

# 交联型 POE 胶膜的力学性能与交联度的对应关系研究

刘长飞<sup>\*</sup>, 秦楠, 王文杰, 赵阳, 尹伟勇, 李军迎, 郑张安  
(晶澳(邢台)太阳能有限公司, 邢台 054001)

**摘 要:** 以光伏组件封装用 POE 胶膜层压后的交联度为研究基础, 通过使用不同厂家生产的 3 种交联型 POE 胶膜, 设计了不同的层压制样方案并分别进行制样, 然后测试不同胶膜样品的交联度变化与胶膜力学性能的对对应关系, 着重研究了剥离强度、拉伸强度和扯断伸长率与交联度的对应关系。研究表明, 各厂家的交联型 POE 胶膜的力学性能均随交联度的变化呈相同的规律性变化。

**关键词:** 光伏组件; POE; 交联度; 力学性能

**中图分类号:** TQ334.2 **文献标志码:** A

## 0 引言

随着传统化石能源日渐枯竭, 太阳能作为清洁能源, 因其取之不尽的特点, 越来越受到人们的青睐, 发展太阳能已成为实现能源可持续发展, 造福全人类的新方向。在太阳能应用中, 光伏发电的发展受到格外关注。光伏组件是将太阳能转换为电能的集成单元, 是由太阳电池、玻璃及背板, 通过胶膜封装组成的。因此, 胶膜的稳定性是保证组件在户外长期运行的可靠性的基础。

作为光伏组件封装材料, POE 以其低透水性、高绝缘强度、高体积电阻、良好的抗 PID 性等特点越来越受到光伏电站业主的青睐。当前市场上的 POE 胶膜主要采用 2 种不同的技术方案, 一种为含有交联剂的交联型 POE 胶膜, 其在技术方面与 EVA 胶膜有相似之处; 另一种是不含交联剂的 POE 胶膜, 它的技术方案是通过组合使用功能性聚合物, 使材料的耐候性和粘结性达到使用要求<sup>[1]</sup>。目前, 交联型 POE 胶膜为市场主流产品, 其交联机理(步骤为 a~d)如图 1 所示<sup>[2]</sup>。

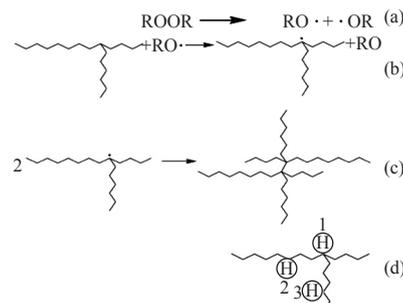


图 1 交联型 POE 胶膜的交联机理

Fig. 1 Crosslinking mechanism of crosslinked POE film

交联型 POE 胶膜封装效果的差异性表现在其胶膜固化后的力学性能差异, 该差异性将直接影响组件的使用寿命。胶膜的力学性能参数主要包括封装后胶膜与玻璃之间的剥离强度、胶膜固化后的拉伸强度及扯断伸长率。而在光伏组件生产过程中, 其封装品质主要是通过交联度测试来判定的。因此, 本文重点研究通过交联度测试结果来评判交联型 POE 胶膜力学性能的优异。研究选用了市场上不同厂家生产的 3 种主流交联型 POE 胶膜, 设计了多组层压制样方案, 每一种制样方案针对 3 种胶膜分别做出待测样品, 随后测试这些样品的交联度及其对应的力学性能, 着重

收稿日期: 2019-10-15

通信作者: 刘长飞(1989—), 男, 本科, 主要从事晶硅太阳能电池方面的研究。liucf@jasolar.com

研究了剥离强度、拉伸强度和扯断伸长率与交联度的对应关系,进而确认了胶膜力学性能与交联度的对应关系。

## 1 实验

### 1.1 实验材料与仪器设备

1) 实验材料: 选用 A、B、C 3 家厂家生产的交联型 POE 胶膜; 二甲苯: 分析纯, 由天津市致远化学试剂有限公司生产。

2) 仪器设备: 苏州茂逸发自动化设备有限公司生产的万能电子拉力机 (TH-8203A), 上海徐吉电气有限公司生产的电热恒温鼓风干燥箱, 上海羌强仪器设备有限公司生产的电加热套 (16370), 博硕光电设备股份有限公司生产的双腔层压机 (BSL2436OAC-H), 河北利诚试验仪器有限公司生产的冲片机 (CP25)。

