

燃机厂房水喷雾蒸发冷却通风设计浅析

李 唯¹ 王海波¹ 吴国华²

1. 中国石油集团工程设计有限责任公司西南分公司, 四川 成都 610041

2. 中国石油吉林油田公司松原采气厂, 吉林 松原 138000

摘 要:水喷雾蒸发冷却降温技术在干热地区具有明显技术优势,利用干热地区空气湿球温度低的显著特点,在对空气加湿的同时将空气温度降至接近湿球温度,以满足工艺设备的低温要求。以某燃气电站燃机厂房水喷雾蒸发冷却通风设计为实例,分析在干热地区燃机厂房通风系统设计需要注意的问题,提出在干热地区夏季有效降低燃机进气温度、提高燃机效率的方法及适用条件,为燃机厂房及其他厂房设计与建造提供参考。

关键词:干热地区;夏季通风;水喷雾蒸发冷却;设计

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2016.03.019

0 前言

环境温度对燃气发电机组的工作特性有很大影响^[1],机组空气进气温度越高,燃机效率越低。中国西北部分地区新建天然气处理厂由于没有外电,需同步建设自备燃气电站。但由于气候干热,夏季工况时燃机发电效率很低,不得不选配更大一级机组,造成设备投资和能源浪费。如何降低燃机空气进气温度、提高燃机效率是干热地区自备燃气电站亟待解决的问题,本文以某燃气电站燃机厂房水喷雾蒸发冷却通风设计为实例进行了分析。

1 燃气电站基本情况

某燃气电站地处新疆塔里木盆地塔克拉玛干沙漠中心,是某处理厂的自备电站。该电站采用往复式内燃天然气发电机组,燃机型号为 TCG 2032 V 16 型。燃气发动机为四冲程十六缸活塞机,V 型布置,发动机转速 1 000 r/min,压缩比 12:1,机组长 9.43 m,宽 2.68 m,高 4.29 m。发电机组及主要配件由德国公司成套提供,散装进口。燃机厂房长 28.8 m,宽 25.5 m,高 10.5 m,轻钢

结构。电站装机容量 3×4 000 kW,二用一备,标准工况总供电负荷 8 000 kW,现场工况最大供电负荷 7 600 kW,2010 年 9 月投入运行。

2 设计参数

2.1 室外气象参数

塔中地区属典型的温带大陆性气候,冬季严寒,夏季炎热,室外气象参数^[2]见表 1。

表 1 塔中地区室外气象参数

气象参数	数据	气象要素	数据
年平均气温 /℃	10.2	年平均地温 /℃	12.4
最高气温 /℃	45.6	极端最高地温 /℃	72.2
月平均最高温度 /℃	38.3	年平均大气压值 /Pa	89 400
年平均蒸发量 /mm	2 563.8	海拔高度 /m	1 075
最热月平均相对湿度 /(%)	10		

2.2 天然气发电机组设计参数

德国公司提供的数据显示,单台发电机组发动机的

收稿日期:2015-10-29

基金项目:中国石油天然气集团公司工程项目“塔中 I 号气田开发试验区 10×10⁸ m³/a 试采地面建设工程”(S 2007-43 E)

作者简介:李 唯(1969-),男,重庆巴县人,高级工程师,国家注册公用设备工程师(动力),学士,现主要从事油气储运、暖通及热工专业设计及其管理工作。

室内散热量 240 kW, 发电机室内散热量 83 kW, 室内总散热量 323 kW; 单台燃机助燃空气量 20 000 kg/h, 通风量 195 000 kg/h。燃气发电机组的运行方式二用一备, 则机组散发至燃机厂房室内的总热量 646 kW, 总助燃空气量 40 000 kg/h, 总通风量 390 000 kg/h。

