



拟薄水铝石改性环氧树脂复合材料的制备与性能

刘国隆 周宏 张宏达 葛静

Preparation and properties of boehmite modified epoxy resin composites

LIU Guolong, ZHOU Hong, ZHANG Hongda, GE Jing

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210131.001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

拟薄水铝石包覆氧化石墨烯改性环氧树脂-氰酸酯复合材料的微观表征及力学性能

Micro-characterization and mechanical properties of pseudo-boehmite stone-coated graphene oxide/epoxy resin-cyanate composites

复合材料学报. 2021, 38(9): 2862–2868 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201116.005>

改性碳纳米管/环氧树脂复合材料的介电性能

Dielectric properties of modified carbon nanotube/epoxy composites

复合材料学报. 2020, 37(6): 1285–1294 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20191105.001>

磷-硼杂化聚合物/环氧树脂复合材料的制备及阻燃性能

Preparation and flame retardant properties of phosphorus–boron hybrid polymer/epoxy resin composites

复合材料学报. 2019, 36(1): 28–38 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180404.001>

酚化酶解木质素-环氧树脂/环氧树脂复合材料的合成及性能

Synthesis and properties of phenolic modified enzymatic hydrolysis lignin–epoxy resin/epoxy resin composites

复合材料学报. 2017, 34(12): 2681–2688 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170401.001>

SiO₂-竹纤维协同改性对环氧树脂基复合材料摩擦磨损性能的影响

Effect of SiO₂–bamboo fiber synergistic modification on friction and wear properties of epoxy resin matrix composites

复合材料学报. 2019, 36(7): 1633–1639 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20181009.003>

改性凹凸棒土-氧化石墨烯/环氧树脂复合材料的力学性能和热电性能

Mechanical, thermal and dielectric properties of modified attapulgite–graphene oxide/epoxy composites

复合材料学报. 2020, 37(5): 1056–1062 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190918.002>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20210131.001

拟薄水铝石改性环氧树脂复合材料的制备与性能



分享本文

刘国隆¹, 周宏^{*1,2}, 张宏达¹, 葛静¹

(1. 哈尔滨理工大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150040;

2. 哈尔滨理工大学 工程电介质及其应用教育部重点实验室, 哈尔滨 150080)

摘要: 采用水热合成法制备拟薄水铝石(AlOOH)纳米棒, 以3-氨基丙基三乙氧基硅烷(APTES)为表面改性剂, 制得mAlOOH, 以环氧树脂(Epoxy, EP)为基体, 制备AlOOH/EP和mAlOOH/EP复合材料。研究AlOOH和mAlOOH的填充量对AlOOH/EP及mAlOOH/EP复合材料性能的影响。结果表明, mAlOOH明显提高了mAlOOH/EP复合材料的力学性能。mAlOOH的填充量为4wt%时, mAlOOH/EP复合材料的冲击强度和弯曲强度分别比聚合物基体分别提高了259%和44%; 填充量不超过5wt%时, mAlOOH/EP的介电常数与介电损耗均略低于纯环氧树脂。当添加量为3wt%时, mAlOOH/EP具有最低的介电常数和介电损耗及最高的玻璃化转变温度(123°C)。

关键词: 环氧树脂; 拟薄水铝石; 力学性能; 热学性能; 介电常数

中图分类号: TB332 文献标志码: A 文章编号: 1000-3851(2021)10-3237-08

Preparation and properties of boehmite modified epoxy resin composites

LIU Guolong¹, ZHOU Hong^{*1,2}, ZHANG Hongda¹, GE Jing¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150040, China;

2. Key Laboratory of Engineering Dielectric and its Application, Ministry of Education,
Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: Boehmite(AlOOH) nanorods were prepared by hydrothermal method and modified by 3-aminopropyltriethoxysilane(APTES) to obtain modified boehmite(mAlOOH). Then, AlOOH/epoxy(EP) and mAlOOH/EP composites were fabricated by using the EP as the matrix. The effects of the contents of AlOOH and mAlOOH on the properties of the AlOOH/EP and mAlOOH/EP composites were systematically studied. The results show that the mechanics properties of mAlOOH/EP composites are obviously improved by mAlOOH. The impact strength and flexural strength of 4wt% mAlOOH/EP composites are increased by 259% and 44% than that of neat EP, respectively. Both dielectric constant and dielectric loss of mAlOOH/EP composites are slightly lower than those of the pure EP with mAlOOH no more than 5wt%. The mAlOOH/EP composites with 3wt% mAlOOH exhibit excellent global properties with the lowest dielectric constant and the lowest dielectric loss, as well as the highest glass transition temperature(123°C).

Keywords: epoxy resin; AlOOH; mechanics properties; thermal properties; dielectric constant

环氧树脂(Epoxy, EP)是在电子工业有重要地位的热固性树脂, 已经广泛应用于汽车及航空配件、电子封装材料及建筑材料等领域^[1]。

一维无机纳米材料因其优异的增韧作用、高

比表面积及纳米尺寸效应而备受研究者的青睐。拟薄水铝石(AlOOH)、氧化铝、氧化铁等^[2-4]都是常见的无机纳米材料。AlOOH表面有较多的羟基, 在酰胺类有机溶液中具有良好的分散性。AlOOH

收稿日期: 2020-10-30; 录用日期: 2021-01-20; 网络首发时间: 2021-02-01 11:32:30

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210131.001>

基金项目: 黑龙江省自然科学基金(E2015058)

通信作者: 周宏, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为纳米复合电介质材料 E-mail: hongzhou@hrbust.edu.cn

引用格式: 刘国隆, 周宏, 张宏达, 等. 拟薄水铝石改性环氧树脂复合材料的制备与性能 [J]. 复合材料学报, 2021, 38(10): 3237-3244.

