

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.08.003

金属化碳纤维对 PC/ABS 电磁屏蔽塑料性能的影响

张欢, 陈杰, 王美发, 郭东朋

(深圳市飞荣达科技股份有限公司, 广东深圳 518132)

摘要: 使用自行研发的碳纤维连续电镀镍生产设备生产镀镍碳纤维(NCF),并用不同用量NCF填充聚碳酸酯/丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料(PC/ABS)合金基材,采用包覆工艺制备PC/ABS电磁屏蔽塑料。研究了NCF用量对电磁屏蔽塑料力学性能、热性能、电性能和电磁屏蔽效能的影响。结果表明,NCF能够在PC/ABS中均匀分散,且两者很好地结合在一起,形成完善的导电网络结构;NCF可以提高电磁屏蔽塑料的力学性能、热性能、导电性能;在NCF质量分数为18%时,电磁屏蔽塑料的综合性能最优,拉伸强度为108.18 MPa,拉伸弹性模量为15 GPa,缺口冲击强度为6.82 kJ/m²,热变形温度为120℃,体积电阻率为 $7.10 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$,屏蔽效能可达到52~72 dB。

关键词: 镀镍碳纤维;电磁屏蔽塑料;力学性能;屏蔽效能

中图分类号: TQ327.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)08-0014-05

Effects of Metallized Carbon Fiber on Performances of PC/ABS Electromagnetic Shielding Plastics

Zhang Huan, Chen Jie, Wang Meifa, Guo Dongpeng

(Shenzhen FRD Science & Technology Co., Ltd., Shenzhen 518132, China)

Abstract: Nickel-plated carbon fiber (NCF) was prepared by self-developed carbon fiber continuous nickel plating production equipment, and polycarbonate/acrylonitrile-butadiene-styrene plastic (PC/ABS) alloy substrates was filled with different contents of NCF. PC/ABS electromagnetic shielding plastics were prepared by coating process. The influences of different contents of NCF on mechanical properties, thermal properties, electrical properties and electromagnetic shielding effectiveness of the electromagnetic shielding plastics were studied. The results show that the NCF can be evenly dispersed in PC/ABS, and the two are well combined together to form a perfect conductive network structure. NCF can improve the mechanical, thermal and electrical properties of the electromagnetic shielding plastics. When the mass fraction of NCF is 18%, the comprehensive performances of the electromagnetic shielding plastics are optimal, the tensile strength is 108.18 MPa and the tensile modulus is 15 GPa, the notched impact strength is 6.82 kJ/m², the thermal deformation temperature is 120℃, the volume resistivity is $7.10 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$, the shielding effectiveness can be up to 52~72 dB.

Keywords: nickel-plated carbon fiber; electromagnetic shielding plastic; mechanical property; shielding effectiveness

电磁屏蔽塑料主要用于电子信息类产品以防止电磁波引起的电磁干扰和电磁兼容。与传统的金属材料相比,电磁屏蔽塑料具有质轻、高强度、抗腐蚀、成本低、易加工等特点。随着人类社会对自身环境健康的要求,这种最先应用于军工领域的材料正式进入人们的生活。

欧美等国家对电磁屏蔽塑料研究和商品开发应用较早,已经形成了较为成熟的产业。而国内在该领域还相对滞后,多数处于研究阶段,没有达到市

场批量应用。王星然等^[1]综述了聚合物/碳系填料发泡复合材料在电磁屏蔽领域应用的研究进展,重点讨论了各种碳系填料[石墨烯、碳纳米管、碳纤维(CF)]以及多组分碳系填料对发泡复合材料电磁屏蔽性能的影响及相关电磁屏蔽原理。于薇等^[2]通过仿真和测试对比验证了等效电路模型的正确性和结论的正确性,并给出了几种不同材料的导电塑料衬垫在100~3 000 MHz下的屏蔽效能。丁祥等^[3]研究了多壁碳纳米管(MWCNT)含量对硬质

通信作者:张欢,硕士,工程师,主要从事导电/导热材料研究

收稿日期:2021-05-05

引用格式:张欢,陈杰,王美发,等.金属化碳纤维对PC/ABS电磁屏蔽塑料性能的影响[J].工程塑料应用,2021,49(8):14-18,42.

