

船用辅汽轮机转子汽封轴颈喷涂 WC-12Co 涂层的摩擦学性能

苏新勇, 刘基凯, 杨秀红

(海军北海表面工程推广站, 山东 青岛 266001)

摘 要: 采用超音速火焰喷涂技术和电镀技术分别在 45 钢试件表面制备了 WC-12Co 涂层和硬铬镀层, 测试了涂层、镀层的显微硬度和室温摩擦磨损性能, 并观察分析了磨损表面形貌。结果表明: WC-12Co 涂层的显微硬度是电镀硬铬层的 1.5 倍以上; 在时间为 1.5 h, 载荷为 20 N 和 100 N 的试验条件下, 电镀硬铬层摩擦磨损损失质量分别为 WC-12Co 涂层的 3 倍和 4 倍, 表明 WC-12Co 涂层的耐磨性能明显优于电镀硬铬镀层; 与硬铬镀层相比, WC-12Co 涂层能缩短磨合时间, 较快地进入稳定磨损阶段, 该阶段因 WC-12Co 涂层摩擦因数低, 波动范围小, 更有利于摩擦状态下延长工件的使用寿命。将超音速火焰喷涂技术用于修复汽轮机转子汽封轴颈, 可极大提高汽轮机转子的性能, 降低维修频率, 延长使用寿命。

关键词: 超音速火焰喷涂; WC-12Co 涂层; 摩擦磨损; 改性修复

中图分类号: TH17

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2011)05-0089-05

Wear Resistance of WC-12Co Coating Sprayed on the Sealed Shaft Neck of the Auxiliary Steam Turbine Rotor for a Ship

SU Xin-yong, LIU Ji-kai, YANG Xiu-hong

(Station for Spreading Superficial Engineering of North China Sea Fleet, Qingdao Shandong 266001)

Abstract: WC-12Co coating and electronic hard chrome plating were prepared on 45 steel by means of high velocity oxygen fuel spray (HVOF) and electronic hard chrome (EHC) plating respectively. Microhardness and wear resistance of the prepared WC-12Co coating and electronic hard chrome plating were tested by the block on ring friction and wear tester. And the surface morphologies were observed and analyzed by microscope. The results show that the microhardness of WC-12Co coating is 1.5 times higher than that of the EHC plating. And mass loss of EHC plating are 3 times and 4 times more than WC-12Co coating under 20 N and 100 N loads for 1.5 h, which indicates that the wear resistance of WC-12Co coating is excellent. At the same time the WC-12Co coating can make the seating time shorter, entering the steady wear stage fast. In this stage the friction coefficient of WC-12Co coating is lower and steady, which is propitious to extend the life-time of workpiece in friction state. The modification repair on the sealed shaft neck of the auxiliary steam turbine rotor by HVOF can improve the performance, reduce the repair frequency and extend the life-span.

Key words: high velocity oxygen fuel spray (HVOF); WC-12Co coating; friction and wear; modification repair

0 引 言

船用辅汽轮机转子汽封轴颈存在磨损严重、原镀铬层脱落等现象, 造成密封失效。汽轮辅机以蒸汽为动力吹动汽轮机转子叶片来实现做功, 蒸汽做功后剩余的废汽则通过废汽管排出。为了防止蒸汽从机体内泄漏出来, 在汽轮机转子靠近叶轮处设置了汽封。理想状态下, 炭精密封环与轴颈有一定间隙, 炭环与轴颈的冷态直径间隙

为 0.05~0.10 mm。但在实际运行中, 汽轮机转子在转动的过程中会有一定的跳动量, 转子轴颈和炭精密封环总是有摩擦的, 并导致轴颈表面磨损, 间隙增大, 蒸汽泄露, 影响整机运行的技战术性能。基于这一情况, 为提高汽封轴颈表面的耐磨耐腐蚀性, 生产厂家在新品制造时, 对汽封轴颈表面采取了电镀硬铬的强化处理措施。但经运行实践检验, 电镀硬铬层难以满足该工况要求。文中采用超音速火焰喷涂技术制备 WC-12Co 涂层, 对原设计为电镀硬铬的表面进行改性修复, 并对涂层组织形貌、显微硬度及耐磨性能进行了

