

启闭机活塞杆表面超音速火焰喷涂 WC-10Co-4Cr 涂层的性能^{*}

赵 坚^{1,2}, 陈小明¹, 吴燕明¹, 王莉容¹, 伏 利², 马红海²

(1. 杭州江河机电装备工程有限公司, 杭州 310012; 2. 水利部产品质量标准研究所, 杭州 310012)

摘 要: 采用超音速火焰热喷涂技术在启闭机活塞杆材料 40Cr 钢表面制备 WC-10Co-4Cr 涂层, 通过扫描电镜、X 射线衍射仪、显微硬度计、摩擦磨损试验机、电化学工作站等手段对涂层的基本性能进行了研究与基体的性能进行了对比分析。结果表明: 涂层的显微硬度为 1 330 HV_{0.3} 是基体的 3.9 倍, 摩擦因数小于基体, 其耐磨性能达到基体的 145 倍, 涂层的耐腐蚀性能较基体也有大幅提高, 并且涂层致密度高孔隙率低于 0.45%, 与基体之间的结合强度高于 70.37 MPa。将涂层应用于活塞杆表面可以大幅提高其表面性能, 特别是耐磨性能及耐腐蚀性能, 使得活塞杆的使用寿命提高为常用电镀铬的 3 倍以上。

关键词: 超音速喷涂; WC; 涂层; 启闭机; 活塞杆

中图分类号: TG174.442

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2014)03-0071-05

Properties of WC-10Co-4Cr Coatings Sprayed by HVOF on Hoist Piston Rod Surface

ZHAO Jian^{1,2}, CHEN Xiao-ming¹, WU Yan-ming¹, WANG Li-rong¹, FU Li², MA Hong-hai²

(1. Hangzhou Jianghe Equipment Co., Ltd., Hangzhou 310012; 2. Standard & Quality Control Research Institute, Ministry of Water Resources, Hangzhou 310012)

Abstract: WC-10Co-4Cr coatings were prepared on hoist piston rod surface by high velocity oxygen fuel (HVOF) spraying. The basic performance of the coatings and matrix were investigated by using scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD), hardness measurement, wear test, electrochemical workstation etc. Results show that the micro-hardness of the coatings is 1 330 HV_{0.3}, which is 3.9 times the micro-hardness of the matrix; the friction coefficient is lower than that of the matrix, which is 145 times the wear resistance of the matrix; the corrosion resistance of the coatings significantly increases, the porosity of coatings is less than 0.45%, and the binding strength between the coatings and the matrix is higher than 70.37 MPa. The surface properties of the piston rod can be significantly improved by coatings, especially the wear resistance and the corrosion resistance. This makes that the service time of the piston rod is 3 times higher than that of the chrome plating.

Key words: high velocity oxygen fuel (HVOF); WC; coating; hoist; piston rod

0 引 言

液压启闭机被广泛应用于水利工程等领域, 是重要的工程设备, 活塞杆是启闭机系统中的重

要组成部分。液压启闭机在使用检修时发现, 其失效形式主要为表面严重的划痕以及锈蚀。由于其使用环境一般为露天的水利工程, 随着长时

收稿日期: 2014-01-02; **修回日期:** 2014-03-30; **基金项目:** * 引进国际先进水利科学技术计划项目(201218); 浙江省公益性技术应用研究项目(2013C31044); 杭州市科技发展计划项目(20120433B35)

作者简介: 赵坚(1985—), 男(汉), 浙江丽水人, 工程师, 硕士; **研究方向:** 表面强化技术及纳米技术

网络出版日期: 2014-04-21 17:08; **网络出版地址:** <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20140421.1709.003.html>

引文格式: 赵坚, 陈小明, 吴燕明, 等. 启闭机活塞杆表面超音速火焰喷涂 WC-10Co-4Cr 涂层的性能 [J]. 中国表面工程, 2014, 27 (3): 71-75.