LIU Guolong, ZHOU Hong, ZHANG Hongda, et al. Preparation and properties of boehmite modified epoxy resin composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(10): 3237-3244(in Chinese).

具有较高的力学强度，因而对提升材料力学性能有较明显的作用^[5-7]。利用 AlOOH 改性环氧树脂可以有效提升复合材料的抗拉强度、冲击强度^[8-9]，相比于传统的氧化铝填料，AlOOH 在提升拉伸模量和极限强度方面更有效^[10]。通过对 AlOOH 表面处理可以有效地改善 AlOOH 与环氧树脂 (EP) 界面作用，为有效提高 EP 复合材料的热学性能提供了可行路线^[11]。

用于环氧树脂基电子封装材料应具备较高的力学强度、低介电常数及良好的热学性能，传统环氧树脂性能已不能满足电子封装材料的需求，研制高性能环氧树脂具有重要意义^[12-14]。

采用水热法制备 AlOOH 纳米棒，采用 3-氨基丙基三乙氧基硅烷 (APTES) 为表面改性剂，制得 mAlOOH 及 mAlOOH/EP 复合材料。研究 mAlOOH 的填充量对 mAlOOH/EP 复合材料的力学性能、热学性能、介电性能的影响。

1 实验部分

1.1 原材料

环氧树脂 (F-51)，分析纯，蓝星化工材料公司无锡树脂厂；甲基四氢苯酐 (MeTHPA)，分析纯，嘉兴市清洋化学有限公司；1-甲基,2-乙基咪唑 (DMI-1,2)，分析纯，梯希爱化成工业发展有限公司；丙酮，分析纯，天津市科密欧化学试剂开发中心；六水合氯化铝 ($\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)，分析纯，天津市光复精细化工研究所；十二烷基苯磺酸钠 (SDBS)，分析纯，天津市光复精细化工研究所；3-氨基丙基三乙氧基硅烷 (APTES)，98%，阿拉丁试剂；NaOH，分析纯，天津市东丽区天大化学试剂厂，N,N'-二甲基乙酰胺 (DMAc)，分析纯，天津富予精细化工有限责任公司。

1.2 实验步骤

1.2.1 AlOOH 的制备

将 $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 溶解在去离子水中，配制成 0.2 mol/L 溶液，缓慢滴加 1 mol/L 的 NaOH 溶液至 pH=5，加入 3wt% 的 SDBS，搅拌 30 min，转移至反应釜，200℃ 保温 24 h，冷却至室温，过滤，水洗 3 次，80℃ 真空烘干 24 h，研磨，得到 AlOOH。

1.2.2 mAlOOH 的制备

将 AlOOH 分散在 DMAc 中，加入 3wt% 的 APTES，加热至 90℃，搅拌 1 h，过滤，水洗 3 次，80℃ 真空干燥 24 h，研磨，得到改性 AlOOH，记为 mAlOOH。

1.2.3 AlOOH/EP 及 AlOOH/EP 复合材料的制备

取适量 AlOOH 分散在丙酮中，超声，搅拌 2 h，将预热好的 EP 加入 AlOOH 的分散液中，超声，搅拌 2 h，移至 80℃ 恒温水浴锅中搅拌 1 h，加入固化剂 (MeTHPA) 及促进剂 (DMI-1,2)。超声，搅拌 2 h，真空烘箱中 12 h 以除去气泡。混合物倒入预热好的模具中升温固化：80、100、120℃ 各 1 h；150℃，3 h；得到 AlOOH/EP 复合材料。

1.2.4 mAlOOH/EP 复合材料的制备

将 1.2.3 节过程中的 AlOOH 换为 mAlOOH，其余过程相同，制得 mAlOOH/EP 复合材料。

1.3 测试与表征

X 射线衍射 (XRD，XRertPROMPO，荷兰帕纳科公司)：表征 AlOOH 的物相结构，Cu 靶，测试范围：5°~80°。

透射电子显微镜 (TEM，JEM-2100F 型透射电子显微镜，日本电子公司)：表征 AlOOH 的形貌。

红外光谱测试 (FTIR，NICOLET IS10 傅里叶红外光谱仪，美国 Thermo Fisher scientific 公司)：表征 mAlOOH 粉体的化学结构，测定范围：4 000~500 cm⁻¹。

扫描电子显微镜 (SEM，XL-30TMP，荷兰 Philips 公司)：表征 AlOOH/EP、mAlOOH/EP 复合材料的形貌及能谱仪 (EDS) 元素分析。

弯曲强度：按照 GB/T 2567—2008^[15] 标准，采用电子万能测试机 (CSS-4430 型，上海倾技仪器仪表科技有限公司) 测试 AlOOH/EP 及 mAlOOH/EP 复合材料的弯曲强度。

冲击强度：按照 GB/T 1043—2008^[16] 标准，采用 CBJ-1IJ 型冲击试验机 (济南华兴实验设备有限公司) 测试 AlOOH/EP 及 mAlOOH/EP 复合材料的冲击强度。

玻璃化转变温度 T_g ：采用 DSC(德国耐驰公司 Q20-TA 型差示扫描量热仪) 测量 AlOOH/EP 和 mAlOOH/EP 的 T_g ，升温速率：20℃/min，温度范围：30~200℃，N₂ 气氛。

