

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.04.013

热塑性聚氨酯模压成型工艺优化

胡恩源^{1,2}, 张学文³, 陈俊¹, 邵伟光¹, 蔡利海¹, 刘文言²

(1. 中国矿业大学(北京), 北京 100083; 2. 军事科学院系统工程研究院军事新能源技术研究所, 北京 102300;

3. 北京航天发射技术研究所, 北京 100076)

摘要:以热塑性聚氨酯(TPU)为原料,采用模压成型工艺制备了 TPU 薄膜,探究了工艺参数(压制温度、压制时间、保压压力、冷却速率)对 TPU 薄膜外观形貌、厚度和拉伸性能的影响。结果表明,若压制温度过高或压制时间过长,容易使 TPU 热分解,导致 TPU 薄膜产生气泡;压制温度较低或压制时间较短,则容易造成 TPU 薄膜厚度偏高。TPU 薄膜的拉伸性能随压制温度、压制时间、保压压力、冷却速率 4 个工艺参数值的增加基本呈现先增大后减小或趋于稳定的变化规律。TPU 薄膜模压成型的最佳工艺参数为:压制温度 190℃,压制时间 16 min,保压压力 3.25 MPa,冷却速率 34.8℃/min,在此工艺参数条件下制备的 TPU 薄膜的拉伸强度和断裂伸长率分别可达到 20.27 MPa 和 503.16%。

关键词:热塑性聚氨酯;模压成型;工艺参数优化;拉伸性能

中图分类号:TQ334.9 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-3539(2022)04-0070-06

Optimization of Thermoplastic Polyurethane Compression Molding Process

Hu Enyuan^{1,2}, Zhang Xuewen³, Chen Jun¹, Shao Weiguang¹, Cai Lihai¹, Liu Wenyan²

[1. China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China;

2. Institute of Military New Energy Technology, Institute of Systems Engineering, Academy of Military Sciences, Beijing 102300, China;

3. Beijing Institute of Space Launch Technology, Beijing 100076, China]

Abstract : TPU films were prepared by compression molding using thermoplastic polyurethane as raw material. The effects of process parameters (compression temperature, compression time, holding pressure and cooling rate) on the appearance, thickness and tensile properties of TPU films were explored. The results show that too high compression temperature and too long compression time are easy to thermally decompose TPU, which in turn lead to bubbles in the TPU film. While the pressing temperature and pressing time are insufficient, the thickness of the TPU film is high. The tensile properties of the TPU film approximately show a change rule that first increased and then decreased or tend to be stable with the increase of the four process parameters including pressing temperature, pressing time, holding pressure and cooling rate. When the compression temperature, compression time, holding pressure and cooling rate are 190℃, 16 min, 3.25 MPa and 34.8℃/min respectively, they are the best process parameters for TPU film compression molding. At this time, the tensile strength and elongation at break of the TPU film can reach 20.27 MPa and 503.16%, respectively.

Keywords : thermoplastic polyurethane ; compression molding ; optimization of process parameters ; tensile property

热塑性聚氨酯(TPU)兼具橡胶材料优异的力学性能和塑性材料良好的加工性能,其制品在工业、医疗、生活等多个领域均有广泛应用^[1-3]。TPU 薄膜作为主要的 TPU 制品之一,具有比传统薄膜材料更好的理化特性和可降解性,被广泛用作鞋材、防水

透湿材料及隔热隔音材料等^[4-5]。

TPU 薄膜制品常用的制备方法为流延法和吹膜法,目前基于这两种方法的成型工艺有模压成型(压缩模塑)、注射成型、挤出成型及压延成型等^[6-10]。其中,模压成型因具有成本低、效率高、产品

通信作者:邵伟光,硕士生导师,主要研究方向为油料装备及其材料研究

收稿日期:2022-02-12

引用格式:胡恩源,张学文,陈俊,等.热塑性聚氨酯模压成型工艺优化[J].工程塑料应用,2022,50(4):70-75.

Hu Enyuan, Zhang Xuewen, Chen Jun, et al. Optimization of thermoplastic polyurethane compression molding process[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(4):70-75.

