

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.07.12

螺杆构型对 PP/HGMs 复合材料性能影响

陈锐, 吴喜元, 刘亚辉

(中钢集团马鞍山矿院新材料科技有限公司, 安徽马鞍山 243100)

摘要: 采用双螺杆挤出机制备聚丙烯/空心玻璃微珠(PP/HGMs)复合材料, 设计了A₁~A₄四种组合的混合段螺杆构型, 研究了螺杆构型对PP/HGMs复合材料中HGMs的完整率、复合材料密度及力学性能的影响。结果表明, A₁, A₂组合制备的复合材料中HGMs破碎严重, HGMs的完整率分别仅为57.3%和64.6%, 而A₃, A₄组合制备的复合材料中HGMs结构完整, HGMs的完整率分别为91.1%和93.5%。扫描电子显微镜照片显示, A₁, A₂组合制备的复合材料断面处HGMs破碎严重, A₃, A₄组合制备的复合材料断面处HGMs结构完整, HGMs形貌观察与完整率计算数据吻合, 同时, 复合材料中HGMs的完整率越高, 复合材料的实际密度与理论密度越接近, 弯曲弹性模量提高幅度越大, 悬臂梁缺口冲击强度衰减越显著。

关键词: 螺杆构型; 聚丙烯; 空心玻璃微珠; 复合材料; 分布混合; 完整率

中图分类号: TQ320.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)07-0071-05

Effects of Screw Configuration on Properties of PP/HGMs Composites

Chen Rui, Wu Xiyuan, Liu Yahui

(Sinosteel Maanshan New Material Co., Ltd., Maanshan 243100, China)

Abstract : The polypropylene/hollow glass microspheres (PP/HGMs) composites were prepared by twin-screw extruder, the four mixing section screw configurations of A₁–A₄ combinations were designed. The effects of screw configuration on the integrity rate, density and mechanical properties of HGMs in PP/HGMs composites were studied. The results show that the HGMs in the composites prepared with A₁ or A₂ combination are broken seriously, and the integrity rate are only 57.3% and 64.6%, respectively, while the HGMs in the composites with A₃ or A₄ combination are complete, and the integrity rate are 91.1% and 93.5%, respectively. Scanning electron microscopic photographs show that the HGMs in composites which is prepared by A₁ or A₂ combination are broken seriously, while the HGMs in composites which is prepared by A₃ or A₄ combination are complete, the morphological observation is consistent with the calculated data of integrity rate. Meanwhile, the higher the integrity rate of HGMs in the composites, the closer the theoretical density is to the actual density, and the flexural elastic modulus of the composites increases higher, while the Izod notched impact strength decreases significantly.

Keywords : screw configuration ; polypropylene ; hollow glass microsphere ; composite ; distribution mixing ; integrity rate

聚丙烯(PP)是一种成本低廉、力学性能优异的通用塑料,且PP自身具有较低的密度,保险杠、仪表板、门板、立柱等汽车内外饰大多采用PP复合材料制成。目前,对PP改性的主要方法是通过添加滑石粉以实现其刚性的提高及尺寸的稳定,这导致PP复合材料的密度都较高,一般在1.05~1.15 g/cm³之间。随着国家对机动车排放要求以及单位质量能耗制定标准的实施,汽车的轻量化势在必行,研

究表明,汽车整备质量每减少100 kg,百公里油耗可降低0.4~0.6 L。此外,汽车轻量化还能相应提高汽车的动力,节省材料成本,从而降低汽车制造成本,较高密度的材料将无法汽车内外饰件的制造需求,不符合汽车部件轻量化发展趋势^[1-3]。

空心玻璃微珠(HGMs)作为一种新型的中空无机填料,具有密度低、易分散、高刚性等诸多性能优势^[4-7],当前,HGMs被用来添加到聚合物树脂中以

通信作者: 陈锐, 硕士, 主要研究方向为聚合物改性加工

收稿日期: 2021-05-15

引用格式: 陈锐, 吴喜元, 刘亚辉. 螺杆构型对PP/HGMs复合材料性能影响[J]. 工程塑料应用, 2021, 49(7): 71-75.

