

# 热电联产集中供热热水罐蓄热技术的发展现状浅析

李俊峰<sup>1</sup>, 单伟贤<sup>1</sup>, 赵云霞<sup>2</sup>, 王延群<sup>1</sup>, 房晓蕾<sup>1</sup>, 张剑楠<sup>1</sup>, 柳爱芬<sup>1</sup>, 岳晋辉<sup>3</sup>

<sup>1</sup>建投河北热力有限公司, 河北 石家庄

<sup>2</sup>河北城市燃气热力服务中心, 河北 石家庄

<sup>3</sup>河北科技大学建筑工程学院, 河北 石家庄

收稿日期: 2023年4月24日; 录用日期: 2023年5月6日; 发布日期: 2023年6月25日

## 摘要

近年来, 我国的集中供热面临巨大压力。六五期间, 热电厂运用“以热定电”策略来降低运行成本, 但该策略导致用电低峰期发电过度, 用电高峰期产电不足, 从而造成电力供需不平衡。为了解决“热电耦合”问题, 国内外许多学者提出了通过蓄热水技术与热电联产机组的协同运作来提高供电可靠性、提升供热质量、实现电力负荷调节的解决方案。本文旨在介绍热水蓄热技术中蓄热水罐的运作原理、应用条件、结构组成和热特性, 并比较分析了集中式、分布式和分散式三种蓄热罐系统布置形式的热延迟性、经济性、安全性和灵活性等方面。此外, 文章总结了现阶段的研究成果, 并进行初步的经济性评估。

## 关键词

集中供热, “以热定电”, 热水蓄热, 分析

# Analysis on the Development Status of Hot Water Heat Storage Technology for Central Heating and Power Cogeneration

Junfeng Li<sup>1</sup>, Weixian Shan<sup>1</sup>, Yunxia Zhao<sup>2</sup>, Yanqun Wang<sup>1</sup>, Xiaolei Fang<sup>1</sup>, Jiannan Zhang<sup>1</sup>, Aifen Liu<sup>1</sup>, Jinhui Yue<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Jiantou Hebei Thermal Power Co., Ltd., Shijiazhuang Hebei

<sup>2</sup>Hebei City Gas Heat Service Center, Shijiazhuang Hebei

<sup>3</sup>School of Civil Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang Hebei

文章引用: 李俊峰, 单伟贤, 赵云霞, 王延群, 房晓蕾, 张剑楠, 柳爱芬, 岳晋辉. 热电联产集中供热热水罐蓄热技术的发展现状浅析[J]. 电力与能源进展, 2023, 11(3): 93-100. DOI: 10.12677/aepe.2023.113012

## Abstract

In recent years, China's central heating is facing great pressure. During the sixth five-year period, the thermal power plants in China implemented a strategy called "heat-led electricity generation" to reduce operating costs. However, this strategy resulted in excessive electricity generation during periods of low electricity consumption and insufficient electricity production during peak consumption, leading to an imbalance between power supply and demand. To address the issue of "heat-electricity coupling," numerous scholars from both domestic and international sources have proposed a solution that involves the collaborative operation of hot water heat storage technology and combined heat and power units. This solution aims to enhance power supply reliability, improve the quality of heat supply, and achieve power load regulation. This article aims to introduce the operational principles, application conditions, structural composition, and thermal characteristics of hot water storage tanks in thermal energy storage technology. Furthermore, a comparative analysis is conducted to assess the thermal latency, economic viability, safety, and flexibility aspects of three different arrangements of thermal storage tank systems: centralized, distributed, and decentralized. Additionally, the article summarizes the current research achievements and presents an initial economic evaluation.

