

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.11.028

热塑性聚醚酰亚胺导热/电磁屏蔽 功能化改性研究进展

王庆宇, 温变英

(北京工商大学化学与材料工程学院, 北京 100048)

摘要: 聚醚酰亚胺是一种拥有高强度、高尺寸及化学稳定性、耐高温、耐老化等优异性能的热塑性特种工程塑料, 对其进行功能化改性, 不仅可以保持其自身优异的性能, 而且可赋予材料新的功能, 近年来受到产业界重视。总结了现阶段对聚醚酰亚胺进行导热、电磁屏蔽以及导热-屏蔽双功能的功能化改性方面的研究进展, 并介绍了聚醚酰亚胺基功能复合材料的主要制备方法, 包含溶液共混法、熔融共混法、发泡成型法和其他方法, 最后对其未来的研究和应用方向提出了建议。

关键词: 聚醚酰亚胺; 功能化改性; 导热; 电磁屏蔽; 制备方法

中图分类号: TB324 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)11-0175-06

Research Progress on Functional Modification for Thermal Conductive and Electromagnetic Shielding Based on Thermoplastic Polyetherimide

Wang Qingyu, Wen Bianying

(College of Chemistry and Materials Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

Abstract : Polyetherimide (PEI) is a thermoplastic specialty engineering plastics with excellent properties such as high strength, high size and chemical stability, high temperature resistance, aging resistance, etc. Functional modification on PEI can not only maintain its own excellent performance characteristics, but also will produce new functions to the material as well, which has been paid attention by the industry in recent years. The current research progress on the functional modification of thermal conductive, electromagnetic shielding and thermal conductive, electromagnetic shielding bi-functional PEI-based composites were summarized, and the main preparation and molding methods of PEI-based functional composites, including solution blend, melt mixed, foam molding and other methods were introduced in brief. Finally, the future research and application directions were suggested.

Keywords : polyetherimide ; functional modification ; thermal conductivity ; electromagnetic shielding ; preparation method

聚醚酰亚胺(PEI)是为了改善聚酰亚胺(PI)加工成型困难,在PI分子链上引入醚键而开发的一类热塑性聚合物,其结构式如图1所示。醚键的引入增加了分子链的柔性,降低了玻璃化转变温度(T_g),改善了PI的加工性能。PEI是一种

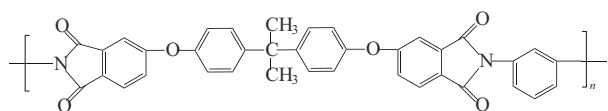


图1 PEI结构式

非晶高性能聚合物,保持了PI优良的耐高温性能和热稳定性,其 T_g 为210~215℃,热变形温度为200~225℃,热分解温度(T_d)在500℃以上,在160~180℃温度下可长期使用,允许间歇使用温度甚至高达200℃^[1-3]。同时,PEI还具有优异的力学性能和化学稳定性,其拉伸强度达115 MPa,能耐受多数醇类以及卤化溶剂,同时短期耐弱碱和耐无机酸。此外,PEI具有杰出的阻燃性和低烟密度,不需要引入任何添加剂其极限氧指数(LOI)即可达47%,燃烧等级为UL94 V-0级。PEI的电气性能优良,在宽广的频率和温度范围中有着稳定

基金项目: 北京市自然科学基金暨北京市教委科技计划重点项目(KZ202110011018)

通信作者: 温变英,博士,教授,研究方向为功能复合材料、聚合物基绿色复合材料

收稿日期: 2023-10-17

引用格式: 王庆宇,温变英.热塑性聚醚酰亚胺导热/电磁屏蔽功能化改性研究进展[J].工程塑料应用,2023,51(11):175-180.

Wang Qingyu, Wen Bianying. Research progress on functional modification for thermal conductive and electromagnetic shielding based on thermoplastic polyetherimide[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(11): 175-180.