研究, 以为汽轮机转子汽封轴颈改性修复应用提供依据。

1 试验材料与方法

图 1 为试验所用的试件图。试环基体材料为 45 钢, 采用 KY-HVO/AF 多功能超音速火焰喷涂系统在外环面制备 WC-12Co 涂层^[1-2], 喷涂工艺参数如表 1 所示, 制备的涂层采用金刚石砂轮进行磨削。对比试环基体材料为 45 钢, 采用 GDS 1000A/9V 硅整流设备在外环面制备电镀硬铬层, 电镀工艺参数^[3]如表 2 所示, 电镀硬铬层采用金刚石砂轮进行磨削。试块材质为炭精(与实际船用密封环材质相同)。试环和对比试环各 2 件, 试块 4 件。

采用 MRH-3 型数显式高速环块磨损试验机进行试环-试块滑动磨损试验; 采用精度为 0.1 mg

表 1 多功能超音速火焰喷涂 WC-12Co 涂层工艺参数
Table 1 Process parameters of WC-12Co coating by multifunctional HVOF

煤油流量/ (L · h ⁻¹)	氧气流量/ (m ³ · h ⁻¹)	送粉量/ (kg · h ⁻¹)
16	36	7.2
氮气流量/ (m ³ · h ⁻¹)	冷却水压力(流量)/ MPa(m ³ · h ⁻¹)	喷涂距离/ mm
0.8	0.4(4)	380

表 2 电镀硬铬工艺参数
Table 2 Process parameters of EHC plating

铬酐浓度/ (g · L ⁻¹)	硫酸根浓度/ (g · L ⁻¹)	温度/℃	电流密度/ (A · dm ⁻²)
180~200	1.8~2.0	50~55	20~25

的 Fa-1104 电子分析天平对试验前后的试环和对比试环称重; 采用精度为 0.01 mm 的游标卡尺测量磨损后试块的磨痕宽度, 并依据 GB/T12444-2006 计算出磨痕体积; 采用 XJP-6/6A 金相显微镜观察 WC-12Co 涂层和电镀硬铬镀层截面形貌; 采用 HVS-1000 型数字显微硬度计测定 WC-12Co 涂层和电镀硬铬镀层显微硬度, 载荷为 300 g。

磨损试验采用干摩擦磨损方式, 试验原理如图 2 所示。设定试环转速为 1400 r/min。试块保持静止。试验中载荷为 20 N 和 100 N, 每间隔 1 min 记录一次摩擦力的大小。

根据公式(1)计算摩擦因数。

$$\mu = \frac{f}{N}$$
 (1)

