文章编号:1001-2060(2007)05-0490-05

某型压气机叶片防护层耐蚀性研究

刘正发,徐 哲,张春梅

(中国船舶重工集团公司第七○三研究所 压气机设计室,黑龙江 哈尔滨 150036)

摘 要:采用磁控溅射技术在压气机叶片上溅射 TiN 层作为 叶片防护层,利用盐雾实验及电化学方法,研究了某型压气 机叶片材料及覆有 TiN 层后叶片耐腐蚀性能,通过失重法计 算出盐雾实验后试样腐蚀速率。根据曲线可以看出覆有 TiN 层的试样耐蚀性优于基体,对盐雾实验不同时间取出的试 件,在 3.5% (wt)NaCl 溶液中,进行电化学动电位扫描,根据 极化曲线数据,分析了不同盐雾腐蚀时间试样腐蚀电位变化 原因,验证盐雾实验结果。

关 键 词: 压气机叶片; TiN 涂层; 盐雾腐蚀;

中图分类号: TK 474. 8 文献标识码: A

引 言

压气机是燃气动力装置的重要组成部分,压气 机的使用性能将对燃气轮机的整体性能产生直接影 响。由于船舶长期在海洋环境中服役,压气机是大 气流经燃气动力装置的首要通道,叶片直接受到高 速、高压潮湿的海洋大气冲刷和腐蚀,其中由腐蚀造 成的损伤与失效尤为突出。压气机叶片等关键部件 的腐蚀损伤与失效,已经成为船舶燃气轮机的多发 性和危险性故障,不仅严重地影响了燃气轮机的发 能、寿命及可靠性,而且使维修费用大幅度增长。因 此研究叶片耐腐蚀性能将对高性能压气机设计、制 造、使用提供理论依据。

盐雾试验己被认为是模拟海洋大气对不同金属 (有保护涂层或无保护涂层)最有效的试验室加速腐 蚀试验方法^[1],因此针对某型压气机叶片,研究叶片 耐盐雾腐蚀性能及溅射 TiN 层后的叶片耐盐雾腐蚀 性能。通过腐蚀动力学曲线,评价了 TiN 层对叶片耐 腐蚀性能的能力,观察低倍腐蚀照片和点蚀部位扫描 照片,分析了叶片腐蚀发生过程,本工作侧重研究磁 控溅射涂层的保护性能和叶片基体的失效机制。

1 实验方法

用线切割机从某型压气机叶片根部切割试样, 尺寸为 12 mm× 12 mm× 3 mm, 经化学分析,叶片材 料为 1Cr11Ni2W2MoV 马氏体不锈钢, 共切割 20 片 试样。其中 10 片试样经抛光、超声波清洗、脱水等 工艺后直接进行盐雾试验; 另外 10 片试样在上面溅 射 TiN 层。

滅射 TiN 薄膜使用 JGP450—PECVD200 型高真 空磁控溅射与等离子体化学气象沉积装置。靶材选 用真空感应熔炼方法生产的纯度为 99.99%金属 Ti 靶, 尺寸为 Φ 60 mm × 3 mm。 工作气体 为纯度 99.99%的 Ar 气;反应气体为纯度 99.99%的 N₂ 气, 通过直流反应磁控溅射来沉积氮化钛薄膜,基片与 靶材之间的距离为 8.5 cm, 偏压为—80 V, 溅射室总 压为 1 Pa, 功率为 300 W。

盐雾试验采用 FQY010A 盐雾腐蚀实验箱,分别 将 10 片基体样和 10 片溅射样放入盐雾箱内。本试 验是模拟海洋大气环境,采取盐雾实验方法对叶片 所用材料和覆有 TiN 薄膜的试样进行耐腐蚀性能研 究,试验条件如下:

(1) 盐雾溶液:将化学纯的氯化钠溶于蒸馏水中,氯化钠的含量 50 ±5 g/L;

(2) pH 值: 用酸度计测量溶液的 pH 值, pH 值 为:6.5~7.2;

(3) 盐雾箱温度: 35±2 ℃;

