

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.12.004

抗静电聚醚醚酮复合材料的研究

唐云峰,周晓东,马辉煌,陈英烜

(华东理工大学,上海市多相结构材料化学工程重点实验室,上海 200237)

摘要:将碳系导电填料掺杂到聚醚醚酮(PEEK)树脂中,通过熔融共混方法制备了 PEEK/膨胀石墨蠕虫(EG), PEEK/炭黑(CB), PEEK/碳纤维(CF), PEEK/EG/CB, PEEK/EG/CB/CF 复合材料,并研究了不同成型加工方法对复合材料制备试样导电性能的影响。结果表明,相比单一尺度导电填料掺杂 PEEK 复合材料,多元碳系导电填料复配掺杂 PEEK 复合材料内部的导电网络更易搭建且稳定。在 PEEK/EG/CB 复合材料模压成型条件下,添加总质量分数为 6.0%~6.5% 的导电填料,可以获得表面电阻为 $10^6 \sim 10^9 \Omega$ 的抗静电板片材;在复合材料注射成型条件下,为了达到抗静电要求,二元导电填料 EG/CB 复配填充总质量分数需达到 17.0%,三元导电填料 EG/CB/CF 复配填充总质量分数需达到 22.0%。添加玻璃纤维(GF)提高复合材料的力学性能,添加 GF 对 PEEK/EG/CB 和 PEEK/EG/CB/CF 复合材料的表面电阻均未产生明显影响,适量添加 GF 可得到抗静电与力学性能兼优的复合材料。

关键词:抗静电;聚醚醚酮;复合材料;碳系填料;电学性能;力学性能

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)12-0020-07

Research on Antistatic PEEK Composites

Tang Yunfeng, Zhou Xiaodong, Ma Huihuang, Chen Yingxuan

(Shanghai Key Laboratory of Chemical Engineering for Multiphase Structural Materials,
East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract : The carbon-based conductive fillers were doped into polyether ether ketone (PEEK) resin by melt blending, and PEEK/expanded graphite worm (EG), PEEK/carbon black (CB), PEEK/carbon fiber (CF), PEEK/EG/CB, PEEK/EG/CB/CF composites were prepared, and the influences of different molding processing methods on the conductive properties of the composite samples were studied. The results show that, compared with single-scale conductive filler-doped PEEK composite, the internal conductive network of multi-element carbon-based conductive fillers compound-doped PEEK composite is easier to build and stable. Under the conditions of PEEK/EG/CB composite compression molding, adding conductive fillers with a total mass fraction of 6.0% – 6.5%, an antistatic sheet with a surface resistance of $10^6 \sim 10^9 \Omega$ can be obtained. Under the conditions of composite injection molding, in order to meet the antistatic requirements, the total mass fraction of binary conductive filler EG/CB filling compound needs to reach 17.0%, and the total mass fraction of ternary conductive filler EG/CB/CF filling compound needs to reach 22.0%. The glass fiber (GF) is added to enhance the mechanical properties of the composite. Adding GF has no significant effects on the surface resistance of PEEK/EG/CB and PEEK/EG/CB/CF composites. Adding GF in a proper amount can obtain the composite with excellent antistatic and mechanical properties.

Keywords : antistatic ; polyether ether ketone ; composite ; carbon-based filler ; electrical property ; mechanical property

聚醚醚酮(PEEK)是主链结构中含有一个酮键和两个醚键的重复单元所构成的线型芳香族高聚

物,是 20 世纪 70 年代由英国开发出的一种新型半结晶、热塑性特种工程塑料^[1]。因其极其出色的物

通信作者:周晓东,博士生导师,教授,主要从事热塑性聚合物复合材料的制备与成型技术、多相多组分聚合物材料界面设计与控制、生物资源高分子材料高性能化和实用化技术等方面的研究

收稿日期: 2021-09-11

引用格式:唐云峰,周晓东,马辉煌,等. 抗静电聚醚醚酮复合材料的研究[J]. 工程塑料应用, 2021, 49(12): 20–26.

Tang Yunfeng, Zhou Xiaodong, Ma Huihuang, et al. Research on antistatic PEEK composites[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(12): 20–26.

