AC-HVAF 喷涂微纳米复合 WC 涂层在水电设备抗空蚀工程中的应用

岳建锋[1]，李勇[2]，杨 冬[1]

(1 华能澜沧江水电股份有限公司检修分公司，昆明 650204；
2 西安热工研究院有限公司，西安 710048)

摘要：水轮机过流部件的空蚀损伤引起设备本体材料流失，破坏机组结构，降低机组运行安全性。涂层防护是抗空蚀损伤的主要手段，本文拟通过降低涂层孔隙率提高涂层的抗空蚀性能。采用空气助燃超音速火焰喷涂技术(AC-HVAF) 制备了微纳米复合 WC 涂层，分别采用静态振动空蚀试验和高速流体空蚀试验进行涂层抗空蚀性能表征，结果表明，AC-HVAF 喷涂的微纳米复合 WC 涂层孔隙率为 0.2%，涂层孔隙细小，分布均匀，涂层抗空蚀性能优于传统 HVOF 喷涂涂层。在水电站现场应用结果表明，经过 5.5 年运行后，涂层完好。AC-HVAF 喷涂微纳米复合 WC 涂层可有效提高水电设备的抗空蚀能力，提高了机组的安全性。

关键词：顶盖；空蚀；空气助燃超音速火焰喷涂

中图分类号：TG174.4 文献标识码：A 文章编号：1674-7127(2020)09-0010-07
DOI 10.3969/j.issn.1674-7127.2020.03.010

Application of AC-HVAF Micro-nano WC Composite Coating against Cavitation Damage in Equipment of Hydropower Station

Jianfeng Yue[1], Yong Li[2] , Dong Yang[1]

(1. Maintenance department of Huaneng Lancang River Hydropower Inc., kunming 650204;
2 Xi'an Thermal Power Research Institute Inc., Xi'an 710048)

Abstract: The cavitation damage of the overflow components of the hydraulic turbines causes the removing of the equipment materials, thus damage unit structure and degrades the safety of units. Thermal sprayed coatings are effective method against cavitation damage. This paper intends to improve the cavitation corrosion resistance of the coating by reducing the porosity of the coatings. Micro-nano composite WC coatings were fabricated by air-combusted high-velocity oxygen fuel spray (AC-HVAF). Static vibration cavitation test and high-speed fluid cavitation test were respectively used to characterize the cavitation resistance performance of the coatings. The results showed that the micro-nano WC composite coatings by AC-HVAF exhibited a homogeneous and dense microstructure with porosity of 0.2%. Compared with the same coatings deposited by HVOF, higher resistance to cavitation is examined during vibration cavitation test and high speed fluid cavitation test for micro-nano WC composite coatings prepared by AC-HVAF. After 5.5 years operation, the coatings remained intact. The micro-nano composite WC coatings deposited by AC-HVAF can effectively improve the anti-cavitation ability of hydropower equipment and the safety of the unit.

Keywords: Head cover; Cavitation; AC-HVAF

第一作者：岳建锋 (1982-)，男，高级工程师，E-mail：149244971@qq.com。

0 引言

在流体机械中，局部流体压力因结构突变而降低，易于引发空化现象，对设备造成空蚀损伤，从而在流体机械部件表面出现麻点、针孔等损伤现象，严重时甚至产生蜂窝或海绵状[1,2]。空蚀损伤通常与流体机械结构相关，表面涂层防护技术是降低或延缓空蚀对设备损伤的主要方法之一[3]。目前在中低水头水电站中主要采用有聚氨酯和改性聚乙烯有机涂覆层[4,5]，利用涂覆层的弹性，提高材料的抗空蚀损伤能力，但结合强度低不能满足高水头水电站设备的空蚀防护需求。NiTi 超弹性合金也具有良好的抗空蚀性能[6,7]，但因其工艺性能差，材料价格昂贵，目前主要采用 NiTi 合金丝材通过电弧喷涂制成涂层，但结合强度仍然不能满足需求。碳化钨 (WC) 是目前广泛应用的一种抗空蚀材料，通常采用超音速火焰喷涂方法制备[8], 但其性能还有待提高。对此，前期研究[9]中通过现场采样并进行涂层失效机理分析发现，热喷涂堆垛层状结构的孔隙中充满气体，这些气体因流道压力的变化极易形成气泡溢出增加流体中的气泡含量，加剧空蚀损伤，而工程应用中封孔工艺并不能完全填充涂层气孔，因此，降低涂层孔隙有望提高涂层抗空蚀性能。本文拟采用空气助燃超音速火焰喷涂 (AC-HVAF) 技术制备高致密度涂层，进行抗空蚀性能试验，并在现场进行涂层的抗空蚀性能应用考核。