### 1.2 样品制备

设计了温度不同的层压制样方案, 在层压温度范围 120 ~ 155 °C 中选取 8 个温度进行层压, 固定层压时间均为 12 min, 最终压力固定在 -10 kPa (相对大气压为 0 Pa)。针对 3 家厂家生产的交联型 POE 胶膜, 分别按照不同的层压制样方案制作测试用胶膜样品。

### 1.3 性能表征

#### 1.3.1 力学性能的测定

1) 扯断伸长率的测定。扯断伸长率为胶膜在拉断时的伸长率, 表征材料的韧性。按照 GB/T 528-1998《硫化橡胶或热塑性橡胶拉伸应力应变性能的测定》的要求, 利用万能电子拉力机测试胶膜的扯断伸长率, 拉伸速率为 500 mm/min; 利用冲片机将层压后胶膜制成哑铃状, 长度为 25 mm, 宽度为 6 mm<sup>[3]</sup>。

扯断伸长率  $E_b$  的计算公式为:

$$E_b = \frac{L_b - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中,  $L_b$  为样品断裂时的标距, mm;  $L_0$  为样品的初始标距, mm。

2) 拉伸强度的测定。拉伸强度为样品拉断过程中的最大拉伸应力, 表征材料抵抗拉伸破坏的极限能力。按照 GB/T 528-1998《硫化橡胶或热塑性橡胶拉伸应力应变性能的测定》的要求, 采用万能电子拉力机测定不同交联程度样品的拉伸强度, 拉伸速率为 500 mm/min; 用冲片机将层压后胶膜制成哑铃状, 长度为 25 mm, 宽度为 6 mm<sup>[3]</sup>。

拉伸强度  $TS$  的计算公式为:

$$TS = \frac{F_m}{wt} \quad (2)$$

式中,  $F_m$  为测试过程中记录的最大力, N;  $w$  为哑铃状样品的狭小平行部分的宽度, mm;  $t$  为哑铃状样品长度部分的厚度, mm。

3) 剥离强度的测定。剥离强度表征胶膜与玻璃之间的粘结性能, 剥离强度按照 GB/T 2790-1995《胶粘剂 180°剥离强度试验方法》中的要求进行测定<sup>[4]</sup>。

胶膜与玻璃间的剥离强度的计算公式为:

$$\sigma_{180^\circ} = \frac{F}{B} \quad (3)$$

式中,  $\sigma_{180^\circ}$  为 180°剥离强度, kN/m;  $F$  为剥离力, N;  $B$  为样品的宽度, mm。

#### 1.3.2 交联度的测定

将经过层压的胶膜样品, 按要求裁剪称重后放置到网袋内, 进行编号; 然后放置于 140 °C 的二甲苯溶液中煮沸萃取 5 h, 未交联的胶膜会全部溶解到二甲苯溶液中, 已交联的胶膜则不会溶解; 通过计算萃取后未溶解的胶膜样品的质量与 POE 胶膜初始总质量的比值来确定交联度<sup>[5]</sup>。

交联度  $G_i$  的计算公式为:

$$G_i = \frac{W_2}{W_1} \times 100\% \quad (4)$$

式中,  $W_1$  为 POE 胶膜样品的初始总质量, mg;  $W_2$  为萃取后未溶解的胶膜样品的质量, mg。

## 2 结果与讨论

### 2.1 交联度与剥离强度的对应关系

不同交联度对应的胶膜与玻璃之间的粘结性

通过剥离强度测试进行表征。采用不同层压制样方案时，3 家厂家生产的交联型 POE 胶膜产品在

不同交联度下的剥离强度测试结果如表 1 所示。

根据表 1 的测试结果，可以绘制出不同厂家

表 1 不同交联度下 3 种交联型 POE 胶膜对应的剥离强度

Table 1 Peel strength corresponding to three types of crosslinked POE films under different crosslinking degrees

制样方案	A 厂家交联型 POE 胶膜		B 厂家交联型 POE 胶膜		C 厂家交联型 POE 胶膜	
	交联度 /%	剥离强度 /N·cm <sup>-1</sup>	交联度 /%	剥离强度 /N·cm <sup>-1</sup>	交联度 /%	剥离强度 /N·cm <sup>-1</sup>
1	1.09	136	0.84	49	1.24	39
2	1.15	152	1.57	82	1.75	91
3	2.45	156	67.58	78	4.45	126
4	69.33	128	73.00	144	32.07	123
5	84.73	116	82.87	127	69.18	144
6	85.50	102	83.90	125	75.83	114
7	86.68	96	83.92	131	83.80	130
8	87.31	86	84.91	98	84.33	90