基于塔中地区夏季气温高的室外气象条件, 德国公司要求在发电机组正常运行条件下, 夏季极端高温(室外温度 45.6 °C)时燃机厂房室内温度必须低于 54 °C, 冬季极端低温(室外温度 -26.4 °C)时不低于 5 °C; 发电机组停运条件下, 燃机厂房室内温度不低于 0 °C。

2.3 不同工况条件下的燃机出力

无论是透平式燃气轮机还是往复式内燃机, 燃机的现场环境条件对燃机出力影响很大^[3]。为使燃机在高温季节取得增加出力、降低能耗的效果, 国内外燃机厂商或用户采取了多种空气降温办法对燃机进气降温, 取得了不同的使用效果^[4-5]。

燃机的额定出力通常是指在 ISO 工况条件(海拔 0 m, 环境温度 15 °C)下的正常出力。随着燃机海拔和环境温度升高, 燃机出力会显著下降。环境温度的影响主要表现在对燃机进气温度的影响, 即在相同海拔条件下, 燃机进气温度越高, 燃机出力越小。TCG 2032 V 16 型往复式内燃天然气发电机组在不同工况条件下的出力见表 2。

表 2 TCG 2032 V 16 型往复式内燃天然气发电机组在不同工况条件下的出力 kW

工况	ISO 工况(海拔 0 m, 环境温度 15 °C)	现场工况(海拔 1 075 m, 环境温度 ≤35 °C)	现场工况(海拔 1 075 m, 环境温度 45.6 °C)
燃机出力	3 916	3 800	3 490

按照德国公司提出的夏季极端高温工况条件下, 当室内温度达到 54 °C 时, 意味着燃机吸气温度(即环境温度)为 54 °C, 燃机出力将进一步下降。

3 通风系统设计

通风设计的目的是为了确保天然气发电机组及附属设备长期稳定运行, 保证设备最大出力。根据德国公司提供的技术参数及相关要求, 在夏季极端高温工况条件下, 厂房通风量巨大(按照燃机厂房全体积计算, 换气次数达到 46 次/h), 同时单台发电机组出力也会大大降低。燃机厂房 54 °C 的室内温度既不符合工业企业卫生标准的要求, 也无法保证维护人员对备用机组的检修维护, 更无法确保发电机组现场仪器仪表的长期稳定运行。

根据塔中地区夏季炎热干燥的独特气象条件, 利用

干热地区空气湿球温度低的特点, 在对空气加湿的同时将空气温度降至接近湿球温度^[6], 空气温度降低, 本质上空气所携带的热量并没有变化^[7]。设计中引入水喷雾蒸发冷却通风的理念, 大幅降低燃机进气温度, 彻底解决燃机厂房夏季室内温度过高问题, 将燃机厂房室内温度降低至 35 °C 以下, 使发电机组在夏季极端高温工况条件下达到最大出力。

3.1 空气处理过程

水喷雾蒸发冷却通风系统空气处理过程见图 1。

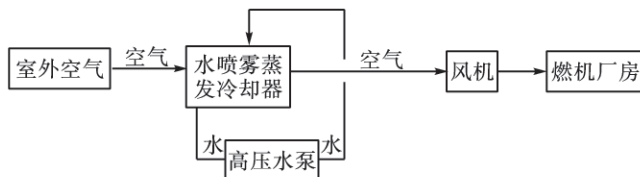


图 1 水喷雾蒸发冷却通风系统空气处理过程

水喷雾蒸发冷却通风系统空气处理过程是利用高压水泵将水加压雾化, 与空气充分接触, 使空气加湿并降温, 然后经风机送至燃机厂房室内。空气加湿降温处理的关键是借助室外干热空气的相对湿度小、干球温度高、湿球温度低、干湿球温差大等气象条件, 使干热空气与水接触等焓加湿, 空气显热转化为潜热^[8], 降低温度^[9-10]。空气处理过程中, 循环喷雾水由于蒸发减少需连续补充, 初始水温对喷雾蒸发冷却效果影响很小(小于 5 %), 可忽略不计。空气处理过程焓湿图见图 2。图 2 中点 1 为室外空气状态点(45.6 °C, 相对湿度 10 %), 经等焓加湿冷却后的空气状态点为点 2(21.52 °C, 相对湿度 88 %)。根据理论计算, 不同气象条件下的室外空气经水喷雾蒸发冷却后的温度 t_s 见表 3。

