

吸收式热泵技术在某市利用电厂余热的大温差长输供暖中的应用研究

宁喜军^{1,2*}, 马志军^{3#}, 李旋⁴, 安俊军⁵, 马坤茹^{1,2}

¹河北科技大学建筑工程学院, 河北 石家庄

²河北省岩土与结构体系防灾减灾技术创新中心, 河北 石家庄

³国家电投集团东方新能源股份有限公司热力分公司, 河北 石家庄

⁴石家庄市政设计研究院有限责任公司第五分公司, 河北 石家庄

⁵唐山市热力集团有限公司, 河北 唐山

收稿日期: 2022年9月25日; 录用日期: 2022年10月15日; 发布日期: 2022年10月26日

摘要

随着社会经济的发展, 城市供暖面积也在快速增长, 面对不断增加的供暖面积, 利用电厂余热为城市供暖, 该方式仅通过提高一次供水温度已不能满足供暖需求, 为进一步提高原有一次管网的供暖能力, 可通过吸收式热泵大温差改造技术——在保证一次供水温度不变的前提下, 通过大幅降低热源电厂供暖回水温度以显著提高一次管网的供暖能力及热量利用率, 以应对不断增长的供暖需求, 为企业的综合效益的提高及未来的发展提供强有力的保障。在能源站建设改造中, 由于城市原有大部分管网属于老旧管网, 承压能力不能保证, 因此选用热网子站做大温差改造的第二类中继能源站。结合某市热用户的供暖区域实际情况以及参考其它大温差供暖改造实例, 确定适合该市的长输供暖方案——分区域实施集中式大温差改造, 更利于短期内投入实施。为今后吸收式热泵技术在利用电厂余热的大温差长输供暖中应用提供参考。

关键词

换热机组, 大温差, 管网输送, 供暖, 分区域集中式

*第一作者。

#通讯作者。

Application of Absorption Heat Pump Technology in Large Temperature Difference Long Transmission Heating System Using Waste Heat of Power Plants in a City

Xijun Ning^{1,2*}, Zhijun Ma^{3#}, Xuan Li⁴, Junjun An⁵, Kunru Ma^{1,2}

¹School of Building Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang Hebei

²Innovation Center of Disaster Prevention and Mitigation Technology for Geotechnical and Structural Systems of Hebei Province (Preparation), Shijiazhuang Hebei

³Heating Branch, Shijiazhuang Municipal Design and Research Institute Co., Ltd., Shijiazhuang Hebei

⁴No. 5 Branch, State Power Investment Group Hebei Power Co., Ltd., Shijiazhuang Hebei

⁵Tangshan Thermal Group Co., Ltd., Tangshan Hebei

Received: Sep. 25th, 2022; accepted: Oct. 15th, 2022; published: Oct. 26th, 2022

Abstract

Along with the development of social economy, the urban heating area is also in rapid growth. In the face of increasing heating area, waste heat of power plant is used for urban heating. This method can not meet the heating demand only by increasing the temperature of the primary water supply. In order to further improve the heating capacity of the original primary pipe network, the absorption heat pump large temperature difference transformation technology can be adopted—in a water supply guarantee under the premise of constant temperature, by reducing heat power plant heating water temperature to significantly improve the ability of a pipe network of heating and heat utilization, in response to the growing demand for heating, which provides a strong guarantee for the improvement of the comprehensive benefit and the future development of the enterprise. In the construction and reconstruction of energy stations, most of the original urban pipe network belongs to the old pipe network, and the pressure bearing capacity cannot be guaranteed, so the second type of relay energy stations, which are not reformed with large temperature difference, are selected for the heat network sub-stations. Combined with the actual situation of heating area of heat users in a city and with reference to other large temperature difference heating renovation examples, the long distance heating transmission scheme suitable for the city is determined—centralized large temperature difference renovation in different areas, which is more conducive to put into practice in a short time. It provides references for the application of absorption heat pump technology in the long distance heating with large temperature differences using the waste heat of power plants.

