

蒸汽驱动型压缩式热泵在热电厂余热回收中的应用

张伟平 邓伟鹏 孙静

摘要：本文介绍了蒸汽驱动型压缩式热泵的原理及其节能优势，并对热电厂余热回收的典型案例分析。采用蒸汽作为驱动能源回收热电厂冷却水余热，不仅实现了废热量的回收再利用，而且避免了发电汽轮机的冷端损失^[1]，提高了热电厂的综合能源利用率，对热电厂的节能、降耗和减排事业有重大意义。

关键词： 蒸汽驱动 压缩式热泵机组 汽轮机 节能减排

1. 概述

传统热电厂使用冷却水将发电汽轮机乏汽中所蕴含的热量通过冷却塔排放到空气中，这造成了热能和水资源的巨大浪费。一般纯凝热电厂，其冷端损失可达 50%以上。回收热电厂冷却水中的低品位余热用于集中供暖，不仅可以避免能源浪费、提高热电厂的综合能源利用率，更可在保留原有设备的情况下增加热电厂的供热能力。

以多级离心式热泵为代表的蒸汽驱动型压缩式热泵，凭借其高可靠性及大温差提升能力，为热电厂冷却水余热回收集中供暖应用开辟了新途径。压缩式热泵机组通过氟利昂蒸气压缩式制热循环，从热源水中提取低品位热能，并将提取的热量连同压缩机压缩功一同释放到热网回水中，用于热水加热。从而实现余热回收集中供暖的目的。

2. 蒸汽驱动压缩式热泵机组介绍

2.1 蒸汽驱动压缩式热泵机组原理

蒸汽驱动的热泵机组与电驱动热泵机组的构造^[2]、原理以及循环流程都是相同的，其不同之处在于：蒸汽驱动压缩式热泵机组的驱动能源是蒸汽，而不是电能，具有一定压力和温度的蒸汽推动汽轮机做功，汽轮机的功率输出给压缩机，压缩机为热泵制热循环提供动力。

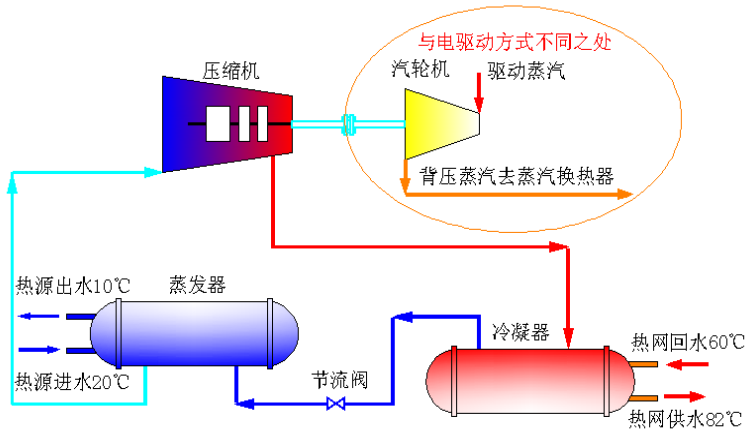


图 1：蒸汽驱动压缩式热泵机组流程图

2.2 蒸汽驱动离心式热泵机组的特点

蒸汽驱动的多级离心式热泵机组在暖通空调、石油化工、区域能源等多个领域有着广泛的应用，具有大制热量、大温度提升能力的特点。由于压缩机采用多级叶轮，能够实现大于 70℃ 的温度压头（温度压头指热泵冷凝器热水出水温度和热泵蒸发器热源水出水温度的差值）。

蒸汽驱动的压缩式热泵机组的驱动撬块（主要包括驱动设备、压缩机和控制中心）和换热容器（主要包括蒸发器、冷凝器以及中冷器）可分开放置，其灵活的安装方式可以满足不同客户的多种多样的现场需求。

蒸汽驱动的压缩式热泵机组单机制热量大、运行稳定、使得整个供热系统流程简化，设备故障率低，适合对安全、可靠性要求较高的城市集中供暖应用。



图 2：蒸汽驱动的压缩式热泵机组

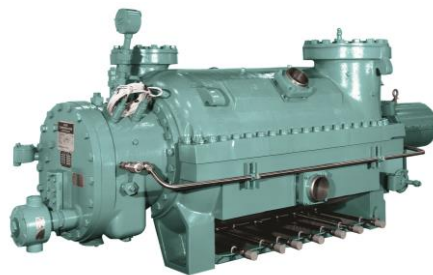


图 3：多级离心式压缩机

3. 蒸汽驱动和电力驱动压缩式热泵一次能源使用率分析

和电驱动热泵机组相比，蒸汽驱动压缩式热泵机组采用蒸汽直接驱动，避免了发电机组的冷端损失和电力输送损失，提高了能源利用率，而且利用蒸汽驱动压缩式热泵机组的余热回收系统可以制取超过 100℃ 的高温热水。

