

水轮机过流部件表面 WC-CoCr 涂层的失效机理^{*}

李 勇, 李太江, 李 巍, 李聚涛, 刘 刚, 米紫昊

(西安热工研究院有限公司, 西安 710032)

摘 要: 应用于多泥沙河水轮机过流部件的超音速火焰喷涂 WC-CoCr 涂层在服役中受到泥沙作用而发生磨蚀。喷涂扁平粒子内部的 WC 硬质相受到泥沙作用而发生脱落。WC 扁平粒子碎片或喷涂飞溅部分在泥沙磨蚀作用下发生整体脱落。文中基于涂层现场采样分析和空蚀、冲蚀、磨损等试验研究超音速火焰喷涂 WC-CoCr 涂层的现场服役失效机理。结果表明: WC 涂层的抗磨损性能约为基体的 16 倍; 但其 30° 攻角下的抗冲蚀性能并不明显; 经过 8 h 空蚀试验后, WC 涂层的空蚀率下降至母材的 70%。空蚀过程中, 涂层的损伤从孔隙部位开始扩展, 在空蚀的作用下, 涂层磨蚀损伤加剧。在真实服役环境下 WC 颗粒的剥落、喷涂涂层粒子的剥落以及涂层中的孔隙诱发空蚀损伤是导致涂层失效的主要因素。

关键词: 水轮机; 冲蚀; 空蚀; 超音速火焰喷涂; 失效机理

中图分类号: TG174.442; TG172.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9289(2014)01-0018-07

Failure Mechanism of the WC-CoCr Coatings Deposited on Flow Passage Components of Hydraulic Turbines

LI Yong, LI Tai-jiang, LI Wei, LI Ju-tao, LIU Gang, MI Zi-hao

(Xi'an Thermal Power Research Institute Co. Ltd., Xi'an 710032)

Abstract: High velocity oxygen fuel(HVOF) sprayed WC-CoCr coatings were employed to protect flow passage components in hydraulic-turbine from erosion and cavitation suffer damage caused by sediment erosion. The failure mechanisms were studied by analyzing on the collected samples and experimental tests including cavitation erosion, solid particle erosion and abrasive wear test. The WC hard phases spall from the bond phase during sediment erosion. The WC-CoCr lamellae or fragments spall as an entirety during sediment erosion. The individual experimental results indicate that abrasive wear weight loss of HVOF sprayed WC-CoCr coating is 16 times as high as the substrate used in this study. The cavitation erosion test results show that WC-CoCr coating exhibit no advantage over the substrate material under the attack angle of 30°. After 8 h test, the cavitation ratio decreased to about 70% of the substrate. Cavitation concaves propagate from pores in coating, which prompt the coating damage. Results show that the peeling-off of WC hard phase in coating, the spalling of deposited lamella and the cavitation damage induced by pores lead to the failure of HVOF sprayed WC-CoCr coating serving at in-field situation.

Key words: hydraulic turbine; erosion; cavitation; high velocity oxygen fuel spraying(HVOF); failure mechanism

0 引 言

多泥沙流域水电站的水轮机过流部件如转轮、顶盖、底环及导叶等在含泥沙水流的作用下容易发生冲蚀、磨损、空蚀等损伤, 危害机组安全

运行。超音速火焰喷涂是目前广泛使用的一种水轮机过流部件表面抗磨蚀涂层的制备方法^[1-2]。利用超音速火焰喷涂的 WC-Co 或 WC-CoCr 涂层具有结构致密、结合强度高、抗冲蚀磨损性能

收稿日期: 2013-08-30; **修回日期:** 2013-11-06; **基金项目:** * 华能集团科技项目(HNKJ12-H34)

作者简介: 李勇(1982—), 男(汉), 四川重庆人, 工程师, 博士; **研究方向:** 热喷涂技术

网络出版日期: 2013-12-20 07:26; **网络出版地址:** <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20131220.0726.008.html>

引文格式: 李勇, 李太江, 李巍, 等. 水轮机过流部件表面 WC-CoCr 涂层的失效机理 [J]. 中国表面工程, 2014, 27(1): 18-24.