Zhang Huan, Chen Jie, Wang Meifa, et al. Effects of metallized carbon fiber on performances of PC/ABS electromagnetic shielding plastics[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(8): 14-18, 42.

聚氨酯泡沫塑料/MWCNT 复合材料的密度、电导率、压缩强度和电磁屏蔽效能的影响。王明等^[4]针对苯并噁嗪(BZ)树脂的工艺特点,利用平板热压工艺制备了BZ/镀镍CF(NCF),BZ/CF,BZ/不锈钢纤维(SSF)三种复合材料试样,研究了该三种复合材料试样的力学性能,并着重考察了10 MHz~1.5 GHz范围内的电磁屏蔽性能与导电性能关系。

随着电子通讯产品向多功能化、小型化和高速化发展,其对电磁材料又提出了新的挑战,要求导电屏蔽材料也要向多功能、高性能等方向发展。从电磁屏蔽塑料的应用研究过程来看,后续的发展趋势主要是在保证综合性能良好的前提下,开发屏蔽效能频带宽的电磁屏蔽塑料,以能够适应电子通讯产品高速发展的需求^[5-6]。

CF经过表面金属化处理后,其导电性能可提高数十倍,是电磁屏蔽塑料理想的填充物。与其它纤维相比,NCF强度大、模量高、密度小,和碳素材料一样具有很好的耐高温、耐腐蚀性,同时具有极好的热、电传导性,阻燃性能良好,热膨胀系数极低,并且还有低辐射线吸收性、非磁性和不磁化,极好的振动阻尼性、抗蠕变和抗疲劳性能及生物相容性^[7-8]。

电磁屏蔽复合材料在民用领域以往更多是应用在电源、充电器、多媒体等方面。为了使其能在手机、电脑等5G领域得到进一步的应用,需将NCF质量分数提高到12%以上,以进一步增强复合材料屏蔽效能,满足更广的应用要求。笔者采用聚碳酸酯(PC)/丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料(ABS)合金为基材、NCF为导电填料,制备一种高屏蔽效能的电磁屏蔽塑料,研究了NCF的用量对电磁屏蔽塑料力学性能、热性能、电性能的影响,同时研究了该电磁屏蔽塑料在30 MHz~18 GHz宽频段范围内的电磁屏蔽效能,以扩大材料的应用范围并为制备高性能电磁屏蔽复合材料提供一定科学依据。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PC/ABS:FR3010,科思创聚合物有限公司;

CF:T300,密度 1.75 g/cm^3 ,直径 $6\sim 8\text{ }\mu\text{m}$,每丝束纤维含12000根单丝,吉林碳素有限公司;

增容剂:KT-2,沈阳科通塑胶科技有限公司;

润滑剂:PETS SC860,上海塑宸新材料有限公司;

抗氧剂:1076/168,上海朗真实业有限公司;

硫酸镍、硫酸镁、硫酸钠、硼酸等电镀用试剂;

分析纯,天津江天化工技术有限公司;

钛酸酯偶联剂:tc-9,安徽泰昌化工有限公司。

1.2 主要仪器与设备

碳纤维连续电镀镍生产设备:自制;

纤维收卷机:定制,江阴市朗昱机械设备有限公司;

精密鼓风干燥箱:KJ-2010A型,东莞市科建检测仪器有限公司;

高速混合机:SHR-10A型,张家港市宏基机械有限公司;

双螺杆挤出机:SHJ-20B型,南京杰恩特机电有限公司;

切粒机:LQ-60型,泰州市科飞橡塑机械有限公司;

注塑机:MA600型,海天塑机集团有限公司;

电子万能试验机:CMT-6503型,美国MTS公司;

数显式简支梁冲击试验机:XCJD-50型,承德市金建检测仪器有限公司;

三架立式热变形维卡软化点温度测定仪:XRW-300B3型,承德市金建检测仪器有限公司;

四探针测试仪:RTS-4型,广州四探针科技有限公司;

场发射扫描电子显微镜(SEM):S4800型,日本HITACHI公司;

屏蔽室:尺寸分别为 $3.5\text{ m}\times 3.0\text{ m}\times 3.0\text{ m}$ 和 $3.5\text{ m}\times 2.46\text{ m}\times 3.0\text{ m}$,美国ETS-LINDGREN公司;