采用宽频介电谱分析仪 (Concept 80，德国 Novocontrol 公司) 测试复合材料的介电常数和介电损耗。测试频率为 10²~10⁵ Hz，室温。

2 结果与讨论

2.1 AlOOH 的形貌

图 1 为 AlOOH 的 TEM 图像，其插图为 AlOOH 的局部放大图。可见，本文制备的 AlOOH 为棒状，

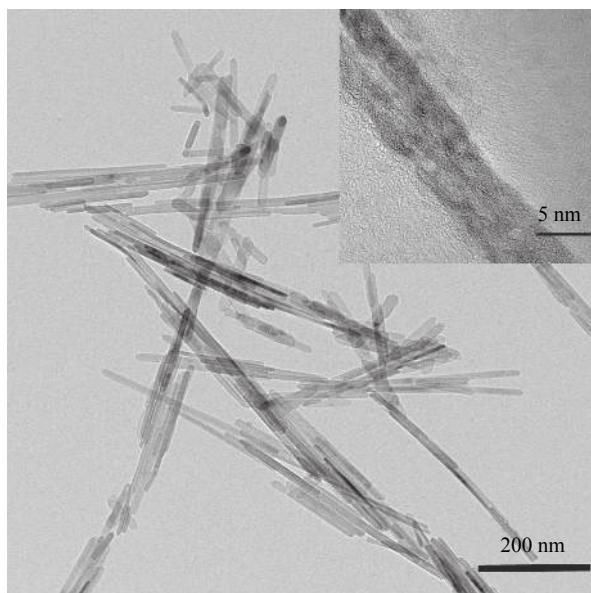


图1 拟薄水铝石(AlOOH)的TEM图像

Fig. 1 TEM image of boehmite (AlOOH)

表面粗糙，呈锯齿状。这有利于 AlOOH 与 EP 之间形成较紧密的结合。

图2是 AlOOH 的 XRD 图谱。 $2\theta=14.5^\circ$ 、 28.1° 、 38.4° 和 49.1° 处的衍射峰分别对应着 AlOOH 的 (020)、(120)、(031) 和 (200) 晶面。样品的衍射峰符合 γ -AlOOH (Boehmite, JCPDS, NO.21-1307)^[17]。

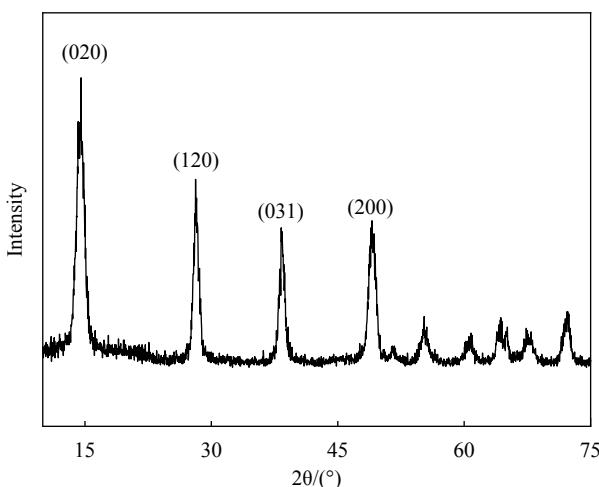


图2 AlOOH的XRD图谱

Fig. 2 XRD pattern of AlOOH

图3为 AlOOH 和 mAlOOH 的 FTIR 图谱。AlOOH 在 3290 cm^{-1} 与 3070 cm^{-1} 处的吸收峰分别对应着 AlOOH 中 O—H 的对称和非对称伸缩振动， 1610 cm^{-1} 处为 Al—OH 的吸收峰， 810 cm^{-1} 为 (OH)—Al=O 的吸收峰， 737 cm^{-1} 与 613 cm^{-1} 处为 [AlO₆] 的吸收峰。 1620 cm^{-1} 来自吸附水中 O—H

的弯曲振动^[17]。mAlOOH 的 FTIR 图谱中，在 2920 cm^{-1} 和 1490 cm^{-1} 处存在 CH₂ 的 C—H 非对称伸缩振动峰，在 1590 cm^{-1} 处存在 N—H 的弯曲振动峰，在 1050 cm^{-1} 处存在 Si—O 的吸收峰及在 $1200\text{--}1100\text{ cm}^{-1}$ 处 Si—C 和 Si—O 的吸收峰，表明偶联剂 APTES 与 AlOOH 成功键合^[12]。

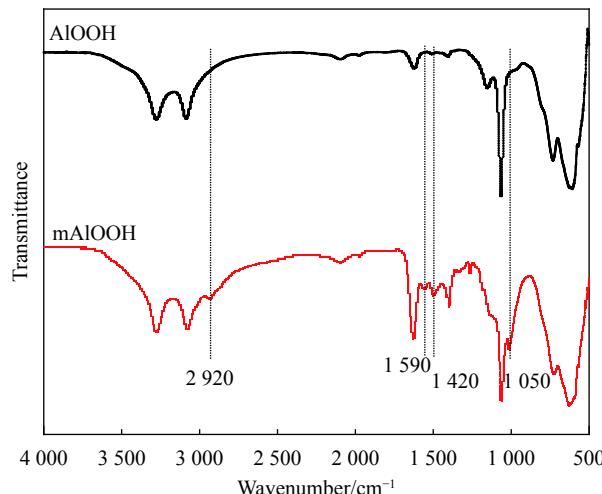


图3 AlOOH和改性AlOOH(mAlOOH)的FTIR图谱

Fig. 3 FTIR spectra of AlOOH and modified boehmite (mAlOOH)

