

燃气轮机进气系统结霜分析及对策

陈仁贵¹, 陶 月²

(1. 中国石油塔里木油田公司, 新疆 库尔勒 841000; 2. 第七〇三研究所无锡分部, 江苏 无锡 214151)

摘 要: 燃气轮机进气系统发生结霜对燃气轮机安全运行危害很大。本文分析了燃气轮机进气系统发生结霜现象的产生机理, 并提出解决问题的办法, 这对燃气轮机用户和设计成套单位有一定的参考价值。

关 键 词: 燃气轮机; 进气系统; 结霜

中图分类号: TK47 文献标识码: B

符号说明

C_1, C_2, C_3 —空气在 I、II、III 段缩口处的流速 $/m \cdot s^{-1}$;

T_1, T_2, T_3 —空气在 I、II、III 段缩口处的温度 $/K$;

P_1, P_2 —空气在 I、II 段处的绝对压力 $/Pa$;

c_p —空气的平均比热 $/J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$;

K —空气的绝热指数, $K = 1.40$;

v_1 —空气在 I 段处的比容 $/m^3 \cdot kg^{-1}$;

ρ_2, ρ_3 —空气在 C_2, C_3 流速时的密度 $/kg \cdot m^{-3}$

1 引 言

新疆塔里木盆地轮南地区目前已装有燃气轮机十余套。这些机组在冬季运行时都不同程度地发生燃气轮机进气系统结霜现象, 严重危害机组的安全可靠运行。这个问题已引起广大燃气轮机用户的高度重视, 并正在寻求解决途径。

燃气轮机进气系统结霜现象易被人们在设计、成套时所忽略, 往往直到问题出现, 用户才开始急于寻找解决办法, 盲目地进行各种尝试, 往往造成不必要的人力物力浪费, 效果不甚理想。因此有必要弄清结霜形成的机理及条件, 找到正确有效的解决办法。

2 结霜机理

典型燃气轮机进气系统组成如图 1 所示。

目前进气过滤器滤芯多采用纸滤。冬季进气系统结霜现象多发生在滤芯表面和消音器出口处。结霜现象的产生直接引起燃气轮机进气系统压力损失的提高, 导致机组报警停机, 严重时会引起压气机喘

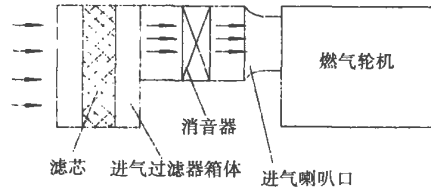
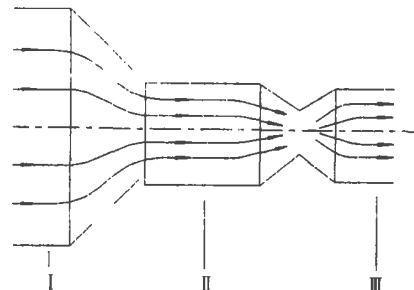


图 1 典型燃气轮机进气系统

振, 甚至由于冰块的吸入, 造成压气机叶片断裂等恶性事故。

2.1 进气系统热力分析

为便于对进气系统进行热力分析, 将图 1 进行简化, 如图 2 所示。取进气过滤器入口至消音器出口段为系统研究对象。



I 截面-进气过滤器入口前段; II 截面-进气过滤器出口过渡段; III 截面-消音器出口过渡段

图 2 燃气轮机进气系统简图

由于燃气轮机进气系统空气流速较快, 空气在进气道停留时间较短, 几乎与周围空间无能量交换, 可近似为开式、绝热、稳定流动热力系统。由热力学第一定律可得简化的系统能量方程:

$$\frac{C_1^2}{2} + C_p T_1 = \frac{C_2^2}{2} + C_p T_2 = \frac{C_3^2}{2} + C_p T_3 \dots \quad (1)$$

气流在流经过滤器时, 流道截面面积逐渐缩小,

可近似与喷管等效。对于理想气体绝热可逆流动, 过滤器出口速度与压力满足方程:

$$C_2 = \sqrt{\frac{2kp_1 v_1}{k-1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} - C_1^2 \dots \quad (2)$$