理、化学、力学及热性能,自问世以来就一直被当作一种战略性国防军工材料,同时凭借其良好的可焊接性、可循环利用性、耐化学腐蚀性^[2-3],特别是短时间内就可加工成型等特点,近年来在汽车、电子、建筑、航空等工业领域也迅速崛起^[4-7]。

导电高分子材料按其制造方法可分为结构型和复合型两大类。前者又称为本征导电高分子材料,是指材料分子结构本身具有导电性的高分子材料;后者是以高分子材料为基体,通过添加掺杂各种导电材料,经混合、分散而成型制得的具有导电特性的复合材料。复合型导电高分子材料中所添加的导电材料有两类:一类是抗静电剂^[8],另一类是导电填料^[9]。传统高分子塑料的导电改性皆以掺杂导电填料为主要手段,其中当属碳系导电填料应用最为广泛。然而传统高分子塑料的导电改性往往都存在以下几点问题^[10]:一是导电填料在制品中易团聚,难以分散均匀,进而导致不同位置的电导率分布不一致;二是导电填料、增强体所需用量较高且与树脂基体的相容性较差,粘结性不好,导致成型后制品的力学性能下降。

万长宇^[11]、吴立豪等^[12]采用模压成型制备 PEEK/炭黑(CB)、PEEK/碳纤维(CF)和 PEEK/玻纤(GF)/碳纳米管(CNTs)抗静电复合材料,研究了填料种类及混合工艺对复合材料力学性能、电性能、导热性能和耐摩擦性能的影响。结果表明,在 PEEK/CB 复合材料中,当 CB 质量分数为 3%~5% 时,较低的 CB 含量确保了复合材料优异的力学性能;在 PEEK/CF 复合材料中,CF 的渗透区质量分数为 15%~20%,当 CF 质量分数为 20% 时,复合材料的表面电阻率为 $6.53 \times 10^8 \Omega$ 。高聪^[13]以 PEEK 和热塑性聚酰亚胺(TPI)共混合金构建“双逾渗现象”为思路,分别采用多壁碳纳米管(MWCNTs)和 CB 作为导电填料,制备了 PEEK/TPI/MWCNTs 和 PEEK/TPI/CB 两种三元复合材料体系。分别研究了 MWCNTs 和 CB 用量对复合材料性能的影响,当 PEEK:TPI=50:50 时,复合材料可以形成双逾渗结构,电导率最高;PEEK/TPI/MWCNTs 复合材料的逾渗阈值为 0.6%(质量分数),PEEK/TPI/CB 三元复合材料的逾渗阈值为 5%(质量分数);当 CB 质量分数为 12.5% 时,三元复合材料的电导率达到 $5.33 \times 10^{-1} \text{ S/m}$ 。侯月娇^[14]利用热压成型和注射成型方式,向 PEEK 中添加电性能优异的 MWCNTs,制备了 PEEK/

MWCNTs 复合材料。通过控制导电填料填充含量,研究发现,随着 MWCNTs 含量的增加,表面电阻减小。同时对 MWCNT 进行羟基化和羧基化改性处理,当 MWCNTs 质量分数达 4% 时,PEEK/羟基化改性 MWCNTs (MWCNTs-OH) 复合材料的表面电阻达 $3.21 \times 10^8 \Omega$,可应用于抗静电材料领域;PEEK/羧基化改性 MWCNTs (MWCNTs-COOH) 复合材料表面电阻达 $2.07 \times 10^5 \Omega$,可应用于导电材料领域。申维新^[15]以经聚醚砜(PES)表面活化改性的连续碳纤维(CCF)制备 PEEK/CCF 复合材料,研究了 PEEK/CCF 复合材料的制备工艺方法对其性能的影响。研究结果表明,当填充质量分数 16% 的 CCF 时,复合材料的表面电阻降低到 $10^7 \sim 10^8 \Omega$;当填充质量分数 30% 的 CCF 时,复合材料的拉伸强度、弯曲强度和冲击强度分别提高到 236.2 MPa, 345.1 MPa 和 12.3 kJ/m²。

笔者通过直接熔融共混和注射成型的方法,采用便于工业化大规模生产的膨胀石墨蠕虫(EG),CB 和 CF 掺杂 PEEK,制备了抗静电 PEEK 复合材料^[16-17],分析了复合材料的电学性能、力学性能和微观结构,解决了绝缘 PEEK 材料在使用过程中易静电积聚、产生电磁噪声进而引起电子电路故障,严重危害工业生产及人身安全甚至引起爆炸等问题,完善了国内在 PEEK 材料抗静电研究领域多局限于热压成型实验小试而鲜有工业放大、量产使用的空缺,在航空航天、电子电路、5G、新能源及生物传感等领域具有十分深远的意义。

1 实验部分

1.1 主要原料

EG: 5.5 μm (2500 目),市售;

CB: VXC-72 和 BLACK PEARLS 2000,按质量比 2:1 比例复配使用,美国卡博特公司;

CF: CT80,欧若拉复合材料(深圳)有限公司;

玻璃纤维(GF): ECS 309A-3-H,重庆国际复合材料有限公司;

偶联润滑剂: YY-703A,广州源泰合成材料有限公司;

