

综论

导电胶性能的提升策略

曲国娟, 张兴宇, 于伟强, 任 静, 王玉东, 杜厚俊*

(山东北方现代化学工业有限公司 科学技术中心, 山东 济南 250031)

摘要: 导电型胶黏剂是一种特殊功能型胶黏剂, 因其优异的线分辨率、环境友好性、简便的操作工艺等诸多优势, 已广泛用于集成电路黏接、发光二极管制造、芯片封装、太阳能电池板等领域。近年来, 随着电子产品、5G、人工智能等新兴技术的快速发展, 高性能导电胶的制备已成为当下电子材料领域的关键研究方向与行业发展趋势。该文综述了导电胶的组成、类型及其优缺点, 介绍了导电机理, 从改性树脂基体和掺杂纳米材料两方面阐述了导电胶力学黏接性能提升策略; 从调控导电填料的种类、尺寸及形貌、纳米颗粒添加、导电填料表面改性、低熔点合金的掺杂及固化条件优化等方面总结了提升导电胶导电性能的策略。最后, 指出了国产导电胶的发展现状、存在的问题, 并展望其未来的发展趋势。

关键词: 导电胶; 导电填料; 树脂改性; 导电性能; 力学黏接性能

中图分类号: TQ436 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-5214 (2026) 05-0950-10

Performance improvement strategies for electrically conductive adhesives

QU Guojuan, ZHANG Xingyu, YU Weiqiang, REN Jing, WANG Yudong, DU Houjun*

(Science and Technology Center, Shandong North Modern Chemical Industry Co., Ltd., Jinan 250031, Shandong, China)

Abstract: Electrically conductive adhesive, a special functional adhesive, has been widely used in the fields of integrated circuit bonding, light-emitting diode manufacturing, chip packaging, and solar panel production due to its excellent line resolution, environmental friendliness, and simple operation process. In recent years, with the rapid development of electronic products, 5G, artificial intelligence and other emerging technologies, preparation of high-performance electrically conductive adhesives has become a key research direction and industry development trend in the field of electronic materials today. Herein, the basic composition, types as well as advantages and disadvantages of electrically conductive adhesives were reviewed, followed by introduction on the conductive mechanism. The improvement strategies for the mechanical bonding performance of electrically conductive adhesives were then elaborated for the aspects of modified resin matrix and doped nanomaterials, while strategies for electrical conductivity enhancement were summarized from regulation on the type, size and morphology of conductive fillers, nanoparticle addition, surface modification of conductive fillers, doping of low-melting-point alloys and optimization of curing conditions. Finally, the current development status and the existing problems of domestic conductive adhesives were pointed out and their future development trends were discussed.

Key words: electrically conductive adhesives; conductive fillers; resin modification; conductive properties; mechanical adhesion properties

电子产品正朝着小型化、微型化、便携化、集成化方向发展, 电子元器件的连接材料也由传统的焊接材料逐渐被黏接材料替代^[1-3]。以锡焊为代表的

焊接技术广泛应用于电子工业中, 该技术需在高温环境下操作, 因此会不可避免地损害电子器件^[4-5]。导电胶作为新兴的绿色环保、可持续黏接材料, 可

收稿日期: 2025-04-02; 定用日期: 2025-05-22; DOI: 10.13550/j.jxhg.20250228

基金项目: 山东省人民防空科学技术研究课题项目 (2024RF006)

作者简介: 曲国娟 (1996—), 女, 博士生, E-mail: quguojuan@126.com。联系人: 杜厚俊 (1970—), 女, 正高级工程师, E-mail: 13573185976@163.com。

代替传统连接技术中的焊料, 减少焊接对电子器件的伤害。导电胶是一类由高性能树脂作为基体, 导电填料、固化剂、促进剂、偶联剂、稀释剂等功能助剂共同调配得到的高分子复合材料, 其固化后展示出优异的导电性、导热性和力学黏接性能^[6-9]。现阶段, 导电胶具有不含铅等有毒重金属、间距黏接细、柔性和抗疲劳性优异、加工工序简便、体积变化小、适合柔性电路板连接等优势^[10-11]。目前, 导电胶技术虽已取得一定的进展, 但与成熟的铅锡焊料工艺相比, 仍处于发展阶段, 诸多技术难题亟待攻克, 如固化后的导电胶力学性能较低、体积电阻率偏大、导电导热性能差, 这些问题严重限制了其在印刷电路板组件、发光二极管、液晶显示器、陶瓷电容器、集成电路、芯片和其他电子元器件领域的应用^[12-14]。因此, 提高导电胶的力学黏接性、导电性和导热性已成为该领域的研究重点, 是行业共同的目标和挑战。近年来, 基于导电胶的组成成分, 从树脂基体的修饰与改性、导电填料复配、添加及改性功能助剂着手来提升导电胶的综合性能。

本文拟介绍导电胶的基本组成成分及其优缺点、导电机理, 如图 1 所示; 重点阐述现阶段采用改性树脂基体、复配导电填料、添加及改性功能助剂等一系列策略, 提升导电胶固化后的力学黏接性能、导电性能。总结目前国产导电胶的研究发展现状、存在的问题, 并展望其未来的发展趋势。

1 导电胶的组成及其优缺点

导电胶作为电子封装与连接领域的关键材料, 其性能高度依赖于各组成成分的协同作用。导电胶主要由树脂基体、导电填料及功能性添加助剂构成, 各组分凭借独特的化学与物理性质, 共同赋予导电

胶多元化性能。其中, 树脂基体犹如“骨架”, 黏接和固定导电粒子, 确保连接结构的稳固性; 导电填料是导电胶实现导电功能的核心要素; 固化剂通过与树脂基体发生交联反应, 促使导电胶固化成型; 稀释剂能够精准调控体系黏度, 满足不同生产场景的操作需求; 偶联剂则充当“桥梁”, 有效增强树脂基体与导电粒子间的界面结合力, 提升导电胶整体性能的稳定性。然而, 导电胶各组成成分在发挥优势的同时, 也存在不可忽视的局限性。这些成分的本征缺陷不仅影响单一成分的性能, 还会通过相互作用制约导电胶综合性能的提升^[15-27]。表 1 系统梳理了导电胶的组成和类型及其在导电胶性能表现中的优缺点。

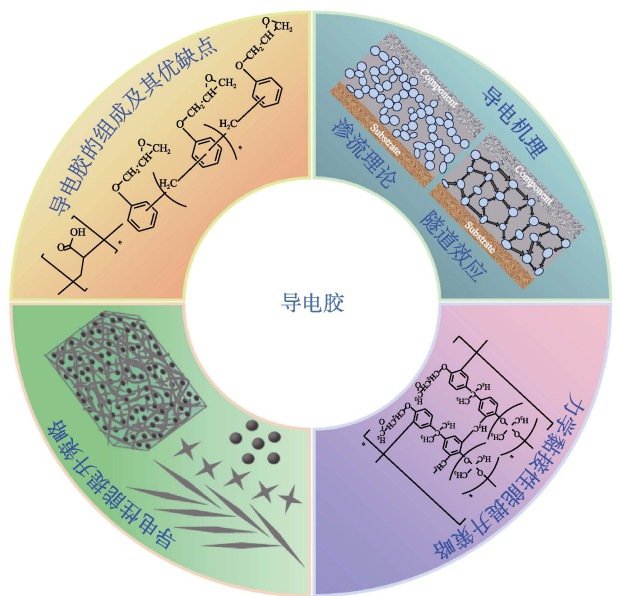


图 1 导电胶性能提升策略示意图
Fig. 1 Schematic diagram of strategies to improve properties for electrically conductive adhesives

表 1 导电胶的组成、类型及优缺点

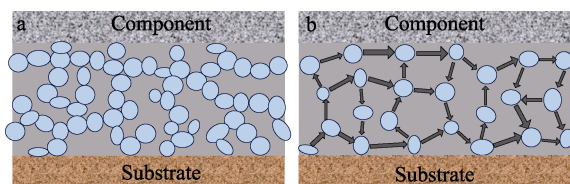
Table 1 Composition, types, advantages and disadvantages of electrically conductive adhesives				
组成	类型	优点	缺点	参考文献
树脂基体	环氧、有机硅、丙烯酸等改性树脂	优异的力学黏接性能、化学稳定性	脆性大、加工黏度大、耐候性较差	[15-18]
固化剂	酸酐类、胺类、咪唑化合物	促进固化反应, 增强黏接强度, 提高导电性能	固化工艺、设备复杂, 选用不合适影响储存稳定性, 降低导电性能、韧性等	[19-20]
导电填料	银、铜、镍等金属、碳材料和导电聚合物	提升导电性能, 改善导热性能, 增强机械性能	分散性难以控制, 添加过量影响导电胶的力学黏接性、流动性, 施工困难	[21-24]
稀释剂	环氧类活性稀释剂、二甲苯、丙酮等非活性稀释剂	调节树脂黏度、流动性, 改善涂布性能, 延长适用期	增加挥发污染, 降低胶接强度, 影响固化性能、导电性能	[25]
偶联剂	硅烷类、铝酸酯类	提高树脂与填料的分散性, 增强界面结合力	高温高湿等复杂环境下稳定性差	[26-27]

