

水轮机叶片表面聚氨酯弹性涂层的抗磨蚀性分析

张瑞珠, 卢伟, 严大考, 黄荣浩, 刘晓东

(华北水利水电大学, 郑州 450011)

摘要: **目的** 分析聚氨酯弹性涂层的抗磨蚀性机理,并研究其在水利工程表面防护中的应用。**方法** 对水轮机叶片的气蚀磨损机理进行分析,采用PU喷涂技术在水轮机叶片钢材(0Cr13Ni5Mo)上做一层聚氨酯弹性耐磨涂层,并对涂层的性能进行检测与分析。**结果** 当聚氨酯组分的官能度为2.4时,聚氨酯弹性涂层表现出优异的综合力学性能,涂层与水轮机叶片间的物理结合力达到12.6 MPa,涂层磨耗值保持在较低范围内(2~3 mg/1000 r)。**结论** 聚氨酯弹性涂层能减缓含沙水流对水利工程中高速运转机械设备的冲刷磨损、空蚀破坏,延长水轮机叶片、水泵叶轮的使用寿命。

关键词: 聚氨酯涂层; 水轮机叶片; 抗磨蚀; 微相分离

中图分类号: TG174.46

文献标识码: A

文章编号: 1001-3660(2014)01-0011-05

Abrasion Resistance Analysis of Spray Polyurethane Elastic Coating on Turbine Blades

ZHANG Rui-zhu, LU Wei, YAN Da-kao, HUANG Rong-hao, LIU Xiao-dong

(North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450011, China)

ABSTRACT: **Objective** To analyze the abrasion resistance of polyurethane elastic coating and study its application in water conservancy engineering surface protection. **Methods** The cavitation erosion mechanism of the hydraulic turbine blade was analyzed, then a polyurethane elastomer wear-resistant layer was coated onto the blade of hydraulic turbine(0Cr13Ni5Mo) using the PU spraying technology and the performance of the coating was analyzed. **Results** When the functionality of polyurethane was 2.4, the Polyurethane elastomers exhibited good mechanical performance, with the binding force between the coating and the turbine blades reaching up to 12.6 MPa and the coating wear value remaining at the lower end of the range of 2~3 mg/1000 r. **Conclusion** Elastic polyurethane coating can reduce erosion wear and cavitation damage caused by sediment flow on high-speed operating machine and equipment of water conservancy projects, and thus extends the service life of the pump impeller and turbine blade.

KEY WORDS: polyurethane coating; turbine blade; anti-abrasion; micro phase separation

黄河中游流经黄土高原,带走大量泥沙,导致中下游含沙量大,水库淤积严重,在水中高速运转的水泵叶轮、水轮机叶片和螺旋桨叶片等水力机械设备的磨损状况也极其严重。材质为0Cr13Ni5Mo的水轮机

叶片遭受泥沙冲磨与空蚀的共同作用,经过一个汛期,表面出现明显的裂纹和沟壑。迎水边气蚀区明显呈蜂窝状,最深处达6 mm,并有深度为3~4 mm的沟槽,叶片的外侧边缘沿径向被磨蚀掉约8 mm,圆周方

收稿日期: 2013-09-08; 修订日期: 2013-09-25

Received: 2013-09-08; Revised: 2013-09-25

基金项目: 河南省重点科技攻关项目(122102210241)

Fund: Supported by the Key Science and Technology Project of Henan Province (122102210241)

作者简介: 张瑞珠(1963—),博士,教授,主要从事材料表面防护的研发工作。

Biography: ZHANG Rui-zhu(1963—), Professor, Ph. D., Research focus: material surface protection.

向被磨蚀掉的线长度约为 45 mm。由于水轮机叶片表面及边缘钢材被不断磨蚀剥落,且每个部位的磨蚀程度不同,导致叶片的三维体型发生改变。这种改变不仅使叶片在高速旋转时产生震动、效率降低,同时也给机组的安全运行带来威胁。因此研究水轮机叶片及水泵叶轮的磨蚀机理和发展新的耐磨涂层,对解决水利水电工程及灌溉排水工程中叶轮的磨蚀问题具有重要意义。

20 世纪 70 年代由美国 Jefferson 化学公司开发的双组分聚氨酯(PU)高分子材料,是以异氰酸酯和扩链剂为硬段、低聚多元醇为软段的嵌段共聚物。其化学结构中含有氨基甲酸酯、脲基甲酸酯键醚键等多种极性共价键,赋予了它优良的耐磨性、柔韧性、粘结性及低温性。聚氨酯这些优异的力学性能已经引起了越来越多有关人士、行业的关注,很多领域相继将其耐磨特性应用到表面防护上。实践证明:对于泥沙含量高的河流,水轮机叶片表面聚氨酯涂层表现出很好的抗磨蚀性。为解决水利工程中高速旋转机械设备的磨蚀问题,开辟了“以柔克刚”新途径。