Chen Rui, Wu Xiyuan, Liu Yahui. Effects of screw configuration on properties of PP/HGMs composites[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(7): 71-75.

降低材料的密度,但多数只是研究了 HGMs 的表面处理方式及填充含量对复合材料的性能影响,而在实际改性加工过程中,由于 HGMs 的中空结构,非常容易被螺杆剪切、挤压后破碎,造成复合材料的实际密度较高,力学性能下降^[8-11]。K. S. Jang 等对比了 HGMs 的喂料方式对复合材料中 HGMs 完整状态的影响,发现将 HGMs 从侧向喂料加入到熔融的聚合物熔体中可以大幅度提高 HGMs 在改性加工过程中的完整率。针对上述问题,笔者将 HGMs 粉体通过侧向喂料的方式加入到熔融的 PP 体系中,并进一步对双螺杆挤出机混合段的螺杆构型进行设计,研究了不同混合段螺杆构型对 PP/HGMs 复合材料中的 HGMs 完整状态、复合材料密度及力学性能的影响。

1 实验部分

1.1 主要原料

HGMs: 平均粒径为 35 μm , 密度为 0.45 ~ 0.47 g/cm^3 , 压缩强度 > 85 MPa, 中钢集团马鞍山矿院新材料科技有限公司;

PP: K7726H, 中石化北京燕山石化分公司;

马来酸酐接枝 PP (PP-g-MAH): 9801, 佳易容相容剂江苏有限公司;

抗氧剂: 168, 1010, 德国巴斯夫公司;

润滑剂: P130, 市售。

1.2 主要设备及仪器

同向平行双螺杆挤出机: TSE36 型, 长径比为 44/1, 侧喂料在第五节, 南京瑞亚挤出机械制造有限公司;

注塑机: BH-80 型, 广东博创装备制造有限公司;

万能材料试验机: 2300 型, 美国 Instron 公司;

悬臂梁缺口冲击试验机: XJJ-50 型, 承德试验机有限公司;

电子密度计: ZMD-1 型, 上海方瑞仪器有限公司;

扫描电子显微镜 (SEM): 3400N 型, 日本日立公司。

1.3 样品制备

按照 PP/PP-g-MAH/抗氧剂 168/抗氧剂 1010/润滑剂为 96.5/3/0.1/0.1/0.3 (质量比) 在高速混合机中混合均匀, 将混合好的物料从双螺杆挤出机主喂料口喂入, HGMs 通过侧向喂料机从侧喂料口喂入, 调节喂料比例使得 HGMs 的填充

质量分数为 5%~20%, 挤出机螺杆转速为 200 r/min, 加工段温度设置为 200~220℃。

挤出造粒烘干后进行样条注塑, 注塑温度为 200~220℃, 注塑压力为 60~80 MPa, 成型模具采用大流道及浇口设计, 以防止注塑过程中高剪切造成 HGMs 破碎。

1.4 性能测试

拉伸强度按照 GB/T 1040-2018 测试, 拉伸速度为 20 mm/min;

悬臂梁缺口冲击强度按照 GB/T 1843-2008 测试, V 型缺口, 摆锤能量为 2.75 J;

弯曲强度按照 GB/T 9341-2008 测试, 弯曲速度为 2 mm/min, 下压位移 12 mm;

密度按照 GB/T 1033.1-2008 中的浸渍法测试;

形貌观察: 将复合材料缺口冲击断面喷金处理, 利用 SEM 观察断面 HGMs 的完整情况;

复合材料中 HGMs 的完整状态以完整率 (I_{HGMs}) 表示, HGMs 的 I_{HGMs} 按照式 (1) 计算:

$$I_{\text{HGMs}} = \frac{m_{\text{tHGMs}} - m_{\text{cHGMs}}}{m_{\text{tHGMs}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: m_{tHGMs} ——HGMs 总的添加质量;

m_{cHGMs} ——加工过程中破碎 HGMs 的质量。

破碎 HGMs 的质量按照式 (2) 计算:

$$\rho_{\text{com}} = \frac{m_{\text{PP}} + m_{\text{tHGMs}}}{\frac{m_{\text{PP}}}{\rho_{\text{PP}}} + \frac{m_{\text{tHGMs}} - m_{\text{cHGMs}}}{\rho_{\text{HGMs}}} + \frac{m_{\text{cHGMs}}}{\rho_{\text{cHGMs}}}} \quad (2)$$

