

# 环氧树脂补强胶膜成膜性的研究

薛小龙<sup>1</sup>, 李会录<sup>1</sup>, 苏建锋<sup>2</sup>, 严玉茹<sup>1</sup>, 于紫萱<sup>1</sup>

(1. 西安科技大学材料科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 中煤陕西能源化工集团有限公司, 陕西 榆林 719100)

**摘要:** 为解决环氧树脂补强胶膜成膜性差的问题, 系统探究树脂基体配比、橡胶含量、填料含量和基材对环氧树脂补强胶膜成膜性的影响。将 GELR128 和 GESN301 两种环氧树脂与端羧基丁腈橡胶 (CTBN)、硅微粉 (SiO<sub>2</sub>) 或氧化铝 (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 填料混合, 制备环氧树脂膜胶液, 并涂敷于不同离型力的离型膜, 得到环氧树脂补强胶膜。结果表明: 环氧树脂的分子量、分子量分布以及填料和柔性链段的引入均对成膜性有较大的影响。当 GELR128 和 GESN301 树脂质量比为 1:3、弹性体丁腈橡胶添加量为 15 phr、填料添加量为 250 phr Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 或 200 phr SiO<sub>2</sub>、离型膜的剥离强度控制在 200 g/mm 时, 环氧树脂补强胶膜表面光滑, 粗糙度最小, 成膜性最佳。

**关键词:** 环氧树脂补强胶膜; 端羧基丁腈橡胶; 改性; 成膜性

中图分类号: TQ433.4

文献标志码: A

文章编号: 1005-3360(2026)02-0027-07

DOI: 10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.02.005

## Study on Film-forming Properties of Epoxy Resin Reinforcing Adhesive Film

XUE Xiaolong<sup>1</sup>, LI Huilu<sup>1</sup>, SU Jianfeng<sup>2</sup>, YAN Yuru<sup>1</sup>, YU Zixuan<sup>1</sup>

(1. College of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. China Coal Shaanxi Energy and Chemical Group Co., Ltd., Yulin 719100, China)

**Abstract:** To address the poor film-forming property of epoxy resin reinforcing adhesive films, the effects of resin matrix ratio, rubber content, filler content and substrate on the film-forming property of epoxy resin reinforcing adhesive films were systematically investigated. Two epoxy resins, GELR128 and GESN301, were blended with carboxyl-terminated butadiene-acrylonitrile rubber (CTBN), silica (SiO<sub>2</sub>) or alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) fillers to prepare epoxy resin adhesive solutions, which were then coated onto release films with different release forces to obtain epoxy resin reinforcing adhesive films. The results showed that the molecular weight and molecular weight distribution of epoxy resins, as well as the introduction of fillers and flexible chain segments, exerted significant influences on the film-forming property. When the mass ratio of GELR128 to GESN301 resins was 1 : 3, the elastomer butadiene-acrylonitrile rubber addition amount was 15 phr, the filler addition amount was 250 phr Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> or 200 phr SiO<sub>2</sub>, and the peel strength of the release film was controlled at 200 g/mm, the epoxy resin reinforcing adhesive film exhibited smooth surface, minimum roughness and optimal film-forming property.

**Keywords:** Epoxy resin reinforcing adhesive film; Carboxy-terminated nitrile rubber; Modification; Film-forming property

补强膜作为挠性印制电路板(FPC)外表面的保护层, 主要起到机械支撑、弥补基板刚性不足<sup>[1-2]</sup>、防止电路受外界物理损伤的作用, 同时通过应力分散降低导体在动态弯曲中的疲劳断裂风险<sup>[3]</sup>, 从而提高FPC的耐折性和耐挠曲寿命。补强膜由绝缘基膜和胶层构成, 胶层通常采用丙烯酸树脂体系或环氧树脂体系。丙烯酸树脂体系<sup>[4]</sup>虽具有较

好的柔韧性和抗弯曲性, 但耐热性不足<sup>[5]</sup>, 且与铜箔的界面黏结强度较差。与此相反, 环氧树脂体系表现出更优的耐热性<sup>[6]</sup>和界面黏结强度<sup>[7]</sup>, 但未改性的环氧固化物通常脆性大, 韧性差<sup>[8]</sup>, 这一缺陷显著制约其在柔性场景中的应用。此外, 环氧树脂体系中含有大量环氧基团, 而绝缘基膜大多为非极性基材, 极性差异导致该体系的成膜性较

收稿日期 Submitted date 2025-03-22; 修回日期 Revised date 2025-04-20; 录用日期 Accepted date 2025-05-26

联系人, 2805884215@qq.com

引用本文: 薛小龙, 李会录, 苏建锋, 等. 环氧树脂补强胶膜成膜性的研究[J]. 塑料科技, 2026, 54(2): 27-33.

Citation: XUE X L, LI H L, SU J F, et al. Study on film-forming properties of epoxy resin reinforcing adhesive film[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(2): 27-33.

