

热电联产工程 E 级燃机入口空气冷却可行性分析

周 军

(江苏华电仪征热电有限公司,江苏仪征 211400)

摘 要:针对江苏华电仪征燃机热电联产工程 E 级燃机,比较分析了多种燃机入口空气冷却技术的特点,并参照同类燃机的应用情况,在此基础上建议该工程采用喷雾蒸发冷却方法来冷却燃机入口空气,同时给出了这种空气冷却技术应用的经济性数据。

关键词:E 级燃机;入口空气冷却技术;喷雾蒸发冷却

中图分类号:TK471

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2012)05-0076-03

燃机入口空气冷却技术是在高温气候环境下,通过降低入口空气温度,提高单位时间燃机吸入空气质量流量,增加燃机出力,减小压气机出力,提高燃机效率,达到提高经济性的目的。各种燃机入口空气冷却技术具有不同的适应性和优缺点,应根据当地气候条件和机组运行特点选择适当的燃机入口空气冷却技术,可达到增加出力、提高效率的目的,否则造成投资浪费。文中结合国内外的燃机入口空气冷却技术发展与应用情况,对江苏华电仪征 3×200 MW 级燃机热电联产工程采用适用的燃机入口空气冷却技术进行探讨。

1 工程概况

江苏华电仪征热电联产工程建设规模为 3×200 MW 级燃机联合循环热电联产机组,采用 3 台燃机+3 台余热锅炉+3 台抽凝机的单元制主机配置,留有扩建相同容量机组余地。

根据主机招标结果,燃气轮机采用上海电气集团引进 Siemens 技术生产的 SGT5-2000E (V94.2) 型燃机,余热锅炉为东方日立锅炉有限公司生产的双压、无补燃、卧式、自然循环、露天布置余热锅炉,汽机为上海电气集团的 80 MW 等级供热双抽凝汽式汽轮机。燃机、汽机的发电机均由上海电气集团配套。该工程 SGT5-2000E (V94.2) 型燃机保证工况下输出功率 165.903 MW,热耗 10 440 kJ/kW·h,燃料为“西气东输”天然气,年利用小时数 5 500 h。

2 燃机入口空气冷却技术

2.1 技术原理

燃气轮机工作的热力学原理^[1]是勃雷登循环,循环过程如图 1 所示。面积 1234 就是 1 kg 空气在燃机中完成一次循环后输出的功,即通常所说的比功或出力。显然面积越大,意味着比功或出力越大。

要想增加面积,一种方法是提高燃气初温(T_3),另一种方法是降低燃机的进气温度(T_1)。

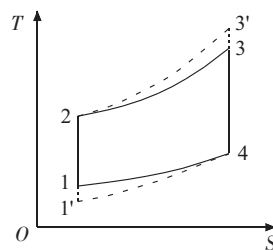


图 1 勃雷登循环温熵曲线

经理论分析发现, T_3 和 T_1 的影响关系可以用温度比 τ 来表示,即 $\tau=T_3/T_1$ 。 τ 增大,机组的比功和热效率都能提高,且只要 τ 相同,机组的热效率相同。但是 T_3 升高 1 K 和 T_1 每下降 1 K 对于机组热效率和出力的影响程度却不同。经计算, T_1 每变化 1 K 对机组热效率和出力的影响程度比 T_3 每变化 1 K 时大得多(约为 4 倍)。

采用提高 T_3 的方法通常适用于燃机制造商,受当前材料科学和机械加工技术的限制,燃机 T_3 的极限大约在 1 704 °C,在合理的成本控制下,目前燃机制造技术已接近这个极限(如 9E 燃机的燃烧温度达到 1 124 °C,9FA 燃机的燃烧温度达到 1 327 °C)。而采用降低进气温度的方法则适用于燃机用户,这种方法对技术要求相对较低,实施难度和成本不高,可行性大,收益明显。

根据理想状态下热力学公式计算可知,E 级燃机从进气温度 T_1 (35 °C,308 K)降低到 T_1' (15 °C,288 K),同等质量流量工质可多做功约 4.5%。在环境温度为 35 °C(308K)时,空气密度约为 1.147 22 kg/m³,在环境温度为 15 °C(288 K)时,空气密度为 1.226 89 kg/m³。说明在单位时间内多吸入了约 6.94 %的工质进入燃机,在多投入相应的燃料燃烧后可使燃机的总出力提升 6.5 %左右。

