

专题——航天器空间特殊环境、效应及评价技术

# PI 纤维在空间带电粒子辐照下的力学性能损伤

琚丹丹<sup>1</sup>, 王馨敏<sup>1</sup>, 孙承月<sup>1</sup>, 王豪<sup>1</sup>, 吴宜勇<sup>1</sup>, 董志鑫<sup>2</sup>,  
刘刚<sup>3</sup>, 潘阳阳<sup>3</sup>, 邱雪鹏<sup>2</sup>

(1.哈尔滨工业大学, 哈尔滨 150001; 2.中国科学院长春应用化学研究所, 长春 130022;  
3.上海卫星装备研究所, 上海 200240)

**摘要:** **目的** 研究聚酰亚胺 (PI) 纤维在电子辐照、质子辐照、应力耦合质子辐照条件下力学性能的损伤行为。**方法** 采用中国科学院长春应用化学研究所自主合成并纺丝制备的聚酰亚胺纤维, 在空间环境模拟设备辐照的条件下, 研究空间带电粒子对聚酰亚胺纤维辐照后的力学损伤行为, 并通过 XQ-1 型纤维强度仪对辐照前后的样品进行拉伸试验。**结果** 在低能电子辐照条件下, 聚酰亚胺纤维的拉伸强度、模量和断裂伸长率均有所降低, 但变化不太显著; 高能电子辐照会提高材料的模量; 质子辐照后, 材料的拉伸强度和断裂伸长率随着辐照注量的增加明显降低; 单一施加 5% 的应变会使聚酰亚胺纤维的拉伸力学性能有一定量下降。与单一应变样品相比, 应力耦合质子辐照样品的拉伸强度和断裂伸长率进一步下降, 但是与单一质子辐照样品相比, 应力耦合辐照样品的拉伸强度和断裂伸长率都更高。**结论** 无论是在低能电子辐照条件下, 还是在高能电子辐照条件下, 电子辐照对聚酰亚胺纤维力学性能影响均较微弱, 而质子辐照会较大程度地降低材料的力学性能, 增加应力耦合效应之后, 质子辐照对材料的力学性能影响减弱。

**关键词:** 聚酰亚胺纤维; 带电粒子辐照; 电子辐照; 质子辐照; 应力耦合辐照效应; 力学性能

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2020.03.001

**中图分类号:** V416 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2020)03-0001-07

## Mechanical Properties of Polyimide Fibers under the Irradiation of Space Charged Particles

JU Dan-dan<sup>1</sup>, WANG Xin-min<sup>1</sup>, SUN Cheng-yue<sup>1</sup>, WANG Hao<sup>1</sup>, WU Yi-yong<sup>1</sup>, DONG Zhi-xin<sup>2</sup>,  
LIU Gang<sup>3</sup>, PAN Yang-yang<sup>3</sup>, QIU Xue-peng<sup>2</sup>

(1. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. Changchun Institute of Applied Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China; 3. Shanghai Institute of Satellite Equipment, Shanghai 200240, China)

**ABSTRACT:** The paper aims to study the mechanical properties of polyimide fibers under electron irradiation, proton irradiation and stress-coupled proton irradiation. The polyimide fibers, which were prepared by the Changchun Institute of Applied Chemistry, Chinese Academy of Sciences, were irradiated by the space environment simulation equipment and the mechanical

收稿日期: 2019-08-28; 修订日期: 2019-10-05

Received: 2019-08-28; Revised: 2019-10-05

基金项目: “十三五”装备预先研究项目 (30508040601); 高等学校学科创新引智计划资助 (B18017)

Fund: Project of the 13th Five-year Plan (30508040601); The 111 Project (B18017)

作者简介: 琚丹丹 (1989—), 女, 河南人, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为聚合物材料的空间环境效应。

**Biography:** JU Dan-dan (1989—), Female, from Henan, Ph. D., Assistant researcher, Research focus: space environment effect of polymer materials.

