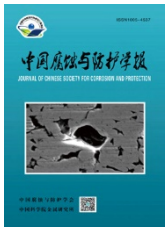

中国腐蚀与防护学报
Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection
ISSN 1005-4537,CN 21-1474/TG

《中国腐蚀与防护学报》网络首发论文

题目：聚四氟乙烯对风电叶片聚氨酯涂层耐磨与耐雨蚀性能影响及损伤机制研究
作者：郑子龙，孙海静，薛伟海，陈国亮，周欣，王进军，段德莉，孙杰
网络首发日期：2024-11-06
引用格式：郑子龙，孙海静，薛伟海，陈国亮，周欣，王进军，段德莉，孙杰．聚四氟乙烯对风电叶片聚氨酯涂层耐磨与耐雨蚀性能影响及损伤机制研究[J/OL]．中国腐蚀与防护学报. https://link.cnki.net/urlid/21.1474.TG.20241105.1645.002

网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

网络首发时间：2024-11-06 10:16:35　网络首发地址：https://link.cnki.net/urlid/21.1474.TG.20241105.1645.002

聚四氟乙烯对风电叶片聚氨酯涂层耐磨与耐雨蚀性能影响及损伤机制研究

郑子龙[1]，孙海静[1*]，薛伟海[2*]，陈国亮[1]，周欣[1]，王进军[3]，段德莉[2]，孙杰[1]

1 沈阳理工大学 环境与化学工程学院　沈阳　110159

2 中国科学院金属研究所　沈阳　110016

3 沈阳飞机工业（集团）有限公司　沈阳　110034

摘要：在风电叶片保护涂层中添加聚四氟乙烯 (PTFE) 常用于提高涂层的耐磨性、疏水性、抗结冰性等，然而却鲜有研究关注 PTFE 添加对耐雨蚀性能的影响。本文测试了含 0%~5% PTFE 的聚氨酯 (PU) 涂层的基本性能，使用扫描电镜 (SEM) 和能谱分析仪 (EDS) 重点探究了 PTFE 对涂层耐磨性与耐雨蚀性能的影响。耐磨性实验显示，涂层耐磨性随 PTFE 含量增加而提升，含 5%时最佳。液滴冲蚀实验显示，与未添加 PTFE 的涂层相比，添加 1%~2% PTFE 的涂层耐冲蚀性变化不大，添加 3%~5% PTFE 的涂层耐冲蚀性急剧下降。SEM 与 EDS 表明，涂层表面 F)元素聚集的位置萌生了针孔、起皮、剥落坑等缺陷，其数量随 PTFE 含量增大而增加。在耐磨性实验中，表面缺陷的存在能够存储碎屑使得涂层耐磨性提升；在液滴冲蚀实验中，液滴冲击涂层表面缺陷会加速涂层脱落，降低涂层的耐冲蚀性。

关键词：PTFE，PU 涂层，耐雨蚀性，耐磨性，F 元素聚集

Effects and Damage Mechanisms of Polytetrafluoroethylene on Wear and Rain Erosion Resistance of Polyurethane Coatings for Wind Turbine Blades

ZHENG Zilong[1], SUN Haijing[1*], XUE Weihai[2*], CHEN Guoliang[1], ZHOU Xin[1], WANG Jinjun[3], DUAN Deli[2], SUN Jie[1]

1 School of Environmental and Chemical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China

2 Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

3 Avic Shenyang Aircraft Corporation, Shenyang 110034, China

Correspondent: SUN Haijing; E-mail: hjsun@sylu.edu.cn

Supported by Basic Scientific Research Project of The Department of Education of Liaoning Province in 2022 (LJKMZ20220598) and Special Funds for Basic Research Business Expenses of Provincial Undergraduate Universities in Liaoning Province (SYLUGXRC26).

ABSTRACT: Under actual operating conditions of wind turbine blades, rain erosion causes extremely severe damage to the coatings on wind turbine blades. Polytetrafluoroethylene (PTFE) is often used to enhance the wear resistance, hydrophobicity, anti-icing, and anti-sand erosion properties of coatings. However, research on the impact of PTFE on the rain erosion resistance of coatings is lacking. Therefore, this study investigates the impact of PTFE on the wear resistance and rain erosion resistance of polyurethane (PU) protective coatings on wind turbine blades, as well as the damage mechanisms of these coatings. This study prepared PU coatings with different PTFE contents, tested the basic properties of the PU coatings. Additionally, the study explored the impact of varying amounts of PTFE on the erosion resistance of PU coatings under two different erosion conditions using a high-speed liquid drop erosion device. The study used a profilometer to characterize the macroscopic morphology of the coatings and measure the volume loss. It employed scanning electron microscopy (SEM) to observe the microstructure of the coatings, and combined with energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) to analyze how PTFE influences the wear resistance and rain erosion resistance of the coatings. The wear resistance tests showed that the coating's wear

资助项目 2022 年辽宁省教育厅高等学校基本科研面上项目（LJKMZ20220598）和辽宁省属本科高校基本科研业务费专项资金资助（SYLUGXRC26）

作者简介 郑子龙，男，2000 年生，硕士

通讯作者 孙海静，E-mail: hjsun@sylu.edu.cn，研究方向为表面处理

resistance improved with increasing PTFE content, with the best performance observed at a mass fraction of 5 wt.%. The liquid drop erosion tests revealed that, compared to coatings without PTFE, coatings with 1-2 wt.% PTFE exhibited little change in erosion resistance. However, coatings with 3-5 wt.% PTFE experienced a sharp decrease in erosion resistance. SEM and EDS analysis indicated that fluorine (F) elements accumulated at specific locations on the coating surface, leading to the formation of defects such as pinholes, peeling, and delamination pits. Moreover, higher PTFE content in the coating correlated with an increased presence of surface defects.
KEY WORDS: PTFE, PU coating, Rain erosion resistance, Wear resistance, Fluorine aggregation

风能作为一种清洁、可再生的绿色能源，正日益成为全球能源转型的重要支柱[1-4]。截止至2023年，全球风电装机总容量突破TW里程碑，风电的可持续发展推动着世界能源体系由化石能源向可持续发展能源转变[5-7]。由于风力发电机组常常被建立在大陆的空旷区域和近海地区，使得风电叶片在工作时经常面临着雨水、砂石、冰雹、空气中其他颗粒的冲蚀与摩擦、冰雪覆盖、太阳紫外老化等问题[8-11]。此外，现役风力发电机组叶片的长度已由40 m增长至120 m，叶尖线速度突破100 m/s，叶片长度的增加虽然提升了风机的发电效率，但也伴随着一系列工程与环境问题的产生[12-15]。其中，高叶尖速度会加剧冲蚀与摩擦两种破坏方式对风电叶片涂层的损伤，从而增大叶片工作时所受的阻力，降低风机的发电效率，缩短风电叶片的使用寿命，带来不可预估的经济损失与安全隐患[16-19]。

目前，风电叶片的保护系统包含了涂料、弹性胶带、保护膜、防护侵蚀板等防护方式，其中，涂料因其具备多功能性、耐用性、成本低等特点被广泛应用[20-21]。PTFE 是一种低摩擦系数、低表面能、低密度的固体材料，常用于提升涂层的耐磨性、疏水性、抗结冰性与抗沙蚀性[22-25]。Özzaim 等[26]探究了两种不同颗粒冲蚀介质下，25% （质量分数）PTFE 增强玻璃纤维和 35% PTFE 增强碳颗粒两种复合材料的冲蚀行为，结果表明 PTFE 复合材料的抗颗粒冲蚀性能较原材料大幅提升。Kumar 等[27]将 PTFE 与塑料缩醛树脂混合制备出一种复合材料，并对比复合材料与塑料缩醛树脂在高应力磨损、喷砂冲蚀、泥浆冲蚀实验中的性能，结果表明，PTFE 增强了塑料缩醛树脂的耐磨、抗砂蚀、抗泥浆冲蚀的性能。Qin 等[28]将 PTFE 与丙酮混合得到的悬浮液喷涂在环氧树脂表面上，制备出了一种高疏水性、高抗结冰性能的风电叶片面漆，涂层性能检测结果表明，当 PTFE 在悬浮液中的质量分数为 5%时，涂层的静态接触角为 154°、滚动角小于 2°，冰黏附强度仅有 28 kPa，但并未测试对其耐雨蚀性能影响。Karmouch 等[29]将风电叶片样品直接浸入 PTFE 溶液分散体中，所得涂层的静态接触角为 145°，冰黏附的剪切强度比原始样片下降了 80%。目前的研究表明，PTFE 确实可以大幅提升涂层的耐磨性、疏水性、抗结冰性与抗砂蚀性能，但缺少对含 PTFE 涂层的耐雨蚀性能研究。在风电叶片实际服役工况下，雨水对涂层冲蚀造成的影响也十分严重，因此探究 PTFE 对涂层耐雨蚀性能的影响是十分重要的[30-31]。

