

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.04.019

柔性光伏组件背板用CGF/PP有机片材的湿热老化可靠性

陈光剑¹, 金学斌², 阚宏俊³, 王学贵¹, 陈先赛¹, 康忠平³, 柴君凌¹

[1. 浙江安防职业技术学院, 浙江温州 325016; 2. 中广核俊尔(浙江)新材料有限公司, 浙江温州 325200;

3. 乐清正泰太阳能科技有限公司, 浙江温州 325600]

摘要: 轻质柔性光伏组件在承载能力有限的工商业屋顶具有广泛的应用前景, 而其背板所用的聚对苯二甲酸乙二醇(PET)材料存在刚性支撑不足、易湿热分解等问题, 影响组件的抗变形和电气性能。为探索连续玻璃纤维增强聚丙烯(CGF/PP)有机片材作为轻质柔性光伏组件背板支撑层材料的可行性, 对其湿热老化可靠性进行研究, 为柔性光伏组件的制备和性能优化提供参考。采用48 h的饱和蒸汽试验(PCT)和1 000 h的85 °C & 85%相对湿度的湿热老化法(DH85), 对未涂覆氟碳涂层的CGF/PP有机片材进行湿热老化测试, 该有机片材由CGF/PP预浸带按[0/90/0]铺层制成。PCT试验结果显示, CGF/PP有机片材湿热老化后的力学性能保持率良好, 湿热破坏主要发生在CGF/PP界面; 抗氧化剂的含量和类型对其力学强度和黄变有显著影响, 耐高温、耐水解型抗氧化剂抑制黄变效果更佳。DH85试验结果表明, 该有机片材的水蒸气透过率稳定性较好; 在湿热条件下, 抗氧化剂对PP基体提供保护抑制裂纹扩散, 使水蒸气透过率维持在2.5 g/(m²·d)以内, 添加耐水解、耐萃取型抗氧化剂的样品表现最优。CGF/PP有机片材若与氟膜/氟碳复合成光伏背板材料, 其可靠性将进一步提升, 具备作为轻质柔性光伏组件背板材料的潜力。

关键词: 连续玻璃纤维增强聚丙烯; 轻质柔性光伏组件; 光伏背板; 湿热老化; 水蒸气透过率

中图分类号: TQ327.1+1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)04-0130-06

Hygrothermal aging reliability of CGF/PP organic sheets for backplane of flexible photovoltaic modules

CHEN Guangjian¹, Jin Xuebin², KAN Hongjun³, WANG Xuegui¹, CHEN Xiansai¹, KANG Zhongping³, CHAI Junling¹

[1. Zhejiang College of Security Technology, Wenzhou 325016, China; 2. CGN Juner (Zhejiang) new materials Co., Ltd., Wenzhou 325200, China; 3. Yueqing Zhengtai Solar Energy Technology Co., Ltd., Wenzhou 325600, China]

Abstract : Lightweight flexible photovoltaic modules have broad application prospects on industrial and commercial rooftops with limited load-bearing capacity. Nevertheless, the polyethylene terephthalate (PET) material employed in their backsheets suffers from issues like inadequate rigid support and vulnerability to hydrothermal decomposition. These problems undermine the modules' resistance to deformation and electrical performance. To probe into the viability of continuous glass fiber reinforced polypropylene (CGF/PP) organic sheets as the backsheet support layer material for lightweight flexible photovoltaic modules. By investigating their hydrothermal aging reliability, valuable references were provided for the fabrication and performance optimization of flexible photovoltaic modules. Methods with 48-hour pressure cooker test (PCT), 1 000-hour hydrothermal aging test at 85 °C and 85% relative humidity (DH85) were utilized to carry out hydrothermal aging tests on CGF/PP organic sheets without fluorocarbon coatings. These CGF/PP organic sheets were fabricated from CGF/PP unidirectional prepreg tapes in [0/90/0] lay-up. The PCT test results indicate that the CGF/PP organic sheets exhibit favorable retention of mechanical properties during hydrothermal aging. Hydrothermal damage predominantly occurs at the CGF/PP interface. The content and type of antioxidants exert a remarkable influence on its mechanical strength and yellowing phenomenon. Antioxidants with high-temperature resistance and hydrolysis resistance demonstrate superior efficacy in suppressing yellowing. The DH85 test reveals that the CGF/PP organic sheets possess good stability in

