

文章编号: 1008-9357(2026)01-0053-08

DOI: 10.14133/j.cnki.1008-9357.20250926001

天冬聚脲基弹性体的制备及其防冰性能研究

王鹏鹏, 汪洋, 东为富

(江南大学化学与材料工程学院, 合成与生物胶体教育部重点实验室, 江苏无锡 214122)

摘要: 积冰是自然环境中的一种普遍现象, 但严重的积冰会影响人们的日常生活, 并给通信系统、风力发电、海上作业、航空航天工程和极地探险等多个领域带来重大挑战。本文以端羟基聚二甲基硅氧烷(HTPDMS)、六亚甲基二异氰酸酯(HDI)和聚天门冬氨酸酯(PAE)为原料, 采用两步法合成聚二甲基硅氧烷(PDMS)改性的天冬聚脲基弹性体(SPUE)。通过分子设计引入柔性硅氧烷疏水链段与刚性脲键, 实现了防冰性能与力学性能的协同作用。SPUE具有优异的防冰性能, 水接触角达 133° , 水滚动角为 19° , 冰附着强度仅为47 kPa。经1000次磨耗与2000 h紫外光老化后, SPUE仍保持稳定的性能。此外, SPUE还具备良好的耐雨蚀性, 展现了其在风电叶片保护领域的应用前景。

关键词: 聚脲基弹性体; 涂层; 表面结构; 防冰性能; 稳定性

中图分类号: O63

文献标志码: A

Preparation of Aspartimide-Based Polyurea Elastomers and Study of Their Anti-Icing Properties

WANG Pengpeng, WANG Yang, DONG Weifu

(Key Laboratory of Synthetic and Biological Colloids, Ministry of Education, School of Chemical and Material Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China)

Abstract: Ice accretion is a common phenomenon in natural environments. However, severe ice accretion significantly affects people's daily lives and poses major challenges across multiple fields, including communication systems, wind power generation, offshore operations, aerospace engineering, and polar exploration. A polydimethylsiloxane (PDMS)-modified aspartimide-based polyurea elastomer (SPUE) was synthesized via a two-step method using hydroxyl-terminated polydimethylsiloxane (HTPDMS), hexamethylene diisocyanate (HDI), and polyaspartic ester (PAE) as raw materials. Molecular design strategies were employed to introduce flexible silicone hydrophobic segments and rigid urea linkages, achieving a synergistic enhancement of anti-icing performance and mechanical performance. The results demonstrate that SPUE exhibits outstanding anti-icing performance, with a water contact angle of 133° , a water rolling angle of 19° , and an ice adhesion strength of 47 kPa. The material retains stable performance after 1 000 abrasion cycles and 2 000 h of UV aging. Moreover, the material shows excellent rain erosion resistance, highlighting its potential for applications in wind turbine blade protection.

收稿日期: 2025-09-26

基金项目: 国家自然科学基金(52373078)

作者简介: 王鹏鹏(1989—), 男, 江苏无锡人, 硕士, 主要研究方向为功能高分子材料。E-mail: 6230657002@stu.jiangnan.edu.cn

通信联系人: 汪洋, E-mail: ywang@jiangnan.edu.cn

引用格式: 王鹏鹏, 汪洋, 东为富. 天冬聚脲基弹性体的制备及其防冰性能研究[J]. 功能高分子学报, 2026, 39(1): 53-60.

Citation: WANG Pengpeng, WANG Yang, DONG Weifu. Preparation of Aspartimide-Based Polyurea Elastomers and Study of Their Anti-Icing Properties [J]. Journal of Functional Polymers, 2026, 39(1): 53-60.

Key words: polyurea elastomer; coating; surface structure; anti-icing performance; stability

积冰是自然界的常见现象^[1],但严重的积冰会影响工业设备的正常运行以及使用寿命。风力发电过程中不消耗化石能源,也不会产生温室气体或有害气体,是当今世界最为主流的清洁能源之一。然而,风机叶片表面的积冰会引起部件结构的损伤,影响气动性能,降低发电效率等,严重的积冰还会造成风电机组停机。目前,国内外应用于风机叶片表面的防冰技术大体可分为主动除冰和被动除冰。主动除冰包括机械除冰^[2]、加热除冰^[3]、化学除冰^[4]等,但这些传统的除冰方式大多具有效率低、能耗高等特点。

近年来,利用新型疏水材料的除冰方式被越来越多地使用。疏水材料对水具有排斥作用,具有较高的接触角、较低的滚动角,表面较难被水附着,因此在防冰除冰领域被越来越多地应用^[5-7]。在高湿、低温条件下,大多数疏水材料一方面会因冷凝液滴填充微/纳米结构从而导致其防冰性能减弱^[8,9],另一方面冰与表面微纳结构的互锁使得除冰时表面结构被破坏,从而进一步降低其使用寿命^[10,11]。

