption heat pump. Appl Therm Eng, 2012, 48: 317–324
- 9 Wu W, Li X T, Shi W X, et al. Low evaporating temperature absorption heat pump used for heating and domestic hot water in northern China (in Chinese). Heat Vent Air Cond, 2013, 43: 86–93 [吴伟, 李先庭, 石文星, 等. 用于北方供暖和供生活热水的低蒸发温度吸收式热泵系统研究. 暖通空调, 2013, 43: 86–93]
- 10 Wu W, Wang B L, Shi W X, et al. Study on heat supply systems based on NH_3-H_2O air source absorption heat pump (in Chinese). Heat Vent Air Cond, 2014, 44: 242–246 [吴伟, 王宝龙, 石文星, 等. 氨水空气源吸收式热泵供热方案分析. 暖通空调, 2014, 44: 242–246]
- 11 Wu W, Wang B L, Shi W X, et al. An overview of ammonia-based absorption chillers and heat pumps. Renew Sustain Energy Rev, 2014, 31: 681–707
- 12 Wu W, Wang B L, Shi W X, et al. Energy-efficient heating and domestic hot water systems suitable for different regions. In: Proceedings of the 8th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning (ISHVAC 2013). Berlin, Heidelberg: Springer, 2014. 601–607
- 13 Wu W, Wang B L, Shi W X, et al. Crystallization analysis and control of ammonia-based air source absorption heat pump in cold regions. Adv Mech Eng, 2013, doi: 10.1155/2013/140341
- 14 Wu W, Zhang X L, Li X T, et al. Comparisons of different working pairs and cycles on the performance of absorption heat pump for heating and domestic hot water in cold regions. Appl Therm Eng, 2012, 48: 349–358
- 15 Wu W, Shi W X, Wang B L, et al. A new heating system based on coupled air source absorption heat pump for cold regions: Energy saving analysis. Energy Convers Manage, 2013, 76: 811–817
- 16 Wu W, Shi W X, Wang B L, et al. Performance improvement of ammonia/absorbent air source absorption heat pump in cold regions. Build Serv Eng Res T, 2014, 35: 451–464

