

氧化铝填料含量和粒径对环氧树脂复合材料力学性能的影响

白德鹏¹, 贺云逸², 李亭¹, 王若丞², 刘智伟¹, 王昭², 金海云²

(1. 中国空间技术研究院西安分院, 710100, 西安;

2. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 以双酚 A 型环氧树脂为基础树脂, 以不同粒径、不同形态的微米氧化铝为填料, 设计了复合材料的配方并制备了复合材料; 通过对复合材料力学性能以及显微结构的测试分析, 研究了氧化铝填料含量、粒径和形态对环氧树脂复合材料力学性能的影响规律, 分析了影响机理。结果表明: 环氧树脂复合材料的力学性能随氧化铝填料体积分数的增加先增大后减小, 当填料为 5 μm 球形氧化铝且填料的体积分数为 3.22% 时, 复合材料的力学性能较好, 拉伸强度与冲击强度分别可以达到 77.62 MPa、13.92 kJ/m², 较纯环氧树脂分别提升了 30.48% 与 44.10%; 由显微结构可以看出, 环氧树脂中的氧化铝填料在自身周围形成银纹, 起到了吸收外界应力的作用, 提高了复合材料的韧性; 观察氧化铝填料在环氧树脂中的分布可以发现, 与其他粒径和形态的氧化铝填料相比, 5 μm 球形氧化铝填料在环氧树脂中分布较好, 与环氧树脂的界面也较好, 使得复合材料具有更好的力学性能。

关键词: 氧化铝填料; 环氧树脂复合材料; 填料形态; 力学性能; 显微结构

中图分类号: TM215.1 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtub202104020 **文章编号:** 0253-987X(2021)04-0181-08



OSID 码

Effects of Particle Size and Content of Alumina Filler on Mechanical Properties of Epoxy Resin Composite Materials

BAI Depeng¹, HE Yunyi², LI Ting¹, WANG Ruocheng², LIU Zhiwei¹,

WANG Zhao², JIN Haiyun²

(1. Xi'an Branch, China Academy of Space Technology, Xi'an 710100, China;

2. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Bisphenol A epoxy resin was used as basic resin, and micron alumina with different morphology and particle size was used as filler to design and prepare composites. By testing and analyzing the mechanical properties and microstructure of the composites, the influences of the morphology, particle size and content of alumina filler on the mechanical properties of the epoxy resin composites were studied, and the influence mechanism was analyzed. The results show that the mechanical properties of the epoxy resin composites increase first and then decrease with the increase of alumina filler content. When the filler is 5 μm spherical alumina particles and the volume fraction of filler is 3.22%, the mechanical properties of the composite are better. The tensile strength and impact strength can reach 77.62 MPa and 13.92 kJ/m² respectively, which are 30.48% and 44.10% higher than that of pure epoxy resin. It can be observed from the

microstructure that the alumina filler in the epoxy resin forms crazes around itself, which can absorb the external stress and improve the toughness of the composite. By observing the distribution of alumina filler in epoxy resin, it can be found that 5 μm spherical alumina particle has better distribution in epoxy resin and better interface with epoxy resin, which makes the composite has better mechanical properties.

Keywords: alumina filler; epoxy resin composite material; filler morphology; mechanical properties; microstructure

环氧树脂复合材料具有的良好绝缘性能、高稳定性以及便于制造等众多优点,使其在电气行业有着重要的应用,如电气绝缘设备、盆式及支撑绝缘子等^[1-5]。除了电气行业,环氧树脂复合材料在航天航空、电子集成产品、轨道车辆和土木建筑等多个领域都有着广泛的应用^[6-8]。由于环氧树脂脆性较大、冲击强度及导热系数较低,在很大程度上限制了其应用范围^[9-11]。双酚 A 型环氧树脂应用广,产量高,占环氧树脂总产量的 85% 以上,其固化物具有优异的性能与较小的固化收缩率。通过在环氧树脂中加入氧化铝填料,可在提升环氧树脂复合材料力学和导热性能的同时保证电学性能不下降。与此同时,氧化铝填料的粒径、形态和含量等也会影响环氧树脂复合材料的性能,因此研究粒径、形态和含量氧化铝填料对环氧树脂复合材料力学性能的影响,对氧化铝填料增强环氧树脂复合材料的发展及应用至关重要。

