

等离子体处理对 UHMWPE 纤维性能的影响

王 欢, 马崇启, 吕汉明
(天津工业大学 纺织学院, 天津 300387)

摘要: 针对超高分子量聚乙烯纤维(UHMWPE)因纤维表面光滑造成纤维与树脂基体间的界面黏结度低的缺点,采用等离子体处理方法对 UHMWPE 纤维的表面进行改性。利用台式扫描电镜、红外光谱等探究改性前后 UHMWPE 纤维的性能,采用正交实验设计方法分析等离子体处理纤维过程中影响纤维性能的因素,再利用纤维束抽拔法测试纤维束与树脂之间的黏结力。结果表明:采用等离子体处理方法最佳处理时间为 4 min、舱内的压强为 5 Pa、处理的功率为 110 W;改性处理后,纤维表面的活性基团明显增多;改性后纤维表面明显有刻蚀作用,纤维表面接触角下降 28.95%,纤维与树脂基体的黏结度提高约 28.35%。

关键词: 等离子体处理法; UHMWPE 纤维; 力学性能; 正交实验; 黏结力; 纤维束抽拔法

中图分类号: TS102.6; TQ342.92 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-7003(2019)01-0021-07 **引用页码:** 011104

Effect of plasma modification treatment on UHMWPE fiber properties

WANG Huan, MA Chongqi, LÜ Hanming

(Textile Institute, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China)

Abstract: The smooth surface of UHMWPE fiber results in the low interfacial adhesion between the fibers and resin matrix. For this disadvantage, plasma processing method was used for surface modification of UHMWPE fibers. The properties of UHMWPE fiber before and after the modification were investigated by SEM and infrared spectroscopy. The factors affecting the fiber properties during plasma treatment were analyzed by orthogonal experiment design method. Then, the adhesive force between the fiber bundle and the resin was measured by the fiber bundle pull-out method. The results showed that: the optimum treatment process is as below: treatment time 4 min, pressure 5 Pa, the power of treatment 110 W. After modification, the active groups on the fibers surface increased significantly; the surface roughness increased obviously; the contact angle of fiber surface decreased by 28.95%, and the adhesive force between fiber and resin matrix increased by about 28.35%.

Key words: plasma treatment; UHMWPE fiber; mechanical properties; orthogonal experiment; adhesive force; fiber bundle pull-out method

UHMWPE 纤维属于三大高性能纤维之一,各项性能都比较出众,如表 1^[1]所示。近年来由于超高的拉伸强度等优点,被广泛应用于缆绳、医学生物、防弹材料、体育运动器材等领域^[2]。但是由于 UHMWPE 的分子链中不含极性基团,其表现出惰性,纤维表面非常的平滑,所以 UHMWPE 纤维跟树脂基体复合而成的复合材料中,UHMWPE 纤维没有起到增强

材料的作用^[3]。

表 1 几种高性能纤维力学性能的比较

Tab.1 Comparison of mechanical properties of several high-performance fibers

纤维名称	密度/ (g·cm ⁻³)	强度/ (cN·dtex ⁻¹)	模量/ (cN·dtex ⁻¹)	比强度/ (N·tex ⁻¹)	比模量/m
UHMWPE	0.97	40.2	1 412	4.14	146
芳纶	1.44	19.2	861	1.33	60
碳纤维	1.81	17.6	1 313	0.97	73
玻璃纤维	2.50	18.4	360	0.74	14

