

# 螺杆膨胀机低温余热发电技术在钢厂自备电厂连排余热上的应用

毕海燕 肖鸿文

乐能国际能源技术有限公司 北京 100022

**摘要:** 介绍了钢厂自备电厂连续排污扩容器低温余热资源概况, 结合实际情况模块化螺杆膨胀机低温余热发电机组配置情况进行详细介绍, 并对配置该技术的项目应用情况进行分析。

**关键词:** ORC; 连续排污扩容器; 低温饱和蒸汽; 低温余热; 双碳

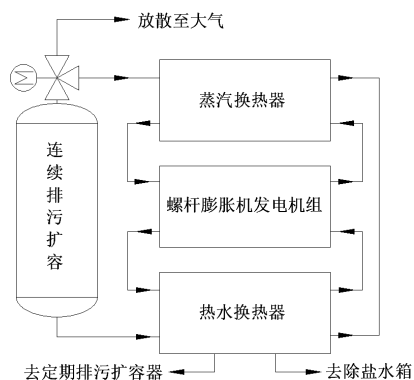
## 1 概述

近日, 生态环境部发布了《关于统筹和加强应对气候变化与生态环境保护相关工作的指导意见》(以下简称《意见》)。按照《意见》, 生态环境部“十四五”期间将全力推进碳达峰行动, 推动钢铁、建材、有色、化工、石化、电力、煤炭等重点行业提出明确的碳达峰目标并制订达峰行动方案。在“双碳”背景下, 中国力争2030年前实现碳达峰, 2060年前实现碳中和<sup>[1]</sup>。

在山东某钢厂自备电厂在“双碳”背景下, 开始重视厂区内余热资源的回收。现有2台UG-280/9.81-M煤粉锅炉和1台UG-240/9.81-Q煤气锅炉, 并配有QFW-60-260MW发电机组3台。3台锅炉连续排污水经过连续排污扩容闪蒸后, 分离出二次蒸汽和排污水, 目前部分二次蒸汽部分由于无法利用进入大气放散, 连续排污扩容器排污水直接进入定期排污扩容直接排放, 这部分余热白白被浪费。为了有效利用此部分低温余热, 决定采用外置式换热器充分利用该部分余热换取热水, 配置螺杆膨胀机低温余热发电机组进行发电, 并对蒸汽冷凝水回收, 获得了很好的经济效益和环保效益<sup>[2]</sup>。

## 2 螺杆膨胀机低温余热发电机组项目方案

1) 该项目工艺流程图如下:

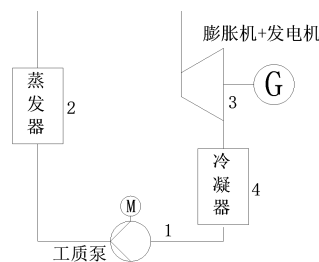


流程简介: 连续排污扩容器二次蒸汽(约160℃)通

过电动三通阀控制进入蒸汽换热器后加热一路闭式循环水, 经冷凝后的二次蒸汽继续进入热水换热器利用部分热量降温至约95℃, 最终二次蒸汽被冷凝后的凝结水进入除盐水箱回收, 螺杆膨胀机发电机组停机时, 连续排污扩容二次蒸汽按照原工艺流程进入大气放散。连续排污扩容器的排污水进入热水换热器加热另一路闭式循环水, 利用部分热量降温至约85℃后进入原定期排污扩容排放。

## 2) 有机朗肯循环原理

有机朗肯循环ORC (organic Rankine cycle, ORC) 发电技术是基于有机朗肯循环的发电系统, ORC 是以低沸点有机物作为循环工质的热力系统, 利用生产过程中排出的余热, 将工质加热到高温高压的微过热蒸气状态, 微过热蒸气进入螺杆膨胀机中膨胀做功, 带动发电机发电输出电能。在换热器中, 低沸点有机工质能够吸收足够的热量变为高压饱和或过热蒸气可以有效解决低温热能难以回收的难题<sup>[3]</sup>。



上图为一个低温余热 ORC 系统简图, 从简图中可见, 主要设备部件包括膨胀机、蒸发器、冷凝器、工质泵四大部分, 其中本项目方案采用螺杆膨胀机。

有机朗肯循环主要循环过程如下: 过冷状态的有机工质在点1被工质泵增压到蒸发压力下的过冷液体, 蒸发压力下的过冷液态工质进入2蒸发器利用余热吸热蒸发为高温高压状态下的微过热饱和和有机工质蒸气, 进入3膨胀机中透冲动及膨胀做功, 带动发电机切割磁力线发出电

