DOI: 10.3969/j.issn.2097-583X.2026.04.016　　文章编号：2097-583X(2026)04-0635-04

不同层压温度下封装材料EVA的性能研究

张宗文[a]，何勇攀[b]，李彦磊[b]，曹铭柯[c]，祁鹏辉[c]，韩会丽[b*]

（信阳师范大学 a. 实验室建设与设备管理中心； b. 建筑节能材料河南省协同创新中心；
c. 物理电子工程学院，河南 信阳 464000）

摘　要：光伏组件封装时，层压温度对层压件中的乙烯-醋酸乙烯酯共聚物(EVA)的性能影响极大。选用同一厂家同一批次的3个EVA胶膜样品，采用3种层压温度对其进行层压，研究温度对EVA胶膜性能的影响。交联度测试结果表明，层压温度为145 ℃时，EVA材料的熔融交联程度较好；DSC和TGA的热分析结果也显示，EVA胶膜在145 ℃的层压温度下，结晶性更好，热稳定性也更好。

关键词：光伏组件；乙烯-醋酸乙烯酯共聚物(EVA)；层压温度；热性能

中图分类号：TB324　　**文献标志码：**A　　**开放科学(资源服务)标识码(OSID)：**

Performance of encapsulation material EVA with different lamination temperatures

Zhang Zongwen[a], He Yongpan[b], Li Yanlei[b], Cao Mingke[c], Qi Penghui[c], Han Huili[b*]

(a. Laboratory Construction and Equipment Management Center; b. Collaborative Innovation Center of Henan Province for Energy-Saving Building Materials; c. School of Physics and Electronic Engineering, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, China)

Abstract: When packaging the photovoltaic module, the performance of ethylene-vinyl acetate copolymer (EVA) in these laminates was greatly influenced by the lamination temperature. To investigate the impact of temperature on EVA film performance, three EVA film samples from the same batch and manufacturer were selected for lamination at three different temperatures. The results of the crosslinking degree test indicated that the melting crosslinking degree of EVA material was enhanced at a laminating temperature of 145 ℃. Additionally, DSC and TGA thermal analysis results demonstrated that, at this temperature, the crystallinity of the EVA film was better and its thermal stability became more consistent.

Key words: photovoltaic module; ethylene vinyl acetate(EVA); lamination temperature; thermal performance

0　引言

乙烯-醋酸乙烯酯共聚物(EVA)是一种有黏性的热塑性胶膜，是以乙烯-醋酸乙烯酯共聚物为基础的树脂添加交联剂、偶联剂和抗紫外剂等成分加工而成的功能性薄膜，放在夹胶玻璃中间，经常用于光伏组件封装，以保护电气绝缘、保护组件免受机械损坏和环境腐蚀等[1]。由于EVA胶膜在黏着力、耐久性和光学特性等方面具有明显的优越性，因此在当前的光伏组件生产中，封装胶膜的使用占比最高[2]。

EVA胶膜是一种透明、无定形的材料。与其

收稿日期：2024-07-12；**修回日期：**2024-09-03；*.**通信联系人，**E-mail：hanhuili107@126.com

基金项目：国家自然科学基金项目(12105239)；河南省自然科学基金项目(242300420357)；河南省科技攻关项目(232102240042)

作者简介：张宗文(1984—)，男，河南平顶山人，中级实验师，硕士，主要从事光伏电池材料性能测试研究；韩会丽(1985—)，女，河南漯河人，副教授，博士，主要从事光伏发电系统性能研究。

引用格式：张宗文，何勇攀，李彦磊，等. 不同层压温度下封装材料EVA的性能研究[J]. 信阳师范大学学报(自然科学版)，2026，39(4)：635-638.

Zhang Zongwen, He Yongpan, Li Yanlei, et al. Performance of encapsulation material EVA with different lamination temperatures [J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2026, 39(4): 635-638.

他聚合物不同,EVA材料的热分解温度(T_d)约为351 ℃[3],在典型的气候环境下运行使用时脆性较大。因此,在制备EVA时,需在聚乙烯中加入少量醋酸乙烯酯,以增加韧性,形成半结晶、高透明的材料。通常情况下,33% 的醋酸乙烯酯与乙烯共聚,会获得较好的综合性能,如高透光率和较低的 T_g。用于太阳能电池封装的EVA是专用的热固性热熔胶,即在加热熔融的同时会产生交联反应。当温度较低时,交联反应发生的速度很缓慢,完成固化所需要的时间较长,反之需要的时间就比较短。因此要选择适宜的层压温度,使EVA在熔融中获得流动性,同时发生固化反应。随着反应的进行,交联度增加,EVA失去流动性,起到封装的作用。

