

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2019.06.005

增韧剂对玻纤增强聚亚苯基砜复合材料性能的影响

杨硕,高红军,叶少勇,孙学科,龙杰明,曹民,姜苏俊

(金发科技股份有限公司企业技术中心,广东省特种工程塑料重点实验室,广州 510663)

摘要: 针对玻璃纤维 (GF) 增强之后聚亚苯基砜 (PPSU) 韧性急剧下降的问题,使用熔融共混的方式制备了不同增韧剂 (马来酸酐接枝乙烯-丙烯酸丁酯共聚物) 含量的 GF 增强 PPSU 复合材料。利用力学性能测试、差示扫描量热法和热重法研究了增韧剂对 GF 增强 PPSU 复合材料力学性能和耐热性能的影响。研究结果显示,增韧剂的加入可以显著提升复合材料的韧性,当增韧剂含量为 20% 时,复合材料的缺口冲击强度提升了 67%;但是,增韧剂的加入会降低复合材料的强度和热稳定性。另外,扫描电子显微镜和 GF 保留长度测试结果显示,增韧剂的引入可以提升 GF 与基体之间的界面结合作用,同时可以显著提升 GF 的保留长度,当增韧剂含量为 20% 时,GF 的数均保留长度由未添加增韧剂时的 370 μm 提升至 510 μm 。

关键词: 聚亚苯基砜;增韧剂;玻璃纤维;复合材料;界面性能

中图分类号: TQ324.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2019)06-0026-06

Effects of Toughening Agents on Properties of Glass Fiber Reinforced Poly(phenylene sulfone) Composites

Yang Shuo, Gao Hongjun, Ye Shaoyong, Sun Xueke, Long Jieming, Cao Min, Jiang Sujun

(National-Certified Enterprise Technology Center, Kingfa Science and Technology Co., Ltd.,

Guangdong Key Laboratory for Specialty Engineering Plastics, Guangzhou 510663, China)

Abstract : Aiming at the problem that the toughness of poly(phenylene sulfone)(PPSU) decreased sharply after glass fiber (GF) reinforced, PPSU / GF composites with various content of toughening agent (maleic anhydride grafted ethylene-butyl acrylate copolymer) were prepared by melt blending. The effects of toughening agent on the mechanical and heat resistance properties of GF reinforced PPSU composites were investigated by mechanical tests, DSC and TG. The results indicate that the addition of toughening agents can improve the toughness of the composites, and the notched impact strength increases 67% with loading 20% toughening agent. But the strength and thermal stability of matrix decrease with the increasing of toughening agent content. In addition, the results of SEM and fiber length tests show that the toughening agent can enhance the interfacial bonding between the GF and the substrate, and increase the retention length of the GF. Compared with the sample without toughening agents, the number-average retention length of GF increases from 370 μm to 510 μm when the content of toughening agent reaches 20%.

Keywords : poly(phenylene sulfone) ; toughening agent ; glass fiber ; composite ; interface property

聚芳醚砜是一类化学结构中含有砜基的芳香族非晶态聚合物,是特种工程塑料中的重要品种。目前,已经商业化的聚芳醚砜主要有三个品种,即双酚 A 型聚砜 (PSU)、聚醚砜 (PES) 和聚亚苯基砜 (PPSU)^[1]。聚芳醚砜具有优异的力学性能、介电性能、耐热性、阻燃性、耐蠕变性和化学稳定性,已经在电子电气、汽车、医疗卫生和家用食品等领域内获得

广泛应用^[2-4]。与 PSU 和 PES 相比,PPSU 最突出的特性是其具有更好的耐冲击性能,同时耐水煮和蒸汽反复消毒,因此 PPSU 也被广泛应用于婴儿奶瓶、食品容器等领域。

对于 PPSU 的改性材料,目前的研究主要集中在填充改性和合金化两个方面。卞军等^[5]通过溶液共混法制备了 PPSU / 石墨烯纳米复合材料,并发

基金项目:广州市科技计划项目 (201806010042)

通讯作者:杨硕,博士,主要从事特种工程塑料研发工作 E-mail: yangshuo@kingfa.com.cn

收稿日期:2019-04-02

引用格式:杨硕,高红军,叶少勇,等.增韧剂对玻纤增强聚亚苯基砜复合材料性能的影响[J].工程塑料应用,2019,47(6):26-31.

