复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica
第 37 卷 第 3 期 3 月 2020 年
Vol. 37 No. 3 Mar 2020

DOI：10.13801/j.cnki.fhclxb.20190705.001

超高分子量聚乙烯(UHMWPE)纤维表面处理对UHMWPE/环氧树脂复合材料界面性能的影响机制

贾彩霞[1,2]，王乾*[1]，任荣[2]，任志磊[1]

(1. 沈阳航空航天大学 航空宇航学院，沈阳 110136；2. 先进聚合物基复合材料辽宁省重点实验室，沈阳 110136)

摘 要： 从工程化应用角度研究了常压空气等离子体改性对超高分子量聚乙烯(UHMWPE)纤维/环氧树脂复合材料界面性能的调节机制，主要分析了不同处理时间对 UHMWPE 纤维表面状态变化的影响，及其对 UHMWPE/环氧树脂复合材料界面黏结性能的影响规律。采用 SEM 及纤维吸水测试研究了等离子体处理对 UHMWPE 纤维表面物理形貌及纤维表面浸润性能的影响，分别以拉伸和弯曲的方式，通过纤维表面脱黏力及层合板层间剪切强度对 UHMWPE/环氧树脂复合材料的界面黏结性能进行表征。结果表明，仅经过 4 s 的空气等离子体处理之后，UHMWPE 纤维表面脱黏力的提高幅度为 84.0%，UHMWPE/环氧树脂复合材料层合板的层间剪切强度由未处理的 7.01 MPa 提高至 15.81 MPa，增幅高达 125.5%。研究发现，通过常压空气等离子体处理改变了 UHMWPE 纤维的表面状态，可以显著高效地调节 UHMWPE/环氧树脂复合材料的界面性能，为扩大该材料的后续工程化应用提供了理论基础。

关键词： 超高分子量聚乙烯(UHMWPE)纤维；环氧树脂；等离子体改性；复合材料；界面黏结

中图分类号： TB332 **文献标志码：** A **文章编号：** 1000-3851(2020)03-0573-08

Influence mechanism of ultra high molecular weight polyethylene(UHMWPE) fiber surface modification on interfacial performance of UHMWPE/epoxy composites

JIA Caixia[1,2], WANG Qian*[1], REN Rong[2], REN Zhilei[1]

(1. College of Aerospace Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;
2. Liaoning Key Laboratory of Advanced Polymer Matrix Composites, Shenyang 110136, China)

Abstract: The interface-regulating mechanisms of atmospheric air plasma modification for ultra high molecular weight polyethylene (UHMWPE) fiber/epoxy composites were investigated from the perspective of engineering application. The influence of plasma treatment duration on UHMWPE fiber surface properties and the interfacial adhesion of UHMWPE/epoxy composites was mainly researched. The SEM and surface water absorption tests were chosen as characterization methods to study the effects on UHMWPE fiber surface morphologies and surface wettability, respectively. Furthermore, the UHMWPE/epoxy composite interfacial adhesion was characterized based on both of the fiber surface adhesion test and the interlaminar shear strength test of laminates by using the stretching load and the bending load, respectively. The results show that the UHMWPE fiber surface adhesion is increased by 84.0% after plasma treatment for only 4 s, and specially the interlaminar shear strength value of UHMWPE/epoxy composite laminates is increased from 7.01 MPa to 15.81 MPa with the increment of 125.5%. These results indicate that the interfacial properties of UHMWPE/epoxy composites can be regulated notably and effectively by UHMWPE fiber surface air-plasma treatment, providing a theoretical basis for its subsequent expanded engineering ap-

收稿日期： 2019-03-21；**录用日期：** 2019-06-10；**网络出版时间：** 2019-07-08 13:10
网络出版地址： https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190705.001
基金项目： 辽宁省自然科学基金(20180550222)；辽宁省教育厅科学研究项目(L201751)；沈阳航空航天大学引进人才科研启动基金(18YB48)
通信作者： 王乾，博士，讲师，研究方向为航空复合材料构件制造技术 E-mail：wangqian@sau.edu.cn
引用格式： 贾彩霞，王乾，任荣，等. 超高分子量聚乙烯(UHMWPE)纤维表面处理对 UHMWPE/环氧树脂复合材料界面性能的影响机制[J]. 复合材料学报，2020，37(3)：573-580.
JIA Caixia, WANG Qian, REN Rong, et al. Influence mechanism of ultra high molecular weight polyethylene(UHMWPE) fiber surface modification on interfacial performance of UHMWPE/epoxy composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(3): 573-580 (in Chinese).

http://fhclxb.buaa.edu.cn

plication.