本文制备了不同 PTFE 含量（质量分数为 0、1%、2%、3%和 5%）的 PU 涂层，探索了 PTFE 对涂层基本性能的影响，并对涂层的耐磨性做了进一步探究。使用高速液滴冲蚀装置模拟雨水冲击风电叶片涂层的实际工况，在液滴冲蚀实验中，探索了雾化与射流两种不同的冲蚀方式下 PTFE 对涂层耐雨蚀性能的影响，液滴冲蚀速度选用了接近于不同长度风电叶片的叶尖旋转速度（70、90 和 115 m/s）。最后，使用 SEM 与 EDS 等表征手段分析了 PTFE 对涂层耐磨性与耐雨蚀性能的影响机制。

1 实验方法

1.1 涂料与样品制备

制备涂料所用的原材料包括：端羟基聚丁二烯 (HTPB) (固含＞99.9%)，平均相对分子质量 3000；XP 2406 异弗尔同异氰酸酯固化剂 (IPDI)，平均相对分子质量 1500；金红石型钛白粉，25 μm；PTFE 蜡粉，2~3 μm；乙酸丁酯，分析纯；UV 531 紫外线吸收剂；BYK 410 防沉降助剂，BYK 163 润湿分散剂，BYK 052 脱泡剂，Tego 4100 流平助剂。

表 1 为风电叶片 PU 涂料的基本配方，本实验选取固定 R 值 (n(-NCO):n(-OH)) 为 1.2∶1，颜基比为 0.4；只改变 PTFE 的用量，使得 PTFE 在最终涂层中的质量分数为 0，1%，2%，3%，5%。不同 PTFE 含量 PU 涂层以 PTFE 在涂层中的质量分数和聚氨酯缩写命名，例如 PU-1%涂层，表示 PTFE 质量分数为 1% 的 PU 涂层；PU-0~2%涂层，表示为 PTFE 质量分数从 0 增加到 2%的 PU 涂层。

表 1 风电叶片 PU 涂料的基本配方

Tab.1 Basic formulation of PU coating for wind turbine blades

Component		Raw materials	Mass fraction /%
Component A	1	HTPB	30
	2	Titanium dioxide	23
	3	Butyl acetate	10
	4	UV absorber	1
	5	Anti-settling agent	0.25
	6	Wetting and dispersing agent	0.25
	7	Defoamer	0.25
	8	Levelling agent	0.25
	9	PTFE	0~5
Component B	10	IPDI	30

涂料制备过程为：将 HTPB、乙酸丁酯溶剂投入于容器中，并在 300~500 r/min 转速下分散 5~10 min；向容器中加入钛白粉、PTFE 蜡粉、紫外线吸收剂、助剂，并在 600~800 r/min 转速下分散 45~60 min，此时得到甲组分；将 IPDI 投入装有甲组分的容器中，并在 600~800 r/min 转速下分散 80~90 min，静止 30 min 后得到双组分 PU 涂料；将制备好涂料放入真空干燥箱中进行真空脱泡处理，脱泡时间持续 8~10 min，待气泡消除后，取出涂料以备使用。

基本性能测试样品制备：涂层光泽、铅笔硬度、柔韧性、耐冲击性、耐水性、耐酸碱性的测试基材为马口铁，漆膜厚度 80~120 μm；附着力测试基材为玻璃钢，漆膜厚度 80~120 μm。将涂料灌注于 PTFE 模具中，制备拉伸试验样品。

耐磨性与耐雨蚀性测试样品制备：涂层耐磨性测试基材为玻璃钢，规格为直径 100 mm，漆膜厚度 1 mm；耐雨蚀性测试基材为玻璃钢，规格 25 mm×25 mm×8 mm，漆膜厚度 1 mm。

所有样品均在室温条件下固化一周后进行性能检测。样品制备与测试流程如图 1 所示。

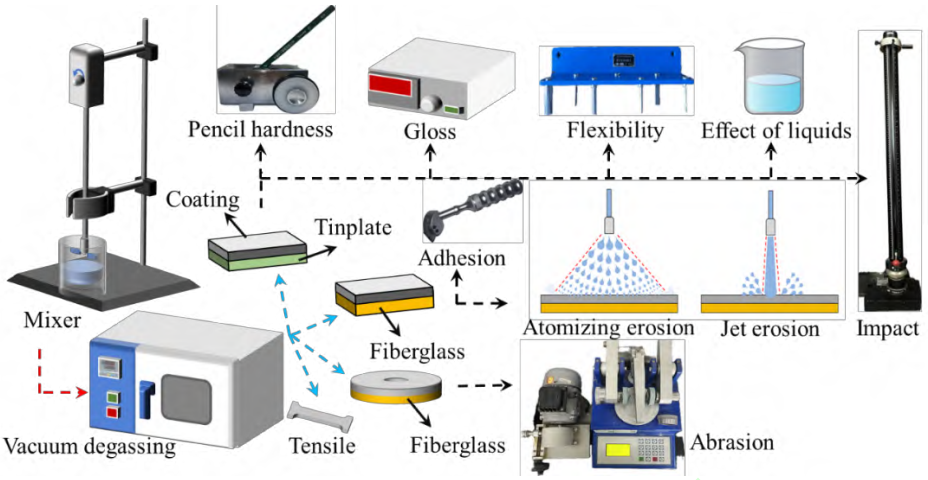

图 1 样品制备与试验测试流程

Fig.1 Sample preparation and testing procedure

1.2 涂层性能检测

参照 ASTM 标准 G73-98，设计研制了液滴冲蚀装置，其工作原理如图 2 所示。通过控制管道中的水流量来调节冲蚀管道中的水压力，从而获取喷嘴处不同的液滴冲蚀速度。

在液滴冲蚀实验中，喷嘴距离样品的高度为 70 mm，200 L 水箱的水温控制在 20 ℃ (±3 ℃)。液滴的流速和尺寸是由粒子图像测量技术系统测量。在雾化冲蚀实验中，选用 8.3 MPa 与 10.3 MPa 两种管道压力，分别对应液滴速度 90 和 115 m/s；在射流冲蚀实验中，选用 6.9 MPa 的管道压力，液滴速度为 70 m/s。

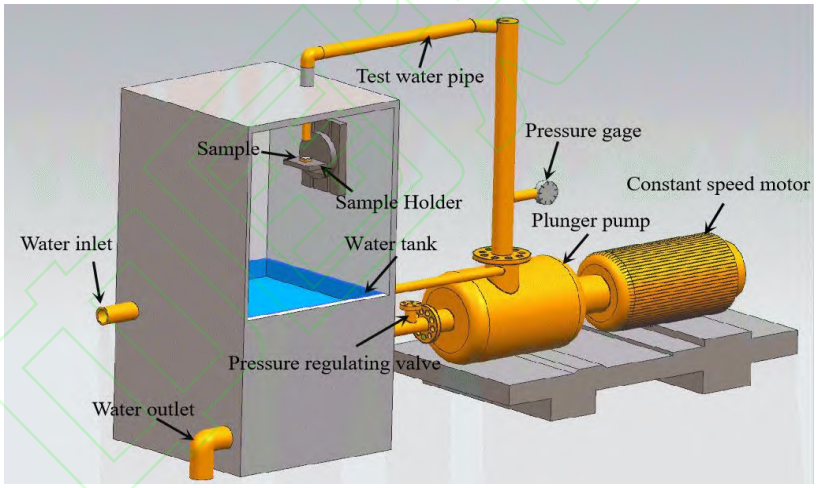

图 2 高速液滴冲蚀装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of high-speed droplet erosion device

图 3 为不同喷嘴的三维形貌及相应冲蚀示意图，在雾化液滴冲蚀过程中，雾化喷嘴将液滴以雾状形态喷洒至涂层表面，具有冲蚀范围大，冲蚀点位随机的特点；在射流冲蚀过程中，射流喷嘴不间断的将液滴输送至涂层表面，具有冲蚀点位集中，破坏力更强的特点。

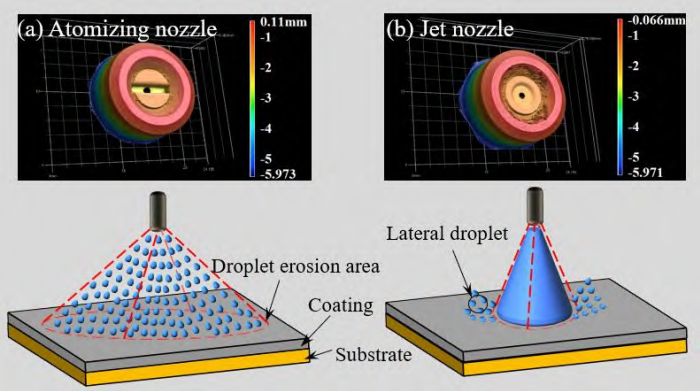

图 3 不同喷嘴的三维形貌及相应冲蚀示意图

Fig 3 Three-dimensional actual shapes and corresponding erosion schematics of atomizing nozzle (a) and jet nozzle (b)

