

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.04.024

导热环氧树脂复合材料研究进展

贾园¹, 师瑞峰², 呼雪¹, 杨菊香¹

(1. 西安文理学院化学工程学院, 陕西省表面工程与再制造重点实验室, 西安 710065; 2. 西安科技大学化学与化工学院, 西安 710054)

摘要: 在介绍传统环氧树脂性能的基础上, 对导热环氧树脂复合材料当前的研究进展进行了综述, 重点论述了在降低环氧树脂原有性能的前提下对其导热性能进行优化的方法, 主要包括填充型和本征型导热环氧树脂复合材料的研究; 总结了导热环氧树脂复合材料常见的三种导热机理: 导热通路理论、声子传热理论和逾渗理论, 并探讨了导热型环氧树脂复合材料的结构及导热填料的分散构筑状态对其导热性能的影响机制; 最后展望了其在未来微电子材料及航空航天领域中的应用研究发展方向。

关键词: 环氧树脂; 导热性能; 改性; 导热机理

中图分类号: TQ323.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)04-0139-05

Research Progress on Thermal Conductive Epoxy Resin Composites

Jia Yuan¹, Shi Ruifeng², Hu Xue¹, Yang Juxiang¹

(1. The Key Laboratory for Surface Engineering and Remanufacturing in Shaanxi Province, College of Chemical Engineering, Xi'an University, Xi'an 710065, China; 2. School of Chemistry and Chemical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: On the basis of introducing the properties of traditional epoxy resin, the current research progress of heat-conducting epoxy resin composite was reviewed, the methods to optimize the thermal conductivity of epoxy resin without reducing their original performance was emphasized, mainly including the research of filled and intrinsic heat-conducting epoxy resin composite. The most common thermal conduction mechanisms of heat-conducting epoxy resin composite were summarized: thermal conduction path theory, phonon heat transfer theory and percolation theory, the influence of the structure of the heat-conducting epoxy resin composite and the dispersion state of the heat-conducting filler on their heat-conducting performance were discussed. The future research directions of heat-conducting epoxy resins in microelectronic materials and aerospace applications were also expected.

Keywords: epoxy resin; thermal conductivity; modification; thermal conduction mechanism

环氧树脂作为一种通用型热固性树脂, 以其高力学性能、低蠕变性、良好的抗氧化性等, 在航空航天、电子元器件等领域得到较为广泛的应用^[1-2]。随着科学技术的不断发展, 对电子设备的需求逐渐增大。由于电的运行会产生大量热量, 电子设备结构等材料的应用对导热性能的要求越来越高^[3]。环氧树脂在满足电子材料低膨胀、高电绝缘性、良好临界电气特性等要求的同时^[4-5], 如果能够适当提高导热性能, 则能满足其在航空航天等苛刻条件下的使用要求^[6]。因此, 导热环氧树脂的研究直接影响着航空航天技术设备的发展。

1 填充型导热环氧树脂复合材料的研究

纯环氧树脂的热导率在 $0.17 \sim 0.23 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 范围内,

基本满足常见电子元器件材料的使用要求^[7]。但当在航空航天等苛刻条件下使用时, 其导热性能仍需要进一步优化。基于此, 在保证环氧树脂自身综合性能不降低的前提下, 进一步提高其导热性能成为目前学者们研究的一个热点。提高环氧树脂热导率主要有两个方法: 一是填充型导热环氧树脂复合材料的研究, 即在环氧树脂中填充氮化硼(BN)、氮化铝、氧化铝等导热性能优异的填料^[8-9]; 二是本征型导热环氧树脂复合材料的研究, 即通过分子键的形式向环氧树脂的主体分子或链节结构中引入导热性能良好的元素及基团, 或提高环氧树脂复合材料结构的有序性和高取向性^[10-11]。目前已有大量文献报道显示, 适当调整改性方法可推进导热型

基金项目: 陕西省教育厅科研计划项目(19JK0741), 国家级大学生创新创业项目(201711080002), 西安市科技局计划项目文理专项(2019KJWL01)

通讯作者: 杨菊香, 教授, 博士, 主要从事有机-无机复合材料的合成及应用研究工作 E-mail: jxyang05@xawlu.edu.cn

收稿日期: 2020-01-14

引用格式: 贾园, 师瑞峰, 呼雪, 等. 导热环氧树脂复合材料研究进展[J]. 工程塑料应用, 2020, 48(4): 139-143, 149.