基金项目: 温州市科研项目(G20240073), 温州市重大科技创新攻关项目(2024ZS0008)

通信作者: 陈光剑, 硕士, 高级工程师, 研究方向为纤维增强复合材料、生物可降解塑料

收稿日期: 2025-02-03

引用格式: 陈光剑, 金学斌, 阚宏俊, 等. 柔性光伏组件背板用CGF/PP有机片材的湿热老化可靠性[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(4): 130-135.

CHEN Guangjian, Jin Xuebin, KAN Hongjun, et al. Hygrothermal aging reliability of CGF/PP organic sheets for backplane of flexible photovoltaic modules[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(4): 130-135.

water vapor transmission rate. Under hydrothermal conditions, antioxidants safeguard the PP matrix and impede crack propagation, maintaining the water vapor transmission rate below $2.5 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$. Samples incorporating hydrolysis-resistant and extraction-resistant antioxidants present the optimal performance. When the CGF/PP organic sheets are compounded with fluorinated films/fluorocarbons to form photovoltaic backsheet, their reliability can be further enhanced, signifying their potential as backsheet materials for lightweight flexible photovoltaic modules.

Keywords : continuous glass fiber reinforced polypropylene ; lightweight flexible photovoltaic module ; photovoltaic module backsheet ; hydrothermal aging ; water vapor transmission rate

工商业分布式光伏具有空间利用效率高、项目灵活度高、运维成本较低等^[1]特点,其增速远超集中式和户用光伏,占据发展主导地位。随着工商业光伏的持续发展,优质的可承重屋顶资源正不断被消耗,大型厂房屋面通常采用彩钢瓦、陶瓷瓦、沥青卷材等低承载力材料,难以适配传统的单/双玻组件^[2-3]。随着封装技术和高分子复合材料的发展,组件朝着轻量化方向开发,轻质柔性光伏组件作为该方向之一,在低载荷屋面得到广泛应用。

早期的柔性组件由薄膜电池制作,近几年随着晶体硅技术的发展及封装技术的进步,新型高效的晶体硅轻质柔性组件逐步占据市场^{[4][5]}。光伏背板是轻质柔性组件中的核心组成,为轻质柔性组件提供支撑,解决柔性光伏刚性不足的问题^[6],但聚对苯二甲酸乙二酯(PET)背板存在刚性低、膨胀系数大、水解等问题,易使轻质柔性组件产生变形,导致组件抗冲能力和电气性能变差。由连续玻璃纤维(CGF)增强聚丙烯(PP)单向预浸带(CGF/PP UD tape)层叠制备的CGF/PP有机片材具有高强度、高模量、化学稳定和厚度可设计性^[7],可作为轻质柔性光伏组件背板的支撑层材料进行应用。因此,笔者对其进行湿热老化研究以验证其长期可靠性^[8]是至关重要的。笔者采用48 h的饱和蒸汽试验(PCT)和1 000 h的85 °C & 85%相对湿度的湿热老化试验(DH85)等测试方法,对CGF/PP有机片材的力学性能衰减和水蒸气透过率变化进行讨论,并对其长期可靠性的影响因素进行了分析。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PP树脂:BX3920,韩国SK综合化学株式会社;
玻璃纤维(GF):SE4805-1200tex,欧文斯科宁复合材料(中国)有限公司;

抗氧化剂:Irganox1010,巴斯夫(中国)有限公司;

抗氧化剂:Irganox168,巴斯夫(中国)有限公司;

抗氧化剂:DSTP,圣莱科特化工(上海)有限公司;

抗氧化剂:1XA,市售;

光稳定剂:2XA,市售;

相容剂:BONDYRAM® 1001,普利朗工程塑料制造(天津)有限公司;

黑色母:PE2718,卡博特(中国)投资有限公司。

1.2 主要仪器及设备

CGF/PP UD tape 生产线:CT-950,浙江遂金复合材料有限公司;

