

汽轮机末级叶片抗水蚀纳米涂层的设计与制备

Design and Deposition of Erosion Resistance Nanosuperlattice Coatings Used in Last Blades of Steam Turbine

谢国胜¹, 尹志民¹, 丁辉², 杨兵²

(1 中南大学, 长沙 410083; 2 武汉大学, 武汉 430072)

XIE Guo-sheng¹, YIN Zhi-min¹, DING Hui², YANG Bing²

(1 Center South University, Changsha 410083, China;

2 Wuhan University, Wuhan 430072, China)

摘要: 针对汽轮机末级叶片水蚀失效的机理及复杂的运行工况, 设计了硬度高、韧性好、与基体结合强度高的多层纳米复合涂层, 选用多弧-磁控溅射镀膜机在末级叶片 2Cr13 材料基体上成功地制备出 CN_x/TiN 多层复合涂层。

关键词: 水蚀; 纳米; 涂层

中图分类号: O73 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381 (2003) 10-0037-03

Abstract: This investigation aimed at the failure mechanism of liquid impact erosion occurred on the last blades of steam turbine and the complicated operation status in the last blades of steam turbine, the multi-layer nanosuperlattice composite coatings with high hardness, fine tenacity and favorable strength combined with substratum had been designed. Finally, the CN_x/TiN multi-layer composite coatings were deposited onto 2Cr13 stainless steel substratum usually used the last blades of steam turbine by combination of DC reaction magnetron sputtering deposition with multi-arc plating.

Key words: erosion; nanosuperlattice; coating

汽轮机每级叶片的工作温度都不相同, 第一级叶片所处的温度最高, 普通机组为 535℃, 大机组为 580℃左右; 随后由于蒸汽做功, 温度逐步降低, 直到末级叶片降到 100℃以下。

大功率凝汽式汽轮机末级排汽湿度总是比较大的, 一般高达 9% ~ 14%, 末级叶片周速度在 300m/s 以上。末级动叶后汽流中携带大量的水滴, 回流的蒸汽携带的水滴冲击高速旋转的动叶片下半部的出汽边。产生大范围的回流, 甚至达到叶高的 2/3 以上。对于这类叶片, 出汽边的水冲蚀就变得非常严重。

一般情况下, 叶片发生水蚀的区域为顶部进气边和根部出气边, 其外观为蜂窝状, 边缘为锯齿形, 严重时出现缺口。汽轮机末级叶片水蚀所形成的锯齿状毛刺会造成应力集中和减小叶型根部截面的面积, 影响叶片的振动特性, 极大地降低了叶片的强度, 使叶栅的气动性能恶化, 级效率下降, 叶片的严重水蚀增加了断裂的危险性。

1 涂层结构设计

叶片材料在受水滴冲蚀时, 疲劳机制占主导地位, 其与叶片表面状况及工作介质等有关。所以在涂

层设计时, 首先是涂层的硬度要高, 以抵抗水滴冲击时产生的巨大应力, 防止叶片表面产生塑性变形; 其次, 涂层与叶片基体金属的结合强度要高, 以免在水冲击时涂层从叶片表面脱落; 第三, 涂层的韧性好, 防止受水滴冲击时在巨大的应力作用下发生脆性断裂。

从 MIN KU LEE^[2]等人对单层 TiN 涂层抗水蚀研究结果表明, TiN 涂层在受到水滴冲蚀时, 涂层与基体的界面能使应力衰减和引起应力波反应, 即使应力反射和透射, 仍具有比钴基合金更好的抗水蚀性能。此外, Michael Bromark^[3]以及 D. W. Wheeler^[4]通过对多层膜诸如 Ti/TiN 的研究表明, 在相同的条件下, 多层结构涂层具有比单层结构涂层更高的硬度、更好耐腐蚀性、耐磨损性、韧性以及抗冲击能力。一种提高膜层的断裂强度的可行方法是采用交替沉积两种性能或成分不同的材料形成层状结构, 如图 1 所示模型。在水滴法向载荷作用下, 多层膜比单层膜内部产生的弯曲应力要小得多, 交替沉积的膜层可提供一剪切应变区, 硬而脆的膜层在法向载荷作用下弯曲而不发生脆性断裂。

