

文章编号: 1671-6612 (2021) 02-189-07

# 跨季节蓄冷集成技术系统能效与经济性分析

陈明彪<sup>1,2,3,4</sup> 宋文吉<sup>1,2,3</sup> 王瑛滢<sup>1,2,3,4</sup> 冯自平<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国科学院广州能源研究所 广州 510640;

2. 中国科学院可再生能源重点实验室 广州 510640;

3. 广东省新能源和可再生能源研究开发与应用重点实验室 广州 510640;

4. 中国科学院大学 北京 100049)

**【摘要】** 减少供暖和供冷的能耗是社会节能的关键任务之一。针对目前跨季节蓄能技术存在的特点和不足,提出了以冰源热泵为核心的跨季节蓄冷集成技术。以北京、沈阳地区的采暖供冷为研究对象,对比三种不同的方案,从能效和经济性两个方面对跨季节蓄冷技术进行分析。结果发现:(1)相比于传统冷水机组供冷和锅炉供热组合的技术,以冰源热泵为核心的跨季节蓄冷集成技术,其全年累计一次能源消耗减少了 50%左右,污染物排放减少了 55%左右,具备良好的社会效益和环保效益。(2)跨季节蓄冷技术与夜间蓄冷技术相结合,可以大幅降低运行成本,减小投资回收期,具备很好的经济效益。北京地区投资回收期约在 6 年左右。(3)蓄水槽对投资回收期有重要影响,而且方案三的投资回收期一直比方案二短。

**【关键词】** 跨季节蓄冷;冰源热泵;冰浆;能效;经济性;相变

中图分类号 TK02 文献标识码 A

## System Energy Efficiency and Economic Analysis of Integrated Seasonal Cool Storage Technology

Chen Mingbiao<sup>1,2,3,4</sup> Song Wenji<sup>1,2,3</sup> Wang Yingying<sup>1,2,3,4</sup> Feng Ziping<sup>1,2,3</sup>

(1. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, 510640;

2. Key Laboratory of Renewable Energy, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, 510640;

3. Guangdong Provincial Key Laboratory of New and Renewable Energy Research and Development, Guangzhou, 510640;

4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049)

**【Abstract】** it is the key tasks to reduce the energy consumption on heating and cooling. Considering the characteristics and shortcomings of the current seasonal cool energy storage technology, it is proposed integrated seasonal cool storage technology (ISCST) based on ice source heat pump. Heating and cooling in Beijing and Shenyang are investigated with three different proposals from the prospect of energy efficiency and economic analysis. It is found that: (1) in comparison with the traditional chiller cooling and boiler heating, ISCST with ice heat pump as core can reduce about 50% of primary energy consumption and about 55% of pollutant emissions. A good social benefits and environmental benefits are produced. (2) Combined with cool storage at night, ISCST can significantly reduce operation costs and payback period. Payback period is about 7 years at Beijing. (3) Water storage pit plays a great role in payback period. The payback period in case 3 is the smaller than that in case 2.

基金项目: 中科院先导专项 (XDA21070305); 河南省中国科学院科技成果转移转化项目 (202001)

作者简介: 陈明彪 (1986-), 男, 助理研究员, 硕士, 研究方向为大规模储能系统, E-mail: chenmb@ms.giec.ac.cn

通信作者: 宋文吉 (1978-), 男, 研究员, 博士, 硕士生导师, 研究方向为大规模储能系统, E-mail: songwj@ms.giec.ac.cn

收稿日期: 2020-07-27

【Keywords】 seasonal cool storage; ice source heat pump; ice slurry; energy efficiency; energy efficiency; phase transformation

## 0 引言

据统计,我国建筑能耗占社会总能耗的 30%左右<sup>[1]</sup>,在建筑能耗中,供暖和供冷占据 61%左右,减少供暖和供冷的能耗是节能的关键任务之一。我国大部分等地区冬季严寒、夏季酷热,对于供暖和供冷都有很大的需求。跨季节蓄能技术,是将冬季存储的冷量用于夏季供冷,夏季存储的热量用于冬季供暖。与传统的空调、锅炉组合技术相比,大规模的跨季节蓄能技术的低成本低,综合能耗低,具有很好的经济和环境效益。

