

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.07.021

双酚S基环氧树脂的制备及在高频高速覆铜板中的应用性能

尹小田¹, 郑志强²

(1. 泸州职业技术学院, 四川泸州 646000; 2. 四川大学材料科学与工程学院, 成都 610065)

摘要: 为满足高频高速覆铜板(CCL)对高耐热、低吸湿及优异介电性能的紧迫需求,本文以双酚S和环氧氯丙烷为原料,采用异丙醇溶液沉淀法合成了一种含砜基($-\text{SO}_2-$)刚性结构的双酚S型环氧树脂。随后,将其与E-51型环氧树脂按不同质量比进行复配,并选用594型改性多胺类固化剂制备了一系列固化体系。采用傅里叶变换红外光谱、核磁共振氢谱等对树脂结构与热行为进行了表征,并系统研究了固化体系的热学、力学、耐湿及介电性能。研究结果表明,目标树脂成功合成,其本征热稳定性优异,初始分解温度($T_{10\%}$)达277℃。在复配体系中,各固化物热分解温度均高于250℃,其中双酚S/E-51质量比为1:3时耐热性最佳。力学与吸水率测试显示,复配材料的弯曲强度保持在120.36~132.61 MPa,吸水率处于0.03%~0.09%的极低水平。介电性能测试表明,随着双酚S含量增加,材料的介电常数与介电损耗均呈降低趋势,体系介电常数由3.30降低至2.95,介电损耗由0.018降低至0.013。结论指出,引入刚性砜基结构在保持材料良好综合性能的同时可显著改善介电性能,该体系作为高频高速覆铜板的基体材料具有广阔的应用潜力。

关键词: 双酚S型环氧树脂;高频高速覆铜板;介电性能;热稳定性;综合性能

中图分类号: TQ436.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)07-0185-07

Preparation of a bisphenol S-based epoxy resin and its application performance in high-frequency and high-speed copper clad laminates

YIN Xiaotian¹, ZHENG Zhiqiang²

(1. Vocational and Technical College, Luzhou 646000, China;

2. College of Materials Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: To address the stringent requirements of high-frequency and high-speed copper-clad laminates (CCL) for high thermal stability, low moisture absorption and excellent dielectric properties, a bisphenol S-type epoxy resin containing rigid sulfone ($-\text{SO}_2-$) structures was synthesized via an isopropanol solution precipitation method with bisphenol S and epichlorohydrin as raw materials. This resin was blended with E-51 epoxy resin in various mass ratios and cured using a 594-type modified polyamine curing agent to prepare a series of cured epoxy resin. The chemical structure and thermal transition behavior of the resin were characterized by Fourier transform infrared spectroscopy, nuclear magnetic resonance hydrogen spectroscopy, etc, and the thermal stability, mechanical strength, moisture resistance and dielectric properties of the cured epoxy resin were systematically investigated. The results confirmed the successful synthesis of the target resin, which exhibited superior intrinsic thermal stability with an initial decomposition temperature ($T_{10\%}$) of 277 °C. All blended systems showed decomposition temperatures exceeding 250 °C, with mass ratio of bisphenol S to E-51 of 1:3, yielding the optimal heat resistance. Mechanical properties and water absorption rate tests indicate that the flexural strength of blended materials remain within 120.36–132.61 MPa, while water absorption rate is remarkably low, ranging from 0.03% to 0.09%. Dielectric property tests indicate that both the dielectric constant and dielectric loss of the materials exhibit a downward trend with the increase of bisphenol S content. Specifically, the dielectric constant of the system decreases from 3.30 to 2.95, while the dielectric loss is reduced from 0.018 to 0.013. It is concluded that the introduction of rigid sulfone

基金项目: 首批教材立项建设项目(JC-2023055)

通信作者: 尹小田, 讲师, 主要研究方向为印制电路板设计与制作、传感器技术

收稿日期: 2026-04-19

引用格式: 尹小田, 郑志强. 双酚S基环氧树脂的制备及在高频高速覆铜板中的应用性能[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(7): 185–191.