## Keywords

Central Heating, "Heat-Led Electricity Generation", Hot Water Heat Storage, Analysis

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着我国城市化进程的推进,城市供热以燃煤热电联产和大型锅炉房集中供热为主[1]。据国家统计局数据,2021年年末,全国城市集中供热面积106.03亿平方米,同比增长7.30%。由于不同热用户对热负荷需求的特殊性以及国内现有自控系统技术水平有限,不易处理复杂多变的运行工况,使得供热量难以迅速响应热负荷的变化。此外为响应“以热定电”政策,致使热电耦合、热电联产机组运行灵活性下降以及经济效益降低。而蓄热技术可以在供暖低谷将多产热量储存,而在供暖高峰,将储存的热量释放,从而达到“削峰填谷”。目前蓄热技术应用最广泛的是显热蓄热技术,而显热蓄热技术中发展较为成熟的就是蓄热罐蓄热技术,其利用冷热水因密度不同分层原理,在蓄热罐内蓄能。近年来,国内外学者对于蓄热水罐的使用方式、热性能参数做了不少研究。其中,Dogan [2]等人在蓄热罐体内部设置障碍物后发现罐内流体分层得到优化;Abdelhak [3]通过数值分析对比蓄热罐水平与垂直两种结构的蓄能性能差异得出,垂直结构性能更高、斜温层更稳定。Savicki [4]设置垂直结构蓄热罐与层流自然对流工况分析罐内温度场得出,恰当的入口射流位置有效的促进热分层。因此,不同的罐体参数以及工况对蓄热水箱蓄热蓄冷效果影响较大。E. Kaloudis等[5]分析蓄热罐内自然分层,并且用流场和温度场数据对分层和混合程度进行了定量分析,采用的分析参数有斜温层厚度、嫡产率。Jae Dong Chung等[6]分析研究布水器结构对水箱分层的影响,得出了Re数是影响分层效果主要因素的结论。蓄热罐体在国外应用较多,在法国与

芬兰等欧洲国家多用于民用供暖，德国、瑞士等国家将可再生能源与蓄热水罐技术结合，从而实现减费减排双重进步。我国蓄热水罐应用较晚，2005年北京热力集团与北京上庄燃气热电有限公司共同开发国内首个热电厂内蓄热水罐项目[7]，即北京左家庄供热厂将蓄热水罐安置在热源侧，为热电联产机组调峰蓄能。

本文将以水蓄热技术、蓄水罐构造与热特性为主题，归纳并分析其各项物性及应用方式。

## 2. 蓄热罐蓄热技术

本技术利用高低温水分层现象进行蓄热，即温度不同的水密度不同，在罐体内部密度较低的高温水受浮升力处于罐体上层，密度较高的低温水处于罐体下层，在两者之间形成温度过渡区(即斜温层)。蓄热罐罐体一般由钢板焊接而成，罐体容积根据供热系统的调峰强度决定[8]。国内外运用最多的是圆柱形立式钢罐，蓄热罐通过内置布水器使流体平稳进入罐体内部，以降低罐体流体扰动减少冷热流体掺混，控制产生较少的冷热掺混流体，即产生更薄的斜温层，以提高蓄热效率[9]。

### 2.1. 运行原理

在蓄热工况下，高温的水从蓄热罐的上布水器流入，低温的水从罐体的下布水器以相同的流量流出。当蓄热完成后，冷热水过渡区(斜温层)从罐体的上方布水器开始逐渐下移，并在移动结束后消失。在取热工况下，当供热高峰出现时，低温的水从罐体的下布水器进入罐内，同时高温的水通过上布水器供给于热用户。斜温层从罐体的下布水器位置开始逐渐形成并向上移动，在取热完成后消失。请参考图1了解蓄热罐的运行原理。