的介电常数、介电损耗和极高的介电强度,并且还具有高尺寸稳定性、耐辐射性、电绝缘性等^[4]。PEI优秀的性能为其制备高性能复合材料创造了有利条件,也为其在电子电气工业、通信、汽车、医疗器械等领域的拓展应用打下了基础。

随着5G和信息技术的飞速发展,电子设备的集成化程度大幅提高,由此导致设备的发热量呈指数增长,这对元器件的工作稳定性、使用寿命造成严重影响,故而对高热导率(TC)散热材料的需求与日俱增^[5-8]。此外,由于当今无线通信技术的大力发展,使其在通信、雷达、医疗等方面极大地改观了人们的生产生活质量,而高频电磁波会对电子设备造成电磁干扰(EMI),影响设备的正常使用与寿命,甚至人们暴露在其中时还会对人体造成损伤^[9-13],因此,电磁屏蔽材料也成为现代社会发展急需的材料。相较于传统的散热、电磁屏蔽材料,聚合物基复合材料的优势在于密度小、耐腐蚀、稳定性高、易于加工生产,已经成为了最有前途的热管理、电磁屏蔽材料。而作为这类应用的材料需要具备优良的耐热性能,这是大多数聚合物所缺乏的。拥有导电或导热能力的PEI复合材料,在很多领域都有十分深远的应用前景,但低的本征热导率和电导率极大地限制了PEI在电子器件等领域的发展。PEI的高耐热性为此类材料的开发带来了曙光,故对PEI进行导热、电磁屏蔽功能化改性具有重要意义。笔者对此类研究进行了综述。

1 功能化改性材料的主要类型

在固体中电流的传导主要靠电子,而热量的传导主要依靠电子、声子和光子。由于大部分聚合物体系内不存在自由电子,且光子仅在高温环境下存在,故声子成为聚合物导热的主要载体;然而由于分子链的随机缠结、分子量的分散性、结晶度低等原因,声子在聚合物内部散射十分严重,使得聚合物导热性能普遍较差^[14-21]。因此,填充高导热或导电填料成为改善聚合物导热导电性能的主要手段。

1.1 导热材料

作为非晶态聚合物,PEI无法通过晶格振动进行传热^[22],导致其热导率很低,只有0.22 W/(m·K)。添加导热填料制备PEI基导热复合材料是提升其导热性能的主要手段。常见的导热填料有陶瓷粉末、金属粉末、碳基填料、Mxene等,当填充量达到某一值后,填料会在基体内部相互搭接形成导热网络,从而有效提高PEI的热导率。填料不同的微观形貌和粒径对于复合材料热导率的改善不同,球粒状填料在聚合物中的填充性、流动性较好,但需要较高的填充量才能搭接成网络;片状填料拥有较高的径厚比,有效的搭接面积大,更有利于热量的传递;纤维状填料因其极高的长径比,更容易实现在基体内部搭接成网络。使用不同粒径和形状的导热填料进行复配混搭,可以较单一类别填料在聚合物内部有更大的概率相互接触形成通路,从而更明显地提高复合材料的热导性能。

舒梦婷^[23]通过热压法制备了具有隔离结构的PEI/铋铜合金(CnBiCu)复合材料,在CnBiCu体积分数达到50%时,合

金颗粒相互连接,形成了导热通路,复合材料的热导率达到1.26 W/(m·K),大约为纯PEI树脂的7倍。Luo等^[24]首先用氧化铁颗粒修饰六方氮化硼(h-BN)薄片,随后采用磁取向技术制备了填料垂直取向的PEI/h-BN复合薄膜,实验结果证明,这种取向方式对于提升复合材料的热导率十分有效,在h-BN质量分数为20%时获得了1.63 W/(m·K)的面间热导率。Tarannum等^[25]制备了边缘氧化石墨烯(EGO)和基底面氧化石墨烯(BGO)两种改性填料,并通过溶液共混法得到了PEI/GO复合材料。结果发现,通过边缘氧化,保留了石墨烯的高内热导率,并降低了聚合物和石墨烯之间的界面热阻,在EGO质量分数为10%时,PEI/EGO复合材料的热导率相比原始PEI/石墨烯复合材料提高了近18%。然而,基底面的氧化极大地降低了石墨烯的内导热性,使PEI/BGO复合材料的热导率相对于相同成分的原始PEI/石墨烯纳米片(GNP)和PEI/EGO复合材料分别降低了57%和63%,这些结果为实现更高热导率的聚合物基石墨烯纳米复合材料提供了新的思路。Lin等^[26]分别使用3-氨基丙基三乙氧基硅烷(AMEO)和聚脲(PUA)对碳化硅晶须(SiCw)进行表面改性,随后将其掺入PEI中制备复合材料。结果表明,在SiCw质量分数为15%时,PEI/SiCw-AMEO和PEI/SiCw-PUA的最大热导率分别达到1.41 W/(m·K)和1.37 W/(m·K),说明表面功能化提升了SiCw对PEI的导热改性效果,也赋予了复合材料更广的应用前景。

