

· 研究论文 ·

## 多场条件下尼龙6材料力学性能

张承诺 谭雯娟 黄浩\* 杨曙光\*

(东华大学材料科学与工程学院 先进纤维材料全国重点实验室 先进低维材料中心 上海 201620)

**摘要** 研究了尼龙6 (PA6)薄膜和鱼线在多场条件下的力学性能,系统测试了水溶液中盐浓度和温度变化对其力学性能的影响,揭示了PA6材料在盐水溶液中相较于纯水中的力学增强现象.将PA6薄膜和鱼线浸泡于水中,模量和强度相比干态下均有降低.升高水溶液温度,薄膜和鱼线的力学强度进一步降低.当水溶液温度达80 °C时,薄膜力学强度急剧下降,鱼线由于尺寸和结构影响断裂强度没有大幅降低,但力学曲线出现多段屈服现象.加入盐后,PA6薄膜和鱼线均表现出更高的力学强度和韧性.尤其在80 °C盐溶液(1 mol/L NaCl)中,薄膜的强度和韧性得到大幅提高,鱼线力学曲线中多段屈服现象消失.我们提出在盐水溶液中,盐离子通过水合层与水分子结合,限制水的迁移,减弱了水分子对高分子材料的增塑作用.该工作呈现了多种环境参数变化下PA6样品的力学行为,为不同服役环境的应用提供指导.

**关键词** 尼龙6; 薄膜; 鱼线; 多场环境; 力学性能

**引用:** 张承诺, 谭雯娟, 黄浩, 杨曙光. 多场条件下尼龙6材料力学性能. 高分子学报, doi: 10.11777/j.issn1000-3304.2026.26090.

**Citation:** Zhang, C. N.; Tan, W. J.; Huang, H.; Yang, S. G. Mechanical properties of nylon 6 materials under multi-field conditions. *Acta Polymerica Sinica* (in Chinese), doi: 10.11777/j.issn1000-3304.2026.26090.

尼龙6 (PA6)是一种半结晶型聚酰胺,由于尼龙分子结构上排列规则,主链上含有重复酰胺基团,大分子间能形成多重氢键,因此其具有高结晶度、耐磨、耐油、耐腐蚀、耐疲劳等优良性能,在汽车制造业、电子电器工业、机械设备、建筑业、包装行业及其他消费用品等领域都得到了广泛的应用<sup>[1-8]</sup>.

PA6的性能受到多种因素的影响,其中温度是一个重要的环境因素.温度对PA6的影响与时间的影响存在等效性<sup>[9]</sup>. Song等<sup>[10]</sup>在极宽的温度范围(-6~200 °C)和不同应变速率下系统研究了PA6力学行为,发现在低温/高应变率时PA6模量高、屈服强度高、脆性明显,在高温/低应变率时PA6模量下降,屈服强度降低、塑性大,验证

了时间温度等效原理在线性粘弹性区的有效性. Koyanagi等<sup>[11]</sup>提出并验证了一套适用于PA6的非线性黏弹性-黏塑性本构方程,用于准确预测其不同应力、温度和时间下的力学行为.

湿度是除温度外另一种重要的环境参数,湿度也会影响PA6的力学性能. PA6中存在酰胺基团,可与水分子形成氢键,因此PA6易吸水.水分子进入PA6破坏内部分子间氢键,导致玻璃化转变温度( $T_g$ )下降<sup>[12,13]</sup>. Frank等<sup>[14]</sup>通过不同吸水量的低温介电弛豫行为,揭示了水分子在PA6中的3种存在方式:紧密结合水、疏松结合水、簇状水. Zhou等<sup>[15]</sup>在35 °C、不同湿度(15%~85% RH)下对PA6进行频率扫描,研究发现不同湿度下的动态模量可沿频率轴叠加得到松弛主曲线,证明

2026-03-25收稿, 2026-05-26录用, 网络出版.

基金项目: 国家自然科学基金(基金号 52273020).

\* 通信联系人, E-mail: huanghao@dhu.edu.cn; shgyang@dhu.edu.cn

本文附有电子支持信息,与正文一并刊登在本刊网站(www.gfzxb.org).

doi: 10.11777/j.issn1000-3304.2026.26090; CSTR: 32057.14.GFZXB.2026.7636

湿度条件下水分子会加速PA6的分子链松弛但并不会改变PA6的松弛模式。

掺杂盐对PA6本体的结晶行为和力学有一定的影响<sup>[16,17]</sup>。Valenti等<sup>[18]</sup>将PA6与溴化锂或氯化锂在260℃下熔融混合,随着盐含量增加,尼龙6的熔点不断降低。溴化锂和氯化锂有助于PA6结晶形成 $\gamma$ 晶型,而不是更常见的 $\alpha$ 晶型。研究认为,这类盐与PA6中无定形区的酰胺基团之间存在强烈的相互作用,这种作用类似于盐溶液对生物聚合物构象稳定性的影响。Mikhailov等<sup>[19]</sup>在PA6聚合阶段加入金属乙酸盐,可在聚合物中形成成核点,从而生成不同尺寸的球晶。该行为可以改善PA6的冷拉伸性能,并提高强度和弹性。

PA6常被用于船舶扎带、汽车底盘部件、工业机械耐盐耐磨组件等产品,服役场景涉及高温,含水、含盐等环境<sup>[20-24]</sup>。以上的研究分别表明了温度、水、盐分子对PA6材料的影响。然而真实的服役环境是多种因素耦合的情形,且多场因素叠加在一起涉及物质和能量传输,对力学行为产生截然不同的影响。原位测试PA6材料在多场环境变化下的力学行为,对其应用至关重要。

本研究对PA6材料进行了晶型结构表征及不同服役环境下原位力学性能测试。通过X射线衍射(XRD)、示差扫描量热法(DSC)表征了不同PA6材料的晶型结构和熔融行为。通过动态热机械分析(DMA)测试了温度和湿度对薄膜和鱼线动态力学的影响。静态拉伸测试原位研究了PA6薄膜、鱼线在水溶液中不同盐浓度和温度下力学行为的变化。重点揭示了PA6材料在盐与水共同作用下相比于纯水作用下的力学增强行为。该工作展现了多场条件作用下PA6原位的力学性能,为多场景服役应用提供指导。

