

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.07.028

等离子体改性高性能纤维材料反应机理研究进展

向坤¹,熊德永¹,陆轴¹,周筑文¹,李扬²,罗筑²

(1. 贵州师范学院物理与电子科学学院, 贵阳 550018; 2. 贵州大学材料与冶金学院, 贵阳 550025)

摘要:介绍了等离子体技术改性高性能纤维界面活性粒子产生、获得活性反应粒子机理过程以及相互作用的反应模型;为适应电子、航空、生命科学、武器构件等领域技术对高性能材料需求,分别对芳纶纤维、碳纤维、玻璃纤维、超高分子量聚乙烯纤维及其它高性能纤维界面改性机理应用研究做了理论性分析。

关键词:等离子体;改性;纤维;反应机理

中图分类号: TQ342 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)07-0148-06

Research Progress in Reaction Mechanism of Plasma Modified High Performance Fiber Materials

Xiang Kun¹, Xiong Deyong¹, Lu Zhou¹, Zhou Zhuwen¹, Li Yang², Luo Zhu²

(1. School of Physics and Electronic Science, Guizhou Education University, Guiyang 550018, China;

2. College of Materials and Metallurgy, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: The generation of active particles at the interface of high performance fiber modified by plasma technology, the mechanism of obtaining active reactive particles and the reaction model of interaction were introduced. In order to meet the needs of high performance materials in the fields of electronics, aviation, life science, weapon components and other technologies, the application research of interfacial modification mechanism of aramid fiber, carbon fiber, glass fiber, ultra-high molecular weight polyethylene fiber and other high-performance fibers was analyzed theoretically.

Keywords: plasma; modification; fiber; reaction mechanism

等离子体改性是一种由中性粒子与高能带电粒子组成离子体的综合改性技术,可在常压条件下进行,具有无污染、能耗低、环保等特点。由于等离子体对材料界面改性处理,发生在距材料表面 100 nm 以内的厚度范围,因此不会影响纤维的本体特征,使高性能纤维在维持自身优良性能的基础上应用于高性能复合材料。等离子体改性纤维界面技术的实质是活性粒子引发高聚物表面变化获得自由基的过程;而纤维界面自由基随后可进行自由基转移、耦合、裂解和氧化等一系列反应,在纤维界面形成具有一定活性的基团;同时,纤维界面还可以经等离子处理技术进行刻蚀,使纤维表面的粗糙度增加,改善纤维的表面性能^[1-3]。

高性能纤维有别于普通商品纤维,其具有模量高、耐高温、耐酸碱、强度大、耐辐射等性能,常作为复合材料的增强

基体赋予材料良好的使用性能,广泛应用于电子元件、生命科学、建筑工程、航空航天、工业等领域^[4-5]。高性能纤维以芳纶纤维、超高分子量聚乙烯 (PE-UHMW) 纤维、玻璃纤维、碳纤维为主要代表,随着应用领域不断扩展,其所制备的材料逐渐被应用于高科技、低污染的先进材料领域。但受到高性能纤维自身分子结构结晶度高、规整、界面活性点低等因素的影响,导致高性能纤维发展应用缓慢,基于此,高性能纤维未来发展的方向将致力于研究纤维的结构与性能的关系。为此笔者分类重点介绍并分析等离子体技术处理高性能纤维的界面机理,为高性能纤维进一步推广应用提供理论参考^[6-7]。

1 等离子体活性粒子改性过程分析

等离子体处理有机聚合物材料界面,无论参加介质是

基金项目: 贵州省科技厅自然科学基金项目 (黔科合基础 [2019]1243), 贵州省科技厅自然科学基金项目 (黔科合平台人才 [2018]5778-02), 贵州省教育厅自然科学基金项目 (黔教合 KY 字 [2017]208), 贵州省省级“物理学”一流专业 (黔财教 2020[9]号)