差<sup>[9]</sup>。环氧树脂补强胶膜通常由环氧树脂、增韧剂、固化剂、填料及其他助剂组成<sup>[10]</sup>。传统环氧树脂补强胶膜存在成膜均匀性差、脆性高等问题。近年来,研究人员通过填料复配<sup>[11]</sup>、增韧改性<sup>[12]</sup>及优化固化工艺<sup>[13-14]</sup>等方式改善其性能,但环氧树脂补强胶膜的成膜性与树脂体系、填料含量、橡胶含量、基材之间的关系仍缺乏系统性研究。成膜性树脂是指能够形成具有一定强度且连续柔性膜的树脂,在成膜过程中,溶剂挥发后树脂分子链与填料呈现均质分布<sup>[15]</sup>,再经半固化工艺使部分环氧树脂交联固化,形成具有一定强度的薄膜。环氧树脂胶膜由黏流态转变为半固化态的过程,是树脂分子链段沿表面缠绕和相互扩散的过程。该过程对树脂的表面愈合及机械修复具有重要作用,受成膜温度及树脂分子量和结构的影响。树脂分子量是影响最终成膜性能的主要因素之一<sup>[16-17]</sup>。数均分子量( $M_n$ )影响树脂的渗透深度和涂膜的拉伸强度, $M_n$ 越小,分子间交联缠结作用越弱,扩散程度越好。树脂分子链段的扩散系数与重均分子量( $M_w$ )成反比<sup>[18]</sup>,这表明合成树脂的分子量分布越宽,成膜的致密性和均匀性越佳<sup>[19]</sup>。

本文基于不同树脂体系,调整橡胶与填料含量,选用不同基材,制备环氧树脂胶膜。通过系统对比树脂体系差异、橡胶及填料含量梯度以及基材表面平整度等参数,深入分析各因素对环氧树脂补强胶膜成膜性能的影响规律。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原料

环氧树脂, GELR128, 184~190 g/eq, 宏昌电子材料股份有限公司; 环氧树脂, GESN301, 450~500 g/eq, 宏昌电子材料股份有限公司; 端羧基丁腈橡胶(CTBN), 1072CGL, 南帝化工有限公司; 聚酰胺, 650, 阿拉丁试剂(上海)有限公司; 硅微粉( $\text{SiO}_2$ )、氧化铝( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), 5  $\mu\text{m}$ , 丹阳市韵辉电子有限公司。

### 1.2 仪器与设备

高速分散机, SDF-1100, 杭州优宝电子有限公司; 真空加热涂膜机, JQ-0012, 常州市蓝光电子有限公司; 铜箔抗剥离强度测试仪, PST-R5, 华鑫电子有限公司; 覆膜机, LA-500R, 东莞市龙安网印机械有限公司; 电子天平, CP114, 奥豪斯仪器有限公司; 扫描电子显微镜(SEM), Hitachi S-4800, 日本日立公司; 凝胶渗透色谱仪, Agilent 1260, 美国安捷伦科技公司。

### 1.3 样品制备

#### 1.3.1 不同树脂体系的环氧树脂补强胶膜的制备

分别称取 GELR128 与 GESN301 两种环氧树脂, 置于烧杯内, 加入适量聚酰胺固化剂, 充分搅拌 1 h 后静置。随后将混合溶液均匀涂布于离型膜上, 待其半固化后, 对胶膜的平整性进行观察, 并检测其表面粗糙度。按不同配比将 GELR128 与 GESN301 环氧树脂进行复合, 重复上述实验步骤, 制备不同配比的树脂体系胶膜。

#### 1.3.2 不同橡胶含量的环氧树脂补强胶膜的制备

称取多份 GELR128 环氧树脂置于烧杯中, 按梯度比例依次加入 5、10、15、20 phr 的 CTBN, 经 2 h 机械搅拌完成初步混合, 补加等当量聚酰胺类固化剂并持续搅拌 1 h。待混合体系均匀化后, 均匀涂覆于离型膜上, 在胶膜达半固化状态时进行胶膜平整度与表面粗糙度检测。

#### 1.3.3 不同填料含量的环氧树脂补强胶膜的制备

取适量 GELR128 环氧树脂若干份置于烧杯内, 依次向其中添加 50~300 phr 且粒径一致的  $\text{SiO}_2$  与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  填料, 充分搅拌 2 h。随后, 加入等量聚酰胺固化剂, 继续搅拌 1 h。待混合物静置后, 将其均匀涂覆于离型膜, 待半固化完成后, 观察胶膜表面平整度, 并对其表面粗糙度进行测试。

上述 3 组实验所采用的离型膜均为同一离型力的离型膜, 均在 60 °C/30 min 下半固化, 得到环氧树脂胶膜。

#### 1.3.4 不同基材的环氧树脂补强胶膜的制备

将实验 1.3.3 中制备的 100 phr  $\text{SiO}_2$  的环氧树脂胶膜分别涂覆于离型力为 50、100、200 g/mm 的离型膜上, 在 60 °C/30 min 下半固化, 得到环氧树脂胶膜。

## 1.4 性能测试与表征

GPC 测试: 采用美国 Agilent 1260 型凝胶渗透色谱仪, 对环氧树脂改性前后的分子量及其分布特性进行测定。精确称取样品, 配制特定浓度溶液, 并使样品在 2~4 h 内完全溶解, 其间持续观察所有样品全部溶解。

SEM 测试: 采用扫描电子显微镜观察样品的微观形貌、尺寸和分散状态, 加速电压设定为 5 kV。

抗剥落强度测试: 采用抗剥落强度测试仪进行测试, 测试过程中取 60 mm×60 mm 的样品, 在基板上轻轻划下两条平行线(线间距 3~4 mm), 以 50 mm/min 的速度施加拉力。