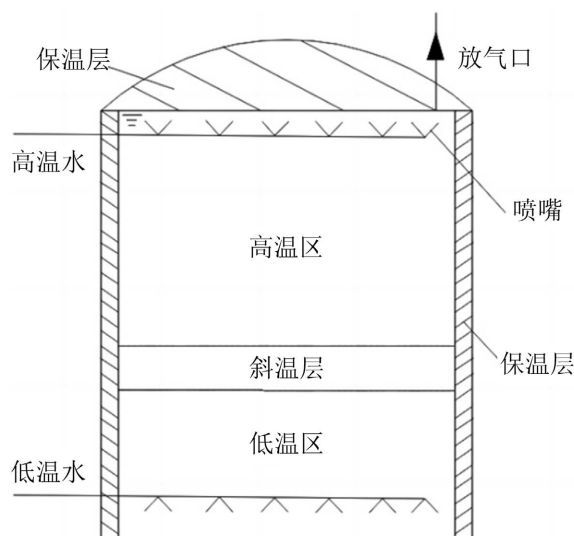


Figure 1. Operation schematic diagram of heat storage tank  
图 1. 蓄热罐运行原理图

### 2.2. 应用条件

蓄热罐通过在供热低峰段蓄能以缓解供热高峰段供热压力，实现削峰填谷，提高热电联产供热系统整体运行的经济性。因此在热电厂中设置蓄热罐需要满足两个条件：

热用户侧热负荷波动或热源侧不可调节的热负荷波动比较大且比较频繁，热负荷高低峰差过高；热源自身的调节能力差，当用热需求改变时无法迅速做出调整。

### 2.3. 热水蓄热罐的斜温层与布水器

在一个因冷热水温度不同导致密度不同自然分层的热水蓄热罐中,由于不同分层间发生热传导现象,从而在冷热水的交界面处形成温度过渡区——斜温层。斜温层的厚度会由于罐体的构造、入口流体流速带来的扰动等发生变化,斜温层厚度增加代表更多热量损耗流失,为避免不必要的能源浪费需要采取相应措施以降低斜温层的厚度。

布水器是外界向蓄热罐储存热量的通道,引导流体以层流状态平稳进入蓄热罐并在冷热水交界处形成斜温层。布水器的构造对蓄热罐内部温度场、速度场影响很大,通常来说减少蓄热罐内部流场的扰动可以降低斜温层厚度、提升蓄热效率。经戈志华[10]等人以水平双侧开孔布水器的圆柱形热水蓄热罐的放热过程数值分析研究得出,流量一定时开孔的数量越多、直径越大越能降低斜温层厚度。胡国霞等人[11]研究得出,保持流量恒定加大布水器上的开孔直径可以使罐内形成更薄的斜温层,蓄能效果更佳。此外,布水器上开孔多为均匀型,张飞宇等人[12]设置中间密集型、两侧密集型以及均匀型三种布水器,对比发现中间密集型布水器能够均匀分配各个孔口处流量,提高布水器内部静压平衡性。

### 2.4. 热水蓄热罐的热特性

蓄热罐形成斜温层厚度受罐体结构以及运行工况的影响,如:蓄热罐罐体结构、布水器结构与开孔参数、工况设置。为提高罐体蓄热性能国内外研究人员进行了广泛研究。

罐体结构是决定罐体内部流场分布的关键因素,通过更改高径比或罐内加设隔热板可以提高罐体性能。刘宇圣[13]设置多组不同高径比工况研究发现随着高径比逐渐增大,蓄冷时间变长,蓄能效率不会持续上升。这是因为斜温层体积由斜温层厚度和罐体截面积共同决定。高径比增加时,前者逐渐增加且幅度加大,后者迅速减小但幅度逐渐减弱。因此,当高径比达到一定值后,罐体截面积减小不能抵消斜温层增加的负面效果,斜温层体积停止降低并开始回升,蓄热效率逐渐下降。张倩男等人[14]研究发现,增大高径比会导致蓄热罐斜温层厚度增加,但因罐体横截面面积降低,使罐体实际蓄热实际可用体积增大;高琳[15]研究发现蓄冷水箱在工程常用高径比 0.53~1.80 时,高径比越大形成的斜温层厚度越小,性能越高。因此,为同时保证罐体性能与实际可用面积,需要合理设置高径比。尹正余等人[16]对内部加装隔热板的蓄热罐研究发现,其可以隔绝冷热两种流体大幅提高罐体蓄热效率,且导热性能较小的材质更适合制作隔热板。