2.2 AlOOH/EP 及 mAlOOH/EP 复合材料的形貌

2.2.1 mAlOOH 与 AlOOH 的分散性

为考察 mAlOOH 与 AlOOH 在丙酮及未经固化 EP 中的分散性，取 0.1 g 的 mAlOOH 与 AlOOH 分别分散在 5 mL 丙酮和 5 g 的 EP 中，静置 2 h，如图4所示。由图4(a)可见，AlOOH 在丙酮中沉淀，而 mAlOOH 未见明显沉淀，表明 mAlOOH 在丙酮中分散性更好。图4(b)中，mAlOOH 在 EP 中的分散液的透光性明显低于 AlOOH 的 EP 分散液，表明 mAlOOH 与环氧树脂之间存在着较大的界面及较强的界面作用。这归因于 mAlOOH 在改

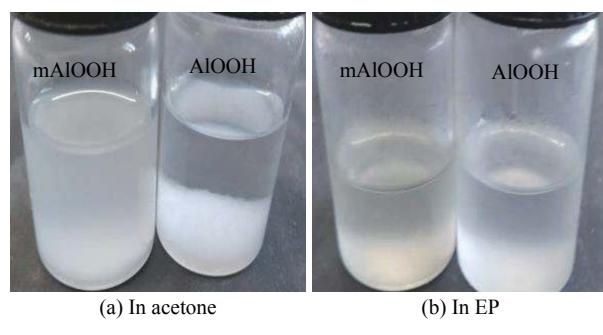


图4 mAlOOH与AlOOH的分散性

Fig. 4 Dispersibility of mAlOOH and AlOOH

性过程键合在其表面的官能团与有机试剂之间具有更好的相容性及分散性。

2.2.2 AlOOH/EP 及 mAlOOH/EP 复合材料的形貌

图 5(a) 为纯 EP 的断面 SEM 图像。可见，纯 EP 受到外力冲击时，裂纹生长路径阻碍较少，断裂面光滑平整，呈河流状，是典型的脆性断裂。

图 5(b)~5(d) 为 AlOOH/EP 复合材料断面形貌。出现韧窝，表明裂纹扩展过程受到阻碍，裂纹的生长路径变得曲折，能够有效地消耗冲击载荷，提高复合材料韧性。图 5(d) 中白色部分处出现团聚。