PEEK: 550P,吉林省中研高分子材料股份有限公司。

1.2 主要仪器与设备

双螺杆挤出机: SHJ-20 型,南京杰恩特机电有限公司;

卧式注塑机: HXL65-W5 型,宁波海雄塑料机

械有限公司;

平板硫化机:QLB-25D/Q型,无锡市中凯橡塑机械有限公司;

高速粉碎机:4500Y型,永康市铂欧五金制品有限公司;

电热恒温鼓风干燥箱:DHG-9030A型,上海一恒科学仪器有限公司;

表面电阻测试仪:VC385型,深圳市驿生胜利科技有限公司;

数字绝缘电阻测试仪:PC40B型,上海安标电子有限公司;

层压和注塑模具:自制;

电子万能材料试验机:CMT4204型,深圳市新三思材料检测有限公司;

场发射扫描电子显微镜(FESEM):Nova Nano SEM 450型,美国FEI公司。

1.3 原材料预处理

将PEEK树脂放入鼓风干燥箱中,于135℃烘干4~6 h,取出,放入高速粉碎机中进行粉碎混合20~30 min,然后将称好的EG, CB及占导电填料添加量0.4%的偶联润滑剂加入到分散均匀的PEEK树脂中,分散10~15 min,停留5~10 min后重复上述操作2~3次,至原料混匀;最后将预处理好的PEEK树脂与GF/CF一同转移至混料桶中混合10~15 min,混合均匀。

1.4 试样制备

将上述预处理好的原料经双螺杆挤出机熔融挤出、水槽退火、切粒、过筛、混匀、烘干,得到PEEK复合材料(母粒),挤出机各加热区段依次为375, 380, 385, 390, 395℃,模头温度为395℃,主机转速为225 r/min、喂料速度为12.5 r/min;采用模压成型(在加工温度为400℃、压力为5 MPa下保温20 min)和注射成型(加热区段温度依次为385, 390, 395℃,射嘴温度为395℃,模温为150℃)方法,分别制得抗静电PEEK复合材料模压试样和注塑试样。所制备的复合材料试样以添加的填料名称及其质量分数来表示,其下标数字为质量分数,如CB₂表示在PEEK中添加质量分数2%的CB制备的复合材料,EG₄CB₂表示在PEEK中添加质量分数4%的EG和2%的CB制备的复合材料,EG₄CB₂CF₁₀表示在PEEK中添加质量分数4%的EG,2%的CB和10%的CF制备的复合材料,EG₈CB₄CF₁₀GF₈表示在PEEK中添加质量分数8%的EG,4%的CB,

10%的CF和8%的GF制备的复合材料。

1.5 性能测试和表征

表面电阻按GB/T 1410-2006测试;

拉伸强度按ISO 527-2012测试;

弯曲强度按ISO 178-2010测试;

用FESEM观察复合材料制备试样表面和断面的微观结构。

2 结果与讨论

2.1 成型加工方法对复合材料表面电阻的影响

填充型抗静电复合材料导电的特点是:复合材料表面电阻随导电填料填充含量的增加不是呈线性下降,而是表现出特有的渗滤现象^[18],即在渗滤区间内,表面电阻的变化极快,而优越稳定的抗静电复合材料要求其表面电阻需满足 $10^6 \sim 10^9 \Omega$ 。图1和图2分别是添加不同质量分数EG/CB的复合材料模压成型和注射成型试样的表面电阻。

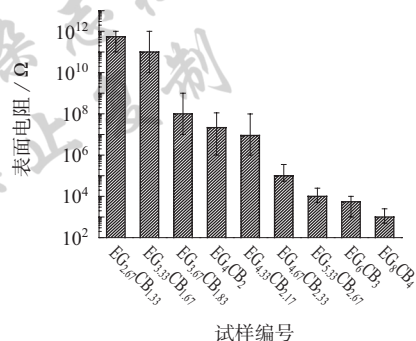


图1 添加不同质量分数EG/CB的复合材料模压成型试样的表面电阻

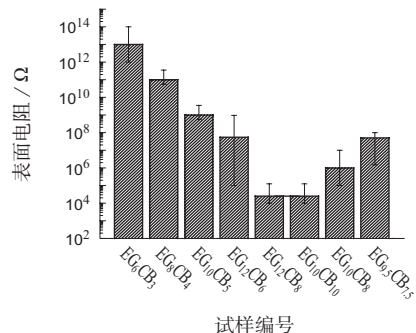


图2 添加不同质量分数EG/CB的复合材料注射成型试样的表面电阻

从图1可以看出,添加质量分数4.0%的EG和2.0%的CB的EG₄CB₂复合材料(导电填料总质量分数为6.0%)及添加质量分数4.33%的EG和2.17%的CB的EG_{4.33}CB_{2.17}复合材料(导电填料总质量分数为6.5%)经模压成型所得试样的表面电阻分别为 $2.14 \times 10^7 \Omega$ 和 $8.93 \times 10^6 \Omega$,完全满足抗静电材料的要求,即在模压成型条件下,导