1.2 电磁屏蔽材料

具备导电性能复合材料的内部存在可自由移动的电子,在电磁场的作用下,产生电流并由于材料自身电阻而产生热量从而损耗电磁波能量,称为电导损耗;而电介质在电磁场中反复极化,摩擦产生热量将电磁能转化为热能耗散掉的方式称为介质损耗^[27-31]。使PEI获得电磁屏蔽性能最常用的改性手法是填充导电填料,从而产生电导损耗和介质损耗以提升复合材料的电磁屏蔽效能(SE)。

温变英等^[32]前期使用悬浮液流延法得到具有梯度分布结构的PEI/Ni薄膜,其SE数值在150 MHz~1.5 GHz频率下达到40~50 dB;并且薄膜在潮湿、湿热、酸雨、强碱这4种溶液体系下保持SE没有下降。Feng等^[33]使用碳纳米管(CNTs)作为焊料和导电框架,通过在模具中将CNTs涂覆在PEI颗粒表面,通过微波辅助烧结成型得到具有分离结构的PEI/CNTs复合材料,仅用质量分数为4.0%的CNTs便获得了拥有17.98 S/m的电导率和X波段下34.6 dB的SE的复合材料,同时拉伸强度还达到35.71 MPa,复合材料优秀的SE归功于建立了完善的CNTs导电网络。此外,Sawai等^[34]通过溶液法制备了不同质量分数还原氧化石墨烯(rGO)填充的PEI薄膜纳米复合材料。结果显示,复合材料的电导率和SE随rGO填充量的增加而增长,含有质量分数2.5%的rGO的纳米复合材料在8~12 GHz波段的SE值为22~26 dB,同时PEI/rGO薄膜还表现了出色的热稳定性。

磁损耗也是电磁波能量损耗的一种重要形式,填充磁性

填料也可以实现对PEI进行电磁屏蔽改性^[35-37]。Asandulesa等^[38]通过溶液浇注得到PEI/钴铁氧体(CoFe_2O_4)复合薄膜,研究发现, CoFe_2O_4 质量分数为10%~50%复合材料的饱和磁化强度和剩余磁化强度分别在4.39~27.9 emu/g和1.47~9.57 emu/g的范围内,在1 Hz的低频范围内的SE从138.34 dB(质量分数为10%)增加到145.41 dB(质量分数为50%),其中吸收损耗占据主导因素。

此外,Shen等^[39]利用相分离法开发了一种新型PEI/石墨烯@ Fe_3O_4 (G@ Fe_3O_4)泡沫复合材料。由于泡沫中的微孔提供了较大的泡孔-基体界面面积,进入到泡沫的入射电磁波可以在这些界面之间反复反射和散射,配合填料 Fe_3O_4 带来的磁损耗机制和石墨烯的电损耗机制,表现出十分优异的SE。其中,G@ Fe_3O_4 负载量为10%的复合泡沫材料在8~12 GHz波段拥有14.3~18.2 dB的SE值,比SE约为41.5 dB/(g/cm³)。

目前对于PEI电磁屏蔽功能改性的文献报道仍然较少,研发更为丰富的改性手段和开发更多的功能填料是目前需要解决的问题。

1.3 导热-屏蔽双功能材料

复合材料的电磁损耗伴随着热量的产生,及时将此能量散发出去对保障设备正常工作以及延长材料的寿命具有重要价值。PEI虽耐热性能良好,但材料内部长时间高热量的聚集也会影响其性能和使用寿命,所以导热-屏蔽双功能改性PEI的研究是不可或缺的。当向PEI基体中填充同时具备优异热导率和电导率的填料如碳系填料,可以取得PEI导热、屏蔽双功能改性的效果。

Zhao等^[40]将功能化GNP(fGNP)与PEI微球结合,在PEI基体中构建了三维微观连续填充物网络,所制造的复合材料具有优异的热导率为4.77 W/(m·K)和高SE为42.7 dB。杜晓蒙^[41]通过溶液共混法制备了PEI/rGO/Ag复合薄膜,当其中的Ag纳米颗粒质量分数达到8.62%时,复合材料的电导率达到10 515.51 S/cm,薄膜的SE和热导率分别达到25 dB和19.959 W/(m·K)。在另一组实验中,该研究者还使用同种方法制备了PEI/CNT/Ag复合薄膜,发现当Ag纳米颗粒质量分数为14.4%时,复合材料的电导率高达37 799.18 S/cm,而薄膜的SE和热导率分别达到了34 dB和35.932 W/(m·K)。原因是Ag纳米颗粒生长在rGO和CNT表面,发挥了填料之间的桥梁作用,减少了缝隙,有助于在聚合物基体内部建立导电、导热网络,从而提升了复合材料的热导率和SE。

