

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20220762

水轮机活动导叶防护材料抗磨蚀性能研究

张 雷^{1,2}, 陈文杰^{1,3}, 李 钢⁴, 周 红⁴, 崔腾飞⁴, 石广帅⁵

(1. 黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003; 2. 河南省水电工程磨蚀测试与防护工程技术研究中心, 河南 郑州 450003; 3. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 210098; 4. 河南省水利基本建设工程质量检测中心站, 河南 漯河 462000; 5. 河南智河工程技术有限公司, 河南 郑州 450003)

摘要: 为避免水轮机活动导叶因磨损、空蚀而造成过流表面形态发生改变, 机组效率下降, 采用超声波振动空蚀机、高速加沙射流冲磨仪与圆环冲磨仪对环氧砂浆、复合树脂砂浆和聚氨酯及活动导叶基材 45 号钢进行空蚀与冲磨试验, 基于试验结果, 分析了不同材料的抗空蚀、抗冲磨性能, 预测了材料在强空蚀作用下的使用寿命, 研究了流速、冲角、含砂量等对材料磨损的影响, 构建材料的磨损量预测模型。结果表明, 材料的抗磨蚀性能为聚氨酯 > 复合树脂砂浆 > 环氧砂浆; 材料的磨损量随流速的增长与流速呈线性或指数关系; 磨损量与含砂量大体上呈线性关系; 磨损量在冲角逐渐增大的情况下先达到冲击磨损峰值, 随后逐渐下降, 不同材料的临界冲角不同。

关键词: 水轮机活动导叶; 涂层材料; 抗空蚀; 抗冲磨; 磨损模型

中图分类号: TV738; TK730.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)02-0211-04

1 引言

磨损、空蚀或两者共同影响是水轮机活动导叶最常见的损伤因素。在空蚀和泥沙磨损的联合作用下, 水轮机活动导叶的端面形态容易发生改变, 使活动导叶在关闭时密封部位破坏严重, 漏水量大, 引起机组停机困难、易误启动等一系列问题, 从而影响设备正常运行^[1]。另外, 磨蚀造成的材料破坏会改变导叶部件应有的绕流条件, 影响水轮机的运行效率、安全稳定性和使用寿命^[2]。目前, 水轮机活动导叶冲磨、空蚀防护有两种途径^[3]: ①采用超音速火焰喷涂(HOVF)、激光熔覆等技术在活动导叶表面涂覆硬质金属涂层。②采用涂抹、浇灌等技术在水轮机活动导叶表面涂覆非金属涂层, 这类涂层材料以砂浆和高分子聚合物为主, 如环氧砂浆、复合树脂砂浆和聚氨酯^[4]。目前较常用的空蚀和冲磨试验装置有超声振动装置、文丘里管、旋转圆盘装置、水下钢球机、高速加沙射流装置、圆环法装置等, 其中利用超声振动装置进行空蚀试验的操作方法已被《振动空蚀试验

方法》(GB/T 6383-2009)^[5]标准收录; 高速加沙射流装置、圆环法装置对材料表面冲磨破坏状态与实际工程中水轮机活动导叶涂层受到破坏后的表面状态相似。因此, 本文基于 3 种试验方法, 对环氧砂浆、复合树脂砂浆、聚氨酯 3 种非金属抗磨蚀材料进行空蚀和冲磨试验, 并以导叶基材 45 号钢进行对比试验, 获得了 3 种非金属涂层抗磨蚀性能的优劣, 为水轮机活动导叶磨蚀防护材料选择提供了参考。

2 研究方法

2.1 超声波振动气蚀试验

参照《振动空蚀试验方法》(GB/T 6383-2009)^[5], 采用超声波振动空蚀方法模拟在强空蚀作用下环氧砂浆、复合树脂砂浆、聚氨酯、45 号钢的空蚀过程。采用超声波材料空蚀试验机, 试验机通过变幅杆发射大功率超声波在试样表面形成大量微小气泡, 引起试样表面材料损坏。

试件尺寸为 25 mm × 25 mm × 8 mm (长 × 宽 × 高), 在试验中每隔 4 h 对试样进行清洗和称

收稿日期: 2022-04-07, **修回日期:** 2022-05-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1965110, 52279134); 黄河水利科学研究院基本科研业务费专项资金资助项目(HKY-JBYW-2022-01)