1 叶片的磨蚀机理分析

由于黄河水中含有大量泥沙,当水流运动时,沙粒在水的推动下向前运动,这种水沙混合液体的冲击力要远远大于清水,加快了材料表面的疲劳破坏和冲刷磨损。同时沙粒本身相对水流成了绕流体,在沙粒前面形成一个微小的低压区,如图 1 所示。当叶片表面凹凸不平时,混合水流在材料表面会形成局部漩涡。水流沿着某个曲率圆周旋转,由于沙粒的密度远比水大,在巨大圆周力的作用下,沙粒沿着水流旋转的切向方向飞出。沙粒高速运动的过程中,由于其后部的水不能及时补充,因此在沙粒后方形成一个微小的低压区。

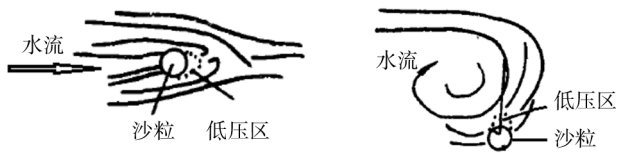


图 1 气蚀核的形成
Fig. 1 The formation of cavitation nuclei

当水流达到一定速度时,这些微小低压区的压力便会降到气化压力以下,萌发生成气泡。气泡在叶片表面溃灭时,会产生剧烈的冲击波,致使一股含沙的

水流高速冲击叶片表面,对叶片表面造成气蚀破坏,如图 2 所示。

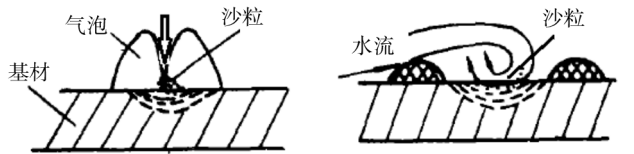


图 2 气蚀磨损对基材的综合作用
Fig. 2 Comprehensive effect of cavitation erosion and wear on the substrate

在磨损与气蚀的综合作用下,叶片被急剧破坏,严重影响了机组的安全运行及发电、灌溉效率。

2 喷涂聚氨酯弹性涂层试样制备

2.1 材料、设备

试验选用(80±5) HA, (95±5) HA 两种不同硬度的 A,B 双组分聚氨酯抗磨蚀材料。基材选用与水轮机叶片相同材质的 0Cr13Ni5Mo 钢材,尺寸大小为 40 mm×40 mm,150 mm×75 mm 各 3 块。NR-9500,NR-9600 底胶 10 kg。

试样制备主要设备见表 1。

表 1 主要实验设备
Tab.1 The main experimental equipment

设备名称	功能及作用
双筒式便携喷枪	可调整喷涂压力与流量
ESC75 型压缩机	为喷砂、喷涂工序提供气压
SS150 电动打磨机	对基材打磨清理
RBM 循环式喷砂机	表面处理,提高表面粗糙度

2.2 试样制备

喷涂聚氨酯弹性涂层的制备工艺流程为:基材处理→喷砂→打底胶→喷涂聚氨酯。

1) 基材处理。用手持式 SS150 电动打磨机对基材进行打磨清理,除去表面的凸起及氧化物。

2) 喷砂。喷砂使工件表面粗化,从而改变工件表面粗糙度,产生色彩柔和的缎面。砂子的粒度为 0.3 ~ 1.5 mm,压缩空气压力为 0.3 ~ 0.6 MPa。

3) 打底胶。采用 NR-9500 与 NR-9600 双组分底胶一起配合使用,第 1 次刷 NR-9600 并固化 7 h 后,再刷 NR-9500 底胶。打胶的目的是为下道工序喷脂

做准备,提高聚氨酯和母材结合力。

4) 喷涂聚氨酯。调节空压机参数,设定温度为 70 ℃,供气压力为 0.74 MPa。喷枪与基材表面保持垂直,并时刻保持合适的喷涂距离和移动速度,遵循先难后易、先喷涂不规则面然后喷涂大面积表面的原则。喷涂的工艺参数见表 2。

