

# 供应不同品位工业蒸汽的 1 000 MW 机组能耗特性分析

高新勇<sup>1</sup>, 郑立军<sup>1</sup>, 刘苗苗<sup>2</sup>, 王朝阳<sup>2</sup>

(1. 华电电力科学研究院有限公司, 浙江 杭州 310030;  
2. 西安交通大学 动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

**摘要:**为分析工业供汽机组供不同品位蒸汽的能耗特性,考虑到工业供汽机组多热用户参数及多供热汽源点的特点,建立了供热机组变工况计算及能耗特性分析模型。以某 1 000 MW 工业供汽机组为例,分别采用好处归电法、好处归热法、做功能力法和等效热降法研究了电负荷、中压工业热负荷、低压工业热负荷、供汽汽源点等因素对机组能耗特性的影响规律。结果表明:不同供热方式下采用同一方法计算的供热煤耗率随电负荷变化的趋势一致,随热负荷变化不大;不同供热方式下采用同一方法计算的发电煤耗率随热负荷变化的趋势一致,随电负荷变化的趋势有差异;当电负荷为 620 MW、热负荷为 220 t/h 时,在再热热段蒸汽供中压蒸汽方式下按照好处归电法、做功能力法、等效热降法、好处归热法分配的供热煤耗率分别为 37.46, 26.43, 25.83 和 22.52 kg/GJ, 发电煤耗率分别为 280.39, 291.80, 292.42 和 295.84 g/(kW·h)。

**关键词:**供热机组;变工况;热电分摊;能耗特性

中图分类号:TM621 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2024.03.009

[引用本文格式]高新勇,郑立军,刘苗苗,等. 供应不同品位工业蒸汽的 1 000 MW 机组能耗特性分析[J]. 热能动力工程,2024,39(3):65-72. GAO Xin-yong, ZHENG Li-jun, LIU Miao-miao, et al. Analysis of energy consumption characteristics of a 1 000 MW unit supplying multiple energy grades of industrial steam[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(3):65-72.

## Analysis of Energy Consumption Characteristics of a 1 000 MW Unit Supplying Multiple Energy Grades of Industrial Steam

GAO Xin-yong<sup>1</sup>, ZHENG Li-jun<sup>1</sup>, LIU Miao-miao<sup>2</sup>, WANG Chao-yang<sup>2</sup>

(1. Huadian Electric Power Research Institute Co., Ltd., Hangzhou, China, Post Code: 310030;

2. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049)

**Abstract:** In order to analyze the energy consumption characteristics of different grades of steam supplied by industrial steam supply units, considering the multi-heat user parameters and multiple heat supply steam sources of industrial steam supply units, the variable working condition calculation and energy consumption characteristic analysis models of heating units were established. Taking a 1 000 MW industrial steam supply unit as an example, the influence of factors such as the electric load, medium-pressure industrial heat load, low-pressure industrial heat load, and supply steam source point on the energy consumption characteristics of the unit was studied by the analytical methods including heat method, actual enthalpy drop method, exergy method and equivalent enthalpy drop method. The results show that the heating coal consumption rate calculated by the same method under different heating modes has the same trend with the power load, but has little variation with the heat load; the power generation coal consumption rate calculated by the same method under different heating modes has the same trend with heat load,

收稿日期:2023-02-27; 修訂日期:2023-04-03

基金项目:国家自然科学基金(52022079, 52106026)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China (52022079, 52106026)

作者简介:高新勇(1987-),男,华电电力科学研究院有限公司高级工程师。

通信作者:王朝阳(1991-),男,西安交通大学副教授。

but has different trends with power load; when the power load is 620 MW and the heat load is 220 t/h, in the mode of the hot reheat steam for the medium pressure steam, the heating coal consumption rates allocated with the heat method, exergy method, equivalent enthalpy drop method and actual enthalpy drop method are 37.46, 26.43, 25.83, and 22.52 kg/GJ, respectively, the power generation coal consumption rates are 280.39, 291.80, 292.42, 295.84 g/(kW·h), respectively.

**Key words:** heating unit, off-design, heat and power allocation, energy consumption characteristics

## 引言

为实现碳达峰、碳中和目标,煤电机组应加强节能降碳、灵活性及供热改造<sup>[1]</sup>。新形势下,热电联产技术得到了较大发展<sup>[2]</sup>。热电联产可实现能量的梯级利用<sup>[3]</sup>,利用热电联产机组满足日益增加的居民采暖、工业蒸汽等集中用热需求具有能源利用率高的显著优势。