表 2 为风电叶片涂层基本性能要求与检测标准，检测标准来源于 GB/T 31817-2015。使用 XGT 台式镜向光泽度计测试光泽度；QHQ-A 铅笔划痕硬度仪测试表面硬度；QFH-SH 600 附着力测试仪测试附着力；QTX 漆膜弹性实验仪测试柔韧性；BGD 304 漆膜冲击器测试耐冲蚀性；JM-IV 漆膜磨耗仪测试耐磨性；RG-Ⅳ 拉伸试验机测试拉伸性能。

使用 VR-3200 轮廓仪测量单个样品不同冲蚀阶段的体积损失并拍取宏观损伤形貌；使用 MIAR-4 SEM 拍取涂层微观形貌并结合 EDS 分析涂层的损伤形貌与机理。

表 2 风电叶片涂层基本性能要求与检测标准

Tab.2 Requirements and test standards of basic performances of wind turbine blade coatings

Coating properties	Requirement	Test standard
Gloss (60 °)/%	≤30	GB/T 1743
Pencil hardness	≥H	GB/T 6739
Adhesion/level	≤1	GB/T 9286
Impact resistance/kg·cm	>50	GB/T 1732
Flexibility/mm	≤1	GB/T 1731
Wear resistance/ [(CS10,1000g/1000r)]mg	<60	GB/T 1768
Elongation at break/%	≥10	ISO 157-2
Tensile strength/MPa	/	ISO 157-2
Water resistance/7d	No foaming, no wrinkling Allowed slight discoloration	GB/T 4893.1
Acid resistance/ (0.05mol/L H_2SO_4)7d	No foaming, no wrinkling Allowed slight discoloration	GB/T 9274
Alkali resistance/ (0.1mol/L NaOH)7d	No foaming, no wrinkling Allowed slight discoloration	GB/T 9274

2 结果与分析

2.1 PU 涂层的基本性能测试结果

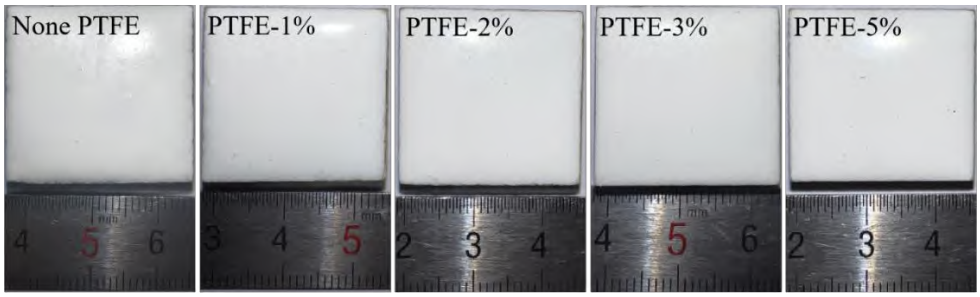

图 4 不同 PTFE 含量的 PU 涂层的宏观形貌

Fig.4 Macroscopic morphologies of PU coatings containing different contents of PTFE

表 3 为不同 PTFE 含量的 PU 涂层的性能检测结果，随着 PTFE 在涂料中的含量增加，涂层的基本性能发生改变，但始终符合风电叶片涂层的检测标准。其中，涂层表面的光泽度逐渐提升，由 21.5%提升至 24.2%，增长幅度为 2.7%。由图 4 不同 PTFE 含量的 PU 涂层的宏观形貌观察到，涂层的光泽度变化不明显。在通常情况下，光泽度增长在 1%~3%范围内，肉眼不会观察出明显差异，因此添加不超过 5% PTFE 对涂层光泽度的影响很小；附着力与表层的铅笔硬度没有发生变化；耐冲击性能逐渐降低；柔韧性降低，但逐渐稳定；耐磨性不断变好；拉伸强度持续变小，断裂伸长率不断增大；耐水性、耐酸碱性实验中并没发现涂层有气泡、起皱、脱落现象。

检测结果表明，涂料体系中 PTFE 含量的增加会对涂层耐冲击性、耐磨性等力学性能产生较大影响，因此展开对涂层耐磨性的深入研究，并重点研究其耐雨蚀性能。

表 3 不同 PTFE 含量的 PU 涂层的性能检测结果

Tab.3 Performance test results of PU coatings with different contents of PTFE

Coating properties	PTFE content (%)					Test results
	0	1	2	3	5	
Gloss (60 °)/%	21.5	22.3	22.8	23.5	24.2	qualified
Pencil hardness	4H	4H	4H	4H	4H	qualified
Adhesion/level	0	0	0	0	0	qualified
Impact resistance/kg·cm	100	100	90	90	85	qualified
Flexibility/mm	0.5	0.5	1	1	1	qualified
Wear resistance/ [(CS10,1000g/1000r)]mg	15	14	13	10	7	qualified
Elongation at break/%	20.7	21.3	22.5	24.8	27.2	qualified
Tensile strength/MPa	5.4	5.2	5.1	4.5	4.0	qualified
Water resistance/7d	unchanged	unchanged	unchanged	unchanged	unchanged	qualified
Acid resistance/ (0.05mol/L H_2SO_4)7d	unchanged	unchanged	unchanged	unchanged	unchanged	qualified
Alkali resistance/ (0.1mol/L NaOH)7d	unchanged	unchanged	unchanged	unchanged	unchanged	qualified

2.2 PTFE 对 PU 涂层耐磨性影响

为了进一步探索 PTFE 含量对涂层耐磨性的影响，将耐磨周次增加到 5000 r，其结果如图 5 所示。随着涂料中 PTFE 的含量增加，涂层的耐磨性能得到显著改善，且不同 PTFE 含量的 PU 涂层在耐磨实验中

的质量损失均呈现线性递增的趋势。在相同的耐磨周次下，涂层中 PTFE 含量越高，质量损失越小。在整个耐磨性测试实验中，PU-5%涂层的质量损失最小，耐磨性最好；PU-0 涂层的质量损失最大，耐磨性最差。此外，按照 GB/T 1768 要求，PU-1%~5%涂层在 5000 r 时的质量损失均小于 60 mg，因此系列的 PU 涂层具有高耐磨性。

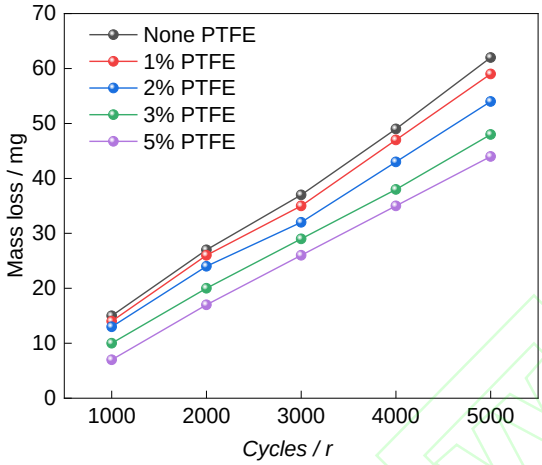

图 5 不同 PTFE 含量的 PU 涂层的质量损失随磨损周次的变化

Fig.5 Variations of mass losses of PU coatings containing different contents of PTFE with wear cycle

涂层耐磨性变优的原因主要有两个方面，一方面，在制备 PU 涂层的过程中，由于 PTFE 与 PU 树脂之间存在较大的表面能差异，使得 PTFE 不断迁移至涂层表面。当涂层中 PTFE 含量较少时，PTFE 主要以离散的形式分布在涂层表面，使得涂层耐磨性小幅提升；当 PTFE 含量足够大时，PTFE 主要以团聚的形式分布在涂层表面，使得涂层的耐磨性大幅提升[32]。另一方面，涂层断裂伸长率的增大与拉伸强度的减小表明涂层的弹性变形的能力增加，良好的弹性变形能力会增大涂层与对磨表面的真实接触面积，充分缓解应力集中，从而改善涂层的耐磨性。

2.3 不同 PTFE 含量的 PU 涂层的雨蚀结果与分析

2.3.1 不同 PU 涂层的雾化冲蚀行为

图 6 为不同 PTFE 含量的 PU 涂层雾化冲蚀 2 h 的体积损失变化，随着涂层中 PTFE 的含量增加，涂层的耐冲蚀性能降低。其中，PU-0 涂层的最终体积损为 0.5 mm^3 左右，耐冲蚀性最好；PU-5%涂层的最终体积损失为 4 mm^3 左右，大约为 PU-0 涂层的 8 倍，耐冲蚀性最差。

