

挟沙风作用下风力机叶片涂层冲蚀特性研究*

张 永, 黄 超, 刘 召, 刘彩霞, 杨丽娟, 高 雄

(内蒙古农业大学机电工程学院, 呼和浩特 010018)

摘要 内蒙古中西部地区高频出现沙尘暴活动, 风力机叶片涂层长期被挟沙风冲蚀磨损, 导致风力机叶片涂层出现冲蚀坑和裂纹, 缩短风力机叶片寿命。针对这一问题, 利用自制的挟沙风试验台, 采用气流挟沙喷射法对以环氧玻璃纤维板为基底的风力机叶片涂层进行低角度加速冲蚀磨损试验, 用失重测量法测定冲蚀磨损量与冲蚀速度的关系, 用扫描电镜(SEM)观测分析涂层表面的冲蚀形貌来确定冲蚀机理, 并提出涂层冲蚀磨损程度的评价计算公式。结果表明: 涂层的冲蚀磨损量随着冲蚀速度的增大而增加; 低角度冲蚀以微切割冲蚀磨损作用为主, 材料的硬度起着决定性作用, 高角度冲蚀主要以挤压变形冲蚀磨损为主, 材料的韧性起决定性因素, 由于聚氨酯涂层材料是塑性材料, 其韧性高而硬度低, 故在低冲蚀角下冲蚀磨损量大; 验证了评价计算公式用于评价涂层冲蚀磨损程度的可靠性, 为运行在风沙环境下的风力机叶片涂层的改进提供理论依据。

关键词 风沙环境 冲蚀机理 加速磨损 冲蚀特性 冲蚀评价

中图分类号: TB324 文献标识码: A DOI: 10.11896/j.issn.1005-023X.2016.10.022

Research on Erosion Properties of Wind Turbine Blade Coating Under the Wind-carrying Action

ZHANG Yong, HUANG Chao, LIU Zhao, LIU Caixia, YANG Lijuan, GAO Xiong

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018)

Abstract Sandstorm activities frequently appear in the central western regions of Inner Mongolia and wind turbine blade coating has long been eroded by sand-carrying wind, leading to erosion pits and cracks in wind turbine blade coating and decay of the service life. This paper utilized airflow spray method to conduct the low angle erosion wear experiment of wind turbine blades with epoxy glass fiber board matrix by using the homemade carrying wind test bench. The relationship of erosion wear and erosion rate was obtained by weightloss measurement method, and the erosion morphology was observed by scanning electron microscope (SEM), on the basis of which erosion mechanism and coating erosion degree's evaluation formula were established. The results showed that erosion amount increased along with the increase of erosion rate. The micro cutting erosion wear was mainly resulted in the low angle erosion, in which the hardness of the material plays a crucial role. The extrusion deformation erosion was induced by the high angle erosion, whose key factor was the toughness of material. As polyurethane coating material belongs to plastic material, it possessed features of low strength and good toughness, thus the erosion became more serious when erosion angle was low. The reliability of the evaluation formula was verified by the evaluation method and it also provideds the theoretical basis for the improvement of wind turbine blade coating.

Key words sand environment, erosion mechanism, accelerated wear, erosion characteristics, erosion evaluation

0 引言

内蒙古中西部地区处于中国北方地区沙尘暴高活动区的中心阶段^[1], 由于内蒙古中西部特殊的地理环境导致引进的风机出现了“水土不服的现象”。叶片是风力发电机中最基础和关键部件, 其良好的表面涂层质量是保证机组正常稳定运行的决定因素。在风沙环境下, 大型风力机叶片在高速

运转过程中, 由于风沙的抽磨, 叶片的涂层出现麻面、纤维布漏出等磨损特征, 叶片裂纹增长加深, 裂纹向深处扩展, 导致风机运行时出现阻力、杂音、哨声, 当裂纹影响风机的运行安全时, 需要由专业队伍来进行维修, 大大增加了风电成本。同时冲蚀坑在雨季容易积水, 大大降低了防雷指数, 可能导致叶片受雷击破裂或断裂等极端现象出现, 直接影响着风电场的安全运行和经济效益。