通讯作者: 吴宜勇 (1967—), 男, 湖北人, 博士, 教授, 主要研究方向为太阳能电池、器件、聚合物材料等空间环境效应评价。

**Corresponding author:** WU Yi-yong (1967—), Male, from Hubei, Ph. D., Professor, Research focus: evaluation of the effect of space environment such as solar cells, components, polymer materials.

properties before and after irradiation were tested by XQ-1 fiber strength meter. Under the low energy electron irradiation, the tensile strength, modulus and elongation at break of polyimide fiber were all reduced, but the change was not significant; high energy electron irradiation would increase the modulus of the material; after proton irradiation, the tensile strength and the elongation at break of the material decreased significantly with the increase of the irradiation fluence; single application of 5% strain would cause a certain decrease in the tensile mechanical properties of the polyimide fiber. Compared to the single strained samples, the tensile strength and the elongation at break of the stress-coupled proton irradiated samples were further reduced; while compared to the single proton irradiated samples, the tensile strength and the elongation at break of the stress-coupled irradiated samples were higher. The effect of electron irradiation on the mechanical properties of polyimide fiber is weak whether it is under low-energy or high-energy; while the proton irradiation will greatly reduce the mechanical properties of the polyimide fibers. Adding the stress coupling effect will weaken the effect of proton irradiation on the mechanical properties of the polyimide fibers.

**KEY WORDS:** polyimide fiber; the irradiation of space charged particles; the electron irradiation; the proton irradiation; the stress coupled irradiation effect; mechanical properties

聚酰亚胺材料具有优异的耐高低温、高强高模、耐辐射、耐腐蚀等优点，在空间领域具有巨大的应用前景<sup>[1-2]</sup>。聚酰亚胺纺丝后，由于分子链的取向，致使聚酰亚胺纤维具有更高的强度和模量，更高的热氧化稳定性，较高的耐辐射性，可以作为先进复合材料的增强剂，用于航空器、航天器、火箭的轻质电缆护套、发动机喷管及耐高温特种编织电缆的制造<sup>[3-4]</sup>。研究者对于聚酰亚胺薄膜材料的空间行为已做了大量的研究<sup>[5-8]</sup>，但是在纺丝的过程中，聚酰亚胺分子会发生高度的结晶或取向<sup>[9]</sup>，其各方面性能与聚酰亚胺薄膜会有明显的区别。北京化工大学的武德珍<sup>[10]</sup>对高强高模的聚酰亚胺纤维在高温、强酸、强碱以及紫外辐照环境中的性能变化做了详细的研究，并与 P84 对比，发现在紫外辐照 150 h 后，纤维力学性能仍保持在 90% 以上，优于 P84 的耐紫外辐照性能。在空间带电粒子辐照下，高性能聚酰亚胺纤维的性能变化及对应的损伤机理还未见报道。带电粒子与聚酰亚胺材料相互作用后，会使聚酰亚胺分子链断裂，产生自由基，而自由基的回复

受到材料结晶度<sup>[11]</sup>和取向度的影响，会进一步影响分子链反应和材料的性能变化，因而聚酰亚胺纤维辐照后的性能损伤和演化机理与聚酰亚胺薄膜也必然会有所不同。同时对于聚酰亚胺纤维来说，在空间的柔性机构应用中，通常会受到应力的作用<sup>[12]</sup>。文中在研究电子/质子单因素辐照对聚酰亚胺纤维力学性能影响的基础上，进一步研究耦合应力及带电粒子辐照对纤维性能的影响，以更真实地反映其在实际应用环境条件中的性能演化，为聚酰亚胺纤维在空间的应用提供依据。

## 1 试验

### 1.1 材料

本研究中的聚酰亚胺纤维由中国科学院长春应用化学研究所提供，其分子结构如图 1 所示。其合成原料为：BPDA（3,3',4,4'-联苯二酐）、PMDA（1,2,4,5-均苯四甲酸二酐）和 ODA（4,4'-二氨基二苯醚）。

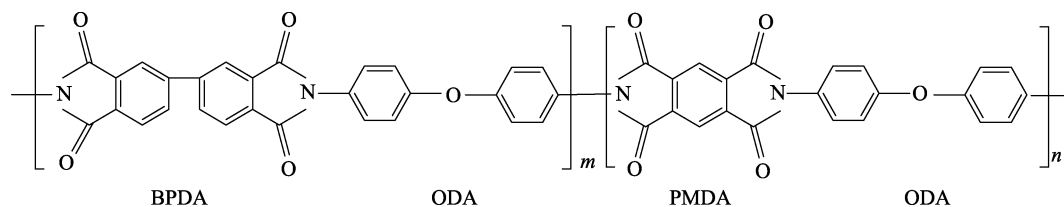


图 1 聚酰亚胺纤维分子结构  
Fig.1 Molecular structure of polyimide fiber

### 1.2 设备及辐照方案

根据辐照设备的性能及对聚酰亚胺材料耐辐照性的相关研究<sup>[5-6]</sup>，选取的电子辐照能量分别为 150 keV 和 1 MeV，质子辐照能量为 150 keV。其中，150 keV 电子辐照和 150 keV 质子辐照采用的设备分别是哈尔滨工业大学空间环境材料行为与评价技术