由于 UHMWPE 纤维这一缺点,许多学者都对

收稿日期: 2018-06-15; 修回日期: 2018-11-15

作者简介: 王欢(1994—),男,硕士研究生,研究方向为纺织复合材料。通信作者: 马崇启 教授,12197759@qq.com。

UHMWPE 纤维的改性做了大量工作^[4-19],常见的改性方法有三种:第一种是等离子体改性。刘晓巧等^[20]采用低温等离子体处理法对 UHMWPE 纤维改性进行研究,并且通过正交实验设计方法分析并确定了等离子改性 UHMWPE 纤维的最佳工艺参数为压强 50 Pa、功率 100 W、时间 180 s;洪剑寒等^[21]探讨了氧气等离子体处理法对 UHMWPE 纤维性能的影响,通过扫描电镜观察改性后的纤维表面形态并进行分析,得出氧气等离子增大了纤维表面能,即改善了 UHMWPE 纤维跟树脂基体的黏结牢度;HUANG Chiyuan 等^[22]使用氩等离子体处理 UHMWPE 纤维表面,功率 4 002 W,时间 502 min,经过剥离实验和接触角实验发现,纤维与黏合剂的剥离强度从 0.602 kgf/in 提高到 4.602 kgf/in,接触角从 80° 降到 28°;LIU Hengjun 等^[23]利用氩(Ar)等离子体改性 UHMWPE,目的是增加耐磨性。结果表明:与未改性 UHMWPE 相比,Ar 等离子体处理的 UHMWPE 的润湿性和耐磨性得到了改善。这些改性手段都属于离子改性,可以发现等离子体改性可以有效改善 UHMWPE 纤维与树脂之间的黏结性,但是都没有具体测出纤维与树脂之间的黏结力,也未系统分析改性对纤维物理和化学性能的影响。第二种是化学改性。曹涛^[24]、宋俊等^[25]分别用铬酸对 UHMWPE 纤维来改性,通过分析改性后纤维的力学性能和观察纤维表面状态与改性时间、温度的关系,研究出最佳的改性工艺参数;S V Panin 等^[26]利用乙烯基三甲氧基硅烷(VTMS)和马来酸酐(SMA)对 UHMWPE 纤维进行化学改性,发现嵌段共聚物纳米复合材料的耐磨性接近非改性聚合物基纳米复合材料。化学改性的手段能提高纤维与树脂之间的黏结强度,但由于化学物质的强腐蚀性和毒性,往往会大幅度降低纤维自身的强力,而且化学改性不适用于连续工业生产。第三

种是辐射接枝改性。WANG Lei 等^[27]为了增强 UHMWPE 纤维/橡胶复合材料的界面性能,先用臭氧预处理改性 UHMWPE 纤维,然后用紫外线(UV)嫁接。对改性后的纤维用 XPS、FTIR、SEM 和 EDS 等进行表征。结果表明:纤维与树脂间的黏结力提高了 79%。杨宇平^[28]利用另一种辐照技术对 UHMWPE 纤维处理,分析处理后的纤维,通过对纤维动态浸润性能测试方法证明了辐射接枝对 UHMWPE 纤维表面惰性的改善十分明显。骆玉祥等^[29]研究紫外线辐射原理接枝处理 UHMWPE 纤维,对纤维一系列的实验测试得出复合材料的层间剪切强度提高到未改性的 1~2 倍。辐射接枝改性能有效改善 UHMWPE 的表面惰性,但是辐射接枝法较为繁琐,通常有前处理步骤,增加工业生产成本。

上述改性方法有等离子体法、化学试剂法、辐射接枝方法^[30],但是等离子改性没有系统地结合纤维的物理、化学性质来分析改性机理,其他改性方法较为困难繁琐,且会大幅度降低 UHMWPE 纤维自身强力,也没有提出方法来测量纤维与树脂之间的黏结力。所以,本文采用等离子处理方法对 UHMWPE 纤维的表面进行改性,对纤维自身的强力影响较小,通过正交实验设计方法对实验进行合理的设计,对纱线进行改性处理实验,通过台式扫描电镜、红外光谱等对改性后的纱线性能和表面形态分析对纤维性能的影响,判断出最佳的改性工艺参数,最后利用纤维束抽拔法对最佳改性工艺后的纤维与树脂进行黏结力测试。

1 实验

1.1 仪器与材料

实验仪器与材料详细说明见表 2。

表 2 实验仪器与材料

Tab. 2 Experimental instruments/materials

实验仪器、材料	具体型号、规格	生产厂家
UHMWPE 纤维	400 D	东莞市索维特特殊线带有限公司
等离子发生器	PR-3 型	北京艾兰科技有限公司
台式扫描电子显微镜	Hitachi TM3030	日本日立公司
红外光谱分析仪	Nicolet iS50(Thermo Scientific)	德国布鲁克公司
纤维接触角测试仪	SCA20 型	北京哈科试验仪器厂
电子万能试验机	INSRTRON 399 型	英国英斯特朗公司