Jia Yuan, Shi Ruifeng, Hu Xue, et al. Research progress on thermal conductive epoxy resin composites[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(4): 139-143, 149.

环氧树脂复合材料的工业化生产,满足航空航天领域材料的应用需求。

1.1 无机填料改性

填充型导热环氧树脂复合材料的制备具有选材灵活、工艺简单、导热性能提升效果明显等优点。常见导热填料主要有BN、氮化铝、碳纤维、不锈钢纤维等^[12],这些填料的添加虽然明显提高环氧树脂复合材料的导热性能,但也会在一定程度上影响其力学性能和其它性能,因此,为了在最大程度上降低导热填料对环氧树脂产生的其它附加损伤,应对导热填料的选择和改性进行深入研究。

(1) 纳米陶瓷填料改性。

纳米陶瓷填料具有较高的热导率和电导率,且成本较低,能够有效提高环氧树脂的导热性能^[13]。但是纳米陶瓷填料与环氧树脂相容性有限,容易在环氧树脂基体中发生团聚,影响其力学性能,且其不同的晶体结构也会极大影响其导热性能的发挥^[14]。因此在使用纳米陶瓷填料时,应当适当控制其晶体结构和分散性,以在最大程度上实现环氧树脂复合材料导热性能的提高。

Hu Yong等^[15]通过胶凝法、烧结法制备出多孔的 Al_2O_3 陶瓷骨架,这种陶瓷骨架具有孔隙度良好、平均晶粒尺寸较大的优点;之后通过真空渗透的方式将环氧树脂加入到该多孔氧化铝陶瓷骨架中,制备出环氧树脂/ Al_2O_3 复合材料,所得环氧树脂/ Al_2O_3 复合材料的弯曲强度增大到305 MPa,热导率可高达 $13.46 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,该研究为导热环氧树脂复合材料的制备提供了新的方法。

Shen Dianyu等^[16]以碳化硅纳米线(SiC NWs)作为导热填料,制备出环氧树脂/ SiC NWs 复合材料并对其性能进行研究,结果表明,当 SiC NWs 掺量为3.0%时,环氧树脂/ SiC NWs 复合材料的热导率高达 $0.449 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,较纯环氧树脂增加约106%。该方法具有用料少、效率高的优点。此外,该环氧树脂/ SiC NWs 复合材料的热性能也得到一定程度的改善。纳米线形式的导热填料在改善环氧树脂复合体系导热性能方面表现出巨大的应用潜力。

Wu Yicheng等^[17]通过原位合成方法将二硼化锆(ZrB_2)颗粒引入到环氧树脂基体中,同时研究了 ZrB_2 添加量对环氧树脂性能的影响。结果表明,在 25°C 时,随着 ZrB_2 添加量的不断增加,环氧树脂体系的热导率不断增高,当 ZrB_2 添加量为4%,8%,12%和16%时,环氧树脂/ ZrB_2 复合材料的热导率较纯环氧树脂分别提高了1.26,1.38,2.27和2.31倍。然而环氧树脂体系的黏度也随着 ZrB_2 添加量的增加而逐渐增大,因此在提高材料导热性能时也应控制体系的黏度,以保证填料在环氧树脂中的分散性。

综上所述,纳米陶瓷填料的加入能够明显改善环氧树

脂的导热性能,新型结构纳米陶瓷填料及其复合纳米粒子的研究成为目前导热材料研究的重点。

(2) 碳纳米材料改性。

碳材料质量较轻,且具有高强度和良好的耐腐蚀性,被广泛应用于航天航空领域^[18]。由于碳的同素异构体众多,不同晶体结构都会影响碳材料的热导率。因此,对碳材料形貌进行控制,并将其应用于环氧树脂导热性能的优化,能够扩大环氧树脂在航天航空材料中的应用。

