

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.05.024

矿物形态对聚丙烯复合材料性能的影响

张陶忠^{1,2}, 陈晓龙², 于福家², 郝晓宇^{1,2}

(1. 山西紫金矿业有限公司, 山西忻州 034000; 2. 东北大学资源与土木工程学院, 沈阳 110819)

摘要: 采用熔融共混法制备了聚丙烯 (PP)/ 矿物填料复合材料, 考察了云母与硅灰石粒径及其组合填充对复合材料力学及流动性能的影响。结果表明, PP/ 硅灰石复合材料的拉伸与弯曲强度、模量均随着硅灰石粒径的增大而下降, 而复合材料的断裂伸长率随着硅灰石粒径增大而增大, 缺口冲击强度随着粒径增大先减小后增大。当硅灰石的累计粒度分布百分数达到 90% 时的粒径 (D_{90}) 为 8.72 μm 时, 复合材料的弯曲强度、拉伸及弯曲弹性模量与缺口冲击强度分别较纯 PP 提高了 7.77%, 119.0%, 100.4% 与 17.46%。PP/ 云母复合材料的拉伸与弯曲强度随着云母粒径的增大先下降后上升, 断裂伸长率、缺口冲击强度与熔体流动速率随着云母粒径增大而下降, 复合材料的拉伸与弯曲弹性模量随云母粒径的增大而增大。当云母的 D_{90} 为 60.09 μm 时, 复合材料的弯曲强度、拉伸及弯曲弹性模量与缺口冲击强度分别较纯 PP 提高了 10.43%, 177.6%, 172.8% 与 17.46%。硅灰石与云母组合填充 PP 的力学及加工性能基本介于单独填充硅灰石与云母所得到的复合材料性能之间, 两者组合填充不能产生协同效应。

关键词: 聚丙烯; 矿物形态; 组合填充; 力学性能

中图分类号: TQ327.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)05-0143-05

Effect of Mineral Morphology on Properties of Polypropylene Composites

Zhang Taozhong^{1,2}, Chen Xiaolong², Yu Fujia², Hao Xiaoyu^{1,2}

(1. Shanxi Zijin Mining Group Company Limited, Xinzhou 034000, China; 2. College of Resource and Civil Engineer, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract : Polypropylene (PP)/mineral filler composites were prepared by melt blending method. The effects of particle size of mica and wollastonite and their combined filling on the mechanical and flow properties of the composites were investigated. The results show that the tensile and bending strength and modulus of PP/wollastonite composites decrease with the increase of wollastonite particle size, while the elongation at break of PP/wollastonite composites increases with the increase of wollastonite particle size, and notched impact strength decreases first and then increases with the increase of wollastonite particle size. When particle size with the percentage of cumulative particle size distribution reaching 90% (D_{90}) of wollastonite is 8.72 μm , the bending strength, tensile and bending modulus and notched impact strength of the composite increase by 7.77%, 119.0%, 100.4% and 17.46% compared with pure PP, respectively. The tensile strength and flexural strength of PP/mica composites decrease first and then increase with the increase of mica particle size, the elongation at break, notched impact strength and melt flow rate decrease with the increase of mica particle size, and the tensile and flexural modulus of PP/mica composites increase with the increase of mica particle size. When D_{90} of mica is 60.09 μm , the flexural strength, tensile and flexural modulus and notched impact strength increase by 10.43%, 177.6%, 172.8% and 17.46% compared with pure PP, respectively. The mechanical properties and processability of PP filled with wollastonite and mica are between those of the composites filled with wollastonite and mica alone, and the combined filling of the two mineral fillers cannot produce synergistic effects.

Keywords : polypropylene ; mineral morphology ; combined filling ; mechanical property

聚丙烯 (PP) 具有易加工、质量轻、力学性能高、耐腐蚀性和耐磨性强等优点, 因此被广泛使用于化工设备、汽车零部件与生活日用品等^[1-2]。但由于纯 PP 存在对缺口敏感性强、强度与刚度差等缺点, 特

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51874073)

通信作者: 陈晓龙, 讲师, 主要研究方向为矿产资源加工技术以及无机矿物材料的研制与开发

收稿日期: 2022-02-28

引用格式: 张陶忠, 陈晓龙, 于福家, 等. 矿物形态对聚丙烯复合材料性能的影响 [J]. 工程塑料应用, 2022, 50(5):143-147, 164.