跨季节蓄能技术包括以热量利用为主的跨季节蓄热以及以冷量利用为主的跨季节蓄冷技术。跨季节蓄热技术因与多能互补区域供热技术相结合,所以有较为广泛的商业应用。如丹麦的 PlanEnergi 公司、Arcon-Sunmark 公司和 Ramboll 公司等集中在供暖区域利用跨季节蓄热技术,减少单位热能的成本,达到节约成本的目的。在国内,四季沐歌主持设计河北经贸大学的季节性蓄热采暖及热水综合利用项目<sup>[2]</sup>,太阳雨集团在西藏浪卡子县和仲巴县建立大型太阳能跨季节蓄热采暖项目。在跨季节蓄热技术应用中,太阳能聚热是热量的主要来源之一。蓄热主要有三种形式,即储罐蓄热、大水池蓄热、地下水体蓄热。

跨季节蓄冷目前大多停留在研究阶段。该技术主要利用地底土壤或含水层作为恒温冷热源,经过热交换后再当作热泵的冷源或热源。2000 年天津大学袁伟峰<sup>[3]</sup>概述了国内外季节性含水层供暖供冷的发展状况。2004 年湖南大学付峥嵘<sup>[4]</sup>提出了季节性含水层储能的住宅集中空调系统,分析系统的运行特性。但是地下含水层作为蓄能形式,受到地理限制。2013 年东南大学杨卫波等<sup>[5]</sup>以 U 型地埋管地下蓄能区域为研究对象,探讨跨季节蓄能型地源热泵地下蓄能与释能特性。2013 年 Zhang<sup>[6]</sup>等提出季节性自然冷源土壤蓄冷系统,并采用湿热耦合数学模型分析土壤跨季节蓄能的蓄能特性。2020 年 Xingping Li<sup>[7]</sup>等提出了采用两相闭式热虹吸管作为被动传热装置,并通过建立模型分析系统特性。

然而基于地源热泵的跨季节蓄能,存在热量不均、冷热匹配、影响地底生态、应用场景受限等问

题。由于地底土壤或富水层作为恒温冷热源的跨季节蓄冷技术存在自身的不足,我们提出了以冰源热泵为核心的跨季节蓄冷集成技术。该技术主要是利用冰源热泵,在冬季提取水的凝固相变热用于供暖,生成的废弃冰浆存储于蓄水槽中,用于夏季释冷。以冰源热泵为核心的跨季节蓄冷集成技术,打破常规水源热泵的可利用下限温度,充分利用水的相变潜热<sup>[8]</sup>,储能密度高,成本低。该跨季节蓄冷集成技术的核心在于冰源热泵。冰源热泵也称作采集凝固热热泵<sup>[9-12]</sup>,已经有学者对其进行了研究和论证。冰源热泵主要是压缩蒸汽制冷循环与动态冰浆制取技术的稳定结合。相比于静态制冰技术,动态冰浆制取技术以其连续稳定的特点较好地配合冰源热泵提取水的凝固相变热。目前采用的动态冰浆制取技术主要有刮削法<sup>[13]</sup>、过冷水法<sup>[14]</sup>、流化床法<sup>[15]</sup>等。而过冷水法,由于具备能效高、换热效率高、结构紧凑的特点,该技术在动态冰浆制取、冰蓄冷等领域已经有商业应用。

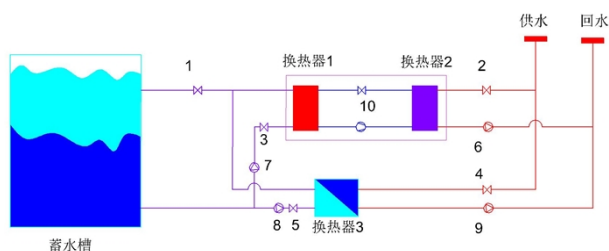
本文提出了以冰源热泵为核心的跨季节蓄冷集成技术,其中冰源热泵采用过冷水方法采集凝固热将液态水变为冰浆,然后对该技术的综合能效以及经济性进行分析,为该技术的进一步应用作为理论参考。