## 2 结果与讨论

### 2.1 树脂体系对环氧树脂补强胶膜成膜性的影响

图 1 为 GELR128 和 GESN301 环氧树脂补强胶膜的 3D 和 2D 表面形貌。从图 1 可以看出, 采用 GESN301 树脂体系的补强胶膜表面相对光滑, 而采用 GELR128 树脂体系的补强胶膜表面相对粗糙。表 1 为 GELR128 和 GESN301 环氧树脂补强胶膜的表面平整度和粗糙度。两种环氧补强胶膜的均方根粗糙度用  $R_q$  表示, 算术平均粗糙度用  $R_a$  表示。从表 1 可以看出, GELR128 树脂体系的环氧树脂补强胶膜表面粗糙度  $R_q=0.082\ 0\ \mu\text{m}$ ,  $R_a=0.050\ 6\ \mu\text{m}$ , GESN301 树脂体系的环氧树脂补强胶膜表面粗糙度  $R_q=0.017\ 0\ \mu\text{m}$ ,  $R_a=0.011\ 8\ \mu\text{m}$ 。因此采用 GESN301 环氧树脂体系具有更低的粗糙度。

表 2 为 GELR128 和 GESN301 环氧树脂的分子量和分子量分布。从表 2 可以看出, GESN301 环氧树脂的多分散性指数( $M_w/M_n$ )为 2.03, 而 GELR128 环氧树脂的多分散性指数为 1.16。在成膜过程中, 树脂的分子量、分子量

分布、柔性链段和树脂纯度对成膜性至关重要。分子量和多分散性指数越大,成膜质量越有利于提升。分子结构相似时,分子量越大,表面张力越高,树脂与基材之间黏附性就越好,薄膜就越容易铺展成膜。多分散性指数

越高,小分子就越容易填充分子间隙区,使薄膜平整性和致密性得到极大提升。因此,GESN301树脂中的小分子比GELR128树脂中的小分子更容易填充分子间隙,即薄膜的平整度和致密性更好。

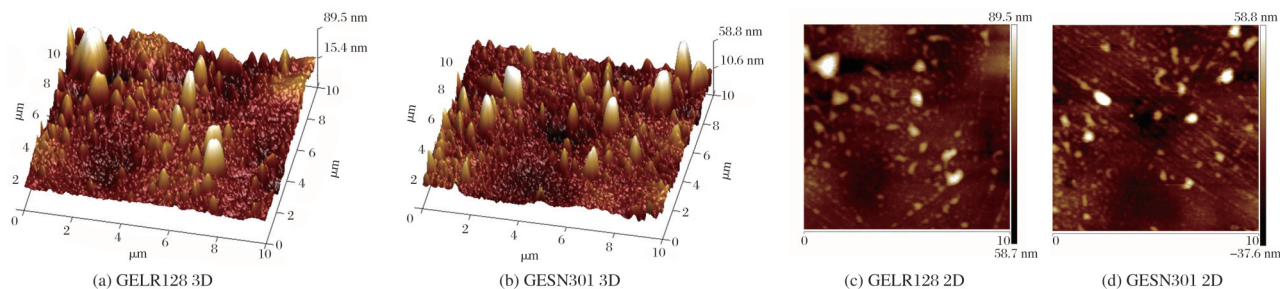


图1 GELR128和GESN301环氧树脂补强胶膜的3D和2D表面形貌

Fig.1 3D and 2D surface morphology of GELR128 and GESN301 epoxy resin reinforced adhesive films

表1 GELR128和GESN301环氧树脂补强胶膜的表面平整度和粗糙度

Tab.1 Surface smoothness and roughness of GELR128 and GESN301 epoxy resin reinforced adhesive films

树脂类型	表面平整度	$R_q/\mu\text{m}$	$R_a/\mu\text{m}$
GELR128	表面粗糙	0.082 0	0.050 6
GESN301	表面光滑	0.017 0	0.011 8

为了进一步确定树脂体系对胶膜成膜性能的影响,将GELR128环氧树脂和GESN301环氧树脂分别按质量比3:1、2:1、1:1、1:2和1:3混合,制备一系列环氧树脂补强胶膜。图2为不同GELR128与GESN301配比下环氧树脂补强胶膜的表面形貌,表3为不同GELR128与GESN301配比下环氧树脂补强胶膜的表面平整度和粗糙度。结合

图2和表3可以看出,两种树脂的复配有助于提升整体成膜性能,随着GESN301在整个树脂体系中所占比例的增加,环氧树脂胶膜的表面平整度得到改善,粗糙度降低,成膜性能提高。当GELR128与GESN301的质量为1:3时,成膜性能最好,粗糙度最低。

表2 GELR128和GESN301环氧树脂的分子量和分子量分布  
Tab.2 Molecular weight and molecular weight distribution of GELR128 and GESN301 epoxy resins

环氧树脂	$M_n/(\text{g}\cdot\text{mol}^{-1})$	$M_w/(\text{g}\cdot\text{mol}^{-1})$	$M_z/(\text{g}\cdot\text{mol}^{-1})$	$M_p/(\text{g}\cdot\text{mol}^{-1})$	多分散性指数
GELR128	355.94	414.06	535.67	321.47	1.16
GESN301	1 065.85	2 166.72	4 038.93	1 054.55	2.03

