

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.02.001

# PEEK基耐磨导电复合材料

扶肖肖, 宋桂珍, 郭晓君, 吴翔, 杨慧君

(太原理工大学机械与运载工程学院, 太原 030024)

**摘要:**以聚醚醚酮(PEEK)为基础材料,为发挥其优异的耐疲劳性、耐磨性和自润滑性,以期研发一种新型高耐磨导电受电弓滑板复合材料。设计采用PEEK和电解铜粉(微米级)及少量短切碳纤维(CF)等成分,通过干燥-共混-冷压-烧结-冷却的成型工艺制备了不同比例的PEEK/Cu, PEEK/Cu/CF复合材料,并对其摩擦学性能、导电性能、微观结构进行了研究。结果表明,PEEK/Cu复合材料中,随着电解铜粉含量的增加,摩擦系数先减小后增大,磨损量先减小再增加;当电解铜粉含量为50%时,其复合材料的摩擦系数和磨损量均最小;当电解铜粉含量达60%时,该材料的体积电阻率为 $6.05 \times 10^{-5} \Omega \cdot m$ ,表现出良好的导电性。PEEK/Cu/CF复合材料中,当电解铜粉含量大于40%时,随着电解铜粉含量的增加摩擦系数先增大后减小,磨损量先增大后减小;当电解铜粉含量为50%时,其摩擦系数和磨损量均最大;随着电解铜粉含量的增加,其复合材料的体积电阻率逐渐减小后趋于平稳。综合耐磨性和导电性等特性,含50%~55%电解铜粉的PEEK基复合材料可以用作受电弓滑板制作材料,也可望用作航空航天轻质、屏蔽材料。

**关键词:**受电弓滑板;聚醚醚酮改性;电解铜粉;短切碳纤维;摩擦磨损

**中图分类号:** TQ326.5      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-3539(2020)02-0001-05

## PEEK Based Wear-Resistant Conductive Composites

Fu Xiaoxiao, Song Guizhen, Guo Xiaojun, Wu Xiang, Yang Huijun

(College of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract :** Polyetheretherketone (PEEK) was used as the base material to exert its excellent fatigue resistance, wear resistance and self-lubrication to develop a new composite material of high wear-resistant conductive pantograph skateboard. Designed using PEEK, electrolytic copper powder (micron grade) and a small amount of chopped carbon fiber (CF) and other components, through the drying-blending-cold pressing-sintering-cooling molding process, different ratios of PEEK / Cu, PEEK / Cu / CF composites were studied for their tribological properties, electrical conductivity, and microstructure. The results show that as the content of electrolytic copper powder in PEEK / Cu composites increases, the friction coefficient decreases first and then increases, and the amount of wear first decreases and then increases. When the content of electrolytic copper powder is 50%, both the friction coefficient and the amount of wear are the smallest. When the content of electrolytic copper powder reaches 60%, the volume resistivity of material is  $6.05 \times 10^{-5} \Omega \cdot m$ , which shows good electrical conductivity. When the content of electrolytic copper powder is greater than 40% in PEEK / Cu / CF composites, the friction coefficient first increases and then decreases, and the amount of wear increases first and then decreases with the increase of electrolytic copper powder content. When the electrolytic copper powder content is 50%, the friction coefficient and abrasion amount are the largest. As the content of electrolytic copper powder increases, the volume resistivity of the composite material gradually decreases and then stabilizes. Comparing abrasion resistance and electrical conductivity, PEEK-based composite material containing 50%–55% electrolytic copper powder can be used as a pantograph skateboard material, and it is also expected to be used as a lightweight and shielding material for aerospace field.

**Keywords :** pantograph skateboard ; polyetheretherketone modification ; electrolytic copper powder ; chopped carbon fiber ; friction and wear

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51341006), 山西省自然科学基金项目(2013011024-1), 太原理工大学大学生创新创业项目(SD18200009)

**通讯作者:** 宋桂珍, 硕士生导师, 博士, 研究方向为新材料, 机械设计及理论 E-mail : gzh\_s@163.com

**收稿日期:** 2019-12-02

**引用格式:** 扶肖肖, 宋桂珍, 郭晓君, 等. PEEK基耐磨导电复合材料[J]. 工程塑料应用, 2020, 48(2) : 1–5.

Fu Xiaoxiao, Song Guizhen, Guo Xiaojun, et al. PEEK based wear-resistant conductive composites[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(2) : 1–5.

