

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.05.021

环境吸湿对玻璃纤维增强尼龙 66 材料性能的影响

龚梦晴¹, 武金龙²

(1. 安徽中翰高分子科技有限公司, 安徽宣城 242300; 2. 北方民族大学材料科学与工程学院, 银川 750021)

摘要: 通过研究两种玻璃纤维(GF)增强尼龙(PA)[GF 增强 PA66 (A3WG6, 巴斯夫), 简称复合材料 A; 自制 PA66+30%GF, 简称复合材料 B] 在环境温湿度条件下调节不同时间后的吸湿状态, 探讨了不同时间调节后 PA 复合材料的拉伸强度、拉伸弹性模量、拉伸应变、冲击强度及收缩率与调节时间的关系, 考察了材料在常温环境下调节时间与材料含水率的关系, 同时分析了水分对 PA 复合材料性能影响的机理。结果表明, 在试验范围内, PA 复合材料在常温环境中的吸湿率随着调节时间的延长而增加, 环境吸湿速率在 16 h 达到最高, 在 168 h 后趋于平稳。吸湿后的 PA 复合材料拉伸强度随着调节时间的延长逐渐下降, 拉伸应变和拉伸弹性模量变化相对较小, 冲击强度则随着调节时间的延长逐渐增大。当 PA66 复合材料 A、B 在环境温湿度条件下调节 168 h 后, 材料的含水率分别为 0.207% 和 0.145%, 材料的拉伸强度分别下降了 14 MPa 和 15.3 MPa, 损失率分别达到 6.9% 和 7.8%。当 PA66 复合材料 A、B 在环境温湿度条件下调节 960 h 后, 材料的含水率分别为 0.578% 和 0.439%, 材料的拉伸强度分别下降了 38 MPa 和 35 MPa, 损失率分别达到 18.6% 和 18.2%, 材料的冲击强度则提高了 12.3% 和 45.7%。PA66 复合材料 A、B 在相同环境温湿度条件下调节不同时间后的物理力学性能、吸湿状态呈相同趋势。

关键词: 玻璃纤维增强尼龙复合材料; 吸湿; 含水率; 性能; 调节时间

中图分类号: TQ327 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)05-0140-06

Effect of environmental hygroscopicity on properties of GF reinforced nylon 66 materials

GONG Mengqing¹, WU Jinlong²

(1. Anhui Zhonghan Polymer Technology Co., LTD., Xuancheng 242300, China;

2. College of Materials Science and Engineering, North Minzu University, Yinchuan 750021, China)

Abstract : By studying the hygroscopic states of two kinds of glass fiber(GF) reinforced nylon(PA) [GF reinforced PA66 (A3WG6, BASF), referred to as composite A, self-made PA66+30%GF, referred to as composite B] after adjustment of different time under ambient temperature and humidity conditions, the relationship between the tensile strength, tensile modulus, tensile strain, impact strength and shrinkage rate of PA composites after adjustment of different time and adjustment time was discussed. The relationship between the adjusting time and the moisture content of the material at room temperature was investigated, and the mechanism of the influence of moisture on the properties of the PA composites was analyzed. The results show that in the experimental range, the moisture absorption rate of PA composites in normal temperature environment increases with the extension of regulation time. The environmental moisture absorption rate reaches the highest at 16 h, and tends to be stable after 168 h. The tensile strength of PA composites decrease gradually with the extension of adjusting time, the tensile strain and tensile modulus change relatively little, and the impact strength increase gradually with the extension of adjusting time. When PA66 composites A and B are adjusted under ambient temperature and humidity conditions for 168 h, the water content of the composites is 0.207% and 0.145% respectively. The tensile strength of PA composites decrease by 14 MPa and 15.3 MPa respectively, and the loss rate reach 6.9% and 7.8%. When PA composites A and B are adjusted for 960 h under ambient temperature and humidity conditions, the water content of the composites is 0.578% and 0.439%, respectively. The tensile strength of the composites decrease by 38 MPa and 35 MPa, the loss rate reach 18.6% and 18.2%, respectively, and the impact strength of the composites increase by 12.3% and 45.7%. The physical and mechanical properties, hygroscopic state of PA66 composite A and B show the same trend after adjusting for different time under the same ambient temperature and humidity conditions.

