

聚酰亚胺薄膜表面改性处理方法研究

田晓娟¹, 王丹¹, 李中华², 黄俊晓¹, 高原¹

(1.烟台大学 化学化工学院, 山东 烟台 264005;

2.兰州空间技术物理研究所 真空技术与物理国防科技重点实验室, 兰州 730000)

摘要: **目的** 利用聚酰亚胺 (PI) 可溶解于碱性溶液的特性, 探究碱溶液改性处理 PI 基材表面的实验方法。研究 $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 、NaOH 和 KOH 等碱溶液的浓度、温度、时间和处理条件的不同与 PI 表面改性效果之间的关系, 确定最佳改性处理方法。**方法** 用不同浓度的 $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 、NaOH 和 KOH 溶液在室温或水热条件下处理 PI 基材。用正交试验确定水热条件的最佳碱浓度、温度和处理时间。样品处理前后的接触角变化用接触角测量仪测定, 透光率用紫外可见分光光度计表征, 拉伸强度和断裂伸长率用智能电子拉力机测定。**结果** 实验得出的最佳表面处理条件为: 25 μm 厚度的 PI 基材采用 1.0 mol/L $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 溶液, 室温下处理 30 min; 50 μm 厚度的 PI 基材采用 0.05 mol/L NaOH 溶液, 水热温度 120 $^{\circ}\text{C}$, 时间 90 min。**结论** 对于厚度为 25 μm 的 PI 基材, 1.0 mol/L $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 溶液处理后, 表面接触角降低至 45 $^{\circ}$, 说明 $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 溶液可有效提高较薄 PI 基材的表面亲水性。KOH 处理后的 PI 基材亲水性显著提高, 但碱液浓度不易控制。采用 NaOH 水热表面改性方法, 能较好地改善 PI 基材的表面亲水性, 从而提高基材与无机涂层之间的界面粘附性。

关键词: 聚酰亚胺; 碱处理; 表面改性; 亲水性

中图分类号: TQ316.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)03-0108-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.03.018

Surface Modification Treatment of Polyimide Film

TIAN Xiao-juan¹, WANG Dan¹, LI Zhong-hua², HUANG Jun-xiao¹, GAO Yuan¹

(1.School of Chemistry and Chemical Engineering, Yantai University, Yantai 264005, China; 2.National Key Lab of Science and Technology on Vacuum Technology & Physics, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China)

ABSTRACT: The work aims to explore experimental method of modifying surface of polyimide (PI) substrate with alkali solution based upon the characteristic of polyimide being dissolved in alkaline solution. Relationship between concentration, temperature, time and treatment conditions of $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, NaOH and KOH solutions and modification effect of PI surface was studied to determine the optimal modification method. Polyimide substrates were treated with different concentration of $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, NaOH and KOH solutions at room temperature or under hydrothermal conditions. Orthogonal experiments were performed to determine the optimal alkali concentration, temperature and treatment time for hydrothermal conditions. Change of contact angle before and after sample treatment was measured with contact angle meter, light transmittance was characterized with UV-visible spectrophotometer, and tensile strength and elongation at break were measured with smart electronic tensile tester. The best sur-

收稿日期: 2017-11-19; 修订日期: 2017-12-04

Received: 2017-11-19; Revised: 2017-12-04

基金项目: 国家自然科学基金 (51573155)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51573155)

作者简介: 田晓娟 (1992—), 女, 硕士研究生, 研究方向为材料改性与涂层。

Biography: TIAN Xiao-juan (1992—), Female, Master, Research focus: material modification and coating.

通讯作者: 高原 (1967—), 男, 博士, 教授, 主要从事复合材料的研究。

Corresponding author: GAO Yuan (1967—), Male, Doctor, Professor, Research focus: composite materials.

face treatment conditions acquired by the experiments were: 25 μm thick PI substrates, 1.0 mol/L $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ solution, room temperature, for 30 minutes; 50 μm thick PI substrates, 0.05 mol/L NaOH, 120 $^\circ\text{C}$ hydrothermal temperature, for 90 minutes. For the 25 μm thick PI substrates, surface contact angle decreases to 45° after treatment with 1.0 mol/L $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ solution, indicating that $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ solution can effectively improve surface hydrophilicity of thin PI substrates. The hydrophilicity of KOH treated polyimide substrates increases significantly, but alkali concentration is not easy to control. NaOH hydrothermal surface modification method can better improve surface hydrophilicity of polyimide substrates, so as to improve interfacial adhesion between the substrate and the inorganic coating.