作者简介: 张雷(1982-), 男, 博士、正高级工程师、硕导, 研究方向为水利工程磨损机理与防护技术, E-mail: hkyzhanglei@163.com

重,累计空蚀 48 h 后结束试验。基于试验结果,根据材料的表面形态、质量损失、磨损速率等不同分析材料抗空蚀性能,拟合了材料磨损率与时间的关系式,并结合抗磨蚀涂层在实际工程中的磨损情况,预测材料在强空蚀条件下的使用寿命。

2.2 高速加沙射流冲磨试验

高速加沙射流冲磨试验主要用来模拟浮在水面的悬移质对活动导叶抗磨蚀涂层的冲击破坏。试验冲磨原理为质量为 m 、冲角为 α 的沙粒以一定的速度冲击抗磨蚀涂层表面,抗磨蚀涂层表面在沙粒反复冲击作用下,其材料强度达到疲劳极限值时将发生破坏。

试验中流速选择为 20、27、32 m/s;冲角选择为 15°、20°、30°、45°、60°、90°;含砂量为 5 kg/m³。试验中采用的冲磨介质为黄河原型泥沙,试件尺寸为 50 mm×50 mm×8 mm(长×宽×高),试验中每隔 20 min 对试样进行清洗和称重,累计冲磨时间为 2 h 后结束试验。基于试验结果,采取单因素轮换法研究冲击角度、水流流速的变化对导叶基材和抗磨蚀涂层冲磨试验的影响,探究材料在不同冲磨因素影响下的磨损特性,建立材料的磨损预测模型。

2.3 圆环冲磨试验

参照《水工混凝土试验规程》(DL/T 5150-2017)^[6]进行混凝土抗冲磨试验,采用圆环法模拟水流中推移质的滑动和滚动对活动导叶抗磨蚀涂层的破坏。圆环冲磨试验原理为质量为 m 的沙粒在水流的带动下沿圆环内壁滚动,对圆环内壁造成磨损,圆环内壁在砂粒反复摩擦作用下发生破坏。

冲磨料采用 16 目的金刚砂,冲磨剂采用自来水,含砂量分别取 35、85、150 kg/m³。电机转速为 1 430 r/min,试件为外径 322 mm、内径 202 mm、高 60 mm 的圆环,试验中每隔 20 min 对试样进行清洗和称重,累计冲磨时间为 2 h 后结束试验。

试验结束后计算试件抗冲磨强度及磨损率,以这两个参数评价材料抗冲磨性能,并得到不同材料的磨损量与含砂量的拟合关系式,揭示在含砂量影响下不同材料的磨损规律。抗冲磨强度、磨损率的计算公式分别为:

$$f_a = AT/\Delta M \quad (1)$$

$$L = \Delta M/(AT) \quad (2)$$

式中, f_a 为抗冲磨强度, h/(g·cm²); A 为试件受冲磨面积, 380.7 cm²; T 为冲磨时间, h; L 为磨损率, g/(h·cm²); ΔM 为冲磨前后的质量损失, g。

3 水轮机活动导叶防护材料抗磨蚀性能

3.1 材料抗空蚀性能测试

3.1.1 材料表面组织形貌

当空蚀时间为 0、8、16、48 h 时,由各试件的表面形貌可看出部分材料表面的空蚀程度由弱到强及空蚀坑的形成与扩张。45 号钢在空蚀 8 h 后表面氧化层破坏,表面开始出现少量微小的空蚀针孔,随后空蚀区不断扩展,空蚀 48 h 后原始表面基本已侵蚀殆尽,呈大面积深浅不一、凹凸不平的蜂窝状孔洞;环氧砂浆在空蚀 48 h 后表面脱落严重,形成大面积深浅不一、凹凸不平的粗糙表面;复合树脂砂浆、聚氨酯涂层在空蚀 48 h 后表面无明显变化,需使用光学显微镜进行进一步观测。

3.1.2 材料微观组织形貌

为观察复合树脂砂浆、聚氨酯涂层的微观结构,采用光学显微镜对其进行 200 倍放大观测,并分析空蚀前后材料的微观表面形态。

图 1(a)、(b)分别为复合树脂砂浆空蚀前与空蚀 48 h 后的光学显微图片。由图 1(a)、(b)可看出,空蚀前复合树脂砂浆表面仅有少量微小划痕;而 48 h 空蚀后,材料表面部分区域形成不规则的深坑,48 h 的空蚀冲击对复合树脂砂浆表层造成了一定的损伤。