1.2 方法

1.2.1 正交实验设计方法及改性实验

正交实验设计方法来原因最佳的水平组合。采用 $L_{16}(4^5)$ 正交实验表,代表 5 个因素 4 个水平。

采用等离子体处理 UHMWPE 纤维。实验有三个因素,每个因素都有四个水平,所以采用了 5 因素 4 水平的正交实验表来进行改性实验,运用 4 因素 4 水平的正交实验来研究等离子处理纤维的时间、压力、功率对纤维改性表面状态和拉伸性能的影响及相互之间的关系。其中等离子处理时间 4 ~ 10 min,四水平为处理时间 4、6、8、10 min;舱内的压强 5 ~ 20 Pa,四水平分别为 10、5、15、20 Pa;处理的功率 110 ~ 200 W,四水平分别为 200、170、140、110 W。

按照正交实验组进行改性实验,把改性好的纱线标记好记号,每一组一次性改性 30 个纱样,等离子改性实验所使用的仪器为 PR-3 型等离子发生器。

1.2.2 改性前后纤维束强力测试

采用 INSTRON 399 型电子万能试验机测试 UHMWPE 纤维强力性能,按照 GB/T 7690.3—2013《增强材料 纱线试验方法 第 3 部分:玻璃纤维断裂强力和断裂伸长的测定》进行实验。首先将改性前纤维和改性后纤维剪成 25 cm 的长度,间隔距离为 17 cm,加载速度为 2 mm/min,每组测 10 次取平均值。

1.2.3 改性前后纤维束接触角测定

实验所采用的纤维接触角的测定仪器为 SCA20 型纤维接触角测试仪,并使用蒸馏水作为媒介,测试接触角。

1.2.4 改性前后纤维表面形态测试

采用实验室的电子扫描电镜观察纤维改性前表面的状态,试样经镀金后使用 TM3030 台式扫描电子显微镜,所加电压为 5 kV,放大倍数 3 000 倍。

1.2.5 改性前后纤维红外光谱分析

利用 Nicolet iS50(Thermo Scientific) 红外光谱分析仪对改性前后的纤维进行分析,使用 KBr 压片法,测量范围 $4\ 000 \sim 400\text{ cm}^{-1}$ 。

1.2.6 改性前后纤维束与树脂黏结力测试

采用纤维束抽拔法进行纤维与树脂之间黏结力的测试。如图 1 所示,将 UHMWPE 纤维束宽度约 0.3 mm,埋置深度为 2 mm,纤维束与树脂接触的底座打磨光滑,防止溢出纤维束影响黏结力大小,待处理完成后,利用电子万能试验机进行抽拔实验,得出位移-载荷曲线。

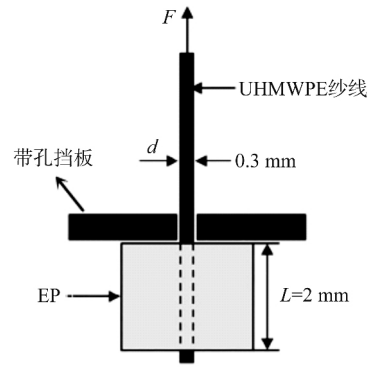


图 1 纤维束抽拔法示意

Fig. 1 Diagram of fiber bundle pull-out method

2 结果与分析

表 3 是改性后 UHMWPE 纤维接触角的实验结果,为了方便计算和减小误差,使用了正交实验来进行结果的直观分析。表 4 为方差分析中主体间效应的检验结果。

表 3 改性后 UHMWPE 纤维接触角的直观分析

Tab. 3 Visual analysis of contact angle of UHMWPE fiber after modification

实验号 (因素)	A 时间/min	B 压强/Pa	C 功率/W	D 接触角/(°)
1 [#]	4	10	200	53.60
2 [#]	4	5	170	65.60
3 [#]	4	15	140	51.50
4 [#]	4	20	110	55.70
5 [#]	6	10	170	55.80
6 [#]	6	5	200	57.80
7 [#]	6	15	110	55.90
8 [#]	6	20	140	50.70
9 [#]	8	10	140	53.80
10 [#]	8	5	110	58.70
11 [#]	8	15	200	54.60
12 [#]	8	20	170	58.90
13 [#]	10	10	110	55.70
14 [#]	10	5	140	59.70
15 [#]	10	15	170	55.20
16 [#]	10	20	200	51.50
接 触 角 (°)	K_1	56.6	54.7	54.4
	K_2	55.1	60.5	58.9
	K_3	56.5	54.3	53.9
	K_4	55.5	54.2	56.5
R	1.5	6.3	5.0	