KEY WORDS: polyimide; alkali treatment; surface modification; hydrophilicity

聚酰亚胺 (Polyimide, PI) 具有突出的热稳定性、优异的耐辐射性能和介电性能, 被广泛用于卫星等各类航空航天器上, 是航天器的重要热控材料之一^[1]。但在低地球轨道环境中, 原子氧 (AO) 侵蚀、紫外线和带电粒子辐射等因素, 会对 PI 造成不同程度的危害^[2-4], 导致材料发生化学、电学、热学、光学和机械性能的变化, 从而造成航天器的损坏^[5-8]。大量空间和地面模拟试验都表明, AO 是低地球轨道环境中危害航天器表面材料的最主要因素^[9]。为提高 PI 抵抗原子氧侵蚀的能力, 最常用的防护技术是在其表面制备 SiO_2 或 Al_2O_3 无机涂层^[10-14]。但在疏水性较强的 PI 表面直接涂覆无机氧化物, 由于二者极性相差较大, 易造成涂层开裂、脱落等现象^[15]。

为增强无机涂层与 PI 基体的界面粘附性, 一般多采用硅烷偶联剂表面改性的方法, 效果明显。但硅烷偶联剂与 PI 基材表面很难形成牢固的化学键合。本文利用 PI 可溶于碱溶液并水解形成 $-\text{COO}^-$ 的特性, 采用碱性溶液对 PI 基材表面进行改性, 去除钝化层, 形成极性官能团 $-\text{COO}^-$, 与 SiO_2 溶胶中的硅羟基进行反应, 产生化学键合, 改善 SiO_2 涂层与 PI 基材的界面结合状况。为探讨此方法的最佳制备条件, 本文分别研究了 NaOH、KOH 和氨水等不同碱液、不同浓度以及室温和水热条件下碱液对 PI 基材表面的改性效果, 为制备结合牢固、均匀致密的 SiO_2 涂层提供可借鉴的实验数据和理论分析。

1 实验

1.1 主要实验材料

实验所用聚酰亚胺材料为 Dupont 公司生产的 Kapton HN, 厚度为 25 μm 和 50 μm 。氨水 ($\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, 莱阳经济技术开发区精细化工厂)、无水乙醇 (EtOH, 天津市永大化学试剂有限公司)、氢氧化钠 (NaOH, 天津市红岩化学试剂厂)、氢氧化钾 (KOH, 莱阳市化工股份有限公司)、盐酸 (HCl, 烟台三和化学试剂有限公司) 和正硅酸乙酯 (TEOS, 天津博迪化工股份有限公司) 均为市购。

1.2 样品制备

1.2.1 聚酰亚胺基材预处理

分别用去离子水和无水乙醇依次超声清洗 Kapton 基材 20 min, 然后用大量去离子水冲洗基材三次, 室温下晾干, 备用。

1.2.2 酸碱改性处理

配制浓度为 0.02、0.05、0.10、0.20、0.50、1.0 mol/L 的 NaOH、KOH 和 $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 溶液, 分别在室温 (约 20 $^\circ\text{C}$) 和水热条件下对 Kapton 基材进行表面改性。

室温处理: 将预处理后的 Kapton 基材放入不同浓度的 NaOH、KOH 和 $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 溶液中, 室温处理 1 h 后取出, 放入 0.1 mol/L HCl 溶液中漂洗, 再用去离子水清洗。

水热处理^[16]: 将预处理后的 Kapton 基材分别放入装有不同浓度 NaOH 溶液的水热釜中, 置烘箱中 120 $^\circ\text{C}$ 处理 1 h, 取出后放入 0.1 mol/L HCl 溶液漂洗, 再用去离子水清洗。

通过正交试验确定水热条件下的最佳碱浓度、温度和处理时间。

1.2.3 涂层制备

量取 45 mL 乙醇置于烧杯中, 加入 5 mL 的正硅酸乙酯 (TEOS), 室温下充分搅拌, 混合均匀, 标记为溶液 A。另量取 45 mL 无水乙醇, 加入 2 mL 去离子水和 0.1 mL 盐酸, 混合均匀, 标记为溶液 B。将溶液 B 缓慢滴加到溶液 A 中, 室温搅拌 1 h, 70 $^\circ\text{C}$ 陈化 6 h, 得到 SiO_2 溶胶。用提拉镀膜的方法在 Kapton 基材表面制备 SiO_2 涂层。