频谱仪:FSV40型,德国ROHDE & SCHWARZ公司;

双锥天线:VUSLP9111B型,德国ROHDE & SCHWARZ公司;

信号源:SMB100A型,德国ROHDE & SCHWARZ公司;

功率放大器:BBA150-A125型,德国ROHDE & SCHWARZ公司。

1.3 试样制备

CF金属化与表面处理:将硫酸镍($200\sim 300\text{ g/L}$)、硫酸镁($30\sim 40\text{ g/L}$)、硫酸钠($10\sim 20\text{ g/L}$)、硼酸($30\sim 35\text{ g/L}$)等按照一定比例配制成混合溶液,装入电镀槽中,再放入CF,在适当条件下(温度 $30\sim 35\text{ }^{\circ}\text{C}$,电流密度 $0.05\sim 0.15\text{ A/dm}^2$,pH $5.0\sim 5.5$)进行电镀,得到NCF。电镀完后先用大量水冲

洗 NCF,再干燥,然后对 NCF 进行表面处理(放入钛酸酯偶联剂中浸泡 20~40 min),最后烘干待用。

电磁屏蔽塑料制备:首先,将各种助剂以一定质量分数(增容剂 1%~10%,润滑剂 1%~10%,抗氧剂 0.1%~1%)与 PC/ABS 充分混合;然后,将混合好的 PC/ABS 粒料从挤出机主料口加入,将 NCF 从侧加料口加入;采用包覆法,将 PC/ABS 以包覆在 NCF 表面的形式从出料口挤出,挤出温度 200~250℃,螺杆转速 48 r/min;最后将包覆好的电磁屏蔽塑料切成长度适当的粒料。塑料中 NCF 的质量分数分别为 12%,14%,16%,18%,20%。

将粒料注塑加工成标准测试样条,注塑机料筒温度 220~250℃,背压 5~10 MPa,模具温度 70~100℃,预干燥 85℃,干燥时间 4~6 h。

1.4 性能测试与结构表征

拉伸强度和拉伸弹性模量参考 ISO 527-2012 进行测试,样条截面 10 mm×4 mm,拉伸速度 50 mm/min;

缺口冲击强度参考 ASTM D149-2009 进行测试,缺口样条截面 8 mm×4 mm,摆锤能量选择 7.5 J;

热变形温度参考 ISO 75-2013 进行测试,试样厚度 4 mm,载荷选择 1.8 MPa,标准挠度 0.34 mm;

SEM 测试:将样条冲击断面经喷金处理,利用 SEM 在 5 kV 电压下,放大 300 倍进行观察;

体积电阻率参考 ISO 3915-1981 进行测试,试样尺寸为 70 mm×10 mm×3 mm;

电磁屏蔽效能参考 MIL-DTL-83528F-2001 进行测试,测试系统包括频谱仪、对数周期天线、双锥天线、喇叭天线、信号源、功率放大器、前置放大器等设备,试样直径 115 mm,厚度 1.2 mm,测试频率 30 MHz~18 GHz,校准测试留出整个测试窗口,窗口尺寸为 600 mm×600 mm,测试照片见图 1。屏蔽效能^[9](单位为 dB)是在同一激励电平下,无屏蔽材料时接收到的功率(P_0 ,单位为 W)与有屏蔽材料时接收到的功率(P_1 ,单位为 W)之比,并以对数表示,其计算公式为:屏蔽效能= $10 \times \lg(P_0/P_1)$ 。