聚脲是由异氰酸酯与氨基化合物反应得到的一种高分子化合物,聚脲材料主要包括芳香族聚脲、常规脂肪族聚脲和聚天门冬氨酸酯聚脲。其中,聚天门冬氨酸酯(PAE)带有仲胺基官能团,可与脂肪族异氰酸酯反应生成高强度、高耐候的天冬聚脲材料。在天冬聚脲中加入柔性的软段结构改性,可赋予其丰富的弹性和柔韧性,并能在低温环境下保持性能稳定,实现刚柔并济、耐寒耐候的协同效果,成为制备耐久性材料的理想选择^[12,13]。聚脲涂料是一种新型的环保型材料,用脂肪族异氰酸酯预聚物作为固化剂,具有高强度、高韧性、耐候性与附着力好、使用寿命长等特点,主要用于设备、结构、建筑的防水和防腐。然而,传统聚脲材料的表面能过高,无法作为降低冰附着力的涂层材料^[14]。近年来,为进一步降低冰的附着力,人们开发了多种新型防冰材料。具有分级结构的超疏水表面(SHSs)通过最小化冰与材料表面的实际接触面积来降低冰的附着力^[15-17],但这类分级结构易因除冰和磨损受损,且凝结和霜冻可能导致其防冰性能下降^[18-20]。

本文通过两步法反应,先以端羟基聚二甲基硅氧烷二醇(HTPDMS)与六亚甲基二异氰酸酯(HDI)为原料生成 HTPDMS-HDI 预聚体,再与 PAE 交联固化制备聚二甲基硅氧烷(PDMS)改性的天冬聚脲基弹性体(SPUE)。以异氰酸根封端的预聚物含有 PDMS 长链结构,可以增强材料的疏水性和柔顺性,并且在与 PAE 交联固化反应后生成刚性脲键结构,提升材料的强度与韧性,从而实现防冰性能与力学性能的协同作用。我们进一步研究了 SPUE 在磨损和紫外老化后的防冰耐久性以及耐雨蚀性能,凸显其在风电叶片保护领域的应用前景。

1 实验部分

1.1 原料和试剂

HTPDMS: 数均分子量(M_n)分别为 1000、4100,化学纯,瓦克化学有限公司; HDI(牌号 WANNATE): 化学纯,万华化工集团有限公司; PAE(牌号 F420): 化学纯,深圳飞扬新材料有限公司; 二月桂酸二正辛基锡(DOTL): 纯度 98%,上海麦克林试剂有限公司。

1.2 测试与表征

1.2.1 结构表征 傅里叶红外光谱(FT-IR): 采用美国 PE 公司 Spectrum TWO 型红外光谱仪,扫描范围 500~4000 cm^{-1} ,扫描测试 32 次。动态热机械分析(DMA): 采用美国 TA 公司 Q800 250 型动态热机械分析仪,用拉伸测试法,温度范围为-70~60 $^{\circ}\text{C}$,频率 1 Hz,升温速率 4 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。原子力显微镜: 采用德国布鲁克公司 Dimension EDGE 型原子力显微镜,薄膜样条尺寸(长×宽×厚)为 200 mm×200 mm×(0.2~0.25) mm。

1.2.2 防冰性能 使用静态接触角测试仪(美国 RAME-HART 公司 260 型)测试材料的静态水接触角(WCA)以及水滑动角(WSA)。实验介质为去离子水,每个样品分别在 3 个不同位置测试,水滴体积 5 μL ,测试温度 23 $^{\circ}\text{C}$,相对湿度 50%。使用配备恒温控制装置的万能拉伸仪(英国 Testometric 公司 M350 型)测试材料的冰附着强度,测试示意图如图 1 所示。使用内径 20 mm、壁厚 3 mm、高度 5 mm 的聚乳酸(PLA)定制模具,将模具置于基材表面,注入去离子水 10 mL,置于-10 $^{\circ}\text{C}$ 的恒温箱内冷冻 24 h 后,以 10 mm/min 的拉伸速率移动模具,记录冰块被移动前的最高拉伸强度峰值,每个样品测试 3 组。

1.2.3 耐久性能 采用美国 Taber 公司 5135 型磨耗仪,CS-10 磨轮、砝码(1 kg),磨耗测试 1000 转,磨耗实验完成后,再次测试材料的 WCA、WSA 及冰附着强度。采用美国 Q-Lab 公司 QUV 型紫外光老化测试仪,按照

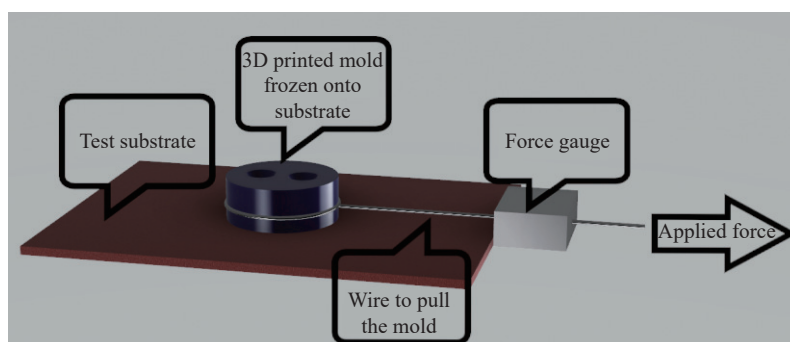


图1 冰附着强度测试示意图

Fig. 1 Diagram of ice adhesion strength test

GB/T 14522—2008 荧光紫外线冷凝循环实验方法,光源为 UV-A 灯管,每次循环实验条件为: 60 °C 光照 4 h,光照度 0.83 W/m², 50 °C 冷凝 4 h。如此循环曝露 2 000 h 后,测试材料的 WCA、WSA 及冰附着强度。