注:“ $M_z$ ”表示Z均分子量;“ $M_p$ ”表示最高峰分子量。

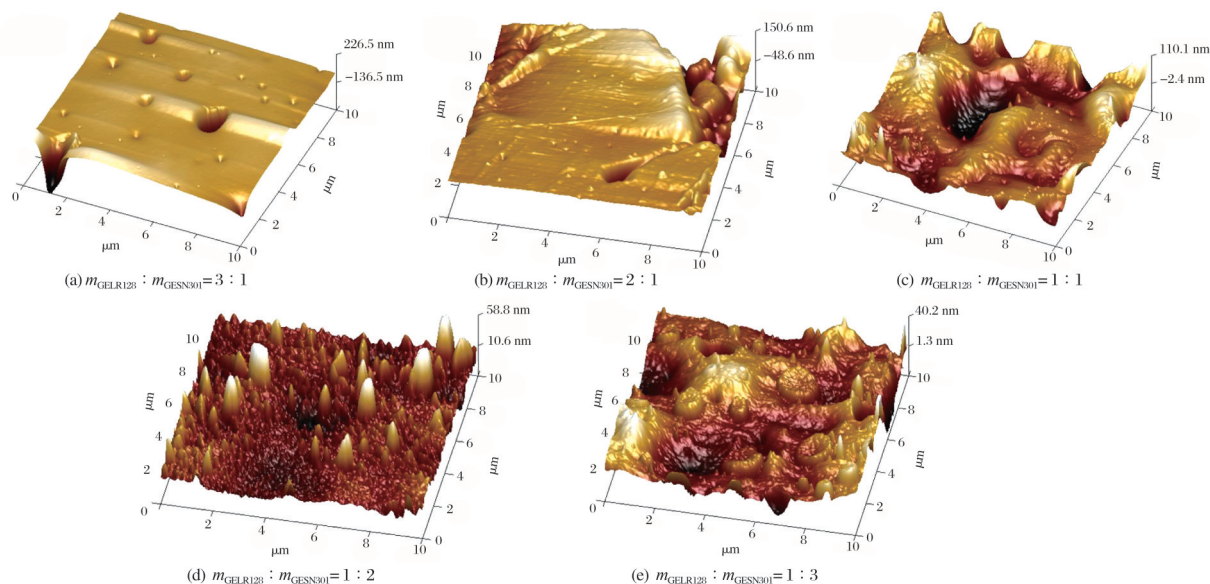


图2 不同GELR128与GESN301配比下环氧树脂补强胶膜的表面形貌

Fig.2 Surface morphology of epoxy resin reinforced adhesive films under different ratios of GELR128 and GESN301

从表2可以看出,与GELR128树脂相比,GESN301的分子量更大,分子量分布更广。两种树脂复配后,低分子量的GELR128树脂具有良好的黏附性和渗透性,可以很

好地黏附在各种基材上,而且由于其低分子量的特性,固化速度更快,柔韧性极佳,有助于提高树脂的整体性能。其次,当分子量相对较高的GESN301环氧树脂与分子量

较低的GELR128环氧树脂复合时,二者之间的协同效应可显著改善环氧树脂补强胶膜的成膜性能。高分子量树脂可提供胶膜的强度<sup>[20]</sup>和稳定性,而低分子量树脂则可填充聚合物树脂之间的空隙,从而提高胶膜的致密性和附着力。由于这种协同效应,胶膜在固化过程中可以形成更均匀、更致密的膜层,从而显著提高环氧树脂补强胶膜的整体成膜性能。

表3 不同GELR128与GESN301配比下环氧树脂补强胶膜的表面平整度和粗糙度

Tab.3 Surface smoothness and roughness of epoxy resin reinforced adhesive films under different ratios of GELR128 and GESN301

$m_{\text{GELR128}}:m_{\text{GESN301}}$	表面平整度	$R_q/\mu\text{m}$	$R_a/\mu\text{m}$
3:1	表面粗糙	0.065 2	0.026 4
2:1	表面粗糙	0.042 4	0.026 0
1:1	表面粗糙	0.033 1	0.024 7
1:2	表面光滑	0.011 4	0.007 7
1:3	表面光滑	0.010 7	0.008 3

## 2.2 CTBN添加量对环氧树脂补强胶膜成膜性的影响

为了确定环氧树脂胶膜中其他组分对成膜性能的影响,以GELR128环氧树脂为基体树脂,分别添加5、10、15、

20 phr的CTBN,得到环氧树脂补强胶膜。图3为CTBN添加量对环氧树脂补强胶膜表面形貌的影响,表4为CTBN添加量对环氧树脂补强胶膜表面平整度和粗糙度的影响。从图3和表4可以看出,添加适量的CTBN可以提高环氧树脂的表面平整度,降低表面粗糙度,改善成膜性能。当CTBN添加量为15 phr时,成膜性最好,此时环氧树脂补强胶膜 $R_q=0.008 6 \mu\text{m}$ , $R_a=0.006 4 \mu\text{m}$ 。然而,当CTBN的添加量进一步增加时,成膜性能变差,粗糙度增加,此时 $R_q=0.014 2 \mu\text{m}$ , $R_a=0.006 6 \mu\text{m}$ 。

与不添加CTBN的补强胶膜相比,添加适量的CTBN可显著改善环氧树脂补强胶膜的成膜性能。而环氧树脂补强胶膜表面粗糙度下降,成膜性变好的原因有以下几点:(1)在环氧树脂中加入CTBN可以有效提高环氧树脂的韧性<sup>[21]</sup>,韧性的提高有助于环氧树脂在成膜过程中更好地抵抗外力和变形,从而促进完整均匀膜层的形成。(2)环氧树脂在半固化过程中容易收缩<sup>[22]</sup>,从而导致胶膜出现裂纹或不平整。添加CTBN可有效降低环氧树脂的收缩率,减少胶膜缺陷的形成,从而提高薄膜的质量。(3)添加CTBN还能调节环氧树脂的黏度,使其更易于涂覆和加工。适当的黏度有助于在成膜时形成均匀的涂层,并减少气泡和缺陷的形成。