Zhang Taozhong, Chen Xiaolong, Yu Fujia, et al. Effect of mineral morphology on properties of polypropylene composites[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(5):143-147, 164.

别是在低温环境下冲击性能差限制了其在其它方面的应用^[3-4]。而通过添加矿物粉体对PP进行填充改性,不仅能够改善复合材料的强度、模量与低温环境下的冲击性能,还可以使复合材料的成本大幅度降低^[5-8]。而矿物填料的形态对于复合材料力学性能的影响甚为明显^[9-13]。

硅灰石是一种天然的纤维状乳白色物质,其长径比较高,可达10:1~20:1,具有化学稳定好、吸油值低、电绝缘性和力学性能较好等特点^[14-15]。云母是具有片层状结构的硅酸盐类矿物,粉碎后还能呈较好的片层状结构,且具有优异的耐化学腐蚀性、较强的绝缘性与化学稳定性等优点^[16-17]。但在超细粉碎过程中,硅灰石与云母形状趋向于粒状,并且云母粒度越细,加工成本越高及加工越困难,且也难以均匀分散,从而使复合材料的性能受到影响,故使用时应综合考虑硅灰石与云母的粒度。纤维状硅灰石与片层状云母能够为PP复合材料带来不同的性能改变,即不同矿物填料的形态能够提高或者改善PP复合材料不同方面的性能。因此为了考察矿物形态对PP复合材料性能的影响规律,笔者采用质量分数为30%的硅烷偶联剂KH-570改性硅灰石与云母填充PP,研究矿物不同粒径对复合材料性能的影响规律,为两种形态矿物在PP中的应用提供借鉴。

1 实验部分

1.1 主要原料

PP:K1008,中国燕山石化北京分公司;

硅灰石:颗粒累计粒度分布百分数达到90%时的粒径(D_{90})分别为8.72,16.13,24.56,34.76 μm ,辽宁法库某硅灰石矿;

云母: D_{90} 分别为4.92,15.11,17.85,60.09 μm ,灵寿华源矿业有限公司;

硅烷偶联剂KH-570:化学纯,杭州杰西卡化工有限公司;

E蜡、芥酸酰胺、抗氧剂1010与168:市售。

1.2 主要仪器及设备

高速混合机:SHR-25A型,江苏鑫达塑料机械有限公司;

双螺杆挤出机:SJSH-30型,石家庄市星烁实业公司;

注塑机:SA600/150型,宁波海天塑机集团有限公司;

电子力学万能试验机:WDW-50E型,济南试金

集团有限公司;

熔体流动速率(MFR)测定仪:XNR-400C型,承德市大加仪器有限公司;

冲击试验机:BC8151-B型,美特斯工业系统有限公司;

扫描电子显微镜(SEM):ULTRA PLUS型,德国蔡司显微镜公司。

1.3 试样制备

(1) 硅灰石、云母表面处理。

采用干法改性工艺对硅灰石与云母进行表面改性,分别称取一定量的硅灰石与云母加入高速混合机中,在90℃条件下分别加入用量为硅灰石质量3%及云母质量4%的硅烷偶联剂KH-570,反应30 min后,停止搅拌得到表面改性的硅灰石与云母。

(2) PP复合材料制备。

以PP为基体树脂,表面改性的硅灰石与云母为填料,通过熔融共混挤出造粒,设置挤出温度为165~190℃、螺杆转速为70 r/min,复合材料中PP、矿物填料(硅灰石或云母)、E蜡、芥酸酰胺、抗氧剂1010、抗氧剂168的质量分数分别为69.27%,30%,0.5%,0.2%,0.01%,0.02%。造粒后将粒料经80℃干燥4 h,然后注塑成标准试样。设置注塑温度为180~195℃、最大注塑压力为100 MPa、保压压力为90 MPa。

1.4 性能测试及表征

拉伸性能按GB/T 1040.1-2018测试,拉伸速率为50 mm/min,取5次测量结果计算平均值。

弯曲性能按GB/T 9341-2008测试,试验速度为5 mm/min,取5次测量结果计算平均值。

悬臂梁缺口冲击强度按GB/T 1843-2008测试,试样缺口形状为V字型,缺口宽度为2 mm±0.2 mm,采用Z侧向冲击,摆锤能力为11 J,取10次测量结果计算平均值。