1.2.4 力学性能 使用万能试验机按照 ISO 527-3:2018 标准测试材料的机械拉伸性能,将厚度为 200 μm 的薄膜裁成长 100 mm、宽 10 mm 的样条,测试温度 23 °C,拉伸速率 200 mm/min,记录拉伸断裂强度及延伸率。测试 3 组平行样。

1.2.5 耐雨蚀性能 使用丹麦 R&D AS 雨滴侵蚀试验仪,按照 ASTM G73-10 (2021) 标准测试 SPUE 材料的耐雨滴侵蚀性能,雨滴平均直径为 2.4 mm,降雨量为 28~32 mm/h,转子尖端转速为 160 m/s。在测试过程中,每 30 min 停机一次,拍照记录材料表面形貌,并记录初始破损出现时间以及破损完全击穿材料至底材裸露的时间。测试底材采用环氧树脂增强玻璃纤维复合材料(玻璃钢)基材,用 80 目(颗粒度约 190 μm)砂纸打磨基材表面,用压缩空气喷枪喷涂 SPUE 材料,漆膜厚度 300 μm,室温下固化 14 d。

1.3 实验步骤

将 HTPDMS-HDI 预聚体样品标记为 Prepol-*x-y*, SPUE 样品标记为 SPUE-*x-y*(*x* 为 HTPDMS 的数均分子量,*y* 为 HTPDMS-HDI 预聚体中异氰酸酯(NCO)官能团的质量分数(%)),*y* 的计算公式如下:

$$y = \frac{(n_{\text{NCO}} - n_{\text{OH}}) \times M_{\text{NCO}}}{m_{\text{HDI}} + m_{\text{HTPDMS}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: n_{NCO} 和 n_{OH} 分别表示 NCO 官能团和 OH 基团的物质的量, m_{HDI} 和 m_{HTPDMS} 分别表示 HDI 和 HTPDMS 的质量, $M_{\text{NCO}} = 42$ 。

1.3.1 HTPDMS-HDI 预聚体的合成 以 Prepol-1000-2 的合成为例,将数均分子量 1 000 的 HTPDMS(0.1783 mol)和 DOTL(0.457 mmol)倒入干燥的烧瓶中,置于 100 °C 烘箱中 2 h 去除水分后,恢复至常温,通入 N₂ 并低速搅拌,缓慢滴加 HDI(0.1881 mol),在 80 °C、N₂ 保护的条件下搅拌 2 h 后,即得到 Prepol-1000-2 预聚体。

1.3.2 SPUE 的合成 将 Prepol-1000-2(0.0553 mol)倒入 200 mL 马口铁罐中,加入 PAE(0.0553 mol),用离心旋转混合设备在 2 200 r/min 的速率下混合,并脱除气泡 3 min。将混合后的样品倒在贴有 3M LSE600 型分离膜的玻璃板表面,使用湿膜制备器将其刮涂成厚度 200 μm、长度约 200 mm、宽度约 80 mm 的薄膜,放置在 23 °C、相对湿度 50% 的恒温箱中固化 7 d,制得 SPUE 材料。SPUE 的合成示意图如图 2 所示。

2 结果与讨论

2.1 HTPDMS-HDI 预聚体 和 SPUE 的结构特征

预聚体 Prepol-1000-4 与 SPUE 的 FT-IR 谱图如图 3 所示。由图 3(a)可以看出,在 2 256 cm⁻¹ 处的 -NCO 特征峰减弱,1 683 cm⁻¹ 处的酰胺键上 C=O 伸缩振动峰和 1 513 cm⁻¹ 处的 -NH- 弯曲振动峰增强,说明 HDI 的 -NCO 官能团与 HTPDMS 中的 -OH 反应而逐渐消耗,生成了 HTPDMS-HDI 预聚体。由图 3(b)可以看出,2 256 cm⁻¹ 处的 -NCO 特征峰完全消失,而在 3 361 cm⁻¹ 处出现 -NH- 拉伸振动峰,以及 1 690 cm⁻¹ 处的脲键上 C=O 伸缩振动峰和 1 513 cm⁻¹ 处 -NH- 的弯曲振动峰增强,说明 PAE 中的仲胺基与预聚体中的异氰酸酯基反应生成了脲基团,表明 SPUE 弹性体的制备成功。