表 2 喷涂工艺参数

Tab.2 Process parameters of spraying

组分温度	压力	喷涂距离	每层厚度
/℃	/ MPa	/cm	/μm
45	0.74	20 ~ 30	50 ~ 60

3 涂层性能检测与分析

聚氨酯弹性体涂层主要是以低官能度的异氰酸酯和长链多元醇为原料,也可以在配方中加入少量短链的多元醇或多元胺扩链剂。原料的不同使材料组分聚合时交联密度不同,导致材料的硬度、粘结力以及耐磨性等有着明显的差别。(80±5)HA,(95±5)HA 两种不同交联密度聚氨酯弹性体的组分对比见表 3。

表 3 两种不同交联密度聚氨酯弹性体的组分对比

Tab.3 Component comparison for polyurethane elastomers with two different crosslinking densities

组分	(80±5)HA 型	(95±5)HA 型
A 组分 (异氰酸酯)	低官能度	高官能度
B 组分 (主要树脂)	二官能或三官能度长链聚醚、聚多元醇	高官能度长链聚醚、聚多元醇
主要扩链剂	二官能或三官能度短链多元醇或多元胺	高官能度短链多元醇或多元胺
官能度	2.0 ~ 2.4	2.4 ~ 3.1

3.1 表面粗糙度

通过与表面粗糙度标准样板对比,(80±5)HA,(95±5)HA 两种不同硬度聚氨酯弹性涂层的表面粗糙度均达到 3.2 μm 以下。这是因为采用了 PU 喷涂技术,A,B 组分在高压下雾化,喷涂到基材上时每层的厚度为 50 ~ 60 μm,均匀、致密、无挂流现象。

聚氨酯弹性涂层表面的低粗糙度,可以抑制材料表面因为凹凸不平而引起的水流漩涡,从而减少了气蚀核的形成,减缓气蚀对材料的破坏。

3.2 粘结力

采用 PosiTest AT 拉脱法附着力测试仪,分别对 (80±5)HA,(95±5)HA 两种不同硬度的聚氨酯试样,选取 5 个测试点进行粘结力测试,测得结果见表 4。

表 4 聚氨酯弹性涂层的粘结力测试

Tab.4 Adhesion test for elastic polyurethane coating

测试点	1	2	3	4	5
(80±5)HA 型	12.6	10.9	11.2	10.6	10.8
(95±5)HA 型	9.8	10.2	9.6	9.6	10.0

从表 4 可以看到,(80±5)HA 型聚氨酯的粘结力比(95±5)HA 型聚氨酯的高 13%。这是因为(95±5)HA 型聚氨酯 A,B 组分的高交联耦合,促使其固化反应过快,导致液体物料不能有效地润湿和渗透基材表面,降低了涂层与基材间的粘结力。因此,聚氨酯弹性体 2 个组分的官能度都控制在较低的范围,一般不超过 2.4。此时聚氨酯弹性涂层与水轮机叶片(材质为 0Cr13Ni5Mo)间的物理结合力最高可以达到 12.6 MPa,能够满足高泥沙水域水利水电工程的应用要求,而不至于在高水头含沙水的巨大冲击力与设备高速旋转巨大的离心力作用下,致使涂层从基材上撕裂剥落。

3.3 抗磨蚀性

采用 Taber5750 耐磨试验机(1000 r/min、温度 23 ℃)测得(80±5)HA,(95±5)HA 两种不同硬度聚氨酯弹性涂层的磨耗值与时间的关系,如图 3 所示。

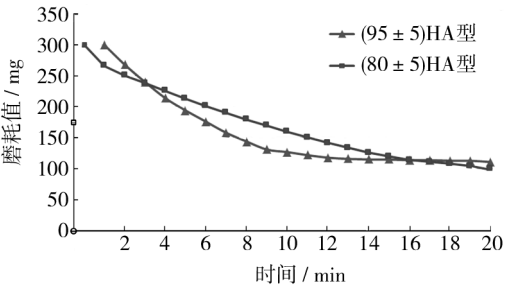


图 3 聚氨酯的 Taber 磨耗值与时间关系
Fig.3 The relationship between Taber abrasion value and time

由图 3 可以看到,(95±5)HA 型聚氨酯弹性涂层的 Taber 磨耗值经历一个由高到低过程。前 10 min 的磨耗值为 7 ~ 9 mg/min,而后磨耗值减小至 2 ~ 3

mg/min,并保持稳定值,表现出很好的耐磨性。这是因为聚氨酯弹性涂层具有独特的软、硬段相分离结构。其中硬段相在常温下处于玻璃态,具有高硬度、高模量的特征;软段相在常温下处于橡胶态,具有良好的弹性与韧性。

