

# 蒸汽驱动型离心式热泵在热电厂及市政污水厂余热回收集中供暖中的应用

作者： 邓伟鹏、孙静、张伟平

## 摘要：

介绍以汽轮机为驱动力的离心式热泵的特点，分析热电厂及市政污水处理厂余热资源，探讨蒸汽驱动型离心式热泵在热电厂及污水处理厂余热回收集中供暖中的应用。介绍余热回收集中供暖系统配置方式，分析系统节能优势，通过案例总结使用效果。为热电厂及市政污水厂余热回收集中供暖应用开辟了新途径。

## 关键词：

蒸汽驱动，离心式热泵，热电厂余热、市政污水厂余热、集中供暖

## 1. 热电厂及市政污水厂余热回收集中供暖应用背景

近年来，中国的热电联产得到迅速发展。截至2011 年底，全国热电联产装机容量达到1.4 亿 KW。总体上看，目前工业用热仍然是热力消费的主导领域，占全国热力消费总量的比重超过70%。居民采暖是热力需求的另外一个主要应用市场。据统计中国城市集中供热面积从2006 年的26.6 亿平方米增长至2010 年的43.6 亿平方米<sup>[1]</sup>。

国内对如何提高热电厂热效率作了很多积极探讨。其中热电厂发电汽轮机乏汽冷凝热余热回收集中供暖系统，在提高热电厂热效率的同时，增加系统供热能力满足城市集中供暖对热源的需求，受到国内同行的广泛关注。各类形式热泵（压缩式热泵，吸收式热泵）在热电厂余热回收的应用也得到了业内的关注<sup>[2]</sup>。

本文以蒸汽驱动型离心式热泵为对象，分析其在热电厂及市政污水处理厂余热回收集中供暖中的应用特点、系统布置形式、系统节能效果，指出蒸汽驱动型离心式热泵在余热回收集中供暖领域的应用前景。

## 2. 蒸汽驱动型多级离心式热泵性能特点

### 2.1 多级离心式热泵系统循环

离心式热泵以氟利昂为制冷剂（如R134A），其制热原理属于制冷剂蒸气压缩式循环，主要设备包括蒸发器（吸收热源中的低品位热量）、压缩机（提升制冷剂蒸气压力）、冷凝器（将热量排放到热水系统）、节流装置。对于多级离心式热泵，为了提高系统制热效率，通常配有中冷器等辅助设备。图1 为典型多级离心式热泵系统循环图。

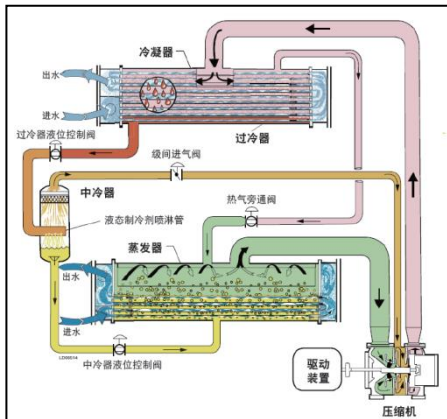


图1：典型多级离心式热泵系统循环图

## 2.2 多级离心式热泵大温差提升能力

多级离心式热泵性能主要取决于压缩机性能。在制冷剂蒸气压缩式制热循环过程中，压缩机的进气压力（来自蒸发器的制冷剂蒸气）取决于蒸发器制冷剂饱和压力，而该饱和压力（对应的饱和温度）取决于蒸发器热源水的出水温度。压缩机的排气压力（排气通往冷凝器）取决于冷凝器制冷剂饱和压力，而该饱和压力（对应的饱和温度）取决于冷凝器供热水的出水温度。通常定义压缩机温度压头为热泵冷凝器出水（供热水）温度和热泵蒸发器出水（热源水）温度之差。

