



污水源热泵空调系统污水侧取水、除污和换热技术研究进展

大连理工大学 张吉礼[☆] 马良栋

摘要 系统地综述了污水源热泵空调技术在北欧、日本和我国的发展过程,介绍了国外污水源热泵空调技术污水取水及换热技术的最新进展和发展趋势,总结了我国污水源热泵空调技术的特色,分析了污水源热泵空调技术在实际应用中存在的问题,指出了污水换热器污水侧除污与强化换热是目前迫切需要解决的关键问题。

关键词 污水源热泵 取水 除污 污水换热

Study progress in intaking water, defouling and heat transfer in sewage water source heat pump air conditioning systems

By Zhang Jili[★] and Ma Liangdong

Abstract Gives an overview of the developing processes of sewage water source heat pump air conditioning systems in north European countries, Japan and China, presents the most recent progress and developing trends in the related technologies, summarizes the technology characteristics in China, analyses the current problems in engineering application and points out that defouling and heat transfer enhancement are the key technology problems to be solved.

Keywords sewage water source heat pump, intaking water, defouling, heat transfer of sewage water

★ Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning Province, China

①

0 引言

城市污水是一种蕴涵丰富低位热能的可再生能源资源^[1-9],在中国、日本,特别是北欧的一些国家已经得到一定程度的应用^[1-5,10-14]。污水源热泵空调技术是以城市污水为建筑供热源和排热汇来解决建筑物冬季供暖、夏季空调和全年热水供应的重要技术^[1-3,10-13]。污水源热泵空调系统具有明显的节能减排效果,是城市污水资源化开发利用的新思路和有效途径。

在节能方面,首先表现在一次能源利用效率上。由于城市污水比室外空气、地下/地表水、土壤、海水等更有利于减小热泵制冷热力循环温区,因而污水源热泵空调系统的制热和制冷性能都好于其他热泵系统^[12,15]。与电制冷加燃煤锅炉、直燃机、燃气加风冷空调等建筑冷热源形式相比,污水源热泵空调具有节能效果好、运行费用低的优点^[16-20]。如日本东京 Koraku 1-chome 污水源热泵空调系统的制热性能比空气源热泵和水源热泵空调系统提高了 60%,比空气源热泵节电 20%^[2];

哈尔滨地区污水源热泵空调系统的一次能源利用率比燃气直燃机组高 36.3%、比燃煤锅炉加电制冷机组高 58.9%,年运行费用低 10%以上,系统的初投资分别是直燃机和燃煤锅炉加电制冷的 88.5%和 82%^[20]。其次,污水源热泵空调系统不需要常规空调冷却塔,从而节省了大量的冷却水资源。另外,污水源热泵空调系统在对建筑物实现冬季供暖、夏季供冷的同时,还可以替代现有电热水器、燃油燃气锅炉和燃煤锅炉全年向建筑物提供生活热水,降低热水供应能耗。

在减排方面,首先表现在污水源热泵空调技术具有显著的减少大气污染物、温室气体排放量的环境效益。日本学者的研究结果表明,污水源热泵空调系统较空气源热泵空调机组可以减少 68%的

①☆ 张吉礼,男,1969 年 10 月生,博士研究生,博士,教授
116024 大连市凌工路 2 号大连理工大学土木水利学院
(0411) 84707753
E-mail: zhangjili@hit.edu.cn
收稿日期:2008-10-16
修回日期:2009-06-06

CO₂ 排放量和 75% 的 NO_x 排放量^[14], 哈尔滨地区污水源热泵空调系统的 CO₂ 排放量约是燃煤锅炉加电制冷的 49.9%^[20]。其次, 污水源热泵空调技术在夏季具有较好的建筑物废热减排效果。夏季, 大量的建筑内部废热通过不同的形式排向室外环境, 加剧了城市热岛效应。城市热岛效应不仅恶化了城市环境, 而且反过来又增大建筑空调负荷和空调耗电量^[21-22]。污水源热泵空调系统在夏季可以将大量的建筑内部废热直接排放到城市污水中, 而不是通过冷却塔或空调室外机组排放到室外环境中, 具有显著降低城市热岛效应的废热减排效果。