国家级重点实验室的 K И Ф К 综合辐照模拟器和空间正离子加速器，1 MeV 电子辐照采用的是黑龙江省科学院技术物理研究所的电子加速器（型号为 DD-1.2，生产厂家为上海先锋）。文中主要研究聚酰亚胺纤维电子辐照和质子辐照前后力学拉伸性能的演化规律，具体辐照方案见表 1。

表 1 聚酰亚胺纤维辐照试验方案

Tab.1 Irradiation testing scheme of polyimide fibers				
粒子种类	能量	辐照环境	通量/ ( $\times 10^{13} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	注量/ ( $\times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ )
电子	150 keV	真空	1.25	1
				10
电子	1 MeV	大气	1.25	0.5
				1
				5
				10
质子	150 keV	真空	1.25	2
				4
				7
				10
				20
				20
应力耦合 质子辐照	150 keV	真空	1.25	7
				10

根据文中单一带电粒子辐照的研究结果,发现质子辐照对聚酰亚胺纤维的力学性能影响较大。因而,为了研究应力耦合辐照效应对纤维力学性能的影响,选择了与 150 keV 质子辐照相同试验条件下,  $7 \times 10^{15}$ 、 $12 \times 10^{16} \text{cm}^{-2}$  两个不同的注量,进行应力耦合质子辐照实验。通过笔者课题组自制的施加恒应变的卡具,实现聚酰亚胺纤维的应力耦合辐照实验,卡具原理如图 2 所示。样品由夹片夹持,通过螺钉固定压紧,在中间丝杠的传动作用下,可以实现上模块上升,而下模块保持不动的状态,因此样品可以随着上模块的运动伸长。通过游标卡尺测量样品伸长的距离,结合样品原始长度计算得到样品的应变。由于丝杠本身带有自锁功能,上模块在向上运动的过程中以及停止运动后,并不会向下滑动,因而可以固定锁死,保证样品的恒应变。根据质子辐照对聚酰亚胺纤维力学性能影响的应力-应变曲线,对样品施加的应变确定为 5%。同时,为了排除单纯施加应力对聚酰亚胺纤维力学性能的影响,准备了与辐照相同的时间和真空条

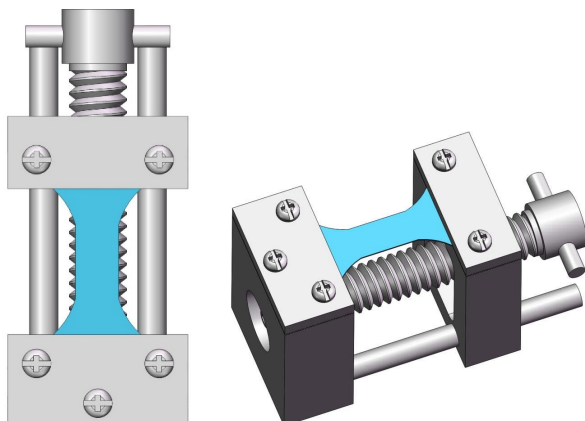


图 2 施加恒应变的卡具原理  
Fig.2 Principle of fixture applying constant strain

件下,只施加 5%的时间和真应变而无辐照的试验作为对照,与相同条件下应力耦合辐照后的纤维力学性能进行对比分析。

### 1.3 拉伸性能测试

辐照前后的拉伸性能测试根据标准 ASTM D3379-75<sup>[13]</sup>进行。采用 XQ-1 型纤维强度仪进行拉伸试验,拉伸速率为 20 mm/min,对每组纤维样品测试 10~20 根纤维单丝,取其平均值来表征样品的拉伸性能。

## 2 结果及分析

### 2.1 150 keV 电子辐照

150 keV 电子辐照聚酰亚胺纤维样品的应力-应变曲线如图 3 所示。可以看出,电子辐照后,样品的拉伸强度和断裂伸长率比原始样品有一定量的下降。这与聚酰亚胺薄膜受电子辐照后拉伸性能变化情况一致<sup>[14]</sup>。150 keV 电子辐照前后,聚酰亚胺纤维拉伸性能的各个参数变化见表 2。