Keywords

Heat Exchanger Unit, Large Temperature Difference, Network Transmission, Heating, Subregional Centralization

Copyright © 2022 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

随着大规模的城市建设, 供暖面积的不断增加使得城镇热力管网的热量输配能力相对不足, 原有的管网难以满足供暖要求[1]。提高热力管网的输配能力是解决供需矛盾的有效手段之一。2010年, 付林等人提出吸收式换热器的概念, 通过大幅度降低一次管网回水温度, 从而达到提高供回水温差的效果, 提高热力管网输送能力, 同时解决了输配能力不足与热源不足的问题[2]。

根据《某市城市集中供热专项规划(2016-2020年)》, 2020-2021年采暖期, 某市中心城区各类需采暖建筑面积 26022 万 m^2 , 其中燃煤热电联产 17505 万 m^2 , 大型燃煤锅炉 1741 万 m^2 , 天然气锅炉供暖 4075 万 m^2 , 工业余热、地热、其余合计等清洁供热方式 2701 万 m^2 。各种方式的具体构成如图 1 所示。

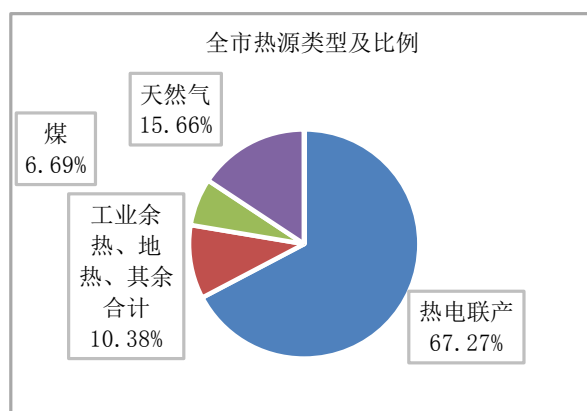


Figure 1. Composition of heat supply in central urban area of a city from 2020 to 2021

图 1. 2020~2021 年某市中心城区供热构成情况

2. 吸收式热泵大温差长输供暖技术原理

大温差吸收式换热机组主要由吸收式换热机组和常规板式换热器组成, 一次管网供水的热量作为吸收式换热机组的驱动力, 产生热泵效应, 进而能够吸收低品位热量。

安装在热力站的吸收式换热机组为该系统的组件, 此组件以吸收式热泵原理为基础, 完成一、二次管网水的换热。吸收式换热机组中的发生器, 以高温水为驱动力, 因加热溶液形成冷剂蒸汽, 浓缩溶液后流入吸收器, 所形成冷剂蒸汽流入冷凝器冷凝, 同时将蒸汽在冷凝过程中所产生的热量传导至二次水, 促使二次水升温。冷剂水经冷凝后再次流入蒸发器, 同时在发生器中完成热量释放的一次水流入蒸发器, 冷剂在低压环境下蒸发, 并从一次水中再吸收热量, 使得一次管网水温降低, 以降温后一次水为一网回水, 返回热电厂。此时, 蒸发器中形成的冷剂蒸汽流入吸收器, 被发生器中所形成的浓溶液吸收, 而在吸收过程中将会产生热量释放, 所释放热量向二次管网水传递[3]。二次管网回水经过吸收式换热机组或板式换热器被加热升温后, 向用户供热。

在补燃型吸收式换热机组的工作原理中, 根据质量及能量守恒方程、溶液热物性及状态方程, 建立在系统循环过程中, 各个主要部件的平衡方程如下:

$$Q_{e,g,sx} + \sum(\dot{m}h)_{in} = \sum(\dot{m}h)_{out} \tag{2.1}$$

$$(G_a - D)\xi_n = G_a\xi_x \tag{2.2}$$

$$Q_{e,g,x} = G_h c_p (t_{he,g,xi} - t_{he,g,xo}) \tag{2.3}$$

$$Q_{c,a,sx} + \sum(\dot{m}h)_{out} = \sum(\dot{m}h)_{in} \tag{2.4}$$

$$Q_{c,a} = G_{yah} c_p (t_{yc,ao} - t_{yc,ai}) \tag{2.5}$$

$$Q_x = G_{yx} c_p (t_{yxo} - t_{yxi}) \tag{2.6}$$

式中： $Q_{e,g,sx}$ —蒸发器、发生器、溶液热交换浓溶液侧的热负荷，KW；

$Q_{e,g,x}$ —一次水在蒸发器、发生器、水-水换热器高温水侧释放的热量，KW；

$Q_{c,a,sx}$ —冷凝器、吸收器、溶液热交换器稀溶液侧的热负荷，KW；

$Q_{c,a}$ —二次水流经冷凝器和吸收器过程中吸收的热量，KW；

Q_x —二次水在水-水换热器低温水侧吸收的热量，KW；

$\dot{m}h$ —各个换热器的介质流量，kg/s、各个换热器的介质焓值，kJ/kg；

ξ —溴化锂溶液的浓度，%； G_a —溴化锂稀溶液的流量，kg/s；

D —冷剂蒸汽的流量，kg/s； G_{yah} —二次水流经吸收式换热机组的流量，kg/s；

G_h —一次水的流量，kg/s； G_{yx} —二次水流经水-水板式换热器的流量，kg/s。

图 2 所示为大温差换热机组与常规换热器的一次供回水温度对比，在保证一次供水温度不变的前提下，通过大幅降低一次管网回水温度可显著提高一次管网的输送能力，以应对不断增长的热负荷需求[4]。常规板式换热器与大温差换热机组一次管网供回水温度区别见下图 2。

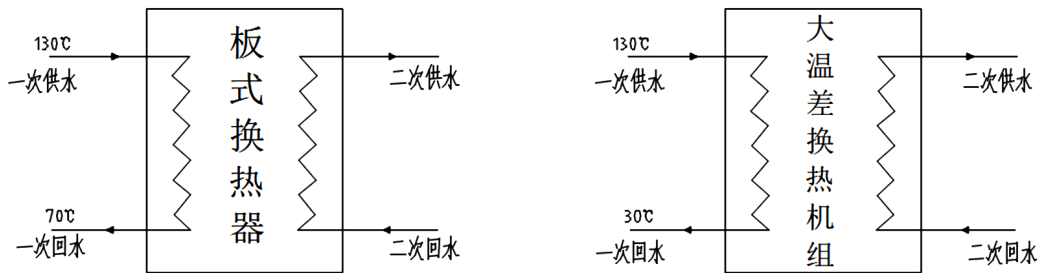


Figure 2. Schematic diagram of primary supply and return water temperature of conventional plate heat exchanger and large temperature difference heat exchanger unit

图 2. 常规板式换热器与大温差换热机组一次供回水温度示意图

3. 能源站建设方案

根据改造需求，在支干管网处建立中继能源站，设置集中式大温差换热机组，通过补充燃气高品位能源，将一次管网回水深度降温至 30℃。单台机组换热功率可根据具体项目要求研发制定(50 MW~150 MW)。

3.1. 第一类能源站

针对新建的或分布式大温差技术应用占比大的支干线，利用原有小型热电厂、部分燃煤锅炉房、隔压站用地改造成为第一类中继能源站，一次网水通过第一类能源站的集中式热泵机组流向分布式大温差热力站，将热网回水温度进一步降低至 30℃，该类中继能源站可长久保留(具体原理图见图 3)。