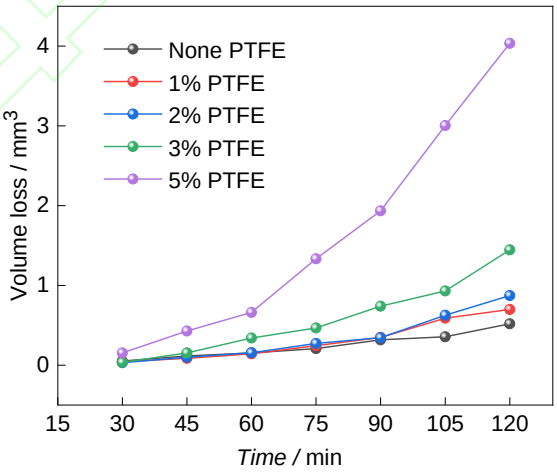

图 6 不同 PTFE 含量的 PU 涂层在 8.3 MPa 雾化冲蚀 2 h 的体积损失变化

Fig.6 Volume loss changes of PU coatings containing different contents of PTFE during atomization erosion at 8.3 MPa for 2 h

在持续 2h 的雾化冲蚀过程中，PU-0~2%涂层的体积损失量增长缓慢，且在 0~90 min 内，三种涂层的体积损失波动较小，直到 90~120 min 才出现了明显的差异；PU-3~5%涂层的体积损失量增长迅速，尤其是在 60~120 min 内，两种涂层的体积损失迅速变大。因此，添加 1%~2% PTFE，涂层的耐冲蚀性变化不大；添加 3%~5% PTFE，涂层的耐冲蚀性急剧变差。

图 7 为不同 PTFE 含量的 PU 涂层在不同冲蚀阶段的表面形貌，随着冲蚀时间的增加，涂层表面凹坑的数量不断增多，尺寸不断增大。在前 90 min 内，PU-3%~5%涂层表面萌生凹坑的平均数量大约是 PU-0~2%涂层的 2~3 倍；凹坑的平均尺寸达到长 0.8 mm、宽 0.8 mm、深 0.4~0.45 mm，其长、宽、深度大约是 PU-0%~2%涂层的 2~3 倍。在 90~120 min 内，PU-3%~5%涂层表面萌生凹坑的平均数量与 PU-0%~2%涂层一致，这是因为 PU-3%~5%涂层在前 90 min 内萌生的小凹坑在液滴冲蚀的作用相互连接生成大凹坑，凹坑的平均尺寸达到长 1 mm、宽 1 mm，深 0.6~0.65 mm，其长、宽大约是 PU-0~2%涂层的 3~4 倍，深度大约为 2~3 倍。此外，凹坑的数量也随着 PTFE 在涂层中含量的增大而增加，这可能是由于大量的 PTFE 上浮到涂层表面，没有与 PU 树脂良好结合导致。

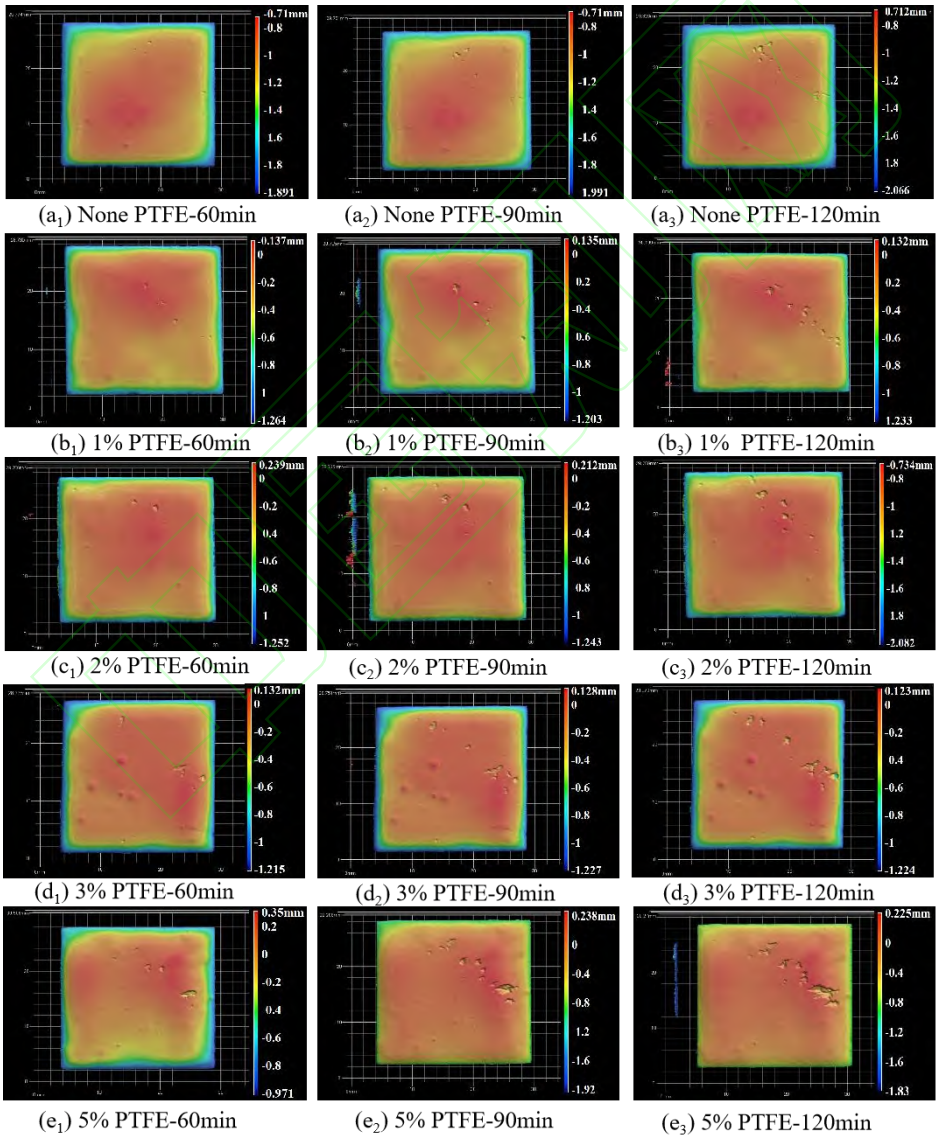

图 7 不同 PTFE 含量的 PU 涂层在 2h 雾化冲蚀的不同阶段的表面形貌

Fig.7 Surface morphologies of PU coatings containing different contents of PTFE after atomization erosion for different test time

2.3.2 PU 涂层在不同雾化冲蚀速度下的冲蚀行为

图 8 为不同 PU 涂层在不同管道压力下雾化冲蚀 30 min 的体积损失，涂层在 10.3 MPa 压强下的体积损失远大于 8.3 MPa，这是因为在相同的冲蚀时间内，增大管道中的水流量会增加管道压力与水流速度，使得液滴冲击涂层表面的频率增加以及涂层会吸收更多的冲击能量，最终导致涂层表面被破坏的程度不同。

图 8 还表明，在 10.3 MPa-30 min 冲蚀条件下，PU-0~2%涂层的体积损失变化很小；PU-3~5%涂层的体积损失迅速增大并在 5%达到最大值，这与在 8.3 MPa 条件下雾化冲蚀 2 h 得出的结果类似。而在 8.3 MPa-30 min 冲蚀条件下，PTFE 的含量从 0 到 5%，涂层的体积损失在 0~0.15 mm^3 之间，增长幅度很小，这是由于在雾化冲蚀前期，涂层表面正处于凹坑与裂纹的萌发阶段，而冲击压强的减小延长了涂层萌发损伤的时间，最终使得涂层体积损失很小。

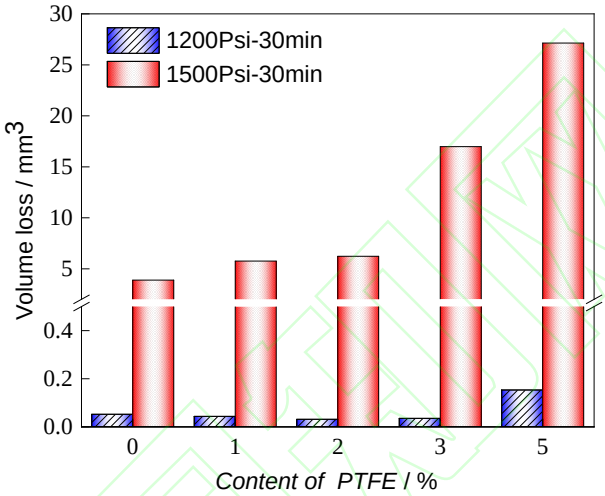

图 8 不同 PTFE 含量的 PU 涂层在不同管道压力下雾化冲蚀 30 min 的体积损失

Fig.8 Volume losses of PU coatings containing different contents of PTFE after atomization erosion for 30 min at pipeline pressures of 8.3 MPa and 10.3 MPa

