

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.06.019

紫外老化对 EVAC/PBO 复合材料力学性能的影响

孙宗保,张鹏,朱晓琳,辛建平,宫平,曲志敏,虢忠仁,钟蔚华

(中国兵器工业集团第五三研究所,济南 250031)

摘要: 研究紫外光照射时间对乙烯-乙酸乙烯酯(EVAC)/PBO 复合材料的力学性能和微观结构的影响,借助电子万能试验机、场发射扫描电子显微镜、傅里叶变换红外光谱仪等设备对复合材料的力学性能及微观结构进行测试表征。结果表明:经过 960 h 的紫外光照射后, EVAC/PBO 复合材料的拉伸强度降幅约 3.2%,弯曲强度、冲击强度及层间剪切强度下降 10% 左右,动态力学性能下降并不显著。结合复合材料的微观结构表征可知,在紫外光的照射下,复合材料表面的树脂基体会发生氧化分解,部分纤维裸露出来,在紫外光的照射下纤维内部化学键发生断裂,噁唑环开环,纤维与树脂之间出现明显空隙,界面性能恶化, EVAC/PBO 复合材料的界面粘接性能下降,导致整体性能下降。

关键词: 乙烯-乙酸乙烯酯/PBO 复合材料; 紫外光辐照; 力学性能; 微观结构

中图分类号: TQ342+.73 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)06-0111-06

Effects of Ultraviolet Aging on Mechanical Properties of EVAC/PBO Composites

Sun Zongbao, Zhang Peng, Zhu Xiaolin, Xin Jianping, Gong Ping, Qu Zhimin, Guo Zhongren, Zhong Weihua

(Institute 53, China North Industries Group Corporation, Jinan 250031, China)

Abstract : The effects of UV irradiation time on the mechanical properties and microstructure of ethylene-vinyl acetate (EVAC)/PBO fiber composites were studied by using electronic universal testing machine, field emission scanning electron microscopy, Fourier infrared spectrometer and other equipment to test the mechanical properties and microstructure of the composite characterization. The results show that after 960 h UV irradiation, the tensile strength of PBO fiber composites decreases about 3.2%, the bending strength, impact strength and interlaminar shear strength decrease about 10%, and the dynamic mechanical properties of PBO fiber composites do not decrease significantly. Combined with the microstructure of the composite characterization, under the irradiation of ultraviolet light, the resin matrix on the surface of the composite will oxide decomposition. Under the irradiation of high-energy ultraviolet, part of the fiber is exposed, fiber interior chemical bonds break, oxazole ring open. A significant gap between fiber and resin shows with the interface performance deterioration and the degradation of interface adhesive performance of the composite. Thus, the overall performance of EVAC/PBO composite decreases.

Keywords : ethylene-vinyl acetate/PBO composite ; ultraviolet irradiation ; mechanical property ; microstructure

聚对苯撑苯并双噁唑(PBO)纤维,因其具有低密度、高强度、高弹性模量、高耐热温度、高阻燃性等优异性能,被誉为“21 世纪的超级纤维”,广泛应用于国防军工、航空航天等领域^[1-5]。但是 PBO 纤维耐紫外老化性能较差,长时间使用后性能会发生明显下降,严重影响服役寿命^[6-9]。对此,众多专家学者展开了对 PBO 纤维紫外老化改性的研究^[10-13]。

将 PBO 纤维制成复合材料,也是近年来改善 PBO 纤维使用性能的研究热点^[14-15]。有关研究表明,在湿热老化、热氧老化及紫外老化条件下,环氧树脂/PBO 纤维复合材料力学性能下降幅度均较小^[16-17]。目前,国内外对 PBO 纤维热固性树脂复合材料的耐紫外老化研究较多,而对热塑性树脂复合材料耐紫外老化展开的研究很少。基于此,笔者对紫外老化

通信作者: 钟蔚华, 硕士, 研究员, 主要研究方向为特种纤维的研发以及纤维增强复合材料

收稿日期: 2022-04-08

引用格式: 孙宗保,张鹏,朱晓琳,等. 紫外老化对 EVAC/PBO 复合材料力学性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2022, 50(6):111-116.