内应力低、力学性能稳定、重复性好等优点在小型制品的批量生产中具有很强的竞争优势^[11]。然而,模压成型的工艺参数(如预热温度、预热时间、压制温度、压制压力、保压时间、冷却速率、排气压力及排气次数等)会直接影响 TPU 分子链段的排列和熔体的流动性,进而影响 TPU 薄膜的外观、尺寸以及力学性能^[12]。因此,选择合理的模压成型工艺参数,对获得外观形貌良好、尺寸稳定、力学性能更好的 TPU 薄膜至关重要。为优化模压成型工艺参数,保证制品的质量,国内外学者围绕理论建模、仿真模拟及实验验证等方面进行了大量的研究和探索^[13-17]。但是,目前关于 TPU 薄膜模压成型工艺参数优化方面的研究还较少。

笔者通过调控模压成型过程中的工艺参数(压制温度、压制时间、保压压力及冷却速率)制备系列 TPU 薄膜样品,探究模压成型工艺参数对 TPU 薄膜外观、尺寸和力学性能的影响,从而使模压成型 TPU 薄膜的工艺参数得到优化。

1 实验部分

1.1 主要原料

TPU 粒料:58300NAT035,密度为 1.1022 g/cm^3 ,粒径为 2 mm ,邵氏 A 硬度为 82,熔融温度为 130°C ,路博润特种化工制造(上海)有限公司;

聚四氟乙烯(PTFE)薄膜:厚 0.1 mm ,市售。

1.2 主要仪器与设备

溢料式镀氟平板模具:模腔尺寸 $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times (2.75 \pm 0.15) \text{ mm}$,定制;

程序控温真空干燥箱:ZK-2BCT 型,天津中环电炉有限公司;

电动平板硫化机:GT-7014-H30 型,高铁检测仪器(东莞)有限公司;

电子万能拉力试验机:AI-7000M-GD 型,高铁检测仪器(东莞)有限公司;

差示扫描量热(DSC)仪:TA Q200 型,美国 TA 仪器公司;

电子天平:YP30001 型,上海衡际科学仪器有限公司;

冲片机:CP-25 型,上海化工机修四厂;

测厚规:HD-1 型,上海化工机修四厂;

单镜头反光数码相机:D7100 型,日本尼康公司。

1.3 样品制备

TPU 薄膜的制备流程如图 1 所示。首先用电

子天平称取一定量的 TPU 粒料于托盘中,将其置于相对真空度为 -0.1 MPa 、温度为 70°C 的真空干燥箱中,干燥 20 h 后,取出,备用。同时,在如图 2 所示的平板模具的模腔表面铺垫一层 PTFE 薄膜,以降低熔体流动阻力。然后,称取 70 g 已干燥好的 TPU 粒料,倒入模腔中,均匀铺平。接下来,将平板模具合模后整体置入平板硫化仪中并设置工艺参数,其中预热压力为 0 MPa ,预热时从室温升至压制温度并保温 2 min ,排气 2 次,压制温度为分别为 $180, 185, 190, 195, 200^\circ\text{C}$,压制时间分别为 $8, 10, 12, 14, 16 \text{ min}$,保压压力分别为 $1.75, 2.50, 3.25, 4.00 \text{ MPa}$ 。随后,在平板硫化仪加热仓内完成模具预热、排气、保温压制等步骤。上述步骤完成后,立即将模具取出,并分别放置在三种冷却速率($0.3, 34.8, 92^\circ\text{C/min}$)环境中进行冷却成型后,即可开模取膜,得到膜样品。

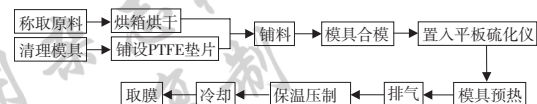
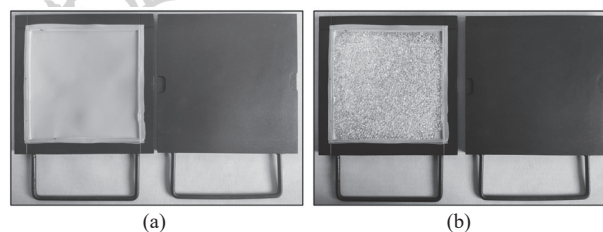