布水器将高温流体平稳引入罐内,将低温水导出罐外,蓄热工况初期的冷热掺混集中于布水器附件,因此优化布水器减缓冷热水掺混可以提高罐体蓄热能力。现有研究集中于布水器结构、布水器开孔等方面,戈志华设置多组工况对比得出:1) 控制其余参数不变通过增大布水器两侧开孔直径、增加孔数等方式增加总开孔面积以降低孔口处流速,罐内形成的斜温层厚度降低;2) 布水器直径大小会对蓄热罐性能产生影响,外侧开孔到罐壁的距离需小于布水器的直径。王子焯等人[17]通过将 H 型布水器开孔采用 120° 背向设计,将冷热水掺混控制在布水器与罐体壁面之间,可以避免出口射流对罐内主流区的直接冲击,有效提高了设备蓄能性能。

除罐体结构与布水器外,蓄热运行工况也会对罐体性能造成影响。刘宇圣提出通过增大冷热水温差可以增加总蓄能量,增加蓄能流量可以加快蓄能完成,但都会增大斜温层厚度使得蓄热效率降低,增加了能量损失。高琳研究发现适当降低蓄冷流量可以降低斜温层厚度,但是反复充冷容易出现冷量残留与不完全充冷现象,导致斜温层厚度增加,设备性能受限。于航[18]研究发现温度分层型水蓄热罐的蓄热时间越长,斜温层的厚度增大,同时指出残留的斜温层会使后续蓄能中斜温层具有初始厚度,从而影响罐体性能。

### 3. 热水蓄热罐布置形式

热水蓄热技术在集中供热系统中有多种布置方式,张婷等人[19]根据热水蓄热罐的布置位置将其分为集中式、分布式以及分散式。集中式布置指蓄热罐安装于热源处并为热网整体进行削峰填谷。分布式布置指蓄热罐分别安装于不同换热站为不同供热区蓄热,不同换热站布置蓄热罐互不影响。分散式布置指蓄热罐布置在热用户建筑附近,并根据其需求调整运行策略,同理不同位置的蓄热罐互不影响。

#### 3.1. 集中式布置

集中式蓄热:国内热电厂供应的热水温度(一次网供水温度)为 $110\sim 130^{\circ}\text{C}$ ,由于蓄热罐通常采用常压蓄热,为避免罐内储水蒸发需确保热水温度不得高于 $98^{\circ}\text{C}$ 。集中蓄热系统简图如图2所示。

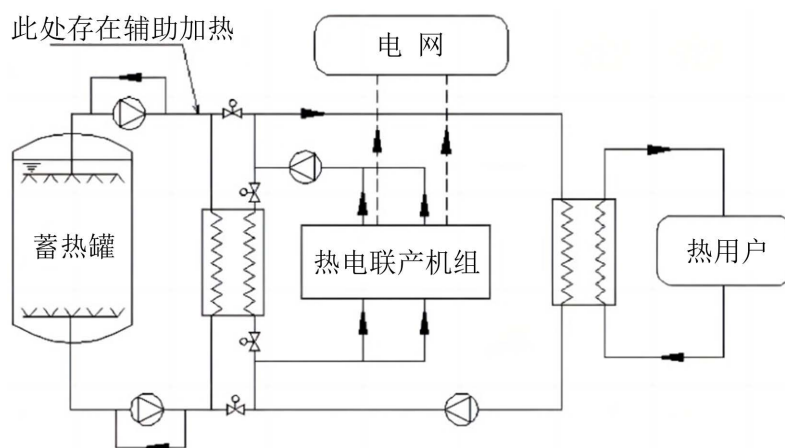


Figure 2. A schematic diagram of the principle of centralized heat storage  
图2. 集中式蓄热原理简图