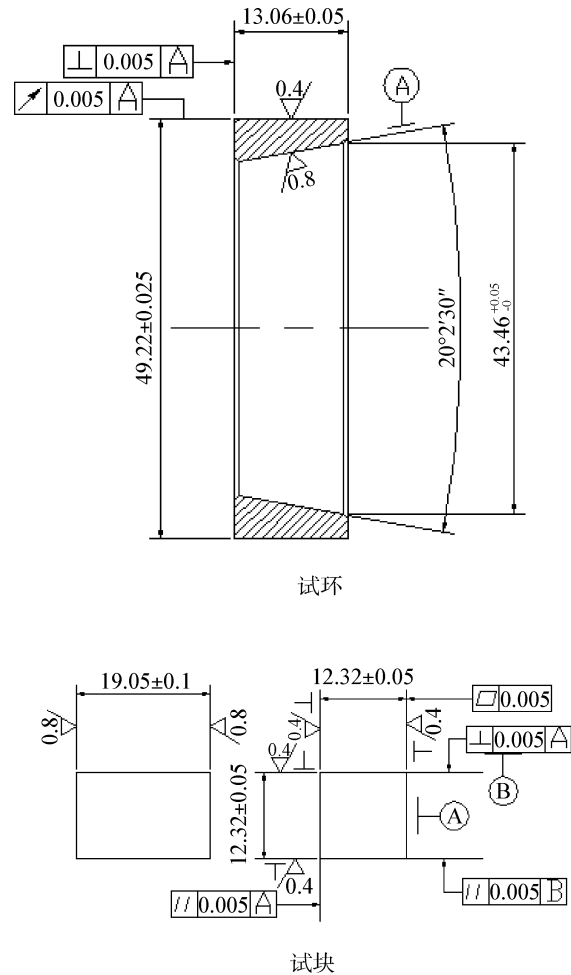


图 1 磨损试验试件图

Fig. 1 Specimen drawings of the friction test

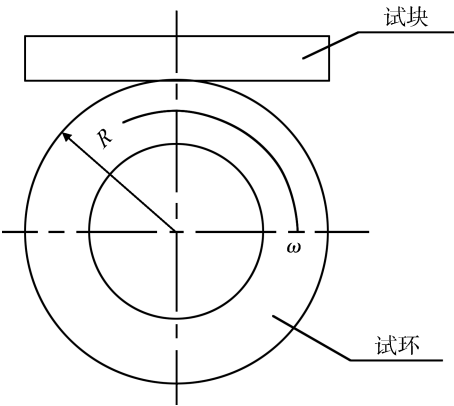


图 2 摩擦试验示意图

Fig. 2 Schematic drawing of the friction test

式中: f 为摩擦力的大小(N); N 为载荷的大小(N)。

对试环和对比试环分别进行上述干摩擦试验。在磨损试验前后,将试环先用三氯乙烷,再用甲醇清洗,清洗后将试环放入干燥器中,在 60 ℃ 下烘干 2 h,再经 2 h 后立即进行称重。

2 试验结果及讨论

2.1 涂层组织及硬度

图 3 为 WC-12Co 涂层的截面形貌。由图 3 可见,WC-12Co 涂层无明显裂纹、孔洞等缺陷,涂层与基体结合良好,界面无明显缺陷。

表 3 为 WC-12Co 涂层和电镀硬铬的显微硬度测试结果。由表 3 可知,WC-12Co 涂层的平均显微硬度是电镀硬铬的 1.5 倍以上。这是因为超音速火焰喷涂射流速度较高,颗粒具有较高的飞行速度和较低的火焰温度,在喷涂过程中能有效抑制 WC 的分解,提高了涂层的硬度。

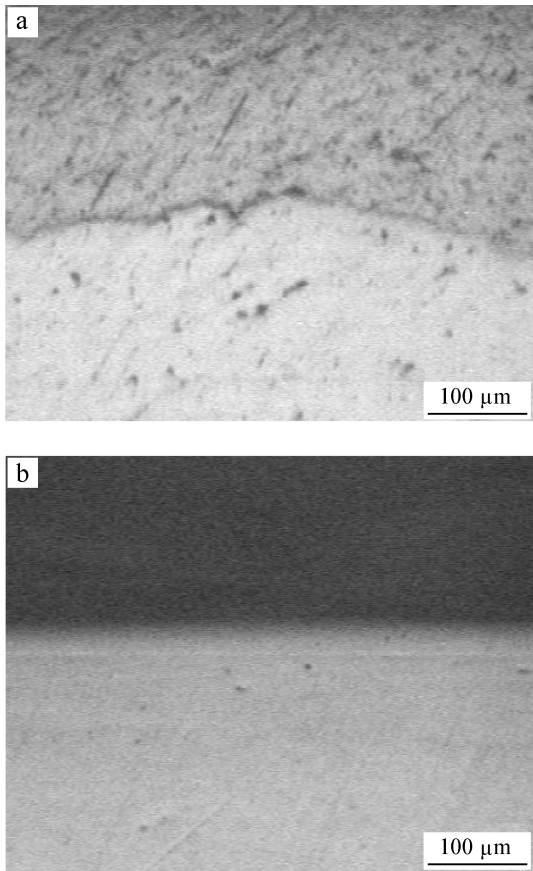


图 3 WC-12Co 涂层 (a) 和 EHC 镀层 (b) 的截面形貌
Fig. 3 Section morphologies of WC-12Co coating (a) and EHC plating (b)

表 3 显微硬度测试结果 ($HV_{0.3}$)

Table 3 Results of the microhardness test ($HV_{0.3}$)

涂层/镀层	测量值					平均值
WC-12Co	1175	1194	1248	1033	1293	1188
电镀硬铬	840	834	716	765	812	793