* 国家自然科学基金(11262015)

张永: 1970年生, 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事机电一体化研究 E-mail: zynmg@imau.edu.cn 高雄: 通讯作者, 1957年生, 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事机械性能分析与优化研究 E-mail: gao0927cn@aliyun.com

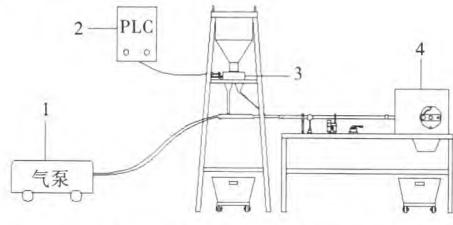
风沙环境的侵蚀主要是沙粒对涂层的冲蚀磨损过程,冲蚀磨损已成为风力机叶片表面涂层毁坏和风力机叶片寿命缩短的一个重要原因^[2-5]。目前研究主要集中工业使用风机叶片上,而对风力发电机叶片的冲蚀磨损研究不够深入^[6-9]。因此,根据内蒙古中西部地区的风沙环境特点,针对以玻璃纤维为基底的风力机叶片表面涂层,采用自制气流挟沙喷射法对风力机叶片表面涂层进行加速磨损^[10],研究风沙环境下风力机叶片涂层磨损规律,明确磨损机理,提出涂层磨损评价计算公式,为运行在风沙环境下的风力机叶片涂层的改进提供理论依据,对风能资源丰富的内蒙古中西部地区大力开展风电产业,提高风电场的安全运行和经济效益,具有重要科学意义。

1 实验

本试验采用气流挟沙喷射法进行试验,采用自制的气流挟沙喷射装置对试件涂层进行加速冲蚀磨损试验,该装置控制方便、操作简单、试验周期短、精度高,是一种比较理想的模拟试验方法。

1.1 试验装置

试验装置如图1,试验装置是自制气流挟沙喷射冲蚀设备,它由气源系统①、控制系统②、供沙系统③和冲蚀系统④四部分组成。气源是由最大排气压力1.6 MPa的微型往复活塞空气压缩机提供,其中控制系统由触摸屏、PLC、步进电机和电气比例阀等组成;PLC选用西门子S7-200,PLC可以精确控制气压的大小和下沙率,它通过控制步进电机来控制下沙量以及通过控制电气比例阀来调节气压,本试验采用的是SMC公司的电气比例阀ITV2050-312L来控制气压,其最大值为0.9 MPa。供沙系统由集沙箱、分沙箱和沙回收箱等组成,分沙箱最大下沙量180 g/min进入进沙管,分沙箱将沙粒分成试验需要的挟沙量,沙回收箱可将分沙箱剩余的沙粒回收;冲蚀系统由冲蚀管、冲蚀室等组成,冲蚀管由进风管、进沙管、混合加速管等组成,冲蚀室,由冲蚀箱、可调夹具和沙回收箱等组成。可调夹具可在0~90°范围内调节,沙回收箱可将喷沙收回。此外,用风速仪来测定冲蚀时试件表面的冲蚀速度,通过触摸屏调节电气比例阀可以调节冲蚀速度,沙粒通过进沙管和气流进气管混合一起进入到混合加速管,组后达到混合共速,沙粒速度近似等于冲蚀速度。此试验需要最大冲蚀速度25 m/s、最大下沙量120 g/min、冲蚀角度0~90°内调节,所以本试验装置能满足冲蚀速度、下沙量、冲蚀角度等要求。



1气源系统,2控制系统,3供沙系统,4冲蚀系统

图1 冲蚀磨损试验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the erosion-wear device