Keywords : glass fiber reinforced nylon composite ; hygroscopic ; moisture content ; performance ; adjust time

通信作者: 武金龙, 理学博士, 讲师, 硕士生导师, 主要研究方向为功能高分子及高分子复合材料

收稿日期: 2024-03-05

引用格式: 龚梦晴, 武金龙. 环境吸湿对玻璃纤维增强尼龙 66 材料性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(5): 140–145.

GONG Mengqing, WU Jinlong. Effect of environmental hygroscopicity on properties of GF reinforced nylon 66 materials[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(5): 140–145.

尼龙(PA)材料作为全世界用量最大、用途最广的工程塑料,具有优异的物理力学性能^[1]。通过添加玻璃纤维(GF)对PA材料进行增强改性,可以更大幅度提高PA材料的强度、韧性、耐热性,从而拓展了PA材料应用范围^[2]。GF增强PA复合材料广泛应用于汽车、电器、机械制造、仪器仪表等高强度和高精密的领域。

PA作为极性高分子材料在使用过程中容易受到环境因素的影响,使其性能发生变化,甚至失效,从而影响其使用寿命。由于PA分子结构中含有亲水性酰胺基团,具有很强吸水性,分子间氢键与环境中的水分相互作用,对其材料的物理力学性能和尺寸变化影响很大^[3-7]。在航空航天、仪器制造、汽车发动机周边零部件、军工材料等高科技、高精度领域的生产应用和研发过程中,PA材料特殊的吸水性对其准确的各项力学性能测定和尺寸稳定性都带来了极大的干扰和测量偏差。材料性能往往处于动态变化的过程,会对产品的应用功能和寿命产生波动。因此研究PA产品的吸水性尤为重要。

实际应用中,为了降低GF增强PA复合材料吸水对其尺寸、性能和外观的持续影响,常通过增湿、热处理、高温水煮等手段来控制或达到相应的变形效果。目前,湿度对极性材料的性能影响的研究有部分报道,但多集中在通过水煮或浸泡试验后的短期影响下的研究^[8-10],而PA复合材料在常温环境下的长期暴露引起的性能变化、含水率变化和尺寸影响则鲜有报道。

笔者对比了两种GF增强PA66材料,通过注塑成型加工得到相应的测试样条,模拟产品的长期使用环境,研究了常温环境下不同调节时间对GF增强PA66材料性能的影响规律,探讨了影响GF增强PA66复合材料性能的原因,并讨论了环境中的水分对GF增强PA66材料性能影响的机理。为设计和控制机械制造、汽车、电气装置中零件产品,如齿轮、滑轮、辊轴、密封垫片、结构性衬套、支架等在使用过程中的尺寸和性能稳定性提供了数据支持和系统性指导。

1 实验部分

试样材料的常温环境调节应在温度 $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$,相对湿度 $50\%\pm 5\%$ 的标准环境下静态、无叠放放置,状态调节时间为0~960 h,测试调节时间分别为0,16,48,72,96,168,240,360,480,720,960 h。

1.1 主要原材料

GF增强PA(A):PA66+30%GF,黑色,德国巴斯夫化工股份有限公司;

GF增强PA(B):PA66+30%GF,黑色,自制。制备过程为:将PA66树脂在 90°C 的鼓风干燥箱里干燥6 h,再与助剂等物料通过高混机混匀,经过双螺杆挤出机挤出,在挤出机的侧面加入质量分数为30%的GF,预混合物和玻纤经过挤出机的熔融、挤出、造粒得到PA(B)材料粒子。双螺杆挤出机的加工温度为 $265^{\circ}\text{C}\sim 280^{\circ}\text{C}$,机头温度为 270°C 。螺杆转速为300 r/min。

1.2 仪器及设备

同向双螺杆挤出机:SK36,南京科亚化工成套装备有限公司;

注塑机:MA1600 II/570,宁波海天塑机集团有限公司;

伺服控制拉力试验机:GT-AI-7000M,东莞高铁检测仪器有限公司;

数位冲击试验机:GT-7045-MD,东莞高铁检测仪器有限公司。

1.3 试样制备

试样材料的常温环境调节应在温度 $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$,相对湿度 $50\%\pm 5\%$ 的标准环境下静态、无叠放放置,状态调节时间为0~960 h,测试调节时间分别为0,16,48,72,96,168,240,360,480,720,960 h。

