

# 超临界 600 MW 火电机组热力系统的焓分析

刘强, 段远源

(清华大学热科学与动力工程教育部重点实验室, 北京市 海淀区 100084)

## Exergy Analysis for Thermal Power System of A 600 MW Supercritical Power Unit

LIU Qiang, DUAN Yuanyuan

(Key Laboratory of Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education,  
Tsinghua University, Haidian district, Beijing 100084, China)

**ABSTRACT:** The matrix equation for exergy balance of regenerative system was derived, and the mathematical model for exergy analysis of thermal power system was presented. Exergy losses and exergy efficiencies of the main components of a domestic N600-24.2/566/566 power unit were calculated by this model. The results indicate that the exergy efficiencies of low pressure heaters are lower than those of high pressure heaters, the exergy destructions in low pressure heaters are also lower. The exergy efficiency of the steam turbine is higher than relative internal efficiency, the exergy efficiencies of the high pressure turbine, intermediate pressure turbine and low pressure turbine are 93.20%, 96.18% and 89.61%, but the work of the low pressure turbine is the largest, so there is energy conservation potential for the low pressure turbine. The coefficient of exergy loss is found to be maximum in the boiler (49.47%) while much lower in condenser (1.232%). In addition, the calculated thermal efficiency of this power plant is 44.54% while the exergy efficiency of the power cycle is 43.52%.

**KEY WORDS:** power unit; thermal power system; exergy analysis; energy conservation

**摘要:** 提出了火电机组回热系统的焓平衡矩阵方程式, 并构建了热力系统焓分析的数学模型。应用该模型, 分析了国产某超临界 N600-24.2/566/566 机组热力系统主要部件的焓损失和焓效率。结果表明: 高压加热器的焓效率高于低压加热器, 但是低压加热器的焓损系数较小; 除氧器的焓损系数最大; 汽轮机的焓效率高于其相对内效率; 高压缸、中压缸和低压缸的焓效率分别为 93.20%, 96.18% 和 89.61%, 但是低压缸承担做功量最大, 因此低压缸仍有一定的节能潜力; 锅炉的焓损系数高达 49.47%, 而凝汽器的焓损系数只有 1.232%, 所以锅

炉是节能的重点对象。此外该机组的全厂热效率为 44.54%, 而焓效率为 43.52%。

**关键词:** 火电机组; 热力系统; 焓分析; 节能

## 0 引言

火力发电机组承担着我国约 80% 的发电量, 是耗能和排放大户, 因此准确而有效的节能理论将有助于火电机组的节能减排工作。火电机组热经济性的评价方法一般分为两类: 基于热力学第一定律的热量法, 如热平衡法、等效焓降法、矩阵法、循环函数法等, 一般用于定量分析; 基于热力学第二定律的焓分析法、熵分析法、热经济学法等, 一般用于定性分析。目前, 我国火电机组的热经济性分析普遍采用热量法, 但节能不仅要重视量, 还应注意节能潜力的挖掘以及能级匹配的改善, 所以对火电机组进行焓分析可以有效评价能量利用的合理程度, 科学地指导电厂节能工作。焓分析和热经济学的理论研究在我国从 20 世纪 80 年代开始发展<sup>[1-4]</sup>, 并得到了一定的应用<sup>[5-15]</sup>, 但是国内对超临界火电机组热力系统进行焓分析的工作仍较少, 而目前超(超)临界 600 MW 及以上机组正相继投入运行, 所以本文拟构建火电机组焓分析数学模型, 并对某台超临界 600 MW 机组进行焓分析, 为大型火电机组的节能提供理论依据。

## 1 火电机组热力系统的焓分析数学模型

### 1.1 焓损失和焓效率

焓损失的大小可以表明实际过程的不可逆程度, 故其大小可以衡量热力过程的完善程度。但焓损失是一绝对量, 无法比较不同工况焓的利用程度, 因此常采用焓效率来评价热力过程或设备的热

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973项目)(2009CB219805)。

Project Supported by National Basic Research Program of China (973 Program) (2009CB219805).