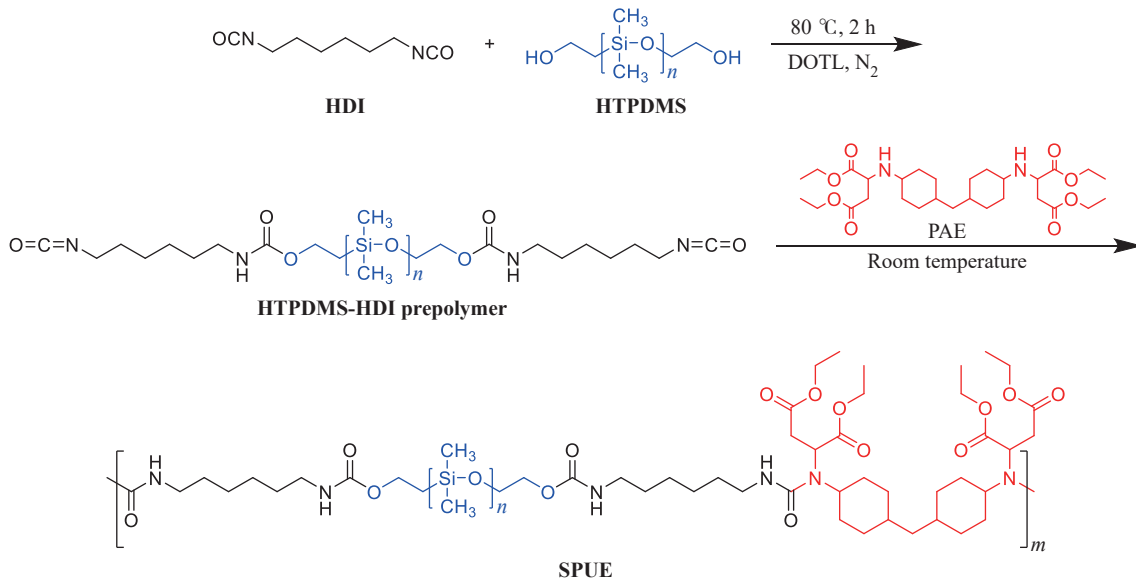


图 2 SPUE 的合成示意图

Fig. 2 Synthetic schematic diagram of SPUE

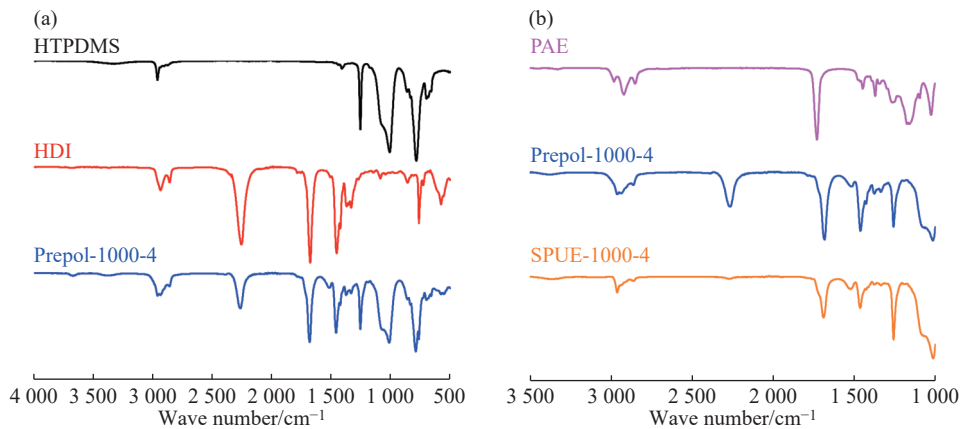


图 3 原料、预聚体及样品的 FT-IR 谱图

Fig. 3 FT-IR spectra of raw materials, prepolymers and samples

2.2 SPUE 的表面微观形貌

SPUE 材料的表面微观形貌如图 4 所示。NCO 质量分数的降低,意味着 SPUE 中 PDMS 链段的占比增多,从而使材料表面的微观形貌粗糙度增加。AFM 图像也显现出相同的趋势。当材料表面有水滴存在时,水对材料表面的润湿状态更容易呈现异相润湿模型状态,即 Cassie-Baxter 模型状态。因此,PDMS 改性的 SPUE 提升了材料表面的疏水性能,使得水滴难以附着于材料表面,从而可以提升材料的防冰性能。

2.3 SPUE 的动态力学性能

SPUE 材料的 DMA 损耗因子($\tan \delta$)曲线如图 5 所示。预聚体中 NCO 官能团的质量分数越低,SPUE 材料的玻璃化转变温度越低,如 SPUE-1000-6 的玻璃化转变温度为 8.5 °C,SPUE-1000-4 的玻璃化转变温度降到 6.4 °C,而 SPUE-1000-2 的玻璃化转变温度进一步降低到 1.8 °C。这是因为 PDMS 链段占比增多,提升了 SPUE 的柔韧性,从而降低 SPUE 材料的玻璃化转变温度。

2.4 SPUE 的防冰性能及耐久性能

WCA 和 WSA 通常用来评估水对材料表面的润湿程度,WCA 越高或 WSA 越低,表明水越难润湿材料表面。冰附着强度指冰与材料表面之间的黏附力,也是评估材料抗积冰性能的重要参数。本实验使用未经改性的 HDI 单体与 PAE 生成聚脲基弹性体(PUE)材料,用于对比改性前后的防冰性能,结果如图 6 所示。未改性的 PUE 材料的 WCA 为 57°,WSA 为 46°,冰附着强度为 465 kPa,基本不具备防冰性能。使用 PDMS 改性