图 9 为不同 PTFE 含量的 PU 涂层在不同管道压力下雾化冲蚀 30 min 的表面形貌，在 8.3 MPa-30 min 冲蚀条件下，PU-0%~5%涂层表面仍保持着完整性，仅出现了少量凹坑，这是由于涂层表面损伤的萌生正处于孕育期，这也使得该冲蚀条件下不能直接判断 PTFE 对涂层冲蚀性能的影响；但在 10.3 MPa-30 min 冲蚀条件下，在冲蚀区域内，涂层表面大面积脱落并形成了不同损伤程度的冲蚀形貌。此外，随着 PTFE 在涂层中含量的增加，涂层表面损伤越严重，但 PU-0%~2%三种涂层在冲蚀区域内的损伤形貌变化很小，直到 PTFE 含量大于 2%时，涂层表面形貌发生了明显的变化，其中，PU-5%冲蚀区域内的涂层表面几乎完全脱落。

PU-0%~5%在 10.3 MPa-30 min 冲蚀条件下的冲蚀结果与图 6 中 8.3 MPa-2 h 相比，冲蚀结果与伤损原因一致，但冲蚀压强的增大将 PTFE 与 PU 树脂的结合力度小的缺陷放大，进而增大了涂层的损伤速率。

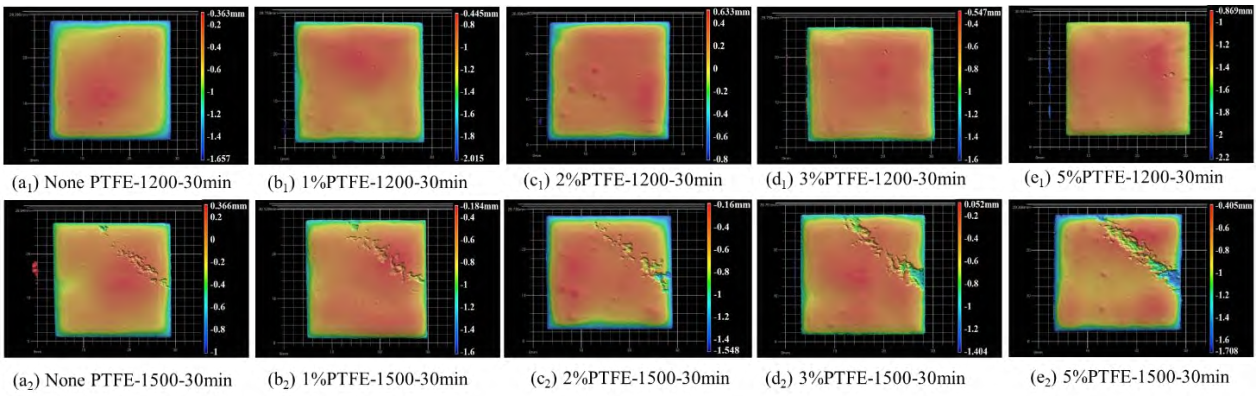

图 9 不同 PTFE 含量的 PU 涂层在不同管道压力下雾化冲蚀 30 min 后的表面形貌

Fig.9 Surface morphologies of PU coatings containing different contents of PTFE after atomization erosion for 30 min at pipeline pressures of 8.3 MPa and 10.3 MPa

2.3.3 不同 PU 涂层的射流冲蚀行为

与雾化冲蚀不同，由于射流冲蚀的冲击点位更集中，破坏力更强，涂层损伤的孕育期更容易掩，很快就发生涂层大量脱落。尽管射流冲蚀的压强仅有 6.9 MPa 且冲蚀时间更短，但在射流冲蚀中涂层的最终体积损失量大约为雾化冲蚀的 4~5 倍。

图 10 为不同 PTFE 含量的 PU 涂层在 6.9 MPa-30° 攻角下射流冲蚀 30 min 的体积损失变化，在持续 30 min 的射流冲蚀过程中，PU-0%~2%涂层的体积损失增长缓慢，且三种涂层的体积损失波动较小，最终体积损失差不多，大约为 9 mm^3；PU-3%~5%涂层的体积损失增加迅速，其中，PU-3%涂层在 10~20 min 内与 PU-5%涂层在 20~25 min 内的体积损失都有一个急剧增长的阶段，这是由于在冲蚀点位出现了 PTFE 团聚的现象所导致。两种涂层的最终体积损失为 16 mm^3 左右，大约为 PU-0%~2%涂层的 2 倍。因此，PU-0%~2%涂层的耐冲蚀性变化很小；PU-3%~5%涂层的耐冲蚀性急剧变差。这与在雾化冲蚀中的结果一致。

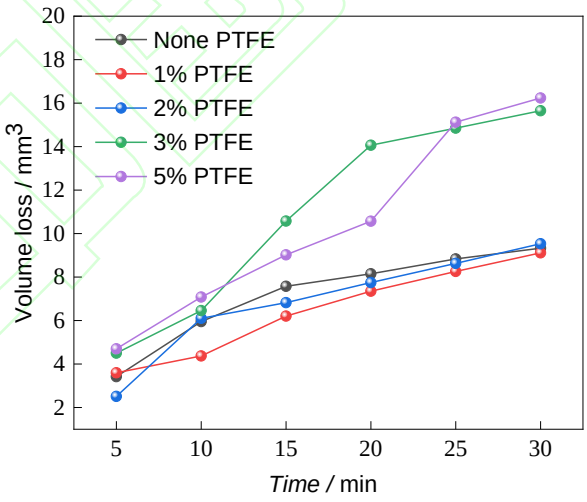

图 10 不同 PTFE 含量的 PU 涂层在 6.9 MPa 管道压力和 30° 攻角下射流冲蚀 30 min 的体积损失变化

Fig.10 Volume loss variations of PU coatings containing different contents of PTFE during jet erosion for 30 min at 6.9 MPa and 30° attack angle

图 11 为不同 PTFE 含量的 PU 涂层在 6.9 MPa-30° 攻角下射流冲蚀不同阶段的表面形貌，五种涂层的最终冲蚀形貌都为细条状冲蚀凹坑。随着冲蚀时间的增大，涂层表面凹坑的体积不断增大。随着 PTFE 含量的增大，PU-3%~5%涂层表面凹坑的体积比 PU-0%~2%涂层大得多，大约为 2.5 倍。

