

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.12.008

高性能电容器外包PPS复合材料的制备与性能

文汝红, 郑夏莲

(宜春学院物理科学与工程技术学院, 江西宜春 336000)

摘要: 采用熔融共混法制备了玻璃纤维(GF)增强聚苯硫醚(PPS)复合材料, 研究了各种填料对改性PPS材料性能的影响。结果表明, 当添加PPS (高黏)56 g, PPS (低黏)44 g, 纳米蒙脱土 5 g, 滑石粉 4 g, 乙烯-乙酸乙烯共聚物/苯乙烯-丁烯-苯乙炔嵌段共聚物(EVAC/SEBS) 7.5 g, 针状硅灰石 7.5 g, 八钛酸钾晶须 2.5 g, 抗氧化剂 0.5 g, 玻璃纤维 4.5 g, 偶联剂 0.5 g 时, 改性PPS的综合性能最佳, 其拉伸强度为 260 MPa, 弯曲强度为 475 MPa, 耐高温温度为 400 °C, 抗紫外等级为 40+, 抗电击穿强度从 900 kV/mm 提高到了 1 200 kV/mm, 且保持了其性能的稳定。

关键词: 聚苯硫醚; 薄膜电容器; 击穿强度

中图分类号: TQ32 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)12-0047-05

Preparation and Properties of High Performance Capacitor Wrapped PPS Composite Materials

Wen Ruhong, Zheng Xialian

(Physical Science and Engineering Technology Institute, Yichun College, Yichun 336000, China)

Abstract : Glass fiber (GF) reinforced poly-LRB-p-phenylene sulfide (PPS) composites were prepared by melt blending method. The effect of various fillers on the properties of modified PPS was studied. The results show that PPS (high viscosity) is 56 g, PPS (low viscosity) is 44 g, nano-montmorillonite is 5 g, talc is 4 g, ethylene-vinyl acetate copolymer/styrene-ethylene/butene-styrene block copolymer(EVAC/SEBS) is 7.5 g, acicular wollastonite is 7.5 g, potassium octanoate whisker is 2.5 g, antioxidant is 0.5 g, glass fiber is 4.5 g, coupling agent is 0.5 g, the comprehensive performance of modified PPS is the best. The tensile strength is 260 MPa, the bending strength is 475 MPa, resistance temperature is 400 °C, ultraviolet resistant grade is 40+, resistance to electrical breakdown strength increases from 900 kV/mm to 1 200 kV/mm, and it keeps its performance stable.

Keywords : polyphenylene sulfide ; film capacitor ; breakdown strength

薄膜电容器又称塑料薄膜电容, 以塑料薄膜为电解质。薄膜电容器拥有电击穿性高、耐候性好、体积小却储能大等特点^[1], 占据了电容器高端市场的一片领域。同时, 与传统电容器相比, 在更高的电场环境下, 薄膜电容器以自身的慢速失效机理可以进行正常作业。薄膜电容器有很多种类, 如聚酯(PET)电容、聚丙烯(PP)电容和聚苯硫醚(PPS)薄膜等, 其制作工艺为: 先把塑料做成一个薄膜, 然后缠绕成圆柱体, 中间加一个电极, 最后进行封装, 制备出标准的薄膜电容器。PET制成的薄膜电容器耐电击穿性较好, 多应用于对耐热要求不高的电子仪器和家用电器。PP制成的薄膜电容器储电量较大, 一般应用于车辆和机器。采用PPS制备而成的薄膜电容

器, 最显著的优势是耐候性好, 由于很多材料应用在室外, 经受风雨、寒暑, 阳光甚至是细菌的各种破坏, 在更高的耐候性市场需求下, 需探索出一些高性能的材料用来制备基础电容器^[2-5], PPS以自身的优越耐候性广泛应用于现代各项高科技领域^[6-8]。