特氟龙连续式复合机:CZ-1500,浙江遂金复合材料有限公司;

PCT 试验箱:PC-422R8,成都哈斯特思机电设备有限公司;

恒温恒湿试验箱:CH400C,重庆阿泰可试验设备有限公司;

分光式色差仪:CM-3700A,日本柯尼卡美能达控股株式会社;

水蒸气透过率测定仪:W413 2.0,广州标际包装设备有限公司;

万能测试仪:E43.504 (50kN),美特斯工业系统(中国)有限公司。

1.3 试样制备

CGF/PP UD tape 的制备:将GF按面密度160 g/m²进行排纱,GF经牵引至展纱装置预分散,进入浸渍模具与PP熔体浸渍,经冷却辊压装置后收卷。通过调节GF牵引速度和喂料螺杆将CGF/PP UD tape的厚度控制在0.15~0.17 mm,GF含量保持在63%~66%。PP树脂与抗氧化剂、光稳定剂、相容剂等助剂通过失重称或混料机进入挤出机,由螺杆分散、塑化成PP熔体被挤入浸渍模具。其中挤出机温度180~230 °C,浸渍模具温度为200~250 °C。

CGF/PP有机片材的制备:如图1所示,将CGF/PP UD tape按[0/90/0]方向进行铺层,经特氟龙连续式复合机加热、辊压定型、冷却后,制得CGF/PP有机片材。其中加热温度为160~200 °C,冷却循环水温度为18~23 °C。

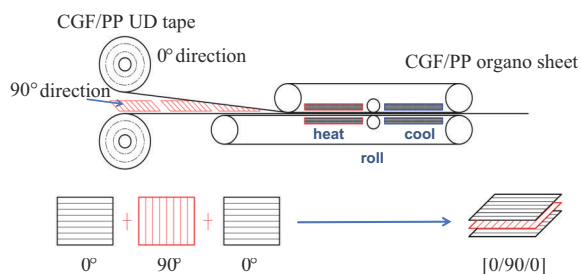


图1 CGF/PP有机片材的制备流程

Fig. 1 Preparation process of CGF/PP organic sheet

1.4 测试与表征

(1)力学性能测试。拉伸强度样条尺寸制备按ISO 527-4:2023,拉伸性能测试速度为5 mm/min;弯曲强度样条制备按ISO 14125:1998,沿表面纤维方向为纵向,垂直纤维方向为横向,弯曲性能测试速度为2 mm/min。

(2)水蒸气透过率测试。水蒸气透过率按GB/T 26253-2010执行,试验条件:温度(38±2)℃,相对湿度(90±2)%RH。

(3)PCT测试。测试条件为:温度(121±1)℃,蒸汽压(0.2±0.01)MPa,相对湿度(97~100)%RH,时间48 h。

(4)DH85试验。测试条件为:温度(85±2)℃,相对湿度(85±2)%RH,时间为1 000 h。

表1 支撑层材料的物理性能对比

Tab. 1 Comparison of physical properties of support layer materials

Item	PET sheet of regular PV module	PET sheet of flexible PV modules	CGF/PP organic sheet
Tensile strength/MPa	MD 180	180	430
	TD 150	150	220
Flexural strength/MPa	70		MD:400
			TD:240
Flexural modulus/MPa	2 200		MD:23 000
			TD:11 200
Sheet thickness/μm	250~260	>500	450~550
Shrinkage rate/%		1.0~2.0	0.1~0.2

Notes: MD is machine direction; TD is transverse direction; the data in the table are typical reference values; the properties of CGF/PP organic sheet is average value of tests on market samples.