YIN Xiaotian, ZHENG Zhiqiang. Preparation of a bisphenol S-based epoxy resin and its application performance in high-frequency and high-speed copper clad laminates[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(7): 185–191.

groups effectively enhances dielectric performance while maintaining robust comprehensive properties. This system has broad application potential as a matrix material for high-frequency and high-speed CCLs.

Keywords: bisphenol S-based epoxy resin; high-frequency and high-speed copper clad laminate; dielectric property; thermal stability; combination property

随着5G/6G通信及高速运算技术的飞速发展,覆铜板(CCL)作为印制电路板(PCB)的核心基材^[1-2],其介电常数(D_k)、介质损耗(D_f)及湿热稳定性直接决定了信号传输的完整性与可靠性^[3-8]。然而,传统双酚A型环氧树脂(如FR-4基材)在应用中表现出显著局限:其固化物玻璃化转变温度(T_g)较低(130~150℃),且分子结构中大量的极性羟基导致吸湿率偏高,在高温高湿环境下易引发信号衰减及尺寸失稳^[9-11]。

针对这些问题,国内外研究学者开始关注通过引入高刚性芳香结构来提升环氧树脂的热稳定性和低吸湿性能,包括萘环^[12]、茚烷^[13]、含氟结构等多种改性体系^[14]。例如,含萘环的环氧固化物能够显著提高 T_g ,同时降低吸水率;含三官能氟取代的环氧树脂固化物可获得超过210℃的 T_g 、极低吸湿率以及较低的 D_k 。然而,这些体系仍面临合成成本高、加工难度大等问题,在工业化应用中受到一定限制。

相比之下,双酚S型环氧树脂因其独特的苯砜(—SO₂—)桥联结构而受到广泛关注。磺酮基团赋予分子链更高的刚性和对称性,使固化物表现出更优异的耐热性、抗氧化性和尺寸稳定性。大量研究显示,引入高刚性主链结构(如磺酮基团)能够有效提高树脂 T_g 、增强分子间作用力并降低吸湿性^[15-18]。因此,基于双酚S的环氧体系在理论上具有显著的性能优势,可满足高频高速PCB对低吸湿、低 D_f 和高可靠性的综合需求。尽管双酚S型环氧树脂具有突出的结构潜力,但目前针对其在覆铜板基材领域的系统研究仍较为有限。现有文献多集中于基础性质与合成方法,而对其固化反应可控性、交联结构设计及最终电热性能之间的关联性仍缺乏深入探讨^[19-20]。因此,围绕双酚S环氧体系开展材料结构设计、固化体系优化及性能验证具有重要的科学意义与工程价值。

基于上述背景,本研究旨在开发一种以双酚S为核心结构的新型高性能环氧树脂体系,通过分子结构调控与固化体系优化,获得同时具备高 T_g 、低吸湿性、低 D_f 及优异力学和电气性能的固化材料。该

研究不仅可填补国内双酚S环氧基覆铜板材料的研究空白,也有望推动高端电子材料在实际产业中的应用,为新一代高速电子系统提供关键材料支撑。

1 实验部分

1.1 主要原材料

双酚S:纯度≥99%,湖北楚烁生物科技有限公司;

环氧氯丙烷:纯度≥99%,苏州巨峰电气绝缘系统股份有限公司;

异丙醇:纯度≥99%,山东飞度化工有限公司提供;

氢氧化钠:纯度≥99%,河北恒通化工有限公司;

E-51型环氧树脂:优级品,广东固德树脂有限公司;

改性多胺类固化剂:594型,优级品,无锡钱广化工原料有限公司;

纯净水:自制。

1.2 仪器及设备

傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪:Nicolet iS50,美国Thermo Fisher公司;

核磁共振(NMR)仪:Bruker AVANCE III HD, 600 MHz,德国Bruker公司;

差示扫描量热(DSC)仪:DSC 250,美国TA公司;

热重(TG)分析仪:Q500,美国TA公司;

导热系数测试仪:DRL-III,中国湘潭湘仪仪器有限公司;

万能材料试验机:Instron 5567,美国INSTRON公司;

介电性能测试仪:QS30,上海精密科学仪器有限公司。

1.3 双酚S环氧树脂的合成

本实验通过异丙醇溶液沉淀工艺完成双酚S环氧树脂的合成,具体操作流程如下:按照双酚S与环氧氯丙烷1:8的物质的量配比,精确称取125 g双酚S、370 g环氧氯丙烷,同时加入148 g异丙醇及适量纯净水,共同置于三口烧瓶内;向反应体系中添加150 g质量分数为32%的氢氧化钠溶液,其中异丙

