

# 利用冷水凝固热的热泵系统与装置<sup>\*</sup>

哈尔滨工业大学 孙德兴<sup>☆</sup> 张承虎 吴荣华 钱剑峰

**摘要** 指出在冬季寒冷地区接近 0℃ 的地表水以及城市污水中,存在着大量可供利用的凝固潜热。研究了利用冷水凝固热的热泵技术。计算结果表明,热泵可以在经济、可行的前提下大量利用冷水凝固热,作为建筑的低温供暖热源。

**关键词** 冷水 凝固热 热泵 低温供暖

## Heat pump systems and equipment exploiting freezing heat from cold water

By Sun Dexing<sup>★</sup>, Zhang Chenghu, Wu Ronghua and Qian Jianfeng

**Abstract** Points out that a plenty of freezing heat exist in urban sewage and surface waters close to the freezing point in winter. Studies the heat pump systems exploiting the freezing heat. Calculation results show that by the heat pump technology, the freezing heat can be used economically and practicably, and therefore be taken as a low temperature heating source for buildings.

**Keywords** cold water, freezing heat, heat pump, low temperature heating

★ Harbin Institute of Technology, Harbin, China

### ① 1 利用冷水凝固热的重要意义

众所周知,水源热泵用于建筑物的供暖与空调是一种既节能又环保的设备。拿采用火电驱动的水源热泵来说,虽然发电时的能源利用效率仅为 0.33 左右,但由于热泵效率为 4 左右,因此用于供暖时总的能源利用效率可达 1.33。比较起来,燃煤供热因锅炉效率低、热能输送损失大,其综合效率仅为 0.6 左右。因此,使用火电驱动的水源热泵供热比燃煤锅炉供热可节能(或节煤)55%。如果认为电力是由水力得到的,则整个过程与矿物燃料无关<sup>[1-2]</sup>。

电力驱动的水源热泵是一项成熟的技术,但多年来受水源问题制约而未获广泛应用。事实上,自然界很少有现成可用的水源。

浅层地下水地源热泵的应用遇到三个问题,一是针对具体的工程常常没有现成的水文地质资料,在是否一定有水这个关键问题上,方案确定与开工建设都不可避免地带有盲目性;二是会引发地下水资源被过度开采、地面沉降等水文地质问题,后果如何,争议很大;三是高昂的打井与回灌费用。地源热泵可被看作是变相的地下水地源热泵,由于高昂的建设费用和平衡温度是否合适等问题,该热源的应用也非易事<sup>[3]</sup>。

近年来笔者研究的城市原生污水热能采集技术为水源热泵的发展开辟了一条新路。实际工程已经证明,城市原生污水源热泵系统技术可靠、可

①☆ 孙德兴,男,1942 年 2 月生,工学博士,教授,博士生导师  
150090 哈尔滨工业大学市政环境工程学院  
(0451) 86282343  
E-mail: sundex031122@sina.com  
收稿日期:2006-02-27

\* 国家自然科学基金资助项目(编号:50578048),北京市供热、供燃气、通风及空调工程重点实验室开放课题(编号:KF200503)

行且经济<sup>[3-4]</sup>。研究成果中关于解决劣质水堵塞换热设备的问题的技术可以用于处理江、河、湖水<sup>[5-6]</sup>。

然而,在利用这些水源的过程中,笔者经常遇到水源温度过低,或者水量不足的问题。在制订城市原生污水水源热泵系统的方案时,由于目前还不能令污水直接进入蒸发器,须经中介水换热,而中介水受冰点限制,故根据一般建筑的热负荷和污水原始温度,每万 m<sup>2</sup> 建筑约需污水量 80 t/h 以上,一般而言,平均 7~10 栋建筑物排放的污水中所含可利用热能仅够一栋建筑供暖用<sup>[7-8]</sup>。因此,很多想采用污水源热泵系统的建筑因附近找不到足量的污水水源而抱憾放弃;打算采用江、河、湖水的水源热泵工程方案,则会遇到冬季水温过低的问题。我国中原及以北地区江河的水面在冬季是封冻的,冰面以下的水接近 0℃。由于在冰点以上已没有降温取热空间,这类水中的热能采用传统方法提取已有使用价值。