电填料总质量分数为 6.0%~6.5% 时,制备试样的表面电阻可达到抗静电要求;而其它导电填料含量复合材料制备试样的表面电阻均不满足抗静电要求。从图 2 可以看出,添加质量分数 9.5% 的 EG 和 7.5% 的 CB 的 $EG_{9.5}CB_{7.5}$ 复合材料(导电填料总质量分数为 17.0%)经注射成型所得试样的表面电阻为 $6.83 \times 10^7 \Omega$,为优良的抗静电复合材料,而其它导电填料含量复合材料制备试样的表面电阻均不满足抗静电要求。另外,从图 1 和图 2 还可以看出,添加质量分数 8.0% 的 EG 和 4.0% 的 CB 的 EG_8CB_4 复合材料(导电填料总质量分数为 12.0%)经模压成型所得试样的表面电阻 $\leq 10^3 \Omega$,为导电材料;而添加质量分数 8.0% 的 EG 和 4.0% 的 CB 的 EG_8CB_4 复合材料(导电填料总质量分数为 12.0%)经注射成型所得试样的表面电阻为 $3.29 \times 10^{11} \Omega$,为绝缘材料。上述实验结果表明,导电填料填充复合型导电复合材料的导电特性呈现独特的导电逾渗现象,导电填料的填充含量是决定复合材料电学性能的重要因素,同时不同的成型加工方法对复合材料表面电阻的影响巨大,导电填料总质量分数相同时,经模压成型和注射成型两种不同的加工方法所制得试样的表面电阻相差甚远。注射成型强大的射出推力及特有的流道结构可能导致复合材料树脂基材与导电填料在注塑试样中呈现区域富集现象,PEEK 树脂因其优良的热塑流动特性,更易在注塑试样表面率先富集、包埋导电填料,进而呈现注射成型较模压成型所得试样的表面电阻增大的现象;但相较于模压成型工艺周期较长、效率低等缺陷,注射成型因其大批量生产效率高,可自动化生产结构复杂的产品,更适合于现代工业生产的需求,故后续研究均采用注射成型对材料进行加工。

2.2 导电填料复配对复合材料表面电阻的影响

为了改善复合材料中的树脂基材与导电填料在注塑试样中呈现区域富集的问题,选择引入宏观尺寸与微观形貌及粒径大小不一的导电填料进行复配掺杂。利用不同导电填料在聚物流体加工过程中流变特性差异和微观结构间的协同效应,优化导电填料在空间体积及导电网络上的堆积方式,多尺度地实现优良完善的“导电通路”搭建。

单一导电填料填充复合材料、二元导电填料复配填充复合材料及三元导电填料复配填充复合材料注射成型试样的表面电阻如图 3、图 2 和图 4 所示。

从图 3 可以看出,无论是采用片层形态结构的

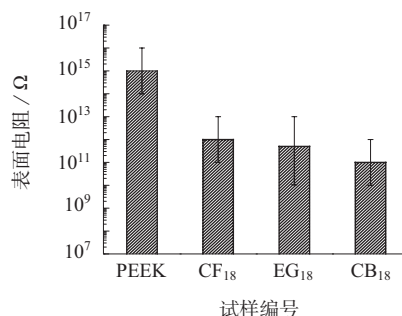


图 3 单一导电填料填充复合材料注射成型试样的表面电阻

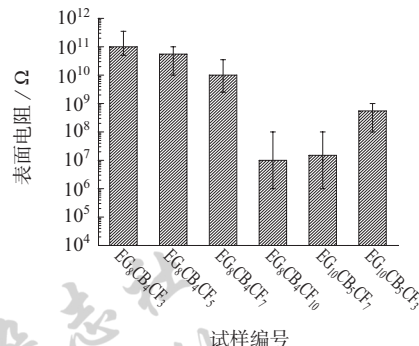


图 4 三元导电填料复配填充复合材料注射成型试样的表面电阻

EG,还是选择纳米颗粒形态结构的CB,亦或是纤维形态结构的CF,即使单一导电填料填充质量分数高达 18.0% 的情况下,也无法抵消导电填料在注塑试样中呈现区域富集的问题,所得复合材料 CF₁₈, EG₁₈ 以及 CB₁₈ 的表面电阻均达不到抗静电要求,难以相互搭接形成导电网络。