Jiang Yue等^[19]首先通过共价反应将石墨烯包覆在表面修饰有氨基硅烷偶联剂的四针状氧化锌上,之后对其进行热还原得到石墨烯包覆的氧化锌晶须,并以其作为填料对环氧树脂进行改性。由于石墨烯包覆的氧化锌晶须不但能够有效避免了石墨烯在环氧树脂基体中的堆积和团聚,而且有利于导热网络的构建,当其添加体积分数为65%时,所得环氧树脂复合材料的热导率为 $5.06 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,较传统的环氧树脂提高了27倍。

R. Vittorio等^[20]选择一维多壁碳纳米管(MWCNTs)和二维剥离石墨纳米粒子(EG)共同对环氧树脂进行填充改性,EG在改性环氧树脂基纳米复合材料热导率方面的影响优于MWCNTs,所得环氧树脂/EG复合材料的起始交联温度为 112°C ,相对于纯环氧树脂(130°C)有一定程度的降低,有利于固化反应的进行;此外复合材料的热导率得到大幅度提高,可增大到 $0.24 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

Zhou Helezi等^[21]以镍骨架和石墨烯碎片为原料,制备出了三维泡沫结构的石墨烯(3DGF),并以其作为填料加入环氧树脂中,结果表明,3DGF独特的中空3D结构有效地防止了石墨烯填料在环氧树脂中的团聚,在保留环氧树脂复合体系传统优点的基础上,将其热导率提高到了 $0.52 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,同时增强了环氧树脂复合体系的摩擦性能,为石墨烯作为导热填料的研究提供了新的思路。

(3) 金属及其氧化物改性。

金属及其氧化物具有良好的导热性能,因此常常用作环氧树脂改性剂使用。Chen Wei等^[22]以直径约20 nm的单晶铜纳米线作为填料加入到环氧树脂中,在较少填充量(体积分数为0.12%)的情况下,环氧树脂复合材料的热导率得到较大提升,达到 $2.59 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$;此外,该课题组还将铟与铈共掺于四氟化铈钠中,制备出具有上转换效应的复合纳米粒子,并以其对环氧树脂进行改性。这种复合纳米粒子能够在保证环氧树脂高导热性能的基础上,准确探测复合材料温度,这种双重功能使环氧树脂复合材料成为电子器件中极有吸引力的候选材料。

Guo Liangchao等^[23]制备出四针状晶须的 ZnO (T-ZnO)并以其作为填料加入到环氧树脂中,结果表明,T-ZnO的晶

须能够在环氧树脂基体中形成导热桥,在赋予环氧树脂/ T-ZnO 复合体系高热导率 $[4.38 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$ 的同时,将其热膨胀系数降低到了 $2.81 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ 。

Ren Linlin 等^[24]通过表面改性 Al_2O_3 微球负载银粒子的形式,制备出 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-AgNPs}$ 的导热填料,并将其加入到环氧树脂中,得到环氧树脂/ $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-AgNPs}$ 复合体系,该复合体系的热导率为 $1.304 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,较纯环氧树脂提升了6倍多,这是因为 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-AgNPs}$ 在环氧树脂复合体系中构建出了银“导热桥”,在降低环氧树脂与填料的界面阻抗的同时,极大提升了环氧树脂的导热效率。

(4) 其它。

除了传统的导热填料,新型功能性导热填料的研究也是导热材料领域的一个研究热点。通过不同的工艺制备出具有新型结构的导热填料,或者将两种导热材料进行复合使其表现出良好的协同效应,都能够极大扩展导热型环氧树脂的应用范围。