间使用环境中的砂粒等杂物会吸附在活塞杆表面并进入缸体内,砂粒等杂质在活塞杆的使用过程中会会在其表面形成划痕等损伤,同时环境中的水气等还会对活塞杆表面造成腐蚀,这将严重影响活塞杆的使用性能并加速缩短其使用寿命。因此,如何提高液压启闭机活塞杆的表面性能,特别是提高其耐磨、耐蚀性能是研究的关键^[1-3]。

在不改变基材的情况下选择一种合适的涂层以及合适的工艺,并将涂层制备到活塞杆基材表面可以解决上述问题。

常规采用电镀铬对活塞杆表面起到一定的保护作用,但使用 1~2 年发现活塞杆表面仍出现较为严重的磨损,部分磨损区周围的镀铬层已剥落,剥落区域产生严重的锈蚀,并且局部还存在镀层被腐蚀剥落,这是由于电镀铬层较薄且硬度及耐磨损性能不足,容易被磨损甚至磨穿,镀铬层存在氢致裂纹,锈蚀直接发生到基材表面,严重时镀层被腐蚀剥落。

WC-10Co-4Cr 涂层因其优秀的耐磨性能及耐腐蚀性能等,成为最适用于活塞杆表面强化的涂层之一,并且通过超音速火焰喷涂技术可以很好的将涂层制备到活塞杆表面,形成致密的涂层并与基材结合良好^[4-6]。研究分析 WC-10Co-4Cr 涂层的制备及性能对于该涂层在活塞杆表面的应用具有积极的意义。文中重点研究了该涂层应用于活塞杆常用材料 40Cr 钢表面的一系列基本性能:微观形貌、孔隙率、结合强度、显微硬度、耐磨性能及耐蚀性能等,并对涂层应用于活塞杆表面的使用寿命进行了分析。

1 材料与方法

1.1 试样制备及 HVOF 喷涂

试样采用 40Cr 钢制成 100 mm×70 mm×5 mm 薄片,主要化学成分(质量分数/%)为:0.37~0.44 C,0.17~0.37 Si,0.50~0.80 Mn,0.80~1.10 Cr,Ni≤0.30,Fe 余量^[7]。表面经过除油、去离子水漂洗、超声波清洗处理后进行喷砂处理,砂子采用粒度为 590~710 μm 的白刚玉砂。

粉末采用 WC-10Co-4Cr 金属陶瓷粉(粒径为 15~45 μm),喷涂设备采用 SPR-3000 超音速火焰喷涂系统,该系统以航空煤油作为燃料,氧气作为助燃气,氮气作为载气,工艺参数为:煤油流量 22 L/h、氧气流量 52 m³/h,送粉量 60 g/min,喷涂

距离 360 mm,涂层厚度为 150~180 μm。

1.2 性能测试分析

采用 ULTRA55 场发射扫描电子显微镜(SEM)分析涂层的微观形貌。采用 KMM-500 金相分析仪测试涂层的孔隙率,测量 5 个视场取平均值。采用 WDW-50KN 微机控制电子万能试验机测试涂层与基体的结合强度,测试夹具及试样按照国标 GB/T8642-2002 制作,采用 3M 公司 FM1000 薄膜胶进行粘结并固化,拉伸速率为 0.5 mm/min,制备两组试样进行测试取平均值。采用 XPer Powder 型 X 射线衍射仪(XRD)测定试样的相结构。

采用 HXD-1000TMC 显微硬度计测试涂层的显微硬度,峰值载荷为 300 g,加载时间 15 s,每个试样测量 12 个点,去掉极值后取平均值。采用 HT-1000 型球-盘摩擦磨损试验机考察试样在干摩擦下的磨损性能,采用 Φ4 mm 氮化硅陶瓷球进行对磨,试验时间为 60 min,载荷为 500 g,摩擦圆半径为 6 mm,转速 1 120 r/min,并采用赛多利斯 LE225D 电子天平进行失重称量。

采用 RST5200 电化学工作站测试涂层的耐腐蚀性能,采用标准三电极体系,环氧树脂封装后的试样作为工作电极,铂片作为辅助电极,饱和甘汞电极(SCE)作为参比电极,在 25 ℃的 3.5% NaCl 溶液中进行动电位计划曲线测试,电化学测试前工作电极在 3.5%NaCl 溶液中浸泡 0.5 h。动电位扫描范围为 -100~100 mV(相对于开路电位),扫描速率为 0.5 mV/s。