从图 2 和图 4 可以看出,相比单一导电填料填充复合材料,二元或三元导电填料复配填充复合材料内部导电网络更易搭建且稳定。二元导电填料复配填充总质量分数为 17.0% 的复合材料 $EG_{9.5}CB_{7.5}$,以及三元导电填料复配填充总质量分数为 22.0% 的复合材料 $EG_8CB_4CF_{10}$ 和 $EG_{10}CB_3CF_7$,制备试样的表面电阻分别为 6.83×10^7 , 1.06×10^7 , $1.51 \times 10^7 \Omega$,均为优良稳定的抗静电材料,即二元或三元导电填料复配填充是改善并解决树脂基材与导电填料在注塑试样中呈现区域富集的有效手段。为了实现复合材料注射成型试样的表面电阻达到抗静电要求,二元导电填料 EG/CB 复配填充总质量分数需达到 17.0%,三元导电填料 EG/CB/CF 复配填充总质量分数需达到 22.0%。

2.3 GF 增强对复合材料表面电阻的影响

在制备复合材料过程中,导电填料的大量使用在改善复合材料表面电阻的同时,也必然导致材料的加工性变差,使得材料的部分力学性能受到损害。为了平衡填料使用对材料力学性能的影响,常常会

通过增强体对材料进行补强。从增强体的强度、用途和成本角度综合考量,目前,在热塑性复合材料增强方面以 GF 增强最为普遍。不同质量分数 GF 增强复合材料注射成型试样的表面电阻如图 5 所示。

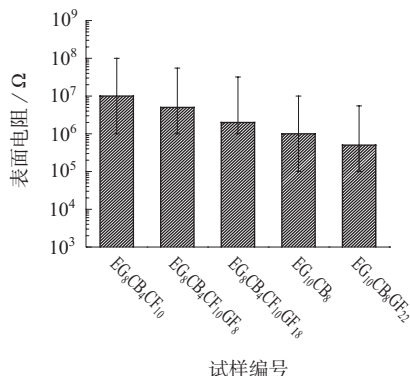


图 5 不同质量分数 GF 增强复合材料注射成型试样的表面电阻

从图 5 可以发现,无论是满足抗静电要求的三元填料复配填充复合材料 EG₈CB₄CF₁₀ (表面电阻为 $6.83 \times 10^7 \Omega$),还是二元填料复配填充复合材料 EG₁₀CB₈ (表面电阻为 $8.96 \times 10^5 \Omega$),添加不同质量分数的 GF 后,复合材料的表面电阻均未产生明显变化。说明增强体 GF 的添加对复合材料的表面电阻的影响不大,即添加 GF 在改善复合材料力学性能的同时,还保留了复合材料优良的表面电阻特性,是非常优异的抗静电改性增强材料。

2.4 导电填料对复合材料力学性能的影响

添加不同导电填料及质量分数的复合材料注射成型试样的拉伸强度和弯曲强度分别如图 6、图 7 所示。

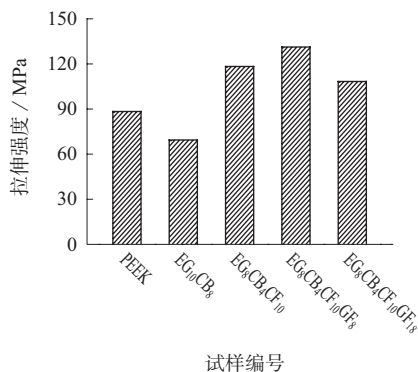


图 6 添加不同导电填料及质量分数的复合材料注射成型试样的拉伸强度

从图 6 和图 7 可以看出,在 PEEK 中添加 EG 和 CB 后,复合材料的拉伸强度和弯曲强度下降,其中拉伸强度下降最为明显,添加质量分数 10.0% 的 EG 和 8.0% 的 CB, EG₁₀CB₈ 复合材料的拉伸强度、弯曲强度分别为 69.42, 141.37 MPa, 相比