Yang Shuo, Gao Hongjun, Ye Shaoyong, et al. Effects of toughening agents on properties of glass fiber reinforced poly(phenylene sulfone) composites[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(6): 26-31.

现加入少量的石墨烯便可以显著提升 PPSU 的力学性能和导电性。张贺^[6]系统地研究了 PPSU/聚苯硫醚合金的性能,研究显示,聚苯硫醚的引入可以显著改善合金的耐溶剂性和吸水性,同时 PPSU 良好的力学性能改善了聚苯硫醚耐冲击性能差的特点。

在实际应用过程中,使用玻璃纤维 (GF) 增强的方式是目前改性聚芳醚砒产品最常使用的方法^[7-9]。对于纯树脂材料,PSU 和 PES 的悬臂梁缺口冲击强度分别为 5.5 kJ/m^2 和 7.5 kJ/m^2 ,而 PPSU 的缺口冲击强度可以达到 55 kJ/m^2 ;纯 PPSU 树脂表现出优异的冲击韧性。然而,以 30% GF 增强的产品为例,PPSU/GF 复合材料的悬臂梁缺口冲击强度与 PSU/GF 和 PES/GF 复合材料接近,均在 $7 \sim 9 \text{ kJ/m}^2$ 。在 GF 改性复合材料中,PPSU 优异的冲击性能难以体现,这与 GF 和 PPSU 基体之间的界面结合作用有关^[10]。遗憾的是,有关 GF 增强 PPSU 材料的研究报道较少,其增韧方法也没有明确的研究工作涉及。因此,为了研究 PPSU/GF 复合材料韧性的提升方法以及提升 GF 与 PPSU 基体之间的界面结合作用,笔者通过熔融共混的方式在 GF 增强 PPSU 复合材料中引入耐高温的马来酸酐接枝乙炔-丙烯酸丁酯共聚物 (EBA-g-MAH) 增韧剂 (热分解温度 $> 400^\circ\text{C}$),以期改善材料的力学性能。研究结果显示,增韧剂可以显著提升 GF 增强 PPSU 复合材料的缺口冲击强度,同时改善 GF 与基体之间的界面性能。这一方法也为进一步改善 GF 增强聚芳醚砒复合材料的性能,拓宽材料的应用提供了新的思路。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PPSU: Visulfon B002 NC001,金发科技股份有限公司;

短切 GF: 直径 $13 \mu\text{m}$,重庆国际复合材料有限公司;

EBA-g-MAH: 1400MN,德国路可比公司。

1.2 主要仪器与设备

双螺杆挤出机: TES-40A 型,南京瑞亚佛斯特高聚物装备有限公司;

注塑机: HTF86/TJ 型,宁波海天塑机集团有限公司;

万能材料试验机: BT2-FR020TEW-A50 型,德国 Zwick 公司;

差示扫描量热 (DSC) 仪: DSC 209F3 型,德国

耐驰公司;

热重 (TG) 分析仪: TGA 209F3 型,德国耐驰公司;

扫描电子显微镜 (SEM): JSM-6700 型,日本 JEOL 公司;