EVA胶膜的分子链为线性结构,在太阳光下因温度升高变软,而在严寒天气下会变得更加坚硬,呈现出热胀冷缩的特性[4];EVA胶膜在户外长期使用时因受到高温、氧气、水汽的作用而降解,其降解后产生的物质可以吸收紫外光和可见光,从而导致EVA胶膜变色[5-6]。晶体硅光伏组件结构一般由钢化玻璃板/EVA膜/太阳能电池板/EVA膜/背板构成。因此太阳能电池上表面的EVA胶膜要求具有良好的透光性,可以提高光线的入射率,从而提高组件的输出功率。

在组件生产过程中,层压工艺是影响EVA胶膜性能的关键因素。EVA中含有有机过氧化物和氧化物,有助于EVA层压过程的交联,当EVA加热到一定温度时,交联剂会分解产生自由基,导致EVA的分子间进行结合,形成网状结构,最后使得EVA交联固化;当达到一定的交联度时,不再发生热胀冷缩现象,表现出较好的耐候性[7]。因此,不同的层压温度会使EVA胶膜的熔融时间以及物理和化学性能表现出明显的差异。

本文选用市场最新的EVA产品,选取3种温度,对EVA胶膜进行层压,对比分析其交联度差异,并研究层压温度对其物理化学性能的影响。

1　实验

1.1　实验材料及设备

实验样品、试剂及仪器:二甲苯、EVA材料、层压机、真空干燥箱、萃取装置(圆底烧瓶、冷凝回流管、加热装置)、电子天平、不锈钢网袋。

1.2　实验方法

选取市售的同一型号同一批次的3个EVA胶膜(编号分别为A、B、C),分别裁取两块10 cm×10 cm的实验样品备用。实验研究了3种层压温度对EVA胶膜性能的影响,具体层压工艺参数如表1所示。

表1　EVA样品层压参数

Tab. 1　Lamination parameters of EVA samples

样品编号	温度/℃	抽真空时间/min	层压时间/min
A	120	4	6
B	136	4	6
C	145	4	6

将裁取的EVA胶膜样品放于2块45 cm×45 cm的玻璃间,然后置于聚四氟乙烯无纺布间,最后放入层压机中进行层压。其中标记为A的EVA样品的层压温度为120 ℃,标记为B的EVA样品的层压温度为136 ℃,标记为C的EVA样品的层压温度为145 ℃,3个实验样品的抽真空时间均为4 min,层压时间均为6 min。层压后将层压件取出,冷却后揭下层压好的EVA胶膜样品,层压后的实验样品如图1所示。

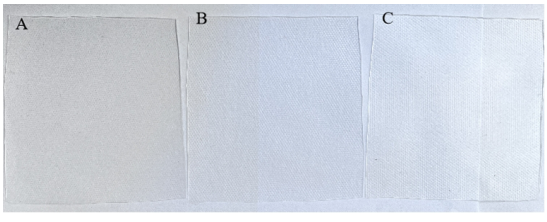


图1　层压后EVA样品

Fig. 1　The EVA sample after lamination

1.3　交联度测试

依据国标GB/T 29848—2018《光伏组件封装用乙烯-醋酸乙烯酯共聚物(EVA)胶膜》,采用二甲苯萃取法进行交联度测试[8]。

首先,采用120目不锈钢丝网制备网袋,进行清洗并烘干,称质量记为 W_1;其次,分别称取层压后EVA胶膜A/B/C样品适量((0.50±0.01) g),将称取后的样品,剪成小块装入网袋中,封口制作为试样包,称质量记为 W_2;然后用铜丝封口,将样品包分别标记为A、B、C,从烧瓶侧口插入并用玻璃塞封住,烧瓶中加入适量二甲苯溶剂,使样品包完全浸没在溶剂中;最后,套上回流冷凝管,加热至140 ℃,进行回流。回流速度保持20~40滴/min,回流时间为5 h。回流结束之后取出样品包,将样品包悬挂除去二甲苯液滴之后放入真空干燥箱,温度控制在140 ℃,干燥至恒重(一般为3 h),

取出样品包冷却后称质量，记为W_3。根据交联度计算公式(1)计算交联度结果，如表2所示。

$$D=\frac{W_3-W_1}{W_2-W_1}\times 100\%, \quad (1)$$

式中：D为交联度，单位 %；W_1为空袋质量，单位g；W_2为试样包质量，单位 g；W_3为萃取和干燥后的试样包质量，单位 g。

表2　交联度计算结果

Tab. 2　The calculation results of cross-linking degree

样品编号	W_1/g	W_2/g	W_3/g	交联度/%
A	0.740 6	0.804 5	0.789 3	76.21
B	0.776 3	0.892 6	0.874 6	84.52
C	0.768 7	0.904 5	0.895 1	93.08