在氧化铝填料增强环氧树脂材料的力学性能方面,国内外学者进行了大量研究。陈允等在环氧树脂中加入质量分数为 2.5% 的纳米氧化铝后,发现其冲击强度较纯环氧树脂提升了 10%^[12]。谢卫刚等用石墨烯来增强环氧树脂复合材料的力学性能,实验结果表明,当石墨烯的质量分数达到 0.1% 时,拉伸强度提升了 16.88%,当石墨烯质量分数达到 0.5% 时,复合材料的拉伸弹性模量提升了 48.29%^[13]。刘刚等通过机械共混法制备出了纳米氧化铝粒子,发现纳米粒子的加入明显改善了复合材料的力学性能,刚性无机纳米粒子的加入可以有效地阻止裂纹的拓展,提高纤维与环氧树脂基体的界面结合能力^[14]。杨艳青等将二氧化硅球形化后与环氧树脂复合,有效地缓解了填料和环氧树脂基体界面的应力集中现象,提高了复合材料的冲击强度和拉伸强度^[15]。研究结果表明,对填料进行表面处理有利于填料在环氧树脂中的分散,对于复合材料的韧性与导热性能都有较大的提升^[16-18]。邓永丽等对未处理过的氧化铝与表面偶联处理过的氧化铝

填充环氧树脂复合材料进行了力学性能测试,发现表面偶联处理过的氧化铝使复合材料的均匀性、拉伸强度以及弹性模量都有较大的提升,认为对氧化铝填料的表面偶联处理可以使氧化铝粒子间的吸附能力下降,增强氧化铝粒子与环氧树脂树脂基体间的结合力,使氧化铝在基体中能达到较好的分散状态^[19]。鲁先孝等人用多种方法处理纳米二氧化硅,制备环氧树脂复合材料,发现超声分散法以及预处理法对于环氧树脂复合材料的力学性能提升较大,复合材料拉伸强度提升了 5%~30%,拉伸断裂伸长率提升了 2%~14%^[20]。

尽管目前已有大量关于填料增强环氧树脂复合材料力学性能的研究,但对于填料的粒径、形态以及表面性质等的深入研究较少,影响了评价不同粒径、形态的填料对环氧树脂复合材料综合性能影响的准确性。氧化铝作为环氧树脂复合材料中最为常见的一种填料,通过研究不同粒径、形态氧化铝对环氧树脂复合材料的性能影响可以为氧化铝填料的选择提供一种新的思路,对提高环氧树脂复合材料的力学性能具有借鉴意义。

本文采用双酚 A 型环氧树脂作为基础树脂,甲基四氢苯酐作固化剂,分别选取不同粒径、不同形态的微米氧化铝作为填料对环氧树脂复合材料进行改性。确定制备环氧树脂复合材料的实验材料和制备方法,对制备试样的力学性能进行测试,研究氧化铝填料的粒径、形态对环氧树脂复合材料的力学性能的影响,从显微结构角度分析氧化铝填料对环氧树脂复合材料影响的内在机理,为氧化铝增强环氧树脂复合材料力学性能的研究提供了理论基础。

1 实验方法

1.1 环氧材料体系的原料选择

实验原料:双酚 A 型环氧树脂(E-39D,嘉兴市东方化工厂);液态酸酐类固化剂甲基四氢苯酐(MeTHPA),外观呈浅黄色透明液体,黏度小于 45 mPa·s;促进剂为脒类促进剂 DBU(新典化学材料

有限公司);防沉淀剂为气相二氧化硅,品牌为Aerosil,粒径为 20 nm,粒子基本呈球形;硅烷偶联剂 KH560(南京向前化工有限公司)。为了对氧化铝填料粒径及颗粒形态进行研究,分别加入 2、5、10

μm 粒径的球形氧化铝以及 5 μm 粒径的类球形氧化铝(东莞东超新材料科技有限公司)作为填料,4 种氧化铝填料对应的扫描电镜图如图 1 所示,其具体性能指标如表 1 所示。