纤维长度分布测试仪: FASEP ECO 型,德国 KARG 公司。

1.3 样品制备

将 PPSU 树脂按比例和增韧剂 EBA-g-MAH 预先在高速混合机中均匀混合,混合料和质量分数 30% 的短切 GF 在双螺杆挤出机中熔融共混,经水槽冷却后造粒,得到 GF 增强 PPSU 复合材料颗粒 (复合材料的配比组成以 PPSU/GF/Ta 表示,分别代表 PPSU 基体树脂、GF 和增韧剂的含量)。其中,挤出螺杆转速为 300 r/min ,加工温度为 $300 \sim 360^\circ\text{C}$ 。颗粒料经过注塑机在 $330 \sim 360^\circ\text{C}$ 依据 ISO 标准注塑成样条用于力学性能测试。

1.4 性能测试

拉伸性能按照 ISO 527-1-2012 测试。

冲击性能按照 ISO 180-2000 测试。

弯曲性能按照 ISO 178-2010 测试。

密度按照 ISO 1183-1-2012 测试。

DSC 分析: 氮气气氛,流速为 50 mL/min 。样品先升温至 350°C ,等温 5 min ,然后冷却至 30°C ,再升温至 350°C ,升、降温速率均为 10°C/min 。

TG 测试: 测试温度为 $40 \sim 750^\circ\text{C}$,升温速率为 10°C/min ,氮气氛围。

SEM 测试: 使用冲击样条断面作为 SEM 观察的样品,样品喷金后进行观察,加速电压为 5 kV 。

GF 保留长度测试: 对于不同增韧剂含量的 GF 增强 PPSU 复合材料样品,每个样品分别取 5 g ,放置于 750°C 马弗炉中烧蚀 2 h ,随后将烧蚀灰分分散在去离子水中,置于纤维长度分布测试仪下统计 GF 保留长度 (每个样品进行测试的统计数量 > 2000 根)。

2 结果与讨论

2.1 增韧剂含量对 GF 增强 PPSU 复合材料力学性能的影响

利用双螺杆挤出机制备了增韧剂含量分别为 0% , 5% , 10% , 15% 和 20% 的 GF 增强 PPSU 复合材料,复合材料的力学性能测试结果列于表 1。

从表 1 可以看出,随着增韧剂含量的增加,复合材料的拉伸强度、弯曲强度、弯曲弹性模量和密度明

表1 不同含量增韧剂的 GF 增强 PPSU 复合材料的力学性能测试结果

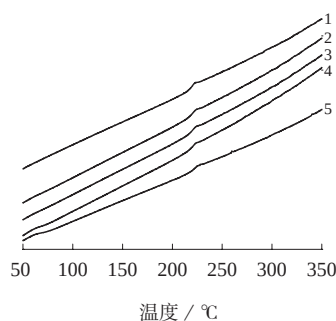
样品	拉伸 强度 / MPa	弯曲 强度 / MPa	弯曲 弹性 模量 / MPa	挠度 / mm	缺口 冲击 强度 / (kJ·m ⁻²)	密度 / (g·cm ⁻³)
PPSU / GF (70 / 30)	105.3	166.5	7089	4.4	8.5	1.52
PPSU / GF / Ta (65 / 30 / 5)	51.6	90.7	5234	10	10.7	1.48
PPSU / GF / Ta (60 / 30 / 10)	41.2	73	4493	8.6	11.6	1.43
PPSU / GF / Ta (55 / 30 / 15)	31.1	48.2	3984	7.7	13.3	1.37
PPSU / GF / Ta (50 / 30 / 20)	24.4	36.7	2643	5.2	14.2	1.33

