

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.04.009

挤出工艺对纳米碳酸钙母料性能影响

柯俊沐, 郭振雄, 陈明鹏, 陈晓峰, 刘志鹏, 陈登龙

(福建师范大学泉港石化研究院, 福建泉州 362801)

摘要:采用纳米碳酸钙(nano-CaCO₃),分别以一字排列三螺杆挤出工艺与双转子连续混炼挤出工艺制备 nano-CaCO₃ 母料,然后添加到高密度聚乙烯(PE-HD)中制备 PE-HD/nano-CaCO₃ 复合材料。分析了不同挤出工艺对 PE-HD/nano-CaCO₃ 复合材料断面形貌和力学性能的影响。结果表明,一字排列三螺杆挤出工艺更好地改善了 nano-CaCO₃ 在 PE-HD 中的分散性,提高了 PE-HD/nano-CaCO₃ 复合材料的韧性,使其缺口冲击强度提高 63.8%,对断裂伸长率影响较小,降低了 16.4%;双转子连续混炼挤出工艺更好地改善了 PE-HD/nano-CaCO₃ 复合材料的弯曲性能,使其弯曲强度提高 6.0%,弯曲弹性模量提高 48.4%,对拉伸强度影响较小,降低了 5.3%。

关键词:一字排列三螺杆挤出工艺;双转子连续混炼挤出工艺;高密度聚乙烯;纳米碳酸钙;复合材料

中图分类号: TQ330.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)04-0049-07

Effects of Extrusion Process on Properties of Nano-CaCO₃ Masterbatch

Ke Junmu, Guo Zhenxiong, Chen Mingpeng, Chen Xiaofeng, Liu Zhipeng, Chen Denglong

(Quangang Petrochemical Research Institute of Fujian Normal University, Quanzhou 362801, China)

Abstract : Nano-CaCO₃ was used to prepare nano-CaCO₃ masterbatch by the parallel arranged tri-screw extrusion process and the double rotor continuous mixing extrusion process respectively, then the high density polyethylene (PE-HD)/nano-CaCO₃ composites were prepared by adding the nano-CaCO₃ masterbatch in PE-HD. The effects of different process on the cross-sectional morphology and mechanical properties of PE-HD/nano-CaCO₃ composite was analyzed. Experiment results show that, the parallel arranged tri-screw extrusion process better improves the dispersion of nano-CaCO₃ in and the improves toughness of PE-HD/nano-CaCO₃ composite, so as to improve the notched impact strength of 63.8%, it has less effect on the elongation at break, which is reduced by 16.4%. The double rotor continuous mixing extrusion process better improves the flexura properties of PE-HD/nano-CaCO₃ composite, so that the flexural strength increases by 6%, flexural modulus increases 48.4%, it has less effect on the tensile strength, which is reduced by 5.3%.

Keywords : parallel arranged tri-screw extrusion process ; double rotor continuous mixing extrusion process ; high density polyethylene ; nano-CaCO₃ ; composite

纳米碳酸钙(nano-CaCO₃)在改善塑料加工性能、提高韧性^[1]等方面具有明显的效果。挤出工艺对 nano-CaCO₃ 的性能有着重要的影响,国内外学者对挤出工艺做了大量的研究报道,主要包括三螺杆挤出工艺^[2-3]、双转子连续混炼挤出工艺^[4-7],以及三螺杆挤出工艺与双螺杆挤出工艺的比较^[8-10]。朱向哲等^[11]认为,一字排列三螺杆挤出机具有两个啮

合区,在啮合区具有较大的压力梯度、速度梯度,有利于物料的充分混合,物料在流道轴截面内,从一根螺杆流向另一根螺杆,共流经两个啮合区,因此,其混合性能好于双螺杆挤出机。廖洋威等^[12]认为,密炼机间歇工作和双螺杆挤出机生热量高、剪切很强,导致产品质量与国外品牌相比还有较大的差距。双转子连续混炼机在保持了密炼机良好的分布和分散

基金项目:福建省教育厅中青年教师教育科研项目(JT180100),2018年中央引导地方科技发展专项(2018L3015),福建师范大学泉港石化研究院专项资金项目(2015YJY17,2018YJY11,2018YJY14)

通讯作者:陈登龙,博士,教授级高级工程师,从事高分子材料与新能源研究工作 E-mail: chendenglong@163.com

收稿日期: 2020-02-21

引用格式: 柯俊沐,郭振雄,陈明鹏,等.挤出工艺对纳米碳酸钙母料性能影响[J].工程塑料应用,2020,48(4):49-55.

Ke Junmu, Guo Zhenxiong, Chen Mingpeng, et al. Effects of extrusion process on properties of nano-CaCO₃ masterbatch[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(4): 49-55.