优异等特点^[3-5],在我国诸多水电站中获得应用^[6]。实践证明超音速火焰喷涂 WC 涂层具有较好的抗冲蚀磨损作用。在水电站的真实运行工况下,过流部件的损伤通常是冲蚀、磨损、空蚀等共同作用的结果。目前,大量的文献^[7-10]针对超音速火焰喷涂 WC 涂层的工艺及性能进行了研究,如优化涂层制备工艺,改进涂层制备方法等。但由于无法进行真实运行工况模拟以及现场采样等工作,对于超音速火焰喷涂 WC 涂层在真实服役环境中的失效机理缺乏相关报道。文中基于现场采样及试验分析,研究超音速火焰喷涂 WC-CoCr 涂层在现场服役工况下的失效机理。

1 采样与试验

采样电厂为华能康定冷竹关水电站,该电站装机容量为 3×60 MW 混流悬式机组,额定水头 362 m,额定转速 500 r/min。转轮型号 HL(E)-LJ-234。转轮叶片结构为 X 型长短叶片,合计 30 片。该电厂多年平均泥沙含量 0.624 kg/m³,汛期泥沙含量 0.824 kg/m³。泥沙级配如表 1 所示。悬移质泥沙中的中值粒径 d_{50} 为 0.129 mm,最大粒径为 1.31 mm,其中 $d>0.25$ mm 的泥沙的质量占 34.1%。

在该电厂检修期间,在涂层剥落部位的边缘,将涂层通过机械方法剥离转轮表面,将采集的样品用于实验室分析。并针对转轮叶片背面的涂层脱落情况进行磨蚀损伤记录,用于失效机理分析。

表 1 冷竹关水电站悬移质泥沙级配表
Table 1 Distribution of the suspended sediment at Leng Zhu Guan power station

Grain size/mm	0.005	0.01	0.025	0.05	0.10
Percent/%	2.6	4.9	12.5	26.1	43.6
Grain size/mm	0.25	0.50	1.00	2.00	
Percent/%	65.9	82.1	95.5	100	

由于采样电厂泥沙含量较高,磨蚀后涂层表面空蚀造成的损伤被磨蚀掩盖,难以观察到空蚀损伤后的组织结构,文中研究采用超音速火焰喷涂 WC-CoCr 涂层,基体为水轮机过流部件常用材料 0Cr13Ni5Mo,然后进行空蚀、冲蚀、磨损试

验及组织分析。喷涂材料粒度为 $(-45+15)\mu\text{m}$ 。按照 GBT 6383-2009《振动空蚀试验方法》标准加工空蚀试样,空蚀试样为 $\Phi 15.9$ mm 的圆柱,涂层喷涂在圆柱端面,喷涂后测量涂层平均厚度为 220 μm 。空蚀振动试验介质为蒸馏水,试验参数如表 2 所示。

表 2 空蚀振动试验参数 Table 2 Parameters of cavitation erosion test	
Parameter	Value
Frequency/Hz	20±1
Water temperature/℃	25±1
Magnetization current/A	6.5±0.5
Amplitude/mm	50±2.5
Generator current/mA	300±20

为了更为合理的评价基体和涂层的空蚀性能,采取空蚀率作为评价参数。空蚀率定义为单位时间、单位面积上因空蚀而产生的失重。试验前针对空蚀样品采用天平(精度:0.1 mg)进行质量检测,每次空蚀时间为 2 h,空蚀后再次进行质量检测,通过空蚀前后的质量变化获得空蚀率。

通过磨损试验对涂层和基体的磨损失重进行研究。采用根据美国 ASTM-G65-71 标准设计组装的橡胶轮磨粒磨损试验机进行磨损试验。磨损试验参数如表 3 所示。通过磨损失重与样品原始质量的比值来表征涂层和基体的抗磨损性能。

表 3 磨粒磨损试验参数
Table 3 Parameters of the abrasive wear test

Parameter	Value
Load/N	13
Speed/(r·min ⁻¹)	60
Diameter/mm	220
Particle size/ μm	50
Time/min	15

通过冲蚀试验进行涂层与基体的冲蚀性能测试,试验参数为:冲蚀距离为 100 mm,喷嘴内径为 3.6~4.0 mm,喷嘴长度为 22 mm,磨料为棕刚玉,粒度为 150 μm (100 目),压缩空气压力

为 0.3 MPa, 冲蚀角度为 30°。

利用数码相机(Canon IXUS 510HS)和扫描仪(HP Scanjet G3110)进行现场涂层磨蚀形貌采集。利用扫描电子显微镜(SEM, VEGA II-XMU, TESCAN, Czech)和能谱仪(EDS)进行涂层组织结构分析和微观形貌检测。