与单级叶轮离心式热泵相比，采用多级叶轮的多级离心式热泵具有更高的制冷剂蒸气压力提升能力。这对热泵而言意味着可以实现更高的温度压头。目前多级离心式热泵温度压头普遍可达 $60^{\circ}\text{C}$ – $75^{\circ}\text{C}$ <sup>[3]</sup>。这意味着在余热回收应用中，可以回收利用温度较低的低温废水（如热泵蒸发器热源水进水 $10^{\circ}\text{C}$ ，出水 $5^{\circ}\text{C}$ ），生产温度较高的热水（如热泵冷凝器出水 $80^{\circ}\text{C}$ ，压缩机温度压头 $75^{\circ}\text{C}$ ）。这为多级离心式热泵在余热回收领域的应用奠定了基础。

## 2.3 多级离心式热泵制热效率

根据离心式热泵制热循环机理，离心式热泵制热效率主要取决于温度压头（热泵能见到的最高水温差：热泵热水出水和热源水出水温差）。温度压头越高（热泵压缩机制冷剂蒸气压力提升越高），压缩机越“费力”，压缩机效率越低。通常用制热效率（制热COP）描述热泵的制热性能，其定义为热泵制热量和压缩机能耗的比值。对于典型的三级离心式压缩机，其制热COP和温度压头的对应关系如图2所示<sup>[3]</sup>。可见对于常见的温度压头范围（ $40^{\circ}\text{C}$ 至 $60^{\circ}\text{C}$ ），压缩机制热效率在4.0至5.8之间。离心式热泵系统能量平衡图如图3所示（以制热COP=5.0为例）。

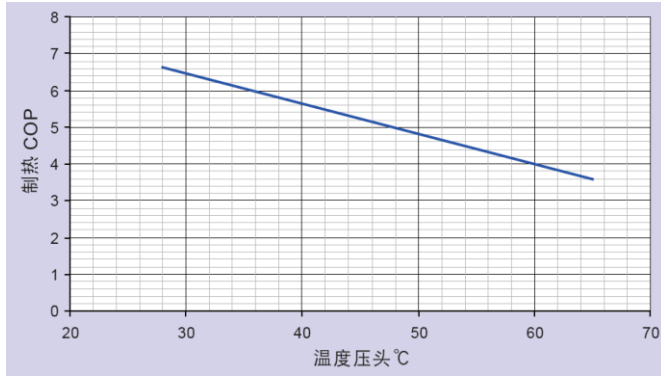


图2： 多级离心式热泵 制热效率-温度压头 关系图

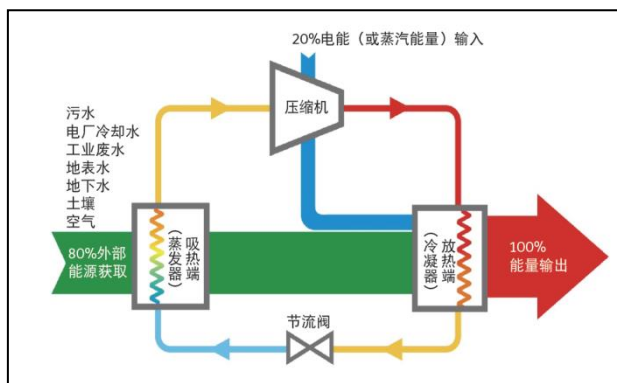


图3： 离心式热泵系统能量平衡图（制热COP=5）

#### 2.4 蒸汽驱动型多级离心式热泵系统配置及特点

采用开式驱动方式的多级离心式压缩机可采用多种方式驱动压缩机转轴。常见的驱动方式为电机驱动或汽轮机驱动。由于电机驱动型离心式热泵在民用建筑及工商类建筑及工艺系统中已有大量应用，本文不作讨论。对于大型集中供暖应用，由于蒸汽驱动比电驱动方式具备更高的一次能源使用率，通常作为首选的热泵驱动方式。

蒸汽驱动型多级离心式热泵，采用蒸汽（来自锅炉或发电汽轮机抽汽）驱动小型汽轮机，汽轮机转轴通过联轴器（转速合适也可以采用直联方式）联接压缩机转轴，驱动热泵压缩机。压缩机汽轮机排汽在热泵表冷器（类似发电汽轮机凝汽器）内冷凝，凝水返回锅炉重新产生蒸汽。表冷器内蒸汽冷凝热用于对热泵冷凝器出水进行二次加热。蒸汽驱动型离心式热泵典型系统配置如图4所示。