## 1 以冰源热泵为核心的跨季节蓄冷集成技术工作原理

冰源热泵有多种不同的冰浆制取方式,本文采用过冷水动态冰浆制取的冰源热泵,并以过冷水法的冰源热泵为核心,提出新的跨季节蓄冷技术。具体工作示意图如图 1 所示。

(1) 供暖期。供暖期内阀门仅 1、2、3 开启,换热器 1 为冷端,换热器 2 为热端。蓄水槽中冷水经过换热器 1,而冰源热泵利用压缩蒸汽循环从中提取热量,给用户侧提供热量。在供暖期内,蓄水槽中的水温逐渐降低直到 0℃ 附近,随着供暖的持续,来自蓄水槽中的液态水经过冰源热泵后,变成过冷水。过冷水解除过冷度后变成 0℃ 的冰浆返回蓄水槽中,而蓄水槽中的含冰率 IPF (Ice Packing Factor) 也从 0 逐渐上升,直到供暖期结束。

(2) 供冷期。供冷期开始时, 阀门仅 4、5 开启。蓄水槽中的冷水经过换热器 3 直接与用户侧的回水换热。供水温度通过换热器两端的水流量进行控制。来自蓄水槽的冷水经换热后返回到蓄水槽, 冰浆释放冷量。供冷期内, 由于冰的相变热很大, 因此相变供冷将持续很长一段时间。随着供冷的持续, 蓄水槽温度升高至 7℃ 左右。该温度的冷水已经不能满足单独的供冷需求, 此时, 阀门全部开启, 换热器 1 为热端, 换热器 2 为冷端, 热泵机组启动并辅助制冷。由于蓄水槽将作为热泵机组的冷源使用, 因此制冷能效很高。随着供冷的持续, 蓄水槽水温逐渐上升, 直到供冷期结束。在供冷期, 潜热供冷占据绝大部分的供冷量, 因此整个供冷期内供冷的运行成本很低。



1~5: 阀门; 6~9: 水泵; 10: 冰源热泵机组

图 1 跨季节蓄冷系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of seasonal cool energy storage system

## 2 跨季节蓄冷能效分析

本文以三种方案对企业园区办公楼的采暖供冷情况进行对比分析。方案一, 冬季利用城市集中管网供热, 夏季采用冷水机组实时供冷。方案二, 冬季采用冰源热泵实时供暖并产生冰浆, 夏季冰浆融化释冷实现实时供冷, 不足部分采用冷水机组供冷。方案三, 利用大小两个蓄水槽, 实现跨季节蓄冷与夜间蓄冷相结合的方式。在冬季, 晚上开启冰源热泵抽取大蓄水槽热量, 提升小水槽的水温至 45℃, 白天利用小水槽热水供暖; 在夏季, 利用冰浆潜热释冷实时供冷, 当蓄水槽温度大于 6℃ 后, 则利用大小水槽进行夜间蓄冷, 白天释冷的方式供冷。

### 2.1 冷热负荷计算

本案例以北京、沈阳地区企业园区办公楼为研究对象进行对比分析, 工作时间为 8:00—19:00。

首先需要估算办公楼的冷热负荷, 具体参数见表 1 所示。

表 1 建筑供暖供冷设计参数

Table 1 Design parameters of cooling and heating supply

总建筑面积/m <sup>2</sup>	20000	层高/m	4.5
长度/m	50	宽度/m	40
窗墙面积比	0.2	外墙传热系数/ (W/(m <sup>2</sup> ·K))	1.5
外窗综合遮阳系数	0.6	外窗传热系数/ (W/(m <sup>2</sup> ·K))	4.0
人群密度/(人/m <sup>2</sup> )	0.15	人体发热率/(W/人)	121
机器发热率/ (W/m <sup>2</sup> )	30	综合换气次数/ (m <sup>3</sup> /h/人)	1.8
夏季室内温度/℃	25	夏季室内相对湿度/%	60
冬季室内温度/℃	20	冬季室内相对湿度/%	20