当固体颗粒冲刷软、硬相嵌段的聚氨酯弹性体时,固体颗粒平行于材料表面的切向力犹如刀具对材料表面的切削,弹性良好的软段链对颗粒这种切削作用的抗力较小。在这种微切削的作用力下,聚合物中软段与硬段间的氢键及次价键首先被破坏,降低了聚氨酯软、硬链段的物理交联度。随后颗粒的微切削力集中在分子主链上,使软段与硬段间共价键键能最小、键长最长的C—N化学键断裂,引起宏观上分子链的断裂,造成部分断裂的柔性段脱离基体,因此前10 min, (95±5) HA型聚氨酯弹性涂层的磨耗值比较高,达到7~9 mg/min。而后,聚氨酯弹性涂层表层部分柔性软链段被剥离脱落:一方面,玻璃态硬段突出于涂层表面承受磨粒的切削作用力。由于硬段相内在的分子间团聚力较强,它们在软段基质中起到物理交联点和增强填料的作用,其高模量和高抗张强度,可以引起链间位阻,阻止了磨损向深处的进一步扩展,提高了材料的抗磨蚀性。另一方面,硬段将一部分来自固体颗粒的冲击功传递给橡胶态的软段链,通过软段链的运动可以缓冲一部分冲击功,从而使(95±5) HA型聚氨酯弹性涂层的磨耗值维持较低范围内2~3 mg/min,具备良好的抗磨蚀性。

相对于(95±5) HA型聚氨酯弹性涂层, (80±5) HA型聚氨酯弹性涂层的磨耗值没有明显的转折,保持在4~6 mg/min,磨损相对较为严重。这是因为(80±5) HA型聚氨酯组分的官能度较低,导致聚氨酯弹性体的自身交联作用力较弱。当聚氨酯弹性涂层表层部分柔性软链段被外界冲击力剥离的同时,粘连部分硬段也从聚氨酯涂层表面剥落,造成玻璃态的硬段在涂层表面的分布缩减,不足以长时间承受外界的冲击力作用。随后聚氨酯涂层表面的硬段磨蚀殆尽,进入下一轮涂层表层部分柔性软链段的剥离脱落,周而复始。因此官能度较低的(80±5) HA型聚氨酯的磨耗值偏高,聚氨酯弹性体组分的官能度控制在2.4~3.1范围内。

4 结论

1) 叶片的气蚀磨损与材料的表面粗糙度有着密

切联系。聚氨酯弹性体表面的粗糙度达到3.2 μm以下,可以抑制材料表面水流漩涡的形成,从而减少了气蚀核的形成,减缓了气蚀对材料的破坏。

2) 当聚氨酯组分的官能度选择在2.0~2.4范围内,聚氨酯弹性涂层与水轮机叶片(材质为0Cr13Ni5Mo)间的物理结合力最高可以达到12.6 MPa,避免涂层在巨大冲击力下从基材上撕裂剥落。

3) 当聚氨酯组分的官能度控制在2.4~3.1的范围内,聚氨酯弹性涂层的软、硬相嵌段结构赋予材料良好的弹性与抗磨蚀性。硬段承受磨粒的切削力、软段缓冲外界冲击功,两者协同作用使涂层的磨耗值保持在较低范围内2~3 mg/1000 r。

4) 兼顾聚氨酯弹性体的粘结力和抗磨蚀性,当聚氨酯组分的官能度选择为两者的交集2.4时,聚氨酯弹性涂层具有优异的综合力学性能。

参考文献

- [1] 武现治,吴四民,郭维克. 改性聚氨酯抗磨蚀材料在机组过流部件的应用[J]. 人民黄河,2010,32(3):31—38
WU Xian-zhi, WU Si-min, GUO Wei-ke. Application of Modified Polyurethane Abrasion Resistant Material Flow Components in the Unit[J]. The People of the Yellow River, 2010,32(3):31—38.
- [2] 宋浩杰,张招柱. 纳米Fe₂O₃对聚氨酯/聚偏氟乙烯复合涂层摩擦学性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2011,27(3):45—49.
SONG Hao-jie, ZHANG Zhao-zhu. Effect of Nano Fe₂O₃ on Polyurethane/Poly Vinylidene Fluoride Tribological Performance of Ethylene Composite Coating[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2011,27(3):45—49.
- [3] 管静,梁红波,郝名扬. 纳米TiO₂/白氟聚氨酯复合涂层的制备及抗老化性能研究[J]. 表面技术,2009,38(1):30—34.
GUANG Jing, LIANG Hong-bo, HAO Ming-yang. Study on Preparation and Anti Ageing Properties of Nano TiO₂/White Fluorinated Polyurethane Composite Coating [J]. Surface Technology, 2009,38(1):30—34.
- [4] 石娇,曲彦平. 耐海洋环境中霉菌腐蚀有机涂层的研究[J]. 表面技术,2011,42(1):56—60.
SHI Jiao, QU Yan-ping. Study on Mildew Resistance of Organic Coatings for Corrosion in Marine Environment [J]. Surface Technology, 2011,42(1):56—60.
- [5] 莫志财,孙岩丽. 官地水电站大坝溢流表面聚脲抗冲刷耐磨弹性体涂层施工工艺试验研究[J]. 西北水电,2011,(6):34—40.
MO Zhi-cai, SUN Yan-li. Station Dam over Flow Surface