Wang Zhengdong 等^[25]制备出具有核/壳结构的 Si/SiO_2 微球,之后在其表面包覆多巴胺,制备出 $\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{聚多巴胺(PDA)}$ 颗粒,并以其作为填料加入环氧树脂中。结果表明,与单纯使用 Si 颗粒填料相比,该环氧树脂复合体系的热导率大幅度提高到 $0.891 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,同时也表现出良好的介电性能,其介电常数及介电损耗分别为23.7和0.11。其性能的优化主要是由于 SiO_2 和PDA壳层形成了良好的绝缘层,从而有效防止它们之间的相互接触。

Huang Tao 等^[26]利用氧化石墨烯(GO)对BN进行封装,制备出了核壳结构的 BN@GO 杂化物作为填料对环氧树脂进行改性,结果表明,当 BN@GO 的加入量为40%时,复合材料的热导率最大达到 $2.23 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,较单独添加BN的环氧树脂复合材料增大了两倍,这是由于GO的存在,使得BN与环氧树脂界面热阻得到了较大的降低。

J. R. Chio 等^[27]采用化学电镀法将Ag镀于MWCNTs上,制备出了 Ag-MWCNTs 纳米粒子,并研究了其对环氧树脂复合材料导热性能的影响。结果表明,复合材料的热导率随镀层时间的增加而增大,当镀层时间为10 min时,复合材料的热导率由原来的 $0.29 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 增大到 $0.72 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。导热性能的增大可归因于银纳米颗粒的加入,以及 Ag-MWCNTs 纳米粒子与环氧基体良好的界面黏结强度。

1.2 有机填料改性

将有机填料引入到环氧树脂中,能够将柔性分子链通过化学键形式引入树脂分子三维网络空间结构中,有效促进热量的传导,从而在一定程度上提高环氧树脂的导热性能。

(1) 小分子有机体系改性。

小分子有机体系往往带有活性基团,能够通过与环氧

树脂中的环氧基团发生反应,从而向环氧树脂中引入导热性能良好的化学元素及官能团,在提高环氧树脂热导率的同时,赋予其更为优异的力学性能。Mo Hailin 等^[28]使用4,4'-二羟基二苯基(DHDP)作为改性剂对环氧树脂进行填充,结果表明,DHDP的引入增加了环氧树脂链的刚性,并在树脂中形成了良好的有序纳米结构,极大提高了环氧树脂的导热性、热稳定性、玻璃化转变温度以及介电性能等,其热导率最高可达到 $0.4 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。该方法为环氧树脂导热性能的优化提供了新的思路。

(2) 有机树脂改性。

将有机树脂引入到环氧树脂中,不但能够使两种树脂的优异性能进行良好结合,而且有机树脂与环氧树脂之间形成的互穿网络结构也能够促进热量的传递,从而制备出导热性能良好的环氧树脂材料。

O. Eksik 等^[29]选择直径在200~300 nm范围内的聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)微球作为核、在其表面包裹GO外壳,制备出核-壳结构的填料。该填料在环氧树脂中分散效果良好,与传统的石墨烯纳米片相比,同等添加剂量下能够赋予环氧树脂体系更高的导热性能,其热导率可达 $0.6 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 左右,是纯环氧树脂的三倍。

Wang Jianggang 等^[30]首先在MWCNTs表面修饰羧酸,并通过羧基与胺的反应将吡咯(Py)接枝到MWCNTs表面,制备出表面同时修饰有Py和Ag纳米粒子的MWCNTs $[\text{MWCNTs@Ag-聚吡咯(PPy)}]$,并以其对环氧树脂进行改性,得到了环氧树脂/ MWCNTs@Ag-PPy 复合材料。研究表明,MWCNTs $[\text{MWCNTs@Ag-PPy}]$ 不但表现出了PPy优异的环境稳定性、导电性和氧化还原活性,也兼具了MWCNTs良好的放电通道和传热网络,因此极大提高了环氧树脂/ MWCNTs@Ag-PPy 复合材料的抗静电性能和导热性能,其热导率可高达 $0.47 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