(4) 盐雾沉降率控制范围: 每 80 cm² 面积上 1~2 mL/h;

(5) 试验周期:试验时间为连续喷雾 72 h,取样时间为 6、24、36、48、72 h,在规定的时间周期内试验不能中断。

试样表面腐蚀形貌观察使用 OLYMPUS PME3 型金相显微镜,并用 STEKEOSCAN 240 型扫描电镜 在更高的放大倍数下观察了试样表面的腐蚀形貌。

腐蚀速率通常可用失重法、深度法和电流密度 法来表示。本文采用金属失重法来测量金属腐蚀速

收稿日期: 2006—12—13; 修订日期: 2007—06—20

作者简介:12年後(1965-) 表。出东开阴人。中国船舶真干集团公司第七日三研究所高级工程师ghts reserved. http://www.cnki.net

率,即金属腐蚀程度的大小可用腐蚀前后单位面积 上试样质量的变化来评定。失重法是根据腐蚀后试 样质量的减少,来表征腐蚀速率,单位面积失重为:

 $V = (m_1 - m_2)/s$ (1) 式中: $V - 单位面积失重, g/m^2; m_1 - 试样腐蚀前的$ $质量, g; m_2 - 试样清除腐蚀产物后的质量, g; s-试$ 样表面积, m²。

带锈试样的极化曲线分析采用 M378 腐蚀电化 学测试系统,辅助电极为铂电极,参比电极为饱和甘 汞电极 (SCE),扫描速度为 0.2 mV/s,在室温下,对 盐雾腐蚀试验不同时间取出的试件,进行电化学动 电位扫描,测定带锈试样在 3.5% (wt) NaCl 溶液中 的极化曲线。

2 实验结果及讨论

- 2.1 试样表面腐蚀形貌
- 2.1.1 基体腐蚀形貌分析

图1~图5为基体材料6、24、36、48、72h不同时 段腐蚀形貌的照片。可以看出基体腐蚀6h形貌基 本没有变化;基体腐蚀24h面上出现点状的包鼓 起,其尺寸较小并且鼓包没有破裂;基体腐蚀36h



图 1 基体 腐蚀 6 h(×40)



图 2 基体腐蚀 24 h(× 40)

包有所长大并出现红锈,其为铁的腐蚀产物;基体腐蚀 48 h 包已经破裂,但没有剥落;腐蚀 72 h 后包破裂并且剥落,形成点蚀孔,孔中被铁的腐蚀产物充满。随着腐蚀时间的增加,材料的表面由光滑状态到鼓包,破裂,直至剥落后形成点蚀孔,材料腐蚀逐渐加剧。



图 3 基体腐蚀 36 h(×40)



图 4 基体 腐蚀 48 h(×40)



图 5 基体 腐蚀 72 h(×40)

图 6~图 8 为基体腐蚀 72 h 后拍摄的扫描电镜 照片,主要拍摄基体的点蚀孔的形貌。图 6 为基体 腐蚀 72 h 鼓包后的破裂图;图 7 为图 6 进一步放大 图,能看到腐蚀产物粘在基体上;图 8 为图 7 中坑底 部物质的放大图,同时看到坑底又一次鼓包。图中 腐蚀产物并没有剥落,但是腐蚀坑已经形成,并且具 有一定的深度;随着腐蚀时间的增加包底又发生鼓



图 6 基体点蚀坑



图7 基体点蚀坑



图8 基体点蚀坑

2.1.2 溅射涂层腐蚀形貌分析



图 9 溅射样腐蚀 6 h(×40)

图 9~图 14 为溅射涂层材料 6、24、36、48、72 h 不 同时段取出后用金相显微镜照相的腐蚀形貌。从图 中可以看出:溅射样腐蚀6h出现红色的铁锈,主要 是溅射涂层不均匀,局部发生腐蚀产生铁的腐蚀产 物; 溅射样腐蚀 24 h 出现点蚀孔; 溅射样腐蚀 36 h 以 上,表面都出现鼓包,包较小并且都没有破裂。可以

