

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.07.008

纤维增强改性PA66电力护栏材料的研制

厉媛媛¹, 詹鑫童²

(1. 山东众晨电力工程管理咨询有限公司, 济南 250002; 2. 山东医学高等专科学校, 济南 250002)

摘要:以尼龙66 (PA66)为基体,分别加入2种纤维、3种增韧剂以及经硅烷偶联剂处理后的石墨烯、抗氧剂、紫外线吸收剂、铜盐热稳定剂等其它助剂,通过共混挤出制备纤维增强改性PA66复合材料,研究了不同纤维、不同增韧剂和其它助剂对PA66复合材料的力学性能和老化性能的影响。结果表明,混杂纤维[碳纤维(CF)和玻璃纤维(GF)]总质量分数为30%时,随着CF含量的增加,PA66复合材料的力学性能有明显提高,CF质量分数在10%时,弯曲强度增加30%以上。增韧剂可以大幅提高复合材料的缺口冲击强度,增韧效果依次为自制增韧剂、聚烯烃弹性体接枝马来酸酐、三元乙丙橡胶接枝马来酸酐,其中自制增韧剂质量分数为9%时,缺口冲击强度可提高20%以上。硅烷偶联剂处理后的石墨烯可提高复合材料的弯曲弹性模量,大大提高制品尺寸的稳定性。抗氧剂、紫外线吸收剂和热稳定剂的加入,提高了复合材料的老化性能,抗氧剂、紫外线吸收剂、铜盐热稳定剂质量分数分别为0.2%、0.3%和0.1%时,效果最佳。以CF、GF、自制增韧剂、硅烷偶联剂处理的石墨烯、抗氧剂、紫外线吸收剂、热稳定剂以及和PA66的质量分数分别为10%、20%、9%、0.6%、0.2%、0.3%、0.1%、59.8%制成的改性PA66经200 h老化后其力学性能分别达到弯曲强度为271 MPa,拉伸强度为255 MPa,缺口冲击强度为24 kJ/m²,弯曲弹性模量为22 GPa。用该材料制成的塑料电力护栏经家庭轿车等不同车型的碾压,完好无损。

关键词: 尼龙66; 碳纤维; 玻璃纤维; 增韧剂; 石墨烯; 老化

中图分类号: TQ327.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)07-0045-06

Development of Fiber Reinforced Modified PA66 Electric Guardrail Material

Li Yuanyuan¹, Zhan Xintong²

(1. Shandong Zhongchen Electric Power Engineering Consulting Co., Ltd., Jinan 250002, China;

2. Shangdong Medical College, Jinan 250002, China)

Abstract : Nylon 66 (PA66) was used as matrix, and two kinds of fibers, three kinds of toughening agents and other additives such as graphene, antioxidant, ultraviolet ray absorber and copper salt heat stabilizer were added respectively after being treated with silane coupling agent, fiber reinforced modified PA66 composites were prepared by blending extrusion, and the effects of fiber, toughening agent and other additives on mechanical properties and aging properties of the composites were studied. The results show that the mechanical properties of the composites are obviously improved when the total content of hybrid fiber [carbon fiber (CF) and glass fiber (GF)] is 30%, with the increase of CF content, the mechanical properties of PA66 composite material have significantly improved, the bending strength increases by more than 30%. Toughening agents can improve the notched impact strength of the composites. The toughening effects of the toughening agents are as follows: self-made toughening agents, POE maleic anhydride (POE-g-MAH), EPDM rubber maleic anhydride (EPDM-g-MAH), when the content of self-made toughening agent is 9%, the notched impact strength can be increased by more than 20%. Graphene treated with KH570 silane coupling agent can increase the bending elastic modulus of the composite and greatly improve the dimensional stability of the product. When the content of antioxidant, UV absorber and copper salt heat stabilizer is 0.2%, 0.3% and 0.1% respectively, the aging property of the composite is the best. The modified PA66 was prepared with graphite treated with CF10%, GF20%, self-made toughening agent 9%, KH570-treated graphene 0.6%, antioxidant 0.2%, UV absorber 0.3%, heat stabilizer 0.1% and PA66 59.8%, respectively, after aging for 200 h, the mechanical properties of PA66 composites are as follows: The bending strength is 271 MPa, the tensile strength is 255 MPa, the notched impact strength is 24 kJ/m², the bending modulus is 22 GPa. The plastic electric fence made of this material is in good condition after being rolled by family cars and other vehicles.