Sun Zongbao, Zhang Peng, Zhu Xiaolin, et al. Effects of ultraviolet aging on mechanical properties of EVAC/PBO composites[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(6):111-116.

条件下乙烯-乙酸乙烯酯共聚物 (EVAC)/PBO 复合材料的静态、动态力学性能以及表面微观结构进行研究,以分析紫外光辐照时间对 EVAC/PBO 复合材料力学性能的影响。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PBO 纤维 (AS 型): ZYLON, 纤度 1670 cN/dtex, 日本东洋纺公司;

EVAC 树脂: 济南三塑公司生产。

1.2 主要设备及仪器

动态疲劳试验机: INSTRON 8850 型, 美国 INSTRON 公司;

电子拉力万能试验机: RGT-10A 型, 深圳市 REGER 仪器有限公司;

简支梁冲击试验机: JB 6 型, 上海简户仪器设备有限公司;

场发射扫描电子显微镜 (FESEM): GEMINI 300 型, 德国 ZEISS 公司;

傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 仪: Nicolet IS 50 型, 美国 Thermo Scientific 公司;

荧光紫外试验箱: QUV/spray 型, 美国 Q-Lab 公司;

动态热力学分析 (DMA) 仪: DMA 242 型, 德国 NETZSCH 公司。

1.3 紫外光辐照试验

EVAC/PBO 复合材料由 PBO 纤维和 EVAC 树脂通过铺层、热压成型工艺制得, 通过高压水射流切割成不同尺寸的力学性能试样。将复合材料试样梳理整齐固定于样品架, 置于荧光紫外试验箱中, 进行紫外光加速老化试验。参考塑料实验室光源暴露试验方法 GB/T 16422.3-2014, 暴露周期为 8 h 干燥、4 h 凝露, 固定光源与样品的距离为 5 cm, 紫外光波长设置为 340 nm。分别取紫外光老化时间为 0, 120, 240, 360, 480, 600, 720, 840, 960 h 的试样进行紫外老化后分析。

1.4 性能测试与表征

拉伸性能测试: 采用动态疲劳试验机进行 EVAC/PBO 复合材料拉伸实验, 试样尺寸按照标准 GB/T 1447-2005, 试验加载速度为 2 mm/min。

弯曲性能测试: 采用电子拉力万能试验机测试, 试验方法选择三点弯曲式, 试样跨距设为试样厚度的 16 倍, 试验时的加载速度为 2 mm/min, 为避

免试验的偶然性, 每组相同试验不少于 5 个试样。

冲击性能测试: 利用简支梁冲击试验机, 按照 GB/T 1043.1-2008 测试 EVAC/PBO 复合材料的无缺口冲击性能, 试样尺寸 80 mm × 10 mm × 4 mm, 每组测试 5 个试样, 测试结果取平均值。

层间剪切测试: 按照 ASTM D2344/2344M-2016 进行。在紫外老化前后, 选用电子拉力万能试验机对 EVAC/PBO 复合材料的层间剪切性能进行测试, 复合材料试样尺寸为 24 mm × 8 mm × 4 mm, 每个老化时间下测试 5 个试样, 试验加载速率为 2 mm/min, 将所得到的测试结果取平均值。

DMA 分析: EVAC/PBO 试样尺寸为 50 mm × 10 mm × 2 mm, 按照 ASTM D7028-2015 进行测试, 选择 N₂ 气氛, 温度范围为 25 ~ 250℃, 升温速率为 10℃/min。

表面形貌观察: 通过 FESEM 对紫外老化前后 EVAC/PBO 样品的表面形貌进行观察。

FTIR 表征: 波数范围为 400 ~ 4000 cm⁻¹, 扫描次数为 32, 分辨率为 4 cm⁻¹。

2 结果与讨论

2.1 静态力学性能

经过紫外光辐照后, EVAC/PBO 复合材料的拉伸强度、弯曲强度、冲击强度及层间剪切强度都产生了变化。图 1 为 EVAC/PBO 复合材料紫外老化前后的拉伸强度及其弹性模量曲线。