通讯作者: 罗筑,教授,博士生导师,主要从事聚合物材料改进研究 E-mail: luozhu2000@sina.com

收稿日期: 2020-04-24

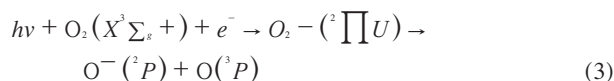
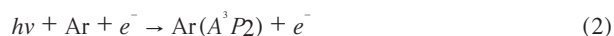
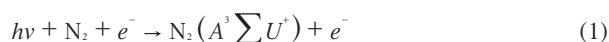
引用格式: 向坤,熊德永,陆轴,等. 等离子体改性高性能纤维材料反应机理研究进展 [J]. 工程塑料应用,2020,48(7): 148-153.

Xiang Kun, Xiong Deyong, Lu Zhou, et al. Research progress in reaction mechanism of plasma modified high performance fiber materials[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(7): 148-153.

活性气体还是惰性气体,在电场高能作用下,有机聚合物材料与之接触只要数十秒到几分钟,界面反应效果明显。现主要以氩气、氧气为例探讨活性粒子改性过程。

1.1 活性粒子产生

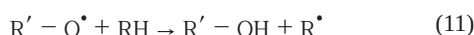
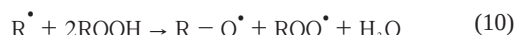
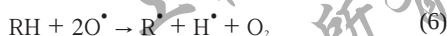
通过等离子体辐射的紫外光高能电子与中间气态分子混合相互作用,这些由电子激发产生的活性物质,即参加反应的活性种粒子,其产生过程如下^[8-9]:



式中: $h\nu$ ——等离子体辐射的紫外光能。

1.2 活性粒子反应机理

等离子体产生的活性种粒子与有机聚合物材料界面将会发生原子与分子自合反应、生成氢自由基、氧自由基等一系列反应,同时,新生成的自由基还可以继续参加有机界面反应引入官能团,或者与有机聚合物中的高分子单体反应形成界面交联结构层或者界面接枝层。其主要反应过程大致如下^[10]:



以上各式中: $R^\cdot$ 表示由有机聚合物高分子界面形成的自由基, RH 表示聚烯烃类碳氢高分子有机物, $ROO^\cdot$ 表示含氧类有机高聚物。经等离子体处理纤维界面生成的自由基,能与特定官能团继续进行反应,由于官能团的引入,界面活性改变,使得纤维界面性质随之改变,主要体现在界面引入的含氧活性基团与氧等离子接触时,界面含氧基团会羧基化或者羟基化,使得界面含氧基团浓度增加,达到改善有机聚合物材料的粘接性与浸润性的目的^[11]。

1.3 活性粒子与聚合物材料界面相互作用模型

等离子体对聚合物材料表面改性只影响界面结构表层,从上述等离子体界面改性机理可知,等离子体中存在的自由基、原子、亚稳态、高能电子、中性粒子及正负离子等活性粒子与聚合物材料表面会发生化学或物理等相互作用。因此等离子体中的处理时间、频率、气压、电源功率及气体组分等成为研究等离子体状态的影响因素,也是对等离子体改性

纤维表面起决定性作用。

在惰性气体等离子体中,聚合物材料表面的粗糙度也会产生变化,主要是聚合物材料界面分子受到高能粒子的撞击,发生刻蚀作用,能量足够时,等离子体中的部分活性基团会与聚合物界面被打断的大分子链的末端进行反应,生成新的活性基团。因此,聚合物材料表面与等离子体相互作用过程,难找到一个主要影响聚合物界面改性的因素,反应也是非常复杂的一个过程。图1为等离子体活性粒子与聚合物材料表面活性基团相互作用的模型图^[12-13]。