Keywords : nylon 66 ; carbon fiber ; glass fiber ; toughening agent ; grapheme ; aging

通信作者: 厉媛媛, 工程师, 主要从事电力设施的研究

收稿日期: 2023-05-26

引用格式: 厉媛媛, 詹鑫童. 纤维增强改性PA66电力护栏材料的研制[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(7):45-50.

Li Yuanyuan, Zhan Xintong. Development of fiber reinforced modified pa66 electric guardrail material[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(7):45-50.

随着城市电力设施的不断增加,为保证这些设施的安全,电力管理部门按照相关规范在电力设施的周围设置了各种形式的隔离护栏。目前,护栏材质基本为Q235钢型材,加工过程需要酸洗、镀锌、切割、焊接、再喷漆成型。在此过程中会产生大量有毒废液、废气、粉尘等,对环境造成严重污染;在户外条件下,螺丝安装孔、构件断面等部位极易造成锈蚀,导致该部位强度下降严重,大大缩短了使用寿命。同时,该种金属护栏在受冲击后,会产生不同程度的永久变形,且会形成锋利断面,极易对人员造成严重的二次伤害。

随着新型技术的发展,以尼龙为基础的复合材料护栏可以很好地解决上述问题,其生产过程不会产生环境污染,不锈蚀抗老化,并且可以重复回收使用。在受到冲击时,通过可恢复的塑性形变吸收能量,即使在极限情况下,也只会破碎为块状物,从而保护车辆与人员的安全。

碳纤维(CF)具有高强度、高模量、高导热的特点,以CF为增强体改性的尼龙66(PA66)复合材料^[1-4],秉承了其优点,但其价格昂贵,可以通过添加玻璃纤维(GF)的方式降低复合材料的成本,混杂纤维同样具备优越性,完全满足电力护栏强度的使用要求^[5-8]。

PA66具有缺口冲击的敏感性和低温及干态下的脆性^[9],使得其对裂纹扩展的抵抗力较差。可以通过添加增韧剂的方式,提高其缺口冲击强度,改善其使用过程中的硬脆性^[10]。增韧剂的加入,提高了塑料护栏制品的冲击韧性^[11-12],避免了护栏在受冲击时对车辆、人体的二次伤害。

石墨烯是一种新型的碳纳米材料,是由平面单层碳原子紧密结合在一起形成的二维蜂窝晶格材料,厚度仅为0.335 nm,是世界上最薄的二维材料之一,与其它纳米材料相比,石墨烯具有高硬度、高强度、低热膨胀系数和超大的比表面积,力学性能极其优异,为目前已知材料中力学性能最高的材料。利用石墨烯优异的特性与其它材料复合,可赋予新材料诸多高性能,高品质^[13-15]。石墨烯的加入使CF复合材料的模量更高,提高了塑料护栏制品的尺寸稳定性,使塑料护栏在春夏秋冬四季中都能保持不变形^[16-17]。

CF复合材料在加工、贮存和使用过程中,由于各种因素的综合作用,都会发生老化的现象,使制

品最终丧失其功能。影响CF复合材料老化的因素主要有氧化、日光里的紫外线和热等,针对上述因素,通过在复合材料中添加抗氧剂^[18]、紫外线吸收剂^[19]和热稳定剂等^[20]助剂,可以很好地延缓复合材料的老化,从而满足塑料护栏对材料的老化要求。

以PA66为基体,分别加入CF以及GF,3种增韧剂和经硅烷偶联剂处理后的石墨烯、抗氧剂、紫外线吸收剂、铜盐热稳定剂等其他助剂,通过共混挤出制备纤维增强改性PA66,研究了不同纤维、不同增韧剂和其它助剂对PA66复合材料的力学性能和老化性能的影响。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PA66:EPR27,河南平顶山神马工程塑料有限公司;