显降低,当增韧剂含量为 20% 时,拉伸强度由未添加增韧剂时的 105.3 MPa 降低至 24.4 MPa,弯曲强度由 166.5 MPa 降低至 36.7 MPa,弯曲弹性模量由 7089 MPa 降低至 2643 MPa,密度由 1.52 g/cm³ 降低至 1.33 g/cm³。增韧剂的加入导致复合材料的强度、弯曲弹性模量和密度的降低与增韧剂的自身特性有关^[11]。然而,复合材料的挠度和缺口冲击强度表现出不同的变化趋势。对于挠度而言,随着增韧剂含量的增加,复合材料的挠度表现出先增大后减小的趋势。在增韧剂含量为 5% 的情况下,复合材料的挠度最高,可以达到 10 mm;而随着增韧剂含量的进一步增加,材料的挠度逐渐减小。这种现象与 GF 和基体之间的界面相互作用强弱有关^[12-13]。在增韧剂含量较低时,增韧剂的加入可以提升 GF 与基体之间的界面结合作用,材料的抗变形能力增加,挠度增加;随着增韧剂含量进一步的增加,增韧剂在体系中的占比增加,但与 PPSU 基体的结合较差,容易在材料内部形成缺陷,导致材料抵抗变形的能力变差,挠度降低。重要的是,对于复合材料的缺口冲击强度而言,随着增韧剂含量的增加,复合材料的缺口冲击强度明显增大,当增韧剂含量为 20% 时,缺口冲击强度由未添加增韧剂时的 8.5 kJ/m² 提升至 14.2 kJ/m²,提升幅度达到 67%。说明增韧剂确实可以显著提升复合材料的韧性。

2.2 增韧剂含量对 GF 增强 PPSU 复合材料热性能的影响

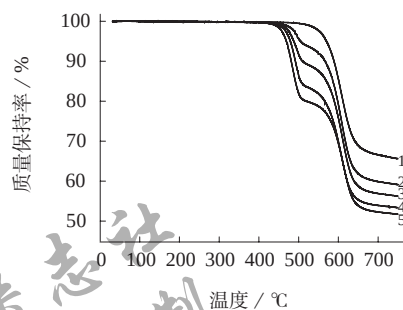
为了判断增韧剂对复合材料热性能的影响,对增韧剂含量分别为 0%,5%,10%,15% 和 20% 的 GF 增强 PPSU 复合材料进行 DSC 和 TG 测试,测试曲线分别如图 1 和图 2 所示。