2 结果与讨论

2.1 NCF 用量对电磁屏蔽塑料力学性能的影响

图 2 是电磁屏蔽塑料拉伸强度和拉伸弹性模量随 NCF 填料用量增加的变化规律。从图 2 可以看出,NCF 对 PC/ABS 的拉伸强度和拉伸弹性模量有明

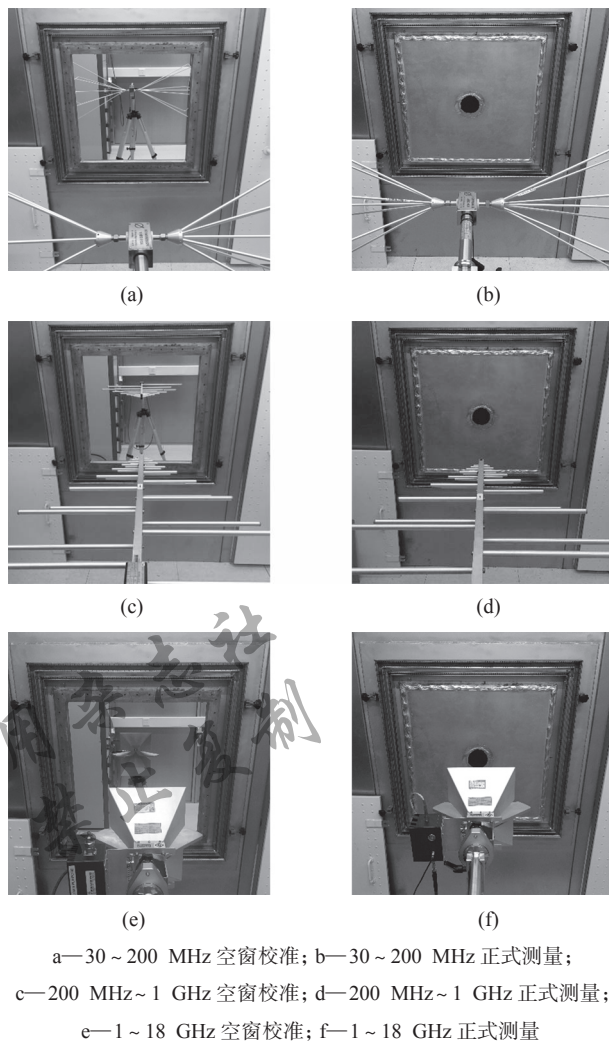


图 1 电磁屏蔽效能测试照片

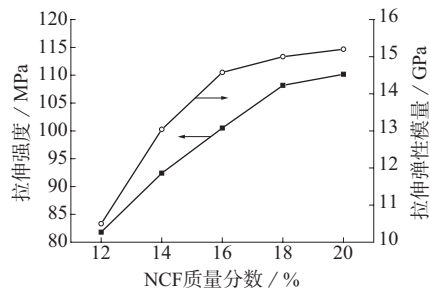


图 2 NCF 不同用量的电磁屏蔽塑料拉伸强度和拉伸弹性模量

显的提升作用,主要是因为 NCF 本身具有极高的强度和模量。当 NCF 质量分数达到 18% 后,电磁屏蔽塑料的强度和模量升高幅度缓慢,此时拉伸强度为 108.18 MPa,拉伸弹性模量为 15 GPa。

图 3 是电磁屏蔽塑料缺口冲击强度随 NCF 填料用量增加的变化规律。从图 3 可以看出,随着填料用量的增加,缺口冲击强度经历了先增大后减小的过程,在 NCF 质量分数为 18% 时达到最大值 6.82 kJ/m²。缺口冲击强度的提高,主要是由于

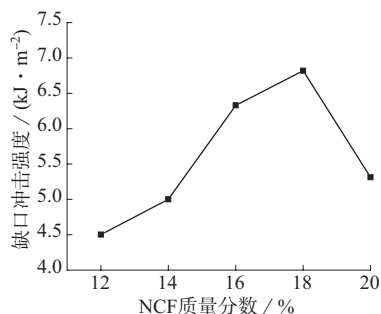


图3 NCF不同用量的电磁屏蔽塑料缺口冲击强度

NCF与基体材料之间有很好的界面相容性,形成紧密、疏松相间的两相结构,这种两相结构有利于应力的分散,冲击韧性得以提高,在受到冲击断裂的过程中,NCF的断裂和拔出吸收了大部分冲击能量^[10]。而当NCF质量分数达到20%时,缺口冲击强度迅速下降,可能是由于材料在受到冲击时,大量纤维断裂和抽出的同时在其附近引发裂纹,而裂纹继续向旁边的纤维和基体扩展并无法得到有效的制止^[11]。