2.2 磨损量

表 4 为试环磨损失重量和试块体积磨损量。由表可知,载荷为 20 N 时,经 1.5 h 摩擦磨损后,电镀硬铬试环的磨损失重量为 WC-12Co 涂层 3 倍,试块的磨痕体积相差不多;载荷为 100 N 时,经 1.5 h 摩擦磨损试验后,电镀硬铬试环的磨损失重为 WC-12Co 涂层的 4 倍,试块的磨痕体积差别较大。

由此可见,与电镀硬铬相比,超音速火焰喷涂 WC-12Co 涂层的耐磨性明显优于电镀硬铬层,这主要是因为 WC-12Co 涂层由粘结相 Co 和硬质相 WC 组成,软的粘结相容易被切削,而涂层中的 WC 硬质陶瓷相可抵抗摩擦过程中的微切削作用。此外,超音速火焰喷涂具有较低的火焰温度和较高的焰流速度,因而涂层致密,不易造成应力集中,减少了涂层层片整体剥落的可能性,涂层磨损失重量较小。

表 4 摩擦磨损试验结果

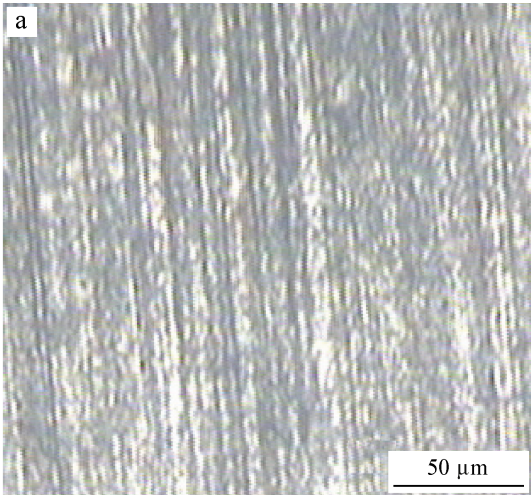
Table 4 Results of the friction test

载荷/N	涂层/镀层	试环失重/mg	试块磨痕宽度/mm	试块磨痕体积/mm ³
20	WC-12Co	1.9	3.15	1.31
20	电镀硬铬	5.8	3.32	1.53
100	WC-12Co	3.8	5.26	6.10
100	电镀硬铬	2.4	9.13	32.08

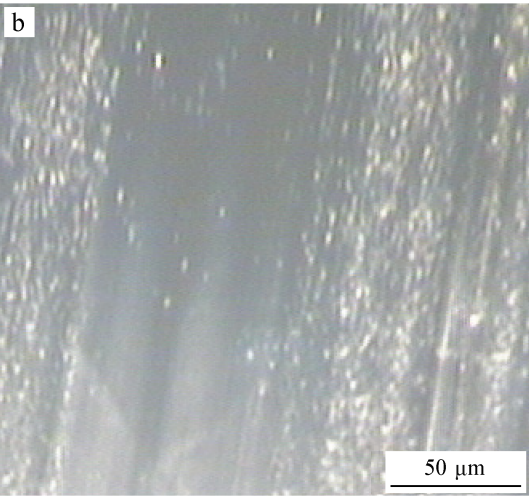
2.3 磨损表面形貌

图 4 为载荷 100 N,时间为 1.5 h 的试验条件下,WC-12Co 涂层和电镀硬铬摩擦试验后的照片。由图 4(a)可以看出,WC-12Co 涂层表面存在粒子剥落,未出现大面积剥落,由此引起的划痕较浅,表明 WC-12Co 涂层与炭精摩擦时为轻微的磨粒磨损;由图 4(b)可以看出,电镀硬铬表面产生较深犁沟并存在大面积剥落现象,表明电镀硬铬与炭精接触摩擦形成两体磨粒磨损^[4]。在磨损过程中,试环受到炭精试块正压力的持续

作用,失重逐渐增大;在磨粒磨损过程中,WC-12Co 涂层硬度高,可以显著阻挡炭精对其产生切削作用,而电镀硬铬硬度较低,因此在磨削过程中,电镀硬铬的失重量明显高于 WC-12Co 涂层的失重量。