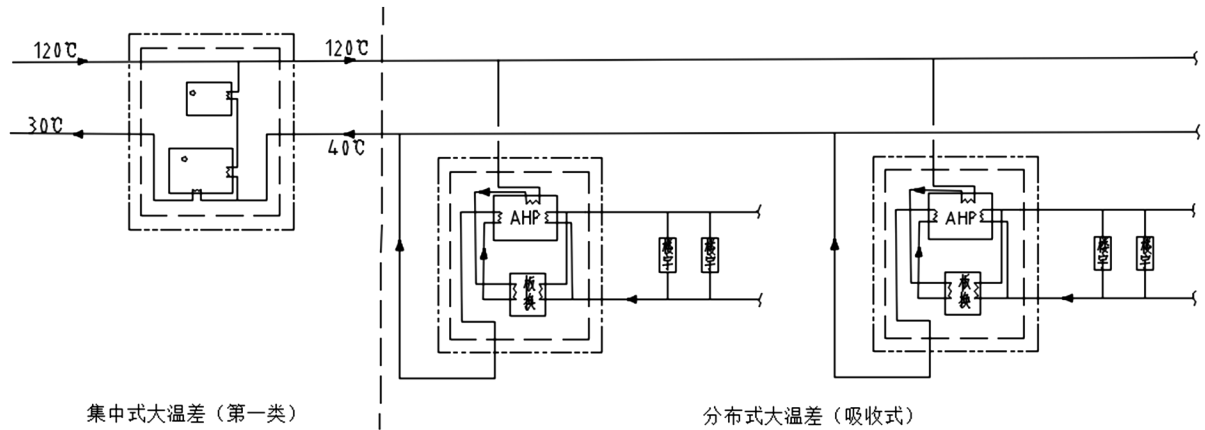


Figure 3. Schematic diagram of type I relay energy station
图 3. 第一类中继能源站原理图

3.2. 第二类能源站

在承压、承温能力差的老旧支干线上建设第二类中继能源站。从第二类能源站到热网子站时，为保障供暖安全，二次管网参数尽量不高于现状参数，尽量采用大流量小温差运行方式。中继能源站设置集补燃型吸收式热泵，辅以部分电动热泵，将一网回水温度降低至 30°C(具体原理见图 4)。

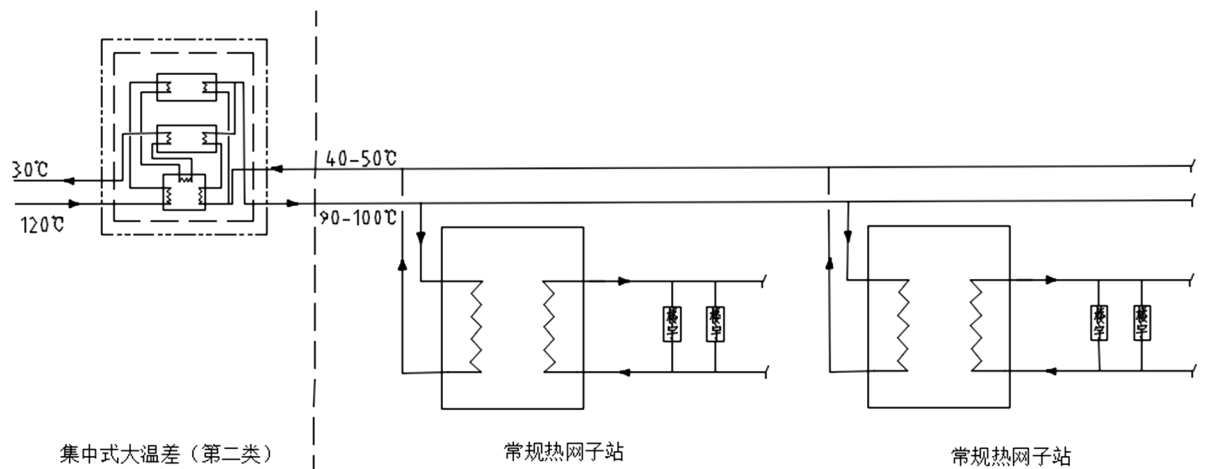


Figure 4. Schematic diagram of class II energy station
图 4. 第二类能源站原理图

集中式大温差换热机组存在以下优点与不足：

优点：设备可集中设置，项目可实施性强，可将回水温度深度降温至 15°C，为远程输送与电厂余热回收创造更好的条件。

缺点：需要补充燃气、电力作为调峰驱动(补燃型)，增加供暖成本。

对比上述第一类能源站和第二类能源站，因为城市原有大部分管网属于老旧管网，承压能力不能保证，如果以进入末端换热站入口温度 115°C 考虑，管网运行压力需不低于 115°C 高温热水汽化压力运行，所以选用第二类大温差能源站方案。