先将PA A、B材料粒子在 120°C 的鼓风干燥箱里干燥6 h,保持含水率在0.02%以下,通过注塑机加工成型成ISO试验样条A、B。吸水率和收缩率测试的标准样条为 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ 的正方形试片。

注塑机的喷嘴温度为 285°C ,其他区的加工温度分别为 $280, 275, 260, 250^{\circ}\text{C}$,注射压力为50~100 MPa,模具温度 $70\sim 90^{\circ}\text{C}$ 。

1.4 测试与表征

1.4.1 PA复合材料的吸水率测试

吸水率(W)测试参照GB/T 1462-2009,按公式(1)计算吸水率,测试温度为 $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$,每组试验至少测试8个样条取平均值,测试精确到0.1 mg。

M_T :环境调节停放完成后测试样的质量。

M_0 :原始测试样的质量。试样需在真空干燥箱中预先烘干至质量不变后测试。

$$W(\%) = (M_T - M_0) / M_0 \times 100\% \quad (1)$$

1.4.2 PA复合材料的收缩率测试

收缩率(MS, 简称 M)测试参照 GB/T 15585-1995, 按公式(2)计算收缩率, 测试温度为 $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$, 测试试片垂流方向的尺寸, 每组试验至少测试6个试片取平均值, 测试精确到0.01 mm。

L_T : 环境调节停放完成后测试样的尺寸。

L_0 : 原始测试样的尺寸。试样需在真空干燥箱中预先烘干, 在标准环境中停放2 h后测试。

$$M(\%) = (L_T - L_0) / L_0 \times 100\% \quad (2)$$

1.4.3 PA复合材料的力学性能测试

按 ISO 527-2:2012 标准利用伺服控制拉力试验机测试拉伸性能, 拉伸速度为 50 mm/min, 测试温度为 $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$, 每组试验至少测试6个样条取平均值; 按 ISO 179-1:2010 标准利用数位冲击试验机测试简支梁缺口冲击性能, 测试温度为 $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$, 每组试验至少测试12个样条取平均值。

2 结果与讨论

2.1 PA复合材料在环境调节下吸水率和时间的关系

图1为PA复合材料A、B样品在室温环境下调节0~960 h后测试所得的吸水率与时间的变化曲线。由图1可知, PA复合材料的吸水率会随着环境调节时间的增加而增大, 在168 h调节时间以内, 材料的吸水率在0.2%以内, 当调节时间达到480 h以后, 材料的吸水率显著上升, 当调节时间达到960 h, 材料的吸水率达到0.5%左右, 此时材料的吸水率还未达到饱和。其中材料A的吸水率高于材料B, 两种复合材料的吸水率曲线趋势相近。PA分子中含极性的酰胺基团($-\text{CONH}-$)和大量羟基键($-\text{OH}$), 在环境调节过程中, 随着时间增加, 极性基团和羟基会与环境中的水分子之间发生氢键相互作用, 使得PA复合材料表面吸水形成一层水分子层^[11]。

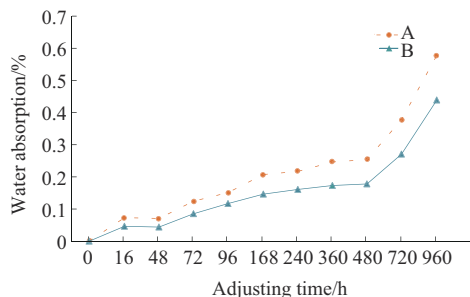


图1 调节时间对GF增强PA复合材料吸水率的影响

Fig. 1 Effect of adjusting time on water absorption of GF reinforced PA composites

2.2 PA复合材料在环境调节下吸湿速率和时间的关系

图2为PA复合材料A、B样品在标准环境下调节后的吸湿速率与时间的变化曲线。从图2可看出, 当PA复合材料暴露在温度 $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$, 相对湿度 $50\% \pm 5\%$ 的标准环境下16 h内的吸湿速率最大, 48 h后趋势减缓, 调节时间达到360 h后材料的吸湿速率达到相对稳定状态。PA复合材料A的吸湿速率高于复合材料B, 两种复合材料的吸湿速率曲线趋势相近。这表明, PA复合材料在48 h内随调节时间的吸水速率变化最大, PA分子中含的 $-\text{CONH}-$ 基团和 $-\text{OH}$ 基团迅速与环境中的水分子通过氢键结合而吸水, 在生产应用和研发过程中, 应当引起足够的重视。

