HVAF 制备 WC-12Co 涂层的空蚀和磨损性能研究*

王国刚,孙冬柏,樊自拴,孟惠民,俞宏英,马 光,徐 杰

(北京科技大学 腐蚀防护中心,北京 100083)

摘 要:采用国际上最新的活性燃烧高速燃气喷涂(AC-HVAF)技术制备出WC-12Co金属陶瓷涂层。涂层的X射线 衍射检测表明,涂层制备过程中未出现WC粒子的氧化和脱碳现象,涂层相结构基本保持了喂料粉末状态;对制备涂 层进行的旋转圆盘空蚀试验表明,WC-12Co硬质涂层抗泥沙磨损性能出色,磨损量仅为不锈钢的1/10;其耐空蚀性 能则相反,不及对比0Cr13Ni5Mo不锈钢;对涂层的空蚀破坏机理做了分析,对沙粒磨损损伤特点做了初步探讨。 关键词:空蚀;磨损;水轮机; HVAF;WC-12Co 中图分类号:TV131.2 文献标识码:A 文章编号:1007-9289(2006)04-0021-04

The Cavitation Behavior and Slurry Wear Resistance of WC-12Co Cermets Coatings Sprayed by AC–HVAF Technology

WANG Guo-gang, SUN Dong-bai, FAN Zi-shuan, YU Hong-ying, MENG Hui-ming, MA Guang, XU Jie

(The School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing 10008)

Abstract: The WC-12 Co cermet coating was deposited by means of the newly developed in the world active combustion-high velocity air fuel (AC–HVAF) Technology. The X–Ray diffraction was employed to identify the chemical composition of the feedstock powder, as–sprayed and heat- treatment coatings. The patterns indicated that the chemical composition kept similarly, without W_2C peak. The cavitation erosion and slurry erosion tests were carried out with the rotating disc equipment, the results showed that the WC–12Co coatings exhibited excellent slurry wear resistance than the sample made of 0Cr13Ni5Mo stainless steel. At last the mechanism of cavitation damage was discussed.

Key words: cavitation; wear; hydraulic turbine; the active combustion high velocity air fuel spray (AC-HVAF); WC-12Co

0 引 言

水利设备中的过流部件,如水轮机叶片,由于 受到空蚀和沙砾的联合损伤,导致过流部位的金属 表面发生破坏,产生振动和噪音,造成设备效率降 低,频繁大修,甚至短期报废^[1]。由于我国的特殊 国情,河流含沙多、工程规模大,磨蚀问题尤其严 重,因此如何解决水轮机或水泵的空蚀和泥沙磨损 问题日益成为工程建设中关键技术难题之一^[2]。不 仅如此,磨蚀(磨损+空蚀)问题还广泛存在于船 舶、石油、化工、国防等部门,因此近年来受到了 国内外广泛关切。

收稿日期:2006-04-12;修回日期:2006-04-28 基金项目:*国家 863 计划(2002AA331080)和北京市重大科技项目 (H024200050021)

作者简介:王国刚(1975-),男(汉),河北栾城人,博士研究生。

热喷涂作为一种高效的表面防护技术,近年来 受到了高度重视,先进的商用喷涂设备和技术不断 被研制开发出来。活性燃烧高速燃气喷涂技术 (Active Combustion-High Velocity Air Fuel, AC-HVAF)就是其中一种。HVAF 尤其适合制备碳化 钨等金属陶瓷涂层。

WC-12Co硬质合金由于具有优越的耐磨耐蚀 性能,广泛应用到工业的各个方面,成为近年来应 用研究的一个重点。有文献报道火焰喷涂(HVOF) 制备WC-nCo硬质合金涂层应用在水轮机叶片上, 但是HVOF喷涂WC陶瓷时,由于火焰温度过高,容 易造成WC粒子的分解,操作工艺不易控制,涂层 质量难以保证^[3]。鉴于AC-HVAF具有防止WC脱碳的 效果,有必要对其涂层的抗空蚀、抗磨损性能进行探讨。