热电联产将热、电二者共同产出,涉及到热力企业、电力企业及热用户本身的利益,如何分配热、电产品成本并兼顾各用能企业的利益至关重要。国内外目前发展了多种热电成本分摊方法来评价热电联产电厂的能耗<sup>[4-5]</sup>。基于热力学第一定律的热量法<sup>[6]</sup>仅涉及到生产电能和热能所消耗的能量,将电厂的热耗量进行划分;热力学第二定律则是对不同过程的不可逆性及能量品质进行界定。实际焓降法<sup>[7]</sup>、做功能力法<sup>[8]</sup>和等效热降法<sup>[9]</sup>不同程度地考虑了能量品质方面的差别。李勇等人<sup>[10]</sup>改进了理想循环热效率的定义,提出了等效热降法的改进算法,并以某 200 MW 机组为例进行了能耗研究。张树芳等人<sup>[11]</sup>以传统实际焓降法为基础,提出了针对大型再热式联产机组的热电分摊方法,并将其应用于某国产 300 MW 机组。叶学民等人<sup>[12]</sup>在综合考虑烟和灰在热电联产机组供热过程中不同作用的基础上,建立了折合烟法分摊模型,开展了多个典型 50 MW 机组的能耗分析。李慧君等人<sup>[13]</sup>考虑了用热量的数量比例和品质提出了乏热分配法,进行实例计算,并与热量法、实际焓降法等进行了比较。亓海青等人<sup>[14]</sup>在考虑能量品位的基础上提出了一种新的烟成本分摊方法,基于某 7 900 kW 燃气轮机热电联产机组研究了主要设计参数对烟成本的影响。李磊磊等人<sup>[15]</sup>基于循环函数法提出了一种新的发电和供热的热耗分配计算模型,以某 50 MW 双抽机组为算例计算了各分项经济性指标。李斌等

人<sup>[16]</sup>提出用结构理论法计算某 350 MW 空冷热电联产机组的煤耗,计算结果与做功能力法接近。

综上所述,许多专家学者对热电联产机组的热电分配问题进行了探讨,但对多种分配方法开展比较的研究较少,且缺乏基于 1 000 MW 级高参数大容量机组的分析。

本文将以某 1 000 MW 工业供汽机组为例,在机组不同运行工况比较不同分摊方法的计算结果差异,进而获得能耗特性随电热负荷变化的规律。对于工业供汽机组来说,热用户需求参数和供热汽源点较多,能耗特性变化规律复杂。针对供热机组采用多汽源供应多品位蒸汽的情况,研究热力参数变化对供热机组能耗特性的影响,有助于全面认识热电联产,从而指导供热机组的经济性运行。

## 1 热力学模型

### 1.1 供热机组变工况计算模型

基于质量平衡和能量平衡原理,通过 MATLAB 软件建立了供热机组基准运行工况计算模型和变工况计算模型。变工况是指机组运行工况发生变动,通常是通过汽轮机的主蒸汽流量  $D_0$  或通过级组的蒸汽流量  $D_f$  发生变化。级组前后压力决定级组通过蒸汽的能力,因而通流量发生变化将引起级组前后压力发生变化,其关系决定于弗留格尔公式<sup>[17]</sup>:

$$\frac{D_f}{D_{f,s}} = \sqrt{\frac{(p_f^2 - p_r^2)}{(p_{f,s}^2 - p_{r,s}^2)}} \sqrt{\frac{t_{f,s}}{t_f}} \quad (1)$$

式中: $D$ —通过级组的蒸汽流量,t/h; $p$ —蒸汽压力,MPa; $t$ —蒸汽温度,℃;角标 f,r—一级组前和级组后;角标 s—基准工况。

供热机组在供热工况下运行时,锅炉产生的蒸汽携带热能进入汽轮机后,一部分用于供热,其余用于发电。由于供热机组存在对外供热情况,变工况计算时需要从供热抽汽口划界,根据抽汽口的数目  $n$  将汽轮机分为  $n+1$  个区段,每个区段分别使用弗

留格尔公式进行计算。

## 1.2 供热机组能耗分析指标

热电联产总热耗量的分配应充分考虑热电厂节约能源、保护环境的社会效益,在兼顾用户承受能力的前提下,本着热电共享的原则合理分摊。本文选取了好处归电法、好处归热法、做功能力法和等效热降法4种典型的能耗分析方法,分析供热机组的供热能耗。

### 1.2.1 好处归电法

好处归电法又名热量法,按照热量法来分配热量的方式是基于计算分配至供热的热耗量 $Q_{tp,h}$ 占热电联产机组总热耗量 $Q_{tp}$ 的比值来达到分配的目的。

热电联产机组总热耗量:

$$Q_{tp} = \frac{D_0(h_0 - h_{fw})}{\eta_b \eta_p} \quad (2)$$

分配给供热的热耗量:

$$Q_{tp,h} = \frac{D_h(h_h - h_{h'})}{\eta_b \eta_p} \quad (3)$$

式中: $D_0$ 和 $D_h$ —主蒸汽耗量和供热蒸汽流量,t/h;  
 $h_0, h_{fw}, h_h$ 和 $h_{h'}$ —主蒸汽初焓、给水比焓、供热抽汽比焓和回水比焓,kJ/kg; $\eta_b$ —锅炉效率; $\eta_p$ —主蒸汽管道效率。