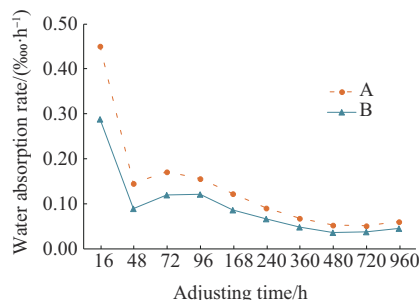


图2 调节时间对GF增强PA复合材料吸水速率的影响

Fig. 2 Effect of adjusting time on water absorption rate of GF reinforced PA composites

2.3 PA复合材料在环境调节下拉伸性能和时间的关系

图3为PA复合材料A、B样品在标准环境下调节后的拉伸强度与时间的变化曲线。从图3可以看出, PA复合材料A、B暴露在温度 $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$, 相对湿度 $50\% \pm 5\%$ 的标准环境下, 随着调节时间的增加, 拉伸强度逐渐下降, 其中复合材料B的性能下降更加明显, 下降趋势与复合材料A相同。当材料的调

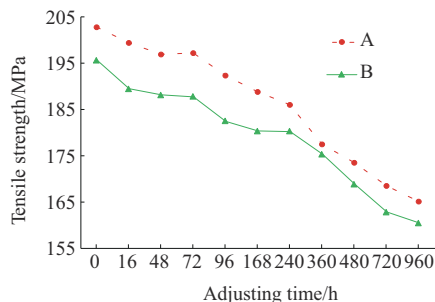


图3 调节时间对玻纤增强PA复合材料拉伸强度的影响

Fig. 3 Effect of adjusting time on tensile strength of GF reinforced PA composites

节时间仅仅48 h时,复合材料A、B的拉伸强度分别下降了6 MPa和7.5 MPa;当材料的调节时间达到168 h时复合材料A、B的拉伸强度分别下降了14 MPa和15.3 MPa,损失率达到6.9%和7.8%,此时复合材料A、B的含水率分别为0.207%和0.145%;当材料A、B的调节时间达到960 h后,材料的拉伸强度分别下降了38 MPa和35 MPa,损失率分别达到18.6%和18.2%,此时材料的含水率分别为0.578%和0.439%。

对调节后的PA复合材料A、B的拉伸强度与调节时间进行曲线拟合,得到以下方程,分别见公式(3)、(4)。

$$A: y = -0.216x^2 - 1.302x + 203.9 \quad (3)$$

$$R^2 = 0.9883$$

$$B: y = -0.1726x^2 - 1.2678x + 194.73 \quad (4)$$

$$R^2 = 0.9761$$

式中: y 为材料的拉伸强度; x 为材料在标准环境中调节的时间; R^2 为拟合方程的相关系数。

可以看出,PA复合材料与环境调节时间呈多项式关系,调节时间与材料的拉伸性能显著相关。这主要是因为复合材料的吸水率随着环境调节时间的增加而增大。环境中的水分子与PA材料分子链上的极性基团相互作用,首先一个水分子在两个羰基间形成氢键,材料吸湿破坏了PA材料原有的分子间氢键,造成材料拉伸性能有所下降;然后第二个水分子和第三个水分子分别与PA材料的酰胺基团上的氢键再形成氢键。随着水分子继续累积增多和向材料内层扩散作用,可以导致PA高分子材料的分子间间隙增大,甚至降解^[12-15]。当PA复合材料样条受到拉力时,GF在PA复合材料中起到了“骨架”的支撑作用,材料在环境中的吸湿使得GF与PA高分子材料间的界面结合作用减弱,作为增强材料的GF在外力的作用下与PA高分子材料剥离,使得材料的拉伸强度显著下降。

图4为PA复合材料A、B样品在标准环境下调节后的拉伸应变与时间的变化曲线。从图4可以看出,PA复合材料的拉伸应变随着调节时间的增加变化不明显。当材料的调节时间在480 h之内,复合材料A、B的拉伸应变都在3%和4%左右,当调节时间达到720 h后,复合材料的拉伸应变才有显著变化。这是因为影响高分子材料的断裂行为的因素很多,GF增强后的PA复合材料的拉伸应变很小,材