Keywords: ultra high molecular weight polyethylene (UHMWPE) fiber; epoxy; plasma modification; composites; interfacial adhesion

耐磨、抗疲劳、耐化学、耐环境性能优异的超高分子量聚乙烯(UHMWPE)纤维，是目前已知的密度最低、比强度和比刚度最大的纤维，与碳纤维、芳纶纤维并称世界三大高性能纤维，被广泛应用于众多领域[1-2]。特别是UHMWPE纤维的断裂伸长率、抗冲击性及能量吸收能力均优于芳纶，在防弹防护领域逐渐呈现替代传统芳纶纤维的态势[3]。由于其介电性能优良，UHMWPE纤维增强树脂复合材料在雷达罩、天线罩等透波制件领域也有着广泛的应用前景。在拥有上述优异性能的同时，UHMWPE纤维具有高结晶度、高取向度及亚甲基长直链结构的高度稳定性，使纤维表面光滑平整，无极性基团，表面能极低，呈现高度的化学惰性和疏水性能，UHMWPE纤维作为复合材料的增强相却难以与基体相形成良好的界面黏合，将直接导致其复合材料在受到层间剪切、横向拉伸等作用力时容易发生脱黏和分层现象，从而极大地降低材料强度，严重限制了UHMWPE纤维这种轻质增强材料在航空航天、军工等领域中的应用[4-5]。

国内外常用化学或物理改性方法对纤维增强体进行表面处理。前者可以通过化学试剂在纤维表面引入反应性基团，改善表面化学活性[6-8]，后者则主要通过等离子体、激光束、射线辐照等物理手段改善纤维的表面性能[9-11]。基本原理均是通过化学键合或氢键、范德华力等作用增强纤维与树脂间的界面黏结作用，及通过增加纤维表面自由能和粗糙度提高纤维对树脂的浸润性和附着力。由于化学方法通常涉及改性程度不易控制及环境问题，因此等离子体处理作为一种工艺简单、环境友好的物理改性方法被广泛应用于研究中。为了改善UHMWPE材料的表面浸润性能并且保持其本体性能不受损伤，Rodrigues等[12]采用低压射频等离子体，以处理时间、处理功率和氧含量作为影响因素进行研究，当处理时间为15 min、处理功率为27 W、氧含量为20vol%时，UHMWPE取得较好的浸润性能。Shi等[13]采用常压Ar等离子体在UHMWPE表面引入了亲水性基团，对于增加其作为医用材料的耐久性具有良好效果。为了增强UHMWPE纤维作为复合材料增强体的表面黏结性能，任煜等[14]采用空气介质阻挡放电等离子体改性UHMWPE纤维并取得明显效果，经测试表明，UHMWPE纤维的表面黏结力由改性之前的1.27 MPa最高可增大为2.10 MPa，增长率为65%。

近年来，等离子体技术在UHMWPE材料的表面改性中逐渐得到研究者的认可，取得了系列研究成果，但因受制于低压等离子体需要真空处理环境，而常压等离子体工艺成熟度较低等局限性，目前尚缺乏从工程化应用角度分析UHMWPE连续纤维增强树脂复合材料界面问题的相关研究。为了积累并完善UHMWPE连续纤维表面改性的理论数据以扩大其后续工程化应用，本研究选用可以实现在线连续处理的常压空气等离子体对UHMWPE纤维进行表面改性，并分析了该技术对UHMWPE纤维/环氧树脂(EP)复合材料界面性能的影响机制，着重以层合板的层间剪切强度(ILSS)提高作为评估材料工程应用安全性的考察点，探索有效提升UHMWPE/EP复合材料界面黏结性能的技术方法。

1　实验材料及方法

1.1　原材料

本研究所用的主要实验材料如表1所示，其中，UHMWPE纤维的产品参数如表2所示。

1.2　复合材料的制备

1.2.1　实验准备

纤维排布：将商品化UHMWPE纤维轴固定于放线设备上，牵引纤维按照一定空间排布连续通过敞开式常压空气等离子体放电区域，然后缠绕于收线设备固定的空纤维轴上，以待后续改性处理。

基体配置：将环氧树脂(EP)和固化剂按照EP：异佛尔酮二胺(IPDA)：4,4-二氨基二苯甲烷(DDM)=12：1：2(质量比)混合均匀，配制树脂胶液，该体系常温条件下的凝胶时间约为5 h。

1.2.2　复合材料的制备

针对温度耐受性较差的UHMWPE纤维，本研究将等离子体处理功率设置为30 W·cm^{-3}，处理时间参数在0～9 s范围内连续可调，然后分别选取2 s、4 s、6 s和8 s作为参考点进行数据分析。由于采用敞开式常压空气等离子体操作平台，处理纤

表 1 主要实验材料

Table 1 Main experimental materials

Material	Abbreviation	Manufacturer
Ultra high molecular weight polyethylene	UHMWPE	Royal DSM N. V.
Epoxy (E51)	EP	Nantong Star Synthetic Materials Co., Ltd.
Isophorondiamine	IPDA	Shenzhen No. 1 Advanced Materials Co., Ltd.
4,4-diaminodiphenyl methane	DDM	Shandong Xiya Chemical Industry Co., Ltd.
Dibutyl sebacate	—	Tianjin Damao Chemical Reagent Factory

Note: Epoxy value of the epoxy is 0.51.