混合能力的同时,又具备低温混合特性和连续生产的优势,在高填充分散混合的场合得到了越来越广泛的应用。尽管一字排列三螺杆挤出工艺和双转子连续混炼挤出工艺均克服了传统双螺杆挤出工艺在高填充 nano-CaCO₃ 母料领域喂料难、分散不均匀等难题,但对于一字排列三螺杆挤出工艺与双转子连续混炼挤出工艺在高填充 nano-CaCO₃ 的应用评价鲜有报道,不利于高填充 nano-CaCO₃ 工业化生产应用。

高密度聚乙烯 (PE-HD) 是制备高性能管材的一种良好基体树脂。通过加入层状或粒状的无机粉体,以纳米尺寸分散在 PE-HD 中,可以制备具有高强度高韧性的 PE-HD 增强材料^[13-14],改善了 PE-HD 在管材领域的应用,有效提高了管材企业的市场竞争力。笔者选用 nano-CaCO₃ 对 PE-HD 进行改性,研究了双转子连续混炼挤出工艺和一字排列三螺杆挤出工艺对 PE-HD/nano-CaCO₃ 复合材料性能的影响。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PE-HD: 7000F, 齐鲁石化公司;

低密度聚乙烯 (PE-LD): 2426H, 茂名石化有限公司;

线型低密度聚乙烯 (PE-LLD): 7042, 大庆石化公司;

nano-CaCO₃: CCR, 恩平燕怡新材料有限公司;

PE 蜡: WD2040P, 泰国 SCG 公司;

硬脂酸: AC-1801, 印度尼西亚斯文公司。

1.2 主要设备及仪器

双螺杆挤出机: TSH25/48 型, 南京创博机械设备有限公司;

双转子连续混炼挤出机: CM50 型, 福建南安实达橡塑机械有限公司;

一字排列三螺杆挤出机: RETM-25/40 型, 广州市普同实验分析仪器有限公司;

注塑机: LMH60-SVPS 型, 震雄机械股份有限公司;

电热恒温鼓风干燥箱: PHG-9070 型, 上海精宏实验设备有限公司;

高速混合机: SHR5A 型, 南京科尔克挤出装备有限公司;

电子拉力测试机: CMT6104 型, 美特斯工业系统 (中国) 有限公司;

液晶式摆锤冲击试验机: ZBC8400-B 型, 美特斯工业系统 (中国) 有限公司;

扫描电子显微镜 (SEM): SIGMA 500 型, 德国卡尔蔡司公司。

1.3 试样制备

(1) nano-CaCO₃ 母料制备。

nano-CaCO₃ 母料配方列于表 1。

PE-LD	PE-LLD	nano-CaCO ₃	PE 蜡	硬脂酸
8	8	80	2	2

分别采用双转子连续混炼挤出工艺和一字排列三螺杆挤出工艺制备 nano-CaCO₃ 含量为 80 份的 nano-CaCO₃ 母料。

① 双转子连续混炼挤出工艺制备。

按表 1 配方, 将 nano-CaCO₃ 在高速混合机中加热至 (110 ± 10) °C, 控制 nano-CaCO₃ 的水分小于 0.3%, 依次加入 PE 蜡、硬脂酸, 加入后继续搅拌 15 min, 然后加入 PE-LLD 和 PE-LD 继续搅拌 30 min, 置于双转子连续混炼挤出机中, 混合料由喂料区向密炼区供料, 由密炼区混合及塑化完成的混合料连续卸料至单螺杆挤出设备, 完成造粒。双转子连续混炼挤出机组的参数列于表 2, 加工工艺参数列于表 3。

密炼区				单螺杆挤出区		
转子公称直径 / mm	转子最大转速 / (r · min ⁻¹)	主电机功率 / kW	螺杆直径 / mm	螺杆长径比	螺杆最大转速 / (r · min ⁻¹)	电机功率 / kW
50	750	22	75	14	75	11

温度 / ℃				转速 / (r · min ⁻¹)			
料筒			模头	密炼主机	喂料	单螺杆	切粒
I 区	II 区	III 区					
130	195	210	200	300	5	30	20

② 一字排列三螺杆挤出工艺制备。

按表 1 配方, 将 nano-CaCO₃ 在高速混合机加热至 (110 ± 10) °C, 控制 nano-CaCO₃ 水分小于 0.3%, 依次加入 PE 蜡、硬脂酸, 加入后继续搅拌 15 min, 然后加入 PE-LLD 和 PE-LD 继续搅拌 30 min, 置于一字排列三螺杆挤出机中, 经过三根螺杆混合、塑化并造粒。一字排列三螺杆挤出机的参数列于表 4, 加工工艺参数列于表 5。