1.3 性能测试

采用 TU-1901 型双光束 UV-Vis 分光光度计 (北京普析通用仪器有限公司) 表征样品的透光率; 用 JC2000D1 接触角测量仪 (上海中晨数字技术设备有限公司) 测定表面处理后的 Kapton 基材的水接触角; 用 MED-01 智能电子拉力机 (济南兰光机电技术有限公司) 测定碱处理前后的 Kapton 基材的抗拉强度和

断裂伸长率。

本文所有实验中, 没有特殊强调, 所使用的 Kapton 基材均为厚度 50 μm 的 Kapton HN 薄膜。

2 结果与讨论

2.1 碱类型的选择

采用碱溶液对 50 μm 厚的 Kapton 基材进行表面改性处理, 目的是除去表面钝化层, 提高 Kapton 表面润湿性, 从而改善其与涂层界面的粘附效果。原始 Kapton 基材、室温下去离子水浸泡 24 h 的空白样和室温下用不同浓度 NaOH 和 KOH 溶液处理 1 h 的 Kapton 基材的表面状态如图 1 所示。

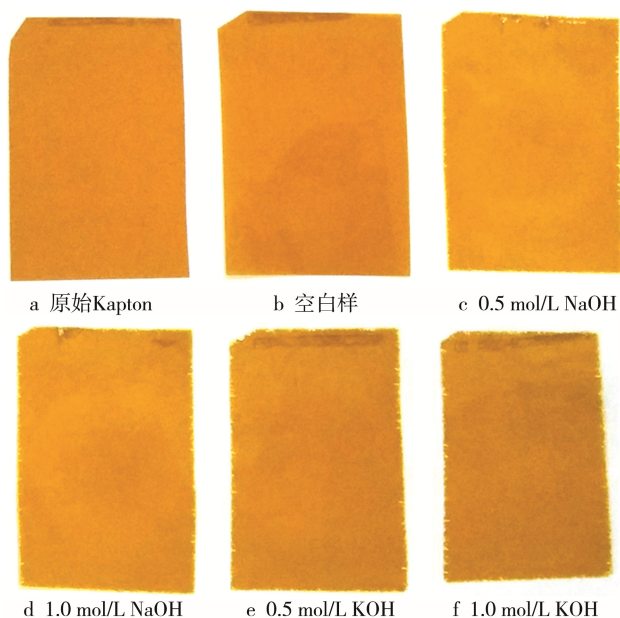


图 1 原始 Kapton 基材和经碱溶液室温处理的 Kapton 基材
Fig.1 Original Kapton substrate and Kapton substrate treated by aqueous alkali solution at room temperature

从图 1 可以看出, 当 NaOH 和 KOH 溶液浓度为 0.5 mol/L 和 1.0 mol/L 时, Kapton 边缘处会呈现轻微

锯齿状, 且同浓度下经 KOH 处理后的样品锯齿状比 NaOH 处理的样品更明显, 说明高浓度的碱溶液已对 Kapton 基材造成过度刻蚀, 并且 KOH 的刻蚀程度比 NaOH 高。因此, 选择强碱溶液对 Kapton 基材进行表面改性时, 其浓度不宜过高。

原始 Kapton 基材、空白样 (浸泡前样品质量为 0.1106 g) 和在室温下采用浓度分别为 0.02、0.05、0.1、0.2、0.5、1.0 mol/L 的 $\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$ 溶液处理后 Kapton 基材的水接触角如图 2 所示。原始 Kapton 基材的水接触角为 76.0° (图 2a), 经去离子水浸泡 24 h 后, 基材的接触角和质量分别变为 75° (图 2b) 和 0.1105 g, 与原始 Kapton 基材相比基本没有变化, 说明碱处理过程中水对基材没有影响。采用不同浓度 $\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$ 溶液处理后的 Kapton 基材, 其外观没有发生变化, 但水接触角反而出现增大趋势, 说明室温下 $\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$ 溶液并不能改善 50 μm 厚 Kapton 基材的亲水性。

图 3 是空白样和室温下采用不同浓度 $\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$ 溶液处理 1 h 后 Kapton 基材的透光率变化曲线。从图 3 可以看出, 处理后的 Kapton 基材透光率与原始 Kapton 相比基本没有变化, 说明室温下 $\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$ 对 50 μm 厚 Kapton 基材的刻蚀程度低, 其亲水性没有得到改善。

将 50 μm 厚 Kapton 基材换成 25 μm 厚的 Kapton, 使用 1.0 mol/L $\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$ 溶液处理, 10~30 min 处理后的 Kapton 基材表面接触角下降为 45° , 说明 $\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$ 溶液可以有效提高 25 μm 厚 Kapton 基材的表面亲水性。 $\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$ 溶液对较厚 (厚度 $\geq 50 \mu\text{m}$) Kapton 基材几乎无改性作用, 但对 25 μm 厚 Kapton 基材产生了较好的改性效果。