在耐磨导电需求领域大多使用电镀、涂层表面改性铜基材料、铜-碳复合材料、陶瓷增强铜基复合材料、铜合金金属材料等作为耐磨导电材料<sup>[1]</sup>。随着航空航天、轨道交通走向高速化发展,特别是高速铁路等的出现,对耐磨导电材料的摩擦磨损性、导电性、轻量化、寿命和经济性提出了更高的要求。因此研究一种新型高分子基耐磨导电复合材料具有重要的意义。

目前制作的受电弓滑板的材料主要有碳纤维(CF)复合材料滑板,碳金属纤维复合材料滑板,碳-铜复合材料滑板以及钛硅系陶瓷材料滑板<sup>[2-3]</sup>。优质的滑板材料应集中其优异的导电性、耐磨性、耐候性和足够的耐冲击性等性能为一体。高铁受电弓滑板一直采用国外的浸金属碳滑板,但存在耐冲击性能差、出现掉块现象、需经常更换等问题<sup>[4-6]</sup>。树脂基复合材料其性能可控性好,成型工艺简单,经改性研究做理想滑板材料具有很大的潜力。Zhou Feng等<sup>[7]</sup>运用熔渗反应烧结技术制备了一种兼具陶瓷与金属性质的 $\text{Ti}_3\text{SiC}_2/\text{TiC}$ 新型受电弓滑板材料,该材料电阻率、自润滑减摩性及生产工艺等优于碳系滑板材料。Yuan Hua等<sup>[8]</sup>采用改性酚醛树脂,以CF,铜和石墨分别为增强相,导电相和润滑相通过热压工艺制备复合材料,随着CF含量的增加其冲击强度、密度和电阻率降低,体积磨耗和摩擦系数先减小后急剧增加。李金羽等<sup>[9]</sup>通过冷压-烧结制备了电解铜粉填充改性聚四氟乙烯(PTFE)基导电均质复合材料,随着铜粉含量的增加,复合材料内部形成连续的导电织网,表现出良好的导电性。PEEK相比PTFE密度轻、耐冲击强度高、耐候性好、耐磨性好、综合力学性能优异,可用较简单的模压成型工艺成型<sup>[10-11]</sup>。

笔者采用性能优异的PEEK高分子材料和导电性能优异的电解铜粉及具有优异摩擦性能的CF制备一种新型材料,其兼具耐磨性、导电性、质轻等性能。对其复合材料的组分、制备工艺以及摩擦性能、导电性能、外观形貌等进行研究,以期研制一种PEEK基新型导电耐磨材料,为PEEK在耐磨导电、耐磨屏蔽领域应用提供依据。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原料

PEEK粉末: 粒径 $50\text{ }\mu\text{m}$ , 密度 $1.30\text{ g/cm}^3$ , 英国威格斯公司;

电解铜粉: 纯度99.999%, 粒径 $48\text{ }\mu\text{m}$ , 密度

$8.92\text{ g/cm}^3$ , 中国金属冶金研究总院;

短切CF: 长度 $1\sim 3\text{ mm}$ , 直径 $7\text{ }\mu\text{m}$ , 日本东邦公司;

钛酸酯偶联剂201: 分析纯, 东莞市鼎海塑胶化工有限公司。

### 1.2 主要仪器和设备

电热鼓风干燥箱: JC01型, 江苏南通嘉程仪器有限公司;

差示扫描量热(DSC)仪: HSC-2/3/4型, 北京恒久实验设备有限公司;

行星式球磨机: QM-3SP2型, 南京南大仪器有限公司;

手动式液压制样机: SDJ-20T型, 湘潭市仪器仪表有限公司;

快速升温电阻炉: SX3-12-16型, 湘潭市仪器仪表有限公司;

直流低电阻测试仪: TH2512B型, 常州同慧股份有限公司;