结合供热区域实地情况以及参考各地其余大温差供热改造实例，现将本热电区域大温差布置方式进

行如下分析:

方案一: 实施分布式大温差改造。就目前项目情况看, 实施分布式大温差改造对整体改造效果难以保证, 零次网回水温度须根据改造进展情况逐年降低。

现有换热站绝大多数位于老旧小区, 空间狭小, 存在换热站迁建场地征用问题, 满足安装规范、检修要求的大温差改造换热站数量较少(不足 30%)。如不能全部进行改造, 项目实施后无法确保零次网回水温度降至 30℃以下。采用分布式改造周期太长。大同和太原在政府大力支持下, 经过了 3 年改造, 至今未将回水降至 30℃以下, 本区实际情况更为复杂, 项目实施改造难度极大。

方案二: 实施集中式大温差改造。利用南厂区空地建设总容量为 900 MW 的集中补燃型大温差机组, 场地及燃气接入方面存在便利, 相对分布式改造实施难度降低, 这种方式主要问题在于一次网流量太大, 现有的管网无法满足要求, 一次管网按 30℃温差计算, 南、北两站和 E 管区域总供热面积 2024 万 m², 一次网流量为 2481 t/h, 需要管径为 DN2000, 现有南厂区一次网出线管径为 DN1200, 由于现有管网较为复杂, 在实施大温差后全部从南厂进行供水, 一次网管道需进行更换, 还需经过详细的水利计算才可确定水泵、管网等选型, 管网水力平衡也需要重新调整。

方案三: 分区域实施集中式大温差改造。在北厂区建设总容量为 400 MW 补燃型大温差能源站一座, 在南厂区西南角建设总容量为 500 MW 补燃型大温差能源站一座, 南厂区能源站分为两部分, 一部分为现状隔压总站所带负荷, 另一部分为 E 管区域负荷, 两座能源站共同承担 2024 万 m² 供热负荷。南北区 1777 万 m² 供暖面积的管网可利用现有的一次管网进行供热, 无需对管网进行改造。E 管区域一次网最大流量为 3190 t/h, 需要管径为 DN700, 此管线路由需要从红星街西侧竖井内(南厂运煤通道门口)接出 DN700 的管道敷设至南厂区东北角围墙内, 沿厂内合适位置敷设至西南角换大温差。

综合考虑, 选择分区域实施集中式大温差改造更为合适, 南北厂区均具备大温差机房建设的空间, 管网也无需进行大量改造。

4. 热负荷

城市集中供暖的供暖范围广、面积大。由于统计所有单体建筑的采暖耗热量的可行性较小, 因此不能详细计算出各建筑物的热负荷。通常区域采暖建筑物的热负荷的计算采用估算方式和历年实际运行耗热量相结合的方式确定[5]。2017~2018 采暖季, 2018~2019 采暖季新华热电区域供暖实际运行耗热量见表 1。

Table 1. 2017~2018 and 2018~2019 heating seasons Xinhua thermal power district actual operation heating consumption
表 1. 2017~2018 采暖季, 2018~2019 采暖季新华热电区域供暖实际运行耗热量

采暖季	采暖季供暖量(万 GJ)
2017~2018 采暖季	544.7783
2018~2019 采暖季	532.2453

2017~2018 采暖季和 2018~2019 采暖季新华热电区域供暖面积都按照 1921 万 m² 考虑, 经计算 2017~2018 采暖季平均热指标为 27.4 W/m², 折合到室外计算温度-6.2℃时设计热指标为 37 W/m²; 2018~2019 采暖季平均热指标为 26.8 W/m², 折合到室外计算温度-6.2℃时设计热指标为 36.3 W/m²。

