

# 汽轮机末级动叶片

## 水蚀损伤修复与防护试验研究

李巍<sup>1</sup>, 李太江<sup>1</sup>, 王绍东<sup>2</sup>, 刘庆伏<sup>3</sup>, 王博<sup>1</sup>

1. 西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710032

2. 华能丹东电厂, 辽宁 丹东 118300

3. 华能上安电厂, 河北 石家庄 050310

**[摘要]** 基于电厂汽轮机末级动叶片水蚀损伤机理, 对受损叶片进行手工钨极氩弧焊(GTAW)修复, 并对焊接接头的组织性能进行试验。结果表明, 焊缝硬度满足使用要求, 焊接接头力学性能优良, 焊接接头抗高周疲劳性能满足叶片工况要求。为了提高叶片抗水蚀性能, 延长叶片使用寿命, 对比分析了叶片超音速火焰喷涂 NiCr 和 WC-Co 金属陶瓷 2 种不同涂层的组织结构、机械性能、热震性能、磨粒磨损及冲蚀磨损性能。与 WC-Co 涂层相比, NiCr 涂层具有优异的耐磨性能及抗冲蚀性能, 可作为耐水蚀涂层应用在汽轮机末级动叶片上。

**[关键词]** 汽轮机; 末级动叶片; 水蚀; 焊接修复; 超音速火焰喷涂; NiCr 涂层; WC-Co 涂层

**[中图分类号]** TK263.3; TG17

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1002-3364(2011)01-0040-05

**[DOI 编号]** 10.3969/j.issn.1002-3364.2011.01.040

### TEST STUDY ON REPAIR AND PROTECTION FOR WATER EROSION DAMAGE OF FINAL-STAGE BLADES IN STEAM TURBINES

LI Wei<sup>1</sup>, LI Taijiang<sup>1</sup>, WANG Shaodong<sup>2</sup>, LIU Qingfu<sup>3</sup>, WANG Bo<sup>1</sup>

1. Xi'an Thermal Power Research Institute Co Ltd, Xi'an 710032, Shaanxi Province, PRC

2. Huaneng Dandong Power Plant, Dandong 118300, Liaoning Province, PRC

3. Huaneng Shang'an Power Plant, Shijiazhuang 050310, Hebei Province, PRC

**Abstract:** Based on the mechanism of water erosion damage occurred on the final-stage blades in steam turbines, the damaged blades have been repaired by using gas tungsten arc welding (GTAW), and the microstructure performance of welded joints being tested. Results show that the hardness of weld joints satisfies the requirements in application, the mechanical properties of weld joints is good, the high-cycle fatigue resistant behavior of the weld joints can meet the requirement of blades in service. In order to enhance the water erosion resisting performance of said blades to lengthen their service life, the microstructure, the mechanical properties, the thermal shocking behavior, the abrasive wear and erosion damage properties of two different coatings NiCr and WC-Co ceramets sprayed using high speed oxygen fuel have been compared and analysed. Compared with WC-Co coatings, the NiCr

收稿日期: 2010-10-26

基金项目: 中国华能集团科技项目(HNKJ06-G22)

作者简介: 李巍(1979-), 男, 重庆江津人, 工程师, 从事电站材料焊接修复与表面工程技术研究。

E-mail: liwei@tpri.com.cn

ceramet coating has excellent resistance to abrasion and erosion, it can be used on final - stage blades in steam turbines as water - resistant coatings.

**Key words:** weld repair; high speed oxygen fuel spraying; NiCr ceramet coating; WC - Co coating

汽轮机末级动叶片工作在含有水滴的湿蒸汽中, 在蒸汽作用力、激振力及湿蒸汽所携带水滴冲刷的共同作用下, 极易遭到水蚀。末级动叶片发生水蚀的区域一般为顶部进汽边和根部出汽边, 其表面为蜂窝状, 边缘为锯齿形, 严重时出现缺口, 破坏叶片型线。叶片水蚀后不仅降低了汽轮机的热效率, 而且极易在水蚀区域造成应力集中萌生裂纹, 如不及时加以修复与防护, 叶片水蚀损伤扩展可能会导致叶片的断裂失效, 造成机组设备损坏的严重事故<sup>[1]</sup>。为此, 本文采用手工焊接仿形方法修复水蚀叶片, 并在其表面应用超音速火焰喷涂技术制备耐水蚀涂层。