2.2 PCT和湿热老化对拉伸和表观性能的影响

温度和湿度能引发光伏组件各材料的老化,使材料性能在一定程度上发生衰减,影响光伏组件的可靠性,进而导致光伏组件电性能的衰退。光伏组件的使用寿命一般要求为25年,通常用加速湿热老化试验来验证材料的长期老化性能。DH85湿热老化试验是光伏背板材料耐湿热老化表征的常规测试手段,为行业标准以及国家标准所认可。但DH85试验的测试时间较长,通常在1 000~3 000 h,

2 结果与讨论

柔性背板为轻质光伏组件提供刚性支撑,且需具有长期耐候性,因此对背板材料的力学性能和长期湿热老化可靠性进行研究是极为必要的。光伏背板基本以多层复合结构存在,由支撑板和氟膜、氟碳涂层等复合而成,而不同组件制造企业对背板含氟的要求也不尽相同^[9]。本试验以不含氟膜/涂层的支撑基板材料为基础研究对象,即以CGF/PP有机片材开展相关的力学强度及湿热老化性能研究。

2.1 基本力学性能

轻质柔性光伏组件缺少玻璃盖板提供的力学强度,而透明前板所能提供的力学强度有限,因此具有更高力学性能的背板材料是柔性光伏组件可靠性的关键需求。当前常见的提高背板强度的方法是增加现有背板支撑层的厚度,即将原PET板厚度250 μm加厚至500 μm以上^[10]。CGF/PP有机片材具有优异的力学性能,与其他支撑层材料的物理性能对比结果见表1,可见CGF/PP有机片材的拉伸强度是PET板^[11]的一倍以上,弯曲模量远超PET数倍,且具有极低的收缩率和线性膨胀系数,是轻质柔性光伏背板支撑层的优选材料。另外,PP比PET具有更优异的耐水解性和耐腐蚀性,能极大提升了柔性光伏组件可靠性。

使光伏背板耐湿热老化性能的评测周期较长。PCT是一种饱和蒸汽加压测试方法,即温度121℃,0.2 MPa蒸汽压、湿度为100%,已被证明在减少湿热测试周期方面是有效的,行业内普遍认为PCT 48 h测试相当于IEC61215标准的DH85 2 000 h测试^[12-13]。

试验所使用的基础配方为33.5份PP,64份GF,2份相容剂、0.5份抗氧剂(1010,168)。在此基础上按表2中助剂种类及比例制备不同配方的CGF/PP样品,再放置PCT环境下24,48 h测试其力学性能

表2 CGF/PP有机片材试验配方
Tab. 2 Experimental formula of CGF/PP organic sheet

Formula No.	Antioxidant DSTP	Antioxidant 1XA	HALS 2XA
1 [#]	0.20		0.10
2 [#]			0.10
3 [#]		0.20	0.10

和黄变值。

性能测试以纵向拉伸强度为参考,结果见表3, PCT 24 h后 CGF/PP 有机片材各样品的拉伸强度和黄变衰减幅度 Δb 都出现了较大程度的衰减。PCT 48 h后 CGF/PP 有机片材各样品的拉伸强度和 Δb 减缓,基本与 PCT 24 h 持平。由此可知,拉伸强度衰减和色差变化基本发生在 PCT 24 h, 衰减幅度跟抗氧剂的种类、比例存在一定的关联性。

表3 PCT 24 h和48 h的拉伸强度和黄变

Tab. 3 Tensile strength and yellowing after 24 h and 48 h of PCT

Item	PCT time/h	Formula No.			PET sheet
		1 [#]	2 [#]	3 [#]	
Tensile strength/ MPa	0	483	473	456	186
	24	450	373	403	135
	48	438	372	400	118
Tensile strength retention rate/%	24	93.1	78.9	88.4	72.6
	48	90.5	78.7	87.5	63.4
Δb	24	3.8	6.4	0.13	
	48	3.58	6.48	0.23	

Notes: Δb is used to measure the degree of change of a color in yellow-blue chromaticity dimension.