多功能摩擦磨损测试仪: CFT-I型, 兰州中科凯华科技开发有限公司;

冷光源视频孔探仪: SD-150型, 徐州科伯光电技术有限公司。

### 1.3 试样制备

考虑到PEEK和电解铜粉的原料状态和性能, 确定采用类似粉末冶金的成型工艺制备该复合材料。

实验前对PEEK粉末进行预处理, 首先对PEEK粉末进行过筛, 使团聚的PEEK分散开, 再放入干燥箱中进行干燥, 设定温度为 $110^\circ\text{C}$ , 时间设定为 $4\text{ h}$ , 然后进行密封包装以实验备用。电解铜粉, 粒径 $48\text{ }\mu\text{m}$ , 纯度高, 规格好, 外观呈均匀浅玫瑰红色, 微观形貌为树枝状, 复杂的几何结构和相对较大的表面粗糙度使其具有更大的比表面积, 特殊的树枝状结构使铜粉颗粒间彼此接触数目明显增加, 填充该铜粉可以最大限度地提高材料导电性<sup>[12]</sup>。CF与PEEK有较好的亲和性, 但CF易团聚, 实验前对CF进行预处理, 以便其在复合材料中均匀分布<sup>[13-15]</sup>。实验前用钛酸酯偶联剂对电解铜粉进行表面处理以改善其与PEEK的界面亲和力, 然后干燥, 密封保存以备用。

将处理过的密封保存的PEEK, 电解铜粉、CF进行称重, 并按一定质量分数进行配比, 配方见表1。

表 1 试样配方

| 编号              | 材料         | 质量比     |
|-----------------|------------|---------|
| 1 <sup>#</sup>  | PEEK/Cu    | 100/0   |
| 2 <sup>#</sup>  | PEEK/Cu    | 60/40   |
| 3 <sup>#</sup>  | PEEK/Cu    | 50/50   |
| 4 <sup>#</sup>  | PEEK/Cu    | 45/55   |
| 5 <sup>#</sup>  | PEEK/Cu    | 40/60   |
| 6 <sup>#</sup>  | PEEK/Cu/CF | 95/0/5  |
| 7 <sup>#</sup>  | PEEK/Cu/CF | 55/40/5 |
| 8 <sup>#</sup>  | PEEK/Cu/CF | 45/50/5 |
| 9 <sup>#</sup>  | PEEK/Cu/CF | 40/55/5 |
| 10 <sup>#</sup> | PEEK/Cu/CF | 35/60/5 |

将按表 1 的配方配制的原料,加入球磨罐中然后夹持在行星式球磨机上,设定混合时间为 12 h,保证各组分材料充分混合均匀。将混合好的配料放入压片机模具中然后放置在手动式液压制样机进行压件,压件时设置压力为 30 MPa,然后保压 2 h,制成  $\varnothing 40$  mm  $\times$  15 mm 的样件。将样件放入到自制烧结模具中,将其放入快速升温电阻炉中进行烧结,通过试验和 DSC 分析确定烧结温度曲线如图 1 所示(烧结温度设定为 310℃)。对烧结完样件进行切割、抛光成不同的规格,备用。

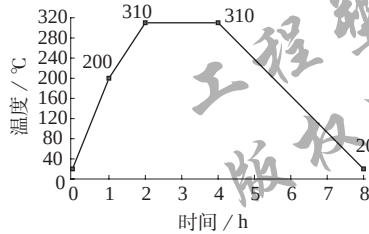


图 1 烧结温度曲线

#### 1.4 测试与表征

对样件进行抛光,然后用无水乙醇对样件表面进行清洁,去除表面杂质。将样件通过夹具夹持在多功能摩擦磨损测试仪对复合材料样件进行摩擦磨损实验,设置摩擦磨损条件为室温下干摩擦磨损,采用旋转摩擦磨损方式,对偶件直径为 5 mm 钢球,材料为 GCr15,旋转速度 500 r/min,磨损半径 4 mm,加载载荷 30 N,摩擦时间 60 min。对其测试摩擦系数、磨损量。

