

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.08.005

短切玻璃纤维不同加料方式对MCA/PA6复合材料性能的影响

芦浩浩, 车仕君, 卢津强, 王晓东, 楼韩锋, 楼大峰, 郝刘佳, 周立辉

(横店集团得邦工程塑料有限公司, 浙江东阳 322118)

摘要: 为探究短切玻璃纤维(sGF)的长度分布对三聚氰胺氰尿酸盐/尼龙6 (MCA/PA6)复合材料性能的影响,并制备出可稳定通过960℃灼热丝可燃性测试的复合材料,通过调整sGF在双螺杆挤出机中的进料位置,制备出一系列具有不同sGF长度分布的MCA/sGF/PA6复合材料,并对其力学性能、熔体流动速率、垂直燃烧和灼热丝可燃性等进行了表征测试。结果表明,随着sGF侧喂量的减少和主喂量的增加,sGF的平均长度由405.0 μm降低至175.7 μm。同时,MCA/sGF/PA6复合材料的拉伸强度由142.4 MPa降低至99.3 MPa,弯曲强度由202.9 MPa降低至164.3 MPa,弯曲模量由7 035.0 MPa降低至5 773.1 MPa,缺口冲击强度由9.9 kJ/m²降低至6.5 kJ/m²,无缺口冲击强度由61.9 kJ/m²降低至48.0 kJ/m²,熔体流动速率由16.7 g/10 min提升至22.8 g/10 min。阻燃测试方面,垂直燃烧的余焰总时间由16.5 s降低至1.9 s,960℃灼热丝的燃烧时间由90 s降低至35.4 s。当sGF侧喂量降低至15份以下时,MCA/sGF/PA6复合材料的垂直燃烧等级可以达到V-2;当sGF侧喂量降低至5份以下时,复合材料可以稳定通过960℃灼热丝可燃性测试。基于sGF的“烛芯效应”,实现了通过熔融挤出工艺对sGF长度分布和灼热丝燃烧时间的调控。

关键词: 短切玻璃纤维; 尼龙6; 三聚氰胺氰尿酸盐; 灼热丝可燃性; 烛芯效应; 力学性能

中图分类号: TQ323.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)08-0033-06

Effect of short glass fiber different feeding methods on properties of MCA/PA6 composites

LU Haohao, CHE Shijun, LU Jinqiang, WANG Xiaodong, LOU Hanfeng, LOU Dafeng, HAO Liujia, ZHOU Lihui

(Hengdian Group Tospo Engineering Plastics Co., Ltd., Dongyang 322118, China)

Abstract : To investigate the influence of short glass fiber (sGF) length distribution on melamine cyanurate/polyamide 6 (MCA/PA6) composites and to develop MCA/sGF/PA6 composites capable of consistently passing the 960 °C glow-wire flammability test, a series of composites with varied sGF length distributions were fabricated by adjusting sGF feeding positions in the twin-screw extruder. Their mechanical properties, melt flow rate (MFR), vertical burning behavior, and glow-wire flammability were systematically characterized. The results indicate that the average length of sGF declines from 405.0 μm to 175.7 μm when the side-feeding ratio of glass fibers decreases and the main-feeding ratio increases. Correspondingly, the tensile strength of MCA/sGF/PA6 composites declines from 142.4 MPa to 99.3 MPa, flexural strength decreases from 202.9 MPa to 164.3 MPa, flexural modulus reduces from 7 035.0 MPa to 5 773.1 MPa, notched impact strength drops from 9.9 kJ/m² to 6.5 kJ/m², unnotched impact strength decreases from 61.9 kJ/m² to 48.0 kJ/m², and MFR increases from 16.7 g/10 min to 22.8 g/10 min. In flammability testing, the total afterflame time of vertical burning decreases from 16.5 s to 1.9 s, and the glow-wire combustion time at 960 °C decreases from 90 s to 35.4 s. When the sGF side-feeding ratio decreases below 15 phr, the composites achieve the UL 94 V-2 rating; at ratios below 5 phr, they consistently pass the 960 °C glow-wire flammability test. Based on the wicking effect of sGF, the regulation of sGF length distribution and glow-wire combustion time through melt extrusion processing are demonstrated.