料在环境调节下吸湿的影响不足以在短时间增大分子链段间的空间,对拉伸应变的影响变化不大。

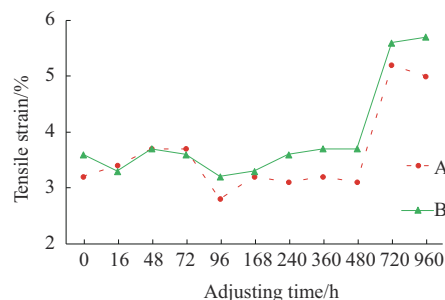


图4 调节时间对玻纤增强PA复合材料拉伸应变的影响

Fig. 4 Effect of adjusting time on tensile strain of GF reinforced PA composites

图5为PA复合材料A、B样品在标准环境下调节后的拉伸弹性模量与时间的变化曲线。从图5可以看出,PA复合材料的拉伸弹性模量随着调节时间的增加有所下降。当材料的调节时间在480 h之内,复合材料A、B的拉伸弹性模量都在10 000 MPa左右,当调节时间达到480 h后,复合材料的拉伸弹性模量明显下降。

这是因为玻纤增强PA复合材料的拉伸弹性模量主要由GF提供,复合材料在环境条件下的少量吸湿对GF本身的弹性模量影响不明显,当调节时间足够长以后,复合材料的整体强度下降,从而影响了材料的拉伸弹性模量。

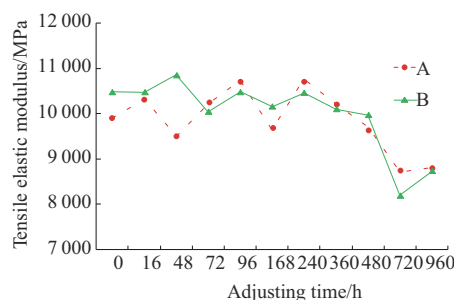


图5 调节时间对玻纤增强PA复合材料拉伸弹性模量的影响

Fig. 5 Effect of adjusting time on tensile elastic modulus of GF reinforced PA composites

2.4 PA复合材料在环境调节下的冲击性能和时间的关系

图6为PA复合材料A、B样品在标准环境下调节后的简支梁缺口冲击强度与时间的变化曲线。从图6可以看出,PA复合材料的冲击强度随着调节时间的增加而增大,同时PA复合材料B的冲击强度提高比PA复合材料A明显,这说明材料冲击强度在标准环境下的冲击性能变化与材料的配方设计有

一定关系。当材料的调节时间达到240 h时,复合材料B的冲击强度显著提高,与原始材料相比,提高了4 kJ/m²。当材料的调节时间达到480 h时,复合材料A的冲击强度显著提高,与原始材料相比,提高了2 kJ/m²。PA复合材料在标准环境下调节吸湿后,水分子进入PA高分子的非晶区域,起到了增塑作用,提高了PA材料的冲击韧性。

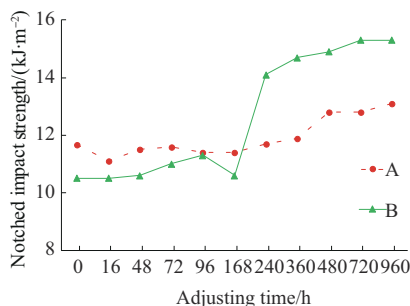


图6 调节时间对玻纤增强PA复合材料冲击强度的影响

Fig. 6 Effect of adjusting time on impact strength of GF reinforced PA composites

2.5 PA复合材料在环境调节下的尺寸变化和时间的关系

高分子材料的尺寸稳定性在生产应用和研究开发中都有重要的意义^[16-17]。PA高分子材料的吸湿造成分子链间的吸湿溶胀^[18],同时PA复合材料在调节过程中的内应力释放收缩,都会导致产品的尺寸发生变化。从图7可以看出,PA复合材料在72 h的调节时间内,材料的内应力释放收缩占主要因素,产品尺寸收缩率呈负数,调节时间达到96 h后,材料的吸湿溶胀作用明显高于材料的内应力释放收缩,产品尺寸的收缩率逐渐随着调节时间的增加而变大,复合材料的尺寸逐渐增大。材料吸湿越明显,含水率越高,分子间的水分子扩散越均匀,使得整个样条的溶胀作用越均匀,复合材料的尺寸变化越大。