综合以上两方面因素,将降低进气温度对燃机总出力的影响和对有用功输出的影响叠加,对于E级燃机来说,夏季将 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的空气冷却至 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$,理论上在燃机简单循环中可增加燃机出力 11% 左右。

以上计算中忽略了空气湿度、不同燃机厂家性能曲线差异等次要因素影响,仅为简化定性计算。同时未考虑由于降低入口空气温度后会造燃机排气温度降低,影响联合循环机组中的余热锅炉出力,附带降低了蒸汽轮机出力的因素。且燃机冷却技术也同时需消耗一定能源,对收益有一定影响。

2.2 技术类型

国外上世纪90年代初开始在工程实践中应用燃气轮机入口空气冷却技术,目前主要的技术手段有直接接触和间接接触两大型式。

2.2.1 直接接触式

直接接触式采用在表面介质上淋水或喷雾等方式,通过水的蒸发吸收汽化潜热降低空气温度。

直接接触式蒸发冷却的优点是系统简单,入口空气流阻增加小,一次投资和运行维护费用低。且在满足喷雾后风道长度的前提下,可对燃机风道进行改造。表面介质上淋水(水膜蒸发)方式较喷雾方式入口空气风道流阻增加大,水蒸发效率低,但不会有未蒸发液滴和杂质带入压气机,较为安全。其缺点是受环境相对湿度影响大,冷度低,冷却后的进气温度仅能逼近但永不能达到环境湿球温度。如采用喷雾方式对水质要求高,需防止水中杂质对压气机叶片腐蚀。同时需尽量减小雾滴直径和控制喷水量,减少蒸发时间,避免液滴对压气机叶片损伤。该方式最适用于在高温干燥地区使用,对常年相对湿度 75% 以上地区的使用效率较低。

也有观点认为在控制条件下的过喷,使部分细微雾滴进入压气机,可在压缩过程中继续降低压缩空气温度,降低的压气机出力可超过因含水量大而增加的压气机能耗,从而实现更大的收益。且过喷可有效降低燃机的 NO_x 排放,根据国外厂家提供的数据,目前已可以实现降低 50% 的 NO_x 排放水平^[2]。

2.2.2 间接接触式

间接接触式利用既有冷源(如液化天然气气化或地下深井水)或溴化锂机组废热制冷、冰蓄冷等技术,通过在入口风道内的换热器冷却空气。

间接接触式(表面冷却)外部系统复杂,占地、一次投资、运行维护费用均较大,同时必须在入口风道内设置换热器,造成入口空气流阻增加较大。但是由于不受环境湿球温度影响,可以实现较大的冷度,只要冷源有足够的制冷能力、换热器鳍片管有足够的传热能力,就可以将进气冷却到最佳进气

温度,在湿度较大地区也可以应用。如果已具有冷源或废热,可以利用该能源实现厂内冷热源平衡,达到节能目的。

根据对间接接触式空气冷却技术应用的研究,也有观点认为,如环境空气湿度较高,风道中的接触式换热器工作温度低于空气露点温度,换热器表面将大量结露。换热器的冷能将主要消耗在凝结水的汽化潜热中,而不能有效降低空气温度,换热器表面凝结的水膜增加了热阻,也严重影响换热效率。而环境温度较低或系统设计不当时,换热器工作温度甚至低于冰点,换热器表面结冰,造成更多的问题。所以间接接触式空气冷却技术的应用实际也是受到环境因素的限制,需综合考虑各方面因素^[3,4]。

3 该工程燃机入口空气冷却技术的选择

3.1 利用膨胀机冷源表面冷却入口空气技术

采用二级换热器和循环泵,以水或乙二醇作为中间工质,可较易实现利用膨胀机冷源表面冷却入口空气(如图2所示)。如果因满足燃机入口要求的天然气最终温度较高,可将中间换热工质循环泵改用热泵代替。对于天然气是利用空气热源热泵制暖机组加热,对于燃机入口空气是利用天然气冷源热泵制冷机组冷却,从而实现了厂内冷热源综合利用。但该方案循环泵/热泵需消耗电能,同时需准确核算两侧冷热源是否能够平衡,否则需要增设其他冷热源。