因此, 开发利用城市污水低位热能资源, 降低建筑冬季供暖、夏季空调和生活热水供应对矿物燃料资源的消耗, 对促进我国建设节约型社会、节约能源、保护环境具有重要的社会发展意义, 对促进人与建筑、人与城市环境、建筑与环境的和谐并存和可持续发展具有重要的建筑科学学术发展意义。

1 北欧污水源热泵空调污水取水换热技术进展分析

瑞典是最早利用污水源热泵进行城市区域供热的国家。1981 年 6 月, 世界上第一个污水源热泵系统在斯德哥尔摩 Sala 镇投入运行^[1], 该系统采用污水热能直接提取方式, 城市污水经净化后喷淋到管束式蒸发器上^[10], 污水在管外与管内工质直接换热, 没有中介水系统。随后, 10 余套大型污水源热泵系统在瑞典投入运行, 到 1986 年, 瑞典该类热泵系统的总装机容量已达到 541.3 MW^[10]。

1983 年, 挪威的第一个城市污水源热泵系统在奥斯陆 Skøyen Vest 投入运行, 热泵站容量为 8~9 MW^[10, 23]。该系统采用污水热能直接提取方式, 其系统原理图见图 1。城市污水经过缝宽为 2 mm 的旋转式筛分器过滤后, 由粗孔喷嘴直接喷淋

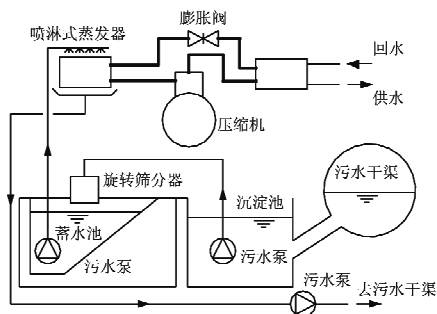


图 1 具有筛分器和喷淋蒸发器的直接取水式污水源热泵系统原理图^[24]

到开式板式蒸发器上^[23-24]。2006 年 1 月, 奥斯陆完成了 Skøyen Vest 污水源热泵系统的改造, 图 2 为该系统的原理图。新系统安装了缝宽为 3 mm 的格栅式传送带, 用于过滤原生污水中的污染物。通过四通换向阀改变换热管内污水的流向以防止换热管堵塞和污垢沉积^[23]。该系统是目前规模较大、污水取水换热技术较先进的污水源热泵系统。此外, 污水源热泵技术在瑞士、德国、芬兰和荷兰等国家也有不同程度的应用^[24-25]。

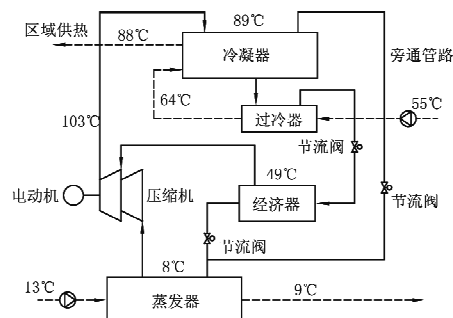


图 2 改造后的奥斯陆 Skøyen Vest 污水源热泵系统原理图^[23]

从污水源热泵系统的规模看, 北欧国家主要发展大型污水源热泵站, 其供热规模总量目前在国际上处于绝对领先地位。从污水热能提取方式看, 北欧国家以直接提取方式为主, 污水热能输送能耗低。从换热设备防堵塞技术看, 北欧国家早期主要采用机械过滤(或筛分器)和沉淀技术, 近几年格栅式传送带和四通换向反冲洗技术在大型污水源热泵中得到了应用。从污水换热设备形式看, 随着污水防堵塞技术的成熟, 大型壳管式污水换热器的应用越来越多, 并成为主导换热器形式。

2 日本污水源热泵空调污水取水换热技术进展分析

日本是利用城市污水热能较早的国家, 1987 年东京大区污水管理局启动了污水热能开发利用计划^[12], 系统总供热量为 8.94 MW, 供冷量为 11.64 MW^[5]。在此项计划中, 日本的污水源热泵技术在国际上取得了突破性进展, 提出了有别于北欧国家、专门针对城市污水水质特点的城市污水取水换热技术。