从图 1 可以看出,随着增韧剂含量的增加,复合材料的玻璃化转变温度 (T_g) 保持在 220℃ 左右,



增韧剂含量: 1—0%; 2—5%; 3—10%; 4—15%; 5—20%

图1 不同增韧剂含量下 GF 增强 PPSU 复合材料的 DSC 曲线



增韧剂含量: 1—0%; 2—5%; 3—10%; 4—15%; 5—20%

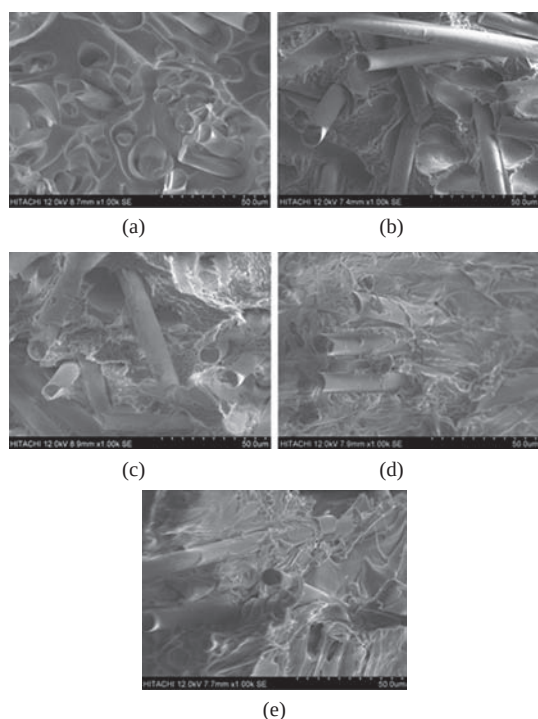
图2 不同增韧剂含量下 GF 增强 PPSU 复合材料的 TG 曲线

没有发生明显变化。从图 2 可以看出,未加增韧剂的复合材料的初始热分解温度为 541℃ (失重 2% 对应的温度),而添加 5%,10%,15% 和 20% 增韧剂的复合材料对应的初始热分解温度分别为 486℃, 473℃, 465℃ 和 455℃。说明增韧剂的加入导致复合材料的热分解温度降低,复合材料的热稳定性下降。这与增韧剂的热分解温度较低有关。另外,增韧剂的热分解温度较低,加入增韧剂后,复合材料在高温下表现出两段热分解行为;第一段热失重对应的是增韧剂的分解,第二段对应的是 PPSU 树脂的分解。从曲线中可以看出,5%,10%,15% 和 20% 增韧剂含量的样品在 420~520℃ 的温度区间内分别失重了 5%,10%,15% 和 20%,分别对应增韧剂的含量;说明增韧剂在 PPSU 树脂开始分解之前就全部分解完成。综上所述,增韧剂的引入会导致 GF 增强 PPSU 复合材料的热稳定性下降。

2.3 增韧剂含量对 GF 增强 PPSU 复合材料界面性能的影响

为了考察增韧剂对 GF 和 PPSU 基体之间界面结合作用的影响,增韧剂含量分别为 0%,5%,10%, 15% 和 20% 的 GF 增强 PPSU 复合材料冲击断面的 SEM 照片如图 3 所示。

在未添加增韧剂时,GF 与 PPSU 基体之间发



增韧剂含量: a—0%; b—5%; c—10%; d—15%; e—20%

图3 不同增韧剂含量下GF增强PPSU复合材料的SEM照片

生明显的界面剥离,且GF表面光滑,没有聚合物粘附(见图3a),说明GF与PPSU之间界面结合较差,几乎没有界面结合作用。在加入5%的增韧剂后,裸露在外的GF表面开始变的粗糙(见图3b),说明GF表面有少量的聚合物粘附,GF与基体之间的界面结合作用加强。随着增韧剂含量的进一步增加,对于增韧剂含量为10%的复合材料,GF表面变得更加粗糙(见图3c);当增韧剂含量提升至15%时,GF表面可以明显观察到大量聚合物的粘附(见图3d);当增韧剂含量增加至20%时,GF已经基本上被聚合物包覆(见图3e)。说明随着增韧剂含量的增加,GF与基体之间的界面结合作用在增强。另外,未添加增韧剂时,材料断面的GF裸露长度较短,大部分GF齐根断裂,说明材料的断裂方式以基体撕裂和GF断裂为主,材料的韧性较差^[14]。而在加入增韧剂之后,材料断面的GF裸露长度明显增加,材料的断裂方式既包含有基体撕裂和GF断裂,也包括GF与基体之间拔插和剥离,说明需要更多的能量才能使得材料发生破坏^[15]。因此,可以发现,在体系中加入增韧剂,一方面可以增强GF与基体之间的界面结合作用,使得GF在加工过程中可以很好地被基体保护,避免断裂,从而裸露长度增加;另一方面,在外力作用下,界面结合作用的增强以及增韧剂自身的影响,使得材料在断裂过程中的破坏方

式发生了变化,材料的韧性得到极大的加强。既然增韧剂的加入在改善界面结合作用的同时,对体系中GF的长度也有显著影响,因此在下文中将着重讨论不同增韧剂含量对GF的分布和保留长度的影响。