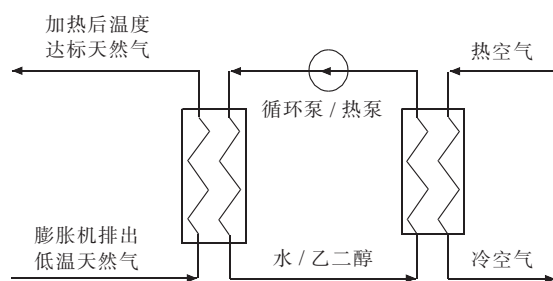


图2 利用膨胀机冷源表面冷却入口空气系统

华电仪征燃机项目的天然气来源若直接将 6 MPa 天然气在厂内利用膨胀机技术减压至 3 MPa ,根据目前一期3台上海电气Siemens V94.2燃机的燃料消耗量,在夏季全厂约产生 $2\ 000\text{ kW}$ (最大)的冷源。而根据该型燃机的空气进气量计算,每降低进气温度 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,约需 $1\ 550\text{ kW}$ 冷源。考虑到换热效率,实际天然气膨胀机产生的冷源仅能降低入口空气 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。该温差推算出的理论增加出力与因在入口风道处增设换热器后增加阻力减少的出力和热泵消耗能源相比基本持平,所以采用表面冷却技术利用该冷源冷却入口空气经济上不可行。

3.2 喷雾蒸发冷却入口空气技术

美国 Mee Industries Inc 公司是喷雾蒸发冷却技术的代表,其 MeeFog 燃机入口空气喷雾蒸发冷却系统已在浙江镇海燃机电厂 GE 公司 9E 机组等项目中应用。经过对其用户的走访,在江浙地区的夏季气候条件下,确实可以有效增加燃机的有效出力。

喷雾蒸发冷却入口空气的布置如图 3 所示。该技术原理简单,立足于除盐水微粒在进气道中自然蒸发时吸收的气化潜热有效降低燃机入口空气温度,从而提高进气质量流量,减少压气机出力,提高机组出力,降低热耗。整个系统仅增加喷雾泵组和雾化喷嘴 2 个模块,占地小,对原有燃机进气道无特殊要求,对外部仅要求提供电源和除盐水,无论对新建项目还是建成燃机项目改造均十分方便。系统由自带的温湿度测定系统自动控制,设定适当启停参数后完全自动化运行,无易损件,不需要增加额外的运行、检修人员。

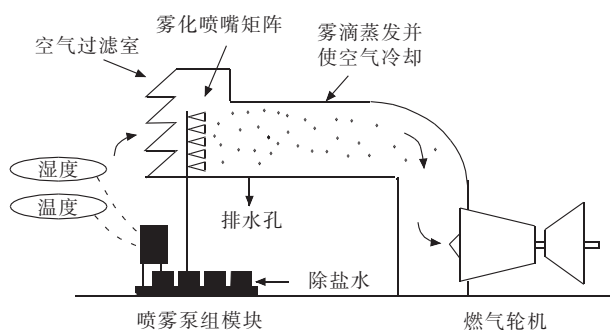


图 3 喷雾蒸发冷却入口空气的原则性布置

该技术的核心是雾化喷嘴和喷水量自动控制系统。该雾化喷嘴可产生平均直径 $10\ \mu\text{m}$ 的雾化液滴(直径大于 $18\ \mu\text{m}$ 雾滴 $<10\%$),在入口风道中 2 s 内可全部蒸发。喷嘴安装在入口风道内的高压除盐水不锈钢管道矩阵中,并采取一定措施防止喷嘴脱落和反作用力对管网造成的影响。根据用户实际条件,高压除盐水不锈钢管道矩阵分成若干组,分别与 2 种规格的高压陶瓷柱塞泵组配合,由控制系统根据气象条件和预设值自动控制喷水量。高压陶瓷柱塞泵组、除盐水过滤系统、控制箱、气象站等厂家按组装好的模块供货,占地尺寸约为 $3\ \text{m}\times 3\ \text{m}$,室外布置,运行中自动控制。控制系统留有与 DCS 接口,可上传有关运行数据^[2]。