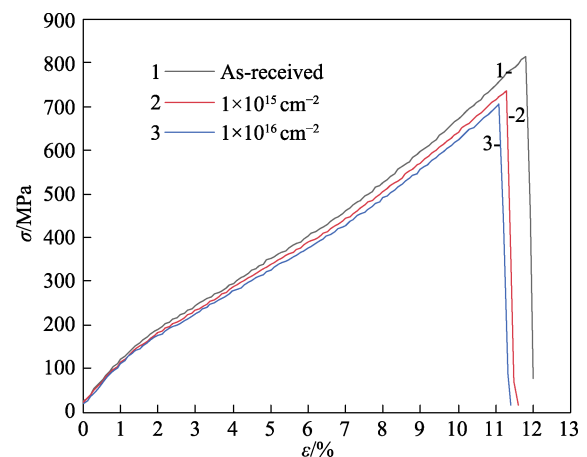


图 3 不同注量的 150 keV 电子辐照聚酰亚胺纤维应力-应变曲线

Fig.3 Stress-strain curve of polyimide fiber under different injection volume of 150 keV electron irradiation

表 2 150 keV 电子辐照聚酰亚胺纤维前后的拉伸性能参数变化

Tab.2 The change of polyimide fiber tensile performance parameters before and after 150 keV electron irradiation			
注量/ $\text{cm}^{-2}$	拉伸强度/GPa	模量/GPa	断裂伸长率/%
原始	$0.79 \pm 0.01$	$9.80 \pm 0.10$	$11.82 \pm 0.14$
$1 \times 10^{15}$	$0.77 \pm 0.01$	$9.57 \pm 0.09$	$11.56 \pm 0.18$
$1 \times 10^{16}$	$0.68 \pm 0.01$	$9.16 \pm 0.14$	$10.99 \pm 0.13$
<i>F</i>	22.40	8.55	7.34
<i>P</i>	$3.33 \times 10^{-7}$	$8.36 \times 10^{-4}$	$1.97 \times 10^{-3}$

由表 2 可知,聚酰亚胺纤维经电子辐照后,拉伸强度和模量随辐照注量的增加而下降。为了进一步证

实这些变化是由于辐照的影响而不是随机的不可控因素造成的,采用方差分析(ANOVA)的方法来评估150 keV电子辐照对聚酰亚胺纤维力学性能影响的可信度<sup>[15]</sup>。

单因素方差分析是一种判断某一因素对试验指标的影响是否显著的数据处理方法。通过计算方差 $S_E^2$ ,它反映了由于试验本身引起的数据波动以及方差 $S_A^2$ ,反映了考察的因素A水平引起的波动,然后计算其比值得到 $F_A$ (见式(1))。 $F_A$ 值是组间变异与组内变异的比率,判断因素A的水平是否对其观察值有影响,实际上就是比较组间均方与组内均方之间差异的大小。进一步计算得到反映因素A对数据波动无影响的概率 $P$ ,通过将 $P$ 值与设定的显著性指标 $\alpha$ 值对比,判定因素A是否对实验数据的波动有影响。

$$F_A = \frac{S_A^2/(r-1)}{S_E^2/(n-r)} \quad (1)$$

在对得到的力学性能数据进行分析时,因素A即为辐照剂量, $P$ 值表示辐照对拉伸性能无影响的零假设成立的概率。选择 $\alpha=0.05$ 作为显著性水平,当 $P$ 小于 $\alpha$ 时,则以大于 $(1-\alpha)\times 100\%$ 的概率拒绝零假设,即辐照对聚酰亚胺纤维的力学性能造成影响的置信水平 $>95\%$ 。因而,由 $P$ 值可以得出辐照对聚酰亚胺纤维不同拉伸性能参数影响的置信度。

150 keV电子辐照后,聚酰亚胺纤维力学性能测试结果ANOVA分析的 $F$ 统计值和 $P$ 值列于表2中。结果表明,辐照对聚酰亚胺纤维拉伸强度的影响最大, $P$ 值接近于0。拉伸模量和断裂伸长率的 $P$ 值虽然比拉伸强度大得多,但仍然小于0.05,甚至小于0.01。这说明对于所有的拉伸性能参数,辐照对聚酰亚胺纤维性能有影响的概率远远超过95%。因此,低能电子辐照对聚酰亚胺纤维的拉伸性能有影响,且随着辐照剂量的增加,拉伸强度、模量、断裂伸长率均有所降低。