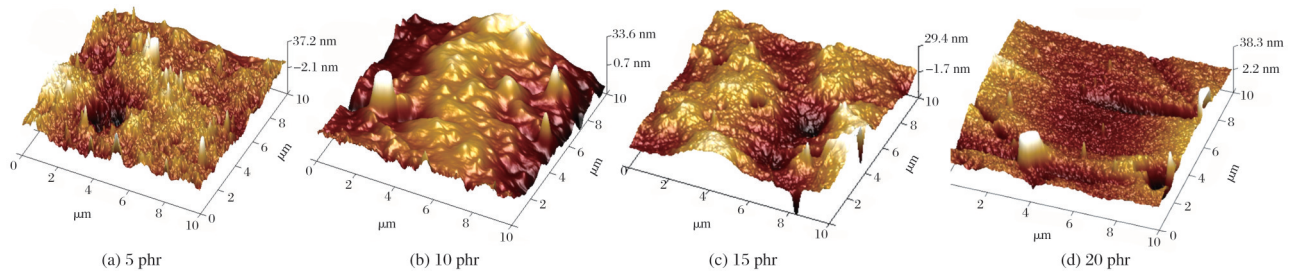


图3 CTBN添加量对环氧树脂补强胶膜表面形貌的影响

Fig.3 Effect of CTBN addition on surface morphology of epoxy resin reinforced adhesive films

表4 CTBN添加量对环氧树脂补强胶膜表面平整度和粗糙度的影响

Tab.4 Effect of CTBN addition on surface smoothness and roughness of epoxy resin reinforced adhesive films

CTBN添加量/phr	表面平整度	$R_q/\mu\text{m}$	$R_a/\mu\text{m}$
0	表面光滑	0.010 7	0.008 3
5	表面光滑	0.009 5	0.007 5
10	表面光滑	0.009 1	0.006 4
15	表面光滑	0.008 6	0.006 4
20	表面光滑	0.014 2	0.006 6

## 2.3 填料添加量对环氧树脂补强胶膜成膜性的影响

### 2.3.1 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 添加量对环氧树脂胶膜成膜性的影响

$\text{Al}_2\text{O}_3$ 作为一种基础的填料,与其他填料如氮化硼、氮化铝等相比,具有更高的性能比和稳定的性能,在导热绝缘复合材料被广泛应用<sup>[23]</sup>。针对印刷电路板(PCB)用覆铜

箔层压板,目前大多是在环氧树脂体系中物理添加大量高导热填料 $\text{Al}_2\text{O}_3$ <sup>[24]</sup>。但填料添加量对环氧树脂成膜性能的影响研究相对较少,在前文研究了CTBN添加量对环氧树脂成膜性能影响的基础上,继续添加 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 填料。

图4为 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 添加量对环氧树脂补强胶膜表面形貌的影响,表5为 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 添加量对环氧树脂补强胶膜表面平整度和粗糙度的影响。从图4和表5可以看出,随着 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 填料添加量的增加,环氧树脂补强胶膜表面粗糙度先减小后增大。当 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 添加量不超过250 phr时,成膜性随 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 添加量的增加变好。此时 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 添加量为50 phr的环氧树脂补强胶膜 $R_q=0.026 7 \mu\text{m}$ , $R_a=0.021 6 \mu\text{m}$ ,而后开始下降,当 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 添加量为250 phr时,粗糙度最低。但随着 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 填料添加量的继续增加,表面粗糙度增大,成膜性能变差。

### 2.3.2 $\text{SiO}_2$ 添加量对环氧树脂补强胶膜成膜性的影响

$\text{SiO}_2$ 填料作为一种新型紧缺矿物材料,是大规模集成电路封装所需的主要原材料。目前,国内外广泛使用的电

子封装材料高分子聚合物大多是填充 70%~90% 球形  $\text{SiO}_2$  的环氧树脂,可以向环氧树脂中添加大量的  $\text{SiO}_2$ ,从