室温下采用浓度分别为 0.02、0.05、0.1、0.2 mol/L 的 NaOH 溶液处理后 Kapton 基材的水接触角如图 4 所示, 随 NaOH 溶液浓度的增大, Kapton 基材的水接触角逐渐减小。与图 2 相比, 相同碱浓度下, NaOH 溶液对 Kapton 基材表面的改性程度比 $\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$ 大, 对 Kapton 基材的亲水性有一定的改善。

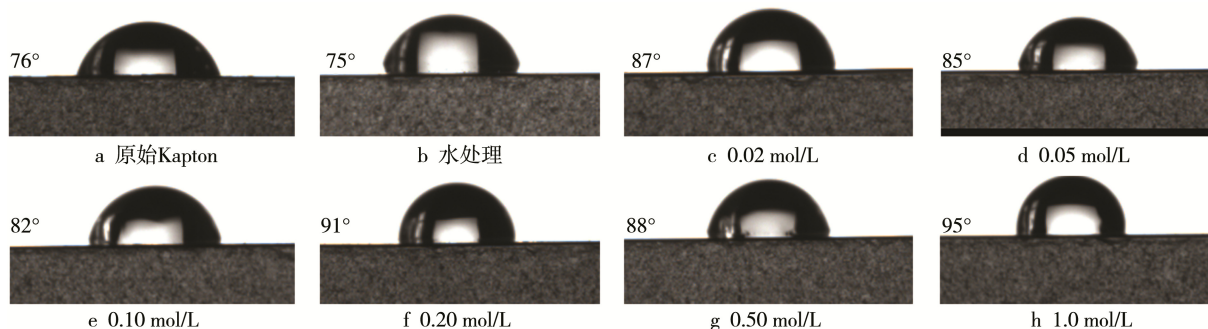


图 2 经不同浓度 $\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$ 溶液室温处理后 Kapton 基材的水接触角

Fig.2 Water contact angle of Kapton substrates treated by different concentration of $\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$ solution: (a) original Kapton, (b) treated by water, (c) 0.02 mol/L, (d) 0.05 mol/L, (e) 0.10 mol/L, (f) 0.20 mol/L, (g) 0.50 mol/L, (h) 1.0 mol/L $\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$ solution

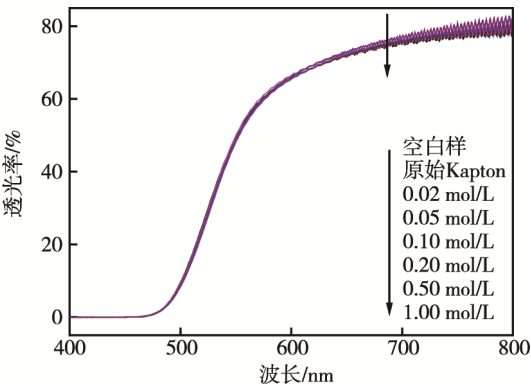


图 3 经不同浓度 $\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$ 溶液室温处理后 Kapton 基材的透光率曲线

Fig.3 Light transmittance curves of Kapton substrates treated by different concentration of $\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$ solution at room temperature

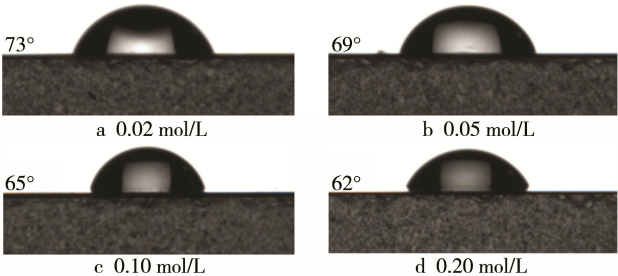


图 4 经不同浓度 NaOH 溶液室温处理后 Kapton 基材的水接触角

Fig.4 Water contact angle of Kapton substrates treated by different concentration of NaOH solution at room temperature:(a) 0.02 mol/L, (b) 0.05 mol/L, (c) 0.10 mol/L, (d) 0.20 mol/L NaOH solution

图 5 是在室温条件下采用不同浓度 NaOH 溶液处理 1 h 后 Kapton 基材的透光率变化曲线。从图中可以看出，随着 NaOH 浓度的增大，Kapton 基材的透光率有小幅提高。