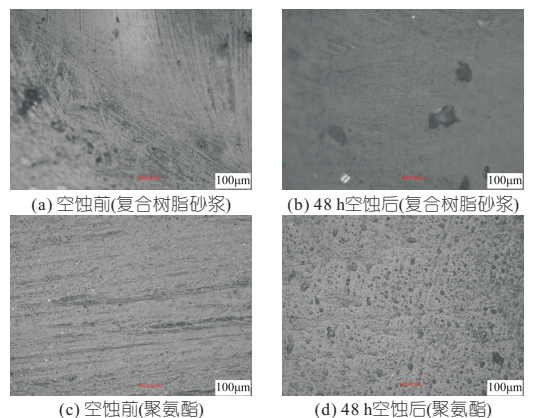


图 1 复合树脂砂浆、聚氨酯微观形态变化

Fig. 1 Micromorphological changes of composite resin mortar and polyurethane

图 1(c)、(d)分别为聚氨酯涂层空蚀前与空蚀 48 h 后的光学显微图片。由图 1(c)、(d)可看出,聚氨酯涂层在空蚀前表面有少量划痕与针孔状气孔;在 48 h 空蚀后,微小气孔逐步进化成较大的气蚀孔。

通过观测 4 种材料的表面空蚀形态与微观空蚀形态,可看出 45 号钢在强空蚀作用下损伤十分严重,表面形成大量蜂窝状的空蚀坑;3 种抗磨涂

层的受损情况为环氧砂浆>复合树脂砂浆>聚氨酯涂层。

3.1.3 材料抗空蚀性能分析

由 4 种材料在 48 h 内的磨损量变化(图 2(a))可知,48 h 后,4 种材料的磨损量为 45 号钢>环氧砂浆>复合树脂砂浆>聚氨酯。图 2(b)为 4 种材料 48 h 内的磨损速率变化。由图 2(b)可看出,空蚀破坏有 3 个阶段,分别为 I 孕育期、II 稳定期、III 衰退期,45 号钢在稳定期后,磨损速率均大于其余 3 种材料。

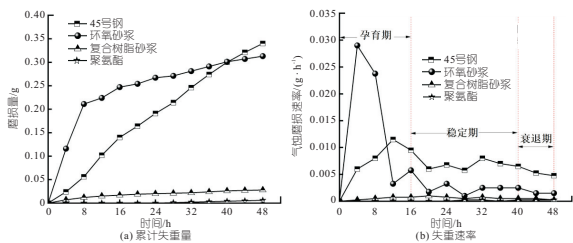


图 2 材料累计失重量与失重速率

Fig. 2 Cumulative weight loss and weight loss rate of materials

图 3(a)为 4 种材料的磨损率与时间的拟合曲线,图 3(b)为磨损率 15% 时材料的使用寿命。由图 3(b)可知,45 号钢、环氧砂浆、复合树脂砂浆、聚氨酯的使用寿命分别为 753、1 906、40 504、94 922 h。根据水轮机磨蚀磨损评定,复合树脂砂浆、聚氨酯涂层在强空蚀作用下的使用时间均大于 8 000 h,可满足在水轮机活动导叶高强度空蚀区域的使用。3 种抗磨蚀涂层的抗空蚀性能(由强到弱)为聚氨酯>复合树脂砂浆>环氧金刚砂浆。

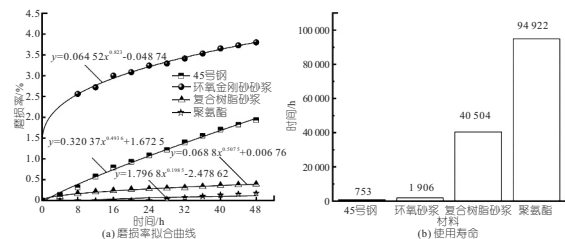


图 3 材料磨损率拟合曲线与使用寿命

Fig. 3 Wear rate fitting curve and service life of materials

3.2 材料抗冲磨性能测试

3.2.1 高速加沙射流冲磨试验

(1)不同冲角下冲磨结果分析。由 45 号钢、环氧砂浆、复合树脂砂浆、聚氨酯在 3 种不同流速(20、27、32 m/s)下磨损量随冲角的变化关系可看出,当冲击角度小于临界冲角时,磨损量随冲角的增加而增加,冲角大于临界角时,磨损量随冲角的增加而减小。不同材料的临界冲角不同,45 号钢的临界冲角为 15°或 20°;环氧砂浆的临界冲角为 45°;复合树脂砂浆的临界冲角为 20°;聚氨酯