力学完善程度。焓效率有普遍焓效率和目的焓效率之分, 由于电厂多数设备是多股焓流汇入和多股焓流汇出, 且普遍焓效率也不是普遍合理的, 所以本文采用目的焓效率, 即系统或设备中作为收益的焓与作为代价的焓之比值<sup>[2-3,16]</sup>。在横向比较时, 即比较不同设备或系统的焓利用程度或焓损失大小时, 采用焓损系数即以输入(代价)焓为基准时局部焓损失所占的比例。

### 1.2 锅炉的焓效率

锅炉以燃料焓为代价, 而其收益是蒸汽, 所以其焓效率可表示为

$$\eta_{b,ex} = \frac{D_b(e_b - e_{w1}) + D_{rh}(e_{rh}'' - e_{rh}')}{Be_f} \quad (1)$$

因为锅炉热效率为

$$\eta_b = \frac{D_b(h_b - \bar{t}_1) + D_{rh}(h_{rh}'' - h_{rh}')}{Bq_{net}} \quad (2)$$

所以锅炉焓效率还可表示为

$$\eta_{b,ex} = \eta_b \frac{q_{net}}{e_f} \frac{D_b(e_b - e_{w1}) + D_{rh}(e_{rh}'' - e_{rh}')}{D_b(h_b - \bar{t}_1) + D_{rh}(h_{rh}'' - h_{rh}')} \quad (3)$$

式中:  $D_b$  为锅炉过热器的蒸汽流量;  $e_b$  为过热器出口蒸汽的比焓;  $e_{w1}$  为锅炉给水的比焓;  $D_{rh}$  为再热蒸汽量;  $e_{rh}'$  和  $e_{rh}''$  分别为再热器入口和出口蒸汽的比焓;  $h_b$  为过热器出口蒸汽的比焓;  $\bar{t}_1$  为锅炉给水的比焓;  $h_{rh}'$  和  $h_{rh}''$  分别为再热器入口和出口蒸汽的比焓;  $q_{net}$  为煤的低位发热量;  $e_f$  为煤的化学焓。

煤的化学焓  $e_f$  的估算式<sup>[2-3]</sup>为

$$e_f = q_{net} (1.0064 + 0.1519 \frac{w(H)}{w(C)} + 0.0616 \frac{w(O)}{w(C)} + 0.0429 \frac{w(N)}{w(C)}) \quad (4)$$

式中:  $w(C)$ 、 $w(H)$ 、 $w(O)$ 、 $w(N)$  分别为燃料煤中碳、氢、氧、氮的质量成分。

锅炉的焓损系数为

$$\Omega_b = 1 - \eta_{b,ex} \quad (5)$$

### 1.3 管道的焓效率

管道的焓效率按供给汽轮机的蒸汽的焓与锅炉热负荷的焓之比表示, 即

$$\eta_{p,ex} = \frac{D_0(e_0 - e_{w1}) + D_{rh}(e_{rh} - e_2)}{D_b(e_b - e_{w1}) + D_{rh}(e_{rh}'' - e_{rh}')} \quad (6)$$

式中:  $D_0$  和  $e_0$  分别为主蒸汽流量及其比焓;  $e_{rh}$  为中联门前再热后的蒸汽的比焓;  $e_2$  为高压缸排汽的比焓。

### 1.4 汽轮机的焓效率

汽轮机以蒸汽的焓为代价, 来获得机械功, 所

以其目的焓效率可表示为

$$\eta_{T,ex} = \frac{W}{D_0(e_0 - e_{w1}) + D_{rh}(e_{rh} - e_2)} \quad (7)$$

式中:  $W$  为汽轮机的做功量。

汽轮机的焓损系数为

$$\Omega_T = \frac{D_0(e_0 - e_{w1}) + D_{rh}(e_{rh} - e_2) - W}{Be_f} \quad (8)$$

在该式中, 汽轮机的焓损失不仅包含其内部损失, 还包括轴封漏汽、小汽轮机、各级加热器和凝汽器的焓损失等。

而对汽轮机的高、中、低压缸的焓效率应是该缸做功量同进出该缸的焓量差的比值, 如高压缸的焓效率可表示为

$$\eta_{T,ex}^H = \frac{W^H}{D_0 e_0 - D_1 e_1 - (D_2 + D_{rh}) e_2 - \sum D_j^{out} e_j^{out}} \quad (9)$$

式中:  $W^H$  高压缸做功量;  $D_i$  和  $e_i$  分别为高压缸的第  $i$  级抽汽量及其比焓;  $D_j^{out}$  和  $e_j^{out}$  分别为高压缸的第  $j$  股漏汽量及其比焓。