2 结果与讨论

2.1 涂层样品组织结构

图 1 为采集涂层样品的宏观组织形貌, 可见涂层表面存在大量同方向的磨痕。图 2 为磨痕微观表面形貌, 表面黑色物质为采集涂层表面残留的泥沙, 可见在磨蚀过程中, 涂层表面产生了犁沟状形貌, 涂层中原致密的 WC 颗粒在泥沙作用下被刮擦, 并向两侧凸起。

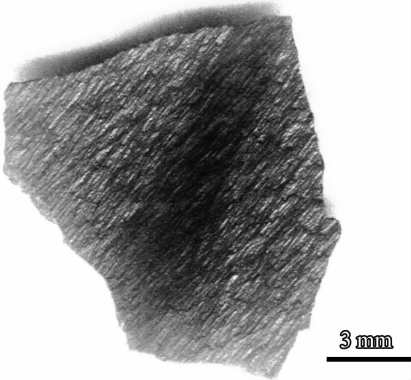


图 1 涂层样品的宏观形貌

Fig. 1 Macroscopic morphology of the coating sample

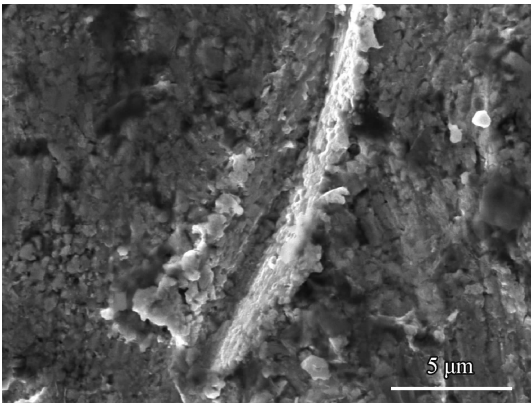


图 2 涂层表面的磨痕形貌

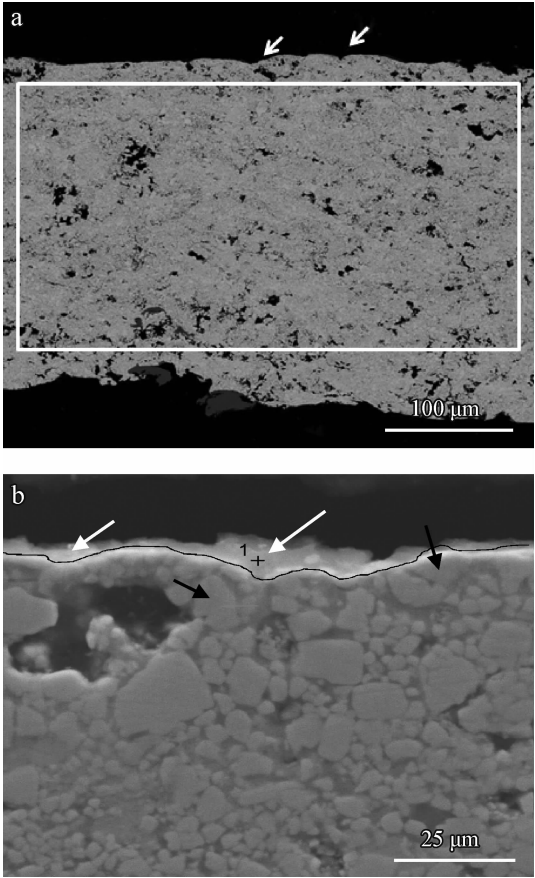
Fig. 2 Worn surface morphology of the of the coating

图 3 为采集涂层样品的断面组织结构, 涂层内部具有一定的孔隙, 选取中间部分(图 3(a)白色框线)进行孔隙率分析, 得孔隙率为 4.9%。测量

涂层厚度为 272 μm。涂层断面结构也显示涂层表面存在大量的磨蚀沟槽, 如图 3(a)白色箭头所示。

由图 3(b)可见, 涂层内部主要由 WC 颗粒及金属相构成, WC 颗粒呈白色菱形状, 如图中黑色箭头所示, 金属相呈暗灰色, 如图中白色箭头所示。WC 颗粒通过金属相粘结以提高涂层的内聚强度。

