http://pmse.scu.edu.cn

玄武岩纤维添加量对聚酰胺 66 复合材料结构及性能影响

张晓冰[1], 张圣昌[1], 刘洪煦[1], 裴 芮[2,3], 刘鹏清[1], 任世杰[1]

(1. 四川大学 高分子科学与工程学院, 四川 成都 610065; 2. 四川四众玄武岩纤维技术研发有限公司, 四川 达州 635000;
3. 玄武岩纤维及复合材料四川省重点实验室, 四川 达州 635000)

摘要: 为探讨玄武岩纤维(BFs)作为填料增强工程塑料的可行性,利用双螺杆共混挤出机制备了 BFs 增强聚酰胺 66 复合材料(BFs/PA66),重点研究了 BFs 质量分数(26%,34%,42%和 50%)对复合材料内部纤维形态、树脂基体结晶行为、复合材料力学性能及耐热性能的影响,阐明了玄武岩纤维改性聚酰胺 66 的性能增强机理。结果表明,随着短切 BFs 含量的增加,复合材料中纤维长度逐步减小,树脂分子链有序排列受阻,结晶度逐步降低;复合材料力学性能变化与短切纤维含量增加呈正相关增长。随着纤维增强体含量增加,复合材料内部刚性增强骨架连续度逐步增加,不仅能承受更高的外加载荷,抑制复合材料内部裂纹产生及拓展的能力亦显著提升;当 BFs 质量分数达 50%时,复合材料拉伸强度可达 192 MPa,弯曲模量达到 356 MPa。此外,无机刚性骨架的存在可明显改善 PA66 的耐热性,热变形温度可达 241.8 ℃。

关键词: 玄武岩纤维;聚酰胺 66 树脂;复合材料;增强机理;结晶行为;耐热性能
中图分类号: TB332 **文献识别码:** A **文章编号:** 1000-7555(2026)04-0061-09

近年来,随着电子器件、航空航天等领域对材料综合性能要求的提升,无机填料与聚合物基体共混复合成为实现材料高强化、轻量化及多功能集成的关键技术手段[1~5]。聚酰胺 66(PA66)凭借其高强度、优异的耐热性、耐磨性及耐化学腐蚀性,广泛应用于汽车发动机部件及电子电气连接器等领域[6]。为突破传统 PA66 在极端工况下的性能限制,常通过共混碳纤维(CF)或玻璃纤维(GF)对其进行增强改性[7,8]。在树脂内部构建高填充(质量分数>45%)连续骨架网络结构可显著提升材料综合性能,拉伸强度可超 200 MPa,弯曲模量可达 18 GPa 以上,热变形温度突破 245 ℃[9,10]。高填充改性不仅拓宽了 PA66 在航空航天精密结构件、高速轨道交通轻量化部件等高端领域的应用,而且通过纤维-基体界面优化形成了应力传递网络,实现了强度-刚性-尺寸稳定性的协同提升,能推动工程塑料向结构功能一体化方向升级。

随着全球对材料可持续发展要求的不断提高,玻璃纤维工业资源消耗大且排放大量 SO_2,CO 和 NO_x 等有毒有害气体的弊端日益凸显[11];碳纤维则面临成本高昂且严重依赖石油资源的挑战[12],这促使市场对绿色替代材料的需求愈发迫切。此外,传统化石能源的日益枯竭,也使得寻求碳纤维和芳纶等纤维增强体低成本、来源广泛的替代品成为复合材料产业实现可持续发展的关键研究任务。玄武岩矿石在地球和月球上具有丰富的储量,且其纤维生产过程绿色环保;玄武岩纤维(BFs)具有较好的力学性能、宽泛的工作温度、良好的耐水、耐酸和耐盐腐蚀性能、电绝缘性能及阻燃性能,已成为未来实现高性能纤维增强复合材料制备过程低碳排放且可持续

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2026.0060
收稿日期: 2025-06-27
基金项目: 达州市科技计划项目(22ZDYF0046)
通讯联系人: 刘鹏清, 主要从事高性能纤维开发和纤维增强复合材料制备的研究, E-mail: liupq@scu.edu.cn;
任世杰, 主要从事功能高分子材料和特种工程塑料的制备及其应用研究, E-mail: rensj@scu.edu.cn

发展的理想材料[13]。目前主要通过传统共混挤出工艺或纤维表面改性技术如硅烷偶联剂处理、等离子体处理 BFs 来增强 PA66 复合材料，但界面改性技术虽可提升低填充量下的相容性，但在高填充时易失效，且缺乏长效稳定性。

为提高 BFs 改性 PA66 复合材料的负载量进而提升其力学性能、阐明 BFs 改性 PA66 的增强机理并推动 BFs 的实际应用发展，本文使用双螺杆共混挤出机制备了不同 BFs 质量分数（26%，34%，42% 和 50%）的 PA66 复合材料，严格控制其工艺参数，促进其在基体中均匀分散与良好取向。利用扫描电子显微镜、光学显微镜、差示扫描量热仪、X 射线衍射仪及万能试验机等，重点研究了 BFs 填充量对复合材料内部纤维形态、树脂基体结晶行为、复合材料力学性能及耐热性能的影响，建立了 BFs 添加量与复合材料结构与性能之间的关系。