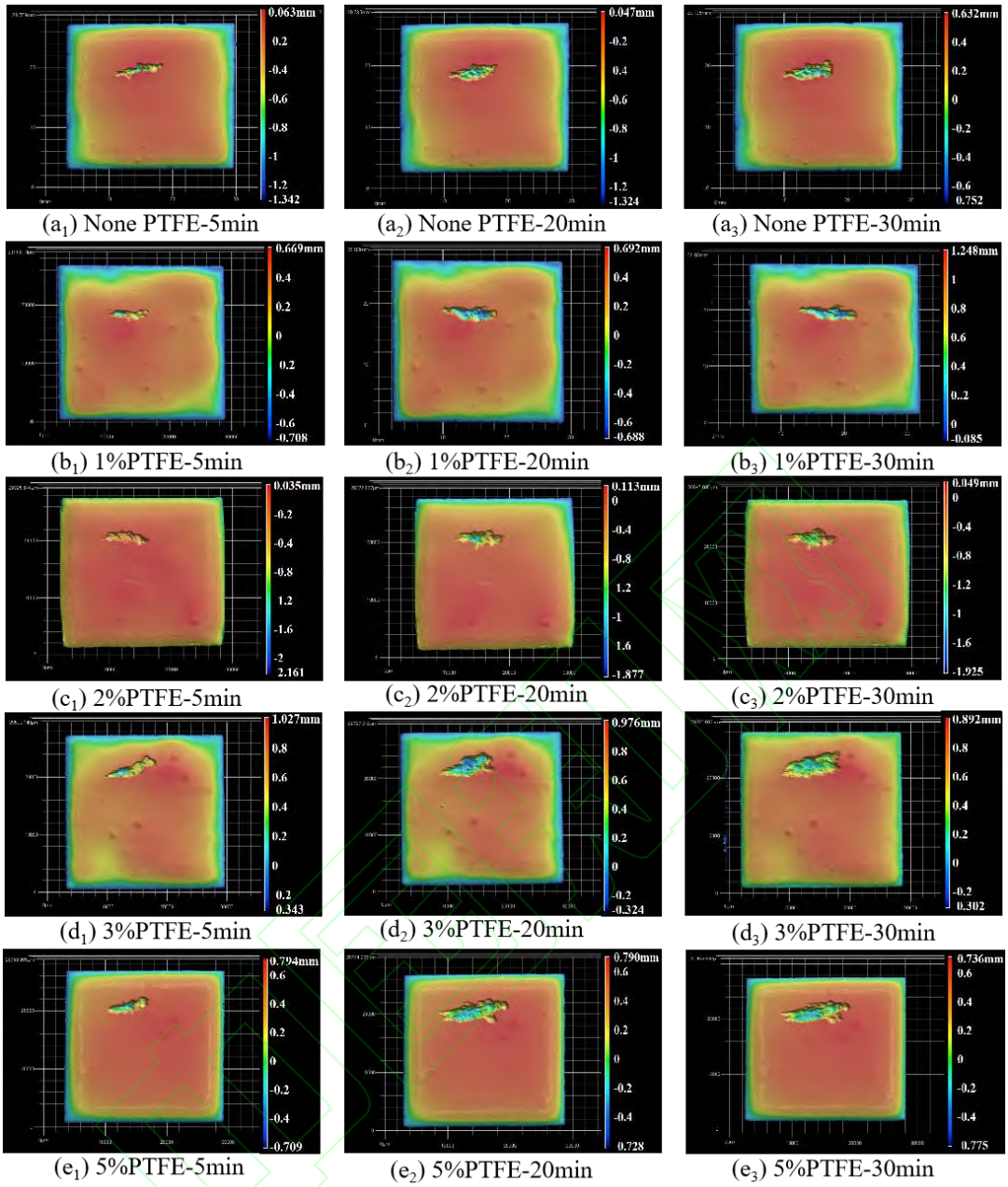

图 11 不同 PTFE 含量的 PU 涂层在 6.9 MPa 管道压力和 30° 攻角下射流冲蚀不同时间后的表面形貌

Fig.11 Surface morphologies of PU coatings containing different contents of PTFE after jet erosion at 6.9 MPa and 30° attack angle for different time

3.涂层损伤萌生机制探究

3.1 涂层损伤的萌生

图 12 为 PU-5%涂层原始样片的表面形貌及其局部放大处 EDS 元素分布，在其放大处，涂层表面主要包含了 C、O、Ti、F 四种元素，但在 F 大量聚集的位置出现了针孔、起皮和剥落坑不同种类的缺陷。这是因为在制备 PU 涂层的过程中，由于 PTFE 具有非极性分子结构、较低的表面能和结晶度大的特点，使 PTFE 难以与其他物质形成化学键、吸附其他物质以及扩散和相互纠缠。PTFE 与 PU 树脂的粘合性差，最终在涂层表面萌生了缺陷。

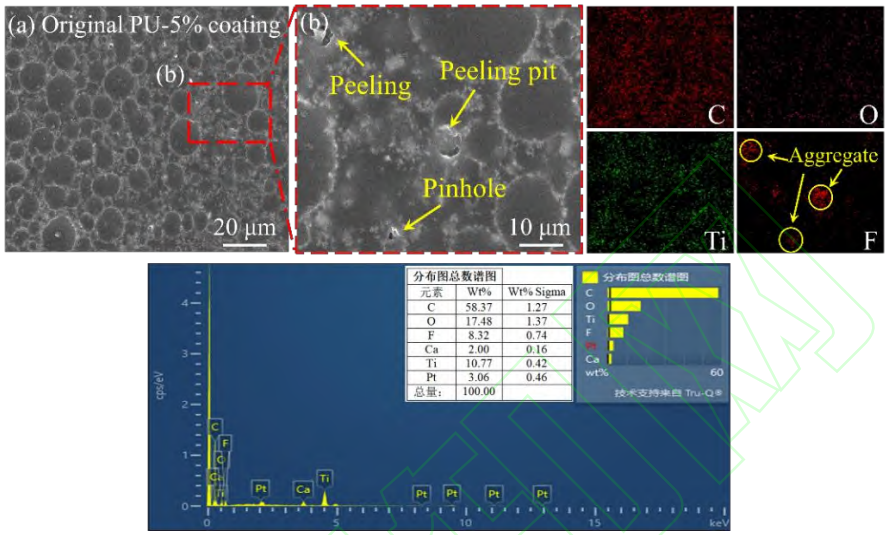

图 12 PU-5%涂层原始样片的表面形貌及其局部放大处 EDS 元素分布

Fig.12 Surface morphology of PU-5% coating (a), and enlarged image of the marked region in Fig12(a) and corresponding EDS analysis results (b)

可以推测，表面缺陷的萌生是破坏涂层表面完整性、降低涂层耐冲蚀性、提升涂层耐磨性的主要原因。在雾化冲蚀实验中，高速冲击的液滴会优先渗入涂层表面缺陷处并使其周围的树脂快速脱落，最终形成表面裂纹与凹坑，如图 13 a 所示；在射流冲蚀实验中，如图 13(b 所示，缺陷作为涂层表面的薄弱点，加快了涂层的剥落速度。但在耐磨性实验中，如图 13 c 所示，当橡胶轮与涂层表面发生相对摩擦时，PTFE 带给 PU 涂层表面的孔隙结构能够存储磨损过程中的磨屑，起到一定的减摩效果[33]，同时也可以减少涂层表面的三体磨料磨损颗粒，保证涂层表面的光滑，从而提升涂层的耐磨性。

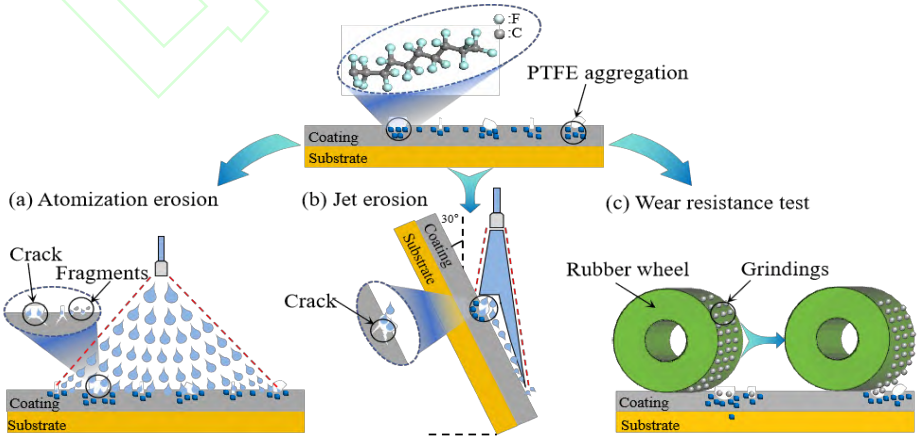

图 13 雾化冲蚀、射流冲蚀、耐磨性测试下涂层的损伤机制图

Fig.13 Damage mechanisms of PU-PTFE coatings under the conditions of atomization erosion (a), jet erosion (b) and wear test (c)

3.2 不同 PTFE 含量 PU 涂层的 SEM 与 EDS 分析

表 4 为不同 PTFE 含量的 PU 涂层原始样片中各元素的占比，未添加 PTFE 时，F 占比为 0；添加 1%和 2%的 PTFE 时，F 占比为 0.70%和 1.92%，F 在表层的质量分数低于 PTFE 在涂料中的含量的；添加 3%和 5%的 PTFE 时，F 的占比为 3.17%和 5.23%，F 在表层的质量分数高于 PTFE 在涂料中的含量的。因此，F 在表层的含量与 PTFE 的添加量存在差值。此外，图 12 展示了 PU-5%涂层原始样片局部放大处的 EDS，F 含量为 8.23 %远大于 5 %。所以，随着涂层中 PTFE 含量的增加，涂层表面 F 的占比逐渐增大，说明在制备样品的过程中，越来越多的 PTFE 上浮到涂层表面。

表 4 不同 PTFE 含量的 PU 涂层中各元素占比

Tab.4 Chemical compositions of PU coatings with different contents of PTFE

PTFE content (%)	C(wt%)	O(wt%)	Ti(wt%)	F(wt%)	Other elements (wt%)
0	60.73	24.11	10.90	0	4.26
1	63.19	22.88	9.93	0.70	3.30
2	58.29	21.65	12.98	1.92	5.16
3	61.94	20.76	10.48	3.17	3.65
5	58.97	19.69	10.95	5.23	5.16

图 14 为不同 PTFE 含量的 PU 涂层原始样片的 SEM 与 C、O、Ti、F 四种元素的表面分布状态，随着涂层中 PTFE 含量的增加，F 在涂层表面的分布形式由离散向团聚转变。其中，PU-0 涂层的 EDS 中没有出现 F，涂层表面也没有出现任何缺陷；PU-1%与 PU-2%涂层表面的 F 元素主要以离散状态分布，但也出现了少量的团聚分布，其中在 F 团聚处，PU-2%涂层表面出现了明显的缺陷；PU-3%与 PU-5%涂层表面的 F 主要以团聚的形式分布，在 F 团聚处，PU-5%涂层表面出现了大量的缺陷。因此，随着 F 在涂层表面团聚的位置越来越多，涂层表面萌生的缺陷随之增加，这也是导致当 PTFE 含量在 0%~2%时，涂层的耐冲蚀性没有受到太大影响、耐磨性小幅提升，当 PTFE 含量大于 2%时，涂层的耐冲蚀性急剧变差、耐磨性明显变好的主要原因。