2 导电机理

导电填料对导电胶导电性能的影响可用渗流理

论和电子隧道效应理论来解释^[28-31]。渗流理论认为, 导电胶的导电性主要取决于导电填料在树脂基体中的分布和相互连接情况, 因此, 导电填料的浓度、尺

寸、形貌、分布均匀性等因素均会影响导电胶的渗流阈值及其导电通路的形成(图 2a);电子隧道效应理论主要用于解释导电填料之间没有直接的物理接触,只要它们的间距足够小,电子凭借量子力学的隧道效应,穿越绝缘势垒,在不同的导电填料之间传输,从而形成导电通路,是一种微观尺度下的量子力学导电机制(图 2b)。电子隧道效应与导电填料的尺寸、形状、表面性质以及它们之间的间距也密切相关,导电填料尺寸越小,比表面积越大,越容易产生电子隧道效应,增强导电胶的导电性能。



a—导电颗粒与导电颗粒之间接触的渗流理论;b—量子力学的电子隧道效应

图 2 导电胶的导电机理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of conductive mechanisms of electrically conductive adhesives

3 导电胶力学黏接性能提升策略

导电胶的力学黏接性能是衡量导电胶多种宏观性能的重要参数指标。优异的拉伸剪切强度可确保固化后的导电胶在电子器件中能牢固地连接导电部件,防止在使用过程中出现脱胶、松动等问题,保障电子设备在受到振动、冲击或因热膨胀等原因产生拉伸应力时,不会轻易断裂,保持导电通路的完整性,防止电子元器件之间发生相对位移,确保电子设备的结构稳定性和电气性能的可靠性。近年来,采用修饰、改性树脂基体,掺杂纳米材料等策略来增强导电胶的力学黏接性能。

3.1 改性树脂基体

导电胶的树脂基体主要赋予导电胶黏接强度、耐热性、韧性、抗疲劳性、抗蠕变性等力学性能。环氧树脂作为应用十分广泛的热固性树脂,具有高模量、黏接力强、固化收缩率低等诸多优点,但也存在脆性大、抗冲击能力差的问题;丙烯酸树脂具有室温固化,黏接强度高的优点,但也存在抗冲击性差、耐热性差、固化迅速等问题;有机硅树脂具有更好的柔韧性、耐冲击性以及耐高低温性能等,广泛应用于电子领域的黏接密封、传感器的结构设计、3D 打印以及电磁屏蔽等领域,但其黏接强度远不及环氧树脂^[32-35]。因此,可通过化学改性树脂基体,结合两种甚至多种树脂基体的优势,增强导电胶的力学黏接性能。如图 3a 所示,郭睿等^[32]利用环氧氯

丙烷和有机硅烷对双酚 A 多聚甲醛酚醛树脂(BPA-PA 酚醛树脂)进行修饰、改性,得到硅烷改性的 BPA-PA 酚醛环氧树脂,由其制备的导电胶的拉伸剪切强度为 20.18 MPa,比市售环氧树脂(E-51)导电胶提升了 5.73 MPa,体积电阻率比 E-51 导电胶降低 $3.86 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 。曾柳惠等^[33]利用 γ -氨丙基三乙氧基硅烷改性异氰酸酯封端的聚氨酯预聚体,再将改性后的预聚体与 E-51 反应,得到有机硅改性的聚氨酯环氧树脂,制得的导电胶的拉伸剪切强度为 22.28 MPa,比市售 E-51 制备的导电胶提升了 7.83 MPa。2025 年, XIONG 等^[34]通过丁腈橡胶和双环戊二烯环氧改性双酚 A 环氧树脂基体,显著提升了镍基导电胶的力学黏接性能,其剪切强度可达 18.8 MPa,拉伸强度可达 32.27 MPa。此外,也可通过修饰、改性丙烯酸类树脂、有机硅树脂、聚氨酯等树脂基体,提升导电胶的性能。2023 年, CHEN 等^[35]选用四官能团的聚氨酯丙烯酸酯齐聚物作为主要的树脂基体成分、面对面接触的 $5 \mu\text{m}$ 的银片作为导电填料,得到体积电阻率为 $1.02 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$ 、剪切强度为 8.995 MPa 的导电胶。还可利用化学改性,在一种树脂基体分子链上引入另一种树脂基体的活性基团或柔性链段,如通过环氧氯丙烷和有机硅烷改性酚醛树脂得到硅烷改性的酚醛环氧树脂,在酚醛树脂分子链上同时引入环氧基团和有机硅链段,实现了对酚醛单一树脂基体分子结构的优化。借助化学改性,调整单一树脂基体分子链的长度、柔韧性、交联密度等,改变树脂基体的内部分子间作用力和聚集态结构,从而有效增强导电胶的力学黏接性能,提升导电胶的综合性能。

3.2 掺杂纳米材料

纳米材料凭借其大比表面和高热稳定性的优势掺杂到导电胶中,有效提升了导电胶的力学黏接性能。2019 年, ARADHANA 等^[36]分别探究了添加聚吡咯(PPy)和还原氧化石墨烯(RGO)及 PPy/RGO 共混物对制备的环氧树脂类导电胶力学性能和导电性能的影响。结果表明,添加纳米材料显著增强了导电胶的拉伸剪切强度、导电性和热稳定性。TSENG 等^[37]在环氧树脂基的导电胶中添加银-有机络合物(如 2-乙基己酸银),利用银-有机络合物能够进行分子级混合,并在环氧树脂基体中形成超细银纳米颗粒($13 \sim 47 \text{ nm}$)分布,从而实现间隙填充和大块网络烧结,使得导电胶的拉伸剪切强度提升了 179%,达 38.06 MPa,显著增强了导电胶的力学黏接性能,并提升了导电胶的导热性能(图 3b)。近年来,在提升导电胶力学黏接性能的同时,也在考虑具有较高黏接强度导电胶的再回收和利用问题。2023 年, WEI 等^[38]在环氧树脂基体中引入聚乙

二醇 (PEG) 长链和 1-丁基-3-甲基咪唑双(三氟甲基磺酰)亚胺 ([BMIM]TFSI), 制备了电可拆卸离子导电环氧树脂胶黏剂 (IEPs)。结果表明, PEG 的相对分子质量 (简称分子量) 越大, 其结晶的倾向性越强, 对导电胶力学黏接性能的增强效果越好。如图 3c 所示, 调节 PEG 的分子量即可实现 IEPs 拥有 20 MPa 以上的初始黏接强度。尽管 IEPs 展现出超强的黏接力, 但施加 60 V 直流电压 (DC), IEPs 可在 1 min 内完全剥离, 为开发具有超高初始

黏接强度的电可拆卸导电胶提供了有效的策略, 也推动了环氧树脂类导电胶的功能化和可持续发展。

总之, 纳米材料较高的表面活性使其掺杂后既能与树脂基体形成强吸附, 也能与导电填料良好地结合, 增强了树脂基体与导电填料之间的界面结合力。纳米材料还展示出较高的强度及良好的分散性, 在导电胶中可以承担和分散部分应力, 使导电胶在受到外力作用时不易出现裂纹, 提高导电胶的拉伸剪切强度、韧性和抗冲击性等力学性能。