2 结果与分析

2.1 涂层形貌、孔隙率及结合强度

图 1 为涂层微观形貌。由图 1(a)可以看出,涂层截面呈致密的层状结构,说明喷涂过程中半熔融粉末经过多次叠加(每次的厚度 15~20 μm)并且每次都是以极高的速度(≥700 m/s)沉积因此能形成更加致密的结构,同时通过半熔融粉末的高速沉积以及基材表面的喷砂处理使得涂层与基体之间呈锯齿形紧密结合。将图 1(a)中的涂层局部放大到 3 000 倍后,发现涂层仍为致密结构未见明显孔隙,通过测试分析,涂层孔隙率低于 0.45%。低孔隙率、高致密度使得涂层获得较高的力学性能。半熔融粉末以高速沉积到基材表面,冲击产生的应力远高于喷涂产生的热应力

等,使其表面的残余应力为压应力,有利于涂层与基体之间的高强度结合^[8-10]。涂层的结合强度测试过程曲线如图 2 所示,从图中可以看出涂层与基体间的结合强度测试结果高于 70.37 MPa(此时涂层无脱落仅粘胶断裂)。

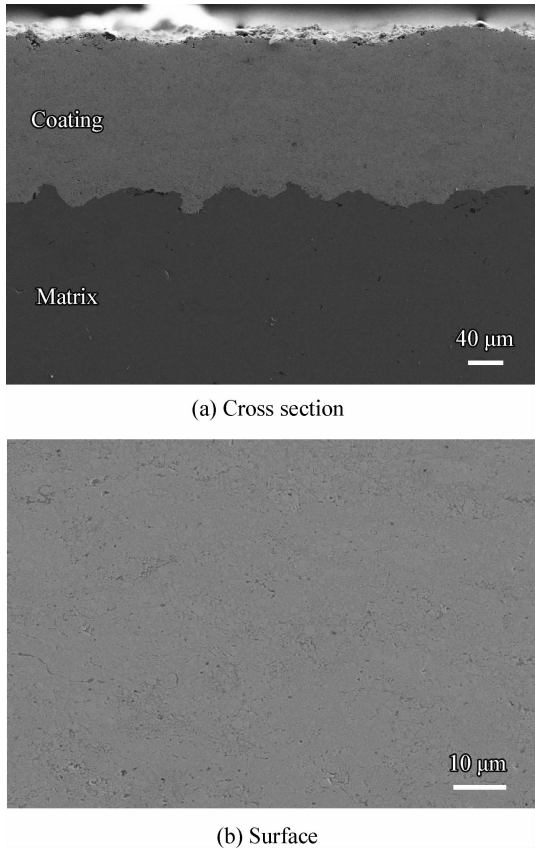


图 1 WC-10Co-4Cr 涂层的截面和表面形貌
Fig. 1 Cross section and surface morphologies of the WC-10Co-4Cr coating

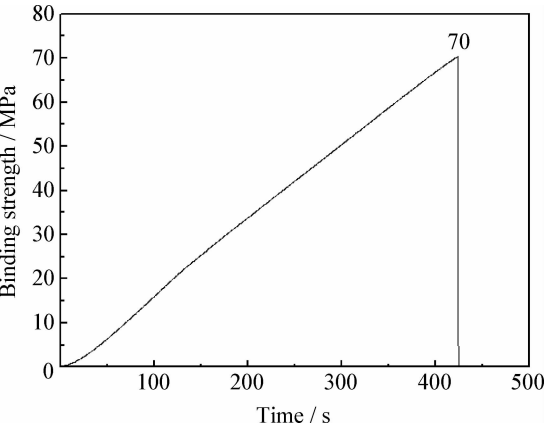


图 2 WC-10Co-4Cr 涂层与基体的结合力曲线
Fig. 2 Binding force curve between the WC-10Co-4Cr coatings and matrix

2.2 涂层的相组成

涂层的 XRD 测试结果如图 2 所示。由 XRD 物相分析可知,涂层中主要为 WC、Co 和 Cr 相,并还存在 W₂C 相,这可能是由于在 WC 在喷涂时高温下脱碳形成的,喷涂过程中少部分 WC 颗粒直接与氧气接触或者 WC 溶于液相 Co 中,这样 WC 中的 C 直接或间接的与氧反应,从而发生脱碳形成 W₂C 相。除了 W₂C 相外,在喷涂过程中未产生其他相,说明涂层能保持较好的性能。

