

# 太阳能辅助供热电站变工况特性研究

李少华, 王迪, 车德勇, 高龙

(东北电力大学, 吉林 吉林 132012)

**摘要:** 利用光煤互补的方式对小机组供热电站进行升级改造, 可以解决大量淘汰小机组造成的城市供热不足等问题。本文以某电厂 12 MW 燃煤机组为设计原型, 利用数值模拟的方法搭建光煤互补系统, 分析了太阳能辐射强度和导热油温度两种因素对系统性能影响, 提出一种新的太阳能互补方式, 与典型的太阳能集热场替代高加抽汽的互补方式进行对比分析。结果表明, 两种互补方式的系统都会随着辐射强度的增加对机组发电量和供热量有较好的促进作用; 在保持系统供热量不变的情况下, 两种互补方式的总热效率差距可达到 10%, 而导热油温度高于 350 °C 左右时利用太阳能直接供热的互补系统的热效率较高。

**关键词:** 光煤互补供热电站; 辐射强度; 导热油温度; 节煤率; 总热效率

中图分类号: TM615 文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2016.08.017

## 引言

随着全球能源紧缺的加剧, 太阳能作为可再生能源越来越受到重视, 太阳能热利用因其能源利用效率高、生产过程无污染等优势成为研究的热点。据 CSPPLAZA 研究中心统计, 截止到 2014 年, 全球光热发电在运行装机容量达到约 4 533 MW, 同比 2013 年增幅达 32%。但太阳能具有间歇性、不稳定性等特点<sup>[1]</sup>, 将太阳能与其它能源形式互补利用是解决这一问题的有效手段, 其中, 将太阳能热利用与燃煤发电机组结合是将太阳能热利用推向规模化的有效途径<sup>[2]</sup>。

国内外研究人员对光煤互补发电系统开展了大量的研究工作<sup>[3-4]</sup>。主要集中在利用不同的互补分析方法对系统不同的互补集成方式进行研究, 在燃煤机组中, 利用太阳能集热器取代回热系统中加热

器的方式是研究的主要方向, 分析对比不同互补集成方式下辐射强度对系统热力性能和经济性的影响<sup>[5-7]</sup>, 得出最佳的光煤互补集成方式。而且主要集中在对系统发电量优化上, 对于用来供热的电站, 利用太阳能直接供热的互补集成方式研究较少; 另外一部分主要是研究系统在运行过程中系统焓效率及系统的焓损分布, 确定互补系统中主要的焓损部分, 提出优化和改进系统的方案<sup>[8-10]</sup>。在国内, 互补系统的研究机构以华北电力大学及中科院较为领先, 金红光等研究了太阳能与多种能源互补的联合发电系统<sup>[11-12]</sup>, 并分析了系统的热力特性; 杨勇平等讨论了槽式太阳能的布置方式、环境因素等对系统性能的影响<sup>[13-14]</sup>, 并在系统设计及优化方面提供了理论支持。

综上, 针对光煤互补系统的研究主要集中在太阳能集热系统对燃煤机组发电量等指标的影响上。然而, 目前在我国北方地区, 仍存在大量以供热为目标的小型燃煤热电联产机组, 这些机组由于效率低、污染物排放高等缺点会逐步被淘汰, 造成严重的资源浪费, 影响供热能力。因此, 有必要对小型燃煤供热机组进行升级改造。本文在借鉴前人的研究成果的基础上, 针对小型供热机组热能为主要产能目标的特点, 提出了一种新的太阳能与燃煤机组互补集成方式, 并以某市 12 MW 机组为对象, 利用数值模拟的方法讨论辐射强度等因素对燃煤机组热力性能的影响, 对比不同互补集成方式对机组的性能指标的影响, 为小型燃煤供热机组进行太阳能与燃煤互补利用的改造提供理论依据。

## 1 燃煤供热机组介绍

某电厂 12 MW 燃煤机组热力系统图如图 1 所

收稿日期: 2015-11-23; 修订日期: 2015-12-24

作者简介: 李少华(1957-), 男, 吉林吉林人, 东北电力大学教授。

示,该机组为抽气冷凝式汽轮机,无再热系统,主蒸汽参数为 4.9 MPa/435 °C,额定进气量为 100 t/h。回热系统主要由一个高压加热器、一个低压加热器和除氧器组成,对应的 2、5、6 分别为汽轮机抽汽,机组在额定负荷下高加抽汽量为 8 t/h,抽汽温度为

225 °C,压力 0.7 MPa,12、13 为换热后的疏水分别进入到除氧器和凝汽器中。机组采用抽汽式采暖供热方式 3 为供热抽汽,供热回水 4 最终回到除氧器中继续循环,汽轮机采暖抽气温度为 250 °C,压力 0.8 MPa。