Keywords : short glass fiber ; polyamide 6 ; melamine cyanurate ; glow-wire flammability ; candlewick effect ; mechanical property

通信作者: 芦浩浩, 硕士, 工程师, 主要从事高分子材料的改性与加工的研究

收稿日期: 2025-05-26

引用格式: 芦浩浩, 车仕君, 卢津强, 等. 短切玻璃纤维不同加料方式对MCA/PA6复合材料性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(8): 33-38.

LU Haohao, CHE Shijun, LU Jinqiang, et al. Effect of short glass fiber different feeding methods on properties of MCA/PA6 composites[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(8): 33-38.

尼龙6 (PA6)因其优异的热性能、力学性能和加工特性成为了一种重要的工程应用材料,但其固有的可燃性、吸水性及尺寸稳定性严重制约了其在接插件、断路器等电子电气领域的应用^[1-3]。部分断路器应用领域要求PA6材料的灼热丝可燃性指数(GWFI)达到960℃并具备无卤、低烟、低毒和良好的力学性能^[4-5]。对此,研究人员提出通过引入环保型的三聚氰胺氰尿酸盐(MCA)阻燃剂和短切玻璃纤维(sGF)对PA6进行改性,赋予PA6阻燃、低吸水和高强度等特性^[6-10]。然而在燃烧过程中,PA6基体中的sGF会引起“烛芯效应”^[10],即暴露的sGF因其高导热性成为热量向尼龙传递的快速通道;同时,熔融的尼龙会沿着纤维表面毛细作用被持续输送到燃烧区,这种热传导和燃料输送的协同作用,极大地促进了火焰的蔓延和维持,从而显著削弱了MCA气相阻燃的隔离效果^[11]。因此,为探究sGF长度分布对MCA/sGF/PA6复合材料“烛芯效应”的影响,笔者采用双螺杆挤出机的多段喂料策略,通过改变sGF的喂料位置(主喂料和侧喂料结合)对MCA/sGF/PA6复合材料中sGF的长度分布进行梯度调控。利用万能试验机、简支梁冲击试验机、灼热丝试验仪和水平垂直燃烧试验机等设备对复合材料的性能进行测试表征,并进一步探讨了sGF长度分布变化对MCA/sGF/PA6复合材料力学性能、热性能及燃烧性能的影响机制,为开发具备优良阻燃性能的玻璃纤维增强PA6复合材料提供理论和数据参考。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PA6: J2400, 杭州聚合顺特种材料科技有限公司;
sGF: ECS10-03-568H, 短切长度3 mm, 中国巨石股份有限公司;

抗氧剂: 1010和168, 江苏极易新材料有限公司;
乙烯基双硬脂酰胺(EBS): 上海井宏化工科技有限公司;

三聚氰胺氰尿酸盐(MCA-L): 寿光卫东化工有限公司。

1.2 主要设备及仪器

电热鼓风干燥箱: GR-GZ9018A, 广州格瑞检测设备有限公司;

双螺杆挤出机: STS35 Mc^{II}, 科倍隆(南京)机械有限公司;

失重式喂料机: NX-S50D, 日本久保田株式会社;
注塑机: MA600 II /130, 海天塑机集团有限公司;
简支梁冲击试验机: HIT-2492, 承德市金建检测仪器有限公司;

万能试验机: 5966-10KN, 美国INSTRON公司;
熔体流动速率(MFR)仪: MFI-2322H, 承德市金建检测仪器有限公司;

水平垂直燃烧试验机: SH5312, 广州信禾电子设备有限公司;

灼热丝试验仪: KS-51BS, 上海今森检测设备有限公司;

箱式电阻炉: SX2-4-10, 上海锦屏仪器有限公司;

扫描电子显微镜(SEM): TM3030, 株式会社日立制作所;

热重(TG)分析仪: TG 209 F1, 德国NETZSCH公司。

1.3 样品制备

将PA6切片和MCA放入120℃烘箱中干燥3 h, 冷却后将PA6, MCA, sGF及其他原料按配方分别称量, 其中主喂料配方为PA6 69份、阻燃剂MCA 10份、润滑剂EBS 0.6份、抗氧剂1010/168 (质量比3:1) 0.4份, sGF总量为20份, sGF的主喂量和侧喂量见表1。首先, 将主喂的原材料置于30 cm×45 cm的聚乙烯袋内手工摇匀。然后, 将物料通过主喂和侧喂的失重式喂料机按比例输送入双螺杆挤出机进行挤出造粒, 主/侧喂料方式如图1所示。双螺杆挤出机加热温度设置为200~250℃, 机头为245℃; 主机螺杆转速设置为350 r/min, 产量为50 kg/h。最后,