MFR按GB/T 3682.1-2018测试。取3.5 g复合材料试样装入标准口模中,230℃预热4 min,施加标称载荷2.16 kg,切割10段称重取平均值,然后将值输入到MFR测定仪中得到MFR。

断面形貌观察:用SEM观察不同粒度云母填充PP复合材料拉伸试样的断面形貌。

2 结果与讨论

2.1 硅灰石粒径对PP复合材料性能影响

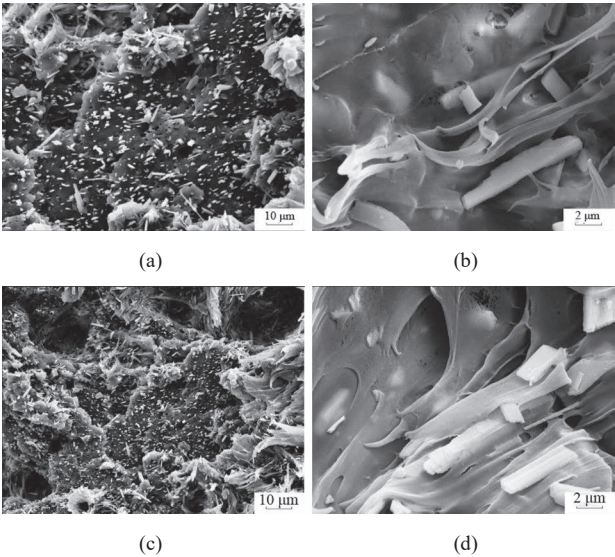
表1为硅灰石粒径对PP/硅灰石复合材料力

学及流动性能的影响。由表 1 可见,硅灰石的 D_{90} 在 $8.72\text{ }\mu\text{m}$ 到 $34.76\text{ }\mu\text{m}$ 的范围内,PP/硅灰石复合材料的拉伸与弯曲强度及相应模量均随着硅灰石粒径的增大而下降,因为硅灰石粒径小时,粉体的比表面积更大,与 PP 基体间的界面作用力更强,在受到外力作用时能够较好进行应力传递,因此能够提高复合材料的强度。在硅灰石 $D_{90}=8.72\text{ }\mu\text{m}$ 时,复合材料的拉伸强度、拉伸弹性模量、弯曲强度与弯曲弹性模量分别达到最大值,为 $32.28, 2\,895.2, 50.32, 2\,792.1\text{ MPa}$,较纯 PP 拉伸强度 (33.60 MPa) 下降了 3.92% ,拉伸弹性模量 ($1\,321.8\text{ MPa}$) 提高了 119.0% ,弯曲强度 (46.69 MPa) 增加了 7.77% ,弯曲弹性模量 ($1\,393.2\text{ MPa}$) 增加了 100.4% 。而复合材料的断裂伸长率随着硅灰石粒径增大呈现上升的趋势,硅灰石 $D_{90}=30.41\text{ }\mu\text{m}$ 时复合材料的断裂伸长率最大,较纯 PP (32.90%) 几乎相同。缺口冲击强度随着粒径增大先减小后增大,且硅灰石的添加能够起到降低 PP 复合材料缺口敏感性的作用,当硅灰石 $D_{90}=8.72\text{ }\mu\text{m}$ 时,复合材料的缺口冲击强度达到最大值 (4.17 kJ/m^2),较纯 PP 的缺口冲击强度 (3.55 kJ/m^2) 增加了 17.46% 。硅灰石的加入使复合材料流动性能较纯 PP 变差,但硅灰石粒径对复合材料的流动性能影响不大。

表 1 不同硅灰石粒径的复合材料力学及流动性能

项 目	纯 PP	复合材料中硅灰石 $D_{90}/\mu\text{m}$			
		8.72	16.13	24.56	34.76
拉伸强度 /MPa	33.60	32.28	30.43	29.40	29.21
拉伸弹性模量 /MPa	1 321.8	2 895.2	2 787.2	2 670.2	2 620.3
断裂伸长率 /%	32.90	20.19	25.27	25.89	32.62
弯曲强度 /MPa	46.69	50.32	48.16	46.19	45.98
弯曲弹性模量 /MPa	1 393.2	2 792.1	2 613.0	2 433.5	2 314.3
缺口冲击强度 /($\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$)	3.55	4.17	3.86	3.69	4.05
MFR/[$\text{g}\cdot(10\text{ min})^{-1}$]	8.30	7.93	7.83	7.84	7.86

