

海洋环境下燃气轮机涡轮叶片的热腐蚀与防护

赵德孜

(海军航空工程学院 青岛分院, 山东 青岛 266041)

摘要: 涡轮叶片热腐蚀是海洋环境下燃气轮机的典型故障之一,也是决定涡轮叶片使用寿命的主要限制因素之一。简要分析了我国沿海地区海洋环境的特点以及涡轮叶片热腐蚀的特点,讨论了燃气轮机涡轮叶片的热腐蚀机理和影响因素,结果表明叶片表面温度、燃气中的盐含量以及燃油中的硫与钒是导致热腐蚀的重要因素。最后,着重从选材、涂层应用和维护等方面,提出了燃气轮机涡轮叶片热腐蚀的防护措施。

关键词: 燃气轮机; 涡轮叶片; 海洋环境; 热腐蚀

中图分类号: TK479 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2011)05-0100-04

Hot Corrosion and Protection of Gas Turbine Blade in Marine Environment

ZHAO De-zi

(Qingdao Branch of Naval Aeronautics Engineering Institute, Qingdao 266041, China)

Abstract: The hot corrosion of turbine blades is one of the typical failures which occur in during operation in marine environment, and is also one of the main limits of blade service life. The characteristics of our marine environment and the corrosion characteristics of the turbine blades were analyzed. The mechanism and influencing factors of hot corrosion were discussed. It was concluded that the surface temperature of turbine blade, salt content of fuel gas, and the content of sulfur/vanadium in the fuel were the important factors of hot corrosion of turbine blades. The preventive measures for the hot corrosion of turbine blades were put forward from the aspects of material selection, coating application and maintenance.

Key words: gas turbine engine; turbine blade; marine environment; hot corrosion

用于海军飞机和舰船的燃气轮机(海洋型燃气轮机),由于受海洋环境的影响,涡轮叶片的热腐蚀成为典型故障之一,不仅降低了燃气轮机的使用效能,而且增加了维修的工作量和费用。燃气轮机涡轮叶片的热腐蚀相对于压气机的电化学腐蚀,其预

防难度和成本更大。由于涡轮叶片特殊的工作条件,其热腐蚀产生及破坏的机理与其它海洋设备不完全相同^[1-2]。笔者针对燃气轮机涡轮叶片的热腐蚀进行分析和研究,然后在此基础上提出相应的防护措施。

收稿日期: 2011-07-29

作者简介: 赵德孜(1962—),男,江苏镇江人,博士,教授,主要研究方向为航空发动机和可靠性工程。

1 海洋环境的特点

海洋大气中含有盐分且湿度大,这些盐分以不同的粒径或形式存在于大气中,气候条件不同,海洋大气中的盐含量也有所不同。通常温度、风速、湿度越大,盐含量越高。在恶劣气候以及舰船航行时击起浪花的情况下,空气中的盐含量更高。据英国的一项研究表明,晴天海洋大气中,盐的质量分数为 $0.01 \times 10^{-6} \sim 0.05 \times 10^{-6}$,直径小于或等于 $5 \mu\text{m}$;一般天气下,盐的质量分数为 $0.1 \times 10^{-6} \sim 0.2 \times 10^{-6}$,盐粒直径不大于 $20 \mu\text{m}$;恶劣天气下,在大风时,盐的质量分数可达 1×10^{-6} 。我国海岸类型包括了寒带和极地海岸类型外的所有类型,形成了沿海气温高、湿度大、盐分高、雾区多的特点。例如,山东半岛东南部沿岸夏季平均相对湿度为 $80\% \sim 94\%$,海南岛沿海绝大部分地区的表层总溶解固体质量分数在 3.35% 以上。