螺杆直径 / mm	螺杆长径比	螺杆最高转速 / (r · min ⁻¹)	电机功率 / kW
21.7	40	600	7.5

表5 一字排列三螺杆挤出机制备 nano-CaCO₃ 母料加工工艺参数

温度/℃									转速/(r·min ⁻¹)			
料筒												
I区	II区	III区	IV区	V区	VI区	VII区	VIII区	模头	主机	喂料	切粒	
130	155	165	175	185	190	195	210	200	300	5	20	

(2) PE-HD 粒料制备。

1[#] 粒料: 纯 PE-HD 粒料。

2[#] 粒料: 称取 12.5% 双转子连续混炼挤出工艺制备的 nano-CaCO₃ 母料、87.5% 的 PE-HD, 混合均匀, 按照表 6 双螺杆挤出机的加工工艺参数, 经双螺杆挤出机挤出、造粒, 获得 nano-CaCO₃ 母料含量为 10% 的 2[#] 粒料。

表6 双螺杆挤出机加工工艺参数

温度/℃									转速/(r·min ⁻¹)			
料筒												
I区	II区	III区	IV区	V区	VI区	VII区	VIII区	模头	主机	喂料	切粒	
130	155	165	175	185	190	195	210	200	300	5	20	

3[#] 粒料: 称取 12.5% 一字排列三螺杆挤出工艺制备的 nano-CaCO₃ 母料、87.5% 的 PE-HD, 混合均匀, 按照表 6 双螺杆挤出机的加工工艺参数, 经双螺杆挤出机挤出、造粒, 获得 nano-CaCO₃ 母料含量为 10% 的 3[#] 粒料。

(3) PE-HD 试样制备。

分别将 1[#]、2[#]、3[#] 粒料放置在 105℃ 的干燥箱中鼓风干燥 4 h, 再将烘干的粒料经注塑机注塑成标准试样, 注塑机工艺参数列于表 7, 按 GB/T 2918-2018 将试样放置在温度 (23±1)℃、相对湿度 (50±2)% 的恒温恒湿室内 24 h 后, 对其进行性能测试。

表7 注塑机加工工艺参数

温度/℃				注塑压力/MPa	保压压力/MPa	保压时间/s
射咀	I区	II区	III区			
220	240	230	190	90	60	3

1.4 性能测试

(1) 缺口冲击强度按 GB/T 1043.1-2008 测试, 试样尺寸为 80 mm×10 mm×4 mm, A 型缺口, 摆锤能量为 4 J。

(2) 拉伸强度和断裂伸长率按 GB/T 1040.1-2006 测试, 试样尺寸为 150 mm×10 mm×4 mm, 标距为 50 mm, 拉伸速度为 100 mm/min。

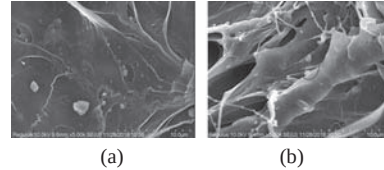
(3) 弯曲强度和弯曲弹性模量按 GB/T 9341-2008 测试, 试样尺寸为 80 mm×10 mm×4 mm, 弯曲速度为 2 mm/min。

(4) 微观形貌分析: 将试样冲断后, 对其断面进行喷金处理, 使用 SEM 对试样断面的微观形貌进行观察。

2 结果与讨论

2.1 PE-HD/nano-CaCO₃ 复合材料的微观形貌

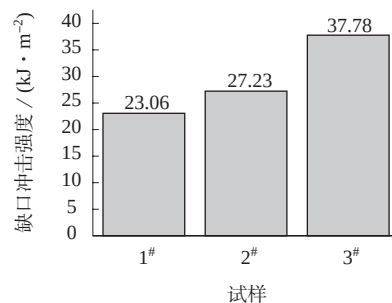
PE-HD/nano-CaCO₃ 复合材料的微观形貌如图 1 所示。

a—2[#] 试样; b—3[#] 试样图1 PE-HD/nano-CaCO₃ 复合材料的 SEM 照片 (×5000)