好处归热法的供热煤耗分摊比 $\beta_{tp,1}$ 为:

$$\beta_{tp,1} = \frac{Q_{tp,h}}{Q_{tp}} = \frac{D_h(h_h - h_{h'})}{D_0(h_0 - h_{fw})} \quad (4)$$

但热量法以热力学第一定律为基础,不区分能量的品质,起不到鼓励热用户利用低品位能量的作用。

### 1.2.2 好处归热法

好处归热法又名实际焓降法,其分配供热与发电煤耗量的原则是:热电厂供热的煤耗量按照供热蒸汽在汽轮机中的实际焓降不足 $W_h$ 占主蒸汽实际焓降 $W_0$ 的比例来分配。

供热抽汽造成的供热汽流焓降不足为:

$$W_h = D_h(h_h - h_c) \quad (5)$$

主蒸汽的实际焓降为:

$$W_0 = D_0(h_0 - h_c) \quad (6)$$

式中: $h_c$ —排汽比焓,kJ/kg。

好处归热法的供热煤耗分摊比 $\beta_{tp,2}$ 为:

$$\beta_{tp,2} = \frac{W_h}{W_0} = \frac{D_h(h_h - h_c)}{D_0(h_0 - h_c)} \quad (7)$$

按照实际焓降法分配煤耗,热电联产机组的所

有冷源损失和供热蒸汽的冷源损失划归到发电方面,但一部分冷源损失实际上已经为热用户所用,因此这种分配方法是“好处归热法”。

### 1.2.3 做功能力法

做功能力法又名烟分析法,是根据热电联产供热蒸汽的做功能力(烟)与主蒸汽最大做功能力的比值来分配。

供热抽汽最大做功量为:

$$E_h = D_h e_h \quad (8)$$

主蒸汽最大做功量为:

$$E_0 = D_0 e_0 \quad (9)$$

做功能力法的供热煤耗分摊比 $\beta_{tp,3}$ 为:

$$\beta_{tp,3} = E_h/E_0 \quad (10)$$

式中: $e_h$ 和 $e_0$ —供热蒸汽和主蒸汽比烟,kJ/kg,计算公式为:

$$e_h = (h_h - h_{en}) - t_{en}(s_h - s_{en}) \quad (11)$$

$$e_0 = (h_0 - h_{en}) - t_{en}(s_0 - s_{en}) \quad (12)$$

式中: $s_0, s_h$ —主蒸汽和供热蒸汽的比熵,kJ/(kg·K);  
 $s_{en}$ —环境比熵,kJ/(kg·K); $h_{en}$ —环境比焓,kJ/kg;  
 $t_{en}$ —环境温度,℃。

做功能力法基于热力学第二定律进行,其计算考虑到了供热蒸汽品质的差别,将热电联产经济效益分发到热能和电能两种产品。

### 1.2.4 等效热降法

等效热降法主要用来分析热力系统和蒸汽动力装置的完善程度,导出热力分析参数抽汽等效热降 $H_j$ 及抽汽效率 $\eta_j$ 等,可用于热力系统的整体计算和局部分析。

机组为再热机组,抽汽等效热降为:

$$H_j = h_j + \sigma - h_c - \sum_{m=1}^{j-1} \frac{A_m}{q_m} H_r \quad (13)$$

主蒸汽的等效热降为:

$$H_0 = h_0 + \sigma - h_c - \sum_{m=1}^n \frac{\tau_m}{q_m} H_m \quad (14)$$

式中: $A$ —换热量,取 $\gamma$ 或 $\tau$ ,视加热器形式而定; $\gamma_m$ 和 $\tau_m$ —第 $m$ 级加热器中1 kg疏水的放热量和1 kg水的焓升,kJ/kg; $q_m$ —第 $m$ 级加热器中1 kg抽汽的放热量,kJ/kg; $m$ 和 $j$ —任意抽汽级脚码; $n$ —抽汽级数; $\sigma$ —再热吸热量,kJ/kg。