有长大和破裂。而溅射样腐蚀 24 h 出现点蚀孔主要 是由于此溅射涂层太薄,不均匀,即表面存在缝隙,夹 杂物等缺陷^[2~4]。这些缺陷有利于氯离子穿过 TiN 薄膜,使氯离子聚集,产生强烈导电感应的氯离子,取 代金属氧化物中的氧 形成可溶性氯化物 使金属溶 解,从而使其在较短的时间内产生点蚀。



图 10 溅射样腐蚀 24 h(×40)



图 11 溅射样腐蚀 36 h(×40)



图 12 溅射样腐蚀48h(×40)



图 13 溅射样腐蚀 72 h(×40)

看出溅射涂层总的趋势是材料只发生鼓包现象,并没。All rights reserved. http://www.cnki.net

从上面的分析可以看出,在 72 h内,溅射涂层 腐蚀形貌主要是出现了鼓包但没有破裂和剥落;基 体腐蚀形貌完成材料腐蚀整个过程,经过鼓包,长 大,破裂,最终剥落形成点蚀坑。溅射涂层面上点蚀 坑密度大于基体面上的点蚀坑密度,前者的电流密 度小于后者电流密度。由此可以推断溅射涂层比基 体的耐蚀性更好。

2.2 腐蚀速率测定

本试验采用失重法来测量叶片用钢基材试样和 覆有溅射涂层试样不同时段单位面积失重,计算出 的各值如表1所示。

表1 腐蚀速率的计算

时间/h	试样	腐蚀前质量	腐蚀后质量 <i>m₂/g</i>	$\Delta m = m_1 - m_2$	面积/ cm ²	单位面积
		<i>m</i> ₁ / g		/ g		失重/g°m ²
6	1	9.552 66	9. 552 27	0.000 39	1.12	3. 482 14
	6	9.761 14	9. 760 98	0.000 16	1.30	1. 230 00
24	2	9.802 67	9.802 04	0.000 63	1.20	5. 250 00
	7	10. 752 84	10. 752 38	0.000 46	1.16	3.965 52
36	3	10.058 14	10. 057 32	0.000 82	1.08	7. 592 59
	8	9.389 36	9.388 86	0.000 50	1.11	4. 504 50
48	4	10. 386 97	10. 386 11	0.000 86	0.986	8. 277 11
	9	10.807 90	10. 807 38	0.000 52	0.926	5.61555
72	5	10. 201 92	10. 200 09	0.001 83	1.20	15.25000
	10	10.772 18	10. 771 11	0.001 07	1.02	10. 490 19

根据表 1 可得腐蚀动力学曲线如图 14 所示。 从图中可以分析出,基体材料和覆有 TiN 薄膜溅射 涂层随时间的增加,腐蚀逐渐加剧,每一时段基体都 比溅射涂层单位面积失重要多,并且到盐雾实验后 期基体腐蚀失重曲线斜率比溅射涂层的斜率要大, 因此溅射涂层的耐蚀性要比基体的耐蚀性要好。



图 14 单位面积失重

2.3 盐雾试验取样的极化曲线分析

2.3.1 基体腐蚀后极化曲线分析

基体材料盐雾实验后,通过在室温下不同取样 时间的极化曲线可得出不同时间取出基体试样的腐 蚀电位,如表2所示。

根据表 2, 做时间和腐蚀电位折线如图 15 所

表 2 腐蚀电位

盐雾腐蚀时间/h	腐蚀电位/V
6	- 0. 22
24	- 0. 24
36	- 0. 64
48	-0.23
72	-0.34



图 15 基体材料腐蚀电位

从图 15 中可以看出,基体的腐蚀电位随着腐蚀 时间增长,先减小后增大,因此阴极和阳极之间电位 差随着时间增大而先增大后减小,从而腐蚀电流密 度随时间的变化为先增大后减小。在盐雾实验开始 阶段,腐蚀点密度较小,因此腐蚀电流密度较小,随 着腐蚀时间的延长,腐蚀点密度越来越大,从而腐蚀