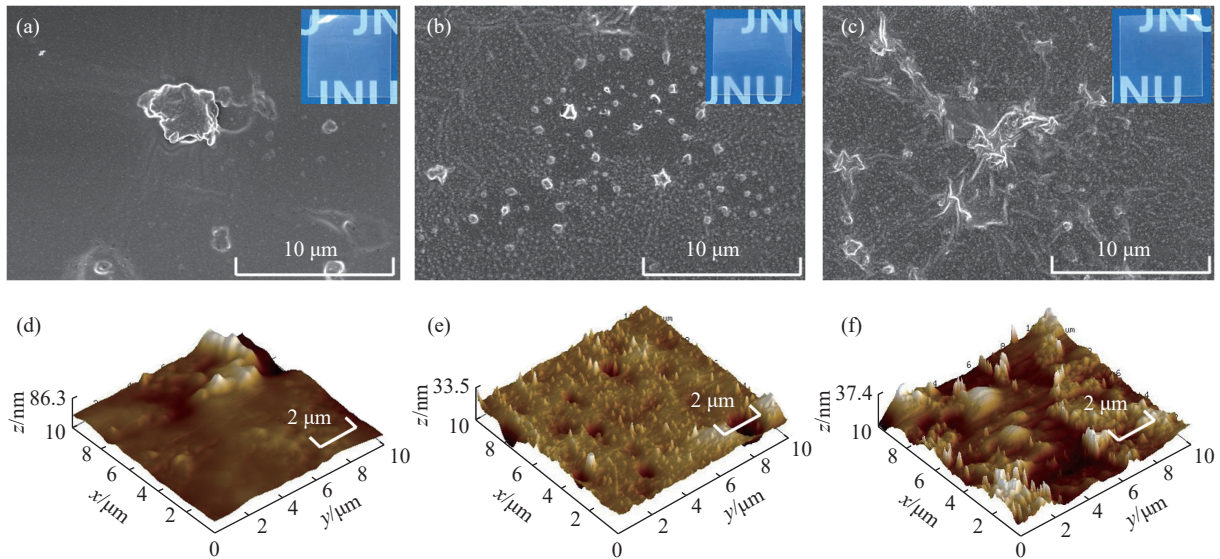


图 4 (a, d) SPUE-1000-6, (b, e) SPUE-1000-4 与 (c, f) SPUE-1000-2 样品的 (a,b,c)SEM 与 (d,e,f)AFM 图像
 Fig. 4 (a,b,c)SEM and (d,e,f)AFM images of (a,d) SPUE-1000-6, (b,e) SPUE-1000-4 and (c,f) SPUE-1000-2 samples

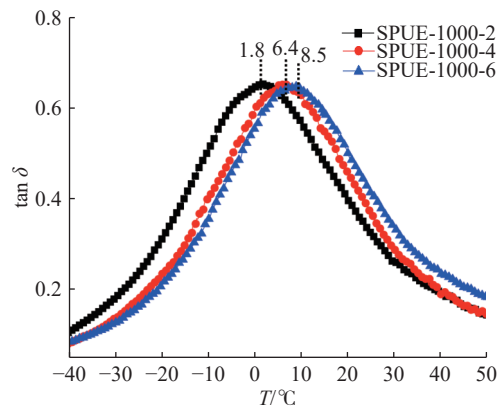


图 5 SPUE 样品的 DMA 损耗因子曲线

Fig. 5 DMA loss factor curves of SPUE samples

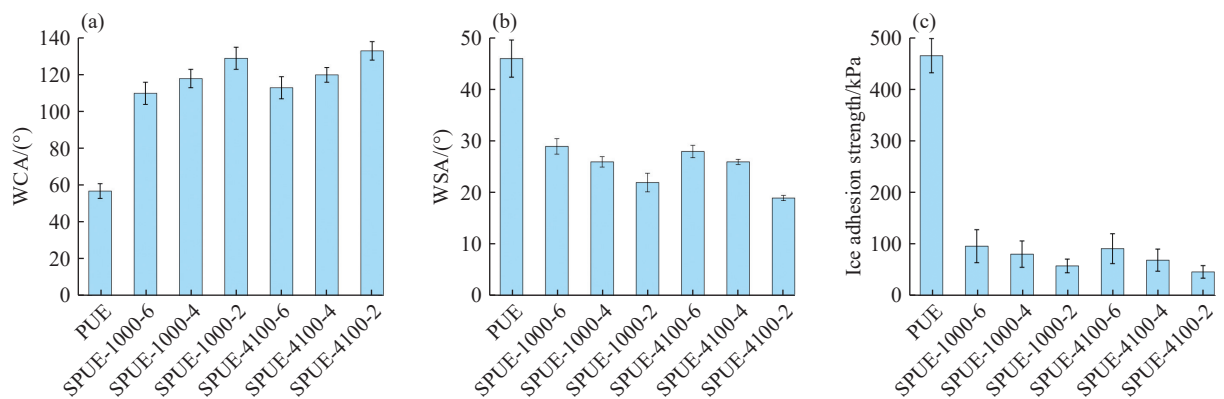


图 6 SPUE 样品的 (a)WCA, (b)WSA 与 (c) 冰附着强度

Fig. 6 (a)WCA, (b)WSA and (c) ice adhesion strength of SPUE samples

后的 SPUE 材料的 WCA、WSA、冰附着强度都有明显的提升。PDMS 改性后, SPUE 分子结构上大量的疏水基团提高了材料的疏水性。在保持 HTPDMS 数均分子量不变的情况下(以 HTPDMS 数均分子量为 4100 为例), 随着 PDMS 预聚程度增加, WCA 从 121° 上升至 133°, WSA 从 24° 下降至 19°, 冰附着强度从 73 kPa 下降至 47 kPa。这说明 PDMS 的预聚程度越高, 防冰性能越佳。在保持预聚体中 NCO 质量分数不变的情况下, 随