将样件切割成 20 mm  $\times$  10 mm  $\times$  10 mm 的试样,对样件表面做抛光处理,其次用无水乙醇对其进行表面清理,去除表面杂质。在室温下用电阻测试仪对复合材料进行电学性能测试,每个样件的电阻进行多次测量,求平均值,然后利用公式(1)求出其体积电阻率。

$$\rho = R \frac{S}{L} \quad (1)$$

式中: $\rho$ ——体积电阻率,  $\Omega \cdot \text{m}$ ;

$R$ ——电阻,  $\Omega$ ;

$S$ ——测量时样件的横截面积,  $\text{m}^2$ ;

$L$ ——样件的长度,  $\text{m}$ 。

把抛光表面清理过的样件放入到视频孔探针中,得到复合材料外观形貌特征及表面的电解铜粉的颗粒在复合材料中分布图形。

## 2 结果与讨论

### 2.1 摩擦磨损性能

图 2、图 3 是 PEEK/Cu、PEEK/Cu/CF 复合材料在钢球对磨实验过程中的摩擦系数。由图 2 和图 3 可以看出在摩擦的前 15 min,对磨钢球与复合材料表面由点面接触到面接触的过程中摩擦系数逐渐增大;随着摩擦时间的增加,由复合材料的摩擦系数变化波动可以看出,对于 PEEK/Cu 及 PEEK/Cu/CF 复合材料,适量的电解铜粉可以改善复合材料的导热性能,减小磨损过程中摩擦热对摩擦系数的影响。

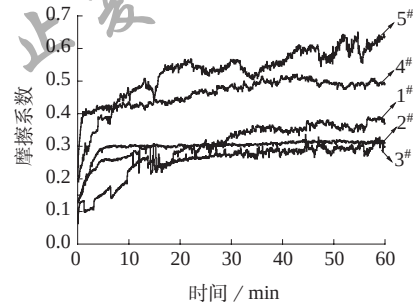


图 2 PEEK/Cu 复合材料对磨过程中的摩擦系数

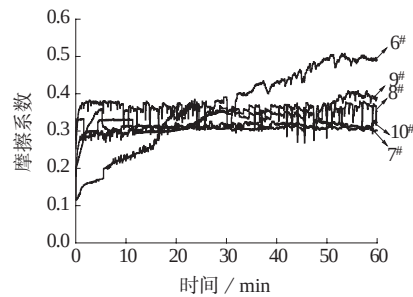


图 3 PEEK/Cu/CF 复合材料对磨过程中的摩擦系数

图 4、图 5 是不同电解铜粉含量的 PEEK/Cu、PEEK/Cu/CF 复合材料的摩擦系数及磨损量。由图 4 可知, PEEK/Cu 复合材料随着电解铜粉含量的增加,其磨损量与摩擦系数的变化趋势一致;当电解铜粉质量分数为 50% 时, PEEK/Cu 复合材料的摩擦系数最低,发生的磨损损失的体积最小,表现出良好的摩擦磨损性能。PEEK/Cu/CF 复合材料中随着电解铜粉含量的增加其摩擦系数先减小再上升最后减小至稳定,磨损量先增大再减小,当电解铜

粉含量为 50% 时, PEEK/Cu/CF 复合材料磨损量最大。当电解铜粉的含量达到一定值时, 复合材料中 CF 的填充降低了 PEEK/Cu 复合材料的摩擦系数, 同时也降低了 PEEK/Cu 的磨损量, 使复合材料表现出很好的摩擦磨损性能。当电解铜粉的含量较低时, 填充 CF 增加了 PEEK/Cu/CF 复合材料的摩擦系数但减小了复合材料的磨损量。