考虑到某市域未来供暖面积的发展, 设备选型选取的设计热指标为 45 W/m²; 为达到尽可能与实际运行耗能相符, 主要技术指标计算基准按照设计热指标 40 W/m² 计算。

4.1. 计算热负荷

1) 按照 45 W/m² 设备选型时计算采暖设计热负荷:

$$Q_{\max} = q_h \times A \times 10^{-2} \quad (4.1)$$

式中： Q_{\max} ——采暖设计热负荷(MW)；

q_h ——采暖热指标(W/m²)；

A ——采暖建筑面积(万 m²)。

按照 45 W/m² 设备选型计算热负荷，新华热电厂区域 2024 万 m² 供暖面积采暖设计热负荷：910.8 MW。

4.2. 采暖平均热负荷

$$Q_{pi} = Q_{\max} (t_i - t_a) / (t_i - t_{o,h}) \quad (4.2)$$

式中： t_i ——室内设计温度：取 18℃；

t_a ——采暖期室外平均温度：0.1℃；

$t_{o,h}$ ——采暖期室外计算温度：-6.2℃；

采暖设计热指标按照 45 W/m² 计算时，采暖期平均热负荷：673.69 MW。

4.3. 采暖热负荷

结合前两个采暖季运行情况，设计热指标选取 40 W/m² 时计算热负荷为：

$$Q = 40 \times A \times 10^{-2} \quad (4.3)$$

经计算采暖设计热指标选取 40 W/m² 时，采暖热负荷：809.6 MW。

5. 工艺流程、设备选型

5.1. 工艺流程

大温差能源站工艺系统由三个分系统组成，分别为零网水系统、一网水系统、烟气系统，工艺流程简图见图 5。

零网水系统是以零网水为工质流转的系统，零网水分为四个流程，依次进入大温差机组发生器的驱动热水流程、进入板换加热一网水的水水换热流程、进入大温差机组蒸发器的第一次余热吸收流程、进入补燃热泵蒸发器的二次余热吸收流程[6]。

一网水分为两个流程，分别是进入大温差换热机组流程和进入补燃机组流程。

一网水大温差换热机组流程：一网水进入大温差换热机组流程分为两个支路，一路经吸收器、冷凝器与零网水换热，一路经板换与零网水换热，混合后成为低于 80℃ 的一网供水，可满足初末寒期的供暖需求时，直接进入一网供水管道。

一网水进入补燃机组流程：当大温差换热机组流出的低于 80℃ 一网水热量不能满足供暖需求或零网回水温度不能满足 30℃ 时，补燃机组启动，从大温差换热机组流出的一网水经过补燃热泵吸收器和冷凝器加热到 80℃ 后，进入一网供水管道。

烟气系统是补燃机组采用燃气为热源，在每台直燃热泵烟道上[7]，安装一级节能器，采用烟气 - 水换热的方式，将烟气的排烟温度降低到 80℃ 以下，回收的烟气温度用于加热一网水，设计一网水从 50℃ 加热到 80℃，多台补燃机组的烟道汇集到一条主烟道上，安装烟气在线监测系统。

此项目建设投资约为 20480.07 万元。资本金占投资的 40%，建设期贷款利息 125.44 万元，工程动态投资 20605.51 万元。经财务分析得静态投资回收期为 8.49 年，内部收益率为 11.9%，故本项目在经济上具有可行性。