碳系填料例如GNP和CNT等,因为兼具优秀的热导率和高电导率,在导热-屏蔽双功能复合材料的研发中被频繁采用。但同时也暴露出在现阶段导热-屏蔽双功能的研究中,填料选择略显单一,开发更多的功能填料种类很有必要。

2 PEI功能复合材料的制备方法

PEI功能复合材料具有多种制备方法,其中以共混技术为主,其他多元化的制备方法也不断被开发研究。

2.1 溶液共混法

溶液共混法是通过利用PEI的可溶解性先行配制成PEI溶液,随后向溶液中加入功能填料共混,并得到复合材料的一种制备方法。常用的溶剂有二氯甲烷(DCM)、*N,N*-二甲基甲酰胺(DMF)、*N*-甲基吡咯烷酮(NMP)、四氢呋喃(THF)等^[42]。

Luo等^[43]将PEI溶解至DMF溶剂中,随后将硫酸处理过的h-BN微片与溶液进行共混,随后使用溶液浇铸法得到PEI/h-BN柔性复合薄膜。当h-BN体积分数为10%时,PEI/h-BN的热导率比纯PEI提高了62%,拉伸弹性模量提高了41%。在h-BN体积分数为5%的情况下,填充h-BN之后,电击穿强度达到55.3 kV/mm的峰值。Xue等^[44]将PEI分散至NMP中,再加入多壁碳纳米管(MWCNT)进行超声分散,通过溶液流延制得到PEI/MWCNT薄膜,经激光刻蚀表面后得到具有优异光热、电热转换性能的超疏水薄膜。Mondal等^[45]首先对二氧化硅颗粒进行硅烷改性,在利用其功能化改性氧化石墨烯(FGO),将FGO加入至PEI的NMP溶液中,经超声分散后流延制膜。结果表明,该薄膜在宽频率和温度范围内表现出优异的EMI屏蔽效果,仅质量分数1.5%的FGO的负载量就可使薄膜在8~12 GHz的频率范围内取得21~23 dB的SE,此外,该薄膜还具有良好的介电、力学性能。段磊^[46]借助于重力沉降通过悬浮液流延法制备了具有不对称结构的PEI/Ni电磁屏蔽膜,系统地考察了导电填料含量、溶液初始浓度、粒径等因素对所制备复合材料结构和性能的影响,并进一步对典型材料的耐温性能和耐环境性能进行了探索性研究。结果表明,Ni的体积分数为12%且厚度为0.40~0.50 mm的复合材料在30 MHz~1.5 GHz,8.2~12.4 GHz测试波段内SE能达到60 dB以上,优于同等含量下粒子均布材料的SE值(50 dB)。

目前关于PEI功能复合材料的研究中,溶液共混法是被大多数研究人员选择的制备方法。采取溶液共混法简单便于操作。但是制备过程中需要大量溶剂,会对环境造成污染,溶剂的浓度、蒸发过程等均会对产物性能造成影响,此外溶剂很难从产品中彻底去除。

2.2 熔融共混法

熔融共混法是利用PEI的可溶性,将其加热至其黏流温度以上,再利用双螺杆挤出机、双辊开炼机、密闭式混炼机等混炼设备将聚合物基体与填料进行充分共混,最后经冷却、造粒或粉碎得到复合材料的方法。借助混炼设备的强剪切力作用,可以将熔融状态下的聚合物与填料进行很好的混合,从而得到复合材料。

Salinier等^[47]使用双螺杆挤出机进行熔融共混,分别制备了PEI/MWCNT和PEI/玻璃纤维(GF)/MWCNT复合材料。结果显示,添加MWCNT显著提高了PEI基体的导电性,对PEI材料的拉伸强度影响不大,但大大降低了其断裂伸长率。采用GF与MWCNT复配,所制备PEI/GF/MWCNT复合材料的电性能与PEI/MWCNT保持在同一水平,但复合材料