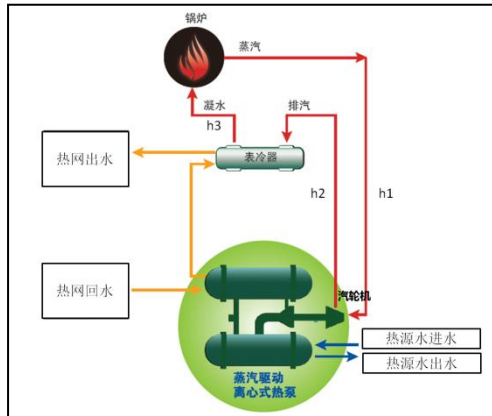


图4：蒸汽驱动型离心式热泵典型系统配置方式

分析可知，采用蒸汽轮机驱动的离心式热泵其系统性能主要取决于：热泵汽轮机进汽焓值（ $h_1$ ）、热泵汽轮机排汽焓值（ $h_2$ ）、热泵表冷器凝水焓值（ $h_3$ ）及热泵压缩机制热性能（ $COP_{\text{压缩机}}$ ）。定义系统制热效率为热泵系统制热量和热泵系统能耗的比值，则蒸汽驱动型离心式热泵的系统制热效率（ $COP_{\text{系统}}$ ）为：

$$COP_{\text{系统}} = [(h_1 - h_2) \times COP_{\text{压缩机}} + (h_2 - h_3)] / (h_1 - h_3) \quad (1)$$

### 3. 蒸汽驱动型多级离心式热泵余热回收集中供暖案例分析

#### 3.1 热电厂凝汽器冷却水余热回收集中供暖

##### 3.1.1 系统流程布置

采用蒸汽驱动型多级离心式热泵回收热电厂发电汽轮机乏汽冷凝热（凝汽器冷却水），通过发电汽轮机抽汽为热泵汽轮机提供驱动蒸汽。热泵汽轮机排汽在热泵表冷器中冷凝放热，凝水返回锅炉。一次热网回水经热泵系统（包括热泵冷凝器及表冷器）加热至热网供水温度。凝汽器冷却水一部分作为热泵热源输入通过热泵蒸发器冷却，一部分通过常规冷却塔冷却。通过热泵系统，回收利用冷却水中的低品位热量（冬季冷却水上塔温度约为 $15^{\circ}\text{C}$ – $25^{\circ}\text{C}$ ），并将其用于加热一次热网回水。

蒸汽驱动离心式热泵热电厂余热回收集中供暖系统配置如图5所示。

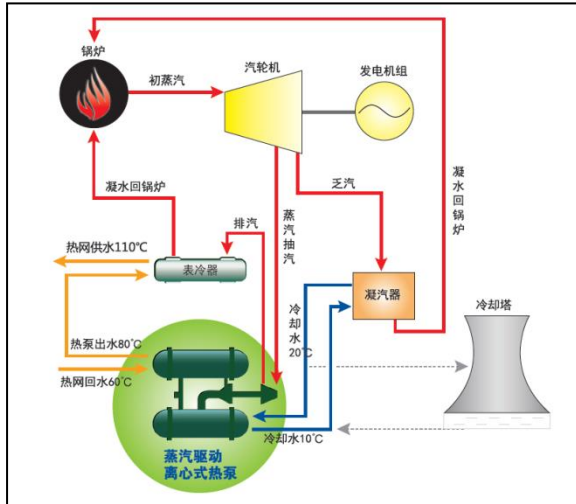


图5： 蒸汽驱动离心式热泵热电厂余热回收集中供暖系统示意图

### 3.1.2 热电厂典型工况及蒸汽驱动离心式热泵系统节能量分析

热电厂冬季冷却水上塔温度通常在15℃-25℃左右(冷却水温度越低,发电汽轮机背压越低,发电煤耗越低)。热电厂供热通常承担市政一次热网加热任务(一次热网高温热水通过换热站加热二次管网热水),一次热网回水温度通常在50℃至60℃范围,热网供水温度通常在90℃至110℃范围。传统热电厂采用汽轮机抽汽的方式加热一次管网回水,采暖抽汽压力一般在0.3MPa至0.8MPa范围。