醇不仅发挥催化作用,还能促进双酚S与环氧氯丙烷在常温条件下溶解,有助于双酚S的均匀分散;将三口烧瓶升温至60℃,在搅拌状态下反应3 h后,继续保温1 h;反应结束后自然冷却至室温,采用布氏漏斗进行过滤处理,收集白色固体产物;利用去离子水对白色固体进行多次洗涤,直至洗涤液的pH值达到中性;将洗涤后的白色固体放入150℃的烘箱中干燥5 h,最终制得双酚S环氧树脂产品。通过盐酸丙酮法测定,测得产物双酚S环氧树脂的环氧值0.52 mol/100 g。(合成双酚S环氧树脂的化学反应式如图1所示)

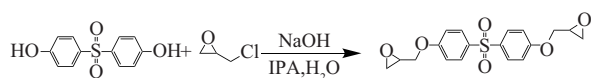


图1 合成双酚S环氧树脂的化学反应式

Fig. 1 Chemical equation for synthesis of bisphenol S epoxy resin

表1 双酚S环氧树脂与E-51型环氧树脂的质量配比方案

Tab. 1 Mass ratio schemes of bisphenol S epoxy resin and E-51 epoxy resin

Sample	Mass ratio of bisphenol S epoxy resin:E-51 epoxy resin	Curing agent 594	Accelerator
S1	0:1		
S2	1:3		
S3	1:4	5% of epoxy resin	0.1% of epoxy resin
S4	1:5		

1.5 测试与表征

FTIR 结构表征:采用FTIR 仪对双酚S环氧树脂的化学结构进行分析,验证特征官能团的存在。

环氧值测定:参照GB/T 1677-2023 标准,采用盐酸-丙酮滴定法测定环氧值。

DSC 分析:选取约10 mg 样品,在氮气气氛下采用DSC 法进行测试,设置升温速率分别为5、10、15、20℃/min,测试温度区间为40~300℃。

NMR 分析:使用NMR 仪对合成产物的化学结构进行表征,产物用CDCl₃溶解,超导磁体14.1 T,对1 H 共振频率为600 MHz;多核探头(31 P ~ 15 N, 19 F)参数为1 H 分辨率0.75 Hz,1 H 灵敏度964.8:1。

热稳定性测试:使用TG 分析仪,取样量约10 mg,在氮气气氛下以10℃/min 的升温速率从25℃升至600℃,记录样品的初始热分解温度($T_{1\%}$)、不同质量损失比例对应的温度($T_{5\%}$ 、 $T_{10\%}$ 等)以及残余物的质量分数。

导热系数测定:采用导热系数测试仪,测试标准为ASTM D5470-2006,测试方法为稳态热流法,测试样品规格为30 mm×30 mm×5 mm。

力学性能测试:采用万能试验机按GB/T 2567-

1.4 试样制备

试样制备流程分为胶黏剂调配与固化物制备两个阶段,具体操作步骤如下:胶黏剂调配:将双酚S环氧树脂与E-51 型环氧树脂按不同质量比进行混合,共设计四组配比方案(详见表1),经加热搅拌至均匀状态后,即得到所需胶黏剂;固化物制备:按照胶黏剂与594 型改性多胺类固化剂20:1 的质量比加入固化剂,搅拌混合15 min 使其充分融合;将混合均匀的物料放入150℃的真空烘箱中,保持该温度恒温5 h,完成固化过程并获得固化产物;单独取E-51 型环氧树脂与594 型改性多胺类固化剂,按20:1 的质量比搅拌混合均匀,采用相同的真空烘箱固化工艺进行处理,所得固化物作为空白对照样品S1。