由于PPS相比于PET价格要昂贵许多, 为了降低PPS的制作成本, 可以添加一些填充料在其中, 如纳米蒙脱土^[9-10]。马瑞雪^[11]发现纳米蒙脱土可以增加材料的拉伸强度, 黎宴良等^[12]发现纳米蒙脱土可以提高耐热性。由于PPS的韧性不够, 容易因卷绕步骤导致薄膜破损, 故笔者在PPS中添加了增韧剂乙烯-乙酸乙烯共聚物/苯乙烯-乙烯/丁烯-苯乙炔嵌段共聚物(EVAC/SEBS)。

通信作者: 文汝红, 硕士, 副教授, 主要研究方向为聚合物基复合材料的研究及光电信号的处理

收稿日期: 2023-11-05

引用格式: 文汝红, 郑夏莲. 高性能电容器外包PPS复合材料的制备与性能[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(12): 47-51.

Wen Ruhong, Zheng Xialian. Preparation and properties of high performance capacitor wrapped PPS composite materials[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(12): 47-51.

滑石粉作为一种填充剂,可以增强复合材料的硬度。针状硅灰石呈纤维状,有着特殊的三斜晶系,也因此有着以较高的耐候性和耐热性,其也可以作为一种增强剂,提高材料的耐磨损性能。目前市面上的 PPS 材料击穿强度集中在 900 kV/mm 以下, PET 材料是 650 kV/mm, PP 材料是 400 kV/mm 左右,但是因为高端电容器的击穿强度要达到 1 000 kV/mm 以上,所以提高 PPS 的电击穿性能是首要问题。薄膜是以片层结构来阻碍电流击穿的,八钛酸钾晶须以自身独特的空间结构再次提高了薄膜的电流击穿性能,二者结合,把 Ti,K 和加在纳米蒙脱土里的 Si,K 连在一起,生成一个两 K 的虚拟键,八钛酸钾晶须里面有 K,纳米蒙脱土是包含 Na, K, Ti, Si, K 和 Na 会形成一个稳定结构,使其抗电击穿性大幅度提高,所以笔者在 PPS 中添加了八钛酸钾晶须和纳米蒙脱土。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PPS (高黏):PPS-R-10-5002C,美国查佛龙菲利普有限公司;

PPS (低黏):P-4,美国查佛龙菲利普有限公司;

纳米蒙脱土:TY-710C,广州亿峰化工科技有限公司;

滑石粉:SY868,东莞市广硕化工有限公司;

EVAC/SEBS 共混物:CH520,金华市搏佳塑胶科技有限公司;

针状硅灰石:ZZGSHF-14,江西上高县雪峰粉体有限公司;

八钛酸钾晶须:16522,上海亚国化工有限责任公司;

抗氧剂:3114,青岛杰得佳新材料科技有限公司;

玻璃纤维:HZ17709,广州市昊兆化工有限公司;

偶联剂:KH-560,广州市中杰化工有限公司。

1.2 主要仪器和设备

高速搅拌机:DHX-2 型,佛山市铎驰环保设备有限公司;

双螺杆挤出机:TSE-35 型,南京瑞亚设备有限公司;

注塑机:80T 型,台州市众乐注塑机销售有限公司;

维卡软化点测定仪:JH-WK300 型,上海佳骅有限公司;

紫外线老化试验机:JK-QUV-1300 型,苏州江凯机械设备有限公司;

工频电压击穿试验仪:NOMEX410 型,中航时代仪器设备有限公司;

智能电子拉力试验机:XLW (PC)型,济南兰光机电技术有限公司。

1.3 试样制备

(1) 混合均匀。

向高速搅拌机中按表 1 的配比加入 PPS (高黏)、PPS (低黏)、滑石粉、纳米蒙脱土、EVAC/SEBS、针状硅灰石、八钛酸钾晶须和抗氧剂,加热到 50 ℃,