过滤器入口空气流速 C_1 较小, 可忽略不计。

当单位质量流速不变时, 系统满足连续方程:

$$C_2 \rho_2 = C_3 \rho_3 \dots \quad (3)$$

由式(1)~式(3)便可确定进气系统可逆流动各截面状态参数。

通常燃气轮机进气系统过滤器压降一般控制在 700 Pa 以内, 消音器压降一般约 400 Pa。以轮南燃气轮机电站冬季环境条件为例, 海拔 927.5 m, 大气温度 $-7\text{ }^\circ\text{C}$, 过滤器出口空气温度随过滤器压降关系见表 1。

表 1 过滤器与消音器压降与温降关系

$P_1 - P_2 / \text{Pa}$	$T_2 / \text{ }^\circ\text{C}$	$T_2 - T_1 / \text{ }^\circ\text{C}$
500	-7.42	-0.42
600	-7.50	-0.5
700	-7.59	-0.59
800	-7.67	-0.67
1 000	-7.84	-0.84

取消音器压降 400 Pa 时, 空气流经消音器时的温降不超过 $0.34\text{ }^\circ\text{C}$ 。可见空气在进气道中的总温降不超过 $2\text{ }^\circ\text{C}$ 。

事实上由于存在摩擦, 流动过程中发生能量损耗, 特别是气流流经消音器时, 由于流道面积的急剧改变产生节流效应, 气流将发生强烈扰动及涡流, 伴随压力损失, 使消音器出口温度进一步下降。实际过程是不可逆的, 部分动能又转化成热能被气流吸收, 因此进气系统实际温降会小于表中所列数值。

根据轮南燃气轮机电站机组运行情况, 通常燃气轮机进口温度(即本文为 T_3)总是比环境温度(干球温度)低 $0.5 \sim 2\text{ }^\circ\text{C}$, 这与本文计算结果基本相符。

2.2 自然条件分析

新疆轮南地区秋冬季, 昼夜温差大, 大气相对湿度变化也较大, 特别是雾天, 相对湿度达 95% 以上, 甚至达到饱和。

下面分别就大气热力变化的两种极端情况对结霜形成过程进行讨论(见图 3 湿空气 $t-d$ 图)。

(1) 大气含湿量不变, 气温急剧下降。大气热力变化过程如图 3 中的 A-B-C。A 点为初始状态, 假定 A 点大气温度 $T_a = 3\text{ }^\circ\text{C}$, 相对湿度 $\phi 70\%$, 含湿量 $d = 3.66\text{ g/kg}$ (干空气)。当气温迅速下降

(沿等 d 线)至 B 点: $T_a = T_s = -1.93\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 大气达到饱和状态。当气温继续下降时, 空气中的水蒸气开始在滤芯表面结霜, 气温将沿饱和线下降至 C 点, $T_a = T_s = -5\text{ }^\circ\text{C}$, 同时含湿量下降至 $d = 2.91\text{ g/kg}$ (干空气)。由于气流流经过滤器时流速逐渐提高, 温度将沿饱和线继续下降。气流不断地流经过滤器, 滤芯表面结霜便愈积愈厚。

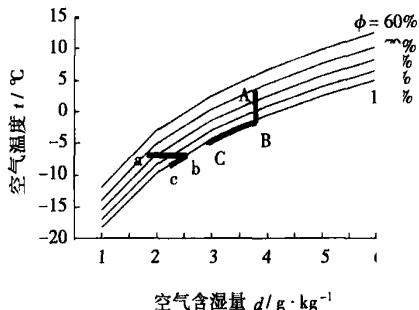


图 3 湿空气 $t-d$ 图

(2) 气温不变, 大气相对湿度不断提高(如下雾)。大气的热力变化过程如图 3 中的 a-b-c。a 点为初始状态, 假定 a 点大气温度 $T_a = -7\text{ }^\circ\text{C}$, 相对湿度 $\phi 70\%$, 含湿量 $d = 1.74\text{ g/kg}$ (干空气)。当大气相对湿度不断提高(沿等 t 线), 至 b 点时, 含湿量 $d = 2.49\text{ g/kg}$ (干空气), 大气达到饱和状态。当空气流经过滤器时, 由于气流速度逐渐提高, 温度将沿饱和和线开始下降至 c 点。同样由于不断有气流流经过滤器, 滤芯表面结霜亦愈积愈厚。