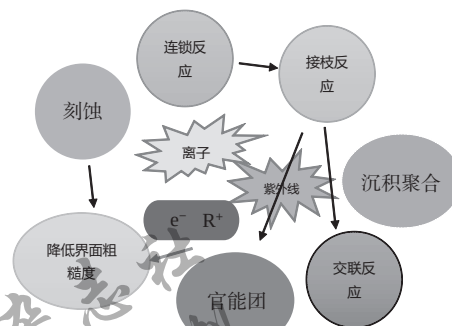


图1 等离子体与界面粒子相互作用模型

2 等离子体改性各类高性能纤维机理分析

2.1 探讨芳族聚酰胺类纤维等离子体改性机理

芳纶纤维材料具有耐疲劳性好、耐高温、模量高、耐腐蚀、强度大等特征,应用领域处于高性能纤维之首。同时,因芳族聚酰胺大分子结构中酰胺键位置的不同,使其有别于其它高性能纤维,具有独特性能,如良好的柔性,耐有机溶剂、润滑剂性。芳族聚酰胺纤维种类较多,主要分为间位芳纶和对位芳纶。由此,分子结构中纤维界面活性点低,基团位阻大。为改善纤维界面活性,也为解决化学方法处理芳纶界面损坏纤维内部结构和改性带来环境污染等问题,主要以等离子体技术对对位芳纶纤维界面进行研究,其研究机理主要分为两种反应处理方式^[14-15]:其一为高能电子直接作用在芳纶纤维界面获得含氧基团;其二为高能电子作用于活性体的中间物质,产生的活性粒子与纤维界面自由基作用,界面获得较高活性基团。

从两种等离子体处理反应过程看出,等离子体在不同环境下对芳纶纤维界面处理发生变化情况不一样,从而处理效果存在差异,高能电子对纤维界面的直接或间接作用为探索等离子体处理芳纶纤维改性技术提供理论参考。其中,张美云^[16]对比空气等离子体分别处理进口 Twaron 与芳纶 1414 以及国产芳纶 III 纤维的界面基团活性、表面接触角 θ 、界面浸润性变化,其结果见表 1。

此研究发现处理工艺条件在空气放电处理时间、气压、

功率分别为 11 min、 2×10^3 Pa、0.65 kW 时,芳纶Ⅲ表面粗糙,处理效果最好^[17]。当前对芳纶纤维界面进行等离子改性主要通过探讨处理功率、时间、介质气体流量变化等对复合材料界面强度、润湿性、粘结性、元素变化、接触角等性能影响来研究纤维界面改性机理。

表 1 不同芳纶纤维等离子体处理情况

品种	$\theta / (^{\circ})$	浸润性	亲水基团
Twaron	64.6	粗糙沟槽不明显,较弱	数量少
芳纶 1414	62.2	沟槽较明显,良好	相对较少
芳纶Ⅲ	55.8	沟槽较多,相对明显,好	较多基团

2.2 探讨碳纤维等离子体改性机理

碳纤维是指含碳量达到 90% 以上,由许多微晶堆砌而成的多晶体,且具有耐高温、模量高、强度大的无机高性能纤维。广泛应用于体育器材、汽车构件、航空航天、武器军工等领域。其轴向结合力较大,相对径向强度较弱,所以延伸度低,是一种脆性材料。根据碳纤维制备过程原材料的不同,又将其分为应用范围最广的聚丙烯腈碳纤维、吸音功能较强的沥青基碳纤维、具有储氢功能的碳纳米管碳纤维三类。由于各类碳纤维均由晶体堆砌而成,纤维表面的浸润性差、呈惰性,与有机聚合物基体界面间的范德华力减小、氢键减弱,化学键合能力降低,使纤维应力的传递效率变差,碳纤维与树脂间界面剪切强度减弱^[18-20]。碳纤维使用受到限制,为了提高碳纤维界面活性,增加界面剪切强度,即需要对碳纤维表面进行改性处理。为此以等离子体技术处理碳纤维界面研究为例,探讨等离子体处理过程中碳纤维界面基团变化特性,具体反应机理^[21]如下:

(1) 碳纤维界面基团相互作用。

碳纤维界面存在不同类型的羧基、羰基、羟基等官能团,相互可能发生反应形成酯基。在高能等离子作用下,碳纤维界面中的酮羰基,受外界氢活性粒子作用,活性粒子位置变化,活性基团产生离子过程。碳纤维界面基团分布如图 2 所示。

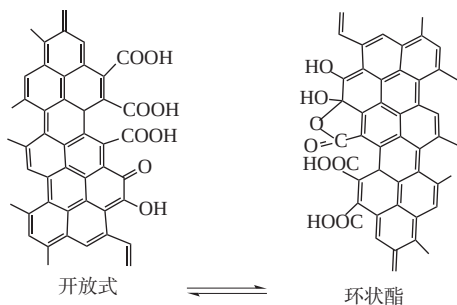


图 2 碳纤维界面基团分布

(2) 活性基团产生离子的过程。

图 3 为活性基团产生的离子过程。图 4 为碳纤维界面等离子反应过程。由以上反应过程可知,碳纤维界面官能

团包含酸性的羧基或羰基基团、中性醌类结构和碱性吡喃酮类结构,界面的含氧官能团主要控制其化学活性。G. P. Boehm^[22-23]对碳纤维界面氧化处理后,界面引入羧基、羰基或羟基等基团,通过 XPS 对界面 O/C 元素比判定界面活性高低。

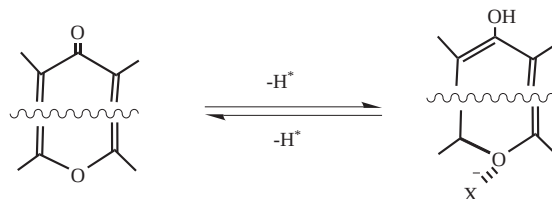


图 3 活性基团产生离子过程

(3) 碳纤维界面活性粒子整体等离子反应。

碳纤维界面活性粒子发生反应过程如图 4 所示。碳纤维分子结构中的羟基、羧基基团及与碳原子相连的氢受高能离子作用后脱落,结构中的碳氢键形成 $-C^{\cdot}$, 羟基与羧基脱氢后形成 $O-O$ 单键以及其他含氧粒子。

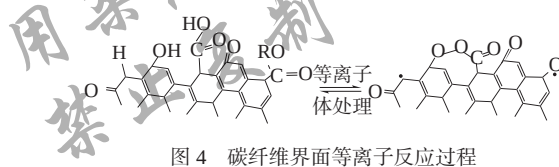


图 4 碳纤维界面等离子反应过程

2.3 探讨硅酸盐类玻璃纤维等离子体改性机理

玻璃纤维是以离心力甩成或以外力控制喷吹方法对熔融状态下的玻璃制备成纤维状材料,具有化学性质稳定、耐热性好、强度大、界面光滑、隔音效果好等特点,其主要含 SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO , $NaCl$ 等成分,根据化学成分不同分为无碱、低碱、中碱、高碱玻璃纤维四大类;若按照用途可分为耐酸碱、耐化学腐蚀、耐电腐蚀、低介电、高强度玻璃纤维五类;由此从用途分类上可以看出,它具有良好的拉伸和冲击强度、绝缘性能、耐热性等优点,是无机非金属材料中性能较好的一种,但存在易被无机酸侵蚀的缺点,在酸性条件下不适用。玻璃纤维单独使用研究较少,而是经过改性赋予特殊性能^[5],主要以介绍 SiO_2 和金属 $Na-SiO_2$ 晶体结构的玻璃纤维如图 5 所示。