## 1 实验部分

### 1.1 实验原料

尼龙6(PA6)双向拉伸薄膜,购自佛山佛塑科技集团股份有限公司,同步双向拉伸工艺生产,厚度为17  $\mu\text{m}$  (电子支持信息图S1); PA6鱼线,购自乐诚渔具厂,直径为200  $\mu\text{m}$  (电子支持信息图S1); PA6有光全拉伸丝(FDY),购自广东新会美达锦纶股份有限公司,规格为111 dtex/36 F,直径为18  $\mu\text{m}$ ; 氯化钠(99%),上海阿拉丁生化科技股份有限公司,分析纯(AR)。次氯酸钠(11%~14%),阿法埃沙(中国)化学有限公司,分

析纯(AR)。氯化钙、氯化镁(99%),上海泰坦科技股份有限公司,分析纯(AR)。

### 1.2 PA6样品处理

在干燥环境下:将PA6样品置于真空干燥箱(DZG-6021,上海一恒科学仪器有限公司)中,60℃下干燥24 h,以确保样品中水分完全去除。

在水溶液环境中:将干燥后的PA6样品置于不同温度的去离子水中浸泡24 h,以达到吸水平衡。

在盐水溶液中:将干燥后的PA6样品置于设定温度下的不同盐溶液中平衡24 h,达到吸水,吸盐平衡。

### 1.3 结构与性能表征

#### 1.3.1 X射线衍射表征(XRD)

采用D8 ADVANCE型X射线衍射仪(德国BRUKER公司)对PA6样品晶体结构进行测试,Cu-K $\alpha$ 辐射源,波长 $\lambda=0.154$  nm,扫描步长 $0.02^\circ$ ,扫描范围 $2\theta=15^\circ\sim 30^\circ$ ,测试时需保持样品垂直于X射线平行紧密排列。

#### 1.3.2 示差扫描量热测试(DSC)

DSC分析采用TA Discovery DSC 250,在氮气气氛下测试,流速为50 mL/min。温度以 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 升温速率从室温升至250℃。所有数据分析基于第一次升温曲线,观测样品内部本征的结晶结构。结晶度( $X_c$ )计算公式(1)如下:

$$X_c = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_m^0} \times 100\% \quad (1)$$

其中, $\Delta H_m$ 和 $\Delta H_m^0$ 分别为测试样品与完全结晶样品的熔融焓(J/g),PA6的 $\Delta H_m^0 \approx 230$  J/g<sup>[8,25]</sup>。

#### 1.3.3 动态热机械分析(DMA)

测试前将所有样品置于60℃烘箱中烘干24 h,使样品水分完全去除。DMA测试采用美国TA公司的Q800仪器,配有湿度附件,使用薄膜拉伸夹具进行测试。

湿度扫描:选用DMA Multi-Frequency-Strain模式进行测试。将干燥的样品置于DMA夹具上,设置频率1 Hz,应变0.1%,温度25℃。以2% RH/min升湿速率从0% RH升至90% RH,记录储能模量( $E'$ ),损耗模量( $E''$ )以及损耗正切( $\tan\delta$ )随湿度的变化。

温度扫描:选用DMA Multi-Frequency-Strain模式进行测试,将干燥的样品置于DMA夹具上,频率1 Hz,固定应变0.1%,湿度0% RH。温度范围为25~180℃,升温速率为 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ ,记

录 $E'$ ,  $E''$ 以及 $\tan\delta$ 随温度的变化.

### 1.3.4 力学性能测试

使用万能试验机(UTM2502, Suns)对PA6样品进行原位拉伸测试. 原始样品在干燥空气中直接测试. 对于多场条件下的样品, 使用控温水箱附件将样品浸入水(或盐水)中原位拉伸测试. 拉伸速度为40 mm/min, 夹具间隙为10 mm.

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同PA6材料的晶型结构

PA6是聚酰胺类半结晶聚合物, 根据结晶加工条件的不同, PA6通常呈现2种晶型:  $\alpha$ 和 $\gamma$ 晶型<sup>[26-28]</sup>.  $\alpha$ 晶型为热力学稳定相, 具有单斜结构, 其氢键存在于反平行链中.  $\gamma$ 晶型也存在单斜结构, 但是扭转的链结构允许氢键存在于平行链中. 图1展现了PA6不同样品的XRD图谱. PA6薄膜在20.5°、21.5°和23.5°处出现衍射峰, 分别来自于 $\alpha(200)$ ,  $\gamma(200)$ 和 $\alpha(002/202)$ 晶面衍射. 20.5°和21.5°的峰相对较弱, 说明薄膜内部形成了排列较为紧密的以 $\alpha$ 晶型为主的结构. 这与双向拉伸加工过程有关<sup>[29,30]</sup>. 鱼线在20.5°和23.5°处出现衍射峰, 属于 $\alpha$ 晶型. PA6纤维在21.5°出现单峰, 在23.5°处出现肩峰, 说明在 $\gamma$ 晶型中含有不完善的 $\alpha$ 晶型<sup>[31]</sup>.

### 2.2 不同PA6材料示差扫描量热测量和静态力学测试

图2(a)展示了不同晶型结构下PA6样品的DSC曲线. 实验采取第一次升温曲线作为分析, 可以展示PA6样品的本征行为. 由图可知, PA6薄膜、鱼线、纤维内晶型结构均在200 °C左右开始熔融, 熔融峰温度分别为223、220、222 °C. 根据PA6完全结晶的熔融焓计算可得薄膜、鱼线、纤维的结晶度分别为21%、25%、33%<sup>[32]</sup>. 纤维结晶度最高, 薄膜结晶度最低.