图 1 为不同粒径的硅灰石填充改性 PP 复合材料的拉伸断面放大 2 000 倍与 10 000 倍观察得到的 SEM 照片。从图 1 可以看到,经 KH-570 改性的硅灰石在 PP 基体中均沿某一方向发生取向,且在 PP 中均匀分散,硅灰石与 PP 基体相容性较好,有较少的硅灰石裸露,且裸露硅灰石上粘附有大量的熔融 PP。但 $D_{90}=8.72\text{ }\mu\text{m}$ 的硅灰石由于单位质量的比表面积大,被 PP 包覆的面积也大,在图 1d 中可看到硅灰石与 PP 基体间的界面更加模糊,且看不到从 PP 基体中脱落而出的硅灰石,因此复合材料在受到外力作用时硅灰石可以在取向方向上更好的传递应力,可以产生较小的应力集中,因此其拉伸强度较高。



$D_{90}=16.15\text{ }\mu\text{m}$ 硅灰石: a—放大 2 000 倍; b—放大 10 000 倍

$D_{90}=8.72\text{ }\mu\text{m}$ 硅灰石: c—放大 2 000 倍; d—放大 10 000 倍

图 1 不同粒径硅灰石填充 PP 复合材料拉伸断面 SEM 照片

2.2 云母粒径对 PP 复合材料性能影响

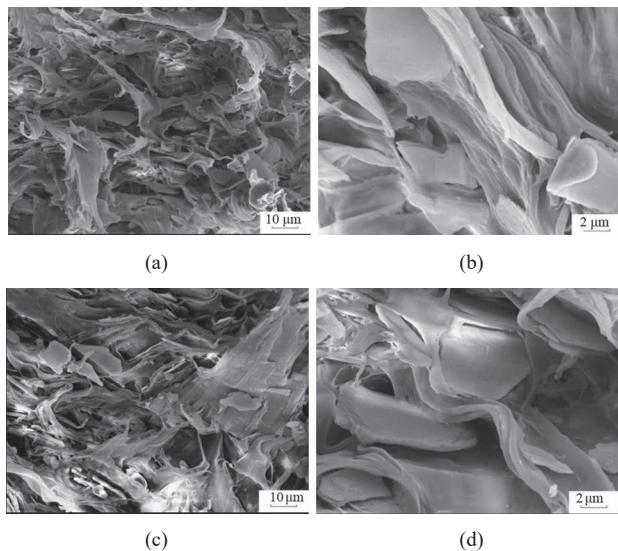
表 2 为云母粒径对 PP/云母复合材料力学及流动性能的影响。由表 2 可见,云母 D_{90} 在 $4.92\text{ }\mu\text{m}$ 到 $60.09\text{ }\mu\text{m}$ 的范围内,PP/云母复合材料的拉伸与弯曲强度随着云母粒径的增大呈现先下降后上升的趋势,在云母 $D_{90}=60.09\text{ }\mu\text{m}$ 时,复合材料的拉伸强度达到最大 (33.54 MPa),较纯 PP 的拉伸强度 (33.60 MPa) 略有下降。在云母粒径 $D_{90}=60.09\text{ }\mu\text{m}$ 时,复合材料弯曲强度达到最大值 (51.56 MPa),较纯 PP 弯曲强度 (46.69 MPa) 提高了 10.43% 。断裂伸长率与缺口冲击强度随着云母粒径增大而下降,但缺口冲击强度始终高于纯 PP,说明云母的加入能使复合材料的缺口敏感性得到降低,始终能够起到增韧 PP 的作用。随着云母粒径的增大复合材料的柔韧性变差,这是由于大粒径云母的加入阻碍了 PP 分子链的运动。当云母 $D_{90}=4.92\text{ }\mu\text{m}$ 时,复合材料缺口冲击强度提高最大,达到了 4.60 kJ/m^2 ,较纯 PP 缺口冲击强度 (3.55 kJ/m^2) 增加了 29.58% ,而当 $D_{90}=60.09\text{ }\mu\text{m}$ 时,较纯 PP 缺口冲击强度增加了