## 2.2 1 MeV 电子辐照

1 MeV电子辐照聚酰亚胺纤维的平均应力-应变曲线如图4所示,详细的拉伸性能参数见表3。由图4可知,与150 keV电子辐照后相似,1 MeV电子辐照后,纤维的拉伸强度和断裂伸长率均有略微的下降,但变化不明显,且与辐照剂量的关系无明显规律。从表3中可以发现,辐照后样品的模量有略微的升高。

同样,使用方差分析(ANOVA)来评估1 MeV电子辐照对聚酰亚胺纤维拉伸性能的影响。从计算的 $P$ 值可以看出,高能电子辐照对聚酰亚胺纤维的拉伸强度和断裂伸长率也有一定的影响,但是相对于低能电子辐照来讲,影响较小。另一方面,高能电子辐照

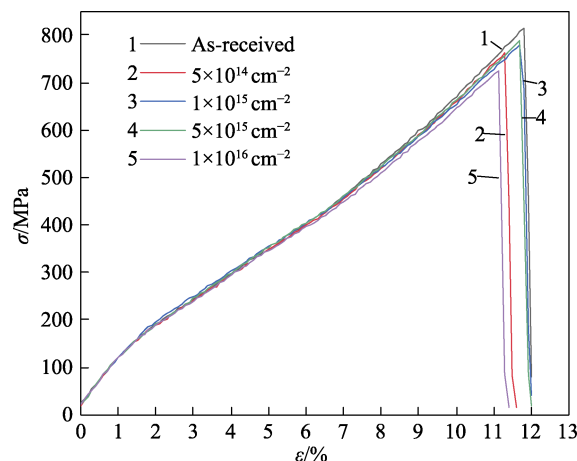


图4 不同剂量的1 MeV电子辐照聚酰亚胺纤维的应力-应变曲线

Fig.4 Stress-strain curve of polyimide fiber under different injection volume of 1 MeV electron irradiation

表3 1 MeV电子辐照聚酰亚胺纤维前后的拉伸性能参数变化

Tab.3 The change of polyimide fiber tensile performance parameters before and after 1 MeV electron irradiation

剂量/cm <sup>-2</sup>	拉伸强度/GPa	模量/GPa	断裂伸长率/%
原始	0.79±0.01	9.80±0.10	11.82±0.14
5×10 <sup>14</sup>	0.78±0.01	10.73±0.20	11.61±0.13
1×10 <sup>15</sup>	0.78±0.01	9.88±0.15	11.64±0.10
5×10 <sup>15</sup>	0.79±0.01	11.24±0.17	11.53±0.09
1×10 <sup>16</sup>	0.74±0.01	10.11±0.18	11.14±0.14
$F$	2.84	14.27	4.32
$P$	$2.83\times 10^{-2}$	$4.62\times 10^{-9}$	$3.03\times 10^{-3}$

后,聚酰亚胺纤维的弹性模量有较大的升高,其 $P$ 值远远小于0.05。Narendra L. Mathakari研究发现,6 MeV的电子辐照后,聚酰亚胺薄膜的弹性模量也有升高的现象。这是因为在 高能电子辐照时,样品中产生了辐照交联,导致分子链之间产生了更强的结合力<sup>[16]</sup>。

## 2.3 150 keV 质子辐照

经过150 keV质子辐照前后,聚酰亚胺纤维的拉伸应力-应变曲线如图5所示。与未辐照样品相比,经过150 keV质子辐照后,纤维的拉伸强度与断裂伸长率均有明显的下降,且下降程度随辐照剂量的增加而增加。沈自才等<sup>[17-18]</sup>对质子辐照聚酰亚胺薄膜的研究也显示薄膜的拉伸强度和断裂伸长率随质子辐照剂量的增加而呈指数减小。

聚酰亚胺纤维质子辐照后的拉伸性能参数变化见表4。与电子辐照试验结果相比,经过150 keV质子辐照后,聚酰亚胺纤维样品的拉伸性能变化更明显。拉伸强度由未辐照样品的0.79 GPa降低至0.42 GPa,降低了46.8%;断裂伸长率由11.82%下降至6.60%,降低了44.2%;模量仅有略微的下降。同