首先, 日本开发了污水自动清污过滤器^[5], 如图 3 所示。该设备主要由筒状旋转滤筛、刮刷、驱动电动机和排污阀等部件组成。筒状滤筛用于过滤污水中的杂质, 电动机带动滤筛旋转, 挂在滤筛

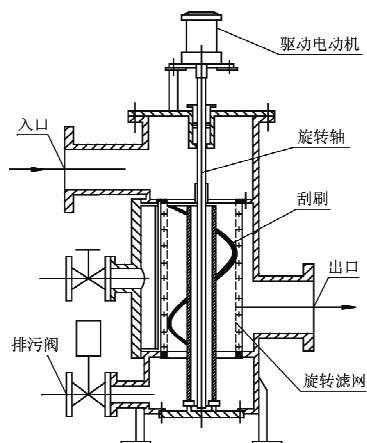


图3 自动清污过滤器

上的污染物被刮刷清除,然后被反冲排回污水干渠,实现污水取水除污过程的连续稳定运行。其次,日本开发了专门用于污水换热的污水换热器和自动清洗系统^[5],如图4所示。污水换热器的换热

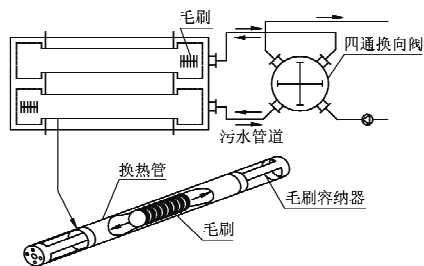


图4 污水换热器及其自动清洗系统

管不同于普通壳管式换热器的换热管,其内置有滑动毛刷,两端设有毛刷容纳管,毛刷在水流换向时沿管内壁往复滑动,达到清除换热管内壁污物的作用。为改变污水的流向,日本发明了四通换向阀。需要说明的是,日本发明的四通换向反冲洗除污技术比北欧国家早15年以上。结合上述技术,日本提出了污水热能直接提取式污水源热泵系统,并于1987年首次在东京Ochiai污水处理厂的污水源热泵系统中使用,运行效果良好。该系统制冷COP达到4.65,供热COP为3.59。另外,污水热能间接提取技术在日本也有应用,1995年投入运行的东京Koraku 1-chome污水源热泵区域供热供冷系统即采用了该技术方式^[2]。该系统采用开式自动旋筛过滤器过滤原生污水中的污染物,如图5所示。自动旋筛过滤器由旋转筛滤筒、刮刀、反冲洗喷嘴、电动机、污水入口、污水出口、排污口和壳体构成。该设备可以实现连续稳定过滤污水和滤面

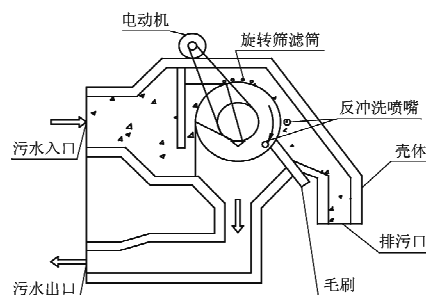


图5 自动旋筛过滤器

清洗再生,保证了后端热泵机组运行的稳定性。Koraku 1-chome污水源热泵系统制冷COP为4.3,制热COP为3.9,性能远好于空气源和普通水源热泵系统。

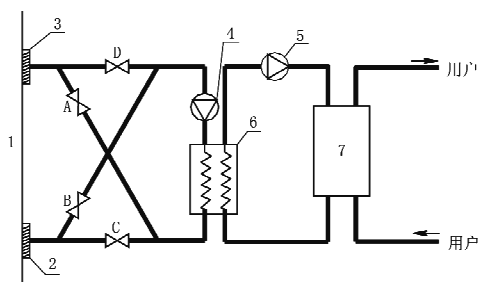
与北欧相比,日本污水源热泵技术突出的特点在于针对城市原生污水在堵塞和换热过程中的特殊性,开发了闭式污水自动清污过滤器和开式自动旋筛过滤器,开发了内置滑动毛刷的、能够实现换热管内污水流向自动换向功能的自动清洗污水换热器,解决了因污水中的污染物在换热管内沉积而带来换热器换热效率降低的问题,提高了污水换热器的换热效率。