主次顺序: $B > C > A$; 优水平: $A_1 B_2 C_2$; 优组合: $A_1 B_2 C_2$

表 4 主体间效应的检验

Tab. 4 Testing of intersubjective effect

源	III 型平方和	df	均方	F	Sig
校正模型	178.716a	9	19.857	4.257	0.046
截距	50 030.506	1	50 030.506	10 725.132	0.000
VAR00003	61.742	3	20.581	4.412	0.058
VAR00002	110.127	3	36.709	7.869	0.017
VAR00001	6.847	3	2.282	0.489	0.702
误差	27.989	6	4.665		
总计	50 237.210	16			
校正的总计	206.704	15			

注: $R^2 = 0.865$ (调整 $R^2 = 0.661$) , 因变量为 VAR00004 , VAR00001 为处理时间 , VAR00002 为处理压强 , VAR00003 为处理功率。

由表 4 的方差分析可知 , 压强的 $Sig < 0.05$, 呈现最显著影响趋势 , 而处理功率的 Sig 值接近 0.05 , 处理时间的 $Sig > 0.05$, 所以等离子改体过程中处理压强对纤维接触角的影响最大 , 其次是处理的功率 , 最后是处理时间。由表 3 和表 4 得出的最佳组合为时间 4 min , 压强 5 Pa , 功率 170 W。

表 5 是改性后 UHMWPE 纤维拉伸强力的实验

表 5 改性后 UHMWPE 纤维拉伸强力的直观分析

Tab. 5 Visual analysis of tensile strength of UHMWPE fiber after modification

实验号 (因素)	A 时间/min	B 压强/Pa	C 功率/W	D 拉伸强力/N
1 [#]	4	10	200	79.62
2 [#]	4	5	170	81.54
3 [#]	4	15	140	83.24
4 [#]	4	20	110	82.28
5 [#]	6	10	170	80.78
6 [#]	6	5	200	80.44
7 [#]	6	15	110	84.45
8 [#]	6	20	140	79.89
9 [#]	8	10	140	81.13
10 [#]	8	5	110	85.65
11 [#]	8	15	200	79.76
12 [#]	8	20	170	81.17
13 [#]	10	10	110	85.51
14 [#]	10	5	140	85.41
15 [#]	10	15	170	80.62
16 [#]	10	20	200	77.85
拉 伸 强 力 /N	K_1	81.67	81.76	79.42
	K_2	81.39	83.26	81.03
	K_3	81.93	82.02	82.42
	K_4	82.35	80.30	84.47
	R	0.96	2.96	5.05

主次顺序: C > B > A; 优水平: A₄ B₂ C₄

结果 表 6 是超高分子量聚乙烯纤维改性之后纤维的拉伸强力分析 , 由方差分析可得 模型的 $Sig < 0.05$, 证明整体数据有效 , 而处理功率的 $Sig < 0.05$, 压强的 Sig 和时间的 $Sig > 0.05$, 所以可以得出 处理纤维的功率对纤维的拉伸强力的影响最大 , 其次是压强和时间。从表 5 和表 6 的极值分析可得 , 最佳的改性工艺是 A₄B₂C₄ , 处理时间 10 min , 处理压强 5 Pa , 处理功率 110 W。

表 6 主体间效应的检验

Tab. 6 Testing of intersubjective effect

源	III 型平方和	df	均方	F	Sig
校正模型	74.888a	9	8.321	5.312	0.027
截距	107 148.202	1	107 148.202	68 396.471	0.000
VAR00003	55.168	3	18.389	11.739	0.006
VAR00002	17.734	3	5.911	3.773	0.078
VAR00001	1.986	3	0.662	0.423	0.744
误差	9.399	6	1.567		
总计	107 232.490	16			
校正的总计	84.287	15			

注: $R^2 = 0.888$ (调整 $R^2 = 0.721$) , 因变量为 VAR00005 , VAR00001 为处理时间 , VAR00002 为处理压强 , VAR00003 为处理功率。

表 7 是 UHMWPE 纤维在不同条件下改性后纤维接触角与拉伸强力的方案对比。

表 7 两组优化方案

Tab. 7 Two groups of optimization schemes

接触角/(°)		拉伸强力/N	
极差	优方案	极差	优方案
1.5	4 min	0.96	10 min
6.3	5 Pa	2.96	5 Pa
5.0	170 W	5.05	110 W