### 1.5 回热加热器的焓损失

式(7)计算的汽轮机的焓效率, 实际上包含了回热过程中各环节的焓损失, 而加热器的运行关系到机组的经济性和安全性, 因此有必要掌握各级加热器热力过程的完善程度。

对图 1 所示的表面式加热器焓平衡方程:

$$D_i e_i + D_0 e_{w(i+1)} + \sum_{j=1}^{i-1} D_j e_{j-1}' = D_i e_i' + D_0 e_{wi} + \sum_{j=1}^{i-1} D_j e_j' + I_i \quad (10)$$

整理得

$$D_i (e_i - e_i') + \sum_{j=1}^{i-1} D_j (e_{j-1}' - e_j') = D_0 (e_{wi} - e_{w(i+1)}) + I_i \quad (11)$$

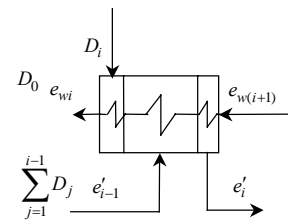


图 1 表面式加热器

Fig. 1 Schematic diagram of a surface heater

对表面式加热器定义第  $i$  级抽汽的比焓降为

$$e_i^q = e_i - e_i' = h_i - \bar{t}_{si} - T_0 (s_i - s_i')$$

上级疏水在第  $i$  级加热器的比焓降为

$$e_i^r = e_{i-1}' - e_i' = \bar{t}_{s(i-1)} - \bar{t}_{si} - T_0 (s_{i-1}' - s_i')$$

给水在第  $i$  级加热器的比焓升为



效率为 44.54%，热力系统如图 3 所示。该机组燃煤的煤质分析结果如表 1 所示。

其低位发热量  $q_{\text{net}}$  为 22441 kJ/kg；计算得燃料的化学焓  $e_f$  为 22965 kJ/kg。

该机组的汽轮机是三缸四排汽，整个通流部分共 48 级叶片，其中高压缸 1+11 级、中压缸 8 级、低压缸 4×7 级。由于焓效率既可表明汽轮机膨胀过程的性能，又可描述整台汽轮机及机组的热力性能<sup>[5]</sup>，因此计算该汽轮机高、中、低压缸的焓效率，结果如表 2 所示。由表 2 可以发现：汽轮机各缸的焓效率均大于其相对内效率；中压缸的焓效率最高，其次是高压缸，低压缸的焓效率最低；相反地，低压缸承担的做功量最大，占 42.3%，高压缸次之，中压缸最低；低压缸的焓损系数是中压缸的 4.677 倍，所以该机组低压缸对整个汽轮机性能的影响最大，有一定的节能潜力。

由表 3 的计算结果可知，高压加热器的焓效率均高于低压加热器，且有随着抽汽压力的降低而降低的趋势。3 号高加抽汽温度最高，该级加热器内的换热温差最大，同其他高加相比其焓效率较低；但是该级加热的给水比焓升只有 110.3 kJ/kg，而 2 号高加为 188.5 kJ/kg，这样就减小了 3 号高加的焓损量，其焓损系数并不显著。尽管低压加热器的焓效率不高，但是低压加热器的焓损失，在全厂中的比例却都不大，这说明低压加热器的代价焓较小，即利用的是低品位能源，所以回热系统应充分利用低压抽汽，减小冷源损失。另外，该机组的第 8 级

表 1 煤质分析结果

Tab. 1 Results of the coal-quality analysis %

$C_{\text{ad}}$	$H_{\text{ad}}$	$O_{\text{ad}}$	$N_{\text{ad}}$	$S_{\text{ad}}$
58.56	3.36	7.28	0.79	0.63

表 2 汽轮机的焓分析结果

Tab. 2 Calculating results of steam turbine %

设备	相对内效率 <sup>①</sup>	焓效率	焓损系数
高压缸	87.10	93.20	1.032
中压缸	93.29	96.18	0.4524
低压缸	88.65	89.61	2.116

注：<sup>①</sup>为厂家提供数据

表 3 热力系统的焓分析结果

Tab. 3 Calculating results of the thermal power system

设备	焓损失/(kJ/s)	焓效率/%	焓损系数/%
1 号加热器	1 011.814 3	96.07	0.073 4
2 号加热器	2 230.834 2	94.04	0.161 7
3 号加热器	2 033.286 5	90.06	0.147 4
4 号加热器	2 994.304 1	88.26	0.217 1
5 号加热器	2 508.103 3	84.89	0.181 8
6 号加热器	742.311 5	87.61	0.053 8
7 号加热器	1 844.324 8	74.62	0.133 7
8 号加热器	765.524 9	63.50	0.055 5
凝汽器	16 985.240 3	—	1.231 5