表 1 改性 PPS 材料的配比 g

编号	PPS (高黏)	PPS (低黏)	滑石粉	纳米蒙脱土	EVAC/SEBS	针状硅灰石	八钛酸钾晶须	抗氧剂	玻璃纤维	偶联剂
1	56	44	2	2.5	2.5	2.5	2	0.5	4.5	0.5
2	56	44	2	5	2.5	2.5	2	0.5	4.5	0.5
3	56	44	2	7.5	2.5	2.5	2	0.5	4.5	0.5
4	56	44	2	10	2.5	2.5	2	0.5	4.5	0.5
5	56	44	4	2.5	2.5	2.5	2	0.5	4.5	0.5
6	56	44	4	5	2.5	2.5	2	0.5	4.5	0.5
7	56	44	4	7.5	2.5	2.5	2	0.5	4.5	0.5
8	56	44	4	10	2.5	2.5	2	0.5	4.5	0.5
9	56	44	6	2.5	2.5	2.5	2	0.5	4.5	0.5
10	56	44	6	5	2.5	2.5	2	0.5	4.5	0.5
11	56	44	6	7.5	2.5	2.5	2	0.5	4.5	0.5
12	56	44	6	10	2.5	2.5	2	0.5	4.5	0.5
13	56	44	8	2.5	2.5	2.5	2	0.5	4.5	0.5
14	56	44	8	5	2.5	2.5	2	0.5	4.5	0.5
15	56	44	8	7.5	2.5	2.5	2	0.5	4.5	0.5
16	56	44	8	10	2.5	2.5	2	0.5	4.5	0.5
17	56	44	4	5	10	2.5	2	0.5	4.5	0.5
18	56	44	4	5	7.5	2.5	2	0.5	4.5	0.5
19	56	44	4	5	5	2.5	2	0.5	4.5	0.5
20	56	44	4	5	2.5	2.5	2	0.5	4.5	0.5
21	56	44	4	5	7.5	10	2	0.5	4.5	0.5
22	56	44	4	5	7.5	10	2.5	0.5	4.5	0.5
23	56	44	4	5	7.5	10	3	0.5	4.5	0.5
24	56	44	4	5	7.5	10	3.5	0.5	4.5	0.5
25	56	44	4	5	7.5	7.5	2	0.5	4.5	0.5
26	56	44	4	5	7.5	7.5	2.5	0.5	4.5	0.5
27	56	44	4	5	7.5	7.5	3	0.5	4.5	0.5
28	56	44	4	5	7.5	5	3.5	0.5	4.5	0.5
29	56	44	4	5	7.5	5	2	0.5	4.5	0.5
30	56	44	4	5	7.5	5	2.5	0.5	4.5	0.5
31	56	44	4	5	7.5	5	3	0.5	4.5	0.5
32	56	44	4	5	7.5	5	3.5	0.5	4.5	0.5
33	56	44	4	5	7.5	2.5	2	0.5	4.5	0.5
34	56	44	4	5	7.5	2.5	2.5	0.5	4.5	0.5
35	56	44	4	5	7.5	2.5	3	0.5	4.5	0.5
36	56	44	4	5	7.5	2.5	3.5	0.5	4.5	0.5

再缓慢添加偶联剂KH-560。PPS是一种具有多黏度的特种工程塑料,低黏度的PPS流动性能优异,有利于在其中添加附属添加剂,在双螺杆中挤塑比较顺畅,易于加工,但是低黏度塑料的拉伸强度和弯曲强度相比于高黏度PPS较有较大幅度的下降,所以笔者选择复配两种黏度的PPS材料。选用高分子化合物为100的配方表示法,即两种PPS的总和为100份,其它组分则以相对于PPS的质量分数表示。高黏PPS与低黏PPS添加的质量分别是56,44 g,抗氧剂和偶联剂KH-560在PPS中的加入量不变,均为0.5 g。滑石粉的用量依次为2,4,6,8 g;纳米蒙脱土的用量依次为2.5,5,7.5,10 g;EVAC/SEBS的用量依次为10,7.5,5,2.5 g;针状硅灰石的用量依次为10,7.5,5,2.5 g;八钛酸钾晶须的用量依次为2,2.5,3,3.5 g;高速搅拌机中搅拌40~50 min,让材料混合至均匀,得到改性PPS材料。

(2)挤出改性PPS材料。

将高速搅拌机中搅拌均匀的材料依次挤出,分批次将不同配比材料缓慢倒入双螺杆挤出机进料仓中,在螺杆第七节加入玻璃纤维,玻璃纤维每次加入的用量均为4.5 g。双螺杆挤出机温度都设定为230,250,280,330,340,310,300,280,300,330 °C,双螺杆速度设定为360 r/min。