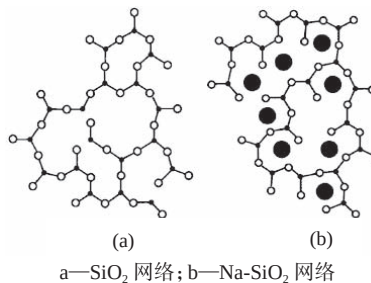


图 5 玻璃纤维分子结构

探讨等离子处理玻璃纤维与其它基体制备复合材料,赋予新性能的研究。其改性过程主要从两大研究方向,即同有机环氧类和金属单体类反应进行机理探讨。

(1) 等离子处理玻璃纤维与环氧树脂反应机理。

两者反应机理如图6所示。由图6可知,玻璃纤维置于等离子体处理过程中,当辉光放电时,除了产生活性粒子 N^+ 外,还会产生 N^- 离子,使玻璃纤维界面形成 MN (M 为玻璃纤维晶体)的结构,再与环氧树脂结合,在其表面形成氢键,但是氢键的键能比玻纤键能小,由此在界面处形成相对较弱的化学键,使得两大基体间粘结性更稳定^[24]。V. Cech等^[25]对玻璃纤维采用氧等离子体进行处理,将等离子处理放电功率 P 控制在 $0.1\sim 10\text{ W}$ 之间,测试玻璃纤维表面的表面粗糙度、表面能和红外光谱图变化。研究得出,界面的 CH_2 , CH , $C=C$ 的吸收峰强度随放电功率增大减弱明显,但界面自由能增加了21%、界面粗糙度提高了3倍。

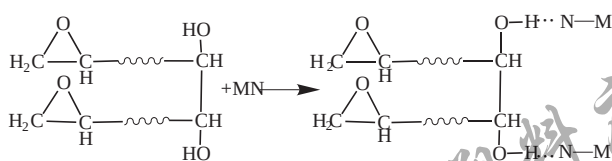


图6 玻璃纤维与环氧树脂反应机理

(2) 等离子体处理玻纤与金属结合机理。

利用氧等离子技术与浸渍法结合处理玻纤制备银-玻纤复合材料研究,研究机理模型如图7所示,玻璃纤维先经过丙酮清洗界面杂物,由氧等离子处理后,在玻璃纤维界面含有大量的羟基($-OH$),形成刷状结构,为把银包覆在玻纤表面,将纤维浸渍在含纳米银的 CH_3CH_2OH 溶液中,通过界面羟基的吸附作用,形成由“多价键合”组成的物理吸附力,达到改性效果,制备高性能复合材料^[26-27]。

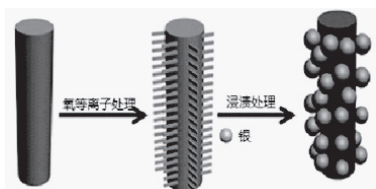


图7 银-玻璃纤维复合材料的制备机理图

2.4 探讨 PE-UHMW 类纤维等离子体改性机理

PE-UHMW 纤维是聚烯烃纤维的一种,也是除芳族聚酰胺纤维、碳纤维之后的一种高性能纤维。PE-UHMW 纤维具有强度和模量高、超轻等特点,其耐化学药品性和耐光性优于芳纶纤维,同时具有较高的耐冲击性及能量吸收能力,从而具有吸收较大能量的能力,常做防弹衣、头盔及海洋环境中使用的股绳索。但熔点较低,高温下易发生蠕变,使用性能迅速降低。PE-UHMW 纤维结晶度高、结构规整排布,

分子结构中没有活性基团;为达到纤维界面改性目的,需要纤维表面原有旧化学键受到等离子中各类粒子(光子、离子、亚稳态粒子和电子)足够大能量的冲击使 $C-C$ 和 $H-C$ 化学键断裂,继而形成新的化学键。各粒子能量与化学键能见表2、表3。

从表2、表3可以看出,除离子外,其它粒子能量均高于 $C-C$ 和 $H-C$ 化学键的键能,这表明,纤维表面的旧化学键可以被等离子体各粒子破坏而形成新键,从而使纤维表面基团获得新的活性^[5]。使用离子引发紫外聚合改性时,采用先等离子处理的方法,其反应机理可以如下表示^[28]。

表2 等离子体中各粒子能量情况

粒子	能量参数 / eV	能量参数 / eV
光子	3 ~ 40	
离子	0 ~ 2	2.6 ~ 5.2
电子	0 ~ 20	3.2 ~ 4.7
亚稳态	0 ~ 20	