亦?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

电流密度增大。盐雾实验到了后期,在材料的表面 形成了厚厚的腐蚀产物,阻碍腐蚀介质和基体的接 触,使腐蚀电流密度下降,最终导致基体腐蚀速度有 所减缓。

2.3.2 溅射涂层腐蚀后极化曲线分析

溅射涂层盐雾实验后,通过在室温下不同取样 时间的极化曲线可得出不同时间取出基体试样的腐 蚀电位,如表3所示。

表3 腐蚀电位

盐雾腐蚀时间/ h	腐蚀电位/ V
6	- 0. 21
24	- 0. 25
36	- 0 . 27
48	— 0 . 27
72	— 0. 18

-0.18 -0.20 电位/V -0.22 -0.24 -0.26 -0.28^L0 70 10 20 30 40 50 60 80 时间/h

根据表 3. 做时间和腐蚀电位折线如图 16 所

图 16 溅射涂层腐蚀电位

从图 16 中可以看出与基体腐蚀电位随时间变

化曲线比溅射涂层的腐蚀电位随着时间增长,变化 并不是很大。因此阴极和阳极之间电位差变化较 小,从而腐蚀电流密度变化不大。由于 TiN 薄膜耐 蚀性较好,从盐雾实验初期到盐雾实验后期,腐蚀仍 是局部腐蚀。加上部分点蚀坑被腐蚀产物所塞积, 使坑底基体和腐蚀介质相隔开,从而造成溅射涂层 的腐蚀电流变化较小。

3 结 论

TIN 能够提高压气机叶片在盐雾环境下耐腐蚀 性能,对基体起到了一定的保护作用。涂层具有较 好的稳定性,对基体的保护是一种机械阻挡作用。 涂层表面缺陷是涂层失效的主要原因,氯离子通过 这些缺陷到达金属的基体表面并积累到一定量时, 产生强烈的导电感应氯离子,使腐蚀环境恶化,随着 氯离子的进一步积累,点蚀得以发生。

参考文献:

- [1] 表面处理工艺手册编审委员会.表面处理工艺手册[M].上 海:上海科学技术出版社,1991.
- [2] MARCO J F, AGUDELO A C, GANCEDO J R, et al. Corrosion resistance of single TiN layers, Ti/TiN bilayers and Ti/TiN multilayers on iron under a salt fog spray (phohesion) test: an evaluation by XPS[J]. Surface and Interface Analysis, 1999, 27: 71-75.
- [3] CHEN B F, PAN W L, YU G P, et al. On the corrosion behavior of TiN-coated AISI D2 steel[J]. Surf Coat Technol, 1999, 111: 16-18.
- [4] BIN SUDIN M. LEYLAND A, JAMES A S, et al. Substrate surface finish effects in duplex coatings of PAPVD TiN and CrN with electroless nickel-phosphorus interlayers[J] Surf Coat Technol (Switzerland), 1996, 81; 215-218.

(编辑 伟)

运行保障

示。

喷水对压气机特性的影响

据《Tennome P ETHKa》 2006 年 12 月 号报道,把水喷入压气机叶片装置是改进燃气轮机工作参数的方法之一。近来,这种方法被广泛用于提高燃气轮机装置的输出功率、效率,也用来减少 NO_x 排放。

向压气机内喷水无论是对于在空气压缩过程中供其蒸发冷却,还是对于叶片装置的在线清洗都是有效的;它可以显著增加压气机的压比和效率。

研究了下列参数的影响:(1)喷水量;(2)喷水的位置;(3)喷入水滴的尺寸(等于和大于 5^µm);(4)叶片湿润部分的相对 高度。

提供了在燃气轮机装置压气机通流部分的水运动和蒸发过程计算研究的结果以及喷水对其主要工作参数的影响。

提供的有关把水喷入压气机级的影响的资料使得能够正确地组织喷水,以便通过压缩过程中的蒸发冷却获得最大的效果并使压气机在线清洗取得最佳效果。
(吉桂明 供稿)