1 实验部分

1.1 试剂与原料

玄武岩纤维：单丝直径约 13 μm，四川玻纤集团有限公司；丙酮：分析纯，成都科龙化工试剂厂；无水乙醇：分析纯，成都科龙化工试剂厂；甲酸：≥99%，上海泰坦科技股份有限公司；PA66：密度为 1140 kg/m^3，熔点为 262 ℃，Zytel® 101L NCO10，美国杜邦公司。

1.2 实验过程

将 PA66 粒料在鼓风干燥箱中 100 ℃干燥 6 h，PA66 粒料与 BFs 利用双螺杆共混挤出机（成都盛达兴业化工工程有限公司，Y132S-4）进行造粒，其中 BFs 的质量分数分别为 26%，34%，42% 和 50%。将制备的复合材料粒料在鼓风干燥箱中 100 ℃干燥 4 h，干燥好的粒料利用塑料注塑成型机（MA600 Ⅱ/130，海天集团）制备成复合材料样条，注塑温度为 290 ℃，注塑压力为 80 MPa，保压时间为 10 s。制备好的复合材料命名为“PA66/BFs x%”，其中“x”表示 BFs 的质量分数，如 PA66/BFs26% 表明复合材料中，BFs 的质量分数为 26%，PA66 的质量分数为 74%。

1.3 测试与表征

1.3.1 微观形貌表征：采用扫描电子显微镜（SEM，Quanta 250 型，美国 FEI 公司）对复合材料的表面及断面进行观察。测试前对样条进行喷金处理，以钨丝为电子源，加速电压为 5.0 kV。

采用重庆奥特光学仪器有限责任公司的 BK-POLR 型偏光显微镜观察材料中 BFs 的长度。取复合材料 2 g 加入 50 mL 甲酸中，于 40 ℃超声溶解、过滤，使用显微镜观察纤维长度。每组样品使用 NanoMeasurer 软件测量纤维长度，取样 10 计算其平均长度。

1.3.2 聚集态结构分析：采用差示扫描量热仪（DSC，TGA2 型，瑞士 METTLER TOLEDO 公司）测试复合材料的熔点、熔融焓、结晶焓、结晶度；N_2 氛围，升降温速率为 10 K/min，测试温度范围为 30～305 ℃。结晶度计算公式如式（1）所示

$$X_c = \frac{\Delta H_m}{(1-x)\Delta H_f} \tag{1}$$

式中：ΔH_m——样品的熔融焓（即熔融峰的面积）；ΔH_f——PA66 完全结晶的理论熔融焓，195 J/g[14]；x——BFs 质量分数。

采用 X 射线衍射仪（XRD，Rigaku MiniFlex600 型，日本理学株式会社）对样品的结晶度进行表征，Cu/K 射线（λ = 0.15418 nm）为 X 射线光源，以 0.05° 为扫描步长，对 2θ = 5°～35°进行数据采集。

1.3.3 力学性能：采用深圳万测公司的 ETM-104C 型万能试验机，参考国标 GB/T 1447—2005，测试复合材料的拉伸强度、弹性模量、弯曲强度、弯曲模量、断裂伸长率。其中拉伸速度为 10 mm/min，弯曲速度为 2 mm/min，每组样品测试数量为 5。

1.3.4 耐热性能：采用热失重分析仪（TGA，METTLER TOLEDO TGA2）测试材料的热分解温度及耐热性，N_2 氛围，升温速率为 10 K/min，温度范围为 35～800 ℃。