1 试验

采用微纳米复合结构的 WC-10Co4Cr 作为喷涂材料，粒度为 21~50μm。分别采用 HVOF (Metco DJ2700) 和 AC-HVAF(Uniquecoat M3) 喷涂技术制备涂层，喷涂工艺参数详见前期研究工作[10]，并进行空蚀试验及组织分析。利用扫描电子显微镜 (SEM， MIRA3, TESCAN, Czech) 和能谱仪 (EDS) 进行涂层组织结构分析，孔隙率测量方法为图像法，选取 500 倍的组织照片 3 张，通过图像处理获取孔隙率。按照 GB/T 6383-2009《振动空蚀试验方法》进行空蚀试验, 空蚀振动参数如表 1 所示，这是一种静态试验过程。为模拟电站流体机械的实际工况，开展了高速流体空蚀试验，即在高速流体的作用下进行扰流空蚀试验，原理如图 1 所示，在涂层的前端有一个扰流体，转盘高速旋转时可在其后方涂层表面形成空化区，对涂层造成损伤，通过测量失重并转化为涂层体积损失来评价涂层的抗空蚀性能。高速流体空蚀试验转盘转速 3000r/min，转盘样品节圆直径 300mm，介质为蒸馏水，为消除传统浑水磨蚀试验中涂层从样品边缘脱落的现象，试验过程中对样品安装方式进行了优化，采用了图 1b 所示涂层和绕流体的一体式结构。

表 1 空蚀振动试验参数

Table 1 Cavitation vibration test parameters

参数	频率 (Hz)	水温 (℃)	磁化电流 (A)	振幅 (mm)	水质	发生器电流 (mA)
参数值	20±1	25±1	6.5±0.5	50±2.5	蒸馏水	300±20

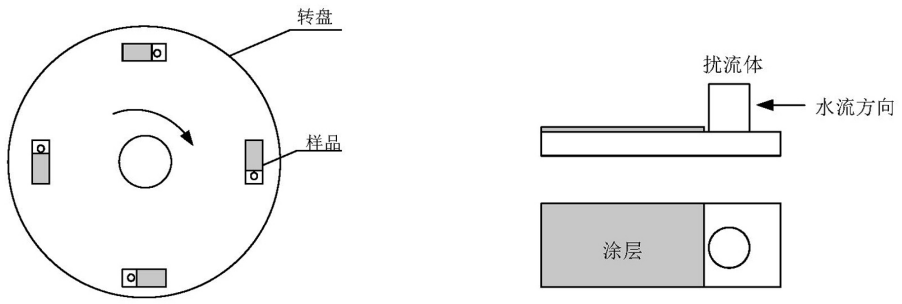

图 1 高速流体空蚀试验：(a) 高速转盘空蚀试验；(b) 涂层样品结构及一体式扰流体

Fig.1 High speed fluid cavitation test:

(a) high speed turn plate cavitation corrosion test; (b) coating sample structure and integrated disturbance fluid