GF:EC-1200,南京中材科技股份有限公司;

CF:T700,日本东丽有限公司;

增韧剂:S-23,山东众晨电力工程管理咨询有限公司;

聚烯烃弹性体接枝马来酸酐(POE-g-MAH):N406,宁波能之光化工有限公司;

三元乙丙橡胶接枝马来酸酐(EPDM-g-MAH):PAE-98,河南平顶山华邦塑料有限公司;

石墨烯:SE1233,常州第六元素有限公司;

硅烷偶联剂:KH570,分析纯,南京曙光化工厂;

抗氧剂:BY-4760,保屹(上海)新材料化工有限公司;

铜盐热稳定剂:H3336,德国布吕格曼公司;

紫外线吸收剂:B234,德国巴斯夫公司。

1.2 仪器及设备

双螺杆挤出机:STS-45型,南京智诚机械有限公司;

注塑机:HTEF90型,宁波海天塑料机械有限公司;

万能试验机:CNT6140型,美特斯工业系统(中国)有限公司;

冲击试验机:XJU-5.5型,承德市金建检测仪器有限公司;

扫描电子显微镜(SEM):JSM-5500LV型,日本JEOL公司;

高速混合机:SHR-10A型,张家港市二轻机械有限公司;

真空烘箱:DZF-6021型,上海恒科有限公司;

换气精密老化试验机:IAT-216型,巨孚仪器工业股份有限公司。

1.3 试样制备

将PA66放置在110℃的烘箱中烘干8h,然后根据表1的配方与增韧剂、紫外线吸收剂、抗氧剂、热稳定剂、硅烷偶联剂处理的石墨烯经过高速混合机混合2min后,通过双螺杆挤出机与不同比例的CF,GF熔融共混,挤出机各段温度依次设定为240,250,255,265,270,275,280,280,280,275℃,转速为300r/min,喂料速度为40kg/h,挤出料条经过水槽冷却后切粒并烘干。将切好的料粒放置在110℃的烘箱中烘干8h,使用注塑机注射成标准试样。注

表1 不同复合材料的样品的配方(质量分数) %

样品 编号	PA66	CF	GF	自制 增韧剂	POE -g- MAH	EPDM -g- MAH	石墨 烯	抗氧 剂	紫外 线吸 收剂	热稳 定剂
1 [#]	80	-	20	-	-	-	-	-	-	-
2 [#]	70	-	30	-	-	-	-	-	-	-
3 [#]	60	-	40	-	-	-	-	-	-	-
4 [#]	80	5	15	-	-	-	-	-	-	-
5 [#]	70	5	25	-	-	-	-	-	-	-
6 [#]	60	5	35	-	-	-	-	-	-	-
7 [#]	80	10	10	-	-	-	-	-	-	-
8 [#]	70	10	20	-	-	-	-	-	-	-
9 [#]	60	10	30	-	-	-	-	-	-	-
10 [#]	67	10	20	3	-	-	-	-	-	-
11 [#]	64	10	20	6	-	-	-	-	-	-
12 [#]	61	10	20	9	-	-	-	-	-	-
13 [#]	58	10	20	12	-	-	-	-	-	-
14 [#]	67	10	20	-	3	-	-	-	-	-
15 [#]	64	10	20	-	6	-	-	-	-	-
16 [#]	61	10	20	-	9	-	-	-	-	-
17 [#]	58	10	20	-	12	-	-	-	-	-
18 [#]	67	10	20	-	-	3	-	-	-	-
19 [#]	64	10	20	-	-	6	-	-	-	-
20 [#]	61	10	20	-	-	9	-	-	-	-
21 [#]	58	10	20	-	-	12	-	-	-	-
22 [#]	60.8	10	20	9	-	-	0.2	-	-	-
23 [#]	60.6	10	20	9	-	-	0.4	-	-	-
24 [#]	60.4	10	20	9	-	-	0.6	-	-	-
25 [#]	60.2	10	20	9	-	-	0.8	-	-	-
26 [#]	60.1	10	20	9	-	-	0.6	0.1	0.1	0.1
27 [#]	59.9	10	20	9	-	-	0.6	0.1	0.2	0.2
28 [#]	59.7	10	20	9	-	-	0.6	0.1	0.3	0.3
29 [#]	59.9	10	20	9	-	-	0.6	0.2	0.1	0.2
31 [#]	59.7	10	20	9	-	-	0.6	0.2	0.2	0.3
32 [#]	59.8	10	20	9	-	-	0.6	0.2	0.3	0.1
33 [#]	59.7	10	20	9	-	-	0.6	0.3	0.1	0.3
34 [#]	59.8	10	20	9	-	-	0.6	0.3	0.2	0.1
35 [#]	59.6	10	20	9	-	-	0.6	0.3	0.3	0.2