2.2 NCF用量对电磁屏蔽塑料热性能的影响

图4是NCF不同用量下电磁屏蔽塑料的热变形温度测试结果。从图4可以看出,随着NCF用量的增加,电磁屏蔽塑料热变形温度逐渐升高。这是因为NCF有很高的耐高温性能,可以明显提高复合材料的使用温度。根据电磁屏蔽级塑料的实际应用场景要求,通常热变形温度 $\geq 115^{\circ}\text{C}$ 即为合格,当NCF质量分数为18%时,电磁屏蔽塑料热变形温度达到 120°C 。

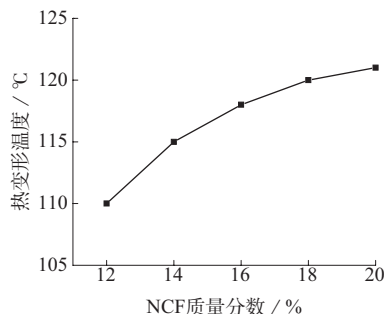


图4 NCF不同用量的电磁屏蔽塑料热变形温度

2.3 NCF用量对电磁屏蔽塑料电性能的影响

表1是NCF不同用量下电磁屏蔽塑料体积电阻率的测试结果。

表1 NCF不同用量的电磁屏蔽塑料体积电阻率 $\Omega \cdot \text{cm}$

NCF质量分数 / %	体积电阻率
12	1.77
14	4.41×10^{-1}
16	1.08×10^{-2}
18	7.10×10^{-3}
20	6.80×10^{-3}

从表1可知,NCF质量分数从12%增加到18%,电磁屏蔽塑料的体积电阻率大幅度降低;但从18%提高到20%时,电磁屏蔽塑料的体积电阻率降低趋势减小至不再有数量级的变化。

这是因为NCF均匀地分布在PC/ABS基体中,纤维相互之间可搭接形成导电网络。根据渗滤理论和量子隧道理论,当NCF的用量高时,对电磁屏蔽塑料的导电性能起主要作用的是纤维之间规整的导电网状结构,而PC/ABS基体对电磁屏蔽塑料的导电性能几乎没有影响,这时NCF的用量和其自身的导电性能决定了电磁屏蔽塑料导电性能的高低^[12-13]。所以当NCF用量增加时,NCF纤维之间的搭接数量越来越多,导电网络结构越来越完整,电子的传递能力越来越强,体积电阻率也就越来越低。当NCF质量分数继续提高到18%时,电磁屏蔽塑料中的导电网络结构已比较完整^[14-15],体积电阻率达到极低的 $7.10 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$;继续提高NCF质量分数到20%,体积电阻率保持在 $10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ 范围内不再降低。可结合NCF不同用量的SEM形貌照片来进一步说明这一现象,如图5所示。

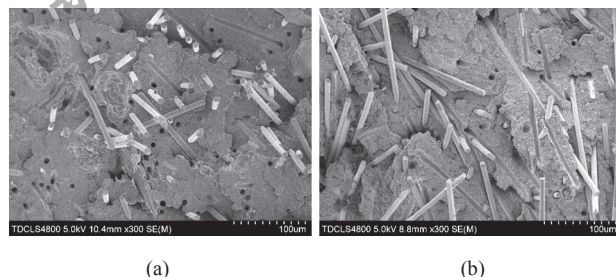


图5 NCF不同用量的电磁屏蔽塑料SEM形貌照片

从图5可以看出,NCF在PC/ABS基体中分布均匀,且紧密地结合在一起,之间没有存在相分离的情况。很可能是因为钛酸酯偶联剂偶联处理起到了较好的增容作用,有效地改善了界面相互作用,提高了复合材料的界面粘合。而且由于NCF含量高,纤维之间相互连接比较多,在复合材料中形成了规整的导电网状结构。特别当NCF质量分数为18%时,导电网络已基本完善,可能达到了该工艺制备电磁屏蔽塑料的一个极限值。

2.4 NCF用量对电磁屏蔽塑料屏蔽效能的影响

图6是电磁屏蔽塑料屏蔽效能随NCF用量增加的变化规律。从图6可以看出,NCF对电磁屏蔽效能的增加作用十分显著,即使在最低含量(质量分数12%)时,屏蔽效能也能达到48~66 dB,可满

