

燃气轮机进气防冰系统国内外技术对比分析

陈仁贵¹, 陈磊¹, 王清亮², 康成佳²

(1. 中石油塔里木油田公司 新疆 库尔勒 841000; 2. 中石油西部管道公司 新疆 乌鲁木齐 830012)

摘要: 目前,引进的燃气轮机的进气系统常带有对消音器和进气喇叭口的加热防冰装置,该装置均不能防止高效滤芯在冬季的结冰堵塞,甚至还会严重影响高寒地区燃气轮机在冬季的安全稳定运行。分析了国内外燃机进气防冰技术上的重大差别和某些机组常常发生防冰系统保护性停机的原因,采用国内研制的防冰技术对其进行改造,将加热部位移至滤芯前,起到预防结冰堵塞作用。结果表明,改造后不仅能提高燃机冬季运行的可靠性,而且能节约大量的能源。

关键词: 燃气轮机; 进气; 防冰; 可靠性

中图分类号: TK477 文献标识码: B

引言

有资料显示,在高寒高湿的地区,燃气轮机进气系统在冬季常常会结冰堵塞,甚至“吞冰”而打坏机组叶片,如图1所示^[1]。

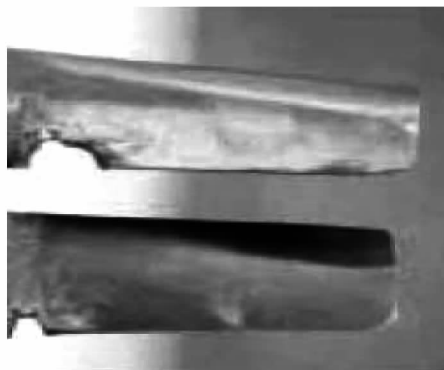


图1 进气结冰打坏的燃气轮机叶片
Fig. 1 Blades of a gas turbine damaged by the iced inlet gas

我国《燃气轮机辅助设备通用技术要求》GB/T-13674-92 标准明确规定: 在高湿高寒的地区,应设计配套高效滤芯进气加热防冰装置。这不仅能防止滤芯结冰堵塞,而且也能防止燃气轮机在进气喇叭口处形成的“吞冰”事故。

为此,一些燃气轮机厂商,根据用户要求,对燃气轮机进气系统配备了防冰装置。多年的运行表明: 整个冬季燃气轮机防冰装置虽能投入运行,但是每当雨雪天气或相对湿度 > 90% RH 时,许多燃气轮机进气滤芯就会发生冰霜堵塞现象,如图2所示。有的机组还发生 $T_s - T_2$ 偏离→停机事故,如图3所示。这给冬季生产带来很大的影响。



图2 塔里木盆地燃气轮机滤芯结冰实景
Fig. 2 Real conditions of the cartridge of a gas turbine iced in Tarim basin

燃气轮机厂商对 $T_s - T_2$ 偏离→保护停机,一直找不到保护停机误动的原因。

而燃气轮机界在防冰设计上普遍存在着一个误区,就是认为不需要对滤芯进气进行加热防冰,用脉冲反冲洗就可以清除掉滤芯的结冰^[2]。

1 进气结冰形成机理

1.1 进气结冰的理论分析

国内的防冰理论^[3]: 燃气轮机进气系统的高效滤芯、消音器和一级可调叶片3处由于进气速度的剧烈变化会引起进气温度的较大变化,空气的动能(速度)会转变成了空气的内能(温度)。滤芯表面结霜是由于进气气流穿过滤芯介质时,由于速度

收稿日期: 2013-04-10; 修订日期: 2013-05-08

作者简介: 陈仁贵(1946-),男,江苏扬中人,中石油塔里木油田公司副总工程师,现已退休。

的增加,表现为压降的增加,而使进气温度降低;当空气温度较低、相对湿度较高时,这时空气的干球温度 T_a 与露点温度 T_s 十分接近;而节流降温使得干球温度低于露点温度时,空气中就会有一部分水蒸气冷凝成水;冷凝水在冰点以下时会“凝华”成霜。滤

芯中的冰霜一部分是由于滤芯本身的节流降温所形成,它会牢牢地嵌在滤芯上。它不同于北方地区冬季常见的“霜挂”,靠“脉冲反冲洗”是不能清除掉这些冰霜的,国外某些学者也认同这个观点^[1]。