表 2 不同云母粒径的复合材料力学及流动性能

项 目	纯 PP	复合材料中云母 $D_{90}/\mu\text{m}$			
		4.92	15.11	17.85	60.09
拉伸强度 /MPa	33.60	32.71	31.44	31.73	33.54
拉伸弹性模量 /MPa	1 321.8	2 957.1	3 002.3	3 200.6	3 669.5
断裂伸长率 /%	32.90	19.38	17.23	12.19	5.62
弯曲强度 /MPa	46.69	50.32	49.63	50.24	51.56
弯曲弹性模量 /MPa	1 393.2	3 074.3	3 188.1	3 517.5	3 800.6
缺口冲击强度 /($\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$)	3.55	4.60	4.41	4.35	4.22
MFR/[$\text{g}\cdot(10\text{ min})^{-1}$]	8.30	7.73	7.32	7.24	6.35

17.46%。云母的加入使复合材料的拉伸与弯曲弹性模量得到很大提高,随着云母粒径的增大两者表现出逐渐上升的变化规律。在云母 $D_{90}=60.09\ \mu\text{m}$ 时,复合材料的拉伸与弯曲弹性模量分别达到最大,为 3669.5 MPa 与 3800.6 MPa,较纯 PP 拉伸弹性模量 (1321.8 MPa) 与弯曲弹性模量 (1393.2 MPa) 增加了 177.6% 与 172.8%。复合材料的流动性能随云母粒径的增大而下降,粒径越大,复合材料的加工性能越差,这可能是由于大粒径云母的加入阻碍了 PP 分子链的运动所导致的。

图 2 为不同粒径的云母填充改性 PP 复合材料的拉伸断面放大 2000 倍与 10000 倍观察得到的 SEM 照片。从图 2 可以看到,两种粒径云母在 PP 中均发生取向,均匀分散,云母与 PP 具有很好的相容性。从进一步放大的断面可以观察到少量裸露的云母粒子的存在,且裸露的云母表面有熔融 PP 的粘附,但图 2d 中 $D_{90}=60.09\ \mu\text{m}$ 的云母粒径大,其具有较大的径厚比,具有完好的片层状结构,当外力作用于复合材料时,片状结构能够进行应力传递,这可能是其填充 PP 复合材料的拉伸强度较其它粒径云母的复合材料得到提高的原因。



$D_{90}=17.85\ \mu\text{m}$ 云母: a—放大 2000 倍; b—放大 10000 倍

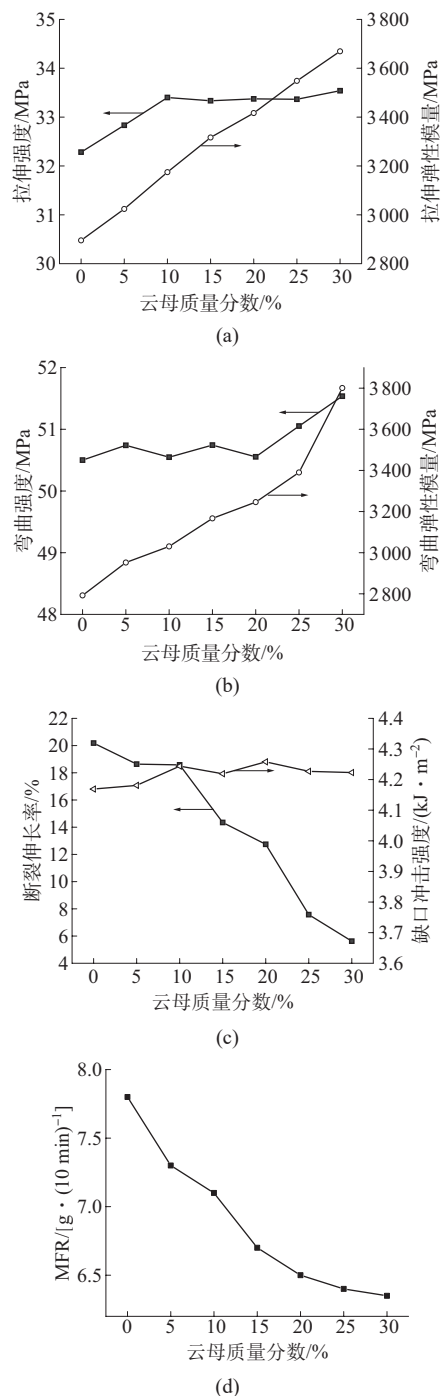
$D_{90}=60.09\ \mu\text{m}$ 云母: c—放大 2000 倍; d—放大 10000 倍