随着 HTPDMS 数均分子量的增加, SPUE 的防冰性能提升。SPUE-1000-2 的 WCA 为 120° , WSA 为 24° , 冰附着强度为 73 kPa; SPUE-4100-2 的 WCA 为 133° , WSA 为 19° , 冰附着强度为 47 kPa, 防冰性能均出现了显著提升。以上结果说明随着聚合物中的 PDMS 链段的增加, SPUE 材料的疏水性显著提升, 从而赋予了此材料在防冰领域的应用价值。

防冰材料的耐久性不高, 无法维持长效防冰。将 PDMS 类的疏水组分与 PUE 材料物理混拼在一起(如表 1 中 PUE+PDMS-1000), 而非采用本研究中的 PDMS 化学改性的方法, 则此类材料通常在表面结构磨损后, 防冰性能会大幅降低。这是由于 PDMS 的密度较低, 且与 PUE 的混溶性较差, 两者物理混合后疏水组分集中于材料表面, 当表面结构被磨损后, PDMS 的疏水组分会被损耗掉, 疏水性能大幅降低, 从而无法长久保持良好的防冰性能。对材料表面进行 1000 次 Taber 磨损测试前后的防冰性能对比如表 1 所示。经 PDMS 化学改性后的 SPUE 的接触角、滚动角和冰附着强度在磨损后均没有明显变化, 且明显高于未改性的 PUE 材料。这显示了聚硅氧烷-聚脲弹性体具有优异的疏水稳定性。仅采用物理混合的 PUE+PDMS-1000 在磨损测试后, 防冰性能明显下降。

表 1 SPUE 材料在 Taber 磨损测试前后的防冰性能

Table 1 Anti-icing property of SPUE samples before and after Taber abrasion test

Sample	WCA/($^\circ$)		WSA/($^\circ$)		Ice adhesion strength/kPa	
	Before	After	Before	After	Before	After
PUE+PDMS-1000	101	58	20	54	147	485
SPUE-1000-6	110	106	29	30	96	101
SPUE-1000-4	114	111	26	27	86	90
SPUE-1000-2	120	118	24	24	73	79
SPUE-4100-6	121	118	24	25	73	80
SPUE-4100-4	126	124	21	22	61	66
SPUE-4100-2	133	131	19	19	47	50

图 7 示出了 SPUE 样品在紫外光化条件下的 WCA、WSA 及冰附着强度, 使用不同分子量 PDMS 改性的 SPUE 材料, 在经过 2000 h 紫外光老化后涂层的 WCA、WSA 和冰附着强度均保持稳定, 为其在户外紫外光强烈环境下的应用奠定了基础。

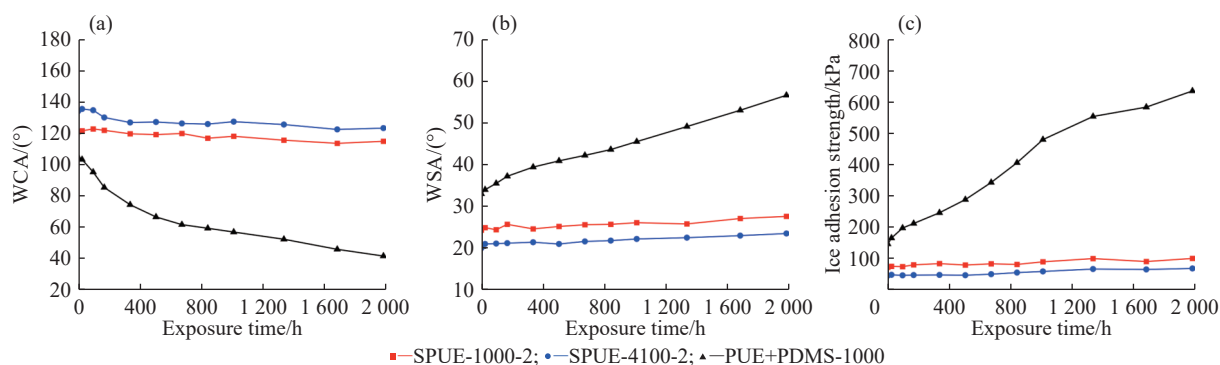


图 7 SPUE 样品在紫外光老化条件下的 (a) WCA, (b) WSA 及 (c) 冰附着强度

Fig. 7 (a) WCA, (b) WSA and (c) ice adhesion strength of SPUE samples under UV aging conditions