2008 进行测试,试验的加载速率为5 mm/min,分别测试5 根试样,结果取平均值。

D_k 和 D_f 测试:采用介电性能测试仪,依据IEC 60250:2018 测试。测试频率为50 Hz,测量温度为25℃,相对湿度为65%。

2 结果与讨论

2.1 结构表征分析

2.1.1 FTIR 分析

图2 为所合成双酚S 型环氧树脂在2 200~600 cm⁻¹ 波数范围内的红外光谱图。在1 580 cm⁻¹ 和1 500 cm⁻¹ 附近可观察到明显吸收峰,归属于芳香环C=C 骨架振动,表明产物中仍保留双酚S 的芳香族结构。在1 320~1 340 cm⁻¹ 和1 140~1 160 cm⁻¹ 处出现一对强吸收峰,分别对应砜基(—SO₂—)的不对称和对称伸缩振动,说明砜基在反应过程中未发生破坏,是双酚S 型环氧树脂的重要结构特征。在910~915 cm⁻¹ 处出现明显的特征吸收峰,为环氧基中氧杂三元环的特征振动峰,同时在840~860 cm⁻¹ 处观察到环氧环的变形振动吸收峰^[21],表明产物中成功引入了环氧基团。此外,1 240~1 260 cm⁻¹ 处的吸收峰可归属于芳香醚键(C—O—C)的伸缩振动,说明双酚S 与环氧氯丙烷发生醚化反应形成环氧树

脂结构。 $1\ 030\sim 1\ 100\ \text{cm}^{-1}$ 区域内的多重吸收峰为C—O—C振动与砜基相关振动的叠加,是芳香族环氧树脂的典型特征。综上所述,红外光谱结果表明,所制备产物为结构明确的双酚S型环氧树脂,目标产物已成功合成。

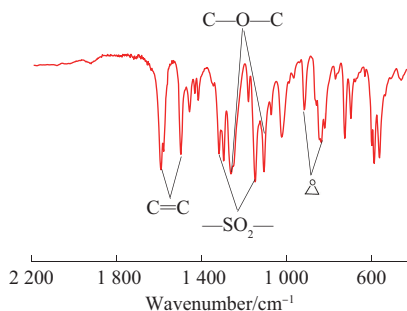


图2 双酚S环氧树脂的FTIR谱图

Fig. 2 FTIR spectrum of bisphenol S epoxy resin

2.1.2 ^1H NMR 分析

图3为双酚S环氧树脂的 ^1H -NMR谱图。如图3所示,双酚S环氧树脂的 ^1H -NMR谱图中各特征信号积分与其理论氢数高度一致。化学位移(δ)为2.6~2.9处的多重峰归属于环氧基中 $-\text{CH}_2-$ 质子,积分对应4H; δ 为3.1~3.3处的信号归属于环氧基中的次甲氢 $-\text{CH}-$,积分为2H,两者积分比约为2:1,符合环氧基结构特征。 δ 为3.8~4.2处的多重峰归属于醚键 $-\text{O}-\text{CH}_2-$ 质子,积分为4H,表明双酚S的酚羟基已完全转化为缩水甘油醚结构。

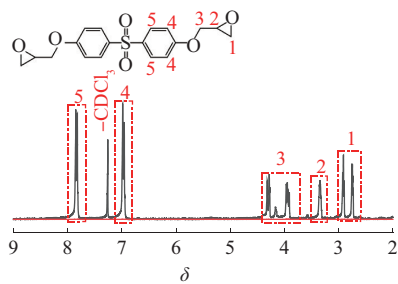


图3 双酚S环氧树脂的 ^1H -NMR谱图

Fig. 3 ^1H -NMR spectrum of bisphenol S epoxy resin

芳香区在 δ 为6.9~8.0范围内出现两组强度相当的特征峰,分别归属于对位取代苯环上的芳香质子,积分各为4H,体现出双酚S对称分子结构特征。谱图中未观察到酚羟基质子信号,说明反应过程中羟基被完全消耗。