图1 TPU 薄膜样品制备流程图



a—铺料前;b—铺料后

图2 溢料式平板模具

模压成型 TPU 薄膜的质量受多种工艺参数的影响。笔者主要针对压制温度、压制时间、保压压力及冷却速率四种工艺参数对 TPU 薄膜外观、尺寸和拉伸性能的影响进行研究分析。在实验时,首先探究压制温度和压制时间对 TPU 薄膜质量和拉伸性能的影响,采用全面试验法并得出 TPU 薄膜质量和力学性能最优的一组参数。其次,基于前一实验基础,探究保压压力对 TPU 薄膜拉伸性能的影响,并得出 TPU 薄膜拉伸性能最优时的保压压力。最后,在前面实验的基础上,探究冷却速率对 TPU 薄膜拉伸性能的影响,得出 TPU 薄膜拉伸性能最优时的冷却速率。最终,即可得出 TPU 薄膜质量和拉伸性能最优时的模压成型压制温度、压制时间、保压压力和冷却速率。

1.4 性能测试与表征

DSC 测试:在高纯 N_2 气氛下,以 10°C/min 的

速率降温至 -80°C , 恒温 5 min 后, 再以 $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速率升温至 250°C 。

拉伸性能测试: 根据 GB/T 528-2009, 将 TPU 薄膜制备成 1 型哑铃状试样, 采用电子万能拉力试验机对 TPU 薄膜进行拉伸性能测试, 拉伸速率为 $500\text{ mm}/\text{min}$, 试验温度为 23°C 。

TPU 薄膜厚度测试: 根据 GB/T 5723-93, 采用精度为 0.01 mm 的测厚规对 TPU 薄膜进行厚度测试, 试验温度为 23°C 。

TPU 薄膜外观形貌观察: 使用单镜头反光数码相机拍摄 TPU 薄膜的外观形貌并进行观察。

2 结果与讨论

2.1 TPU 粒料 DSC 分析

TPU 粒料的 DSC 曲线如图 3 所示。从图 3 可以看出, 在 150°C 附近有一个比较明显的转变, 这是 TPU 硬段远程有序结构破坏时的吸热峰^[18], 说明 $130\sim 170^{\circ}\text{C}$ 区间为 TPU 硬段远程有序结构的熔融温度区间。文献 [19] 研究认为, 当温度高于 150°C 时, TPU 的表观黏度将急速下降, 流动性会明显增加。但当温度过高时, TPU 中的氨基甲酸酯键将受热分解, 产生 CO_2 , 影响产品质量^[20]。基于上述分析, 将 TPU 薄膜的压制温度区间初步拟定为 $180\sim 200^{\circ}\text{C}$ 。

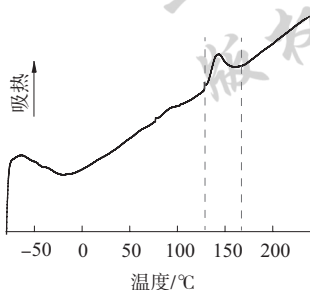


图3 TPU 粒料的 DSC 曲线

2.2 压制温度与压制时间对 TPU 薄膜外观形貌、厚度和拉伸性能的影响

压制温度为 200°C 时, TPU 薄膜的外观形貌如图 4 所示。由图 4 可看出, 当压制温度达到 200°C 时, TPU 薄膜会出现微小气泡。另外, 在同一压制温度下, 压制时间过长时, 也容易出现气泡。这是由于压制温度过高或保温压制时间过长时, TPU 分子发生了热分解, 产生 CO_2 气体, 气体无法及时排出, 与 TPU 形成两相体系, 冷却成膜后形成气泡。由于气泡的存在不能满足 TPU 薄膜的行业使用要求, 因此在后续工作中不对 200°C 压制温度进行探究, 同时根据工作经验, 设置压制时间不超过 16 min。



图4 压制温度为 200°C 时 TPU 薄膜外观形貌

在保压压力为 2.5 MPa 、冷却速率为 $34.8^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 条件下, 不同压制温度与压制时间时制备的 TPU 薄膜的厚度、拉伸强度和断裂伸长率数据见表 1。