塑机各区以及注射喷嘴温度分别为245,265,270,275,275,280,280,275℃,注塑压力为50~80MPa,保压压力为30~50MPa,保压时间为2~4s,冷却时间为20~25s。

1.4 性能测试

拉伸性能按GB/T 1040.2-2006测试,A型试样,拉伸速度20mm/min;

弯曲强度按GB/T 9342-2008测试,试验速度2mm/min;

缺口冲击强度按GB/T 1043.1-2008测试,C型缺口,摆锤冲击能量为0.5J;

SEM分析:对室温下的缺口冲击断面喷金后用SEM观察断面形态。

2 结果与讨论

2.1 纤维对PA66复合材料力学性能的影响

笔者采用CF和GF复合增强技术对PA66进行增强改性,在充分利用混杂纤维复合优势的基础上,兼顾GF的价格优势和CF优良的力学性能。GF和CF对PA66复合材料弯曲强度、拉伸强度和缺口冲击强度的影响如图1~图3所示。对比的是表1中的1[#]至9[#]试样。从图1和图2可以看出,随着纤维含量的增加,复合材料的弯曲强度和拉伸强度都相应地增加,这主要依赖纤维与树脂的牢固粘结,使塑

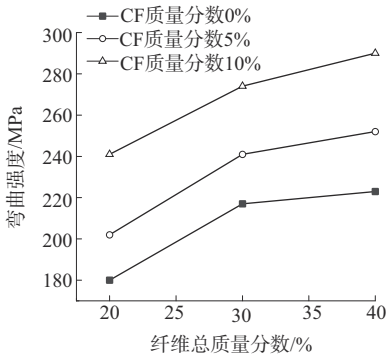


图1 不同纤维含量的PA66复合材料的弯曲强度

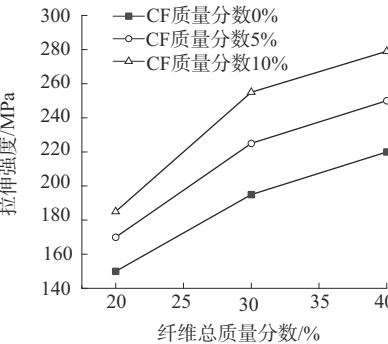


图2 不同纤维含量的PA66复合材料的拉伸强度

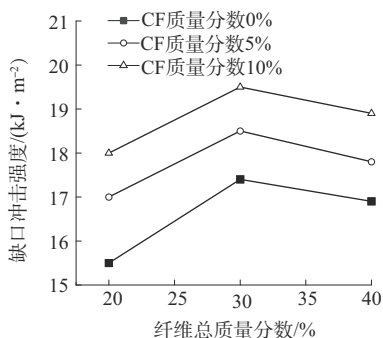


图3 不同纤维含量的PA66复合材料的缺口冲击强度

料所受负荷或能量转移到支承的强力纤维上,并将负荷由局部传递到较大范围甚至于整个物体。CF和GF相比,具有更高的强度和模量,从图中可以明显看出,由CF增强的PA66的弯曲强度和拉伸强度有较大提升。