式中: m_{PP} ——PP 基体树脂的质量;

ρ_{com} ——复合材料的密度;

ρ_{PP} ——基体树脂的密度;

ρ_{HGMs} ——HGMs 的密度;

ρ_{cHGMs} ——加工过程中破碎 HGMs 的密度, 按照 HGMs 外壳硼硅酸盐玻璃的密度 2.23 g/cm^3 计算。

2 结果与讨论

2.1 混合段螺杆构型设计

同向平行双螺杆挤出机的螺杆组件主要包括输送螺纹元件和混炼螺纹元件两大类。输送螺纹元件是沿螺杆轴向横截面连续扭转而成的组件, 而由一系列这种横截面非扭转而成、由不同错列角捏合块构成的组件称为捏合盘元件, 捏合盘元件在挤出过程中主要起混合分散作用, 通常将捏合盘元件称为混炼螺纹元件^[13-14]。传统捏合盘元件是全捏合的, 当熔体通过捏合块时, 产生强烈的横向混合与剪切,

高的剪切区域主要存在于捏合块的螺棱位置,以及块与块之间的啮合区域,对于 PP/HGMs 复合材料,高剪切容易导致 HGMs 的破碎。

对于传统的 PP/滑石粉复合材料的共混过程,要求双螺杆挤出机的螺杆构型需具有强烈的分散分布能力,以便将小粒径团聚的片状滑石粉粉体打开,并均匀分散于 PP 基体中,而 HGMs 是一种平均粒径较大的中空玻璃微球, HGMs 之间独立存在,不存在团聚现象,且 HGMs 的球形表面光滑,易在聚合物基体中进行分散,故加工过程只要将 HGMs 粉体均匀分布于聚合物基体中即可,而过于强烈的剪切分散易导致 HGMs 的破碎,针对 PP/HGMs 复合材料的共混特点,对 HGMs 侧喂加入后的混合段进行了螺杆构型设计,并引入专门的混合分布元件,即齿形盘元件 TME^[15],设计的 4 种混合段螺杆构组合型见表 1。

表 1 混合段螺杆构型

组合编号	混合段螺杆构型
A ₁	48 / 48 × 4, 32 / 32 × 4, 22 / 22 × 2, K45° / 5 / 32, K90° / 5 / 32, 32 / 32 × 2, 22 / 22 × 2, K45° / 5 / 32, K90° / 5 / 32, 22 / 11L
A ₂	48 / 48 × 4, 32 / 32 × 4, 22 / 22 × 2, K45° / 5 / 32, K45° / 5 / 32, 32 / 32 × 2, 22 / 22 × 2, K45° / 5 / 32, K45° / 5 / 32, 22 / 11L
A ₃	48 / 48 × 4, 32 / 32 × 4, 22 / 22 × 2, K45° / 5 / 16 × 3, 32 / 32 × 3, 22 / 22 × 2, TME8 / 16 × 3, 22 / 11L
A ₄	48 / 48 × 4, 32 / 32 × 4, 22 / 22 × 2, TME8 / 16 × 3, 32 / 32 × 3, 22 / 22 × 2, TME8 / 16 × 3, 22 / 11L

注: 48 / 48 × 4 表示 4 个螺纹导程为 48 mm、元件长度为 48 mm 的输送元件, 32 / 32 × 4 表示 4 个螺纹导程为 32 mm、元件长度为 32 mm 的输送元件, 22 / 22 × 2 表示 2 个螺纹导程为 22 mm、元件长度为 22 mm 的输送元件, K45° / 5 / 32, K90° / 5 / 32 分别表示错角为 45° 和 90°、5 片剪切块、长度为 32 mm 的捏合盘元件, K45° / 5 / 16 × 3 表示 3 个错角为 45°、5 片剪切块、长度为 16 mm 的窄捏合盘元件, TME8 / 16 × 3 表示 3 个齿数为 8、长度为 16 mm 的齿形盘元件, 22 / 11L 表示螺纹导程为 22 mm、元件长度为 11 mm 的反向输送元件。