表1 不同压制温度与压制时间下 TPU 薄膜的厚度和拉伸性能

压制温度 / $^{\circ}\text{C}$	压制时间 /min	样品厚度 /mm	拉伸强度 /MPa	断裂伸长率 /%
180	8	2.84	6.47	216.19
180	10	2.83	8.78	301.06
180	12	2.82	9.99	345.79
180	14	2.79	11.91	372.58
180	16	2.79	11.15	372.65
185	8	2.81	11.39	349.66
185	10	2.79	10.09	342.10
185	12	2.79	11.53	378.28
185	14	2.78	16.01	451.19
185	16	2.79	14.65	441.15
190	8	2.81	13.07	410.92
190	10	2.80	15.77	459.81
190	12	2.77	15.41	457.85
190	14	2.78	17.21	492.42
190	16	2.75	18.75	516.83
195	8	2.77	15.39	449.45
195	10	2.76	16.57	467.46
195	12	2.75	15.31	464.79
195	14	2.75	18.25	490.68
195	16	2.76	17.02	506.89

为了直观地反映表 1 数据规律, 绘制相应的折线图, 不同压制温度和压制时间下 TPU 薄膜的厚度如图 5 所示。

从图 5a 可以看出, 当压制时间相同时, 随着压制温度的升高, 薄膜的厚度逐渐降低并趋于稳定。这是由于当压制温度较低时, TPU 熔体流动性差, 短时间内无法流延铺匀, 不能有效溢出, 从而造成膜体厚度偏高。从图 5b 可以看出, 在同一压制温度下, 随着压制时间的延长, 薄膜厚度逐渐降低并趋于稳定。这是因为随着压制时间的延长, TPU 熔体得以充分流延铺平, 从而降低了薄膜厚度。

不同压制温度和压制时间下 TPU 薄膜的拉伸性能如图 6 所示。

从图 6a 和图 6b 可以看出, 在压制时间相同条件下, 随着压制温度的升高, TPU 薄膜的拉伸强度

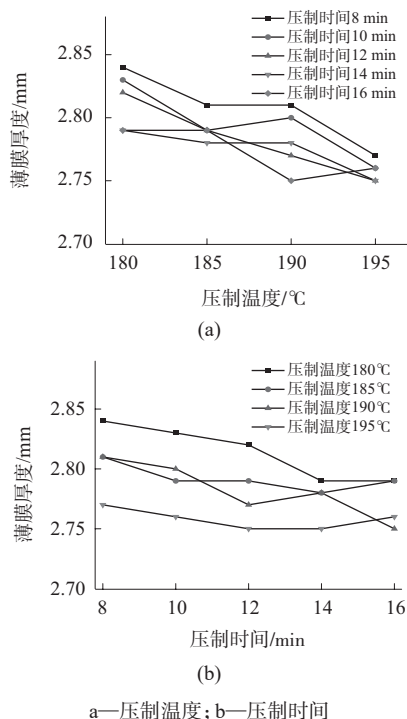


图5 不同压制温度和压制时间下 TPU 薄膜的厚度

和断裂伸长率总体呈现先增大后减小或趋于稳定的变化规律。压制温度从 180℃增加至 190℃过程中,TPU 薄膜的拉伸性能逐渐提升,随后继续增加至 195℃时,TPU 薄膜的拉伸性能变化不大。这是因为在模压成型过程中,如果压制温度过低,TPU 熔体的黏度会较高,流动性变差,使得 TPU 薄膜内部结合较弱,进而导致 TPU 薄膜的拉伸性能变差。从图 6c 和图 6d 可以看出,在压制温度相同条件下,随着压制时间的延长,TPU 薄膜的拉伸强度和断裂伸长率总体呈先增加后减小或趋于稳定的变化规律。这是因为延长压制时间,可使 TPU 粒料充分吸收能量,提升其熔化融合程度,进而增加 TPU 薄膜的结合度,而在压制时间达到 14 min 后,TPU 粒料间的熔化融合程度可能达到一稳定值,因此随着压制时间的继续增加,TPU 薄膜的拉伸性能变化不再明显。

综上分析,通过探究模压成型过程中压制温度和压制时间对 TPU 薄膜厚度和力学性能的影响,可以得出:在其它工艺参数保持不变时,当压制温度为 190℃、压制时间为 16 min 时,TPU 薄膜的拉伸性能较好,此时薄膜平均厚度为 2.75 mm、拉伸强度为 18.75 MPa、断裂伸长率为 516.83%。