1.2 冲蚀磨损程度及机理的测量与评定

利用BT223S精密电子称确定涂层材料的冲蚀量来评价磨损程度,利用S-530型扫描电子显微镜观测涂层冲蚀形貌来探讨分析涂层材料冲蚀行为和机理。

1.3 风沙环境特性分析

沙粒特征和风速是风沙环境最主要的两个影响因素。

1.3.1 沙粒特征分析

试验用沙根据沙粒冲蚀磨损速率快和冲蚀速度能吹起来进行筛选,通过分级筛对工程用沙进行筛选选取,然后将沙粒清洗干净。最后采用筛选试验对沙粒粒径进行分析,分析结果如表1所示。

表1 试验用沙粒径分布情况

Table 1 Size distribution of sand particles

Diameter of sand/mm	Range/%
<1.0	2.943
1.0~1.2	25.048
1.2~1.5	63.734
1.5~2.0	7.838
>2.0	0.437

沙粒形状是采用S-530电子扫描显微镜进行观测分析,结果表明沙粒形状为无规则尖角沙粒,如图2所示。

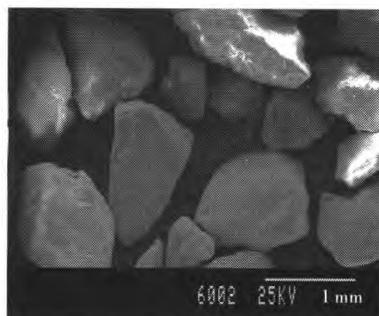


图2 沙粒形状图(30×)

Fig.2 Morphology of sand particles (30×)

1.3.2 试验风速段设置

在挟沙风冲蚀试验中,由于沙粒在混合加速管中使风沙充分混合共速,所以认为喷口处风速和沙粒速度相近,称为冲蚀速度。根据风速等级表(如表2所示)设置试验冲蚀速度,风速分别为8 m/s、11 m/s、14 m/s、17 m/s、21 m/s和25 m/s。

表2 风速等级表

Table 2 Grade of wind-speed

Grade of Wind-speed	Range of wind-speed $m \cdot s^{-1}$	Test wind-speed $m \cdot s^{-1}$
5	8.0~10.7	8
6	10.8~13.8	11
7	13.9~17.1	14
8	17.2~20.7	17
9	20.8~24.4	21
10	24.5~28.4	25

1.4 试件制备

试件基体材料采用环氧玻璃纤维板,尺寸选用 $14.5\text{ mm} \times 13\text{ mm} \times 3\text{ mm}$,涂层材料选用聚氨酯漆,漆、稀释剂、固化剂按 $2:1:1$ 调配。试件制备步骤:(1)先用360#砂纸打磨处理试样基底,再用丙酮溶液清洗干净;(2)用喷枪给试件基底材料喷涂一道底漆,底漆干后用600#砂纸打磨处理,再清洗干净;(3)给试件喷涂第一道面漆,面漆后用800#砂纸打磨处理,再清洗干净;(4)最后给试件喷涂第二道面漆。用千分尺测量试件喷涂厚度在 $350\sim450\mu\text{m}$ 之间,涂层密度为 1.46 g/cm^3 。

1.5 试验过程

本试验是通过改变下沙量、冲蚀角度、冲蚀速度的单因素试验,用触摸屏来设置下沙量、冲蚀时间和冲蚀速度。利用PLC对步进电机、电气比例阀和冲蚀时间进行控制,通过步进电机推动螺杆来实现风沙器的准确定位和冲蚀时间,最终达精确控制下沙量和冲蚀时间,通过控制比例电磁阀的压力值达到控制冲蚀速度。采用气流挟沙喷射法对涂层进行加速磨损,将试件放在冲蚀室,沙粒束经过分沙箱进入进沙管,气流经过进风管到达进沙管,气流在进沙管中加速,然后一起进入混合加速管充分混合共速,通过喷射口喷射到试件涂层,试件涂层在挟沙风环境下进行冲蚀达到加速磨损效果。