气温以北京、沈阳 2019 年每日最高温和最低温为依据, 并假设日间逐时温度变化服从正弦函数。室外相对湿度则参考该地区历年平均相对湿度为设计参数。

夏季供冷时总冷负荷包括五项:

$$P_{all} = P_r + P_a + P_w + P_p + P_m \quad (1)$$

其中,  $P_{all}$  是总冷负荷;  $P_r$  是透过窗的辐射冷负荷;  $P_a$  是空气交换产生的冷负荷;  $P_w$  是由于墙窗等围护结构传热产生的冷负荷;  $P_p$  是人体发热产生的冷负荷;  $P_m$  是机器发热产生的冷负荷。

冬季采暖的热负荷, 同样以方程 (1) 为设计依据。北方地区冬季辐射较弱, 占比很少, 因此冬季热负荷计算忽略辐射产生的热负荷。

$$P_r = \phi \cdot A_r \cdot J_{cz} \quad (2)$$

其中,  $\phi$  是综合遮阳系数;  $A_r$  是窗的面积;  $J_{cz}$  是各朝向透过标准窗玻璃的直接辐射照度, W/m<sup>2</sup>。具体数值参考《采暖通风与空气调节设计规范》的附录 D。

$$P_a = (1 - \mu_a) \cdot h_a \cdot V_a \quad (3)$$

其中,  $\mu_a$  是全热交换效率, 通常为 0.5;  $h_a$  是单位交换空气的焓差;  $V_a$  是总空气量。总空气量根据不同建筑的换气次数与总容积获得。

$$h_t = 1.01t + (2500 + 1.84t)d \quad (4)$$

其中,  $h_t$  是在温度  $t$  (℃) 下的焓值;  $d$  是单位

干空气的含湿量, kg/kg。

$$P_w = h_w \cdot A_w \cdot \Delta t \quad (5)$$

其中,  $h_w$  是墙体的总传热系数;  $A_w$  是墙体的面积;  $\Delta t$  是室外和室内的温差。

$$P_p = w_p \cdot N \quad (6)$$

其中,  $w_p$  是人体发热平均功率;  $N$  是总人数。

$$P_m = A_m \cdot w_m \quad (7)$$

其中,  $A_m$  是总的使用面积;  $w_m$  是机器的平均发热功率。

### 2.2 一次能源利用

对于方案一夏季冷水机组供冷, 由于室外空气温度变化对空调主机能效比有较为明显的影响, 因此根据文献[16]的统计数据获得能效比与室外温度一一对应的关系。从而进一步可以获得机组的电能消耗。冬季城市热网采暖的能源利用效率为:

$$K_g = \eta_f (1 - \eta_{h,s}) \quad (8)$$

其中,  $\eta_f$  和  $\eta_{h,s}$  分别是城市热网使用锅炉的热效率以及设备损耗系数, 分别取 0.75 和 0.1<sup>[17]</sup>。

对于方案二以及方案三, 根据厂家测试数据的回归分析, 我们可以拟合得到如下的 COP (coefficient of performance) 值关系式:

$$COP = 0.00129\Delta T^2 - 0.1634\Delta T + 8.17286 \quad (9)$$

其中,  $\Delta T$  是冰源热泵机组采暖热水侧水的平均温度与低温水源侧水的平均温度的差值, 即:

$$\Delta T = (T_{h,in} + T_{h,out})/2 - (T_{c,in} + T_{c,out})/2 \quad (10)$$

其中,  $T_{h,in}$  和  $T_{h,out}$  是热水侧的进口和出口水温;  $T_{c,in}$  和  $T_{c,out}$  是冷水侧的进口和出口水温。

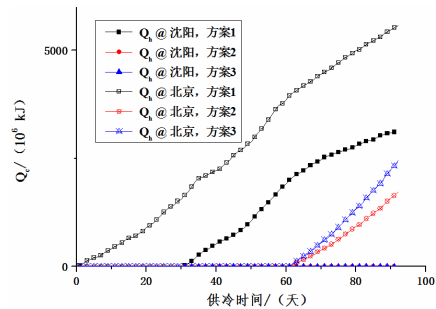
对于方案二、三, 夏季供冷开始时刻蓄水槽中的含冰率为 0.5, 冬季供暖开始时刻初始水温为 20℃。另外, 三种方案中都采用电驱动热泵机组, 电能的一次能源利用效率为:

$$K_e = COP \cdot \eta_e (1 - \eta_{e,s}) \quad (11)$$

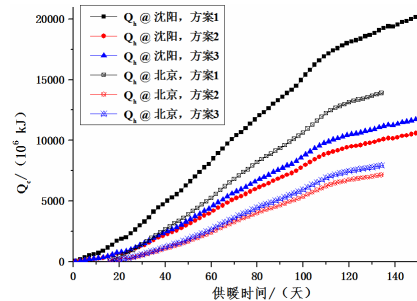
其中,  $\eta_e$  和  $\eta_{e,s}$  分别是发电厂发电效率以及电能传输损耗系数, 分别取值为 0.33 和 0.05。

通过编写程序计算, 可以获得不同参数的变化对跨季节蓄冷系统性能的影响关系。

### 2.3 能效结果分析



(a) 夏季, 沈阳地区供冷比北京晚 30 天开式



(b) 冬季, 沈阳地区供暖比北京早 15 天开始

图 2 一次能源累计利用量

Fig.2 Cumulative using of primary energy

以北京、沈阳两个地区为例, 分析三种不同的方案在全年采暖供冷过程中一次能源的消耗量, 具体见图 2 所示。其中, 北京、沈阳地区供冷分别为 90 天和 60 天, 采暖分别为 120 天和 150 天。由图 2 可见, 无论是北京地区还是沈阳地区, 三种方案的一次能源消耗量顺序都是: 方案 1 > 方案 3 > 方案 2。以城市热网及冷水机组的方案 1 为基准, 北京、沈阳地区利用方案 2 则一年节省一次能源 12.1TJ 和 12.8TJ, 节省率分别是 62% 和 54%; 利用方案 3 则一年节省一次能源 11.2TJ 和 11.6TJ, 节省率分别是 57% 和 49%。相比于方案 1, 以跨季节蓄冷为基础的方案 2 和方案 3 可以节省约一半的一次能源消耗。节省的来源主要来自两个方面, 其一是冬季的冷量存储并被用于夏季供冷, 夏季热量存储并被用于冬季, 这是主要的节省来源, 其二是冬季供暖时, 冰源热泵的综合能源利用效率比锅炉的高, 具体可见方程 (8) 以及方程 (11)。在采暖和供冷两个时间段内, 以跨季节蓄冷为基础的方案 2 和方案 3, 其节省的一次能源随着地区不同而出现变化。北京

地区夏季节省的一次能源占总节省量的 60%左右, 而沈阳地区夏季节省的一次能源占总节省量的 50%左右。

根据统计数据, 可以知道 1GJ 一次能源约排放 1.15kg 的 CO<sub>2</sub>, 8.1g 的 SO<sub>2</sub>, 以及 0.43g 的 NO<sub>x</sub>。进一步计算可以知道采用三种不同的方案时污染

物的排放量, 具体见表 3 所示。相对比方案一而言, 可以看到采用跨季节蓄冷技术可以减少约 55% 的污染物排放, 具有很好的环保效益, 因此, 在空气污染比较严重的地区, 应该优先选用跨季节蓄冷技术进行供暖供冷。

表 2 全年一次能源消耗

Table 2 Cumulative using of primary energy in one year

	北京			沈阳		
	方案 1	方案 2	方案 3	方案 1	方案 2	方案 3
一次能源消耗/TJ	19.5	7.4	8.3	23.5	10.7	11.8
一次能源节省量/TJ	0	12.1	11.2	0	12.8	11.6
一次能源节省率/%	0	62	57	0	54	49

表 3 全年污染物排放量

Table 3 Pollution emissions in one year

	北京			沈阳		
	方案 1	方案 2	方案 3	方案 1	方案 2	方案 3
SO <sub>2</sub> 排放量/kg	158.3	59.9	67.3	190.3	86.6	96.0
CO <sub>2</sub> 排放量/吨	22.4	8.5	9.5	27.0	12.2	13.6
NO <sub>x</sub> 排放量/kg	8.4	3.2	3.5	10.1	4.6	5.1