纤维填充的用量对复合材料力学性能的影响,在理论上应呈比例的增加,但实际上这种比例关系仅在一定的纤维含量范围内存在。从图3可看出,随着混杂纤维含量的增加,复合材料的缺口冲击强度增加,但在纤维总质量分数达40%时,缺口冲击强度反而比纤维总质量分数30%时还要低。这是因为纤维的加入,对材料的加工性、熔融流动性有很大的影响,从而影响材料的其它性能。因此,混杂纤维质量分数一般控制在10%~30%范围内。

2.2 增韧剂对PA66复合材料韧性的影响

在保持CF质量分数为10%,纤维总质量分数为30%的基础上,研究不同增韧剂POE-g-MAH, EPDM-g-MAH和自制增韧剂以及不同含量对PA66复合材料缺口冲击强度的影响,配方见表1中10[#]至21[#],结果如图4所示。

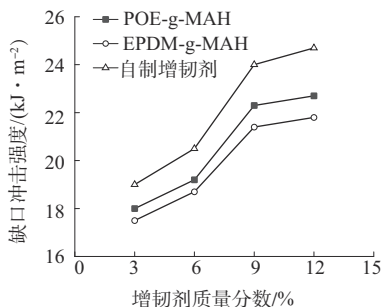


图4 增韧剂对PA66复合材料缺口冲击强度的影响

由图4可知,POE-g-MAH, EPDM-g-MAH和自制增韧剂对PA66复合材料都有良好的增韧效果,随着3种增韧剂含量的增加,PA66复合材料的冲击性能逐渐提高。当增韧剂的含量相同时,增韧效果顺序依次为自制增韧剂、POE-g-MAH和EPDM-g-

MAH,其中自制增韧剂的效果最好。POE和EPDM是目前最常用的尼龙类增韧剂,但尼龙带有较强的酰胺基团,与非极性的POE和EPDM共混时,两者之间的相容性差,相分离现象严重,为改善其相容性,目前最常用的方法是将POE和EPDM与MAH进行熔融接枝,使POE和EPDM带有二酸酐官能团,变成POE-g-MAH和EPDM-g-MAH,当POE-g-MAH, EPDM-g-MAH和PA66共混时,其酸酐官能团很容易与PA66末端氨基反应,形成化学键,提高了增韧剂与PA66的界面相容性,从而大大提高了复合材料的韧性。但POE, EPDM与MAH接枝时,其接枝率很低,只有1%左右,从而降低了增韧剂的效果。为提高其增韧剂的接枝率,笔者把POE和EPDM两者先共混再与MAH熔融接枝,使接枝率达到2%左右,即自制了一种高MAH接枝率的增韧剂,从而提高了复合材料的增韧效果。从图3可以看出,CF质量分数为10%,纤维总质量分数为30%时,其缺口冲击强度为19.5 kJ/m²,在其基础上,添加9%的自制增韧剂后,从图4可以看出,其缺口冲击强度达到24.3 kJ/m²,增加了20%以上。

2.3 石墨烯对复合材料的弯曲弹性模量影响

电力护栏常年放置在室外,要经受住四季冷暖和风吹雨淋日晒,其对制品的变形性要求很高,即对材料的弯曲弹性模量要求很高。为此,通过添加石墨烯来提高复合材料的弯曲弹性模量,从而降低制品的变形。保持其它助剂含量不变,在CF质量分数10%,纤维总质量分数30%的基础上,研究不同含量经硅烷偶联剂处理后的石墨烯对PA66复合材料弯曲弹性模量的影响,配方见表1中2[#], 22[#]至25[#],结果见图5。

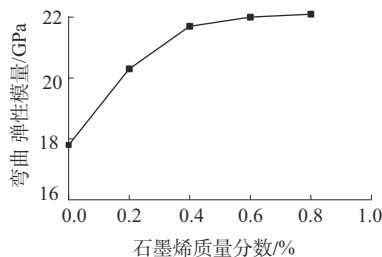


图5 不同石墨烯含量的PA66复合材料弯曲弹性模量的影响

从图5可以看出,随着石墨烯含量的增加,复合材料的弯曲弹性模量有显著提高,这是因为硅烷分子水解生成的活性硅羟基与石墨烯边缘上的活性位点(羟基、羧基、环氧基团等)间的化学键合反应,实现硅烷接枝修饰。硅烷分子上的官能团(如氮