在等离子体处理过程中 , 接触角和拉伸强力是影响纤维及纤维与树脂黏结力的重要因素 , 接触角越小 , 证明树脂与纤维的接触性能越好 , 而纤维拉伸强力则不同 , 因为纤维强力越大 , 代表处理的效果不明显 , 没有达到刻蚀纤维表面的目的。纤维强力越小 , 代表处理时间等过久 , 严重影响了纤维自身的强力 , 可能会影响整体复合材料的力学性能。所以综合考虑接触角和拉伸强力的因素及两组方差分析可以发现 较好方案为处理时间 4 min , 处理压强 5 Pa , 功率 110 W。

图 2 为改性前后 UHMWPE 纤维的红外光谱。由图 2 可以看出 , 波数 2920 cm^{-1} 和 2850 cm^{-1} 处的吸收峰是 CH_2 的反对称和对称伸缩振动峰; 在 1700 cm^{-1} 处的峰值明显增强 , 为 C=O 的特征峰 , 是由于等离子体作用于纤维表面产生自由基 , 而自由基在与空气中的氧气发生反应的结果 , 可能是羧

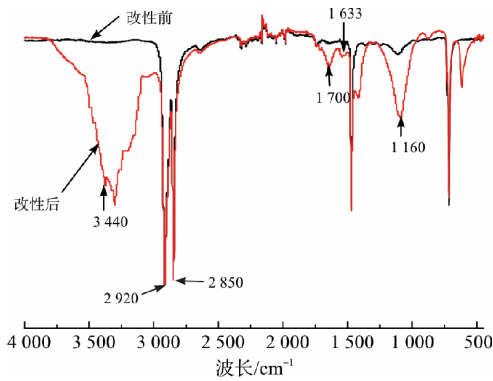


图 2 改性前后 UHMWPE 纤维红外光谱

Fig.2 Infrared spectrum of UHMWPE fiber before and after modification

酸的 C=O 官能团,有利于改善 UHMWPE 纤维的黏着性;在 1 160 cm⁻¹ 处的峰值有增强,在 3 440 cm⁻¹

处的峰值显著增强,是处理后羟基的特征峰值;在 3 430 cm⁻¹ 处的宽峰是羟基,1 633 cm⁻¹ 处的是和羟基对应的。以上结果表明,经等离子体改性处理后,等离子体冲击纤维表面,使 UHMWPE 纤维表面的官能团和共价键形态结构发生变化^[31],导致 UHMWPE 纤维表面的活性基团,如羟基、羧基等明显提高。

图 3 为改性前后 UHMWPE 纤维的形貌结构。由图 3 可知,通过扫描电子显微镜观察未改性的超高分子量聚乙烯纤维表面光滑平整、清晰,经过等离子体改性后的纤维表面较为粗糙。这是由于等离子体处理的缘故发生了热蚀、蒸发、降解等^[32]现象,使纤维表面细小的沟槽增多,表面的粗糙度明显增加,提高 UHMWPE 纤维与树脂基体的接触面积,从而大幅增强了纤维与树脂基体的黏结度。

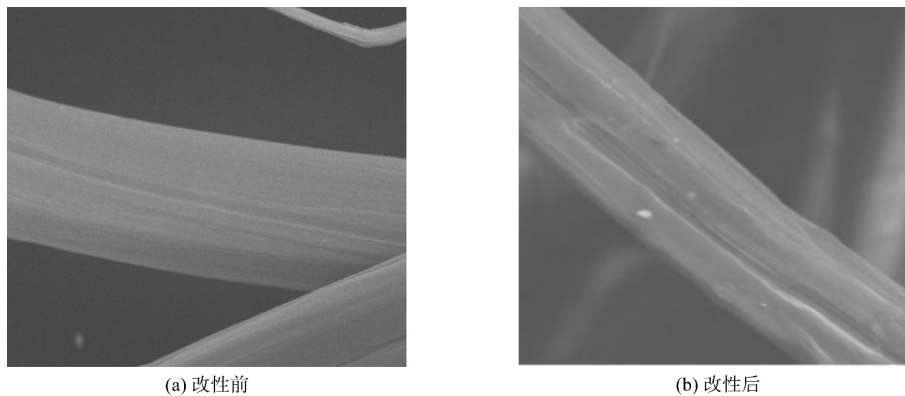


图 3 改性前后 UHMWPE 纤维的形貌结构

Fig.3 Morphology and structure of UHMWPE fiber before and after modification

表 8 为改性前后 UHMWPE 纤维的比较。

如图 4 所示,原纤维束的接触角是 76°,经过处理后,表面的接触角降低至 54°,这表明经等离子体改性处理后,纤维表面的粗糙程度增加,增大了和液体的接触面积,有利于液体接触角的提高,实现疏水结构。另外,羟基等极性基团的引入,使得表面润湿性发生了变化,导致了材料表面接触角发生变化。纱