3.1 电机驱动型压缩热泵一次能源利用率分析

以火力发电为例，电厂通过锅炉产生蒸汽驱动汽轮机发电，以热泵机组制热效率（热泵机组制热量和驱动功率比值）为 5.0 为例，则电机驱动热泵机组的能源使用率分析如下：

100% 的一次能源（煤），进入锅炉产生蒸汽，锅炉损失 10%；发电效率（煤电转换率）取 35%，另外 55% 的能量通过冷却塔排放到空气中去。35% 的电能用于驱动热泵机组可以回收 140% 的余热量，热泵机组的总供热量为 175%。

3.2 蒸汽驱动型压缩式热泵一次能源利用率分析

仍以煤作为一次能源，燃煤锅炉产生蒸汽，蒸汽直接驱动热泵机组。以热泵机组制热效率（热泵机组制热量和驱动功率比值）为 5.0 为例，则蒸汽驱动型热泵的能源使用率分析如下：

100% 的一次能源（煤），进入锅炉产生蒸汽，锅炉损失 10%；蒸汽蕴含能量的 30% 转化为有用功，则可以用来驱动热泵机组的能量占一次能源的 27%，通过热泵可回收 108% 的余热，产生 135% 的热量。蒸汽中另外含有的 70% 热量直接放热，则可实现的供热量占一次能源的 63%。则蒸汽驱动型热泵提供制热量为 198%。

3.3 小结

通过上述分析可知：在相同热泵制热效率的情况下（制热 COP 取 5.0），蒸汽驱动压缩式热泵机组利用 1kw 的一次能源（煤）可以得到将近 1.98kw 的供热量，而电驱动热泵机组利用 1kw 的一次能源（煤）可得到 1.75kw 的供热量。在集中供暖领域应用，蒸汽驱动方式能够实现更高的一次能源利用率。

4. 热电厂余热回收集中供暖案例分析

4.1 项目背景

北方某城市热电厂有 4 台发电机组，改造前从#3 机（C12-3.43/0.981）和#4 机（C25-8.83/0.98）抽汽供暖，换热首站的供热能力为 100 万平方米，抽汽参数 0.98MPa，300℃，供热抽汽量 60 吨/时。

预计到 2014 年，换热首站的供热能力要扩容至 200 万平米，热网实际的供回水温度 95℃/55℃，其供热缺口有 100 万平方米，供热的峰值负荷大约需要增加 40MW。

4.2 蒸汽驱动型多级离心式热泵供热改造项目说明

在不增加新热源和供热抽汽量的前提下，只有回收冷却水中的余热可以增加供热负荷。由于住宅供热的负荷系数在 0.7~0.8 之间，同时也是为了降低设备的冗余量，按照峰值供热负荷的 80%来设计余热回收系统。

选用 1 台制热量 24500kw 的蒸汽驱动压缩式热泵机组，热源水（电厂冷却水）进/出热泵蒸发器的温度为 25℃/20℃，热泵冷凝器把 55℃的热网回水加热到 68.3℃；热泵汽轮机的背压蒸汽在热泵表冷器中将冷凝器 68.3℃的热水继续加热到 87℃，热泵表冷器的加热量 39568kw，热泵系统（冷凝器和表冷器）总供热量约 64MW，基本可以满足供热季初寒期和中寒期的供热需求。在极寒期，87℃热水需要再进入调峰换热器加热到 95℃，调峰换热器由 1#机的低压蒸汽作为热源，提供热量 16MW，能够满足极寒期的峰值供热需求。