而降低塑料封装材料的热膨胀系数、吸水性、内应力、收缩率,提高导热性能。

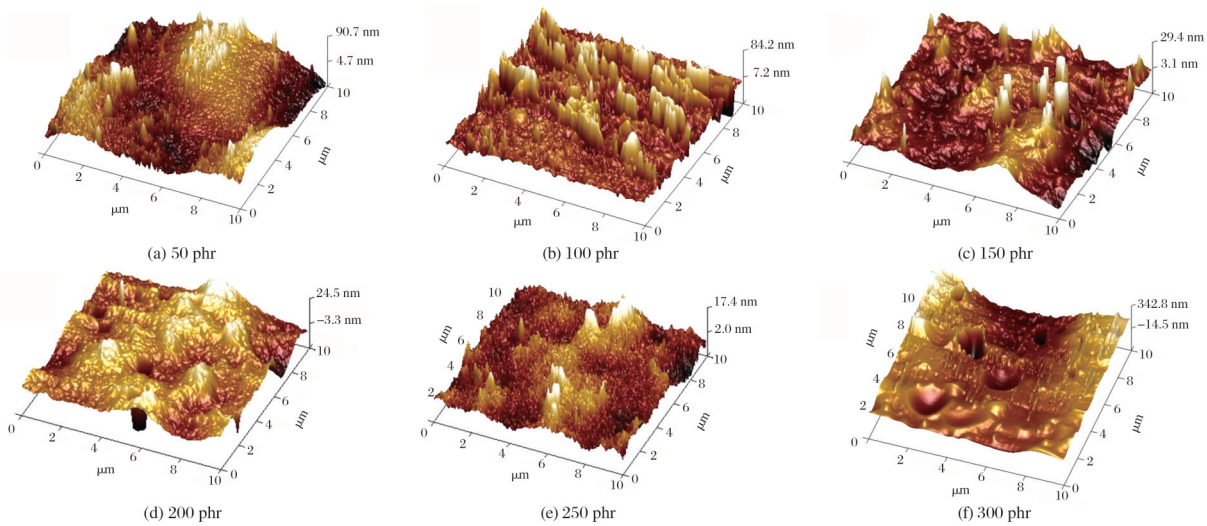


图4  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 添加量对环氧树脂补强胶膜表面形貌的影响

Fig.4 Effect of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  addition on surface morphology of epoxy resin reinforced adhesive films

表5  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 添加量对环氧树脂补强胶膜表面平整度和粗糙度的影响

Tab.5 Effect of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  addition on surface smoothness and roughness of epoxy resin reinforced adhesive films

$\text{Al}_2\text{O}_3$ 添加量/phr	表面平整度	$R_q/\mu\text{m}$	$R_a/\mu\text{m}$
50	表面光滑	0.026 7	0.021 6
100	表面光滑	0.018 8	0.013 1
150	表面光滑	0.007 5	0.005 0
200	表面光滑	0.007 4	0.004 8
250	表面光滑	0.004 0	0.002 9
300	表面粗糙	0.087 1	0.063 3

图5为  $\text{SiO}_2$ 添加量对环氧树脂补强胶膜表面形貌的影响,表5为  $\text{SiO}_2$ 添加量对环氧树脂补强胶膜表面平整度

和粗糙度的影响。从图5和表6可以看出,  $\text{SiO}_2$ 与  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 填料的趋势相同,在添加量不超过200 phr时,随着  $\text{SiO}_2$ 添加量的增加,成膜性能越来越好,当  $\text{SiO}_2$ 添加量为200 phr时,此时粗糙度最小,成膜性能最好,  $R_q=0.007 8 \mu\text{m}$ ,  $R_a=0.004 5 \mu\text{m}$ 。但当  $\text{SiO}_2$ 添加量继续增加时,成膜性变差。在成膜过程中,添加填料可以调节环氧树脂的黏度<sup>[25]</sup>,改变其流动性,进而影响涂膜过程中的厚度均匀性和膜层的致密性。适当添加填料可使树脂填补填料堆积造成的空隙,有助于控制固化过程中的收缩,从而避免形成粗糙的表面。但是,如果填料添加过多,树脂就不足以完全包裹填料,从而导致硬度增加和成膜不良。因此,适量的填料可以改善薄膜的厚度均匀性和完整性,使薄膜更加光滑致密,但过多或过少都会导致薄膜质量变差,如气泡、裂纹等问题。

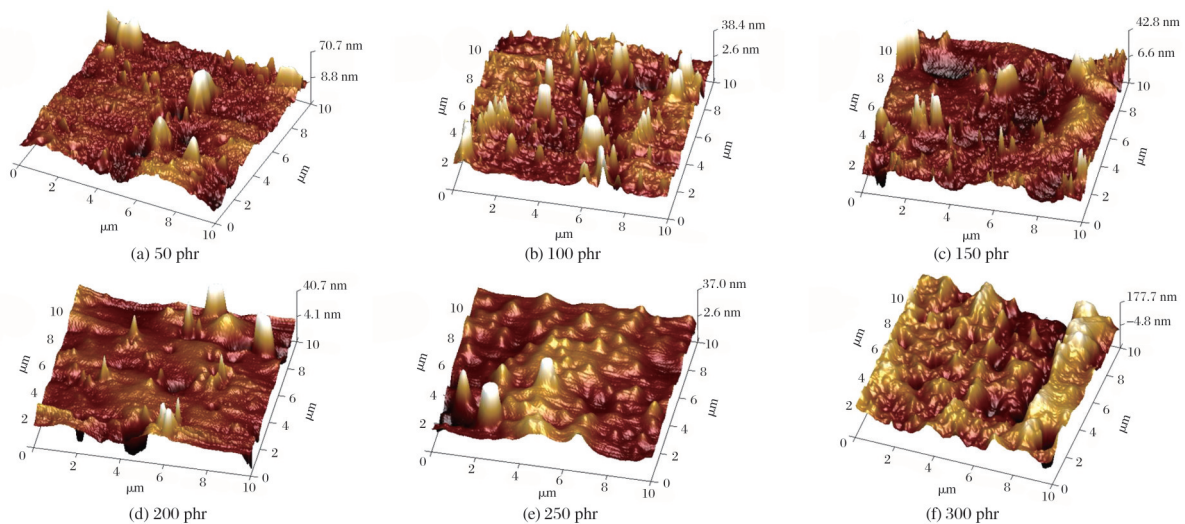


图5  $\text{SiO}_2$ 添加量对环氧树脂补强胶膜表面形貌的影响

Fig.5 Effect of  $\text{SiO}_2$  addition on surface morphology of epoxy resin reinforced adhesive films