等效热降法的供热煤耗分摊比 $\beta_{tp,4}$ 为:

$$\beta_{tp,4} = \frac{D_h H_h}{D_0 H_0} \quad (15)$$

等效热降法利用等效热降来研究热电联产机组的热功转换及能量利用程度。等效热降仅考虑机组从进汽到排汽这个过程,所以避免了供热蒸汽的冷源损失分配问题。

对于上述 4 种典型的能耗分析方法,供热煤耗率为:

$$b_{tp,h,i} = \frac{\beta_{tp,i} B_{tp}}{Q_h} \quad (16)$$

发电煤耗率为:

$$b_{tp,e,i} = \frac{(1 - \beta_{tp,i}) B_{tp}}{N_d} \quad (17)$$

式中: $B_{tp}$ —机组总煤耗量,kg/h; $N_d$ —机组电负荷,MW; $Q_h$ —机组热负荷,GJ/h。

## 2 案例机组参数

### 2.1 机组主要技术参数

以某 1 000 MW 燃煤发电机组为例进行研究,汽轮机是超超临界凝汽式汽轮机,型号为 N1000-25/600/600。汽轮机的主要技术参数如表 1 所示。

表 1 汽轮机主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of steam turbine

参数	数值
THA 工况功率/MW	1 036
VWO 工况功率/MW	1 090
额定主蒸汽流量/t·h <sup>-1</sup>	2 850.95
额定主蒸汽压力/MPa	25
额定主蒸汽温度/℃	600
额定再热蒸汽压力/MPa	4.33
额定再热蒸汽温度/℃	600
额定排汽压力/kPa	5.7

### 2.2 供热系统概况

对于供热机组来说,供热蒸汽参数及流量需满足集中供热区域内热用户的用热需求,热用户所需蒸汽分为低压和中压蒸汽。设计供热工况为:中压蒸汽压力 3.1 MPa、温度 310 ℃、流量 220 t/h;低压蒸汽压力 1.1 MPa、温度 240 ℃、流量 270 t/h。中、低压不同供汽方案分别有 3 种,如表 2 所示。供热系统如图 1 所示。

表 2 中、低压不同供汽方案

Tab. 2 Different medium and low pressure steam supply schemes

供汽方式	方案	供汽方案	特点
中压	1	再热热段蒸汽(热再)减温减压后供中压蒸汽,中联门不参调	再热热段处蒸汽压力满足供汽要求,中联门不参与调节压力
	2	再热热段蒸汽供中压蒸汽,中联门参调	再热热段处蒸汽压力不足,辅助以中联门参调后供汽,最低电负荷 530 MW
低压	3	主蒸汽减温减压后供中压蒸汽	当电负荷低于 530 MW 时采用此方案
	4	中压缸排汽供低压蒸汽,供热蝶阀不参调	中低压连通管处压力满足供汽要求,供热蝶阀不参与调节压力
	5	中压缸排汽供低压蒸汽,供热蝶阀参调	中低压连通管处供汽压力不足,辅助以供热蝶阀参调,最低电负荷 866 MW
6 热压机供低压蒸汽		当电负荷低于 866 MW 时,再热热段蒸汽引射中压缸排汽去供汽	

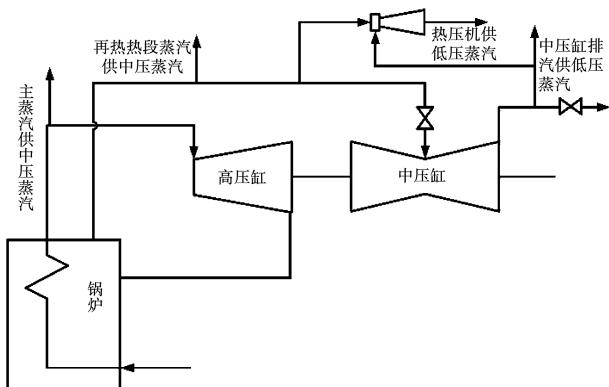


图 1 供热系统图

Fig. 1 Heating system diagram

## 3 结果与分析

以某 1 000 MW 机组多汽源点供中压和低压蒸汽为例,分别在定热负荷和定电负荷条件下研究了机组在中、低压供汽场景下的能耗特性,分析了电负荷或热负荷变化对不同能耗分析方法结果的影响规律。

### 3.1 机组中压供汽场景下能耗特性

#### 3.1.1 定热负荷时机组煤耗特性

当中压热负荷为 220 t/h 时,机组在不同供热方式下的供热煤耗率和发电煤耗率随电负荷变化如

图2所示。由图2可知,好处归电法将供热蒸汽的冷源损失全部归到供热方面,节能的好处全部归于发电方面,所以按好处归电法分配的供热煤耗率最大,发电煤耗率最小。而好处归热法与之相反,按好处归热法分配的供热煤耗率最小,发电煤耗率最大。按做功能力法和等效热降法分配的供热煤耗率和发电煤耗率介于前两者之间。