由图 1 可以看出, 对于不同工艺制备的 nano-CaCO₃ 母料, 采用双转子连续混炼挤出工艺时, PE-HD/nano-CaCO₃ 复合材料中 nano-CaCO₃ 的最大颗粒尺寸约为 2 μm; 采用一字排列三螺杆挤出工艺制备时, PE-HD/nano-CaCO₃ 复合材料中 nano-CaCO₃ 的最大颗粒尺寸约为 0.5 μm。一字排列三螺杆挤出工艺制备的 nano-CaCO₃ 的分散均匀程度优于双转子连续混炼挤出工艺。分散混合能力一般是通过剪切力来实现的, 在双转子连续混炼挤出机混合过程中, 物料在混炼室内强烈地轴向循环流动, 使得该设备具有较强的轴向分散混合能力; 一字排列三螺杆挤出机具有两个啮合区, 在啮合区具有较大的压力梯度、速度梯度, 有利于物料的充分混合。物料在流道轴截面内, 从一根螺杆流向另一根螺杆, 共流经两个啮合区。相对于双转子连续混炼挤出机, 一字排列三螺杆挤出机使物料在多个空间层面上充分交换流动, 对 nano-CaCO₃ 具有较好的分散性。

2.2 不同挤出工艺纳米碳酸钙母料对 PE-HD/nano-CaCO₃ 复合材料力学性能的影响

为了更好地研究不同挤出工艺对 PE-HD/nano-CaCO₃ 复合材料力学性能的影响, 采用不同挤出工艺制备 nano-CaCO₃ 母料, 制备的 PE-HD/nano-CaCO₃ 复合材料的缺口冲击强度如图 2 所示。

图2 不同挤出工艺制备 nano-CaCO₃ 母料时 PE-HD/nano-CaCO₃ 复合材料的缺口冲击强度

由图2可以看出,相对于纯PE-HD(1[#]试样),添加nano-CaCO₃后,制备的PE-HD/nano-CaCO₃复合材料(2[#]试样和3[#]试样)的缺口冲击强度显著提高。这是因为nano-CaCO₃的粒径较小,比表面积大,纳米颗粒与PE-HD基体的接触面积大,纳米粒子可以在PE-HD基体中作为应力集中点,PE-HD/nano-CaCO₃复合材料受到外力冲击时会产生更多的银纹,吸收更多的冲击能;nano-CaCO₃具有能量传递效应,会使PE-HD/nano-CaCO₃复合材料受到外力冲击时产生的银纹在扩散时受阻或钝化,最终终止裂纹,从而提高PE-HD/nano-CaCO₃复合材料的抗冲击能力^[15]。不同挤出工艺制备的nano-CaCO₃母料对于PE-HD/nano-CaCO₃复合材料缺口冲击强度的影响效果不同。采用双转子连续混炼挤出工艺制备nano-CaCO₃母料时,制备的2[#]试样的缺口冲击强度为27.23 kJ/m²,相对于1[#]试样的23.06 kJ/m²,提高了18.1%;采用一字排列三螺杆挤出工艺制备nano-CaCO₃母料时,制备的3[#]试样的缺口冲击强度为37.78 kJ/m²,相对于1[#]试样,提高了63.8%。一字排列三螺杆挤出工艺制备的nano-CaCO₃母料对PE-HD/nano-CaCO₃复合材料的增韧效果更佳,一字排列三螺杆挤出工艺优于双转子连续混炼挤出工艺。这是因为一字排列三螺杆挤出机具有两个啮合区,物料经过一个螺距的长度时,受到两个啮合区的剪切力,剪切次数增加;物料在流道轴截面内,从一根螺杆流向另一根螺杆,物料的空间多个层面上充分交换流动,对物料具有较好的分散。因此,在相同nano-CaCO₃含量条件下,一字排列三螺杆挤出工艺相比于双转子连续混炼挤出工艺,使PE-HD/nano-CaCO₃复合材料具有更多的纳米颗粒作为PE-HD基体的应力集中点,PE-HD/nano-CaCO₃复合材料受到外力冲击时会产生更多的银纹,吸收更多的冲击能。

采用不同挤出工艺制备nano-CaCO₃母料,制备的PE-HD/nano-CaCO₃复合材料的拉伸强度如图3所示。

由图3可知,相对于纯PE-HD(1[#]试样),添加nano-CaCO₃后,制备的PE-HD/nano-CaCO₃复合材料(2[#]试样和3[#]试样)的拉伸强度均有所下降。采用双转子连续混炼挤出工艺制备nano-CaCO₃母料时,制备的2[#]试样的拉伸强度为26.30 MPa,相对于1[#]试样的27.78 MPa,降低了5.3%;采用一字排列三螺杆挤出工艺制备nano-CaCO₃母料时,制

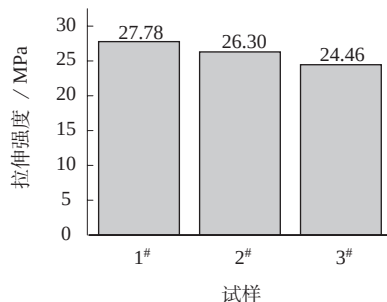


图3 不同挤出工艺制备nano-CaCO₃母料时PE-HD/nano-CaCO₃复合材料的拉伸强度

备的3[#]试样的拉伸强度为24.46 MPa,相对于1[#]试样,降低了12.0%。虽然不同挤出工艺制备的nano-CaCO₃母料都降低了PE-HD/nano-CaCO₃复合材料的拉伸强度,但双转子连续混炼挤出工艺明显优于一字排列三螺杆挤出工艺。