2.3 保压压力对 TPU 薄膜拉伸性能的影响

当压制温度为 190℃、压制时间为 16 min、冷

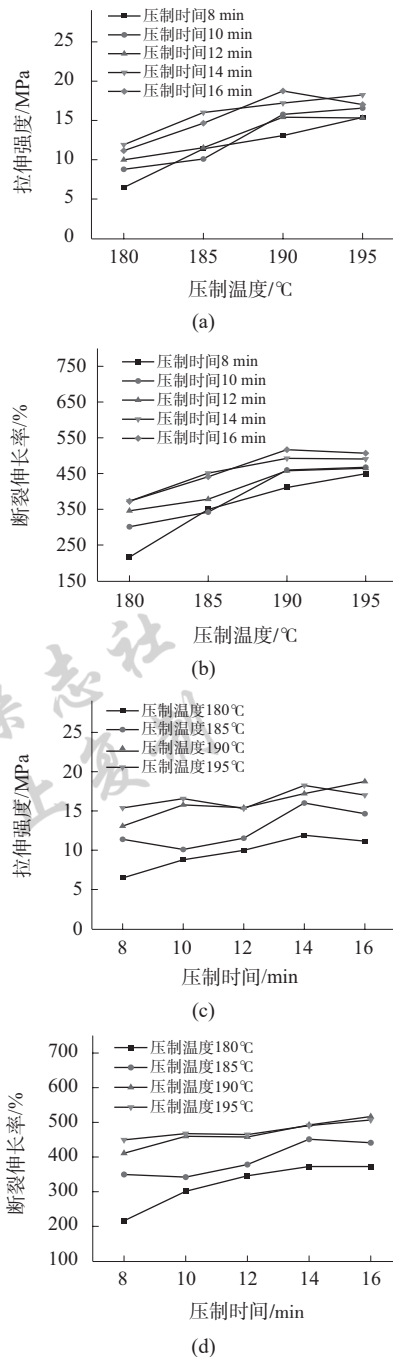


图6 不同压制温度和压制时间下 TPU 薄膜的拉伸性能

却速率为 34.8℃/min 时,不同保压压力下制备的 TPU 薄膜的拉伸性能如图 7 所示。

从图 7 可以看出,随着保压压力的逐渐增加,TPU 薄膜的拉伸强度和断裂伸长率均呈现先增加后减小的趋势。其中,当保压压力为 3.25 MPa 时,TPU 薄膜的拉伸强度达到最大值,为 20.27 MPa,而断裂伸长率则在保压压力为 2.5 MPa 时达到最

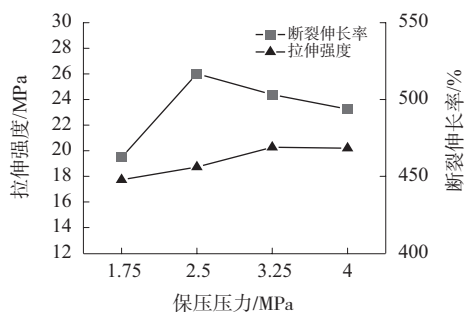


图7 不同保压压力下TPU薄膜的拉伸性能

大值,为516.83%。这可能是因为压力增大为TPU熔体的流动提供了更大的驱动力,从而提高了TPU粒料之间的结合力。此外,保压压力的增加,会对TPU分子链段的取向产生影响,同时会使得TPU熔体过量溢出,破坏膜体结构,进而影响薄膜的拉伸性能。

2.4 冷却速率对TPU薄膜力学性能的影响

在压制温度为190℃、压制时间为16 min、保压压力为3.25 MPa条件下,不同冷却速率时制备的TPU薄膜的拉伸性能如图8所示。

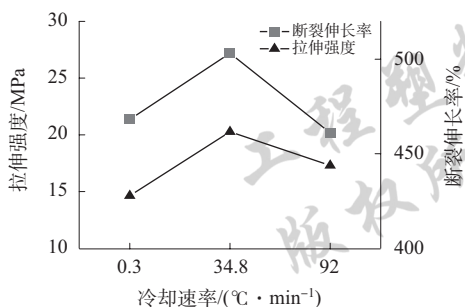


图8 不同冷却速率下TPU薄膜的拉伸性能

从图8可以看出,随着冷却速率的增加,TPU薄膜的拉伸强度和断裂伸长率呈先增大后减小的趋势。其中,当冷却速率为34.8℃/min时,TPU薄膜的拉伸性能最佳,拉伸强度和断裂伸长率分别可达20.27 MPa和503.16%。这是因为在缓慢冷却过程中,TPU分子内软硬段有序排列程度提高,结晶度增加,导致断裂伸长率降低;而当冷却速率较快时,会增大试样内部残余应力,降低试样几何稳定性,进而导致拉伸性能变差。