涂层磨蚀沟槽表面存在一层纯暗色物质, 如图 3(b)黑色线以上部位, 该层物质内部未发现白色 WC 硬质相, 基于 EDS 分析, 该暗色物质为 CoCr 金属相。这表明表层的 WC 颗粒脱离 CoCr 金属相, 使表面只残留了 CoCr 金属相薄层。



(a) Cross section (b) Enlargement of (a)

图 3 涂层的断面组织形貌

Fig. 3 Cross section morphologies of the coating

在现场工况下, 超音速火焰喷涂 WC 涂层中, 发生了喷涂粒子或粒子碎片剥落现象。图 4 白色线部分为喷涂过程中单个粉末颗粒经熔化、扁平、凝固而形成的单个扁平粒子在冷却中形成的粒子碎片或碰撞时产生的飞溅粒子, 这种现象与文献[11]中相关报道类似。该粒子碎片或飞

溅粒子与底部涂层已形成了明显的脱落间隙,同时在剥落的粒子表面观察到 WC 硬质相剥落的现象,如白色箭头所示。这表明喷涂涂层内部粒子间结合也影响涂层的抗磨蚀性能。

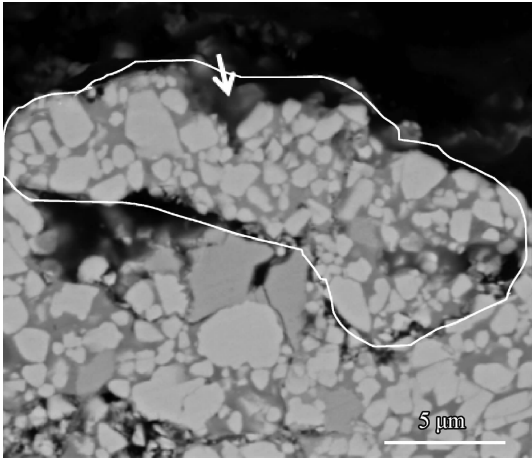


图 4 涂层表面喷涂粒子的微观形貌

Fig. 4 Morphology of the particles on the coating

图 5 为转轮出水侧叶片背面负压区域涂层脱落后的形貌,可以发现,脱落后的基体表面局部存在蜂窝状的点坑,表明该区域发生了空蚀损伤。超音速火焰喷涂的涂层在该区域不仅受到磨损、冲蚀作用,同时也受到空蚀损伤。此外,该区域涂层完全剥落,且冲蚀、磨损和空蚀已损伤了基体,这说明,该区域涂层在三者联合作用下,损伤程度更胜于以磨损和冲蚀为主的损伤。

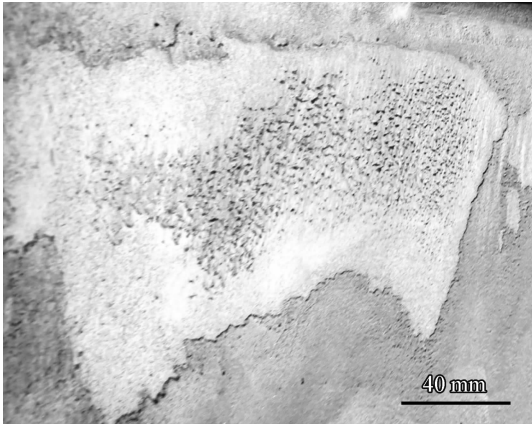


图 5 转轮出水侧叶片背面涂层剥落部位的空蚀形貌

Fig. 5 Cavitation morphology of the disbonding part of the coating at outlet side of runner blade

2.2 喷涂态涂层组织结构

图 6 为喷涂态涂层的组织形貌,喷涂试验用

涂层厚度平均约 220 μm,喷涂态涂层结构致密,界面结合良好,但涂层上表面的孔隙率高于底部,这主要是因为涂层表面缺乏后续粒子的冲击夯实作用,此外喷涂过程中,涂层表面受到拉应力状态也可能导致涂层表层孔隙率的增加。