的临界冲角为 15°。

(2)不同流速下冲磨结果分析。由 45 号钢、环氧砂浆、复合树脂砂浆、聚氨酯在 6 种不同冲角(15°、20°、30°、45°、60°、90°)下磨损量随水流流速的变化关系可知,在同一角度下,随着水流流速的增大,涂层的磨损量也不断增加。45 号钢、环氧砂浆的磨损量随流速增大与流速呈较明显的指数关系,磨损量受流速影响较大;复合树脂砂浆在冲角为 15°、20°、30°、45°时,磨损量随流速增大与流速呈指数关系,在冲角为 60°、90°时,磨损量随流速增大与流速呈线性关系;聚氨酯在冲角为 15°、20°时,磨损量随流速增大与流速呈指数关系,在冲角为 30°、45°、60°、90°时,磨损量随流速增大与流速呈线性关系。

(3)材料磨损预测模型。以水流流速、冲击角度、冲击时间 3 种影响因素为自变量,磨损量为因变量,分别建立不同材料的磨损预测模型,见表 1。由表 1 可知,45 号钢、环氧砂浆、复合树脂砂浆的磨损量与流速的关系在 2.0~3.2 次方之间,聚氨酯的磨损量与流速约呈 0.8 次方关系,受流速影响较小;材料的磨损量与时间大体呈 1 次方关系。

表 1 材料磨损预测模型

Tab. 1 Material wear prediction model

材料	拟合公式
45 号钢	$W_t = 0.01v^{2.614} \alpha^{-0.563} t^{0.786}$
环氧砂浆	$W_t = 0.021v^{2.055} \alpha^{0.134} t^{1.154}$
复合树脂砂浆	$W_t = 0.001v^{3.137} \alpha^{-0.473} t^{0.852}$
聚氨酯	$W_t = 0.409v^{0.854} \alpha^{-0.597} t^{0.947}$

注: W_t 为磨损失重量, mg; v 为流速, m/s; α 为冲角, (°); t 为时间, min。

3.2.2 圆环冲磨试验

(1)不同材料冲磨结果分析。不同含砂量下 45 号钢、环氧砂浆、复合树脂砂浆、聚氨酯材料的磨损率和抗冲磨强度见表 2。由表 2 可看出,45 号钢的抗冲磨强度虽然最大,但由于锈损的影响,在不同工况下,其抗冲磨强度下降最快;复合树脂砂浆的抗冲磨强度为环氧砂浆的 3 倍以上,聚氨

表 2 材料磨损率与抗冲磨强度

Tab. 2 Material wear rate and impact wear strength

材料	含砂量	损失	磨损率	抗冲磨强度
	/(kg·m ⁻³)	重量/g	/(g·(h·cm ²) ⁻¹)	/(h·(g·cm ²) ⁻¹)
45 号钢	35	0.8	0.001 1	951.8
	85	2.2	0.002 9	346.1
	150	3.9	0.005 1	195.2
环氧砂浆	35	9.6	0.012 6	79.3
	85	23.8	0.031 3	32.0
	150	42.3	0.055 6	18.0
复合树脂砂浆	35	3.1	0.004 1	245.6
	85	7.3	0.009 6	104.3
	150	12.7	0.016 7	59.9
聚氨酯	35	1.2	0.001 6	634.5
	85	3.1	0.004 1	245.6
	150	5.3	0.006 9	143.7

酯的抗冲磨性能为环氧砂浆的 8 倍左右,为复合树脂砂浆的 2 倍以上。在 3 种非金属材料中,聚氨酯材料抗冲磨性能表现最佳,复合树脂砂浆次之,环氧砂浆最差。

(2)不同含砂量下冲磨结果分析。在本次试验的含砂量范围($S=35\sim 150\text{ kg/m}^3$)内,几种试验材料的磨损量一直随含砂量的增大而增大,未出现砂粒对磨损的抑制现象。4 种试验材料的磨损量与含砂量大体呈正比关系。经单参数回归分析,其拟合公式见表 3。