2 结果与讨论

2.1 涂层组织

AC-HVAF 制备的涂层喷涂态组织结构如图 2 所示，与传统 HVOF 喷涂态涂层 (图 3) 相比，AC-HVAF 涂层更致密，孔隙率仅为 0.2±0.04%，孔隙尺寸较小，其二维平面尺寸都小于 2μm，基体法线方向上组织分布均匀，表面粗糙度 Ra 为 0.75μm。而 HVOF 喷涂涂层内部存在可见的孔隙，经统计孔隙率为 2.3±0.07%，孔隙最大尺寸可达 10μm 左右，主要分布在涂层近表层，呈梯度分布，其表面粗糙度 Ra 为 4.5μm。 两种工艺相比，AC-HVAF 制备涂层具有更致密的结构，孔隙分布均匀，尺寸细小，涂层表面粗糙度低。

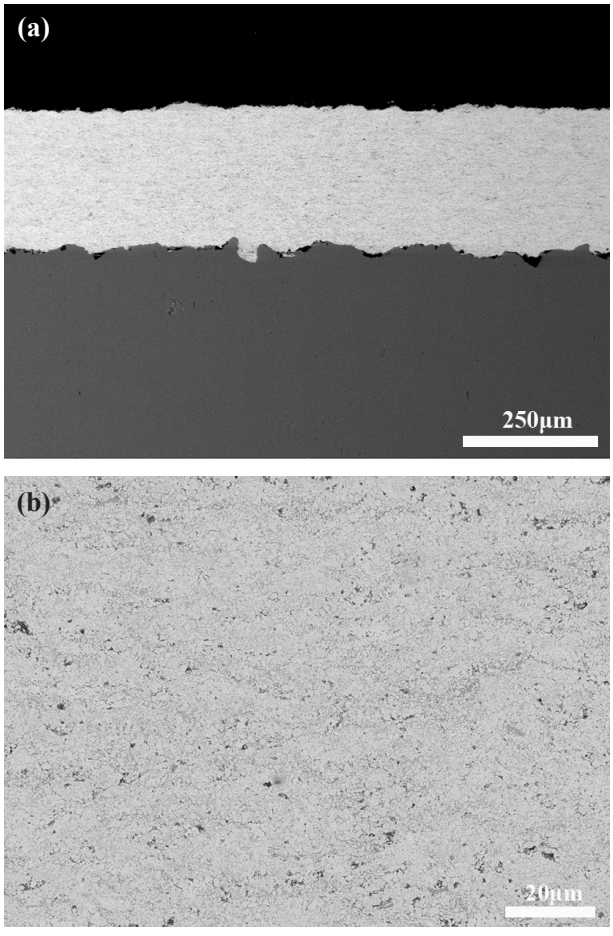

图 2 AC-HVAF 喷涂 WC-10Co4Cr 涂层组织结构：
(a) 200X; (b)2000X
Fig.2 Structure of WC-10Co4Cr coating deposited by AC-HVAF: (a) 200X; (b)2000X