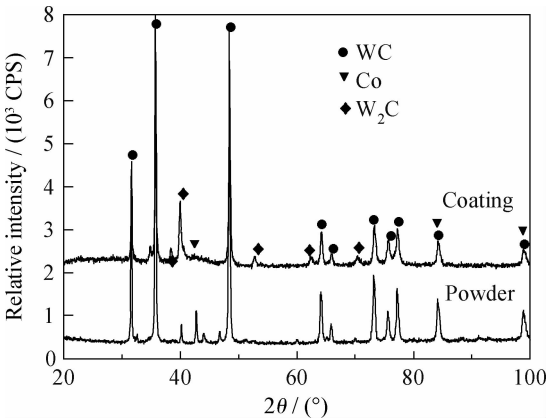


图 3 WC-10Co-4Cr 涂层的 XRD 图谱
Fig. 3 XRD patterns of the WC-10Co-4Cr coating

2.3 涂层的显微硬度

基体与涂层的显微硬度测试结果有所不同。基体 40Cr 钢的硬度较为均匀,数值保持在 340 HV_{0.3} 左右。涂层表面不同区域的显微硬度值有些差别,数值范围在 1 274~1 405 HV_{0.3} 之间波动,其平均显微硬度值为 1 330 HV_{0.3},是基体的 3.9 倍。这是由于涂层由 WC、Co、Cr 等不同的物相组成,而这些相的硬度性能有所不同,涂层虽然极为致密,但也无法达到每个区域的完全一致,其中的主要成分 WC 硬质合金相使涂层具有高硬度。

2.4 涂层与基体的耐磨损性能对比

图 4 为基体和涂层在 180 min 摩擦磨损试验后的磨损量。可以看出,基体的磨损量远高于涂层,涂层耐磨损性能高达基体的 145 倍,涂层和基体在干滑动磨损过程中主要发生磨粒磨损和粘着磨损,磨损的机理主要有:接触面材料的互相粘着并转移、切削磨损、疲劳引起的微裂纹,耐磨损性能主要取决于接触表面的硬度、粗糙度及厚度等^[11-12]。WC 具有高硬度使得涂层获得良好的耐磨性能,并且通过超音速火焰热喷涂技术 Co

相均匀分布在致密涂层的 WC 中, WC 相也不容易被磨损剥落。

图 5 所示为基体和涂层的摩擦因数曲线。基体的摩擦因数较高并出现不规则的波动,说明随着摩擦磨损试验的进行,基体不断的被磨损,磨损的界面不断更新,磨削下来的磨屑附着在相对摩擦的界面上引起磨球不规则振动;而涂层的摩擦因数在起初较高,之后持续下降并趋于一个较低值,说明涂层在刚接触对磨球的短时间内界面较为粗糙并主要发生微小的磨粒磨损,由于当 Co 相和 Cr 相被磨损后形成凹面, WC 相成为相对的凸起与对磨球进行摩擦(磨损形貌如图 6 所示),而 WC 相的高硬度使得很难被磨损及切削, WC 相与 Co 相结合紧密不易被磨损剥落,并且摩擦界面发生持续的重复摩擦,摩擦界面越来越光滑,耐磨损性能也随之被强化。