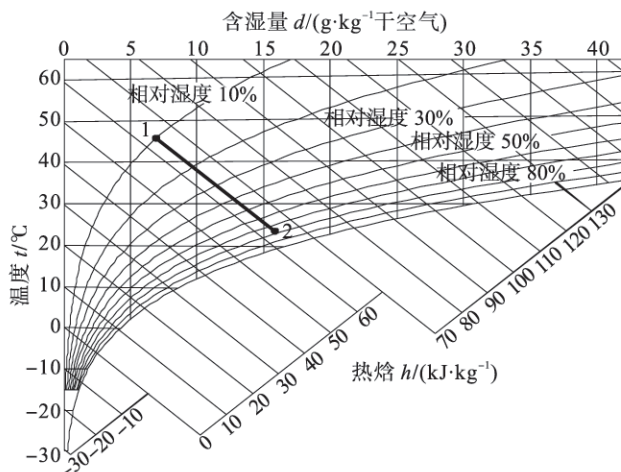


图 2 空气处理焓湿图

3.2 通风量计算及校核

燃机厂房通风量计算公式^[11]如下:

$$G = \frac{Q}{c \cdot (t_n - t_s)}$$

式中: Q 为室内余热, kJ/h ; G 为通风量, kg/h ; c 为空气比热, $\text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$; t_n 为室内温度, $^\circ\text{C}$; t_s 为送风温度, $^\circ\text{C}$ 。

表 3 不同气象条件下的空气喷雾蒸发冷却后的参数

相对湿度 / (%)	室外空气干球温度 / $^\circ\text{C}$	室外空气热焓 / ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	相对湿度 88 % 后空气温度 / $^\circ\text{C}$
10	48	82.39	23.11
	45.6	75.22	21.52
	40	64.26	18.85
20	48	107.53	27.99
	45.6	96.64	26.00
	40	80.56	22.72
30	48	133.32	32.09
	45.6	118.54	29.83
	40	97.12	26.10

假定燃机厂房室内温度维持在 35°C , 为消除燃机厂房天然气发电机组 646 kW 余热, 则需在不同室外气象条件下计算燃机厂房通风量, 见表 4。

表 4 不同室外气象条件下的送风参数及通风量

室外气象参数		送风参数		燃机厂房余热 / kW	通风量 / ($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$)
温度 / $^\circ\text{C}$	相对湿度 / (%)	温度 / $^\circ\text{C}$	相对湿度 / (%)		
45.6	10	21.52	88	646	171 153
40.0	10	18.85	88	646	142 857
45.6	20	26.00	88	646	256 349
40.0	20	22.72	88	646	187 878
45.6	30	29.83	88	646	446 256
40.0	30	26.10	88	646	259 229

表 4 数据表明, 在相同干球温度条件下, 随着室外空气相对湿度的增加, 燃机厂房所需通风量也急剧增加。

考虑到油气处理厂对供电稳定性及连续性的严格要求, 在喷雾冷却机组入口端设计中采用了自洁式空气过滤器, 将室外空气携带的颗粒处理到 $10\text{ }\mu\text{m}$ 以内 (除尘效率 $\geq 99.8\%$, 灰尘含量 $\leq 0.03\text{ mg/kg}$)。