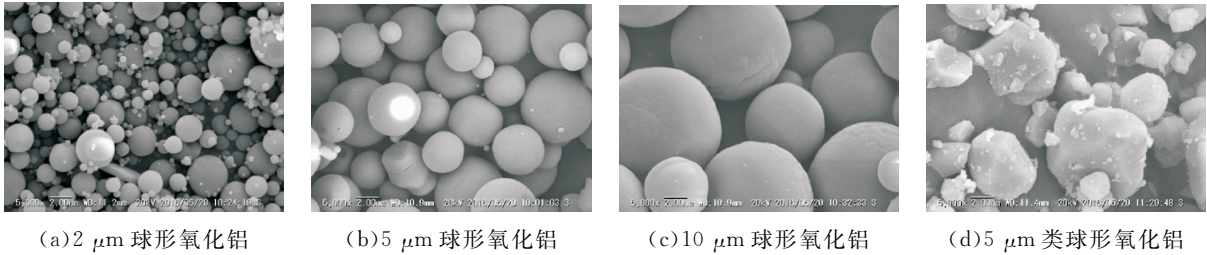


图 1 氧化铝填料扫描电镜图
Fig. 1 SEM images of alumina particles

表 1 氧化铝填料的性能指标
Table 1 Performance indexes of alumina fillers

型号	粒径/ μm	形态	比表面积/ $(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	α 氧化铝质量分数/%	外观
DCA-02S	2	球形	0.90	3.93	≥ 99.6	白色粉末
DCA-05S	5	球形	0.60	3.93	≥ 99.6	白色粉末
DCA-05L	5	类球形	0.72	3.93	≥ 99.6	白色粉末
DCA-10S	10	球形	0.50	3.93	≥ 99.6	白色粉末

1.2 配方设计与实验方法

氧化铝的体积分数分别为 0%、3.22%、6.77%、10.97%、16.03%、22.46%、30.05%。按照配比称量并在烧杯中加入环氧树脂、固化剂,用玻璃棒初步搅拌后加入氧化铝填料、防沉淀剂和硅烷偶联剂;倒入三角瓶中 70 $^{\circ}\text{C}$ 下水浴加热,机械搅拌 10 min 后用真空泵进行脱气且高速机械搅拌 20 min,后加入促进剂继续高速搅拌脱气 10 min;将环氧树脂共混物沿模具内壁倒入模具中,将模具置入烘箱,采用分段等温阶梯固化(90 $^{\circ}\text{C}$ 2 h,110 $^{\circ}\text{C}$ 2 h,150 $^{\circ}\text{C}$ 6 h),固化结束后随烘箱一起自然冷却至室温。

1.3 分析与测试

采用电子万能试验机(CMT-5504,美斯特工业系统有限公司)对环氧树脂固化试样进行拉伸试验,试样的形状尺寸和测试条件参照国家推荐标准《树脂浇铸体性能试验方法》(GB/T 2567—2008)。试样形状为哑铃型,总长度为 150 mm,厚度为 4 mm,端部宽度为 20 mm,窄部宽度为 10 mm,标距取 60 mm。测试条件为:室温环境,拉伸速率 2 mm/min。采用简支梁摆锤冲击试验机(MC009-XJJ-50,上海研润光机科技有限公司)对环氧树脂固化试样进行冲击试验,试验过程参照国家推荐标准《树脂浇铸体性能试验方法》(GB/T 2567—2008)。试样为 120 mm $\times$ 15 mm $\times$ 10 mm 的无缺口条形试样,至少为 5

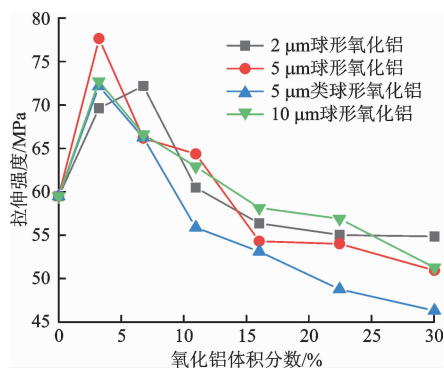
根,在室温条件下跨距为 70 mm,摆锤能量为 7.5 J。采用扫描电子显微镜(VE-9800,日本基恩士公司)观察拉伸试样断面的显微形貌。

2 结果与讨论

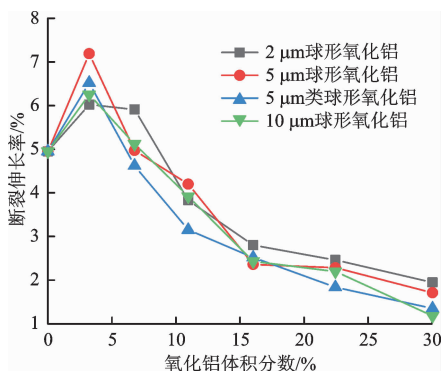
2.1 填料含量对环氧树脂复合材料力学性能的影响

图 2 为 4 种环氧树脂复合材料的拉伸强度与断裂伸长率随氧化铝填料体积分数的变化曲线图。可以看出,环氧树脂复合材料的拉伸强度随填料体积分数的增加先增大后减小,低含量的氧化铝填料对复合材料的拉伸性能有提升作用,在添加填料体积分数为 3.22% 的 5 μm 球形氧化铝填料后,复合材料的拉伸强度较高,达到 77.62 MPa,相对于纯环氧树脂提升了 30.48%。当氧化铝填料含量较高时,其拉伸强度反而下降。复合材料的断裂伸长率随氧化铝填料含量的变化规律与拉伸强度变化规律一致,先增大后减小。断裂伸长率越大表明其韧性越大,可以看到,在氧化铝含量较低时,其断裂伸长率可以达到 6% 以上,具有良好的韧性。