2 结果与分析

图3是在冲蚀时间为30 min,挟沙率为 120 g/min ,冲蚀速度为 14 m/s 的条件下,冲蚀磨损量与冲蚀角度的关系曲线图。由图3可知,试件涂层的冲蚀磨损量,在 $\alpha=30^\circ$ 时冲蚀磨损量达到最大值,在 $\alpha=90^\circ$ 时最小,这是由于在低冲蚀角时,材料的硬度是决定其耐冲蚀性主要因素,而在高冲蚀角时,材料的韧性是决定其耐冲蚀性的主要因素。聚氨酯涂层为塑性材料,其硬度较低而韧性较强,故其在低冲蚀角的冲蚀磨损量高于高冲蚀角的冲蚀磨损量。

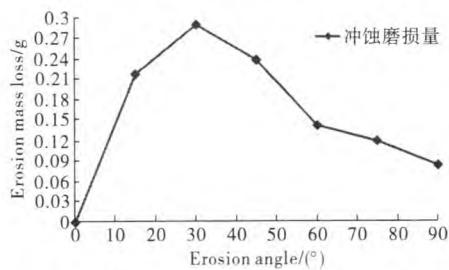


图3 涂层冲蚀磨损量与冲蚀角度关系

Fig. 3 Relationship between erosion mass loss and erosion angle

2.1 不同冲蚀速度对涂层冲蚀量的影响

图4是涂层在冲蚀角度为 30° ,冲蚀时间为30 min,挟沙量为 120 g/min 下,不同冲蚀速度与冲蚀磨损量的关系曲线图。图4表明挟沙风在不同冲蚀速度下,冲蚀磨损量都随着冲蚀速度的增大而增加,因为冲蚀涂层表面的唯一能量就是沙粒的能量,所以沙粒的速度越大,其动能也相应增加,

冲蚀磨损也越剧烈。

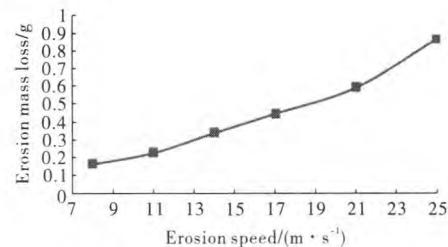


图4 涂层冲蚀量与冲蚀速度关系

Fig. 4 Relation between erosion mass-loss

2.2 涂层冲蚀机理分析

图5是在冲蚀角为 30° ,冲蚀速度 14 m/s ,冲蚀时间30 min,挟沙量 120 g/min 的条件下,试件涂层表面冲蚀形貌图。由图5可见,在低角度下冲蚀时,涂层表面形貌呈现海浪状或犁耕状。分析可得,破坏形貌主要是沙粒微切削的痕迹,部分材料从表面剥落下来形成剥落坑,从而造成涂层的破坏。这表明,在低冲蚀角时,涂层表面微切削为主,微切削主要是由表面水平应力切削导致的,这个应力是剪切应力。在低角度冲蚀的条件下,挟沙风作用力水平方向的分力大于垂直方向的分力,由于沙粒硬度远大于涂层表面的硬度,沙粒又是不规则尖角沙粒,剪应力越大,切削作用越强,对涂层表面破坏越严重,垂直方向分量小,对涂层表面冲蚀磨损微弱,但这微弱的正应力也会导致裂纹产生和扩展,促进裂纹剥落,加剧涂层磨损。因此,当低冲蚀角时,涂层冲蚀磨损主要以硬质尖角沙粒犁耕和切削磨损为主,另外垂直方向的冲蚀也会导致出现裂纹、裂纹扩展和剥落,水平和垂直方向的力同时存在于冲蚀磨损中,相互促进并加剧磨损。