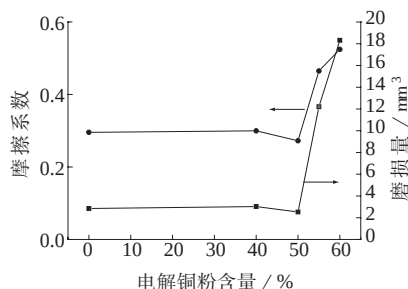


图4 不同电解铜粉含量的 PEEK/Cu 的摩擦磨损性能

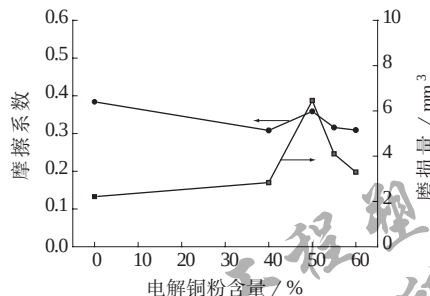


图5 不同电解铜粉含量的 PEEK/Cu/CF 摩擦磨损性能

## 2.2 导电性能

图 6、图 7 分别是不同电解铜粉含量的 PEEK/Cu, PEEK/Cu/CF 复合材料的体积电阻率。由图 6 可以看出, 对于 PEEK/Cu 复合材料, 随着复合材料中电解铜粉比例的增加, 其体积电阻率逐渐减小; 当电解铜粉的含量在 50%~55% 范围内, 其复合材料的体积电阻率变化急剧减小了 3 个数量级; 当电解铜粉的含量达到 60% 时, 复合材料的体积电阻率最小为  $6.05 \times 10^{-5} \Omega \cdot m$ 。由图 7 可以看出, 对于 PEEK/Cu/CF 复合材料, 随着导电填料的增加, 复合材料的体积电阻率逐渐减小; 当电解铜粉的含量达到 40%~50% 范围内, 复合材料的体积电阻率迅速减小, 当电解铜粉含量大于 55% 后, 随着电解铜粉含量的增加, PEEK/Cu/CF 复合材料的电阻率变化趋势较小。通过对比 PEEK/Cu, PEEK/Cu/CF 复合材料的体积电阻率随电解铜粉含量变化可以看出, 当电解铜粉的含量小于 50% 时, CF 的加入降低了该复合材料的体积电阻率, 明显增强了 PEEK/Cu 复合材料的导电性。这是由于 CF 具有良好的导电性, 大的长径比, CF 的填充, 使复合

材料内部形成了密集的导电网络。当电解铜粉含量大于 50% 时, 电解铜粉含量的增加, PEEK/Cu/CF 复合材料的体积电阻率比 PEEK/Cu 复合材料的电阻率大, CF 的填充反而降低了其复合材料的导电性。

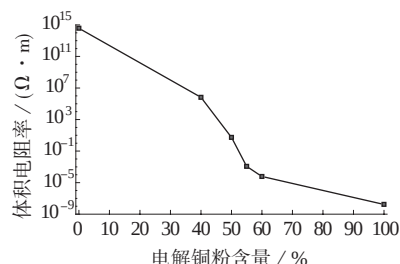


图6 不同电解铜粉含量的 PEEK/Cu 的体积电阻率

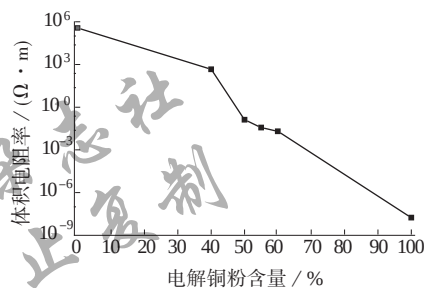


图7 不同电解铜粉含量的 PEEK/Cu/CF 的体积电阻率

## 2.3 复合材料的微观结构表征

图 8 为 PEEK 基复合材料的表面形貌图。由形貌结构深浅差异可知, 随着导电材料含量的增加, PEEK/Cu, PEEK/Cu/CF 中导电填充物彼此接触, 贯通相连, 颗粒之间紧密相接, 复合材料中形成连续的导电网络桥梁从而表现出良好的导电性; CF 在 PEEK/Cu/CF 复合材料内发生团聚, CF 易团聚且具有较大的长径比与比表面积使材料内部结构出现空隙, 导电网络不紧密, 从而导致当电解铜粉的含量达到 50% 时, PEEK/Cu/CF 复合材料的体积电阻率比 PEEK/Cu 复合材料的体积电阻率大。根据渗流理论, 当填充颗粒达到一定值时复合材料中的填充粒子彼此接触形成稳定的导电网络, 复合材料的体积电阻率将发生急剧变化, 表现出良好的电学性能<sup>[16]</sup>。图中显示了随着电解铜粉含量增加, 复合材料内部电解铜粉粒子彼此接触, 足够形成稳定紧密的导电织网, 使绝缘的高分子材料改性成为导体, 符合渗流理论导电机理。