实际情况往往是大气温度和相对湿度同时发生变化, 结霜形成过程分析原理是相似的。

由湿空气性质可知, 大气相对湿度愈接近饱和, 大气温度 T_a 、湿球温度 T_w 和露点温度 T_s 愈接近, 且有 $T_a > T_w > T_s$; 当大气相对湿度达到饱和时, 3 个温度相等。

轮南地区冬季气象参数见表 2。

表 2 轮南地区冬季典型气象参数

大气温度 $T_a / \text{ }^\circ\text{C}$	相对湿度 $\phi / \%$	露点温度 $T_s / \text{ }^\circ\text{C}$	结霜温降 $T_a - T_s / \text{ }^\circ\text{C}$
-25	70	-28.89	3.89
-10	90	-11.3	1.33
-7	60	-13.5	6.45
-7	95	-7.66	0.66
-7	100	-7.00	0.00

表 2 参数反映出结霜温降与相对湿度密切相关。相对湿度越大, 结霜温降越小, 同是 $-7\text{ }^\circ\text{C}$ 相

对湿度由 60% 提高至 100%，结霜温降由 6.45 °C 减少至 0 °C。由于气流经过进气道时伴随有 0.5 ~ 2 °C 的温降，正是该温降使得接近饱和的大气发生结霜，因此节流降温是结霜形成的内因，而大气相对湿度的提高则是结霜形成的外因。

前面关于进气系统热力分析是假定气流均匀稳定流动，实际流场是不均匀的。速度大的部位结霜温降也大，也就首先发生结霜堵塞情况，而一旦发生部分堵塞现象，原先流速低的部位流速开始提高，随之也开始出现结霜堵塞，从而造成恶性循环，进气系统结霜愈来愈严重，最终造成整个进气系统堵塞。

目前陆用燃气轮机配套使用的高效过滤器滤芯多采用木质纤维制作，滤纸平均孔径 2 ~ 5 μm。空气中水雾较大时，木质纤维会因受潮膨胀，使滤芯阻力增大，相应提高进气道温降（见表 1），这也是过滤器滤芯容易结霜的又一诱因。

3 对 策

通过以上分析可知，燃气轮机进气系统结霜是有条件的，相对湿度是结霜形成的最直接因素，降低进气相对湿度是解决问题的关键。最直接最有效方法是在进气过滤器前配置加热进气用的加热装置。

进气加热装置的加热量，除在结构设计上考虑尽可能减少散热损失外，加热进气温升的确定至关重要，温升过高不经济，过低起不到除霜效果。鉴于

进气系统本身引起不到 2 °C 的温降，再考虑留有一定的进气不饱和度，建议进气加热温升取 3 °C 为宜。对应于这一温升，当大气相对湿度达到 85% 左右，就启动进气加热系统，使进气温度提高 2 ~ 3 °C，而加热后的空气露点温度仍为原露点温度，这样进气相对湿度降低了 15% ~ 20%，远离饱和状态，从而有效地防止进气系统结霜。以 TITAN130 机组为例，燃气轮机进气量 50 kg/s，进气加热热耗约 150 kW。

进气加热方法可有多种，如电加热、引箱体通风出口空气掺混加热、有蒸汽热源时采用蒸汽暖管加热以及抽压气机出口高压气掺混加热等，采用何种方法应视现场条件及机组具体情况而定。

通过上述分析，燃气轮机进气系统气流温降及较高的大气相对湿度是促成冬季进气系统结霜的主要原因。有效避免结霜方法是加热燃气轮机进气。对于冬季 0 °C 以下，大气相对湿度大于 85% 地区的燃气轮机用户，为确保燃气轮机安全可靠运行，配套进气加热装置是必不可少的。

参考文献:

- [1] 沈维道, 郑佩芝, 蒋淡安. 工程热力学[M]. 北京: 人民教育出版社, 1965.
- [2] 沈阳黎明航空发动机(集团)有限公司. 燃气轮机原理、结构与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [3] 赵世杭. 燃气轮机结构[M]. 北京: 清华大学出版社, 1983.