采用热变形维卡软化试验机（ZWK1302-B 型，深圳三思纵横科技股份有限公司）测试样品的热变形温度。升温速率为 120 ℃/h，弯曲应力为 1.8 MPa。

2 结果与讨论

2.1 形貌分析

对注塑成型的 PA66 与 BFs 复合材料样条的表

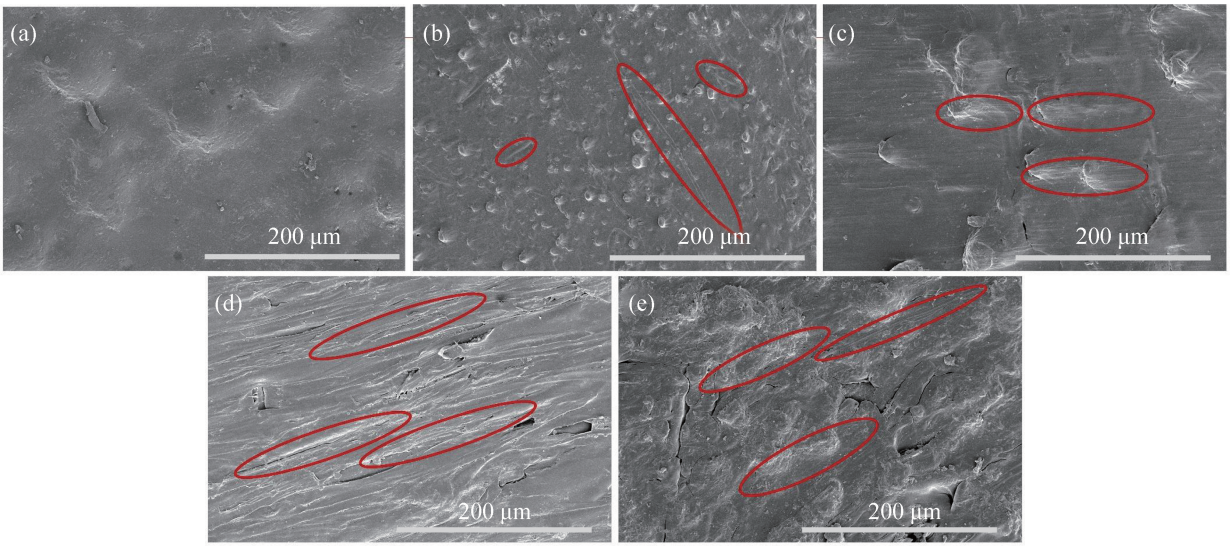


Fig. 1　SEM image of the surface of PA66/BFs composite materials: (a) PA66; (b)PA66/BFs26%; (c) PA66/BFs34%; (d) PA66/BFs42%; (e) PA66/BFs50%

面进行观察。从 SEM 图中可以明显观察到，未添加 BFs 的纯 PA66 样条表面较为光滑，随着 BFs 的引入，样品表面开始出现丝状纹路，为裸露的纤维。随着纤维添加量增加，纤维显露程度提高，在 PA66/BFs26% 复合材料中仅可观察到稀疏纤维，而在 PA66/BFs42% 中，纤维已均匀覆盖整个表面，形貌清晰可见（Fig.1）。纤维添加量的增加导致 PA66 树脂不能完全包覆 BFs，在双螺杆挤出机中，双螺杆的剪切作用使树脂与纤维混合均匀，且样条表面观察到的纤维取向与样条成型方向一致。

光学显微镜显示了复合材料粒料中 BFs 的长度（Fig.2），随着 BFs 含量增加，PA66/BFs26%，PA66/BFs34%，PA66/BFs42% 和 PA66/BFs50% 中纤维的长度分别为 1.04 mm，0.88 mm，0.67 mm 和 0.46 mm，呈下降趋势。这是由于双螺杆挤出机通过螺杆的旋转产生强烈的剪切力和挤压力来实现物料的熔融、

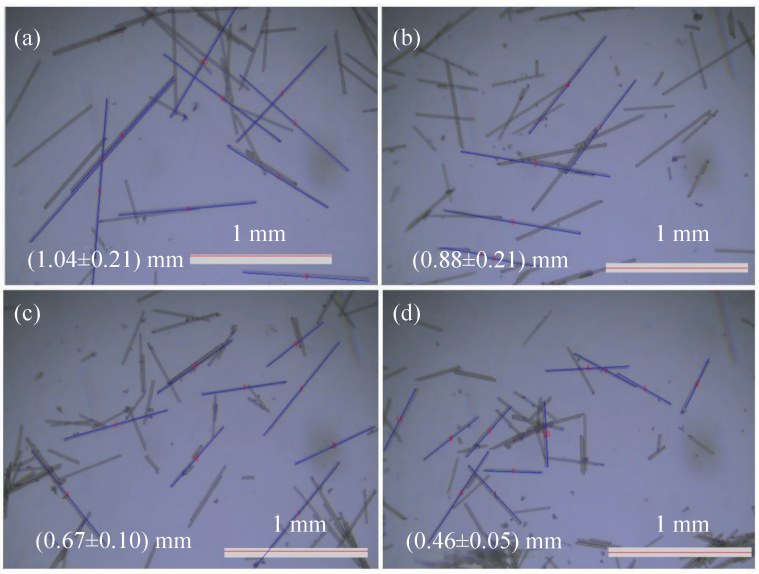


Fig. 2　Optical microscope images of PA66/BFs composites: (a) PA66/BFs26%; (b) PA66/BFs34%; (c) PA66/BFs42%; (d) PA66/BFs50%

混合和分散。当纤维含量增加时,熔体黏度显著升高,螺杆对纤维的剪切作用增强。高剪切力作用下,纤维在螺杆的输送段等区域反复受到拉伸、弯曲和剪切作用,更容易发生断裂。纤维含量越高,这种机械损伤的累积效应越明显。此外,当纤维含量增加时,纤维之间的接触频率增加,纤维的相互碰撞和摩擦进一步加剧了纤维的断裂,导致复合材料粒料中的纤维长度随着纤维含量的增加而减小。

2.2 聚集态结构分析

根据 XRD 结果分析,BFs 为无定形(Fig.3(a)),证明玄武岩纤维为非晶态固体纤维。PA66 基体以稳定晶相 α 相(特征峰 $2\theta\approx20°$ 和 $2\theta\approx24°$)为主,其结晶区由分子链通过氢键(N—H···O═C)形成规整排列的 α 晶型结构。非晶区分子链无序排列,赋予材料韧性。随着 BFs 含量增加,PA66/BFs 复合材料的 XRD 图中归属于 PA66 的衍射峰峰强逐渐降