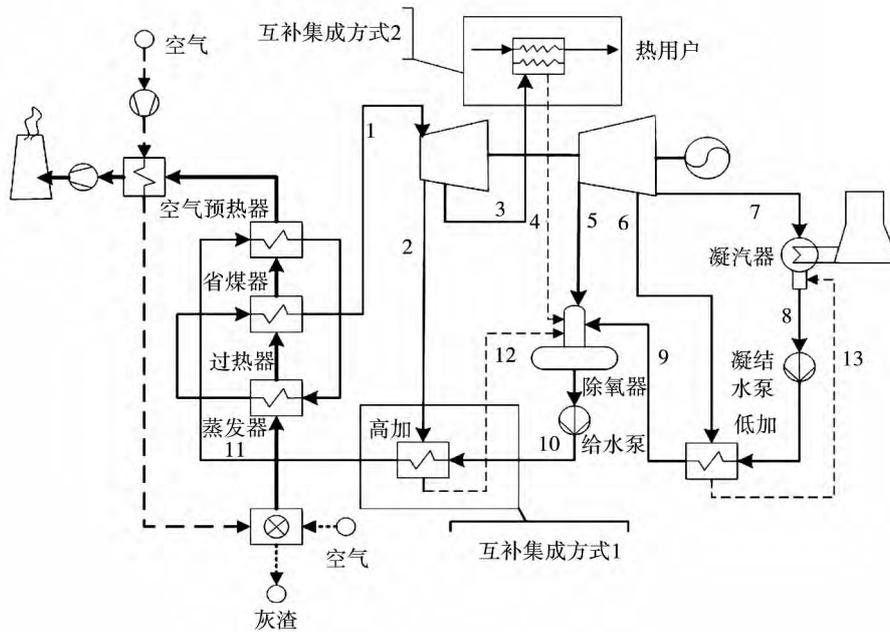


图 1 光煤互补系统热力循环图

Fig. 1 Thermal cycle diagram of solar and coal complementary system

## 2 系统方案设计

### 2.1 太阳能集热系统设计

太阳能与燃煤互补系统选择介质为导热油的槽式太阳能热利用方式,集热器采用的 LS-2 型号<sup>[15]</sup>,导热油为 VP-1 (由 73.5% 的二苯醚和 26.5% 联苯的共晶混合物,凝固点温度为 12 °C),集热场成“1”型多个回路并列布置<sup>[16]</sup>。选择机组额定负荷时为设计点,油水换热器换热效率约为 98%<sup>[17]</sup>,集热场的设计应与动力侧容量合理匹配,集热场最佳辐射强度一般选取在机组年运行小时数的 20%~30%<sup>[13]</sup>。根据美国可再生能源局提供的辐射强度数据,考察大连地区全年辐照情况和电厂全年运行小时数,设计辐照强度值应为 435 W/m<sup>2</sup>。忽略集热器遮挡损失及末端损失,太阳能入射角和环境温度取平均值  $\theta = 25^\circ$ ,  $T_a = 10^\circ\text{C}$ ,利用设计辐照强度下的集热器完全替代额定负荷下的高加抽汽量,计算后得出集热镜场面积为 25 195 m<sup>2</sup>。

### 2.2 互补集成方式设计

如图 2 和图 3 所示,本文太阳能集热器与燃煤机组采用两种互补集成方式:

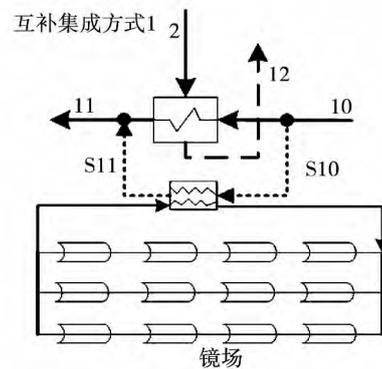


图 2 太阳能替代高加抽汽互补方式

Fig. 2 Complementary way of solar energy alternatives to high pressure heater extraction

方式 1: 利用集热器加热回水系统,给水泵出来的给水一部分经高压加热器加热进入锅炉,另一部

分经油水换热器和太阳能集热器换热后与高压加热器出口给水混合,一起通入锅炉;

方式 2: 针对供热机组特点,遵照“温度对口”原则,本文提出了一种新的互补集成方式,即太阳能集热系统接入一次热网,利用集热场对供热回水段 4 的部分回水加热,加热后的水再次回到 3 对热用户进行换热。