的拉伸强度和断裂应变较PEI/MWCNT有所提升。Hatui等^[48]首先分别使用SiC和TiO₂对MWCNT表面改性,再通过熔融共混得到PEI/MWCNT/液晶聚合物(LCP)复合材料。研究表明,改性MWCNT在PEI基体中的分散性优于未改性MWCNT,使得复合材料的力学性能得到提升。具有TiO₂和SiC涂层的MWCNT的纳米复合材料的力学性能均高于添加了纯MWCNT的纳米复合材料,其中PEI/TiO₂-MWCNT性能最优,拉伸强度达到66.41 MPa。Bozkurt等^[49]通过双螺杆挤出机制备了填料质量分数为5%~30%的系列PEI/h-BN复合材料,PEI/h-BN复合材料制备流程图如图2所示。结果表明,所制备复合材料的流变行为和热导率与加工条件的变化相关,h-BN的加入增强了PEI的导热性能,添加质量分数30%的h-BN时的热导率为0.82 W/(m·K),大约是纯PEI的3倍。添加h-BN不会导致PEI的 T_g 有变化;却使PEI的热分解温度向更高的温度转移。

熔融共混法充分利用PEI的热塑性进行直接加工且不会有挥发性有机物(VOCs)等副产物,混合效果优秀,是效率最高的加工方法,但由于PEI的高熔融温度,需要用到高温加工设备。

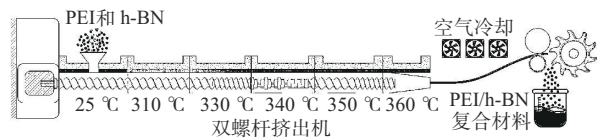


图2 PEI/h-BN复合材料制备流程图

2.3 发泡成型法

除了常用的注射成型、热压成型等成型方式,发泡成型可以使复合材料具备独特的内部结构,以满足更丰富的性能需求。发泡是复合材料结构设计的一个重要策略,发泡结构在减轻复合材料的质量的同时,还可以在基体中分散气体,从而降低实部的介电常数;提高了泡壁中填料的有效浓度,使连续的泡沫壁形成了导电网络,降低阻抗匹配以减少材料表面微波反射率;此外泡孔造就的多层结构使电磁波在复合材料内部多次反射而衰减能量。对于具有良好热塑性的PEI,发泡成型可以赋予其更多元化的性能以及更广阔的应用领域。

Xia等^[50]将溶液共混后得到的PEI/Ti₃C₂T_x MXenes/Ag复合材料与发泡剂混合,通过高温模压成型法,开发了具有高强度、低密度和隔热性能的新型纳米颗粒复合泡沫。当Ti₃C₂T_x MXenes负载量为1%(质量分数)时,所获得的泡沫复合材料在8.2~12.4 GHz下表现出28 dB的SE。同时,这种泡沫材料具有0.029~0.053 W/(m·K)的低热导率和11.59~20.20 MPa的高压缩拉伸强度。Ling等^[51]报道了一种通过相分离工艺生产轻质微孔PEI/GNP纳米复合材料泡沫的简单方法。观察发现,在泡孔生长过程中产生的强拉伸流诱导了石墨烯在孔壁上的富集和定向,这种作用将复合材料的电导率逾渗值从PEI/GNP纳米复合材料的体积分数为0.21%降低到PEI/GNP复合泡沫的0.18%。此外,发泡显著提高了复

合材料的比SE,从17 dB/(g/cm³)提高到44 dB/(g/cm³)。Zhao等^[52]以水蒸气诱导相分离(WVIPS)工艺得到PEI/Ni泡沫复合材料。研究发现,不同Ni含量的未发泡复合材料电磁屏蔽效能中的吸收分量(SE_A)占总屏蔽效能比率均为0,而相应的复合泡沫SE_A则增加至20.2%~25.1%,这说明泡孔结构的存在增强了对电磁波的吸收。