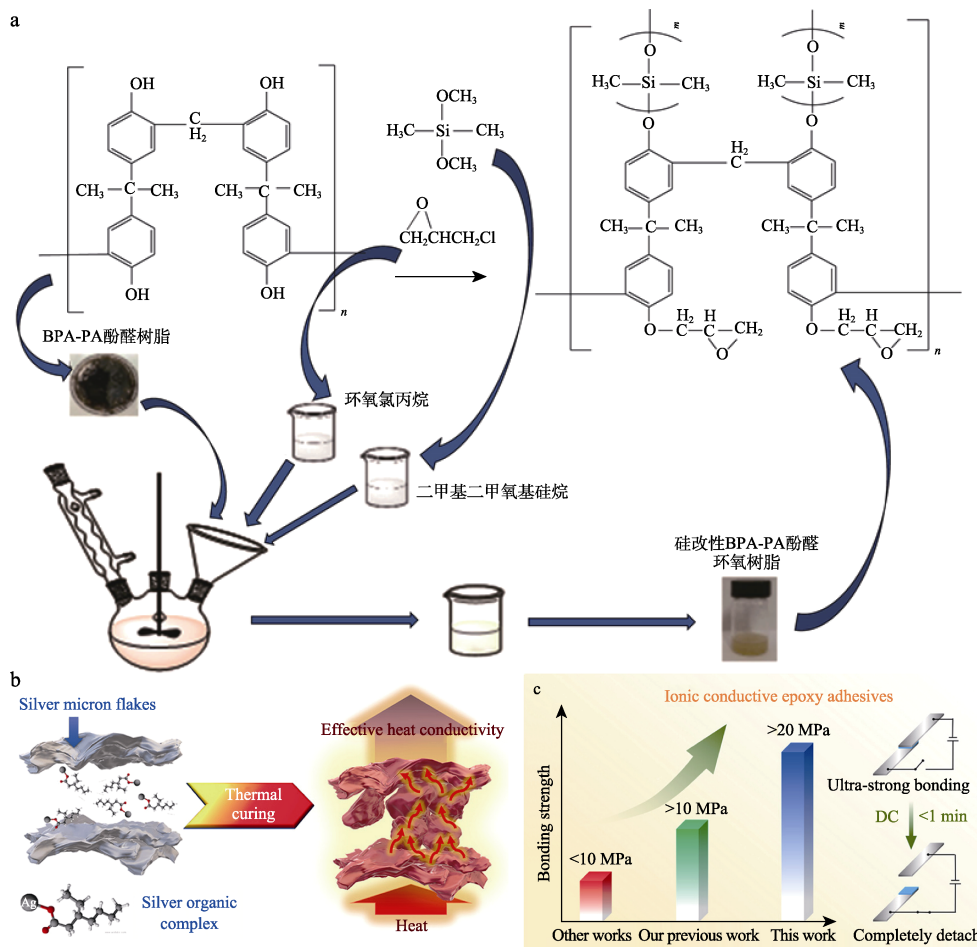


图 3 有机硅改性 BPA-PA 酚醛环氧树脂的合成路线示意图 (a)^[32]; 银-有机络合物增强环氧树脂类导电胶的力学性能和导热性示意图 (b)^[37]; 基于 PEG 和 [BMIM]TFSI 构建的具有高黏接强度的电可拆卸离子导电环氧树脂胶黏剂的性能 (c)^[38]

Fig. 3 Schematic diagram of synthesis of silicone modified BPA-PA phenolic epoxy resin (a)^[32]; Adding silver-organic complex to enhance the mechanical properties and thermal conductivity in epoxy-based electrically conductive adhesives (b)^[37]; Properties of electrically detachable ionic conductive epoxy adhesives with high bonding strength based on PEG and [BMIM]TFSI (c)^[38]

4 导电胶导电性能提升策略

导电性能是评判导电胶性能优劣的一个重要指标参数。现阶段, 电子封装、黏接用导电胶的体积电阻率一般要求 $<1 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 。依据导电胶的导电机理和组成成分可知, 导电胶导电性能的优劣主要取决于导电填料、树脂基体和制备工艺等。因此,

近年来在导电填料的种类、填充量、尺寸及形貌、添加纳米颗粒、导电填料表面改性、掺杂低熔点合金、优化固化条件等方面展开了一系列研究, 综合提升导电胶的导电性能。

4.1 导电填料的种类、尺寸及形貌

导电填料的种类、填充量、尺寸及形貌等基本特征会直接影响导电填料间的接触面积、空隙, 决

定了导电胶的渗流阈值、导电性等性能参数。基于此,从导电填料的种类、填充量、尺寸及形貌等基本特征出发,探究了不同的尺寸、形貌及种类的导电填料复配的比例、填充量等因素对导电胶导电性能的影响^[39-43]。2020年,ZHANG等^[39]分别探究了不同形貌的银颗粒对导电胶导电性能的影响。结果表明,与点与点对接的银球相比,银颗粒中银片可以搭接形成接触面积更大的面对面接触,固化后更容易形成导电通路,更有利于提升导电性能。CHEN等^[40]利用银分形花构建导电胶的导电框架,并引入银纳米线连接分离区域、银纳米片填充细小间隙,利用三银基填料策略制备高导电性(电阻率 $6.0 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$)和低Ag含量的导电胶。2022年,JI等^[41]利用化学还原法制备了微型花状银颗粒(MFSPs),探究了抗坏血酸与硝酸银不同质量比对MFSPs形貌和粒径的影响,其中,抗坏血酸与硝

酸银质量比为0.5:1、1.0:1、1.5:1制备的MFSPs分别记为MFSP_{M0.5}、MFSP_{M1.0}、MFSP_{M1.5}。随后,将MFSP_{M0.5}、MFSP_{M1.0}、MFSP_{M1.5}填充到环氧树脂基体中,得到了在极低银含量下渗流阈值低、导电性高、黏接强度高的导电胶(图4a)。2025年,ACEVEDO等^[42]探究了填料的含量及几何形状对导电胶电阻率的影响。如图4b所示,增加填料含量,可显著降低导电胶的接触电阻率和体电阻率,但下降的幅度在很大程度上取决于两种填料的几何形状比率,即其比表面积(SA)。结果表明,当小比表面积与大比表面积的填料质量比为60:40时,银含量较低,导电性能较好。CHEN等^[43]以双酚F环氧树脂为基体,微米级银片和银纳米颗粒为复配导电填料,通过优化配方各组分比例,使导电胶形成良好的导电网络,并促进电子隧道效应,得到的导电胶体积电阻率低至 $8 \mu\Omega \cdot \text{cm}$,剪切强度可达87 MPa。

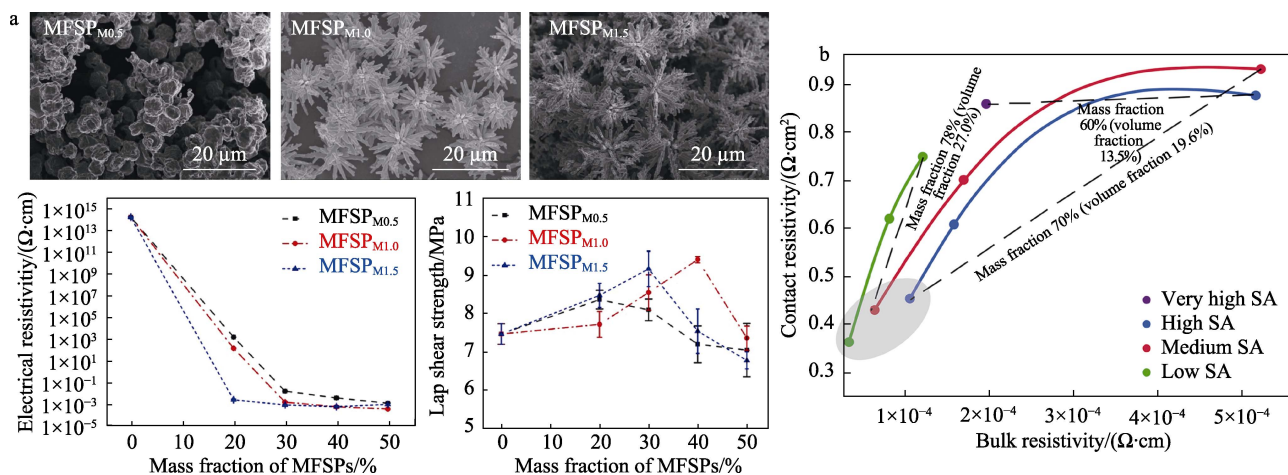


图4 不同尺寸的微型花状银颗粒对制备的环氧树脂基导电胶导电性能和黏接性能的影响(a)^[41]; 填料几何形状比率对导电胶接触电阻率和体积电阻率的影响(b)^[42]

Fig. 4 Effects of different sizes of micro-sized flower-like silver particles on the electrical conductivity and adhesive properties of epoxy electrically conductive adhesives (a)^[41]; Effects of filler geometry ratios on contact and bulk resistivity of electrically conductive adhesives (b)^[42]

4.2 纳米颗粒的添加

纳米颗粒填充到单一导电填料间的空隙可有效解决单一导电填料制备的导电胶存在的导电通路缺陷问题,改善导电胶中导电网络的结构,增强导电胶的导电性能。如图5a所示,CAO等^[44]以柠檬酸盐为封端剂、聚乙烯吡咯烷酮为分散剂,合成了抗氧化的金属铋(Bi)纳米粒子,Bi纳米粒子可作为补充导电填料与环氧树脂中的银片有效结合,显著提升导电胶的导电性能。结果表明,只需添加质量分数5%的Bi纳米粒子,导电胶的体积电阻率即可降低至相同银含量导电胶的1/3000。GUO等^[45]将具有三维网状结构的纳米材料掺杂到环氧导电胶中,增加了导电粒子之间的接触面积,形成了共邻导电通路,构建导电网络,提升环氧导电胶的导电性能。2024年,TULUGAN等^[46]