## 3 结论

(1) 烧结温度 310℃ 可以制备稳定的 PEEK/Cu 和 PEEK/Cu/CF 耐磨导电复合材料, 随着电解铜粉含量的增加, 复合材料的摩擦系数与磨损量的变

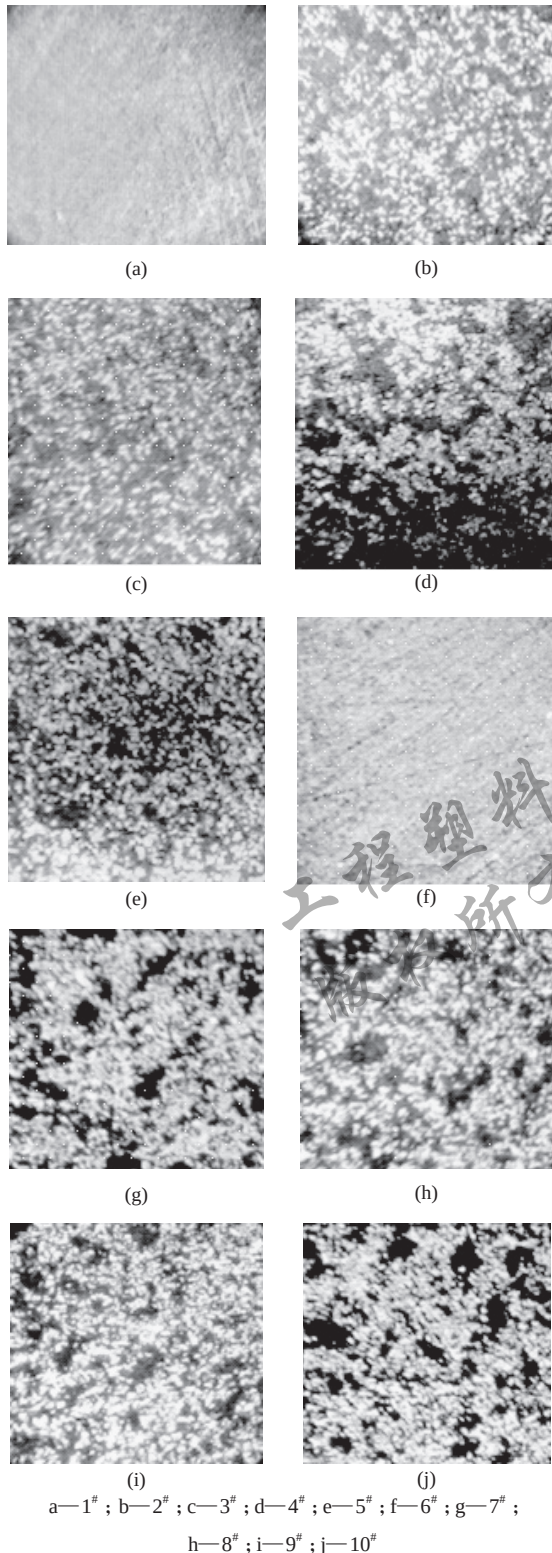


图8 PEEK基复合材料的微观形貌

化趋势基本一致,当电解铜粉含量大于50%,短切CF的填充可以提高其复合材料在干摩擦条件下的摩擦磨损性能。

(2) 在 PEEK 基复合材料中随着电解铜粉的增

加, PEEK/Cu, PEEK/Cu/CF 表现良好的导电性,符合渗流理论学说。当电解铜粉含量小于50%时,CF的填充增加 PEEK/Cu 的导电性,当铜粉含量大于50%时,填充CF导致复合材料内部出现空隙,增加了其体积电阻率,减小了复合材料的导电性能。

(3) 采用冷压-烧结-冷却成型工艺制备 PEEK/Cu, PEEK/Cu/CF 复合材料,通过对复合材料的摩擦学、电学性能的测试,当电解铜粉含量为55%时, PEEK/Cu/CF 复合材料既有良好的摩擦磨损性能又有良好的导电性能。