线表面接触角的减小有利于增加纤维与树脂间的黏结作用,从而提高复合材料的力学性能。

表 8 改性前后 UHMWPE 纤维比较

Tab.8 Comparison of UHMWPE fibers before and after modification

方法	接触角/(°)	比强度/(cN·tex ⁻¹)
改性前	76.0	203.09
改性后	54.0	160.02

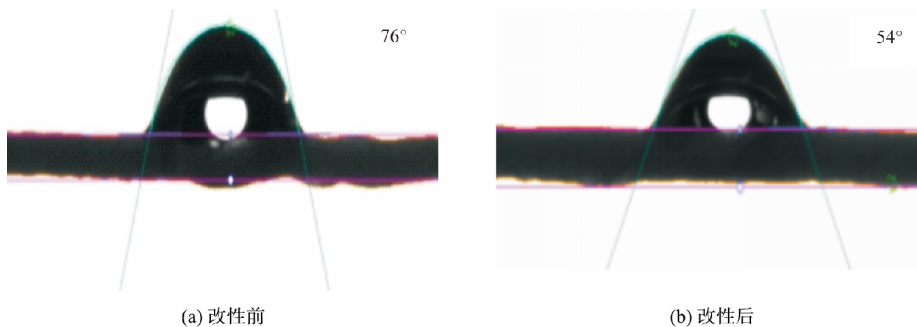


图 4 改性前后 UHMWPE 纤维表面接触角

Fig.4 Contact angle of UHMWPE fiber surface before and after modification

由图5位移-载荷曲线可以看出,纤维束从树脂中抽拔出所需的载荷明显增大,增大约28.35%。这是由于改性后纤维束粗糙程度增加,导致纤维与树脂的接触面积增大,纤维表面含氧官能团增多^[32],使纤维束与树脂之间的黏结力增强,从而有效增加UHMWPE环氧树脂基复合材料的力学性能。

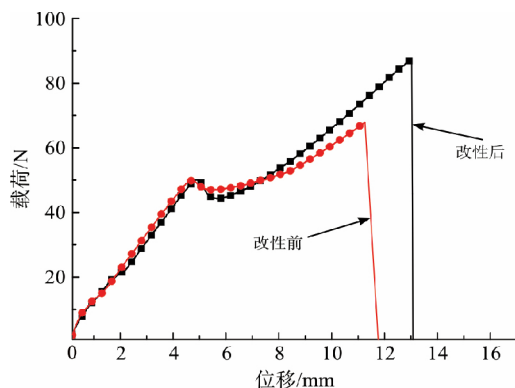


图5 抽拔出纤维束的位移-载荷曲线

Fig. 5 Displacement-load curve of pulled-out fiber bundle

3 结论

本文采用等离子体对UHMWPE纤维表面进行改性处理,目的是增加纤维表面粗糙程度,提高纤维与树脂之间的黏结力,从而增强复合材料的力学性能,通过正交实验和纤维束抽拔法测试,结论如下:

1) 用等离子处理方法处理UHMWPE纤维表面,最佳处理时间为4 min、舱内的压强为5 Pa、处理的功率为110 W。

2) 等离子体改性后,纤维表面的羟基和羧基等含氧基团增加,这些活性基团有助于纤维与树脂的黏结。

3) 等离子体改性后纤维表面明显发生物理刻蚀,表面的粗糙度明显增加,纤维表面接触角下降28.95%,经过纤维束抽拔法测量得知纤维与树脂基体的黏结度提高了约28.35%,这有助于提高复合材料整体的力学性能。

参考文献:

[1] 张艳. 超高分子量聚乙烯纤维在防弹和防刺材料方面的应用[J]. 产业用纺织品, 2010, 28(10): 32-39.
ZHANG Yan. The application of ultra high molecular weight polyethylene fiber on bulletproof and stab-resistant materials [J]. Technical Textiles, 2010, 28(10): 32-39.
[2] 尹晔东. 超高分子量聚乙烯纤维的发展状况[J]. 化工新型材料, 2008, 36(10): 51-53.