利用水热法制备了复合纳米材料,将其掺杂到以镀银/铜粉为导电填料的环氧导电胶中,树枝状的导电填料使其易于相互接触、形成导电网络,为载流子传输提供了通道,复合纳米材料的引入有助于连接点接触的导电粒子和断开的导电通路,构建多层导电通路,协同镀银/铜粉降低导电胶的体积电阻率至 $4.32 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 。2025年,JIANG等^[47]将铋掺杂氧化锡纳米颗粒(ATO NPs)与银片一起掺入到热塑性聚氨酯基体中,制备了ATO柔性导电黏合剂(AFCA)。高导电性和分散性的ATO纳米颗粒不仅能充当导电桥梁,增加导电通路,由Ag质量分数60%、ATO质量分数7%制备的AFCA9展示出 $2.01 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ 的低体积电阻率(图5b),而且由于其较高的红外反射率,还可与银片协同增强导电胶的红外屏蔽性能,构建了

高导电性和红外隐身性能的导电胶。

纳米颗粒尺寸小, 能均匀地分散在导电胶中, 填充导电颗粒之间的间隙, 增加导电通路, 为电子传输提供更多的路径, 提高导电性能。此外, 纳米颗粒表面

原子比例高, 表面能大, 与周围导电粒子或基体接触时, 能通过表面效应增强电子传递能力, 优化导电网络, 利于电子传输, 进而提高导电性能。因此, 在导电胶中添加纳米颗粒可用于提高导电胶的导电性能。

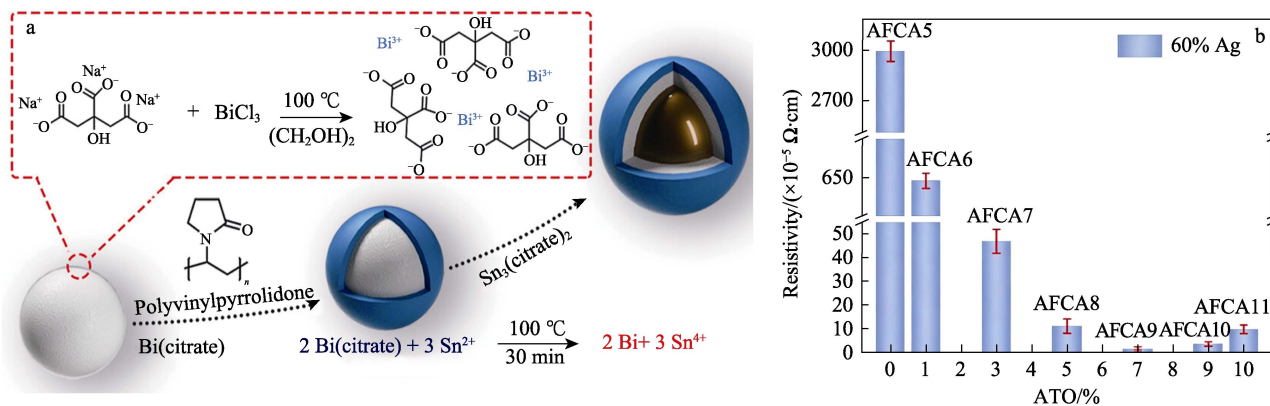


图5 Bi纳米粒子的合成路线和反应机理示意图(a)^[44]; ATO纳米粒子对AFCA导电性的影响(b)^[47]

Fig. 5 Schematic diagram of synthesis route and reaction mechanism of Bi nanoparticles (a)^[44]; Effect of ATO nanoparticles electrical conductivity of AFCA (b)^[47]

4.3 表面改性

银是导电胶中最常用的导电填料。然而, 银表面存在大量的油酸和硬脂酸等有机润滑剂, 显著降低了导电胶的导电性能和机械性能。近年来, 采用表面改性对银片表面的有机润滑剂进行处理, 有效去除了银表面的润滑剂, 增强了导电胶的导电性能及机械性能。2020年, SU等^[48]选用衣康酸取代银片表面的润滑剂, 并利用衣康酸与丙烯酸聚合在银片和树脂基体间形成共价键, 提升了丙烯酸基导电胶的导电性能和机械性能。ZHANG等^[49]引入戊二酸, 通过单齿配位作用使戊二酸化学吸附在微米级银片表面, 并与银片表面的油酸和硬脂酸等有机润滑剂发生反应, 去除银片表面存在的会降低导电胶导电性能和机械性能的表面活性剂(图6a)。结果表明, 添加戊二酸的质量分数为0.12%时, 导电胶的体积电阻率低至 $1.52 \times 10^{-4} \Omega\cdot\text{cm}$, 剪切强度可达24.57 MPa, 极大提升了导电胶的导电性能和机械性能。2023年, YU等^[50]使用电解法合成了树枝状银颗粒(DSPs), 并用甲基苯并三唑(TTA)改性DSPs表面, 制备了TTA修饰的DSPs(图6b)。温度 $>200^\circ\text{C}$ 后, DSPs纳米分支处出现烧结现象, 促进导电通路的形成。此外, TTA涂层还可减少导电胶中银颗粒之间的隧道距离。制备的DSPs引入商用导电银胶中, 体积电阻率可降低至 $5.63 \times 10^{-5} \Omega\cdot\text{cm}$ 。ZHANG等^[51]从热学、流变学、电学和力学等方面研究了不同偶联剂对环氧树脂基导电胶性能的影响。结果表明, 利用3-氨基三乙氧基硅烷偶联剂处理银片导电填料, 可使导电胶体积电阻率降至 $5.22 \times 10^{-4} \Omega\cdot\text{cm}$, 抗剪切强度高达20.32 MPa。

除了在银薄片表面引入有机化合物进行表面改

性外, 也可通过在银薄片表面镀金等表面改性策略增强导电银胶的导电性能。2020年, LU等^[52]在一维银纳米线(Ag NWs)表面镀金, 通过一步法合成了金修饰的Ag NWs混合导电填料, 得到体积电阻率为 $7.8 \times 10^{-5} \Omega\cdot\text{cm}$ 的导电胶, 解决了Ag NWs上的绝缘配体在Ag NWs之间形成了大接触电阻的问题, 提升了导电胶的导电性能。

随着导电胶的需求量日益增大, 急需制备高导电性、低成本的导电胶。作为银导电填料的低成本替代品, 铜纳米颗粒填充导电胶是理想的选择之一, 但铜的化学性质比银活泼, 在空气中会迅速发生氧化反应, 形成一层绝缘的氧化铜, 使导电填料的体积电阻率增大甚至不导电。因此, 低导电性和易氧化的问题严重限制了铜系导电胶的应用。鉴于此, 采用在铜表面镀一层抗氧化的银, 既解决了铜导电填料的氧化和性价比问题, 又使铜导电胶具备良好的导电性能。ZHANG等^[53]从导电填料含量、固化温度和固化时间等方面出发, 探究了改性纳米银包覆铜粒子对制备的导电胶体积电阻率和剪切强度的影响。结果表明, 导电填料的优化含量为体积分数23.5%, 在 170°C 的固化温度下固化100 min, 制得的导电胶的体积电阻率为 $5.159 \times 10^{-6} \Omega\cdot\text{cm}$, 剪切强度可达6.121 MPa。2021年, SUN等^[54]利用铜的自催化性能, 以 $1 \mu\text{m}$ 铜颗粒为基底制备了镀银/铜颗粒。结果表明, 镀银表面改性可显著提高铜颗粒的抗氧化性, 并赋予导电胶较高的导电性能。2023年, CHENG等^[55]在铜颗粒表面沉积了一层具有凹凸特性、致密的结晶银, 镀银/铜颗粒作为导电填料使得导电胶的体积电阻率低于 $6 \times 10^{-5} \Omega\cdot\text{m}$, 剪切强度可达8 MPa, 在先进电子器件中具有重要的应用价值。

此外,董晓茹等^[56]还探究了树枝状、球状、片状等不同形貌的镀银/铜粉对导电胶性能的影响,结果表明,树枝状的镀银/铜粉凭借其较多的接触点和较大的接触面积,形成的导电通道数量最多,导电性能最优。除了对铜颗粒表面镀银外,采用有机化合物改性去除铜表面的氧化物,也是目前常用的一种铜颗粒表面改性策略。2023 年,DAI 等^[57]利用甲酸根离子和硫醇对铜微片进行表面改性,得到了一类抗氧化型、高导电性、低成本的铜导电胶。如图 6c 所示,在盐雾、酸、碱、高温和潮湿等极端条件下,表面改性处理后的铜导电胶的电阻率显著低于铜颗粒未改性处理的导电胶。此外,铜颗粒表面改性处理后的导电胶在 250 °C 固化 30 min 的条件下,具有 65.12 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ 的超低体积电阻率和优异的稳定性。WANG 等^[58]探究了十八烷硫醇 (ODT) 形成的自组装单层 (SAM) 对导电胶中微米级铜粉颗粒氧化程度的减弱效果 (图 6d)。SAM 在沉积过程中盐酸蚀