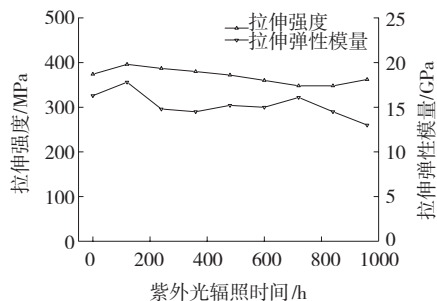


图1 不同紫外光辐照时间时 EVAC/PBO 复合材料拉伸性能

从图 1 可以看出, 在紫外光辐照前, EVAC/PBO 复合材料的拉伸强度为 374 MPa, 经过不同时间的紫外光辐照后, EVAC/PBO 复合材料的拉伸强度呈现出波动下降的趋势, 但总体降幅较小。辐照时间达到 960 h 时, 拉伸强度降幅约 3.2%。EVAC/PBO 复合材料的拉伸弹性模量为 16.3 GPa, 在紫外光辐照下, 其拉伸弹性模量不断波动下降。经过 960 h 的紫外光辐照后, 拉伸弹性模量降幅约 20.2%。在

紫外光的辐照下,复合材料表面受紫外光、氧气、水分等因素的影响,树脂基体可能会发生氧化分解,从而导致复合材料的拉伸性能下降。由于 EVAC 树脂是热塑性树脂,加之成型工艺的影响,因此 EVAC/PBO 复合材料表面的可变形性较大,进行力学性能测试时可能会有较大的误差,从而造成个别数据偏差较大。

图 2 为 EVAC/PBO 复合材料紫外老化前后的弯曲强度及其弹性模量变化曲线。由图 2 可知,在紫外光辐照之后, EVAC/PBO 复合材料的弯曲强度和弯曲弹性模量均出现了波动性变化,且变化趋势一致。紫外老化前,复合材料试样的弯曲强度为 46.8 MPa,经过 960 h 的紫外光辐照后,弯曲强度降为 44.4 MPa,降幅为 5.1%。紫外老化前,复合材料试样的弯曲弹性模量为 11.7 GPa,经过 960 h 的紫外光辐照后,弯曲弹性模量出现下降,弯曲弹性模量降为 10.5 GPa,降幅为 10.3%。由于 EVAC/PBO 复合材料是热塑性复合材料,材料表面可变形性高,因此其弯曲性能的测试误差也会较大。

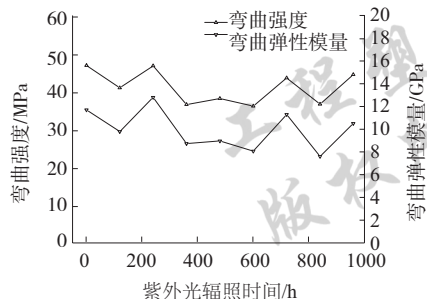


图 2 不同紫外光辐照时间时 EVAC/PBO 复合材料弯曲性能

图 3 为 EVAC/PBO 复合材料紫外老化前后的冲击强度曲线。由图 3 可知,紫外光照射前, EVAC/PBO 复合材料冲击强度为 107 kJ/m²。在紫外光辐照的前 240 h 内, EVAC/PBO 复合材料的冲击强度不断降低。在紫外光辐照 240 h 后,复合材料试样的冲击强度开始升高,当辐照时间达到 720 h 时,复合材料的冲击强度达到最大值 127 kJ/m²,受材料性质的影响,这有可能是测试误差引起的异常点。紫外光辐照 720 h 后, EVAC/PBO 复合材料的冲击强度又开始下降。经过 960 h 的紫外光辐照后, EVAC/PBO 复合材料的冲击强度降为 89 kJ/m²,降幅为 16.8%。在紫外光照射下, EVAC/PBO 复合材料表面的基体树脂氧化分解,造成纤维树脂界面破坏,从而使材料整体的冲击性能下降。随着照射时间的延长,试验环境中的氧气、水蒸气等小分子会通