Zhang Yuwei 等^[31]以双酚A二缩水甘油醚、甲基四氢邻苯二甲酸酐、聚醚砜(PES)为原料、以石墨纳米片(GNPs)为填料,通过诱导相分离的方法将GNPs定位于PES的表面,固化后得到具有三维立体连续网络状结构的环氧树脂体系。该改性环氧树脂体系的热导率可达到 $0.709 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,较纯环氧树脂提升了3.5倍,较传统的环氧树脂/ GNPs 复合材料提高了52%。此方法为热固性树脂体系内导热填料的引入提供了新的思路。

2 本征型导热环氧树脂复合材料的研究

纳米粒子及有机体系共混改性的导热型环氧树脂复合材料应用范围较广,其主要导热机理是在材料内部建立良好的导热通路。但是仅仅构建导热连接无法满足更大热量的传导需求,而本征型环氧树脂复合材料的研究则为更高的热

传导要求提供了新的解决办法。本征型导热型环氧树脂复合材料的合成主要是通过在高分子链中引入刚性基团、促进高分子链的有序性结晶、改进填料存在形式等方法,对环氧树脂的热传递通路进行进一步的贯通和引导,其导热性能的提升不依赖于填料的加入量。

2.1 液晶型

液晶型环氧树脂内部结构高度规整,能够利用有效的晶格振动进行热能传递,相比普通环氧树脂具有更好的导热性能。因此,提升环氧树脂材料液晶排列的紧密程度和取向程度对于提高其导热性能具有深远意义。

Luo Fubin 等^[32]首先以液晶环氧树脂和还原氧化石墨烯(rGO)为原料,制备出具有液晶结构的纳米环氧树脂复合材料(AEO),在制备过程中选用真空自组装的方法,同时接枝含磷化合物,使得rGO的取向与材料平面平行方向上高度一致,并最终在AEO中形成了平面方向的rGO-rGO键传热通道,因此,所得环氧树脂在平面方向的热导率最高可达 $1.3209\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,表现出优异的阻燃性能和力学性能。

A. M. Islam 等^[33]利用阳离子引发剂对环氧树脂基官能团进行线性排列,固化后得到了环氧树脂基团高度有序的液晶形态,减少了体系导热过程中的声子散射,其热导率最大可高达 $23\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,相比传统环氧树脂的热导率提升了141%,为液晶环氧树脂在散热材料制备领域的应用提供了高效简便的方法。

Guo Huilong 等^[34]制备出了一系列含取代联苯中间体的高导热环氧树脂,并选用偏振光显微镜测得该环氧树脂具有良好的液晶相结构,同时讨论了热导率与液晶畴结构之间的关系。结果表明,在环氧树脂中引入了联苯结构能够使其热导率增大到 $0.28\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,高导热性和高热加工性能能使该环氧树脂在微电子学领域具有较为广泛的应用。

2.2 其它

除了制备出液晶环氧树脂外,通过化学合成方法在环氧树脂内引入其它元素或离子,可赋予环氧树脂新的性能。

Yang Xutong 等^[35]使用巯基环氧化合物通过亲核开环反应成功制备了含有巯基的环氧树脂弹性体,然后以原位聚合的方式将BN引入到体系中。所得巯基环氧树脂弹性体/BN复合材料在BN填充量为60%时获得最佳的导热性能,热导率能够达到 $1.058\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,同时该环氧树脂体系在酯交换作用下具有自愈能力,能够重新降解为巯基环氧化合物,表现出良好的回收价值。

Y. Takezawa 等^[36]制备出结构中分别含有2个苯甲酸基团或1个二苯基的两种新型环氧树脂单体,这两种环氧树脂单体均具有类晶体结构且高度有序,能够有效抑制声子的散射,其热导率为 $0.49\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,明显高于常规环氧树脂。

K. Fukushima 等^[37]选择含有萘环的胺类作为固化剂制备出了结构中含有刚性联苯结构的环氧树脂,并研究了其导热性能,结果表明,该环氧树脂的热导率为 $0.35\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 左右,相对于传统双酚A环氧树脂的 $0.17\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 左右有了极大的提高。