集中式蓄热系统需要对整个系统进行调节,如果出现部分热用户与主体的负荷特征差别过大的现象或者单个用户用热量发生变化时,系统无法进行针对性调节。此外,当集中供热规模过大后会出现管网过长、结构复杂以及水平失调的问题,热延迟较高,处于系统较远处的用户供热质量差。

#### 3.2. 分散式布置

分散式蓄热结构简单,配置灵活,蓄热系统安装在建筑物旁热延迟现象小到可以忽略,而且可以根据服务建筑性质与用户热需求调整启停,不受其他建筑影响可以最大限度提高服务质量。

分散式布置也存在一些缺陷,Nuytten T 和 Claessens B [20]等研究发现分散式蓄热系统运行性弱于集中式布置,其蓄热水罐分别布置在不同建筑内间隔大,蓄热系统独立运作,不能互相借力使得灵活性最差。分散蓄热方式导致热电联产机组的启停运作需要满足热用户中瞬时最大热需求,致使系统运行不经济,且耗能严重[21]。此外,分散式布置意味着对于等面积供热区域需要额外安装更多的蓄热罐,初期投资会高很多。

#### 3.3. 分布式布置

分布式蓄热罐安装在换热站内,综合吸收了集中式蓄热系统和分散式蓄热系统的优点:1) 对比分散式布置,灵活性有所提高,蓄热罐数量较少,初投资合理;2) 对比集中式布置,其蓄热距离较短,热延迟较小,且可以根据换热站所覆盖热用户的热负荷特点调整,更好发挥削峰填谷作用;分布式蓄热系统

不仅可以实现针对性调峰还同时兼顾了低热延迟、高经济性与高稳定性的优点，因此在实际项目推广中更受青睐。

分布式布置依据蓄热罐蓄热量的来源，将蓄热罐与热网的连接方式分为：从一次网蓄热、从二次网蓄热。方式1一次网侧分布式蓄热见图3；方式2二次网侧分布式蓄热见图4。

张婷等人研究得出结论：方式1蓄热罐设置在一次网处，通过对一次网高温水降压降温后通入罐内蓄热，较方式2热量损耗更少、调节灵活性更高但维护难度也相应提高。

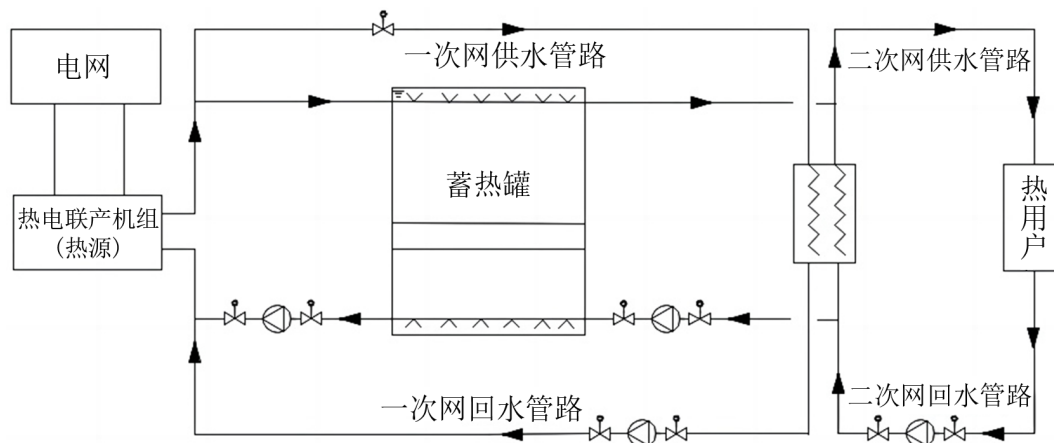


Figure 3. Method 1: Diagram of the distributed layout system of primary grid-side heat storage