## 1 焊接修复

### 1.1 试验材料及焊接工艺参数

试验选取末级动叶片常用的 12%Cr 型马氏体不锈钢 2Cr13 钢作为母材, 规格为  $d150\text{ mm} \times 7\text{ mm}$ , 采用单边  $30^\circ$  V 形坡口。由于 12%Cr 型马氏体不锈钢含碳量较高, 具有较高的室温强度, 可焊性较差, 焊接时易出现冷裂纹, 焊接过程需控制焊前预热、焊接线能量及冷却速度<sup>[2]</sup>。因此, 试验选择与母材金属化学成分完全不同的镍基奥氏体焊材 ST - 82, 降低焊缝强度, 提高焊缝塑韧性, 以防止裂纹产生, 且无需焊后热处理, 焊丝直径为 1.6 mm。焊接方法为手工钨极氩弧焊(GTAW), 焊接工艺参数见表 1。

表 1 GTAW 焊接工艺参数

焊接工艺参数	根焊	填充焊
焊接电流/A	80~90	90~100
焊接电压/V	12~15	14~17
焊接速度/mm · min <sup>-1</sup>	25~35	55~65
焊前预热/℃	100~130	
层间温度/℃	100~130	
氩气纯度/%	99.99	
正面氩气流量/L · min <sup>-1</sup>	10	
背面氩气流量/L · min <sup>-1</sup>	10	
焊接位置	平焊(1G)	

### 1.2 焊接接头试验分析

#### 1.2.1 微观组织

图 1、图 2 分别为母材及热影响区的金相组织。由图 1、图 2 可见, 试样及热影响区金相组织为回火马氏体。焊缝、熔合区组织分别如图 3、图 4 所示。焊缝为单相奥氏体组织, 呈树枝状生长。单相奥氏体组织具有较好的塑性, 有利于防止产生冷裂纹。焊接接头中未发现显微裂纹及过烧组织<sup>[3-4]</sup>。

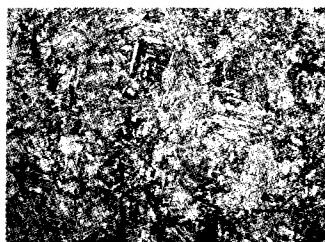


图 1 母材组织 400×

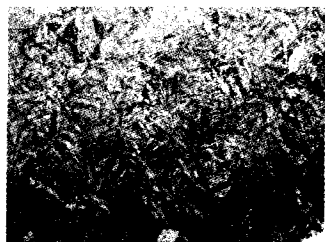


图 2 热影响区组织 400×



图 3 焊缝组织 400×



图 4 熔合区形貌 200×

### 1.2.2 显微硬度

焊接接头显微硬度曲线如图5所示。显微硬度测试结果表明,焊缝硬度与母材硬度相当,最大显微硬度为210 HV0.3,焊缝硬度满足使用要求。

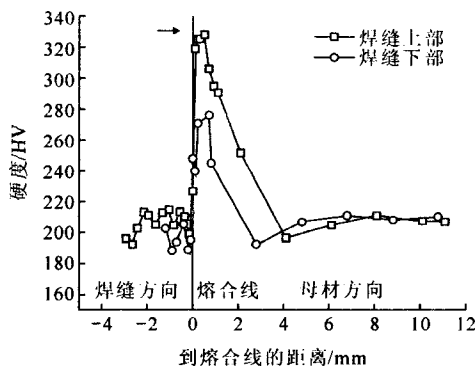


图5 焊接接头显微硬度

由图5可见,焊缝上部硬度较焊缝下部硬度偏高,这与多层多道焊工艺有关,前层(道)对后层(道)柱状晶生长有强化作用,而后层(道)对前层(道)有回火晶粒细化作用,提高了焊缝组织的致密性。

### 1.2.3 力学性能

焊接接头力学性能试验结果如表2所示。

表2 焊接接头力学性能

$R_{p0.2}$ 均值 /MPa	$R_m$ 均值 /MPa	$A_{kv}$ 平均值/J 焊缝	$A_{kv}$ 平均值/J 热影响区	弯曲试验 结果
593	760	94.4	74.2	面弯、背弯 180°无裂纹