表6 SiO<sub>2</sub>添加量对环氧树脂补强胶膜表面平整度和粗糙度的影响

Tab.6 Effect of SiO<sub>2</sub> addition on surface smoothness and roughness of epoxy resin reinforced adhesive films

SiO <sub>2</sub> 添加量/phr	表面平整度	$R_q/\mu\text{m}$	$R_a/\mu\text{m}$
50	表面光滑	0.013 0	0.008 2
100	表面光滑	0.011 1	0.006 7
150	表面光滑	0.009 0	0.006 0
200	表面光滑	0.007 8	0.004 5
250	表面光滑	0.008 1	0.005 6
300	表面粗糙	0.050 8	0.039 0

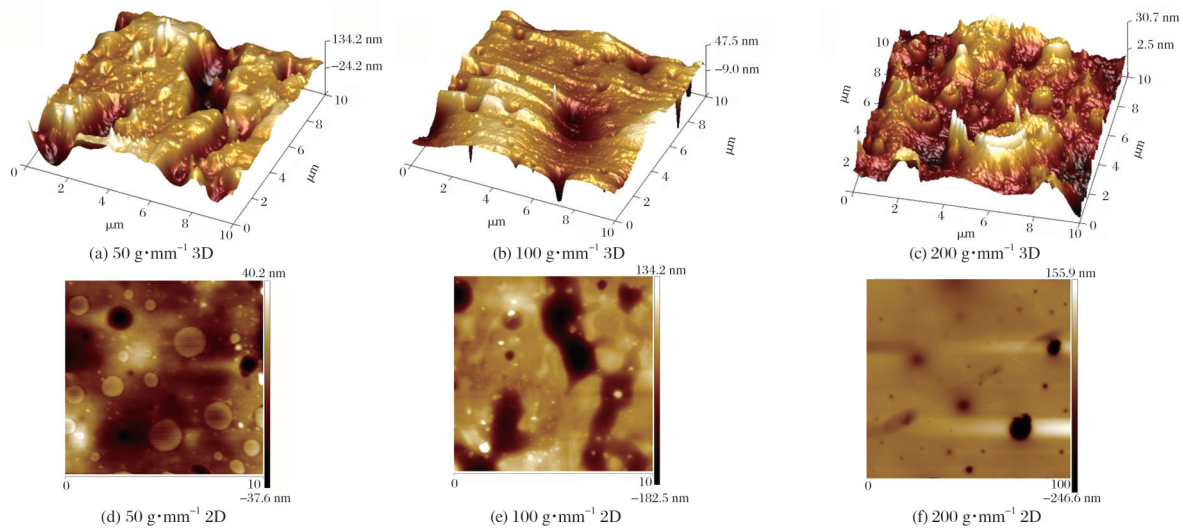


图6 涂敷于不同离型力的离型膜的环氧树脂补强胶膜的3D和2D表面形貌

Fig.6 3D and 2D surface morphology of epoxy resin reinforced adhesive films applied to release films with different release forces

表7 涂敷于不同离型力的离型膜的环氧树脂补强膜表面平整度和粗糙度

Tab.7 Surface smoothness and roughness of epoxy resin reinforced films applied to release films with different release forces

离型力/(g·mm <sup>-1</sup> )	表面平整度	$R_q/\mu\text{m}$	$R_a/\mu\text{m}$
50	表面粗糙	0.048 7	0.037 8
100	表面光滑	0.015 9	0.010 2
200	表面光滑	0.008 0	0.006 4

### 3 结论

本研究选用 GELR128 与 GESN301 型环氧树脂、CTBN、SiO<sub>2</sub> 及 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 填料以及不同离型力的基材,制备一系列环氧树脂复合补强胶膜体系。并对该复合补强胶膜进行表面形貌的观察和粗糙度的测试,系统研究树脂基体类型、橡胶相增韧比例、纳米粒子填充梯度及基材界面特性对胶膜成膜完整性的协同作用机制。

环氧树脂补强胶膜表面粗糙度测试结果显示,在两种环氧树脂体系中,GESN301 树脂体系展现的成膜性能更

### 2.4 不同基材对环氧树脂补强胶膜成膜性的影响

图6为涂敷于不同离型力的离型膜的环氧树脂补强胶膜的3D和2D表面形貌,表7为涂敷于不同离型力的离型膜的环氧树脂补强膜表面平整度和粗糙度。从图6和表7可以看出,当离型力为50 g/mm时,胶膜表面粗糙成膜性较差, $R_q=0.0487\mu\text{m}$ , $R_a=0.0378\mu\text{m}$ ;当离型力为200 g/mm时,胶膜表面光滑,粗糙度最小,成膜性较好, $R_q=0.0080\mu\text{m}$ , $R_a=0.0064\mu\text{m}$ 。由此可以看出,离型膜的离型力对膜的粗糙度也有着较大的影响。离型力越大,则基膜上的离型剂越少,收缩率越小,树脂在与离型膜接触的过程中,能够更好地附着在离型膜表面,形成均匀、完整的膜,即成膜性更好。