刻可以去除铜颗粒表面预先存在的氧化物,降低铜颗粒的表面氧化。ODT 中的硫醇键也可以与树脂基体以及铜颗粒金属界面反应,起到填充、接触、黏接、传导的作用。结果表明,将填充有 ODT 保护的铜粉与环氧树脂复配制成铜导电胶的电导率高达 $2\times 10^6\text{ S/m}$,与同等条件下制备的银导电胶的性能相当,可用于制作功能电路。

金纳米颗粒具有良好的导电性、抗氧化性、耐腐蚀等特性,但金的成本较高,通常用于高端精密元件或航空航天等领域^[59]。

表面改性主要是通过有机化学反应去除导电填料表面能降低导电胶导电性能的物质,如银片表面的润滑剂或铜片表面的氧化物;或在导电填料表面形成一层高电导率的金属层,镀层既能作为良好的导电通道,为电子提供顺畅的传输路径,也能与基体间形成紧密的结合界面,减少电子传输过程中的散射和阻碍,从而提高其导电性能。

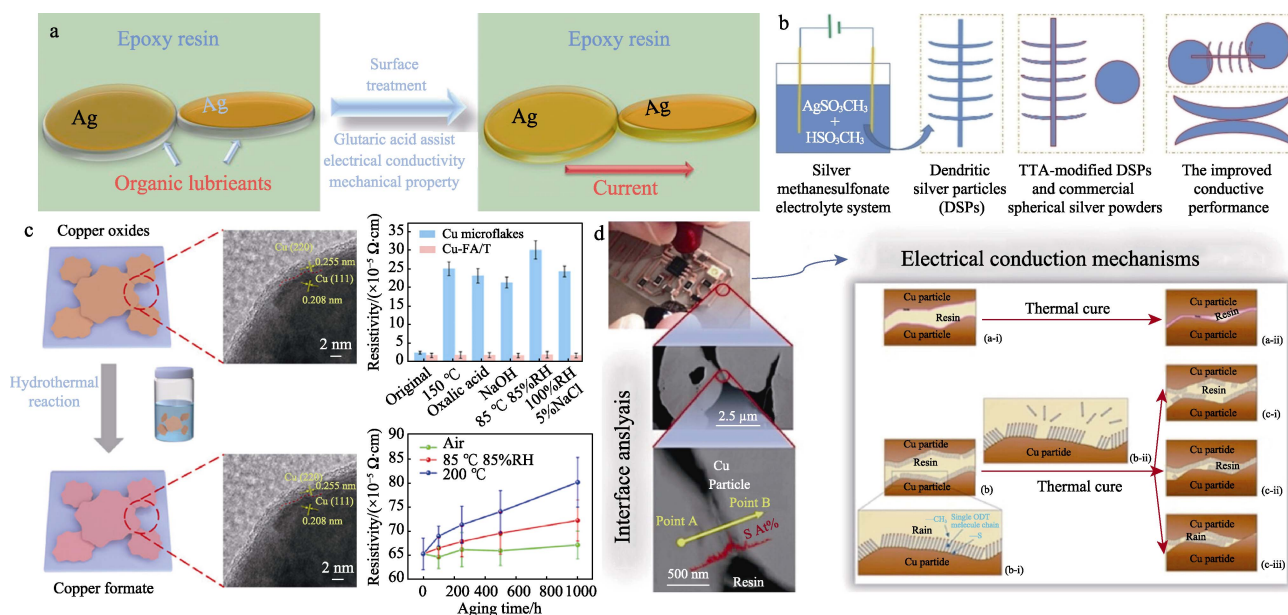


图 6 戊二酸对微米银片进行表面改性以提高导电胶的导电性示意图 (a)^[49]; TTA 修饰的树枝状银颗粒对导电性能的提升示意图 (b)^[50]; 甲酸根离子和硫醇表面钝化铜微片, 制备超稳定、超低电阻率的铜导电胶示意图 (c)^[57]; ODT 形成的自组装单层降低微米级铜粉颗粒的氧化, 提升导电胶的导电性能 (d)^[58]

Fig. 6 Schematic diagram of surface modification of micrometer silver flakes with glutaric acid to enhance the electrical conductivity of electrically conductive adhesives (a)^[49]; Schematic diagram of enhancement of conductive performance by TTA-modified dendritic silver particles (b)^[50]; Schematic diagram of copper microflakes with surface passivation by formate ions and thiols used to create super-stable, ultra-low resistivity Cu electrically conductive adhesives (c)^[57]; Self-assembled monolayers of octadecanethiol reducing the oxidation of micrometer-scale Cu powder particles and improving the electrical conductivity of electrically conductive adhesives (d)^[58]

4.4 低熔点合金的掺杂

在导电胶固化过程中,低熔点合金 (LMPA) 会受热熔化,浸润导电填料,与银粉等导电填料形成多元化的冶金连接,降低导电胶内部的接触电阻,从而提高其导电性能^[60-62]。2023 年,YANG 等^[60]将尺寸可控的声化学 LMPA 颗粒掺入瞬态液相环氧树脂基导电胶中,制备了导电性能优异、机械强度高

的导电胶 (图 7)。结果表明,LMPA 颗粒的掺杂使得导电胶的体积电阻率降至 $2.37\times 10^{-4} \Omega\cdot\text{cm}$,并且剪切强度与纯银导电胶相比显著增强了 55.4%。同年,ZHANG 等^[61]利用低熔点 SnBi58 合金在导电填料之间以及导电胶与铜基板之间形成冶金结合,既提升了导电胶的导电性能和机械性能,也有效降低了导电胶的接触电阻漂移。结果表明,当导电填料中

SnBi58 合金的质量分数为 20% 时, 导电胶的体积电阻率降至 $4.8 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$, 剪切强度可达 27.71 MPa, 拓宽了导电胶在电子封装领域的应用。2025 年, ZHAO 等^[62]将 LMPA 颗粒掺入到银基导电胶中构建了瞬态液相导电胶 (TLP-ECA), 在固化过程中熔化 LMPA 颗粒以产生液相, 并在界面处与 Ag 薄片发生扩散反应, 生成高熔点的 Ag_9In_4 和 Ag_3Sn 金属间化合物, 增强了 TLP-ECA 抗电化学迁移特性。此外, TLP-ECA 中 Ag、In、Sn、Bi 元素会延长树枝状晶核的形成和生长, 延长失效时间, 提升电子元件的可靠性。

LMPA 在熔融状态下优异的浸润性可有效改善导电填料与树脂基体间的界面接触, 增强界面结合, 减少电子在界面处的散射和反射, 提高导电胶的导电性能。此外, 掺杂 LMPA 会在导电胶内部形成更多高效、连续的导电通路, 电子能够更高效地在这些连续的合金通路上传输, 从而降低导电胶的电阻, 提高其导电性能。

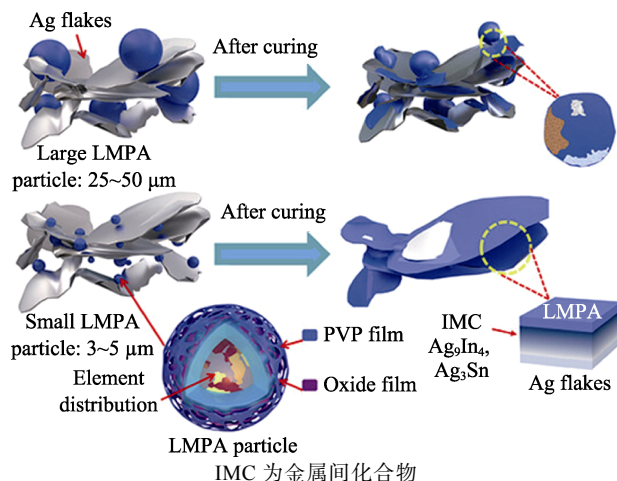


图 7 掺入尺寸可控的声化学低熔点合金颗粒瞬态液相导电胶制备示意图及其导电性能和机械性能^[60]

Fig. 7 Schematic diagram and electrical conductivity and mechanical properties of size-controllable sonochemical LMPA particle incorporated transient liquid-phase electrically conductive adhesives^[60]