表1 sGF的主喂量和侧喂量

Tab. 1 Main-fed and side-fed dosage of sGF

Samples	Main-fed sGF/phr	Side-fed sGF/phr
1 [#]	0	20
2 [#]	5	15
3 [#]	10	10
4 [#]	15	5
5 [#]	20	0

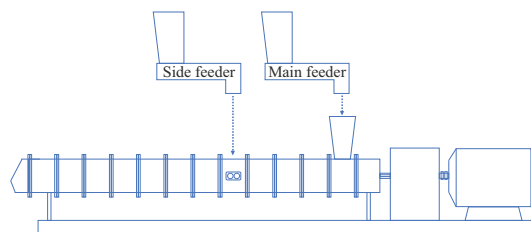


图1 双螺杆挤出机的主/侧喂料方式示意图

Fig. 1 Schematic diagram of main/side feeding mode in a twin-screw extruder

将挤出的MCA/sGF/PA6复合材料放入120℃烘箱中干燥4 h,通过注塑机制备为测试样条。

1.4 性能测试

注塑样条在 $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$,相对湿度为 $(50\pm 5)\%$ 的条件下状态调节24 h后进行测试。

(1)拉伸强度按照GB/T 1040.2-2022进行测试,拉伸速率为10 mm/min;弯曲强度按照GB/T 9341-2008进行测试;冲击性能按照GB/T 1043.1-2008进行测试。

(2)阻燃性能按照GB/T 2408-2021进行测试,样条厚度1.6 mm,各测5片样条。

(3) GWFI测试按照GB/T 5169.11-2017,样片厚度为2 mm,各测3片样条。

(4) MFR按照GB/T 3682.1-2018进行测试,测试条件为250℃/2.16 kg。

(5) TG分析按照GB/T 33047.1-2016进行测试。

(6) sGF残留长度的测定:截取注塑弯曲样条约2 g置于750℃的箱式电阻炉中灼烧10 min,冷却后将残留的sGF置于在无水乙醇中并振荡分散,随后迅速转移到SEM载物台上,待溶剂自然挥发完全后,使用SEM观察残留物,最后利用测试软件测量

sGF的剩余长度,长度小于50 μm的sGF不做统计,每组取样数量为300根。

2 结果与讨论

2.1 不同喂料工艺下sGF长度分布及力学性能分析

通过调整sGF在双螺杆挤出机中主/侧喂的喂料比例,制备出具备不同sGF长度分布的MCA/sGF/PA6/复合材料,相应复合材料中sGF长度分布统计结果如图2所示。从图2a-图2e的统计结果可以看出,1#样品中sGF长度主要分布于200~500 μm,2#和3#样品中sGF长度主要分布于100~400 μm,4#样品中sGF长度主要分布于100~300 μm,5#样品中sGF长度主要分布于100~200 μm。由图2f可知,1#~5#样品的平均长度由405.0 μm降低至175.7 μm。这是因为sGF从主喂进料能够受到更长的螺杆剪切距离,且主喂料口位置存在未塑化的PA6粒子与螺杆产生协同作用,使sGF受到更强的剪切力;而sGF从第五节机筒侧喂进料时,sGF受到的螺杆剪切距离相对较短,且已熔融塑化的PA6树脂会对sGF产生一定的保护作用。即sGF从主喂料口进料时受到的剪切作用远大于侧喂,导致sGF的平均长度随着主喂量的增加而逐渐减小。