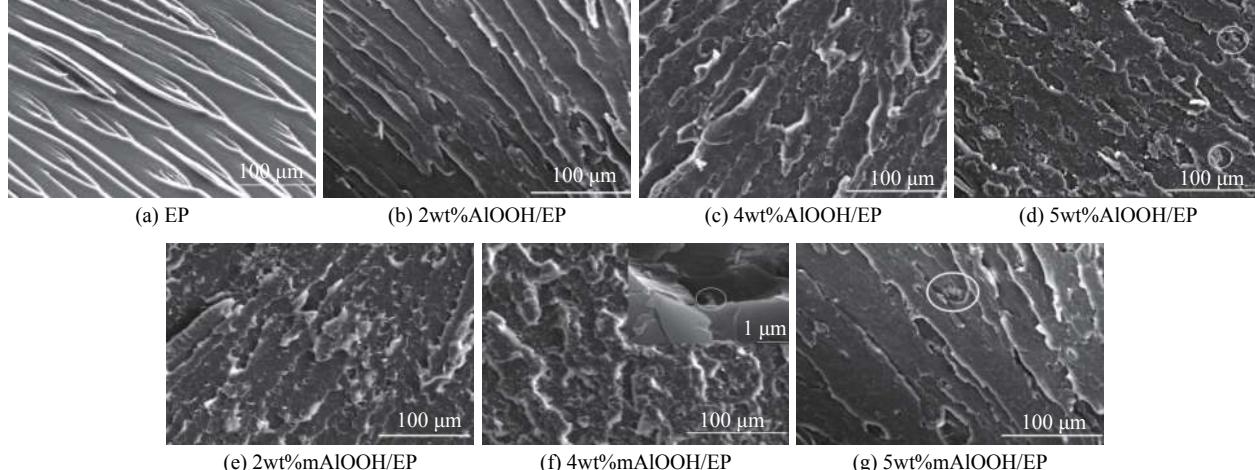


图 5 AlOOH/EP 和 mAlOOH/EP 复合材料的 SEM 图像

Fig. 5 SEM images of AlOOH/EP and mAlOOH/EP composites

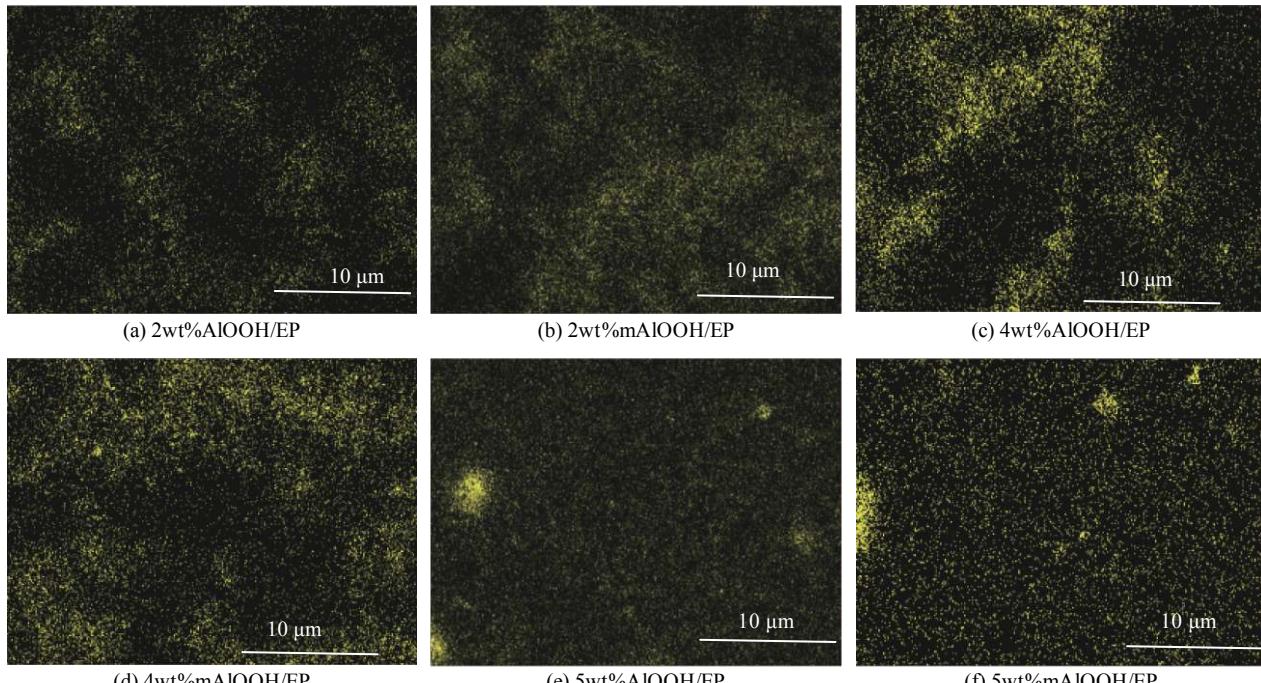


图 6 AlOOH/EP 及 mAlOOH/EP 复合材料铝元素 EDS 图谱

Fig. 6 EDS of Al distribution for AlOOH/EP and mAlOOH/EP composites

图 5(e)~5(g) 中 mAlOOH/EP 复合材料的 SEM 图像比图 5(b)~5(d) 更粗糙，表明 mAlOOH 在 EP 中分散性更好，有助于阻碍裂纹扩展，进一步提高材料的韧性。在图 5(f) 的局部放大图中，其白色区域内存在棒状凸起，一半嵌入在基体中，另一半暴露在外，这可能与纤维拔出机制有关，mAlOOH 部分拔出可以消耗一定的载荷，这有利于增强 EP 复合材料的力学性能。

为考察 AlOOH 在 EP 中的分布，图 6 采用 EDS 对 AlOOH/EP 和 mAlOOH/EP 复合材料进行

Al元素分析, 图中浅色的部分为Al元素。由图6(a)~6(f)可见, 2wt%时, AlOOH/EP和mAlOOH/EP复合材料中Al元素分布均匀; 质量分数为4wt%时, 两种复合材料中的Al元素都更加密集; 当填充量增加到5wt%时, 两种EP复合材料均出现明显团聚, 且5wt% mAlOOH/EP复合材料的分散性要优于5wt% AlOOH/EP复合材料。

2.3 AlOOH/EP与mAlOOH/EP复合材料力学性能

图7为AlOOH/EP与mAlOOH/EP复合材料的冲击强度。随着AlOOH与mAlOOH填充量增加, AlOOH/EP与mAlOOH/EP复合材料的冲击强度均先增大后减小。填充量为4wt%时, AlOOH/EP与mAlOOH/EP复合材料的最大冲击强度分别为16.62 kJ/m²与18.17 kJ/m², 比纯EP提高了分别提高了229%和259%。一方面, 在受到冲击载荷作用时, 外力能通过界面有效的传递到AlOOH, 由于AlOOH具有优异的力学性能, 从而产生大量的不同走向的裂纹, 裂纹生长的路径被延长; 另一方面, 在材料断裂过程中, 部分纤维受应力作用, 从基体中拔出, 在一定范围内, 增强体与基体界面结合越牢固, 纤维拔出所消耗的载荷越大, 因而AlOOH/EP与mAlOOH/EP均表现出冲击强度上升。当添加量超过4wt%时, AlOOH与mAlOOH发生团聚, 引发应力集中, 冲击强度开始下降。

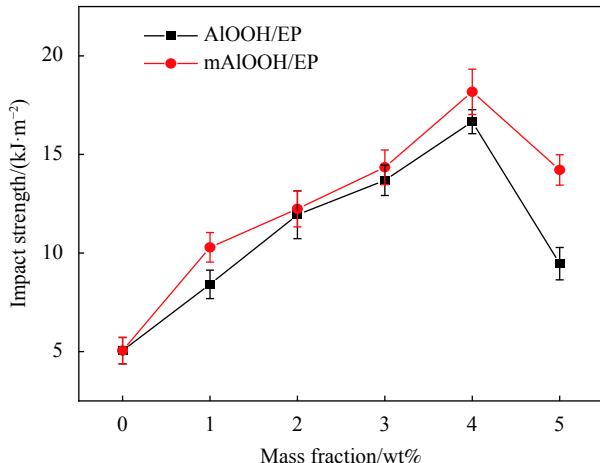


图7 AlOOH/EP和mAlOOH/EP复合材料的冲击强度

Fig. 7 Impact strength of AlOOH/EP and mAlOOH/EP composites

mAlOOH表面的氨基与环氧树脂基体的环氧键反应, 与EP具有较强的界面作用, 反应机制如图8所示。因此, mAlOOH/EP比AlOOH/EP复合材料具有更高的冲击强度。