(3)注塑成型。

挤出得到的改性PPS材料放入注塑机进料仓内,经注塑机均匀注塑成测试所需标准样板,注塑机温度设定为310,330,330,350 °C。得到标准待测样板,用来测试性能。

1.4 测试与表征

拉伸强度按GB/T 4944-2005测试,拉伸速度为3 mm/min;

弯曲强度按GB/T 9341-2008测试,弯曲速度为2 mm/min;

耐高温温度按GB/T 7141-2008测试,待测样板厚度为2 mm;

抗紫外老化按GBT 164223测试,使用荧光紫外灯;

抗电击穿性按GB/T1408.1-2016测试,待测平板厚度为100 mm。

2 结果与讨论

2.1 纳米蒙脱土、滑石粉对改性PPS的影响

滑石粉润滑性优异,因其层状的晶体结构,均

匀添加在PPS材料中可以起到支撑作用^[13],添加不同用量的滑石粉,PPS的拉伸和弯曲强度都得到不同的提升。纳米蒙脱土有优异的改性功能,添加少量的纳米蒙脱土可以改良材料分散性差、稳定性差的特点^[14]。添加滑石粉用量分别为2,4,6,8 g,抗氧剂与偶联剂KH-560均为0.5 g,玻璃纤维4.5 g,通过注塑机得到的新型改性PPS材料,考察了用量分别为2.5,5,7.5,10 g的纳米蒙脱土,在不同用量的滑石粉下对改性PPS材料拉伸强度、弯曲强度的影响。

图1为不同滑石粉用量和纳米蒙脱土用量下改性PPS材料的拉伸强度和弯曲强度。从图1可以看出,滑石粉用量和纳米蒙脱土用量对拉伸强度有着较大的影响,随着滑石粉用量的增加,改性PPS材料的拉伸强度和弯曲强度均呈先增加后降低的趋势。当滑石粉用量低于4 g时,纳米蒙脱土对拉伸强度和弯曲强度的影响较大;当滑石粉用量达到4 g后,纳米蒙脱土对拉伸强度和弯曲强度的影响较小。当滑石粉用量为4 g,纳米蒙脱土为5 g时,改性PPS材料的拉伸强度和弯曲强度均达到最大值,其值分别为260 MPa和475 MPa。

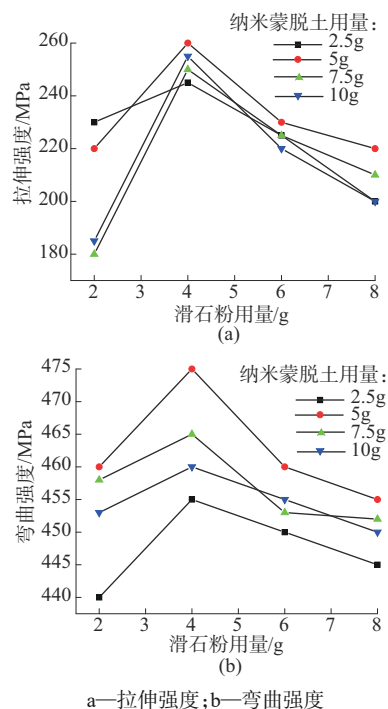


图1 不同滑石粉用量和纳米蒙脱土用量下改性PPS材料的拉伸强度和弯曲强度

2.2 EVAC/SEBS用量对改性PPS材料的影响

EVAC/SEBS是一种增韧剂^[15],SEBS以塑料硬段的特性,在内部结构中起到了物理交联点的作用,加入不同比例EVAC/SEBS,熔融体的弹性会发

生变化。由于PPS韧性不够,容易因卷绕步骤导致薄膜破损,故笔者在PPS中添加了增韧剂EVAC/SEBS。接下来考察受EVAC/SEBS增韧影响的击穿强度指标。通过注塑机得到的改性PPS材料,其中EVAC/SEBS的用量为2.5, 5, 7.5, 10 g,分别考察了不同用量EVAC/SEBS对改性PPS击穿强度的影响。