2.4 增韧剂含量对GF增强PPSU复合材料中GF保留长度的影响

对于GF增强复合材料,GF保留长度对材料的性能影响显著^[15]。因此,通过统计不同增韧剂含量的复合材料中GF的保留长度,研究了增韧剂含量对GF分布和保留长度的影响。图4是不同增韧剂含量的GF增强PPSU复合材料中GF的分布。从图4a可以看出,在未添加增韧剂时,GF的长度主要分布在200~500 μm ,且分布比较集中,超过400 μm 的GF占比只有17%,说明体系中的GF长度整体较短。在添加增韧剂之后,GF的长度分布更加分散,并逐渐向高长度方向移动。当添加5%增韧剂时,GF长度集中在200~600 μm ,超过400 μm 的GF占比为31%(见图4b)。添加10%增韧剂时,GF的长度集中在200~650 μm ,超过400 μm 的GF占比为37%(见图4c)。当增韧剂含量提升至15%时,GF的长度集中在200~700 μm ,超过400 μm 的GF占比为42%(见图4d)。而增韧剂含量为20%时,GF的长度集中在200~800 μm ,超过400 μm 的GF占比为52%,且各长度段的GF占比接近(见图4e),说明GF的分布非常分散。因此,可以看出,随着增韧剂含量的增加,复合材料中的GF分布越来越分散,但是长度超过400 μm 的GF占比逐渐增加。

进一步计算了不同增韧剂含量的GF增强PPSU复合材料中GF的数均保留长度,结果如图5所示。从图5可以看出,对于未添加增韧剂的复合材料,GF的数均保留长度只有370 μm 。添加5%增韧剂时,GF的数均保留长度提升至410 μm ,保留长度明显增加。当增韧剂含量分别为10%,15%和20%时,GF的数均保留长度分别增加至448, 472 μm 和510 μm 。从数据上可以明显看出,随着增韧剂含量的增加,GF数均保留长度明显增加。说明在相同的加工工艺下,引入增韧剂可以有效地提升GF增强PPSU复合材料中GF的保留长度。造成这种现象的原因推测是:(1)增韧剂的加工温度较低,黏度相较于PPSU小,引入增韧剂会降低体系的黏度,从而可以弱化剪切,提升GF的保留长度;

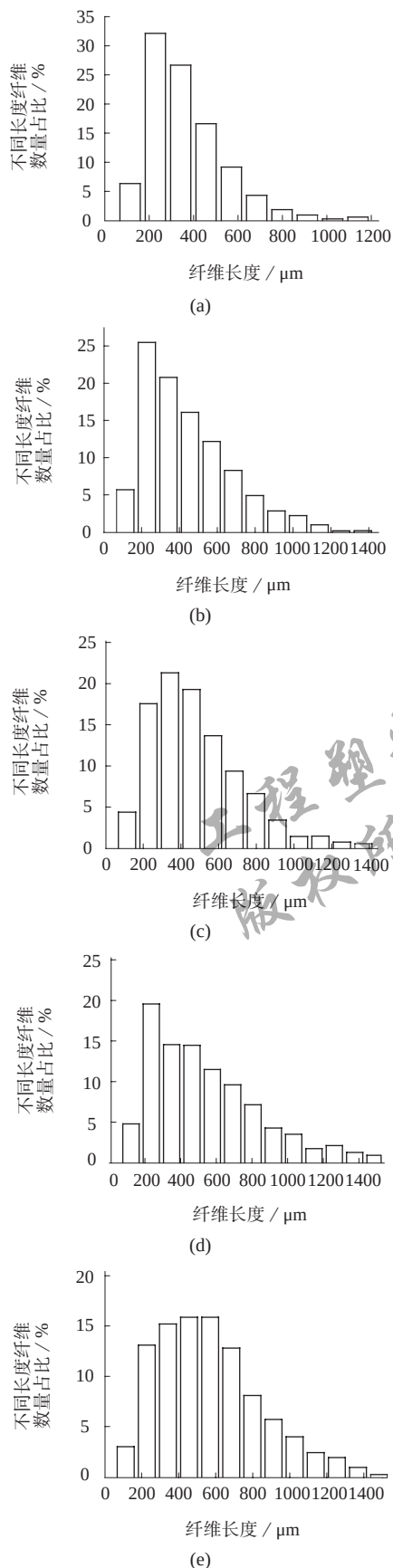


图4 不同增韧剂含量下GF增强PPSU复合材料中GF分布

(2) 增韧剂的引入可以提升GF与基体之间的界面相互作用,从而可以有效地保护GF,使得GF的保留长度增加。综上所述,增韧剂的引入可以有效提升体系中GF的保留长度,但是GF的分布更加分散。