过纤维树脂界面的间隙逐渐扩散到复合材料微小缺陷内部,因此当复合材料受到载荷冲击时,这些气体会促使缺陷迅速扩散到纤维上,纤维会阻止缺陷向材料内部进一步扩展,从而使复合材料冲击强度升高。当辐照时间继续增加,小分子气体在复合材料内部缺陷中达到饱和,纤维将无法继续阻止缺陷向复合材料内部扩散,并且纤维树脂界面恶化严重,造成 EVAC/PBO 复合材料冲击强度急剧下降。

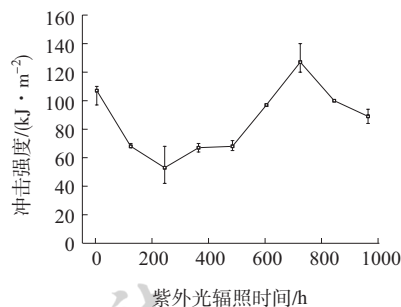


图 3 不同紫外光辐照时间时 EVAC/PBO 复合材料冲击强度

图 4 为紫外光辐照时间对 EVAC/PBO 复合材料层间剪切强度的影响曲线。由图 4 可知,未经紫外光辐照的复合材料的层间剪切强度为 3.14 MPa,经过 960 h 的紫外光辐照后,层间剪切强度降为 2.72 MPa,下降幅度约 13.4%。这表明紫外老化会导致 EVAC/PBO 复合材料的界面粘接性能下降,其原因可能是由于紫外光老化条件中温度较高, EVAC/PBO 复合材料在紫外老化时可能还会产生热氧老化,而 PBO 纤维与 EVAC 树脂两者的热膨胀系数不同,使得 EVAC/PBO 复合材料内部会产生热应力,导致 PBO 纤维与 EVAC 树脂的接触界面遭到破坏,从而使得 EVAC/PBO 复合材料层间剪切强度发生下降。

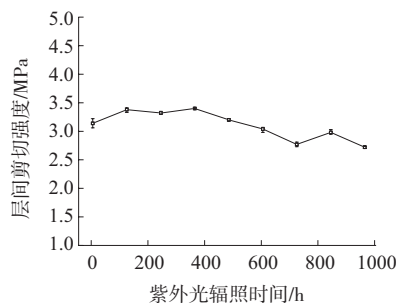
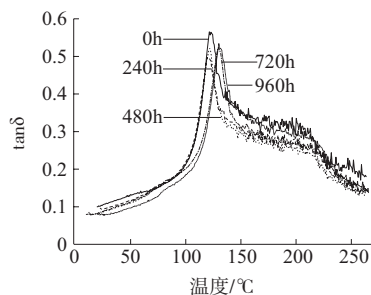


图 4 不同紫外光辐照时间时 EVAC/PBO 复合材料层间剪切强度

2.2 动态力学性能

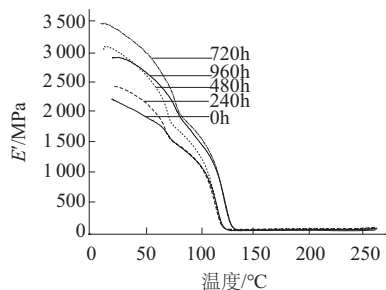
经过不同时间的紫外光辐照后, EVAC/PBO 复合材料的损耗因子 ($\tan \delta$) 变化情况如图 5 所示,紫外光辐照时间对 EVAC/PBO 复合材料玻璃化转变温度 (T_g) 的影响见表 2。

图5 不同紫外光辐照时间时 EVAC/PBO 复合材料 $\tan \delta$ 表2 紫外光辐照时间对 EVAC/PBO 复合材料 T_g 的影响

辐照时间 /h	$T_g/^\circ\text{C}$	$\tan \delta$
0	122.67	0.565
120	119.60	0.528
240	121.19	0.498
360	123.36	0.515
480	122.95	0.521
600	130.68	0.514
720	131.16	0.524
840	129.24	0.505
960	131.20	0.534