加热器没有设置疏水冷却段，低压加热器系统也未采用疏水泵，从焓分析的结果可知，低压加热器的焓损系数较低，可挖掘的节能潜力较小，如果增设疏水泵不仅使系统复杂，而且耗用高品质电能，实际上可节能的空间也不大。

由表 4 知，锅炉是电厂中焓损失最大的设备，主要是因为燃烧与传热的不可逆造成的。全厂焓效率为 43.52%，稍低于其全厂热效率，焓效率和热效率的差别取决于所耗用燃料的特性，亦即取决于燃料的化学焓与其低位发热量之间的差别<sup>[3]</sup>，由于该机组用煤的化学焓高于其低位发热量，因此其全厂焓效率低于其全厂热效率。

表 4 全厂的焓分析结果

Tab. 4 Calculating results of the power unit

设备	焓损失/(kJ/s)	焓效率/%	焓损系数/%
锅炉	677371.309 0	50.887 7	49.112 3
管道	10423.862 6	98.514 8	0.755 8
汽轮机	82136.295 0	88.120 9	5.955 2
其他 <sup>②</sup>	8998.062 0	98.523 2	0.652 4
全厂	778929.528 6	43.524 3	56.475 7

注：<sup>②</sup>为机械损失和发电机损失。

### 3 结论

提出了火电机组回热系统的焓平衡矩阵方程式，构建了热力系统焓分析的数学模型，应用该模型对某 N600-24.2/566/566 机组进行了焓分析，得出如下结论。

1) 汽轮机各缸的焓效率均大于其相对内效率；中压缸的焓效率最高，其次是高压缸，低压缸的焓效率最小，而低压缸承担机组出力最大，所以低压缸仍有一定的节能潜力。

2) 高压加热器的焓效率均高于低压加热器，且有随着抽汽压力的降低而降低的趋势。尽管低压加热器的焓效率不高，但是其焓损失在全厂中的比例却都不大，节能潜力有限。

3) 提高机组参数和容量可以提高锅炉的焓效率。该机组的全厂焓效率为 43.52%，稍低于其全厂热效率 44.54%。

### 参考文献

- [1] 宋之平, 王加璇. 节能原理[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985: 63-390.  
Song Zhiping, Wang Jiakuan. The principle of energy conservation [M]. Beijing: Electric Press, 1985: 63-390(in Chinese).
- [2] 朱明善. 能量系统的焓分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988: 180-342.  
Zhu Mingshan. Exergy analysis of energy system [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1988: 180-342 (in Chinese).