泡孔结构的引入对PEI泡沫提高复合材料的SE有着显著效果,但同时使材料导热性能急剧下降,这使得它们在轻质电磁屏蔽-隔热材料的研发具有很好的发展前景。

2.4 其他方法

PEI功能复合材料的应用领域十分广阔,因此面对不同的性能需求,其制备方法也是多种的,以下着重介绍静电纺丝法、溶胶-凝胶法和3D打印法。

静电纺丝法是一种新颖的纤维制造工艺,利用高分子流体静电雾化得到聚合物微小射流,经过固化后得到纤维。PEI织物是兼具轻质、柔性的极佳电磁屏蔽材料。Liang等^[53]通过静电纺丝法制备PEI/二乙酸纤维素(CDA)二维复合纳米纤维膜,然后进行膜的后处理和冷冻干燥制备得到PEI/CDA/透明质酸(HA)三维复合材料,复合材料具有优异的吸水率和保水率,并表现出良好的抗菌性和细胞相容性。赵利洁^[54]通过静电纺丝工艺制得PEI/CNT纤维膜。结果显示,CNT的加入增加了纤维膜的介电常数,并且对纤维膜的热稳定性和尺寸稳定性有所改善,同时CNT质量分数为5%时,使纤维膜的拉伸强度和拉伸弹性模量分别提高44.4%和33.6%。静电纺丝法现在已经在众多领域发挥了重要作用,但是在降低纤维平均直径和制备多孔或中空结构纤维等技术方向仍有很大发展空间。

溶胶-凝胶法通常用酸、碱和中性盐来催化前驱物水解和缩合,因其水解和缩合条件温和,因此制备简便^[55-56]。张晶等^[57]在N,N-二甲基乙酰胺(DMAc)/THF混合溶剂中利用溶胶-凝胶法得到PEI/SiO₂复合材料。研究发现,引入SiO₂纳米粒子后,PEI的 T_g 和热分解温度(T_d)都有显著的提高,当负载量达到12.5%(质量分数)时, T_g 和 T_d 同时达到最高,分别为235.3℃和556.6℃。Dal Poggetto等^[58]利用PEI的高热稳定性和在人体组织中的相容性,以溶胶-凝胶法合成了一种新型PEI/SiO₂复合生物材料,并获得了很好的抗菌性能。溶胶-凝胶法的优点是可以在温和的条件下进行,然而在凝胶干燥的过程中,溶剂和小分子的挥发会导致复合材料的内部产生应力,对力学性能产生一定影响。

3D打印是通过逐层打印方式制备产品的快速成型技术。Chen等^[59]运用3D打印技术得到PEI/CNT复合材料。结果表明,CNT的引入使复合材料样品的孔隙率显著降低,明显增强了复合材料的力学性能。Yildiz等^[60]先用双螺杆挤出得到PEI/CNT粒料,然后依据ASTM D638和ASTM D3039标准规定试样的几何形状和尺寸进行增材制造,并通过制品缺陷来进行打印工艺参数的优化。研究表明,按照ASTM D3039标准3D打印的试样性能最佳,填充质量分数

1%的PEI/CNTs复合材料的极限拉伸强度可达到93.57 MPa,但作者没有对材料的导热和屏蔽性能进行测试。3D打印技术的优点是可以制备复杂形状的个性化产品,但成型效率低,且现阶段仍没有发展到十分成熟的加工水平,仍需要科研人员对其不断研究。

3 结语

通过添加功能性填料对PEI改性以制备导热和电磁屏蔽功能复合材料是可行的。绝缘性功能填料如氮化硼等的加入,可以提升PEI的热导率,而导电性填料如碳系材料的引入,则可同时改善PEI的导热性和导电性,进而具备电磁屏蔽功能。目前报道的PEI功能复合材料的制备方法丰富多样,包括溶液共混法、熔融共混法、发泡成型法和3D打印等,其中以溶液共混法居多,这可能与这种方法的简便易行和实验用料少有关。但溶液共混法不能做到绿色环保,且成型效率低,残留溶剂还会影响制品的性能。相比之下,熔融共混法加工效率高,可广泛地应用于工业生产,是值得推荐的制备方法,但因PEI的熔点高,因此需要高温加工设备的支持。发泡成型技术形成微孔结构是一种新颖的结构设计方案,非常适用于隔热-屏蔽领域,但不能应用于结构材料。此外,静电纺丝法、溶胶-凝胶法、3D打印等其他方法也使PEI基功能复合材料拥有更加广阔的应用领域。

虽然针对PEI的导热和电磁屏蔽功能化改性取得进展,但是依然有些问题需要解决,比如目前还较难做到力学性能和传导功能同步提升、功能化需要的填料浓度较高以及成本高等问题。为此,建议在未来的研究和推广应用中需要关注下列方向:(1)功能化改性填料的制备和选用范围可进一步拓宽;(2)界面在功能改性中发挥关键作用,仍是十分值得深入研究的问题;(3)可熔可溶是PEI的优势特征,虽现有报道多用溶液共混法,但熔融共混法更符合绿色低碳的工业化发展方向,应加强熔融加工设备的研究和推广应用。