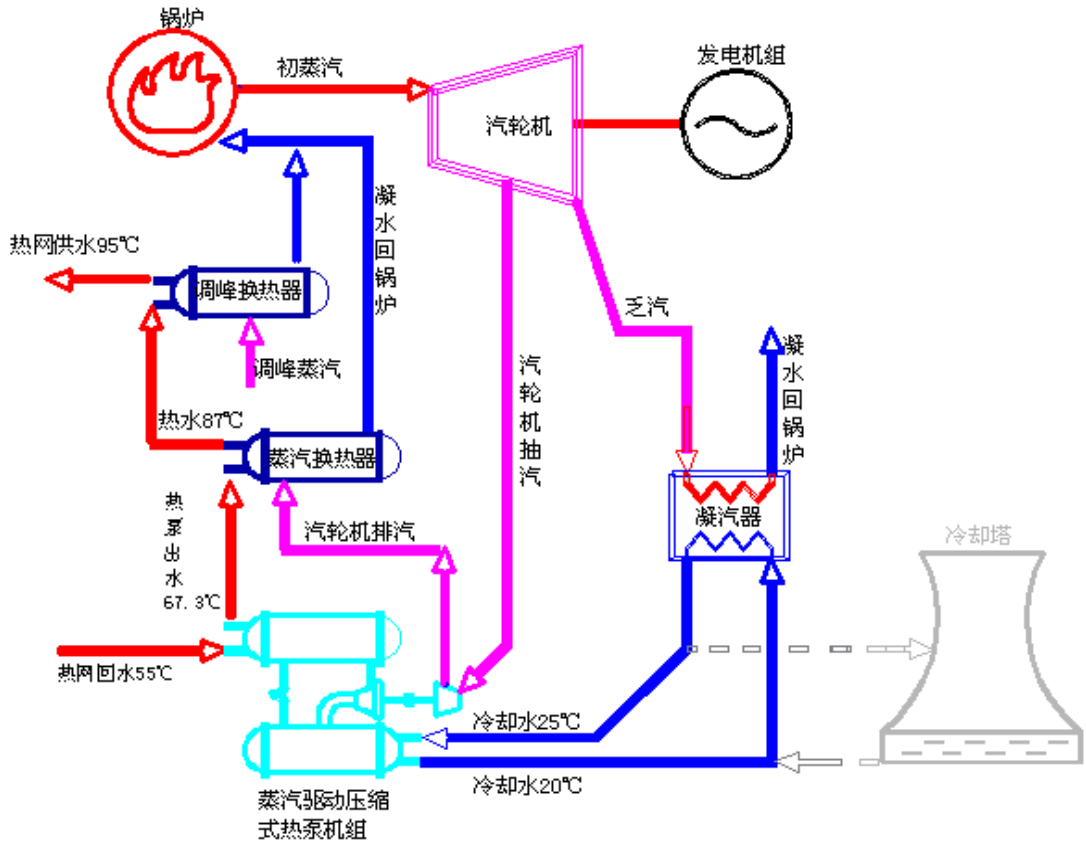


图 4： 压缩式热泵机组回收冷却水余热流程图

4.3 蒸汽驱动型压缩式热泵系统主要配置

4.3.1 热泵机组

本项目选用了 1 台蒸汽驱动的压缩式热泵机组，单机制热量 24500kw，热泵机组从 25℃的冷却水中提取废热，机组热水出水温度 67.3℃。压缩机设计为三级叶轮，采用汽轮机驱动，汽轮机用汽量 62 吨/h，从冷却水中回收的余热量 19396kw。

表 1： 蒸汽驱动压缩式热泵机组性能参数表

机组类型	制热量	汽轮机输出效率	蒸汽量	制热效率	蒸发器		冷凝器	
	kw		吨/h		进出水温度 ℃	流量 m3/h	进出水温度 ℃	流量 m3/h
蒸汽驱动压缩式热泵机组	24500	5104	62	4.8	25/20	3335	55/67.3	1720

4.3.2 热泵驱动汽轮机

汽轮机的进汽压力 0.98MPa（绝压），温度 300℃，焓值 3062kJ/kg；排汽压力 0.15MPa（绝压），温度 165℃，焓值 2766kJ/kg；蒸汽做功焓差 296kJ/kg，1 台蒸汽驱动压缩式热泵机组理论计算的小时耗汽量为 62 吨。

4.3.3 热泵表冷器

汽轮机的排汽压力 0.15MPa（绝压），温度 165℃，焓值 2766kJ/kg；进入蒸汽换热器完成热量交换之后变为 110℃的凝结水（凝水焓值 460kJ/kg）；热泵机组的供热水流量 1720m³/h，62 吨的汽轮机排汽能够把 67.3℃的热泵机组出水继续加热到 87℃；热泵表冷器加热量为 39568kw。

4.4 蒸汽驱动压缩式热泵余热回收集集中供暖节能分析

热泵机组在主工况下余热回收量为19.4 MW。以供暖季5个月计算，热泵系统在单个供热季回收的余热量为 25.1万GJ，折合标煤 8579吨，实现CO₂减排22305吨。

5. 总结

蒸汽驱动型压缩式热泵比电力驱动型压缩式热泵具有更高的一次能源使用率，在热电厂余热回收集集中供暖等大型供热场合，蒸汽驱动方式更具经济性。

以多级离心式热泵为代表的压缩式热泵，因为其压缩机的高压头特性，使热泵具备普遍具备 60℃-75℃的高温差提升能力(热水出水和热源水出水温度差)。在余热回收集集中供暖应用领域，这意味着压缩式热泵可以在不提高热电厂冷却水温度的情况下，满足热网高供/回水温度的要求（热电厂冷却水温度越低，发电汽轮机乏汽压力越低，发电煤耗越低），充分利用余热资源，为热电厂余热回收集集中供暖应用提供高效节能解决方案。

参考文献

- [1] 黄树红等. 汽轮机原理. 中国电力出版社, 2008
- [2] 严启森. 空气调节用制冷技术. 第二版. 中国建筑工业出版社, 1980
- [3] 陆耀庆. 实用供热空调设计手册 (上下册). 第二版. 中国建筑工业出版社, 2008

作者简介:

张伟平 13683646117

Wei.ping.zhang@jci.com

北京市东城区祈年大街 18 号楼 2 号院 100062 约克 (中国) 商贸有限公司北京分公司