1000MW超超临界二次再热机组㶲分析

赵家毅1,2，李千军2，杨涛1

（1.华中科技大学 能源与动力工程学院，湖北 武汉430074; 2.广东电网有限责任公司电力科学研究院，广东 广州 510080)

摘要：以1000MW超超临界二次再热机组为研究对象，建立了机组的热力学模型，采用热力学㶲分析法对机组及其主要部件进行了研究。结果表明：在THA工况下，机组的各项㶲损失中锅炉㶲损最大，占总体㶲损失86.94%。二次再热机组的㶲效率为45.41%，其中锅炉㶲效率为58.11%，汽轮机㶲效率为83.49%。在锅炉各主要受热面中，水冷壁、低温过热器和空气预热器㶲效率最低，分别为60.08%，77.88%和77.16%；在汽轮机侧，除了汽轮机末级级组㶲效率仅为80.95%之外，其余级组效率均高于90%；对于回热系统，高压加热器㶲效率要高于低压加热器，其中末级低温加热器㶲效率最低。

关键词：超超临界；二次再热；㶲分析；

Exergy analysis of on a 1000MW ultra-supercritical double reheat unit

ZHAO Jiayi1,2 LI Qianjun1 YANG Tao2

(1. School of Energy and Power Engineering，Huazhong University of Science & Technology，Wuhan，Hubei 430074，China ;2.Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510080,China)

**Abstract:** Thermodynamic model of a 1000MW ultra-supercritical double reheat unit was built, and research of unit as well as the main componenets were carried out with exergy analysis method. Results show the exergy efficiency of the power cycle is 45.41%, while that of boiler and steam turbine is 58.11% and 83.49% respectively. Besides, the exergy loss of the boiler accounts for 86.94% of the whole exergy losses under THA loadt, which is greatest part. Of all the main heating surfaces in the boiler, the waterwall, primary superheater and the air preheater has the lowest efficiency, which is 60.08%, 77.88% and 77.16% respectively. In the steam turbine system, the exergy efficiency of all stages is higher than 90%, except the last stage whose exergy efficiency is 80.95%; as for the regenerative system, the high pressure regenerative heaters has higher exergy efficiency, and the last low pressure regenerative has the lowest exergy efficiency

**Key words：**ultra-supercritical；double reheat； exergy analysis

前言

我国的能源结构决定了燃煤发电为主要的发电方式。资料表明，发电耗煤占煤炭总消耗量的50%以上[1]，因燃煤发电排放的硫化物SOX，氮化物NOX和温室气体CO2分别占总排放量的比例为55%，37%和55%，降低燃煤机组的发电煤耗和污染物排放对我国能源可持续发展意义重大。与传统一次再热技术相比， 二次再热能够进一步提高机组热效率，降低机组煤耗，减少污染物和温室气体排放，被认为是燃煤机组的重要发展方向。基于我国大容量超超临界机组技术的成熟性，自2009年起，国内许多科研机构和高校都陆续开展对二次再热机组的设计研究。目前，国电泰州发电有限公司建设项目的1000MW超超临界二次再热机组，作为国内首台二次再热机组，已于2015年投入运行[2]。

随着我国二次再热机组的快速发展，对其进行热经济性分析是国内学者们的研究重点之一。火电机组热力系统的热经济性分析能够有效评估机组能量利用程度，对机组节能潜力挖掘和运行经济性都有重要指导意义。二次再热系统相对于一次再热系统更为复杂，且缺少实际运行数据和经验，因此对其进行热力学分析有重要意义[3-4]。目前针对二次再热机组的热力学分析大多基于热力学第一定律的热量法，缺少基于热力学第二定律的㶲分析法。与热量法相比，㶲分析法将能量的品味差别考虑在内，能够准确表明能量转换过程中能量损失的数量、部位，揭示能量损失的本质原因[5]。本文通过建立二次再热机组模型，采用㶲分析法对二次再热机组进行了热力学分析。计算分析了二次再热机组热力系统整体的㶲损分布，对锅炉、汽轮机和回热系统的各主要部件进行了㶲分析，寻找出了㶲效率较低之处，并对㶲效率较低的原因进行了分析，为二次再热机组进一步降低能耗提供理论指导。