北欧和日本污水源热泵技术的发展和给应用给人们提供了极具参考价值和启发性的污水取水换热过程理论研究和相关技术开发的新思路、新方向 and 有效途径,表明了污水换热器换热管除污和强化换热是污水源热泵技术需要进一步研究和解决的关键问题。

3 我国污水源热泵空调污水取水换热技术进展分析

我国学者早在20世纪80年代末就开始关注国外污水源热泵技术的研究与应用进展。马最良等人分析了工业污水源热泵在不同地区的节能效果^[26]。我国首例城市污水源热泵系统到2000年才在北京高碑店污水处理厂示范成功^[10-11]。青岛某酒店于2003年进行了原生污水水源热泵尝试,原理如图6所示,利用A~D 4个阀门来实现对过滤面的反冲洗。由于污水杂质浓度很高,所要求的反冲洗周期很短,阀门切换时间无法满足反冲洗要求,所以此系统应用效果不理想。

图7为目前大连华峰化工公司采用的污水过滤器,电动机带动旋转椭圆管转动,污水进入腔体内由孔板过滤,孔板上的污染物在旋转椭圆管的作



1 污水干渠 2, 3 过滤格栅 4 污水泵 5 中介水循环泵
6 污水换热器 7 热泵机组 A~D 反冲洗切换阀门

图 6 双滤面交替反冲洗污水取水系统原理图

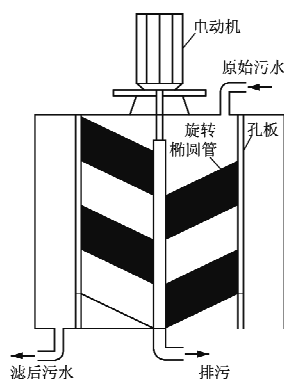
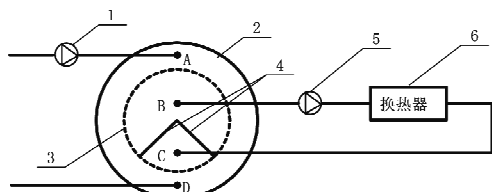


图 7 大连华峰化工公司污水过滤器原理图

用下由排污孔排除。在实际运行过程中,此系统旋转椭圆管与孔板之间有一定的间隙,长时间运行后在腔体内会沉积大量的污物,同时污水的排污量较大。

真正对我国城市污水源热泵空调技术的应用和发展起到重大推动作用的研究,是哈尔滨工业大学孙德兴的科研团队完成的。他们提出了城市原生污水热能资源化工艺与技术,利用旋转滤面连续再生技术开发了闭式污水取水装置^[19],其原理图如图 8 所示。该技术最早于 2003 年 9 月应用于哈尔滨望江宾馆^[27]。目前,已在哈尔滨、大庆、北京、天津等多个城市获得了成功的应用,取得了很好的节能环保效果。



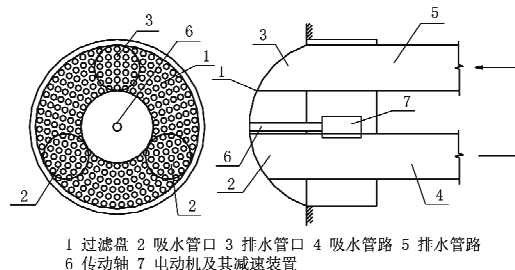
1 一级污水泵 2 外壳 3 旋转滤网 4 内挡板 5 二级污水泵 6 污水换热器

图 8 闭式滤面连续再生污水取水系统原理图^[19]