综上,各特征峰的化学位移、裂分形式及积分比(4:2:4:4:4)与双酚S环氧树脂的理论结构完全一致,证明所合成产物为目标双酚S环氧树脂。

2.1.3 DSC 分析

图4为双酚S型环氧树脂在升温速率为 $10\ ^\circ\text{C}/\text{min}$ 条件下获得的DSC曲线。由图4可见,在 $40\sim 50\ ^\circ\text{C}$ 附近出现一处较为平缓的吸热转变,对应于树脂的 T_g 。该转变峰较宽,说明材料以无定形结构为主,且分子链段运动存在一定的分布特征,这与双酚类环氧树脂的结构特点相一致。当温度升高至约 $165\sim 175\ ^\circ\text{C}$ 后出现明显的吸热峰,该峰可归属于双酚S环氧树脂的熔融吸热过程。该明显熔融峰的存在表明树脂分子中由于砜基和芳香环的引入,形成了一定程度的规整结构或局部有序堆积,从而表现出可观察的熔融转变行为。综上,DSC结果表明合成双酚S型环氧树脂具有明确的玻璃化转变和熔融行为,它的热转变特征与其分子结构相一致,进一步验证了目标产物的成功制备。

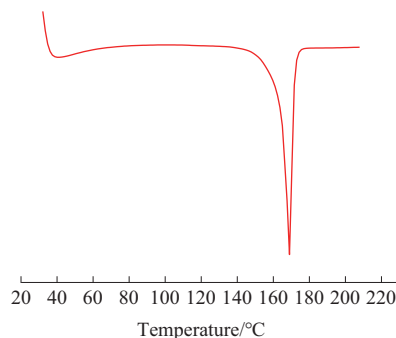


图4 双酚S环氧树脂的DSC曲线

Fig. 4 DSC curves of bisphenol S epoxy resin

2.1.4 热失重分析

图5为双酚S型环氧树脂的TG曲线。由图可知,样品在 $250\ ^\circ\text{C}$ 以下质量基本保持不变,表明材料在低温区具有良好的热稳定性,且体系中未含明显残余溶剂或低分子杂质。样品的 $T_{10\%}$ 达到 $277\ ^\circ\text{C}$,显示出较高的热分解起始温度。当质量损失达到5%和15%时, $T_{5\%}$ 和 $T_{15\%}$ 分别为 $330\ ^\circ\text{C}$ 和 $372\ ^\circ\text{C}$,进一步

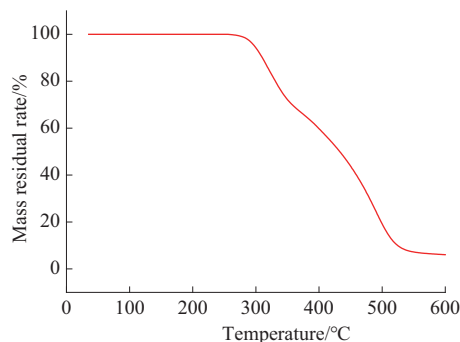


图5 双酚S环氧树脂的TG曲线

Fig. 5 TG curve of bisphenol S epoxy resin

表明该环氧树脂具有优异的耐热性能。随着温度继续升高,样品在 394 °C 时失重达到 50% ($T_{50\%}$),说明树脂主链的热裂解主要发生在较高温度区间。该优异的热稳定性主要归因于分子结构中刚性芳香环骨架及热稳定性较高的砒基的引入。在 300~550 °C 区间内,样品经历主要的热分解过程,对应于环氧树脂分子主链中醚键断裂及含砒芳香结构的热降解;550 °C 以上残余质量趋于稳定,最终残炭率为 5%~10%,表明芳香环与砒基结构有利于高温下炭化层的形成。综上所述,TG 分析结果表明合成的双酚 S 型环氧树脂具有较高的初始分解温度和优异的热稳定性,可满足耐热型环氧材料的应用需求。

2.2 固化物综合性能分析

2.3.1 固化物耐热性分析

对双酚 S 环氧树脂与 E-51 环氧树脂按不同比例复配,经固化剂 594 固化后的产物进行 TG 测试。从环氧基体树脂固化物的测试结果来看,如图 6 所示:四种配比固化物的热分解温度分别为 264.23、327.12、306.97、258.84 °C,均高于 250 °C,表明其具备良好的耐热基础。 $T_{5\%}$ 对应的温度范围在 298.01~354.25 °C 之间, $T_{10\%}$ 对应的温度范围为 321.33~369.63 °C,600 °C 时的残留质量分数介于 2.31%~7.73% 之间。综合分析各项热性能参数,当双酚 S 环氧树脂与 E-51 环氧树脂的质量比为 1:3 时(S2),