拉伸强度是表征材料力学性能最为重要的参数之一,反映了无塑性形变条件下材料可以承受的最大载荷。对于颗粒填充高分子复合材料,若颗粒与基体树脂之间无粘结,且无应力传递,所有载荷由基体树脂承受,则复合材料的拉伸强度与垂直载荷方向的承受载荷的有效横截面积分数之间有如下关系^[16]:

$$\sigma_c = \sigma_m(1 - \psi) \quad (1)$$

式中: σ_c ——复合材料拉伸强度,MPa;

σ_m ——树脂拉伸强度,MPa;

ψ ——颗粒最大面积分数,%。

J. Jancar等^[17]研究认为,应力集中主要依赖于粒子的含量,基体承载横截面积的减少是影响复合材料拉伸强度的主要因素。由于nano-CaCO₃粒子分散在PE-HD基体内,与纯PE-HD相比,由于有效承载面积减小,PE-HD/nano-CaCO₃复合材料的拉伸强度降低。相对于双转子连续混炼挤出工艺,一字排列三螺杆挤出工艺使PE-HD/nano-CaCO₃复合材料的拉伸强度明显降低的原因在于:在nano-CaCO₃含量一定的情况下,由于一字排列三螺杆有两个啮合区,对nano-CaCO₃具有较好分散性,使纳米粒子的最大面积分数(ψ)减小,故 $1-\psi$ 增大,但是同时一字排列三螺杆的高剪切力对PE-HD树脂的分子链的破坏十分严重,使PE-HD树脂的拉伸强度(σ_m)下降较大,在两个因素共同作用下,相对于双转子连续混炼挤出工艺,一字排列三螺杆挤出工艺对PE-HD/nano-CaCO₃复合材料的拉伸强度(σ_c)降低明显。

采用不同挤出工艺制备 nano-CaCO₃ 母料,制备的 PE-HD/nano-CaCO₃ 复合材料的弯曲性能如图 4、图 5 所示。

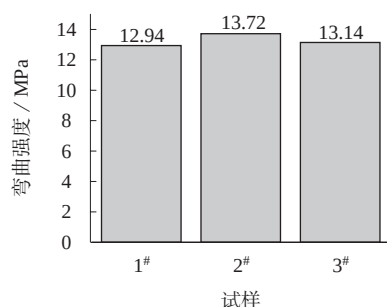


图 4 不同挤出工艺制备 nano-CaCO₃ 母料时 PE-HD/nano-CaCO₃ 复合材料的弯曲强度

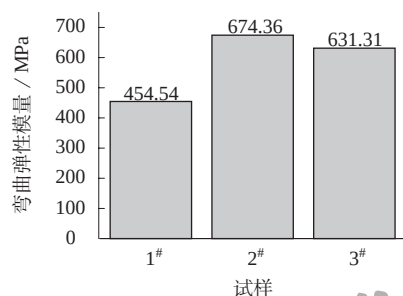


图 5 不同挤出工艺制备 nano-CaCO₃ 母料时 PE-HD/nano-CaCO₃ 复合材料的弯曲弹性模量

由图 4 和图 5 可知,相对于纯 PE-HD (1# 试样),添加 nano-CaCO₃ 后,制备的 PE-HD/nano-CaCO₃ 复合材料 (2# 试样和 3# 试样) 的弯曲强度和弯曲弹性模量均有所提高。采用双转子连续混炼挤出工艺制备 nano-CaCO₃ 母料时,制备的 2# 试样的弯曲强度和弯曲弹性模量分别为 13.72 MPa 和 674.36 MPa,相对于 1# 试样的 12.94 MPa 和 454.54 MPa,分别提高了 6.0% 和 48.4%;采用一字排列三螺杆挤出工艺制备 nano-CaCO₃ 母料时,制备的 3# 试样的弯曲强度和弯曲弹性模量分别为 13.14 MPa 和 631.31 MPa,相对于 1# 试样,分别提高了 1.5% 和 38.9%。双转子连续混炼挤出工艺的效果优于一字排列三螺杆挤出工艺。

弯曲强度和弯曲弹性模量增加的原因是^[18-19]:一方面是因为 nano-CaCO₃ 纳米颗粒在 PE-HD 基体中作为物理交联点,可以有效地传递应力,使得 PE-HD/nano-CaCO₃ 复合材料的弯曲强度和弯曲弹性模量增大;另一方面是因为 nano-CaCO₃ 加入到 PE-HD 中,充当了异相成核剂的作用,促进了 PE-HD 的结晶,使得分子链排列紧密有序,分子间作用增强,有利于 PE-HD/nano-CaCO₃ 复合材料的