在理论研究方面,吴荣华等人以污水换热器为

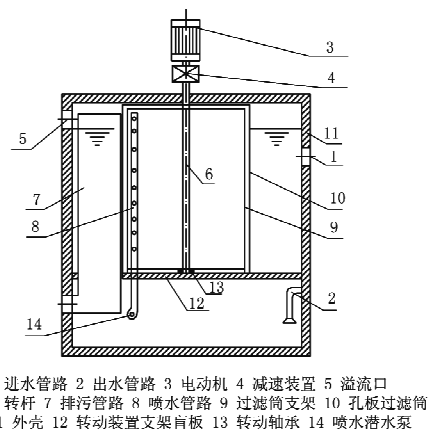
对象,连续测试分析了原生污水在换热器中的流动阻塞特性,分析了污水污泥对换热器污染变化过程及其对污水换热器设计的影响;指出原生污水流动换热效果很差,且受污水流速的影响很小,原生污水流动具有非牛顿特性,常规的换热准则不适用于污水^[18]。从设计和运行的角度,吴荣华等人研究了该系统制热和制冷工况下的运行参数,评价了系统的运行效率^[27],研究了双级污水泵的运行调节特性^[28]。针对污水厂二级污水,姚杨等人提出了基于淋激式换热器的污水源热泵系统,完成了淋激式换热器的结构设计、热泵系统关键设备设计和淋激式换热器污垢热阻变化对热泵系统性能影响的仿真分析等^[29-31]。

毕海洋开发了旋转板式自动除污取水装置和旋转筒式自动除污取水装置^[32]。如图 9 所示,旋转板式自动除污取水装置采用了锥体或球冠形孔板过滤盘和与之配合的斜口椭圆形吸水管口和排水管口,避免了取水装置中吸、排水管口处的污水短路问题。而图 10 所示的旋转筒式自动除污取水装置依靠重力取水,避免了吸、排水管口处的低位冷热源短路问题^[32]。为提高污水源热泵系统的污水换热效率,毕海洋提出了如图 11 所示的污水换



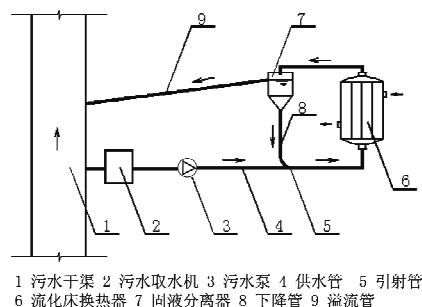
1 过滤盘 2 吸水管口 3 排水管口 4 吸水管路 5 排水管路
6 传动轴 7 电动机及其减速装置

图 9 旋转板式自动除污取水装置^[32]



1 进水管路 2 出水管路 3 电动机 4 减速装置 5 溢流口
6 转杆 7 排污管路 8 喷水管路 9 过滤筒支架 10 孔板过滤筒
11 外壳 12 转动装置支架板 13 转动轴承 14 喷水潜水泵

图 10 旋转筒式自动除污取水装置^[32]

图 11 流化除垢与强化换热系统原理图^[32]

热过程流化除垢与强化换热方法,利用小球在换热器中与换热管壁的碰撞作用,实现对管壁的除垢和强化换热;研究了小尺度污染物在换热过程中的污垢形成机理及其对换热性能的影响,试验研究了流化强化换热的效果,为污水源热泵系统污水防垢和强化换热提供了新思路^[32]。

笔者针对现有污水取水机存在的内泄漏问题,提出了开式循环集成式污水取水技术,开发了如图 12 所示的开式循环集成式污水取水装置。该装置能在常压下运行,降低了材料强度要求,材料选择范围广;设备自身阻力损失小,降低了污水潜水泵与污水循环泵扬程,降低了取水运行能耗;无动密封与泄漏问题,设备简单,易于加工。此装置既适用于污水热能间接提取取水系统,也适用于污水热能直接提取取水系统。笔者对壳管式污水换热器管内污泥污垢生长特性和除污强化换热方法进行了试验研究,建立了热阻法冷凝换热管内污垢生长特性试验台,试验研究了污水换热管污泥污垢生长