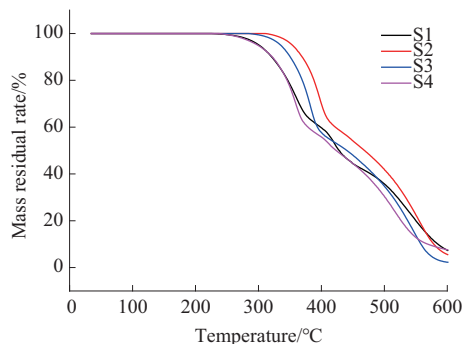


图6 固化物体系TG曲线

Fig. 6 TG curves of the cured system

固化物的热稳定性最优,能够充分满足覆铜箔板基体树脂的耐热使用需求。

2.3.2 固化物性能综合分析

表2给出了不同配比双酚 S 环氧树脂/E-51 环氧树脂固化物的导热率测试结果。与 E-51 体系相比,引入双酚 S 环氧树脂后,固化物导热率仅在 0.89~1.15 W/(m·k) 范围内小幅波动,且各配比样品之间差异不显著,表明双酚 S 环氧树脂的加入并未对体系导热性能产生不利影响。尽管双酚 S 的引入在一定程度上改变了分子链结构和交联致密程度,从而影响声子传热路径,但由于其与 E-51 环氧树脂主链结构相近、体系连续性良好,整体导热性能仍保持稳定,能够满足覆铜箔板基体材料对热管理性能的要求。

表2 不同配比固化物性能

Tab. 2 Properties of cured product of different ratios

System	Thermal conductivity/ [W·(m·k) ⁻¹]	Flexural strength/MPa	Water absorption rate/%	Dielectric constant(D_k)	Dielectric loss(D_f)
S1	0.89	126.47	0.05	3.30	0.018
S2	1.15	120.36	0.03	3.15	0.016
S3	1.06	122.44	0.09	3.05	0.014
S4	0.91	132.61	0.06	2.95	0.013

不同配比固化物的弯曲强度结果见表2。与 S1 配比相比时,S2~S4 配比的固化物弯曲强度仍能保持在 120.36~132.61 MPa,说明少量双酚 S 的引入不会削弱体系的力学性能。然而,当其质量比为 S2 至 S4 时,固化物弯曲强度出现小幅下降,最低下降至 120.36 MPa。这表明,双酚 S 环氧树脂在适当掺量范围内可与 E-51 形成结构均一的固化网络,而过高含量则可能破坏体系的均一性并限制固化反应的充分进行,从而对力学性能产生不利影响。因此,双酚 S 环氧树脂在 S4 配比时能表现出良好的力学性能保持能力。

吸水率测试结果(表2)显示,不同配比固化物的吸水率均处于 0.03%~0.09% 的较低水平,且随双酚 S 环氧树脂含量变化不明显。与 S1 配比相比,引入双酚 S 环氧树脂后,固化物仍在保持优异疏水性能的同时未引入额外的吸湿风险,满足覆铜箔板基体树脂对耐湿性能的要求。

由表2可知,在介电性能方面,随着双酚 S 含量的增加,材料的 D_k 和 D_f 均呈现逐渐降低的趋势。纯 E-51 体系(S1)的 D_k 为 3.30, D_f 为 0.018;随着双酚 S 的引入,S2 至 S4 体系的 D_k 逐步降低至 2.95, D_f 降低至 0.013。这一变化主要归因于双酚 S 分子中砒基

(—SO₂—)的引入。一方面,砜基具有较强的吸电子能力,降低了体系的电子极化和取向极化;另一方面,其刚性结构限制了分子链段运动,从而降低偶极子的响应能力。此外,随着刚性结构含量增加,体系自由体积减小,分子运动受限,进一步抑制了介电弛豫过程,使 D_f 降低。需要说明的是,本文在50 Hz条件下测试介电性能,主要用于比较不同配方体系之间的相对变化规律,而非直接反映材料在高频条件下的绝对性能。因此,所得数据更侧重于反映分子结构调控对介电行为的影响规律。尽管高频(GHz级)介电性能对于高速覆铜板应用更为关键,但低频测试结果通常与高频变化趋势具有一致性,因此仍具有重要参考价值。