互补后的系统,汽轮机主蒸汽及各级抽汽参数保持不变,燃煤锅炉进、出口工质参数保持不变,冷凝器出口及回水系统中各级加热器出口温度也保持不变,图 1 中 1~13 代表热力系统中各级抽汽及各设备出口工质状态,对应表 1 中各状态点,不同负荷下机组各状态点的主要相关参数如表 1 所示。

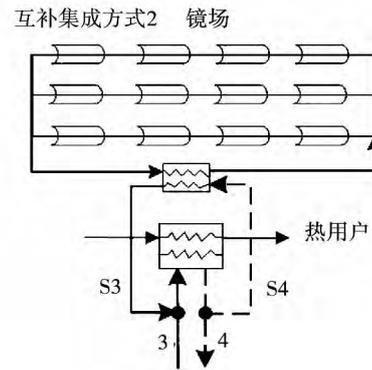


图 3 太阳能与供热系统连接互补方式  
Fig. 3 Complementary way of solar energy connected to the heating system

表 1 互补系统不同机组负荷下各状态点参数表

Tab. 1 Parameter list for each state point of the complementary system under different loads

状态点	汽机负荷 80%			汽机负荷 65%			汽机负荷 50%		
	温度/°C	压力/MPa	流量/t·h <sup>-1</sup>	温度/°C	压力/MPa	流量/t·h <sup>-1</sup>	温度/°C	压力/MPa	流量/t·h <sup>-1</sup>
1	427	5	93.63	427	5	86.07	427	5	78.95
2	255	0.7	5.8	255	0.7	4.4	255	0.7	3.5
3	250	0.82	63	250	0.82	63	250	0.82	63
4	78.5	0.8	63	78.5	0.8	63	78.5	0.8	63
5	120	0.008	2.48	120	0.008	1.86	120	0.008	1.25
6	90	0.008	4.47	90	0.008	3.36	90	0.008	2.24
7	32.90	0.005	22.35	32.9	0.005	16.8	32.9	0.005	11.21
8	40	0.007	22.35	40	0.007	16.8	40	0.007	11.21
9	93	0.085	22.35	93	0.085	16.8	93	0.085	11.21
10	100.28	0.75	93.63	97.16	7	86.07	92.64	7	78.95
11	136.58	7	93.63	126.51	7	86.07	118.16	7	78.95
12	130	0.7	5.8	130	0.7	4.4	130	0.7	3.5
13	41.53	0.008	4.47	41.53	0.008	3.36	41.53	0.008	2.24

### 3 评价指标

槽式太阳能集热器的集热效率表达式如下:

$$\eta_c = \frac{Q_u}{bLI_b} \quad (1)$$

式中:  $\eta_c$ —聚光集热器效率, %;  $Q_u$ —集热管的有用能量收益 kJ/s;  $I_b$ —太阳直射辐射强度,  $W/m^2$ ;  $b$ —聚光器光孔宽度,  $\mu m$ ;  $L$ —聚光器光孔长度,  $\mu m$ 。

$$Q_u = A_c \eta_{opt, \theta} \cos \theta K(\theta) S_e I_b - U_L \pi d_p l (T_p - T_a) \quad (2)$$

式中:  $A_c$ —集热管集热面积,  $\mu m^2$ ;  $\eta_{opt, \theta}$ —太阳辐射入

射角  $0^\circ$  时,槽型抛物面聚光集热器的峰值光学效率;  $\theta$ —太阳能辐射入射角,  $(^\circ)$ ;  $K(\theta)$ —入射角修正系数;  $S_e$ —除污系数;  $U_L$ —热损失系数;  $d_p$ —接收管外直径;  $l$ —接收管长度,  $m$ ;  $T_p$ —接收管温度,  $^\circ C$ ;  $T_a$ —环境温度,  $^\circ C$ 。

根据能量守恒定律,油水换热器及给水加热器的表达式如下:

$$Q_u = (m_{s11} h_{s11} - m_{s10} h_{s10}) \times 98\% \quad (3)$$

$$Q_u = m 2' (h_{12} - h_2) \quad (4)$$

$$(m_2 - m 2') (h_{12} - h_2) = (m_{10} - m_{s10}) (h_{11} - h_{10}) \quad (5)$$

式中:  $m_{s11}$ 、 $m_{s10}$ 、 $m_2$ 、 $m_{10}$ 、 $m_{s10}$ —各状态点质量流量, kg/s;  $h_{s11}$ 、 $h_{s10}$ 、 $h_{12}$ 、 $h_2$ 、 $h_{11}$ 、 $h_{10}$ —各状态点比焓, kJ/kg;  $m_2$ —太阳能集热器替代的高加抽汽质量流量, kg/s。