能。做功后的有机工质乏气进入4凝汽器，在凝汽器通过冷却水或空气放出热量，有机工质被冷凝为过冷液体状态点1，而后进入下一个循环。

3) 本工程采用螺杆膨胀机低温余热发电机组为模块化机组，螺杆膨胀机低温余热发电机组具有以下特点：

a) 模块化，撬装结构，现场土建施工量少，安装周期短；

b) 采用有机朗肯循环原理，工质采用环保型工质R245fa，无毒、无污染。

c) 采用螺杆膨胀机，具有较高的机械强度和稳定性，能够保证长期连续运转，可靠性高；

d) 等熵效率大于等于85%，可靠性高，发电效率高且余热回收量大；

e) 整机结构紧凑，相对运动部件较小，体积小，重量轻，占地面积小，易于安装和维护，维护量低，基本零维护；

f) 使用寿命长，设计使用寿命  $\geq 10$ 年；

g) 螺杆膨胀机与发电机封闭设计，减少泄露风险，

保证系统密封性；

4) 电气、控制系统

螺杆膨胀机低温余热发电机组采用400V低压并网。发电机并网系统具有启动时间短，并网操作简单，并网后无振荡等特点。机组用电负荷与发电机接入同一低压电网，发电机并网前用电负荷由电压电网供电，发电机并网后，用电负荷将由发电机生产的电能供电。

该项目整个系统采用PLC控制，通过监控整机运行的参数，如温度、压力、液位、功率等，实现内部闭环控制。由于该项目高度集成的自动化系统，整个系统可实现无人值守下的自动运行。系统采用485通讯方式，将数据传输至厂内中控系统，实现数据的实时记录与分析。

5) 辅助系统

该项目辅助系统包括蒸汽管道及疏放水系统、水循环管道系统、补水系统等。

6) 其他参数要求

螺杆膨胀机低温余热发电机组内闭式循环水水质要求如下：

| 序号 | 名称   | 单位                      | 数值        |
|----|------|-------------------------|-----------|
| 1  | PH值  | -                       | 7-9       |
| 2  | 总硬度  | °dH                     | 6-15      |
| 3  | 电导率  | $\mu\text{S}/\text{cm}$ | 10-500    |
| 4  | 游离氯  | mg/L                    | < 0.5     |
| 5  | 硫化氢  | mg/L                    | < 0.05    |
| 6  | 氨    | mg/L                    | < 2       |
| 7  | 硫酸盐  | mg/L                    | < 100     |
| 8  | 硝酸盐  | $\mu\text{S}/\text{cm}$ | < 100     |
| 9  | 溶解氧  | mg/L                    | < 0.05    |
| 10 | 碳酸盐  | mg/L                    | < 20      |
| 11 | 铁离子  | mg/L                    | < 0.2     |
| 12 | 亚硝酸盐 | mg/L                    | < 0.1     |
| 13 | 硝酸盐  | mg/L                    | < 100     |
| 14 | 硫化物  | mg/L                    | < 1       |
| 15 | 碳酸氢盐 | mg/L                    | < 300     |
| 16 | 硫酸盐  | mg/L                    | < 100     |
| 17 | 有机物  | mg/L                    | < 0.02    |
| 18 | 浊度   | NTU                     | $\leq 10$ |
| 19 | 悬浮物  | mg/L                    | < 10      |

### 3 工艺计算

#### 1) 总排污水量

该钢厂自备电厂有3台锅炉共用1套连续排污扩容系统，锅炉的排污率约为1%，根据锅炉设计容量计算出总排污水量为：

$$D_1 = (280 \times 2 + 240 \times 1) \times 0.01 = 8 \text{ t/h}$$

#### 2) 连续排污扩容二次蒸汽产量：

排污水压力为9.0MPa（绝压）排污水温度约为300℃，经连续排污扩容器后二次蒸汽及排污水量计算如下：

$$D_{qh} = D_{pw} \frac{h_2 - h_1}{xr}$$

$$= 8 \times \frac{1363.87 - 661.73}{0.97 \times 2092.2}$$

$$= 2.77 \text{ t/h}$$

其中:

$D_{qh}$ ——排污水汽化量;

$D_{pw}$ ——排污水量;

$h_1$ ——锅筒内饱和水质量焓(kJ/kg);

$h_2$ ——连续排污扩容压力下饱和水的质量焓;

$x$ ——连续排污扩容容器出口的蒸汽干度,一般为  $x = 0.97$ ;

$r$ ——连续排污扩容压力下的汽化潜热;

连续排污扩容容器压力为0.57MPa(绝压)

### 3) 连续排污扩容排污水量

$$D_2 = D_1 - D_{pw} = 8 - 2.77 = 5.23 \text{ t/h}$$

### 4) 利用热量计算

#### a) 蒸汽换热器

经蒸汽换热器后饱和蒸汽完全冷却为水,该级换热器利用二次蒸汽的汽化潜热,利用热量如下:

$$Q_1 = D_{qh}xr = 2.77 \times 0.97 \times 2092.2 \div 3.6 = 1561.5 \text{ kW}$$

#### b) 热水换热器

该热水换热器利用两股热源,一股为连排扩容汽排污水经换热器后降温至90℃,另一股为连续排污扩容容器经蒸汽换热器冷凝后的凝结水经换热器降温至90℃,利用热量如下:

$$Q_2 = D_{qh}(h_3 - h_4)$$

$$= 5.23 \times (661.73 - 377.41) \div 3.6$$

$$= 413.1 \text{ kW}$$

$$Q_3 = D_2(h_5 - h_6)$$

$$= 2.77 \times (661.73 - 377.41) \div 3.6$$

$$= 218.7 \text{ kW}$$

其中:

$Q_2$ ——连续排污扩容排污水利用热量;

$Q_3$ ——二次蒸汽凝结水利用热量;

$h_3, h_5$ ——二次蒸汽冷凝水焓值

$h_4, h_6$ ——90℃水焓值

c) 螺杆膨胀机发电机组利用的低温余热总热量为:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 1561.5 + 413 + 218.7 = 2193.3 \text{ kW}$$

5) 根据2022年8月31日至2023年8月31日项目实际运行情况进行统计,总结如下:

| 序号 | 项目      | 单位   | 数值                  |              |
|----|---------|------|---------------------|--------------|
| 1  | 平均净输出功率 | kW   | 175                 |              |
| 2  | 设备占地面积  | m×m  | 13×5                |              |
| 3  | 年发电量    | kW.h | 147×10 <sup>4</sup> | 年利用小时数按8400h |
| 4  | 年回收冷凝水量 | t    | 23268               | 暂定4元/t       |
| 5  | 维护量     | -    | 无人值守                | 暂定0.57元/kW.h |
| 6  | 土建费用    | 万元   | 基本为0                |              |
| 7  | 年收益     | 万元   | 93.1                |              |

## 4 总结

螺杆膨胀机低温余热发电技术在此项目的应用取得了显著的效果和收益,在发电收益方面,年发电收益约83.8万元;在冷凝水回收方面,年节水收益约为9.3万元。总项目投入成本按照350万元计,可计算出投资回收期约为3.8年,如此最大4年可全部回收建设投资。

在部分钢厂自备发电厂或其他发电厂中,对于连续排污扩容位置余热资源,随着对蒸汽品质和锅炉排污水压力的不断提高,锅炉排污水的数量和质量都在不断提高,因此充分利用连续排污水的余热对提高发电厂的经济效益,降低其发电成本具有十分重要的意义,同时也符合对国家“双碳”政策、绿色可持续发展的方向,其未来市场空间广阔。按照该技术的应用为钢铁等行业

的节能减排提供了新的解决方案,具有广泛的应用前景,随着技术的不断进步和应用的深入推广,螺杆膨胀机低温余热发电技术将在更多低温余热领域实现降本增效和节能减排等方面发挥重要作用。

### 参考文献

- [1]刘颖,马永峰.低压饱和蒸汽发电技术在钢铁行业的应用.冶金动力,2016年第3期,总第193期:34-37.
- [2]王亚伟.连续排污扩容容器热能利用,广东科技,2009.6.总第214期:175-176.
- [3]李志涛,吴家欢,章高霞. ORC低温余热发电技术在陶瓷行业内的应用前景[J].能源研究与管理,2022(01):103-107. DOI:10.16056/j.2096-7705.2022.01.017.