2.2 HGMs 完整率分析

在其它加工条件不变的情况下,不同混合段螺杆构型制备的 PP/HGMs 复合材料中 HGMs 完整率如图 1 所示。

A₁ 组合中有 K45° / 5 / 32, K90° / 5 / 32 两组捏合盘元件,其中 90° 捏合盘元件的剪切能力强,它对物料无轴向输送能力,主要是依赖上游的螺纹元件建立的压力进行输送,物料通过时会进行反复啮合,造成 HGMs 破碎严重, HGMs 完整率较低; A₂ 组合中使用了两组正向 45° 捏合盘元件,其具有一

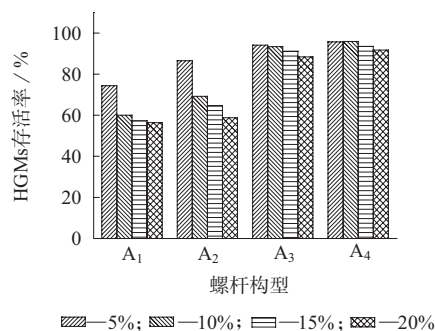


图 1 不同混合段螺杆构型制备的 PP/HGMs 复合材料中 HGMs 的完整率

定的输送能力,剪切能力相对 A₁ 组合降低, HGMs 的完整率相对 A₁ 组合有所提高。

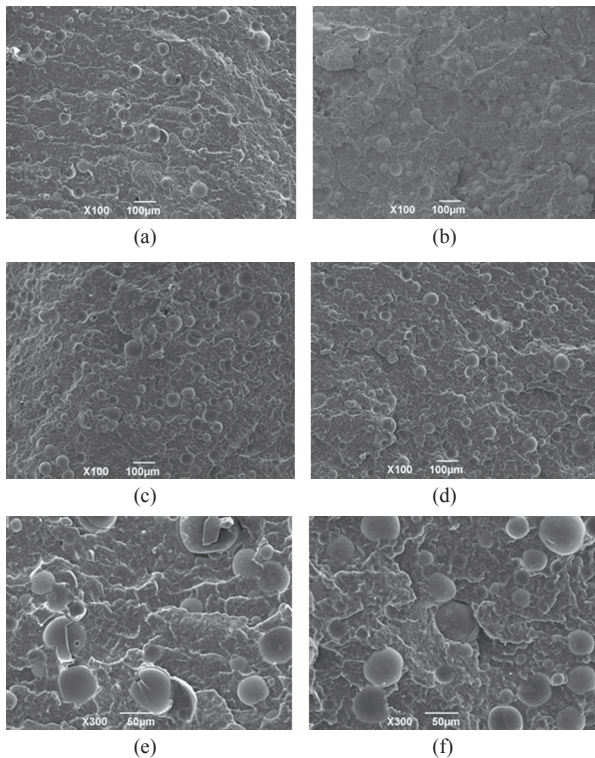
对于 PP/HGMs 复合材料的共混,由于 HGMs 自身粒径较大、单分散且粉体球形表面光滑的特性,因此混合段主要以分布性混合为主,螺杆构型的设计应使得物料在混合段能不断取向分布, A₃, A₄ 组合中分别引入了窄 45° 捏合盘元件及齿形盘元件 TME,大幅度降低了混合段螺杆的剪切能力, HGMs 在材料中的完整率高。这是因为同样是捏合盘元件,但用于分散混合和分布混合的捏合盘元件在设计上差别是比较大的,分步混合的捏合盘元件的捏合片比较窄,单位长度上切割流体的效率达到最大值,而齿形盘元件 TME 在混合过程中可以对物料进行分流取向,实现物料界面的无序化,且提供较小的剪切能力输入,从而实现良好的分布混合^[16],因此, A₃, A₄ 组合制备的复合材料中 HGMs 的完整率较 A₁, A₂ 组合大幅度提高,当 HGMs 在复合材料中添加的质量分数为 15% 时, A₁, A₂, A₃, A₄ 组合制备的 PP/HGMs 复合材料中的 HGMs 完整率分别为 57.3%, 64.6%, 91.1%, 93.5%。