3 结论

(1)以双酚S为核心结构成功合成了一种新型环氧树脂。FTIR与¹H-NMR表征结果表明,目标树脂中环氧官能团成功引入,芳香环及砜基结构在合成过程中保持稳定。

(2)热分析结果表明,所合成双酚S型环氧树脂的初始热分解温度为277℃,表现出优异的本征热稳定性,其较高的热分解温度赋予复配体系良好的热稳定性能。

(3)双酚S环氧树脂与E-51环氧树脂复配后的固化体系均表现出良好的综合性能,所有配方的热分解温度均高于250℃,其中双酚S/E-51质量比为1:3的体系耐热性能最佳。

(4)在S4配比时,固化体系仍保持较高的弯曲强度132.61 MPa,且吸水率较低为0.06%,表现出良好的力学性能和耐湿稳定性。

(5)双酚S环氧树脂的引入可显著改善固化体系的介电性能。研究结果表明,该树脂在高频高速覆铜板基体材料领域具有良好的应用潜力。

参考文献

- [1] 魏新启,任永会,王剑. 224G高速互联对PCB及覆铜板需求和挑战[J]. 覆铜板资讯, 2024(6):25–35.
WEI Xinqi, REN Yonghui, WANG Jian. Demand and challenge of 224G high-speed interconnection for PCB and copper clad laminate[J]. Copper Clad Laminate Information, 2024(6):25–35.
- [2] 林金堵. 5G通信对PCB基材的要求[J]. 印制电路信息, 2021, 29(1):7–12.
LIN Jindu. Requirements of base material of PCB for 5G communication[J]. Printed Circuit Information, 2021, 29(1):7–12.
- [3] 周文涛,蒲金灵,邱家乐,等. 5G基站AAU模块的高速PCB技术研究[J]. 印制电路信息, 2024, 32(增刊1):87–92.
ZHOU Wentao, PU Jinling, QIU Jiale, et al. Research on high speed pcb technology for 5G base station AAU module[J]. Printed Circuit Information, 2024, 32(Suppl 1):87–92.
- [4] ZHENG X Q, CHEN J, WANG H C, et al. A deep learning-based approach for the automated surface inspection of copper clad laminate images[J]. Applied Intelligence, 2021, 51(3):1 262–1 279.
- [5] JIA L, YANG H F, WANG Y S, et al. Direct bonding of copper foil and liquid crystal polymer by laser etching and welding[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2021, 139. DOI: 10.1016/j. optlaseng. 2020.106509.
- [6] 陈浩,田正波,张阳,等. 植物油改性脂环族环氧树脂绝缘复合材料[J]. 材料科学与工程学报, 2025, 43(2):210–216.
CHEN Hao, TIAN Zhengbo, ZHANG Yang, et al. Cycloaliphatic epoxy resin insulating composites modified by plant oil[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2025, 43(2):210–216.
- [7] 罗成,陈勇,颜善银. 超低介电损耗、超低CTE的高耐热CCL在多层PCB及HDI方面的应用研究[J]. 覆铜板资讯, 2025(1):38–46.
LUO Cheng, CHEN Yong, YAN Shanyin. Study on the application of high heat-resistant CCL with ultra-low dielectric loss and ultra-low CTE in high-layer PCB and HDI[J]. Copper Clad Laminate Information, 2025(1):38–46.
- [8] 葛成利,朱红军,刘萌. 低介电环氧树脂研究进展[J]. 覆铜板资讯, 2022(5):34–42.
GE Chengli, ZHU Hongjun, LIU Meng. Research progress of low dielectric epoxy resin[J]. Copper Clad Laminate Information, 2022 (5):34–42.
- [9] 杨宋,顾媛娟,梁国正,等. 一种高频高速用覆铜板的制备及其性能研究[J]. 印制电路信息, 2017, 25(11):44–48.
YANG Song, GU Aijuan, LIANG Guozheng, et al. Preparation and properties of Copper Clad Laminates for high frequency and high speed applications[J]. Printed Circuit Information, 2017, 25(11): 44–48.
- [10] 强悦悦,蔡会武,王延东,等. 聚苯醚树脂在高频覆铜板中的应用研究[J]. 化工新型材料, 2022, 50(11):21–25.
QIANG Yueyue, CAI Huiwu, WANG Yandong, et al. Research on the application of polyphenylene ether resin in high frequency copper clad laminate[J]. New Chemical Materials, 2022, 50(11): 21–25.
- [11] 魏文康,虞鑫海. 环氧基体树脂的制备与性能表征[J]. 中国胶粘剂, 2019, 28(2):12–15.
WEI Wenkang, YU Xinhai. Preparation and characterization of epoxy matrix resin[J]. China Adhesives, 2019, 28(2):12–15.
- [12] 王威,王义师,孔国强,等. 含蔡环二胺改性BMI树脂的制备和性能[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(2):58–64.
WANG Wei, WANG Yishi, KONG Guoqiang, et al. Preparation and properties of BMI resin modified by diamine containing naphthalene[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(2):58–64.
- [13] 张翀,郭瑞鲁,崔惠泽,等. 笼型倍半硅氧烷改性环氧树脂的制备及性能研究[J]. 绝缘材料, 2025, 58(11):12–17.
ZHANG Chong, GUO Ruilu, CUI Huize, et al. Preparation and properties of polyhedral oligomeric silsesquioxane modified