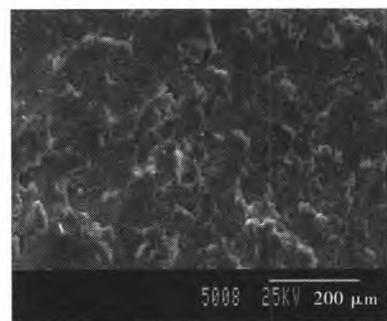


图5 涂层冲蚀磨损表面SEM形貌

Fig. 5 SEM micro graph of eroded coating surface

3 涂层冲蚀磨损程度的评价研究

国内外研究人员对固体粒子冲蚀磨损程度的评价方法进行研究,目前,Bitter^[11,12]的挤压变形磨损理论及其基于冲蚀过程中的能量平衡归纳出了一个描述固体颗粒对材料冲蚀磨损程度评价的表达式在单颗粒冲蚀磨损试验机上得到了验证,可以较好地解释冲蚀现象,因而被广泛采用。他认为固体颗粒对材料的冲蚀磨损有挤压变形冲蚀磨损和切削冲蚀磨损两种方式:(1)变形冲蚀磨损量 W_d ,它是法向冲蚀速度的函数;(2)切削冲蚀磨损量 W_c ,它是颗粒冲蚀试件切向速度的函数。实际上这两种冲蚀磨损方式是同时发生的,

总冲蚀磨损量 W_t 等于这两种冲蚀磨损量之和。

3.1 冲蚀磨损评价的计算公式

本研究在 Bitter 公式和文献[13—15]基础上, 提出适合以玻璃纤维为基底的风力机叶片涂层冲蚀磨损程度的评价公式:

$$W_t = W_d + W_c$$

$$W_d = \frac{\frac{1}{2}m_s(v \times \sin\alpha)^2}{\delta} + \frac{\frac{1}{2}m_s(v \times \cos\alpha)^2 \times \sin n\alpha}{\mu} \quad (0 < \alpha \leq \alpha_0)$$

$$W_t = \frac{\frac{1}{2}m_s(v \times \sin\alpha)^2}{\delta} + \frac{\frac{1}{2}m_s(v \times \cos\alpha)^2}{\mu} \quad (\alpha_0 < \alpha < \frac{\pi}{2}) \quad (1)$$

式中: W_t 、 W_d 、 W_c 分别为总冲蚀磨损量、变形冲蚀磨损量和气血冲蚀磨损量, 单位 g; m_s 为冲蚀试件涂层的有效沙粒质量, 单位 g; v 为冲蚀速度, 单位 m/s; α 为沙粒的冲蚀角, α_0 为最大冲蚀磨损临界角, 由涂层冲蚀磨损试验分析得出 α_0 为 30° ; n 为无量纲常数(当 $\alpha=\alpha_0$ 时, $\sin n\alpha_0=1$, 则有 $n=\frac{\pi}{2\alpha_0}$); δ 为变形冲蚀磨损能耗系数, 单位 cm^2/s^2 ; μ 为切削冲蚀磨损能耗系数, 单位 cm^2/s^2 。

式(1)中的 δ 和 μ 是与沙粒特征和冲蚀材料性能相关的参数。因影响因子较多, 准确测量计算较困难。本研究在试验的基础上, 通过计算拟合得出其经验计算值: $\delta=4.089 \times 10^{10} \text{ cm}^2/\text{s}^2$, $\mu=9.877 \times 10^9 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ 。

3.2 评价公式计算结果与试验结果对比分析

利用上述冲蚀磨损评价公式分析计算在不同冲蚀角度、冲蚀速度条件下试件涂层的冲蚀磨损质量的损失, 并与试验数据进行分析对比, 验证冲蚀磨损评价公式的可靠性。已知条件: 冲蚀角 α 为 $0\sim90^\circ$, 冲蚀速度 v 为 $8\sim25 \text{ m/s}$, 冲蚀时间为 30 min , 挪沙率为 120 g/min , 涂层密度 1.46 g/cm^3 , 最大冲蚀角 α 为 30° , 常数 $n=\frac{\pi}{2\alpha_0}=3$, 能耗因数 $\delta=4.089 \times 10^{10} \text{ cm}^2/\text{s}^2$, $\mu=9.877 \times 10^9 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ 。