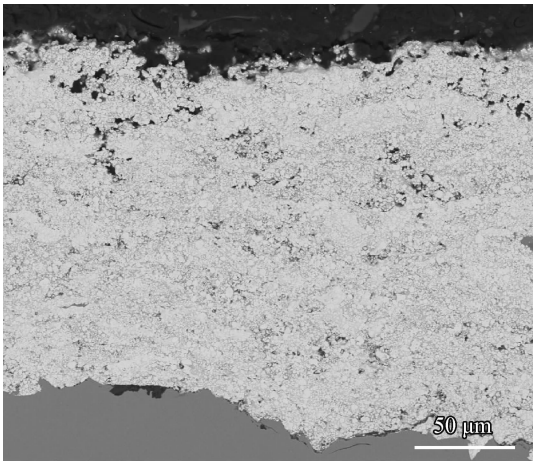


图 6 喷涂态涂层的组织形貌

Fig. 6 Morphology of the as-sprayed coating

2.3 空蚀性能

图 7 为超音速火焰喷涂 WC-CoCr 涂层与基体的空蚀性能对比。随着空蚀时间的延长,基体的空蚀率略微下降,但并不明显。HVOF 喷涂 WC-CoCr 涂层在空蚀初期发生严重的涂层物质损失,其空蚀率约为基体材料的 2.5 倍。然而随着空蚀时间的延长,其空蚀率不断降低。空蚀 8 h 后,涂层的空蚀率低于基体,约为 70%。其下降的原因可能与涂层表层孔隙率较高有关,当孔隙

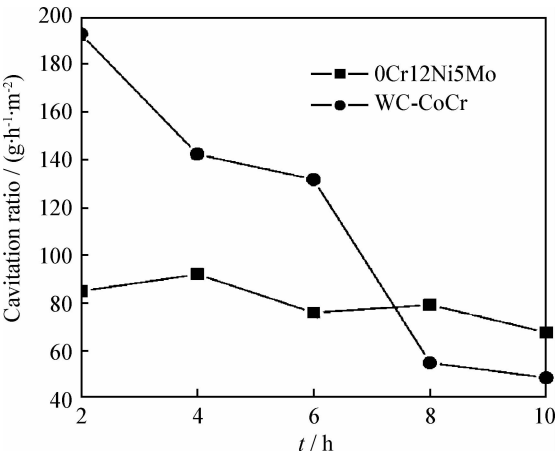


图 7 WC-CoCr 涂层与基体的空蚀率

Fig. 7 Cavitation ratio of the WC-CoCr coating and substrate

率较高的表层被空蚀损伤发生物质流失后,底部的涂层更致密,因此其抗空蚀性能得到提高。

2.4 磨损性能

图 8 为 HVOF 喷涂 WC-CoCr 涂层与基体的磨损性能对比。可见超音速火焰喷涂 WC-CoCr 涂层具有比 0Cr13Ni5Mo 基体更高的抗磨损性能,其相对磨损失重比仅为基体材料的 1/16。

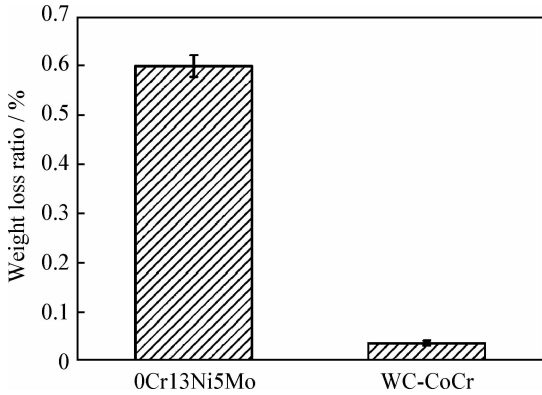


图 8 WC-CoCr 涂层与基体的磨损失重比
Fig.8 Weight loss ratio of the WC-CoCr coating and substrate

2.5 冲蚀性能

图 9 所示为 HVOF 喷涂 WC-CoCr 涂层与基体的冲蚀性能对比。在小角度冲蚀情况下,与 0Cr13Ni5Mo 基体相比,超音速火焰喷涂 WC-CoCr 涂层抗冲蚀性能并不明显。

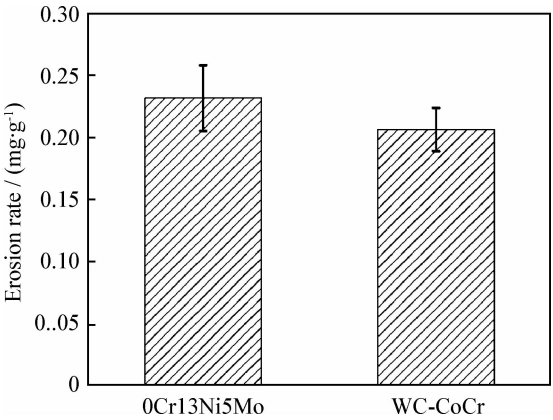


图 9 WC-CoCr 涂层与基体的冲蚀率
Fig.9 Solid particle erosion ratio of the WC-CoCr coating and substrate