参考文献

- [1] 王新威,等.材料导报,2007(S1):408-412.
Wang Xinwei, et al. Materials Reports, 2007(S1):408-412.
- [2] 张一辉,等.中国塑料,2021,35(4):124-132.
Zhang Yihui, et al. China Plastics, 2021, 35(4):124-132.
- [3] 王晓杰.聚醚酰亚胺树脂的制备及其纳米复合材料性能研究[D].北京:北京化工大学,2017.
Wang Xiaojie. The preparation of polyether imide and the properties of its nanocomposites[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2017.
- [4] 杨品黄,等.工程塑料应用,1985,13(1):32-37.
Yang Pinhuang, et al. Engineering Plastics Application, 1985, 13(1):32-37.
- [5] 王世民,等.复合材料学报,2023,40(1):160-170.
Wang Shimin, et al. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(1):160-170.
- [6] 温变英,等.高分子材料科学与工程,2022,38(7):175-182.
Wen Bianying, et al. Polymer Materials Science & Engineering, 2022, 38(7):175-182.
- [7] Wang W, et al. Composites Science and Technology, 2023, 242. DOI: 10.1016/j.compscitech.2023.110161.
- [8] Yang S Q, et al. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(1): 1 511-1 523.
- [9] 姜超,等.材料导报,2022,36(16):203-212.
Jiang Chao, et al. Materials Reports, 2022, 36(16):203-212.
- [10] Wang X J, et al. Composites Part B, 2019, 173. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.106904.
- [11] Yang Z J, et al. Composites Science and Technology, 2019, 178: 41-49.
- [12] Qiu M N, et al. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2018, 29(12):10 437-10 444.
- [13] Raji S, et al. Carbon, 2023, 213. DOI: 10.1016/j.carbon.2023.118259.
- [14] Gong X T, et al. Computational Condensed Matter, 2018, 14: 133-136.
- [15] 孙咏子,等.材料开发与应用,2023,38(1):98-108.
Sun Yangzi, et al. Development and Application of Materials, 2023, 38(1):98-108.
- [16] 林夏泽,等.复合材料学报,2022,39(4):1 498-1 510.
Lin Xiaze, et al. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(4): 1 498-1 510.
- [17] Qin L L, et al. Polymer Composites, 2015, 36(9):1 675-1 684.
- [18] Burger N, et al. Progress in Polymer Science, 2016, 61:1-28.
- [19] 杜伯学,等.电工技术学报,2018,33(14):3 149-3 159.
Du Boxue, et al. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(14):3 149-3 159.
- [20] Yu S Q, et al. High Performance Polymers, 2022, 34(10):1 081-1 101.
- [21] Zhang H, et al. Journal of Composites Science, 2020, 4(4). DOI: 10.3390/jcs4040180.
- [22] 王冰成.石墨烯/环氧树脂复合材料热运输的微观机理研究[D].济南:山东大学,2022.
Wang Bingcheng. Study on the microscale mechanism of heat transport of graphene/epoxy composites[D]. Jinan: Shandong University, 2022.
- [23] 舒梦婷.低熔点合金-聚合物基复合材料隔离网络结构设计及其导热性能研究[D].合肥:中国科学技术大学,2020.
Shu Mengting. The construction of segregated structure and thermal conductivity of polymer/low-melting-point alloy composites[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020.
- [24] Luo W H, et al. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 912. DOI: 10.1016/j.jallcom.2022.165248.
- [25] Tarannum F, et al. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14 (12):14 753-14 763.
- [26] Lin Q H, et al. Applied Surface Science, 2022, 599. DOI:10.1016/j.apsusc.2022.153991.