(a) WC-12Co涂层



(b) EHC镀层

图 4 试环磨损后表面形貌

Fig. 4 Surface morphologies of the ring after the friction test

2.4 摩擦因数

图 5 为载荷为 20 N 和 100 N 时 WC-12Co 涂层与电镀硬铬层摩擦因数随时间变化关系。从曲线可以看出,载荷为 20 N 时摩擦磨损过程经过 2 个阶段,在 10 min 内摩擦因数迅速增加,而后稳定在一定范围(WC-12Co 涂层摩擦因数稳定在 0.15 左右;电镀硬铬层摩擦因数稳定在

0.26 左右)。这主要是因为 WC-12Co 涂层中的粘结相 Co 硬度较低,与炭精摩擦过程中容易发生塑性变形,炭精颗粒压入涂层表面产生犁削作用,同时摩擦副两个相互接触表面较为不平整,存在某些突峰或较大的形貌起伏,摩擦过程的前 10 min 内需先将这些不平整部位磨平,因此摩擦因数迅速增加;10 min 后由于两个相互接触表面相对磨平,同时磨损产生的部分粉末进入摩擦副,起到一定的润滑作用,磨损程度减小,摩擦因数也趋于稳定,但因摩擦副中炭精硬度很低,摩擦过程中随着磨损量的增加,表面磨痕加深,接触面积增大,因此造成摩擦力逐渐增大,从曲线上看即为摩擦因数略有增大;稳定后 WC-12Co 涂层的摩擦因数远小于电镀硬铬,这对摩擦条件下延长涂层的使用寿命有利。

载荷为 100 N 时 WC-12Co 涂层与电镀硬铬层干摩擦磨损过程都分为 3 个阶段。摩擦因数先增大再减小,最后趋于稳定。WC-12Co 涂层摩擦因数 20 min 后趋于稳定,电镀硬铬层摩擦因数 30 min 后趋于稳定。这主要是因为 WC-12Co 涂层中硬度较高的陶瓷相 WC 和软的粘结相 Co,能够较快地与炭精完成磨合,进入稳定磨损阶段。

从曲线还可以看出,WC-12Co 涂层趋于稳定后摩擦因数在 0.35 左右,几乎保持稳定不变,而电镀硬铬层的摩擦因数波动范围较大。这也表明在稳定磨损阶段 WC-12Co 涂层比电镀硬铬更有利于延长涂层的使用寿命。

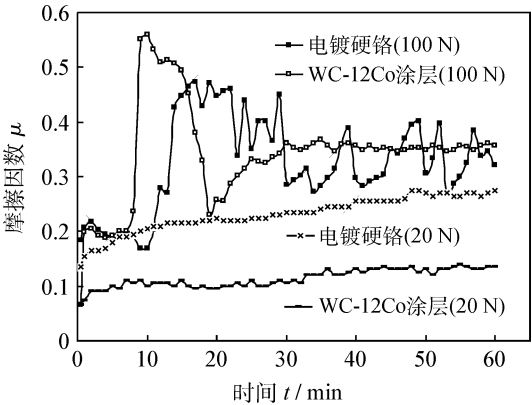


图 5 WC-12Co 涂层和电镀硬铬层的摩擦因数随时间变化的关系

Fig. 5 Curves of friction coefficient with time of WC-12Co coating and EHC palting

3 典型应用实例

某船先后采用超音速火焰喷涂 WC-12Co 涂层,对其辅汽轮机 6 台给水泵汽轮机转子和 4 台鼓风机转子的汽封轴颈进行了改性修复(如图 6 所示)。修复后投入使用,至今未发现密封失效

现象。对先期修复的 1 号鼓风机转子运行一年后解体检查,喷涂层表面光滑,结合良好,磨损轻微(磨损量 $<0.02\text{ mm}$),如图 6(e)所示。应用证明,该成果应用于辅汽轮机转子汽封轴颈改性修复,可大大提高汽轮机转子的运行性能,预计使用寿命可提高 5 倍以上。