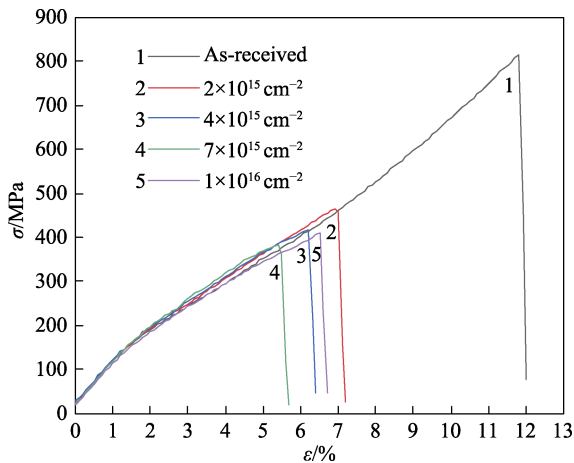


图 5 不同注量的 150 keV 质子辐照聚酰亚胺纤维的应力-应变曲线

Fig.5 Stress-strain curve of polyimide fiber under different injection volume of 150 keV proton irradiation

表 4 150 keV 质子辐照聚酰亚胺纤维前后的拉伸性能参数变化

Tab.4 The change of polyimide fiber tensile performance parameters before and after 150 keV proton irradiation

注量/cm <sup>-2</sup>	拉伸强度/GPa	模量/GPa	断裂伸长率/%
原始	0.79±0.01	9.80±0.10	11.82±0.14
2×10 <sup>15</sup>	0.47±0.01	9.61±0.11	7.33±0.14
4×10 <sup>15</sup>	0.41±0.01	9.04±0.14	6.26±0.21
7×10 <sup>15</sup>	0.38±0.01	9.31±0.10	5.85±0.17
1×10 <sup>16</sup>	0.42±0.01	9.56±0.09	6.60±0.08
<i>F</i>	358.09	7.35	234.68
<i>P</i>	0	3.51×10 <sup>-5</sup>	0

样使用方差分析 (ANOVA) 来评估 150 keV 质子辐照对聚酰亚胺纤维拉伸性能的影响。从表 4 中的 *P* 值可见, 样品辐照后的拉伸强度、模量、断裂伸长率数据统计所得 *P* 值均远小于 0.05, 说明质子辐照对聚酰亚胺纤维力学性能各参数均有显著影响。拉伸强度和断裂伸长率的 *P* 值均为 0, 说明质子辐照对聚酰亚胺纤维的拉伸强度和断裂伸长率的影响比电子辐照显著得多。

## 2.4 应力耦合质子辐照

为了研究应力耦合辐照效应对纤维力学性能的影响, 选择了与 150 keV 质子辐照相同试验条件下, 7×10<sup>15</sup>、12×10<sup>16</sup> cm<sup>-2</sup> 两个不同的注量, 进行应力耦合质子辐照实验。同时, 为了排除单纯施加应力对聚酰亚胺纤维力学性能的影响, 准备了与辐照相同的时间和真空条件下, 只施加 5% 不同的注量应变而无辐照的试验作为对照, 与相同条件下应力耦合辐照后的纤维力学性能进行对比分析。150 keV 质子辐照前后, 聚酰亚胺纤维原始样品、单一施加应力、应力耦合辐照以及单一辐照的应力-应变曲线对比如图 6 所示。

与原始样品对比, 单一施加 5% 的应变会使聚酰亚胺纤维的拉伸强度和断裂伸长率有一定的下降。应力耦合质子辐照后, 样品的拉伸强度和断裂伸长率较单一施加应变的样品会进一步下降, 说明应力耦合辐照后, 样品拉伸性能的变化并不是单纯由应力拉伸造成的。另一方面, 与单一辐照样品相比, 应力耦合辐照后样品的拉伸强度和断裂伸长率又有所增加。这说明在辐照中, 引入应力的作用, 会减弱辐照对材料力学性能的影响。从聚酰亚胺纤维应力耦合 150 keV 质子辐照前后拉伸性能参数变化的详细情况 (表 5) 可以更清晰地确认此结果。

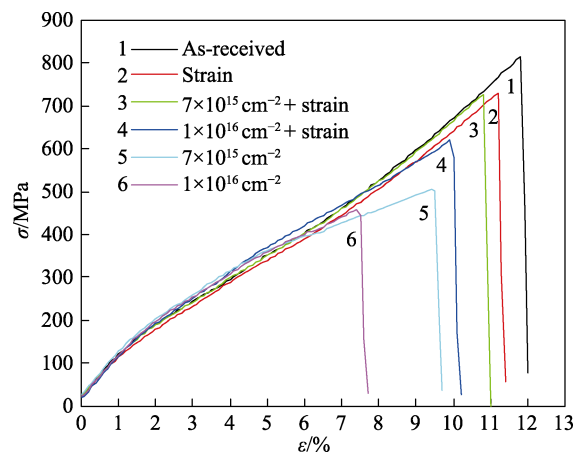


图 6 应力耦合 150 keV 质子辐照聚酰亚胺纤维的应力-应变曲线

Fig.6 Stress-strain curve of polyimide fiber under stress coupled of 150 keV proton irradiation