弯曲强度和弯曲弹性模量增加。相比于双转子连续混炼挤出工艺,采用一字排列三螺杆挤出工艺制备 nano-CaCO₃ 母料时,制备的 PE-HD/nano-CaCO₃ 复合材料的弯曲强度和弯曲弹性模量提高较少,其原因在于:尽管一字排列三螺杆对 nano-CaCO₃ 具有更好的分散性,使其交联点更多且结晶度更高,但是三螺杆造粒工艺的高剪切力对 PE-HD 树脂的分子链破坏很显著,使得 PE-HD 树脂承载应力的能力下降,在两个因素共同作用下,使一字排列三螺杆挤出工艺对 PE-HD/nano-CaCO₃ 复合材料的弯曲强度和弯曲弹性模量提高较少。

采用不同挤出工艺制备 nano-CaCO₃ 母料,制备的 PE-HD/nano-CaCO₃ 复合材料的断裂伸长率如图 6 所示。

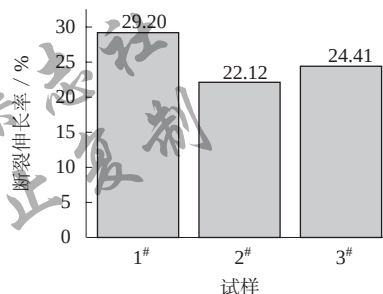


图 6 不同挤出工艺制备 nano-CaCO₃ 母料时 PE-HD/nano-CaCO₃ 复合材料的断裂伸长率

由图 6 可以看出,相对于纯 PE-HD (1# 试样),添加 nano-CaCO₃ 后,制备的 PE-HD/nano-CaCO₃ 复合材料 (2# 试样和 3# 试样) 的断裂伸长率有所降低。采用双转子连续混炼挤出工艺制备 nano-CaCO₃ 母料时,制备的 2# 试样的断裂伸长率为 22.12%,相对于 1# 试样的 29.20%,降低了 24.2%;采用一字排列三螺杆挤出工艺制备 nano-CaCO₃ 母料时,制备的 3# 试样的断裂伸长率为 24.41%,相对于 1# 试样,降低了 16.4%。双转子连续混炼挤出工艺的效果明显低于一字排列三螺杆挤出工艺。这是由于 nano-CaCO₃ 在 PE-HD/nano-CaCO₃ 复合材料中的物理交联点作用和异相成核剂作用,使其断裂伸长率降低。相比于双转子连续混炼挤出工艺,采用一字排列三螺杆挤出工艺时,制备的 PE-HD/nano-CaCO₃ 复合材料断裂伸长率降低较少,其原因在于:断裂伸长率大小与分子链的运动难易程度有关。分子量越大,分子链之间的分子间作用力越强,分子链运动就越困难,断裂伸长率越小^[20-22]。相比于双转子连续混炼,一字排列三螺杆的高剪切力对

PE-HD树脂分子链的破坏性更强,其分子量降低,小分子链能更易运动,因此采用一字排列三螺杆挤出工艺制备 nano-CaCO₃ 母料时,制备的 PE-HD/nano-CaCO₃ 复合材料的断裂伸长率降低较少。

3 结论

(1) SEM 分析表明,相比于双转子连续混炼挤出工艺,一字排列三螺杆挤出工艺对 nano-CaCO₃ 具有更好的分散作用,制备的 PE-HD/nano-CaCO₃ 复合材料的缺口冲击强度增加明显,较纯 PE-HD 提高了 63.8%。

(2) 采用不同挤出工艺制备 nano-CaCO₃ 母料,制备的 PE-HD/nano-CaCO₃ 复合材料的弯曲性能得到提高。一字排列三螺杆挤出工艺对 nano-CaCO₃ 具有更好的分散作用的同时,高剪切力对 PE-HD 树脂分子链的破坏也很显著,在两个因素的共同作用下,采用双转子连续混炼挤出工艺时,制备的 PE-HD/nano-CaCO₃ 复合材料的弯曲性能较高,较纯 PE-HD 的弯曲强度提高 6%、弯曲弹性模量提高 48.4%。