在燃气电站设计中, 燃机厂房建筑面积 714 m^2 , 建筑室内高度 9.4 m , 正常通风量 $34\,272\text{ m}^3/\text{h}$, 事故通风量 (8 次正常通风量 + 8 次全体积通风量) $^{[12]}\ 87\,965\text{ m}^3/\text{h}$ 。笔者选配了处理量为 $120\,000\text{ m}^3/\text{h}$ 的自洁式空气过滤器 + 水喷雾蒸发冷却空气处理机组。自洁式空气过滤器与水喷雾蒸发冷却机组成成橇, 承担燃机厂房通风过滤及冷却任务, 在降低燃机厂房室内温度, 为燃气发电机组提供合格的低温、清洁助燃空气, 改善天然气发电

机组运行环境的同时, 及时排除燃机厂房内事故条件下出现的燃气泄漏, 使天然气发电机组在塔中极端高温工况条件下平稳高效运行的同时确保燃机厂房的安全。与德国公司给定的极端高温工况相比较, 采用水喷雾蒸发冷却后天然气发电机组效率提高 10% 。

2 套自洁式空气过滤器 + 水喷雾蒸发冷却空气处理机组全开时通风量达 $240\,000\text{ m}^3/\text{h}$ 。在夏季极端高温工况条件下, 2 台天然气发电机组满负荷运转时, 燃机厂房内温度不高于 33°C , 单台发电机组满负荷运转时, 燃机厂房室内温度不高于 28°C 。为节约能源, 避免燃机厂房室内温度降得过低, 送风机采用变频控制, 在保证提供给发电机组必要的燃烧空气前提下, 风机转速可以根据燃机厂房室内温度自动调节。

某燃机厂房通风设备布置平面见图 3。

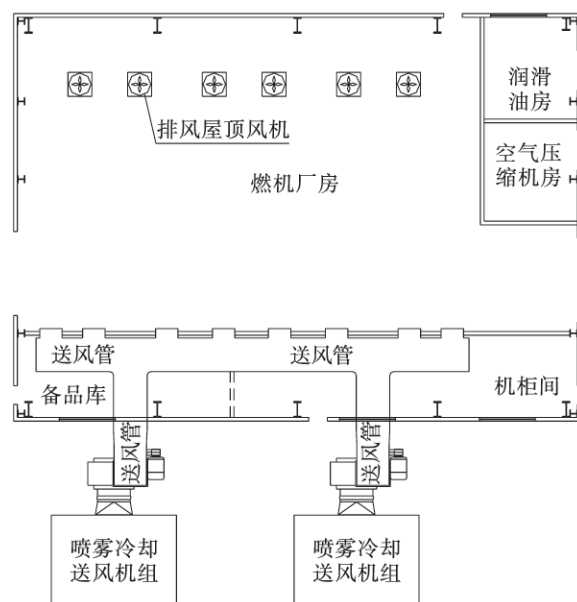


图 3 燃机厂房通风系统平面

4 结论

无论是透平式燃气轮机还是往复式内燃机, 燃机所在地海拔高度和供给燃机助燃空气的温度对燃机出力都有很大的影响。在燃机所在地海拔高度无法改变条件下, 改善燃机空气进气温度成为提高燃机效率的重要途径。在夏季炎热、空气干燥的新疆、甘肃、宁夏、内蒙等地区, 当设备散热量较大, 常规通风方式难以满足冷却降温要求时, 可充分利用当地空气干球温度高、相对湿度较小、湿球温度低、干湿球温差大的有利条件, 推广用水喷雾蒸发冷却通风方式, 可以极大改善设备运行条件, 提高设备运行效率。对燃气轮机、内燃机进气“携水率”一般小于 0.5% 的要求, 只需喷雾冷却处理后的空气相对湿度不超过 90% 或“过冷”幅度小于 $1\sim 2^\circ\text{C}$, 即可满足。

水喷雾蒸发冷却通风方式利用空气干湿球温差,将空气显热转变为潜热,空气温度降低,湿度增加,但本质上空气所携带的热量并没有变化。在空气潮湿、干湿球温差较小的南方地区,空气加湿方式对降低空气温度效果不大,不宜采用。另外,即使是在北方干热地区,当设备对室内空气有严格低湿度要求时,水喷雾蒸发冷却通风方式也不宜采用。