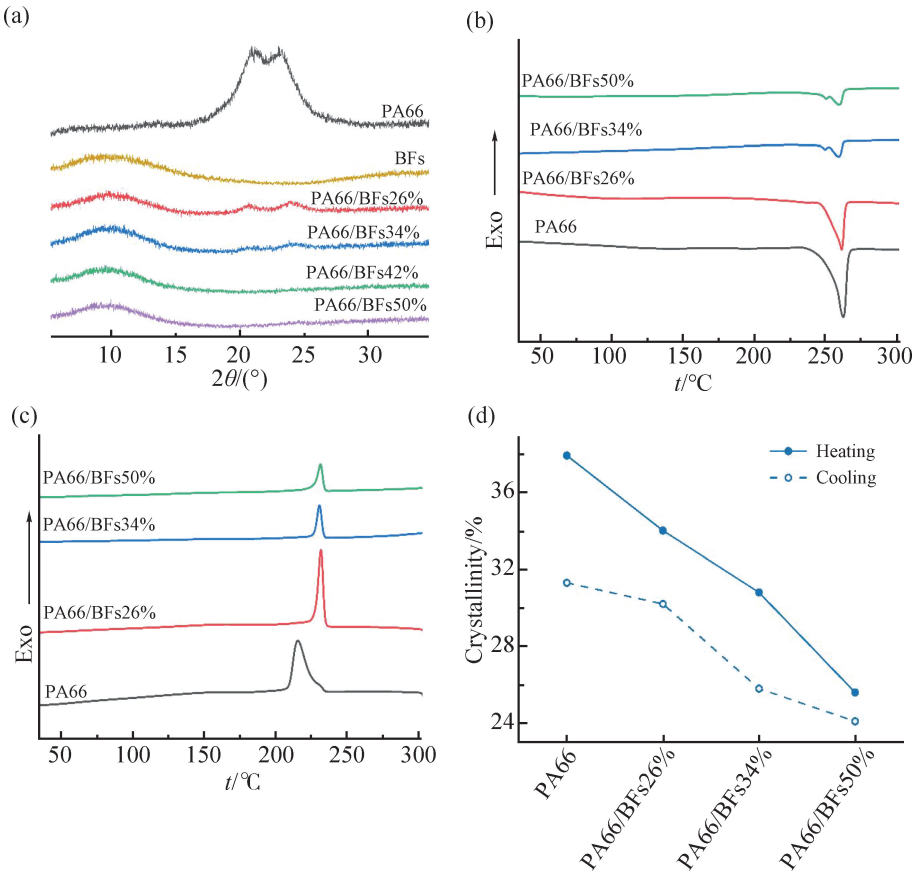


Fig. 3 Chemical structure test of PA66/BFs composite material: (a) X-ray diffraction patterns; (b) DSC heating curves; (c) DSC cooling curves; (d) crystallinity of PA66/BFs composite material during heating and cooling

Tab. 1 DSC data of PA66/BFs composite material

Sample	$T_{tonset\text{-}heating}$/℃	$T_{tonset\text{-}cooling}$/℃	ΔH_m/(J·g^{-1})	ΔH_c/(J·g^{-1})	X_c/%
PA66	234.0	225.8	74.0	61.1	37.9
PA66/BFs26%	243.5	233.7	49.0	43.6	34.0
PA66/BFs34%	225.9	232.6	39.6	33.2	30.8
PA66/BFs50%	222.1	233.3	25.0	23.5	25.6

低,BFs 含量为 42% 和 50% 时,特征峰消失。玄武岩纤维作为填料占据复合材料较大体积,导致 PA66 的相对含量下降。XRD 峰强度与对应相的含量成正比,因此,PA66 的衍射峰随纤维添加量的增加而减弱。且高纤维含量限制了 PA66 分子链的运动,阻碍其形成规整的氢键网络(α 晶型),导致结晶度下降。非晶区比例增加会削弱对应晶面的衍射峰强度,最终导致 XRD 图谱中特征峰消失。

通过 DSC 测试了 PA66/BFs 复合材料的熔融及结晶行为(Fig.3(b~d)及 Tab.1)。升温曲线(Fig.3(b))显示,基体 PA66 与复合材料样品在 220~275 ℃温区均出现了明显的熔融峰,且纤维含量增加,复合材料的熔融峰位置变化不大,表明纤维含量对熔融温度影响不大,这对该类材料的成型加工工艺温度精准控制大有裨益。降温曲线(Fig.3(c))显示,复合材料的降温结晶过程与升温过程呈现几乎相同的变化规律,仅在 233 ℃附近观察到 1 个明显的结晶峰,与纯 PA66 相比,复合材料的结晶温度提高了约 8 ℃,说明纤维的加入有利于基体 PA66 在高温结晶,起到了异相成核剂的作用。分别通过升温熔融焓和降温结晶焓计算复合材料的升温和降温结晶度(Fig.3(d)及 Tab.1),随着 BFs 含量增加,PA66/BFs 复合材料的结晶度下降,升降温过程结晶度的变化趋势一致,与 XRD 的测试结果相吻合,纤维与 PA66 基体的相互作用会阻碍 PA66 分子链的自由运动,导致结晶过程中分子链难以有序排列,结晶度降低。即 BFs 在复合材料中可作为异相成核剂,促进 PA66 快速结晶,但添加量过高会抑制晶体生长,使材料的结晶度降低。