(3) 采用不同挤出工艺制备 nano-CaCO₃ 母料,制备的 PE-HD/nano-CaCO₃ 复合材料的拉伸强度和断裂伸长率均有所降低。采用双转子连续混炼挤出工艺制备 nano-CaCO₃ 母料对 PE-HD/nano-CaCO₃ 复合材料的拉伸强度影响较小,其拉伸强度较纯 PE-HD 降低了 5.3%。采用一字排列三螺杆挤出工艺制备 nano-CaCO₃ 母料对 PE-HD/nano-CaCO₃ 复合材料的断裂伸长率影响较小,其断裂伸长率较纯 PE-HD 降低了 16.4%。

参考文献

- [1] 石璞,陈浪,钟苗苗,等.高组分纳米碳酸钙填充聚丙烯及增韧机理[J].高分子材料科学与工程,2015,31(10):69-74.
Shi Pu, Chen Lang, Zhong Miaomiao, et al. Toughening mechanism of polypropylene with high components of nano-calcium carbonate[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2015, 31(10):69-74.
- [2] 余东泉.三螺杆挤出机混炼性能评价及剪切-拉伸交变流场作用机制研究[D].北京:北京化工大学,2017.
Yu Dongquan. Assessment on mixing properties of triple screw extruder and research on its shear-extensional alternating flow mechanism[D]. Beijing:Beijing University of Chemical Technology, 2017.
- [3] Zhu X Z, Wang G, He Y D, et al. Flow mechanism and mixing efficiency of a parallel arranged triple screw extruder for polymer processing[J]. Advanced Science, 2013, 5(1):46-54.
- [4] 马昆,丁玉梅,邵剑波,等.双转子连续混炼机不同转子元件混合性能的对比较研究[J].中国塑料,2014,28(5):107-110.
Ma Kun, Ding Yumei, Shao Jianbo, et al. Comparative study on mixing performance of different rotors in two-rotor continuous mixes[J]. China Plastics, 2014, 28(5):107-110.
- [5] 张晓强,黄建东,江波,等.大型双转子连续混炼机转子混炼段混合性能的研究[J].工程塑料应用,2015,43(1):72-75.
Zhang Xiaoqiang, Huang Jiandong, Jiang Bo, et al. Study on mixing performance of kneading section of rotors in large-scale twin-rotor continuous mixer[J]. Engineering Plastics Application, 2015, 43(1):72-75.
- [6] 张霞,谢林生,马玉录.双转子连续混炼机混炼段拉伸作用的研究[J].中国塑料,2010,24(3):108-113.
Zhang Xia, Xie Linsheng, Ma Yulu. Study on stretching effect in mixing section of two-rotor continuous mixers[J]. China Plastics, 2010, 24(3):108-113.
- [7] 马昆,丁玉梅,邵剑波,等.双转子混炼机中固体粉末与聚合物共混的数值模拟[J].橡胶工业,2015,62(9):527-530.
Ma Kun, Ding Yumei, Shao Jianbo, et al. Numerical simulation on mixing of solid powder and polymer in double-rotor continuous mixer[J]. China Rubber Industry, 2015, 62(9):527-530.
- [8] 庞军舰,何亚东,信春玲,等.三螺杆挤出机与双螺杆挤出机混合性能的比较[J].中国塑料,2012(6):107-111.
Pang Junjian, He Yadong, Xin Chunling, et al. Comparison of mixing performance of three-screw extruders with twin-screw extruders[J]. China Plastics, 2012(6):107-111.
- [9] 张安震,孙靖尧,庞军舰,等.三螺杆、双螺杆挤出机及其啮合块混合性能的比较[J].橡塑技术与装备,2014,40(20):33-39.
Zhang Anzhen, Sun Jingyao, Pang Junjian, et al. Comparison of mixing performance of tri-screw and twin-screw extruders and their meshing blocks[J]. China Rubber / Plastics Technology and Equipment, 2014, 40(20):33-39.
- [10] 王鹏,孙浩.三螺杆挤出工艺在填充母料生产中的应用[J].工程塑料应用,2010,38(6):80-82.
Wang Peng, Sun Hao. Application of three screw extrusion process in the filling masterbatch production[J]. Engineering Plastics Application, 2010, 38(6):80-82.
- [11] 朱向哲,谢禹钧,苗一.“一字”型排列三螺杆挤出机三维流场分析[J].工程塑料应用,2004,32(10):34-36.
Zhu Xiangzhe, Xie Yujun, Miao Yi. Three dimensional flow field analysis in tri-screw extruder of “一” type[J]. Engineering Plastics Application, 2004, 32(10):34-36.
- [12] 廖洋威,谢林生,马玉录,等.高拉伸转子混合特性及在乙烯-醋酸乙烯共聚物无卤阻燃材料制备中的应用[J].高分子材料科学与工程,2018,34(1):101-105.
Liao Yangwei, Xie Linsheng, Ma Yulu, et al. Flow field mixing characteristics of high stretching rotor and its application in prepa-