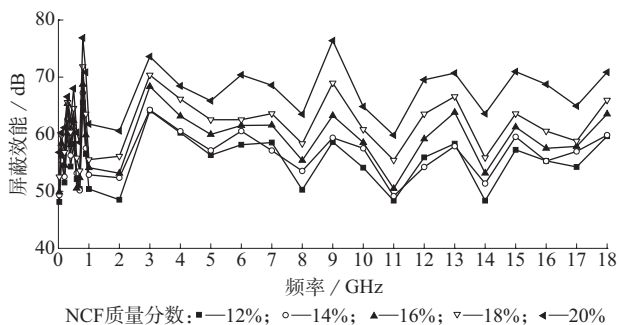


图6 NCF不同用量的电磁屏蔽塑料屏蔽效能

足一般民用电子设备的应用要求。当NCF质量分数为18%时,电磁屏蔽塑料的屏蔽效能得到明显提升,为52~72 dB,当NCF质量分数为20%时,屏蔽效能为57~77 dB。这是因为,一方面NCF含量越高,电磁屏蔽塑料的导电性能越好,屏蔽效能越高;另一方面由于镍本身具有一定的导磁性能,有利于提高复合材料磁导率,进而提高屏蔽效能^[16]。

3 结论

(1) 制备了NCF质量分数为12%,14%,16%,18%,20%的PC/ABS电磁屏蔽塑料,NCF均匀分散在基体材料中,与PC/ABS有很好的界面相容性,形成导电网络结构;NCF填料可以大幅度提高电磁屏蔽塑料的拉伸强度、拉伸弹性模量和冲击韧性,在NCF质量分数为18%时综合力学性能最优,拉伸强度为108.18 MPa,拉伸弹性模量为15 GPa,缺口冲击强度为6.82 kJ/m²。

(2) NCF可以提高电磁屏蔽塑料的热变形温度,当NCF质量分数为18%时,热变形温度为120℃,符合实际应用温度要求。

(3) NCF可以提高电磁屏蔽塑料的导电性能,当NCF质量分数为18%时,体积电阻率达到极低的 $7.10 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$,继续提高NCF用量,体积电阻率保持在 $10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ 范围内不再降低。

(4) NCF改性的PC/ABS电磁屏蔽塑料具有优异的电磁屏蔽性能,在30 MHz~18 GHz的频率范围内,当NCF质量分数为18%时,电磁屏蔽塑料屏蔽效能最高可达到72 dB。

参考文献

- [1] 王星然,王明昊,顿东星,等. 聚合物/碳系填料发泡复合材料电磁屏蔽性能的研究进展[J]. 中国塑料,2020,34(10):110-118.
Wang Xingran, Wang Minghao, Dun Dongxing, et al. Research progress in electromagnetic shielding performance of polymer/carbon fillers foaming composites[J]. China Plastics, 2020, 34(10):110-118.
- [2] 于薇,高林国,孙挺. 基于转移阻抗理论的导电塑料衬垫屏蔽效能研究[J]. 塑料科技,2021,49(2):59-61.
Yu Wei, Gao Linguo, Sun Ting. Study on Shielding effectiveness of conductive plastic liner based on transfer impedance theory[J]. Plastics Science and Technology, 2021, 49(2):59-61.
- [3] 丁祥,吕程,张过有. MWCNT/PUF复合材料的电磁屏蔽效能[J]. 聚氨酯工业,2018,33(01):16-18.
Ding Xiang, Lyu Cheng, Zhang Guoyou. Electromagnetic interference shielding effectiveness of MWCNT/PUF composites[J]. Polyurethane Industry, 2018, 33(1):16-18.
- [4] 王明,郑志才,肖亚超,等. 不同纤维对苯并噁嗪树脂基复合材料电磁屏蔽性能的影响[J]. 工程塑料应用,2019,47(7):124-128.
Wang Ming, Zheng Zhicai, Xiao Yachao, et al. Effects of different fibers on electromagnetic shielding properties of benzoxazine resin matrix composites[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(7):124-128.
- [5] 王丽君,尧银海,鲁云. 碳系填料填充型电磁屏蔽材料的研究进展[J]. 西华大学学报:自然科学版,2020,39(3):90-96.
Wang Lijun, Yao Yin Hai, Lu Yun. Research progress in carbon filler-filled electromagnetic shielding materials[J]. Journal of Xihua University: Natural Science Edition, 2020, 39(3):90-96.
- [6] 孔祥依. 短碳纤维表面化学镀镍及其复合材料屏蔽性能研究[D]. 太原:太原科技大学,2011:45.
Kong Xiangyi. Study on electroless nickel plating on short carbon fiber surface and shielding properties of composites[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2011:45.
- [7] 史航. 复合型导电塑料的制备及性能[D]. 天津:天津大学,2011.
Shi Hang. Preparation and properties of compound conductive plastics[D]. Tianjin: Tianjin University, 2011.
- [8] 王睿,王怡灶,何芳,等. 碳纤维连续镀镍生产工艺及其屏蔽复合材料[J]. 复合材料学报,2010,27(5):19-23.
Wang Rui, Wan Yizao, He Fang, et al. Nickel-plated carbon fiber continuous production process and its shielding composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2010, 27(5):19-23.
- [9] 李秉洋. 聚合物基电磁屏蔽材料的研究现状及进展[J]. 中国新技术新产品,2021(1):52-54.
Li Bingyang. Present situation and progress of polymer based electromagnetic shielding material[J]. China New Technologies and New Products, 2021(1):52-54.
- [10] 张建东,王富强,苏青林,等. 镀镍碳纤维-芳纶纤维增强复合材料性能研究[J]. 高科技纤维与应用,2018,43(2):32-35.
Zhang Jiandong, Wang Fuqiang, Su Qinglin, et al. Research on preparation of the nickel-coated carbon fiber/aramid fiber composites[J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2018, 43(2):32-35.
- [11] 马继源. 连续石英纤维增强磷酸盐聚合物复合材料组织结构与性能[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.
Ma Jiyuan. Microstructure and properties of continuous quartz fiber reinforced phosphate polymer composites[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.