- 17 Wu W, Shi W X, Wang B L, et al. Approaches and comparative analysis for performance improvement of air source absorption heat pump in cold regions (in Chinese). *J Refrig*, 2013, 34: 1–7 [吴伟, 石文星, 王宝龙, 等. 寒冷地区空气源吸收式热泵性能提高途径及对比分析. *制冷学报*, 2013, 34: 1–7]
- 18 Wu W, Shi W X, Wang B L, et al. Simulation on performance of air source absorption heat pumps with different compression-assisted approaches (in Chinese). *CIESE J*, 2013, 64: 2360–2368 [吴伟, 石文星, 王宝龙, 等. 不同增压方式对空气源吸收式热泵性能影响的模拟分析. *化工学报*, 2013, 64: 2360–2368]
- 19 Wu W, Wang B L, Shi W X, et al. Techno-economic analysis of air source absorption heat pump: Improving economy from a design perspective. *Energy Build*, 2014, 81: 200–210
- 20 Hepbasli A, Erbay Z, Icier F, et al. A review of gas engine driven heat pumps (GEHPs) for residential and industrial applications. *Renew Sustain Energy Rev*, 2009, 13: 85–99
- 21 Yang Z, Zhang S G, Zhao H B. Optimization study of combined refrigeration cycles driven by an engine. *Appl Energy*, 2003, 76: 379–389
- 22 Wu W, Wang B L, Shi W X, et al. Absorption heating technologies: A review and perspective. *Appl Energy*, 2014, 130: 51–71
- 23 Wu W, Wang B L, Shi W X, et al. A potential solution for thermal imbalance of ground source heat pump systems in cold regions: Ground source absorption heat pump. *Renew Energy*, 2013, 59: 39–48
- 24 Wu W, You T, Wang B L, et al. Simulation of a combined heating, cooling and domestic hot water system based on ground source absorption heat pump. *Appl Energy*, 2014, 126: 113–122
- 25 Wu W, You T, Wang B L, et al. Evaluation of ground source absorption heat pumps combined with borehole free cooling. *Energy Convers Manage*, 2014, 79: 334–343
- 26 Wu W, You T, Zhang X L, et al. Analysis of ground source absorption heat pump integrated with free cooling using heating terminals in cold regions (in Chinese). *Build Sci*, 2012, 28: 175–177 [吴伟, 游田, 张晓灵, 等. 地源吸收式热泵供热结合采暖末端免费供冷在寒冷地区的应用效果研究. *建筑科学*, 2012, 28: 175–177]
- 27 You T, Wu W, Wang B L, et al. Dynamic soil temperature of ground-coupled heat pump system in cold region. In: *Proceedings of the 8th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2014. 439–448
- 28 Han Z W. Study on primal problems and several application countermeasures of heat pump for heating and air conditioning in China (in Chinese). Postdoctoral Report. Beijing: Tsinghua University, 2011 [韩宗伟. 热泵在我国供暖空调应用中的主要问题及对策研究. 博士后研究报告. 北京: 清华大学, 2011]
- 29 Hua L, Fan R, Pan Y Q, et al. Review and development of hybrid ground-coupled heat pump system (in Chinese). *Refrigeration and Air Conditioning*, 2011, 25: 518–525 [花莉, 范蕊, 潘毅群, 等. 复合式地源热泵系统的回顾与发展. *制冷与空调*, 2011, 25: 518–525]
- 30 Elisabeth K, Goran H, Bengt P. Optimization of systems with the combination of ground-source heat pump and solar collectors in dwellings. *Energy*, 2010, 35: 2667–2673
- 31 Man Y, Yang H, Wang J. Study on hybrid ground-coupled heat pump system for air-conditioning in hot-weather areas like HongKong. *Appl Energy*, 2010, 87: 2826–2833
- 32 You T, Wang B L, Wu W, et al. A new solution for underground thermal imbalance of ground-coupled heat pump systems in cold regions: Heat compensation unit with thermosyphon. *Appl Therm Eng*, 2014, 64: 283–292
- 33 You T, Wu W, Li B T, et al. Hybrid heat compensator based on heat pipe and air source heat pump used for ground source heat pump (in Chinese). In: *Proceedings of HVAC Conference 2012*. 2012 [游田, 吴伟, 李炳田, 等. 基于热管和空气源热泵的一体化地源热泵复合补热机组. 见: 全国暖通空调制冷2012年学术年会论文集. 2012]
- 34 You T, Wu W, Wang B L, et al. Design and application of hybrid ground source heat pump system with heat compensation (in Chinese). In: *Proceedings of HVAC Conference 2014*. 2014 [游田, 吴伟, 王宝龙, 等. 复合补热地源热泵系统设计方法研究与应用. 见: 全国暖通空调制冷2014年学术年会论文集. 2014]
- 35 Li B T, You T, Wang B L, et al. Application analysis of hybrid ground source heat pump system with heat compensation used in cold regions (in Chinese). *Build Sci*, 2012, 28: 178–183 [李炳田, 游田, 王宝龙, 等. 复合补热地源热泵系统在北方地区的应用效果分析. *建筑科学*, 2012, 28: 178–183]
- 36 You T, Wu W, Wang B L, et al. Evaluation of a novel hybrid ground-coupled heat pump system with heat compensation and domestic hot water supply. In: *Proceedings of 12th International Conference on Sustainable Energy technologies (SET2013)*, Hong Kong, China. 2013
- 37 You T. Study on the operation characteristics of hybrid ground source heat pump system with heat compensation (in Chinese). Dissertation of Master Degree. Beijing: Tsinghua University, 2014 [游田. 复合补热机组与土壤源热泵系统联合运行特性研究. 硕士学位论文. 北京: 清华大学, 2014]
- 38 Kuang Y H, Wang R Z, Yu L Q. Experimental study on solar assisted heat pump system for heat supply. *Energy Convers Manage*, 2003, 44: 1089–1098