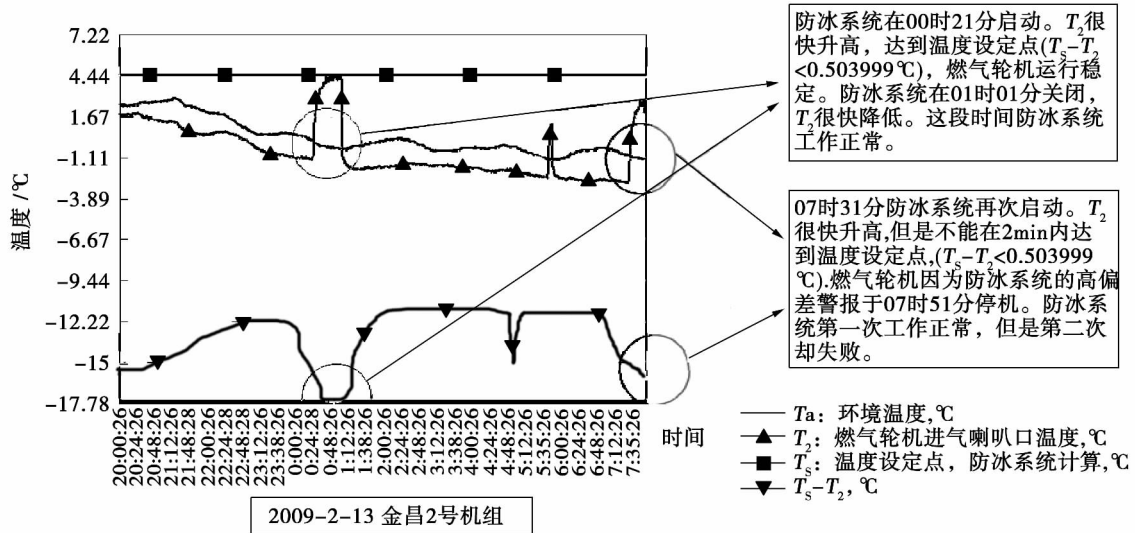


图 3 某机组防冰保护实录曲线及分析

Fig. 3 Actually recorded curves and analysis of the ice prevention for a gas turbine unit

高效滤芯、消音器和一级可调叶片处的温降值与流经该处的气流速度有关。

1.2 理论计算与分析

依据工程热力学第一定律,气流的速度、压降、温降的计算式为:

$$C_1^2 + 2C_p T_1 = C_2^2 + 2C_p T_2 = \dots = C_i^2 + 2C_p T_i$$

$$C_2^2 = \sqrt{\frac{2n \cdot RT_1}{n-1} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]} - C_1^2$$

$$T_1 - T_2 = A \times (C_1^2 - C_2^2) / 2g \times C_p$$

.....

式中: C_p —空气的比热容: 1.014 kJ/(kg · K); n —空气多变指数: 1.4; R —气体常数: 287 kJ/(kg · K); g —重力加速度: 9.8 m/s²; A —功的热当量: 1/102 kJ/(kg · m)。

例如: 某机组在当地大气压 87 kPa 处工作,进气质量 76 kg/s。过滤器压差为 1 kPa,喇叭口前的流速均匀,速度 $C_1 = 25$ m/s,喇叭口处流速 $C_2 = 70$ m/s,一级可调导叶片处流速 $C_3 = 135$ m/s。求解各处温降(T_a 为空气干球温度, T_1 、 T_2 、 T_3 分别为滤芯、喇叭口、一级可调导叶处温度)。

设干球温度 -5 °C,相对湿度 95% RH,由此可计算得:

$$露点温度 T_s = -5.80 \text{ °C}$$

$$T_a - T_1 = 0.84 \text{ °C}$$

$$T_a - T_2 = 2.07 \text{ °C}$$

$$T_a - T_3 = 8.50 \text{ °C}$$

滤芯处温度是 -5.84 °C,已低于露点温度,会有冷凝水析出,并瞬时凝华成霜。

2 某些机组防冰设计分析

2.1 某些厂商的防冰理论之一

某些机组的进气防冰对象,是只考虑消音器和一级可调导叶的防冰。进气加热热源从压气机抽取,加热部位在消音器前,并认为:高效滤芯的冰霜是“由于滤芯挡住了雨雪中的冰霜,靠空气过滤器的脉冲反冲洗很容易清除掉滤芯上的这些冰霜”。