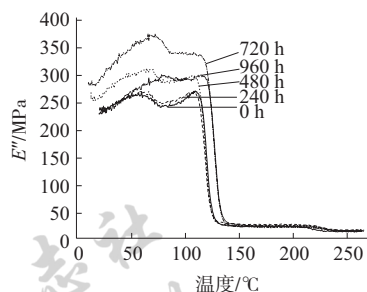
由图5和表2可知,在紫外光辐照前, EVAC/PBO 复合材料的 T_g 为 122.67°C , 紫外光辐照 120 h 时, T_g 降低到 119.60°C , 紫外光辐照 960 h 后, T_g 升高到 131.20°C 。这说明在紫外光的辐照下, 紫外光辐照能量不仅使得 PBO 纤维的分子结构产生变化, 噁唑环开环, 还使得 EVAC 树脂基体发生断链、降解, 在这些因素的影响下, EVAC/PBO 复合材料的 T_g 降低, 耐热性能发生下降。当紫外光辐照时间继续增加时, EVAC/PBO 复合材料内部的残余热应力得到充分释放, 从而导致 EVAC/PBO 复合材料耐热性能提高。

EVAC/PBO 复合材料的储能模量 (E') 随着紫外光辐照时间的变化情况如图6所示。

图6 不同紫外光辐照时间时 EVAC/PBO 复合材料的 E'

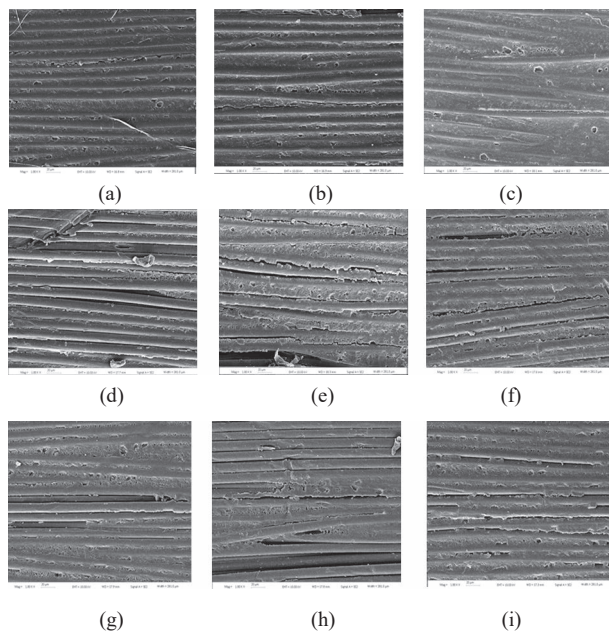
从图6可以看出,在紫外光的作用下, EVAC/PBO 复合材料的 E' 曲线逐渐向低温方向移动, 这说明 EVAC/PBO 复合材料的刚性降低。当继续增加紫外光辐照时长后, E' 曲线开始朝向高温方向移动, EVAC/PBO 复合材料的刚性不断升高。

图7为 EVAC/PBO 复合材料的损耗模量 (E'') 随着紫外光辐照时间的变化情况。由图7可知,在紫外光的作用下, E'' 曲线逐渐向低温方向移动, 这说明 EVAC 树脂基体发生玻璃化转变的温度降低, 其分子链段运动所需要克服的内部摩擦阻力减小, EVAC/PBO 复合材料的耐热性能有所下降。当照射时间继续增加时, EVAC/PBO 复合材料的 E'' 曲线又朝向高温方向移动, T_g 升高, EVAC/PBO 复合材料耐热性升高, 这也与 EVAC/PBO 复合材料的 T_g 的变化结果一致。

图7 不同紫外光辐照时间时 EVAC/PBO 复合材料的 E''

2.3 表面形貌

对紫外老化前后 EVAC/PBO 复合材料的表面形貌进行观察, 得到放大 1000 倍的表面形貌照片, 如图8所示。由图8可知, 紫外老化前, EVAC/PBO 复合材料表面平整, PBO 纤维被 EVAC 树脂均匀覆盖, 纤维/树脂界面良好。经过紫外光辐照 360 h 后, 纤维表面的树脂基体逐渐被氧化分解, 大量纤维裸