节煤率是表征光煤互补系统比单纯燃煤机组在折算成标准煤耗量后的对煤炭的节约程度。

$$b = \frac{b_{CF} - b_{SCAF}}{b_{CF}} \times 100\% \quad (6)$$

式中:  $b$ —互补系统节煤率, %;  $b_{CF}$ —单纯燃煤机组标准煤耗量  $g/(kW \cdot h)$ ;  $b_{SCAF}$ —互补系统标准煤耗量  $g/(kW \cdot h)$ 。

互补集成系统的总热效率是用来评价系统在输入和输出能量之间的关系。忽略系统漏汽, 假设各级给水加热器不存在换热损失, 总热效率的表达式如下:

$$\eta_{tp} = \frac{3600N_{el} + Q_h}{B_{tp}Q_L} \quad (7)$$

式中:  $\eta_{tp}$ —互补系统的总热效率, %;  $N_{el}$ —电厂发电量  $kW \cdot h$ ;  $Q_h$ —电厂供热量, kJ;  $B_{tp}$ —电厂燃料消耗量, kg;  $Q_L$ —电厂燃料的低位发热量, kJ/kg。

### 4 计算结果分析

#### 4.1 辐射强度的影响

在 3 种不同机组负荷下(80%、65%、50%), 高加抽汽量随辐射强度的变化如图 4 所示。从图中可以看出, 高加抽汽量随着辐射强度的增加呈线性降低趋势, 这是因为随着辐射强度的增加集热场收集到的热量增加, 通过油水换热器的给水量增大, 在锅炉给水总量不变的情况下, 通过高压加热器的给水量减少, 高加抽汽量减少。在 80% 运行时, 当辐射强度达到  $375 W/m^2$  时高加抽汽量降为零, 太阳能集热量能够完全代替高加抽汽; 65% 负荷和 50% 负荷下, 能够完全代替高加抽汽对应的辐射强度分别为  $310 W/m^2$  和  $248 W/m^2$ 。

供热机组通常采用“以热定电”的运行原则, 本文对比了两种互补集成方式在保证供热负荷的前提下对发电量的影响。

其结果如图 5 所示, 从图中可以看出, 在 3 种负荷下, 采用互补集成方式 1 机组发电量均要高于互补集成方式 2, 所不同的是, 互补集成方式 2 下, 辐

射强度对发电量影响不明显, 而互补集成方式 1 却存在拐点, 并且拐点对应的辐射强度随着负荷增加而增大。这是因为在互补集成方式 1 的系统中, 当辐射强度增大时, 太阳能集热场所能提供的热量增加, 回热给水分到集热场的流量增加, 通过高压加热器的给水流量减少, 高加抽气量减少; 当 3 种负荷下的机组(50%、65%、80%) 辐射强度分别增大到 240、288、350  $W/m^2$  值时, 集热场完全替代高加抽汽, 当高加抽汽量为零保持不变时, 机组发电量趋于稳定; 且机组负荷越小, 高加抽汽量越少, 集热场最大所能替代的抽气量也越小, 机组发电量达到最大值所需要的辐射强度也越小。

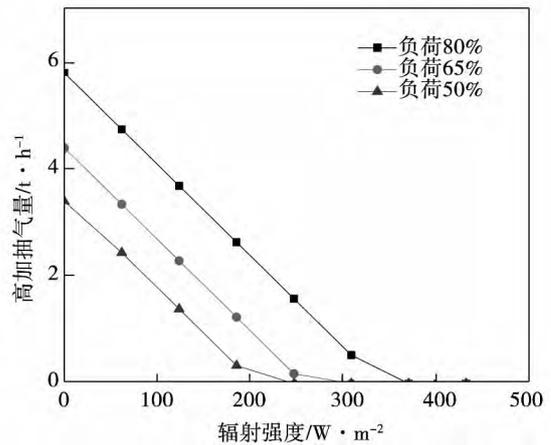


图 4 高加抽气量随辐射强度的变化  
Fig. 4 Variation of high pressure heater exhaust stream with the radiation

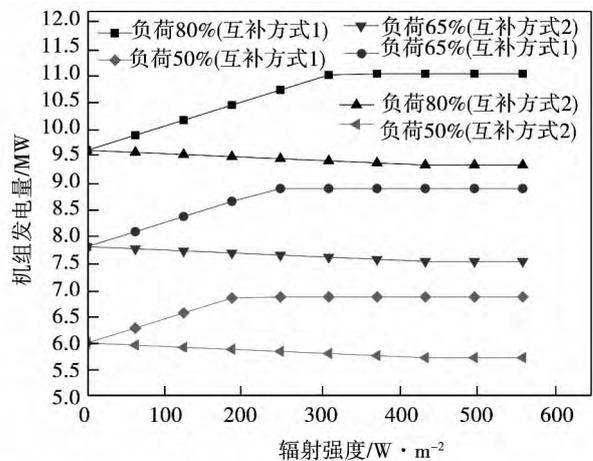


图 5 辐射强度对机组发电量的影响  
Fig. 5 Influence of radiation intensity on generating capacity