YIN Yedong. Recent progress in ultra high molecular weight polyethylene fibers [J]. New Chemical Materials, 2008, 36(10): 51-53.
[3] 田孟琪, 杨建忠. 等离子体处理超高相对分子质量聚乙烯纤维[J]. 合成纤维, 2013, 42(4): 16-19.
TIAN Mengqi, YANG Jianzhong. Study on ultra-high molecular weight polyethylene fiber treated by plasma [J]. Synthetic Fiber in China, 2013, 42(4): 16-19.
[4] WANG J, LIANG G, WEN Z, et al. Studies on surface modification of UHMWPE fibers via UV initiated grafting [J]. Applied Surface Science, 2006, 253(2): 668-673.
[5] SMITH P, LEMSTRA P J. Ultra-high-strength polyethylene filaments by solution spinning/drawing [J]. Journal of Materials Science, 1980, 15(2): 505-514.
[6] LIU Ying. Characteristic and application progress of UHMWPE [J]. World Plastics, 2005(11): 36-40.
[7] WANG Yanping, CHENG Ruiling, LIANG Linli, et al. Study on the preparation and characterization of ultra-high molecular weight polyethylene-carbon nanotubes composite fiber [J]. Composites Science & Technology, 2005, 65(5): 793-797.
[8] LUO Yifeng. General situation of world's ultra high molecular weight polyethylene fiber and some suggestions [J]. Hi-Tech Fiber & Application, 1999(5): 13-19.
[9] YIN Dehui, LI Binghai, XU Shuzhen, et al. Development and application of UHMWPE [J]. Plastics, 1999, 41(6): 9-12.
[10] XU Haojun, AN Minfang, WANG Zongbao, et al. Characterization of structural knot distributions in UHMWPE fibers [J]. Polymer Science (English), 2016, 34(5): 606-615.
[11] 任元林, 程博闻. 超高分子量聚乙烯纤维的改性及其应用[J]. 高科技纤维与应用, 2005, 30(5): 34-40.
REN Yuanlin, CHENG Bowen. Modification and application of ultra-high molecular weight polyethylene fiber [J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2005, 30(5): 34-40.
[12] 王皓, 侯志辉, 李炜, 等. UHMWPE树脂及其纤维应用现状和发展前景[J]. 高科技纤维与应用, 2015, 40(1): 19-28.
WANG Hao, HOU Zhihui, LI Wei, et al. The application and trend of UHMWPE resin and its fiber [J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2015, 40(1): 19-28.
[13] 栾秀娜, 于俊荣, 刘兆峰. 超高分子量聚乙烯纤维及其应用[J]. 高科技纤维与应用, 2003, 28(3): 23-27.
LUAN Xiuna, YU Junrong, LIU Zhaofeng. Ultra-high molecular weight polyethylene fiber and its application [J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2003, 28(3): 23-27.
[14] 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(4): 41-46.
LI Ruipei, LI Weiwei, MENG Li, 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(4) : 41-46.
- [15]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黏结力的影响研究[J]. *高分子学报* , 2016(10) : 1439-1446.
REN Yu , ZHANG Yin , WANG Xiaona , et al. Surface properties and adhesion force of air dielectric barrier discharge treated UHMWPE fibers [J]. *Acta Polymerica Sinica* , 2016(10) : 1439-1446.
- [16]金军,张慧萍,晏雄. 超高分子量聚乙烯纤维的表面改性研究[J]. *产业用纺织品* , 2010 , 28(2) : 36-40.
JIN Jun , ZHANG Huiping , YAN Xiong. Study on surface-treatment of UHMWPE fiber [J]. *Technical Textiles* , 2010 , 28(2) : 36-40.
- [17]SAKURAI K , KONDO Y , MIYAZAKI K , et al. Ultrahigh-molecular-weight-polyethylene-fiber surface treatment by electron-beam-irradiation-induced graft polymerization and its effect on adhesion in a styrene-butadiene rubber matrix [J]. *Journal of Polymer Science Part B Polymer Physics* , 2004 , 42(42) : 2595-2603.
- [18]NETRAVALI A N , CACERES J M , THOMPSON M O , et al. Surface modification of ultra-high strength polyethylene fibers for enhanced adhesion to epoxy resins using intense pulsed high-power ion beam [J]. *Journal of Adhesion Science & Technology* , 1999 , 13(11) : 1331-1342.