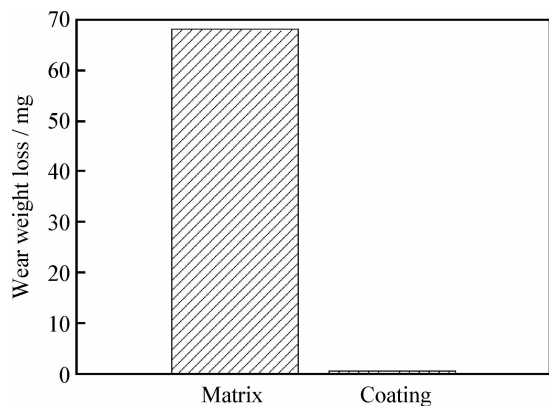


图 4 WC-10Co-4Cr 涂层与基体的磨损量

Fig. 4 Wear weight loss of the WC-10Co-4Cr coating and matrix

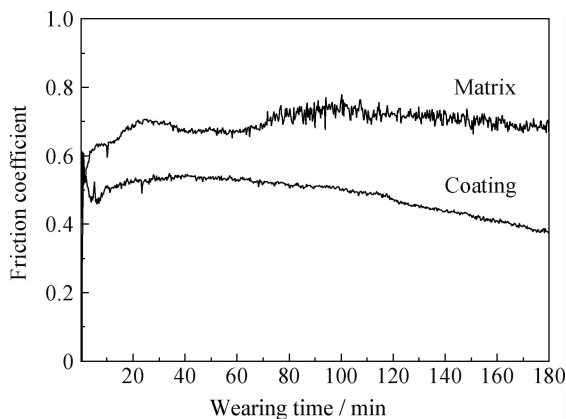


图 5 WC-10Co-4Cr 涂层与基体的摩擦因数曲线

Fig. 5 Friction coefficient of the WC-10Co-4Cr coating and matrix

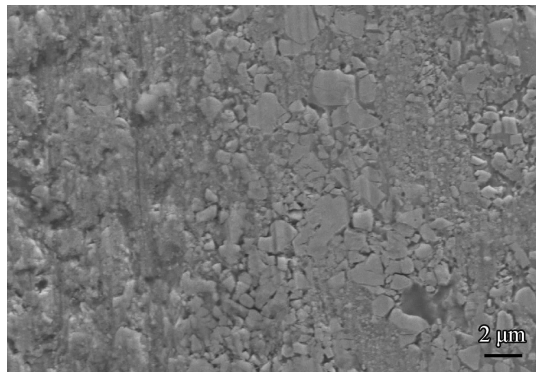


图 6 WC-10Co-4Cr 涂层摩擦磨损形貌

Fig. 6 Worn morphology of the WC-10Co-4Cr coating

2.5 涂层与基体的电化学性能测试分析

涂层与基体的电化学腐蚀电位如图 7 所示。从图中可以看出,涂层的腐蚀电位高于基体的腐蚀电位,并且涂层腐蚀电流为 $7.054 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ 小于基体的 $2.496 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$,说明涂层的耐腐蚀性能要优于基体。邓春明等^[13]对 Cr 元素对 WC 涂层耐腐蚀性能的影响进行了研究,表明 Cr 元素的存在可以有效提高涂层的耐腐蚀性能,而涂层中 Cr 含量为 4% 要远高于基体基体的 0.8%~1.1%,同时涂层致密的结构对于腐蚀介质的扩散起到一定的阻碍作用。

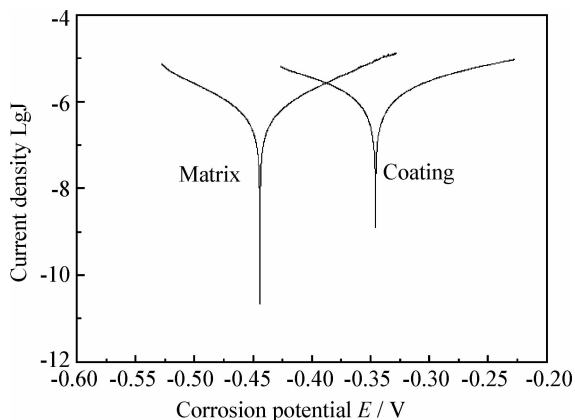


图 7 WC-10Co-4Cr 涂层与基体的腐蚀电位

Fig. 7 Corrosion potential of the WC-10Co-4Cr coatings and matrix

2.6 涂层应用于活塞杆表面的使用寿命分析

通过超音速火焰热喷涂技术在启闭机活塞杆表面制备 WC-10Co-4Cr 涂层,经过封孔以及磨削加工等后处理,装配使用。经过 1 年时间的实际应用,发现活塞杆表面出现摩擦痕迹以及水