图2(b)展示了干燥的PA6薄膜、鱼线及纤维样品的力学拉伸曲线. PA6薄膜断裂强度为100 MPa, 断裂伸长率为15%. PA6鱼线断裂强度为400 MPa, 断裂伸长率为30%. PA6纤维断裂强度为450 MPa, 断裂伸长率为15%. PA6纤维的断裂强度最高, 薄膜的断裂强度最低. 这些行为与其加工及晶型结构有关. PA6纤维是全拉伸丝, 具有高度取向结构, 且结晶度最高, 呈现 $\gamma$ 晶型, 分子链间排列紧密, 这些特征加强了分子间作用

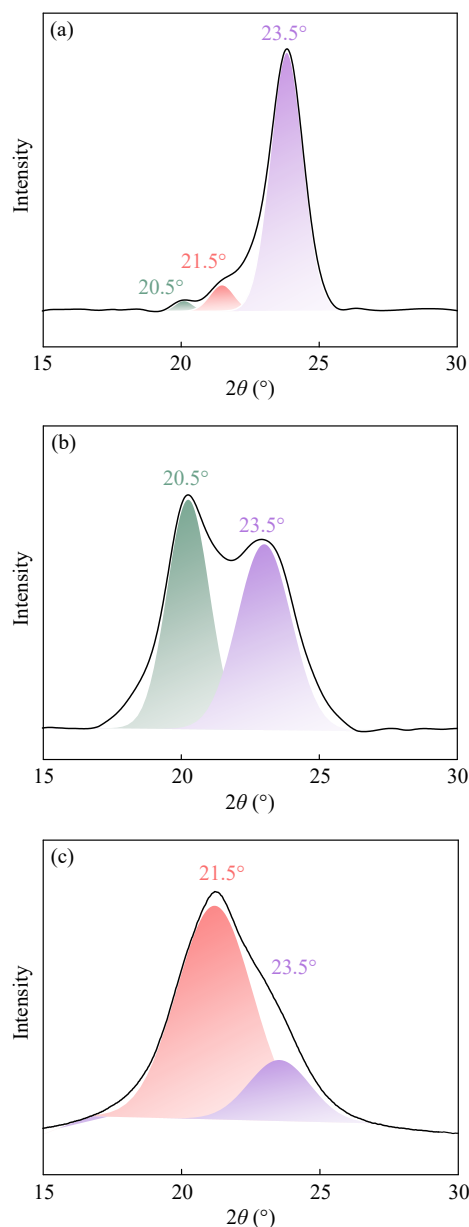


Fig. 1 XRD patterns of PA6 (a) film, (b) fishing line, (c) fiber.

强度, 因为其断裂强度最高. 薄膜为双向拉伸膜, 无定形区分子链运动能力下降, 导致断裂伸长率较低; 同时其结晶度最低, 因此力学强度最弱<sup>[33]</sup>.

### 2.3 温度对PA6材料力学性能影响

温度能够加快聚合物链松弛, 促进材料加工. 近期一些研究表明湿度对聚合物也具有类似的作用<sup>[34-36]</sup>. 温度和湿度是耦合的环境因素, 利用DMA的温度扫描和湿度扫描可以分别测试温度和湿度单独对材料力学行为的影响. PA6纤维单丝直径18  $\mu\text{m}$ , 受到仪器灵敏度限制无法对其进行测试. 因此后续实验主要针对PA6薄膜和鱼线展开.

图3(a)和3(b)分别是PA6薄膜和鱼线的DMA温度扫描. 由图可知, 当温度从25 °C升高至180 °C, 薄膜的 $E'$ 在不断下降, 从1400 MPa下降

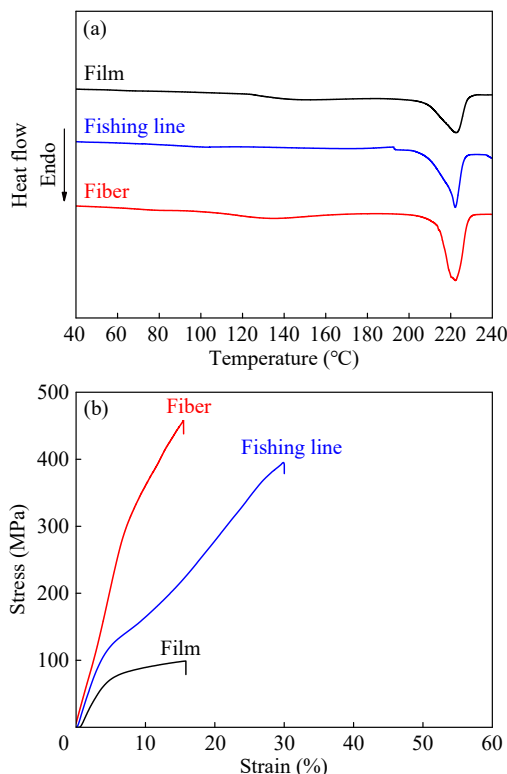


Fig. 2 (a) DSC first heating curves of PA6 samples; (b) Stress-strain curves of PA6 samples at dry state.

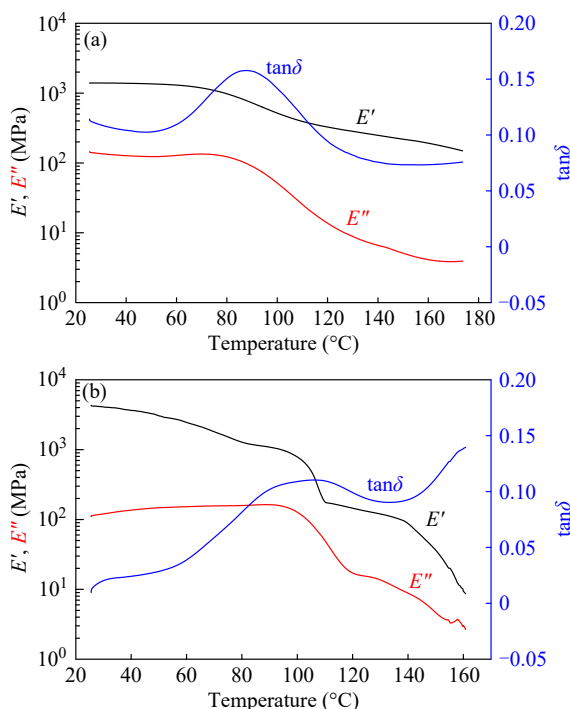


Fig. 3 DMA temperature sweep curves of (a) PA6 film, (b) PA6 fishing line.