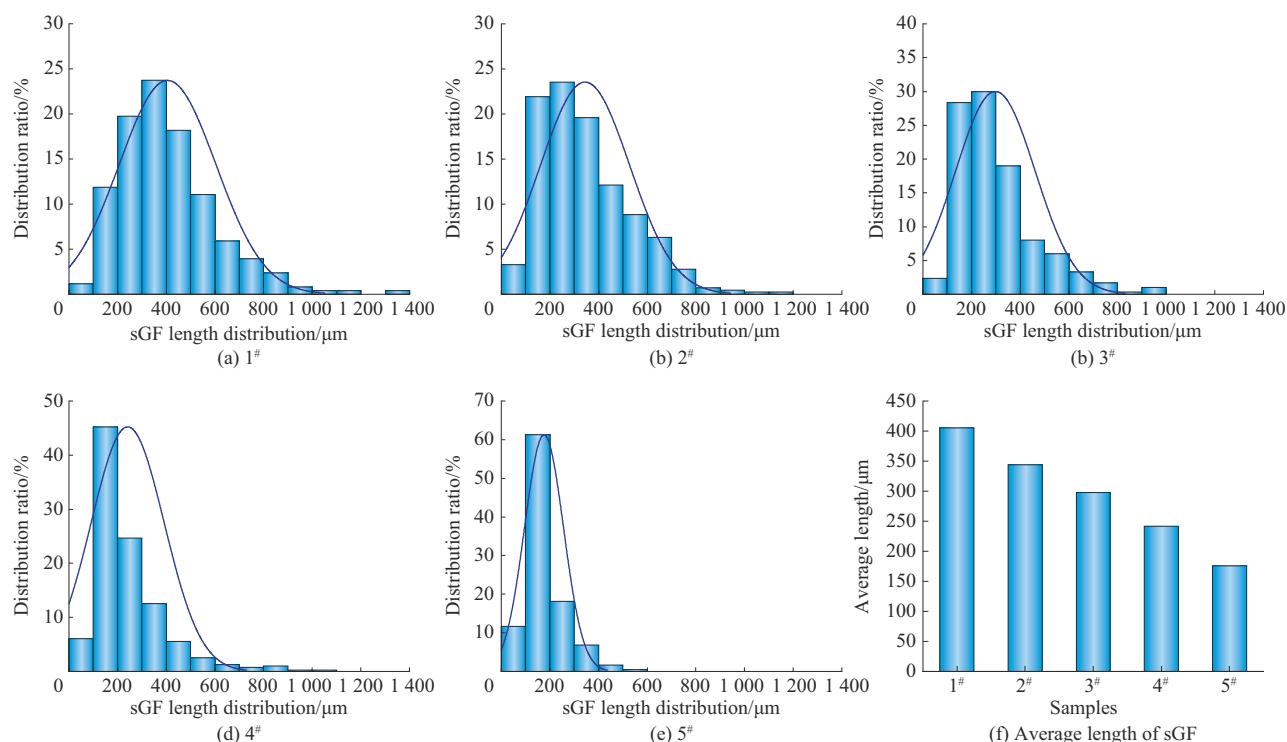


图2 MCA/sGF/PA6复合材料中sGF的保留长度

Fig. 2 Residual length of sGF in MCA/sGF/PA6 composites

MCA/sGF/PA6复合材料的力学性能测试结果如图3所示。由测试数据可知,随着sGF侧喂量的

减少和主喂量的增加,断裂伸长率虽然呈现先增大后减小的趋势,但整体变化幅度不大。出现该现象

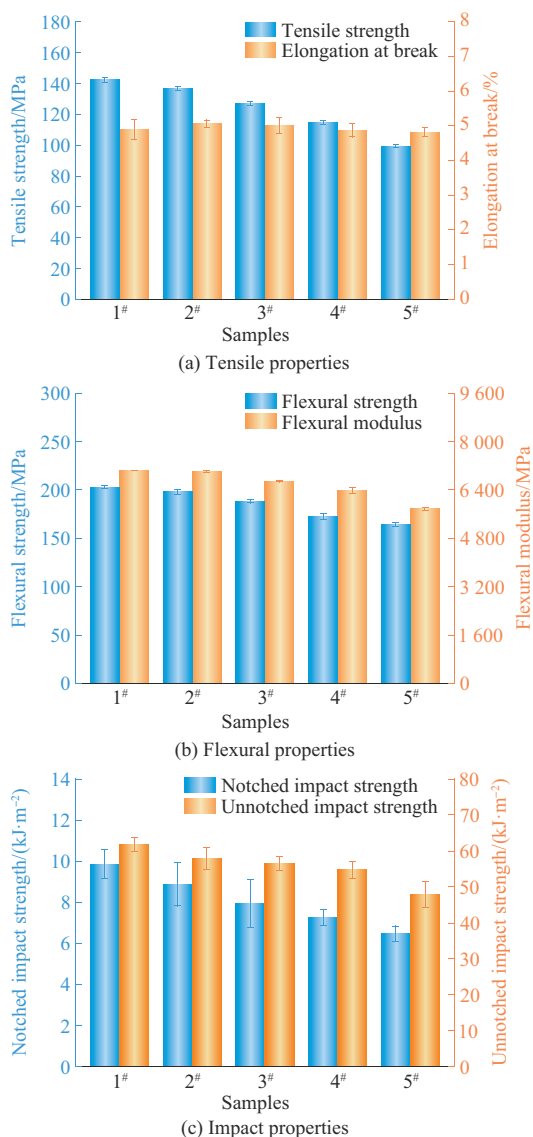


图3 MCA/sGF/PA6复合材料的力学性能

Fig. 3 Mechanical performance of MCA/sGF/PA6 composites

的原因可能是:较长的sGF在树脂中可以形成良好的网络结构,并与树脂之间具有更好的相互作用,此时sGF含量越高导致分子链运动能力下降越明显,导致断裂伸长率进一步下降^[12]。当侧喂sGF量为5份时,复合材料体系内由15份的较长sGF作为主导,且较长的sGF含量降低引起分子链运动能力提升,使复合材料的拉伸应变得以提升;当侧喂sGF量增加至10份及以上时,更多的较短sGF在树脂体系内难以形成网络结构,且容易使较长的sGF与PA6树脂之间产生缺陷,进而导致复合材料的拉伸应变降低。该趋势也与Ferreira等^[13]报道的研究结果相近。而复合材料的其他力学性能整体呈现下降趋势,拉伸强度由142.4 MPa降低至99.3 MPa,弯曲强度由202.9 MPa降低至164.3 MPa,弯曲模