在水轮机真实工况即小角度冲蚀工况下,金属相抗磨蚀能力较差。在外来异质泥沙颗粒的小角度冲蚀磨损作用下,作为粘结相的 CoCr 合金易于被磨蚀,导致硬质颗粒裸露,如图 10(a)(b)所示。当大量金属相被磨蚀后,WC 硬质颗粒周围的金属相对其不能起到足够的粘结作用,因此在后续泥沙的冲蚀及磨损作用下,硬质颗粒将脱离金属相,如图 10(c)所示。WC 硬质颗粒脱落后,表层以金属相为主,且 WC 颗粒脱落后,表面形成的不平整,如凹坑,加剧了泥沙对金属相的冲蚀和磨损作用。金属相被磨蚀后导致硬质颗粒结合强度减弱,易于被磨蚀,如图 10(d)所示。在大量的泥沙作用下,以上过程重复不断的发生,最终导致 WC-CoCr 涂层的磨蚀失效。

2.6 磨蚀失效机理

超音速火焰喷涂 WC 涂层中 WC 硬质相通过金属相 CoCr 合金粘结,在磨蚀的过程中,WC 硬质相起到抗冲蚀、磨损的作用。与硬质相比,

WC 热喷涂粉末由大量的微米级及亚微米级 WC 颗粒经团聚而形成。热喷涂涂层是粉末粒子

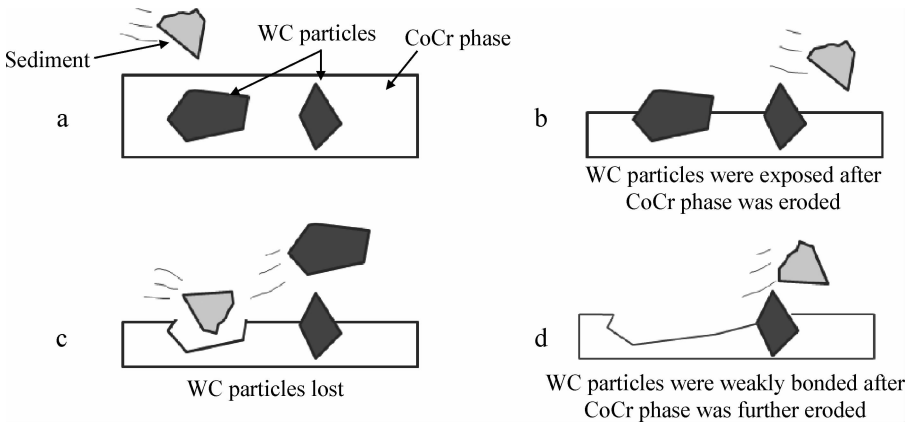


图 10 WC 硬质颗粒剥落失效机理示意图
Fig.10 Schematic diagram of the failure mechanism of WC hard phase

经过高温焰流加热、加速后与基体碰撞并发生冷却、凝固而形成的扁平粒子堆积结构的涂层^[12]。涂层的断面通常表现为典型的层状组织结构,扁平状的粒子之间结合率低、结合强度低。在外来含砂水流的冲击作用下,弱结合的热喷涂 WC-CoCr 粉末粒子将发生剥落失效,形成如图 3(b)所示失效后的组织结构。在采集样品中发现的这一现象在冲蚀试验后也发现了涂层粒子或粒子碎片剥落的情况,如图 11 中白色箭头所示。