(4) 该 PEEK 基复合材料可以用作耐磨导电、屏蔽材料。

#### 参考文献

- [1] 奚恒恒,何鹏飞,刘世贵,等. 导电耐磨自润滑涂层的研究现状与展望[J]. 表面技术,2019,48(7):353-363.  
Xi Hengheng, He Pengfei, Liu Shigui, et al. Progress and prospect in the development of conductive wear resistant and self-lubricating coatings[J]. Surface Technology, 2019, 48(7):353-363.
- [2] 罗骥,曹慧钦,贾步超,等. 新型铜基受电弓滑板材料的制备与性能[J]. 复合材料学报,2012,29(2):103-108.  
Luo Ji, Cao Huiqin, Jia Buchao, et al. Preparation and properties of the new type copper matrix pantograph slider[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2012, 29(2):103-108.
- [3] 土屋,广志,彭惠民. C/C 复合材料在受电弓滑板上的应用[J]. 国外机车车辆工艺,2010,35(5):19-22.  
Tu Wu, Guang Zhi, Peng Huimin. Application of C/C compound materials to the slide of pantograph[J]. Foreign Locomotive & Rolling Stock Technology, 2010, 35(5):19-22.
- [4] 杜广林,刘克思,张哲. 降低高速受电弓碳滑板磨耗的技术对策[J]. 中国铁路,2015(2):38-41.  
Du Guanglin, Liu Kesi, Zhang Zhe. Technical countermeasures for reducing abrasion of high-speed pantograph carbon slide[J]. Chinese Railways, 2015(2):38-41.
- [5] 吴广宁,周悦,雷栋,等. 弓网电接触研究进展[J]. 高电压技术,2016,42(11):3495-3506.  
Wu Guangning, Zhou Yue, Lei Dong, et al. Research advances in electric contact between pantograph and catenary[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(11):3495-3506.
- [6] 田茂林. 关于电力机车受电弓滑板的探讨[J]. 神华科技,2018,16(6):77-81.  
Tian Maolin. Discussion about electric locomotive's pantograph pan[J]. Shenhua Science and Technology, 2018, 16(6):77-81.
- [7] Zhou Feng, Xiao Qidan, Wu Shan. Preparation and mechanical properties of  $Ti_3SiC_2/TiC$  synthesized by infiltration sintering[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(25):274-278.

(下转第12页)

- [15] Hernández S, Lei S, Rong W, et al. Functionalization of flat sheet and hollow fiber microfiltration membranes for water applications[J]. *Acs Sustain Chem Eng*, 2015, 4(3):907–918.
- [16] Arthanareeswaran G, Mohan D, Raajenthiren M. Preparation, characterization and performance studies of ultrafiltration membranes with polymeric additive[J]. *J Membr Sci*, 2010, 350(1–2):130–138.
- [17] He Mingrui, Zhang Shiyu, Su Yanlei, et al. Manipulating membrane surface porosity and pore size by in-situ assembly of Pluronic F127 and tannin[J]. *J Membr Sci*, 2018, 556:285–292.
- [18] Jung J T, Kim J F, Wang H H, et al. Understanding the non-solvent induced phase separation (NIPS) effect during the fabrication of microporous PVDF membranes via thermally induced phase separation (TIPS)[J]. *J Membr Sci*, 2016, 514:250–263.
- [19] 徐林, 张欢欢, 石彤非. 非溶剂诱导聚苯乙烯超薄膜去润湿过程中不同有序表面形貌的形成 [J]. *高等学校化学学报*, 2016, 37(1):174–179.
- Xu Lin, Zhang Huanhuan, Shi Tongfei. Morphology evolution of thin polystyrene film during the non-solvent driven dewetting process[J]. *Chemical Research in Chinese Universities*, 2016, 37(1):174–179.
- [20] Zhan Xiaoli, Zhang Guangfa, Chen Xi, et al. Improvement of antifouling and antibacterial properties of poly(ether sulfone) UF membrane by blending with a multifunctional comb copolymer[J]. *Ind Eng Chem Res*, 2015, 54(45):11 312–11 318.
- [21] Fan Xiaochen, Su Yanlei, Zhao Xueting, et al. Manipulating the segregation behavior of polyethylene glycol by hydrogen bonding interaction to endow ultrafiltration membranes with enhanced antifouling performance[J]. *J Membr Sci*, 2016, 499:56–64.
- [22] Zhang Lei, Cui Zhenyu, Hu Mengyang, et al. Microstructure construction of polypropylene-based hollow fiber membranes with bimodal microporous structure for water flux enhancement and rejection performance retention[J]. *Sep Purif Technol*, 2019, 213:328–338.
- [23] Enayatzadeh M, Mohammadi T. Morphology and performance of poly(vinylidene fluoride) flat sheet membranes: Thermodynamic and kinetic aspects[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2018, 135(27). DOI:10.1002/app.46419.
- [24] 郑秋光, 刘海亮, 肖长发. 热致相分离法偏二氯乙烯–氯乙烯共聚物多孔膜的制备及性能 [J]. *高等学校化学学报*, 2019, 40(4):235–242.
- Zheng Qiuguang, Liu Hailiang, Xiao Changfa. Preparation and performance of poly(vinylidene chloride-co-vinyl chloride) porous membranes via thermally induced phase separation[J]. *Chemical Research in Chinese Universities*, 2019, 40(4):235–242.
- [25] Fadaei A, Salimi A, Mirzataheri M. Structural elucidation of morphology and performance of the PVDF / PEG membrane[J]. *J Polym Res*, 2014, 21(9):1–8.