优。将两种环氧树脂体系以不同配比复配,随着GESN301占比的提高,环氧树脂补强胶膜的粗糙度呈现下降趋势,当GELR128和GESN301树脂质量比为1:3时,树脂体系展现的成膜性最佳。CTBN添加量对成膜性具有显著影响。适量添加CTBN可有效优化胶膜成膜性,当其添加量为15 phr时,表面粗糙度参数 $R_q$ 与 $R_a$ 分别达到0.0086 $\mu\text{m}$ 和0.0064 $\mu\text{m}$ ,此时成膜效果最佳。然而进一步增加CTBN添加量,成膜性则逐渐劣化。不同填料含量对其成膜性影响显著。适量添加填料可有效改善环氧树脂补强胶膜的成膜性,而填料用量不足或过量均会导致成膜性变差。具体而言,当Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>添加量为250 phr时,胶膜表面粗糙度达到最低值;当SiO<sub>2</sub>添加量为200 phr时,胶膜成膜性表现最优。针对同一配方环氧树脂胶膜,在不同离型力离型膜上的成膜粗糙度测试显示,离型膜离型力与成膜质量呈正相关,即离型力越大,胶膜成膜性越优。当离型力参数设定为200 g/mm时,环氧树脂补强胶膜表面呈现高平整度特征,粗糙度检测值达到最低水平,证实该离型力条件下成膜效果最优。

## 参考文献

- [1] 孙国栋, 张杨. FPC补强片贴片质量视觉检测系统设计[J]. 应用光学, 2015, 36(6): 942.
- [2] 牛翔, 陈文求, 陈伟, 等. FPC基材用电子化学材料的研究现状和发展趋势[C]//第二十五届中国覆铜板技术研讨会论文集. 九江: 中国电子材料行业协会覆铜板材料分会, 中国电子电路行业协会覆铜板分会, 江汉大学湖北省化学研究院, 华烁电子材料(武汉)有限公司, 华烁科技股份有限公司, 2024.
- [3] 于翠屏, 刘元安, 李杨柳, 等. 柔性电子材料与器件的应用[J]. 物联网学报, 2019, 3(3): 102-110.
- [4] FENG Y F, LI Y D, WANG F P, et al. Strong composition dependence of adhesive properties of ultraviolet curing adhesives with modified acrylates[J]. Materials Research Express, 2018, 5(5): 056409.
- [5] 聂兵. 低分子量丙烯酸树脂的合成研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2025.
- [6] 刘军海, 李志洲, 王俊宏. 改性淀粉木材胶黏剂的制备及性能研究[J]. 中国胶粘剂, 2016, 25(9): 29-33.
- [7] 黄云涌, 朱可嘉. 环氧胶黏剂在不同固化条件下的凝胶化时间研究[J]. 公路与汽运, 2015, 31(2): 98-100.
- [8] 杨志, 张翼, 杨慧敏. 增韧环氧树脂、多元醇分子量及有机硅改性聚氨酯的制备及对复合涂层防护性能的研究[J]. 现代化工, 2025, 45(4): 180-189.
- [9] 钟昀芮. 杜仲胶基海洋防腐防污涂料的研究与开发[D]. 北京: 北京化工大学, 2024.
- [10] 何勇, 陈金威, 张卫康, 等. HTPB液体橡胶/纳米SiO<sub>2</sub>协同增韧环氧树脂的研究[J]. 塑料科技, 2023, 51(2): 59-63.
- [11] 蔚永强. 环氧树脂基高导热绝缘复合胶膜的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- [12] 陈辉. 耐热耐火环氧树脂及其胶膜的制备与性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- [13] 何岳山, 许伟鸿, 李东伟. 固化温度对封装基板用环氧树脂绝缘增层胶膜性能的影响[J]. 热固性树脂, 2024, 39(4): 25-29.
- [14] 成秀燕, 陈淳, 张佐光, 等. 中温热熔预浸料用环氧树脂胶膜配方的研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2007(6): 9-13.
- [15] 李会录, 张国杰, 魏韦华, 等. 有机基板用增层膜性能与一致性的探讨[J]. 电子与封装, 2024, 24(2): 32-39.
- [16] YOO J N, SPERLING L H, GLINKA C J, et al. Characterization of film formation from polystyrene latex particles via SANS. 2. High molecular weight[J]. Macromolecules, 1991, 24(10): 2868-2876.
- [17] PAWLICZAK E E, KINGSLEY B J, CHIAROT P R. Structure and properties of electrospray printed polymeric films[J]. MRS Advances, 2022, 7: 635-640.
- [18] 秦总根, 涂伟萍, 夏正斌. 树脂乳胶成膜过程的研究现状与前景[J]. 合成树脂及塑料, 2004, 21(5): 75-78.
- [19] WANG C S, BOWDEN R L, CHEN W N. Method for preparing advanced epoxy or phenoxy resins with low aliphatic halide content: US468470[P]. 1987-08-04.
- [20] 夏璐. 高密度聚乙烯土工膜性能及其受到聚乙烯原料的影响分析[J]. 江西建材, 2018(9): 45-46.
- [21] 何志球, 盘冠华, 胡泳宾. 氧化石墨烯对环氧-橡胶两相体系性能的影响研究[J]. 粘接, 2019, 40(4): 41-44.
- [22] 周启航. 纳米银片的制备及其在环氧树脂基导电胶中的应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.
- [23] 高顺英. 氧化铝/氮化硼/环氧树脂导热绝缘复合材料的制备及性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2024.
- [24] 熊雯雯. 高导热环氧树脂复合绝缘胶黏剂的制备与性能研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
- [25] 殷实莹. 超导磁体封装用环氧树脂及其复合材料制备与性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.