表3 等离子体中化学键的能量情况

化学键	能量参数 / eV
$C-C$ 键	2.6 ~ 5.2
$H-C$ 键	3.2 ~ 4.7

等离子预处理聚乙烯纤维产生各种含氧基团如图8所示。

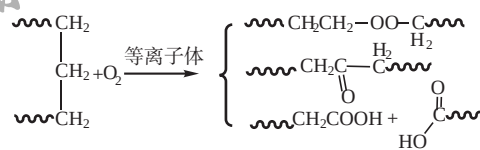


图8 等离子预处理聚乙烯纤维

等离子处理聚乙烯纤维聚合接枝反应情况如图9所示。

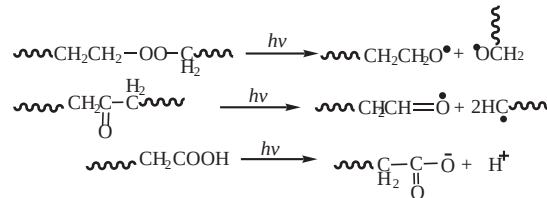


图9 等离子处理聚乙烯纤维聚合接枝反应情况

对经反应产生自由基分析,发现等离子体处理后,在基体表面生成自由基的活性基团更容易,随后再将基体放在紫外光照射下接枝,表面的活性基团通过紫外光作用快速引发,达到改性目的。吴越等^[29]对PE-UHMW纤维利用氮等离子体处理后,采用XPS检测技术追踪纤维界面N元素,在PE-UHMW纤维发现了N元素,且对复合材料界面形成了对粘结性能有很大的一 $C-N$ 新化学键,为等离子处理后的PE-UHMW纤维界面活性提供更多活性点^[30]。

2.5 探讨其它高性能纤维等离子体改性机理

在高性能纤维领域中,除了前述讨论的四大纤维外,还有玄武岩纤维、芳香族聚酰胺纤维、聚苯并咪唑(PBI)纤

维、芳香族杂环液晶聚合物纤维(PBO)。但其存在制备困难,部分合成性能不稳定,且应用范围较狭窄,由此对其研究较少。现以PBO纤维为例对等离子体处理其它高性能纤维机理进行简要分析,在PBO分子结构中的氮和碳元素存在成键状态的不同,N元素因受O原子次级诱导影响,只有一种 $C=N-C$ (398.6eV, N1),而C元素有四种成键状态: $N=C-O$ (288.1eV, C4), $C=C$ (284.4 eV, C1), $C-O$ (286.5 eV, C3) 和 $C-N$ (285.5 eV, C2),其结合能相对于其特征结合能向高能态移动了0.4 eV^[31-32]。由此,利用氧气等离子体改性PBO纤维时,可能在纤维界面发生反应的机理如图10所示。

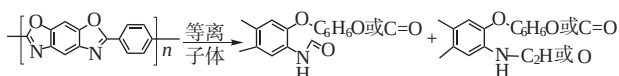


图10 等离子预处理PBO纤维界面反应

反应可以形成很多新的活性基团,如 $N-OH$, $O=C-N-H$, $O-C=O$, $N-O-OH$, $C-O-OH$ 等活性基团。图11为PBO纤维界面发生反应情况。

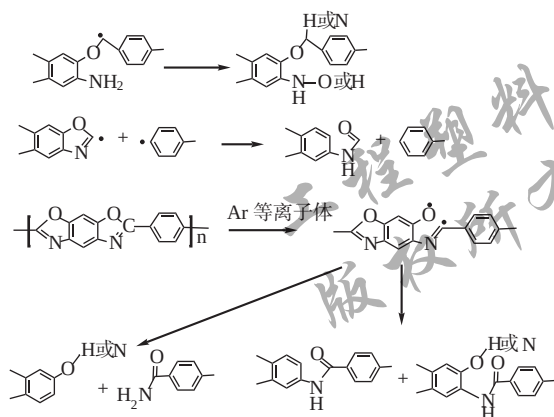


图11 PBO纤维界面发生反应情况

从图11可知,PBO纤维表面可以通过氩气等离子体改性产生较多自由基,其可通过与空气中的氧气和水反应或者发生电子转移被终止。该过程可产生有助于增强双马来酰亚胺(BMI)树脂与PBO纤维基体之间表面粘结性能的酰胺基团,但已形成的极性基团会随处理时间的延长被二次破坏^[33]。