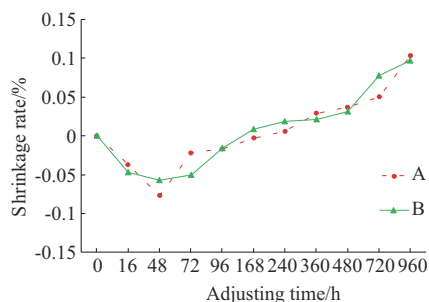


图7 调节时间对玻纤增强PA复合材料收缩率的影响

Fig. 7 Effect of adjusting time on shrinkage rate of GF reinforced PA composites

3 结论

(1) 通过考察两种GF增强PA复合材料在(23±2)℃,相对湿度50%±5%的标准环境下调节不同时间后的吸水率、吸水速率,发现GF增强PA复合材料在常温环境中的吸湿率随着调节时间的延长而增加,环境吸湿速率在16 h达到最高,48 h后趋势减缓,360 h后材料的吸湿速率达到相对稳定状态。

(2) GF增强PA66材料的拉伸性能与环境调节时间呈多项式关系,材料的拉伸性能与调节时间显著相关。

(3) 在试验范围内,吸湿后的PA复合材料拉伸强度随着调节时间的延长逐渐下降,拉伸应变和拉伸弹性模量变化相对较小,缺口冲击强度则随着调节时间的延长逐渐增大。

(4) 当GF增强PA复合材料A、B在环境温湿度条件下调节168 h后,材料的含水率分别达到0.207%和0.145%,材料的拉伸强度分别下降了14 MPa和15.3 MPa,损失率达到6.9%和7.8%。

(5) 当GF增强PA复合材料A、B在环境温湿度条件下调节960 h后,材料的含水率分别达到0.578%和0.439%,材料的拉伸强度分别下降了38 MPa和35 MPa,损失率分别达到18.6%和18.2%,材料的缺口冲击强度则提高了12.3%和45.7%。

(6) 复合材料的吸湿越明显,含水率越高,分子间的水分子扩散得越均匀,使得整个样条的吸湿溶胀作用越均匀,复合材料的尺寸变化越大。

(7) 为实际应用中PA复合材料的环境停放吸湿及吸湿后性能的变化趋势的预测提供了重要的数据支持。

参考文献

- [1] 陈佰全,陈智文,郑友明,等.高含量玻璃纤维增强尼龙复合材料的制备与性能[J].工程塑料应用,2018,49(8):31-36,53.
CHEN Baiquan, CHEN Zhiwen, ZHENG Youming, et al. Preparation and properties of high content glass fiber reinforced PA composites[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(8): 31-36, 53.
- [2] 黄绍军,蒋似梅,梁小良,等.玻纤含量对玻纤增强尼龙66复合材料性能的影响[J].工业技术创新,2020,7(6):6-9.
HUANG Shaojun, JIANG Simei, LIANG Xiaoliang, et al. Effects of glass fiber content on properties of glass fiber reinforced polyamide 66 composites[J]. Industrial Technology Innovation, 2020, 7(6): 6-9.
- [3] 吕桂英,朱华,林安,等.现代测试技术在尼龙6老化研究中的应用[J].工程塑料应用,2006,34(2):64-66.
LYU Guiying, ZHU Hua, LIN An, et al. Application of modern