由图 1 可知,随着 HGMs 在复合材料中添加含量的增加,在不同的加工螺杆组合中 HGMs 的完整率总体呈现下降的趋势。这可能是因为随着体系中刚性 HGMs 含量的增加, HGMs 在螺杆中相互碰撞的机率加大,造成 HGMs 的破碎率增大,即随着 HGMs 加载量的增加,复合材料中 HGMs 的完整率下降。

2.3 SEM 形貌分析

当 HGMs 质量分数为 15% 时,不同混合段螺杆构型制备的 PP/HGMs 复合材料的 SEM 照片如图 2 所示。

图 2a、图 2b 分别为采用 A₁, A₂ 组合制备复合材料,可以很明显观察到,复合材料断面处的 HGMs



螺杆构型: a—A₁, 放大 100 倍; b—A₂, 放大 100 倍; c—A₃, 放大 100 倍; d—A₄, 放大 100 倍; e—A₁, 放大 300 倍; f—A₄, 放大 300 倍

图 2 不同混合段螺杆构型制备的 PP/HGMs 复合材料的 SEM 照片
破碎非常严重; 图 2c、图 2d 分别为采用 A₃、A₄ 组合制备复合材料, 断面处几乎观察不到破碎的 HGMs, 说明采用 A₃、A₄ 组合制备的复合材料中 HGMs 的完整率高, 这与计算的完整率数据相吻合。图 2e、图 2f 分别为采用 A₁、A₄ 组合制备的复合材料断面放大 300 倍后的 SEM 照片, 可以进一步看到, 通过改变混合段螺杆构型, 引入具有分布混合作用的齿形 TME 元件, 可以大幅度提高 HGMs 在 PP 基体中的完整率。

2.4 复合材料密度、力学性能分析

不同混合段螺杆构型制备的 PP/HGMs 复合材料密度如图 3 所示。

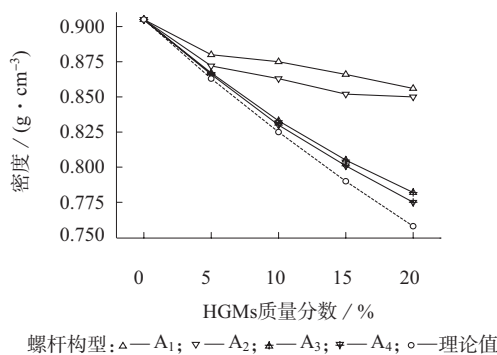


图 3 不同螺杆构型制备的 PP/HGMs 复合材料的密度

由图 3 可以看出, A₁、A₂ 组合制备的 PP/HGMs 复合材料的密度大幅度偏离理论值, 说明体系中 HGMs 的完整率低; A₃、A₄ 组合制备的 PP/HGMs 复合材料的密度与理论值接近。当 HGMs 的质量分数为 15% 时, A₃、A₄ 组合制备的两种 PP/HGMs 复合材料的密度大幅下降, 由未添加 HGMs 时的 0.905 g/cm³ 分别下降至 0.806 g/cm³ 及 0.801 g/cm³, 分别下降 10.9% 和 11.5%, 同样说明在合适的螺杆构型下, HGMs 的加入可以大幅度降低 PP 基体树脂的密度。

PP/HGMs 复合材料的力学性能如表 2 所示。

表 2 不同螺杆构型制备的复合材料的力学性能

项目	螺杆构型				PP 基体
	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	
拉伸强度 / MPa	20.3	20.2	18.6	18.2	20.8
弯曲弹性模量 / MPa	1 210	1 280	1 475	1 490	1 050
悬臂梁缺口冲击强度 / (kJ·m ⁻²)	9.2	9.0	5.8	5.5	12.5
HGMs 完整率 / %	57.3	64.6	91.1	93.5	