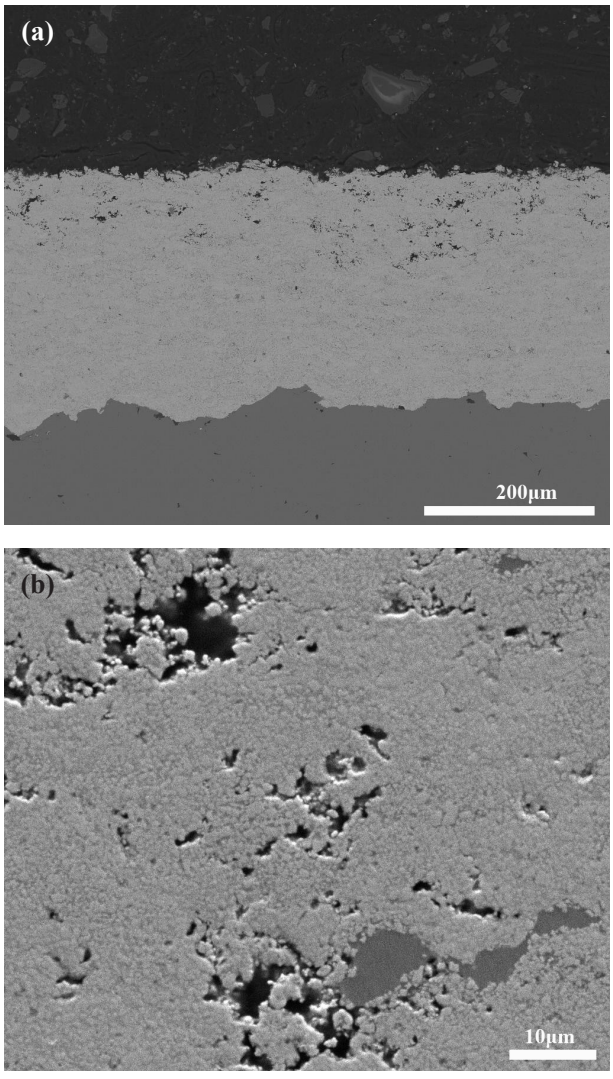

图 3 HVOF 喷涂 WC-10Co4Cr 涂层组织结构：
(a) 200X; (b)2000X
Fig.3 Structure of WC-10Co4Cr coating deposited by HVOF: (a) 200X; (b)2000X

2.2 抗静态空蚀性能

图 4 所示为静态环境下的每 2h 的空蚀试验结果，0Cr13Ni5Mo 基体在空蚀过程中基本保持稳定的体积损失。两种涂层在空蚀初期，其体积损失超过基体，尤其是 HVOF 喷涂涂层，结合图 3 所示涂层的组织结构可以发现，HVOF 喷涂涂层表层相对疏松，而 HVAF 喷涂涂层表层相对致密，在空蚀过程中不易发生脱落，然而两种工艺方法制备的涂层粒子结合强度毕竟低于铸造状态的 0Cr13Ni5Mo 基体，因此两种涂层空蚀初期的体积损失高于不锈钢基体，而 HVAF 制备致密涂层的

体积损失低于 HVOF 喷涂涂层。经过 4h 空蚀过程，两种涂层的体积损失低于不锈钢基体，WC-CoCr 材料的抗空蚀性能得到发挥，表层疏松层脱落后涂层的孔隙率降低，涂层体积损失均趋于稳定发展，通过 AC-HVAF 喷涂的 WC 涂层致密性得到了提高后，涂层在确定时间内的空蚀体积损失相比传统 HVOF 喷涂涂层有所降低。

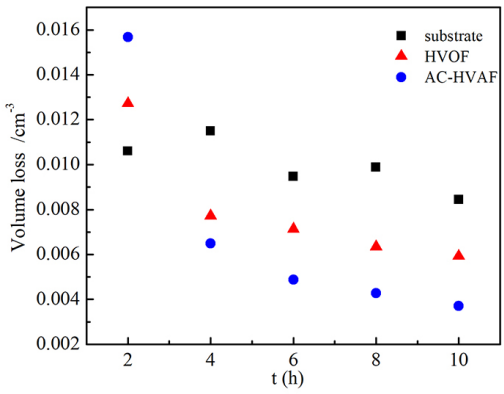

图 4 静态环境下的空蚀损伤单次测试的体积损失

Fig.4 The volume loss of a single test for cavitation damage under static conditions