表 5 应力耦合 150 keV 质子辐照聚酰亚胺纤维前后的拉伸性能参数变化

Tab.5 The change of polyimide fiber tensile performance parameters before and after stress coupled 150 keV proton irradiation

注量	拉伸强度/GPa	模量/GPa	断裂伸长率/%
原始	0.79±0.01	9.80±0.10	11.82±0.14
5%应变	0.74±0.01	9.36±0.05	11.33±0.17
7×10 <sup>15</sup> cm <sup>-2</sup>	0.38±0.01	9.31±0.10	5.85±0.17
7×10 <sup>15</sup> cm <sup>-2</sup> + 5%应变	0.72±0.02	9.42±0.23	11.50±0.17
1×10 <sup>16</sup> cm <sup>-2</sup>	0.42±0.01	9.56±0.09	6.60±0.08
1×10 <sup>16</sup> cm <sup>-2</sup> + 5%应变	0.63±0.01	10.18±0.09	9.98±0.15

由表 5 可见, 相对于原始样品 0.79 GPa 的拉伸强度, 经过 7×10<sup>15</sup>、1×10<sup>16</sup> cm<sup>-2</sup> 注量的辐照后, 样品拉伸强度分别降低到了 0.38、0.42 GPa。在辐照的同时施加应力后, 拉伸强度却仅仅降低到 0.72、0.63 GPa。相对应的, 单一辐照后, 断裂伸长率从 11.82% 降低到了 5.85% 和 6.60%, 应力耦合辐照后, 断裂伸长率仅仅降低到了 11.50% 和 9.98%。李鹏对应力耦合质子辐照聚酰亚胺薄膜的研究也有类似的现



象<sup>[19]</sup>。分析认为,在施加应变辐照过程中,自由基之间有可能复合得更迅速,而且在应变的作用下,可能是因为辐照过程中分子链的断裂和重组过程会形成一定的沿应力方向取向的稳定的分子结构,导致辐照对材料宏观力学性能的影响减弱。

### 3 结论

1) 无论是经过真空条件下的 150 keV 电子辐照,还是大气环境条件下的 1 MeV 电子辐照,纤维的拉伸强度和断裂伸长率均有略微的下降。在 1 MeV 电子辐照条件下,聚酰亚胺纤维的模量有所增加。

2) 质子辐照会显著降低聚酰亚胺纤维的拉伸强度和断裂伸长率,同时使模量略微下降。

3) 质子辐照对聚酰亚胺纤维力学性能的影响比电子辐照影响显著。

4) 相对于单一的质子辐照,引入应力后,由于促进了辐照过程中分子链的重组及取向排列,会减弱单一质子辐照造成的材料力学性能的降低。

通过采用电子辐照、质子辐照、应力耦合质子辐照研究了带电粒子辐照对聚酰亚胺纤维力学性能损伤的变化规律,可以为聚酰亚胺纤维在空间的应用提供一定的依据,但是对于以上结果变化的机理,还需进一步详细研究。