紫外光照射时间: a—0 h; b—120 h; c—240 h; d—360 h; e—480 h; f—600 h; g—720 h; h—840 h; i—960 h

图8 EVAC/PBO 复合材料紫外老化前后 SEM 照片

露出来,部分纤维与树脂之间出现微裂纹。随着紫外光辐照时间的继续增加,纤维与树脂之间的裂纹明显增多。经过紫外光辐照 840 h 后,纤维与树脂发生脱粘,树脂基体分解严重,PBO 纤维与 EVAC 树脂之间出现明显空隙。这主要是因为,在紫外光的辐照下,EVAC 树脂基体会被氧化分解,使得复合材料表面的缺陷增多,水分、氧气等小分子物质在这些缺陷中不断扩散,从而加剧了 PBO 纤维与 EVAC 树脂界面的破坏。另外,由于紫外老化环境中设定的试验温度较高,EVAC/PBO 复合材料在紫外老化时还会产生热氧老化,而 PBO 纤维与 EVAC 树脂的热膨胀系数并不相同,从而导致 EVAC/PBO 复合材料内部产生热应力,大量裂纹产生。表面缺陷的增加,纤维树脂界面的恶化,均会使得 EVAC/PBO 复合材料的整体性能下降,这也与上述复合材料力学性能的降低相呼应。

2.4 FTIR 光谱

在紫外加速老化后,对复合材料进行 FTIR 表征,以分析紫外光辐照对其化学结构的影响。图 9 为 EVAC/PBO 复合材料紫外老化前后的 FTIR 谱图。

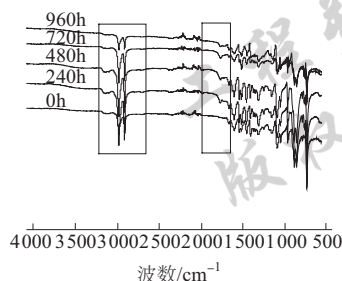


图 9 不同紫外老化时间下 EVAC/PBO 复合材料 FTIR 谱图

由图 9 可知,EVAC/PBO 复合材料在 2851 cm^{-1} 和 2918 cm^{-1} 处有明显的吸收峰,在紫外光的照射下,该吸收峰的强度一直在波动变化。 $2850\sim 3000\text{ cm}^{-1}$ 为亚甲基的伸缩振动峰,在紫外光的照射下,复合材料表面的树脂基体会发生氧化分解,造成亚甲基的吸收峰强度降低。同时,随着紫外光辐照时间的增加,由于树脂基体逐渐分解,复合材料表面被 EVAC 树脂保护的纤维裸露出来,PBO 纤维在紫外光的辐照下,内部化学键发生断裂,在 $-\text{CH}-$ 处断裂产生亚甲基,使亚甲基的含量升高。当紫外照射时间继续增加,PBO 纤维内部断裂生成的亚甲基会被进一步氧化,从而导致亚甲基含量下降。因此,在紫外光照射下,复合材料中亚甲基的吸收峰强度变化,是树脂基体分解和 PBO 纤维内部化学键断裂以及化学键进一步被氧化多种因素作

用的综合结果。

经过 240 h 紫外光辐照后,EVAC/PBO 复合材料在 1724 cm^{-1} 处有一明显的吸收峰,随着紫外光辐射时间的继续增加,该吸收峰一直存在。这说明 EVAC/PBO 复合材料经过紫外光老化,分子结构中产生了羰基。而在紫外光的辐照下,EVAC 树脂基体被氧化分解,会造成羰基的含量升高。PBO 纤维经过紫外光照射,噁唑环上 $\text{C}=\text{N}$ 键和 $\text{C}-\text{O}$ 键断裂,噁唑环开环,PBO 纤维分子结构遭到破坏,生成新的单体,也会导致羰基含量升高。而树脂基体氧化分解生成的小分子会逐渐从复合材料表面剥落,使得羰基含量降低。综合以上几点因素,经过紫外光辐照后,EVAC/PBO 复合材料的羰基含量基本保持在同一水平。