- Wang Zhiguo, Liang Bing, Liu Xuyue. Preparation of phosphorus-nitrogen PDAB-DOPO and its flame retardant epoxy resin[J]. New Chemical Materials, 2018, 46(12):68-72.
- [5] 洪臻, 王长松, 梁兵, 等. 环氧树脂胺类固化剂的研究进展[J]. 化工新型材料, 2014, 42(8):12-15.
- Hong Zhen, Wang Changsong, Liang Bing, et al. Research and development of amine curing agents for epoxy resin[J]. New Chemical Materials, 2014, 42(8):12-15.
- [6] 白向鸽, 陈连喜, 黄世帅. 阻燃型胺类环氧树脂固化剂的研究进展[J]. 粘接, 2011(5):73-76.
- Bai Xiangge, Chen Lianxi, Huang Shishuai. Recent developments on flame retarded amines curing agents of epoxy resin[J]. Adhesion, 2011(5):73-76.
- [7] 李谷才, 李桂林, 刘小娟, 等. DOPO 型环氧树脂用阻燃剂的合成与应用[J]. 精细化工, 2015, 32(7):789-793.
- Li Gucai, Li Guilin, Liu Xiaojuan, et al. Synthesis and application of DOPO type flame retardants for epoxy resin[J]. Fine Chemicals, 2015, 32(7):789-793.
- [8] 罗琴琴, 孙玉林. DOPO 钠盐官能化 LDH 的制备及其阻燃环氧树脂性能[J]. 功能材料, 2019, 42(2):10208-10213.
- Luo Qinqin, Sun Yulin. Preparation of DOPO-based sodium salt functionalized LDH and its application in flame retarding epoxy resins[J]. Journal of Functional Materials, 2019, 50(10):10208-10213.
- [9] 曾碧榕, 陈锦梅, 胡蓉, 等. 低聚倍半硅氧烷基铁络合物阻燃剂的合成及改性环氧树脂[J]. 高分子材料科学与工程, 2019, 35(6):1-9.
- Zeng Birong, Chen Jinmei, Hu Rong, et al. Synthesis of oligosilsesquioxane-based iron complex flame retardant and its modified epoxy resin[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2019, 35(6):1-9.
- [10] 王雅珍, 孙瑜, 肖添远, 等. 高分子材料 DOPO 基阻燃剂研究进展[J]. 中国塑料, 2018, 32(8):7-13.
- Wang Yazhen, Sun Yu, Xiao Tianyuan, et al. Research progress in DOPO-based flame retardants for polymers[J]. China Plastics, 2018, 32(8):7-13.
- [11] 吴传芬, 陈文静, 吴东森, 等. DOPO 型无卤阻燃环氧树脂体系的性能研究[J]. 工程塑料应用, 2014, 42(2):25-29.
- Wu Chuanfen, Chen Wenjing, Wu Dongsen, et al. Properties of DOPO type halogen-free flame retardant epoxy resin system[J]. Engineering Plastics Application, 2014, 42(2):25-29.
- [12] 江民文, 尹晨辉, 李胜, 等. 环三磷腈-DOPO 大分子阻燃剂的合成及阻燃环氧树脂性能[J]. 高等学校化学学报, 2019, 40(12):2615-2622.
- Jiang Minwen, Yin Chenhui, Li Sheng, et al. Synthesis of DOPO-based cyclotriphosphazene macromolecule flame retardant and its performance in flame-retarded epoxy resin[J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2019, 40(12):2615-2622.