(何静芳 编辑)

仿真技术

汽轮机过渡工况的优化

《Теплоэнергетика》2005 年 6 月号报导实现大功率汽轮机高压缸整锻式转子热应力状态仿真模型的算法和程序，提供了 T-250/300-240 型汽轮机过渡工况数值模拟的结果，进行的数值试验以便确定转子危险区域内应力变化最佳的允许范围。

应该指出，在所有的工况中转子金属的最大受损程序出现在第一个非调节级沿轮盘的内圆角区。在实际涡轮机组启动时，不仅转子内的温度应力，而且调节阀和停汽阀壳内的应力、锅炉内装式闸阀的极限压降、机匣和转子的相对位移等都可以成为限制工况参数变化的因素。

基于仿真模拟进行的数值试验证实，在相应程序控制的条件下，并实时检测汽轮机装置零件的热应力状态，就能够保证汽轮机最佳的过渡工况。

利用动力装置控制系统内转子的仿真模型，可以帮助运行人员得到有关汽轮机重要零件热应力状态的信息，从而提高整个装置的可靠性，保证大的机动性和经济性。

此外，该模型还能计算转子的寿命，这就允许专家客观地比较，并评定汽轮机组过渡工况实施的质量，允许有根据地做出有关执行预防和修理措施的决定。

(吉桂明 供稿)

por-water swelling might rise to about 6000 mm. The steam-purging factor of the superheater and reheater is respectively greater than 1.3 and 2.0, thus contributing to a relatively high steam-purging effectiveness. By increasing the combustion rate and slowly opening a temporary purging valve it is possible to prevent the drastic rise and lowering of the separator water level. During a sustained stable-pressure steam purging the steam superheating of the separator has been controlled at about 20 °C. Desuperheating water was used to control the superheater and reheater outlet temperature, thereby preventing the materials from being subjected to an excessively high temperature. **Key words:** startup system of the atmospheric flash-off type, supercritical once-through boiler, stable-pressure steam purging

船用蒸汽动力装置机炉协调系统的总体结构设计 = **The Design of an Overall Construction Scheme of a Turbine-boiler Coordinated Control System for a Marine Steam Power Plant** [刊, 汉] / ZHANG Shao-kai (Naval Representative Office Resident at No.426 Factory, Dalian, China, Post Code: 116000), LU Shu-ju, LIU Huan (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, — 2005, 20(6). — 643 ~ 646

Through the analysis of a commonly used turbine-boiler coordinated control system and in conjunction with the specific conditions of and the implementation feasibility for a marine boiler and steam turbine presented is a control mode and overall construction design scheme for a marine turbine-boiler coordinated control system. The theory of turbine-boiler coordinated control theory is analyzed and the configuration of main control modules given. **Key words:** marine, main boiler, main steam turbine, coordinated control

燃气轮机进气系统结霜分析及对策 = **Analysis of and Countermeasures Taken for the Frosting of a Gas-turbine Air-inlet System** [刊, 汉] / CHEN Ren-gui (China Petroleum Talimu Oil Field Co., Kule, Xinjiang, China, Post Code: 841000), TAO Yue (Wuxi Division of No. 703 Research Institute, Wuxi, China, Post Code: 214151) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, — 2005, 20(6). — 647 ~ 649

The safe operation of a gas turbine will be seriously affected when frosting occurs at the gas turbine air-inlet system. The generation mechanism of such a frosting is analyzed and measures for coping with it are put forward, which can serve as a useful reference for gas turbine users and design-packaging units. **Key words:** gas turbine, air inlet system, frosting

燃气轮机性能试验用的康氏水力测功器 = **Kahn Hydraulic Dynamometers for Performance Testing of Gas Turbines** [刊, 汉] / Gerhard Merkle (Kahn Industries, Inc., Wetherisfield, USA, ct 06109) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, — 2005, 20(6). — 650 ~ 654

QPY 油气润滑技术—在小功率燃气涡轮发电机、涡轮压缩机上的应用设想 = **Oil-gas Lubrication Technology for Low-duty Gas-turbine Generator Sets and Turbo-compressors** [刊, 汉] / ZHANG Chun-lin (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036), JIANG San-yong (Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, — 2005, 20(6). — 655 ~ 656