至140 MPa.  $\tan\delta$ 在85 °C处出现极大值峰, 表明薄膜在此温度下发生了玻璃化松弛转变. 对于PA6鱼线, 温度在25~80 °C之间,  $E'$ 均在 $1 \times 10^3$  MPa以上. 温度超过100 °C后 $E'$ 出现数量级下降, 并在110 °C左右出现模量平台(约 $10^2$  MPa), 温度超过140 °C后继续下降. 在180 °C时 $E'$ 下降至8 MPa. 通过DMA测得鱼线的 $T_g$ 为100 °C. 薄膜和鱼线经过玻璃化松弛转变之后,  $E'$ 均没有出现骤降, 且 $\tan\delta$ 一直小于0.2, 处于较低数值, 表明分子链没有大尺度运动. 这是由于温度还没有到达PA6熔融温度, 内部结晶结构限制了分子链进一步松弛.

## 2.4 湿度对PA6材料力学性能影响

图4展示了薄膜和鱼线在不同湿度下的动态力学行为. 通过图4(a)湿度扫描可以看出, 薄膜 $E'$ 随湿度增加降低,  $E''$ 在湿度低于60% RH之前随着湿度的增加而增加, 表明小尺度的链段运动, 内摩擦增大. 在湿度高于60% RH,  $E''$ 降低, 这是由于水分子的润滑作用降低了链段间内摩擦<sup>[37]</sup>.

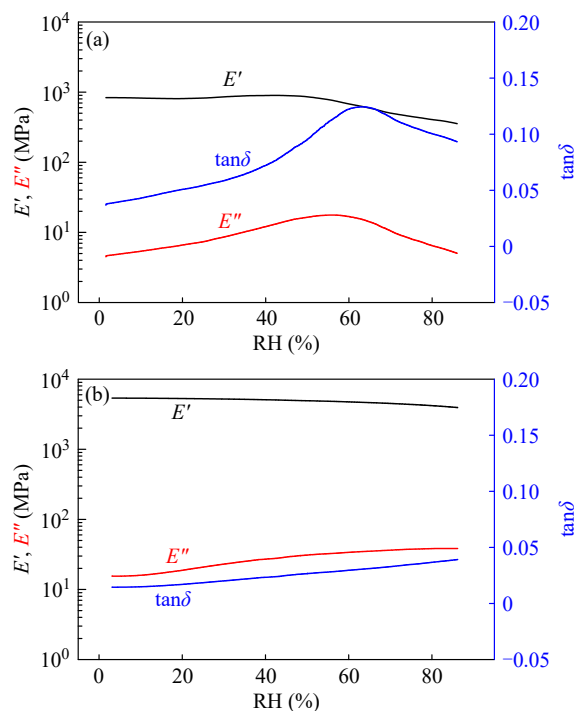


Fig. 4 DMA humidity sweep curves of (a) PA6 film, (b) PA6 fishing line.

从图4(b)鱼线的湿度扫描曲线可知, 鱼线 $E'$ 随湿度变化一直保持在 $1 \times 10^3$  MPa以上,  $\tan\delta$ 小于0.04, 没有出现次级松弛转变, 表明分子链运



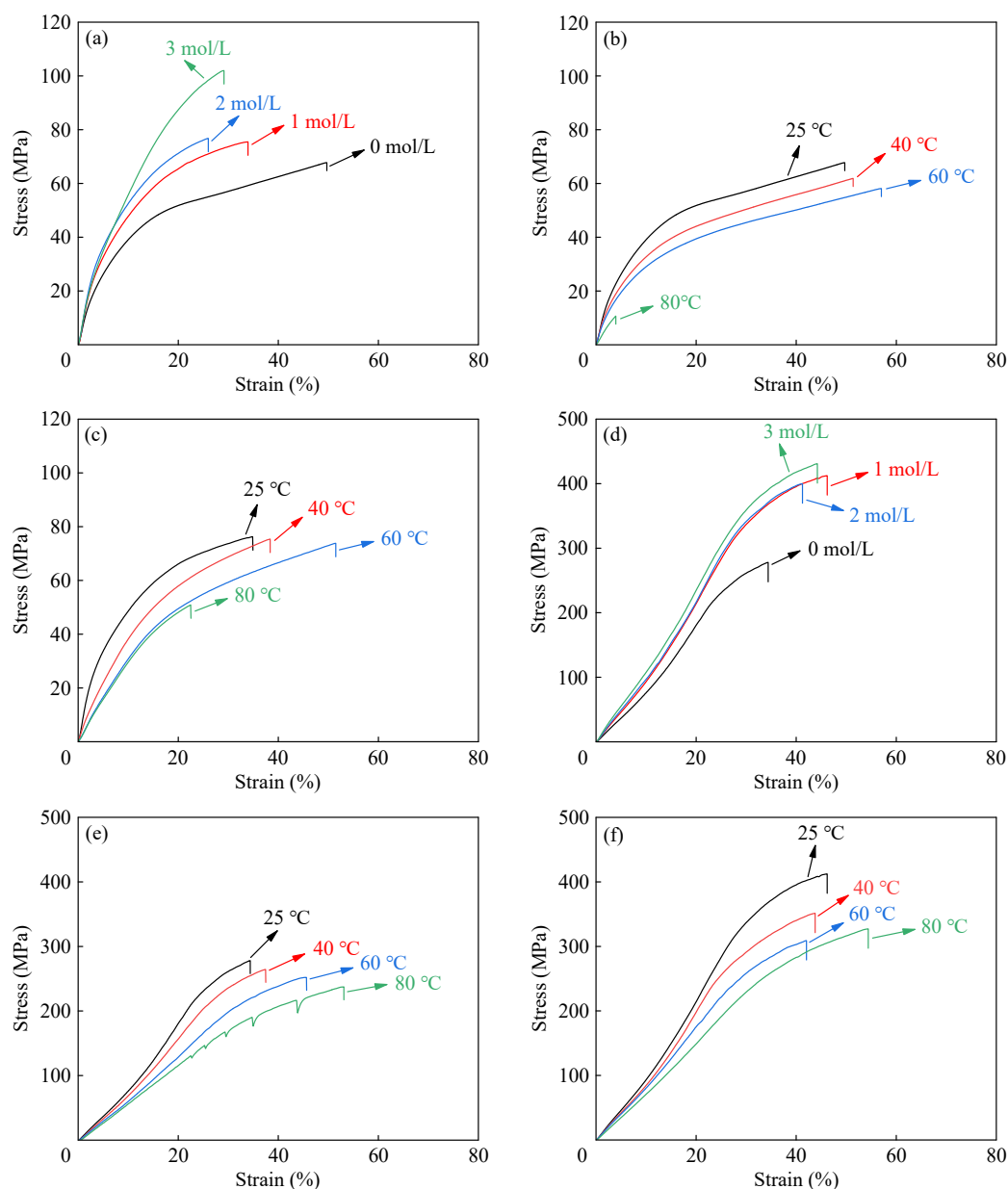
动能力低, 材料处于玻璃态. 在整个湿度扫描区间未出现明显的力学转变特征. 相对于薄膜, 湿度对鱼线动态力学的影响更低. 这是因为湿度对材料的影响涉及物质传输, 鱼线尺寸结构更粗, 水分子扩散缓慢, 因此在湿度扫描的固定时间内鱼线表现出更低的湿度依赖行为.