2.3 高速流体空蚀性能

图 5 为基体和不同涂层在高速流体空蚀环境下累计体积损失，可见在高速流体工况下，超音速火焰喷涂涂层仍然体现出比不锈钢基体更优异的抗空蚀损伤性能。事实上，高速流体空蚀试验过程不仅仅是空化过程，同时也存在高速流体的冲刷作用。随着涂层制备方法的改进，涂层致密度的提升，涂层的抗空蚀损伤性能得到进一步改善，AC-HVAF 喷涂涂层的累计空蚀体积损失相比传统 HVOF 喷涂涂层更低。在高速流体作用下，基体表面受到空化作用变得越来越粗糙，这种粗糙在静态、去离子水的环境中并不会对试验结果产生影响，但在自来水这种微观含有微量固体颗粒的高速流动过程中，高速流体会加速基体粗糙化部分的脱落，但这种现象在涂层中相对较弱，因为在高速旋转过程中，水流的冲击方向近乎平行于样品表面流过，WC-CoCr 涂层本身具有较高的抗小角度冲蚀性能，因此其体积损失明显比基体降低。

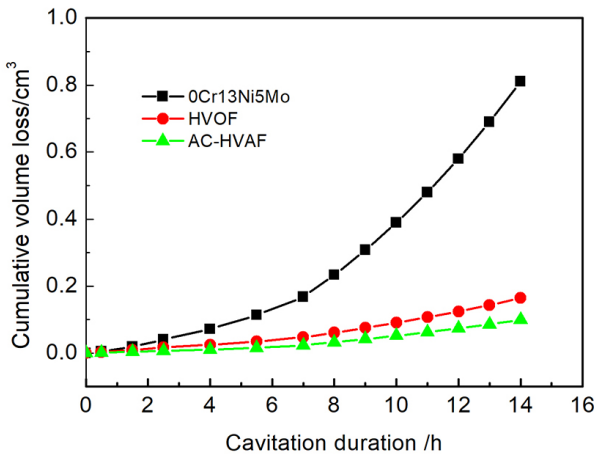

图 5 高速流体空蚀环境下累计体积损失

Fig.5 Accumulative volume loss under high speed fluid cavitation environment

3 现场应用实践

3.1 空蚀损伤现象

西南某水电站自 2010 年 8 月份全部 6 台机组投产以来，在历年的大修中 6 台机组顶盖均存在不同程度的空蚀现象，对机组的安全稳定运行带来巨大隐患。抗磨板内侧碳钢部分空蚀损伤后，表现出 φ1.0~1.5mm 的密集孔，如图 6(a) 所示，分布在高度为 100mm，直径为 φ6830mm 的圆柱面上。而顶盖圆锥面上 4 个卸压孔附近、卸压孔过渡段空蚀更为严重，空蚀形态表现为疏松的海绵状结构，如图 6(b) 所示，空蚀损伤深度可达 25mm。顶盖 4 个圆锥瓣体对接缝存附近也产生密集针孔状的空蚀损伤，如图 6(c) 所示。各台机组的顶盖损伤情况如表 2 所示。

3.2 空蚀损伤原因分析

流体机械的空蚀通常与结构有关 [1]。该水电站顶盖是由 4 个泄压孔均布于底部的圆锥面上，该部位结构如图 7(a) 所示，泄压管与顶盖圆锥面成一定倾角，水流在流经过渡段时，流向发生变动，过渡段左侧的台阶构成了绕流体，从而在其后方（即图示左侧）产生空蚀损伤，如图 7(a)。同样的现象也发生在组成顶盖圆锥面的 4 个瓣体对接焊缝处，如图 7(b) 所示，这种突变台阶造成的空蚀损伤形貌如图 6(c) 所示。