焊接接头抗拉强度高达760 MPa,屈强比(屈服强度/抗拉强度)为0.78,屈强比较大。同时,焊缝及热影响区冲击吸收功分别高达94.4、74.2 J,冲击韧性较高,焊接接头力学性能优良。

### 1.2.4 疲劳试验

2Cr13叶片用钢焊接接头和母材疲劳寿命S-N曲线如图6所示。疲劳试验结果表明,母材在循环 $1 \times 10^7$ 次的条件疲劳极限为486 MPa,焊接接头条件疲

劳极限为438 MPa,焊接接头抗高周疲劳性能为母材的90.1%,能够满足叶片运行工况要求。

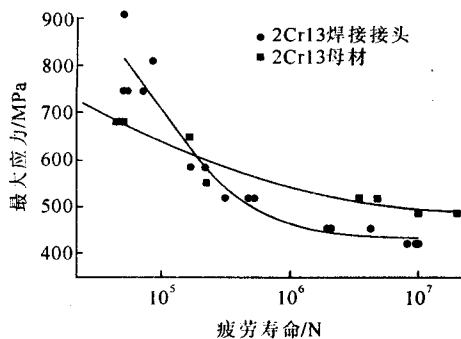


图6 焊接接头疲劳寿命S-N曲线

## 2 超音速火焰喷涂试验

喷涂材料采用团聚烧结合 NiCr 金属陶瓷粉末和粉碎烧结合 WC-Co 金属陶瓷粉末,粉末粒度分布范围为 $46 \sim 60 \mu\text{m}$ 。图7、图8分别为 WC-Co 粉末和 NiCr 粉末的表面形貌。喷涂工艺参数见表3。

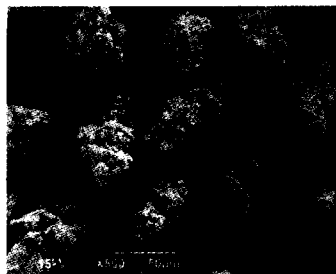


图7 WC-Co 粉末表面形貌



图8 NiCr 粉末表面形貌

表3 超音速火焰喷涂工艺参数

涂层类别	氧气流量 / $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	丙烷流量 / $\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$	氮气流量 / $\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$	送粉量 / $\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$	喷枪移动速度 / $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	喷涂距离 /mm
WC-Co 涂层	10	1 400	1 200	45	400	180
NiCr 金属陶瓷	13	1 100	1 100	50	600	180

## 2.1 涂层微观组织

超音速火焰喷涂 NiCr 金属陶瓷涂层显微组织如图 9(a)、图 9(b) 所示。涂层中存在的含量较高、颗粒细小、均匀分布的碳化物有利于提高涂层的抗磨损性能和抗冲蚀性能。从图 9(b) 可以看出, NiCr 涂层与基体 2Cr13 结合非常紧密, 检测结果显示涂层孔隙率仅为 0.5%。图 10(a) 为 WC-Co 金属陶瓷涂层的组织结构, 碳化物粒子呈多角状弥散分布在涂层粘结相, 有利于提高 WC-Co 涂层的耐磨粒磨损和冲蚀磨损性能<sup>[5]</sup>。由图 10(b) 可以看出, 涂层与基体 2Cr13 结合较为紧密, 涂层中存在少量孔隙, 检测结果显示涂层孔隙率为 1.6%。