图9为不同填充量的AlOOH/EP与mAlOOH/



图8 mAlOOH/EP复合材料反应原理

Fig. 8 Reaction mechanism of mAlOOH/EP composites

EP复合材料的弯曲强度。随着AlOOH与mAlOOH质量分数的增加, AlOOH/EP与mAlOOH/EP复合材料的冲击强度均先增大后减小。当AlOOH与mAlOOH的质量分数为4wt%时, AlOOH/EP与mAlOOH/EP复合材料的最大弯曲强度分别为116.12 MPa和119.17 MPa, mAlOOH/EP相比于纯EP提高了44%。AlOOH的引入在环氧树脂中形成更加复杂的微观结构, 填补了环氧树脂基体内缺陷, 提高了裂纹扩展的难度, 从而达到增韧EP复合材料的目的; 当添加量超过4wt%时, AlOOH与mAlOOH团聚愈发严重, 在团聚区域引发应力集中, 易于形成裂纹, 导致EP复合材料的弯曲强度反而下降。由于mAlOOH表面的氨基可以与树脂基体发生键合, 形成更加致密的界面区域, 因此mAlOOH/EP比AlOOH/EP复合材料具有更高的弯曲强度。

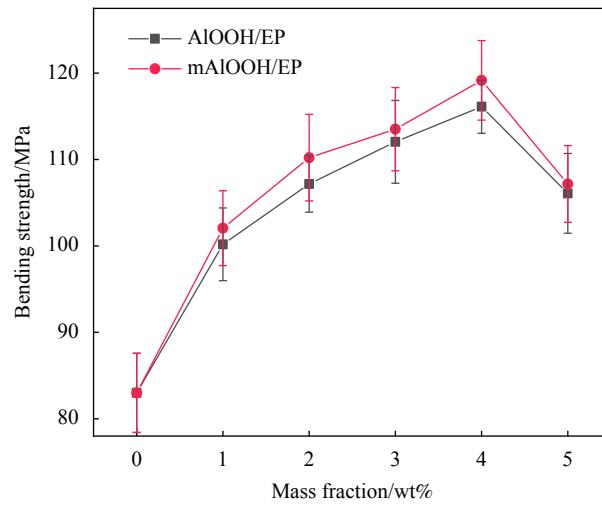


图9 AlOOH/EP和mAlOOH/EP复合材料弯曲强度

Fig. 9 Bending strength of AlOOH/EP and mAlOOH/EP composites

2.4 AlOOH/EP和mAlOOH/EP复合材料介电常数

AlOOH/EP和mAlOOH/EP复合材料介电常数与频率的关系如图10和图11所示。AlOOH/EP和mAlOOH/EP复合材料介电常数均随着频率的增加而增加。这是由于随着频率增加, 松弛时间减小, 偶极子的转向跟不上电场变化, 因而介电

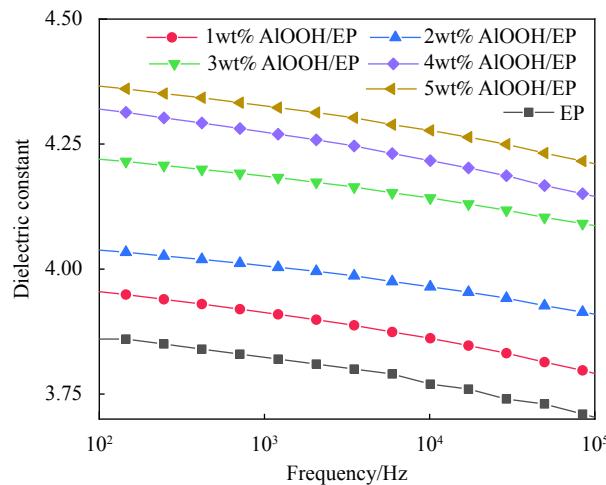


图 10 AlOOH/EP 复合材料的介电常数

Fig. 10 Dielectric constant of AlOOH/EP composites

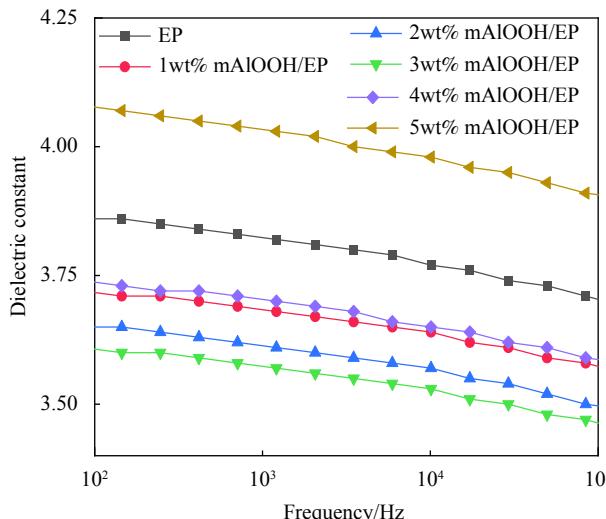


图 11 mAlOOH/EP 复合材料的介电常数

Fig. 11 Dielectric constant of mAlOOH/EP composites

常数下降。

由图 10 可见, AlOOH/EP 复合材料的介电常数随着 AlOOH 填充量的增加而增加。由于 AlOOH 表面存在大量的羟基, 极性基团数量增加, 从而使得 AlOOH/EP 介电常数有明显提升^[18]。随着 mAlOOH 填料添加量增加, mAlOOH/EP 复合材料的介电常数先降低后增加, 3wt% mAlOOH/EP 复合材料的介电常数最低。表面改性后的 mAlOOH 能够与 EP 基体具有更好的界面作用, 偶极子转向更加困难, 降低了 EP 复合材料的介电常数。但当填料超过 3wt% 时, mAlOOH 团聚较差的分散造成了更多的缺陷, 因此介电常数反而增加。