除结构因素外，设备制造采用的材料也是

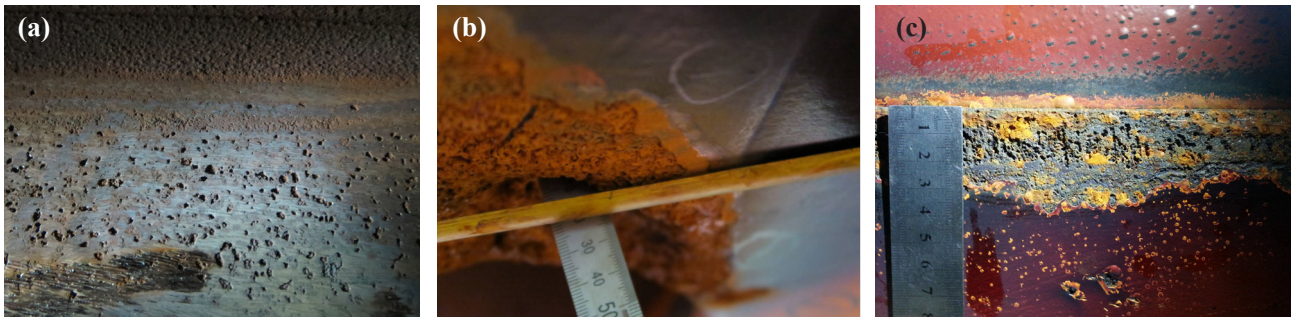

图 6 顶盖空蚀损伤：(a) 密集孔状空蚀损伤；(b) 卸压孔附近空蚀损伤；(c) 对接缝台阶附近空蚀损伤

Fig.6 Cavitation damage of cap: (a) dense pore cavitation damage; (b) cavitation damage near pressure relief hole; (c) cavitation damage near joint step

表 2 历次大修顶盖空蚀损伤情况汇总

Table2 The summarized cavitation damage of the top of previous overhaul

机组编号	投运时间	第一次大修时间（顶盖吊出）	顶盖空蚀情况
1#	2009 年 9 月	2015 年 1 月	φ6830 圆柱面密集空蚀孔、卸压孔周边空蚀、防腐漆脱落，金属锈蚀。
2#	2009 年 11 月	2014 年 1 月	φ6830 圆柱面密集空蚀孔、圆锥面卸压孔附近及过渡段空蚀、最大深度 25mm，防腐漆脱落，金属锈蚀。瓣体对接缝附近空蚀损伤。
3#	2009 年 12 月	2015 年 12 月	φ6830 圆柱面密集空蚀孔、圆锥面卸压孔附近及过渡段空蚀、最大深度 23mm，防腐漆脱落，金属锈蚀。
4#	2010 年 4 月	2012 年 12 月	φ6830 圆柱面密集空蚀孔、圆锥面卸压孔附近及过渡段空蚀，防腐漆脱落，金属锈蚀。
5#	2010 年 6 月	2016 年 11 月	φ6830 圆柱面密集空蚀孔、圆锥面卸压孔附近及过渡段空蚀，防腐漆脱落，金属锈蚀。
6#	2010 年 8 月	2013 年 4 月	φ6830 圆柱面密集空蚀孔、圆锥面卸压孔附近及过渡段空蚀，防腐漆脱落，金属锈蚀。

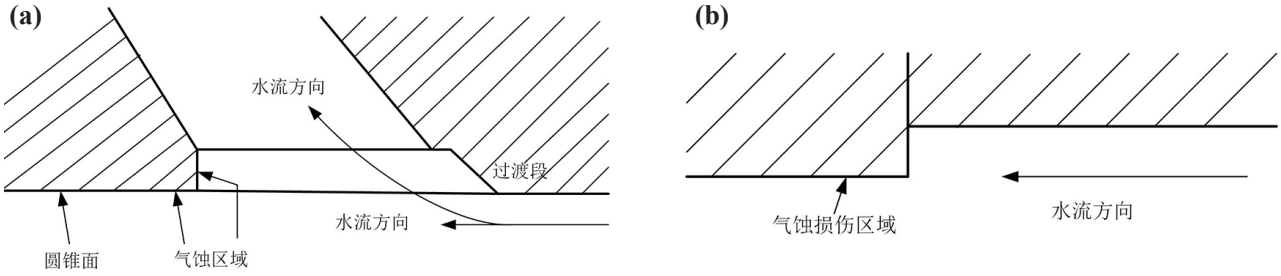

图 7 空蚀区域结构：(a) 泄压孔附近空蚀；(b) 圆锥瓣体对接缝台阶附近空蚀

Fig.7 Cavitation zone structure: (a) cavitation erosion near pressure relief hole; (b) cavitation erosion of conical valve body near joint step