图 3 为环氧树脂复合材料拉伸断面的 SEM 图。可以看出,纯环氧树脂拉伸断面的端口较为光滑,产生的裂纹主要呈直线型(如图 3a),几乎没有塑性形变,所以纯环氧树脂断裂方式为脆性断裂,拉伸强度较小。加入氧化铝填料后,在氧化铝的含量



(a) 拉伸强度

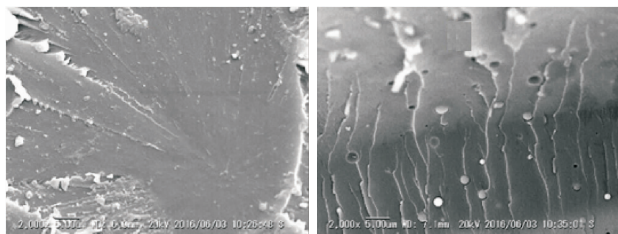


(b) 断裂伸长率

图 2 环氧树脂复合材料拉伸强度与断裂伸长率随填料体积分数和粒径变化趋势图

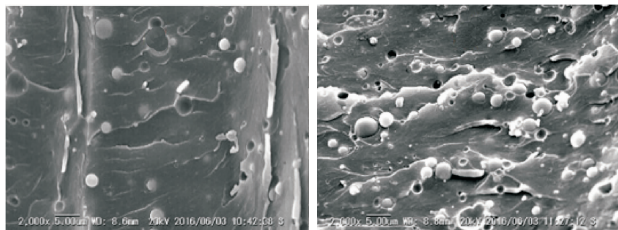
Fig. 2 Curves of tensile strength and elongation at break of epoxy composites reinforced with different contents and sizes of alumina particles

较低时,复合材料拉伸强度较大。由于氧化铝颗粒在硅烷偶联剂 KH560 的作用下与环氧树脂基体连接,浸润在环氧树脂之中,此时氧化铝填料颗粒在环氧树脂中分散较好,且能够看到尺寸较大的韧窝结构,说明该样品在拉伸断裂前塑性形变量较大,具有良好的韧性。断面形貌呈河流状或者树枝状(如图 3b),显示较大的抵抗拉伸形变过程,氧化铝填料颗粒周围出现银纹汇聚的现象,说明氧化铝填料颗粒诱发周围环氧基体在应力作用下发生明显的塑性变化,被包裹在环氧树脂中的氧化铝填料吸收了能量,显示为韧性断裂的特点。当复合材料受到拉伸的应力作用时,氧化铝颗粒可以均匀地分散应力,使拉伸的断面呈现高低不平、大小不均的不规则形状,在氧化铝填料颗粒周围的银纹形成相互关联、相互交织的网络结构,分布细密(如图 3c),从而减小了拉伸应力对材料的破坏。然而当氧化铝填料含量继续增加时,由于填料的分散不均匀和界面缺陷的增多(如图 3d 与 e),导致复合材料的拉伸强度降低。



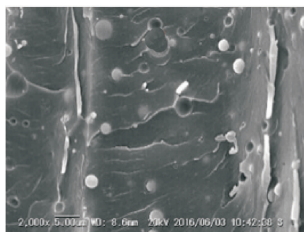
(a) 纯环氧树脂

(b) 含 3.22% 氧化铝的
复合材料



(c) 含 6.77% 氧化铝的
复合材料

(d) 含 10.97% 氧化铝的
复合材料



(e) 含 30.05% 氧化铝的复合材料

图 3 环氧树脂复合材料拉伸断面 SEM 图

Fig. 3 SEM images of fractured surface morphologies of epoxy composites reinforced with different contents of alumina

图 4 为 4 种复合材料的拉伸弹性模量随氧化铝填料体积分数的变化趋势图。从图 4 可以看出,环氧树脂氧化铝复合材料的弹性模量随氧化铝填料体积分数的增加而增加。弹性模量是复合材料在弹性形变中线性部分斜率的大小,代表着材料的刚性大小,即材料在弹性范围内抵抗变形的难易程度。因为氧化铝为刚性粒子,自身具有较高的弹性模量,所以氧化铝填料的加入对复合材料的弹性模量提升较大。