图 2 不同粒径云母填充 PP 复合材料拉伸断面 SEM 照片

2.3 组合填充对 PP 复合材料性能影响

为了考察纤维状的硅灰石与片层状云母组合填充对 PP 复合材料力学及流动性能的影响,将采用 KH-570 改性的 $D_{90}=8.72\ \mu\text{m}$ 硅灰石与 $D_{90}=60.09\ \mu\text{m}$ 云母进行组合,填充到 PP 中,矿物填料总质量分数设为 30%,通过改变云母的含量研究

了硅灰石与云母不同比例组合对 PP 复合材料力学性能及流动性能的影响,结果如图 3 所示。从图 3 可以观察到,硅灰石与云母组合填充 PP 复合材料的拉伸及弯曲强度与模量、断裂伸长率及 MFR 介于单独填充硅灰石与云母所得到复合材料性能之间,云母与硅灰石组合并不能产生协同效应。硅灰石与云母填充会不同程度降低 PP 的拉伸强度,但



a—拉伸强度及拉伸弹性模量; b—弯曲强度及弯曲弹性模量;

c—断裂伸长率及缺口冲击强度; d—MFR

图 3 硅灰石与云母组合填充 PP 复合材料的性能

云母与硅灰石不同比例组合对 PP 复合材料拉伸强度降低的幅度较小,能保持纯 PP 复合材料拉伸强度 96% 以上。硅灰石与云母填充使复合材料拉伸与弯曲弹性模量得到较大提升,当组合矿物填料中云母质量分数为 0% (即硅灰石质量分数为 30%) 时,复合材料的拉伸及弯曲弹性模量提高幅度最小,但较纯 PP 分别提高 119.0% 与 100.4%,随着云母添加量增多,复合材料的拉伸及弯曲弹性模量增加。当组合矿物填料中云母质量分数为 0% 时,复合材料的弯曲强度提高幅度最小,随着云母质量分数达到 30%,弯曲强度 (51.56 MPa) 较纯 PP 提高了 10.43%。云母与硅灰石的填充比例对缺口冲击强度影响不大,当云母质量分数为 10% 时,复合材料的缺口冲击强度相比单独填充硅灰石或云母时略有提高,约为 4.24 kJ/m²,较纯 PP 缺口冲击强度 (3.55 kJ/m²) 提高了 19.44%。硅灰石与云母的加入导致复合材料的流动性能变差,且云母添加量越多,复合材料的加工性能越差。

3 结论

(1) 在所选硅灰石 D_{90} 为 8.72 μm 到 34.76 μm 的范围内, PP/ 硅灰石复合材料的拉伸强度、拉伸弹性模量、弯曲强度、弯曲弹性模量均随着硅灰石粒径的增大呈现下降的趋势,而复合材料的断裂伸长率随着硅灰石粒径增大呈现上升的趋势,复合材料的缺口冲击强度随着粒径增大先减小后增大。

(2) 在所选云母 D_{90} 为 4.92 μm 到 60.09 μm 的范围内,复合材料的拉伸强度与弯曲强度随着云母粒径的增大先下降后上升,复合材料的断裂伸长率与缺口冲击强度随云母粒径增大而下降,而复合材料的拉伸弹性模量与弯曲弹性模量随着粒径的增大呈现上升的趋势。

(3) 纤维状硅灰石与片层状云母均降低了 PP 的流动性能,两者组合填充 PP 复合材料的力学及加工性能基本介于单独填充硅灰石与云母所得到的复合材料性能之间,两者组合填充不能产生协同效应。