引起空蚀损伤的主要因素，碳钢的强度比不锈钢低，更易于发生空蚀损伤。在我国水电站设备中，对于易受到空蚀、磨损的部件，比如转轮、导叶、顶盖及底环的抗磨板大部分采用的材质为 0Cr13Ni5Mo 系列的材料。小湾水电站顶盖的抗磨板采用的 CA6 NM 钢板与 0Cr13Ni5Mo 马氏体不锈钢相当，其抗空蚀性能优异，没有发生空蚀，但顶盖本体采用的材料主要为 Q235B 碳钢，这也是引起顶盖发生空蚀的原因之一。

3.3 抗空蚀损伤工程措施

在结构和材料两种因素中，可进行局部微区的结构优化，但设备本体的材料无法改变。因此，在解决该工程问题时，首先进行结构优化，并对气蚀损伤区域进行修型，然后采用热喷涂抗空蚀涂层进行防护。

3.3.1 结构优化

基于气蚀损伤原因分析，需对顶盖气蚀部位结构进行优化处理，尤其是卸压管口位置，应保持圆滑平顺过渡（如图 8(a) 所示）；与图 7(a) 相比，主要对泄压孔的垂直面进行圆滑过渡，减弱垂直面扰流后在其后方形成的空化程度，并采用 A302 不锈钢焊条对损伤区域进行焊接修复，同时采用 A302 不锈钢焊条对过渡段形成的台阶型线进行堆焊，并打磨使其平滑过渡。基于以上处理，泄压孔周边结构得到改善、同时材质得到提升。此外对圆锥瓣体对接缝的台阶进行结构优化，将图 7(b) 所示约 10mm 的台阶消除，并平滑过渡，防止形成绕流体。对存在针孔状的气蚀损伤部位，首先去除气蚀孔，然后采用 A302 不锈钢焊条进行表面堆焊，最后机械打磨去除余高。

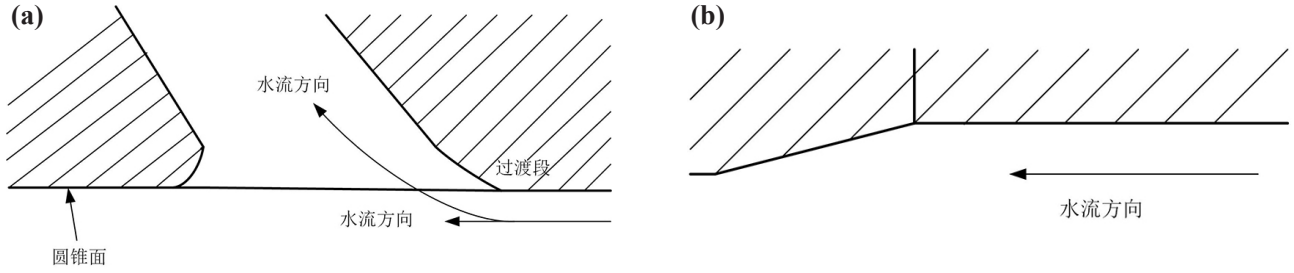

图 8 气蚀区域结构：(a) 泄压孔过渡段结构优化；(b) 圆锥瓣体对接缝台阶优化

Fig.8 Cavitation zone structure: (a) optimized structure for the transition section of the pressure relief hole (b) optimized conical valves for seam steps

3.3.2 抗空蚀防护涂层的应用

根据前期试验结果，将 AC-HVAF 喷涂微纳米复合 WC 涂层应用于该水电站的顶盖抗空蚀防护工程，并进行真实工况应用考核。2014 年 3 月对该水电厂 2 号机组顶盖进行了抗空蚀涂层喷涂施工，喷涂施工完毕后，顶盖于 2014 年 6 月投入运行。至 2019 年 12 月，喷涂后的顶盖运行了 5.5 年后，再次进行 A+ 级大修，吊出顶盖进行检查，发现 2014 年喷涂的涂层保持完好，顶盖卸压管口位置空蚀情况大为改善。检查结果如下。