因此,此反应机理被诸多研究者采用XPS检测技术证实,通过谱图分析未处理PBO纤维的C1s和N1s,对其分别进行拟合成多个峰值;利用氧气等离子体改性PBO纤维后,在结合能高位置的C1s能谱出现明显的吸收峰,应属于 $O=C=O$ 的峰,而高结合能位置有两个明显的峰出现在N1s能谱,应属于 $N-O(N_3)$ 和 $N-C=O(N_2)$ 的峰,所以,经等离子体改性PBO纤维的N1s和C1s峰值被拟合后,在原有峰值上增加了1~2个^[34-36]。

3 结语

通过对比分析等离子体改性芳纶纤维、PE-UHMW纤维、玻璃纤维、碳纤维以及PBO纤维界面的机理,发现,对等离子体改性纤维的研究在理论技术设计、改性工艺设置条件等方面要求严格。但高性能纤维在军事、航空航天、海洋开发、电子元器件、新材料应用、建筑等领域的需求越来越明显,尤其在高强建筑补强材料、轻质机翼、轻质防弹装甲、风机叶片等高端技术领域的应用尤为突出,为此,需对等离子体处理高性能纤维机理进行深入分析,为充分发挥高性能纤维在高端技术领域的应用提供基础理论参考。

参考文献

- [1] Yuan Hao, et al. Surface & Amp:Coatings Technology, 2018, 344:614-620.
- [2] Wang C X, et al. Applied Surface Science, 2015, 349:333-342.
- [3] Jia Caixia, et al. Applied Surface Science, 2011, 257(9):4165-4170.
- [4] Yu Hyunjin, et al. ACS applied Materials & Interfaces, 2020, 12(5):5820-5830.
- [5] 张元松. 新型纤维材料概论 [D]. 重庆:西南大学, 2012.
- [6] Zhang Yuansong. Introduction to new fiber materials [D]. Chongqing:Southwest University, 2012.
- [7] Zhou Jun, et al. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 2014, 94:30-35.
- [8] Sun Wenjun, et al. Journal of Chromatography B, 2014, 29:951-952.
- [9] 宁平,等. 材料导报, 2015, 29(21):62-67.
- [10] Ning Ping, et al. Materials Reports, 2015, 29 (21):62-67.
- [11] Moreno F, et al. Journal of Chromatography A, 2013(2):43-50.
- [12] 柯倩兰. 常压等离子体处理对国产PAN基碳纤维表面性能影响的研究 [D]. 上海:东华大学, 2011.
- [13] Ke Qianlan. Study on the influence of atmospheric pressure plasma treatment on the surface properties of PAN based carbon fiber [D]. Shanghai:Donghua University, 2011.
- [14] 潘贤林. 常压等离子体处理对PBO纤维表面性能影响研究 [D]. 上海:东华大学, 2010.
- [15] Pan Xianlin. Study on the influence of atmospheric pressure plasma treatment on the surface properties of PBO fiber [D]. Shanghai:Donghua University, 2010.
- [16] 刁颖. 常压等离子体对高性能纤维表面改性处理研究 [D]. 上海:东华大学, 2011.
- [17] Diao Ying. Surface modification of high performance fiber by atmospheric pressure plasma [D]. Shanghai:Donghua University, 2011.
- [18] Mao Xiangju, et al. Journal of Chromatography A, 2011,