表 2 超高分子量聚乙烯(UHMWPE)纤维基本参数

Table 2 Essential parameters of ultra high molecular weight polyethylene(UHMWPE) fiber

	D/dtex	ρ/(g·cm^{-3})	R_m/GPa	E_m/GPa	δ/%	Crystalline/%	ε
Trevo®70	440	0.97	3.1	121	2—3	>90	1.4

Notes: D—Linear density; ρ—Density; R_m—Tensile strength; E_m—Elastic modulus; δ—Elongation at break; ε—Dielectric constant.

维的总长度不限，根据实际需求设定即可。

将 10 mg 树脂胶液滴落在 UHMWPE 纤维束表面(埋长设定为 4 mm)，待树脂微球固化后采用拉伸方式进行纤维表面脱黏力测试平行实验。

将 UHMWPE 纤维单丝的两端固定在坐标纸框上(单丝直径为25.9 μm，计量长度为 25 mm)制成拉伸试样，然后进行纤维单丝拉伸强度测试平行实验。

通过自制预浸料成型机将等离子体改性前后的 UHMWPE 纤维浸渍 EP 胶液制备单向预浸料，采用模压工艺将 UHMWPE/EP 单向预浸料制备成层合板，控制层合板中纤维的质量分数为60wt%±3wt%。

研究中涉及的 UHMWPE 纤维及 UHMWPE/EP 复合材料层合板编号如表 3 所示。

表 3 UHMWPE 纤维及 UHMWPE/环氧树脂(EP)复合材料层合板编号

Table 3 Codes of UHMWPE fiber and UHMWPE/epoxy (EP) composites

Treatment time/s	Fiber code	Composite code
0	UHMWPE-0	UHMWPE-0/EP
2	UHMWPE-2	UHMWPE-2/EP
4	UHMWPE-4	UHMWPE-4/EP
6	UHMWPE-6	UHMWPE-6/EP
8	UHMWPE-8	UHMWPE-8/EP

Note: The treat power is 30 W·cm^{-3}.

1.3 性能测试与表征

1.3.1 纤维表面形貌分析

采用 SEM(SU3500，日立公司)对等离子体处理前后 UHMWPE 纤维的表面形貌进行表征，加速电压为 10 kV，放大倍数为 2 000 倍。

1.3.2 纤维吸水量测量

采用精密电子天平(BSM-120.4，上海卓精电子科技有限公司)对等离子体处理前后的 UHMWPE 纤维浸水质量变化进行测量，选取 300 mm±5 mm作为试样的计量长度，浸水时间为 5 min，纤维质量精确到 0.0001 g，本测试每组试样测量个数不少于 5 个，得到质量变化分别为 Δm_1、Δm_2、Δm_3、Δm_4 和 Δm_5，然后取平均值作为试样的吸水质量 $\overline{\Delta m}$，最后由 $\overline{\Delta m}$ 与试样质量的比值计算吸水增量。

1.3.3 纤维表面脱黏力及本体力学性能评估

采用指针式推拉计(NK-100，宁波凯诺仪器有限公司)测量不同等离子体处理时间下 UHMWPE 纤维表面脱黏力及单丝拉伸强度的变化，调节指针式推拉计的工作模式为荷重峰值测试，在测量时保持纤维方向与其受拉伸力方向一致。纤维束表面的树脂微球脱黏后所记录的读数即为 UHMWPE 纤维表面脱黏力数值；等离子体处理前后 UHMWPE 纤维单丝拉断时所记录的读数与单丝截面积的比值即为 UHMWPE 纤维单丝拉伸强度值。每组测试 10 个试样，取其平均值。