(1) 原未经防护，运行 2.5 年就发生严重损伤的部位，经过 AC-HVAF 喷涂微纳米复合 WC 涂层防护后运行 5.5 年，原空蚀严重的卸压孔周边、抗磨板侧面、水平大圆环平面三个区域无明显空蚀，涂层保持完好，如图 9 所示。涂层完好，经过测量，涂层仍然保持 300μm 以上的厚度。

(2) 原顶盖安装对接焊缝空蚀损伤严重区经过喷涂防护后，对接焊缝区域再无空蚀、锈蚀等现象，涂层保持完整。有效改善了该区域的空蚀损伤程度，如图 10 所示。

图 9 顶盖缝合处防护后运行 5.5 年，涂层完好

Fig.9 The intact coatings of sutures at the top after 5.5 years protection

图 10 喷涂防护涂层后的焊缝对接区域
Fig.10 Weld butt area after spraying protection

5. 结论

针对水电站空蚀损伤开展了防护涂层试验，获得了高致密度的涂层，有效提高了涂层的抗空蚀损伤能力，结论如下：

(1)AC-HVAF 喷涂工艺可以获得比传统 HVOF 更致密的涂层，涂层孔隙分布均匀，孔隙率为 0.2%。

(2)AC-HVAF 喷涂工艺制备的微纳米复合 WC 涂层在静态和高速流体空蚀实验中均能获得比不锈钢基体和传统 HVOF 喷涂 WC 涂层更优的抗空蚀性能。

(3) 设备的空蚀损伤与其局部的突变结构有关，结构的突变易于在流体前进方向的金属避免形成空化现象，结构的优化有助于降低空蚀损伤程度。

(4)AC-HVAF 喷涂工艺制备的微纳米复合 WC 涂层结合设备微区结构优化在水电站现场空蚀工况中服役 5.5 年涂层完好，显著提高了设备的耐空蚀损伤能力。

参考文献

[1] 顾四行 , 杨天生 , 闵京声 , 等 . 水电站技术改造及水机磨蚀 [M]. 黄河水利出版社 , 2012. 09.
[2] 张亚利 . 水轮机空蚀原因分析及对策 [J]. 水力发电 2000, 7:65-66.
[3] 李国晓 , 齐波 , 张云根 , 等 . 水轮机过流部件热喷涂技术应用 [J]. 水电站机电技术 , 2018, 41(2): 56-58.
[4] 张磊 , 陈小明 , 吴燕明 , 等 . 水轮机过流部件抗磨蚀涂层技术研究进展 [J]. 材料导报 A : 2017, 31(9): 75-83
[5] 张瑞珠 , 卢伟 , 严大考 , 等 . 水轮机叶片表面聚氨酯弹性涂层的抗磨蚀性分析 [J]. 表面技术 , 2014, 43(1): 11-15.
[6] 张俊 , 周勇 , 李洁 . 热处理对电弧喷涂 Ni-Ti 涂层冲蚀磨损性能的影响 [J]. 热加工工艺 , 2013, 42(006): 196-200.
[7] 周勇 , 马晓琳 , 李太江 , 等 . 超音速电弧喷涂制备 NiTi 混合涂层的空蚀性能研究 [J], 热加工工艺 , 2016, 36(06): 206-209.
[8] 李超 . HVOF 制备不同结构 WC 基复合涂层的空蚀行为与机理研究 [D]. 武汉理工大学 , 2017.
[9] 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.
[10] 李勇 , 李太江 , 李聚涛 , 等 . HVAF 和 HVOF 喷涂 WC-CoCr 涂层的组织和性能表征 [J]. 热力发电 , 2014, 44(4): 96-99.