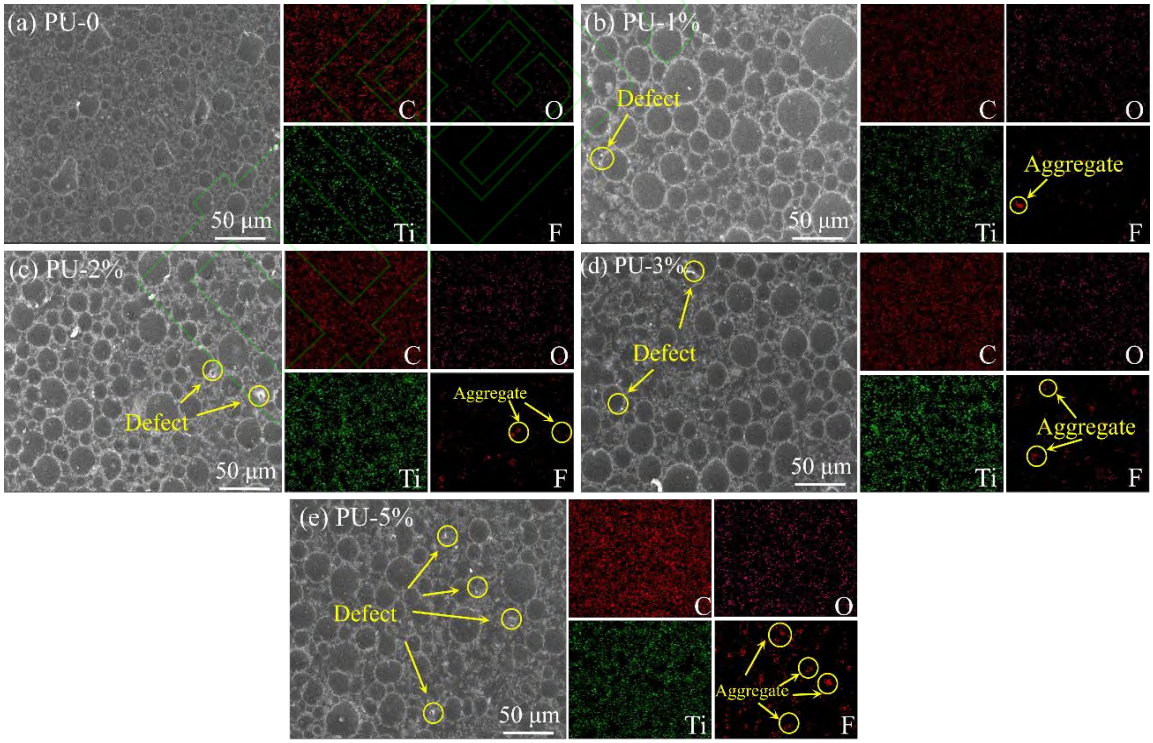

图 14 不同 PTFE 含量的 PU 涂层原始样片的 SEM 像与 EDS 分析结果

Fig.14 SEM images and EDS analysis results of original PU coatings with different contents of PTFE

3.3 不同 PTFE 含量 PU 涂层的雾化冲蚀 SEM 与 EDS

图 15 为不同 PTFE 含量的 PU 涂层雾化冲蚀 2 h 的表面损伤形貌与 C、O、Ti、F 四种元素的表面分布

状态。SEM结果表明，涂层在雾化冲蚀2 h后，PU-0涂层表面仍保持着完整性，但在持续的雾化冲蚀下，表层的 PU 树脂会自然脱落并形成了少量凹坑；而 PU-1%~5%涂层表面出现了大量的凹坑，且随着涂层中 PTFE 含量的增加，涂层表面冲蚀凹坑的数量越多，这些凹坑一部分是由于 PU 树脂自然脱落形成，一部分是由于液滴冲蚀 F 聚集处形成的缺陷造成。EDS 结果表明，雾化冲蚀 2 h 后，由于 F 聚集处形成的缺陷其周围树脂的脱落带走了大量 F，使得 PU-1%~5%涂层中的 F 不在以聚集的形态分布在涂层表面，而是以离散状态分布，尤其是在 PU-3%~5%中十分显著。因此，涂层表面凹坑数量的增多与 F 聚集态分布的减少都证实了因 F 聚集形成的表面缺陷会降低涂层的耐冲蚀性能推测。

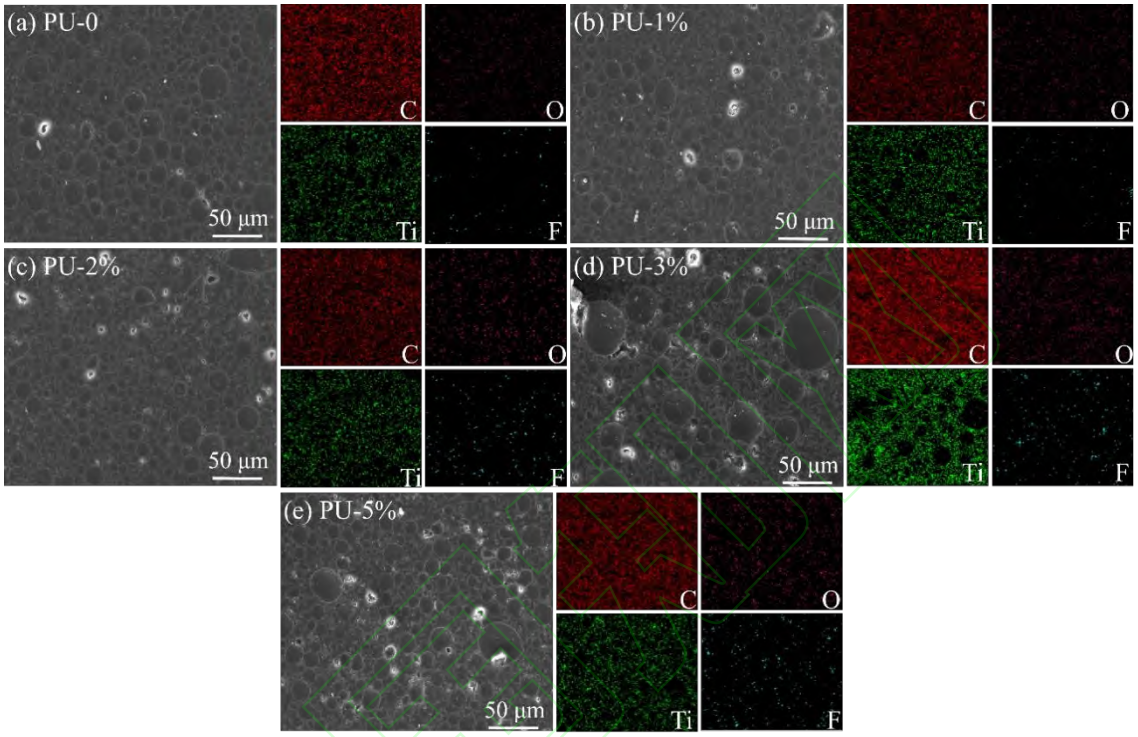

图 15 不同 PTFE 含量的 PU 涂层雾化冲蚀 2h 后的表面形貌与元素分布

Fig.15 SEM images and EDS element mappings of PU coatings with different contents of PTFE after atomization erosion for 2 h

4.结论

本文探究了不同 PTFE 含量 PU 涂层的基本性能，并对涂层的耐磨性与耐雨蚀性能展开深入研究，主要结论如下：

(1) 该聚氨酯涂料能够满足风电叶片保护涂层的基本要求，符合《风力发电设施防护涂装技术规范》中关于涂层设计的标准：具有高附着力、高耐冲击性、高耐磨性和较好耐雨蚀性。

(2) 随着 PTFE 在涂层中含量的增加，涂层的耐磨性显著提升，含 5 % 时最好；耐雨蚀性能大幅下降，添加 0%~2% PTFE 涂层的耐冲蚀性变化很小，添加 3%~5% PTFE 涂层的耐冲蚀性急剧变差。PTFE 在涂层表面团聚而产生的表面缺陷是涂层耐磨性变好、耐冲蚀性变差的主要原因。