- [3] 王加璇, 张树芳. 焓方法及其在火电厂中的应用[M]. 北京: 水利电力出版社, 1993: 26-184.  
Wang Jiakuan, Zhan Shufang. Exergy method and application in power plant [M]. Beijing: Electric Press, 1993: 26-184 (in Chinese).
- [4] 项新耀. 工程焓分析方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 1990: 32-323.  
Xiang Xinyao. Engineering exergy analysis method [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1990: 32-323 (in Chinese).
- [5] 杨勇平, 王加璇. 汽轮机性能评价的新准则——焓效率[J]. 汽轮机技术, 1995, 37(1): 21-26.  
Yang Yongping, Wang Jiakuan. The new criterion, exergy efficiency, for evaluation of turbine performance [J]. Turbine Technology, 1995, 37(1): 21-26(in Chinese).
- [6] 王清照, 肖卫杰, 王加璇. 运用热经济学结构理论进行故障诊断的探讨[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(9): 178-181.  
Wang Qingzhao, Xiao WeiJie, Wang Jiakuan. An inquire into the application of the structural theory for diagnosing malfunction in a thermal system[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(9): 178-181(in Chinese).
- [7] 张晓东, 高波, 王加璇. 热经济学结构理论与 LIFO 法则应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 185-189.  
Zhang Xiaodong, Gao Bo, Wang Jiakuan. Research on the application of structure theory and LIFO costing for a power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 185-189(in Chinese).
- [8] 张超, 刘黎明, 陈胜, 等. 基于热经济学结构理论的热力系统性能评价[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(24): 108-113.  
Zhang Chao, Liu Liming, Cheng Sheng, et al. Performance evaluation of thermal power system based on the structure theory of thermoeconomic[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(24): 108-113 (in Chinese).
- [9] 李永华, 李庚生, 闫顺林. 火电机组回热系统焓损分布的通用矩阵方程[J]. 动力工程, 2006, 26(4): 595-598.  
Li Yonghua, Li Gengsheng, Yan Shunlin. A general matrix equation of exergy Loss distribution in regenerative systems of fossil fired power sets[J]. Power Engineering, 2006, 26(4): 595-598 (in Chinese).
- [10] 程伟良, 王清照, 王加璇. 300MW 凝汽机组的热经济学成本诊断[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(8): 126-129.  
Cheng Weiliang, Wang Qingzhao, Wang Jiakuan. Thermoeconomic cost diagnosis of 300MW condensing power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(8): 126-129 (in Chinese).
- [11] Zhang Chao, Wang Yan, Zheng Chuguang, et al. Exergy cost analysis of a coal fired power plant based on structural theory of thermoeconomics[J]. Energy Conservation and Management, 2006, 47(7-8): 817-843.
- [12] 熊杰, 张超, 赵海波, 等. 基于热经济学结构理论的电站热力系统全局优化[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(26): 65-71.  
Xiong Jie, Zhang Chao, Zhao Haibo, et al. Global optimization of thermal power system based on structure theory of thermoeconomics [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(26): 65-71 (in Chinese).
- [13] 张晓晖, 杨莱, 卢玫, 等. 火电厂热力系统焓分析计算研究[J]. 动力工程, 2004, 24(5): 703-706.  
Zhang Xiaohui, Yang Mo, Lu Mei, et al. Research on exergy analysis computation of coal-fired unit thermal system[J]. Power Engineering, 2004, 24(5): 703-706 (in Chinese).
- [14] 徐剑锋, 彭琦, 付加林. 火电厂热力系统火用分析[J]. 能源工程, 2001(5): 21-24.  
Xu Jianfeng, Peng Qi, Fu Jialin. Exergy analysis on thermodynamic system of power plant[J]. Energy Engineering, 2001(5): 21-24(in Chinese).
- [15] 洪慧, 金红光, 刘泽龙, 等. 给水加热型联合循环系统分析研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(2): 144-148.  
Hong Hui, Jin Hongguang, Liu Zelong, et al. Study on exergy evaluation for feedwater heating combined cycle system [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(2): 144-148(in Chinese).
- [16] Mehmet Kanoglu, Ibrahim Dincer, Marc A. Rosen. Understanding energy and exergy efficiencies for improved energy mangement in power plants[J]. Energy Policy, 2007, 35(7): 3967-3978.
- [17] 郭民臣, 王清照, 魏楠, 等. 电厂热力系统矩阵分析方法的改进[J]. 热能动力工程, 1997, 12(2): 103-106.  
Guo Minchen, Wang Qingzhao, Wei Nan, et al. The improvement of matrix analysis in thermodynamic system in power plant [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 1997, 12(2): 103-106(in Chinese).
- [18] 郭民臣, 魏楠. 电厂热力系统矩阵热平衡方程式及其应用[J]. 动力工程, 2002, 22(2): 1733-1738.  
Guo Minchen, Wei Nan. Thermodynamic system matrix thermal balance equation of power plant and its application[J]. Power Engineering, 2002, 22(2): 1733-1738(in Chinese).
- [19] 张学蕾, 王松龄, 陈海平, 等. 加热器端差对机组热经济性影响的通用计算模型[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 166-171.  
Zhang Xuelei, Wang Songling, Cheng Haiping, et al. General calculation model on the influence of terminal temperature difference on heat economy of unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 166-171(in Chinese).
- [20] 闫水保, 魏新利. 能级效率显式矩阵算法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(7): 58-61.  
Yan Shuibao, Wei Xinli. Explicit matrix algorithm of energy level efficiencies[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(7): 58-61(in Chinese).



收稿日期: 2010-03-29。

作者简介:

刘强(1981), 男, 博士研究生, 从事流体热物性和电厂节能理论的研究, qiang-liu09@mails.tsinghua.edu.cn;

段远源(1971), 男, 教授, 博士生导师, 国家杰出青年科学基金和全国优秀博士学位论文获得者, 主要从事热力学、流体热物性、能量系统优化的研究, yyduan@tsinghua.edu.cn。

(责任编辑 王庆霞)