图3. 方式1：一次网侧分布式蓄热示意图

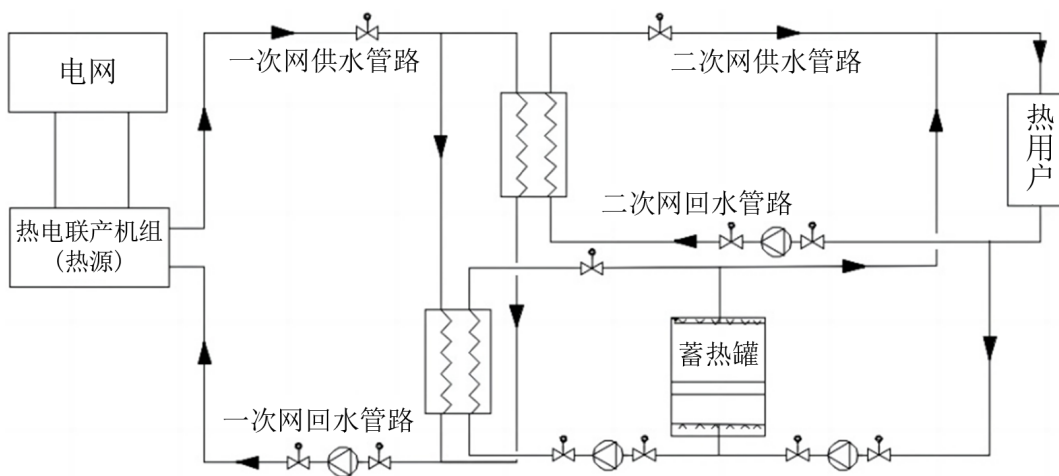


Figure 4. Method 2: Secondary grid side heat storage distributed layout system diagram

图4. 方式2：二次网侧分布式蓄热示意图

#### 4. 热水罐蓄热技术的优势与不足

随着集中供热热网规模逐年扩大，蓄热技术在供热系统中“削峰填谷”，有效降低了高峰供暖压力，技术优势逐渐显现。其中的热水罐蓄热的优势如下[22]：

- 1) 结构简单，运维简便，安全系数高；
- 2) 蓄热介质为水，廉价易得，与供热系统热媒相同可直接接入系统；

- 3) 通过“削峰填谷”，提高集中供热系统的灵活性和经济性；
- 4) 蓄热后作为备用热源使用，且可以为系统补水定压；
- 5) 建设成本远低于调峰热源。

当然，热水蓄热技术也存在以下不足：

- 1) 罐体可能渗入空气，导致管路腐蚀；
- 2) 水蓄热密度低，储蓄等量热量需要体积更大，罐体热损失更大，需在罐外设置保温层；
- 3) 罐体结构以及运行工况需合理设定，不同的参数、工况将直接影响罐内冷热流体掺混强度、蓄热时间以及斜温层厚度，导致蓄热管性能下降，造成不必要的能源损耗[8]。

## 5. 结语

在近年来，中国大力发展热水蓄热罐蓄热采暖系统，因为该系统具有经济效益高、灵活的运行机制和响应“以热定电”等特点[23]。这除了有国内外蓄热技术和相关热电联产项目累积实践的支持外，还因为未来储能调峰收益和市场竞争能力将继续增加，借此弥补能源价格逐年上涨导致热电厂经济效益逐年降低的问题。面对这一现实，很多地区都在推动热电联产协同蓄热系统，并通过不断的研究，借鉴国内外项目，推动分布式蓄热系统的落地，以期助力实现“双碳”目标。