材料的冲击强度一般也能体现出材料的韧性。图 5 为环氧树脂复合材料的冲击强度随氧化铝填料体积分数的变化趋势图。从图 5 可以看出,环氧树脂复合材料的冲击强度随氧化铝填料含量的变化曲线与拉伸强度类似,纯环氧树脂的冲击强度较小,不足 10 kJ/m²,当加入的氧化铝填料含量较小时,复合材料的冲击强度有了明显的提升。环氧树脂复合材料在固化过程中,受热胀冷缩等因素,在其固化物

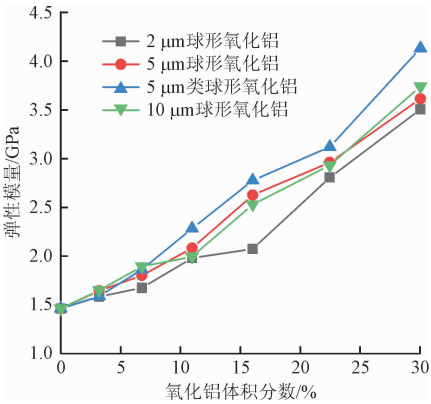


图 4 环氧树脂复合材料弹性模量随填料体积分数变化趋势图

Fig.4 Variation of elastic modulus of epoxy composites with content and size of alumina particles

的内部会产生一些裂纹;当材料受到外力作用时,这些裂纹会不断扩展;当裂纹在环氧树脂内部扩展到一定程度时,就会导致材料的内部结构发生破坏,产生断裂。如果复合材料的内部含有与环氧树脂相容性较好的氧化铝刚性颗粒,则当外力传递到氧化铝颗粒时,氧化铝的颗粒能够在自身周围产生出微小的裂纹来吸收和消耗外力,并且氧化铝颗粒本身也会发生一定的弹性形变,增加环氧树脂的冲击强度。可以看出,当添加的填料体积分数为 3.22%时,分别加入 5 μm 和 10 μm 球形氧化铝填料后,复合材料的冲击强度较高,分别可提升到 13.92、14.23 kJ/ m^2 ,相对于纯环氧树脂提升了 44.10%、47.31%。当氧化铝填料的含量继续增加时,填料的分布不均以及界面缺陷增多,造成应力集中,使得复合材料的冲击强度不断下降。

但是,冲击强度在本次实验中是通过冲击试样吸收摆锤冲击所做的功与试样的有效横截面积的比值计算得来的。实际上摆锤在低速冲击试样时(冲击速度 $\leq 50\text{ m/s}$),试样在断裂瞬间施加在断口截面的力是及其不均匀的,一般可以分为裂纹的引发区与裂纹的扩展区,裂纹的引发区断口裂纹呈直线型发展,断裂面呈平滑有序状,表现为脆性断裂的特性,而裂纹的扩展区,其断裂面比较粗糙,裂纹的发展方向比较分散,有明显的塑性形变,呈韧性断裂特性。

2.2 填料粒径和形态对环氧树脂复合材料力学性能的影响

表 2 为含 3.22% 体积分数、不同粒径的氧化铝填料的环氧树脂复合材料的拉伸性能。通过表 2 可以发现,5 μm 球形氧化铝填料的拉伸性能最好,拉

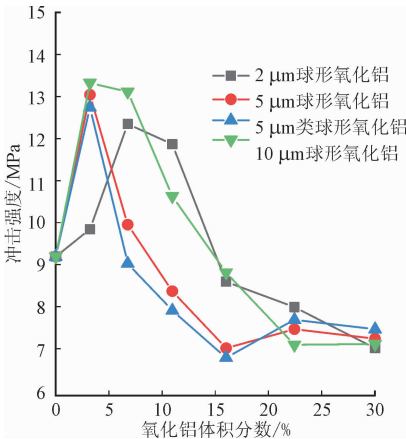


图 5 环氧树脂复合材料冲击强度随填料体积分数变化趋势图

Fig.5 Variation of impact strength of epoxy composites with content and size of alumina particles

伸强度与断裂伸长率均高于其他的,其拉伸强度比 2 μm 填料和 10 μm 填料的分别高了 11.47% 与 6.75%。可以看出,氧化铝填料粒径适中时,更有利于提升环氧树脂复合材料的力学性能。