量由7 035.0 MPa降低至5 773.1 MPa,缺口冲击强度由9.9 kJ/m²降低至6.5 kJ/m²,无缺口冲击强度由61.9 kJ/m²降低至48.0 kJ/m²。这是因为当sGF的平均长度逐渐变短时,sGF形成的网络结构逐渐变差,对PA6树脂产生的整体黏滞力逐渐降低,应力不能更好地传递到sGF上,使之能够承担的应力损耗作用逐渐减弱,进一步导致复合材料的拉伸、弯曲和冲击强度逐渐降低^[14-15]。

2.2 MCA/sGF/PA6复合材料的热性能分析

MCA/sGF/PA6复合材料的MFR测试结果见表2,由表2可以看出,随着sGF侧喂量的减少和主喂量的增加,复合材料的熔体流动性逐渐升高,MFR由16.7 g/10 min逐渐增大至22.8 g/10 min,这是因为随着sGF平均长度逐渐变短导致复合材料熔体的分子间摩擦力逐渐下降^[16]。

表2 MCA/sGF/PA6复合材料的MFR

Tab. 2 MFR of MCA/sGF/PA6 composites

Samples	1#	2#	3#	4#	5#
MFR/[g·(10 min) ⁻¹]	16.7	17.2	18.7	19.9	22.8

图4为MCA/sGF/PA6复合材料的TG及DTG曲线图。由图4的TG分析结果可知,MCA/GF/PA6复合材料体系在290~350 °C出现了明显的失重峰,主要原因是MCA提前分解,此阶段MCA开始分解成三聚氰胺、氰尿酸、水、二氧化碳和氨气等^[7,17]。利用MCA的分解可以带走大量的热量,且非燃性气体对空气中的氧气有一定的稀释作用,使材料具备阻燃性^[2,11]。从表3的TG分析数据结果可知,1#~5#复合材料热失重50%质量时的温度(T_{50})和DTG峰值2的温度(T_{p2})有下降趋势,这可能是因为sGF平均长度变短使复合材料的热稳定性下降^[18],导致复合材料在高于340 °C时分解速度变快;而DTG的峰值1温度(T_{p1})有升高趋势,可能是在熔融挤出过程