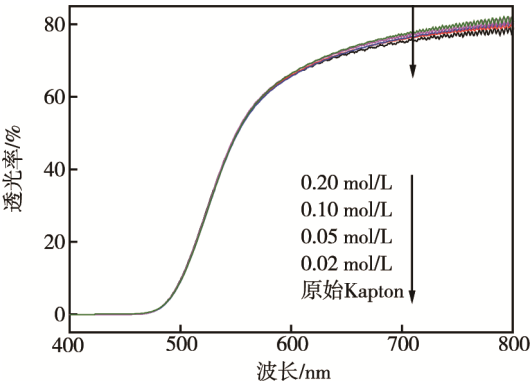


图 5 经不同浓度 NaOH 溶液室温处理后 Kapton 基材的透光率曲线

Fig.5 Light transmittance curves of Kapton substrates treated by different concentration of NaOH solution at room temperature

图 6 是室温下采用浓度分别为 0.02、0.05、0.1、0.2 mol/L 的 KOH 溶液处理后 Kapton 基材的水接触角。从图中可知，随着碱浓度的增加，基材的水接触角减小，当 KOH 浓度为 0.02 mol/L 时，Kapton 基材的水接触角变为 71° （图 6a），与原始基材（图 2a）相比变化不大，但当 KOH 浓度增至 0.2 mol/L 时，基材的水接触角降低至 17° （图 6d），亲水性得到显著改善。

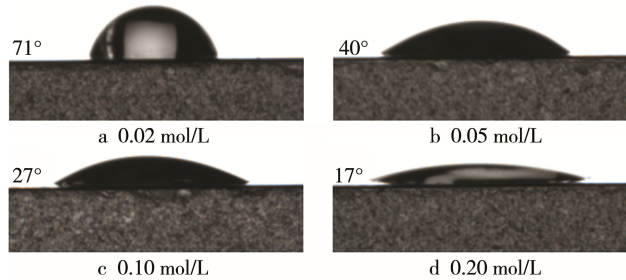


图 6 经不同浓度 KOH 溶液室温处理后 Kapton 基材的水接触角

Fig.6 Water contact angle of Kapton substrates treated by different concentration of KOH solution at room temperature :(a) 0.02 mol/L, (b) 0.05 mol/L, (c) 0.10 mol/L, (d) 0.20 mol/L KOH solution

从图 7 可以看出，随着 KOH 溶液浓度的增大，处理后的 Kapton 基材透光率增加幅度大于相同浓度 NaOH 溶液处理的样品，说明 KOH 溶液去除表面钝化层的能力强，Kapton 基材变薄，材料机械性能受到影响。

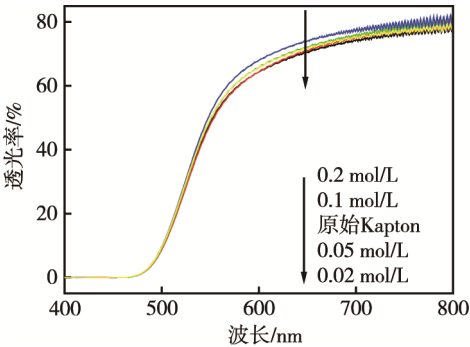


图 7 经不同浓度 KOH 溶液室温处理后 Kapton 基材的透光率曲线

Fig.7 Light transmittance curves of Kapton substrates treated by different concentration of KOH solution at room temperature

2.2 水热改性

图 8 是在 120°C 水热条件下采用不同浓度 NaOH 溶液处理 1 h 后 Kapton 基材的透光率变化曲线。从图中可以看出，在 120°C 水热条件下经不同浓度 NaOH 溶液处理的 Kapton 基材透光率呈现下降趋势。0.02 mol/L NaOH 溶液处理后的基材透光率与原始 Kapton 相比基本没有变化，可能是因为 NaOH 的浓度太低，对 Kapton 基材表面的刻蚀不足。增大 NaOH

浓度, Kapton 基材的透光率在 550~800 nm 范围内普遍下降, 当 NaOH 溶液浓度为 0.5 mol/L 和 1.0 mol/L 时, Kapton 基材表面已遭到严重腐蚀, 基材变薄且边缘呈锯齿状样貌 (如图 1)。这表明过高浓度的 NaOH 溶液会严重刻蚀 Kapton 基材表面, 并导致 Kapton 的光学性能和机械性能下降。