基、环氧基等)为后续偶联提供桥梁,采用硅烷偶联剂对石墨烯进行接枝修饰后,改善了石墨烯的分散性,同时,硅烷偶联剂分子链上的丙烯酰氧基可与PA66上的基团发生反应,使复合材料形成了理想的界面,提高了载荷传递的功效,从而增强了复合材料的弯曲弹性模量。从图5可以看出,石墨烯质量分数为0.6%时,PA66复合材料的性能最优。石墨烯在复合材料中的分布见图6。

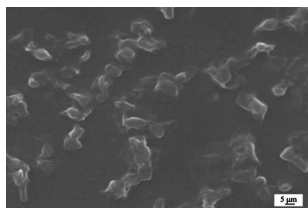


图6 石墨烯在PA66复合材料中的分布

2.4 抗氧剂、紫外线吸收剂、热稳定剂对材料老化性能的影响

笔者选用弯曲强度作评价指标,通过热氧和光加速老化,保持其它助剂含量不变,在CF质量分数10%、纤维总质量分数30%的基础上,考察不同含量抗氧剂、紫外线吸收剂、热稳定剂对材料老化性能的影响,其质量分数分别为0.1%、0.2%和0.3%,配方见表1中24[#]、26[#]至35[#],试验结果见表2。

表2 不同含量抗氧剂、紫外线吸收剂、热稳定剂对复合材料表征后弯曲强度 单位:MPa

试样编号									
24 [#]	26 [#]	27 [#]	28 [#]	29 [#]	30 [#]	31 [#]	32 [#]	33 [#]	34 [#]
285	246	252	261	253	264	260	271	251	258

从表2直接可以看出,在26[#]至35[#]这9个试样中,与不添加这些助剂的材料24[#]性能对比发现,32[#]试样的结果最好,老化200 h后弯曲强度只降低了5%,因此,最优的老化比例是抗氧剂、紫外线吸收剂、热稳定剂的浓度分别为0.2%、0.3%和0.1%。

经上述讨论,32[#]配方为最佳配方,并对其进行全面性能测试,经200 h老化后,其弯曲强度达到271 MPa,拉伸强度达到255 MPa,缺口冲击强度达到24 kJ/m²,弯曲弹性模量达到22 GPa。

2.6 应用情况

GF增强改性PA66材料的刚性和韧性是一对难以调和的矛盾,韧性增加通常以牺牲刚性和强度为代价,对电力护栏来说,材料的强度和韧性同等重要,增韧剂的添加提高了复合材料的韧性,但降低了其刚性,笔者通过添加CF代替GF的方法,又恢复了复合材料降低的刚性,很好解决了该矛盾。以

CF、GF及自制增韧剂、硅烷偶联剂处理的石墨烯、抗氧剂、紫外线吸收剂、热稳定剂质量分数分别为10%、20%、9%、0.6%、0.2%、0.3%、0.1%与59.8%的PA66共混制成改性PA66。用该改性PA66材料制成了一种电力塑料护栏样品,经过家庭轿车等不同车型的碾压试验,发现该电力塑料护栏完好无损。

3 结论

(1)随着纤维含量的增加,复合材料的弯曲强度和拉伸强度都会相应的增加,但CF增加到一定程度,力学综合性能也达到最高值,转而呈下降趋势,兼顾GF的价格优势和CF优良的力学性能,CF质量分数为10%,GF质量分数为20%时,综合性能最优。

(2)在增韧剂含量相同时,增韧效果从高到低依次为自制增韧剂、POE-g-MAH, EPDM-g-MAH,其中自制增韧剂质量分数为9%时,PA66复合材料的缺口冲击强度可提高20%以上。