1. 机组信息与研究方法

1.1 机组信息

本文研究对象为国电泰州发电有限公司1000MW二次再热超超临界机组（N1000-31/600/610/610）。表1为二次再热机组的部分参数。

表1 机组THA工况下的部分设计参数

|  |  |
| --- | --- |
| 项目 | 数值 |
| 主蒸汽压力（bar） | 310 |
| 主蒸汽温度(℃) | 600 |
| 主蒸汽流量（t/h） | 2629.537 |
| 一次再热蒸汽压力（bar） | 100.94 |
| 一次再热蒸汽温度(℃) | 610 |
| 二次再热蒸汽压力（bar） | 30.84 |
| 二次再热蒸汽温度(℃) | 610 |
| 排汽压力（kPa） | 4.5 |
| 输出功率（kW） | 1000 |
| 设计热耗(kJ/kWh) | 7070 |

与一次再热机组的锅炉受热面布置不同，本文研究的二次再热系统增加了一级再热器，且将再热器冷段前移布置，将高温过热器和再热器组合交叉布置[6]。低温再热器（WPSH）出口烟气先分别进入两高温再热器冷段（FHRC,SHRC），再进入高温过热器(FS)；由高温过热器出口的烟气先进入高温再热器热段(FHRH,SHRH)，再进入低温再热器（FLR，SLR），最后进入省煤器（ECO）和空气预热器（APH），锅炉主要受热面分布如图1所示。在汽轮机侧，二次再热超超临界机组采用单轴五缸四排汽的单轴布置，由超高压缸（VHP）、高压缸（HP）、中压缸（IP）、低压缸（LP）组成。回热系统采用十级抽汽，由四级高压加热器（HRH）、一级除氧器(DEA)和五级低压加热器(LRH)组成，其中第二级和第四级高压加热器分别连接外置式蒸汽冷却器（AOC）。



图2 二次再热机组锅炉侧受热面分布

1.2 㶲分析法

热力系统的热力学分析法通常包括基于第一热力学定律的热量法和基于第二热力学定律的㶲分析法。与热量法相比，㶲分析法从能量转换的角度分析设备或热力系统的完善性，兼顾了能量的“数量”和“品质”，更具科学性。工程上，通常用㶲损、㶲损率和㶲效率来分析评价设备或热力系统[7]。

（1）㶲损

任何热力系统都是熵增的过程，都会伴随着㶲转化为（火无）的过程，产生㶲损。根据㶲平衡关系，㶲损I可表示为：

（1）

（2）㶲损率

㶲损率表示各部件㶲损占系统总㶲损的比值：

（2）

（3）㶲效率

㶲效率定义为设备或热力系统在能量传递和转换过程中，目的㶲与代价㶲之比，可表示为：

（3）

1. 结果分析

2.1机组热力系统㶲分析

在THA工况下，二次再热机组的㶲效率为45.41%。 将机组热力系统划分锅炉、汽轮机、回热系统和凝汽器四部分，其㶲分析结果如表2所示。

表2 二次再热机组热力系统㶲分析

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 项目 | 㶲损（MW） | 㶲损率（%） |
| 锅炉 | 844.56 | 86.94% |
| 汽轮机 | 79.48 | 8.18% |
| 回热系统 | 24.59 | 2.53% |
| 凝汽器 | 22.80 | 2.34% |

由上表可知，在THA工况下，锅炉㶲损失占整个热力系统㶲损失比重最大为86.94%，而汽轮机、凝汽器和回热系统的㶲损率分别为8.18%、2.53%和2.34%，远小于锅炉㶲损。在锅炉内部，燃料燃烧的不可逆性和工质间换热温差过大是造成锅炉㶲损的主要原因，此外燃料不完全燃烧。炉体扇热，排烟损失也会造成锅炉㶲损失。汽轮机的㶲损主要来源于喷嘴损失、余速损失、漏汽损失和余速损失等。对于回热系统和凝汽器而言，换热过程的传热温差是造成㶲损的主要原因。