## 基金项目

河北省建设科技计划项目(2021~2002)。

## 参考文献

- [1] 中国能源网. 以规划科学、布局合理、利用高效、供热安全为目标“热电联产产业要形成健康发展格局” [N]. 中国环境报, 2016-05-19(第9版).
- [2] Dogan, E. and Necdet, A. (2016) Improved Thermal Stratification with Obstacles Placed inside the Vertical Mantled Hot Water Tanks. *Applied Thermal Engineering*, **100**, 354-360. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.01.069>
- [3] Abdelhak, O., Mhiri, H. and Bournot, P. (2015) CFD Analysis of Thermal Stratification in Domestic Hot Water Storage Tank during Dynamic Mode. *Building Simulation*, **8**, 421-429. <https://doi.org/10.1007/s12273-015-0216-9>
- [4] Savicki, D.L., Vielmo, H.A. and Krenzinger, A. (2011) Three-Dimensional Analysis and Investigation of the Thermal and Hydrodynamic Behaviors of Cylindrical Storage Tanks. *Renewable Energy*, **36**, 1364-1373. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.10.011>
- [5] Kaloudis, E., Grigoriadis, D., Papanicolaou, E., et al. (2014) Large Eddy Simulation of Thermocline Flow Phenomena and Mixing during Discharging of an Initially Homogeneous or Stratified Storage Tank. *European Journal of Mechanics*, **48**, 94-114. <https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2014.04.012>
- [6] Chung, J.D., Cho, S.H., Tae, C.S., et al. (2008) The Effect of Diffuser Configuration on Thermal Stratification in a Rectangular Storage Tank. *Renewable Energy*, **33**, 2236-2245. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.12.013>
- [7] 董燕京. 热水蓄热器在多热源联网供热系统的应用与节能分析[J]. 区域供热, 2013(2): 94-97.
- [8] 黄丽. 温度分层型水蓄冷槽的模拟及理论研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉科技大学, 2010.
- [9] 周守军. 基于管网动态模型的城市集中供热系统参数预测及运行优化研究[D]: [博士学位论文]. 济南: 山东大学, 2012.
- [10] 戈志华, 张飞宇, 张尤俊. 斜温层单体蓄热罐性能改进的模拟研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(3): 773-781, 956.
- [11] 胡国霞. 温度分层型水蓄冷槽布水器的斜温层试验分析[J]. 能源技术, 2010, 31(4): 198-201.
- [12] 张飞宇. 斜温层蓄热罐结构优化及性能模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2018: 13.
- [13] 刘宇圣. 自然分层型水蓄冷槽性能的模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [14] 张倩男. 热水蓄热罐蓄放热特性及容量与热电联产机组调峰能力的匹配研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2019.

- [15] 高琳. 温度分层型蓄冷水罐斜温层厚度的控制[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019: 28-31.
- [16] 尹正宇, 韩奎华, 高明, 等. 装配隔热板的单罐储热罐性能模拟及焓分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(S1): 236-246.
- [17] 王子焯, 黄凤苗, 郭盛祯. 新型 H 型水蓄冷布水器的设计与数值模拟研究[J]. 发电与空调, 2013, 34(1): 59-63.
- [18] 于航, 邓育涌, 孙斌, 等. 温度分层型水蓄冷罐的仿真研究[J]. 能源技术, 2006, 27(3): 120-122, 126.
- [19] 张婷. 分布式蓄热在集中供热系统中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [20] Nuytten, T., Claessens, B. and Paredis, K. (2013) Flexibility of a Combined Heat and Power System with Thermal Energy Storage for District Heating. *Applied Energy*, **104**, 583-591. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.029>
- [21] Tveit, T.M., Savola, T., Gebremedhin, A., *et al.* (2009) Multi-Period MINLP Model for Optimising Operation and Structural Changes to CHP Plants in District Heating Networks with Long-Term Thermal Storage. *Energy Conversion and Management*, **50**, 639-647. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.10.010>
- [22] 柳文洁. 热水蓄热罐在热电联产供热系统中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [23] 肖钢. 大能源. 分布式能源[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2015: 44-45.