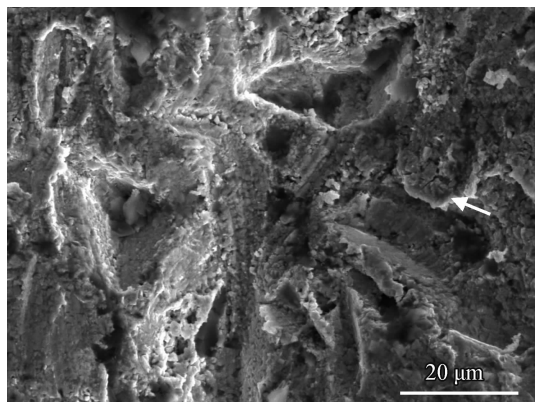


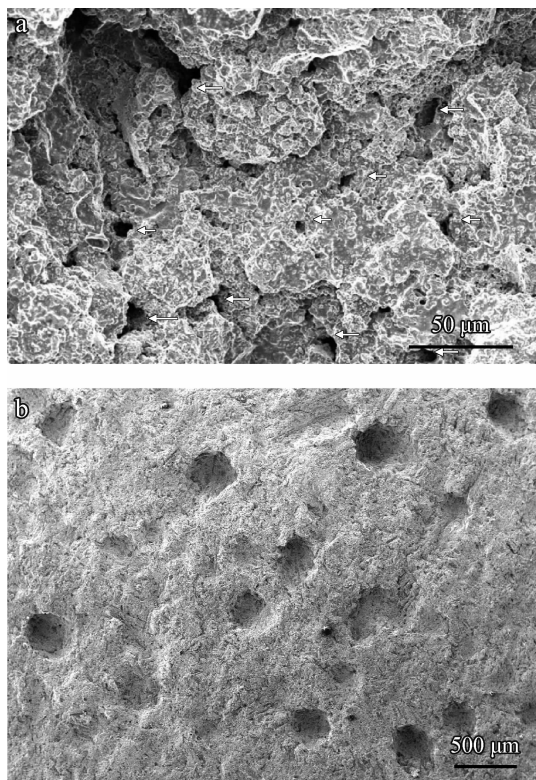
图 11 冲蚀试验后涂层的表面形貌

Fig. 11 Morphology of the coating after solid particle erosion test

另一方面,水轮机过流部件由于结构问题,如流道横截面积的突变,导叶裙边、导叶进水侧圆柱结构的障碍物、转轮叶片背面等都会导致如转轮叶片、导叶等区域不可避免的形成低压区,当压力降低到临界值时,液体也会汽化或溶解于其中的空气发育形成空穴,这一过程称为空化。当空穴进入压力较低的区域时,就开始发育成长为较大的气泡,气泡被流体带到压力高于临界值的区域后将溃灭,在空泡溃灭过程中伴随着机械、电化、热力、化学等过程的作用,将产生高速射流,这种射流将引起过流表面的材料损坏。热喷涂涂层的结构为堆垛层状结构,层间和涂层内部孔隙中充满一定的气体,这些气体因流道压力的变化极易形成气泡,增加了气蚀的可能性,在气泡溃灭产生的射流作用下,将导致涂层粒子间隙处受到射流冲击作用,而形成气蚀坑。

空蚀初期(2 h),空蚀坑直径约 50 μm ,同时存在部分小的空蚀坑,如图 12(a)箭头所示,这些空蚀坑通常分布于涂层粒子的交接处或孔隙处。随着空蚀的继续发展,这些空蚀坑部位将进一步扩大,形成如图 12(b)所示的大空蚀坑,直径约为

300~400 μm 。其扩大的原因为早期形成的空蚀坑促进了气泡的形成。而一旦这种空蚀坑形成后,涂层表面变得更加粗糙,在含砂水流的冲刷作用下,磨蚀速度将加快。这表明涂层的致密度对空蚀损伤具有较大的影响。一方面,致密的涂层降低了涂层中气体的含量,另一方面致密的涂层具有更高的结合强度,可提高涂层的抗磨蚀性能。



(a) 2 h (b) 8 h

图 12 空蚀 2 h 和 8 h 后涂层的表面形貌

Fig. 12 Morphologies of the coating after covitation for 2 h and 8 h

尽管随着空蚀的进行,涂层的空蚀率降低。但在真实服役环境下,涂层表面的环境是高速流动的含泥沙动态水流,并非试验测试条件下的静态蒸馏水,在这种情况下,空蚀和磨损、冲蚀联合作用,空蚀后产生的空蚀坑更加剧了泥沙的磨蚀,因此在空蚀部位,涂层将优先于其他以磨损、冲蚀为主的部位而脱落,形成图 5 所示形貌。

基于以上分析,提高 WC 颗粒的结合强度、涂层的内聚强度以及致密度可提高超音速喷涂 WC-CoCr 涂层抗磨蚀性能。采用超音速火焰喷涂工艺进行水轮机过流部件涂层喷涂时,应在工艺上进行优化,提高涂层的致密度。也可对涂层