根据浙江镇海燃机电厂 GE 公司 9E 机组 2008 年 8 月 20 日的实际运行数据,在环境温度 $36\ ^\circ\text{C}$,相对湿度 65% 的外部条件下,投入该系统后将燃机入口温度降低 $6\ ^\circ\text{C}$ 至 $30\ ^\circ\text{C}$,此时燃机出力由 $92.5\ \text{MW}$ 增至 $97.3\ \text{MW}$,出力提高约 5.2% ,热耗降低约 1% ^[5]。

根据上海发电设备成套设计研究院对浙江镇海燃机电厂 GE 公司 9E 机组空气喷雾冷却系统性能对比试验报告(实验日期 2007 年 8 月 6 日),在环境温度 $33.6\ ^\circ\text{C}$,相对湿度 48.7% 的外部条件下,喷水量 $4.1\ \text{m}^3/\text{h}$,投入该系统后将燃机入口温度降低至 $26.1\ ^\circ\text{C}$,此时燃机出力由 $92.93\ \text{MW}$ 增至 $97.02\ \text{MW}$,出力提高约 4.4% ,热耗降低约 0.96% ,联合循环总出力增加约 3.69% ,热耗降低约 0.28% ,联合循环效率提高 0.13% 。

在镇海地区气候条件下该系统可整定为在环境温度 $18\ ^\circ\text{C}$ 以上时自动投用,当环境温度降低到 $16\ ^\circ\text{C}$ 时自动切断。控制系统可根据自带的气象站判断相对湿度等,控制喷水量,燃机入口处的空气相对湿度也在系统中设定,一般宜控制在 95% 左右^[6]。

江苏沿江地区的气象条件与浙江镇海地区相近,仪征地处江苏沿江地区,故建议该工程采用喷雾蒸发冷却技术来冷却燃机入口空气,可达到在夏季高温条件下有效提高燃机机组的出力,并降低热耗的目的。

3.3 技术经济分析

以 MeeFog 燃机入口空气喷雾蒸发冷却系统为例,每套设备一次投入成本约为 300 万元,每年用于更换润滑油、密封圈、滤芯等消耗件的维护成本约为 10 万元,除盐水成本按 $6\ \text{元}/\text{m}^3$ 计算,除盐水消耗量暂定 $1\ \text{t}/(\text{h}\cdot^\circ\text{C})$ 温降,泵组平均电耗暂定 $2\ \text{kW}/^\circ\text{C}$ 温降。

该 $3\times 200\ \text{MW}$ 级燃机热电联产工程年利用小时数 $5\ 500\ \text{h}$,在仪征地区的气候条件下折算该入口空气喷雾蒸发冷却系统年度蒸发冷却度时(ECDH)值暂定为 $10\ 000\ \text{h}\cdot^\circ\text{C}$,保守估计入口空气降温 $1\ ^\circ\text{C}$ 平均降低燃机热耗 0.1% ,该项目折算单台燃机年天然气燃料消耗量为 $2.938\times 10^8\ \text{m}^3$ 。根据以上 ECDH 值折算,在全年燃机总发电量不变的情况下,每年可节约天然气燃料约 $40\times 10^4\ \text{m}^3$ 。暂定天然气燃料价格 $2.29\ \text{元}/\text{m}^3$ 计算,每年可节约成本约 59 万元,6 年可收回该系统投资。

4 结束语

理论分析和应用工程实际运行数据都表明,选用合适的燃机入口空气冷却技术确实可以提高燃机在炎热气候下的出力和效率,具有较好的经济性,结合仪征地区的气候特点和该工程供热机组特点,推荐采用喷雾蒸发冷却入口空气技术。

参考文献:

[1] 施明恒,李鹤立.工程热力学[M].南京:东南大学出版社,

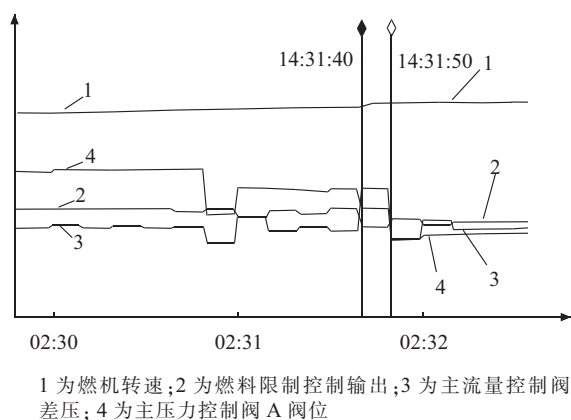


图5 成功点火冲转曲线

为重要,准确快速测量流量控制阀前后差压才能及时调节压力控制阀,使差压值维持恒定,从而保证天然气流量控制阀输出具有良好的线性。相反,在煤

粉炉的炉膛负压控制中,炉膛负压的压力变送器的阻尼系数的设置就显得宽松许多,本身DCS控制器的扫描周期也是数百毫秒级的,与燃机控制几十毫秒级的扫描周期相去甚远,同时为了滤除由于下煤不均、煤质内扰造成的炉膛负压高频噪声,DCS里往往还会适当增加炉膛负压测量值的阻尼时间。

参考文献:

- [1] 吴海滨.M701 F 燃气轮机主控制系统分析[J].燃气轮机技术,2006,19(3):14-18.

作者简介:

张卫庆(1977),男,江苏南通人,工程师,从事热工控制系统调试工作;

沈思贤(1973),男,江苏新沂人,工程师,从事大型火力发电厂运行检修管理工作。

Damping Coefficient Setting of Differential Pressure Transmitter for the Control of Gas Turbine Starting

ZHANG Wei-qin¹, SHEN Si-xian²

(1. Fangtian Power Technology Co. Ltd., Nanjing 211102, China;

2. Operational Department, Jiangsu Branch, Huarun Power Holdings Co.Ltd., Nanjing 210019, China)

Abstract: Focusing on the abnormal issues including unsteady combustion and overlarge speed deviation of the M701DA gas turbine during the first starting procedure, this work firstly introduces the whole analysis process, and then, determines that the unreasonable setting of damping coefficient of the differential pressure transmitter is the main reason for these issues. By using new setting values, it is found that the abnormal issues are effectively avoided.

Key words: M701DA gas turbine; pressure transmitter; damping coefficient; stability

(上接第78页)

1995.

- [2] MEHER-HOMJI C B, MEE T .R. Gas Turbine Power Augmentation by Fogging of Inlet Air [C]. Proceedings of 28th Turbomachinery Symposium, Houston,1999.
- [3] 王松岭,张莉娜,张学镭.燃气轮机进气冷却技术现状及发展趋势[J].电力科学与工程,2009,25(2):37-41.
- [4] 吕太,孙锐,张学荣.燃气轮机冷却技术发展现状及前景分析[J].燃气轮机技术,2004,17(4):18-22.

[5] 韩刚.9E型燃机辅助雾化空气泵启停时间优化[J].上海电力,2006(3):260-262.

[6] 陈扬.采用进气喷雾冷却技术提高9E燃气轮机的出力和热效率[J].浙江电力,2009(3):35-37.

作者简介:

周军(1970),男,江苏扬州人,工程师,从事工程项目技术管理工作。

Feasibility Analysis on Inlet Air Cooling for Grade E Gas Turbine in Combined Heat and Power Plant

ZHOU Jun

(Huadian Yizheng Thermal Power Generation Co.Ltd., Yizheng 211400, China)

Abstract: For the Grade E gas turbine installed in Huadian Yizheng Combined Heat and Power Plant, the features of various types of inlet air cooling technology are analyzed in this paper. According to the performance of different types of cooling technology employed in similar gas turbines, the spray evaporative cooling method is advised for this plant. Besides, the economic performances of this air cooling technology are also proposed in this paper.

Key words: Grade E gas turbine; inlet air cooling technology; spray evaporative cooling