2.3　力学性能分析

PA66/BFs 复合材料的拉伸强度及弹性模量变化如 Fig.4(a)及 Tab.2 所示,相应的应力-应变曲线

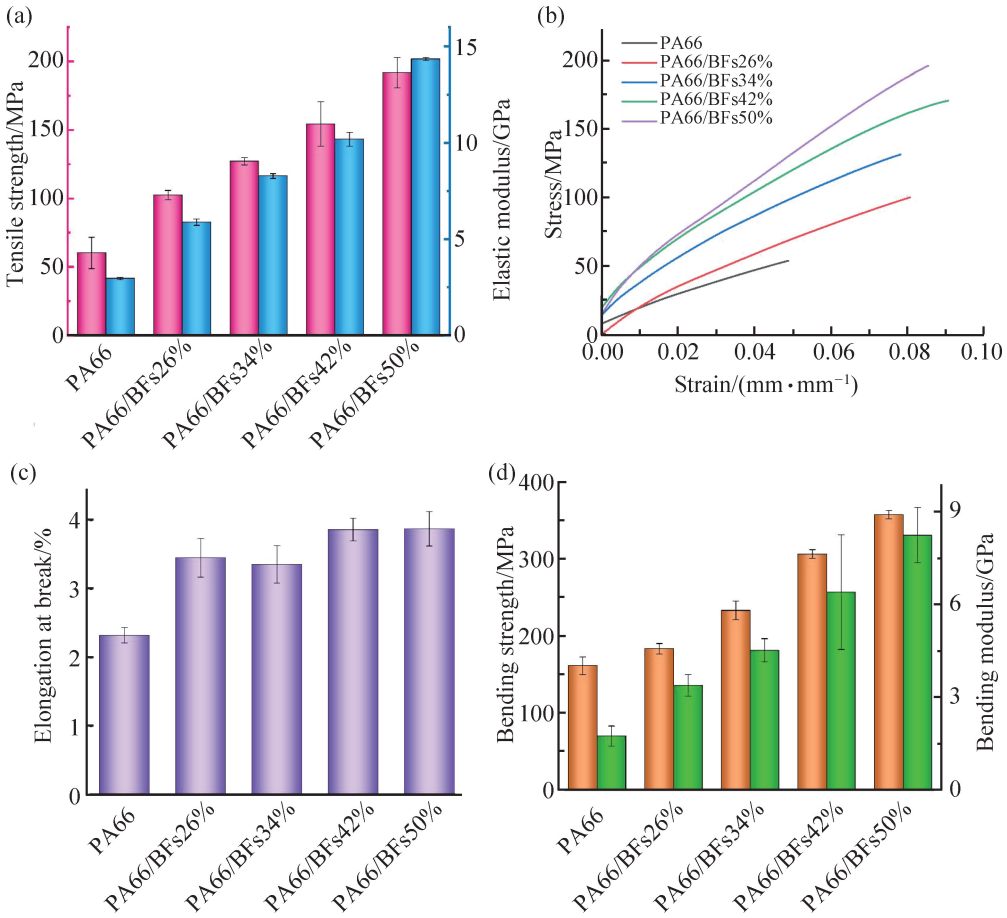


Fig. 4　Mechanical performance of PA66/BFs composite material: (a) tensile strength and elastic modulus; (b) stress-strain curves; (c) elongation at break; (d) bending strength and bending modulus

如 Fig.4(b)所示,断裂伸长率如 Fig.4(c)及 Tab.2 所示。纯 PA66 样条的拉伸强度为 60.2 MPa,弹性模量为 2949.9 MPa,断裂伸长率为 2.32%。随着 BFs 含量增加,复合材料的拉伸强度及弹性模量、断裂伸长率均增加。当复合材料中 BFs 的含量为 50%时,材料的拉伸强度及弹性模量、断裂伸长率均达到最大值,分别为 192.5 MPa,14340.8 MPa 和 3.87%,相比于 PA66 样条,拉伸强度提升了 219.8%,弹性模量提升了 386.1%。以上数据显示,PA66 树脂本身拉伸强度及弹性模量并不高,添加了具有高强度高模量的 BFs 后,外部载荷通过 PA66 树脂基体传递到 BFs 上,纤维承担了绝大部分应力,从而显著提高了材料的强度。纤维的刚性结构限制了树脂基体在受力时的塑性变形,当材料受拉时,纤维通过界面黏结“锁住”树脂分子链的运动,使材料的变形能力降低,从而提高了弹性模量。样条的断面 SEM 图像显示,BFs 均匀分布在 PA66 树脂基体中,且在加工过程中,纤维倾向于沿流动方向取向排列(Fig.5)。当拉伸方向与纤维取向一致时,纤维的轴向承载效率最大化,显著提高了拉伸强度和弹性模量。此外,BFs 在 PA66 树脂中形成的物理屏障可阻碍裂纹扩展,裂纹遇到纤维时需绕过或拔出纤维,从而消耗更多能量,延缓断裂,断裂面的扫描电子显微镜图中可以明显观察到此现象。

PA66/BFs 复合材料的弯曲强度及弯曲模量变化如 Fig.4(d)及 Tab.2 所示。纯 PA66 树脂样条的弯曲强度为 161.1 MPa,弯曲模量为 1743.7 MPa。随着 BFs 添加量增加,材料的弯曲强度及弯曲模量均增