笔者于 2005 年 12 月底组织调查,得到了我国冬季地表水的水温资料(尚不够完整),见表 1。

表 1 我国部分地区地表水冬季最低水温

	地面水体	水温/℃
天津	海河 4 m 深处	2
北京	护城河 1.5 m 深处	2
西安	泾河 2 m 深处	4.5
上海	西沟河 3.5 m 深处	4
上海	黄浦江江边	5
杭州	护城河与京杭大运河 4 m 深处	5
南京	秦淮河 2 m 深处	4.5

表 1 中数据表明,这些天然水体的温度在冬季最冷时段都已接近 0℃。受冰点的限制,如果说 4~5℃ 的水采用大流量的方法勉强还可用来提取一点显热的话,从 2℃ 的水中提取显热就不再具有工程上的可行性。

这些情况引发了提取冷水凝固热的需求。1 kg 水结冰时释放的凝固热为 335 kJ(80 kcal),而 1 kg 水降温 1℃ 才可获取 4.19 kJ(1 kcal)热量。若能开发出提取冷水凝固热的热泵机组,则我国广大地区包括东北、西北严寒地区在冬季就有了取之不尽、用之不竭的水源热源,所有天然水体封冻表面以下的水全都可以成为水源热泵的热源。在采用城市污水作热源时,将不再存在建筑物附近水量不足的问题。用提取凝固热的方法,该楼排放污水中

所含的热能将可绰绰有余地用于本栋楼供暖。

如果提取冷水凝固热的技术成熟,用水源热泵取代燃煤为建筑物供热,在水源方面将不再存在量的问题。

## 2 相关技术的现状

在令水结冰提取凝固热的过程中,水体最低温度部位总是位于换热表面上,因此用冻冰法采集冷水凝固热的关键是如何在满足经济效益的情况下使结的冰不在换热表面上固结或者固结后及时从换热面上被剥离<sup>[9-10]</sup>;还有一个问题是如何无堵塞地在管道中输运冰水<sup>[11-13]</sup>。

在冰蓄冷空调的工程实际中已有一些相近的技术被研究或应用。这些技术的直接目的是制冰,然后利用冰中的冷量去冷却房间。制冰方法可分为表面法与体积法两种<sup>[14]</sup>,即令水在换热表面上冻结或在空间产生,后者制出的是冰絮或冰浆,即所谓流体冰。表面法中比较成熟的是球体蓄冰与盘管蓄冰两种,盘管蓄冰又可分为内蓄冰与外蓄冰。随着冷量的储存与释放,这些金属壁面上交替进行冻冰与融冰两个过程<sup>[15]</sup>。显然,此类技术不能满足连续从水中提取凝固热的要求。目前制取流体冰(冰浆)的方法包括 5 种:1) 机械刮削的方法<sup>[16-17]</sup>。据文献记载,目前该方法只能用于海水,采用套管结构,环空间为制冷剂,内管中有机械刮板快速转动,以避免海水析出的冰晶颗粒冻结到管壁上。该方法目前没有解决好冰筒数量少时换热器体积过大或冰筒数量多时设备复杂的问题,故目前此种方法还不能满足从淡水中提取凝固热的要求。2) 直接用水作制冷剂,在压缩制冷过程中形成冰浆的方法<sup>[18]</sup>。令水质很差的天然水直接参与压缩制冷显然是不行的,故该方法也不能用来提取天然水中的凝固热。3) 过冷水动态制冰的方法<sup>[19-22]</sup>。仅为提出的一个设想,研究如何过冷而不在壁面上冻结,且达到可靠运行,但这是难以实现的。4) 采用低于 0℃ 且与水不相溶的溶液与水混合,令水在空间而不是在壁面上结冰的方法<sup>[16-23]</sup>。但目前还没有找到合适的溶液,另外水在溶液中的雾化和热、质交换问题也很复杂。对于获取水质较差或很差的天然水中的大量凝固热,该方法显然难以成功。5) 利用流化床换热器的方法<sup>[24]</sup>。

## 3 冷水结冰释热的三个新方法

为可靠并经济地从水质较差或很差的天然水

体中提取凝固热,笔者研究了三个新方法,相关的设计计算、图纸及数据等分别记述在下列三个已申请的专利中:1)发明专利,冷水凝固热的采集装置(申请号:200610009616.0);2)发明专利,基于壁面弹性变形剥冰提取凝固潜热制取流体冰的方法(申请号:200610009618.X);3)发明专利,利用低位热源供水显热进行除霜的凝固潜热型热泵(申请号:200610009617.5)。