参考文献

- [1] 洪定一. 聚丙烯——原理、工艺与技术 [M]. 北京: 中国石化出版社, 2011.
Hong Dingyi. Polypropylene—Principle, process and technology [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2011.
- [2] 阮锦泉. 聚丙烯 / 硅灰石复合材料性能及其增强增韧机理研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
Ruan Jinquan. Research on properties and reinforcing & toughening mechanisms of PP/wollastonite composites [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.
- [3] 党力. 碱式硫酸镁晶须表面改性及其在聚丙烯材料中的应用研究 [D]. 西宁: 中国科学院大学 (中国科学院青海盐湖研究所), 2017.
Dang Li. Surface modification of magnesium oxysulfate whisker and its application in polypropylene [D]. Xining: Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [4] Rajak D K, Pagar D D, Kumar R, et al. Recent progress of reinforcement materials: A comprehensive overview of composite materials [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2019, 8(6): 6354–6374.
- [5] 胡智华, 傅和青. 聚丙烯填充改性 [J]. 化工新型材料, 2005, 33(5): 60–61, 64.
Hu Zhihua, Fu Heqing. Filling and modifying of polypropylene [J]. New Chemical Materials, 2005, 33(5): 60–61, 64.
- [6] 陈科. 硅灰石粉填充改性聚丙烯复合材料性能研究 [J]. 塑料科技, 2016, 44(2): 34–36.
Chen Ke. Study on properties of modified polypropylene composites filled with wollastonite [J]. Plastics Science and Technology, 2016, 44(2): 34–36.
- [7] 程鹏, 郭周超, 薛平, 等. 滑石粉添加量对口模拉伸自增强聚丙烯性能的影响 [J]. 塑料工业, 2020, 48(9): 61–65.
Cheng Peng, Guo Zhouchao, Xue Ping, et al. Effect of Talc contents on the properties of self-reinforced samples prepared by die stretching [J]. China Plastics Industry, 2020, 48(9): 61–65.
- [8] Chen X L, Zhang T Z, Sun P L, et al. Study on the performance and mechanism of modified mica for improving polypropylene composites [J]. International Journal of Low-Carbon Technologies, 2022, 17: 176–184.
- [9] Leong Y W, Bakar M, Ishak Z, et al. Comparison of the mechanical properties and interfacial interactions between talc, kaolin, and calcium carbonate filled polypropylene composites [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2010, 91(5): 3315–3326.
- [10] 陈晓龙, 张陶忠, 于福家. 矿物填料形状对 PP 复合材料力学性能的影响 [J]. 非金属矿, 2020, 43(1): 40–43.
Chen Xiaolong, Zhang Taozhong, Yu Fujia. Effect of mineral filler shape on mechanical properties of PP composites [J]. Non-Metallic Mines, 2020, 43(1): 40–43.
- [11] Tang J, Wang Y, Liu H Y, et al. Effects of organic nucleating agents and zinc oxide nanoparticles on isotactic polypropylene crystallization [J]. Polymer, 2004, 45(7): 2081–2091.
- [12] 党力, 乃学瑛, 朱东海, 等. 碱式硫酸镁形貌对碱式硫酸镁 / 聚丙烯复合材料力学性能的影响 [J]. 复合材料学报, 2017, 34(7): 1517–1525.
Dang Li, Nai Xueying, Zhu Donghai, et al. Effect of magnesium oxysulfate morphology on the mechanical properties of magnesium oxysulfate/polypropylene composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34(7): 1517–1525.

