

# 凝汽机组低品位化供热改造及其应用前景

周少祥<sup>1</sup>, 胡三高<sup>1</sup>, 齐革军<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学 动力系, 北京 102206; 2. 包头第二热电厂, 内蒙古 包头 014030)

**摘 要:** 简要分析了供热过程的最低理论燃料单耗问题, 详细论述了常规自然对流散热器所决定的采暖供热温度匹配问题及其对策。并依据基于电量的统一性能评价方法, 分析计算了凝汽机组低品位化供热改造的性能指标, 以及配合高效末端散热器, 适应用户末端散热器温度匹配能够取得的节能效果, 并从总能系统的角度进行了阐述。还对这种改造的特点及其应用进行了分析。

**关键词:** 热电联产; 供热改造; 低品位化

中图分类号: TK16 文献标识码: B

## 1 供热过程的最低理论燃料单耗问题

当燃料热量 100% 地转化为电功时, 每生产 1 kWh 电功所消耗的燃料最小。以标准煤核算, 发电理论最低燃料单耗为 123 g/(kWh)。

从理论上讲, 供热过程是没有最低理论燃料单耗的, 这是因为卡诺循环热泵的性能系数为:

$$COP = \frac{Q_h}{W_h} = \frac{T_h}{T_h - T_{en}} \quad (1)$$

随着分母 ( $T_h - T_{en}$ ) 减小, COP 值迅速增大。当  $T_h \rightarrow T_{en}$  时, COP 值趋于  $\infty$ , 即输入的能源  $W_h$  可以趋于零, 或供热最低理论燃料单耗可以趋于零。因此供热过程的节能潜力巨大, 关键在于节能技术的合理利用。

## 2 供热温度匹配问题及其对策

国家标准规定, 居民冬季采暖的室内温度不低于 16 °C, 设计温度 18 ~ 20 °C。由于采用自然对流散热器, 其设计供热介质温度为 90 °C, 低负荷时可低至 70 °C, 高负荷时高达 120 °C, 甚至更高。通常, 大多数加热器的传热端差设计在 10 °C 以内, 作为暖通空调系统常用设备的风机盘管类高效散热器, 其传热端差通常在 5 °C 以内。如果室内采用这种高效散热器, 设室内空气进出风机盘管的温升为 5 °C, 散热器出口传热温差 5 °C, 供热介质进出风机盘管的

温降为 15 °C, 则供热热源温度只要高于 43 ~ 45 °C 即可以满足供热需要。显然, 对于采暖温度需要, 供热介质高于 70 °C 就不属于合适的温度匹配。因此, 传统的用户末端散热器具有很大的节能潜力。但问题的关键不在于是否是低品位供热, 而在于低品位热源从何而来。

如果使凝汽机组低真空运行, 让循环水出口温度维持在约 45 °C 的水平, 并直接供应热用户, 用户末端采用风机盘管高效散热器。则可以提高改造的节能效果, 而且对凝汽机组冬夏两季的安全运行没有任何不利的影响。

凝汽机组低真空运行、循环水供热在近年来不断被专家学者提出, 并被一些电厂采用。但由于用户末端仍采用传统的自然对流散热器, 循环水温度较高, 一来节能效果有限, 二来可能诱发机组振动, 对其安全运行产生不利影响。更重要的是, 对低品位化供热的温度匹配关系及其节能效果的分析不够充分, 而这正是本文研究的重点。

## 3 典型凝汽机组热电联产低品位供热改造

包头第二热电厂 3 号机为哈汽 51-50-1 型凝汽机组, 额定出力 50 MW, 进汽温度 500 °C, 进汽压力 8.88 MPa。20 世纪 70 年代对该机进行了调速汽门及通流部分打孔抽汽改造, 使机组长期在非经济工况运行。如汽耗率, 设计值在 50 MW 时为 4.09 kg/(kWh), 改造后则增大到 4.39 kg/(kWh), 供电煤耗率由 425.4 g/(kWh) 增大到 456.6 g/(kWh), 机组厂用电率约 8.8%。电厂供电成本约为 0.12 元/(kWh)。

为满足市区采暖供热需求, 1985 年将 3 号机改为低真空运行, 利用循环水供热。并进行了热力性能试验, 结果如表 1 所示。实际工程中采用工况 5 的低真空运行工况, 循环水直接供往热用户, 用户末