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnkd

weaken the unsteadiness of the impeller and diffuser with the changing radian being only about 1/4 of the original magnitude. When the IGV assume a negative prewhirl angle, the unsteady influence brought about by the wake flow of the IGV is much smaller than that when the IGV take on a positive prewhirl angle. The unsteady effect arising from the wake flow of the impeller and potential-repercussion action of the diffuser, however, will be somewhat bigger than the case when the IGV have a positive prewhirl angle. **Key words:** inlet guided vane, impeller, diffuser, unsteady interaction, prewhirl angle, unsteadiness

某型压气机叶片防护层耐蚀性研究= A Study of the Corrosion-resistant Characteristics of the Blades of a Compressor and Their Protective Coatings[刊,汉]/LIU Zheng-fa, XU Zhe, ZHANG Chun-mei (Compressor Design Department, Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2007, 22(5). -490~494

By using magnetically-controlled sputter technology, a TiN layer was sputtered onto compressor blades to serve as a protective coating of the blades. Through a combination of salt-mist tests and an electrochemical method, the corrosion-resistant performance of the material of compressor blades was studied when the blades have been sputtered with a TiN layer. With the help of a weight-loss method, calculated was the corrosion rate of the test piece after the salt-mist test. From the curve, it can be seen that the corrosion-resistant performance of the test piece covered with a TiN layer is better than that of the base material. In a 3.5% (by weight) NaCl solution, an electrochemical dynamic potential scan was conducted of the test pieces sampled at different times during the salt-mist test. Based on the data of polarization curves, the authors have analyzed the causes leading to changes in corrosion potential of the test pieces undergoing different salt-mist corrosion durations, thus verifying the salt-mist test results. **Key words:** compressor blade, TiN coating, salt-mist-caused corrosion, blade corrosion

变几何多级轴流压气机全工况性能预测模型=A Model for the Prediction of the Full-load-operation Performance of Variable-geometry Multi-stage Axial Compressors[刊,汉]/CUI Ning, WANG Bing-shu, LI Bin, et al (Automation Department, North China Electric Power University, Baoding, China, Post Code: 071003)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(5). — 495~499

Based on the comprehensive characteristic curves of compressor stages and by using a stage-by-stage superposition method, the authors have developed a model for the prediction of the full-load-operation performance of a variable geometry multistage axial compressor incorporating adjustable stationary blades. During the calculation different stage characteristic curves at a low rotating speed were used for each compressor stage to establish the performance calculation module of each stage. On the basis of rational assumptions, derived was the influence of the change in adjustable inlet guide vane (IGV) angles of the compressor on its performance based on the speed triangles of moving blades. The introduction of the aerodynamic functions and specific-heat-variable calculation formulae has simplified the calculation process, enhancing the calculation accuracy of the model. The calculation examples show that the model lends itself to practical use to a certain extent, basically reflecting the full-load-operation characteristics of the compressor and exhibiting more or less accurately the effect of IGV regulation on the performance of the whole compressor. As a result, the foregoing can well provide reliable data for the performance calculation of compressors during the development of a dynamic simulation model for modern large-sized gas turbines. **Key words**; variable geometry, axial-flow compressor, stage characteristics, model, simulation

电站给水泵汽轮机头部流场的数值计算与结构改进= Numerical Calculation of the Flow Fields in the Head Portion of a Steam Turbine Destined for Feedwater Pumps in Power Plants and Related Structural Improvements [刊,汉] /JI Chun-jun, ZHOU Zi-yun, (College of Energy Source and Power, Dalian University of Technology, Dalian, China, Post Code, 116023)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, -- 2007, 22 (5), -- 500, ~ 503, China, Post Code, 116023)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, -- 2007, 22 (5), -- 500, ~ 503, China, Post Code, 116023)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, -- 2007, 22 (5), -- 500, ~ 503, China, Post Code, 116023)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, -- 2007, 22 (5), -- 500, ~ 503, China, Post Code, 116023)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, -- 2007, 22 (5), -- 500, ~ 503, China, Post Code, 116023)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, -- 2007, 22 (5), -- 500, ~ 503, Power, -- 2007, 22 (5), -- 500, ~ 503, Power, -- 2007, -- 500, ~ 503, Power, -- 500, ~ 500, ~ 503, Power, -- 500, Power, Power, -- 500, ~ 503, Power, -- 500, ~ 5