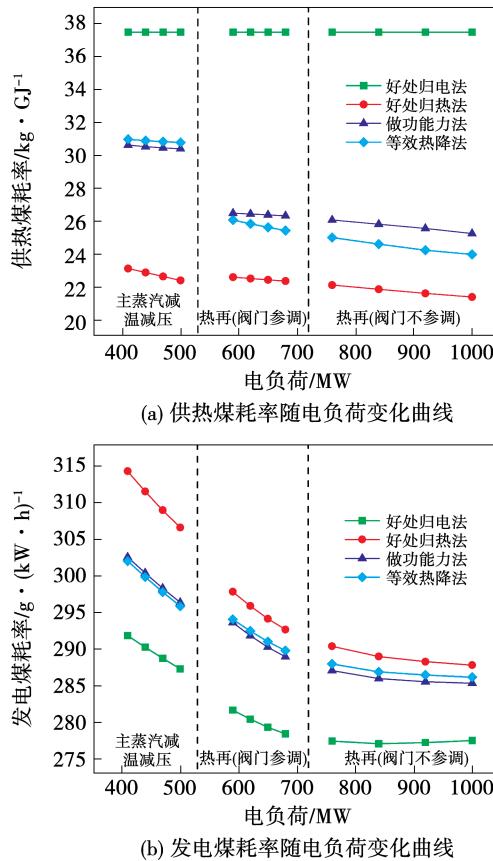


图2 中压供汽场景定热负荷时煤耗特性

$$(Q_h = 220 \text{ t/h})$$

Fig. 2 Coal consumption characteristics at constant heat load in medium pressure steam supply scenario ( $Q_h = 220 \text{ t/h}$ )

不同供热方式下采用同一方法计算的供热煤耗率随电负荷变化的趋势是一致的。随着电负荷增加,按照好处归电法分配的供热煤耗率不变,按照做功能力法、好处归热法、等效热降法分配的结果降低。因为按照好处归电法分配的供热煤耗率仅与锅炉效率、热网效率相关,计算中假定这两个效率不变。对于其他分配方法,随着电负荷增大机组的运

行状态接近于设计工况,机组的效率增大,供热煤耗率会降低。

不同供热方式下采用同一方法计算的发电煤耗率随电负荷变化的趋势有差异。在电负荷较小时,随着电负荷增加按照不同方法分配的发电煤耗率降低,随着电负荷增大按照不同方法分配的发电煤耗率变化较平缓。

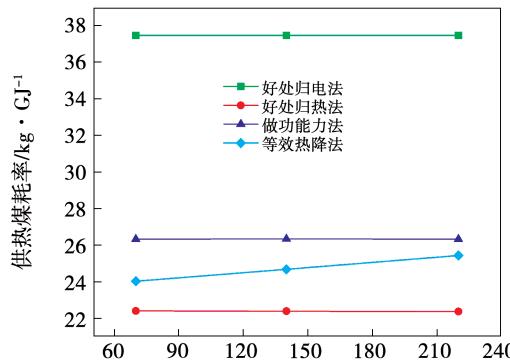
当主蒸汽减温减压供中压热负荷时,供热煤耗率由高到低为好处归电法、等效热降法、做功能力法、好处归热法,发电煤耗率由高到低为好处归热法、做功能力法、等效热降法、好处归电法。当电负荷为440 MW、热负荷为220 t/h时,按照好处归电法、做功能力法、等效热降法、好处归热法分配的供热煤耗率分别为37.46,30.52,30.88和22.89 kg/GJ,发电煤耗率分别为290.22,300.34,299.81和311.47 g/(kW·h)。

当再热热段蒸汽供中压热负荷、中联门参调/不参调时,供热煤耗率由高到低为好处归电法、做功能力法、等效热降法、好处归热法,发电煤耗率由高到低为好处归热法、等效热降法、做功能力法、好处归电法。当电负荷为620 MW、热负荷为220 t/h时,按照好处归电法、做功能力法、等效热降法、好处归热法分配的供热煤耗率分别为37.46,26.43,25.83和22.52 kg/GJ,发电煤耗率分别为280.39,291.80,292.42和295.84 g/(kW·h)。

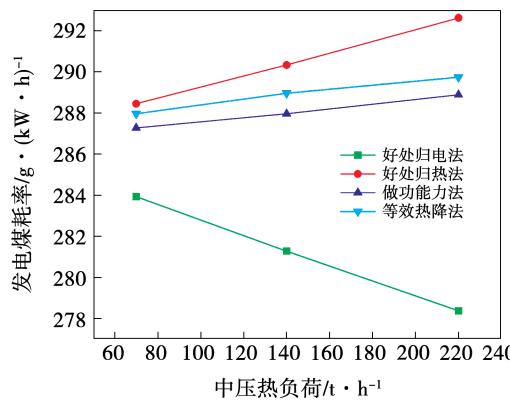
### 3.1.2 定电负荷时机组煤耗特性

以再热热段蒸汽供中压热负荷且中联门参调方式为例,当电负荷一定时,机组供热煤耗率和发电煤耗率随热负荷变化如图3所示。由图3(a)可知,供热煤耗率由高到低为好处归电法、做功能力法、等效热降法、好处归热法。随着热负荷增加,按照好处归电法分配的供热煤耗率不变,按照好处归热法、做功能力法分配的供热煤耗率变化不大,按照等效热降法分配的供热煤耗率逐渐增加。对于等效热降法,供热抽汽的做功损失随着热负荷增加而增加,导致供热煤耗率增加。由图3(b)可知,当电负荷一定时,机组发电煤耗率由高到低为好处归热法、等效热降法、做功能力法、好处归电法。随着热负荷增加,按照好处归电法分配的发电煤耗率逐渐降低,按照