第一个专利为笔者设计的实用的机械刮冰装置,其创新之处在于新的冰刮削方式和联合传动方式,减少单个冰桶体积,增加并联冰桶数量。该装置的核心部件为圆管、螺旋状刮冰板和联合传动装置,通过螺旋刮冰板的旋转将管内壁面上结的冰刮下来。设计计算的主要内容为:1)结冰的换热温差,结冰换热量,所需换热面积以及所需的管径、管长和管的根数。2)刮冰耗功。为降低刮冰的耗功,确定优化的管径(与刮冰力矩成正比)及螺旋刮冰板的转数,其中管径与所需的换热面积相关。3)诸多换热管的排列方法,水与制冷剂空间的布置及它们之间的隔绝方式。4)各根管中螺旋刮冰板旋转的驱动方法及它们之间的联动问题。

设计计算表明,刮冰的耗功仅为所获取冷凝热的1%以下,冰水混合流体中冰的体积比可保持在5%以内,能确保流动过程无堵塞发生。管外的制冷剂采用乙二醇水溶液,温度控制在 $-4.5\sim-1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。蒸发温度为 $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。

第二个专利为笔者提出的一个将冰从壁面上剥离的新思路与新方法。令换热壁面缓慢地、间歇或连续地弹性变形,当壁面上结的冰达到一定的厚度时,它们将因壁面的变形而产生脆裂,并可在水流、气流、重力、浮力等的作用下从壁面上脱落至水中。设计计算表明,虽然过程中冰层始终有一定的厚度,但其导热热阻在传热的总热阻中仍只占一个较小的比例。已经开发出多种变形剥冰的系统形式,实验数据表明该方法切实可行,经济可靠。可弹性变形换热面的一个实例为螺旋形弹簧管,用机械力令其缓慢地弹性变形,耗功很少,不构成附加的能耗问题。弹性变形类换热(蒸发)器不仅可应用于凝固潜热型热泵中,也可以应用于冰蓄冷和食品冷藏中。

第三个专利为笔者开发的一种新的类空气源凝固潜热型热泵。将热源水喷射成雾滴状至温度

为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下的空气流中,将这些雾滴状的水冷凝成冰粒;该空气流是在喷雾结冰室与机组蒸发器之间循环流动并不断被蒸发器取走热量而保持低温的。含冰粒的空气流在离开喷雾结冰室时,其中的大部分冰粒通过惯性力和分离装置被分离到热源的回水中。含有剩余冰粒并且相对湿度接近100%的空气流进入蒸发器被冷却以保持低温。可以想见,在这样的空气流被冷却时,蒸发器的金属表面一定会严重结霜。由于流体冰的流动性受限于冰晶浓度,即冰晶浓度小于30%,而且凝固潜热型热泵的热量主要来自冰晶的凝固放热,因此为解决除霜问题,该专利的办法是设两个蒸发器交替工作,在一个蒸发器冷却空气流的同时,另一个蒸发器内停止制冷剂的供应,并使用其余70%(或部分)热源供水除霜,除霜之后再用空气进行表面风干。该方法充分利用了系统自身的固有资源,能耗小,运行可靠。

#### 4 系统方面的问题

4.1 上述三个方法中,第一、二种方法目前尚无法实现用制冷剂直接与热源水进行换热,原因是这些结构都比较复杂,无法保证制冷剂不泄漏,而且第一种方法中制冷剂的充灌量较大。目前实验中,采用第一、二种方法是通过低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的制冷剂与热源水进行换热。比较合适的制冷剂应该是乙二醇水溶液。

4.2 由于需两次换热,因此需要较低的蒸发温度,致使热泵的循环效率有所降低。实验数据表明,蒸发温度为 $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,供热的冷凝出水温度在 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,实验热泵的性能系数仍在3.2以上。

4.3 由于热源水单位质量的采热量很高,因此需水量会很小,但在实际应用中,建议还是采用较大的循环水量,以降低热源水回水中冰粒的质量比例,保证回水管路不堵塞。计算表明,这样做引起的水泵附加耗功不大;另外,在实际应用中水源的水量通常都不成问题。