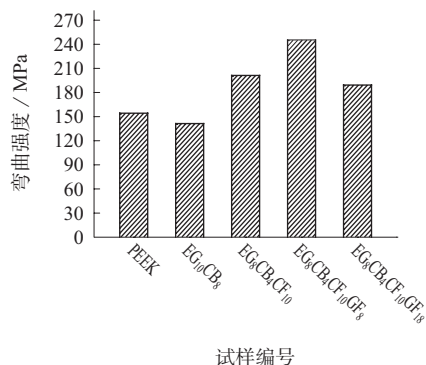


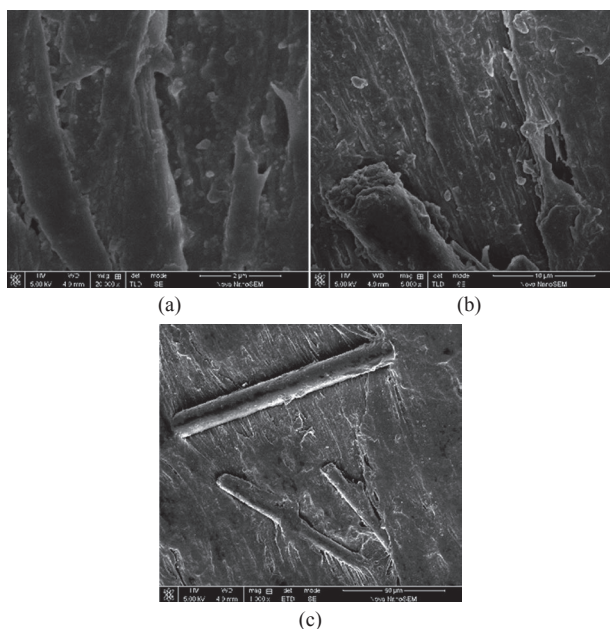
图 7 添加不同导电填料及质量分数的复合材料注射成型试样的弯曲强度

绝缘 PEEK 的拉伸强度 88.36 MPa 和弯曲强度 154.03 MPa 分别降低了 21.4% 和 8.2%。添加质量分数 8.0% 的 EG, 4.0% 的 CB 和 10.0% 的 CF, EG₈CB₄CF₁₀ 复合材料的拉伸强度达到 118.3 MPa, 弯曲强度达到 201.24 MPa; 进一步添加质量分数 8.0% 的 GF, EG₈CB₄CF₁₀GF₈ 复合材料的拉伸强度达到 131.26 MPa, 弯曲强度达到 245.37 MPa; 但随着 GF 填充质量分数的继续增加, EG₈CB₄CF₁₀GF₁₈ 复合材料的力学性能下降。这是由于 GF 在一定填充量条件下能够与 PEEK 树脂基体形成良好的界面粘结, 从而有效传递应力, 提高复合材料的力学性能, 但随着 GF 填充量的进一步增加, 影响填料在 PEEK 树脂基体中分散效果, 以及与 PEEK 树脂基体的粘结, 反而不利于复合材料力学性能的改善。

2.5 复合材料微观形貌分析

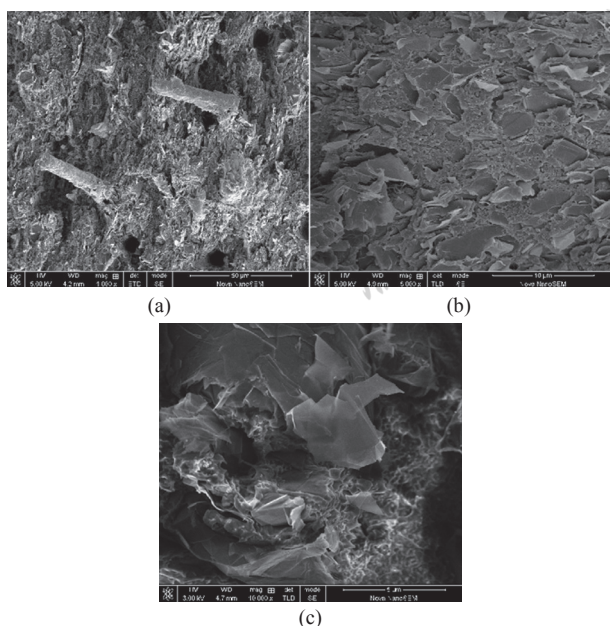
在不同放大倍数下, EG₈CB₄CF₁₀GF₈ 复合材料注射成型试样表面和断面的 FESEM 照片分别如图 8 和图 9 所示。

从图 8 和图 9a 可以发现, 经预处理的导电填料和纤维在 PEEK 树脂中实现了均匀分散并与树脂的良好粘结。从图 8a 和图 8b 可以看到, PEEK 树脂包覆着分散均匀的片层 EG 和颗粒状 CB, 可实现近程接触导电, 并且 PEEK 树脂良好地粘结在纤维表面, 而拥有大长径比的 CF 在 EG 和 CB 之间充当“桥梁”, EG, CB 和 CF 在复合材料中通过协同作用, 实现了空间导电网络结构的高效搭建; 从图 8c 和图 9a 可以看出, 增强纤维均匀分散并粘结在复合材料体系中, 对复合材料的力学性能进行补强。图 9b 和 9c 可以看出, 经高温膨化处理的 EG 在双螺杆挤出机高剪切剥离作用下, 达到了十分优异的纳米片层结构, 同时片层纳米 EG 与纳米颗粒 CB 交错堆叠、良好搭接, 形成了“导电通路”, 为实现导电网络的