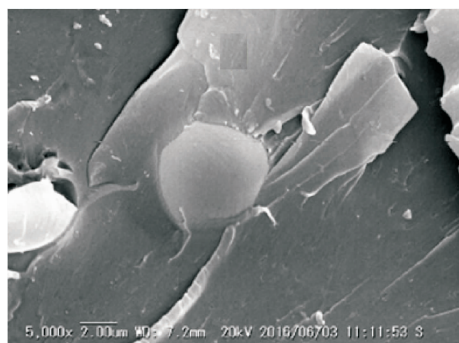
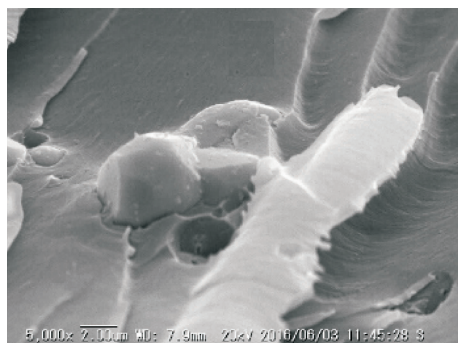
表 2 环氧树脂复合材料拉伸性能

Table 2 Tensile properties of epoxy resin composites

填料种类	拉伸强度 /MPa	断裂伸长 率/%	弹性模量 /MPa
2 μm 球形氧化铝	69.63	6.02	1 583.97
5 μm 球形氧化铝	77.62	7.19	1 643.51
5 μm 类球形氧化铝	72.17	6.52	1 587.31
10 μm 球形氧化铝	72.71	6.25	1 650.03

由图 6a 可以看出,5 μm 氧化铝颗粒不但在环氧树脂中分散较好,且粒子能够被紧密的包裹,有的甚至能够完全阻挡裂纹的继续扩展。另外,填料对环氧树脂基体有吸附的作用,包括物理吸附与化学吸附,因而在填料与基体之间存在界面层。复合材料在受到力的作用时,这个界面层对裂纹的继续增长可以起到缓冲或者抑制的作用,从而表现出良好的力学性能。

当填料颗粒较小,氧化铝对裂纹扩展的抑制能力较弱,如图 6b 所示;当氧化铝填料粒径较大时,如图 6c 所示,在同样倍数的扫描电镜可以看出,10 μm 氧化铝在环氧树脂填充后界面有一定的缺陷,拉伸端口出现较大的裂纹,难以利用环氧树脂基体与氧化铝填料之间的相互作用来提升复合材料的韧性,所以较大粒径氧化铝填料复合材料的机械性能有所下降。

(a) 含 5 μm 球形氧化铝

(b) 类球形氧化铝

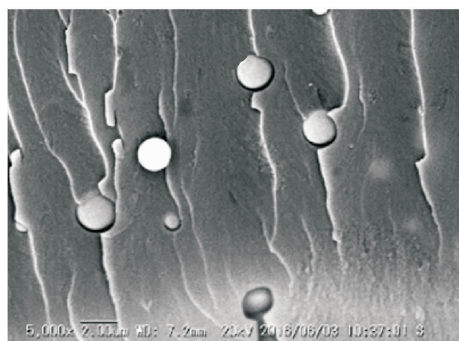
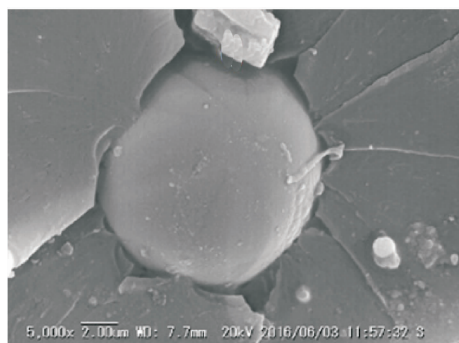
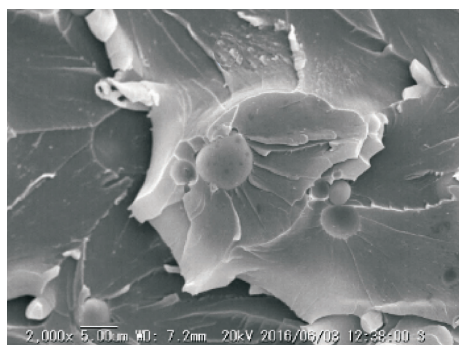
(b) 含 2 μm 球形氧化铝(c) 含 10 μm 球形氧化铝