本征型环氧树脂的合成主要是对环氧树脂的结构进行设计调控,能够在保存环氧树脂原有优点的基础上,进一步赋予其良好的导热性能和力学性能,满足环氧树脂在航空航天等苛刻条件下的使用范围,并实现其大范围的工业生产。

3 环氧树脂复合材料导热机理的研究

导热型环氧树脂的研究能够极大扩展环氧树脂在航空航天等苛刻条件下作为小型化电子器件的应用。而环氧树脂的导热性能与环氧树脂的结构、填料的种类等有较大的关系,因此对环氧树脂复合材料导热机理的研究能够有效对其导热性能进行调控。

导热现象主要是指温度不同的物体相互接触,或者内部温度不同的物体内部温差部分之间,通过分子、原子及自由电子等微观粒子的热运动而引起的热量传递现象。对于环氧树脂的导热理论尚未有明确的定论,目前的研究中可以将环氧树脂的导热机理大致分为三类:热通路理论、声子传热理论和逾渗现象理论。

3.1 导热通路理论

环氧树脂内部的分子链往往会发生无规则缠绕,在很大程度上会限制其自由运动,因此无法形成完整的晶体,因此环氧树脂的热导率较低。而对环氧树脂分子链结构的调控,以提高其结构的有序性,从而可有效提高环氧树脂的热导率。G. Thanhkieu 等^[38]制备出三种不同偶氮甲基封端的液晶环氧树脂,并对其内部结晶结构和导热性能之间的关系进行研究,结果表明,环氧树脂导热性能受其骨架结构和结晶有序程度的影响较大,结晶有序程度越高则越有利于形成良好的导热通路,相对应的环氧树脂热导率也越高。

此外,向环氧树脂中加入导热性良好的填料也对提升环氧树脂的导热性能起到积极作用。当填料在环氧树脂中的含量达到一定程度时,粒子之间会发生相互接触,从而在环氧树脂中形成良好的导热通道,极大改善环氧树脂的导热性能。K. Kim 等^[39]将氧化铁纳米颗粒修饰到BN表面(BN/ Fe_2O_3),并研究其导热机理,结果表明,BN/ Fe_2O_3 能够在磁场的作用下表现出良好的界面结合作用,粒子之间能够相互吸引碰撞,从而优化了环氧树脂的导热路径,极大提高了复合材料的热导率。

3.2 声子传热理论

固体的导热载体主要由电子、声子和光子三种形式。环氧树脂作为聚合物材料的一种,主要依靠晶格振动进行导

热,即通过声子来进行热量的传导。当导热填料在环氧树脂中含量较低时,填料在基体中没有形成导热通路,此时的导热性能主要取决于填料本身。例如,在纳米填料表面进行表面修饰,增大其与环氧树脂的界面结合强度,声子在界面处的散射则能够得到有效抑制,从而增大声子传播的自由程,极大改善了复合材料的热导率。Huang Xingyi 等^[40]研究了导热粒子表面修饰偶联剂对环氧树脂导热性能的影响,结果表明,过多的偶联剂会分散在界面之间,从而使声子在界面处发生散射,明显降低声子的平均自由程,从而也使环氧树脂的导热性能受到一定破坏。因此,声子导热理论说明,提高环氧树脂导热性能的有效方式之一是优化其声子传播。

3.3 逾渗现象理论

逾渗现象是指在一元或多元体系中,体系以外的一种介质通过一定的路径进入体系内的过程。目前已有学者研究了逾渗现象在材料导热性能中的作用,并得到了部分认可。该理论认为,当向环氧树脂中加入的填料达到了一定程度,会出现逾渗转变点的改变。然而逾渗现象仅会在使用极高热导率的填料粒子时才可以观察到^[41],在使用普通填料时难观察到,且无法解释环氧树脂热导率随填料粒径减小而降低的现象,因此也存在着较大的争议。