- [27] 谢阿明,等.科学通报,2023,68(25):3 353–3 367.
Xie Aming, et al. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(25):3 353–3 367.
- [28] Wu X M, et al. Composites Science and Technology, 2020, 199. DOI:10.1016/j.compscitech.2020.108343.
- [29] 徐东卫,等.材料研究学报,[2023-10-31].http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1328.TG.20230605.1633.004.html.
Xu Dongwei, et al. Chinese Journal of Materials Research, [2023-10-31]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1328.TG.20230605.1633.004.html.
- [30] Jiang D W, et al. Polymer Reviews, 2019, 59(2):280–337.
- [31] Abbasi H, et al. Progress in Materials Science, 2019, 103: 319–373.
- [32] 温变英,等.材料导报,2019,33(6):1 065–1 069.
Wen Bianying, et al. Materials Reports, 2019, 33(6):1 065–1 069.
- [33] Feng D, et al. Composites Science and Technology, 2019, 182(C). DOI:10.1016/j.compscitech.2019.107753.
- [34] Sawai P, et al. Materials Today: Proceedings, 2018, 5(3):9 989–9 999.
- [35] Liu L, et al. Cryst Eng Comm, 2023, 25:1 657–1 668.
- [36] Wen B Y, et al. Composites Science and Technology, 2019, 169: 127–134.
- [37] Jiang C, et al. Small(Weinheim an der Bergstrasse, Germany), 2023. DOI:10.1002/smll.202301760.
- [38] Asandulesa M, et al. International Journal of Molecular Sciences, 2023, 24(2). DOI:10.3390/ijms24020999.
- [39] Shen B, et al. ACS Applied Materials & Interfaces, 2013, 5(21): 11 383–11 391.
- [40] Zhao J Y, et al. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2023, 665. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2023.131222.
- [41] 杜晓蒙.无机杂化填料合成及其复合材料电磁屏蔽、导热性能研究[D].北京:中国石油大学(北京),2020.
Du Xiaomeng. Synthesis of inorganic hybrid fillers and study the electromagnetic shielding and thermal conductivity performance of their composites[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2020.
- [42] 邓清田,等.高分子通报,2013(2):32–38.
Deng Qingtian, et al. Polymer Bulletin, 2013(2):32–38.
- [43] Luo W H, et al. Polymer Composites, 2022, 43(6):3 846–3 857.
- [44] Xue Y Q, et al. Materials Chemistry and Physics, 2023, 297. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2023.127385.
- [45] Mondal S, et al. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2018, 29(16):14 122–14 131.
- [46] 段磊.聚醚酰亚胺基电磁屏蔽功能材料研究[D].北京:北京工商大学,2015.
Duan Lei. Study on polyetherimide-based electromagnetic shielding functional materials[D]. Beijing: Beijing Technology and Business University, 2015.
- [47] Salinier A, et al. Composite Structures, 2013, 102:81–89.
- [48] Hatui G, et al. Journal of Polymer Research, 2013, 20(2). DOI: 10.1007/s10965-013-0077-9.
- [49] Bozkurt E Y, et al. Materials Today Communications, 2021, 29. DOI:10.1016/j.mtcomm.2021.102854.
- [50] Xia B H, et al. Composites Communications, 2022, 29. DOI: 10.1016/j.coco.2021.101028.
- [51] Ling J Q, et al. ACS applied Materials & Interfaces, 2013, 5(7): 2 677–2 684.
- [52] Zhai W T, et al. Journal of Cellular Plastics, 2014, 50(6): 537–550.
- [53] Liang W C, et al. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 89:225–232.
- [54] 赵利洁. CNFs/PEI复合材料的制备及介电性能研究[D].北京:北京化工大学,2012.
Zhao Lijie. Study on the preparation and dielectric properties of CNFs/PEI composite film[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2012.
- [55] 杨超.多孔纳米氧化锌基常温精脱硫剂制备及构效关系[D].太原:太原理工大学,2021.
Yang Chao. Preparation of porous nano ZnO based room temperature deep desulfurizer and its structure-activity relationship[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2021.
- [56] 詹朋璇.新型锶铁氧体的离子取代及磁性能研究[D].成都:电子科技大学,2018.
Zhan Pengxuan. A research on ion substitution and magnetic properties of new-type strontium ferrite[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.
- [57] 张晶,等.高分子学报,2011(10):1 125–1 131.
Zhang Jing, et al. Acta Polymerica Sinica, 2011(10):1 125–1 131.
- [58] Dal Poggetto G, et al. Macromolecular Symposia, 2021, 395(1). DOI:10.1002/masy.202000218.
- [59] Chen Q, et al. Composites Communications, 2022, 30. DOI: 10.1016/j.coco.2022.101083.
- [60] Yildiz A, et al. Composite Structures, 2022, 296. DOI:10.1016/j.compstruct.2022.115853.