4.5 固化条件优化

导电胶的导电性能还受固化剂的种类、固化方式、固化温度、固化时间等的影响。2022 年, FUKUMOTO 等^[63]探究了不同脂肪酸包覆的含银导电胶在固化过程中电阻率的变化。其中, 己酸包覆的含银导电胶在固化前的体积电阻率为 $4.0 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{m}$, 在 100~140 °C 下固化后, 其体积电阻率迅速降低至 $5.5 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$, 固化升温可去除导电银填料表面包覆的己酸等脂肪酸绝缘层, 有效降低了导电胶的接触电阻, 提升了其导电性能。此外, 也研究了光固化等新型固化方式对导电胶性能的影响。如图 8 所示, WANG 等^[64]在导电胶 (ECA) 中引入上转换纳米颗粒 (UCNPs) 和光引发剂, 在 UCNPs 的帮助下, 将近红外光 (NIR)

转化为紫外光, 诱导导电胶光固化。同时, 近红外光的光热效应迅速提高系统温度, 启动导电胶的热固化, 光固化和热固化的协同作用使导电胶充分固化, 制得导电性能和剪切强度优异的导电胶, 解决了导电胶中存在的紫外光固化不完全的问题。

适宜的固化体系可促进交联反应, 使树脂分子链之间形成三维网状等交联结构, 既能增强树脂基体的力学性能和稳定性, 也能改善导电填料在基体中的分散性, 防止导电填料发生位移, 确保导电通路的连续性, 提高导电性能。匹配的固化工艺使导电胶体系固化完全, 性能到达最佳。

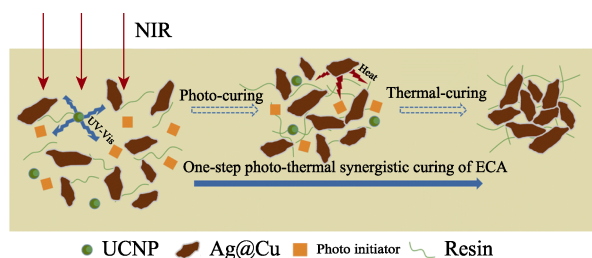


图 8 上转换纳米粒子辅助导电胶的近红外光诱导固化示意图^[64]

Fig. 8 Schematic diagram of upconversion particles assisted near-infrared light induced curing of electrically conductive adhesives^[64]

5 结束语与展望

近年来, 通过改性树脂基体、掺杂纳米颗粒、调控导电填料的种类、尺寸、形貌等一系列策略, 在提升导电胶性能方面取得了显著的成果, 通过关键材料的自主研发, 使得导电胶在体积电阻率、拉伸剪切强度等单一性能参数或部分性能参数上远超国外产品。目前, 国产导电胶的性能指标满足甚至高于导电胶的行业标准要求, 如银基导电胶的拉伸剪切强度 $\geq 10 \text{ MPa}$, 体积电阻率 $\leq 1.0 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ (25 °C), 在一般芯片封装、电子元件连接、航空航天电子设备中一些非关键部位的连接、太阳能光伏电池片互联、组件封装、柔性电子等领域中已实现应用。但在航空发动机高温部件、卫星及太空探测器、深海设备、核聚变装置等极端要求场景, 国产导电胶的整体性能指标还难以完全满足, 主要依赖进口产品。存在问题如下:

(1) 性能指标差距。部分国产导电胶在剪切强度等力学性能方面已达到较高的水平, 其剪切强度可达 20~30 MPa, 但对航空发动机高温部件、核聚变装置等极端条件要求的超高剪切强度 (如 >35 MPa)、超低体积电阻率 ($\leq 5.0 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$), 与国外先进产品相比还存在一定的不足, 尚不能完全满足所有的超高要求。

(2) 性能指标失衡。国产导电胶存在高导电性、高拉伸剪切强度、高储存期稳定性等指标无法共存的问题,无法满足实际应用对综合性能的要求。为提升国产导电胶的拉伸剪切强度,通常会对树脂基体进行改性或添加增强剂,这会使导电通路受到影响,导致导电性能下降。

(3) 耐老化性能差。在长期高温、超高压、复杂的海水腐蚀环境及辐射环境等老化条件下,国产导电胶的分子结构会受到破坏,导致力学性能、电导率等性能指标大幅度下降。

(4) 技术迭代升级慢。高端导电胶因性能指标要求极高,如超高剪切强度、极低电阻率等,导致研发过程面临多重技术障碍,现有的技术水平难以跨越,阻碍研发进程,研发周期长。对于满足指标的研发产品,极端环境(如高温、高压、强辐射等)下的产品性能验证需要耗费大量的时间,且验证过程复杂、数据收集缓慢,导致研发成果反馈延迟,延缓产品迭代速度,造成研发-验证时滞效应,技术迭代时耗冗余。

为解决上述问题,在导电胶的后续研究过程中,需重视理论基础研究,重点剖析导电胶的树脂固化机理、导电机理、耐老化失效机理,为导电胶的综合性能提升和技术创新提供更多的理论支撑。开发适用于更多高精尖领域的高性能导电胶,拓宽导电胶在卫星及太空探测器、超大规模集成电路封装、军工、航天等领域的应用,相关建议如下:

(1) 聚焦核心性能指标攻关。如超高剪切强度与导电性协同提升,开发杂化改性环氧树脂等高强度树脂基体,优化单一树脂分子结构,结合分子结构设计增强交联密度;探索合成比表面积大的纳米级导电填料,通过优化填料表面改性工艺和分散技术,在提升填料含量的同时保证导电通路的连续性,降低体积电阻率,实现 $>35\text{ MPa}$ 的剪切强度与超低电阻率($\leq 5.0 \times 10^{-6}\ \Omega \cdot \text{cm}$)等核心性能指标。

(2) 多性能协同设计。建立基于机器学习的材料性能预测模型,输入树脂基体结构、导电填料类型、配比等参数,模拟不同组合下的导电性能、力学性能和储存稳定性,辅助筛选最佳配方,避免单一性能优化对其他指标的负面影响。

(3) 强化极端环境的适应性。针对太空辐射、深海高压等场景,研发耐辐射树脂(如含氟聚酰亚胺)或在树脂分子链中引入耐辐射、耐高压、抗氧化等功能性基团或多种功能树脂共混、改性,添加抗腐蚀导电填料,探索优化固化工艺,如光固化、电子束固化、微波固化等,减少导电胶内部应力,提升其在极端环境下的稳定性。

(4) 深化耐老化机理研究与数据积累。加强导电胶耐老化机理的系统性研究,利用分子动力学模

拟、原位表征等先进技术,研究高温、高湿、高低压、辐射等极端条件下导电胶内部分子的扩散、分子链断裂、界面失效等机制;建立老化模型,量化环境因素与性能衰减的关系,为配方设计提供理论依据。搭建多环境加速老化试验平台,模拟极端工况(如 $-200\sim 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 热循环、深海盐雾环境),积累长期老化数据。

(5) 加速技术迭代,产学研协同发展。引入高通量技术,利用机器学习加速配方设计优化,缩短研发周期。强化产学研用协同,高校和科研院所聚焦基础理论研究,企业主导产业化应用开发,建立“研发-中试-生产”一体化平台,加速成果向应用导向型技术转化。联合航天、深海设备等领域的用户,开展定制化研发,建立系统化、动态化的管理与监控体系,实时跟进研发、验证节点,缩短技术到产品的转化周期,加速导电胶技术的迭代升级。

参考文献:

- [1] BO G Y, YU H W, REN L, *et al.* Gallium-indium-tin liquid metal nanodroplet-based anisotropic conductive adhesives for flexible integrated electronics[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2021, 4(1): 550-557.
- [2] WEN J Y, TIAN Y H, HANG C J, *et al.* Fabrication of novel printable electrically conductive adhesives (ECAs) with excellent conductivity and stability enhanced by the addition of polyaniline nanoparticles[J]. *Nanomaterials*, 2019, 9(7): 960.
- [3] CAO G, CHEN Y H, JIANG C W, *et al.* Synthesis of citrate-capped Sn nanoparticles with excellent oxidation resistance for high-performance electrically conductive adhesives[J]. *ACS Applied Electronic Materials*, 2023, 5(2): 1164-1173.
- [4] SHTENNIKOV V N, BUDAI B T. The results of thermal investigations in the region of the contact soldering of electronic devices[J]. *Measurement Techniques*, 2014, 57: 79-82.
- [5] ZHANG P, XUE S B, WANG J H. New challenges of miniaturization of electronic devices: Electromigration and thermomigration in lead-free solder joints[J]. *Materials & Design*, 2020, 192: 108726.
- [6] LI X S, XIANG X Z, WANG L, *et al.* Conductivity and mechanical properties of conductive adhesive with silver nanowires[J]. *Rare Metals*, 2018, 37: 191-195.
- [7] SHANG Q Y, HAO S, ZHANG J J, *et al.* Investigation on constitution of electrical conductive adhesives fitting for UV-thermal dual curing[J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2015, 29(9): 910-923.
- [8] LU W B, ZHANG Y, ZHOU J P, *et al.* Effect of MXene fillers on the electrical conductivity of Ag-coated Cu conductive adhesives[J]. *Ceramics International*, 2023, 49(6): 9978-9984.
- [9] LIU H, LIU J H, WANG S A, *et al.* Effects of silver nano-particles and nano-wires on properties of electrically conductive adhesives[J]. *Microelectronics Reliability*, 2022, 135: 114571.
- [10] CAO G, CUI H H, WANG L L, *et al.* Highly conductive and highly dispersed polythiophene nanoparticles for fabricating high-performance conductive adhesives[J]. *ACS Applied Electronic Materials*, 2020, 2(9): 2750-2759.
- [11] XU T, CHEN J Y, YUAN W H, *et al.* Self-assembly synthesis of silver nanowires/graphene nanocomposite and its effects on the performance of electrically conductive adhesive[J]. *Materials*, 2018, 11(10): 2028.
- [12] ZHANG X M. Preparation of silver nanopowders and its application

- in low temperature electrically conductive adhesive[J]. *Microelectronics Reliability*, 2023, 142: 114917.
- [13] DERAKHSHANKHAH H, MOHAMMADREZAEI R, MASSOUMI B, *et al.* Conducting polymer-based electrically conductive adhesive materials: Design, fabrication, properties, and applications[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2020, 31: 10947-10961.
 - [14] LU J, LIU D, DAI J F. Preparation of highly conductive silver nanowires for electrically conductive adhesives[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2019, 30: 15786-15794.
 - [15] CAO G, CAI S Y, ZHANG H, *et al.* High-performance conductive adhesives based on water-soluble resins for printed circuits, flexible conductive films, and electromagnetic interference shielding devices[J]. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2022, 5: 1730-1742.
 - [16] ZHANG C (张晨), LI X T (李笑甜), DING M H (丁明惠), *et al.* Preparation and properties of PhN-DOPO modified epoxy resin[J]. *Fine Chemicals (精细化工)*, 2024, 41(11): 2522-2530.
 - [17] YOU S J, WU Y, SUN T C, *et al.* A novel connecting material: Electrically conductive adhesives based on polyimide resin and conductive ceramic powders[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2016, 27: 10405-10410.
 - [18] CHEN M H (陈慕华), SUN C H (孙晨晖), JI Z (嵇震), *et al.* Heterogeneous catalytic synthesis and properties of eugenol silicon-epoxy resin[J]. *Fine Chemicals (精细化工)*, 2025, 42(3): 678-683, 696.
 - [19] WANG X Q, GAN W P, XIANG F, *et al.* Effect of curing agent and curing substrate on low temperature curable silver conductive adhesive[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2019, 30: 2829-2836.
 - [20] AZIZ T, HAQ F, FARID A, *et al.* The epoxy resin system: Function and role of curing agents[J]. *Carbon Letters*, 2024, 34: 477-494.
 - [21] LIU Y, XU L, LIU B J, *et al.* Shell structure control of monodisperse polystyrene-silver composite microspheres and synthesis of epoxy resin-based anisotropic conductive adhesives[J]. *Polymers Advanced Technologies*, 2023, 34(4): 1405-1419.
 - [22] DOODEJI M S, AFZALZADEH A, ZERAFAT M M. Fabrication of Ag nanowires and Ag-graphite nanocomposite conductive adhesives by one-step hydrothermal method[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2024, 35: 1543.
 - [23] SHI Y L, LIU Q, PAN Q Q, *et al.* Fabrication of PS-DVB@Cu core-shell microsphere for anisotropic conductive adhesives by electroless plating with copper nanoparticles as seeds[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2024, 683: 133037.
 - [24] HUANG H, ZHANG Y, LU W B, *et al.* The multiple synthesis of layered V_2CT_x -MXene particles as electrically conductive adhesive fillers in printed electronics[J]. *Materials Letters*, 2024, 355: 135482.
 - [25] FUKUSHIMA T, INOUE M. Control of silver micro-flakes sintering and connection properties of epoxy-based conductive adhesives by the effectiveness of binder chemistry[J]. *Materials*, 2025, 18(2): 217.
 - [26] WANG J L, LI W B, JI Y C, *et al.* Effect of surface modification of boron nitride nanosheets by titanate coupling agent on properties of epoxy resin[J]. *Surfaces and Interfaces*, 2024, 54: 105270.
 - [27] HAN P, HU S K, MENG C, *et al.* Covalently grafting silane coupling agents onto MXene-reinforced carbon fibers for epoxy composites with improved mechanical properties[J]. *Polymer Composites*, 2025, 46(5): 4534-4546.
 - [28] CAO G, HAO C X, GAO X L, *et al.* Carbon nanotubes with carbon blacks as cofillers to improve conductivity and stability[J]. *ACS Omega*, 2019, 4(2): 4169-4175.
 - [29] ZHANG W W, LIU J H, ZHANG L B, *et al.* The synergistic effect of micron spherical and flaky silver-coated copper for conductive adhesives to achieve high electrical conductivity with low percolation threshold[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2022, 114: 102988.
 - [30] LIU Y H (刘银花), LI L (李莉), OUYANG X P (欧阳新平), *et al.* Effects of silver nanowires-graphene nanocomposites on the performance of electrically conductive adhesive[J]. *Fine Chemicals (精细化工)*, 2018, 35(9): 1466-1471.
 - [31] ZHANG S Y (张墅野), XU S W (许孙武), CAO Y (曹洋), *et al.* Study on conductive mechanism of silver coated copper powders for conductive adhesives[J]. *Welding & Joining (焊接)*, 2019, 2: 1-5, 65.
 - [32] GUO R (郭睿), LI P A (李平安), ZHAO Y F (赵云飞). Synthesis and performance of silicon modified BPA-PA phenolic epoxy resin conductive adhesive[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress (化工进展)*, 2022, 41(8): 4473-4480.
 - [33] ZENG L H (曾柳惠), CAO Y M (曹有名), HE W G (何伟光). Properties of polyurethane/epoxy resin adhesives modified by organosilicon[J]. *Materials Research and Application (材料研究与应用)*, 2022, 16(3): 438-441.
 - [34] XIONG Z K, YU C X, JING D L, *et al.* Nickel conductive adhesive based on bisphenol A epoxy resin modified by CTBN/dicyclopentadiene epoxy resin: Effects of epoxy resin structure on mechanical properties and thermal stability[J]. *Journal of Molecular Structure*, 2025, 1325: 141064.
 - [35] CHEN Y X, HE Y, GUO J Y, *et al.* A new one-component electrically conductive adhesive with excellent electrical conductivity and mechanical properties using tetra-functional polyurethane acrylate oligomers and silver particle fillers[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2023, 124: 103388.
 - [36] ARADHANA R, MOHANTY S, NAYAK S K. Synergistic effect of polypyrrole and reduced graphene oxide on mechanical, electrical and thermal properties of epoxy adhesives[J]. *Polymer*, 2019, 166: 215-228.
 - [37] TSENG L T, JHANG R H, HO J Q, *et al.* Molecular approach to enhance thermal conductivity in electrically conductive adhesives[J]. *ACS Applied Electronic Materials*, 2019, 1(9): 1890-1898.
 - [38] WEI Y, WU M, SUN S J, *et al.* Electrically detachable ionic conductive epoxy adhesives with high bonding strength[J]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2023, 5(9): 7328-7339.
 - [39] ZHANG L, SU Y, DAI Y Q, *et al.* Effect of the silver with different morphologies on the performance of electrically conductive adhesives[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2020, 49(5): 1526-1532.
 - [40] CHEN Y, LI Q L, LI C W, *et al.* Regulation of multidimensional silver nanostructures for high performance composite conductive adhesives[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2020, 137: 106025.
 - [41] JI Y H, MIAO P, ZHANG R N, *et al.* Novel epoxy adhesives based on conductive micron-sized silver flowers[J]. *Polymer Composites*, 2022, 43(12): 8761-8770.
 - [42] ACEVEDO M I D, WELLS R, GROßER S, *et al.* The effects of increasing filler loading on the contact resistivity of interconnects based on silver-epoxied conductive adhesives and silver metallization pastes[J]. *Progress in Photovoltaics Research and Applications*, 2025, 33(1): 143-157.
 - [43] CHEN X W, NIU X, LAI J Y, *et al.* Preparation and characterization of Ag conductive adhesive with low resistivity[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2024, 35: 1848.
 - [44] CAO G, JIANG C W, CAI S Y, *et al.* Oxidation-resistant metallic bismuth nanoparticles for electrically conductive adhesives[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2023, 6(18): 16343-16352.
 - [45] GUO Z J, LU W B, ZHANG Y, *et al.* MXene fillers and silver flakes filled epoxy resin for new hybrid conductive adhesives[J]. *Ceramics International*, 2023, 49(8): 12054-12060.
 - [46] TULUGAN K, ZHANG Y, ZHOU J P, *et al.* Preparation of MXene and its application in low temperature electrically conductive adhesive[J]. *Materials Letters*, 2024, 365: 136431.
 - [47] JIANG C W, ZI C F, LI J, *et al.* Flexible conductive adhesives with high conductivity and infrared stealth performance[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2025, 188: 108559.