AlOOH/EP 和 mAlOOH/EP 复合材料的介电损耗如图 12 和图 13 所示。在测试频率范围内,

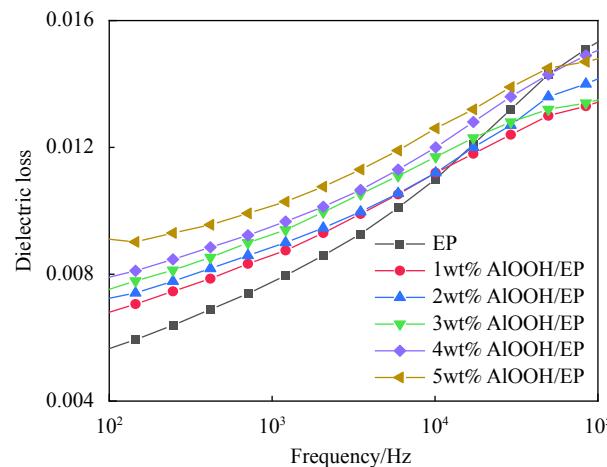


图 12 AlOOH/EP 复合材料的介电损耗

Fig. 12 Dielectric loss of AlOOH/EP composites

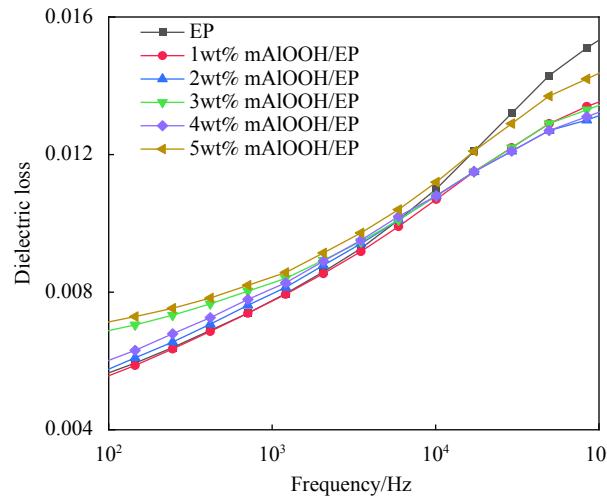


图 13 mAlOOH/EP 复合材料的介电损耗

Fig. 13 Dielectric loss of mAlOOH/EP composites

AlOOH/EP 复合材料的介电损耗随着填料添加量的增加而增大, 而 mAlOOH/EP 的介电损耗随 mAlOOH 添加量的增加呈现先降低后升高的趋势。这可能是由于 AlOOH 与 EP 基体之间形成界面强度较弱, 不能很好地束缚 AlOOH 表面极性基团, 介电损耗随着引入的 AlOOH 的增加而增加, 而 mAlOOH 与基体界面结合更强, 在约束层和松散层中的深陷阱较多, 对电荷的束缚能力强, 界面损耗较弱, 且两相界面以氨基与 EP 基体共价键相连为主, 使界面结合更牢固, 空间位阻加大, 增加了极性基团转向极化发生难度, 使其极化损耗降低, 故其复合体系的介电损耗降低。过高的 mAlOOH 填充量会因为团聚形成大颗粒, 引起缺陷, 界面结合能力降低, 在电场作用下其团聚处易造成局部场强增大, 形成漏电电流, 伴随着介

电损耗提高^[19]。

2.5 AlOOH/EP 和 mAlOOH/EP 复合材料热学性能

图 14 是 AlOOH/EP 和 mAlOOH/EP 复合材料的玻璃化转变温度 T_g 。可见，随着 AlOOH 填充量的增加，AlOOH/EP 复合材料的 T_g 降低；而随着 mAlOOH 填充量增加，mAlOOH/EP 复合材料的 T_g 先增加后减小，4wt% mAlOOH/EP 复合材料 T_g 达到最大。AlOOH/EP 复合材料中两相间存在的气隙、缺陷使 EP 分子链段更容易发生运动，致使 T_g 降低^[20]。经过 mAlOOH 表面引入了氨基基团，可以与 EP 形成共价键，分子自由空间减小，增加了环氧分子旋转或移动的难度，从而提升了 mAlOOH/EP 复合材料的 T_g 。

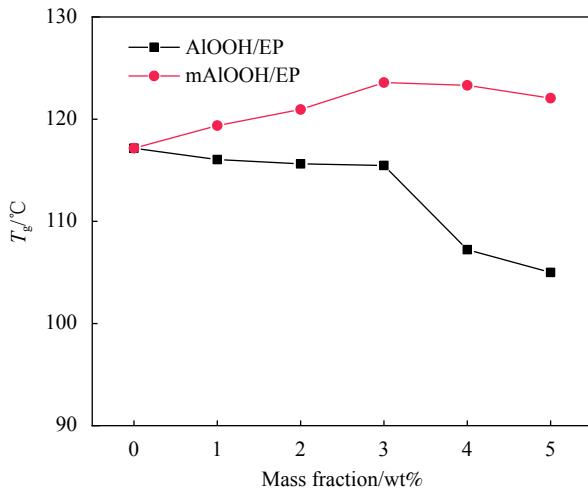


图 14 AlOOH/EP 和 mAlOOH/EP 复合材料的玻璃化转变温度 T_g

Fig. 14 Glass transition temperature T_g of AlOOH/EP and mAlOOH/EP composites

3 结论

采用水热法制备拟薄水铝石(AlOOH)纳米棒，采用 3-氨基丙基三乙氧基硅烷(APTES)为表面改性剂，制得改性 AlOOH(mAlOOH) 及 mAlOOH/环氧树脂(EP)复合材料。

(1) APTES 提高了 AlOOH 在丙酮及 EP 中的分散性。

(2) mAlOOH 明显提高了 EP 的力学性能。当添加量为 4wt% 时，mAlOOH/EP 的冲击强度 (18.17 kJ/m²) 和弯曲强度 (119.17 MPa) 相比于纯 EP 分别提高了 259% 和 44%。