1.3.4 复合材料层间剪切强度分析

根据标准 ASTM D2344M—16[15]，采用三点式短梁弯曲法对等离子体处理前后的 UHMWPE/EP 复合材料层间剪切强度进行评估分析。

2 结果与讨论

2.1 等离子体改性对 UHMWPE 纤维表面形貌的影响

图 1 为经过不同时间等离子体处理前后 UHMWPE纤维表面形貌的 SEM 图像。可以看出，

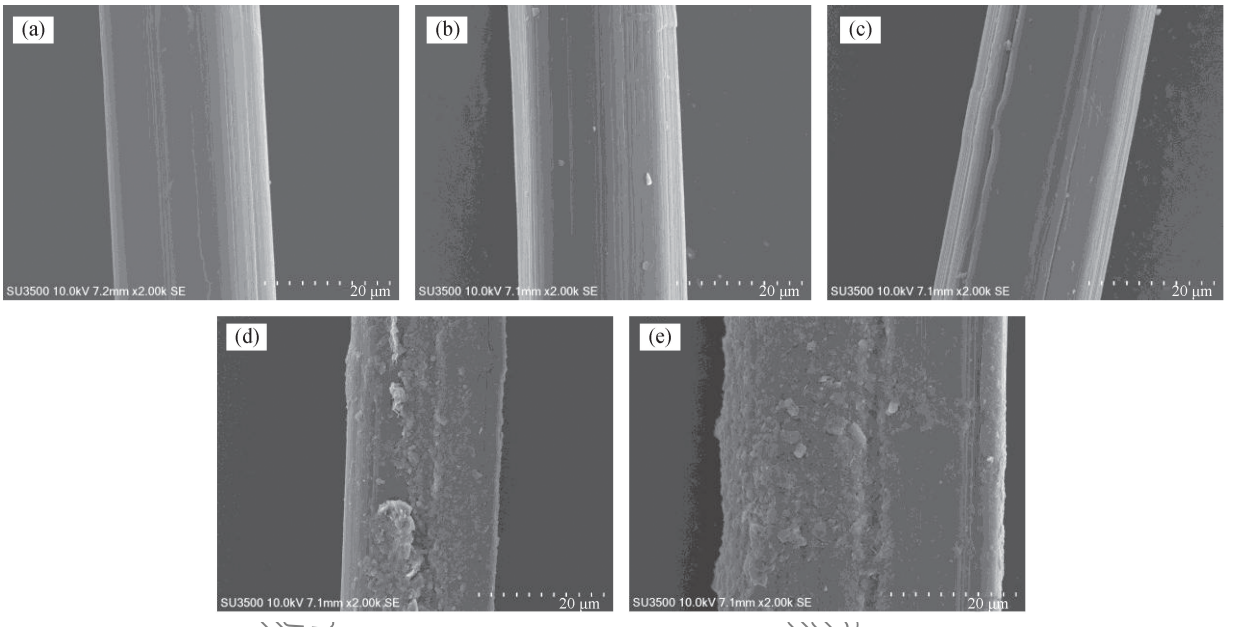


图 1　UHMWPE 纤维表面改性前后的 SEM 图像

Fig. 1　SEM images of UHMWPE fiber surface before and after treatment

((a) UHMWPE-0; (b) UHMWPE-2; (c) UHMWPE-4; (d) UHMWPE-6; (e) UHMWPE-8)

未经等离子体处理的 UHMWPE 纤维表面光滑，沿纤维轴向均匀分布着很浅的沟槽纹理，这是凝胶纺丝工艺制备 UHMWPE 纤维所具有的典型表面特征[16]。随着等离子体处理时间的增加，UHMWPE 纤维表面的沟槽结构特征逐渐加深，最后出现表面熔融现象。

首先，经过等离子体处理后，UHMWPE 纤维表面物理形貌的变化非常明显，对于 UHMWPE-2 纤维和 UHMWPE-4 纤维，主要体现在纤维表面沟槽逐渐变宽、变深、数量增加，同时表面出现一些颗粒状凸起结构，如图 1(b)和图 1(c)所示，因此相比于 UHMWPE-0 纤维，等离子体处理使纤维表面的粗糙程度明显增加。随着等离子体处理时间的进一步延长，纤维表面出现局部受热熔融现象，如图 1(d)所示，UHMWPE-6 纤维表面形貌变得非常复杂，特别是 UHMWPE-8 纤维，如同 1(e)所示，熔融程度已经覆盖大部分纤维表面，且单丝之间出现了黏连状态。UHMWPE 纤维表面粗糙结构的出现及表面形貌的复杂化有益于后续复合材料界面黏结性能的提高[17-18]，但较严重的表面刻蚀作用，尤其是单丝之间的黏连现象，可能会严重影响树脂基体对纤维表面的浸润行为及复合材料的力学性能。

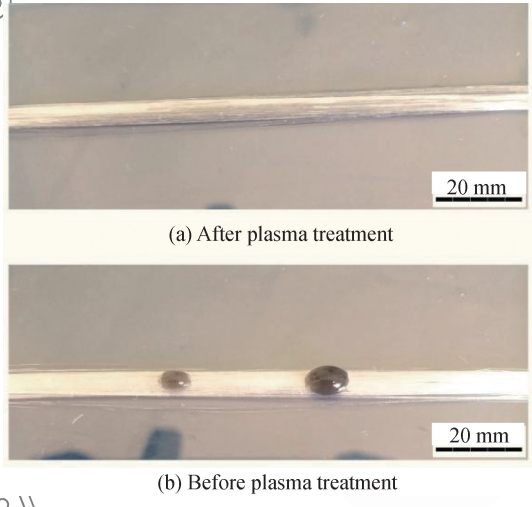


图 2　等离子体处理前后 UHMWPE 纤维表面滴水实验照片(处理时间为 4 s)

Fig. 2　Photos of UHMWPE fiber with water droplets before and after plasma treatment(treat time is 4 s)

2.2　等离子体改性对 UHMWPE 纤维浸润性能的影响

图 2 为等离子体处理前后 UHMWPE 纤维表面的滴水实验照片(处理时间为 4 s)。可以看出，未改性的 UHMWPE 纤维疏水而改性后 UHMWPE 纤维亲水，浸润性能具有显著变化，说明常压空气等离子体对 UHMWPE 纤维的改性效果明显。