参考文献:

- [1] 郭刚,宋志刚,陈仁贵. 喷雾蒸发冷却技术在西气东输燃压机组上应用的可行性研究[J]. 热能动力工程, 2012, 27 (4): 24-26.
Guo Gang, Song Zhigang, Chen Rengui. Spray Evaporative Cooling Technology Feasibility Study on the West-East Gas Fuel Turbine Pressure Unit Application [J]. Thermal Power Engineering, 2012, 27 (4): 24-26.
- [2] 暖通规范管理组. 暖通空调气象资料集[M]. 北京: 冶金工业部北京有色冶金设计研究总院, 1979.
HVAC Regulation Management Group. Meteorological Data Set of HV & AC [M]. Beijing: Ministry of Metallurgical Industry of Beijing Nonferrous Metallurgy Design and Research Institute, 1979.
- [3] 白珊,徐继祥,徐志明,等. 燃气轮机进气采用喷雾蒸发冷却方式的温度分析[J]. 东北电力大学学报, 2006, 26 (6): 20-32.
Bai Shan, Xu Jixiang, Xu Zhiming, et al. Temperature Analysis on Gas Turbine Inlet Air by Water Spray Evaporative Cooling [J]. Journal of Northeast Dianli University Natural Science Edition, 2006, 26 (6): 20-32.
- [4] 何语平,祝耀坤. 采用进气冷却技术提高燃气轮机出力和热效率[J]. 浙江电力, 2004, (3): 25-27.
He Yuping, Zhu Yaokun. Adopting Inlet Air Cooling Technology to Raise Output and Heat Rate of Gas Turbine Power Plant [J]. Zhejiang Electric Power, 2004, (3): 25-27.
- [5] 李硕平,潜纪儒,童晓丹,等. 进气蒸发冷却器在 PG 9351 燃气轮机上的应用[J]. 燃气轮机技术, 2015, 28 (3): 67-69.
Li Shuoping, Qian Jiru, Tong Xiaodan, et al. Application of Inlet Air Evaporative Cooler for Gas Turbine PG 9351 FA [J]. Gas Turbine Technology, 2015, 28 (3): 67-69.
- [6] 陆耀庆. 实用供热空调设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
Lu Yaoqing. Practical Handbook of Heating and Air Conditioning Design [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2007.
- [7] 陆亚俊,马最良,邹平华. 暖通空调[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
Lu Yajun, Ma Zuiliang, Zou Pinghua. Heating Ventilating and Air Conditioning [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2005.
- [8] 陈沛霖. 空调与制冷技术手册[M]. 上海: 同济大学出版社, 1999.
Chen Peilin. Technology Handbook of Air Conditioning and Refrigeration [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1999.
- [9] 王瑞瑜. 水蒸发冷却技术在云南通信机房空调高效节能中的应用与研究[C]. 昆明: 通信电源新技术论坛, 2011.
Wang Ruiyu. Study on the Water Evaporation Cooling Technology in Yunnan Telecom Room Air Conditioning Energy-efficient and Its Application [C]. Kunming: Communication Power Supply New Technology Seminar, 2011.
- [10] 刘金星,新军哲. 燃气轮机进气蒸发冷却系统在全国各地区的适用性分析[J]. 制冷与空调, 2011, 11 (6): 93-96.
Liu Jinxing, Xin Junze. Applicability Analysis of Inlet Evaporative Cooling System for Gas Turbine in Each Region of China [J]. Refrigeration and Air Condition, 2011, 11 (6): 93-96.
- [11] 孙一坚. 简明通风设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
Sun Yijian. Concise Ventilation Design Manual [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2006.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 输气管道工程设计规范 GB 20251-2015[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for Design of Gas Transmission Pipeline Engineering GB 20251-2015 [S]. Beijing: China Planning Press, 2015.