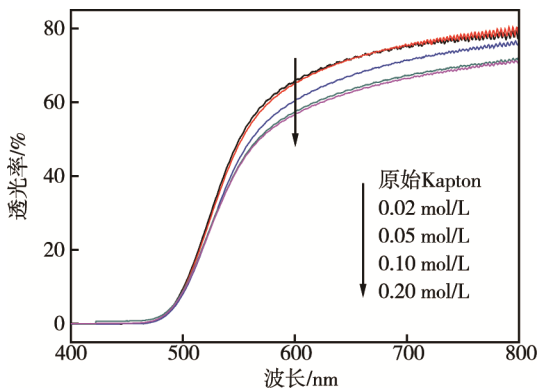


图 8 经不同浓度 NaOH 溶液水热处理后 Kapton 基材的透光率曲线
Fig.8 Light transmittance curves of Kapton substrates hydrothermally treated by different concentration of NaOH solution

图 9 显示了在 120 °C 水热条件下采用不同浓度 NaOH 溶液处理 1 h 后 Kapton 基材的水接触角。原始 Kapton 基材的接触角为 76° (图 2a), 经过 0.02 mol/L NaOH 溶液水热处理后, Kapton 基材的水接触角变为 65° (图 9a), 亲水性略有增加, 但是效果不明显。增大 NaOH 浓度至 0.05 mol/L 和 0.10 mol/L 时, Kapton 基材的接触角分别降至 52° (图 9b) 和 48° (图 9c), 继续增大 NaOH 浓度至 0.20 mol/L, Kapton 基材的水接触角变化不大。对比室温 (图 4)、水热 (图 9) 条件下的水接触角可知, NaOH 浓度相同时, 水热条件下 Kapton 基材的改性效果优于室温。

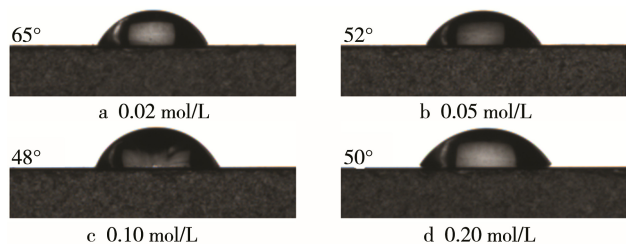


图 9 经不同浓度 NaOH 溶液水热处理后 Kapton 基材的水接触角
Fig.9 Water contact angle of Kapton substrates hydrothermally treated by different concentration of NaOH solution(a) 0.02 mol/L, (b) 0.05 mol/L, (c) 0.10 mol/L, (d) 0.20 mol/L NaOH solution

表 1、表 2 显示了经水热和室温处理的 Kapton 基材的抗拉强度和断裂伸长率。原始 Kapton 基材经低浓度 (≤ 0.05 mL/L) NaOH 水热和室温处理后, 基材的抗拉强度略有降低, 但降幅不大, 说明基材的机械性能仍能保持良好。

表 1 经室温 (20 °C) 处理后 Kapton 的抗拉强度和断裂伸长率

Tab.1 Tensile strength and elongation at break of Kapton substrates treated by NaOH solution at room temperature

NaOH/(mol·L ⁻¹)	原始	0.02	0.05	0.10	0.20
抗拉强度/MPa	224.66	224.41	218.72	199.56	196.72
断裂伸长率/%	75.4	75.2	73.0	55.9	51.5

注: 拉伸速度为 10 mm/min

表 2 经水热处理 (120 °C) 后 Kapton 的抗拉强度和断裂伸长率

Tab.2 Tensile strength and elongation at break of Kapton substrates hydro-thermally treated by NaOH solution

NaOH/(mol·L ⁻¹)	原始	0.02	0.05	0.10	0.20
抗拉强度/MPa	224.66	221.07	211.36	203.96	183.39
断裂伸长率/%	75.4	74.2	72.9	63.3	48.9

注: 拉伸速度为 10 mm/min

2.3 水热条件下最佳碱浓度、温度和水热时间的确定

接触角是聚酰亚胺薄膜表面亲水性好坏的主要判据, 在确定其改性条件时, 应确定正交试验需要考察的因素和水平。本文考察了三个因素, 分别为碱浓度、水热温度和水热时间。每个因素取三个水平, 采用 $L_9(3^3)$ 正交表来安排试验 (见表 3)。正交试验结果如表 4 所示。