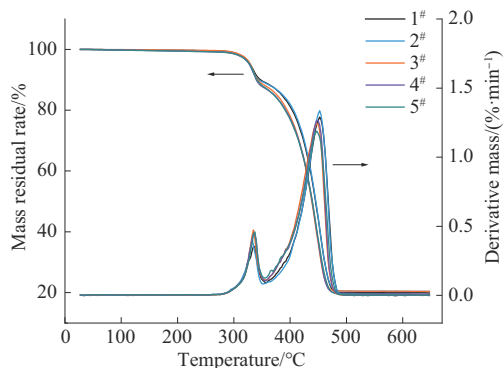


图4 MCA/sGF/PA6复合材料的TG及DTG曲线

Fig. 4 TG and DTG curves of MCA/sGF/PA6 composites

表3 MCA/sGF/PA6复合材料的TG测试数据

Tab. 3 TG test data of MCA/sGF/PA6 composites

Item	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]
$T_5/^{\circ}\text{C}$	328.4	328.3	328.6	328.2	328.3
$T_{50}/^{\circ}\text{C}$	445.2	445.8	438.6	438.9	438.8
$T_{p1}/^{\circ}\text{C}$	334.9	332.4	334.9	337.4	337.4
$T_{p2}/^{\circ}\text{C}$	452.4	452.4	450.1	447.4	447.4
$W_{600}/\%$	20.0	20.4	20.5	19.7	19.4

Notes: T_5 is temperature at 5% mass loss; T_{50} is temperature at 50% mass loss; T_{p1} is peak temperature 1 in DTG curves; T_{p2} is peak temperature 2 in DTG curves; $W_{600\%}$ is residual mass fraction at 600 °C.

中,复合材料中较长的sGF含量越多越容易导致熔体的内摩擦力增大,进而产生较高的剪切热^[19]使MCA在双螺杆挤出机中发生了少量分解。

2.3 MCA/sGF/PA6复合材料的阻燃性能分析

MCA/GF/PA6复合材料燃烧时,较长的sGF更容易形成连续的导热通路(类似烛芯),从而将热量快速地从火焰区传导至材料内部未燃区域,同时sGF可通过毛细作用促进熔融聚合物的流动和可燃性挥发物的输送,两者协同作用抵消MCA的气相阻燃作用,从而加剧PA6基体的燃烧^[20-22]。从表4的测试结果可以看出,1[#]~5[#]样品的垂直燃烧时间逐渐变小(都存在滴落引燃脱脂棉),两次燃烧余焰总时间由16.5 s降低至1.9 s。其中1[#]和2[#]样条燃烧时火焰大,火焰蔓延速度较快,熔滴滴落速度较慢;此外,1[#]样品燃烧时间过长,阻燃无级别;2[#]样品燃烧时间处于V-2等级要求的临界值。这主要是因为复合材料中sGF长度较长,发挥较强的“烛芯”作用,并且sGF对PA6产生的整体黏滞力较强及复合材料的流动性较差导致燃烧时无法及时滴落带走热量^[2,5]。5[#]样品的测试结果表明,当sGF完全主喂时,复合材料的阻燃样条能够快速滴落并熄灭,这主要是因为当sGF长度主要分布于300 μm以下时,即sGF长度分布降低使得MCA/GF/PA6复合材料中sGF导热网络结构难以有效连接,从而使热量和燃料的传递效率降低,“烛芯效应”被抑制,且sGF对PA6产生的整体黏滞力下降及复合材料流动性增加

表4 MCA/sGF/PA6复合材料的垂直燃烧测试结果

Tab. 4 Vertical burning test results of MCA/sGF/PA6 composites

Item	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]
Mean t_1 value/s	14.3	10.0	7.9	7.7	1.1
Mean t_2 value/s	2.2	1.1	0.8	0.8	0.8
Whether dripping ignites bleached cotton	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Flame retardant rating	No	V-2	V-2	V-2	V-2

Notes: t_1 and t_2 represent flame duration after the first and second flame application, respectively.

可以使熔滴快速滴落并转移热量。

表5为MCA/sGF/PA6复合材料的960 °C灼热丝测试结果。从表5可以看出,1[#]~5[#]样品的燃烧时间逐渐变小,其主要原因是由于sGF侧喂量的减少导致复合材料中sGF的长度逐渐变短,而更短的sGF可以使复合材料的“烛芯效应”明显减弱,促使灼热丝960 °C下燃烧时间明显变短。根据GB/T 5169.11-2017测试标准^[4],灼热丝施加时间为30 s,灼热丝退出后样品的余焰燃烧时间在30 s内且绢纸未被熔滴引燃才能通过测试,即4[#]和5[#]样品可以通过960 °C GWFI测试。综上,MCA/sGF/PA6复合材料在加工过程中侧喂5份以内sGF时,能够稳定通过960 °C GWFI测试。

表5 MCA/sGF/PA6复合材料的960 °C灼热丝测试结果

Tab. 5 Glow-wire test results at 960 °C of MCA/sGF/PA6 composites

Item	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]
Mean t_R value/s	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Mean t_E value/s	>90	85.3	58.2	43.2	35.4
Whether dripping ignites tissue paper	Yes	Yes	Yes	No	No

Notes: t_R denotes ignition time of specimen after glow-wire application, while t_E represents total flaming duration after ignition.