- j.est.2021.102687.
- [11] Lin F K, et al. *ChemistrySelect*, 2020, 5(11):3 217–3 224.
- [12] Yuan Z Y, et al. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2021, 306(11). DOI:10.1002/mame.202100428.
- [13] Pan D, et al. *Composites Part B:Engineering*, 2021, 209. DOI: 10.1016/j.compositesb.2021.108609.
- [14] Chen X L, et al. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(14). DOI:10.1021/acsami.0c04882.
- [15] Jia X W, et al. *Composites Part A:Applied Science and Manufacturing*, 2020, 129. DOI:10.1016/j.compositesa.2019. 105710.
- [16] Song J N, et al. *Composites Part A:Applied Science and Manufacturing*, 2020, 133. DOI:10.1016/j.compositesa.2020. 105873.
- [17] El Idi M M, et al. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2020, 21. DOI:10.1016/j.csite.2020.100716.
- [18] Liang H, et al. *Applied Physics A*, 2016, 122. DOI:10.1007/s00339-016-0048-1.
- [19] Pinto S C, et al. *Metals*, 2019, 9(11). DOI:10.3390/met9111214.
- [20] Ye W T, et al. *Materials & Design*, 2018, 156:32–41.
- [21] Di B, et al. *Ceramics International*, 2020, 46(17):27 531–27 538.
- [22] Xiong S W, et al. *Composites Science and Technology*, 2021, 202. DOI:10.1016/j.compscitech.2020.108596.
- [23] He X H, et al. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2021, 60(3):1 137–1 154.
- [24] Chen X, et al. *Energy Conversion and Management*, 2015, 97: 282–289.
- [25] Huang T Q, et al. *Composites Science and Technology*, 2020, 198. DOI:10.1016/j.compscitech.2020.108322.
- [26] Wei Z L, et al. *Composites Science and Technology*, 2020. DOI: 10.1016/j.compscitech.2020.108304.
- [27] Shimamura A, et al. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 2020, 8(1):176–182.
- [28] Sanei S H R, et al. *Journal of Composites Science*, 2020, 4(3). DOI:10.3390/jcs4030098.
- [29] Wang J L, et al. *Composites Communications*, 2020, 19:142–146.
- [30] Gamboa G, et al. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 2020, 38(4). DOI:10.1116/6.0000121.
- [31] Wang H H, et al. *Applied Physics Letters*, 2021, 118(13). DOI: 10.1063/5.0042812.
- [32] Liu M J, et al. *Ceramics International*, 2020, 46(13). DOI:10.1016/j.ceramint.2020.05.096.
- [33] Ye Z Q, et al. Aligned-carbon-fibre/silicone-rubber composite with high thermal conductivity fabricated by double-stacked electrostatic flocking method[C]//2020 21st International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT). New York:IEEE, 2020:1–4.
- [34] Ji T X, et al. *Carbon*, 2018, 131:149–159.
- [35] Yu Z F, et al. *Journal of Materials Science:Materials in Electronics*, 2019, 30(11). DOI:10.1007/s10854-019-01360-7.
- [36] Wu X P, et al. *Polymer Composites*, 2020, 41(7):2 687–2 703.
- [37] Guo Y Q, et al. *Journal of Materials Chemistry C*, 2018, 6(12): 3 004–3 015.
- [38] Zheng H T, et al. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2021, 125(39):21 580–21 587.
- [39] Lv X H, et al. *Composites Science and Technology*, 2020, 200. DOI:10.1016/j.compscitech.2020.108414.
- [40] Yang X T, et al. *Composites Part B:Engineering*, 2019, 175. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107070.
- [41] Maleki M, et al. *Applied Energy*, 2020, 258. DOI:10.1016/j.apenergy.2019.114108.
- [42] Yang W, et al. *Composites Part B:Engineering*, 2021, 224. DOI: 10.1016/j.compositesb.2021.109168.
- [43] Qian Y X, et al. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 425. DOI: 10.1016/j.cej.2021.131608.
- [44] Li S, et al. *Composites Part A:Applied Science and Manufacturing*, 2019, 120:95–105.
- [45] Lei W, et al. *Carbon*, 2019, 141:506–514.

(上接第 147 页)

- [13] 杨坤. 无机刚性粒子及其级配共混增强增韧聚丙烯的研究 [D]. 成都: 四川大学, 2006.
- Yang Kun. Study on polypropylene toughened and reinforced by inorganic single-filler and hybrid filler[D]. Chengdu:Sichuan University, 2006.
- [14] Liang J Z, Ruan J Q, Li B. Effects of the surface treatment of wollastonite on the tensile and flow properties for reinforced polypropylene composites[J]. *Journal of Polymer Engineering*, 2014, 34(7):649–655.
- [15] 阮锦泉. 聚丙烯/硅灰石复合材料性能及其增强增韧机理研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- Ruan Jinqun. Research on properties and reinforcing & toughening mechanisms of PP/wollastonite composites[D]. Guangzhou:South China University of Technology, 2014.
- [16] 晏海霞, 胡珊, 刘娟. 绢云母/ABS 树脂复合材料的制备及性能 [J]. *非金属矿*, 2007, 30(5):19–21.
- Yan Haixia, Hu Shan, Liu Juan. Preparation and properties of ABS composites filled with sericite[J]. *Non-Metallic Mines*, 2007, 30(5):19–21.
- [17] 雷芸. 绢云母表面改性及机理研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2003.
- Lei Yun. Study on surface modification and mechanism of sericite[D]. Wuhan:Wuhan University of Technology, 2003.