1 试 验

1.1 涂层制备

试样采用0Cr13Ni5Mo不锈钢(以后用BJ代称, 水轮机叶片用钢,硬度220HV)作基体和对比材料, 试样直径为28mm,厚7mm。喷涂前试样进行喷砂 预处理,制备涂层厚度为(0.4±0.1)mm。

粉末和涂层的X射线衍射(图 1)分析表明,AC-HVAF制备涂层基本保持原粉体的相结构。只有Co 峰由尖锐峰变为漫散状态。未发现WC分解的W₂C 以及其它化合物相,说明HVAF涂层制备工艺很好 的抑制了WC颗粒脱碳的发生。



图 1 喷涂粉、原涂层和热处理涂层的 X 射线衍射图 Fig. 1 The X-ray diffraction pattern of coatings and powder

WC-12Co涂层在抛光后的涂层厚度约为 0.3 mm,程黑色镜面,在电镜下观察为微米级的粒子 密集堆积状(图 2);测得涂层平均显微硬度为 1034.6 HV₁₀₀;根据中国航空标准(7751~2004HB),测得涂 层与基体的平均结合强度高达 221.5 MPa,较HVOF 制备同类涂层高出 1 倍多^[4],预测能够满足含泥沙 高速水流的冲击力和剪切力,(一般要求应用于叶片 的涂层结合强度不低于 40 MPa)。



图 2 涂层抛光区的 SEM(中间为划痕)

Fig.2 The SEM image of polished WC-12Co Coatings (a nick in the middle)

另外,一组WC-12Co试样B进行了石蜡封孔,

观察空蚀过程中腐蚀介质对涂层性能影响。对另一 组试样 C 在氮气保护下进行了热处理,目的是了解 热处理对涂层抗空蚀性能的影响;热处理后的 X 射 线衍射分析表明:WC 仍然保持原状态,而涂层中 Co 峰重新出现(图 1),确认原涂层中的金属钴在喷 涂过程中发生了非晶态转变,在 600 ℃等温退火过 程中重新晶化。

1.2 空蚀和磨损试验

空蚀试验在旋转圆盘空蚀模拟试验机^[5]上进 行,旋转圆盘见图3,圆盘外直径360 mm,在直径 300 mm圆周上均匀分布6个试样,试样空蚀面直径 为28 mm,嵌入到圆盘中测试面与圆盘面持平。空 蚀源为直径为10 mm的通孔。空蚀腔内的压力由一 个3 kW的清水泵提供。其它试验条件和参数见表1。



图 3 试验圆盘和试样装配图

Fig. 3 Scheme of the rotating disc and sample

表1 空蚀和磨损试验条件和参数

Table 1The conditions and parameters of cavitationerosion and slurry erosion tests

清水空蚀试验		泥沙混水磨损试验	
条件	参数	条件	参数
转速/(r/min)	2940	转速/(r/min)	2940
线速度/(m/s)	46	线速度/(m/s)	46
腔内压力/MPa	0.1	腔内压力/MPa	0.2
水温/C	18~35	砂子装载量/(kg/m³)	15
时间/h	2	砂子粒度/d50, µm	7.374
		水温/°C	25~45
		时间/h	6×6

泥沙磨损试验,主要检测的是涂层在多泥沙环 境中,抗流沙磨损的性能,试验设备基本同上,主 要区别是:取消了空蚀源孔;在水中加入了黄河沙; 试样测试面凸出圆盘面约 0.5 mm,采用高压气流 搅拌法对泥沙进行搅拌,用同等功率的混水泵替换 清水泵,采用上进水下排水方式,含沙水流与试样 平面程 0°角,每6 h停机观察称重1次,累积时间为 36 h。

2 结果和讨论

2.1 空蚀性能

涂层空蚀试验结果见图 4,不锈钢的失重最少, 喷涂封孔试样失重最多,主要可能是因为填充缝隙 石蜡与涂层一起被剥蚀掉造成损失增加。说明这时 涂层表面主要受到的是空化力学损伤,腐蚀作用不 明显。WC-12Co 涂层的失重较大,约为不锈钢的 6 倍,而热处理涂层质量损失与原涂层相差无几,表 明热处理对提高涂层的抗空蚀性能没有什么贡献。