图 6 是涂层在冲蚀速度为 14 m/s , 冲蚀时间为 30 min , 挪沙率为 120 g/min 的条件下, 由评价公式(1)计算得到的涂层冲蚀磨损量随着冲蚀角度变化关系曲线。由图 6 可知, 涂层的切削冲蚀磨损量和总冲蚀磨损量受冲蚀角影响较大, 两者的变化规律基本一致, 在 $0\sim30^\circ$ 之间都是随着冲蚀角度的增大而冲蚀磨损量增加, 冲蚀角为 30° 时达到冲蚀磨损量的最大值, 在 $30\sim90^\circ$ 范围内随着冲蚀角度的增大而冲蚀磨损量增加, 但是挤压变形冲蚀磨损量随着冲蚀角度的变化几乎呈线性变化, 一直随着冲蚀角度的增大而冲蚀磨损量增加。在低冲蚀角度($<30^\circ$)冲蚀时, 切削冲蚀磨损量损失比变形冲蚀磨损量的损失大很多, 总冲蚀磨损量几乎都是切削冲蚀磨损量所造成的, 这是由于在低角度冲蚀时, 冲蚀磨损主要为剪应力的作用, 涂层材料是塑性材料聚氨酯漆喷涂而成, 其特点是韧性较大而硬度较低, 而涂层的耐磨性主要取决于其硬度, 故低角度冲蚀主要是切削冲蚀磨损量。随着冲蚀角度的增加水平方向的分力即切削力的作用逐渐减小, 故

其切削冲蚀磨损量减少, 但挤压变形作用逐渐增强, 因此随着冲蚀角度的增大, 挤压变形冲蚀磨损量逐渐增多。在 $\alpha=64^\circ$ 时, 两者达到了相同的冲蚀磨损量; 在 $\alpha=90^\circ$ 时, 切削力作用为零, 只有正应力作用试件涂层, 因此, 切削冲蚀磨损量为零, 挤压变形冲蚀磨损量达到最大值。

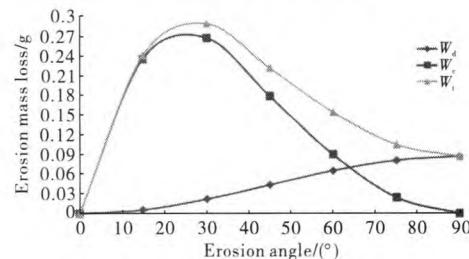


图 6 涂层冲蚀磨损量与冲蚀角的关系

Fig. 6 Relationship between erosion mass loss and erosion angle

图 7 是在冲蚀时间为 30 min 、挪沙率为 120 g/min 和冲蚀速度为 14 m/s 的条件下, 冲蚀磨损量与冲蚀角度关系试验数据与计算数据对比曲线图, 根据图 7 对比情况可知, 评价公式(1)结果与试验结果基本吻合。

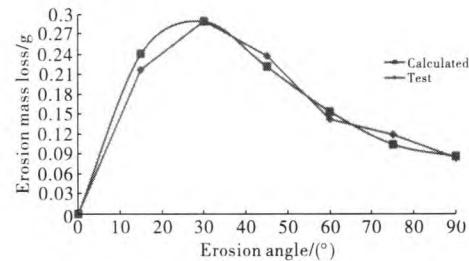


图 7 试验数据与计算数据对比

Fig. 7 Comparison of test data with calculated date

图 8 是冲蚀时间为 30 min , 挪沙率为 120 g/min , 冲蚀角度分为 30° 的条件下, 根据评价公式计算得到的涂层冲蚀磨损量和冲蚀速度的关系图。由图 8 可知, 涂层的切削冲蚀磨损量、挤压变形冲蚀磨损量和总冲蚀磨损量都随着冲蚀速度的增大而增加, 在低冲蚀角下, 切削冲蚀磨损量和总冲蚀磨损量比挤压变形冲蚀磨损量敏感性强, 切削冲蚀磨损量和总冲蚀磨损量呈指数变化规律, 挤压变形冲蚀磨损量呈线性变化规律。在低冲蚀角下, 切削冲蚀磨损量很大, 挤压变形冲蚀磨损量很小, 总的冲蚀磨损量主要是靠切削冲蚀磨损造成, 其原因是低冲蚀角下沙粒对涂层的作用力的