#### (上接第5页)

- [8] Yuan Hua, Wang Chengao, Lu Wenbo, et al. Preparation and tribological behavior of carbon fiber reinforced pantograph slide plate[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 432:378–382.
- [9] 李金羽, 宋桂珍, 程建明, 等. 聚四氟乙烯基导电均质复合材料的研究 [J]. *塑料工业*, 2018, 46(5):162–165.
- Li Jinyu, Song Guizhen, Cheng Jianming, et al. Study on PTFE based conductive homogeneous composites[J]. *China Plastics Industry*, 2018, 46(5):162–165.
- [10] Kalina M, Zalaznika M, Novakb S. Wear and friction behavior of poly-ether-ether-ketone (PEEK) filled with grapheme WS2 and CNT nanoparticles[J]. *Wear*, 2015, 332:855–862.
- [11] 文怀兴, 刘杏, 陈威. 聚醚醚酮复合材料的改性研究及应用进展 [J]. *工程塑料应用*, 2017, 45(1):123–127.
- Wen Huaixing, Liu Xing, Chen Wei. Review on modification research and application of peek composites[J]. *Engineering Plastics Application*, 2017, 45(1):123–127.
- [12] Xu Ruidong, Chang Shiyang, Guo Zhongcheng. Study on process and performance of ultrafine copper powder prepared by electrolytic method[J]. *Electronics Process Technology*, 2006, 27(6):355–358.
- [13] 王雅珍, 张雪泽, 狄语韬. 近年硅烷偶联剂在聚合物改性中的研究进展及应用 [J]. *化工新型材料*, 2018, 46(11):5–7.
- Wang Yazhen, Zhang Xueze, Di Yutao. Research progress and application of silane coupling agent in polymer modification[J]. *New Chemical Materials*, 2018, 46(11):5–7.
- [14] Wang Ying, Yao Rongxing, Yue Tongjian, et al. Surface modification of superfine tourmaline powder with titanate coupling agent[J]. *Colloid and Polymer Science*, 2006, 284(12):1 465–1 470.
- [15] 李红玲, 董斌, 韩延安, 等. 钛酸酯偶联剂的偶联机理及研究进展 [J]. *表面技术*, 2012, 41(4):99–102.
- Li Hongling, Dong Bin, Han Yanan, et al. The coupling mechanism and research progress on titanate coupling agents[J]. *Surface Technology*, 2012, 41(4):99–102.
- [16] Zhou Jingxuan, Sun Haibin, Zheng Xin, et al. Conductive mechanism of particle-filled conductive composites[J]. *Journal of Ceramics*, 2009, 30(3):281–285.