好处归热法、做功能力法、等效热降法分配的发电煤耗率逐渐增加。



(a) 供热煤耗率随热负荷变化曲线



(b) 发电煤耗率随热负荷变化曲线

图 3 中压供汽场景定电负荷时煤耗特性(再热热段蒸汽供中压蒸汽, 阀门参调,  $N_d = 680 \text{ MW}$ )

Fig. 3 Coal consumption characteristics at constant power load in medium pressure steam supply scenario (hot reheat steam for medium pressure steam, valve adjustment,  $N_d = 680 \text{ MW}$ )

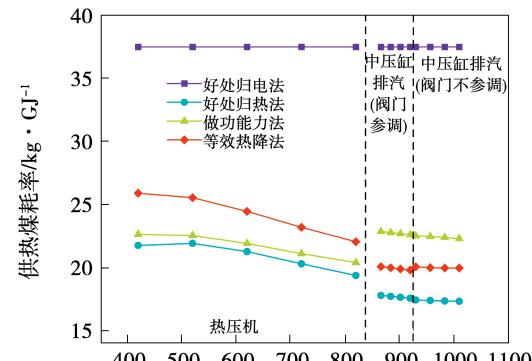
### 3.2 机组低压供汽场景下能耗特性

#### 3.2.1 定热负荷时机组煤耗特性

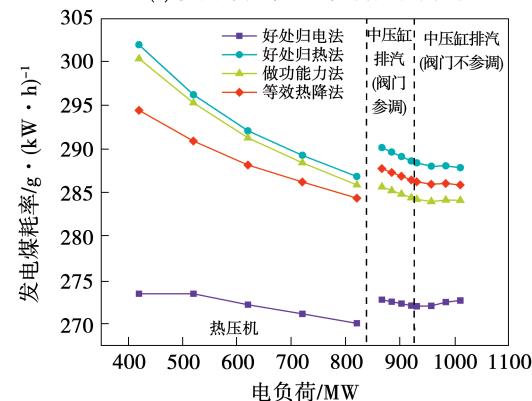
当低压热负荷为  $270 \text{ t/h}$  时, 机组在不同供热方式下的供热煤耗率和发电煤耗率随电负荷变化如图 4 所示。由图 4 可知, 不同供热方式下采用同一方法计算的供热煤耗率随电负荷变化的趋势一致。随着电负荷增加, 按照好处归电法分配的供热煤耗率不变, 按照做功能力法、等效热降法和好处归热法分配的供热煤耗率降低。

不同供热方式下采用同一方法计算的发电煤耗率随电负荷变化的趋势有差异。在电负荷较小时, 随着电负荷增加, 按照不同方法分配的发电煤耗率

降低。随着电负荷增大, 按照不同方法分配的发电煤耗率变化较平缓。



(a) 供热煤耗率随电负荷变化曲线



(b) 发电煤耗率随电负荷变化曲线

图 4 低压供汽场景定热负荷时煤耗特性( $Q_h = 270 \text{ t/h}$ )

Fig. 4 Coal consumption characteristics at constant heat load in low pressure steam supply scenario ( $Q_h = 270 \text{ t/h}$ )

当热压机供低压热负荷时, 供热煤耗率由高到低为好处归电法、等效热降法、做功能力法和好处归热法, 发电煤耗率由高到低为好处归热法、做功能力法、等效热降法和好处归电法。当电负荷为  $620 \text{ MW}$ 、热负荷为  $270 \text{ t/h}$  时, 按照好处归电法、做功能力法、等效热降法和好处归热法分配的供热煤耗率分别为  $37.46, 21.93, 24.46$  和  $21.28 \text{ kg/GJ}$ , 发电煤耗率分别为  $272.24, 291.28, 288.18$  和  $292.08 \text{ g/(kW·h)}$ 。

当中压缸排汽供低压热负荷、中低压连通管供热蝶阀参调/不参调时, 供热煤耗率由高到低为好处归电法、做功能力法、等效热降法和好处归热法, 发电煤耗率由高到低为好处归热法、等效热降法、做功能力法和好处归电法。当电负荷为  $930 \text{ MW}$ 、热负