2.2 锅炉㶲分析

锅炉㶲效率定义为锅炉有效利用㶲与燃料㶲的比值，可表示为： (4)

式中，-锅炉给水㶲；

-主蒸汽㶲；

-一次再热器入口㶲；

-一次再热器出口㶲；

-二次再热器入口㶲；

-二次再热器出口㶲；

-燃料㶲。

在THA工况下，二次再热机组锅炉的㶲效率为58.11%，其内部㶲分析结果如图2所示：

图2 锅炉㶲分布

由上图可知，锅炉内部被有效利用的㶲的比例为58.11%。在锅炉各项㶲损失中，燃烧㶲损失和传热㶲损失比例最大，辅助设备㶲损失和排烟㶲损失所占比例相对较小。通常燃烧㶲损失主要是因为燃烧过程的不可逆性，也和燃料的不完全燃烧、散热及灰渣等损失相关，可以通过增加空气预热器面积提高二次风温度、进行富氧燃烧等方法降低燃烧过程㶲损。

表3 锅炉主要受热面㶲分析结果

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 项目 | 㶲损（MW） | 㶲效率（%） |
| 水冷壁 | 361..48 | 60.08 |
| 低温过热器 | 36.87 | 77.88 |
| 一次高温过热器冷段 | 13.35 | 80.36 |
| 二次高温过热器冷段 | 5.78 | 82.95 |
| 高温过热器 | 25.32 | 85.12 |
| 一次高温再热器热段 | 8.68 | 87.64 |
| 二次高温再热器热段 | 3.57 | 91.22 |
| 一次低温再热器 | 11.72 | 89.43 |
| 二次低温再热器 | 7.30 | 91.64 |
| 省煤器 | 9.02 | 89.08 |
| 空气预热器 | 27.17 | 77.16 |

表3为锅炉内部主要受热面的㶲分析结果。可以看出水冷壁、低温过热器和空气预热器的㶲效率最低，分别为60.08%、77.88%和77.16%，其余受热面的㶲效率均在80%以上。这主要与受热面工质所处温度和换热温差相关。为进一步对比分析锅炉受热面的㶲效率，可将其定义式表示为[8]：

（5）

其中和分别表示冷、热流体的平均温度，为冷热流体算术平均温差。

由式（5）可知，换热器的㶲效率由冷流体的平均温度和算术平均温差决定。由图3可知，于水冷壁所和低温过热器处区域烟气与工质传热温差过大，超过1000℃，从而使得其㶲效率远小于其他受热面。对于空气预热器而言，其传热温差为为77℃，小于其他受热面传热温差，但空气预热器内工质温度仅为176.5℃，远远低于其他受热面工质的平均温度，导致其㶲效率处于较低水平。



图3 锅炉受热面㶲分析

2.3 汽轮机㶲分析

汽轮机的㶲效率为输出机械功率与锅炉提供的蒸汽㶲之比，可表示为

(6)

在THA工况下，该机组汽轮机㶲效率为83.49%，远高于锅炉㶲效率。

2.3.1汽轮机级组㶲分析

汽轮机级组的㶲平衡方程为：

(7)

㶲效率： (8)

式中-级组进口㶲；

-级组出口㶲；

-级组抽汽口㶲；

-级组输出功率；

-级组㶲损。

图4为THA工况下汽轮机级组㶲分析结果。由图可知，除末级级组效率为80.95%外，其余各级级组效率均高于90%；汽轮机末级级组㶲损为16.05MW，远大于其他级组㶲损，而导致汽轮机末级㶲损较大的主要原因是末级的叶顶漏气损失、湿汽损失和余速损失。



图4 汽轮机级组㶲分析

2.3.2 汽轮机回热系统㶲分析

汽轮机回热系统㶲平衡方程为：

(9)

㶲效率： (10)