图 3 为等离子体改性前后 UHMWPE 纤维吸水量变化。通过纤维表面吸水增量的变化趋势来表征等离子体改性作用对纤维表面浸润性能的影响规

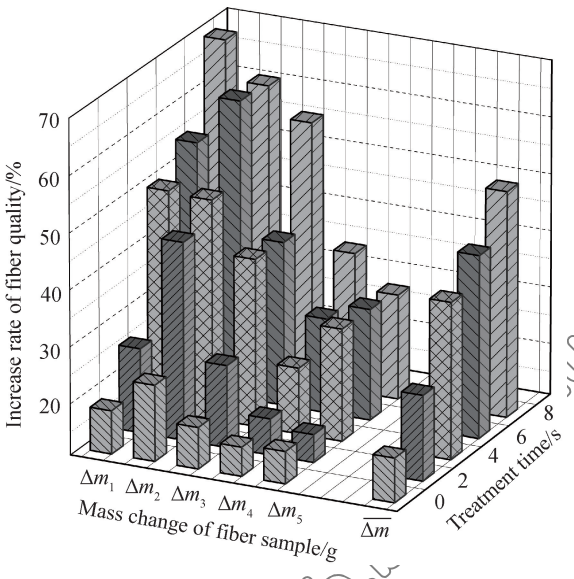


图 3 等离子体改性前后 UHMWPE 纤维吸水量变化

Fig. 3 Variation of water absorption of UHMWPE fibers before and after plasma treatment

律。可知，UHMWPE-0 纤维的吸水增量为 18.82%，考虑到 UHMWPE 纤维的疏水特性，这可能是由于自由态的水被纤维束所束缚导致的吸水增量。但随着等离子体处理时间的延长，UHMWPE纤维的吸水增量呈明显增大趋势，UHMWPE-2 纤维、UHMWPE-4 纤维、UHMWPE-6 纤维和 UHMWPE-8 纤维的吸水增量分别为 26.06%、38.68%、43.24%和 50.84%，表明常压空气等离子体处理对 UHMWPE 纤维表面的浸润性能具有改善作用。

其中，采用较短时间的等离子体处理(如 2 s、4 s)对 UHMWPE 纤维表面进行改性所引起的吸水增量属于有效增量，依据材料的表面自由能测试和计算方法[19]可知，其根本原因是由于UHMWPE 纤维表面极性状态的改善，引起 UHMWPE 纤维表面自由能极性分量增加，会对纤维与树脂基体之间的界面复合起到积极影响[17, 20]。但较大程度的处理(如 6 s、8 s)所导致的 UHMWPE 纤维吸水增量中可能包含部分无效增量，主要体现为 UHMWPE 纤维表面分子结构熔融破坏引起吸水、锁水能力增加，同上所述，可能对纤维与树脂基体之间的有效浸润及后续复合材料的界面性能提升没有贡献。

2.3 等离子体改性对 UHMWPE 纤维表面脱黏力及性能损伤的影响

表 4 为等离子体改性前后 UHMWPE 纤维的表面脱黏力及单丝拉伸强度。可以看出，UHMWPE 纤维经过常压空气等离子体处理后，其表面脱黏力相比于未处理 UHMWPE 纤维有明显提升，即使处理时间为 2 s，UHMWPE 纤维的表面脱黏力也可以实现 36.9%的增长率。纤维表面脱黏力体现了纤维表面对树脂基体的黏附能力[21]，在一定程度上反映出 UHMWPE 纤维表面改性对其复合材料界面性能的调节作用。

由前文分析可知，常压空气等离子体分别处理 2 s、4 s 后，改性作用使 UHMWPE 纤维表面变得粗糙，表面浸润性能得以改善，因此 UHMWPE 纤维表面脱黏力呈逐渐增大趋势，并在处理时间为 4 s 时，达到最大值，为 60.9 N，实现增幅达 84.0%，界面黏结性能的改善效果非常显著。但当等离子体处理时间分别延长至 6 s 和 8 s 时，虽然 UHMWPE-6 纤维和 UHMWPE-8 纤维的表面脱黏力较 UHMWPE-0、甚至较 UHMWPE-2 纤维仍有较大幅度的提高，但与 UHMWPE-4 纤维相比，已经呈现出明显的减小趋势。因此，随着等离子体处理程度加深，UHMWPE 纤维表面的熔融现象会导致 UHMWPE 纤维表面脱黏力下降。

由表 4 还可以看到，分别经过 6 s 和 8 s 的常压空气等离子体处理，UHMWPE 纤维表面的熔融导致其本体性能受到较大程度损伤，也是使纤维表面脱黏力降低的主要原因。当处理不超过 4 s 时，UHMWPE 纤维单丝拉伸强度降低幅度不超过 6.3%，损伤相对较小。

表 4 等离子体处理前后 UHMWPE 纤维的表面脱黏力及单丝拉伸强度

Table 4 Surface adhesion and single fiber tensile strength of untreated and plasma treated UHMWPE fibers

Sample	Surface adhesion (SD)/N	Increment/%	Single fiber tensile strength (SD)/GPa	Decrement/%
UHMWPE-0	33.1 (3.7)	0	3.2 (0.31)	0
UHMWPE-2	45.3 (2.7)	36.9	3.0 (0.33)	6.3
UHMWPE-4	60.9 (2.5)	84.0	3.0 (0.30)	6.3
UHMWPE-6	54.8 (3.0)	65.6	2.7 (0.26)	15.6
UHMWPE-8	51.4 (3.0)	55.3	2.6 (0.29)	18.8

Note: SD—Standard deviation.