图2为不同EVAC/SEBS用量下改性PPS材料的击穿强度。从图2可以看出,EVAC/SEBS用量为2.5 g时,改性PPS材料的击穿强度最低,此时击穿强度为32 kV/mm;随着EVAC/SEBS用量的增加,改性PPS材料的击穿强度随之增加,并在EVAC/SEBS用量达到7.5 g时,改性PPS材料的击穿强度最好,此时击穿强度为40 kV/mm;持续增加EVAC/SEBS的用量,改性PPS材料的击穿强度有所下降。当EVAC/SEBS用量达到10 g,此时改性PPS材料的击穿强度下降到35 kV/mm。由此可见,添加适量的EVAC/SEBS可以提高改性PPS的击穿强度,当EVAC/SEBS的用量为7.5 g时,改性PPS的击穿强度最高,达到了40 kV/mm。

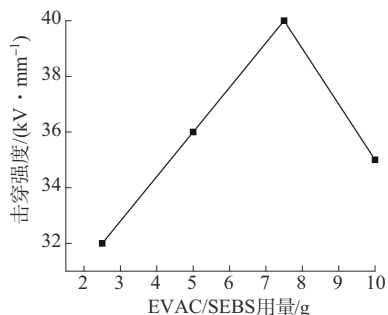


图2 不同EVAC/SEBS用量下改性PPS材料的击穿强度

2.3 针状硅灰石和八钛酸钾晶须的用量对改性PPS材料的影响

针状硅灰石普遍呈纤维状,有着特殊的三斜晶系,也因此有着较高的耐候性、耐热性。针状硅灰石和EVAC/SEBS也是一种增塑剂,可以提高材料的耐磨损性能^[16]。通过注塑机得到的改性PPS材料,继续考察用量为10, 7.5, 5, 2.5 g的针状硅灰石,在不同用量的八钛酸钾晶须下对改性PPS材料的耐高温温度、抗紫外线等级和击穿强度的影响。图3为不同八钛酸钾晶须用量下不同针状硅灰石用量的改性PPS材料的性能。从图3a和图3b可以看出,随着八钛酸钾晶须用量的逐渐增加,改性PPS材料的耐高温温度与抗紫外线等级呈先增加后降低的趋势。而添加不同用量的针状硅灰石的改性PPS材料,其耐高温温度与抗紫外线等级没有明显的变

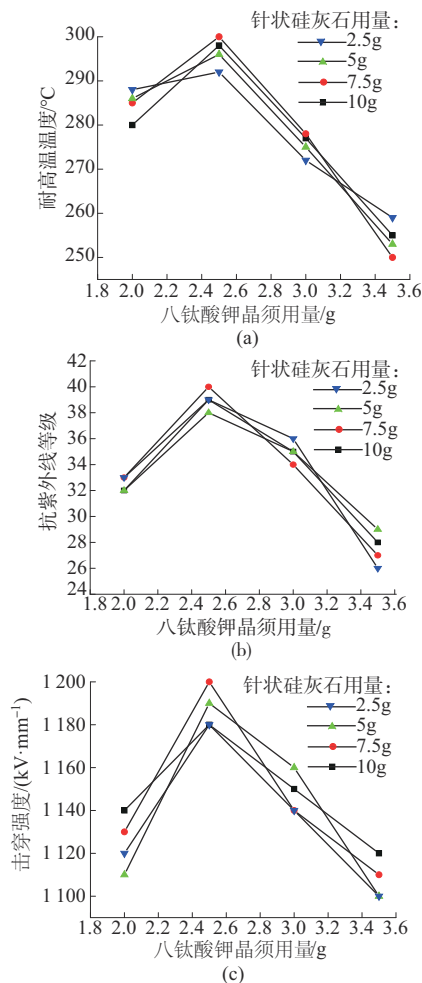


图3 不同八钛酸钾晶须用量下不同针状硅灰石用量的改性PPS材料的性能

化。当八钛酸钾晶须的用量为2.5 g,针状硅灰石用量为7.5 g时改性PPS材料耐高温温度最佳,此时耐高温温度达到了300℃,抗紫外线等级也达到最佳,此时抗紫外线等级达到了40+。