- [13] 卢林刚, 陈英辉, 赵瑾, 等. DOPOMPC-APP-MWCNTs 协同阻燃环氧树脂的制备[J]. 复合材料学报, 2015, 32(1):101-107.
- Lu Lingang, Chen Yinghui, Zhao Jin, et al. Preparation of DOPOMPC-APP-MWCNTs intumescent flame-retardant epoxy resin[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015, 32(1):101-107.
- [14] 黄健光, 姜佳丽, 农彦彦, 等. DOPO 和含磷固化剂协同阻燃 EP 性能[J]. 工程塑料应用, 2020, 48(7):116-120, 131.
- Huang Jiangguang, Jiang Jiali, Nong Yanyan, et al. The Properties of flame retardant EP synergized by DOPO and curing agent containing phosphorus[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(7):116-120, 131.
- [15] Jirasutsakul I, Paosawatyanong B, Bhanthumnavin W. Aromatic phosphorodiamidate curing agent for epoxy resin coating with flame-retarding properties[J]. Progress in Organic Coatings, 2013, 76(12):1738-1746.
- [16] 厉安昕, 毛萍莉, 梁兵. 用于环氧树脂磷-氮阻燃固化剂的合成及应用[J]. 现代塑料加工应用, 2020, 32(1):8-11.
- Li Anxin, Mao Pingli, Liang Bing. Synthesis and application of phosphorus-nitrogen flame retardant curing agent for epoxy resin[J]. Modern Plastics Processing and Applications, 2020, 32(1):8-11.
- [17] 何银通, 梁家琪, 刘鲁斌, 等. 耐水阻燃透明型环氧树脂的制备及其应用研究[J]. 中国塑料, 2021, 35(5):6-10.
- He Yintong, Liang Jiaqi, Liu Lubin, et al. Preparation and applications of water resistant flame retardant transparent epoxy resins[J]. China Plastics, 2021, 35(5):6-10.
- (上接第 18 页)
- [12] 徐伟杰, 陈宏峰, 李言, 等. 导电环氧树脂基电磁屏蔽材料的制备与性能研究[J]. 中国胶粘剂, 2021(3):19-22.
- Xu Weijie, Chen Hongfeng, Li Yan, et al. Preparation and performance of conductive epoxy resin-based electromagnetic shielding material[J]. China Adhesives, 2021(3):19-22.
- [13] 胡文涛. TPU/EVA/PE 复合电缆料的制备及性能测试[J]. 鞋类工艺与设计, 2021(2):23-26.
- Hu Wentao. Preparation and performance test of TPU/EVA/PE composite cable material[J]. Shoes Technology and Design, 2021(2):23-26.
- [14] Greshan R M. EMI/RFI shielding of plastics[J]. Plating and Surface Finishing, 1988(2):63-69.
- [15] Gangopadhyay R, De A. Conducting polymer nanocomposites: A brief overview[J]. Chem Mater, 2002, 12(3):608-622.
- [16] 刘顺华. 电磁波屏蔽及吸波材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007:62-76.
- Liu Shunhua. Electromagnetic shielding and absorbing materials[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007:62-76.