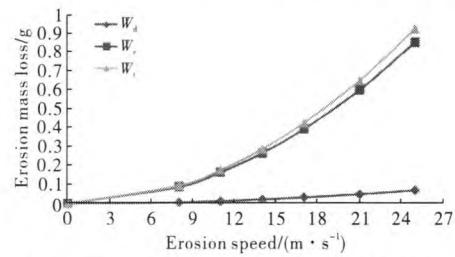


图 8 涂层冲蚀磨损量与冲蚀速度的关系

Fig. 8 Relationship between erosion mass loss and erosion speed

水平分力即剪应力较大, 垂直作用力分量较小, 涂层为塑性材料, 韧性高而硬度低, 磨损量主要与硬度有关, 所以总冲蚀磨损量主要是切削冲蚀磨损量所导致。

图9为冲蚀角 30° , 冲蚀时间30 min, 挟沙率120 g/min的条件下, 涂层冲蚀磨损量和冲蚀速度关系的评价公式(1)计算数据与试验数据对比曲线图。根据图9对比情况可知, 评价公式(1)计算的结果与试验结果基本吻合。

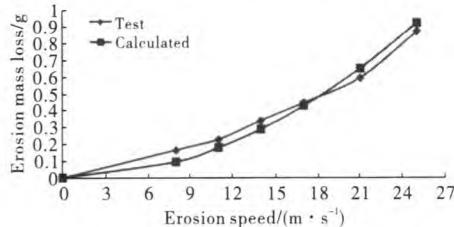


图9 试验数据和计算数据对比

Fig. 9 Comparison of test data with calculated data

根据以上涂层冲蚀量的试验数据和评价公式(1)计算数据对比分析的结果, 说明利用本研究提出的评价公式(1)来评价以环氧玻璃纤维为基底的聚氨酯涂层的冲蚀磨损程度是可靠的。

4 结论

(1)通过在挟沙风环境下运用气流喷射法的加速冲蚀磨损试验, 研究了涂层冲蚀磨损量与冲蚀角、冲蚀速度之间的关系: 涂层冲蚀磨损量在冲蚀角 $\alpha=30^\circ$ 时冲蚀磨损量最大, 且涂层的冲蚀量磨损量随着冲蚀速度的增大而增加。

(2)试件涂层受挟沙风作用下侵蚀机理为: 在低冲蚀角条件下, 涂层冲蚀磨损量主要受水平方向上分力的作用, 硬质沙粒对涂层的切削作用起主导地位, 硬度是决定冲蚀材料的决定性因素; 在高冲蚀角条件下, 涂层冲蚀磨损量主要受垂直方向分力的作用, 涂层主要受挤压变形冲蚀磨损的作用, 其耐冲蚀性主要取决于其韧性。由于聚氨酯涂层是塑性材料, 其硬度低而韧性好, 故聚氨酯涂层在低冲蚀角下的冲蚀磨损量要高于高冲蚀角下的冲蚀磨损量。

(3)提出以环氧玻璃纤维为基底, 聚氨酯涂层的冲蚀磨损程度的评价计算公式, 利用评价计算公式分析了涂层冲蚀磨损量(挤压变形冲蚀磨损量、切削冲蚀磨损量和总的冲蚀磨损量)与不同冲蚀速度的关系, 并将用冲蚀程度评价公式计算出来的数据与试验数据进行对比分析, 验证了该评价计算公式的可靠性。