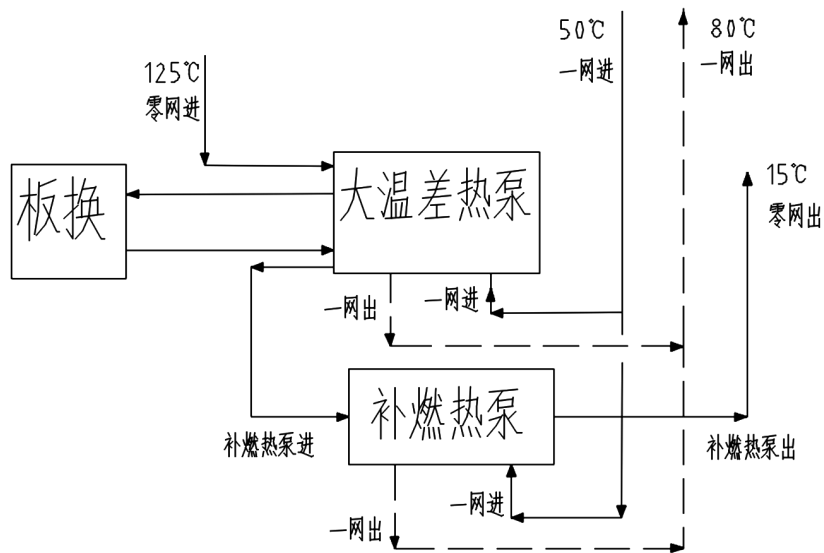


Figure 5. Process flow diagram
图 5. 工艺流程简图

5.2. 设备选型

供暖热量由零网供暖热量+燃气补燃热量组成，每年补燃量的大小，主要取决补燃点(补燃开始的室外温度)的高低和燃气耗用热量与系统总容量的占比。当大温差换热机组零网回水温度不能满足低于 30℃ 要求或一网温度不能达到设计要求 80℃ 时，补燃热泵启动，将大温差机组蒸发器中高于 30℃ 的零网回水，进入补燃热泵的蒸发器进行放热降温，流出不大于 30℃ 的零网水，回到零网回水管道；将大温差换热机组流出的 1 网供水经过补燃热泵吸收器和冷凝器加热到 80℃ 后，进入 1 网供水管道。由大温差机组、补燃机组和板换一一对应的布置方式，成为独立的补燃型大温差机组。

供暖区域总面积 2024 万 m²，根据实际情况划分为南、北厂区，南厂区负责供暖面积 1135.5 万 m²，北厂区负责供暖面积 888.5 万 m²。设计参数按照零次网供回水温度达到 125℃/15℃[8] [9] [10]，一次管网供回水温度 80℃/50℃ 考虑，设备装机负荷按照 45 W/m² 的热指标进行选型，总设备负荷为 910.8 MW。

根据某市南、北厂区及 E 管区域面积划分情况计算：南厂区能源站需要设置 57 MW 补燃型大温差机组 9 台(包括 E 管区域 2 台)，总负荷 513 MW，北厂区能源站需要设置 57 MW 补燃型大温差机组 7 台，总负荷 399 MW。

经调查，南北厂现状换热总站设备均处于良好运行状态，为了节省投资，遵循设备利旧原则，现状设备符合利旧条件的均考虑就地利旧或者移位利旧，根据实际情况，制水设备和补水系统都能利旧[11]，考虑循环水泵和板式换热器是否可以利旧。

南、北厂区大温差能源站设备选型如表 2、表 3 所示：

Table 2. Equipment selection of energy station in the North plant area

表 2. 北厂能源站设备选型

序号	项目	设备参数	单位	数量	备注
1	补燃型大温差热泵机组	换热量 57 MW	套	7	
1.1	大温差机组	换热量 51.3 MW	台	7	
1.2	补燃热泵	补燃量 5.7 MW	台	7	

Continued

1.3	板式换热器	换热量 60 MW	台	7	利旧
2	循环水泵	G = 3840 t/h H = 126 m N = 1800 KW	台	4	利旧
3	补水系统		套	1	利旧
4	零网除污器	DN1200 P = 2.5 MPa	台	1	
5	一网除污器	DN1200 P = 1.6 MPa	台	1	

Table 3. Equipment selection of energy station in the South plant area**表 3.** 南厂能源站设备选型