表 4 中的 K_1 、 K_2 、 K_3 分别表示在各因素各水平下接触角的平均值。用同一因素各水平下接触角的极差 R (极差=平均接触角的最大值-平均接触角的最小值) 来反映各因素的水平变动对试验结果 (接触角) 影响的大小。极差越大表示该因素的水平变动对试验结果的影响越大。由表 4 得到因素的主次顺序依次为碱浓度 (因素 A)、水热时间 (因素 B)、水热温度 (因素 C)。由此得到各因素的最佳搭配为 $A_1B_3C_2$, 即水热条件下最佳碱浓度为 0.05 mol/L, 时间为 90 min, 温度为 120 °C。

为进一步确定反应条件对聚酰亚胺表面接触角的影响, 选用上述得到的最佳水热条件进行试验, 结果得到基材的接触角为 34°, 小于正交试验结果中的最小值。图 10 是正交试验得到的最佳条件下的水接触角, 可知经过该条件处理后的基材的水接触角显著降低, 说明 Kapton 的亲水性得到显著改善。

表 3 正交试验设计表
Tab.3 Orthogonal test design

因素	NaOH (A) / (mol·L ⁻¹)	Reaction time (B) /min	Reaction temperature (C) /°C
Level 1	0.05	30	90
Level 2	0.1	60	120
Level 3	0.2	90	150

表 4 正交试验结果
Tab.4 Orthogonal test results

序号	NaOH(A)/ (mol·L ⁻¹)	Reaction time (B)/min	Reaction temp- Erature(C)/°C	Contact angle/(°)
1	0.05	30	90	67
2	0.05	60	120	52
3	0.05	90	150	61
4	0.1	30	120	79
5	0.1	60	150	82
6	0.1	90	90	71
7	0.2	30	150	69
8	0.2	60	90	71
9	0.2	90	120	70
K ₁	60	71.7	69.7	
K ₂	77.3	68.3	67	
K ₃	70	67.3	70.6	
R	17.3	4.4	3.6	



图 10 最佳水热条件处理后 Kapton 基材的水接触角
Fig.10 Water contact angle of Kapton substrate treated under optimal hydrothermal conditions

2.4 形貌分析

图 11a 是水热条件下 0.05 mol/L NaOH 处理后的

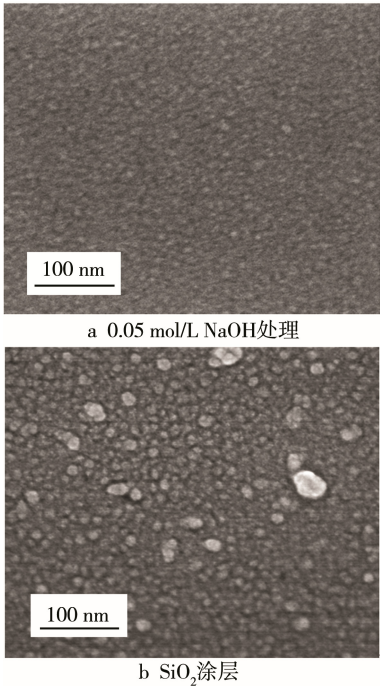


图 11 Kapton 基材表面形貌分析
Fig.11 Surface morphology analysis of Kapton substrates: (a) treated by 0.05 mol/L NaOH and (b) SiO₂ coating

Kapton 基材表面，低浓度碱液刻蚀后，表面出现 10 nm 左右的凸凹点，原有的钝化层被去除。从图 11b 可以看出，SiO₂ 溶胶在凸凹点表面形成 20~30 nm(少量 40 nm 左右)的颗粒堆积致密层，说明经过 NaOH 处理后的 Kapton 表面与 SiO₂ 涂层极性相近，界面粘附性增强。

3 结论

1) 用 1.0 mol/L NH₃·H₂O 溶液处理厚度为 25 μm 的 PI 基材后,其表面接触角降低至 45°,说明 NH₃·H₂O 溶液可有效提高较薄 PI 基材的表面亲水性。

2) 室温下采用 NaOH 和 KOH 碱处理后的 PI 基材的亲水性得到提高, KOH 的改性效果更明显,但处理时碱浓度不易控制,易对材料的机械性能产生破坏作用。

3) 采用 NaOH 水热表面改性方法,能较好地改善 PI 基材的表面亲水性,从而提高基材与无机涂层之间的界面粘附性。

4) 通过正交试验得出最佳水热条件为: NaOH 浓度 0.05 mol/L, 水热温度 120 °C, 时间 90 min。用该方法对 PI 表面进行改性,能很好地改善 PI 基材的亲水性。

参考文献:

[1] XIAO F, WANG K, ZHAN M. Atomic Oxygen Erosion Resistance of Polyimide/ZrO₂ Hybrid Films[J]. Applied Surface Science, 2010, 256(24): 7384-7388.