2 涡轮叶片的热腐蚀

2.1 特点

热腐蚀会严重降低叶片材料的力学性能,涡轮叶片热腐蚀的特殊之处主要体现在工作条件十分恶劣。例如,涡轮动叶不仅要在高速和高压气流及交变温度条件下工作,而且要承受很大的交变热负荷和机械载荷等。涡轮动叶热腐蚀的宏观形貌特征一般是在叶片表面出现大面积的破坏,特别是前、后缘及承受高压的叶盆处,其腐蚀产物相对较硬、较致密。至于微观形貌特征,则因材料、温度和环境介质的不同而千差万别。图1为某型燃气轮机高压涡轮第1,2级动叶前缘的热腐蚀。

涡轮叶片热腐蚀基本属于一种稳定性故障,除了特殊情况之外,一般不会发展成裂纹,产生故障的可能性较小。当涡轮叶片发生较严重的热腐蚀时,不仅会使燃气轮机性能衰减、排气温度增高,而且常常使昂贵的涡轮叶片过早报废。

2.2 热腐蚀机理与影响因素

国外很早就开始使用舰载飞机和舰用的燃气



图1 高压涡轮第1,2级动叶前缘的热腐蚀

Fig. 1 Hot corrosion at the leading edges of turbine blades

轮机,在20世纪50年代就致力于涡轮叶片热腐蚀机理及防护方面的研究^[1-4]。国内因种种原因,直至20世纪80年代才开始加以关注,近年来这方面的研究逐渐增多^[4-8]。虽然国内外对涡轮叶片热腐蚀机理进行了大量研究,但并不深入,这种机理未被充分认识的原因是多方面的。例如,涡轮叶片的实际工作条件十分恶劣和复杂,实验研究和台架试验时很难真实地进行模拟;涡轮叶片热腐蚀机理本身就很复杂,目前的成果还缺乏足够的热力学数据作依据。

就热腐蚀的过程来说,一般认为燃油中含有的S元素在高温介质中被氧化,与燃气中的NaCl发生反应,生成了 Na_2SO_4 。在一定的温度范围内,这些 Na_2SO_4 呈熔融状态溶解于叶片表面,破坏叶片表面的保护性氧化层,随后进一步加速对里层金属的氧化,并形成硫化物,加剧了叶片基体合金的腐蚀,使金属的性能迅速下降。

涡轮叶片热腐蚀的影响因素如下。

1) 叶片表面温度。大量的试验和实践证明,叶片表面温度是影响热腐蚀的重要因素。根据发生热腐蚀的温度范围,可将热腐蚀分为高温热腐蚀和中低温热腐蚀^[9]。高温热腐蚀是指 $750 \sim 950 \text{ }^\circ\text{C}$ 时产生的热腐蚀,主要发生在涡轮叶片上;中低温热腐蚀是指发生在 $650 \sim 750 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间的热腐蚀,这种腐蚀通常只发生于高增压比压气机的最后几级。不同的材料有不同的热腐蚀温度范围,在此范围内,材料的热腐蚀最为严重,这是因为一方面各种合金材料的抗热腐蚀能力不同,另一方面是腐蚀介质的特性所造成的。

2) 叶片材料。燃气轮机的热腐蚀大部分发生在涡轮动叶。囿于涡轮动片的工作要求,一般都采

用镍基高温合金,提高其含铬量,可以增强合金的抗热腐蚀能力。镍基高温合金中铬的质量分数低于15%时,其抗腐蚀能力较差,但超过25%时,又会降低其高温强度,必须加以综合考虑。

3) 燃气中的盐含量。燃气中的盐含量对热腐蚀起加速作用。一般来说,盐含量越高,热腐蚀的速度越快,所以,英国海军规定燃烧空气中盐的质量分数不得超过 0.01×10^{-6} 。研究表明,盐含量有可能存在一个范围,小于其下限的时候,热腐蚀一般不会发生;超过其上限时,腐蚀速度就不会再增加。