3 结论

(1)在双螺杆挤出机熔融混合过程中,随着sGF侧喂量的减少和主喂量的增加,sGF的平均长度由405.0 μm降低至175.7 μm,MCA/sGF/PA6复合材料力学性能呈现整体下降的趋势,断裂伸长率虽然呈现先增大后减小的趋势,但整体变化幅度不大。

(2)随着sGF平均长度逐渐变短,MCA/sGF/PA6复合材料熔体的分子间摩擦力逐渐下降,使得复合材料的流动性逐渐改善。挤出混合过程中sGF侧喂量较多时会产生较高的剪切热,导致部分MCA阻燃剂分解。

(3)随着sGF平均长度逐渐变短,MCA/sGF/PA6复合材料的垂直燃烧时间和960 °C灼热丝燃烧时间逐渐变短。当sGF侧喂量降低至15份以下时,复合材料的垂直燃烧等级可以达到V-2级。当sGF侧喂量降低至5份以下时,复合材料可以稳定通过960 °C灼热丝可燃性测试。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 李双庆,汤溢融,杨永波.阻燃尼龙研究进展[J].工程塑料应用,

- 2020,48(2):132-138.
- LI Shuangqing, TANG Yirong, YANG Yongbo. Research progress on fire retarded nylon[J]. *Engineering Plastics Application*, 2020, 48(2):132-138.
- [3] 杨海民,李函坚,林经萍,等.水滑石对MCA阻燃PA6性能的影响[J]. *塑料工业*, 2020, 48(1):96-99.
- YANG Haimin, LI Hanjian, LIN Jingping, et al. Effect of hydro-talcite on the properties of MCA/PA6 flame-retardant composites[J]. *China Plastics Industry*, 2020, 48(1):96-99.
- [4] 张林,陈敏. GB/T 5169.11-2017与GB/T 5169.11-2006标准差异及成品的灼热丝可燃性试验过程分析[J]. *电器与能效管理技术*, 2019(5):71-74.
- ZHANG Lin, CHEN Min. Analysis of glow-wire flammability test process and difference between GB/T 5169.11-2017 and GB/T 5169.11-2006[J]. *Electrical & Energy Management Technology*, 2019(5):71-74.
- [5] 贾义军,毕立,陈国军,等.电子元器件壳体用MCA阻燃尼龙6工程塑料研制[J]. *工程塑料应用*, 2020, 48(5):34-38, 51.
- JIA Yijun, BI Li, CHEN Guojun, et al. Development of MCA flame retardant nylon 6 for electronic appliance[J]. *Engineering Plastics Application*, 2020, 48(5):34-38, 51.
- [6] 李圆圆,付俊,张玲丽,等.氮-磷协同阻燃聚酰胺66制备与性能[J]. *工程塑料应用*, 2021, 49(4):29-33, 60.
- LI Yuanyuan, FU Jun, ZHANG Lingli, et al. Preparation and properties of nitrogen-phosphorus synergistic flame retarded polyamide66[J]. *Engineering Plastics Application*, 2021, 49(4):29-33, 60.
- [7] 齐可心,张安莹,陈赛赛,等. MCA阻燃尼龙66的制备及其性能研究[J]. *合成纤维工业*, 2024, 47(3):64-67, 73.
- QI Kexin, ZHANG Anying, CHEN Saisai, et al. Preparation and properties of MCA flame retardant nylon 66[J]. *China Synthetic Fiber Industry*, 2024, 47(3):64-67, 73.
- [8] 张电子,齐辉,王学军. 尼龙6无卤阻燃改性研究进展[J]. *工程塑料应用*, 2022, 50(9):138-143.
- ZHANG Dianzi, QI Hui, WANG Xuejun. Research progress on halogen-free flame retardant modification of nylon 6[J]. *Engineering Plastics Application*, 2022, 50(9):138-143.
- [9] 武少钰,姚兵,李姣姣,等. MCA不同加料方式对尼龙66力学性能的影响[J]. *塑料工业*, 2020, 48(1):69-72, 99.
- WU Shaoyu, YAO Bing, LI Jiaojiao, et al. Effect of MCA different feeding methods on mechanical properties of nylon 66[J]. *China Plastics Industry*, 2020, 48(1):69-72, 99.
- [10] SHI X H, LI X L, LI Y M, et al. Flame-retardant strategy and mechanism of fiber reinforced polymeric composite: A review[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2022, 233. DOI: 10.1016/j.compositesb.2022.109663.
- [11] 章建忠,许升,樊家澍,等.玻璃纤维增强聚酰胺复合材料用阻燃剂的研究进展[J]. *复合材料学报*, 2025, 42(5):2 414-2 429.