参考文献

- Liu J T, Zheng M Q. Climatic characteristics of strong and very strong sandstorms in the middle and west parts of Inner Mongolia [J]. Plateau Meteorology, 2003, 22(1): 51(in Chinese)
- 刘景涛, 郑明倩. 内蒙古中西部强和特强沙尘暴的气候学特征[J]. 高原气象, 2003, 22(1): 51
- Zhong P, Peng E. Study of erosion behavior of polyurethane-urea coating[J]. Tribology, 2007, 27(5): 447(in Chinese)
- 钟萍, 彭恩. 高聚氨酯涂层冲蚀磨损性能研究[J]. 摩擦学学报, 2007, 27(5): 447
- Zheng J, Zhang Q H, Luo Z H. Progress on the protective coating layer materials of wing turbine blades[J]. Polym Mater Sci Eng, 2012, 27(11): 182(in Chinese)
- 郑进, 张庆华, 罗振寰. 风电叶片防护涂层材料的研究进展[J]. 高分子材料科学与工程, 2012, 27(11): 182
- Li Y, Liu Y, Duan D L, et al. Slurry erosion behavior of HVOF sprayed WC-Wo-Cr coatings at different impingement angle[J]. China Surface Eng, 2011, 12(6): 11(in Chinese)
- 李阳, 刘阳, 段德莉, 等. HVOF热喷WC-Co-Cr涂层在不同攻角下的料浆冲蚀行为[J]. 中国表面工程, 2011, 12(6): 11
- Bitter J G A. The effects of air pollution on electrical contact material: A field study[J]. Wear, 1968, 11(2): 123
- Hao Y H, Xing Y M, Yang S T. Erosion-wear behavior of steel structure coating subject to sandstorm[J]. Tribology, 2010, 30(1): 26(in Chinese)
- 郝负洪, 邢永明, 杨诗婷. 风沙环境下钢结构表面涂层冲蚀行为与侵蚀机理研究[J]. 摩擦学学报, 2010, 30(1): 26
- Chen S Y, Chen Y Z. The application and development of polyurethane coatings[J]. Chem Ind Times, 2008, 22(8): 52(in Chinese)
- 陈赛艳, 陈蕴智. 聚氨酯涂料的应用发展现状[J]. 化工时刊, 2008, 22(8): 52
- Jia Y H. Research of fan blade coating microstructure and dynamic mechanical properties [J]. Marine Heavy Anticorrosion Coat Appl, 2011(6): 35(in Chinese)
- 贾艳华. 风机叶片涂层微观结构与动态力学性能研究[J]. 中国涂料, 2010, 25(7): 35
- Yang C Y, Zhai H, Xiong J. Status quo and present status of protective coating for wind power blades[J]. China New Technol New Products, 2011(17): 153(in Chinese)
- 杨春燕, 翟欢, 熊杰. 风电叶片保护涂层的现状及应用[J]. 中国新技术新产品, 2011(17): 153
- Li Y J. Estimation method of sand wear to hydraulic concrete [J]. J Hydraulic Engineering, 1989(7): 60(in Chinese)
- 李亚杰. 水工混凝土沙粒磨损估算方法[J]. 水利学报, 1989(7): 60
- Bitter J G A. A study of erosion phenomena(Part I)[J]. Wear, 1963, 6(1): 5
- Bitter J G A. A study of erosion phenomena(Part II)[J]. Wear, 1963, 6(3): 169
- Hao Y H, Xing Y M, Zhao Y R. Erosion mechanism and evaluation method of steel structure coating eroded under sandstorm environment[J]. J Build Mater, 2011, 14(3): 345(in Chinese)
- 郝负洪, 邢永明, 赵燕茹. 风沙环境下钢结构涂层侵蚀机理及评价方法[J]. 建筑材料学报, 2011, 14(3): 345
- Charles D Wood. Erosion of metals by high speed impact of sand and dust particles III[C]//Annual Technical Meeting Proceedings. Institute of Environment Science, 1966: 55
- Neilson J H, Gilchrist A. Erosion by a stream of solid particles [J]. Wear, 1968, 11: 111

(责任编辑 周媛媛)