## 2.4 冷热匹配

在跨季节蓄冷集成技术当中, 全年冷热是否匹配对实际应用有重要影响。在本文的一年运行案例分析中, 都是从夏季供冷开式, 并假设蓄水槽的初始含冰率 IPF 为 50%, 冬季采暖初始水温为 20℃。由图 3 (a) 可见, 北京、沈阳地区的含冰率都是从 50% 下降到 0%, 两个地区在供冷结束后, 蓄水槽水温都在 20℃ 左右。在冬季采暖阶段, 两地区水温都是从 20℃ 下降到 0℃ 并保持不变。采暖结束时, 两地区的含冰率各不相同, 北京地区含冰率只有 50% 左右, 而沈阳地区含冰率达到 70% 以上。其原因是沈阳地区的冬季热负荷与夏季冷负荷的差值大于北京地区。从冷热匹配的角度来考虑, 则北京地区优于沈阳地区。

从方案 2 和方案 3 的对比来看, 两种方案在不同地区的情况差异并不大。在夏季, 两种方案的含冰率 IPF 是重叠的, 这是因为在 IPF 大于 0 时, 都是通过融冰的方式供冷, 两种方案并无差别。而供冷结束时, 方案 3 中的蓄水槽水温高于方案 2。这是因为采用方案 3 时, 夜间蓄冷的 COP 相对较小而且冷量损失较大, 因此需要消耗了更多的电能,

所消耗的电能转化为热量存储在大蓄水槽中, 导致大蓄水槽温度升高。在冬季采暖结束时, 方案 3 中含冰率 IPF 低于方案 2。这是因为采用方案 3 时, 夜间蓄热的 COP 相对较小而且热损失较大, 需要消耗了更多的电能制热, 所消耗的电能转化为热量使小蓄水槽水温更快升高, 导致从大蓄水槽提取的凝固热减少, 因此方案 3 中含冰率小于方案 2。

冷热不匹配是跨季节冷技术在实际应用中的痛点问题。可行方法是利用自然界的冷热源给目标冷热源进行补充。在冷需求更多的区域, 则在冬季利用大气自然对流换热等低成本技术给蓄水槽补充冷量。在热量需求更多的区域, 则采用太阳能集热等技术补充热量。

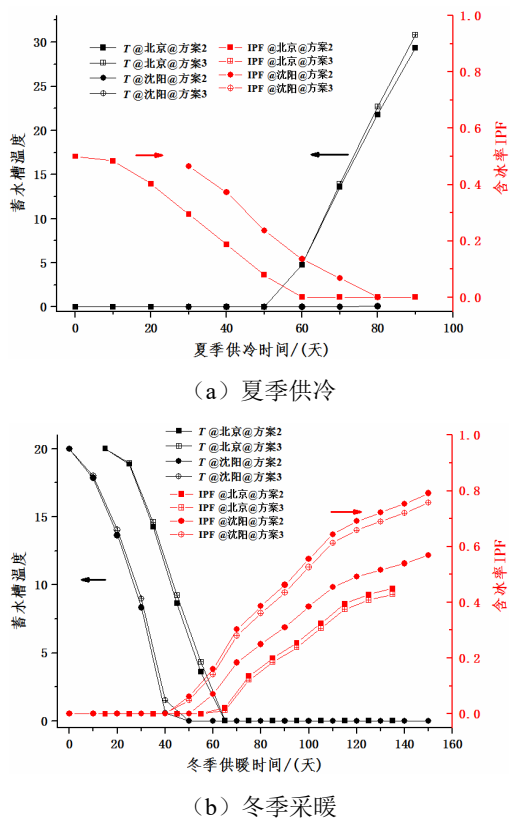


图3 蓄水槽内水温和含冰率 IPF 随着时间的变化  
Fig.3 Temperature and IPF variation with time

### 3 跨季节蓄冷经济性分析

在经济性分析过程中，主要包括初始投资和运行成本两部分。由于办公大楼必须配备供暖供冷系统，因此经济性分析中以方案 1 为基准。在方案 2 和方案 3 中，土地价格、热泵机组、用户端设备、水泵等设备费不包含在新增初始投资中。相对于方案 1，其新增的初始投资主要包括蓄水槽、冰源热泵主机配件等。蓄水槽的造价主要包括挖土和布置保温材料，参考大容积水池蓄热项目中，大水槽的造价<sup>[18]</sup>，水槽价格遵循边际效应递减规律，随着水槽容积增大而减小。