互补集成方式 2 的系统,太阳能集热场直接与供热一次网相连,辐射强度增加时供热所需的抽气量减少,节约的蒸汽用来继续给机组发电,但由于供热回水一部分用来通入集热场二次利用,回到除氧器的供热回水量减少,整个系统总的回水量减少,主蒸汽量相对减少,所以机组的发电量基本保持不变。

#### 4.2 系统评价

保持系供热量不变时,辐射强度对系统发电量造成影响的同时也对锅炉负荷造成影响,将互补系统燃煤消耗量折算成标准煤耗量之后,利用节煤率反应辐射强度对锅炉负荷的影响,如图 6 所示。互补集成方式 1 的节煤率在较低辐射强度时基本没有什么变化,当辐射强度高于  $200 \text{ W/m}^2$  时,随着辐射强度的增大,集热场所能替代的高加抽气量增加,用来做功的蒸汽量增加,同时机组给水温度会因为辐射强度的影响而升高,由于锅炉出口蒸汽的温度和压力没有变化,锅炉所消耗的燃料量减少,当辐射强度增加到一定值时,集热场所能提供的热量达到最大值,机组节煤率趋于稳定;并且机组负荷越大,所消耗的燃料越多节煤率越小,3 种负荷下的机组节煤率最高可分别达到 2.916%、4.996%、6.784%。从图中可以看出互补集成方式 2 的节煤率基本呈线性趋势,然后在  $440 \text{ W/m}^2$  左右分别在 10.93%、11.94%、13.15% 达到最大值,但是由于互补集成方式 2 的系统中集热场的一部分热量利用供热回水使得锅炉给水的温度升高,而用来供热的热量减少,所以互补系统的节煤率明显高于互补集成方式 1 的系统。

系统的总热效率是系统总输出能量和总消耗能量的比值,衡量系统在能量利用效率上的评价指标,图 7 是系统在保持供热量不变的情况下,辐射强度对系统总热效率的影响。图 7 中由于互补系统中加入了太阳能,两种互补集成方式下的系统总的热效率都会随着辐射强度的增加而增大,并且由于机组负荷越大机组在热利用过程中损失的热量越大,系统的热效率会越小。互补集成方式 1 的系统中总热效率的曲线开始时缓慢升高,当辐射强度达到一定值时,总热效率升高明显,然后分别在 59%、73%、89% 趋于稳定,而互补集成方式 2 的热效率基本呈直线上升趋势,最高可分别达到 69%、83%、101%。