表 3 材料磨损量与含砂量的关系

Tab.3 Relationship between material wear and sand content

材料	拟合公式	材料	拟合公式
45 号钢	$y = 0.02x^{1.053}$	复合树脂砂浆	$y = 0.098x^{0.971}$
环氧砂浆	$y = 0.26x^{1.016}$	聚氨酯	$y = 0.037x^{0.989}$

由表 3 可知,材料磨损量与含砂量拟合公式幂变化在 0.971~1.053 之间,则磨损量与含砂量的关系为:

$$W_t \propto S^{0.971\sim 1.053} \quad (3)$$

式中, W_t 为磨损量,mg; S 为含砂量, kg/m^3 。

4 结论

a. 在强空蚀作用下 4 种材料的表面形态变化不同,质量损失相差较大,磨损速率的变化趋势大体上相同,对比材料磨损率和时间的拟合关系式,

并结合涂层在实际工程中的磨损情况推测出 45 号钢、环氧砂浆、复合树脂砂浆、聚氨酯 4 种材料在强空蚀作用下的使用寿命分别为 753、1 906、40 504、94 922 h。

b. 抗磨蚀涂层的磨蚀失效特性与水流流速、冲击角度、含砂量有关。流速越大,材料的磨损量越大,材料的磨损量随流速的增长与流速呈线性或指数关系;冲角会改变材料的损伤形态,随着冲角增大,磨损量先达到冲击磨损峰值后逐渐下降,不同材料的临界冲角不同;材料的磨损量随含砂量的增大而增大,与含砂量大体上呈线性关系。

参考文献:

[1] 王鉴. 白鹤滩水电站水轮机导水机构密封结构特点分析[J]. 水利水电快报, 2020, 41(10): 36-39.

[2] 高梅英, 陈胜武. 三门峡电站水轮机叶片裂纹的分析及处理[J]. 华中电力, 2011, 24(4): 63-65.

[3] 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, 2017, 31(17): 75-83.

[4] 温鸿浦, 张雷, 郭维克. 聚氨酯复合树脂砂浆在固海扬水泵站泵壳磨蚀防护中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2018(12): 126-128, 133.

[5] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 振动空蚀试验方法: GB/T 6383-2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.

[6] 国家能源局. 水工混凝土试验规程: DL/T 5150-2017[S]. 北京: 中国电力出版社, 2018.

Research on Abrasion Resistance of Movable Guide Vane Protection Material for Hydraulic Turbine

ZHANG Lei^{1,2}, CHEN Wen-jie^{1,3}, LI Gang⁴, ZHOU Hong⁴, CUI Teng-fei⁴, SHI Guang-shuai⁵

(1. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China; 2. Henan Engineering Research Center of Hydropower Engineering Abrasion Test and Protection, Zhengzhou 450003, China; 3. College of Energy and Electricity, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. Water Engineering Quality Testing Center Station of Henan, Luohe 462000, China; 5. Henan Zhihe Engineering Technology Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China)

Abstract: To avoid flow surface morphology change caused by wear and cavitation erosion of turbine movable guide vane and the unit efficiency decrease, ultrasonic vibration cavitation machine, high-speed jet of gaza's grinding apparatus and circle grinding apparatus were used to carry out cavitation erosion test for epoxy mortar, mortar composite resin and polyurethane and movable guide vane base material of #45 steel. Based on the test results, the cavitation erosion resistance and impact wear resistance of different materials were analyzed, and the service life of materials under strong cavitation erosion was predicted. The influence of flow rate, attack angle and sand content on material wear was studied, and the prediction model of material wear was established. The results show that the corrosion resistance of the materials is as follows: polyurethane > composite resin mortar > epoxy mortar; The abrasion loss of material has a linear or exponential relationship with the increase of velocity. The relationship between wear and sand content is linear. When the attack angle increases gradually, the impact wear first reaches the peak value and then decreases gradually. The critical attack angle of different materials is different.

Key words: turbine guide vanes; coating materials; anti-cavitation; anti-abrasion; wear model