Tab. 2 Mechanical properties of PA66/BFs composite materials

Sample	Tensile strength /MPa	Elastic modulus /MPa	Bending strength /MPa	Bending modulus /MPa	Elongation at break /%
PA66	60.2±11.5	2949.9±59.2	161.1±11.6	1743.7±329.0	2.32±0.11
PA66/BFs26%	102.4±3.5	5880.0±168.8	183.4±6.7	3389.8±353.3	3.45±0.28
PA66/BFs34%	127.2±2.8	8275.1±125.5	232.8±12.1	4530.6±373.4	3.36±0.28
PA66/BFs42%	154.4±16.2	10190.4±359.6	306.3±5.6	6417.6±1859.2	3.87±0.16
PA66/BFs50%	192.5±11.1	14340.8±83.7	356.7±5.4	8260.4±891.0	3.88±0.25

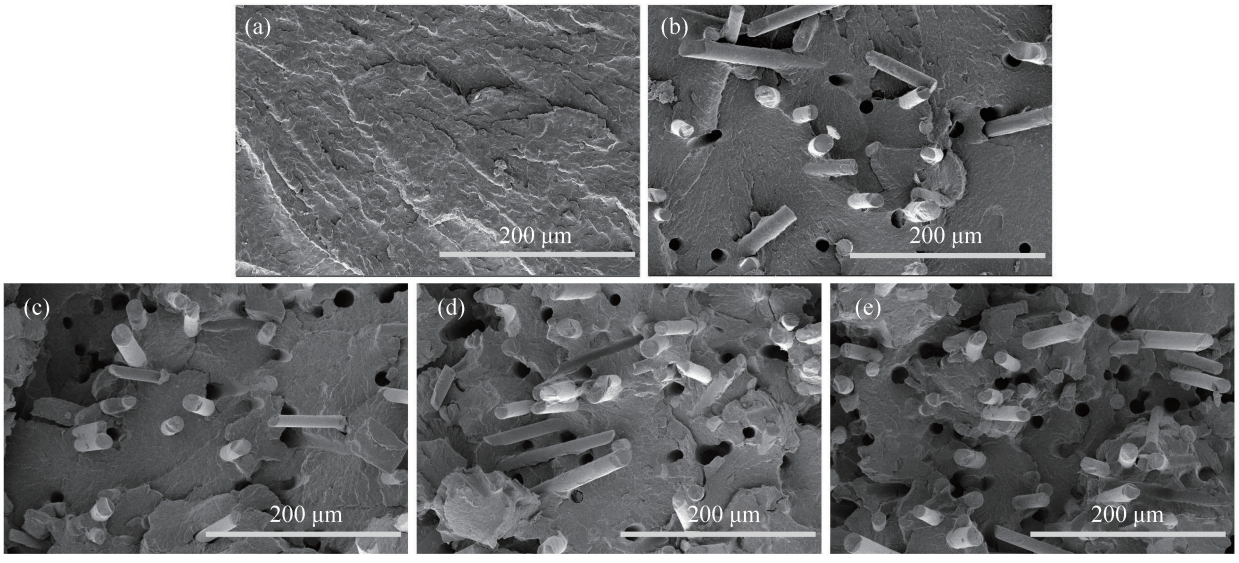


Fig. 5 SEM image of the fracture surface of PA66/BFs composite material: (a) PA66; (b) PA66/BFs26%; (c) PA66/BFs34%; (d) PA66/BFs42%; (e) PA66/BFs50%

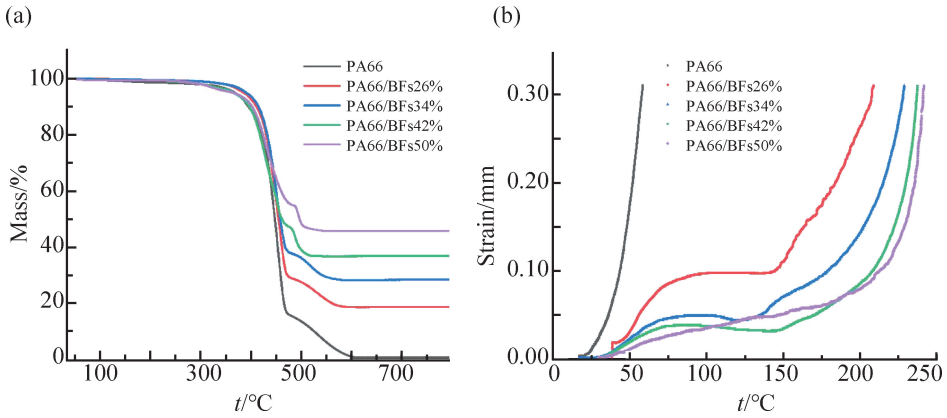


Fig. 6　(a) TGA and (b) heat deformation temperature curves of PA66/BFs composite materials

Tab. 3　TGA and heat distortion temperature of PA66/BFs composites

Sample	$T_{5\%}$/℃	T_{over}/℃	Residue/%	HDT/℃
PA66	367	612	0.68	58.4
PA66/BFs26%	386	587	18.66	208.9
PA66/BFs34%	390	571	28.37	228.9
PA66/BFs42%	365	542	36.88	237.6
PA66/BFs50%	362	541	45.82	241.8