荷为270 t/h时,按照好处归电法、做功能力法、等效热降法、好处归热法分配的供热煤耗率分别为37.46,22.53,20.08和17.46 kg/GJ,发电煤耗率分别为272.06,284.28,286.29和288.42 g/(kW·h)。

### 3.2.2 定电负荷时机组煤耗特性

以中压缸排汽供低压热负荷且中低压连通管供热蝶阀参调方式为例,当电负荷一定时,机组供热煤耗率和发电煤耗率随热负荷变化如图5所示。由图5(a)可知,供热煤耗率由高到低为好处归电法、做功能力法、等效热降法和好处归热法。随着热负荷增加,按照好处归电法分配的供热煤耗率不变,按照好处归热法、做功能力法分配的供热煤耗率变化不大,按照等效热降法分配的供热煤耗率逐渐增加。

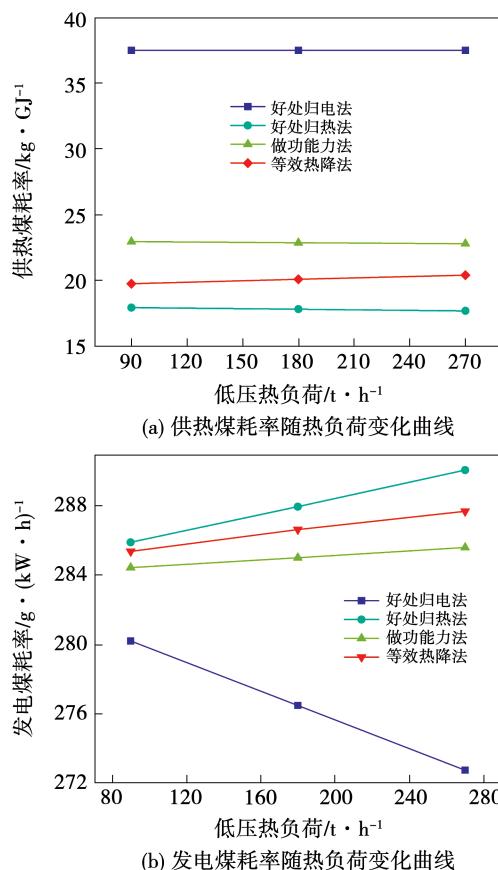


图5 低压供汽场景定电负荷时煤耗特性

(中排供低压蒸汽,阀门参调, $N_d = 870 \text{ MW}$ )

Fig. 5 Coal consumption characteristics at constant power load in low pressure steam supply scenario (medium pressure turbine exhaust steam for low pressure steam, valve adjustment,  $N_d = 870 \text{ MW}$ )

由图5(b)可知,当电负荷一定时,机组发电煤耗率由高到低为好处归热法、等效热降法、做功能力法和好处归电法。随着热负荷增加,按照好处归电法分配的发电煤耗率逐渐降低,按照好处归热法、等效热降法和做功能力法分配的发电煤耗率逐渐增加。

## 4 结论

本文以某1000 MW 机组多汽源点供中压蒸汽和低压蒸汽为例,对供热机组典型的热电成本分摊方法进行研究,对机组的能耗特性进行分析,研究了电负荷或热负荷变化对不同能耗分析方法结果的影响规律,结论如下:

(1) 不同供热方式下采用同一方法计算的供热煤耗率随电负荷变化的趋势一致,随热负荷变化不大。热负荷一定时,随着电负荷增加,按照好处归电法分配的供热煤耗率不变,按照做功能力法、好处归热法和等效热降法分配的供热煤耗率降低。

(2) 不同供热方式下采用同一方法计算的发电煤耗率随热负荷变化的趋势一致,随电负荷变化的趋势有差异。热负荷一定时,在电负荷较小时按照不同方法分配的发电煤耗率随电负荷增加而降低,在电负荷较大时按照不同方法分配的发电煤耗率随电负荷变化不大。电负荷一定时,随着热负荷增加按照好处归电法分配的发电煤耗率逐渐降低,按照好处归热法、等效热降法和做功能力法分配的发电煤耗率逐渐增加。

## 参考文献:

- [1] 周运虎.含吸收式热泵的热电厂运行策略研究[D].大连:大连理工大学,2022.  
ZHOU Yun-hu. Research on operation strategy of combined heat and power plant with absorption heat pump [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022.
- [2] 程东涛,王生鹏,谢天,等.抽汽供热机组增设背压机节能效果评价[J].热能动力工程,2021,36(7):7-11.  
CHENG Dong-tao, WANG Sheng-peng, XIE Tian, et al. Energy-saving effect evaluation of adding back pressure turbine to steam extraction heat supply unit [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(7):7-11.
- [3] ZHANG Xiao-feng, LI Hong-qiang, LIU Li-fang, et al. Optimization analysis of a novel combined heating and power system based on