2.4　等离子体改性对 UHMWPE/EP 层合板层间剪切强度(ILSS)的影响

图 4 为等离子体处理时间对 UHMWPE/EP 复合材料 ILSS 的影响规律。可以看出，ILSS 数值的变化与等离子体改性前后 UHMWPE 纤维表面脱黏力的变化趋势相吻合。随着等离子体处理时间的延长，UHMWPE/EP 复合材料层合板的 ILSS 值同样呈先增大后减小的变化趋势，当处理时间为 4 s 时，UHMWPE-4/EP 复合材料层合板的 ILSS 为 15.81 MPa，相比于未改性 UHMWPE-0/EP 复合材料层合板的 ILSS(7.01 MPa)，增长率高达 125.5%。ILSS 结果表明，UHMWPE 纤维与 EP 基体之间的界面结合状态得到明显改善[22]，UHMWPE/EP 复合材料层合板 ILSS 的提高，对于扩大其工程化应用范围和确保其工程应用安全性具有重要意义。

图 5(a)是未处理和等离子体处理 4 s 的 UHMWPE/EP 复合材料层合板(厚为 0.25 mm)表面的划痕对比照片。可知，等离子体改性前由于 UHMWPE纤维与 EP 基体之间容易脱黏，导致剪切破坏沿纤维轴向扩展，所产生的划痕较宽、较浅，但在等离子处理后 UHMWPE/EP 复合材料层合板的划痕明显变窄、变深；图 5(b)是复合材料薄板的切边对比照片。可知，改性前 UHMWPE 纤维与 EP 基体两相之间非常低的界面黏结性能使切边上的纤维大量脱黏拔出，而等离子改性后的 UHMWPE/EP 复合材料层合板切边非常整齐、平滑。由图 5 所得结论与 ILSS 测试结果一致，从表观角度说明常压空气等离子体对 UHMWPE/EP 复合材料界面黏结性能具有作用。

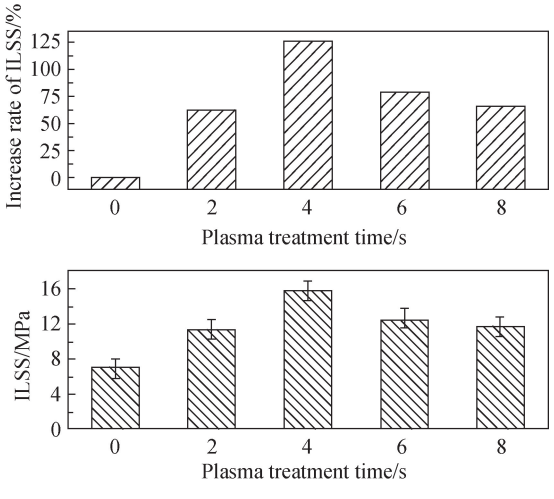
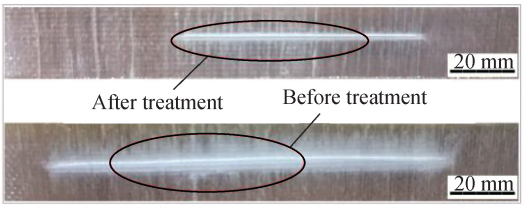
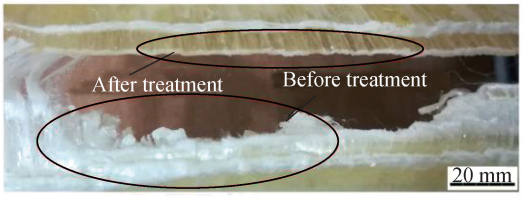


图 4　等离子体处理对 UHMWPE/EP 复合材料层间剪切强度(ILSS)的影响

Fig. 4　Effect of plasma treatment on interlaminar shear strength (ILSS) of UHMWPE/EP composites



(a) Contrast between scratches on composites



(b) Contrast between scrap edges of composites

图 5　等离子体处理对 UHMWPE/EP 复合材料界面黏结行为的表观影响

Fig. 5　Apparent effect of plasma treatment on interfacial adhesion of UHMWPE/EP composites

对于等离子体处理时间分别为 6 s、8 s 时 UHMWPE/EP 复合材料层合板 ILSS 下降的原因与纤维表面脱黏力降低的原因大体一致。均是由于过度的等离子体处理[23-24]使温度耐受性较差的 UHMWPE纤维表面分子结构熔融破坏，纤维本体性能受到较大程度损伤，尤其后期出现纤维单丝之间的黏连状态，树脂基体无法充分、均匀地浸润纤维表面并与之紧密地复合到一起，因此产生了部分无效界面而导致 UHMWPE/EP 复合材料层合板 ILSS 数值的降低。