$T_{5\%}$ represents the temperature corresponding to a 5% reduction in sample mass; T_{over} represents the temperature corresponding to the complete decomposition of sample; HDT: heat deflection temperature

加。当 BFs 添加量为 50% 时,材料的弯曲强度及弯曲模量均达到最大值,分别为 356.7 MPa 和 8260.4 MPa,相比于 PA66 样条,弯曲强度提升了 121.4%,弯曲模量提升了 373.7%。弯曲载荷下,复合材料的上表面受压、下表面受拉,中性层附近存在剪切应力。BFs 的高模量使其在拉伸区和压缩区均能有效分担载荷,拉伸区的玄武岩纤维直接承受拉伸应力,抑制树脂基体的塑性变形,而压缩区的玄武岩纤维提供抗压支撑,抵抗 PA66 树脂基体的屈曲失稳。同时,纤维在树脂中形成了三维网络,弯曲载荷引发的裂纹在扩展时需绕过纤维或将其拔出,从而消耗额外能量,延缓断裂过程,提高材料的表观弯曲强度。此外,BFs 通过界面黏结增强了树脂的层间剪切强度,减少了中性层附近的剪切滑移,从而提升了整体抗弯能力。

2.4　耐热性能分析

BFs 的添加对 PA66/BFs 复合材料的耐热性能影响可通过 TGA 和热变形温度测试来表征。TGA 测试结果显示,PA66 和 PA66/BFs 复合材料热分解曲线均只有 1 个失重台阶,为一步分解反应(Fig.6(a)和 Tab.3)。PA66 树脂吸湿性强,在 35~200 ℃时,酰胺键(—NH—CO—)通过氢键吸附的水分逐渐蒸发,TGA 曲线下降平缓,300 ℃后,酰胺键发生热裂解,生成低聚物、CO_2、NH_3 等挥发性产物;—(CH_2)— 链段断裂、氧化,生成烃类气体,最终剩余炭化残渣。在 PA66 树脂中添加 BFs 后,复合材料的分解温度随着纤维含量的增加呈现先升高后降低的趋势。BFs 含量较少时,纤维在 PA66 树脂基体中分散均匀,能形成局部热阻屏障,延缓热量向基体内部传递,减缓升温速率,延迟热分解起始点,纤维网络阻碍分解产物的挥发,暂时抑制失重。但 BFs 含量过高时:(1)高含量纤维形成的连续导热路径加速了热量扩散;(2)熔体黏度增大导致加工中 PA66 分子链断裂,生成了热稳定性较差的低分子量片段;(3)过量纤维阻碍了 PA66 分子链的重排,降低了结晶度,非晶区氢键密度低,热稳定性差,复合材料的

初始热分解温度降低。

PA66/BFs 复合材料的热变形温度测试结果(Fig.6(b)和 Tab.3)显示,PA66 样条的热变形温度为 58.4 ℃,随着 BFs 含量增加,PA66/BFs 复合材料的热变形温度升高,当 BFs 添加量为 50%时,PA66/BFs50%的热变形温度达到最高,为 241.8 ℃。热变形温度是指材料在受热过程中发生形状变化的温度,通常用于衡量材料的耐热性。BFs 的弹性模量远高于 PA66 树脂基体,在高温受到外力时,纤维作为刚性骨架承担大部分应力,能显著抑制 PA66 树脂基体的塑性变形。纤维含量越高,这种支撑效应越显著,材料抗变形能力越强。纤维通过与树脂基体的界面结合阻碍了 PA66 分子链在高温时的链段滑移和蠕变,从而延缓了材料的软化,表现为 PA66/BFs 复合材料的热变形温度随着纤维含量的增加而升高。

3 结论

本文通过改变 BFs 的添加量,经过共混挤出、注塑制备了一系列 PA66/BFs 复合材料。当 BFs 质量分数由 0%增加到高含量 50%时,材料的拉伸强度由 60.2 MPa 增至 192.5 MPa,弯曲强度由 161.1 MPa 增至 356.7 MPa,热变形温度由 58.4 ℃增至 241.8 ℃。添加的 BFs 承担了绝大部分应力,同时限制了树脂基体在受力时的塑性变形,当材料受拉时,纤维通过界面黏结“锁住”树脂的分子链运动,使材料的变形能力降低,从而显著提高了材料的强度。这项工作不仅验证了 BFs 作为 PA66 高效、高性价比增强相的巨大潜力,且尤其适用于轻量化、耐高温结构部件,更强调了界面优化是未来挖掘性能极限的关键方向,为理解与设计高性能纤维增强热塑性复合材料提供了理论参考和实践范例。

参考文献:

[1] Lin Y, Kang Q, Liu Y, *et al*. Flexible, highly thermally conductive and electrically insulating phase change materials for advanced thermal management of 5G base stations and thermoelectric generators[J]. Nano-Micro Letters, 2023, 15: 7-21.

[2] Zhou Y, Wang Y, Li M, *et al*. Ultra-high thermal conductivity multifunctional composites with uniaxially oriented boron nitride sheets for future wireless charging technology[J]. Springer Nature Link, 2025, 8: 237.