- epoxy resin[J]. *Insulating Materials*, 2025, 58(11):12–17.
- [14] 祖立武,李纪东,刘嘉欣,等.环氧树脂改性国内外研究现状[J]. *化工新型材料*, 2022, 50(12):6–11.
- ZU Liwu, LI Jidong, LIU Jiaxin, et al. Research status of epoxy resin modification at home and abroad[J]. *New Chemical Materials*, 2022, 50(12):6–11.
- [15] 吴冯,虞鑫海,周兴平.新型耐高温双组分环氧胶粘剂的研制[J]. *粘接*, 2016, 37(5):53–56.
- WU Feng, YU Xinhai, ZHOU Xingping. Preparation of novel bi-component epoxy adhesive with high temperature resistance[J]. *Adhesion*, 2016, 37(5):53–56.
- [16] 童超梅,虞鑫海,陈吉伟,等.无溶剂耐高温环氧基体树脂的制备及性能研究[J]. *绝缘材料*, 2016, 49(2):18–21, 27.
- TONG Chaomei, YU Xinhai, CHEN Jiwei, et al. Preparation and properties of solvent-free epoxy matrix resin with high temperature resistance[J]. *Insulating Materials*, 2016, 49(2):18–21, 27.
- [17] 苏畅,张军营,杨威,等.高纯度双酚S环氧树脂/双氰胺/改性咪唑潜伏体系固化行为和性能研究[J]. *中国胶粘剂*, 2020, 29(1):1–8.
- SU Chang, ZHANG Junying, YANG Wei, et al. Study on curing behavior and properties of high purity bisphenol S epoxy resin/dicyandiamide/modified imidazole latent system[J]. *China Adhesives*, 2020, 29(1):1–8.
- [18] LIAW D J, SHEN W C. Synthesis of epoxy resins based on bisphenol-S and its derivatives[J]. *Die Angewandte Makromolekulare Chemie*, 1992, 199(1):171–190.
- [19] 张汇萌.双酚S环氧树脂及其衍生物的合成、结构及性能研究[D].北京:北京化工大学, 2012.
- ZHANG Huimeng. Study on the bisphenol S epoxy resin and its derivatives[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2012.
- [20] 孙东洲,孙禹,张智,等.改性双酚S环氧树脂胶黏剂的合成工艺[J]. *化学与粘合*, 2016, 38(4):255–259.
- SUN Dongzhou, SUN Yu, ZHANG Zhi, et al. Synthesis technology of modified bisphenol-S epoxy resin adhesive[J]. *Chemistry and Adhesion*, 2016, 38(4):255–259.
- [21] 金川,赵思,杭翔,等.香兰素基环氧树脂的制备及性能研究[J]. *化工新型材料*, 2024, 52(3):262–266, 272.
- JIN Chuan, ZHAO Si, HANG Xiang, et al. Preparation and properties of vanillin-based epoxy resin[J]. *New Chemical Materials*, 2024, 52(3):262–266, 272.