4) 硫和钒。硫存在于燃油和海水中,它起促进腐蚀的作用。美国海军的研究表明,燃油中的硫质量分数为0.04%~0.4%时,在钠盐含量相同的情况下,其腐蚀的差别不是很明显。当燃油遭到钒的污染时,在燃烧过程中,燃油中的钒与氧和钠(或钾)反应,生成一种类似于硫化钠的溶盐,沉积在涡轮前几级叶片上,使之产生热腐蚀。燃油中钒的质量分数一般要限制在 $0.2 \times 10^{-6} \sim 0.5 \times 10^{-6}$ 范围内。

5) 燃气流速。燃气流速越大,腐蚀越严重。

3 涡轮叶片热腐蚀的防护

要解决燃气轮机涡轮叶片热腐蚀的问题,通常需要从设计和使用维护等方面通盘考虑,以便在控制成本和风险的前提下,尽可能地降低热腐蚀带来的危害。

3.1 合理选材

设计海洋环境下使用的燃气轮机时,在考虑加工水平、经济性以及保证相关性能(抗氧化性能、机械性能和金相稳定性等)的前提下,涡轮叶片尽量选用抗热腐蚀性能好的材料。镍基高温合金的蠕变强度比钴镍基高温合金高,但后者的高温氧化和热腐蚀的性能强于前者,所以,镍基和钴基高温合金分别适用于涡轮的动叶和静叶。适当提高镍基和钴基高温合金的铬含量可以增强其抗热腐蚀的能力。在镍基高温合金中加入微量的铈、镨、镧和钆等稀土元素,可以减少合金有害元素(氧、氮、硫)的含量,还能提高合金表层氧化膜的稳定性,增强抗高温氧化及热腐蚀的性能。

相对于传统的高温合金制造技术,一些新的材

料制造技术,如定向凝固合金、粉末冶金、细晶铸造、单晶合金等,不仅提高了涡轮叶片的使用温度和改善其高温性能,而且可以有效防止热腐蚀发生。美国在20世纪60年代就研制出典型的抗热腐蚀、高定向凝固合金DZ125。另一方面,用陶瓷、金属基/金属间化合物基复合材料、陶瓷基复合材料等耐热,防热腐蚀性能更好的新材料替代目前的高温合金,将成为燃气轮机高温材料的必然趋势,但在此之前还有一些技术问题需要解决。

3.2 采用进气净化装置

舰用燃气轮机的进气装置应具有净化进气的功能,以便在恶劣天气时减少进入燃气轮机气流通道的盐分,减轻热腐蚀。直升机用的燃气轮机可以安装进气分离器。这样一方面可以防止因微小粒子进入燃气轮机而破坏叶片的表面防护层,降低其防腐效果;另一方面,也可以减少进入燃气轮机气流通道的盐分。

3.3 采用热腐蚀防护涂层

在涡轮叶片表面施加防护涂层是隔绝燃气、防止热腐蚀发生的有效方法,也是目前得到广泛使用的方法。目前,叶片防护涂层已发展到第四代,由最初的渗铝、渗铝-硅等金属热扩散渗层、MCoAlY(M为Ni,Co或NiCo)包覆涂层发展为更先进的陶瓷热障涂层。

MCoAlY包覆涂层是目前应用最广泛的、防热腐蚀效果较好的涡轮叶片防护涂层。MCoAlY包覆涂层的制备方法有真空等离子喷涂、电子束物理气相沉积(EB-PVD)等,其中最好的方法是EB-PVD法。

陶瓷热障涂层是在MCoAlY包覆涂层的基础上发展的性能更好的防护涂层,其底层为MCoAlY粘接层,表层为ZrO₂陶瓷层。陶瓷层可显著提高涡轮叶片的工作温度,并且涂层有较低的表面粗糙度,具有较好的抗高温氧化性能以及优异的抗高温燃气冲刷性及抗热震性能,即使在1650℃高温下长期工作,其热稳定性和化学稳定性都很好,使用寿命也 longer。目前这种防护涂层已推广应用于涡轮的静叶和动叶。目前,陶瓷热障涂层的主要问题是热应力会引起涂层提早剥落。