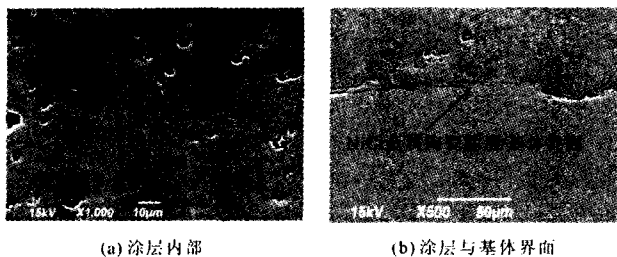


图 9 NiCr 金属陶瓷涂层内部及涂层与基体界面组织结构

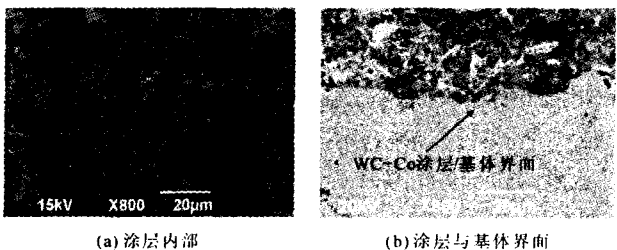


图 10 WC-Co 陶瓷涂层内部及涂层与基体界面组织结构

## 2.2 涂层机械性能

涂层结合强度是评价涂层性能的重要指标。较高的涂层结合强度增强了涂层与叶片的附着能力, 提高了涂层抵抗水滴、固体颗粒冲蚀的能力。表 4 为涂层结合强度测试结果。由表 4 可见, 超音速火焰喷涂 WC-Co 金属陶瓷涂层结合强度平均值为 65.0 MPa, NiCr 金属陶瓷涂层结合强度平均值高达 70.7 MPa。

表 4 涂层结合强度测试结果

涂层	测试结果/MPa					结合强度均值/MPa
	1	2	3	4	5	
WC-Co 金属陶瓷	69.1	66.7	62.2	65.8	61.3	65.0
NiCr 金属陶瓷	71.3	72.4	68.3	74.0	67.4	70.7

涂层硬度的大小表征涂层的耐磨性和抗冲蚀性, 表 5 为涂层的显微硬度测试结果。WC-Co 金属陶瓷涂层、NiCr 金属陶瓷涂层和 2Cr13 基体平均显微硬度值分别为 1 311.36 HV0.3, 748.66 HV0.3 和 216.00 HV0.3, 超音速火焰喷涂制备的 2 种涂层显微硬度为 2Cr13 基体的 3~6 倍。

表 5 涂层显微硬度测试结果

项目	平均值 /HV0.3	最大值 /HV0.3	最小值 /HV0.3	试验次数 /次
WC-Co 金属陶瓷涂层	1 311.36	1 462.60	1 159.80	9
NiCr 金属陶瓷涂层	748.66	987.45	682.98	9
2Cr13 基体	216.00	219.00	213.00	9

## 2.3 涂层热震试验

涂层热震试验结果显示, NiCr 金属陶瓷涂层完好无剥落, 这说明 NiCr 金属陶瓷涂层具有优异的抗热疲劳性能及较强抗裂纹扩展能力, 而 WC-Co 金属陶瓷涂层经热震后与基体剥落。图 11 为 WC-Co 金属陶瓷涂层在 540 °C 热震失效后表面 SEM 形貌。由图 11 可见, WC-Co 金属陶瓷涂层失效形式为高温急冷条件下形成的热应力, 使涂层与基体发生剥离反应产生微裂纹, 在循环应力作用下, 涂层微裂纹扩展形成细小颗粒脱落, 最终导致涂层整体剥离脱落。WC-Co 金属陶瓷涂层在 450 °C 以上会产生分解, 导致涂层整体粉碎失效<sup>[6]</sup>, 因此 WC-Co 金属陶瓷涂层只能适用于 450 °C 以下工况条件。

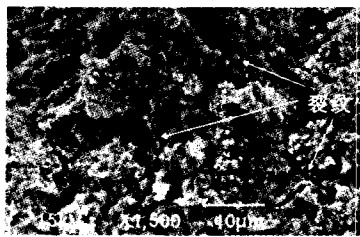


图 11 WC-Co 金属陶瓷涂层在 540 °C 热震失效后表面 SEM 形貌

## 2.4 涂层磨粒磨损性能

磨粒磨损试验结果如图 12 所示。试验结果表明, 超音速火焰喷涂技术制备的 2 种涂层具有优异的耐磨性能, 其中 NiCr 金属陶瓷涂层耐磨粒磨损性能最佳, 2 种涂层的耐磨粒磨损性能为 2Cr13 基体的 6~12 倍。