2.2 某些厂商的防冰理论之二

图 4 为某机组的防冰曲线。其机组控制逻辑是:当 $T_a < 4.4$ °C 和相对湿度 $\phi > 67\%$ RH 时,防冰

系统即自动启动;通过 T_s (设定值) - T_2 偏差值来控制进气加热量,最大加热温度 5.6 °C,如图 4 阴影处。

对图 4 曲线从工程热力学的角度进行了复核,确定有关计算是正确的。

假如: $P_0 = 0.10325$ MPa, 当 $T_a = 4.4$ °C、 $\phi = 67\%$ RH 时,露点温度 $T_s = -1.186$ °C, $T_a - T_s = 5.59$ °C。

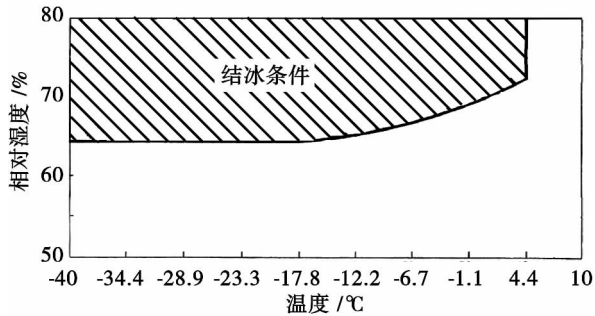


图 4 某机组的防冰曲线

Fig. 4 Ice - prevention curves of a gas turbine unit

计算还发现: T_a 愈低, $T_a - T_s$ 愈小。因此,当 $\phi = 67\%$ RH 时,只要将进气温度 T_a 最大提高 5.6 °C,就能有效防止进气系统结冰,这就是最大加热温升 5.6 °C 的由来。但是,在许多项目上,某公司将进气喇叭口处的温度 T_2 提高 5.6 °C,导致 $T_2 \neq T_a$, $T_a - T_2 = 2.07$ °C,这就是一个概念上的错误。

由计算还可知,一级可调导叶处的温降约 8.5 °C,此处温降最大,在相对湿度 $\phi > 67\%$ RH 时,是会有冷凝水析出,继而凝结成冰霜。但是,由于空气流速很高,物体表面也很光滑,凝结的冰霜不可能在这里堆积成块,它会以细微的颗粒状直接进入燃气轮机,不会对燃气轮机造成危害。所以,该公司也并没有将 8.5 °C 作为防冰的设计依据。

2.3 结果分析

图 4 防冰曲线应该适合于航空发动机的防冰曲线。因为航空发动机都没有空气过滤器,飞机在飞行中会遇到各种雨雪云雾天气。颗粒状的雨雪一旦进入进气道,当气温低于 4.4 °C 时,就会立即变成较大冰块进入发动机,这当然是非常危险的。

这条曲线也适合于加拿大等高寒高湿地区的燃气轮机防冰设计。该地区空气非常清洁,燃气轮机进气系统只配有简单的进气滤网;而该地区冬季异常潮湿,会有大量的雨雪直接进入燃气轮机进气道,

凝结的冰霜会吸附在消音器或喇叭口的支撑龙骨上。当冰霜堆积到一定厚度时,会脱落下来被吸入燃气轮机,从而造成打坏叶片事故。

我国陆上燃气轮机进气系统一般都配有 F7 级以上的空气过滤器,100% 的 5 μm 以上的水雾雨雪都不会进入燃气轮机进气道,不会发生加拿大输气管道那种情况。我国东北、新疆等高寒地区有数十台燃气轮机运行了几十年,它们一般都不带进气防冰系统,冬天遇到的问题也只是滤芯结冰堵塞,但从未发生过“吞冰”事故。