污痕,说明活塞杆涂层表面的失效形式主要表现为磨损及腐蚀,但经过擦洗后发现活塞杆涂层表面状况良好无明显的磨损及腐蚀等损伤,远未到失效的程度,并涂层与基材结合良好无剥落,说明涂层的高耐磨性能及耐腐蚀性能等可以很好的抵御其失效行为,可以对活塞杆表面起到持久的保护作用,使得活塞杆的使用寿命大幅延长,而采用电镀铬处理的活塞杆经过同样时间的应用,表面出现了明显的划痕损伤,并且局部出现了镀层磨穿基体被腐蚀的情况。经过更长时间的实际使用,证明了经过超音速热喷涂 WC 涂层处理的活塞杆的使用寿命可以达到常规电镀铬的 3 倍以上。

3 结 论

经试验研究表明,超音速火焰热喷涂 WC-10Co-4Cr 涂层可以很好的应用于启闭机活塞杆表面,以大幅提高活塞杆的耐磨性能、耐腐蚀性能以及使用寿命。具体结论如下:

- (1) 涂层具有致密的表面形貌,孔隙率低于 0.45%,与基体之间呈致密的锯齿形结合,涂层与基体之间的结合强度高于 70.37 MPa。
- (2) 涂层平均显微硬度值为 1 330 HV_{0.3} 是基体的 3.9 倍,耐磨损性能高达基体的 145 倍。
- (3) 由于涂层中 Cr 等耐腐蚀金属相的含量高于基体,使得该涂层具有高于基体的耐腐蚀性能。
- (4) 超音速喷涂 WC 涂层应用于启闭机活塞杆表面,较常规电镀铬层延长其使用寿命 3 倍以上。

参考文献

[1] 孙省已. 活塞杆材料及其热处理(一) [J]. 压缩机技术, 1994(2): 18-22.

[2] 朱丽红. 几种表面强化方法在 2Cr13 活塞杆上的应用比较 [J]. 创新沈阳文集(A), 2009: 16-22.

[3] 李玉臣. 液压启闭机在水利工程中的应用及运行维护管理 [J]. 北京水务, 2010(3): 49-51.

[4] 邓世均. 高性能陶瓷涂层 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.

[5] 孙万昌, 张磊, 张哈, 等. 金属表面复合层研究进展 [J]. 热加工工艺, 2011, 40(16): 75-77.

[6] 赵翔, 李萍, 王群, 等. AC-HVAF 制备 WC-10Co-4Cr 涂层抗磨粒磨损性能研究 [J]. 热加工工艺, 2010, 39(20): 132-134.

[7] 汤精明, 姜忠宇. 表面完整性对 40Cr 钢耐腐蚀性的影响 [J]. 热加工工艺, 2010, 39(2): 100-103.

[8] Qiao Y F, Fischer E, Dent A. The effect of fuel chemistry and feedstock powder structure on the mechanical and tribological properties of HVOF thermal-sprayed WC-Co coating with very fine structures [J]. Surface & Coatings Technology, 2003, 172(1): 24-41.

[9] 杨震晓, 刘敏, 邓春明, 等. 热喷涂基体表面预处理技术的研究进展 [J]. 中国表面工程, 2012, 25(2): 8-13.

[10] Mutasim L, Bankar V, Rim linger C. High velocity oxy-fuel thermal sprayed coatings as alternatives to WC-12Co coatings and chromium plating [M]. C C Berndted Thermal Spray. A united forum for scientific and technology advances. ASM International Materials Park, USA, 1997: 901-908.

[11] Pawlowski L 著. 热喷涂材料与工程 [M]. 李辉, 贺定勇, 译. 北京: 机械工业出版社, 2010.

[12] 侯国梁, 安宇龙, 陈杰, 等. 两种 WC 基涂层在 600 ℃下的摩擦学性能 [J]. 中国表面工程, 2012, 25(6): 61-67.

[13] 邓春明, 周克崧, 刘敏, 等. Cr 对超音速火焰喷涂 WC-Co 涂层抗中性盐雾腐蚀性能的影响 [J]. 材料开发与应用, 2007, 22(3): 33-36.

作者地址: 浙江杭州市西湖区学院路 102 号 310012
杭州江河机电装备工程有限公司
Tel: (0571) 8808 7115
E-mail: zhaojian2010@126.com

(责任编辑: 陈茜)