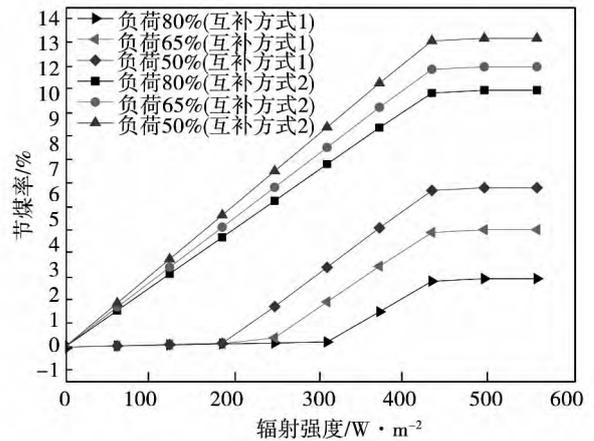


图 6 两种互补系统节煤率对比

Fig. 6 Coal saving rate comparison of two complementary systems

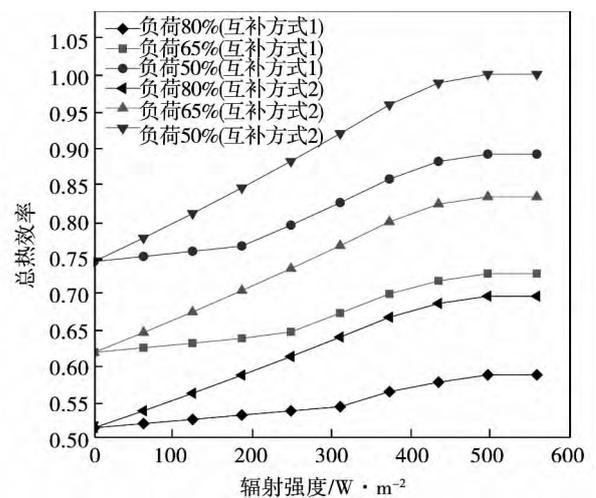


图 7 辐射强度对总热效率的影响

Fig. 7 Effect of radiant intensity on total heat efficiency

对比两种互补系统,当保持系统的供热量一定时,辐射强度的增加会增大系统的发电量,由以上可知,虽然互补集成方式 1 的系统对发电量的促进作用更大,但由于互补集成方式 2 的系统对锅炉也产生了较大影响,使得系统的节煤率高于互补集成方式 1,总热效率也明显高于互补集成方式 1。

#### 4.3 导热油温度对系统供热的影响

在小负荷的供热机组中,机组的主要工作是冬季供暖,不同互补集成方式下的油水换热器,导热油温度的不同也会影响机组的供热情况。分析机组负荷在 80% 和 65% 情况下,相同的导热油温度变化趋势下对供热负荷的影响,同时对比两种互补集成方

式下导热油温度的变化对系统总热效率的影响。

集热场在设计点时导热油进出口温度分别为 260、370 ℃, 改变导热油出口温度时两种互补方式下导热油温度对系统供热负荷的影响如图 8 所示。随着导热油温度的升高供热负荷成增长的趋势, 互补集成方式 2 的系统供热负荷明显大于互补集成方式 1 的系统, 且曲线的斜率也明显大于互补集成方式 1 的斜率; 当导热油温度超过 390 ℃ 时, 供热负荷不再增大, 这是因为导热油导热率随温度增加而降低<sup>[1]</sup>, 且温度过高时, 易引发导热油热解造成换热效果降低; 互补集成方式 1 的系统机组负荷越小供热量的增长的速度越慢, 导热油温度在 370 ℃ 以前低负荷机组的供热量较大, 以后成相反状况。

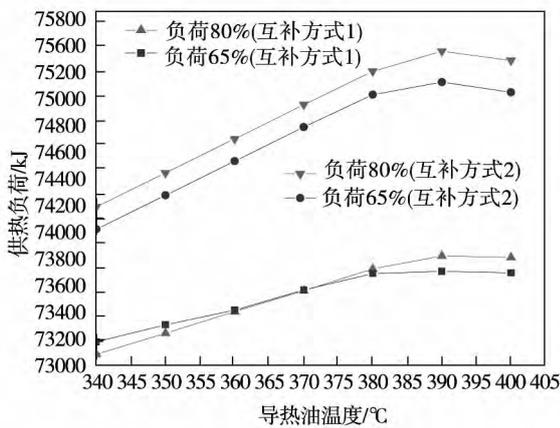


图 8 导热油温度供热负荷的影响

Fig. 8 Effect of heat conduction oil temperature on heating load

导热油温度对系统总热效率的影响如图 9 所示。系统总热效率随着导热油温度的升高而升高, 当导热油温度达到 390 ℃ 时系统总热效率达到最大, 且低机组负荷的总热效率明显高于高机组负荷; 从图中可以看出互补集成方式 1 的总热效率增长速度要小于互补集成方式 2 的增长速度; 在相同机组负荷时两种互补集成方式的热效率曲线有相交处, 机组负荷为 80%, 且温度大于 350 ℃ 时, 互补集成方式 2 的系统总热效率较大, 且随着导热油温度的升高, 差值越来越大; 当机组负荷为 65% 时, 两种互补方式总热效率曲线在 355 ℃ 左右相交, 变化趋势和 80% 机组负荷时相似。

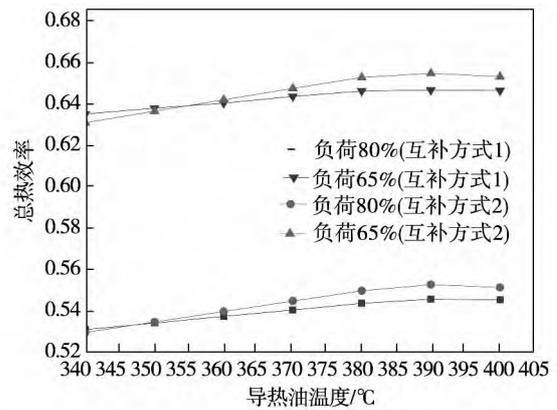


图 9 导热油温度对总热效率的影响

Fig. 9 Effect of heat conduction oil temperature on total heat efficiency

综上所述可知, 互补集成方式 2 在相同的导热油变化量时在提高机组供热上具有较明显的优势, 且随着导热油温度的提高, 互补集成方式 2 总热效率的增长率也高于互补方式 1 的系统。