## 2.5 盐水环境中 PA6 材料力学性能随温度的变化

在 PA6 实际服役中, 涉及高温、含水、含盐等多场耦合环境. 在探明温度和湿度对其动态力

学行为影响的基础上, 进一步将 PA6 样品浸泡在不同浓度盐水溶液中, 通过改变溶液的温度, 进一步测试 PA6 材料在多场下的力学行为.

将 PA6 薄膜浸泡于水溶液中后, 薄膜的力学强度从干态下 100 MPa 降至 68 MPa, 断裂伸长率从 15% 增加至 50% (电子支持信息图 S2). 水分子对 PA6 的影响主要作用于非晶区, 破坏酰胺基团间的氢键相互作用<sup>[38]</sup>. 进一步将薄膜置于不同浓度的盐水溶液中. 由图 5(a) 可知, 薄膜的断裂强度在 1 mol/L NaCl 溶液中增加至 76 MPa, 在

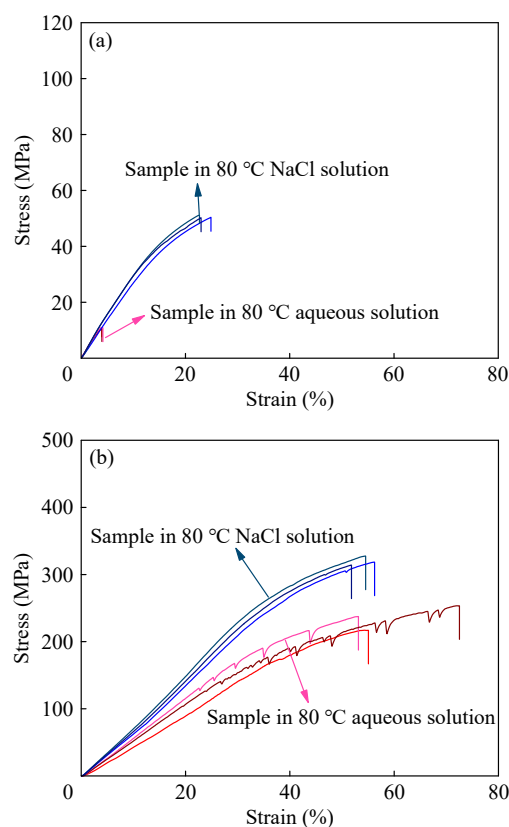


**Fig. 5** Stress-strain curves of Nylon 6 films: (a) soaked in NaCl solutions with different concentrations for 24 h, (b) soaked in water for 24 h with different temperatures, (c) soaked in 1 mol/L NaCl solution for 24 h with different temperatures. Stress-strain curves of Nylon 6 fishing lines: (d) soaked in NaCl solutions with different concentrations for 24 h, (e) soaked in water with different temperatures for 24 h, (f) soaked in 1 mol/L NaCl solution with different temperatures for 24 h.

3 mol/L NaCl 溶液中增加至 102 MPa. 随着溶液中 NaCl 浓度增加, 薄膜的断裂强度在不断增加, 断裂伸长率在逐渐减小. 初始模量表示线性区间内材料的弹性行为, 更能准确的反映材料软硬变化. 薄膜从 0 mol/L 盐浓度到 3 mol/L 盐浓度溶液中, 其初始模量从 740 MPa 增加至 940 MPa. 此外, PA6 薄膜在 1 mol/L NaClO、CaCl<sub>2</sub>、MgCl<sub>2</sub> 溶液中力学强度均有增强趋势(电子支持信息图 S3). 红外图谱中酰胺 A 带 N—H 伸缩振动(3300 cm<sup>-1</sup>), 酰胺 I 带的 C=O 伸缩振动(1633 cm<sup>-1</sup>)和酰胺 II 带 N—H 弯曲振动(1536 cm<sup>-1</sup>)被广泛用于揭示离子与尼龙酰胺基团的相互作用<sup>[39]</sup>. 结果显示这些特征基团位移无明显改变, PA6 薄膜经过 NaCl 盐溶液浸泡后, 钠离子未与酰胺基团形成氢键相互作用(电子支持信息图 S4). 通过 XRD 表明, 薄膜在吸水和吸盐后晶型结构未发生明显改变(电子支持信息图 S5). 不同盐浓度下的薄膜含水量表明, 盐的加入降低了 PA6 薄膜的含水量, 削弱了水分子对薄膜的增塑作用(电子支持信息图 S6).