根据涂层应力分布特点, 本研究采用硬度较高的

氮化碳和相对较软的氮化钛所组成的纳米超晶格涂层。纳米超晶格涂层的结构如图2所示。

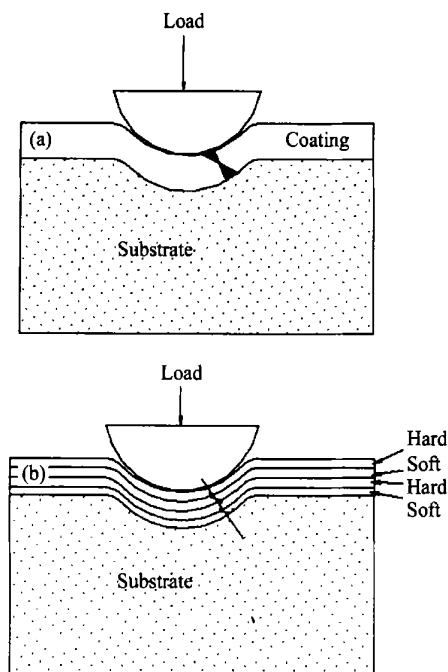


图1 单层膜 (a) 与多层膜 (b) 受冲击载荷时的结构变形及应力分布

Fig. 1 Structure deformation stress distribution of single-layer coatings (a) and multi-layer coatings (b) under the impacting load

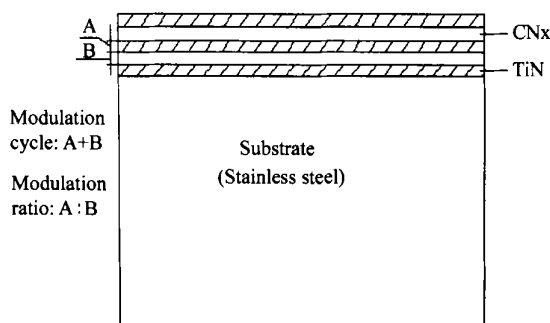


图2 纳米超晶格涂层结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of superlattice coating

2 基体材料的选择

本实验基体材料采用国内外广泛使用的 2Cr13 叶片用钢, 其属于 Cr12% 型马氏体耐热钢。其热处理工艺为: 加热 950~1000 油淬+ 700~750 回火, 组织为回火索氏体。其化学成分 (质量分数/%): C 0.16~0.25, Cr 12~14, Si 1.0, Mn 1.0, Ni 0.6, S 0.03, P 0.035, 线膨胀系数为 $10.9 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。

热导率 100 为 26.8W/(m·k), 室温弹性模量

为 22.3GPa, 切变模量为 85.8MPa, 泊松比为 0.297, 密度为 $7.75\text{g}/\text{cm}^3$, σ_b 为 655~735MPa, $\sigma_{0.2}$ 为 490~590MPa, δ_5 为 15%~16%, δ_{10} 为 47%~55%, A_k 47~55kJ。

3 涂层的制备

本试验采用的镀膜装置为多弧-磁控溅射系统, 其结构如图3所示, 整套装置是在国营南光机器厂 JC600 型磁控溅射装置的基础上设计、改装而成的。共有三个阴极, 改装后一个作多弧靶 (Ti 靶), 另外两个作磁控溅射靶 (碳靶)。镀膜装置采用多弧-磁控溅射镀膜机。为了增大磁场强度, 溅射靶背面边磁体采用 NbFeB 硬磁材料, 实测磁场为 0.4T, 靶背面中心为软磁材料, 实测磁场为 0.12~0.15T。相邻阴极异性磁极相对, 构成闭合非平衡磁场。