从图3c可以看出,当八钛酸钾晶须的用量为2 g时,改性PPS材料的击穿强度得到显著的提升。当针状硅灰石用量为10 g时,改性PPS材料的击穿强度最高达到1 140 kV/mm;随着八钛酸钾晶须用量的逐渐加大,改性PPS材料的击穿强度也随之增加,当八钛酸钾晶须的用量为2.5 g时,改性PPS材料的击穿强度达到最高,其中针状硅灰石用量为7.5 g时,改性PPS材料的击穿强度达到最高,此时击穿强度为1 200 kV/mm;随着八钛酸钾晶须用量的进一步增加,改性PPS材料的击穿强度有所下降,当八钛酸钾晶须用量增加到3 g时,此时改性PPS材料的击穿强度在1 150 kV/mm左右;当八钛酸钾晶

须用量为 3.5 g 时,此时改性 PPS 材料的击穿强度在 1 110 kV/mm 左右;由此可见,当八钛酸钾晶须用量为 2.5 g,针状硅灰石用量为 7.5 g 时,改性 PPS 材料的击穿性能最佳,此时击穿强度到达 1 200 kV/mm。

薄膜是以片层结构存在来阻碍电流击穿的,八钛酸钾晶须以自身独特的空间结构再次提高了薄膜的电流击穿性能,二者结合,把 Ti, K 和加在纳米蒙脱土里的 Si, K 两个连在一起,生成一个两 K 的虚拟键,八钛酸钾晶须里面有 K, 纳米蒙脱土是一个 Na, K, Ti, Si 结构,其中 K 和 Na 会形成一个稳定结构,使其抗电击穿性能大幅度提高。

3 结论

加入填充料为 5 g 的纳米蒙脱土,并添加用量为 4 g 的滑石粉,再添加用量为 7.5 g 的 EVAC/SEBS,得到的改性 PPS 材料具有较好的综合性能,其拉伸强度为 260 MPa,弯曲强度为 475 MPa,击穿强度为 40 kV/mm。

当使用八钛酸钾晶须的用量为 2.5 g,针状硅灰石用量为 7.5 g 时,改性 PPS 材料耐高温性能最佳,耐高温温度达到了 300 °C;抗紫外线等级达到最佳,抗紫外线等级达到了 40+。改性 PPS 材料的抗电击穿性能最佳,击穿强度达到 1 200 kV/mm,并且改性 PPS 材料的各项性能都有所增加。用此配比制备的改性 PPS 材料,各项性能均最佳,最适合用来制备新型薄膜电容器。