注: PP/HGMs 复合材料中 HGMs 的质量分数为 15%。

由表 2 可以看出, HGMs 的加入使得 PP 基体树脂的拉伸强度、悬臂梁缺口冲击强度下降, 弯曲弹性模量提高。这是因为 HGMs 较大的粒径及球形结构使得其与聚合物树脂之间的结合较差, 在拉伸过程中, 断裂发生在 HGMs 与树脂的结合处, 复合材料在未达到最大屈服应力时提前断裂, 致使复合材料的拉伸强度降低; 同样, 在冲击过程中, 由于 HGMs 的加入, 复合材料由韧性断裂转变为脆性断裂, 导致悬臂梁缺口冲击强度降低; HGMs 具有明显增刚的作用, 由于 HGMs 的加入, 使得复合材料的弯曲弹性模量明显提高。不同螺杆构型对 PP/HGMs 复合材料的力学性能影响很大。这是因为加工过程中不同的螺杆构型使得复合材料中 HGMs 的完整率有很大不同, A₁、A₂ 组合剪切强, HGMs 的完整率低, 即有很大一部分球形 HGMs 是以碎片的形式存在于聚合物基体中, 所以其对复合材料的力学性能影响较小, 而 A₃、A₄ 组合制备的 PP/HGMs 复合材料中 HGMs 完整率高, 大部分 HGMs 以球形结构存在, 使得复合材料的悬臂梁缺口冲击强度大幅降低, 弯曲弹性模量大幅提高。

3 结论

(1) 混合段螺杆构型对 PP/HGMs 复合材料中 HGMs 的完整率有很大影响, A₁、A₂ 组合的剪切强, HGMs 完整率低, 复合材料的实际密度大幅度偏离理论值, A₃、A₄ 组合混合分布均匀, HGMs 完整率

高,复合材料的实际密度与理论值接近,添加质量分数为15%的HGMs, A_3 、 A_4 组合制备的两种PP/HGMs复合材料的密度由未添加时的 0.905 g/cm^3 分别下降至 0.806 g/cm^3 及 0.801 g/cm^3 , 分别下降10.9%和11.5%。

(2) SEM显示, A_1 、 A_2 组合制备的复合材料断面处的HGMs破碎严重,而 A_3 、 A_4 组合制备的复合材料断面处几乎观察不到破碎的HGMs,形貌观察与计算的完整率数据相吻合。

(3) HGMs的加入使得PP基体的悬臂梁缺口冲击强度、拉伸强度下降,弯曲弹性模量提高。复合材料的力学性能受混合段螺杆构型的影响很大,使用 A_3 、 A_4 组合制备复合材料时,HGMs在体系中的完整率高,复合材料的弯曲弹性模量大幅提高,悬臂梁冲击强度衰减显著。