根据前期的研究^[14-16],材料拉伸强度的衰减受两个方面的影响:

(1)高温、高压条件下饱和水蒸气对 CGF/PP 有机片材的树脂基体和界面的破坏。

与 PET 材料相比,CGF/PP 有机片材中的 PP 基体具有较好的抗水解性,PCT 试验对 CGF/PP 有机片材更多在于 GF 与 PP 相容界面和热氧老化的破坏。如图2所示,在基础配方上添加质量分数2%的黑色母,制备了黑色 CGF/PP 有机片材,可以明显看到在 PCT 48 h 内的表面 PP 基体破坏和裂纹变化。

在水蒸气环境中,水分子通过毛细作用沿着树脂基体的微孔、内部裂纹、纤维与树脂的界面进行扩散,而高温、高压环境加速水分子的热运动以及向复合材料内部的迁移速度,使得 PP 树脂基体发生了溶胀^[17]和塑化,使聚合物链之间的相互作用减弱。另外,随着水分子的迁移和扩散,GF 与 PP 基体界面发生了破坏,使本就不强的界面相容性变得更差,

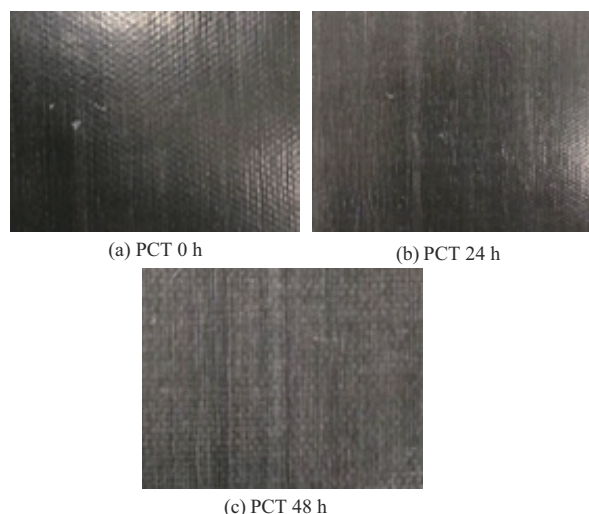


图2 黑色 CGF/PP 有机片材 PCT 48 h 内外观变化

Fig. 2 Appearance changes of black CGF/PP organic sheet within PCT 48 hours

界面黏结强度下降,甚至脱黏,导致传递到 GF 上的外加载荷力降低,复合材料的力学性能下降,这是导致 CGF/PP 有机片材 PCT 24 h 拉伸强度明显下降的最主要原因。因此,PCT 试验方法也适用于 PP 基纤维增强热塑性复合材料。

(2)高温、高湿、高压下 PP 基体的热氧老化。

在高温、高湿、高压条件下,CGF/PP 有机片材也存在较为强烈的热氧老化现象。由表2可知,1[#]~3[#]样品配方的差异在于2[#]样品配方缺少一种抗氧剂,在 PCT 试验后,2[#]样品的拉伸性能保持程度远低于1[#]和3[#]配方,且 Δb 远高于1[#]和3[#]配方。由此可知,抗氧剂含量在一定程度上影响 CGF/PP 有机片材的性能衰减和 Δb 黄变值^[18],在湿热条件下抗氧化剂能与 PP 树脂降解产生的活性自由基和过氧化物反应^[19-20],起到延缓或阻止 PP 发生老化降解的作用,抗氧化剂不断被消耗,而2[#]样品中的抗氧化剂含量偏少,PP 降解速率加快,且马来酸酐接枝聚丙烯相容剂 (PP-g-MAH) 也产生严重的断裂反应^[21],导致 PP 与 GF 之间的界面强度下降。PP-g-MAH 中的 MAH 基团与水分子形成羧酸,又加速了湿氧老化现象。

部分抗氧化剂在 PCT 环境下,其酯基发生水解,形成可溶性物质^[22-23],并被水蒸气带出,进而影响了热氧化效率。抗氧化剂 DSTP 是一种硫代酯抗氧化剂,其在高温高湿等苛刻条件下对热氧老化具有较强的防护作用^[24],但其硫代酯键易发生水解,因此1[#]配方样品的拉伸性能保持率要优于3[#], Δb 黄变值上却比3[#]差。另外,3[#]配方中抗氧化剂 1XA 为耐高温、耐

水解型亚磷酸酯类抗氧剂,有效降低了CGF/PP有机片材PCT 48 h试验的 Δb 黄变值;拉伸强度保持率在87.5%,优于PET板PCT 48 h拉伸强度保持率62.5%的试验结果^[11]。