由 EVAC/PBO 复合材料的红外光谱结果分析可知,经紫外光辐照后,EVAC 树脂基体会发生氧化分解,逐渐从材料表面脱落。部分失去保护的 PBO 纤维在紫外光作用下内部化学键发生断裂,使得纤维强度降低。在两者共同作用下,EVAC/PBO 复合材料的拉伸性能、弯曲性能等出现不同幅度的下降。

3 结论

(1) 经过 960 h 的紫外光照射后,EVAC/PBO 复合材料的拉伸强度降幅约 3.2%,弯曲弹性模量、冲击强度及层间剪切强度下降为 10% 左右。结合复合材料的表面形貌及红外光谱结果可知,在紫外光的照射下,EVAC/PBO 复合材料表面的树脂基体会发生氧化分解,并逐渐从复合材料表面脱落;随着照射时间的延长,部分 PBO 纤维裸露出来,在紫外光的辐照下纤维内部化学键发生断裂,噁唑环开环,PBO 纤维与 EVAC 树脂之间出现明显空隙,界面性能变差,复合材料整体力学性能下降。由于 EVAC/PBO 复合材料的紫外光辐照是一个由表及里的过程,且裸露出来的 PBO 纤维占表面纤维总数的比例较小,因此 EVAC/PBO 复合材料的力学性能下降并不显著。

(2) 经过 960 h 的紫外光照射后,EVAC/PBO 复合材料的 T_g 先降低后升高, $\tan \delta$, E' , E'' 也符合以上规律,耐热性能有小幅提升。这是因为 EVAC/PBO 复合材料内部的残余热应力在紫外光辐照能量的作用下得到了充分释放,使得复合材料的耐热性能提高。

(3) 通过热压成型工艺制备的热塑性 EVAC/PBO 复合材料,表面可变形性较大,进行拉伸性能、

弯曲性能等力学性能测试时可能会有较大的误差,从而造成个别数据偏差较大。因此对此类复合材料进行力学性能测试时,应尽量增加每组的试样个数,舍去异常数据点,尽量提高试验结果的准确性。