3 结论

通过对TPU薄膜模压成型工艺参数的研究,得出如下结论:

(1) 当压制温度过高或压制时间过长时,TPU易受热分解,产生CO₂气体,使TPU薄膜产生气泡。当压制温度较低、压制时间较短时,TPU薄膜的厚度偏高;另外,随着工艺参数压制温度、压制时间、

保压压力及冷却速率的增加,TPU薄膜的拉伸性能总体呈先增大后减小或趋于稳定的变化规律。因此,选择合适的模压成型工艺参数,可以获得外观形貌、厚度和拉伸性能更佳的TPU薄膜。

(2) 在压制温度为190℃、压制时间为16 min、保压压力为3.25 MPa、冷却速率为34.8℃/min的工艺参数下,TPU薄膜的拉伸性能最佳,拉伸强度和断裂伸长率分别可达20.27 MPa和503.16%。

(3) 在模压成型TPU薄膜过程中,工艺参数对薄膜的外观形貌、厚度和拉伸性能有较大影响。研究结果为模压成型TPU薄膜的工艺优化提供了数据支撑。

参考文献

- [1] Zhang J H, Kong Q H, Yang L W, et al. Few layered Co(OH)₂ ultrathin nanosheet-based polyurethane nanocomposites with reduced fire hazard: From eco-friendly flame retardance to sustainable recycling[J]. *Green Chemistry*, 2016, 18(10): 3 066–3 074.
- [2] 彭建文,刘新亮,肖崇,等. 热塑性聚氨酯/微胶囊化聚磷酸铵/氢氧化铝复合材料的制备及性能研究[J]. *中国塑料*, 2021, 35(7): 36–42.
Peng Jianwen, Liu Xinliang, Xiao Chong et al. Fabrication and properties of thermoplastic polyurethane/microencapsulated ammonium polyphosphate/aluminum hydroxide composites[J]. *China Plastics*, 2021, 35(7): 36–42.
- [3] 张文龙,吕玲,梁月,等. 红外光谱法研究TPU/SEBS的相容性[J]. *中国塑料*, 2016, 30(10): 36–41.
Zhang Wenlong, Lyu Ling, Liang Yue, et al. Investigation on compatibility of TPU and SEBS with using infrared spectroscopy[J]. *China Plastics*, 2016, 30(10): 36–41.
- [4] Nishi T, Yamaguchi T, Shibata K, et al. Wear behavior of thermoplastic urethane for the outer soles of spike shoes[J]. *Wear*, 2022, 490–491. DOI:10.1016/j.wear.2021.204105.
- [5] Arsheen M, Rajiv P, Wang X. Coating of TPU-PDMS-TMS on polycotton fabrics for versatile protection[J]. *Polymers*, 2017, 9(12). DOI:10.3390/polym9120660.
- [6] 闫东雨. TPU薄膜技术与市场分析[J]. *信息记录材料*, 2019, 20(11): 12–16.
Yan Dongyu. Analysis on the market and technology of TPU film[J]. *Information Recording Materials*, 2019, 20(11): 12–16.
- [7] Guerrero P, Muxika A, Zarandona I, et al. Crosslinking of chitosan films processed by compression molding[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2018, 206: 820–826.
- [8] Ding Yifei, Hassan M H, Bakker O, et al. A review on microcellular injection moulding[J]. *Materials*, 2021, 14(15). DOI:10.3390/ma14154209.
- [9] Singh S, Patel M K, Geng S Y, et al. Orientation of polylactic acid-