- ration of halogen-free flame retardant EVA[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2018, 34(1):101-105.
- [13] Sahebian S, Zebarjad S M, Sajjadi S A, et al. Effect of both uncoated and coated calcium carbonate on fracture toughness of HDPE / CaCO₃ nanocomposites[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2007, 104(6):3 688-3 694.
- [14] Sepet H, Tarakcioglu N, Misra R. Determination of the mechanical, thermal and physical properties of nano-CaCO₃ filled high-density polyethylene nanocomposites produced in an industrial scale[J]. Journal of Composite Materials, 2016, doi: 10.1177/0021998315621371.
- [15] 朱静. HDPE/TPI/纳米颗粒三元复合材料结构与性能的研究[D]. 青岛:青岛科技大学, 2018.
- Zhu Jing. Study on structure and properties of HDPE/TPI/nanoparticles ternary composite[D]. Qingdao:Qingdao University of Science & Technology, 2018.
- [16] 吴成宝, 盖国胜, 李建波. PP/无机粒子复合材料拉伸强度的预测模型及影响因素分析[J]. 合成材料老化与应用, 2009, 38(4):25-30.
- Wu Chengbao, Gai Guosheng, Li Jianbo. Predicting model and influencing factors analysis of tensile strength of PP/inorganic particles composites[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2009, 38(4):25-30.
- [17] Jancar J, Dianselmo A, Dibenedetto A T. The yield strength of particulate reinforced thermoplastic composites[J]. Polymer Engineering and Science, 1992, 32(18):1 394-1 399.
- [18] 刘传生, 吴成宝, 陈峥华, 等. 聚丙烯/硬质无机粒子复合材料的拉伸性能的理论预测模型研究[J]. 合成材料老化与应用, 2017, 46(1):67-71.
- Liu Chuansheng, Wu Chengbao, Chen Zhenghua, et al. A study on theoretic prediction models for the rigid inorganic particle filling polypropylene composites[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2017, 46(1):67-71.
- [19] 陈莹. 聚丙烯/Al(OH)₃/Mg(OH)₂/ZB阻燃复合材料的制备及其性能研究[D]. 广州:华南理工大学, 2011.
- Chen Ying. Research on preparation and properties of polypropylene/Al(OH)₃/Mg(OH)₂/ZB flame retardant composites[D]. Guangzhou:South China University of Technology, 2011.
- [20] 黄丽. 高分子材料[M]. 2版. 北京:化学工业出版社, 2010:23-25.
- Huang Li. Polymer Materials[M]. 2nd ed. Beijing:Chemical Industry Press, 2010:23-25.
- [21] 吴成宝, 盖国胜, 陈峥华, 等. 不同碳酸钙填充聚氯乙烯复合材料力学性能研究[J]. 塑料科技, 2016, 44(5):37-41.
- Wu Chengbao, Gai Guosheng, Chen Zhenghua, et al. Study on mechanical properties of PVC composites filled with different types of calcium carbonate[J]. Plastics Science and Technology, 2016, 44(5):37-41.
- [22] 李玉杰. 无机粉体填充 HDPE 对其综合性能的影响研究[J]. 城市地理, 2016(24):182-183.
- Li Yujie. Effect of inorganic powder filled HDPE its overall performance [J]. Cultural Geography, 2016(24):182-183.

优惠销售中国工程塑料复合材料技术研讨会《论文集》及论文集光盘

中国合成树脂供销协会加工与应用分会为了配合 2000~2019 年先后召开的中国工程塑料复合材料技术研讨会, 共编辑、出版了 20 本《论文集》。其内容涉及工程塑料及通用塑料的合成与改性、加工、应用、测试、模具、设备新技术, 以及文献综述、评论等, 突出了我国工程塑料行业发展规划、热点分析。现尚有部分《论文集》, 以及应广大读者要求加工制作的论文集光盘, 现以优惠价格(含邮费)销售, 欢迎订阅。

1. 2004~2019 年中国工程塑料复合材料技术研讨会《论文集》, 优惠价 400 元/套。

2. 2000~2019 年中国工程塑料复合材料技术研讨会论文集光盘, 优惠价 300 元/盘。本光盘除收录 2000~2019 年 20 本《论文集》的全部内容外, 还包括约 3 300 人次的会议代表通讯录。

邮局汇款

收款地址: 山东济南市天桥区田庄东路 3 号

收款单位:《工程塑料应用》杂志社

邮 编: 250031

电 话: (0531)85878223 85878057 85878278

传 真: (0531)85947355

银行汇款

户 名: 山东非金属材料研究所

开户银行: 济南市工商银行经十一路支行

帐 号: 1602001229014425546

网上订购: <http://www.epa1973.com>