参考文献

- [1] 胡智清,周全,熊建武.国内车用改性聚丙烯的研究现状及进展[J].工程塑料应用,2017,45(6):145-148.
Hu Zhiqing, Zhou Quan, Xiong Jianwu. Research Status and development of modified polypropylene for vehicle at home[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(6):145-148.
- [2] 赵玉梅.汽车轻量化用改性聚丙烯的研究进展[J].合成树脂及塑料,2016,33(6):91-94.
Zhao Yumei. Research progress of modified PP for automobile lightweight[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2016, 33(6):91-94.
- [3] 俞飞,赖昂,聂鑫,等.低收缩、低线性膨胀系数聚丙烯材料研究[J].工程塑料应用,2020,48(6):14-19.
Yu Fei, Lai Ang, Nie Xin, et al. Research on polypropylene material of low gloss and low density blasting instrument panel[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(6):14-19.
- [4] 蔡跃武,刘海彪,赵胜勇,等.空心玻璃微珠制备方法及应用研究进展[J].河南化工,2019,36(11):11-13.
Cai Yaowu, Liu Haibiao, Zhao Shengyong, et al. Preparation method and application research progress of hollow glass microspheres[J]. Henan Chemical Industry, 2019, 36(11):11-13.
- [5] 李欣,孙刚,李国明,等.一种空心玻璃微珠填充低密度聚丙烯复合物及其制备方法:CN102492221A[P]. 2012-06-13.
Li Xin, Sun Gang, Li Guoming, et al. Hollow glass microspheres filled low density polypropylene composite and preparation method:CN102492221A[P]. 2012-06-13.
- [6] 虞夏,许传华.高性能空心玻璃微珠对涂料隔热性能影响的研究[J].涂料工业,2014,44(4):1-5.
Yu Xia, Xu Chuanhua. Influence of high-performance hollow glass microsphere on thermal insulation of coatings[J]. Paint & Coatings Industry, 2014, 44(4):1-5.
- [7] Mutua F N, Li Peijie, Koech J K, et al. Surface modification of hollow glass microspheres[J]. Materials Sciences and Applications, 2012, 3(12):856-860.
- [8] 陈金伟,陈锐,汪俊,等.空心玻璃微珠/玻纤增强PA66复合材料的性能研究[J].现代塑料加工应用,2019,31(3):36-39.
Chen Jinwei, Chen Rui, Wang Jun, et al. Properties of hollow glass spheres/glass fiber reinforced PA66 composites[J]. Modern Plastics Processing and Application, 2019, 31(3):36-39.
- [9] 吴喜元,汪俊,陈锐.空心玻璃微珠在玻纤增强阻燃PA66中的应用[J].工程塑料应用,2018,46(12):48-52.
Wu Xiyuan, Wang Jun, Chen Rui. Application of hollow glass microspheres in glass fiber reinforced flame retardant PA66[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(12):48-52.
- [10] 夏英,蹇锡高,韩英波,等.空心玻璃微珠改性ABS复合材料的性能研究[J].工程塑料应用,2005,33(4):12-15.
Xia Ying, Jian Xigao, Han Yingbo, et al. Study on properties of ABS composite filled with hollow bead[J]. Engineering Plastics Application, 2005, 33(4):12-15.
- [11] 柳雷,王冰星,彭丽芬,等.PBT/空心玻璃微珠复合材料的性能研究[J].现代塑料加工应用,2021,33(1):23-25.
Liu Lei, Wang Bingxing, Peng Lifan, et al. Properties of PBT/hollow glass microspheres composite[J]. Modern Plastics Processing and Application, 2021, 33(1):23-25.
- [12] Jang K S. Low-density polycarbonate composites with robust hollow glass microspheres by tailorable processing variables[J]. Polymer Testing, 2020, 84.doi:10.1016/j.polymeresting.2020.106408.
- [13] 尹燕玲.啮合同向双螺杆挤出机新型混合元件及螺杆构型的研究[D].北京:北京化工大学,2002.
Yin Yanling. Study on a new mixing element and screw configuration in intermeshing co-rotating twin screw extruder[D]. Beijing:Beijing University of Chemical Technology, 2002.
- [14] 陈志强,王春芬,汪颐.啮合同向双螺杆挤出机新型混炼元件性能及应用[J].中国塑料,2001,15(6):78-83.
Chen Zhiqiang, Wang Chunfen, Wang Yi. Performance and application of new type mixing elements in co-rotating twin screw extruders[J]. China Plastics, 2001, 15(6):78-83.
- [15] 张俊义,马秀清,耿孝正.啮合同向双螺杆挤出机中齿形盘元件不同螺杆构型的性能分析[J].中国塑料,2004,18(1):92-95.
Zhang Junyi, Ma Xiuqing, Geng Xiaozheng. Analysis of different screw configuration with TME of co-rotating twin screw extruders[J]. China Plastics, 2004, 18(1):92-95.
- [16] 耿孝正.双螺杆挤出机及其应用[M].北京:中国轻工业出版社,2003.
Geng Xiaozheng. Twin Screw Extruder and Its Applications[M]. Beijing:China Light Industry Press, 2003.