根据某热电厂冬季供暖典型工况(表1),及某厂家提供的蒸汽驱动型离心式热泵性能参数(表2-表4),比较了蒸汽驱动型热泵余热回收集中供暖和采用传统发电汽轮机抽汽集中供暖两种系统的能耗分析,结果如下:

表1: 某热电厂冬季集中供暖典型工况

某热电厂冬季典型工况					
热泵汽轮机驱动蒸汽		热泵热源水		热泵供水	
蒸汽压力 MPa	蒸汽温度 ℃	凝汽器冷却水出水 (热泵蒸发器进水) 温度 ℃	凝汽器冷却水进水 (热泵蒸发器出水) 温度 ℃	一次热网回水 (热泵系统进水) 温度 ℃	一次热网供水 (热泵系统出水) 温度 ℃
0.8	350	23	15	60	110

表2: 蒸汽驱动型离心式热泵系统参数 (供热侧)

热泵系统供热侧参数								
总制热量	热泵冷凝器				热泵表冷器			
	进水温度 ℃	出水温度 ℃	循环水量 M3/H	制热量 MW	进水温度 ℃	出水温度 ℃	循环水量 M3/H	制热量 MW
65.5	60	76	1127	20.7	76	110	1127	44.8

表3：蒸汽驱动型离心式热泵系统参数（驱动侧）

热泵驱动侧参数				
热泵汽轮机				热泵压缩机
进汽焓值 Kj/Kg	排汽焓值 Kj/Kg	抽汽量 T/H	汽轮机功率 KW	制热COP
3162	2884	67.1	5182	4.0

表4：蒸汽驱动型离心式热泵系统参数（热源侧）

热泵系统热源侧参数			
总余热回收量	热泵蒸发器		
MW（兆瓦）	进水温度 ℃	出水温度 ℃	循环水量 M3/H
15.5	23	15	1666

与直接抽汽供暖方式相比（抽汽压力取 0.8MPa），在相同抽汽参数和抽汽量的情况下，采用蒸汽驱动型多级离心式热泵系统通过余热回收集中供暖，其系统供热能力增加 31%（在 67.1 T/H 抽汽量时，直接抽汽加热系统供热能力为 50MW，蒸汽驱动离心式热泵系统供热能力为 65.5 MW）。以 50w/m<sup>2</sup> 热负荷及冬季平米供暖收费 30元/平米计算，可增加供暖面积约31万平米，单季供暖季增加供暖收益 930万元。

### 3.2 市政污水厂低温中水余热回收集中供暖

#### 3.2.1 系统流程布置

采用蒸汽驱动型多级离心式热泵回收城市污水处理厂低温中水中的低品位热量，通过蒸汽锅炉为热泵汽轮机提供驱动蒸汽。热泵汽轮机排汽在热泵表冷器中冷凝放热，凝水返回锅炉。一次热网回水经热泵系统（包括热泵冷凝器及表冷器）加热至热网供水温度。

蒸汽驱动型离心式热泵城市污水处理厂低温中水余热回收集中供暖系统如图6所示。

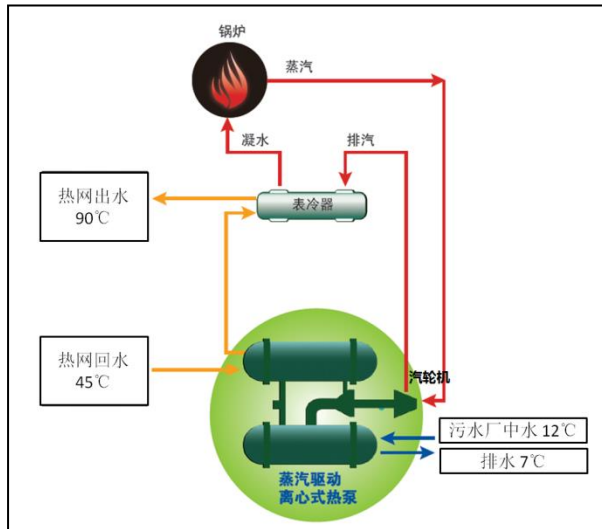


图6： 蒸汽驱动离心式热泵污水处理厂余热回收集中供暖系统示意图

### 3.2.2 城市污水厂典型工况及蒸汽驱动型离心式热泵系统节能量分析

城市污水处理厂冬季中水温度通常在10℃至15℃范围。利用供热公司原蒸汽锅炉生产蒸汽驱动离心式热泵机组，通过回收污水处理厂中水中的低品位热量，加热市政管网回水，在提供相同供热能力的前提下，节约热力公司蒸汽能耗。