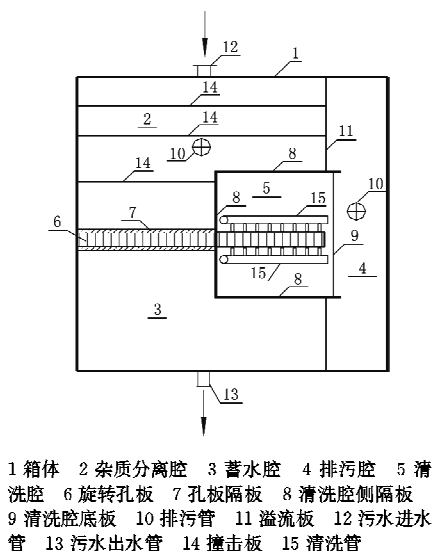


图 12 开式循环集成式污水取水装置

特性曲线,研究表明,新的换热管连续运行 190 h 左右后,其污泥污垢热阻即达到最大值,需要对管内污水侧进行清洗除污^[33]。为实现管内自动除污,笔者提出了能够与壳管式换热器一体化的旋转四通换向阀^[34],如图 13 所示,实现了换热管内污水流向的自动换向,试验研究了不同反冲洗流速下的反冲洗除污效果^[33],并提出了污水换热管内置弹簧除污方法,如图 14 所示,试验研究了该方法的除污特性,目前已有产品应用于天津某原生污水源热泵系统中。



图 13 旋转四通换向阀

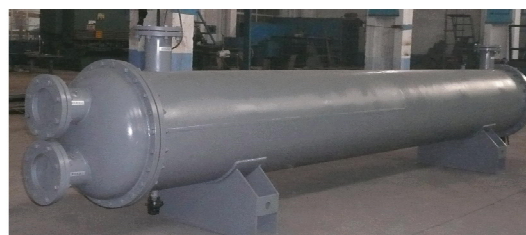


图 14 内置弹簧清污器的污水壳管式换热器

4 问题分析与结语

污水取水和换热是污水源热泵空调系统的关键技术。在污水取水技术方面,虽然成功地解决了城市原生污水和污水厂二级处理污水的取水问题,但在实际应用中仍存在一些问題,主要表现在:1) 对于闭式的污水取水系统,取水设备承压高,污水输送能耗高。污水处理仅采用单一的过滤方式,滤面过滤负荷大。取水设备需要多处动密封,导致加工、检修维护难度大。2) 存在内泄漏,由于刮板与过滤断面之间存在间隙,因此过滤后经换热设备换热后的反冲水会通过间隙渗漏到原始污水中,导致原始污水的温度升高或降低。图 15 和图 16 分别给出了热泵机组入口温度和机组性能系数随内泄漏量的变化,从图中可以看出,无论是冬季供热还是夏季供冷,随内泄漏量的增大,机组的 COP 明显下降。