- 39 Kaygusuz K, Ayhan T. Experimental and theoretical investigation of combined solar heat pump system for residential heating. *Energy Convers Manage*, 1999, 40: 1377–1396
- 40 Kuang Y H, Sumathy K, Wang R Z. Study on a direct-expansion solar-assisted heat pump water heating system. *Int J Energy Res*, 2003, 27: 531–548
- 41 Huang B J, Lee J P, Chyng J P. Heat-pipe enhanced solar-assisted heat pump water heater. *Sol Energy*, 2005, 78: 375–381
- 42 Li X T, Wu W, Wang B L, et al. A hybrid solar air source heat pump (in Chinese). PRC Patent, ZL201420269521.2, 2014 [李先庭, 吴伟, 王宝龙, 等. 一种复合太阳能空气源热泵. 中国专利, ZL201420269521.2, 2014]
- 43 Han Z W, Zheng M Y, Kong F H. Simulation of hybrid heat pump systems with seasonal solar energy storage in the soil in severely cold regions (in Chinese). *Acta Energy Solar Sin*, 2008, 29: 574–580 [韩宗伟, 郑茂余, 孔凡红. 严寒地区太阳能-季节性土壤蓄热泵供暖系统的模拟研究. 太阳能学报, 2008, 29: 574–580]
- 44 Jan-Olof D C, Yu G Q. Application and design of large-scale solar heating systems in Europe (in Chinese). *Heat Vent Air Cond*, 2007, 37: 117–120 [Jan-Olof D C, 于国清. 欧洲大型太阳能供热系统的应用与设计. 暖通空调, 2007, 37: 117–120]
- 45 Schmidt T, Mangold D, Müller-Steinhagen H. Central solar heating plants with seasonal storage in Germany. *Sol Energy*, 2004, 76: 16–174
- 46 Shi W X. Development of the low temperature air source heat pump in Japan (in Chinese). *Heat Vent Air Cond*, 2008, 38: 26–34 [石文星. 低温热泵技术在日本的进展. 暖通空调, 2008, 38: 26–34]
- 47 Tian C Q, Shi W X, Wang S. Study of two-stage inverter air source heat pump used in cold regions (in Chinese). *Acta Energy Solar Sin*, 2004, 25: 388–393 [田长青, 石文星, 王森. 用于寒冷地区双级压缩变频空气源热泵的研究. 太阳能学报, 2004, 25: 388–393]
- 48 Han Z W, Li X T, Shi W X. Low temperature air source heat pump system combined with solar energy for cold areas (in Chinese). *Heat Vent Air Cond*, 2011, 41: 104–107 [韩宗伟, 李先庭, 石文星. 适用于寒冷地区的太阳能与低温空气源热泵复合空调系统. 暖通空调, 2011, 41: 104–107]
- 49 Han Z W, Li X T, Shi W X, et al. Simulation of operation characteristics of low temperature air source heat pump system combined with solar energy storage (in Chinese). *Acta Energy Solar Sin*, 2012, 33: 1411–1418 [韩宗伟, 李先庭, 石文星, 等. 太阳能蓄热与低温空气源热泵复合空调系统运行特性模拟研究. 太阳能学报, 2012, 33: 1411–1418]
- 50 Han Z W, Li X T, Shi W X, et al. Optimization design of low temperature air source heat pump system combined with solar energy storage (in Chinese). *Acta Energy Solar Sin*, 2012, 33: 1529–1535 [韩宗伟, 李先庭, 石文星, 等. 太阳能蓄热与低温空气源热泵复合空调系统优化设计. 太阳能学报, 2012, 33: 1529–1535]
- 51 Han L J, Shi W X, Wang B L, et al. Energy consumption model of integrated air conditioner with thermosyphon in mobile phone base station. *Int J Refrig*, 2014, 40: 1–10
- 52 Han L J, Shi W X, Wang B L, et al. Development of an integrated air conditioner with thermosyphon and the application in mobile phone base station. *Int J Refrig*, 2013, 36: 58–69
- 53 Wang B L, Zhou D H, Han L J, et al. A novel air conditioner with heat pipe function for year round space cooling. In: *Proceedings of the 23rd IIR International Congress of Refrigeration*. Prague, 2011
- 54 Zhang P L, Wang B L, Shi W X, et al. Simulation on energy performance of air-conditioning system assisted with thermosyphon used in telecommunication base station. In: *Proceedings of 13th Conference of the International Building Performance Simulation Association*. Chambéry, 2013
- 55 Shi W X, Han L J, Wang B L, et al. Principle of combined air conditioner by heat pipe and vapor-compression and its application analysis in high heat density space (in Chinese). *Refrig Air Cond*, 2011, 11: 1–4 [石文星, 韩林俊, 王宝龙, 等. 热管/蒸气压缩复合空调原理及其在高发热量空间的应用效果分析. 制冷与空调, 2011, 11: 1–4]
- 56 Zhang H N, Shao S Q, Xu H B, et al. Free cooling of data centers: A review. *Renew Sustainable Energy Rev*, 2014, 35: 171–182
- 57 Li X T, Zhang P L, Wang B L, et al. A year-round cooling system with condensation heat recovery in data centers (in Chinese). PRC Patent, ZL201320372204.9, 2013 [李先庭, 张朋磊, 王宝龙, 等. 一种带冷凝热回收的数据机房全年供冷空调系统. 中国专利, ZL201320372204.9, 2013]