参考文献

- [1] 史纪友,李磊,缪金根,等. PBO纤维的开发及应用[J]. 合成纤维工业,2017,40(3):56-62.
Shi Jiyu, Li Lei, Miao Jingen, et al. Development and application of PBO fiber[J]. China Synthetic Fiber Industry, 2017, 40(3):56-62.
- [2] 董晓宁,尉霞,郭昌盛. PBO纤维的性能及应用[J]. 成都纺织高等专科学校学报,2016,33(2):182-185.
Dong Xiaoning, Yu Xia, Guo Changsheng. Performance and application of PBO fiber[J]. Journal of Chengdu Textile College, 2016, 33(2):182-185.
- [3] 蔡小川,张海涛,韩建国,等. 超高性能PBO纤维的发展及性能应用[J]. 辽宁化工,2016,45(11):1435-1438.
Cai Xiaochuan, Zhang Haitao, Han Jianguo, et al. Development and application of the super high performance PBO fiber[J]. Liaoning Chemical Industry, 2016, 45(11):1435-1438.
- [4] 江晓玲,未雨浓,杨胜林,等. 热处理对PBO纤维结构和性能的影响[J]. 合成技术及应用,2018,33(3):1-4.
Jiang Xiaoling, Wei Yunong, Yang Shenglin, et al. Effect of heat treatment on the structure and properties of polybenzoxazole (PBO) fibers[J]. Synthetic Technology and Application, 2018, 33(3):1-4.
- [5] 张华鹏,张建春,王善元. 超高性能PBO纤维Zylon的结构、力学性能及应用[J]. 产业用纺织品,2001,19(2):38-41.
Zhang Huapeng, Zhang Jianchun, Wang Shanyuan, et al. Mechanical properties, structure and its application of super high performance PBO fibre zylon[J]. Industrial Textile, 2001, 19(2):38-41.
- [6] Peter J Walsh, Hu Xiaobo. Environmental effects on poly-p-phenylene benzobisoxazole fibers. II.attempts at stabilization[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2006, 102:3 819-3 829.
- [7] Peter J Walsh, Hu Xiaobo. Environmental effects on poly-p-phenylene benzobisoxazole fibers. i .mechanisms of degradation[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2006, 102:3 517-3 525.
- [8] 应灵慧,汪益龙,刘小云,等. PBO纤维自然老化与加速老化的相关性研究[J]. 固体火箭技术,2013,36(1):107-112.
Ying Linghui, Wang Yilong, Liu Xiaoyun, et al. Correlation between accelerated aging and natural aging of PBO fiber[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2013, 36(1):107-112.
- [9] 宋波,傅倩,刘小云,等. 环境因素对PBO纤维老化的影响和储存寿命预测[J]. 材料研究学报,2010,24(5):487-492.
Song Bo, Fu Qian, Liu Xiaoyun, et al. Effect of environmental factors on the aging behave of PBO fibers and the storage life prediction[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2010, 24(5):487-492.
- [10] 吴俊岭,刘小云,钱军,等. 复合溶胶凝胶法改善纤维的光稳定性[J]. 功能高分子学报,2014,27(2):157-163.
Wu Junling, Liu Xiaoyun, Qian Jun, et al. Improving photoaging stability of poly(p-phenylene-2,6-benzobisoxazole)fiber by multiple sol-gel method[J]. Journal of Functional Polymers, 2014, 27(2):157-163.
- [11] 赵浩,金俊弘,杨胜林,等. 复合抗紫外剂对PBO纤维光稳定性的影响[J]. 材料导报,2011,25(17):107-110.
Zhao Hao, Jin Junhong, Yang Shenglin, et al. The effect of hybrid ultraviolet stabilizers on the uv stability of poly(p-phenylene benzobisoxazole)fibers[J]. Material Review, 2011, 25(17):107-110.
- [12] 张娜,杨胜林,金俊弘,等. 可溶性聚酰亚胺涂覆PBO纤维的抗紫外老化性能[J]. 东华大学学报:自然科学版,2012,38(6):650-654.
Zhang Na, Yang Shenglin, Jin Junhong, et al. Anti-ultraviolet aging properties of poly(p-phenylene benzobisoxazole)fiber coated with soluble polyimide[J]. Journal of Donghua University:Natural Science Edition, 2012, 38(6):650-654.
- [13] 张涛,金俊弘,杨胜林,等. 抗紫外老化聚对苯撑苯并二噁唑(PBO)纤维的制备与表征[J]. 化学学报,2010,68(2):199-204.
Zhang Tao, Jin Junhong, Yang Shenglin, et al. Preparation and characterization of poly(p-phenylene benzobisoxazole)(PBO) fiber with anti-ultraviolet aging[J]. Acta Chimica Sinica, 2010, 68(2):199-204.
- [14] 刘夏清,邹德华,牛捷,等. PBO纤维复合材料的研究及进展[J]. 工程塑料应用,2017,45(3):138-141.
Liu Xiaqing, Zou Dehua, Niu Jie, et al. Research and development of PBO fiber composites[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(3):138-141.
- [15] 张鹏,金子明,宫平,等. PBO纤维及复合材料研究进展[J]. 工程塑料应用,2011,39(10):107-110.
Zhang Peng, Jin Ziming, Gong Ping, et al. Progress of PBO fiber and its composites[J]. Engineering Plastics Application, 2011, 39(10):107-110.
- [16] 张承双,王百亚,邢新玲,等. 湿热老化对PBO纤维复合材料力学性能的影响[J]. 固体火箭技术,2016,39(3):397-400,406.
Zhang Chengshuang, Wang Baiya, Xing Xinling, et al. Effect of hygrothermal aging on mechanical properties of PBO fiber reinforced composites[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2016, 39(3):397-400,406.
- [17] 张承双,刘宁,包艳玲,等. 热氧老化对PBO纤维复合材料力学性能的影响[J]. 合成材料老化与应用,2016,45(5):17-21.
Zhang Chengshuang, Liu Ning, Bao Yanling, et al. The effect of thermo-oxidative aging on mechanical properties of PBO fiber reinforced composites[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2016, 45(5):17-21.