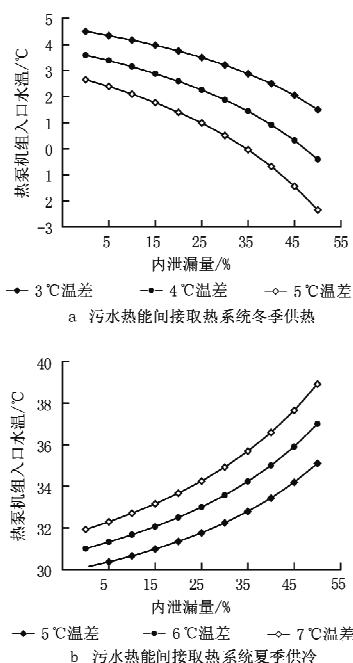


图 15 热泵机组入口温度随内泄漏量的变化

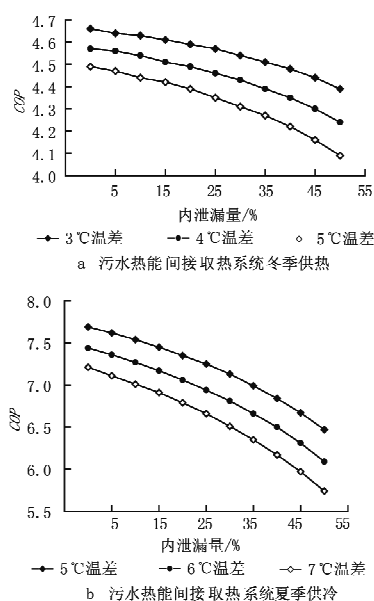


图 16 机组性能系数随内泄漏量的变化

在污水换热技术方面,我国的研究刚刚起步,许多问题亟待解决。首先,污水换热器结构设计时只能进行估算,通常取污水的黏度为清水的 10 倍以上^[18]。其次,污水中小尺度污染物浓度高,换热管内外表面极易沉积形成黏性污泥层,1 台新的污水换热器运行 1 周后污泥层热阻就会达到最大值,此时在换热管及强化换热技术方面所做的任何努力都毫无意义。第三,从国内外现有强化换热技术看,污水侧换热管内置毛刷和弹簧的清污方法尽管

提高了污水换热效率,但也存在内置物易被污泥粘住和换热管路堵塞的问题。第四,从污水源热泵技术发展过程中人们的工作重点看,人们普遍重视该技术工程应用类问题的研究和开发,而对污水取水换热过程中污水流动特性、污泥污垢生长和去除、污水换热和强化换热等关键基础性问题的研究重视不够,仅处于起步阶段,而该类问题的研究和解决才是解决上述工程应用问题的前提和基础。

另外,从某系统 3 年的运行结果看,该系统污水和中介水之间的实际运行温差高达 15 °C 以上,远远高于污水换热器设计温差,直接影响了污水源热泵系统的实际运行能效。即污水取水换热过程中的内泄漏问题和污水换热过程中的污水侧污垢热阻问题,将可能使污水源热泵这一节能技术在实际运行中不节能,在夏季的运行能耗还可能高于冷却塔空调系统(当运行不当使中介水温度高于当地湿球温度时,便会出现此问题)。

因此,在污水取水技术方面,针对现有技术的不足,有必要开发新的取水技术以避免内泄漏等因素对热泵机组性能的不利影响。在污水换热技术方面,污水换热器污水侧除污与强化换热是目前污水源热泵技术迫切需要解决的关键问题,它直接关系到污水源热泵空调系统全年运行能耗的高低以及该项技术的实际节能效果。

参考文献:

- [1] Lindström H O. Experiences with a 3.3 MW heat pump using sewage water as heat source[J]. Journal of Heat Recovery Systems, 1985, 5(1):33-38
- [2] First DHC system in Japan using untreated sewage as a heat source[OL]. <http://gasunie.eldoc.ub.rug.nl/root/1997/2039648/>
- [3] Arashi Norio, Inaba Atsushi. Evaluation of energy use in district heating and cooling plant using sewage and one using air as heat source[J]. Journal of the Japan Institute of Energy, 2000, 79(5): 446-454
- [4] Yoshii T. Technology for utilizing unused low temperature difference energy[J]. Journal of the Japan Institute of Energy, 2001, 80(8): 696-706
- [5] Funamizu N, Iida M, Sakakura Y. Reuse of heat energy in waste water; implementation examples in Japan[J]. Water Science and Technology, 2001, 43(10): 277-286
- [6] 尹军, 韦新东. 我国城市污水中可利用热能状况初探[J]. 中国给水排水, 2001, 17(4): 27-30