2.3 湿热老化对水蒸气透过率的影响

水蒸气可以渗透过聚合物封装材料,在组件内部积聚诱发材料降解,侵蚀电池片栅线和聚合物材料中的低分子量物质,并溶解离子,导致组件较高的功率衰减、电气绝缘介质退化,增大漏电流和有害离子迁移量。因此水蒸气透过率是光伏组件背板可靠性的重要参数,CGF/PP有机片材作为轻质柔性光伏组件背板的支撑层材料,研究其水蒸气透过率是非常有必要的。

表4为DH85 1 000 h CGF/PP有机片材的水蒸气透过率,由表4可知,将0[#]~3[#]配方样片先放置在水蒸气透过率测定仪上测定出初始水蒸气透过率,再将其放置于85℃和85%相对湿度湿热老化试验箱1 000 h后测定水蒸气透过率。通过测试前后的数据对比,发现CGF/PP有机片材的水蒸气透过率在一定程度上受抗氧剂的影响。未添加任何抗氧剂的0[#]样片,其水蒸气透过率初始值比其他配方样片都低,反映出抗氧剂的种类和含量会略微影响材料的初始水蒸气透过率。在经历1 000 h湿热老化后,0[#]样片的水蒸气透过率大幅度提升,这间接验证了PCT老化过程中的裂纹扩散和界面破坏。配方1[#]~3[#]样片经历1 000 h湿热老化后水蒸气透过率都有小幅度增长,符合GB/T 31034-2014对复合型背板水蒸气透过率“ $\leq 2.5 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ”的要求,这也验证了抗氧剂在湿热老化过程中对树脂基体的保护。由此可见,若CGF/PP有机片材与氟膜或氟碳涂层组成复合型背板,其湿热老化、紫外老化程度会降低,水蒸气透过率将会进一步减少。

表4 DH85 1 000 h后CGF/PP有机片材的水蒸气透过率

Tab. 4 Water vapor transmission rate of CGF/PP organic sheet after DH85 1 000 h

Formula No.	Water vapor transmission rate/ [g·(m ² ·d) ⁻¹]		Increase rate/%
	0 h	DH85 1 000 h	
0 [#]	1.0	11.2	1020
1 [#]	1.5	1.8	20
2 [#]	1.3	2.0	53.8
3 [#]	1.2	1.3	8.3
PET sheet	0.2	1.4	600

Note: 0[#] sample is basic formulation without antioxidants.

3 结论

探讨了[0/90/0]层叠的CGF/PP有机片材的物理性能,并开展了PCT 48 h和DH85 1 000 h试验,初步验证了CGF/PP有机片材作为柔性光伏组件背板支撑层的湿热老化可靠性。

(1) CGF/PP有机片材的可设计性和更高的力学性能,为其作为柔性光伏组件背板支撑层提供了可行性。

(2) PCT高温、高湿、高压试验是光伏组件耐长期老化可靠性验证的重要方法。CGF/PP有机片材经PCT 48 h测试,力学强度有一定幅度的衰减和色值黄变,但比传统的PET具有更好的长期服役可靠性,原因在于PP基体具有较好的耐水解性和化学稳定性,在PCT试验下所受的主要破坏为GF与PP基体的界面相容性破坏及PP基体的热氧降解。另外,合适的抗氧剂含量和类型能有效抑制CGF/PP有机片材力学性能的衰减和黄变,其中耐高温、耐水解型亚磷酸酯抗氧剂在防黄变上具有显著效果。

(3) 水蒸气透过率是光伏组件背板可靠性的重要参数,CGF/PP有机片材可以在抗氧剂的辅助下,经DH85 1 000 h长期湿热老化试验,具有较好的水蒸气透过率保持性。CGF/PP有机片材与氟膜或氟碳涂层制成复合背板,其湿热老化、紫外老化程度会降低,更能保障其长期可靠性。