2　结果与讨论

2.1　交联度结果分析

交联度测试结果显示，EVA胶膜A的交联度为76.21%，EVA胶膜B的交联度为84.52%，EVA胶膜C的交联度为93.08%。对于光伏组件来说，EVA交联度为80%～85%时，满足光伏组件的封装要求，判断EVA的固化效果较好[9]。从不同层压温度下制备的EVA胶膜的交联度结果来看，当层压温度设置为136 ℃时，EVA胶膜B达到了最佳的交联状态。

2.2　热性能分析

为了进一步分析层压温度对EVA胶膜热性能的影响，采用差示扫描量热法(DSC)和热重分析法(TGA)对3种层压温度制备的EVA样品进行了测试表征分析。

2.2.1　DSC分析

DSC是研究和表征聚合物结构中熔融、结晶和重排等热转变的常用技术[10]，主要用来表征材料内部热转变相关的温度、热流之间的关系。图2为不同层压温度制备的EVA样品的DSC曲线。

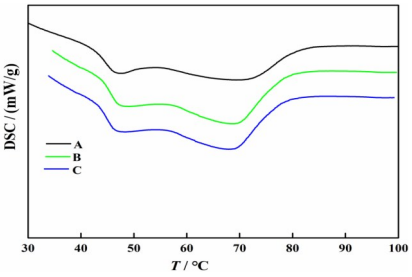


图2　不同层压温度下EVA样品的DSC曲线

Fig. 2　DSC curves of EVA samples with different lamination temperatures

由晶体熔化引起的典型吸热峰有2个，由2个典型晶体熔化造成的吸热峰形成一段较宽的吸热峰，其温度范围在40～100 ℃[11]。较低温度的吸热峰在40～60 ℃，对应初级结晶；较高温度的吸热峰一般在60～90 ℃，对应次级结晶。交联通常发生在140～200 ℃。图2中可以看出，B、C样品的玻璃化转变温度比较接近，并且均高于A样品的玻璃化转变温度，说明较高的层压温度促进了EVA分子的进一步交联。同时可以看出，B、C样品的熔融峰面积大于A样品，说明较高的层压温度下制备的EVA样品交联比例更大，获得了更高的结晶度。

2.2.2　TGA分析

EVA胶膜在层压过程中首先会熔融，随后在较高温度下发生交联反应，层压温度越高发生交联的程度越高。不同层压温度制备的EVA样品的热失重，如图3所示。由图3可知，第一阶段的热重损失发生在300～450 ℃的温度范围内，主要是乙烯基团的分解引起的质量损失，即脱乙酰反应[12]；第二阶段热失重发生在400～530 ℃的温度范围内，主要是乙烯链的分解引起的质量损失。

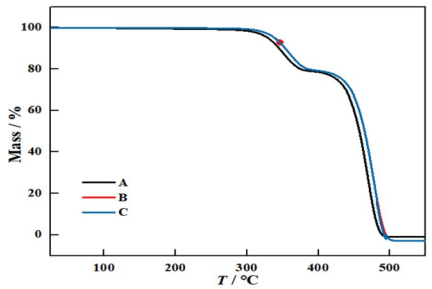


图3　不同层压温度下EVA样品的TGA曲线

Fig. 3　TGA curves of EVA samples with different lamination temperatures

由图3可得，第一阶段B、C样品的热失重低于A样品，说明较高温度下层压的EVA样品的热稳定性更好。第二阶段的失重是交联部分的分解引起的，该阶段B、C样品减少百分比远高于A样品，说明较高温度下层压的EVA样品交联度较大，这与交联度测试结果一致。

2.3　透光性分析

晶体硅太阳电池的响应波长为400～1100 nm[13]，EVA作为光伏组件的封装胶膜，为保证光伏组件的转换效率，必须保证较大比例的太阳光透过玻璃和EVA胶膜，以增加太阳电池的入射光比例。因此，要求EVA胶膜在该波长范围内应具备良好的透光性。不同层压温度制备的EVA胶膜的透光

率(Transmittance,波长 200～1000 nm),如图 4 所示。

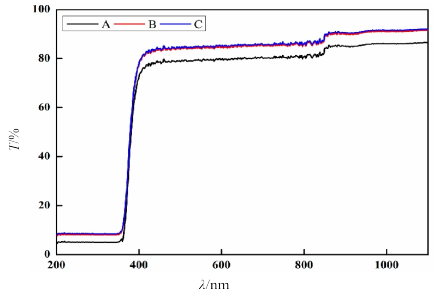


图 4　不同层压温度下 EVA 样品的透光率

Fig. 4　Transmittance of EVA samples at different lamination temperatures

由图 4 可以看出,B、C 样品在波长 400～1000 nm 范围内的透光率均超过了 85%,而 A 样品在 400～800 nm 波长范围内的透光率不足 80%,这说明较低层压温度制备的 EVA 胶膜的透光率较低。