图6 不同粒径环氧树脂复合材料拉伸断面 SEM 图

Fig. 6 SEM images of fracture surface of the epoxy composites with different particle



(a) 球形氧化铝

图7 不同形态环氧树脂复合材料拉伸断面 SEM 图

Fig. 7 SEM images of fracture surface of the epoxy with different morphology

通过表2中相同粒径不同形态氧化铝填料的环氧树脂复合材料的拉伸性能可以发现,含球形氧化铝填料的复合材料的拉伸强度与断裂伸长率均高于含类球形氧化铝填料的,其中,含球形氧化铝填料的复合材料的拉伸强度比含类球形填料的高出7.55%。由此可见,填料形态为球形时,更有利于提升环氧树脂复合材料的力学性能。

如图7所示,相比于类球形氧化铝,球形氧化铝表面较为光滑,没有棱角,而类球形氧化铝的表面更为不规则,其与基础树脂结合的界面上更容易发生应力集中,同时球形粒子的比表面积较小,填料的表面能较小,在浇注时黏度较小,更加有利于氧化铝颗粒在环氧树脂内均匀分散,因此球形填料相比于类球形填料能更好地提高环氧树脂浇注件的力学性能。

3 结 论

本文选用双酚A型环氧树脂作为基础树脂,甲基四氢苯酞作固化剂,DBU作促进剂,研究了氧化铝填料含量、粒径以及形态对环氧树脂复合材料力学性能的影响,得到以下结论。

(1)环氧树脂复合材料的力学性能随氧化铝填料体积分数的增加先增大后减小,当氧化铝含量较低时,其在环氧树脂内分散性较好,氧化铝颗粒可以被环氧树脂较好地包裹;当受到外应力时,氧化铝可以在周围可以形成银纹,可以起到吸收外力的效果,提升了其力学性能;当填料为5 μm 球形氧化铝且填料体积分数为3.22%时,环氧树脂复合材料的力学性能总体达到最佳,复合材料的拉伸强度、断裂伸长率和冲击强度分别达到77.62 MPa、7.19%和13.92 kJ/m²,较纯环氧树脂分别提升了30.48%、45.25%和44.10%。

(2)对于不同粒径的球形氧化铝填料,填料粒径适中较好,5 μm 球形氧化铝对复合材料力学性能的提升高于 2 μm 球形氧化铝与 10 μm 球形氧化铝。但总体来说,氧化铝填料的粒径对复合材料力学性能的影响不显著。

(3)对于不同形态的氧化铝填料,球形氧化铝对复合材料的提升较好,因为球形氧化铝的界面性能较好,减少了由于界面缺陷对复合材料力学性能的影响。

参考文献:

- [1] 曹文斌. 环氧树脂绝缘件在电力设备中的应用 [J]. 电气制造, 2009, 12(4): 28-29.
- [2] CHAND N, NIGRAWAL A. Development and electrical conductivity behavior of copper-powder-filled-epoxy graded composites [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2008, 109(4): 2384-2387.
- [3] 沈威, 李德军, 史西乐, 等. 环氧树脂绝缘件在 GIS 中的应用和试验 [C] // 2012 输变电年会论文集. [2016-03-04]. <http://el.csee.org.cn/detail/366605F9FE6F85CAE050007F01005CC5>.
- [4] 卢为, 成永红, 王增彬, 等. 环氧及其复合材料在变压器油中的快脉冲闪络特性 [J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(10): 83-87.
LU Wei, CHENG Yonghong, WANG Zengbin, et al. Flashover property of epoxy resin and epoxy composites under fast pulse in transformer oil [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(10): 83-87.
- [5] CONRADI M, KOCIJAN A, ZORKO M, et al. Damage resistance and anticorrosion properties of nanosilica-filled epoxy-resin composite coatings [J]. Progress in Organic Coatings, 2015, 80: 20-26.
- [6] NIHAL TÜZÜN F, ŞAFAK TUNALIÖĞLU M. The effect of finely-divided fillers on the adhesion strengths of epoxy-based adhesives [J]. Composite Structures, 2015, 121: 296-303.
- [7] VERGE P, TONIAZZO V, RUCH D, et al. Unconventional plasticization threshold for a biobased bisphenol-A epoxy substitution candidate displaying improved adhesion and water-resistance [J]. Industrial Crops and Products, 2014, 55: 180-186.
- [8] 宋盛菊, 杨法杰, 褚庭亮, 等. 环氧树脂增韧方法及增韧剂的研究进展 [J]. 中国印刷与包装研究, 2013, 5(5): 9-24.
SONG Shengju, YANG Fajie, CHU Tingliang, et al. Research progress of epoxy resin toughening method and toughening agent [J]. China Printing and Packaging Study, 2013, 5(5): 9-24.
- [9] 赵江涛, 蒋德意, 周权, 等. 端环氧基丁腈橡胶增韧环氧树脂的力学性能及微观形貌 [J]. 合成橡胶工业, 2015, 38(6): 447-451.
ZHAO Jiangtao, JIANG Deyi, ZHOU Quan, et al. Mechanical properties and morphology of epoxy resin toughened with epoxy-terminated butadiene-acrylonitrile rubber [J]. China Synthetic Rubber Industry, 2015, 38(6): 447-451.
- [10] 贾文品, 周金利, 余木火, 等. 聚醚砜增韧环氧树脂的力学性能及固化体系相分离 [J]. 玻璃钢/复合材料, 2017(3): 5-10.
JIA Wenpin, ZHOU Jinli, YU Muhuo, et al. Mechanical properties and phase separation of epoxy resin toughened by polyether sulfone [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2017(3): 5-10.
- [11] 陈平, 刘胜平, 王德中. 环氧树脂及其应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2011: 1-5.
- [12] 陈允, 何少波, 崔博源, 等. 微纳米氧化铝填料对环氧树脂浇注体系性能的影响 [C] // 中国电机工程学会高电压专业委员会 2015 年学术年会论文集. [2017-09-13]. <http://el.esee.org.cn/detail/366605FA94B185CAE050007F01005CC5>.
- [13] 谢卫刚, 赵东林, 景磊, 等. 石墨烯/环氧树脂复合材料的制备与力学性能 [J]. 高分子材料科学与工程, 2012, 28(9): 129-132.
XIE Weigang, ZHAO Donglin, JING Lei, et al. Preparation and mechanical properties of graphene reinforced epoxy resin matrix composites [J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2012, 28(9): 129-132.
- [14] 刘刚, 张代军, 张晖, 等. 纳米粒子改性环氧树脂及其复合材料力学性能研究 [J]. 材料工程, 2010, 38(1): 47-53.
LIU Gang, ZHANG Daijun, ZHANG Hui, et al. Mechanical properties of nanoparticles modified epoxy matrix and composites [J]. Journal of Materials Engineering, 2010, 38(1): 47-53.
- [15] 杨艳青, 许亮. 球形二氧化硅/环氧树脂复合材料制备与性能表征 [J]. 塑料科技, 2010, 38(2): 74-77.
YANG Yanqing, XU Liang. Preparation and property characterization of spherical silica/epoxy resin composites [J]. Plastics Science and Technology, 2010, 38(2): 74-77.
- [16] 程永奇, 张鹏, 孙友松, 等. 表面处理对碳纤维织物增强环氧树脂复合材料界面及性能的影响 [J]. 高分子材料科学与工程, 2015, 31(5): 66-71.
CHENG Yongqi, ZHANG Peng, SUN Yousong, et

- al. Influence of surface treatment on interface and performance for carbon fabric reinforced epoxy resin composite [J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2015, 31(5): 66-71.
- [17] PENG Wenyi, HUANG Xingyi, YU Jinhong, et al. Electrical and thermophysical properties of epoxy/aluminum nitride nanocomposites: effects of nanoparticle surface modification [J]. *Composites: Part A Applied Science and Manufacturing*, 2010, 41(9): 1201-1209.
- [18] HONG J P, YOON S W, HWANG T S, et al. Interphase control of boron nitride/epoxy composites for high thermal conductivity [J]. *Korea-Australia Rheology Journal*, 2010, 22(4): 259-264.
- [19] 邓永丽, 樊慧庆, 张洁. 表面改性处理对氧化铝/环氧树脂复合材料力学性能的影响 [J]. *硅酸盐学报*, 2008, 36(9): 1251-1255.
- DENG Yongli, FAN Huiqing, ZHANG Jie. Effect of surface modification on mechanical performances of alumina-dispersed epoxy composites [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2008, 36(9): 1251-1255.
- [20] 鲁先孝, 罗琦, 王兵. 纳米 SiO_2 /环氧树脂复合材料的制备方法与性能关系 [J]. *材料开发与应用*, 2016, 31(6): 80-87.
- LU Xianxiao, LUO Qi, WANG Bing. Relation between the preparation methods of nano-silica/epoxy resin composites and their properties [J]. *Development and Application of Materials*, 2016, 31(6): 80-87.
- (编辑 亢列梅)