- [19]ALINA Kaminska , HALINA Kaczmarek , JOLANTA Kowalone. The influence of side groups and polarity of polymers on the kind and effectiveness of their surface modification by air plasma action [J]. *European Polymer Journal* , 2002(38) : 1915-1919.
- [20]刘晓巧,孟家光,田萌. 超高分子量聚乙烯纤维的低温等离子体处理[J]. *合成纤维* , 2015 , 44(10) : 25-29.
LIU Xiaoqiao , MENG Jianguang , TIAN Meng. Low temperature plasma treatment of ultrahigh molecular weight polyethylene fiber [J]. *Synthetic Fiber in China* , 2015 , 44(10) : 25-29.
- [21]洪剑寒,潘志娟. 氧气等离子体处理对超高分子量聚乙烯纤维力学性能的影响[J]. *产业用纺织品* , 2013 , 31(2) : 29-32.
HONG Jianhan , PAN Zhijuan. Mechanical property of UHMWPE fiber treated by oxygen plasma [J]. *Technical Textiles* , 2013 , 31(2) : 29-32.
- [22]HUANG Chiyuan , WU Jinhyi , TSAI Chinshan , et al. Effects of argon plasma treatment on the adhesion property of ultra high molecular weight polyethylene (UHMWPE) textile [J]. *Surface & Coatings Technology* , 2013 , 231(9) : 507-511.
- [23]LIU Hengjun , PEI Yanan , XIE Dong , et al. Surface modification of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) by argon plasma [J]. *Applied Surface Science* , 2010 , 256(12) : 3941-3945.
- [24]曹涛. 铬酸处理超高分子量聚乙烯纤维性能分析[J]. *山东纺织科技* , 2014 , 55(2) : 53-56.
CAO Tao. Research on adhesion of UHMWPE fiber treated by chromic acid [J]. *Shandong Textile Science & Technology* , 2014 , 55(2) : 53-56.
- [25]宋俊,肖长发,李娜娜,等. 铬酸处理的超高分子量聚乙烯纤维粘接性研究[J]. *玻璃钢/复合材料* , 2007(2) : 29-32.
SONG Jun , XIAO Changfa , LI Nana , et al. Study on adhesion of UHMWPE fiber treated by chromic acid [J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites* , 2007(2) : 29-32.
- [26]PANIN S V , KORNIENKO L A , PIRIYAON S , et al. Antifrictional nanocomposites based on chemically modified UHMWPE (Part 3) : comparison of modification effect of compatibilizers on mechanical and tribotechnical properties [J]. *Journal of Friction & Wear* , 2012 , 33(1) : 47-52.
- [27]WANG Lei , GAO Shangbing , WANG Junjun , et al. Surface modification of uhmwpe fibers by ozone treatment and uv grafting for adhesion improvement [J]. *Journal of Adhesion* , 2016 , 94(1) : 30-45.
- [28]杨宇平. 超高分子量聚乙烯纤维电子束辐照改性研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2004: 2.
YANG Yuping. Study on Electron Beam Irradiation Modification of UHMWPE Fibers [D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University , 2004: 2.
- [29]骆玉祥,胡福增,郑安响,等. 超高分子量聚乙烯纤维表面处理[J]. *玻璃钢/复合材料* , 1998(5) : 9-13.
LUO Yuxiang , HU Fuzeng , ZHENG Anna , et al. Surface treatment of ultra-high molecular weight polyethylene fiber [J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites* , 1998(5) : 9-13.
- [30]田孟琪,杨建忠. 空气冷等离子体处理对 UHMWPE 纤维性能与结构的影响[J]. *高科技纤维与应用* , 2013(4) : 34-37.
TIAN Mengqi , YANG Jianzhong. Cold air plasma treatment on properties and structure of UHMWPE fibers [J]. *High-Tech Fiber And Applications* 2013(4) : 34-37.
- [31]邓芹英,刘岚,邓慧敏. 波谱分析教程[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2007.
DENG Qinying , LIU Lan , DENG Huimin. *Wave-Spectrum Analysis Tutorial* [M]. 2nd Ed. Beijing: Science Press , 2007.
- [32]岳震南,黄英,王岩,等. 低温等离子体对 PBO 纤维表面改性的研究[J]. *玻璃钢/复合材料* , 2011(1) : 16-19.
YUE Zhennan , HUANG Ying , WANG Yan , et al. Study on the affect of low temperature plasma treatment on surface modification of PBO fibers [J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites* , 2011(1) : 16-19.