2.4 某燃气轮机防冰保护的原因分析

研究分析,可以对图 3 防冰保护停机曲线作出合理的解释。某公司利用 $T_s - T_2 < 0.503999$ °C 来控制加热后的 T_2 温度(T_s 是温控线,并非人们习惯认知的露点温度)。其 T_2 的最大温升为 5.6 °C。在 $T_a > -1.1$ °C 时, T_s 的设定值为 4.4 °C; 在 $T_a < -1.1$ °C 时, $T_s = T_a + 5.6$ °C。这就产生了一个问题: 由于 $T_a - T_2 = 2.07$ °C 左右,并且 T_2 是 T_a 、 C_1 、 C_2 的函数,所以在 $T_a < -1.1$ °C、 T_2 最大温升为 5.6 °C 的情况下, T_2 是不可能接近 T_s 值的,它们的差值一般是 $T_a - T_2 = 2.09$ °C。也就是说, $T_a > -1.1$ °C 以上时,系统能正常工作; $T_a < -1.1$ °C 时,系统就不可能工作,必然发生防冰保护停机。

图 3 中 00:24 防冰成功投入,是 T_a 在 -1.1 °C 以上;而 07:36 防冰退出,这时 T_a 已降至 -1.1 °C 以下。

由图 3 可以明显看出: 07:36 $T_a = -1.1$ °C, $T_s = 4.4$ °C, 但 $T_2 = -2.78$ °C, 加热 5.6 °C 后 T_2 升至 2.82 °C, $T_s - T_2 = 1.58$ °C > 0.503999 °C, 所以出现防冰保护。理论计算分析与图示曲线非常一致。

这说明 $T_1 < -1.1$ °C 时的算式是有问题,必然会出现防冰保护。

3 原防冰设计的能耗

按温升 5.6 °C 计算,30 MW 燃气轮机进气防冰投运时,要消耗 600 kW 左右的能量。某 30 MW 机组运行报表显示: 机组防冰系统投运后,机组要增加 127 m^3/h 的天然气耗量。这主要是要对大量的进气加热,同时由于进气温度的升高又会降低燃气轮机的热效率。个别机组是只要气温 < 4.4 °C,防冰系统就自动投入运行。如果一个冬季按 140 d 计,这台机组一个冬季防冰系统要消耗的天然气为:

$$140d \times 24h \times 127m^3/h = 42.67 \times 10^4 m^3;$$

还有的机组根据气温 $< 4.4 \text{ }^\circ\text{C}$ 和相对湿度 $> 67\% \text{ RH}$ 时,防冰系统才自动投运。如果一个冬季按 80 d 计算,这台机组防冰系统也要消耗天然气:

$$80d \times 24h \times 127m^3/h = 24.38 \times 10^4 m^3.$$

4 国内燃气轮机进气防冰技术

针对国外机组防冰系统存在的问题,中石油与国内某公司合作,利用原有压气机抽气加热的热源,对机组防冰系统进行了改造,将加热部位移至滤芯前,取得了圆满的成功。防冰装置的控制界面人机界面如图 5 所示,其控制对象是 T_1 。

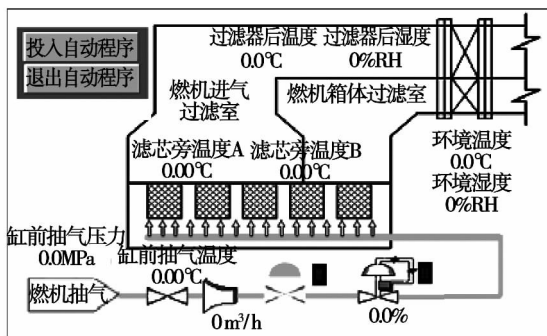


图 5 控制系统人机界面

Fig. 5 Man-machine interface of the control system

因 $T_1 \approx T_a$ 加热算式为 $T_1 - T_a \leq 5.6 \text{ }^\circ\text{C}$, 这样就不会发生国外某公司算式上的逻辑错误。

国内研究的防冰理论还认为:滤芯处加热防冰所需要的温升较低,湿度条件也远大于 67% RH。但是,考虑到空气中含有的液态水雾的不同,加热温升和湿度的大小还需通过实践来证实,以求得用最低的能耗获得最好的防冰效果。