a—放大 20 000 倍,喷铂处理; b—放大 5 000 倍,喷铂处理;
c—放大 1 000 倍,喷铂处理

图 8 不同放大倍数下 EG₈CB₄CF₁₀GF₈ 复合材料表面的 FESEM 照片



a—放大 1 000 倍,喷铂处理; b—放大 5 000 倍,喷铂处理;
c—放大 10 000 倍,未喷铂处理

图 9 不同放大倍数下 EG₈CB₄CF₁₀GF₈ 复合材料断面的 FESEM 照片
高效搭建提供了保障。

3 结论

采用螺杆挤出熔融共混方法,制备了一系列性能优良的抗静电 PEEK 复合材料,研究了不同成型加工方法对材料导电性能的影响。结果表明:

(1) 相比单一尺度导电填料掺杂 PEEK 复合材料,多元碳系导电填料复配掺杂 PEEK 复合材料的

内部导电网络更易搭建且稳定。

(2) 不同成型加工方式对复合材料电学性能的影响差异巨大,EG₈CB₄ 复合材料经模压成型所得试样的表面电阻 $\leq 10^3 \Omega$,为导电材料;其经注射成型所得试样的表面电阻为 $3.29 \times 10^{11} \Omega$,为绝缘材料。

(3) EG₄CB₂ 和 EG_{4.33}CB_{2.17} 复合材料经模压成型所得试样的表面电阻分别为 $2.14 \times 10^7 \Omega$ 和 $8.93 \times 10^6 \Omega$,满足抗静电要求,即在模压成型条件下,导电填料总质量分数为 6.0%~6.5% 时,制备试样的表面电阻可达到抗静电要求;EG_{9.5}CB_{7.5}, EG₈CB₄CF₁₀ 和 EG₁₀CB₅CF₇ 复合材料经注射成型所得试样的表面电阻分别为 6.83×10^7 , 1.06×10^7 , $1.51 \times 10^7 \Omega$ 均为优良稳定的抗静电材料,即 PEEK 复合材料注射成型时,二元导电填料 EG/CB 复配填充总质量分数需达到 17.0%,三元导电填料 EG/CB/CF 复配填充总质量分数需达到 22.0%。

(4) 为了获取电学与力学性能兼优的抗静电复合材料,添加 GF 对复合材料进行力学性能增强,添加 GF 对复合材料的电学性能均未产生明显影响,适量添加 GF 可得到抗静电与力学性能兼优的复合材料。

参考文献

- [1] 郝章来,吴丽君. 聚醚醚酮的生产应用及发展前景[J]. 化工新型材料,2004,32(4):43-44,35.
Hao Zhanglai, Wu Lijun. Production, application and development prospect of polyether ether ketone[J]. New Chemical Materials, 2004,32(4):43-44,35.
- [2] Sugimoto T. Monodispersed particles[M]. Amsterdam:Elsevier, 2001:580-731.
- [3] Patel P, Hull T R, Lyon R E, et al. Investigation of the thermal decomposition and flammability of PEEK and its carbon and glass-fibre composites[J]. Polymer Degradation and Stability, 2011, 96:12-22.
- [4] 吴磊. 碳纤维增强聚醚醚酮复合材料的制备工艺及耐磨和导电性研究[J]. 广东化工,2014,41(15):74-75.
Wu Lei. The preparation of carbon fiber reinforced poly(ether ether ketone) composites technology and wear resistance and electric conductivity study[J]. Guangdong Chemical Industry, 2014,41(15):74-75.
- [5] 郭强,田爱国,陈志刚. 高性能工程塑料聚醚醚酮特性和应用的研究[J]. 工程塑料应用,2001,29(12):19-21.
Guo Qiang, Tian Aiguo, Chen Zhigang. Study on the property and engineering application of the engineering plastic peek with high performance[J]. Engineering Plastics Application, 2001,29(12):19-