- carbamazepine in water over $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{ZIF-8}$ nanocomposites with persulfate or peroxymonosulfate as activator[J]. *Catalysis Today*, 2024, 435: 114733.
- [37] DIAO S Y, MENG L L, FENG L L. Microenvironment modulation of MoS_2 -based single-atom catalyst for accelerating electron-transfer process to activate PMS and degrade pollutant[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024, 12(3): 112559.
- [38] KAUR P, KUMAR S, RANI J, *et al.* Rationally tailored synergy between adsorption efficiency of cotton shell activated carbon and PMS activation via biogenic Fe^0 or Cu^0 for effective mitigation of triphenylmethane dyes[J]. *Separation and Purification Technology*, 2024, 342: 127010.
- [39] CHEN P, CHENG Z L, ZHANG X Z, *et al.* Novel Fe-Mn bimetallic catalyst to activate peroxymonosulfate (PMS) for efficient degradation of medicaments: Mechanism insights and application for pharmaceutical wastewater[J]. 2023. DOI: 10.2139/ssrn.4662679.
- [40] DI L, WANG T, LU Q W, *et al.* Efficient PMS activation toward degradation of bisphenol A by metal-free nitrogen-doped hollow carbon spheres[J]. *Separation and Purification Technology*, 2024, 339: 126740.
- [41] AN B Y, LIU J L, ZHU B J, *et al.* Returnable MoS_2 @carbon nitride nanotube composite hollow spheres drive photo-self-Fenton-PMS system for synergistic catalytic and photocatalytic tetracycline degradation[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 478: 147344.
- [42] SATIZABAL-GÓMEZ V, COLLAZOS-BOTERO M A, SERNA-GALVIS E A, *et al.* Effect of the presence of inorganic ions and operational parameters on free cyanide degradation by ultraviolet C activation of persulfate in synthetic mining wastewater[J]. *Minerals Engineering*, 2021, 170: 107031-107040.
- [43] BARZEGAR G, SABAGHAN M, AZADBAKHT O, *et al.* Ciprofloxacin degradation by catalytic activation of monopersulfate using Mn-Fe oxides: Performance and mineralization[J]. *Water Science and Technology*, 2023, 87(5): 1029-1042.
- [44] LIU J (刘静), YANG L B (杨璐冰), LI C (李晨), *et al.* Preparation of $\text{ML-WO}_3/\text{TiO}_2$ heterojunction and its photocatalytic degradation of Rhodamine B[J]. *Fine Chemicals (精细化工)*, 2022, 39(12): 2456-2467.
- [45] DAI K, LU L H, LIANG C H, *et al.* A high efficient graphitic- $\text{C}_3\text{N}_4/\text{BiOI}$ /graphene oxide ternary nanocomposite heterostructured photocatalyst with graphene oxide as electron transport buffer material[J]. *Dalton Transactions*, 2015, 44: 7903.
- [46] BAI Y J, BAI H Y, QU K G, *et al.* In-situ approach to fabricate BiOI photocathode with oxygen vacancies: Understanding the N_2 reduced behavior in photoelectrochemical system[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 362: 349-356.
- [47] ZHANG W, ZHOU L, SHI J, *et al.* Synthesis of $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{g-C}_3\text{N}_4$ composite with enhanced photocatalytic performance for the photodegradation of diclofenac under visible light irradiation[J]. *Catalysts*, 2018, 8(2): 45.
- [48] SONG D, ZHENG Z X, WANG Z Z, *et al.* Catalytic PMS oxidation universality of $\text{CuFe}_2\text{O}_4/\text{MnO}_2$ heterojunctions at multiple application scenarios[J]. *Environmental Research*, 2023, 243: 117828.
- [49] TIAN M, REN X C, DING S Y, *et al.* Effective degradation of phenol by activating PMS with bimetallic Mo and Ni Co-doped $\text{g-C}_3\text{N}_4$ composite catalyst: A Fenton-like degradation process promoted by non-free radical $^1\text{O}_2$ [J]. *Environmental Research*, 2023, 243: 117848.

(上接第 959 页)

- [48] SU Y, ZHANG L, LIAO B, *et al.* Simultaneous improvement of the electrical conductivity and mechanical properties via double-bond introduction in the electrically conductive adhesives[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2020, 31: 8923-8932.
- [49] ZHANG W W, LIU J H, LIU H, *et al.* Surface functionalization of micrometer silver flakes for fabricating high-performance electrically conductive adhesives[J]. *ACS Applied Electronic Materials*, 2022, 4(11): 5387-5396.
- [50] YU C Y, LEI J Q, WANG N, *et al.* Electrolytic synthesis and tolyltriazole modification of dendritic silver powders for high-performance electrically conductive adhesives[J]. *ChemistrySelect*, 2023, 8(14): e202300763.
- [51] ZHANG W W, WANG J T, LIU H, *et al.* Surface treatment of micron silver flakes with coupling agents for high-performance electrically conductive adhesives[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2023, 122: 103300.
- [52] LU J, HAN T L, DAI J F. Preparation of gold-decorated silver nanowires for improving conductivity of electrically conductive adhesives[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2020, 31: 14601-14607.
- [53] ZHANG S Y, QI X Q, YANG M, *et al.* A study on the resistivity and mechanical properties of modified nano-Ag coated Cu particles in electrically conductive adhesives[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2019, 30: 9171-9183.
- [54] SUN Z, CHENG N, CHEN F, *et al.* Preparation of micron-scale Cu@Ag conductive particles by displacement coating to reinforce epoxy conductive adhesives[J]. *New Journal of Chemistry*, 2021, 45(22): 10089-10097.
- [55] CHENG N, SUN Z, YU X H, *et al.* Effect of flake silver-plated copper particles on the property enhancement of electrically conductive adhesives[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2023, 25(14): 10022-10032.
- [56] DONG X R (董晓茹), HUANG C Y (黄楚云), HE H (贺华), *et al.* Preparation and characterization of electrically conductive adhesives of silver-coated copper powder with different morphologies[J]. *Plating & Finishing (电镀与精饰)*, 2023, 45(6): 84-89.
- [57] DAI D F, WANG Z P, YU J B, *et al.* Superstable, high-conductivity Cu conductive adhesive[J]. *ACS Applied Electronic Materials*, 2023, 5(12): 6621-6629.
- [58] WANG S D, ZHOU Z X, GOULAS A, *et al.* The role of self-assembled monolayers in the surface modification and interfacial contact of copper fillers in electrically conductive adhesives[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, 16(1): 1846-1860.
- [59] YAN J, WANG L, ZHAO C X, *et al.* Stretchable semi-interpenetrating carboxymethyl guar gum-based composite hydrogel for moisture-proof wearable strain sensor[J]. *Langmuir*, 2023, 39(3): 1061-1071.
- [60] YANG M K, LIU Y X, ZHANG D L, *et al.* Size-controlled low-melting-point-alloy particle-incorporated transient liquid-phase epoxy composite conductive adhesive with high performances[J]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2023, 5(4): 2760-2773.
- [61] ZHANG W W, ZHANG Z, LIU H, *et al.* Effects of low melting point SnBi58 alloy on the properties of isotropic conductive adhesives[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2023, 125: 103419.
- [62] ZHAO S, YANG M K, LIU Y X, *et al.* The anti-electrochemical migration mechanism of Ag-based transient liquid-phase electrically conductive adhesive: Experimental and phase-field study[J]. *Applied Surface Science*, 2025, 696: 162998.
- [63] FUKUMOTO S, MAKIMOTO K, OHTA K, *et al.* Change in electrical conductivity of electrically conductive adhesives during curing process[J]. *Journal of Materials Science*, 2022, 57: 11189-11201.
- [64] WANG X Y, LIU R, LUO J. Near-infrared light induced curing of electrically conductive adhesive assisted by upconversion particles[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2023, 11: 3997-4004.