#### 参考文献:

- [1] LIAW D J, WANG K L, HUANG Y C, et al. Advanced Polyimide Materials: Syntheses, Physical Properties and Applications[J]. Progress in Polymer Science, 2012, 37(7): 907-974.
- [2] GU J D. Microbial Colonization of Polymeric Materials for Space Applications and Mechanisms of Biodeterioration: A Review[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2007, 59(3): 170-179.
- [3] 董杰, 王士华, 徐圆, 等. 聚酰亚胺纤维制备及应用[J]. 中国材料进展, 2012, 31(10): 14-20.  
DONG Jie, WANG Shi-hua, XU Yuan, et al. Preparation and Application of Polyimide Fibers[J]. Materials China, 2012, 31(10): 14-20.
- [4] 朱璇, 钱明球, 虞鑫海, 等. 聚酰亚胺及其纤维的研究与开发进展(II)[J]. 合成技术及应用, 2013, 28(2): 24-29.  
ZHU Xuan, QIAN Ming-qiu, YU Xin-hai, et al. The Research and Development Progress in Polyimides and Its Fiber[J]. Synthetic Technology and Application, 2013, 28(2): 24-29.
- [5] 李瑞锋. 质子辐照下 SiO<sub>2</sub> 薄膜改性 Kapton 光学性能演化及其损伤机理[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [6] LI Rui-feng. Optical-property Evolution & Its Damage Mechanisms of SiO<sub>2</sub> Film Modified Kapton under Proton Irradiation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [7] 孙承月. 航天用 SiO<sub>2</sub>/PI 材料辐照自由基演化及损伤行为研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.  
SUN Cheng-yue. Investigation on Irradiation Induced Free Radical Evolution and Damage Behavior of Space Applied SiO<sub>2</sub>/PI Materials[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [8] ZENG D W, YUNG K C, XIE C S. XPS Investigation of the Chemical Characteristics of Kapton Films Ablated by a Pulsed TEA CO<sub>2</sub> Laser[J]. Surface and Coatings Technology, 2002, 153(2): 210-216.
- [9] KONNO H, SHIBA K, KABURAGI Y, et al. Carbonization and Graphitization of Kapton-type Polyimide Film Having Boron-bearing Functional Groups[J]. Carbon, 2001, 39(11): 1731-1740.
- [10] YIN C Q, DONG J, TAN W J, et al. Strain-induced Crystallization of Polyimide Fibers Containing 2-(4-aminophenyl)-5-aminobenzimidazole Moiety[J]. Polymer, 2015, 75: 178-186.
- [11] 牛鸿庆, 张梦颖, 周康迪, 等. 高强高模聚酰亚胺纤维的耐环境影响性能研究[J]. 工业技术创新, 2014, 1(1): 43-49.  
NIU Hong-qing, ZHANG Meng-ying, ZHOU Kang-di, et al. Environmental Resistance Investigation of Polyimide Fibers with High Strength and High Modulus[J]. Industrial Technology Innovation, 2014, 1(1): 43-49.
- [12] ZHAO Y N, WANG M H, TANG Z F, et al. ESR Study of Free Radicals in UHMW-PE Fiber Irradiated by Gamma Rays[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2010, 79(4): 429-433.
- [13] SZÖCS F, BECHT J, FISCHER H. On Free Radical Recombination in Irradiated and in Strained Fibers of Polyamides[J]. European Polymer Journal, 1971, 7(2): 173-179.
- [14] ZHAO Y, FENG T, LI G M, et al. Synthesis and Properties of Novel Polyimide Fibers Containing Phosphorus Groups in the Main Chain[J]. RSC Advances, 2016(6): 42482-42494.
- [15] 沈自才, 佟欣, 武博涵. 电子辐照聚酰亚胺薄膜力学性能演化机理研究[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28(5): 199-204.  
SHEN Zi-cai, TONG Xin, WU Bo-han. Mechanical Property Evolution Mechanism of Polyimide Film under Electron Irradiation[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28(5): 199-204.
- [16] 杨小勇. 方差分析法浅析——单因素的方差分析[J]. 实验科学与技术, 2013, 11(1): 41-43.  
YANG Xiao-yong. Variance Analysis: The Single Factor Variance Analysis[J]. Experiment Science and Technology, 2013, 11(1): 41-43.
- [17] MATHAKARI N L, BHORASKAR V N, DHOLE S D. 6 MeV Pulsed Electron Beam Induced Surface and Structural Changes in Polyimide[J]. Materials Science

- and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology, 2010, 168(1): 122-126.
- [18] 张帆, 沈自才, 冯伟泉, 等. 均苯型聚酰亚胺薄膜在质子辐照下的力学性能退化试验研究[J]. 航天器环境工程, 2012, 29(3): 83-87.
- ZHANG Fan, SHEN Zi-cai, FENG Wei-quan, et al. The Effect of Space Proton Environment on Mechanical Properties of Polypyromellitimide Film[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2012, 29(3): 83-87.
- [19] 沈自才, 张帆, 高鸿. 质子辐照聚酰亚胺薄膜的力学性能退化机理[J]. 宇航材料工艺, 2015, 45(2): 68-72.
- SHEN Zi-cai, ZHANG Fan, GAO Hong. Mechanical Property Degradation Mechanism of Polyimide Film by Proton Radiation[J]. Aerospace Materials & Technology, 2015, 45(2): 68-72.
- [20] 李鹏. 应力场与带电粒子辐照耦合作用下聚酰亚胺薄膜的损伤行为[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- LI Peng. Damage Behavior of PI Film under Coupling Effects of Stress Filed and Charged Particle Irradiation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.