国内进气防冰技术的加热时率不足国外规定的 10%,而且加热量又不足国外规定的 80%,这是国内防冰技术与国外技术的很大区别,也是能显著节能的根本原因。

目前,国内防冰技术已为许多燃气轮机用户成功改造了 5 种机型的 17 台燃气轮机的进气防冰系统,不仅完全防冰,而且节能效果显著。

5 结论和建议

(1) 进口燃气轮机的进气防冰装置,其防冰理论及措施与我国的相关标准及技术方案都有很大的区别,有待进一步研究。

(2) 将防冰加热部位移至滤芯前,能同时起到 3 个易结冰部位的防冰作用。

(3) 对于国内自研的防冰系统,前期做好研究和试验工作,确定是在 $T_a < 4.4 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $\phi > 67\% \text{ RH}$ 时,还是在 $T_a < 3.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $> 90\% \text{ RH}$ 时投运,在保证设备安全运行的前提下,尽量降低温升和缩短投运时间,以节约宝贵的能源。

参考文献:

[1] Majed Sammak. Anti-Icing in Gas Turbines Isrn Lutmdn/Tmhp - 0615090 - E ISSN 0282 - 1990: 50 p3.
 [2] Guideline For Gas Turbine Inlet Air Filtration Systems-Gas Machinery Research Council [EO/BL]. <http://www.qmrc.org>. 2010.
 [3] 陈仁贵,陶月. 燃气轮机进气系统结霜分析及对策[J]. 热能动力工程, 2005(6): 647 - 649.
 CHEN Ren-gui,TAO Yue. Analysis of and countermeasures for the frosting of the air intaking system of a gas turbine[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power 2005(6): 647 - 649.

(辉 编辑)

• 书 讯 •

轮机维护与修理

本书紧扣高职教育培养技能型专业人才的培养目标,打破了传统的以理论知识为核心,将以前以轮机维修理论、工艺构成的教学内容体系,转为基于轮机维修工作过程,按照"项目引领、任务驱动"的方式,以实际维修工作任务为主线,根据实际轮机维修的工作流程,按实际工作步骤来组织教学内容,突出了维修工作的全过程。

书号: 978 - 7 - 5661 - 0509 - 7

作者: 施祝斌

出版社: 哈尔滨工程大学出版社有限公司

出版日期: 2012 年 12 月 01 日

der discussion can be used to conveniently and accurately identify the load and center distribution of bearings ,thus offering guidance for installation and maintenance of the unit. **Key words:** steam turbine ,bearing ,load ,bending strain method ,vibration ,test

燃气轮机进气防冰系统国内外技术对比分析 = **Contrast and Analysis of the Worldwide Technologies for Gas Turbine Inlet Air Deicing Systems** [刊 ,汉] CHEN Ren-gui ,CHEN Lei (Tarim Oil Field Company ,China National Petroleum Corporation ,Korla ,China ,Post Code: 841000) ,WANG Qing-liang ,KANG Cheng-jia (West Pipeline Company ,China National Petroleum Corporation ,Urumchi ,China ,Post Code: 830012) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2013 28(6) . -569 ~572

At present ,the air inlet systems for gas turbines introduced from abroad are often provided with heating and deicing devices for silencers and air inlet bell-mouths. However ,such devices are incapable of preventing the high efficiency cartridges from being iced and clogged ,even the safe and stable operation of gas turbines in frigid regions in winters are seriously affected and the relevant standards of China are not met. The authors analyzed the major difference in the air inlet deicing technologies for gas turbines in the world and the main causes for protective shutdown of some units often tripped by deicing systems and performed reconstruction of the units by employing the deicing technology developed in domestics. It has been found that the units after the reconstruction can not only enhance the reliability of the operation of the gas turbines in winters but also save a large amount of energy. **Key words:** gas turbine ,inlet air ,deicing ,reliability

天然气热电联供系统改造及焓经济分析 = **Modification and Exergoeconomic Analysis of a Natural Gas Heat and Power Cogeneration System** [刊 ,汉] HU Jia-hao ,LUO Xiang-long ,CHEN Ying (College of Materials and Energy Sources ,Guangdong University of Technology ,Guangzhou ,China ,Post Code: 510006) ,HUA Ben (Research Center for Natural Gas Utilization ,South China University of Science and Technology ,Guangzhou ,China ,Post Code: 510640) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2013 28(6) . -573 ~579

On the basis of a traditional natural gas heat and power cogeneration system ,put forward was an improved electricity ,steam and hot water cogeneration system. One of the specific features of the system in question is to realize the u-