参考文献

- [1] Pan H, Kursumovic A, Lin Y H, et al. Dielectric films for high performance capacitive energy storage: Multiscale Engineering[J]. *Nanoscale*, 2020, 12(38):19 582–19 591.
- [2] 据高鹏. 试析金属化薄膜电容器的技术改进策略[J]. *信息与自动化*, 2020(3):62.
Ju Gaopeng. Analysis of the technical improvement strategy of metallized film capacitors[J]. *Information and Automation*, 2020(3):62.
- [3] 闫欣,王赫颖. 金属化薄膜电容器自愈性的影响因素及控制措施[J]. *世界有色金属*, 2016(23):95–96.
Yan Xin, Wang Heying. Metallized film capacitor self-healing effect factors and control measures[J]. *World Nonferrous Metals*, 2016(23):95–96.
- [4] Lai Minlong, Jiang Lin, Wang Xukang, et al. Effects of multi-walled carbon nanotube/graphene oxide-based sizing on interfacial and tribological properties of continuous carbon fiber/poly(ether ether ketone) composites[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2022. DOI:10.1016/j.matchemphys.2021.125344.
- [5] Yin J, Zhang W L, Alhebshi N A, et al. Electrochemical zinc ion capacitors: fundamentals, materials, and systems[J]. *Advanced Energy Materials*, 2021, 11(21):1–30.
- [6] 倪卓,莫少妮,朱进普,等. PEEK 复合材料的非等温热分解动力学[J]. *塑料*, 2021, 50(6):78–82.
Ni Zhuo, Mo Shaoni, Zhu Jinpu, et al. Non-isothermal thermal decomposition kinetics of PEEK composite[J]. *Plastics*, 2021, 50(6):78–82.
- [7] 申维新,姜云龙,朱爱萍. 聚醚砜对连续碳纤维/聚醚醚酮复合材料性能的影响[J]. *复合材料学报*, 2021, 38(6):1 809–1 816.
Shen Weixin, Jiang Yunlong, Zhu Aiping. Effect of polyethersulfone on the properties of continuous carbon fiber/polyetheretherketone composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(6):1 809–1 816.
- [8] Qiao Liang, Zhu Kaili, Tan Hongsheng, et al. Effect of carbon nanotubes on the electrical, thermal, mechanical properties and crystallization behavior of continuous carbon fiber reinforced polyetheretherketone composites[J]. *Materials Research Express*, 2021, 8(4). DOI:10.1088/2053-1591/abf6f9.
- [9] 李青,颜丹,申益兰,等. 氢氧化镁阻燃聚丙烯/蒙脱土复合材料的性能研究[J]. *中国非金属矿工业导刊*, 2015(4):20–23.
Li Qing, Yan Dan, Shen Yilan, et al. Preparation and properties of Mg(OH)₂ flame-retardant PP/montmorillonite composites[J]. *China Non-Metallic Mining Industry Herald*, 2015(4):20–23.
- [10] Yan Shicheng, Xue Yahong, Hu Yahui, et al. Thermal, mechanical, and tribological properties of sodium-montmorillonite-nanoparticle-reinforced polyethersulfone and polytetrafluoroethylene ternary composites[J]. *Friction*, 2020, 10(7):1–18.
- [11] 马瑞雪. 碳纳米管/蒙脱土增强聚醚醚酮纳米复合材料的制备及性能[D]. 郑州:郑州大学, 2019.
Ma Ruixue. Preparation and properties of carbon nanotubes/montmorillonite reinforced polyether ketone nanocomposites[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2019.
- [12] 黎宴良,张军. PMMA/OMMT 纳米复合材料炭层结构对阻燃性能的影响[J]. *现代塑料加工应用*, 2013, 25(6):1–4.
Li Yanliang, Zhang Jun. Effect of fire residue of PMMA/OMMT on flame retardant performance nanocomposites[J]. *Modern Plastics Processing and Applications*, 2013, 25(6):1–4.
- [13] 彭鹤松,宋建强,李永安,等. 超细滑石粉填充改性 ABS 的性能研究[J]. *工程塑料应用*, 2015, 43(9):130–133.
Peng Hesong, Song Jianqiang, Li Yong'an, et al. Study on properties of ABS filled with ultrafine talc[J]. *Engineering Plastics Application*, 2015, 43(9):130–133.
- [14] 彭泽恒,喻伟婕,李清平,等. 用蜡原油纳米降凝剂研究进展[J]. *应用化工*, 2022, 51(1):164–169.
Peng Zeheng, Yu Weijie, Li Qingping, et al. Research progress of nanocomposite pour point depressants for waxy oil[J]. *Applied Chemical Industry*, 2022, 51(1):164–169.
- [15] 曹胜先,王刚. 国内外 EVAC 产品的开发现状及进展[J]. *中国塑料*, 2003, 17(4):14–21.
Cao Shengxian, Wang Gang. Advance and current situation of EVAC at home and abroad[J]. *China Plastics*, 2003, 17(4):14–21.
- [16] 禹泉,叶素娟. 硅灰石纤维改性 PTFE 材料摩擦性研究[J]. *工程塑料应用*, 2012, 40(4):73–75.
Yu Quan, Ye Sujuan. Research of the tribological properties of mineral fiber filled PTFE composites[J]. *Engineering Plastics Application*, 2012, 40(4):73–75.