- Abrasion Resistant Coating of Polyurethane Elastomer Experimental Study on Construction Technology of Guandi Hydropower[J]. Northwest Hydropower, 2011, (6): 34—40.
- [6] 王立权. 共聚物的多尺度微相结构研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- WANG Li-quan. Study on Micro Phase Structure and Multi-scale Copolymer[D]. Guangzhou: Institutes of Technology of South China, 2011.
- [7] 李会, 周青. MDI 异构体对聚氨酯弹性体微观结构和性能的影响[J]. 聚氨酯工业, 2010, 25(3): 22—26.
- LI Hui, ZHOU Qing. Effects of MDI Isomer on the Micro Structure and Property of Polyurethane Elastomer[J]. Polyurethane Industry, 2010, 25(3): 22—26.
- [8] 朱金华, 姚树人. 聚氨酯弹性体结构与动态性能研究[J]. 高分子材料科学与工程, 2000, 16(5): 106—108.
- ZHU Jin-hua, YAO Shu-ren. Polyurethane Elastomer Structure and Dynamic Performance Study[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2000, 16(5): 106—108.
- [9] 殷锦捷, 周华利. 有机硅和环氧树脂复合改性聚氨酯涂料的研制[J]. 表面技术, 2010, 39(6): 93—97.
- YIN Jin-jie, ZHOU Hua-li. Preparation of Silicone and Epoxy Resin Modified Polyurethane Coating[J]. Surface Technology, 2010, 39(6): 93—97.
- [10] 陆文明, 王李军. 聚氨酯涂料的耐磨实验探索[J]. 上海涂料, 2008, 46(1): 15—19.
- LU Wen-ming, WANG Li-jun. To Explore the Wear Test of Polyurethane Coatings[J]. Shanghai Paint, 2008, 46(1): 15—19.
- [11] 朱广超, 王贵友, 胡春圃. 交联密度对脂肪族聚氨酯弹性体结构与性能的影响[J]. 高分子学报, 2011, (3): 274—278.
- ZHU Guang-chao, WANG Gui-you, HU Chun-pu. Effect of Crosslinking Density on the Structure and Properties of Aliphatic Polyurethane Elastomer[J]. Chinese Journal of Polymer Science, 2011, (3): 274—278.
- [12] 李穰. 热塑性聚氨酯弹性体性能的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2010.
- LI Yue. Study on the Properties of Thermoplastic Polyurethane Elastomer [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2010.
- [13] 傅晓平, 龙兰, 柏涛. 两种硅烷聚合物制造的常温固化防腐耐候水性工业面涂[J]. 表面技术, 2009, 38(3): 90—95.
- FU Xiao-ping, LONG Lan, BAI Tao. Two Room Temperature Curing Corrosion Proof Water Industrial Manufacturing of Silane Polymer Coated Surface [J]. Surface Technology, 2009, 38(3): 90—95.
- [14] 伊成龙, 张乐福. 核电厂海水循环泵用两种耐腐蚀涂层[J]. 腐蚀与防护, 2012, 33(7): 51—55.
- YI Cheng-long, ZHANG Le-fu. Corrosion Resistant Coating with two Kinds of Nuclear Power Plant Circulating Water Pump[J]. Corrosion and Protection, 2012, 33(7): 51—55.
- [15] 周雅, 陈希挺, 许海东. 金属表面环氧聚氨酯涂层的去除机理研究[J]. 表面技术, 2009, 38(3): 4—8.
- ZHOU Ya, CHEN Xi-ting, XU Hai-dong. Study on Removal Mechanism of Epoxy Polyurethane Film on Metal Surface [J]. Surface Technology, 2009, 38(3): 4—8.
- [16] 郭磊. 弹性聚氨酯的耐磨涂层的研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2006.
- GUO Lei. Study on Abrasion Resistant Coating of Polyurethane Elastomer [J]. Qingdao: University of Science and Technology of Shandong, 2006.