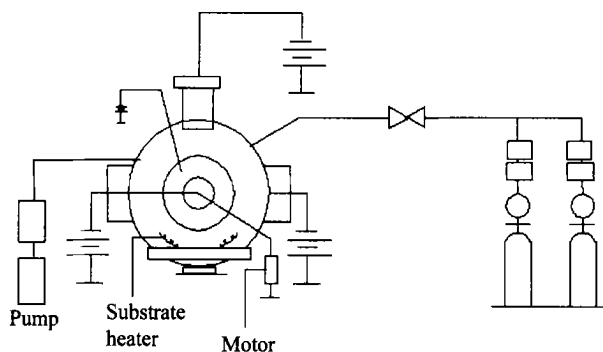


图3 多弧-磁控溅射装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of multi-arc ion plating and magnetron sputtering apparatus

为了控制和调节流向衬底的正离子的密度和能量, 在距靶面 3cm 处设置负偏置栅网电极, 栅极电压 0~1000V 可调。

涂覆中同时启动石墨靶和钛靶, 随着衬底的转动, 在衬底上生长出 CN_x/TiN 复合交替膜。工作真空为 0.5~1.0Pa, 工作气体为 N_2 和 Ar_2 , 流量比 N_2/Ar_2 由质量流量计控制, 衬底转速可调, 衬底负偏压和磁控溅射的溅射电压均为 0~1000V 连续可调。沉积参数如下: 沉积压力为 0.5~1.0Pa; 氮气流量为 50mL/min; 氩气流量为 30~40mL/min; 衬底转速为 16~22r/min; 衬底加热功率为 3~4kW; 碳靶溅射电压为 550~600V; 碳靶溅射电流为 3~4A; 钛靶弧电压为 18~24V; 钛靶弧电流为 40~50A。衬底材料用数控线切割机床切割成 $20\text{mm} \times 10\text{mm} \times 3\text{mm}$ 的样品, 经预磨、抛光和严格的清洗处理后放入多弧-磁控溅射系统中沉积 CN_x/TiN 涂层。为了测试方便, 还放置 Si 片同时沉积。

4 涂层的组成及结构

氮化碳的结晶取决于 TiN 的质量, 多弧源的引入, 使 TiN 的沉积速度比磁控溅射沉积 TiN 的速率提高 2 倍以上, 同时改善了 TiN 的质量。

从粉末 X 衍射卡中查出不同 d 值对应的物相, 发现在涂层中存在 TiN、立方相的 CN_x , $-CN_x$, Ti_2N 等。

5 结论

本研究针对汽轮机末级叶片水蚀失效的机理及复杂的运行工况, 在探讨汽轮机末级叶片水蚀失效机理的基础上, 设计了抗水蚀多层纳米涂层, 采用多弧-磁控溅射沉积法在末级叶片 2Cr13 基体上成功制备了 CN_x/TiN 复合纳米涂层,

参考文献

- [1] 鄢宇鹏, 孙弼, 蔡颐年. 汽轮机动叶片水蚀问题的研究 [J]. 汽轮机技术, 1994, 36 (5): 305-315.
- [2] Min Ku Lee, Whung Whoe Kim, Chang Kyu Rhee, et al. Investigation of liquid impact erosion for 12Cr steel and Stellite 6B [J]. Journal of Nuclear Materials, 1998, 257: 134-144.
- [3] Michael Bromark, Mats Larsson, Per Hedenqvist, Sture Hogmark. Wear of PVD Ti/TiN multilayer coatings [J]. Surface and Coatings Technology, 1997, 90: 217-223.
- [4] WHEELER D W, WOODR J K. Erosive wear behaviour of thick chemical vapor deposited diamond coatings [J]. Wear, 1999, 225-229: 523-536.