2.5 SPUE 应用于风电叶片保护的力学性能和耐雨蚀性能

要将 SPUE 应用到风电叶片表面的防护涂层中, 其机械拉伸性能至关重要。这是因为风电叶片的主体材料通常为玻璃纤维增强环氧树脂的复合材料, 质量轻, 强度高, 还具备较高的柔韧性, 以应对高速运行过程中因长期循环交变应力造成的疲劳损伤^[21]。从图 8 可以看出, 随着 HTPDMS 数均分子量以及预聚程度的提升, SPUE 材料的延伸率增加, 断裂强度降低。这主要是由于 PDMS 链段在 SPUE 分子结构中作为柔性的软段,

其占比越大, 材料柔韧性越好。以防冰性能最佳的 SPUE-4100-2 为例, 其延伸率为 520%, 断裂强度为 11.7 MPa, 可应用于风电叶片保护材料。

风力发电机叶片的前缘部位在高速运转时极易被雨水腐蚀, 不仅会造成翼型升阻比的降低, 从而降低发电效率, 而且严重影响风力发电机叶片的使用寿命^[22]。雨蚀测试通常是研究材料耐雨水侵蚀的最有效方式, 测试模拟雨滴撞击在高速运转的风电叶片表面, 其最尖端的线速率最高可达 160 m/s。要将 SPUE 应用到风电叶片的前缘部位, 需要具备优异的耐雨蚀性能才可维持长久的防冰性能。SPUE 材料的耐雨蚀性能测试结果如表 2 所示。

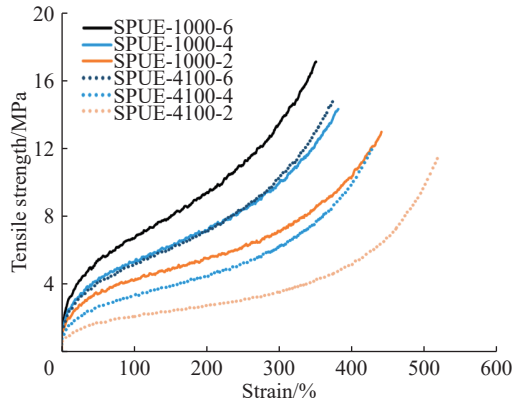


图 8 SPUE 样品的拉伸性能曲线

Fig. 8 Tensile property curves of SPUE samples

表 2 SPUE 材料的耐雨蚀性能

Table 2 Rain erosion resistance of SPUE samples

Sample	Incubation time/min	Breakthrough time/min
PUE	30	60
SPUE-1000-4	60	180
SPUE-1000-2	90	240
SPUE-4100-4	90	210
SPUE-4100-2	150	450

由表 2 可知, 经过 HTPDMS 改性后 SPUE 材料的耐雨蚀性能明显优于未改性的 PUE。当雨滴高速撞击固体材料表面时, 雨滴变形产生的瑞利波^[23]以及材料受冲击产生的压缩波、剪切波等均在材料内产生很大的内应力。随着时间积累, 如果冲击能量无法被材料有效地吸收消散, 就会在材料中不断产生内应力, 继而发展成为宏观可视的缺陷。PDMS 有机硅弹性体中的氢键为可逆非共价键, 且硅氧烷主链具有优异的链运动能力, 因此赋予了 SPUE 材料优异的柔韧性, HTPDMS 的数均分子量和占比越高, 其耐雨蚀性能越好。SPUE-4100-2 可以达到初始点蚀时间 150 min, 击穿破坏时间 450 min, 远远优于未改性的 PUE, 使其具备了应用于风电叶片前缘部位保护的能力。

3 结 论

(1) 以 HTPDMS、HDI 和 PAE 为原料, 通过两步法合成 PDMS 改性的天冬聚脲基弹性体材料。

(2) 合成的 SPUE-4100-2 材料具有优异的防冰性能和耐久性能, 其接触角、滚动角、冰附着强度分别达到 133°、19°和 47 kPa, 并且在 1000 次 Taber 磨耗和 2000 h 的紫外光老化后仍然保持了良好的性能。

(3) SPUE-4100-2 还具备良好的拉伸力学性能和耐雨蚀性能, 具备在风电叶片保护领域的应用前景。

参考文献:

- [1] BARTELS-RAUSCH T. Ten things we need to know about ice and snow [J]. *Nature*, 2013, 494: 27-29.
- [2] WANG F, ZHUO Y Z, HE Z, XIAO S, HE J, ZHANG Z. Dynamic anti-icing surfaces (DAIS) [J]. *Advanced Science*, 2021, 8(21): 2101163.
- [3] ZHAO Z, CHEN H, LIU X, LIU H, ZHANG D. Development of high-efficient synthetic electric heating coating for anti-icing/de-icing [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2018, 349: 340-346.
- [4] NAZARI M H, MOUSAVI S Z, POTAPOVA A, MCLINTYRE J, SHI X. Toxicological impacts of roadway deicers on aquatic resources and human health: A review [J]. *Water Environment Research*, 2021, 93(10): 1855-1881.
- [5] 江雷. 从自然到仿生的超疏水纳米界面材料 [J]. *科技导报*, 2005, 23(2): 4-8.
JIANG L. Super-hydrophobic nanoscale interface materials: From natural to artificial [J]. *Science & Technology Review*, 2005,