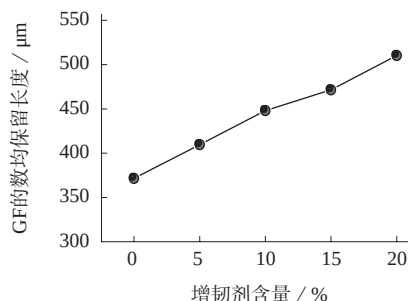


图5 不同增韧剂含量下GF增强PPSU复合材料中GF的数均保留长度

3 结论

通过制备增韧剂含量分别为0%,5%,10%,15%和20%的GF增强PPSU复合材料,系统地研究了增韧剂对材料性能的影响,结论如下:

(1) 随着增韧剂含量的增加,复合材料的强度、弹性模量和密度明显降低;当增韧剂含量为5%时,可以有效提升材料的挠度;当增韧剂含量为20%时,材料的缺口冲击强度提升67%,韧性明显提升。

(2) 与未添加增韧剂的复合材料相比,增韧剂的引入会造成复合材料的初始分解温度降低;增韧剂含量为20%时,复合材料的初始热分解温度由541℃降低至455℃,材料的热稳定性下降。

(3) 随着增韧剂含量的增加,GF与基体之间的界面结合作用增强,材料的破坏方式发生变化,韧性提升。

(4) 在相同加工工艺条件下,与未添加增韧剂的复合材料相比,添加增韧剂可以有效提升体系中GF的保留长度;增韧剂含量为20%时,GF的数均保留长度由370 μm 提升至510 μm ,但是GF的分布更加分散。

参考文献

- [1] 吴忠文. 特种工程塑料聚醚砜、聚醚醚酮树脂国内外研究、开发、生产现状[J]. 化工新型材料, 2002, 30(6):15-18.
Wu Zhongwen. Situation of research and production and development for the special engineering plastic polyether sulfone and polyether ether ketone at home and abroad[J]. New Chemical Materials, 2002, 30(6):15-18.
- [2] 钱伯章. 全球特种工程塑料的开发与应用[J]. 国外塑料, 2006, 24(10):56-61.