收稿日期: 2003-07-28; 修订日期: 2003-08-18

作者简介: 谢国胜 (1968-), 男, 中南大学在职博士, 研究方向为材料物理与化学, 湖南省电力试验研究所金属室副主任, 高级工程师, 联系地址: 湖南省电力试验研究所金属室 (410007)。

* * * * *

(上接第 10 页)

小, 由 (1) 式知 E 值增大。由该公式可知在应变一定的情况下, 基体开裂应力的变化可影响 E 的大小。在不同温度间比较时, 由于基体开裂应力与残余应力有

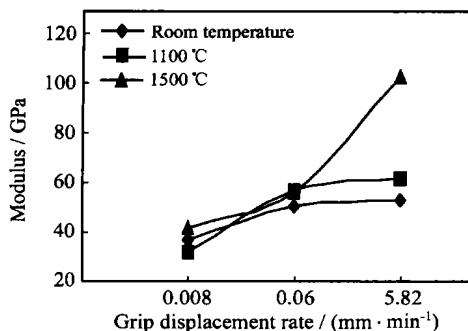


图 5 夹头位移速率对初始弹性模量影响

Fig. 5 Grip displacement rate vs. initial

一定的联系。提高 σ_{mc} 可以通过改变材料中各组分的性能, 致密度及界面性质, 最大的影响当属改变基体中的轴向残余应力 σ_{res} [5]。通过改变基体中的残余应力来提高基体开裂应力做法最明显的例子就是预应力混凝土构件。以制备温度为分界点, 材料中的残余应力从降低基体开裂应力到提高开裂应力过渡, 因此在高于 1100 °C 下试样的初始弹性模量有明显的上升。

3 结论

(1) 室温条件下材料的断裂应力随变形速率的增大而增加; 1500 °C 断裂应力随变形速率的增大而减小; 1100 °C 条件下断裂应力基本不随变形速率而改变。

(2) 随着加载速率的提高, 断裂应变逐渐减小, 而初始弹性模量却逐渐增加。在各个温度下都呈现这一相同的规律。

参考文献

- [1] DIX D M and PETTY J S. Aircraft technology gets a second wind [J]. Aerospace America, 1990, 7.
- [2] NASLAIN R. Thermostructural ceramic matrix composites: an overview [A]. Advanced structural and functional materials [C]. 1991, Berlin: Springer-Verlag, 51-89.
- [3] LIPETZKY P, DVORK G J and STOLOFF N S. Tensile properties of a SiCf/SiC composite [J]. Material Science and Engineering, A2. 1996, 16: 11-19.
- [4] HOLMES J W, PARK Y H and JONES J W. Tensile creep and creep-recovery behavior of a SiC-fiber-Si₃N₄-matrix composite [J]. J Am Ceram Soc, 1993, 76 (5): 1281-1293.
- [5] EDGAR L C and CHRISTIANA M R. On the matrix cracking stress and the redistribution of internal stresses in brittle-matrix composites [J]. Materials Science and Engineering, 1998, A250: 270-278.
- [6] CHO C, HOLMES J W, BARBER J R. Distribution of matrix cracks in a uniaxial composite [J]. J Am Ceram Soc, 1992, 75 [2]: 316-324.
- [7] 杜善义, 王彪. 复合材料细观力学 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [8] Gerald Camus, Laurent Guillaumat and Stéphane Baste. Development of Damage in a 2 D Woven C/ SiC Composite under Mechanical Loading: I Mechanical Characterization [J]. Composites Science and Technology, 1996, 56: 1363-1372.
- [9] Mechanical Loading: I Mechanical Characterization. Composites Science and Technology, 1996, 56: 1363-1372.

收稿日期: 2003-07-28; 修订日期: 2003-08-18

作者简介: 罗国清 (1980-), 男, 西北工业大学材料学在读硕士, 研究方向为材料的结构与性能, 联系地址: 西北工业大学材料科学与工程学院 547 信箱 (710072)。