(3) 添加 PTFE 改变了液滴冲蚀中凹坑的形成方式，少量凹坑是由自然脱落形成，大量凹坑是由液滴冲蚀 F 元素聚集处形成的缺陷造成。

(4) 使用耐磨性等基础性能测试结果预测涂层的耐雨蚀性是不可行的，风电叶片耐雨蚀涂层的评价必须通过专业雨蚀设备获取。

参考文献：

[1] Yang F, Yao Z F, Deng C N, et al. Spatiotemporal variations of global land surface wind speed and wind power energy density from 1950 to 2021 [J]. Resources Science, 2023, 45(11): 2276-2289

(杨飞,姚作芳,邓春暖,等. 1950—2021 年全球陆表风速及发电风能时空变化 [J]. 资源科学, 2023, 45 (11): 2276-2289)

[2] Chen X X, Tian Y X. The development trend, advantages, potential, and strategic orientation of China's new energy industry [J]. Reform, 2024, (05): 112-123

(陈星星,田贻萱. 中国新能源产业发展态势、优势潜能与取向选择 [J]. 改革, 2024, (05): 112-123)

[3] Herbert G M J, Iniyan S, Sreevalsan E, et al. A review of wind energy technologies [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2007, 11(6): 1117-1145

[4] Islam M R, Mekhilef S, Saidur R. Progress and recent trends of wind energy technology [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 21: 456-468

[5] Lin C. The "global wind energy report 2024" announces the wind power industry entering a new era of accelerated growth [N]. Lectromechanical Business Daily, 2024-04-22 (A07)

(林楚. 《全球风能报告 2024》发布风电行业进入加速增长新时代 [N]. 机电商报, 2024-04-22 (A07))

[6] Wang L Liu Y B Teng W, et al. Research and advances in non-destructive testing techniques for wind turbine blades [J]. Electric Power, 2023, 56 (10): 80-95

(王磊,柳亦兵,滕伟,等. 风电机组叶片无损检测技术研究与进展 [J]. 中国电力, 2023, 56 (10): 80-95)

[7] Martinez A, Iglesias G. Global wind energy resources decline under climate change[J]. Energy, 2024, 288: 129765.

[8] Storm B K. Surface protection and coatings for wind turbine rotor blades [M]//Advances in wind turbine blade design and materials. Woodhead publishing, 2013: 417-440

[9] Katsaprakakis D A, Papadakis N, Ntintakis I. A comprehensive analysis of wind turbine blade damage [J]. Energies, 2021, 14(18): 5974

[10] Li Y J. Study on mechanical behavior and acoustic emission response characteristics of the delamination damage evaluation for wind turbine blades [D]. Hebei University, 2015

(李亚娟. 风电叶片分层缺陷演化的力学行为及声发射响应特性研究[D]. 河北大学, 2015)

[11] Li P X, Yuan L, Pan L, et al. Research progress on polyurethane coatings for MW-level wind turbine blades [J]. Materials Reports, 2020, 34 (S2): 1594-1597

(李沛欣,袁凌,潘磊,等. MW 级风电叶片用聚氨酯涂料的研究进展 [J]. 材料导报, 2020, 34 (S2): 1594-1597)

[12] Dashtkar A, Hadavinia H, Sahinkaya M N, et al. Rain erosion-resistant coatings for wind turbine blades: A Review [J]. Polymers and Polymer Composites, 2019, 27(8): 443-475

[13] Zhang S, Dam-Johansen K, Nørkjær S, et al. Erosion of wind turbine blade coatings-design and analysis of jet-based laboratory equipment for performance evaluation [J]. Progress in Organic Coatings, 2015, 78: 103-115

[14] Zhang L B, Zhang H X, Liu Z J, et al. Nano-silica anti-icing coatings for protecting wind-power turbine fan blades [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2023, 630: 1-10

[15] Jiang B C, Lei Y H, Zhang Y L, et al Research progress on the application of functional superhydrophobic coatings in polar ice resistance field[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2024, 44 (1): 1-14

(姜伯晨, 类延华, 张玉良, 等. 功能性超疏水涂层在极地抗冰领域的应用研究进展[J]. 中国腐蚀与防护学报. 2024, 44 (1): 1-14)

[16] Mishnaevsky Jr L, Hasager C B, Bak C, et al. Leading edge erosion of wind turbine blades: understanding, prevention and protection [J]. Renewable Energy, 2021, 169: 953-969

[17] Li D H, Yang T X, Sun T X, et al. Preparation and corrosion resistance of modified SiO_2 aerogel polyurethane composite coating[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2024, 44 (1): 167-174

(李丹鸿, 杨腾逊, 孙天翔, 等. 改性 SiO_2 气凝胶聚氨酯复合涂层的制备及耐蚀性能研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2024, 44 (1): 167-174)

[18] Li C L, Shi H W, Liang G P, et al. Study on the corrosion resistance and aging mechanism of polyurethane topcoat for high speed trains[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2023, 43 (6): 1383-1391

(李春霖, 史洪微, 梁国平,等. 高速列车用聚氨酯面漆耐蚀性能和老化机制研究[J]. 中国腐蚀与防护学报. 2023, 43 (6): 1383-1391)

[19] Zhang S, Dam-Johansen K, Bernad Jr P L, et al. Rain erosion of wind turbine blade coatings using discrete water jets: effects of water cushioning, substrate geometry, impact distance, and coating properties [J]. Wear, 2015, 328: 140-148

[20] Hoksbergen T H, Akkerman R, Baran I. Rain droplet impact stress analysis for leading edge protection coating systems for wind turbine blades [J]. Renewable Energy, 2023, 218: 119328

[21] Yang D X, Lan H J, Yin X Y. An overview of rain erosion testing techniques for wind turbine blades [J]. Composite Materials Science and Engineering, 2024(05):121-128

(杨德旭,兰海金,尹秀云.风电叶片雨蚀测试技术浅析 [J].复合材料科学与工程, 2024(05):121-128)

[22] Blumm J, Lindemann A, Meyer M, et al. Characterization of ptfe using advanced thermal analysis techniques [J]. International Journal of Thermophysics, 2010, 31(10): 1919-1927

[23] Liu F, Jin Y, Li J, et al. Improved coefficient thermal expansion and mechanical properties of ptfe composites for high-frequency communication [J]. Composites Science and Technology, 2023, 241: 110142

[24] Wang M, Lu T,Tan S B, et al. Research progress in surface modification of polytetrafluoroethylene [J]. Chemistry & Bioengineering, 2024,41(06):1-6+36

(王苗,路涛,谭少博,等.聚四氟乙烯的表面改性研究进展 [J].化学与生物工程, 2024,41(06):1-6+36)

[25] Xu B, Liu Q, Qian J C, et al. Protective performance of fluoropolyurethane coating system in simulated marine environment [J]. Surface Technology, 2022, 51(9): 243-250

(许斌,刘强,钱建才,等.含氟聚氨酯防护涂层体系在模拟海洋环境下的防护性能 [J].表面技术,2022,51(09):243-250+270)

[26] Qin C C, Mulroney A T, Gupta M C. Anti-icing epoxy resin surface modified by spray coating of ptfe teflon particles for wind turbine blades [J]. Materials Today Communications, 2020, 22: 100770

[27] Karmouch R, Coudé S, Abel G, et al. Icephobic ptfe coatings for wind turbines operating in cold climate conditions [C]//2009 IEEE Electrical Power & Energy Conference (EPEC). IEEE, 2009: 1-6

[28] Kumar R, Malaval B, Antonov M, et al. Performance of polyimide and ptfe based composites under sliding, erosive and high stress abrasive conditions [J]. Tribology International, 2020, 147: 106282

[29] Özzaim P, Korkusuz O B, Fidan S, et al. Investigation of particle erosion of polytetrafluoroethylene and its composites[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 2022, 236(9): 1738-1749

[30] Gui Y Q, Ni A Q, Wang J H. Research on rain erosion of wind turbine blade coatings [J]. Chinese Journal Of Applied Mechanics, 2020,37(01):403-410+496-497

(桂永强,倪爱清,王继辉.风机叶片涂层雨蚀研究 [J].应用力学学报, 2020,37(01):403-410+496-497)

[31] Gu M B, Jiang X J, Cheng J Q, et al. Preparation and performance study of highly wear resistant coatings [J]. Aging and Applications of Synthetic Materials, 2023, 52 (03): 17-20

(谷美邦,姜秀杰,成建强,等. 高耐磨涂料的制备及性能研究 [J]. 合成材料老化与应用, 2023, 52 (03): 17-20)

[32] Wang X K, Su Y F, Cheng Z, et al. Fabrication and wear resistance of robust superhydrophobic composite coating based on porous adhesive layer [J]. Surface Technology, 2023, 52(11): 63-71

(汪希奎,苏一凡,程真,等.基于多孔黏结层的超疏水复合涂层制备及其耐磨性研究 [J].表面技术,2023, 52 (11): 63-71)