同样，虽然较长的处理时间会导致 UHMWPE/EP 复合材料 ILSS 下降，但 UHMWPE-6/EP 复合材料和 UHMWPE-8/EP 复合材料的层间剪切强度相比未改性 UHMWPE-0/EP 复合材料依然有超过 60%的提高。另一方面可以发现，UHMWPE-2/EP 复合材料 ILSS 的增长率也超过 60%。可见，常压空气等离子体对于 UHMWPE 纤维的表面改性，不但易于实现在线连续处理，且对UHMWPE/EP 复合材料层合板的界面调节作用十分显著，可以推广作为扩大 UHMWPE 连续纤维工程化应用的高效处理手段。

3　结　论

(1) 常压空气等离子体处理时间对超高分子量

http://hclab.buaa.edu.cn

聚乙烯(UHMWPE)纤维表面性能有着非常明显的影响规律。等离子体处理初期，UHMWPE 纤维表面沟槽逐渐变宽、变深、数量增加，同时出现了一些颗粒状凸起结构，纤维表面变得愈加粗糙，纤维吸水能力增大，表面浸润性能有了明显改善；而等离子体处理后期 UHMWPE 纤维表面出现受热熔融现象，熔融程度逐渐增大，且开始出现单丝之间的黏连状态，导致 UHMWPE 纤维的吸水量中出现部分无效增量。

(2) UHMWPE 纤维表面脱黏力变化和 UHMWPE/环氧树脂复合材料层合板层间剪切强度(ILSS)变化呈现出较好的一致性，反映了 UHMWPE 纤维表面等离子体改性对 UHMWPE/环氧树脂复合材料界面性能具有调节作用。经 4 s 常压空气等离子体处理之后，UHMWPE 纤维表面脱黏力的提升幅度为 84.0%，而 UHMWPE/环氧树脂复合材料层合板的 ILSS 提高幅度更是高达 125.5%；UHMWPE 纤维表面粗糙结构的出现、形貌的复杂化及浸润性能的提高，有益于 UHMWPE/环氧树脂复合材料界面黏结性能的提高，但较严重的表面刻蚀作用，尤其是单丝之间的黏连现象，导致复合材料界面性能的降低。

(3) 敞开式常压空气等离子体可以实现在线连续处理 UHMWPE 纤维，高效调节 UHMWPE/环氧树脂复合材料的界面性能。2～8 s 常压空气等离子体改性的 UHMWPE/环氧树脂复合材料层合板 ILSS 增幅均在 60%以上，处理时间不超过 4 s 时，UHMWPE 纤维的拉伸强度降低幅度不超过 6.3%，损伤相对较小，为扩大 UHMWPE 纤维的后续工程化应用积累了理论数据。

参考文献：

[1] 赵景婵，梁国正，郭治安，等. 生物酶催化 UHMWPE 纤维表面改性[J]. 复合材料学报，2004，21(4)：62-66.
ZHAO J C，LIANG G Z A，GUO Z，et al. Surface modification of UHMWPE fibers using enzyme as catalyst[J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2004，21(4)：62-66 (in Chinese).

[2] 李瑞培，李微微，孟立，等. 超高分子量聚乙烯纤维的液相氧化改性及其环氧树脂基复合材料的力学和摩擦性能[J]. 材料导报，2016，30(2)：41-46.
LI R P，LI W W，MENG L，et al. Liquid-phase oxidation modification of ultra-high molecular weight polyethylene fiber and mechanical/tribological properties of the corresponding fiber-reinforced epoxy resin composites[J]. Materials Review，2016，30(2)：41-46 (in Chinese).

[3] FAIZ Z，JAN S，ULRICH H，et al. Strategic positioning of carbon fiber layers in an UHMWPE ballistic hybrid composite panel[J]. International Journal of Impact Engineering，2019，129：119-127.

[4] 陈一，张鹏，王旭，等. 直接氟化表面处理超高分子量聚乙烯粘接性能研究[J]. 高分子学报，2011(5)：543-547.
CHEN Y，ZHANG P，WANG X，et al. Effect of direct fluorination on the bonding property of ultra-high molecular weight polyethylene[J]. Acta Polymerica Sinica，2011(5)：543-547 (in Chinese).

[5] 王成忠，李鹏，于运花，等. UHMWPE 纤维表面处理及其复合材料性能[J]. 复合材料学报，2006，23(2)：30-35.
WANG C Z，LI P，YU Y H，et al. UHMWPE fibers with surface treatment and its composites properties[J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2006，23(2)：30-35 (in Chinese).

[6] 李春阳，李微微，李瑞培，等. 超高分子量聚乙烯纤维复合表面改性及其橡胶基复合材料的力学性能[J]. 复合材料学报，2015，32(2)：409-419.
LI C Y，LI W W，LI R P，et al. Compound surface modification of ultra-high molecular weight polyethylene fiber and mechanical properties of its rubber matrix composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2015，32(2)：409-419 (in Chinese).