### 5 结 论

本文以某热电厂 12 MW 燃煤机组为设计原型搭建的光煤互补系统, 为了使互补系统更有利于供热, 在经典互补集成方式的基础上提出了一种新的互补系统方式, 即利用太阳能集热场对供热回水再热, 再热后的回水接着用来供热。文章利用节煤率、总热效率对两种互补系统进行对比分析, 得出以下结论:

- (1) 两种互补集成方式的系统都会随着辐射强度的增加对机组发电量和供热量有较好的促进作用;
- (2) 在保证电厂的供热量的前提下, 利用太阳能直接供热的互补系统节煤率要明显优于互补集成方式 1 的系统; 且不同辐射强度下互补集成方式 2 的系统总热效率要高于互补集成方式 1 的系统, 最大可有 10% 的差距;
- (3) 互补集成方式 2 的系统导热油的温度对供热影响较大, 且两种互补集成方式的系统总热效率存在交叉点, 当温度高于 350 ℃ 左右时互补集成方

式 2 的热效率较高。

### 参考文献:

- [1] 胡永生. 太阳能与燃煤机组互补电站热力特性与集成机理研究[D]. 华北电力大学 2014.  
HU Yong-sheng. Study on Thermal Performance and Integrated Mechanism of Solar-aided Coal Fired Power Plant[D]. North China Electric Power University 2014.
- [2] 许璐. MW 级光煤互补发电系统变辐照变工况性能研究[D]. 中国科学院研究生院(工程热物理研究所) 2014.  
XU Lu. Study on the performance of the MW grade light coal complementary power generation system with varying irradiation and varying conditions [D]. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences 2014.
- [3] 林汝谋, 金红光, 蔡睿贤. 新一代能源动力系统的研究方向与进展[J]. 动力工程 2003 03: 2370 - 2376.  
LI Ru-mou, JIN Hong-guan, CAI Rui-xian. Researching direction and development for new generation energy power system [J]. Power Engineer 2003(03): 2370 - 2376.
- [4] THOMAS. A solar steam generation system using parabolic trough concentrators[J]. Energy Conversion and Management, 1996, 37(2): 215 - 245.
- [5] 李少宁, 徐二树, 石磊. 太阳能辅助燃煤电站一体化发电技术[J]. 电力建设 2010 31(1): 7 - 10.  
LI Shao-ning, XU Er-shu, SHI Lei. Integrative power generation technology of coal fired power plant supported by solar energy [J]. Electric Power Construction 2010 31(1): 7 - 10.
- [6] YANQ, YANG Y, NISHIMURA A, et al. Multi-point and Multi-level Solar Integration into a Conventional Coal-Fired Power Plant[J]. Energy & fuels 2010 24(7): 3733 - 3738.
- [7] 赵洪滨, 白云. 600 MW 燃煤电站太阳能利用集成系统性能研究[J]. 热能动力工程 2013 28(6): 638 - 643.  
ZHAO Hong-bin, BAI Yun. Study of the performance of a solar energy utilization integration system in a 600 MW coal-fired power plant[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2013 28(6): 638 - 643.
- [8] SURESHM. V. J. J., REDDY K. S., KOLAR A K. 4-E (Energy, Exergy Environment and Economic) analysis of solar thermal aid coal-fired power plants [J]. Energy for Sustainable Development 14 (2010): 267 - 279.
- [9] YINGY, HU E J. Thermodynamic advantages of using solar energy in the regenerative Rankine power plant[J]. Applied thermal engineering, 1999, 19(11): 1173 - 1180.
- [10] ZHAIR ZHU Y, YANG Y, et al. Exergetic and parametric study of a solar aided coal-fired power plant [J]. Entropy, 2013, 15(3): 1014 - 1034.
- [11] 林汝谋, 韩巍, 金红光, 等. 太阳能互补的联合循环(ISC)发电系统[J]. 燃气轮机技术 2013 02: 1 - 15.  
LIN Ru-mou, HAN Wei, JIN Hong-guang, et al. The integrated solar combined cycle power generation systems [J]. Gas Turbine Technology 2013 (02): 1 - 15.
- [12] 袁建丽, 韩巍, 金红光, 等. 新型塔式太阳能热发电系统集成研究[J]. 中国电机工程学报 2010 29: 115 - 121.  
YUAN Jian-li, HAN Wei, JIN Hong-guang, et al. Research on system integration of a novel solar tower thermal power plant [J]. Proceeding of the CSEE 2010(29): 115 - 121.
- [13] 崔映红, 杨勇平, 张明智. 太阳能-煤炭互补的发电系统与互补方式[J]. 中国电机工程学报 2008. 5(28): 102-107.  
CUI Ying-hong, YANG Yong-ping, ZHANG Ming-zhi. Solar-coal complementary electric generation system and its modes [J]. Proceedings of the CSEE 2008 5(28): 102 - 107.
- [14] 段立强, 徐钢, 林汝谋, 等. IGCC 系统热力与环境性能结合的评价准则[J]. 中国电机工程学报 2004 12: 267 - 271.  
DUAN Li-qiang, XU Gang, LIN Ru-mou, et al. New evaluation criterion of IGCC system performance integrating thermodynamics with environment [J]. Proceedings of the CSEE 2004(12): 267 - 271.
- [15] 刘鉴民. 太阳能热发电技术 [M]. 化学工业出版社. 2012: 63 - 90.  
LIU Jian-min. Solar thermal power generation technology [M], Chemical Industry Press 2012: 63 - 90.
- [16] 付立. 槽式太阳能辅助燃煤发电系统热性能研究[D]. 华北电力大学 2014.  
FU Li. Thermal performance of coal-fired power trough solar-assisted systems [D], North China Electric Power University 2014.
- [17] 谭开禹. 太阳能辅助燃煤电站运行优化研究[D]. 华北电力大学 2014.  
TAN Kai-yu. Operation optimization of solar aided coal-fired power plant [D]. North China Electric Power University 2014.