端采用传统的自然对流散热器。

为了客观分析凝汽机组低品位化供热改造的节能效果,本文采用基于电量的统一性能评价方法计算<sup>[1-3]</sup>,该方法简单实用,所得结果能客观反映能源利用过程的本质,可以应用于同一用能目的、不同用能方式的能源利用系统之间的热力性能比较和评价,具体细节参见文献[2]。

表 1 3 号机组低真空试验有关数据

	试验工况点					
	1	2	3	4	5	6
发电功率/MW	47.5	46.75	40.33	38.67	37.39	36.17
主汽流量/ $t \cdot h^{-1}$	217.528	225.052	213.402	217.1	221.787	220.087
压力/MPa	8.88	9.08	9.00	9.01	9.01	9.04
温度/ $^{\circ}C$	497.5	494.5	497	499.5	496.8	495.7
排汽压力/MPa	0.007 21	0.011 4	0.024 9	0.035 0	0.047 5	0.055 8
温度/ $^{\circ}C$	43.5	51.45	65.4	72.9	79.85	83.55
流量/ $t \cdot h^{-1}$	168.733	178.314	164.454	169.694	175.069	172.357
循环水量/ $t \cdot h^{-1}$	12 225.8	6 210.1	2 862.7	2 749.3	2 097.1	1 916.6
入口温度/ $^{\circ}C$	28.5	28.5	28.5	28.75	29.5	29.5
出口温度/ $^{\circ}C$	36.25	44.5	60.05	65	74.7	78.05
供热量/ $GJ \cdot h^{-1}$	—	416.0	378.1	387.3	396.9	389.6

## 4 凝汽机组低品位化供热及其经济性分析

根据上述分析,如果采用风机盘管类强制对流换热的高效散热器,则在工况 2 的运行条件下,供水温度达到  $44.5^{\circ}C$  基本满足供热要求。

本文计算了试验工况 2→5 的各热力性能指标,结果如图 1 所示。随着机组真空度的提高(排汽压力降低),机组供热的当量性能系数  $ECOP$  和供热效率指数  $\eta_h$  迅速提高,供热煤耗率和供热成本迅速降低。

根据计算,工况 2 的机组排汽压力为 11.4 kPa,其供热当量性能系数  $ECOP$  高达 48.3,相应的供热煤耗率  $b_h$  只有  $2.63 \text{ kg/GJ}$ ,供热效率指数  $\eta_h$  高达 1 298.6%,可取得显著的节能效果。供热成本约  $0.69 \text{ 元/GJ}$ ,而且供热减少的机组出力很小,因此其供热、供电经济效益显著<sup>[3]</sup>。

按每平方米建筑面积的采暖指标 60

W 计算,循环水供热量  $416 \text{ GJ/h}$ ,考虑 2% 的管网系统散热损失,可满足  $188.7 \text{ 万 m}^2$  建筑面积的供热需求。此时,热网泵功约  $2 170 \text{ kW}$ ,风机盘管电耗约每  $20 \text{ m}^2$  建筑面积  $15 \text{ W}$ ,需增加电耗  $1 444 \text{ kW}$ ,实际到达用户处的供热当量性能系数  $ECOP=19.24$ ,相应的供热煤耗率  $b_h=6.59 \text{ kg/GJ}$ ,供热效率指数  $\eta_h=517.5\%$ ,供热成本为  $C_h=1.73 \text{ 元/GJ}$ ,远低于传统供热方式,包括传统的热电联产供热方式。

因此,结合凝汽机组热电联产低品位化供热改造,采用高效散热器,强化用户终端的换热效率,可以降低供热煤耗率,同时机组发电量微减少,供电收益非常好,从总能系统角度提高能源利用率最有效的措施。无论对于电厂还是热用户都是一种双赢的改造方案。

实际工程中采用工况 5 的低真空运行工况,其供热  $ECOP$  仍高达 10.18,相应供热煤耗率  $b_h=12.44 \text{ kg/GJ}$ ,供热效率指数  $\eta_h=274\%$ ,供热成本  $C_h=3.27 \text{ 元/GJ}$ 。其供热性能也优于其它常规的热电联产方式,供热收益十分显著。