参考文献

- 秦景振.工商业分布式光伏集中管控系统的设计与实现[J].能源科技,2024,22(5):70-73.
QIN Jingzhen. Design and implementation of distributed photovoltaic centralized control system for industry and commerce[J]. Energy Science and Technology, 2024, 22(5): 70-73.
- 柴霖,刘胜祥,朱勇.轻质柔性光伏组件应用的经济性分析[J].湖南邮电职业技术学院学报,2023,22(3):34-36,41.
CHAI Ji, LIU Shengxiang, ZHU Yong. Economic analysis of lightweight flexible photovoltaic modules application[J]. Journal of Hunan Post and Telecommunication College, 2023, 22(3): 34-36, 41.
- 郭远帆,卢博,李媛媛.光伏组件轻量化发展与研究进展[J].材料导报,2024,38(增刊1):24-27.
GUO Yuanfan, LU Bo, LI Yuanyuan. Development and research progress of lightweight photovoltaic modules[J]. Materials Reports, 2024, 38(Suppl 1): 24-27.
- 郭永刚,李媛媛,左燕,等.新型轻质柔性光伏组件的制备及其性能研究[J].合成材料老化与应用,2022,51(4):51-53.
GUO Yonggang, LI Yuanyuan, ZUO Yan, et al. Fabrication and properties of novel lightweight flexible photovoltaic module[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2022, 51(4): 51-53.