(3)硅烷偶联剂处理后的石墨烯,可提高PA66复合材料的弯曲弹性模量,大大提高制品尺寸的稳定性,处理后的石墨烯质量分数为0.6%时,PA66复合材料的性能最优。

(4)抗氧剂、紫外线吸收剂、热稳定剂的质量分数分别为0.2%、0.3%和0.1%时,改性PA66复合材料的老化性能最好,经加速老化200 h,弯曲强度只降低了5%。

(5)以CF、GF及自制增韧剂、硅烷偶联剂处理的石墨烯、抗氧剂、紫外线吸收剂、热稳定剂质量分数分别为10%、20%、9%、0.6%、0.2%、0.3%、0.1%与59.8%的PA66共混制成改性PA66,经200 h老化后,PA66复合材料的弯曲强度达到271 MPa,拉伸强度达到255 MPa,缺口冲击强度达到24 kJ/m²,弯曲弹性模量达到22 GPa。用其制成电力塑料护栏,完全满足其使用要求,解决原金属护栏加工过程中对环境污染的问题,并避免了原金属护栏被撞击破坏后对人体的二次伤害。

参考文献

- [1] 刘颖,马艺涛,刘强.短切碳纤维增强尼龙复合材料力学性能及在电池箱上的应用[J].复合材料科学与工程,2021(9):46-54.
Liu Ying, Ma Yitao, Liu Qiang. Performance of short carbon fiber reinforced nylon composite and it's application in battery pack[J]. Composites Science and Engineering, 2021(9):46-54.
- [2] 张友强,王宝生,赵付宝,等.高流动性碳纤维增强尼龙66的制备与性能[J].工程塑料应用,2021,49(8):43-46,60.
Zhang Youqiang, Wang Baosheng, Zhao Fubao, et al. Preparation and properties of high fluidity carbon fiber reinforced nylon 66[J].