- chitin nanocomposite films via combined calendaring and uniaxial drawing: Effect on structure, mechanical, and thermal properties[J]. *Nanomaterials*, 2021, 11(12). DOI:10.3390/nano11123308.
- [10] Barletta M, Aversa C, Puopolo M, et al. Extrusion blow molding of environmentally friendly bottles in biodegradable polyesters blends[J]. *Polymer Testing*, 2019, 77. DOI:10.1016/j.polymer-testing.2019.05.001.
- [11] Corbridge D M, Harper L T, De Focatiis D S A, et al. Compression moulding of composites with hybrid fibre architectures[J]. *Composites Part A*, 2017, 95:87–99.
- [12] Tang X G, Antonio Feula, Baker B C, et al. A dynamic supra-molecular polyurethane network whose mechanical properties are kinetically controlled[J]. *Polymer*, 2017, 133:143–150.
- [13] Chang Chih-Yuan. Simulation of dynamic mold compression and resin flow for force-controlled compression resin transfer molding[J]. *Journal of Polymer Engineering*, 2019, 39(9):844–851.
- [14] Olsson, Lundström, Olofsson. Design of experiment study of compression moulding of SMC[J]. *Plastics, Rubber and Composites*, 2009, 38(9–10):426–431.
- [15] Xie J M, Wang S Y, Cui Z B, et al. Process optimization for compression molding of carbon fiber-reinforced thermosetting polymer[J]. *Materials*, 2019, 12(15):2430–2430.
- [16] Xie J M, Wang S Y, Cui Z B, et al. Research on anisotropic viscoelastic constitutive model of compression molding for CFRP[J]. *Materials*, 2020, 13(10). DOI:10.3390/ma13102277.
- [17] Muller J, González-Martínez C, Chiralt A. Poly(lactic) acid (PLA) and starch bilayer films, containing cinnamaldehyde, obtained by compression moulding[J]. *European Polymer Journal*, 2017, 95:56–70.
- [18] Bogart J, Bluemke D A, Cooper S L. Annealing-induced morphological changes in segmented elastomers[J]. *Polymer*, 1981, 22(10):1428–1438.
- [19] 许朝玉, 李华, 黄忠耀, 等. 不同硬度热塑性聚氨酯流变行为研究[J]. *塑料科技*, 2019, 47(4):117–122.
- Xu Zhaoyu, Li Hua, Huang Zhongyao, et al. Study on rheological behavior of TPU with different hardness groups[J]. *Plastics Science and Technology*, 2019, 47(4):117–122.
- [20] Jiao C M, Li M X, Chen X L, et al. Flame retardancy and thermal decomposition behavior of TPU/chitosan composites[J]. *Polymers for Advanced Technologies*, 2020, 31(1):178–188.
- Beijing: China Light Industry Press, 1996.
- [14] Wang Q F, Wang H L, Fan N, et al. Combined effect of fibers and PTFE nanoparticles on improving the fretting wear resistance of UHMWPE-matrix composites[J]. *Polymers Advanced Technologies*, 2016, 27(5):642–650.
- [15] Johansson P, Marklund P, Bjorling M, et al. Effect of humidity and counterface material on the friction and wear of carbon fiber reinforced PTFE composites[J]. *Tribology International*, 2021, 157. DOI:10.1016/j.triboint.2021.106869.
- [16] 时连卫, 王子君, 孙小波, 等. 纳米 Al_2O_3 改性 PTFE 复合保持架材料性能研究[J]. *轴承*, 2016(6):35–38.
- Shi Lianwei, Wang Zijun, Sun Xiaobo, et al. Research on performance of PTFE composite material modified with nano- Al_2O_3 [J]. *Bearing*, 2016(6):35–38.
- [17] Brown E N, Trujillo C P, Gray G T, et al. Soft recovery of polytetrafluoroethylene shocked through the crystalline phase II-III transition[J]. *J Appl Phys*, 2007, 101(2). DOI:10.1063/1.2424536.
- =====
- (上接第 69 页)
- [10] Fan Xuefeng, Li Guitao, Guo Yuexia, et al. Role of reinforcement types and silica nanoparticles on tribofilm growth at PTFE-steel interface[J]. *Tribology International*, 2020, 143. DOI:10.1016/j.triboint.2019.106035.
- [11] 黄丽, 郑旖旎, 吕亚非, 等. 不同混合方式对超高分子量聚乙烯复合材料中填料粒子分散性的影响[J]. *北京化工大学学报*, 2006(1):105–107.
- Huang Li, Zheng Yini, Lyu Yafei, et al. Effects of different mixing methods on properties of UHMWPE-based composites[J]. *Journal of Beijing University of Chemical Technology*, 2006(1):105–107.
- [12] 黄丽. 高分子材料[M]. 2 版. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- Huang Li. *Polymer materials*[M]. 2nd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2010.
- [13] 吴培熙, 张留城. 聚合物共混改性[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1996.
- Wu Peixi, Zhang Liucheng. *Polymer blending modification*[M].