- 23(2): 4-8.
- [6] WANG L, GONG Q, ZHAN S, JIANG L, ZHENG Y. Robust anti-icing performance of a flexible superhydrophobic surface [J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(35): 7729-7735.
- [7] LIU Y, MOEVIUS L, XU X, QIAN T, YEOMANS J M, WANG Z. Pancake bouncing on superhydrophobic surfaces [J]. *Nature Physics*, 2014, 10(7): 515-519.
- [8] LI K, ZENG X, LI H, LAI X. A study on the fabrication of superhydrophobic iron surfaces by chemical etching and galvanic replacement methods and their anti-icing properties [J]. *Applied Surface Science*, 2015, 346: 458-463.
- [9] 胡琴, 杨航, 蒋兴良, 舒立春. 覆冰损伤后天然超疏水表面湿润性恢复机理研究 [J]. *表面技术*, 2023, 52(9): 306-312.
HU Q, YANG H, JIANG X L, SHU L C. Wettability recovery mechanism of natural superhydrophobic surface after icing damage [J]. *Surface Technology*, 2023, 52(9): 306-312.
- [10] DHYANI A, CHOI W, GOLOVIN K, TUTEJA A. Surface design strategies for mitigating ice and snow accretion [J]. *Matter*, 2022, 5(5): 1423-1454.
- [11] LIU Y, MA L, WANG W, KOTA A K, HU H. An experimental study on soft PDMS materials for aircraft icing mitigation [J]. *Applied Surface Science*, 2018, 447: 599-609.
- [12] LI H, XU F, WANG J, ZHANG J, WANG H, LI Y, SUN J. Self-healing fluorinated poly (urethane urea) for mechanically and environmentally stable, high performance, and versatile fully self-healing triboelectric nanogenerators [J]. *Nano Energy*, 2023, 108: 108243.
- [13] LI Z, ZHU Y, NIU W, YANG X, JIANG Z, LU Z, LIU X, SUN J. Healable and recyclable elastomers with record-high mechanical robustness, unprecedented crack tolerance, and superhigh elastic restorability [J]. *Advanced Materials*, 2021, 33(7): 2101498.
- [14] LIU Q, LEI Y, ZENG Q, LI C, SUN G, YOU B, REN W. Hydrogenated castor oil modified graphene oxide as self-thixotropic nanofiller in high solid polyaspartic coatings for enhanced anti-corrosion performance [J]. *Progress in Organic Coatings*, 2022, 167: 106836.
- [15] LAMBLEY H, SCHUTZIUS T M, POULIKAKOS D. Superhydrophobic surfaces for extreme environmental conditions [J]. *Proceedings of the National Academy of Science*, 2020, 117(14): 27188-27194.
- [16] WANG F, PI J, SONG F, FENG R, XU C, WANG X, WANG Y. A superhydrophobic coating to create multi-functional materials with mechanical/chemical/physical robustness [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 328: 122539.
- [17] TIAN Z, WANG L, ZHU D, CHEN C, ZHAO H, PENG R, ZHANG H, FAN P, ZHONG M. Passive anti-icing performances of the same superhydrophobic surfaces under static freezing, dynamic supercooled-droplet impinging, and icing wind tunnel tests [J]. *ACS Applied Material Interfaces*, 2023, 15(4): 6013-6024.
- [18] YEONG Y H, STEELE A, LOTH E, BAYER I, COMBARIEU G D, LAKEMAN C. Temperature and humidity effects on superhydrophobicity of nanocomposite coatings [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(5): 053112.
- [19] WEI J, LI B, TIAN N, ZHANG J, LIANG W, ZHANG J. Scalable robust superamphiphobic coatings enabled by self-similar structure, protective micro-skeleton, and adhesive for practical anti-icing of high-voltage transmission tower [J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(43): 2206014.
- [20] ZHANG H, BU X, LI W, CUI M, JI X, TAO F, GAI L, JIANG H, LIU L, WANG Z. A skin-inspired design integrating mechano-chemical-thermal robustness into superhydrophobic coatings [J]. *Advanced Materials*, 2022, 34(31): 2203792.
- [21] 柏至伟, 张治斌, 张雅娟, 汪济奎. 基于配位键交联的自修复弹性体的合成及表征 [J]. *功能高分子学报*, 2020, 33(2): 180-186.
BAI Z W, ZHANG Z B, ZHANG Y J, WANG J K. Synthesis and characterization of self-healing elastomers based on coordination bonds [J]. *Journal of Functional Polymers*, 2020, 33(2): 180-186.
- [22] 冯学斌, 凡盛, 詹佳普, 胡杰桦, 梁鹏程, 戴龙侠. 前缘凹坑及涡流发生器对风力机翼型气动性能影响 [J]. *机械设计与研究*, 2023, 39(4): 247-256.
FENG X B, FAN S, ZHAN J P, HU J H, LIANG P C, DAI L X. Study of leading edge pit and vortex generator on aerodynamic performance of airfoil [J]. *Machine Design & Research*, 2023, 39(4): 247-256.
- [23] BECH J I, JOHANSEN N F, MADSEN M B, HANNESDÓTTIR Á, HASAGER C B. Experimental study on the effect of drop size in rain erosion test and on lifetime prediction of wind turbine blades [J]. *Renewable Energy*, 2022, 197: 776-789.

(责任编辑: 刘亚萍)