- Engineering Plastics Application, 2021, 49(8):43–46, 60.
- [3] 李永刚. 碳纤维复合材料汽车保险杠的研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2015.
- Li Yonggang. Research on carbon fiber composite material automobile bumper[D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2015.
- [4] 张琦, 张师军. 碳纤维增强热塑性复合材料的研究进展[J]. 石油化工, 2020, 49(12):1 153–1 164.
- Zhang Qi, Zhang Shijun. Research development on carbon fiber reinforced thermoplastic composites[J]. Petrochemical Technology, 2020, 49(12):1 153–1 164.
- [5] 任明伟, 刘莲英, 范广宏, 等. 碳纤维表面改性及结构重建技术的研究进展[J]. 化工新型材料, 2018, 46(10):40–43.
- Ren Mingwei, Liu Lianying, Fan Guanghong, et al. Recent research of surface modification and reconstruction of carbon fiber [J]. New Chemical Materials, 2018, 46(10):40–43.
- [6] 李三平, 杨正. 连续碳纤维增强热塑性复合材料的性能优势及应用举例[J]. 中国新技术新产品, 2019(10):64–65.
- Li Sanping, Yang Zheng. Performance advantages and application examples of continuous carbon fiber reinforced thermoplastic composites[J]. New Technologies and Products in China, 2019(10): 64–65.
- [7] 王子健, 周晓东. 连续纤维增强热塑性复合材料成型工艺研究进展[J]. 复合材料科学与工程, 2021(10):120–128.
- Wang Zijian, Zhou Xiaodong. Research progress on forming process of continuous fiber reinforced thermoplastic composites[J]. Composites Science and Engineering, 2021(10):120–128.
- [8] 刘云斌. 纤维增强尼龙复合材料的韧性研究进展[J]. 塑料科技, 2021, 49(8):117–120.
- Liu Yunbin. Research advance in the toughness of fiber reinforced nylon composites[J]. Plastics Science and Technology, 2021, 49(8): 117–120.
- [9] 马晓敏, 邢立学, 谭洪生, 等. 连续碳纤维增强 PA66 复合材料的结晶与力学性能[J]. 中国塑料, 2019, 33(2):40–47.
- Ma Xiaomin, Xing Lixue, Tan Hongsheng, et al. Study on crystallization and mechanical properties of continuous carbon-fiber-reinforced PA66 composites[J]. China Plastics, 2019, 33(2):40–47.
- [10] 张顶顶, 张福华, 杨吉祥, 等. 碳纤维表面改性及其在尼龙复合材料中的应用研究进展[J]. 工程塑料应用, 2019, 47(7):141–146.
- Zhang Dingding, Zhang Fuhua, Yang Jixiang, et al. Research progress on surface modification of carbon fiber and its application in polyamide composites[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(7):141–146.
- [11] 马小丰, 金旺, 刘莉莉, 等. 增韧尼龙 66 的制备及耐低温性能[J]. 工程塑料应用, 2019, 47(6):38–42.
- Ma Xiaofeng, Jin Wang, Liu Lili, et al. Preparation and low temperature properties of toughened polyamide 66[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(6):38–42.
- [12] 丁剑峰, 王伟, 刘耀, 等. 无机成核剂改性聚酰胺 6/碳纤维复合材料的结构与性能[J]. 中国塑料, 2020, 34(12):8–16.
- Ding Jianfeng, Wang Wei, Liu Yao, et al. Structure and properties of polyamide 6/carbon fiber composites modified with inorganic nucleating agents[J]. China Plastics, 2020, 34(12):8–16.
- [13] Li X L, Ge J P, Prof Y D L. Atmospheric pressure chemical vapor deposition: An alternative route to large-scale MoS₂ and WS₂ inorganic fullerene-like nanostructures and nanoflowers[J]. Chemistry: A European Journal, 2004, 10:6 163–6 171.
- [14] 杨丽君, 王齐华, 宁丽萍, 等. 碳纤维及石墨填充聚四氟乙烯复合材料的摩擦学性能研究[J]. 材料科学与工程学报, 2004, 22(5): 705–708.
- Yang Lijun, Wang Qihua, Ning Liping, et al. Study on the tribological properties of CF-Gr-PTFE composites[J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2004, 22(5):705–708.
- [15] 张景新. 表面接枝 MgO 的碳纤维/尼龙 6 号热绝缘复合材料的制备及性能研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2017.
- Zhang Jingxin. Preparation of MgO nanoparticles-grafted carbon fibers/nylon 6 composites and research of its thermal conductive and insulating properties[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2017.
- [16] 陈春银, 赵彩霞, 郭威男, 等. 尼龙 11/石墨烯氧化物纳米复合材料的动态流变性能[J]. 塑料, 2012, 41(1):67–70.
- Chen Chunyin, Zhao Caixia, Guo Weinan, et al. Dynamical rheological behavior of polyamide 11/graphene oxide(GO) nanocomposite[J]. Plastics, 2012, 41(1):67–70.
- [17] Zeng X, Qin W. Synthesis of MoS₂ nanoparticles using MoO₃ nanobelts as precursor via a PVP-assisted hydrothermal method [J]. Materials Letters, 2016, 182:347–350.
- [18] 田赫, 蔡智奇, 李迎春, 等. 不同类型抗氧化剂对 PA6 长效耐热性能影响[J]. 工程塑料应用, 2018, 46(11):129–133.
- Tian Cheng, Cai Zhiqi, Li Yingchun, et al. Effect on heat-resistant oxygen modification of polyamide 6[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(11):129–133.
- [19] 赵浩, 金俊弘, 杨胜林, 等. 复合抗紫外剂对 PBO 纤维光稳定性的影响[J]. 材料导报, 2011, 25(17):107–110.
- Zhao Hao, Jin Junhong, Yang Shenglin, et al. The effect of hybrid ultraviolet stabilizers on the uv stability of poly(p-phenylene benzobisoxazole) fibers[J]. Material Review, 2011, 25(17): 107–110.
- [20] 武海花, 李迎春, 蔡智奇. 抗老化助剂对尼龙 6 耐老化性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2017, 45(7):124–128.
- Wu Haihua, Li Yingchun, Cai Zhiqi. Effects of anti-aging additives on anti-aging resistance of PA6[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(7):124–128.