(3) 填充量不超过 5wt% 时，mAlOOH/EP 的介电常数与介电损耗均略低于纯 EP。当添加量为 3wt% 时，mAlOOH/EP 具有最低的介电常数和介

电损耗；3wt% mAlOOH/EP 复合材料玻璃化转变温度达到最高。mAlOOH/EP 复合材料具有优异的综合性能。

参考文献：

- ZAHED A. Nanostructured epoxy adhesives: A review[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2019, 135: 449-453.
- MARC S, FABIO D, DAVIDE F, et al. Epoxy-boehmite nanocomposites as new insulating materials[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2010, 114(4): 2541-2546.
- DUAN Z W, HE H L, LIANG W Y, et al. Tensile, quasistatic and dynamic fracture properties of nano-Al₂O₃-modified epoxy resin[J]. *Materials*, 2018, 11(6): 905.
- 刘新, 陈锋, 何辉永, 等. 热塑性颗粒-无机粒子协同增韧碳纤维增强环氧树脂复合材料[J]. 复合材料学报, 2020, 37(8): 1904-1910.
- LIU X, CHEN D, HE H Y, et al. Synergistic toughening of thermoplastic particles-inorganic particles to carbon fiber reinforced epoxyresin composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, 37(8): 1904-1910(in Chinese).
- CEREN Ö Z, KRZYSZTOF K, STEPHEN J P. Preparation and characterization of titanate-modified boehmite-polyamide-6 nanocomposites[J]. *Polymer*, 2005, 46(16): 6025-6034.
- SEONG J J, JAI J L, WOONG K, et al. Hard coating films based on organosilane-modified boehmite nanoparticles under UV/thermal dual curing[J]. *Thin Solid Films*, 2008, 516(12): 3904-3909.
- MOHAMMADNEZHAD G, MOHAMMAD D, AFSHIN N. High surface area nano-boehmite as effective nano-filler for preparation of boehmite-polyamide-6 nanocomposites[J]. *Advances in Polymer Technology*, 2018, 37(4): 1221-1228.
- LIAO H D, ZHANG W P, SUN X M, et al. Study on the preparation and performance of epoxy resin/AlOOH nanocomposite materials[J]. *Advanced Materials Research*, 2012(399): 579-601.
- WU Z J, ZHUO Q, SUN T, et al. Mechanical properties of epoxy resins reinforced with synthetic boehmite (AlOOH) nanosheets[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2015, 132(5): 513-519.
- ANIL R R, RAJ B L, ALI Z, et al. Liquid metal synthesis of two-dimensional aluminium oxide platelet store inforce epoxy composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2019(181): 107708.
- CORCIONE C E. Development and characterization of novel photopolymerizable formulations for stereolithography[J]. *Journal of Polymer Engineering*, 2014, 34(1): 85-93.
- SUN T, WU Z J, ZHUO Q, et al. Surface functionalized

- boehmite sheets filled epoxy composites with enhanced mechanical and thermal properties[J]. *Polymers for Advanced Technologies*, 2014, 25(12): 1604-1609.
- [13] 范晓龙, 张广成, 李建通, 等. 环氧树脂微孔材料的制备与性能[J]. 复合材料学报, 2016, 33(9): 1915-1921.
- FAN X L, ZHANG G C, LI J T, et al. Preparation and properties of microcellular epoxy resin[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2016, 33(9): 1915-1921(in Chinese).
- [14] ZHOU Y C, LIU F, WANG H. Novel organic-inorganic composites with high thermal conductivity for electronic packaging applications: A key issue review[J]. *Polymer Composites*, 2017, 38(4): 803-813.
- [15] 国家质量监督检验检疫总局. 树脂浇铸体性能实验方法: GB/T 2567—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. Test methods for properties of resin casting body: GB/T 2567—2008[S]. Beijing: China Standard Press, 2008(in Chinese).
- [16] 国家质量技术监督局. 塑料简支梁冲击性能的测定: GB/T 1043—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
China State Bureau of Quality and Technical Supervision. Determination of impact properties of plastic simply supported beams: GB/T 1043—2008[S]. Beijing: China Standard Press, 2008(in Chinese).
- [17] ALEMİ A, HOSSEINPOUR Z, DOLATYARI M, et al. Boehmite (γ -AlOOH) nanoparticles: Hydrothermal synthesis, characterization, pH-controlled morphologies, optical properties, and DFT calculations[J]. *Physica Status Solidi (b)*, 2012, 249(6): 1-7.
- [18] 张明艳, 王登辉, 吴子剑, 等. 改性碳纳米管/环氧树脂复合材料的介电性能[J]. 复合材料学报, 2020, 37(6): 1285-1294.
ZHANG M Y, WANG D H, WU Z J, et al. Dielectric properties of modified carbon nanotube/epoxy composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, 37(6): 1285-1294(in Chinese).
- [19] 巩桂芬, 邢韵, 李泽, 等. 表面修饰纳米晶纤维素及其在双马来酰亚胺树脂中的应用[J]. 复合材料学报, 2020, 37(6): 1334-1343.
GONG G F, XING Y, LI Z, et al. Surface modification of nano crystalline cellulose and application in bismaleimide resin[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, 37(6): 1334-1343(in Chinese).
- [20] MEDIA G Z K, ANNA-MARIA E, VASILE-DAN H, et al. Short- and long-range mechanical and chemical interphases caused by interaction of boehmite (γ -AlOOH) with anhydride-cured epoxy resins[J]. *Nanomaterials*, 2019, 9(6): 853.