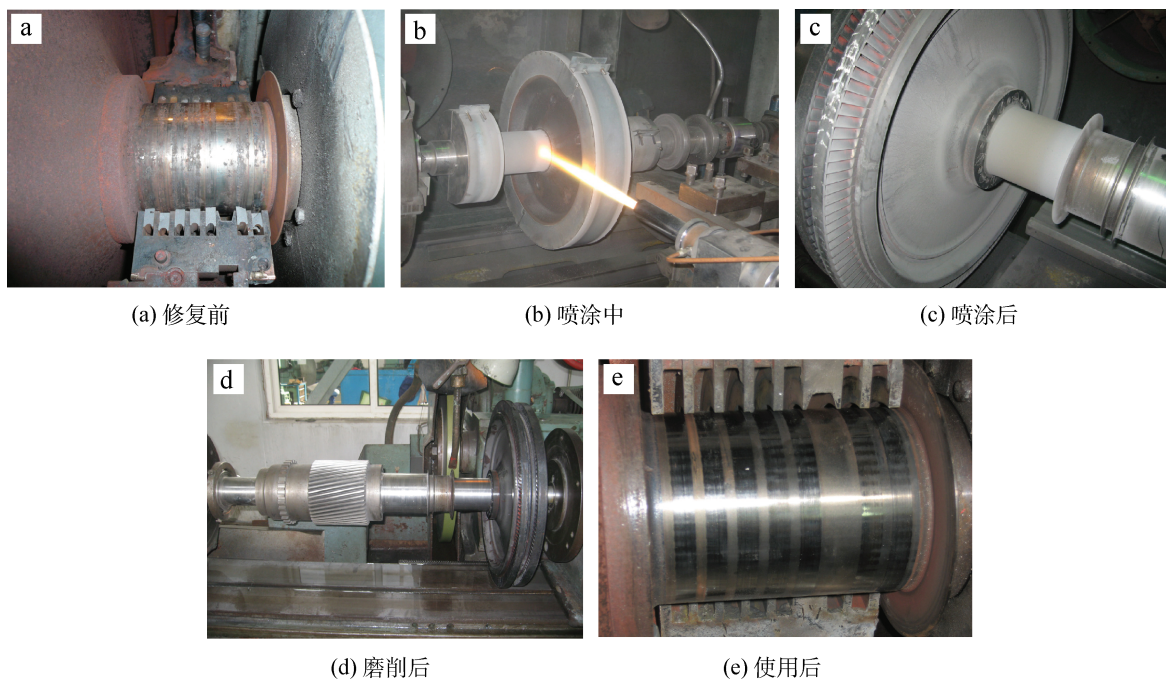


图 6 船用辅汽轮机转子汽封轴颈表面改性修复照片

Fig. 6 Photos of the surface modification repair of the sealed shaft neck of auxiliary steam turbine rotor

4 结 论

(1) 采用超音速火焰喷涂的 WC-12Co 涂层硬度均值为 $1\ 188\text{ HV}_{0.3}$,为电镀硬铬层硬度的 1.5 倍以上。

(2) 在时间为 1.5 h,载荷为 20 N 和 100 N 的试验条件下,电镀硬铬层摩擦磨损失重量分别为 WC-12Co 涂层的 3 倍和 4 倍,这表明 WC-12Co 涂层的耐磨性能明显优于电镀硬铬镀层。

(3) 与电镀硬铬相比,超音速火焰喷涂制备的 WC-12Co 涂层能缩短磨合时间,较快地进入稳定磨损阶段,该阶段涂层摩擦因数低,波动范围小,更有利于摩擦状态下延长涂层使用寿命。

(4) 采用超音速火焰喷涂技术制备 WC-12Co 涂层对船用辅汽轮机转子汽封轴颈进行了改性修复,转子的运行性能得到了有效提高,新技术在新装备维修保障领域得到了成功应用,

同时也为船用重要装备维修保障提供了新的依据和新的经验。

参考文献

- [1] 徐滨士. 表面工程与维修 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.
- [2] 苏新勇, 查柏林等. 中国海军科技报告: 基于超音速火焰喷涂(HVOF)取代电镀硬铬(EHC)的舰艇装备维修技术研究 [D]. 解放军第四八零八工厂, 2007.
- [3] 刘鹏飞. 电镀现场必读 [M]. 国营南方动力机械公司, 1986.
- [4] 束德林. 金属力学性能 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.

作者地址: 山东省青岛市市南区菏泽四路 15 号 266001

Tel: 138 0899 4151

E-mail: suxinyong888@163.com