- 10(1):1-9.
- [14] 刘丽,等. 高科技纤维与应用,2002(4):12-17.
Liu Li, et al. High Tech Fiber and Application, 2002(4):12-17.
- [15] Karim Biswas M A, et al. Textile Research Journal, 2013, 83(4):406-417.
- [16] 张美云,等. 中国造纸学报,2006(3):72-76.
Zhang Meiyun, et al. High Tech Fiber and Application, 2006 (3):72-76.
- [17] 王红红,等. 合成纤维工业,2016,39(6):30-33.
Wang Honghong, et al. China Synthetic Fiber Industry, 2016, 39(6):30-33.
- [18] 何焱,等. 弹性体,2015,25(6):76-81.
He Ye, et al. China Elastomer, 2015, 25(6):76-81.
- [19] 王存涛. 离子体改性 PAN 基碳纤维 / 聚酰亚胺界面强度的研究 [D]. 上海: 东华大学, 2011.
Wang Cuntao. Study on the interfacial strength of PAN based carbon fiber / polyimide modified by plasma[D]. Shanghai:Donghua University, 2011.
- [20] 高明,等. 集成技术,2018,7(4):16-23.
Gao Ming, et al. Journal of Integration Technology, 2018, 7(4):16-23.
- [21] 欧阳洁. 常压 DBD 等离子体处理及其接枝对碳纤维表面性能影响的研究 [D]. 上海: 东华大学, 2012.
Ou Yangjie. Study on the influence of atmospheric pressure DBD plasma treatment and grafting on the surface properties of carbon fiber[D]. Shanghai:Donghua University, 2012.
- [22] Boehm G P, et al. Ploym, 1968, 227:17.
- [23] Kontes-Moran M A, et al. Carbon, 2005, 43:1 795-1 799.
- [24] 王德生,等. 西安交通大学学报,1989(5):27-33.
Wang Desheng, et al. Journal of Xi' an Jiaotong University, 1989 (5):27-33.
- [25] Cech V, et al. Composites Part AApplied Science & Manufacturing, 2014, 58(3):84-89.
- [26] 路平,等. 材料研究学报,2015,29(1):45-50.
Lu Ping, et al. Chinese Journal of Materials Research, 2015, 29(1):45-50.
- [27] Abolfazl S, et al. Journal of Chromatography B, 2009, 877(18):1 758-1 764.
- [28] 张驰. 等离子接枝对超高分子量聚乙烯纤维表面性能的影响 [D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
Zhang Chi. The effect of plasma grafting on the surface properties of UHMWPE fiber[D]. Chongqing:Chongqing University, 2006.
- [29] 吴越,等. 功能高分子学报,2001(1):76-80.
Wu Yue, et al. Journal of Functional Polymers, 2001(1):76-80.
- [30] 吴越,等. 功能高分子学报,2001(2):190-194.
Wu Yue, et al. Journal of Functional Polymers, 2001(2):190-194.
- [31] Liu Dong, et al. Surface & Coatings Technology, 2012, 206(16):3 534-3 541.
- [32] 张晓亮. 常压氧气 DBD 等离子体对 PBO 纤维及 PBO/BMI 复合材料界面性能的影响 [D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
Zhang Xiaoliang. Influence of atmospheric pressure oxygen DBD plasma on the interfacial properties of PBO fiber and PBO / BMI composite[D]. Dalian:Dalian University of Technology, 2014.
- [33] 陈明新. PBO 纤维表面等离子体改性及 PBO/BMI 复合材料界面粘结性能的研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
Chen Mingxin. Study on plasma modification of PBO fiber surface and interfacial adhesion of PBO / BMI composite[D]. Dalian:Dalian University of Technology, 2012.
- [34] Ebrahimzadeh H, et al. Talanta, 2012, 94:77-83.
- [35] Chen Beibei, et al. Journal of Chromatography A, 2012, 1 227:19-28.
- [36] Filipe D P, et al. Journal of Chromatography A, 2009, 1 216(42):7 049-7 054.