4.4 该系统同样可以进行水路的切换,在夏季用于空调。

本文介绍的专利内容均涉及哈尔滨工业大学的知识产权,欢迎合作,万勿侵权。

#### 参考文献

- [1] 吴荣华,孙德兴. 哈尔滨望江宾馆利用城市污水中的能源[J]. 中国给水排水,2003,19(12):92-93

- [2] 吴荣华,张承虎,孙德兴. 城市原生污水与其他冷热源的比较研究[J]. 暖通空调,2006,36(1):43-46
- [3] 吴荣华. 城市原生污水源热泵系统研究与工程应用[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2005
- [4] 吴荣华,张承虎,孙德兴. 城市污水冷热源应用技术发展状况研究[J]. 暖通空调,2005,35(6):31-37
- [5] Watanabe Choyu. Super heat pump system using river water as a heat source [C] // ASME/JSME Thermal Engineering Joint Conference Proceeding, 1995
- [6] Energy Information Administration. International energy outlook 1999 [EB/OL]. DOE/EIA - 0484 (99). <http://www.eia.doe.gov>
- [7] 吴荣华,孙德兴. 城市污水源热泵系统的节能与环保评价法[J]. 中国给水排水,2005,21(12):103-106
- [8] 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
- [9] Saito A. Fundamental research on external factors affecting the freezing of supercooled water [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1992,35(10):2527-2532
- [10] Masahik Yamada, Shoichiro Fukusako, Tsuyoshi Kawanami. Performance analysis on the liquid-ice thermal storage system for optimum operation[J]. International Journal of Refrigeration,2002,25(3):267-274
- [11] Hong R, Kawaji M, Goldstein V. Numerical investigation of ice-slurry flow and heat transfer in a scraped ice generator and storage tank [C] // Proceedings of the Third Workshop on Ice Slurries of the International Institute of Refrigeration. Horw/Lucerne, Switzerland, 2001: 119-125
- [12] Masayuki Tanino. Ice-water two-phase flow behavior in ice heat storage system [J]. International Journal of Refrigeration,2001,24(7):639
- [13] Kema D,Kondu I,Shigenaga Y, et al. Development of a dynamic type ice thermal storage air conditioning system of individual control for building use [C] // Megostock 97 Proceedings (7th International Conference on Thermal Energy Storage),1997
- [14] Peter W E, Michael K. From physical properties of ice slurries to industrial ice slurry applications [J]. International Journal of Refrigeration,2005,28(7):4-12
- [15] Meili F, Sari O, Vuarnoz D, et al. Storage and mixing of ice slurries in tanks [C] // Proceedings of the Third Workshop on Ice Slurries of the International Institute of Refrigeration. Horw/Lucerne, Switzerland, 2001: 97-104
- [16] Chuard M, Fortuin J P. A new technology system for production and storage of ice [C] // Proceedings of the First Workshop on Ice Slurries of the International Institute of Refrigeration. Yverdon-les-Bains, Switzerland, 1999: 140-146
- [17] 袁竹林. 制取流体冰新方法及其高效冰蓄冷研究[J]. 能源研究与利用,2004,36(4):36-40
- [18] Wobst E, Vollmer D. Ice slurry generation by direct evaporation of refrigerant [C] // Proceedings of the First Workshop on Ice Slurries of the International Institute of Refrigeration. Yverdon-les-Bains, Switzerland, 1999:126-132
- [19] Tanino M, Kozawa Y, Mito D, et al. Development of active control method for super cooling releasing of water [C] // Proceedings of the Second Workshop on Ice Slurries of the International Institute of Refrigeration. Paris, 2000: 127-139
- [20] Inaba H. Fundamental study on continuous ice making using flowing super cooled water [J]. Journal of JSME,1994,37(2):385
- [21] Okawa S, Saito A, Minami R. The solidification phenomenon of the super cooled water containing solid particle [J]. International Journal of Refrigeration, 2001, 24(1):108
- [22] Inada T, Zhang X, Yabe A, et al. Active control of phase change from super cooled water to ice by ultrasonic vibration [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2001,44(23):4523-4531
- [23] 袁竹林. 海水冰浆的制取与应用 [C] // 江苏省制冷学会 2002 年学术会议论文集,2002
- [24] Meewise J W, Infante Ferreira C A. Ice slurry production with a fluidized bed heat exchanger [C]. Proceedings of the Second Workshop on Ice Slurries of the International Institute of Refrigeration. Paris, 2000: 101-108