生产的交联型 POE 胶膜的交联度与其剥离强度的变化曲线，如图 2 所示。

由图 2 可知，随着交联度的增大，3 家厂家生产的交联型 POE 胶膜的剥离强度呈现出先上升到逐步稳定，然后再缓慢下降的趋势；交联度在 69%~84% 区间内时，剥离强度数值处于一个稳定区。因此，3 家厂家的交联型 POE 胶膜的交联度与其剥离强度的变化规律相同。

### 2.2 交联度与拉伸强度的对应关系

对不同厂家的交联型 POE 胶膜在不同交联度下对应的拉伸强度进行测试，结果如表 2 所示。

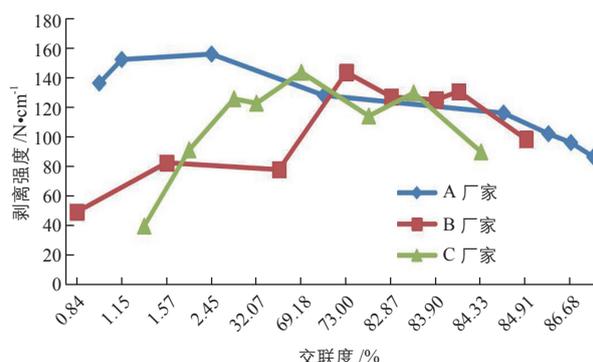


图 2 3 种交联型 POE 胶膜的交联度与剥离强度的对应关系

Fig. 2 The relations between crosslinking degree and peel strength corresponding to three types of crosslinked POE films

表 2 不同交联度下 3 种交联型 POE 胶膜对应的拉伸强度

Table 2 Tensile strength corresponding to three types of crosslinked POE films under different crosslinking degrees

制样方案	A 厂家交联型 POE 胶膜		B 厂家交联型 POE 胶膜		C 厂家交联型 POE 胶膜	
	交联度 /%	拉伸强度 /Mpa	交联度 /%	拉伸强度 /Mpa	交联度 /%	拉伸强度 /Mpa
1	1.09	8.10	0.84	5.80	1.24	10.81
2	1.15	9.36	1.57	6.60	1.75	9.80
3	2.45	10.54	67.58	7.80	4.45	11.75
4	69.33	10.52	73.00	9.78	32.07	12.16
5	84.73	12.18	82.87	10.76	69.18	12.79
6	85.50	10.00	83.90	11.45	75.83	12.19
7	86.68	9.00	83.92	10.20	83.80	10.40
8	87.31	8.50	84.91	9.00	84.33	9.00

根据表 2 的测试结果,可以绘制出不同厂家生产的交联型 POE 胶膜的交联度与其拉伸强度的变化曲线,如图 3 所示。

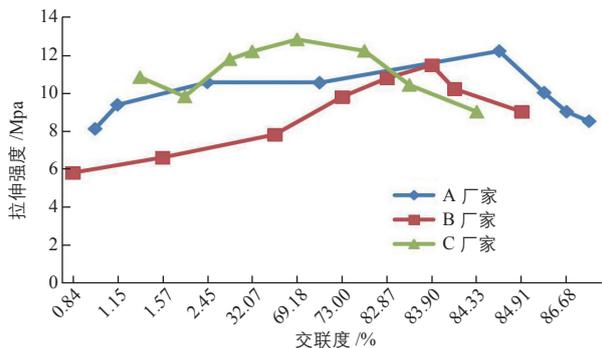


图 3 3 种交联型 POE 胶膜的交联度与拉伸强度的对应关系

Fig. 3 Relations between crosslinking degree and tensile strength corresponding to three types of crosslinked POE films

从图 3 可以看出,随着交联度的增大,3 家厂家生产的交联型 POE 胶膜的拉伸强度基本呈现出先上升到最大,然后再下降的趋势;交联度在 69%~84.9% 区间内时,拉伸强度数值处于一个最优区。总的来说,3 家厂家的交联型 POE 胶膜的交联度与其拉伸强度的变化规律相同。

### 2.3 交联度与扯断伸长率的对应关系

对不同厂家生产的交联型 POE 胶膜在不同交联度下对应的扯断伸长率进行测试,结果如表 3 所示。根据表 3 的测试结果,绘制出不同厂家生产的交联型 POE 胶膜样品的交联度与其扯断伸长率的变化曲线,如图 4 所示。

表 3 不同交联度下 3 种交联型 POE 胶膜对应的扯断伸长率

Table 3 Elongation at break corresponding to three types of crosslinked POE films under different crosslinking degrees