运行成本计算过程中，峰谷电价参考北京、沈阳地区的电价政策。城市集中供暖价格，其中北京地区是 45 元/平方·供暖季，而沈阳地区则是 4.7 元/平方·月。

经计算可以获得不同地区不同方案的运行费用。由图 4 可见，由于以方案 1 为基准进行计算，因为方案 1 没有初始投资也没有回收期。方案 3 的初始投资比方案 2 多 70 万元左右，主要是大蓄水

槽分离出小蓄水槽时的隔热层以及相关配件。北京地区的初投资比沈阳地区的初投资高，这是因为北京地区夏季冷负荷更大，需要更大的蓄水槽。对比不同方案的全年运行费用，方案 3 的运行费用总是最低的，这是因为方案 3 既利用了跨季节蓄冷的优势，也利用了峰谷电价的经济优势，具备很好的经济效益。静态投资回收期也说明，相比方案 2 方案 3 是更优的选择。北京地区的投资回收期比沈阳地区的回收期短，主要有两个原因。其一是北京地区的电价以及采暖价格比沈阳地区高不少，其二是北京地区所需蓄水槽更大，因此单位立方的初投资费用更小。当然，该结论是不考虑土地价格的因素在内所得。但由于蓄水槽表面封盖后，土地依然可以被利用，因此结论仍然具有一定的参考意义。另外，需要注意的是沈阳地区方案 2 的运行费用高于方案 1。这是由于方案 2 在白天直接利用高峰电价运转冰源热泵，所需电费远高于集中采暖的价格，因此方案 2 的全年的运行费用高于方案 1。

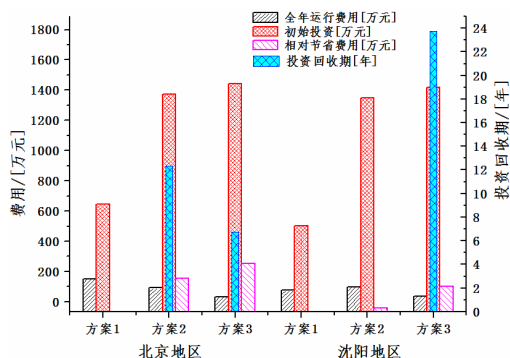


图4 不同技术方案的经济性分析

Fig.4 Economic analysis of different cases

在方案 2 和方案 3 中，蓄水槽的费用占总投资费用的大部分，因此蓄水槽容积的改变将对投资产生重要影响。由图 5 可见，方案 2 和方案 3 的静态投资回收期都随着蓄水槽容积而出现变化。可以看到在计算范围内，方案 3 的投资回收期一直小于方案 2，而且北京地区方案 3 的投资回收期在 6 年左右，对于大型工程而言，该投资回收期是可接受的。而且，随着很多地方大力推广夜间蓄冷电价（如广州地区夜间蓄冷电价为 0.15 元），这必将使得投资回收期减小。

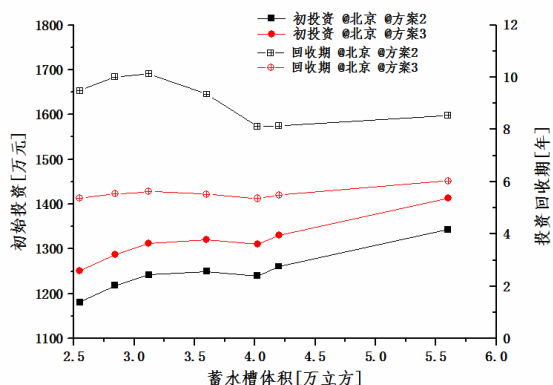


图 5 不同蓄水槽容积对投资的影响

Fig.5 Influence of tank volume on investment

#### 4 总结

减少供暖和供冷的能耗是建立节约型社会的关键任务之一, 本文针对目前跨季节蓄能技术存在的特点和不足, 提出了以冰源热泵为核心的跨季节蓄冷集成技术, 并对跨季节蓄冷技术的原理详细讲述。然后, 以北京、沈阳地区企业园区办公大楼的采暖供冷为研究对象, 对比三种不同的方案, 从能效和经济性两个方面对跨季节蓄冷技术进行分析。结果发现:

(1) 相比于传统冷水机组供冷和锅炉供热组合的技术, 以冰源热泵为核心的跨季节蓄冷集成技术, 其全年累计一次能源消耗减少了 50% 左右, 污染物排放减少了 55% 左右, 具备良好的社会效益和环保效益。

(2) 跨季节蓄冷技术与夜间蓄冷技术相结合, 可以大幅降低运行成本, 减小投资回收期, 具备很好的经济效益。北京地区投资回收期约在 6 年左右。

(3) 蓄水槽对投资回收期有重要影响, 而且方案三的回收期一直比方案二要短。

此外, 需要指出的是以上结论是假设全年冷热均衡的基础上获得的。实际的工程应用中不同地区的冷热需求必然是不匹配的。但是冷热均衡是可以通过其他低成本方式实现。因此, 以全年冷热是均衡的为假设而得到的结论仍具备一定的参考价值。

#### 参考文献:

[1] 朱茂川, 周国兵, 杨霏, 等. 过冷水合盐相变材料跨季节储存太阳能研究进展[J]. 化工进展, 2018, 37(6): 2256-2268.

[2] 朱宁, 王潇洋, 温仁新. 跨季节蓄热太阳能集中供热系统论证分析——河北经贸大学跨季节蓄热太阳能集中供热系统示范项目设计[J]. 建设科技, 2014, (9): 108-111.

[3] 袁伟峰, 赵军, 朱强, 等. 季节性含水层蓄能系统研究与发展的综述[J]. 制冷学报, 2000, (4): 1-6.

[4] 付嵘嵘, 李念平, 汤广发, 等. 季节性含水层储能系统在住宅中的应用[J]. 暖通空调, 2004, 34(9): 84-86, 75.

[5] 杨卫波, 陈振乾, 施明恒. 跨季节蓄能型地源热泵地下蓄能与释能特性[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2010, (5): 95-100.

[6] Tao Yang, Xiaosong Zhang, Bin Zhou, et al. Simulation and experimental validation of soil cool storage with seasonal natural energy[J]. Energy & Buildings, 2013, 63.

[7] Li J. Quantitative analysis of passive seasonal cold storage with a two-phase closed thermosyphon[J]. Applied Energy, 2019, 260: 114250.

[8] 孙德兴, 张承虎, 吴荣华, 等. 利用冷水凝固热的热泵系统与装置[J]. 暖通空调, 2006, (7): 46-49.

[9] 钱剑峰. 采集凝固热热泵系统的形式与工况分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.

[10] 李丽娜. 非清洁水源凝固潜热采集装置及其热泵系统运行性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2014.

[11] 郑记莘. 提取冷水凝固热热泵系统的研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2017.

[12] 张雁秋, 尚德敏. 冰水源热泵核心技术研究[J]. 科技创新与应用, 2020, (8): 155-156, 159.

[13] PAUL J. Binary ice-technologies for the production of pumpable ice-slurries[C]. Proceedings of the International Institute of Refrigeration, London, UK, 1993.

[14] 岑玉, 张冲, 金翼, 等. 载冷剂循环对间接式过冷水动态制冰性能的影响[J]. 制冷与空调, 2017, 17(10): 20-23, 73.

[15] 宋文吉, 冯自平, 肖睿. 冰浆技术及其应用进展[J]. 新能源进展, 2019, 7(2): 129-141.

[16] 蒋凯, 刘兆辉, 谭洪卫. 某办公楼多联机空调系统能耗特征与能效比分析[J]. 建筑节能, 2019, 47(11): 25-30.

[17] 钱剑峰. 城市污水源采集凝固热热泵系统节能环保评价[J]. 建筑热能通风空调, 2009, 28(6): 25-29.

[18] Schmidt T J, Pauschinger T, Sorensen P A, et al. Design Aspects for Large-scale Pit and Aquifer Thermal Energy Storage for District Heating and Cooling[J]. Energy

---

Procedia, 2018:585-594.