- test technology in aging study of nylon 6[J]. Engineering Plastics Application, 2006, 34(2):64–66.
- [4] 李晖,魏莉萍,王湘明,等.吸水率对尼龙66力学性能的影响研究[J].工程塑料应用,2008,36(8):64–67.
- LI Hui, WEI Liping, WANG Xiangming, et al. Investigation on the influences of water absorption to the mechanical properties of nylon 66 materials[J]. Engineering Plastics Application, 2008, 36(8):64–67.
- [5] 宋伟强,朱诚身,何素琴,等.尼龙1010/6及尼龙1010/66基本物理性能与组成的关系[J].郑州大学学报(自然科学版),1999,31(4):75–77.
- SONG Weiqiang, ZHU Chengshen, HE Suqin, et al. Studies on the relations between fundamental physical properties and compositions of PA1010/6 and PA1010/66[J]. Journal of Zhengzhou University (Natural Science Edition), 1999, 31(4):75–77.
- [6] 任建平,蒋晶,褚建忠,等.型腔气体反压智能注射马桶盖模具创新设计[J].塑料工业,2021,49(3):79–85.
- REN Jianping, JIANG Jing, CHU Jianzhong, et al. Innovative design of intelligent injection toilet cover mold with cavity gas back pressure[J]. China Plastics Industry, 2021, 49(3):79–85.
- [7] 张加锋,熊建武,龙华,等.空调挂机中梁模具结构优化设计[J].工程塑料应用,2020,48(12):81–88.
- ZHANG Jiafeng, XIONG Jianwu, LONG Hua, et al. Optimum design of die structure for middle beam of air conditioner hanger[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(12):81–88.
- [8] 李宏福,王淑萍,孙海霞,等.连续碳纤维/尼龙6热塑性改性尼龙材料的吸湿及力学性能[J].改性尼龙材料学报,2019,36(1):114–121.
- LI Hongfu, WANG Shufan, SUN Haixia, et al. Water absorption and mechanical property of continuous carbon fiber/polyamide 6 composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(1):114–121.
- [9] 王迎芬,彭公秋,谢富原.国产T700级碳纤维/BMI改性尼龙材料湿热性能[J].材料科学与工艺,2018,26(3):16–22.
- WANG Yingfen, PENG Gongqiu, XIE Fuyuan. Hygrothermal properties of domestic T700 carbon fiber/bismaleimide composites[J]. Materials Science and Technology, 2018, 26(3):16–22.
- [10] 周雷.低吸水性PA6材料的制备[J].工程塑料应用,2019,47(9):41–45.
- ZHOU Lei. Development of PA6 materials with low water absorption[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(9):41–45.
- [11] 陆龙威,颜菲,卢津强,等.玻纤增强尼龙6材料水煮后性能变化[J].工程塑料应用,2024,52(1):128–131, 145.
- LU Longwei, YAN Fei, LU Jinqiang, et al. Performance changes of glass fiber reinforced nylon 6 material after boiling in water[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(1):128–131, 145.
- [12] 朱本玮,朱华,吕桂英,等.环境湿度对尼龙66性能的影响及其时间效应[J].现代塑料加工应用,2008,20(5):5–7.
- ZHU Benwei, ZHU Hua, LYU Guiying, et al. Effect of moisture of environment on properties of polyamide 66 and its time effect[J]. Modern Plastics Processing and Applications, 2008, 20(5):5–7.
- [13] PUFFR R, SEBENDA J. On the structure and properties of polyamides. XXVII. The mechanism of water sorption in polyamides[J]. J Appl Polym Sci Part C: Polym Symposia, 1967, 16(1):79–93.
- [14] 蒋思源,刘玉飞,何敏,等.脂肪族尼龙抗吸水性及其机理的研究进展[J].上海塑料,2021,49(5):1–6.
- JIANG Siyuan, LIU Yufei, HE Min, et al. Research progress on water absorption resistance and mechanism of aliphatic nylon[J]. Shanghai Plastics, 2021, 49(5):1–6.
- [15] 于云安,武红元,严雯莉.尼龙增强材料及PA6/ABS尺寸稳定性和吸水性的改善[J].塑料工业,2023,51(2):36–41, 78.
- YU Yun'an, WU Hongyuan, YAN Wenli. The dimensional stability and water absorption improvement of nylon enhancement materials and PA6/ABS[J]. China Plastics Industry, 2023, 51(2):36–41, 78.
- [16] 冉进成.低吸水性耐磨碳纤维增强尼龙46复合材料的研究[D].广州:华南理工大学,2019.
- RAN Jincheng. Carbon fiber reinforced polyamide 46 composites with low water absorption and excellent wear resistance[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [17] 吴全德,郝源增.新型尼龙46工程塑料的性能及应用[J].工程塑料应用,2000,28(11):31–33.
- WU Quande, HAO Yuanzeng. Property and application of new engineering plastics nylon 46[J]. Engineering Plastics Application, 2000, 28(11):31–33.
- [18] 何曼君,陈维孝,董西侠.高分子物理(修订版)[M].上海:复旦大学出版社,2001:34–36.
- HE Manjun, CHEN Weixiao, DONG Xixia. Polymer physics (Revised edition) [M]. Shanghai: Fudan University Press, 2001: 34–36.