[3] Jung B N, Kang D, Jung H W, *et al*. Compatibilization and gas barrier effect of graphene nanoplatelets in PP/EVOH blend biaxial stretching film[J]. Journal of Membrane Science, 2025, 722: 123843.

[4] Guo H, Xu T, Zhou S, *et al*. A technique engineered for improving thermal conductive properties of polyamide-6 composites via hydroxylated boron nitride masterbatch-based melt blending[J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 212: 108716.

[5] 张圣昌, 钟天皓月, 许启彬, 等. 玄武岩纤维表面硅烷偶联剂接枝率对环氧树脂复合材料界面强度及力学性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2022, 38(2): 88-94.
Zhang S C, Zhong T H Y, Xu Q B, *et al*. Effects of silane coupling agent grafted on the surface of basalt fiber on the interfacial strength and tensile strength of fiber-reinforced epoxy composites[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2022, 38(2): 88-94.

[6] 李佳馨, 钱晓明, 朵永超, 等. PA66 的改性及应用进展[J]. 塑料, 2024, 53(3): 124-130.
Li J X, Qian X M, Duo Y C, *et al*. Modification and application progress of PA66[J]. Plastics, 2024, 53(3): 124-130.

[7] 王峰, 张家辉, 孙文革, 等. 用于汽车轻量化领域的碳纤维增强尼龙 66 复合材料的制备与研究[J]. 塑料科技, 2024, 52(7): 101-104.
Wang F, Zhang J H, Sun W G, *et al*. Preparation and research of carbon fiber reinforced nylon 66 composites for automotive light weighting[J]. Plastics Science and Technology, 2024, 52(7): 101-104.

[8] Chena J, Xua H, Liu C, *et al*. The effect of double grafted interface layer on the properties of carbon fiber reinforced polyamide 66 composites[J]. Composites Science and Technology, 2018, 168: 20-27.

[9] 孙东泽. 高含量玻璃纤维增强尼龙 66 配方设计及优化[D]. 郑州: 河南工业大学, 2023.
Sun D Z. High content glass fiber reinforced nylon 66formulation design and optimization[D]. Zhenghou: Henan University of Technology, 2023.

[10] 杨道显. 碳纤维与玻璃纤维复合改性聚酰胺 66 复合材料的制备与性能研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2024.
Yang D X. Preparation and properties of carbon fiber and glass fiber composite modified polyamide 66 composites[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2024.

[11] 孟一鸣, 龚先政, 周丽玮. 玻璃纤维产品的环境影响评价[J]. 中国建材科技, 2023, 32(6): 43-50.
Meng Y M, Gong X Z, Zhou L W. Environmental impact

assessment of glass fiber product[J]. China Building Materials Science & Technology, 2023, 32(6): 43-50.

[12] Hermansson F, Heimersson S, Janssen M, *et al*. Can carbon fiber composites have a lower environmental impact than fiberglass[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2022, 181: 106234.

[13] Dhand V, Mittal G, Rhee K Y, *et al*. A short review on basalt fiber reinforced polymer composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2015, 73: 166-180.

[14] Frihi D, Layachi A, Gherib S, *et al*. Crystallization of glass-fiber-reinforced polyamide 66 composites: influence of glass-fiber content and cooling rate[J]. Composites Science and Technology, 2016, 130: 70-77.

Influence of the Addition Amount of Basalt Fiber on the Structure and Properties of Polyamide 66 Composite Materials

Xiaobing Zhang[1], Shengchang Zhang[1], Hongxu Liu[1], Rui Pei[2,3], Pengqing Liu[1], Shijie Ren[1]

(*1. College of Polymer Science & Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;*
2. Sichuan Sizhong Basalt Fiber Technology Research and Development Co., Ltd, Dazhou 635000, China;
3. Basalt Fiber and Composite Key Laboratory of Sichuan Province, Dazhou 635000, China)

ABSTRACT: To explore the feasibility of basalt fiber (BFs) as filler to enhance engineering plastics, BF-filled polyamide 66 (PA66/BFs) composites were prepared by a twin-screw co-extrusion machine. The effects of BFs mass fraction (26%, 34%, 42% and 50%) on the internal fiber morphology, crystallization behavior of the resin matrix, mechanical properties and thermal properties of the composites were investigated in detail, and the performance enhancement mechanism of basalt fiber modified PA66 was clarified. The results show that with the increase of short-cut BFs content, the fiber length in the composites gradually decreases, and the ordered arrangement of the resin molecular chain is hindered, resulting in a gradual decrease in crystallinity. The mechanical properties of composites change in a positive correlation with the increase of short-cut fiber content. With the increase of reinforcing fiber content, the continuity of the rigid reinforcing skeleton formed inside the composites gradually increases; not only can it withstand higher external loads, but also the ability to inhibit the generation and expansion of internal cracks in the composites is significantly improved. When the BFs mass fraction reaches 50%, the tensile strength of the composite can reach 192 MPa and the flexural modulus can reach 356 MPa. In addition, the existence of inorganic rigid skeletons can significantly improve the heat resistance of PA66, and the heat distortion temperature can reach 241.8 ℃.

Keywords: basalt fiber; polyamide 66 resin; composite material; reinforcement mechanism; crystallization behavior; heat resistance performance