不锈钢试样表面只出现了某些"发涩",放大 观察是空蚀的微小麻点。而涂层已遭到了空蚀的严 重破坏,空蚀区崎岖不平,呈现典型的蜂窝或针孔 状,在电子显微境(SEM)下观察图 5(a),发现空蚀 首先在涂层的表面产生点蚀,随着空蚀的不断加剧 和积累,点蚀坑不断加深增大,并且逐渐联到一起, 最终形成大片的空蚀区。但是涂层没有出现大片整 体的剥落现象,这得益于涂层与基体的优良的结合 强度。





小不一的孔洞,空泡溃灭产生的冲击波和微射流,把材料不断的从空蚀面被剥蚀掉^[6],这种剥蚀行为 首先从涂层组织薄弱或者孔隙的地方开始,逐渐慢 慢扩大,形成较大孔隙。同时空蚀面形貌正好揭示 出涂层内部结构的均匀度差异,甚至存在多孔隙的 缺陷。

造成这种损伤的主要原因是空化气泡溃灭时 对涂层面产生的巨大的冲击,有报道微射流的速度 在 50~4 000 m/s之间^[7],压强高达上万兆帕^[8]。另 外,WC硬质粒子靠钴粘合在一起,粒子之间的结 合强度低,再加上微射流的直径大约为 2~3 μm^[9] 恰好与形成涂层的WC-12Co微粒相近,微射流就完 全可能把涂层粒子从表面剥离。因此,需要进一步 提高涂层的内部结合强度和韧性,比如,采用在喷 涂材料中增加粘合金属成份或者添加具有自熔倾 向的材料方法,来增强涂层的抗空蚀能力。

2.2 泥沙磨损

从图 6(a)(b)对比可以看到,不锈钢 BJ 冲蚀损 伤严重,已经被沙浆切削出一个锲形斜坡,而 WC-12Co 涂层基本完好无损,从高倍光学照片上看图 7(a)(b)不锈钢表面明显布满了沙浆滑过的痕迹, WC-12Co 涂层的冲蚀面,没有沟壑,仅仅是表面 出现了粗糙化,这可能是因为涂层的粒子由钴粘合



图 6 泥沙磨损后的试样形貌

Fig. 6 The appearance of the sample after slurry erosion



在一起,高速泥沙粒子与涂层是粒子与粒子的接

触,直接把涂层粒子冲击剥离掉的同时自身也被反 弹出去,未能形成明显沟壑。

为了验证数据的可靠性,在喷涂试验条件完全 一致条件下制备了 Ni6035WC 涂层并和 KBJ (1Cr18Ni9Ti),进行了空蚀和磨损试验。从失重曲 线图 8(a)(b)中可以看出,与抗空蚀性能相反,WC-12Co 涂层在泥沙磨损中失重量最少,表现出了硬 质合金涂层的优异抗泥沙磨损性能,对比试样 KBJ(1Cr18Ni9Ti)抗沙子冲蚀性能最差,涂层磨损量 仅为 BJ 不锈钢的 1/10,分析主要是因为:虽然泥 沙的相对速度高达 46 m/s,但是与空泡溃灭时产生 的高速微射流比还差至少两个数量级,这时两种涂 层内部的结合力完全可以经受住这样的冲击,这时 的损伤主要沙粒的切削划伤,涂层优异的抗磨损性 能,主要得益于硬质合金涂层高强度和高硬度特性。