2.4　化学结构测试与分析

傅里叶变换红外光谱仪(FTIR),简称为傅里叶红外光谱仪。为了分析不同层压温度对 EVA 胶膜化学结构的影响,对 EVA 样品进行了 FTIR 表征分析,如图 5 所示。由图 5 可以看出,乙烯链段的特征吸收峰为:2921 cm^{-1}和 2842 cm^{-1}对应的是亚甲基(—CH_2—)的振动吸收峰;1466 cm^{-1}处对应的是—CH_2—的振动吸收峰;1371 cm^{-1}处的峰归属于甲基(—CH_3)的振动吸收峰;722 cm^{-1}处的峰归属于—CH_2—的振动吸收峰。

EVA 官能团中,1730 cm^{-1}对应 C═O 的振动吸收峰;1233 cm^{-1}对应 C—O 的振动吸收峰;1025 cm^{-1}对应 C—O—C 的振动吸收峰。3 个样品的红外光谱图基本重合,说明层压温度对 EVA 胶膜的化学结构影响较小。

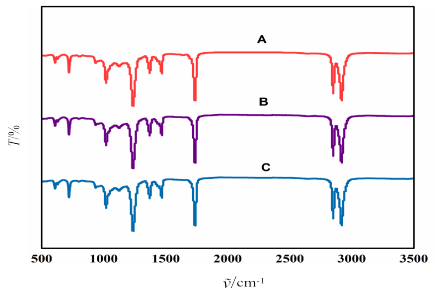


图 5　不同层压温度下 EVA 样品的 FTIR 谱图

Fig. 5　FTIR spectra of EVA samples with different lamination temperatures

3　结论

光伏组件在封装时,层压温度对封装胶膜 EVA 的性能影响较大,尤其是对其物理化学以及热性能。本文采用同一批次的 EVA 胶膜作为研究对象,通过 3 种层压温度制备 EVA 胶膜样品,分析了层压温度对 EVA 胶膜性能的影响。

交联度分析结果表明:在一定的温度范围内,温度越高,层压时的 EVA 材料的熔融交联程度越好;DSC 和 TGA 的热分析结果也表明,较高的层压温度,使得 EVA 胶膜的结晶性更好,拥有更好的热稳定性;FTIR 的化学结构分析显示不同层压温度对其化学结构影响不大。为保证光伏组件的长期可靠性,组件在选择不同厂家 EVA 作为封装胶膜时,应选择合适的层压工艺进行组件封装。

参考文献:

[1] 丁盛,张海鹏. 光伏组件用 EVA 封装胶膜的性能研究[J]. 粘接,2021, 45(1): 32-34.
[2] 施其锋,郭森,唐舫成,等. 光伏组件封装用热塑性聚烯烃胶膜的制备及性能研究[J]. 粘接,2020, 43(7): 6-8,12.
[3] 吴薇, 贾珺博, 王文燕, 等. 聚烯烃弹性体研究进展[J]. 弹性体, 2022, 32(4): 90-94.
[4] 黄慧,冯相赛,钱峰伟,等. 光伏组件耐极端气候环境性能的研究综述[J]. 太阳能,2020(6): 17-21.
[5] 朱威武,李 宾,袁 晓,等. EVA 封装胶膜的功能复合改性与耐老化性能[J]. 太阳能学报,2019, 40(6): 1576-1582.
[6] Willis P B. Investigation of materials and processes for solar cell encapsulation[J]. Polymer Degradation and Stability, 1986, 12(16): 101-105.
[7] Han Huili, Huan Yan, Wang Xuemeng, et al. Analysis of the degradation of encapsulant materials used in photovoltaic modules exposed to different climates in China[J]. Solar Energy, 2019, 194: 177-188.
[8] 邹仁华,周立军. 光伏封装材料标准及其应用研究[J]. 中国标准化,2022(9): 90-98,109.
[9] Bora B, Mondal S, Prasad B, et al. Accelerated stress testing of potential induced degradation susceptibility of PV modules under different climatic conditions[J]. Solar Energy,2021, 223: 158-167.
[10] 陈如意, 孔蕊, 周扬, 等. 光伏组件封装胶膜的种类及交联度的研究[J]. 太阳能, 2023(3): 24-25.
[11] 张宗文,严欢,韩会丽. VA 含量对封装材料 EVA 老化衰变行为的影响[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2022, 35(4): 609-614.
[12] Oreski G, Omazic A, Eder G C, et al. Properties and degradation behaviour of polyolefin encapsulants for photovoltaic modules[J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2020, 28(12): 1277-1288.
[13] 赖伟东,吴翠姑,刘莹,等. EVA 胶膜对晶硅太阳电池的封装特性研究[J]. 信息记录材料,2020, 21(6): 1-3.

责任编辑:王　萍　陈松楠