- [7] 王宏哲,伊均. 城市污水热能回收与利用发展状况、评价和意义[J]. 中国环境管理,2001,19(5):21-23
- [8] 冯彦刚. 城市污水资源化的研究[D]. 北京:北京工业大学,2002
- [9] 尹军,陈雷,王鹤立. 城市污水的资源再生及热能回收利用[M]. 北京:化学工业出版社,2003
- [10] 马最良,姚杨,赵丽莹. 污水源热泵系统的应用前景[J]. 中国给水排水,2003,19(7):41-43
- [11] 吴荣华,孙德兴,张成虎,等. 城市污水源热泵的应用与研究现状[J]. 哈尔滨工业大学学报,2006,38(8):1326-1329
- [12] 周文忠,李建兴,涂光备. 污水源热泵系统和污水冷热能利用前景分析[J]. 暖通空调,2004,34(8):25-29
- [13] 黄国琦. 城市污水源热泵的开发和应用[J]. 流体机械,2005,33(6):76-38
- [14] Baek N C, Shin U C, Yoon J H. A study on the design and analysis of a heat pump heating system using waste water as a heat source[J]. Solar Energy, 2005, 78(3): 427-440
- [15] 吴荣华,刘志斌,黄磊,等. 污水及地表水地源热泵系统规范化设计研究[J]. 暖通空调,2006,36(12):63-69
- [16] Reduced fouling of sewage water heat pumps[OL]. <http://gasunie.eldoc.ub.rug.nl/root/1997/2039648/>
- [17] 周文忠. 污水源热泵空调系统在污水处理厂的应用[J]. 暖通空调,2005,35(1):83-86
- [18] 吴荣华,孙德兴,张成虎,等. 热泵冷热源城市原生污水的流动阻塞与换热特性[J]. 暖通空调,2005,35(2):86-88
- [19] 吕监,冯彦刚. 城市污水低位热能回收利用的研究[J]. 工业用水与废水,2002,33(1):10-12
- [20] 吴学慧,孙德兴. 城市原生污水源热泵经济性分析[J]. 暖通空调,2007,37(11):36-39
- [21] 魏真真,张瑞波,耿庆龙,等. 城市热岛效应研究进展[J]. 新疆师范大学学报,2007,26(3):232-235
- [22] Hassid S, Santamouris M. The effect of the athens heat island on air conditioning load [J]. Energy and Buildings, 2000, 32(2): 131-141
- [23] Svein Erik Pedersen, Jörn Stene. 18 MW heat pump system in Norway utilizes untreated sewage as heat source [J]. IEA Heat Pump Centre Newsletter, 2006, 24(4): 37-38
- [24] 徐邦裕,陆亚俊,马最良. 热泵[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1988
- [25] Energy from sewage water—district heating and district cooling in Sandvika, with 2 Unitop® 28C Heat Pump Units[OL]. http://www.friotherm.com/downloads/sandvika_eoo5_uk.pdf
- [26] 马最良,刘永红. 热泵站的现状及在我国应用的前景[J]. 暖通空调,1994,24(5):6-10
- [27] 吴荣华,张成虎,孙德兴. 城市原生污水源热泵系统运行工况与参数特性[J]. 流体机械,2005,33(11):73-76
- [28] 张成虎,吴荣华,刘志斌,等. 污水源热泵系统双级水泵运行特性研究[J]. 哈尔滨工业大学学报,2007,39(10):1601-1605
- [29] 姚杨,宋艳,那威. 污水源热泵系统中多级淋激式换热器的设计与分析[J]. 暖通空调,2007,37(3):63-67
- [30] 姚杨,马最良,赵丽莹. 污水源热泵系统的设计计算[J]. 煤气与热力,2005,25(2):39-42
- [31] 姚杨,宋艳,那威. 污垢对污水源热泵系统性能影响[J]. 哈尔滨工业大学学报,2007,39(4):599-603
- [32] 毕海洋. 污水源热泵系统取水换热过程流化除垢与强化换热方法[D]. 大连:大连理工大学,2007
- [33] 曹达君. 壳管换热器管内污垢生长及旋转转向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006
- [34] 张吉礼. 旋转四通换向阀:中国,2005100099465[P]. 2005-08-12

(上接第 21 页)

参考文献:

- [1] ISO. ISO 7730 Moderate thermal environment—determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort [S]. Geneva: International Standard Organization, 1984
- [2] 刘成明. 青藏高原地区人口、资源、环境与可持续发展[J]. 青海社会科学,2003(1):39-42
- [3] 陈信,袁修干. 人-机-环境系统工程生理学基础[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2000:43-45
- [4] 王昭俊. 严寒地区居室热环境与热舒适性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2002
- [5] Dedear R J, Brager G S. Developing an adaptive model of thermal comfort and preference [G] // ASHRAE Trans,1998,104(1):145-167
- [6] Cena K, Dedear R J. Field study MTS of occupant comfort and office thermal environments in a hot, arid climate [G] // ASHRAE Trans, 1999, 105(2): 204-217
- [7] 范格. 舒适[M]. 李天麟,曹俊周,黄海潮,译. 北京:北京科学技术出版社,1992