图 8 涂层在含泥沙混水中的磨损情况



从失重速率图上可以明显看出,两种不锈钢在 失重速率曲线在中部同时出现了凹陷,表明在这个 阶段不锈钢表面抗沙粒磨损性能有所增强,推测此 时材料发生了表面硬化,大量沙粒冲击造成的反复 塑性变形,材料磨损表面形成了磨损冷作硬化层。 开始时,冲击沙粒能量较小,不足以使材料直接产 生由塑性变形引起的材料剥落,但大量沙粒长期反 复冲击,也会导致材料的疲劳剥落,这个时候材料 的失重量速率迅速增加^[10]。相比之下硬质合金涂层 的沙粒磨损速率不仅低,而且失重速率未出现类似 波动,表明涂层在沙粒冲蚀过程中,没有明显的疲 劳失效和硬化特征,这可能与涂层制备过程中产生 的压应力有关^[11]。

3 结 论

利用 AC-HVAF 制备出 WC-12Co 金属陶瓷金 涂层,涂层未发现脱碳和氧化产物,硬度高于 1000 MPa,涂层与基体的结合力高达 200 MPa 以上。

试验表明,WC-12Co 空蚀和沙粒磨损两种损 伤机理差别很大,空蚀损伤主要是气泡溃灭垂直冲 击导致材料直接被剥离表面,表现为点蚀坑的形成 和扩张;而泥沙冲蚀磨损过程,则侧重于泥沙粒子 与涂层面的碰撞和切削剥蚀作用;WC-12Co 金属 陶瓷涂层具有高的抗沙粒磨损性能,可应用于泥沙 磨损较为严重的部位;由于热喷涂层内部结合力或 夹生等特点,涂层的抗空蚀性比不锈钢要差。由于 磨损与空蚀对材料表面破坏的作用机理各异,应根 据实际需要保护的部位和工况环境,即根据空蚀和 磨损发生所占的比例大小,合理地应用 WC-12Co 金属陶瓷涂层进行防护。

通过对 WC-12Co 涂层空蚀和泥沙损伤分析, 今后涂层的改进重点是提高其耐空蚀性能。应在保 持涂层高耐泥沙磨损性能的基础上,进一步优化涂 层设计,提高涂层的的致密性和内部结合强度,整 体提高涂层的耐空蚀磨损的综合性能。

参考文献:

- [1] 张林夫, 夏维洪. 空化与空蚀 [M]. 南京: 河海大学 出版社, 1989: 3-4.
- [2] 顾四行,杨天生.水机磨蚀研究与实践 50 年 [M].北京:中国水利水电出版社,2005:3-5.
- [3] 李长久. 超音速火焰喷涂 WC-Co 涂层结构的研究[J]. 西安交通大学学报, 1994, 28(4): 39-45.
- [4] 韩志海,徐滨士,等. 三种超音速热喷涂工艺制备
 WC-12Co 涂层的组织结构分析 [J]. 中国表面工程, 2005, 18(3): 23-27.
- [5] Steller K, Krzysztofowicz T, Reymann Z. Effects of Cavitation on Materials in Field and Laboratory Conditions [A]. American Society for Testing and (下转第 31 页)

(上接第24页)

Materials, Special Tech. Pub. 1975, 567: 152.

- [6] Brennen C E. Cavitation, Bubble Dynamics [M]. New York: Oxford University Press, 1995: 91.
- John R Blak, Giles S Keen, Robert P Tong. Acoustic cavitation: the fluid dynamics of non-spherical bubbles
 [J]. Phil. Trans.R. Soc.Lord A, 1999, 357: 251-267.
- [8] 黄继汤. 空化与空蚀的原理及应用 [M]. 北京: 清 华大学出版社, 1991.
- [9] Hammit F G. Mechanical Cavitation Damage Phenomena and Corrosion-Fatigues [C]. UMICH Report, No 03371- 7-T, University of Michigan, 1971.
- [10] 段昌国.水轮机沙粒磨损 [M].北京:清华太学出版社,1981.
- [11] Verstak A, Baranovski V. Deposition of carbides by activated combustion HVAF spraying [C]. Proceedings of the International Thermal Spray Conference, 2004: 551-555.

作者地址:北京海淀区学院路 30 号 100083 北京科技大学腐蚀防护中心 Tel: (010) 62399707 13691369843 E-mail: ssnabi@126.com