4 结语

导热型环氧树脂材料的研究不但能够在保证环氧树脂原有优点的前提下,赋予其高的导热性能,为其在航空航天及电子科技领域等苛刻条件下的使用提供保障,而且能够极大促进微电子技术的发展。目前对导热型环氧树脂的研究主要集中于共混改性和本征型导热环氧树脂的研究,并取得了一定的成绩。可以预测,在未来的研究中,高热导率环氧树脂的制备及对其导热理论的深入探索将成为学者们研究的热点。

参考文献

- [1] Wang Yang, et al. Polymer Bulletin, 2019, 76:3 957–3 970.
- [2] Feng Yuezhan, et al. Journal of Materials Chemistry A, 2017, 5:13 544–13 556.
- [3] Chen Ting, et al. Polymers for Advanced Technologies, 2017, 29:1–9.
- [4] Qiu Yong, et al. Polymer International, 2017, 66:1 883–1 890.
- [5] Han Sensen, et al. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2019, 120:116–126.
- [6] 胡光凯等. 高分子材料科学与工程, 2018, 34(11):144–150.
Hu Guangkai, et al. Polymer Materials Science & Engineering, 2018, 34(11):144–150.
- [7] Yu Wenqi, et al. Composites Science and Technology, 2016, 125:90–99.
- [8] Yang Peng, et al. Materials Today Communications, 2019, 19:186–195.
- [9] Chen Chao, et al. Composites Science and Technology, 2016, 128:207–214.
- [10] Xu Xiao, et al. International Journal of Mechanical Sciences, 2019, 151:46–60.
- [11] Shan Xinran, et al. Materials Science and Engineering, 2017, 171:doi:10.1088/1757-899X/171/1/012151.
- [12] Jakubinek M B, et al. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2018, 84:194–201.
- [13] Hennemann K K, et al. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2019, 89:11–18.
- [14] Xue Gang, et al. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2019, 88:11–18.
- [15] Hu Yong, et al. Composites Science and Technology, 2016, 124:36–43.
- [16] Shen Dianyu, et al. Scientific Reports, 2017, 7:doi:10.1038/s41598-017-02929-0.
- [17] Wu Yicheng, et al. Composites Science and Technology, 2015, 107:61–66.
- [18] Wang Yu, et al. ACS Applied Materials and Interfaces, 2016, 8:8 272–8 279.
- [19] Jiang Yue, et al. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2017, 94:104–112.
- [20] Vittorio R, et al. Polymer Engineering and Science, 2017, 57:doi: 10.1002 / pen.24629.
- [21] Zhou Helezi, et al. Carbon, 2018, doi:10.1016 / j.carbon.2018.07.059.
- [22] Chen Wei, et al. Composites Science and Technology, 2016, 130:63–69.
- [23] Guo Liangchao, et al. RSC Advances, 2018, 8:12 337–12 343.
- [24] Ren Linlin, et al. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2018, 107:561–569.
- [25] Wang Zhengdong, et al. Composites Part B: Engineering, 2018, 140:83–90.
- [26] Huang Tao, et al. RSC Advances, 2016, 6:35 847–35 854.
- [27] Choi J R, et al. Composites Part B: Engineering, 2015, 80:379–384.
- [28] Mo Hailin, et al. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2015, 22:906–915.
- [29] Eksik O, et al. Carbon, 2016, 101:239–244.
- [30] Wang Jianggang, et al. RSC Advances, 2016, 6:31 782–31 789.
- [31] Zhang Yuwei, et al. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2018, 110:62–69.
- [32] Luo Fubin, et al. Composites Science and Technology, 2016, 132:1–8.
- [33] Islam A M, et al. ACS Macro Letter. 2018, 7:1 180–1 185.
- [34] Guo Huilong, et al. Journal of Material Science: Mater Electron, 2016, 27:2 754–2 759.