由图 5(b)可知在纯水溶液中升高溶液温度, 薄膜的力学强度降低. 从 25 °C 升温到 60 °C, 力学强度从 68 MPa 降至 57 MPa. 当温度达到 80 °C 后, 薄膜的断裂强度和伸长率急剧降低, 分别为 9 MPa 和 4%. 对吸水饱和的薄膜进行 DSC 测试, 结果表明薄膜的熔融峰温度仍在 220 °C (电子支持信息图 S7), 结晶未熔融. 通过 DMA 测得 PA6 薄膜的动力学  $T_g$  在 85 °C 左右. 因此在 80 °C 水溶液中, 温度接近薄膜的松弛转变温度, 非晶区分子链运动能力增加, 且在水分子进一步破坏非晶区氢键作用. 此时, 薄膜未发生屈服就已经断裂, 力学强度急剧下降. 在 1 mol/L 盐水溶液中逐步升高温度, 如图 5(c), 薄膜的力学变化趋势与纯水中温度变化一致, 随着温度升高薄膜逐渐变软. 但是在相同温度下, 薄膜在 1 mol/L 盐水中的力学强度比纯水中高. 这种现象在 80 °C 的条件下最为明显. 图 6(a)对比了在 80 °C 水溶液和 1 mol/L 盐溶液中的力学行为. 在 80 °C 盐水溶液中薄膜的强度增加至 55 MPa, 相较于在 80 °C 纯水溶液中力学强度提升 600%. 韧性也从 0.2 MJ/m<sup>3</sup> 增至 11.0 MJ/m<sup>3</sup>.

在相同条件下, 对 PA6 鱼线也进行了测试. 鱼线在水溶液中的力学强度和断裂伸长率分别为 280 MPa 和 34% (电子支持信息图 S2). 如图 5(d),



**Fig. 6** (a) Stress-strain curves of Nylon 6 films soaked in water and 1 mol/L NaCl solution at 80 °C for 24 h; (b) Stress-strain curves of Nylon 6 fishing lines soaked in water and 1 mol/L NaCl solution at 80 °C for 24 h.

在 1 mol/L 盐溶液中, 其力学强度提升至 412 MPa. 在盐水溶液中其断裂强度增加, 但是在 1~3 mol/L 盐浓度之内力学强度变化不大. 在纯水溶液中, 升高溶液温度, 鱼线的力学强度逐渐降低, 伸长率增加, 如图 5(e). 在 80 °C 纯水溶液中, 鱼线由于更粗的尺寸结构, 其力学强度没有像薄膜一样极大的降低, 但是曲线出现多段屈服. 这些多段屈服是在测试过程中鱼线表面不断出现裂痕导致. 在 1 mol/L 盐溶液中升高温度, 鱼线也逐渐变软, 其力学强度比相同温度下纯水溶液中高. 这一现象与薄膜中的力学行为一致. 如图 6(b)所示, 在 80 °C 盐水溶液中, 鱼线的多段屈服现象消失. 相比 80 °C 纯水溶液中, 在 80 °C 盐水溶液中断裂强度由从 235 MPa 提升至 323 MPa, 初始模量从 245 MPa 升高至 500 MPa, 而韧性也从 85 MJ/m<sup>3</sup> 升高至 103 MJ/m<sup>3</sup>. XRD 与 FTIR 结果表明, 和薄膜一样, PA6 鱼线的晶型结构没有发生改变, NaCl 和酰胺基团没有形成相互作用(电子支持信息图 S4 和 S5). 但是随着盐

浓度升高, PA6 鱼线内的含水率有所降低。

这些现象表明, 相同温度下盐水溶液中 PA6 材料比纯水溶液中具有更高的力学强度。在盐溶液中, 盐离子通过水合层与水分子结合, 限制水分子迁移, 减弱了水对材料的增塑作用。在高温下该作用被进一步放大。因此 80 °C 盐溶液中 PA6 薄膜和鱼线的力学强度都得到加强, 且鱼线中的多段屈服消失。该结论也被 Lutkenhaus 等<sup>[40]</sup>通过理论模拟证明, 水分子对材料具有增塑作用, 但是在一定盐浓度下, 水和盐对材料具有反增塑作用。

### 3 结论

表征了不同 PA6 材料的形貌, 晶型结构, 原位测试了其在多场条件变化下的力学性能。PA6 薄膜在 25~180 °C 温度范围内  $E'$  从 1400 MPa 下降至 140 MPa。PA6 鱼线在 25~180 °C 温度范围  $E'$  从 4200 MPa 下降至 8 MPa。PA6 薄膜和鱼线内部的

结晶结构使得样品经历松弛转变后模量没有立即骤降。薄膜  $E'$  随湿度增加而降低, 在 0~90% RH 的湿度区间内出现次级松弛。而鱼线因为更粗的尺寸结构, 对湿度的依赖行为不明显。将薄膜和鱼线浸泡在水溶液中, 水分子促进了分子链运动, 样品的断裂强度逐渐降低。升高水溶液温度, 薄膜和鱼线的力学强度会随着温度的升高而进一步降低。其中 80 °C 时薄膜的断裂强度和伸长率降低至 9 MPa 和 4%, 鱼线的力学曲线中出现了多段屈服。在水溶液中加入盐会提高 PA6 材料的力学强度。在 80 °C 的 1 mol/L NaCl 溶液中, PA6 薄膜的力学强度增加至 55 MPa, PA6 鱼线的力学强度也有增强且曲线中多次屈服点消失。该工作展示了多场条件变化下 PA6 的力学行为, 尤其指出 PA6 在盐水溶液中相比在水溶液中具有更高的力学强度, 研究结果对 PA6 的多场景服役应用具有指导作用。