- Qian Bozhang. The development and application of special engineering plastics in the world[J]. World Plastics, 2006, 24(10):56–61.
- [3] 李英俊,林得厚,吴忠文. 新型耐高温热塑性工程塑料[J]. 工程塑料应用, 1982, 10(4):1–7.
- Li Yingjun, Lin Dehou, Wu Zhongwen. New type of high temperature resistant thermoplastic engineering plastics[J]. Engineering Plastics Application, 1982, 10(4):1–7.
- [4] 陈锐斌,高红军,孙学科,等. 高热稳定性封端聚苯砜树脂的合成及表征[J]. 工程塑料应用, 2018, 46(11):25–29.
- Chen Ruibin, Gao Hongjun, Sun Xueke, et al. Synthesis and characterization of end group modified poly(phenylene sulfone) with high thermostability[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(11):25–29.
- [5] 卞军,何飞雄,蔺海兰,等. 聚亚苯基砜/石墨烯纳米复合材料的制备与性能研究[J]. 高校化学工程学报, 2015(5):1 229–1 237.
- Bian Jun, He Feixiong, Lin Hailan, et al. Preparation and Properties of Polyphenylsulfone / Graphene Nanocomposites[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2015(5):1 229–1 237.
- [6] 张贺. 聚亚苯基砜/聚苯硫醚共混物的制备及性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- Zhang He. Preparation and research of polyphenylene sulfone / phenylenesulfid blend[D]. Changchun: Jilin University, 2015.
- [7] 顾铁生,廖功雄,王锦艳,等. 短切玻纤增强杂联苯聚砜共混树脂基复合材料的力学性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2009(7):94–96, 100.
- Gu Tiesheng, Liao Gongxiong, Wang Jinyan, et al. Mechanical properties of PPBS / PEEK composites reinforced by short glass fiber[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2009(7):94–96, 100.
- [8] 李明,吴忠文,汤心颐. 玻璃纤维增强聚砜复合材料力学性能研究[J]. 复合材料学报, 1992(4):7–12.
- Li Ming, Wu Zhongwen, Tang Xinyi. Study on mechanical properties of glass fiber reinforced polyethersulphone composites[J]. ACTA Materiae Compositae Sinica, 1992(4):7–12.
- [9] 李玉杰. 聚亚苯基砜/聚苯硫醚共混物及其玻纤增强材料的制备与性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- Li Yujie. Preparation and study on properties of GF reinforced PPSU / PPO blends[J]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [10] Zhandarov S, Mäder E, Scheffler C, et al. Investigation of interfacial strength parameters in polymer matrix composites: Compatibility and reproducibility[J]. Advanced Industrial and Engineering Polymer Research, 2018, 1(1):82–92.
- [11] 张鹏飞,陆波. 增韧剂对玻纤增强尼龙 66 力学性能的影响[J]. 橡塑技术与装备, 2017(12):43–45.
- Zhang Pengfei, Lu Bo. Effect of toughing agents on performance of glass fiber reinforced PA66[J]. China Rubber / Plastics Technology and Equipment, 2017(12):43–45.
- [12] Sambale A K, Schöneich M, Stommel M. Influence of the processing parameters on the fiber-matrix-interphase in short glass fiber-reinforced thermoplastics[J]. Polymers, 2017, 9(6):doi:10.3390/polym9060221.
- [13] Karger-Kocsis J, Mahmood H, Pegoretti A. Recent advances in fiber / matrix interphase engineering for polymer composites[J]. Progress in Materials Science, 2015, 73:1–43.
- [14] 蒋兆寅. 玻纤增强改性工艺及螺杆组合研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2012.
- Jiang Zhaoyin. Research on the screw assemble and the processing technics for glass-fiber reinforced modifacation[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2012.
- [15] Schoßig M, Zankel A, Bierögel C, et al. ESEM investigations for assessment of damage kinetics of short glass fibre reinforced thermoplastics—Results of in situ tensile tests coupled with acoustic emission analysis[J]. Composites Science and Technology, 2011, 71(3):257–265.
-
- (上接第 19 页)
- vascular graft for blood vessel tissue engineering[J]. Tissue Engineering, 2005, 11(9–10):1 574–1 588.
- [13] Yu Aibing, Standish N. Estimation of the porosity of particle mixtures by a linear-mixture packing model[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1991, 30(6):1 372–1 385.
- [14] 李小兵,刘莹. 微观结构表面接触角模型及其润湿性[J]. 材料导报, 2009, 23(24):101–103.
- Li Xiaobing, Liu Ying. Contact angle model and wettability on the surfaces with microstructures[J]. Materials Review, 2009, 23(24):101–103.
- [15] Attia H, Johnson D J, Wright C J, et al. Robust superhydrophobic electrospun membrane fabricated by combination of electrospinning and electrospraying techniques for air gap membrane distillation[J]. Desalination, 2018, 446:70–82.
- [16] Koysuren O, Koysuren H N. Characterization of poly(methyl methacrylate) nanofiber mats by electrospinning process[J]. Journal of Macromolecular Science: Part A—Chemistry, 2016, 53(11):691–698.
- [17] Chang Yao, Li Junjie, Sun Tianshu, et al. Grafting starch nanocrystals onto the surface of sisal fibers and consequent improvement of interfacial adhesion in sisal reinforced starch composite[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2019, 136(11):doi:10.1002/app.47202.