根据某热力公司及其周边某城市污水处理厂提供的冬季典型工况(表5)，及某厂家提供的 蒸汽驱动型离心式热泵 性能参数(表6-表8)，比较了蒸汽驱动型热泵余热回收集中供暖系统和原蒸汽直接加热系统的能耗分析，结果如下：

表5： 某城市污水处理厂及热力公司冬季集中供暖典型工况

城市污水集中处理余热回收 典型工况					
热泵汽轮机驱动蒸汽		热泵热源水		热泵供热水	
蒸汽压力 MPa	蒸汽温度 ℃	热泵蒸发器进水 (来自城市污水) 温度 ℃	热泵蒸发器出水 (排放) 温度 ℃	供热管网回水 (热泵系统进水) 温度 ℃	供热管网供水 (热泵系统出水) 温度 ℃
3.43	435	12	7	45	90

表6： 蒸汽驱动型离心式热泵系统参数 (供热侧)

热泵系统供热侧参数								
总制热量	热泵冷凝器				热泵表冷器			
	进水温度 ℃	出水温度 ℃	循环水量 M3/H	制热量 MW	进水温度 ℃	出水温度 ℃	循环水量 M3/H	制热量 MW
MW (兆瓦)	45	65	997	22.8	65	90	997	28.5

表7： 蒸汽驱动型离心式热泵系统参数 (驱动侧)

热泵驱动侧参数				
热泵汽轮机				热泵压缩机
进汽焓值 Kj/Kg	排汽焓值 Kj/Kg	抽汽量 T/H	汽轮机功率 KW	制热COP
3304	2835	42.1	5485	4.16

表8：蒸汽驱动型离心式热泵系统参数（热源侧）

热泵系统热源侧参数			
总余热回收量	热泵蒸发器		
MW（兆瓦）	进水温度 ℃	出水温度 ℃	循环水量 M3/H
17.3	12	7	2966

与蒸汽直接供暖方式相比，在提供相同供热量的情况下，采用蒸汽驱动型多级离心式热泵系统通过余热回集中供暖，可降低采暖蒸汽量 34%（提供 51.3 MW 供热量时，蒸汽直接加热系统蒸汽耗量为 63.6 T/H，蒸汽驱动离心式热泵系统蒸汽消耗量为 42.1 T/H）。采用蒸汽驱动离心式热泵，从市政中水中吸取热量 17.3MW，以 6 个月供暖季计算，相当于节约 26.9 万GJ 的热量，折合标煤约 9200 吨。以标煤每吨 800 元计算，单个供暖季节约能耗费用 736 万元。

#### 4. 结语

本文介绍了蒸汽驱动型多级离心式热泵在热电厂余热回收及城市污水余热回集中供暖领域的应用特点，通过实际案例验证了蒸汽驱动型离心式热泵系统的节能潜力，为热电厂余热回收及污水厂余热回集中供暖（尤其是利用低温余热资源）开辟了新途径。

#### 参考文献：

1. 2011-2015 年中国热电联产行业深度调研与投资战略规划分析报告. Forward & Intelligence Co.,Ltd., Shenzhen.
2. 郭江龙、常澍平、冯爱华、李浩、李琼，压缩式和吸收式热泵回收电厂循环水冷凝热经济性分析，汽轮机技术，2012.5。
3. 约克 Titan™ 多级离心式热泵机组产品手册，江森自控产品手册，2013.

#### 作者简介：

邓伟鹏（1978 年），男，江森自控，从事工业余热回收系统应用开发  
Email: Terry.weipeng.deng@jci.com