[2] ATAR N, GROSSMAN E, GOUZMAN I, et al. Atomic-oxygen-durable and Electrically-conductive CNT-POSS-Polyimide Flexible Films for Space Applications [J]. Acs Applied Materials & Interfaces, 2015, 7(22): 12047.

[3] SUI X, GAO L, YIN P. Shielding Kevlar Fibers from Atomic Oxygen Erosion via Layer-by-Layer Assembly of Nanocomposites[J]. Polymer Degradation & Stability, 2014, 110: 23-26.

[4] HOOSHANGI Z, FEGHHI S, SAEEDZADED R. The Effects of Low Earth Orbit Atomic Oxygen on the Properties of Polytetra Fluoroethylene[J]. Acta Astronaut ICA, 2016, 119: 233-240.

[5] XIE Y, GAO Y, QIN X, et al. Preparation and Properties of Atomic Oxygen Protective Films Deposited on Kapton by Solvothermal and Sol-Gel Methods[J]. Surface and Coatings Technology, 2012, 206(21): 4384-4388.

[6] HU L, LI M, XU H, et al. Perhydropolysilazane Derived Silica Coating Protecting Kapton from Atomic Oxygen Attack[J]. Thin Solid Films, 2011, 520(3): 1063-1068.

- [7] HU L, LI M, XU J, et al. Vacuum Ultraviolet/Atomic Oxygen Erosion Resistance of Amorphous $\text{Si}_{0.26}\text{C}_{0.43}\text{N}_{0.31}$ Coating[J]. Journal of Spacecraft and Rocket, 2011, 48(3): 507-512.
- [8] 刘凯, 慕慧峰, 李中华, 等. 空间聚合物基体表面原子氧防护技术研究进展[J]. 表面技术, 2016, 45(1): 20-27.
LIU Kai, MU Hui-feng, LI Zhong-hua, et al. Research Progress of Atomic Oxygen Protection Technology on the Surface of Space Polymers[J]. Surface Technology, 2016, 45(1): 20-27.
- [9] 褚勇. 原子氧对高分子材料的侵蚀效应分析及其防护研究[D]. 烟台: 烟台大学, 2013.
CHU Yong. Atomic Oxygen Erosion Effect Analysis and Protective Research on Polymer Materials [D]. Yantai: Yantai University, 2013.
- [10] 赵琳, 李中华, 郑阔海. 原子氧防护涂层技术研究[J]. 真空与低温, 2011, 17(4): 87-192.
ZHAO Lin, LI Zhong-hua, ZHENG Kuo-hai. The Study on Atomic Oxygen Protective Coatings[J]. Vacuum & Cryogenics, 2011, 17(4): 87-192.
- [11] 张宗波, 郎冠卿, 姜海富, 等. 低地球轨道航天器涂层防护技术研究进展[J]. 航天器环境工程, 2016, 33(1): 109-114.
ZHANG Zong-bo, LANG Guan-qing, JIANG Hai-fu, et al. Review of Protection Coating Techniques for LEO Spacecrafts[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2016, 33(1): 109-114.
- [12] HUANG T, HUNG W, ZHOU C, et al. Superhydrophilicity of $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ Thin Films: Synergistic Effect of SiO_2 , and Phase-separation-induced Porous Structure[J]. Surface & Coatings Technology, 2012, 213(2037): 126-132.
- [13] HA T J, PARK H H, KANG E S, et al. Variations in Mechanical and Thermal Properties of Mesoporous Alumina Thin Films Due to Porosity and Ordered Pore Structure[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2010, 345(1): 120-124.
- [14] 多树旺, 李美栓, 尹孝辉, 等. 溶胶-凝胶制备的 Al_2O_3 涂层抗原子氧侵蚀性能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(A02): 735-738.
DUO Shu-wang, LI Mei-shuan, YIN Xiao-hui, et al. Properties of Al_2O_3 Protective Coatings Prepared by Sol-Gel Process in Atomic Oxygen Environment[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(A02): 735-738.
- [15] HUANG Y, LV S, TIAN X, et al. Interface Analysis of Inorganic Films on Polyimide with Atomic Oxygen Exposure[J]. Surface and Coatings Technology, 2013, 216: 121-126.
- [16] SHU M, LI Z, MAN Y, et al. Surface Modification of Poly (4,4'-Oxydiphenylene Pyromellitimide)(Kapt-on) by Alkali Solution and Its Applications to Atomic Oxygen Protective Coating[J]. Corrosion Science, 2016, 112: 418-425.