- biomass partial gasification and ground source heat pump [J]. Energy Conversion and Management, 2018, 163(5): 355 – 370.
- [4] 王攀,王泳涛,王宝玉. 基于热泵回收余热的热电厂能耗分析方法研究[J]. 太阳能学报, 2015, 36(9): 2217 – 2224.  
WANG Pan, WANG Yong-tao, WANG Bao-yu. Study on the energy consumption method of power plant using heat pump for recycling waste heat [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2015, 36 (9): 2217 – 2224.
- [5] NESHEIM S J, ERTESVAG I S. Efficiencies and indicators defined to promote combined heat and power [J]. Energy Conversion & Management, 2007, 48(3): 1004 – 1015.
- [6] 荆有印. 热电联产热、电按质分摊法的热量平衡[J]. 热能动力工程, 2002, 17(1): 95 – 96.  
JING You-yin. Thermal balance of heat and electricity of a cogeneration plant by using the quality-based method of apportionment [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2002, 17(1): 95 – 96.
- [7] YE Xue-min. Reduced exergy method for heat-electricity cost allocation in combined heat and power plants [J]. Entropy, 2003, 5(5): 432 – 443.
- [8] 冯霄,钱立伦,蔡颐年. 热电联产中热、电分摊比的合理确定[J]. 工程热物理学报, 1997, 18(4): 409 – 413.  
FENG Xiao, QIAN Li-lun, CAI Yi-nian. Rationally allocating co-generation costs [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1997, 18(4): 409 – 413.
- [9] 刘继平,严俊杰,陈国慧,等. 效热降法的数学理论基础研究[J]. 西安交通大学学报, 1998, 32(5): 68 – 72.  
LIU Ji-ping, YAN Jun-jie, CHEN Guo-hui, et al. The mathematical theory of the equivalent heat drop method [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1998, 32(5): 68 – 72.
- [10] 李勇,曹丽华,林文彬,等. 效热降法的改进计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 243 – 247.  
LI Yong, CAO Li-hua, LIN Wen-bin, et al. Improvements on the equivalent enthalpy drop method [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 243 – 247.
- [11] 张树芳,孙科,郭江龙,等. 热电厂热电分摊实际焓降法的新算法[J]. 节能技术, 2012, 30(2): 124 – 126.  
ZHANG Shu-fang, SUN Ke, GUO Jiang-long, et al. The new methods of actual enthalpy drop of cost allocation in cogeneration [J]. Energy Conservation Technology, 2012, 30(2): 124 – 126.
- [12] 叶学民,阎维平,高正阳. 合理确定热电联产机组中热电分摊比的折合(㶲)分摊模型[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(2): 168 – 171.  
YE Xue-min, YAN Wei-ping, GAO Zheng-yang. A reduced exergy model for rational cost allocation in cogeneration [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(2): 168 – 171.
- [13] 李慧君,池冉,范伟,等. 热电成本分摊之乏热分配法的研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2008, 35(1): 67 – 70.  
LI Hui-jun, CHI Ran, FAN Wei, et al. Study of var-heat apportionment method on heat-power cost apportionment [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2008, 35(1): 67 – 70.
- [14] 亓海青,韩巍,张娜. 基于品位的㶲成本分摊方法及其应用[J]. 工程热物理学报, 2016, 37(6): 1141 – 1146.  
QI Hai-qing, HAN Wei, ZHANG Na. Exergy cost allocation method based on energy level and its application [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2016, 37(6): 1141 – 1146.
- [15] 李磊磊,王培红,贾俊颖,等. 供热机组分项经济指标的循环函数法计算模型研究[J]. 汽轮机技术, 2002, 44(3): 155 – 156, 181.  
LI Lei-lei, WANG Pei-hong, JIA Jun-ying, et al. Algorithm research of performances model for cogeneration turbine by cycle functions [J]. Turbine Technology, 2002, 44 (3): 155 – 156, 181.
- [16] 李斌,胡楠,杜艳玲. 基于热经济学结构理论的热电联产机组耗煤量计算[J]. 汽轮机技术, 2014, 56(2): 137 – 140, 106.  
LI Bin, HU Nan, DU Yan-ling. Coal consumption calculating method for cogeneration unit based on structural theory of thermoeconomics [J]. Turbine Technology, 2014, 56 (2): 137 – 140, 106.
- [17] 崔传涛,刘传美,牛修富,等. 基于特征通流面积分析和级组故障诊断试验的1 000 MW 汽轮机机组功率恢复研究与工程应用[J]. 热能动力工程, 2020, 35(7): 71 – 74.  
CUI Chuan-tao, LIU Chuan-mei, NIU Xiu-fu, et al. Power recovery and engineering application of 1 000 MW steam turbine unit based on characteristic flow area analysis and stage group fault diagnosis test [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(7): 71 – 74.

(刘颖 编辑)