采取封孔措施,封孔工艺及所用材料应保证涂层内部也能获得较好的封孔效果,否则涂层表面层磨蚀后,残留涂层仍然不能起到抗磨蚀的作用。

3 结 论

基于现场采样样品失效后的组织结构分析及试验结果,超音速火焰喷涂 WC 涂层的失效机理可归纳为:

(1)亚微米级 WC 硬质相的剥落导致涂层发生磨蚀。

(2)热喷涂涂层扁平粒子的弱结合导致涂层内部粒子或粒子碎片发生脱落。

(3)涂层中的孔隙引发的空蚀加剧了涂层磨蚀的损伤程度。

参考文献

- [1] 王华仁,张光华,李曙,等. HVOF 喷涂 WC-10Co-4Cr 涂层耐泥沙冲蚀研究 [J]. 东方电气评论, 2011, 25(1): 41-47.
- [2] 岳高峰,李延频,陈德新. 多泥沙河流水轮机磨蚀改造分析 [J]. 水力发电, 2010, 36(5): 56-58.
- [3] Erning U, Nestler M C, Tauchert G, et al. Proceedings of UTSC'99 [C]. Dusseldorf: German Welding Society, 1999: 462
- [4] 李阳,刘阳,段德莉,等. HVOF 热喷 WC-CoCr 涂层在不同攻角下的料浆冲蚀行为 [J]. 中国表面工程, 2011, 24(6): 11-18.

- [5] 李阳,刘阳,段德莉,等. WC-CoCr 涂层和 0Cr13Ni5Mo 基材的气体喷砂冲蚀行为 [J]. 中国表面工程, 2013, 26(2): 14-20.
- [6] 顾四行,杨天生,闵京声. 水机磨蚀 [M]. 北京:中国水利水电出版社, 2008.
- [7] 马光,樊自拴,孙冬柏,等. AC-HVAF 喷涂 Ni60/WC 复合涂层微观组织及冲刷磨损性能研究 [J]. 有色金属(冶炼部分), 2006(Z1): 19-22.
- [8] 王国刚,孙冬柏,樊自拴,等. HVAF 制备 WC-12Co 涂层的空蚀和磨损性能研究 [J]. 中国表面工程, 2006, 19(4): 21-24.
- [9] 雷强,李文亚,袁建辉,等. 亚微米 WC 添加对超音速火焰喷涂 WC-Co 涂层磨损性能影响 [J]. 中国表面工程, 2012, 25(2): 43-48.
- [10] Wang B, Wang Y D, Zhang Z H. WC-M coating to improve resistance of hydraulic turbines to cavitation erosion and abrasion [J]. Transactions of the Nonferrous Metal Society of China, 2003,13(4): 893-897.
- [11] Li C J, Ohmori A, Harada Y. Effect of WC particle size on the formation of HVOF sprayed WC-Co coatings [J]. Thermal Spraying - Current Status and Future Trends, 1995: 235-240.
- [12] Pierre F, Ghislain M, Ghislaine B. From powders to thermally sprayed coatings [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2010, 19(1/2): 56-80.

作者地址: 陕西省西安市兴庆路 136 号

710032

西安热工研究院有限公司

Tel: (029) 8210 2409

E-mail: liyong@tpri.com.cn

(责任编辑:王文字)

• 学术动态 •

2014 年全国青年摩擦学学术会议将于湖北宜昌召开

中国机械工程学会摩擦学分会将于 2014 年 5 月 15~18 日在湖北省宜昌市召开 2014 年全国青年摩擦学学术会议。本次会议由 中国机械工程学会摩擦学分会青年工作委员会主办,三峡大学承办,中国机械工程学会摩擦学分会和国家自然科学基金委员会工程与材料学部支持,武汉理工大学协办。

会议设大会报告、分会场报告以及展览交流 3 种形式,会议主题(但不限于)包括:①摩擦与磨损的基础研究;②润滑的基础研究;③表面工程;④摩擦化学与界面;⑤环境与生态;⑥生物与仿生;⑦工业摩擦学;⑧微纳摩擦学与应用;⑨摩擦学创新研究——新理论、新现象、新方法 & 新应用。同时,会议特别欢迎能源装备关键零部件摩擦学问题研究、节能减排等方面的研究成果。

会议将印制非正式出版的论文/论文详细摘要文集,摘要征文截止日期为 2014 年 2 月 1 日,论文全文截止日期为 2014 年 3 月 31 日。

(摘自中国机械工程学会网)