序号	项目	设备参数	单位	数量	备注
1	补燃型大温差热泵机组	换热量 57 MW	套	9	
1.1	大温差机组	换热量 51.3 MW	台	9	
1.2	补燃热泵	补燃量 5.7 MW	台	9	
1.3	板式换热器(1)	换热量 60 MW	台	6	利旧
	板式换热器(2)	换热量 50 MW	台	4	利旧
2	循环水泵(1)	G = 3840 t/h H = 126 m N = 1800 KW	台	1	利旧
	循环水泵(2)	G = 3274 t/h H = 126 m N = 1800 KW	台	1	利旧
	循环水泵(3)	G = 1260 t/h H = 126 m N = 710 KW	台	3	利旧
3	E 管区域一网循环水泵	G = 1700 t/h H = 85 m N = 560 KW	台	3	两用一备
4	补水系统		套	1	利旧
5	零网除污器	DN1200 P = 2.5 MPa	台	1	
6	一网除污器	DN1200 P = 1.6 MPa	台	1	

根据南、北厂区大温差能源站各自占地面积，确定在南厂区隔压站西侧，北厂区隔压站东侧区域面积建设大温差能源站。南厂区补燃机组排烟可利用现有烟囱，北厂区需新建烟囱一座。

结合某市热用户的供暖区域实际情况，实施分区域实施集中式大温差改造后，经过 2020~2022 二个采暖期的实际运行，降低了一次水网的回水温度，增加了热网输送能力，提升了供暖系统效能。提高能源利用率，相当于进一步减少了该市区烟气排放量和改善市区空气质量，符合国家实现北方地区冬季清洁取暖的政策方针要求。

6. 结论

1) 吸收式热泵技术在利用电厂余热的大温差长输供暖中的应用符合国家能源及环保政策，能保证冬季供暖需求。

2) 通过对比第一类中继能源站和第二类中继能源站，结合供暖区域管网老旧和承压能力弱等问题，

暂时选用第二类中继能源站。但随着老旧管线的更新，应逐步取消这类中继能源站，逐步过渡到一类中继能源站。

3) 由于目前尚无大温差设备制作的国家标准，各个厂家补燃型大温差的补燃条件和补燃率不相同，经过 2020~2022 年的供暖运行证明，补燃率维持在 10%左右。今后应逐渐规范大温差设备制作的国家标准，本项目的成功实施可为今后同类工程提供参考。

科技项目

河北省科技厅创新能力提升计划(21554501K)。

参考文献

- [1] 张丽英. 基于吸收式换热的热电联产集中供热应用研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林建筑大学, 2014.
- [2] 王林文. 太原市基于吸收式大温差供热技术应用及问题探讨[J]. 区域供热, 2020(5): 40-45.
- [3] 张索敏. 大温差吸收式换热技术换热站应用分析[J]. 住宅与房地产, 2019(34): 241.
- [4] 葛宇, 周小三, 厉吉文, 等. 大温差溴化锂吸收式热泵设计计算与数值分析[J]. 中小企业管理与科技(上旬刊), 2020(12): 189-193.
- [5] 纪强, 韩宗伟, 张孝顺, 等. 吸收式热泵研究进展及应用现状[J]. 暖通空调, 2020, 50(10): 14-23.
- [6] 张承虎, 林己又, 李亚平, 谭羽非. 喷射式大温差换热系统实验研究[J]. 煤气与热力, 2020, 40(11): 1-7+41.
- [7] 王冠英, 王莹. 大温差供热热力站改造方案[J]. 煤气与热力, 2020, 40(7): 12-15+42.
- [8] Sun, F.T., Zhao, J.Z., Fu, L., *et al.* (2017) New District Heating System Based on Natural Gas-Fired Boilers with Absorption Heat Exchangers. *Energy*, **138**, 405-418. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.030>
- [9] Sun, J., Ge, Z.H. and Fu, L. (2017) Investigation on Operation Strategy of Absorption Heat Exchanger for District Heating System. *Energy and Buildings*, **156**, 51-57. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.054>
- [10] 朱添奇. 单效溴化锂吸收式换热机组研发与性能实验研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [11] 钟杰成, 孙永海, 李文才. 浅谈吸收式大温差换热机组在供热系统中的应用[J]. 区域供热, 2017(6): 123-126+134.