- 21.
- [6] 吴忠文. 特种工程塑料及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- Wu Zhongwen. Special engineering plastics and their applications[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011.
- [7] 段翔远. 特种工程塑料聚醚醚酮应用进展[J]. 化工新型材料, 2013, 41(5): 183-185.
- Duan Xiangyuan. Application progress of special engineering plastic polyether ether ketone[J]. New Chemical Materials, 2013, 41(5): 183-185.
- [8] 汪晓鹏. 高分子塑料抗静电剂的机理分析和应用[J]. 西部皮革, 2021, 43(11): 29-30, 47.
- Wang Xiaopeng. Mechanism analysis and application of polymer plastic antistatic agent[J]. Western Leather, 2021, 43(11): 29-30, 47.
- [9] 王勇, 黄锐. 炭黑复合导电高分子材料成型加工研究进展[J]. 工程塑料应用, 2003, 31(3): 63-65.
- Wang Yong, Huang Rui. Advance in the research of the molding of carbon black / polymer conductive composite[J]. Engineering Plastics Applications, 2003, 31(3): 63-65.
- [10] 王贵宾, 王洪松, 张淑玲, 等. 聚醚醚酮基复合电磁屏蔽材料及其制备方法: CN102321338A[P]. 2012-01-18.
- Wang Guibin, Wang Hongsong, Zhang Shuling, et al. Polyether ether ketone-based composite electromagnetic shielding material and its preparation method: CN102321338A[P]. 2012-01-18.
- [11] 万长宇. 特种工程塑料 PEEK 抗静电复合材料的制备[J]. 大连: 大连工业大学, 2013.
- Wan Changyu. Study on special engineering plastics PEEK antistatic composites[D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2013.
- [12] 吴立豪, 曲敏杰, 宁洋, 等. PEEK / GF / CNTs 复合材料的制备及性能研究[J]. 塑料科技, 2018, 46(3): 36-39.
- Wu Lihao, Qu Minjie, Ning Yang, et al. Study on preparation and properties of PEEK / GF / CNTs composites[J]. Plastics Science and Technology, 2018, 46(3): 36-39.
- [13] 高聪. 聚醚醚酮 / 聚酰亚胺合金及其导电复合材料的结构与性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- Gao Cong. Structure and properties of poly(ether ether ketone) / polyimide blends and their conductive composites[D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [14] 侯月娇. 聚醚醚酮 / 纳米管复合材料的制备与性能研究[D]. 大连: 大连工业大学, 2017.
- Hou Yuejiao. Preparation and properties of poly ether ether ketone / carbon nanotubes composites[D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2017.
- [15] 申维新. 微纳米碳基 / 聚合物功能复合材料的制备及界面设计[D]. 扬州: 扬州大学, 2021.
- Shen Weixin. Preparation and interface design of micro / nano carbon / polymer functional composites[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2021.
- [16] Papageorgiou D G, Liu Mufeng, Li Zheling, et al. Hybrid poly(ether ether ketone) composites reinforced with a combination of carbon fibres and graphene nanoplatelets[J]. Composites Science and Technology, 2019, 175: 60-68.
- [17] Wang Pan, Ma Ruixue, Wang Yaming, et al. Comparative study of fullerenes and graphene nanoplatelets on the mechanical and thermomechanical properties of poly(ether ether ketone)[J]. Materials Letters, 2019, 249: 180-184.
- [18] de Souza Vieira L, Anjos E G R, Verginio G E A, et al. Carbon-based materials as antistatic agents for the production of antistatic packaging: A review[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2021, 32: 3 929-3 947.

=====

(上接第 19 页)

- tetrapolymers and its modification to ABS resin[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2017, 33(6): 1-6.
- [11] 王旭, 隋智慧, 郭制安, 等. 有机氟、硅改性聚丙烯酸酯无皂乳液的制备[J]. 合成树脂及塑料, 2021, 38(3): 17-23.
- Wang Xu, Sui Zhihui, Guo Zhian, et al. Preparation of organic fluorine-silicone modified polyacrylate soap-free emulsion[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2021, 38(3): 17-23.
- [12] Zhang Le, Wang Youchuan, Cai Xufu. Effect of a novel polysiloxane-containing nitrogen on the thermal stability and flame retardancy of epoxy resins[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2016, 124: 791-798.
- [13] 胡茂明, 严兵. 有机硅改性酚醛树脂合成及应用性能[J]. 工程塑料应用, 2019, 47(4): 30-34.
- Hu Maoming, Yan Bing. Synthesis and application performance of silicone-modified resole resin[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(4): 30-34.
- [14] Essawy H A, El-Sabbagh S H, Hussein A I, et al. Novel poly(vinyl chloride) based thermoplastic elastomers incorporating vinyl-functionalized silicone rubber[J]. Journal of Macromolecular Science, Part A: Pure and Applied Chemistry, 2018, 55(7): 507-512.
- [15] 李俊杰, 王金, 周霆. ABS 材料粘滑现象改善[J]. 工程塑料应用, 2020, 48(8): 41-45.
- Li Junjie, Wang Jin, Zhou Ting. Improvement of stick-slip phenomenon of ABS materials[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(8): 41-45.
- [16] 史彦勇, 任志荣, 熊磊. 交联 PVC 树脂的研究进展[J]. 聚氯乙烯, 2018, 46(3): 8-10.
- Shi Yanyong, Ren Zhirong, Xiong Lei. Research progress of cross-linked PVC resins[J]. Polyvinyl Chloride, 2018, 46(3): 8-10.