## 2.5 涂层冲蚀磨损性能

图 13 为不同涂层冲蚀磨损失重对比。由图 13 可见,WC-Co 涂层与 NiCr 涂层冲蚀磨损失重差别不大,两种涂层均具有优异的抗冲蚀性能。

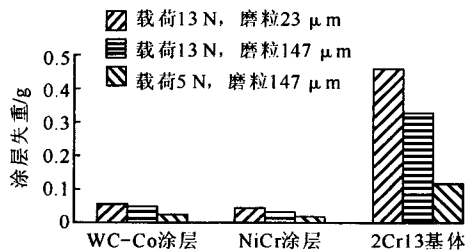


图 12 涂层与基材磨粒磨损失重对比

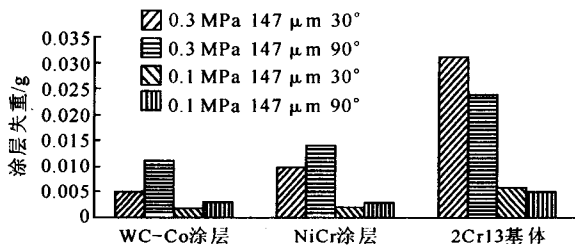


图 13 涂层冲蚀磨损失重对比

## 3 结论

对发生水蚀而断裂的末级动叶片的焊接修复试验结果表明,焊缝硬度及抗疲劳性能满足叶片工况要求。为了提高叶片抗水蚀性能,延长叶片使用寿命,采用超音速喷涂技术制备耐水蚀涂层,对 WC-Co 与 NiCr

涂层的试验结果表明,NiCr 金属陶瓷涂层具有良好的涂层结合强度、耐磨粒磨损性能、抗冲蚀性能和优于 WC-Co 金属陶瓷涂层的抗热疲劳性能及较强的抗裂纹扩展能力,可作为汽轮机末级动叶片焊接修复后喷涂防护的首选涂层材料。采用“焊接仿形修复”和“HVOF 耐水蚀涂层制备”相结合的汽轮机末级叶片水蚀损伤修复与防护技术,于 2008 年 10 月对华能丹东电厂 1 号机组的 140 片给水泵汽轮机低压末级动叶片及 2009 年 9 月对华能上安电厂 1 号机组 188 片汽轮机低压末级动叶片进行了现场焊接修复与喷涂防护,至今汽轮机各项运行技术指标良好。

### [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):305-310.
- [2] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册(第 2 卷)[M]. 北京:机械工业出版社,2001:407-408.
- [3] A K Bhaduri, T P S Gill, S K Albert, et al. Repair welding of cracked steam turbine blades using austenitic and martensitic stainless-steel consumables[J]. Nuclear Engineering and Design, 2001(206):249-259.
- [4] 王香云,尉世凯. 马氏体不锈钢低匹配焊接接头动态断裂韧性研究[J]. 焊接技术,2006,35(6):58-61.
- [5] W J Jarosinski, M F Gruninger, C H Londry. Characterization of Tungsten Carbide Cobalt Powder and HVOF Sprayed Coatings[C]. Proc of the 6th NTSC. Anaheim (CA), 1993:153-157.
- [6] 张文钺. 焊接冶金学[M]. 北京:机械工业出版社,1996:117-127.

(上接第 22 页)

算程序。用该方法对文献[5]提供的算例进行了不确定度评定,结果与算例给出的合成误差非常接近,表明采用蒙特卡罗数值模拟法计算锅炉热效率测量不确定度简单而有效。在此基础上,分析了影响锅炉热效率不确定度的主要因素,表明排烟温度和入炉煤低位发热量、入炉煤灰分、飞灰含碳量、排烟含氧量以及飞灰份额等参数的误差变化对锅炉热效率不确定度的影响较大,在测试中应采取措施着重减小这些参数的测量误差。

### [参 考 文 献]

- [1] JJF 1059—1999, 测量不确定度评定与表示[S].
- [2] BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPA Pand OIML, Guide to the expression of uncertainty in measurement[S].
- [3] BIPM/JCGM, Evaluation of measurement data - Supplement 1 to the Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement - Propagation of distributions using a Monte Carlo method[S].
- [4] 王伟,宋明顺,陈意华,等. 蒙特卡罗方法在复杂模型测量不确定度评定中的应用[J]. 仪器仪表学报,2008,29(7):1446-1449.
- [5] GB 10184—88, 电站锅炉性能试验规程[S].