## 5 凝汽机组低品位化供热改造的主要特点及应用

(1) 凝汽机组低品位化供热改造在很大程度上解决了用户末端散热器温度不匹配的问题,可大幅

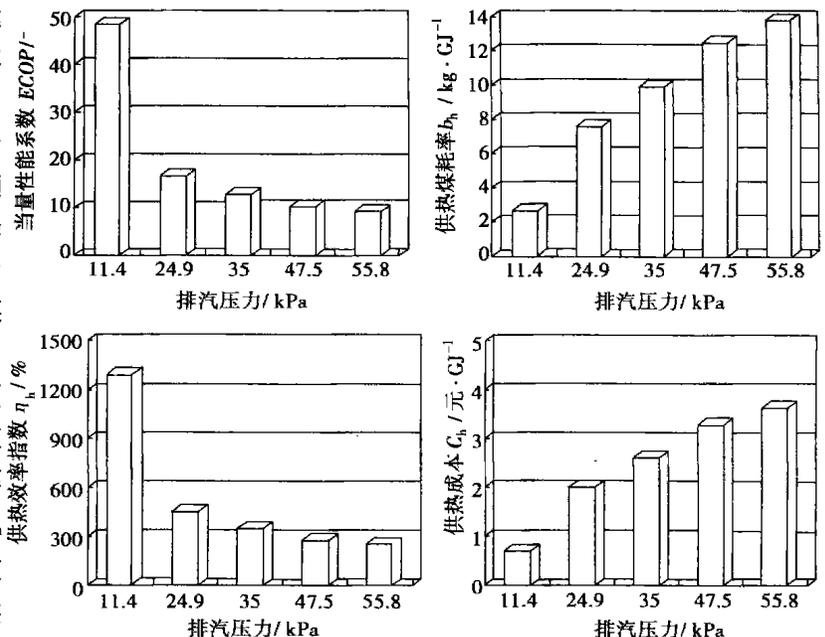


图 1 机组排汽压力对供热性能的影响

度降低供热能耗。

(2) 凝汽机组无需做实质性改造, 仅改造循环水系统, 改造费用低。

(3) 冬季以低品位化供热方式运行, 夏季以纯凝汽工况运行, 对机组热力性能几乎没有影响。

(4) 供热参数的降低, 管网系统与环境之间的温差及其散热损失将大幅度降低, 因此相应的保温要求和保温费用可以降低。

(5) 可以将风机盘管设计为冬夏两用, 即冬季采暖和夏季制冷, 所需的投资比常规的自然对流散热器要大一些。但较传统的供热及制冷两套散热器系统, 可以减小基建投资, 提高设备利用率。

(6) 便于用户处的热负荷调节, 以及供热计费的实施。

(7) 不利情况是风机盘管运行有一定的噪音, 室内风速对舒适感有一定影响。

根据上述特点, 凝汽机组低品位化供热改造可用于我国长江流域以北的大部分地区。尤其是长江流域, 冬季寒冷, 夏季炎热, 许多家庭已安装了空调器, 使夏季电网调峰负荷大幅度增大, 很适合采用这种改造方式。尤其是随着天然气使用量的增加, 可以采用燃气蒸汽联合循环机组作为调峰电源, 适应该地区峰谷差增大的需要, 冬季时采用低品位化供热方式运行, 解决居民取暖问题, 改善居住条件。而

且随着我国城镇化工作的进一步实施和人民生活水平的不断提高, 这种能源供应方案应具有良好的市场前景。

## 6 结束语

凝汽机组低品位化供热改造, 配合风机盘管高效散热器, 可以在很大程度上解决传统供热系统用户末端散热器的温度匹配问题, 又能最大限度地降低对凝汽机组供电量的影响, 从总能系统的角度, 可以大幅度提高能源利用效率。由于改造幅度小, 适应性强, 因此低品位化供热具有很大的应用前景, 应引起有关部门的重视。

## 参考文献:

- [1] ZHOU SHAOXIANG, HU SANGAO, LIANG SHUANGYIN, The Critical Heat-Power Ratio of CHP Plant[A]. edited by S R Penfield Jr. Proceedings of the 1999 International Joint Power Generation Conference[C]. Burlingame California USA: ASME, 1999, 505—510.
- [2] 周少祥, 胡三高. 总能系统与能源利用的统一性性能评价指标体系[J]. 动力工程, 2000 21(1): 1069—1077.
- [3] 宋之平, 张光, 周少祥. 新模式热电联产系统: 联产供热的一个发展[J]. 工程热物理学报, 1997, 18(5): 536—539.