3.4 维护措施

根据涡轮叶片热腐蚀的特点,相关的主要维护措施如下。

1) 科学合理地进行燃气轮机的清洗。这不仅可以有效防止燃气轮机机件的电化学腐蚀,而且可以减轻涡轮叶片的热腐蚀。同时,对延长燃气轮机寿命和确保燃气轮机长期工作中性能不会恶化也有十分显著的效果。具体的清洗周期和清洗方法可以根据具体机种和使用环境而定,制订出科学的维护规程。

2) 加强涡轮叶片的腐蚀监控。要对涡轮叶片的腐蚀状况进行全寿命跟踪监控,对叶片腐蚀及早发现、排除,对叶片要进行定期严格检查。要充分运用无损检测技术。燃气轮机翻修寿命不能只按工作小时数或起落次数来确定,而必须考虑使用的日历时间。

3) 尽可能地使用硫含量低的燃油,并且要保证燃油的清洁,要防止受到海水的污染。

4 结语

随着我国海洋活动的日益增多,研究燃气轮机涡轮叶片热腐蚀的重要性也愈显重要。除了要加强热腐蚀机理、材料和涂层等的理论和试验研究之外,更为重要的是要重视现役燃气轮机相关数据的积累,以及已有研究成果在现役和新研燃气轮机上的应用,并为之建立全寿命跟踪监控体系,以便建立有效的数据库。这不仅对研究工作十分重要,而

且可为未来燃气轮机防腐设计规范的制订提供必要的基础。

参考文献:

[1] WANHIL R J. High Temperature Gas Turbine Materials[M]. National Technical Information Service, 1987: 12—15.

[2] 赵德孜. 海洋环境对燃气轮机的影响及预防措施[J]. 航空维修专刊, 1987, 4(2): 22—27.

[3] WING R G, MCGILL I R. The Protect of Gas Turbine Blades [J]. Aircraft Engineering, 1981, 53(10): 21—23.

[4] 赵德孜. 燃气轮机的低温热腐蚀[J]. 航空制造工程, 1989(2): 15—16.

[5] 顾凯, 赵德孜. 海航现役发动机的腐蚀研究及对策[C]//中国航空学会动力专业 2000 年学术年会论文集. 2000, 274—278.(余不详)

[6] 隆小庆. 航空发动机高温部件热腐蚀机理的探讨[J]. 全面腐蚀控制, 2003(2): 9—13.

[7] 李云, 郭建亭, 袁超等. 镍基铸造高温合金 K35 的热腐蚀行为[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2005, 25(4): 250—255.

[8] 罗顺, 陈和兴. 高温镍基单晶合金 NiCoCrAlYTa 涂层的抗热腐蚀性能[J]. 材料保护, 2010, 43(3): 17—20.

(上接第 95 页)

Processes, 1991, 6(1): 87—115.

[5] MAHYSHEV V. Micro-arc Oxidation, A New Method for Strengthening Aluminum Surfaces[J]. Mateloberflache, 1995, 49(8): 606—608.

[6] 蒋百灵, 张先峰, 朱静. 铝、镁合金微弧氧化技术研究现状和产业化前景[J]. 金属热处理, 2004, 29(1): 23—29.

[7] 段关文, 高晓菊, 满红, 等. 微弧氧化研究进展[J]. 兵器材

料科学与工程, 2010, 33(5): 102—106.

[8] 孟光毅. 大功率微弧氧化电源[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.

[9] 梅建伟, 蒋云峰, 喻绍森. 一种数字化多自由度镁铝合金微弧氧化电源的研制[J]. 电源技术, 2010, 34(5): 502—505.

[10] 蒋百灵, 李均明. 铝镁合金微弧氧化处理技术的工程应用[J]. 新技术新工艺, 2010(2): 16—18.