- ZHANG Jianzhong, XU Sheng, FAN Jiashu, et al. Research progress in flame retardants for glass fiber reinforced polyamide composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2025, 42(5): 2 414-2 429.
- [12] ZHAO Y H, WANG L Y, CHONG Y S, et al. Preparation and properties of glass fiber reinforced nylon56 composites[J]. *Polymer Composites*, 2022, 43(9):6 660-6 666.
- [13] FERREIRA T R M, DE ALENCAR LECHTMAN M, DIAS F L, et al. Effect of hollow glass microspheres addition on density reduction and mechanical properties of PA6/glass fibers composites[J]. *Polimeros*, 2022, 32(1). DOI:10.1590/0104-1428.210060.
- [14] QIAO J, ZHANG Q, WU C, et al. Effects of fiber volume fraction and length on the mechanical properties of milled glass fiber/polyurea composites[J]. *Polymers*, 2022, 14(15). DOI: 10.3390/polym14153080.
- [15] 张九夫,罗开强,徐军,等.长玻璃纤维增强PA66复合材料的综合性能及其影响因素研究[J]. *中国塑料*, 2022, 36(3):1-8.
- ZHANG Jiufu, LUO Kaiqiang, XU Jun, et al. Study on comprehensive properties and influencing factors of long glass fiber reinforced PA66 composites[J]. *China Plastics*, 2022, 36(3):1-8.
- [16] ZHANG D H, HE M, QIN S H, et al. Effect of fiber length and dispersion on properties of long glass fiber reinforced thermoplastic composites based on poly(butylene terephthalate) [J]. *RSC Advances*, 2017, 7(25):15 439-15 454.
- [17] 罗典,范敬辉,黄浩,等.三聚氰胺脲酸阻燃尼龙66热降解行为及动力学[J]. *高分子材料科学与工程*, 2019, 35(6):35-39.
- LUO Dian, FAN Jinghui, HUANG Hao, et al. Thermal degradation dynamic model of melamine cyanurate flame retardant nylon 66[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2019, 35(6): 35-39.
- [18] PATTI A, ACIERNO S, NELE L, et al. Sustainable basalt fibers vs. traditional glass fibers: Comparative study on thermal properties and flow behavior of polyamide 66-based composites[J]. *ChemEngineering*, 2022, 6(6). DOI: 10.3390/chemengineering6060086.
- [19] 蒋新沛,黄天宇,魏兴岳,等.聚合物低温挤出与能耗管理研究进展[J]. *中国塑料*, 2025, 39(4):111-117.
- JIANG Xinpei, HUANG Tianyu, WEI Xingyue, et al. Research progress in polymer extrusion at low temperatures and energy consumption management[J]. *China Plastics*, 2025, 39(4):111-117.
- [20] 阮阳阳,陈小随,张爱清,等.界面阻燃化玻璃纤维协同聚磷酸铵增强阻燃聚乳酸[J]. *精细化工*, 2024, 41(4):829-839.
- RUAN Yangyang, CHEN Xiaosui, ZHANG Aiqing, et al. Interfacial flame-retardant glass fiber synergistically reinforced polylactic acid with ammonium polyphosphate[J]. *Fine Chemicals*, 2024, 41(4):829-839.
- [21] WEI Z B, JI C, YU T, et al. The unique wick effect and combustion behavior of flax fiber reinforced composites: Experiment and simulation[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2023, 265. DOI: 10.1016/j.compositesb.2023.110954.
- [22] YARGICI KOVanci C, NOFAR M, GHANBARI A. Synergistic enhancement of flame retardancy behavior of glass-fiber reinforced polylactide composites through using phosphorus-based flame retardants and chain modifiers[J]. *Polymers*, 2022, 14(23). DOI:10.3390/polym14235324.