Research progress of high-efficiency, low-temperature hot water systems

LI XianTing & WU Wei

Department of Building Science, School of Architecture, Tsinghua University, Beijing 100084, China

The energy used to heat urban buildings accounts for 27% of total building energy consumption in China. Current hot water production systems are mainly based on direct use of fossil fuels or electricity, which is of low primary energy efficiency and produces severe air pollution. Based on the principles of “high-grade energy as driving source, low-grade heat for low-temperature demand, and natural energy fully used”, we have developed various high-efficiency, low-temperature hot water systems, including: (1) a fuel-driven, air-source heat pump system that uses existing energy as the driving power of the air-source heat pump to extract additional heat from the ambient air, achieving energy saving rates of 20%–40% and payback times of 3–7 years; (2) a fuel-driven, water-source heat pump system that can use an absorption heat pump to relieve underground thermal imbalance and reduce the required number of boreholes and consumption of the conventional electric heat pump; (3) a hybrid ground-source heat pump system with heat compensation that can store ambient heat in the ground efficiently via heat thermosyphon and heat pump modes, maintaining excellent system performance in long-term operation; (4) a hybrid solar air-source heat pump system that can make full use of solar energy of varying intensities and ambient heat with different temperatures, so as to improve system efficiency and reduce the initial investment of a conventional solar heat pump or air-source heat pump; (5) a hybrid air-source heat pump system aided by seasonal energy storage that combines advantages of solar energy and ambient heat, with enhanced heating reliability and economic feasibility relative to the normal air-source heat pump; (6) a hot water system based on heat recovery from data centers, which uses an integrated air conditioner with heat thermosyphon and heat pump modes to collect waste heat in a water loop, from which a water-source heat pump extracts heat to produce low-temperature hot water with an energy saving rate of 60%. All the above proposed hot water systems are assessed to have high energy efficiency, heating reliability and economy feasibility, which should be important in energy savings and emission reduction within the building sector.

low-temperature hot water, building energy efficiency, natural energy, heat pump, energy storage, heat recovery

doi: 10.1360/N972015-00063