[7] 王春红，任子龙，张青菊. 单向竹原纤维表面改性对其增强不饱和聚酯树脂复合材料性能的影响[J]. 复合材料学报，2017，34(2)：314-321.
WANG C H，REN Z L，ZHANG Q J. Effect of surface modification of unidirectional bamboo fiber on the properties of its reinforced unsaturated polyester resin composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2017，34(2)：314-321 (in Chinese).

[8] ZEC J，TOMIĆ N Z，ZRILIĆ M，et al. Optimization of Al_2O_3 particle modification and UHMWPE fiber oxidation of EVA based hybrid composites：Compatibility，morphological and mechanical properties[J]. Composites Part B：Engineering，2018，153：36-48.

[9] 李瑞华，黄玉东，龙军，等. PBO 纤维表面空气冷等离子体改性[J]. 复合材料学报，2003，20(3)：102-107.
LI R H，HUANG Y D，LONG J，et al. Air cold plasma modification on PBO fiber surface[J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2003，20(3)：102-107 (in Chinese).

[10] 刘静，曹意林，李刚，等. 激光对碳纤维及碳纤维/环氧树脂复合材料性能影响[J]. 复合材料学报，2018，35(11)：2979-2986.
LIU J，CAO Y L，LI G，et al. Effect of laser on properties of carbon fibre and carbon fibre/epoxy resin composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2018，35(11)：2979-2986 (in Chinese).

[11] 赵艳凝，王谋华，唐忠锋，等. γ-射线辐照对超高分子量聚乙

http://fhclxb.buaa.edu.cn

烯纤维结构与力学性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程，2010，26(10)：32-35.
ZHAO Y N，WANG M H，TANG Z F，et al. Effects of γ-ray irradiation on the structure and mechanical properties of UHMWPE fibers[J]. Polymer Materials Science and Engineering，2010，26(10)：32-35 (in Chinese).

[12] RODRIGUES M M，FONTOURA C P，GARCIA C S C，et al. Investigation of plasma treatment on UHMWPE surfaces：Impact on physicochemical properties，sterilization and fibroblastic adhesion[J]. Materials Science & Engineering C，2019，102：264-275.

[13] SHI S C，CHANG T W. FTIR study of the surface properties and tribological behaviors of plasma-modified UHMWPE and zirconia[J]. Optical and Quantum Electronics，2018，50：440.

[14] 任煜，张银，王晓娜，等. 空气介质阻挡放电对超高分子量聚乙烯纤维表面性能及粘结力的影响研究[J]. 高分子学报，2016(10)：1439-1446.
REN Y，ZHANG Y，WANG X N，et al. Surface properties and adhesion force of air dielectric barrier discharge treated UHMWPE fibers[J]. Acta Polymerica Sinica，2016(10)：1439-1446 (in Chinese).

[15] ASTM International. Standard test method for short-beam strength of polymer matrix composite materials and their laminates：ASTM D2344M—16[S]. West Conshohocken：ASTM International，2016.

[16] SMITH P，LEMSTRA P J，BOOIJ H C. Ultradrawing of high-molecular-weight polyethylene cast from solution Ⅱ：Influence of initial polymer concentration[J]. Journal of Polymer Science Part B：Polymer Physics，1981，19(6)：877-888.

[17] JIA C X，WANG Q，CHEN P，et al. Wettability assessment of plasma-treated PBO fibers based on thermogravimetric analysis[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives，2017，74：123-130.

[18] KAFI A，HUSON M，CREIGHTON C，et al. Effect of surface functionality of PAN-based carbon fibres on the mechanical performance of carbon/epoxy composites[J]. Composite Science and Technology，2014，94(4)：89-95.

[19] RUDAWSKA A，JACNIACKA E. Analysis for determining surface free energy uncertainty by the Owen-Wendt method[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives，2009，29(4)：451-457.

[20] JIA C X，CHEN P，WANG Q，et al. Surface wettability of atmospheric dielectric barrier discharge processed Armos fibers[J]. Applied Surface Science，2011，258(1)：388-393.

[21] 武海生，孙志杰，贾晶晶，等. 高性能有机纤维单丝复合体系界面粘结性能实验研究[J]. 复合材料学报，2010，27(4)：59-63.
WU H S，SUN Z J，JIA J J，et al. Experimental study on the interfacial bonding properties of high-performance organic fibers in single fiber fragmentation test[J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2010，27(4)：59-63 (in Chinese).

[22] LIN S P，HAN J L，YEH J T，et al. Composites of UHMWPE fiber reinforced PU/epoxy grafted interpenetrating polymer networks[J]. European Polymer Journal，2007，43(3)：996-1008.

[23] WANG Q，CHEN P，JIA C X，et al. Improvement of PBO fiber surface and PBO/PPESK composite interface properties with air DBD plasma treatment[J]. Applied Surface Science，2012，44(5)：548-553.

[24] CARCÍA A，DÍAZ M D，PANIAGUA R，et al. Microhardness modification of ultrahigh-molecular-weight polyethylene by oxygen plasma：Effect of the polymer crosslinking[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B：Beam Interactions with Materials and Atoms，2019，443：8-12.

http://fhclxb.buaa.edu.cn