式中-第j级加热器的进口蒸汽㶲；

-第j级加热器进口疏水㶲；

-第j级加热器进口给水㶲；

-第j级加热器出口给水㶲；

-第j级加热器出口疏水㶲；

-第j级加热器㶲损。

由图5汽轮机回热系统㶲分析结果可知，回热加热器的㶲效率在给水流动方向上总体呈上升趋势；高压加热器的㶲效率高于低压加热器；高压加热器的㶲效率均在90%以上，低压加热器的㶲效率在70%到90%之间。这主要是由于与低压加热器相比高压加热器端差小、传热效果好，能够提高吸热过程的平均温度降低换热温差，从而提高㶲效率；另一方面，由式（5）可知，高压加热器在换热过程工质所处温度区间要高于低压加热器，这也使得其㶲效率高于低压加热器。



图4 汽轮机回热系统㶲分析

1. 结束语

本文基于热力学第二定律㶲分析法，对二次再热机组及其主要部件进行了研究，得出以下结论：

（1）二次再热机组㶲效率为45.41%，其中锅炉㶲效率为58.11%，汽轮机㶲效率为83.49%；二次再热机组各组件㶲损失由大到小依次为锅炉、汽轮机、回热系统和凝汽器，所占比例分别为86.94%，8.187%，2.53%和2.34%。

（2）在锅炉各主要受热面中，水冷壁、低温过热器和空气预热器㶲效率最低，分别为60.08%，77.88%和77.16%。其中水冷壁和低温过热器㶲效率低是因为换热温差过大，而空气预热器㶲效率则是因为被加热空气平均温度过低。

（3）汽轮机末级级组㶲效率最低为80.95%，其余各级组㶲效率均高于90%。末级级组由于工作环境差，存在湿汽损失、余速损失等不利因素，因而㶲效率低于其余级组。

（4）回热系统高压加热器㶲效率高于低压加热器，一方面是因为高压加热器传热效果好、端差小，导致换热温差小；另一方面是因为高压加热器的给水温度较高。

参考文献：

1. 徐俊，刘启明，白英民，宋风强. 1000MW超超临界燃煤机组二次再热技术现状及其市场前景分析[J]．东方电气评论，2015，29（03）：85-88.

XU Jun，LIU Qiming，BAI Yingming，SONG Feng qiang．Market-prospect Analysis and Development Status of 1000 MW High-capacity Ultra-supercritical Coal-fired Unit with Double reheat cycles[J]．Dongfang Electric Review，2015，29（3）：83-85.

1. Zhao ZG，Su S， Si NN， et al. Exergy analysis of the turbine system in a 1000MW double reheat ultra-supercritical power plant. Energy 2017; 119:540-548.
2. 赵永明，阎维平，刘立衡. 超超临界二次再热机组设计参数影响分析[J]. 汽轮机技术，2013，55（6）：458-464.
3. 陆万鹏，孙奉仲，史月涛. 电站锅炉排烟余热能级提升系统㶲分析[J]. 中国电机工程学报，2012，32（23）：9-14.
4. 赵晓军。 超超临界二次再热机组热力系统经济性分析[D]．东南大学，2016.
5. 刘翔，方曹明，范浩杰，高昊天，张忠孝. 二次再热超超临界机组㶲分析[J]. 锅炉技术，2016，47（3）：1-5+30.

LIU Xiang，FANG Caoming，FAN Haojie，GAO Haotian，ZHANG Zhong，et al．Exergy analysis on Ultra Supercritical Power Unit with Double Reheat [J]．Boiler Technology，2016，5（3）：1-5+30.

1. 高昊天．二次再热超超临界机组㶲分析[D]． 上海，上海交通大学，2015.
2. Yang YP，Wang LG，Dong CQ，et al. Comprehensive Exergy-based Evaluation and Parametric Study of a Coal-fired Ultra-supercritical Power Plant. Applied Energy 2013; 112: 1087-1099.

作者简介：

赵家毅（1992），男，湖北襄阳人。在读硕士研究生，研究方向为火电厂热力性能仿真。

李千军（1974），男，湖北天门人。高级工程师，工学硕士，从事火电厂节能等方面研究工作。

杨涛（1978），男，湖北襄阳人。副教授，工学博士，主要研究方向为旋转机械状态检测和故障诊断、热能工程建模与仿真。