### REFERENCES

- 1 Kohan, M. I. *Nylon Plastics Handbook*. New York: Hanser Publishers, 1995.
- 2 Li, M. Z.; Liu, X. Y.; Chi, Y. B.; Feng, P. F.; Yu, H. T.; Fan, X. Y.; Yan, Z. W.; Jian, X. G.; Song, Y. J.; Xu, J. Structural regulation of polyamide 6 and interfacial dynamic networks confers the properties of self-healing and low water absorption for CF/PA6 composites. *Chem. Eng. J.*, **2025**, 523, 168033.
- 3 张燕珠, 刘四委, 黄爱萍, 张艺, 池振国, 许家瑞. 热处理对尼龙 6 及其与聚酰胺嵌段共聚物共混体系晶体熔融行为和结晶结构的影响. *高分子学报*, **2010**, (2), 231–236.
- 4 Liu, Phang, I. Y.; Shen, L.; Chow, S. Y.; Zhang, W. D. Morphology and mechanical properties of multiwalled carbon nanotubes reinforced nylon-6 composites. *Macromolecules*, **2004**, 37(19), 7214–7222.
- 5 Baráth, M.; Kotus, M.; Boszorádová, L.; Baláži, J.; Hrabovský, L.; Pravda, Š. Effect of relative humidity on tribological and mechanical properties of PA6-based composites. *Manag. Syst. Prod. Eng.*, **2025**, 33(3), 362–370.
- 6 张玲, 杨建民, 冯超伟, 李春忠. 表面复合纳米 SiO<sub>2</sub> 和碳纳米管玻璃纤维增强尼龙 6 的结构与性能. *高分子学报*, **2010**, (11), 1333–1339.
- 7 Chen, K. F.; Wang, Y. J.; Zhou, L. L.; Dai, J. M.; Chen, W. X.; Lu, W. Y. Characteristics and competitive mechanisms of polycondensation and cyclization induced by end-groups in polyamide 6 melt. *J. Polym. Sci.*, **2024**, 62(22), 5019–5029.
- 8 Li, X. S.; Wang, Q.; Wu, D. Y.; Li, T. Q.; Zhang, P.; Bai, J. R.; Zhang, X. Effects of short-term thermal oxidation on the mechanical and thermal behavior of PA6 liner material for type IV hydrogen storage cylinders. *RSC Adv.*, **2025**, 15(21), 16375–16391.
- 9 Williams, M. L.; Landel, R. F.; Ferry, J. D. The temperature dependence of relaxation mechanisms in amorphous polymers and other glass-forming liquids. *J. Am. Chem. Soc.*, **1955**, 77(14), 3701–3707.
- 10 Song, P. H.; Trivedi, A. R.; Chapman, D. J.; Graham, A.; Hawkins, N.; Lukić, B.; Rack, A.; Siviour, C. R. Thermomechanical and damage characterisation of short glass fibre reinforced polyamide 6 and impact-modified polyamide 6 composites. *Compos. Part B Eng.*, **2024**, 287, 111767.
- 11 Koyanagi, J.; Hasegawa, K.; Ohtani, A.; Sakai, T.; Sakaue, K. Formulation of non-linear viscoelastic-viscoplastic constitutive equation for polyamide 6 resin. *Heliyon*, **2021**, 7(2), e06335.
- 12 Shirinbayan, M.; Benfriha, K.; Ahmadifar, M.; Penavayre, C.; Nouira, S.; Fitoussi, J. Effects of hygrothermal aging on the physicochemical and mechanical properties of 3D-printed PA6. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **2024**, 131(9), 4811–4823.

- 13 Sharma, P.; Diebels, S. A mixture theory for the moisture transport in polyamide. *Continuum Mech. Thermodyn.*, **2021**, 33(4), 1891–1905.
- 14 Frank, B.; Fröbing, P.; Pissis, P. Water sorption and thermally stimulated depolarization currents in nylon-6. *J. Polym. Sci. B Polym. Phys.*, **1996**, 34(11), 1853–1860.
- 15 Zhou, S. M.; Tashiro, K.; Ii, T. Moisture effect on structure and mechanical property of nylon 6 as studied by the time-resolved and simultaneous measurements of FT-IR and dynamic viscoelasticity under the controlled humidity at constant scanning rate. *Polym. J.*, **2001**, 33(4), 344–355.
- 16 Li, H.; Donovan, J. A. Salt embrittlement of nylon 6. *Eng. Fract. Mech.*, **2013**, 101, 91–95.
- 17 de Cindio, B.; Migliaresi, C.; Acierno, D. Viscosity measurements on nylon-6/ethyl alcohol solutions in presence of inorganic salts. *Polymer*, **1978**, 19(5), 526–530.
- 18 Valenti, B.; Bianchi, E.; Greppi, G.; Tealdi, A.; Ciferri, A. Bulk properties of synthetic polymer-inorganic salt systems. Melting behavior of salted poly(caproamide). *J. Phys. Chem.*, **1973**, 77(3), 389–395.
- 19 Mikhailov, N. V.; Maiboroda, V. I.; Prokof'eva, A. S.; Krasova, I. I.; Gorbacheva, V. O. Structural modification of the properties of polyamide fibres. *Polym. Sci. U S S R*, **1966**, 8(12), 2294–2300.
- 20 Uematsu, H.; Ishikawa, M.; Yamaguchi, A.; Sugihara, S.; Nishitsuji, S.; Nishimura, F.; Yamane, M.; Kawabe, K.; Ozaki, Y.; Tanoue, S. Enhancement of flexural properties of carbon fiber-reinforced polyamide 6 via oriented crystallization of polyamide 6 among carbon fibers. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, **2024**, 176, 107837.
- 21 Kuram, E. Micro-machinability of injection molded polyamide 6 polymer and glass-fiber reinforced polyamide 6 composite. *Compos. Part B Eng.*, **2016**, 88, 85–100.
- 22 Cai, Z. Q.; Ye, J. Q.; Zhang, Y. F.; Nie, D. L.; Ouyang, J. L. The phase transition of polyamide 6 with pre-stretching process at different temperatures. *Phys. Scr.*, **2021**, 96(12), 125732.
- 23 Skorupska, M.; Kulczyk, M.; Przybysz, S.; Skiba, J.; Mizeracki, J.; Ryszkowska, J. Mechanical reinforcement of polyamide 6 by cold hydrostatic extrusion. *Materials*, **2021**, 14(20), 6045.
- 24 Wang, X. S.; Wang, Z. L.; Liang, S. M.; Jin, Y.; Lotz, B.; Yang, S. G. Surface nano-structure of polyamide 6 film by hydrothermal treatment. *Appl. Surf. Sci.*, **2018**, 442, 595–601.
- 25 Cravero, F.; Arrigo, R.; Frache, A. Processing/microstructure relationships in melt compounded polyamide 6 with different molecular weights: effect of screw speed and viscosity ratio. *Polym. Eng. Sci.*, **2025**, 65(5), 2525–2538.
- 26 Arrhenius, G. X-ray diffraction procedures for polycrystalline and amorphous materials. *J. Chem. Educ.*, **1955**, 32(4), 228.
- 27 Illers, K. H.; Haberkorn, H.; Simak, P. Untersuchungen über die  $\gamma$ -struktur in unverstrecktem und verstrecktem 6-polyamid. *Macromol. Chem. Phys.*, **1972**, 158(1), 285–311.
- 28 D'Alò, B.; Coppola, G.; Pallesi, B. Studies of crystalline forms of nylon-6 by X-ray and I.r. Spectrophotometry. *Polymer*, **1974**, 15(3), 130–132.
- 29 Lin, X. T.; Liu, Y. J.; Jin, R. J.; Peng, Y. Structure evolution and properties enhancement of polyamide-6/polyamide-1010 films under uniaxial and biaxial stretching. *J. Appl. Polym. Sci.*, **2023**, 140(32), e54253.
- 30 Pepin, J.; Gaucher, V.; Lefebvre, J. M.; Stroeks, A. Biaxial stretching behavior as a probe of H-bond organization in semi-crystalline polyamides. *Polymer*, **2016**, 101, 217–224.
- 31 Gao, Y. Y.; Dong, X.; Wang, L. L.; Liu, G. M.; Liu, X. G.; Tuinea-Bobe, C.; Whiteside, B.; Coates, P.; Wang, D. J.; Han, C. C. Flow-induced crystallization of long chain aliphatic polyamides under a complex flow field: inverted anisotropic structure and formation mechanism. *Polymer*, **2015**, 73, 91–101.
- 32 Zhang, Y. Z.; Zhang, Y.; Liu, S. W.; Huang, A. P.; Chi, Z. G.; Xu, J. R.; Economy, J. Phase stability and melting behavior of the  $\alpha$  and  $\gamma$  phases of nylon 6. *J. Appl. Polym. Sci.*, **2011**, 120(4), 1885–1891.
- 33 王晓春, 杨桂生, 郑强. 尼龙6与半芳香性非晶尼龙原位共混物的结构与性能. *高分子学报*, **2007**, (9), 796–801.
- 34 张彩虹, 王伟杰, 黄浩, 刘泽新, 杨曙光. 湿度对高分子氢键复合物纤维力学行为的影响. *高分子学报*, **2023**, 54(11), 1772–1783.
- 35 刘泽新, 尹培阳, 黄浩, 张彩虹, 杨曙光. 高分子氢键复合物蠕变行为研究. *高分子学报*, **2025**, 56(7), 1223–1233.
- 36 Zhang, Z. Y.; Tang, Z. Y.; Kobayashi, Y.; Ito, H.; Okazaki, S. Microscopic mechanism of accelerated aging in swollen polylactic acid by water: tensile test experiments and molecular dynamics calculations. *Polymer*, **2025**, 332, 128582.
- 37 Kehrer, L.; Keursten, J.; Hirschberg, V.; Böhlke, T. Dynamic mechanical analysis of PA 6 under hydrothermal influences and viscoelastic material modeling. *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, **2023**, 36(11), 4630–4664.