(陈滨 编辑)

In the process of building LNG ship ,the welding residual stress not only can induce the cracks of LNG Tanks ,but also can change the loading capacity of LNG Tanks when superimposed upon applied pressure. In order to obtaining mechanical behavior of welding process ,it is necessary to analyze the welding residual stresses of LNG Tanks with finite element method. Using axisymmetric model and Live-dead Element ,this study aims to investigate the distributions of the welding residual stresses in a LNG Tanks Used in LNG Carrier. According to the national standard ,the effect of the LNG tank groove size on residual stress distribution was studied ,and the effect of heat treatment to welding residual Mises stress was also discussed. The results indicate that with the increase of the groove depth ,the welding residual Mises stress first decreases and then increases ,and reaches the minimum when the groove depth is 6mm. Compared to the V and U type groove angles ,groove depth has more significant influence on welding residual Mises stress. In order to reduce the welding residual Mises stress ,it is suggested to choose a small groove depth and groove angle according to the actual structure and technology. The heat treatment can also reduce the residual Mises stress by 21% . These results provide a theoretical reference regarding the control of the welding residual stresses in the LNG tanks. **Key words:** LNG Tanks ,9Ni Steel ,Residual Stress ,Design of Weld Grooves ,Live-dead Element

太阳能辅助供热电站变工况特性研究 = **Off-design Performance of Solar Hybrid Heating Power Plant** [刊 , 汉] LI Shao-hua ,WANG Di ,CHE De-yong ,GAO Long ( Northeast Dianli University ,Jilin ,China ,Post Code: 132012) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31(8) . -99 ~ 105

Upgrading the heating power plant by using of a complementary way of solar and coal can solve urban heating shortage and other issues caused by eliminating small units. Based on the design prototype of 12MW coal fired units ,the coal and solar complementary system model was established by using numerical simulation. The influence of solar radiation intensity and heat conduction oil temperature on the performance of the system was analyzed. A new solar energy complementary way was put forward ,and compared to the typical complementary way of replacing high pressure heater. The results showed that these two complementary ways can both increase generating capacity and heat supply quantity of units with the increase of the intensity of radiation. In the case of constant heat supply ,the total thermal efficiency gap of these two complementary ways can reach 10% . When the heat conduction oil temperature is higher than 350 °C ,the thermal efficiency of the solar energy direct heating system is higher. **Key words:** solar and coal complementary heating power plant ,radiation intensity ,heat conduction oil temperature ,coal saving rate , total thermal efficiency

基于氟塑料换热器的新型烟气余热深度回收技术研究 = **A New Technology for Deeply Flue Gas Heat Recovery based on the Fluorine Plastic Heat Exchanger** [刊 ,汉] HU Qing ,SUN Shao-peng ,JIANG Wen ,ZHU Wen-zhong ( Hangzhou Huadian Energy Engineering Institute ,Hangzhou ,Zhejiang ,China ,Post Code: 310030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31(8) . -106 ~ 109

This article introduced a new technology for deeply flue gas heat recovery based on the fluorine plastic heat exchanger ,elaborated the principle and main characteristics of this technology ,and analyzed the economic performance