制样方案	A 厂家交联型 POE 胶膜		B 厂家交联型 POE 胶膜		C 厂家交联型 POE 胶膜	
	交联度 /%	扯断伸长率 /%	交联度 /%	扯断伸长率 /%	交联度 /%	扯断伸长率 /%
1	1.09	1932	0.84	1808	1.24	1727
2	1.15	1973	1.57	1773	1.75	1773
3	2.45	2020	67.58	1732	4.45	1708
4	69.33	1650	73.00	1813	32.07	1554
5	84.73	1437	82.87	1683	69.18	1522
6	85.50	1353	83.90	1441	75.83	1344
7	86.68	1094	83.92	1322	83.80	1126
8	87.31	1046	84.91	1218	84.33	1035

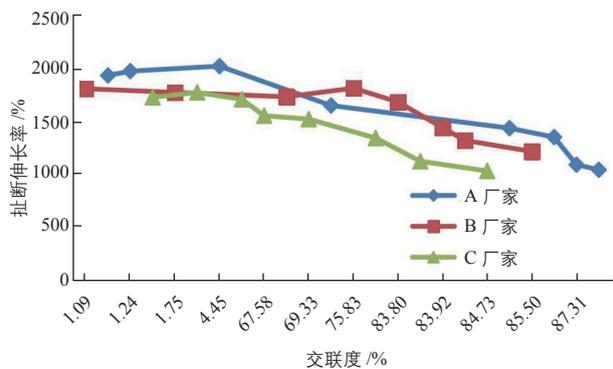


图 4 3 种交联型 POE 胶膜的交联度与扯断伸长率的对应关系

Fig. 4 Relations between crosslinking degree and elongation at break corresponding to three types of crosslinked POE films

从图 4 中可以看出,随着交联度的增大,3 家厂家生产的交联型 POE 胶膜的扯断伸长率呈现出从基本平稳到逐步下降的趋势,这说明交联度数值越大,胶膜脆性断裂的可能性越大。综上所述,3 家厂家生产的交联型 POE 胶膜的交联度与其扯断伸长率的变化规律基本相同。

### 3 结论

本文着重研究了交联型 POE 胶膜的交联度与其剥离强度、拉伸强度和扯断伸长率之间的对应关系。通过测试发现,交联型 POE 胶膜的力学性能存在如下规律:

1) 剥离强度和拉伸强度均随交联度的上升呈现先上升, 然后逐步下降的趋势。

2) 扯断伸长率随交联度的上升呈现从基本平稳到逐步下降的趋势。

基于交联度与力学性能的关系, 光伏组件使用交联型 POE 胶膜作为封装材料时, 为保证其力学性能综合表现较优, 层压后的交联型 POE 胶膜的交联度需要控制在 69%~84% 区间内, 进而才可以保证光伏组件的长期可靠性。

#### [参考文献]

- [1] 徐晓龙, 范云峰. 光伏用聚烯烃封装胶膜交联体系研究[J]. 信息记录材料, 2013, 14(5): 11 - 16.
- [1] SVOBODA P, POONGAVALLAPPIL S, THERAVALLAPPIL R, et al. Effect of octene content on peroxide crosslinking of ethylene-octene copolymers[J]. Polymer international, 2013, 62(2): 184 - 189.
- [3] 硫化橡胶或热塑性橡胶拉伸应力应变性能的测定 非书资料: GB/T 528-1998[S]. 1998.
- [4] 胶粘剂 180°剥离强度试验方法 挠性材料对刚性材料 非书资料: GB/T 2790-1995[S]. 1995.
- [5] 彭新龙. 封装膜用交联 POE 的老化性能研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2013.

## CORRESPONDENCE BETWEEN MECHANICAL PROPERTIES AND CROSSLINKING DEGREES OF CROSSLINKED POE FILMS

Liu Changfei, Qin Nan, Wang Wenjie, Zhao Yang, Yin Weiyong,  
Li Junying, Zheng Zhangan

(JingAo (Xingtai) Solar Energy Co., Ltd., Xingtai 054001, China)

**Abstract:** For crosslinked POE films produced by three different manufacturers, under different laminating conditions, the corresponding relationship between change in crosslinking degree and mechanical properties of the crosslinked POE films were studied, the relationship between peel strength, tensile strength, elongation at break and crosslinking degree were studied. The results show that the mechanical properties of the three types of crosslinked POE films all show the same regular changes with the change of the crosslinking degree.

**Keywords:** PV modules; POE; crosslinking degree; mechanical property