- 38 Fabre, V.; Quandalle, G.; Billon, N.; Cantournet, S. Time-Temperature-Water content equivalence on dynamic mechanical response of polyamide 6, 6. *Polymer*, 2018, 137, 22–29.
- 39 Wu, Y. J.; Xu, Y. Z.; Wang, D. J.; Zhao, Y.; Weng, S. F.; Xu, D. F.; Wu, J. G. FT-IR spectroscopic investigation on the interaction between nylon 66 and lithium salts. *J. Appl. Polym. Sci.*, **2004**, 91(5), 2869–2875.
- 40 Zhang, R.; Zhang, Y. P.; Antila, H. S.; Lutkenhaus, J. L.; Sammalkorpi, M. Role of salt and water in the plasticization of PDAC/PSS polyelectrolyte assemblies. *J. Phys. Chem. B*, **2017**, 121(1), 322–333.

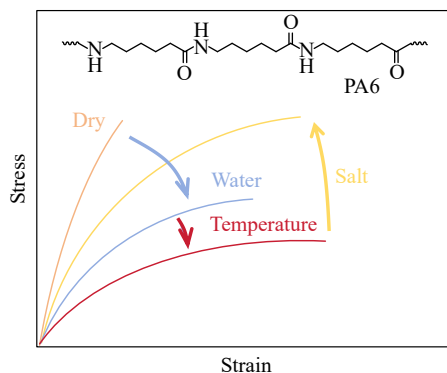
## Research Article

## Mechanical Properties of Nylon 6 Materials Under Multi-field Conditions

Cheng-nuo Zhang, Wen-juan Tan, Hao Huang\*, Shu-guang Yang\*

(State Key Laboratory of Advanced Fiber Materials, Center for Advanced Low-dimension Materials,  
College of Material Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620)

**Abstract** This study investigated the mechanical properties of nylon 6 (PA6) films and fishing lines under multi-field conditions. The effects of salt concentration and temperature variations in aqueous solutions on their mechanical properties were systematically examined, revealing that PA6 materials exhibited enhanced mechanical strength in saline solutions compared to that in pure water. When PA6 films and fishing lines were immersed in water, their modulus and strength decreased compared to the dry state. With increasing temperature of aqueous solution, the mechanical strength of both films and fishing lines further declined. At 80 °C aqueous solution, the mechanical strength of the films dropped sharply. The breaking strength of fishing lines did not decrease abruptly due to their size and structural characteristics, but their mechanical curves displayed multi-stage yielding. Upon the addition of salt, in 1 mol/L NaCl solution at 80 °C, both the strength and toughness of PA6 films were improved, and the multi-stage yielding in the mechanical curves of PA6 fishing lines disappeared. In saline solution, salt ions associated with water molecules through hydration shells, weakening the plasticizing effect of water on the material. This work presents the evolution of the mechanical properties of PA6 under various multi-field conditions, providing guidance for applications in different service environments.



**Keywords** Nylon 6; Film; Fishing line; Multi-Field condition; Mechanical property

\* Corresponding authors: Hao Huang, E-mail: huanghao@dhu.edu.cn

Shu-guang Yang, E-mail: shgyang@dhu.edu.cn