(渠 源 编辑)

## Aquila 船舶燃气轮机过滤器

据《Diesel & Gas Turbine Worldwide》2003 年 3 月号报道, 英国空气过滤和噪声控制专业公司—Altair Filter Technology 宣布用于燃气轮机进气过滤系统的改进方案。Aquila 过滤器系统是 Altair 于 20 世纪 90 年代中期用于海上环境工作的燃气轮机空气进气过滤系统。与传统过滤系统比较, 它的尺寸很小。

最近的改进对 Hydra 叶片分离器技术作了主要的修改, 使过滤器更小和更轻, 保留原设计高性能。现在可以提供由船用等级铝和不锈钢制造的超紧凑设计的 Hydra 分离器。

在海洋环境中工作的燃气轮机, 承受大量降水、空气载粒子和悬浮盐粒的侵蚀。为了保护发动机清除这些污染物, Aquila 系统使用惯性分离级和高效过滤器的联合配置(精确的级数取决于具体的应用和环境)。

典型的系统包含 4 个主要级。第一级是 Hydra 或 Hydra+ 分离器, 两者可以清除降水、水雾和海上悬浮的盐粒。第二级是 PFA 前置过滤器(可供选择的级), 推荐用于高尘环境。第三级是 HEA 或 HXA 高效率过滤器, 用来清除干的粒子(如灰尘和盐晶粒)。第四级是 Hydra 或 Hydra+ 分离器, 用来保证捕获并清除进气中任何水或海水。

意大利燃气轮机承包商已为总计 12 台 GE LM2500 燃气轮机的进气过滤系统提供总承服务。其中 4 套系统将用于意大利海军新的 Andrea Doria 航空母舰。其余系统将用于 4 艘(地平线)级防空护卫舰。

(吉桂明)

North China University, Baoding, China, Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(2). — 198 ~ 201

In a power plant it is rather difficult to judge whether a ball mill is operating near its optimal load point. Based on the analysis of parameters which can reflect mill load conditions, the authors have come up with a method for judging the operating condition of ball mills by using data merging techniques. In accordance with ball mill design data and historical operating ones presented is a credibility distribution for judging the mill running condition as contributed by each parameter. Then, by using D-S evidence theory the credibility distribution undergoes a data merging process, resulting in a comprehensive evaluation of each parameter. To cope with the deficiency of immutability of the credibility distribution of the D-S evidence theory an improved principle is put forward. Practical operation indicates that the new approach based on the data-merging technology features a high reliability and ease of implementation. **Key words:** ball mill, data merging, D-S evidence theory, load

300 MW 机组引风机振动在线监测系统研究 = **A Study of an On-line Monitoring System of Induced-draft Fan Vibrations for a 300MW Power Plant** [刊, 汉] / XIAO Han-cai, WANG Yun-min (College of Energy and Power Engineering under the Changsha Electric Power Institute, Changsha, China, Post Code: 410077), HU Rong-jin (Xinya Science and Technology Co. Ltd., Chengdu, China, Post Code: 610051), ZHAO Shi-chang (Hunan Shimen Power Plant, Shimen, China, Post Code: 415300), ZHANG Guo-zhong (Hunan Electric Power Testing Research Institute, Changsha, China, Post Code: 410007) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(2). — 202 ~ 205

To eliminate the frequent failures of induced-draft fans installed at Shimen Power Plant due to serious vibrations an on-line vibration monitoring system has been developed for the above fans. A brief account is given of the composition, working principles, characteristic features and technical indexes of the monitoring system. The excellent results obtained from the use of the system are given. In addition, it is also noted there is a real necessity of installing an on-line vibration monitoring system for the main machines and auxiliaries of large-sized power generation plants. **Key words:** axial flow fan, vibration, sensor, monitoring system

凝汽机组低品位化供热改造及其应用前景 = **Reconstruction of a Condensing Turbine Unit for Low-grade Heat Supply and Potential Application Prospects** [刊, 汉] / ZHOU Shao-Xiang, HU San-gao (Power Engineering Department, North China Electric Power University, Beijing, China, Post Code: 102206), Qi Ge-jun (Baotou No.2 Thermal Power Plant, Baotou, China, Post Code: 014030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(2). — 206 ~ 208

A brief analysis is conducted of the issue of minimum theoretical specific fuel consumption. Discussed in detail are the issue of the heating and heat supply temperature matching as required by a conventional natural convection radiator and the countermeasures being taken to resolve the issue. Moreover, on the basis of a unified performance evaluation of electrical supply load the performance indexes of the condensing turbine to be reconstructed for low-grade heat supply are analyzed and calculated. Also expounded is the energy-saving effectiveness derived from the temperature matching of a high-efficiency last-stage radiator with the last-stage radiator of the heat end-user. Finally, an exposition from the viewpoint of a total energy system is given and the specific features and implementation of this reconstruction work are analyzed. **Key words:** cogeneration of electric power and process steam, reconstruction for low-grade heat supply, low-grade heat supply