- 44(11):12–17.
- [16] Guo Rui, et al. *European Polymer Journal*, 2018, doi:10.1016 / j.eurpolymj.2018.07.035.
- [17] Tao Yubo, et al. *Materials*, 2017, 10(4):doi:10.3390 / ma10040339.
- [18] Scaffaro R, et al. *Composites Part B:Engineering*, 2019, 167:199–206.
- [19] 徐蒙蒙,等. *工程塑料应用*, 2017, 45(8):106–111.
Xu Mengmeng, et al. *Engineering Plastics Application*, 2017, 45(8):106–111.
- [20] 刘斐,等. *塑料科技*, 2019, 47(11):59–64.
Liu Fei, et al. *Plastics Science and Technology*, 2019, 47(11):59–64.
- [21] 肖湘莲,等. *塑料助剂*, 2016(3):63–66.
Xiao Xianglian, et al. *Plastics Additives*, 2016(3):63–66.
- [22] Yang Yong, et al. *Materials & Design*, 2016, 91:262–268.
- [23] Serra T, et al. *Materials Science & Engineering C*, 2014, 38:55–62.
- [24] Lu Wan, et al. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2018, 88:223–230.
- [25] 何静. *化工新型材料*, 2015, 43(9):216–218.
He Jing. *New Chemical Materials*, 2015, 43(9):216–218.
- [26] 丁正. 一种聚乳酸基的聚酯酰胺的制备及结晶性能研究 [D]. 武汉: 湖北工业大学, 2017.
Ding Zheng. Preparation and study on crystallization properties of a polyesteramide based on poly(L-lactic acid)[D]. Wuhan:Hubei University of Technology, 2017.
- [27] Gu Liangliang, et al. *Polymer*, 2018, 156, 261–269.
- [28] Gug J, et al. *Journal of Applied Polymer Science*, 2016, 133(45): doi:10.1002/app.43350.
- [29] Ghalia M A, et al. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2017, 95:494–504.
- [30] 孙静,等. *塑料*, 2015, 44(6):1–4.
Sun Jing, et al. *Plastics*, 2015, 44(6):1–4.
- [31] 张臣,等. *材料科学与工程学报*, 2017, 35(4):587–591, 569.
Zhang Chen, et al. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2017, 35(4):587–591, 569.
- [32] 王艳宁,等. *中国塑料*, 2019, 33(11):71–77.
Wang Yanning, et al. *China Plastics*, 2019, 33(11):71–77.
- [33] 袁冰玉. 紫外光辐照引发反应挤出改性聚乳酸及其性能研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
Yuan Bingyu. Studies on the properties of modified polylactide prepared by UV irradiation induced reactive extrusion[D]. Guangzhou:South China University of Technology, 2018.
- [34] Karkhanis S S, et al. *Polymer Engineering and Science*, 2019, 59(11):2211–2219.
- [35] 左迎峰,等. *高分子材料科学与工程*, 2018, 34(8):142–148.
Zuo Yingfeng, et al. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2018, 34(8):142–148.
- [36] 马金亮,等. *合成纤维*, 2019, 48(8):39–42.
Ma Jinliang, et al. *Synthetic Fiber in China*, 2019, 48(8):39–42.
- [37] 徐志娟,等. *中国塑料*, 2018, 32(5):109–115.
Xu Zhijuan, et al. *China Plastics*, 2018, 32(5):109–115.
-
- (上接第 143 页)
- [35] Yang Xutong, et al. *Composites Science and Technology*, 2018, 164:59–64.
- [36] Takezawa Y, et al. High thermal conductive epoxy resins with controlled high order structure[C]//Proceedings of the 7th International conference on properties and applications of dielectric materials. New York:IEEE, 2003:1 146–1 149.
- [37] Fukushima K, et al. Thermal conductive epoxy resins with controlled high-order structure[C]//The 17th Annual meeting of the IEEE lasers and Electro-optics society, 2003 .LEOS 2004.New York:IEEE, 2004:340–343.
- [38] Thanhkieu G, et al. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2015, 30:77–84.
- [39] Kim K, et al. *Polymer*, 2016, 91:74–80.
- [40] Huang Xingyi, et al. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2012, 116:13 629–13 639.
- [41] 张国栋,等. *热固性树脂*, 2018, 33(3):43–48.
Zhang Guodong, et al. *Thermosetting Resin*, 2018, 33(3):43–48.