- [5] SAI H, OKU T, SATO Y, et al. Potential of very thin and high-efficiency silicon heterojunction solar cells[J]. *Progress in Photo-voltaics: Research and Applications*, 2019, 27(12):1 061–1 070.
- [6] LIU W Z, LIU Y J, YANG Z Q, et al. Flexible solar cells based on foldable silicon wafers with blunted edges[J]. *Nature*, 2023, 617 (7962):717–723.
- [7] 刘雪静, 谭洪生, 李丽平, 等. 连续玻纤增强聚烯烃预浸带的力学性能[J]. *山东理工大学学报(自然科学版)*, 2013, 27(5):1–4, 9.
LIU Xuejing, TAN Hongsheng, LI Liping, et al. Mechanical properties of continuous glass fiber reinforced polyolefin prepreg tapes[J]. *Journal of Shandong University of Technology (Natural Science Edition)*, 2013, 27(5):1–4, 9.
- [8] TACHIBANA T, SHIRASAWA K, TANAHASHI K. Development of lightweight and flexible crystalline silicon solar cell modules with PET film cover for high reliability in high temperature and humidity conditions[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2023, 262. DOI:10.1016/j.solmat.2023.112541.
- [9] 文劲松. 塑料薄膜之光伏背板市场分析[J]. *中国塑料*, 2022, 36 (12):71–77.
WEN Jinsong. Market analysis of photovoltaic backsheets based on plastic films[J]. *China Plastics*, 2022, 36(12):71–77.
- [10] 张银环, 姜倩, 唐兰兰. 柔性光伏组件用一体透明前板材料的可靠性分析[J]. *合成材料老化与应用*, 2023, 52(6):27–30.
ZHANG Yinhan, JIANG Qian, TANG Lanlan. Reliability analysis of integrated transparent front panel materials for flexible photovoltaic modules[J]. *Synthetic Materials Aging and Application*, 2023, 52(6):27–30.
- [11] 祝炬桦, 周玉波, 裴旺, 等. 光伏组件背板用高反射率PET薄膜性能[J]. *工程塑料应用*, 2020, 48(4):14–19.
ZHU Juye, ZHOU Yubo, PEI Wang, et al. Performance of PET film with high reflectivity for photovoltaic module backsheet[J]. *Engineering Plastics Application*, 2020, 48(4):14–19.
- [12] OTTERSBOCK B, ORESKI G, PINTER G. Correlation study of damp heat and pressure cooker testing on backsheets[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2016, 133(47). DOI: 10.1002/app.44230.
- [13] 沙锐, 王同心, 姚元毅, 等. 高压加速与恒温恒湿试验对光伏背板性能衰减的关联性探究[J]. *塑料工业*, 2017, 45(2):129–132.
SHA Rui, WANG Tongxin, YAO Yuanyi, et al. The relevance study of pressure cooker test and hot-humid aging test on photovoltaic backsheet's performance degradation[J]. *China Plastics Industry*, 2017, 45(2):129–132.
- [14] 方立. 连续纤维增强热塑性复合材料制备及其性能的研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2012.
FANG Li. Study on preparation and properties of continuous fiber reinforced thermoplastic composites[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2012.
- [15] 谭艺蓓, 倪爱清, 陈宏达, 等. 吸水对连续玻璃纤维增强聚丙烯复合材料的力学性能影响的研究[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2017 (10):72–78.
TAN Yibei, NI Aiqing, CHEN Hongda, et al. Effect of water absorption on mechanical properties of continuous glass fiber reinforced polypropylene composites[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2017(10):72–78.
- [16] 周平, 白艳博, 李承高, 等. 模拟海水-海砂混凝土环境下连续玻璃纤维增强聚丙烯复合材料杆层间剪切性能的演化[J]. *复合材料学报*, 2024, 41(1):323–332.
ZHOU Ping, BAI Yanbo, LI Chenggao, et al. Interlaminar shear behavior of glass-fibre reinforced polypropylene rod under seawater and sea sand concrete simulation environment[J]. *Acta Materialiae Compositae Sinica*, 2024, 41(1):323–332.
- [17] 赵丽丽, 成凤, 厉勇, 等. 超高分子量聚乙烯溶胀工艺的研究进展[J]. *合成纤维*, 2024, 53(7):22–24.
ZHAO Lili, CHENG Feng, LI Yong, et al. Research progress on the swelling process of ultra high molecular weight polyethylene [J]. *Synthetic Fiber in China*, 2024, 53(7):22–24.
- [18] 葛喜慧, 刘义, 韩李旺, 等. 不同抗氧化剂体系对聚丙烯加工稳定性的影响[J]. *塑料科技*, 2024, 52(2):36–39.
GE Xihui, LIU Yi, HAN Liwang, et al. Effect of different antioxidant systems on processing stability of polypropylene[J]. *Plastics Science and Technology*, 2024, 52(2):36–39.
- [19] 陈键. 聚丙烯耐热氧化性能的研究[D]. 广州: 仲恺农业工程学院, 2015.
CHEN Jian. Study on thermal oxidative aging resistance of polypropylene[D]. Guangzhou: Zhongkai University of Agriculture and Engineering, 2015.
- [20] 刘庆坤. 功能化大分子抗氧化剂的合成及其在橡胶中的抗氧化性能研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2023.
LIU Qingkun. Synthesis of functionalized macromolecular antioxidant and its antioxidant performance in rubber[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2023.
- [21] 谢海生, 周淑芬, 兰修才, 等. 热氧化对马来酸酐接枝聚丙烯的结构与性能的影响[J]. *塑料工业*, 2024, 52(2):135–140.
XIE Haisheng, ZHOU Shufen, LAN Xiucan, et al. Effect of thermal oxygen aging on the structure and properties of maleic anhydride grafted polypropylene[J]. *China Plastics Industry*, 2024, 52(2):135–140.
- [22] THÖRNBLÖM K, PALMLÖF M, HJERTBERG T. The extractability of phenolic antioxidants into water and organic solvents from polyethylene pipe materials – Part I[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2011, 96(10):1 751–1 760.
- [23] 牛建娜, 徐慧静, 闫茗, 等. 聚丙烯餐盒复用过程中邻苯二甲酸酯类塑化剂和合成酚类抗氧化剂的检测及迁移规律研究[J]. *食品安全质量检测学报*, 2024, 15(12):182–192.
NIU Jianna, XU Huijing, YAN Ming, et al. Study on determination and migration rule of phthalate ester plasticizers and synthetic phenolic antioxidants during the reuse of polypropylene lunch boxes[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2024, 15(12):182–192.
- [24] 谭卓华, 李世昌, 敖晓娟, 等. 硫代酯抗氧化剂 412S 对聚丙烯加工稳定性的影响[J]. *合成材料老化与应用*, 2018, 47(2):21–23.
TAN Zhuohua, LI Shichang, AO Xiaojuan, et al. Effect of thioester antioxidant 412S on processing stabilization of polypropylene [J]. *Synthetic Materials Aging and Application*, 2018, 47(2):21–23.