http://pmse.scu.edu.cn

超声振动对不同含量碳纤维增强聚丙烯制件性能的影响

刘 莹，杨 勇，于同敏，赵雪利，马 赛，祝铁丽
（大连理工大学机械工程学院 高性能精密制造全国重点实验室，辽宁 大连 116024）

摘要：利用超声辅助振动注塑模具，针对3种不同质量分数（10%，15%和20%）的碳纤维增强聚丙烯（CFPP）复合材料，进行了底部带有标准拉伸试样的壳体制件的成型实验。借助X射线衍射、扫描电镜等观测分析及拉伸性能测试，研究了超声振动外场作用下，不同碳纤维含量的制件内部结晶度及凝聚态结构中碳纤维的空间形态，以及碳纤维与基体接触界面的结合强度对制件力学性能的影响。结果表明，在CFPP制件注塑成型的填充流动阶段施加600 W功率的超声振动，上述不同碳纤维含量的制件结晶度分别提高了4.4%，7.4%和9.8%，纤维取向程度分别提高了5.2%，9.7%和3.5%，纤维与基体的结合强度分别提高了32.5%，12.7%和12.6%，最终使得制件的拉伸强度相比于未施加超声振动时分别提高了6.9%，6.2%和10.4%；但超声功率高达到900 W时，结晶度和纤维与基体的结合强度有所下降，导致制件拉伸强度有所降低。

关键词：超声振动；碳纤维增强聚丙烯；凝聚态结构；拉伸强度
中图分类号：TB332 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-7555（2023）12-0080-08

纤维增强聚合物复合材料（FRPC）制件因具有高比强度、高比模量、高尺寸稳定性及耐腐蚀性强等优点，在航空航天、能源、汽车等工业领域得到了广泛应用[1~3]。但FRPC制件的力学性能，主要取决于制件成型加工时其内部分子所凝聚堆砌的凝聚态结构及添加纤维的形态，因此获得具有高强度性能凝聚态结构和添加纤维充分取向的制件，成为纤维增强聚合物复合材料制件成型技术研究的重要内容，对此国内外学者进行了大量的研究。Aparna等研究了纤维含量对碳纤维增强聚酰胺6制件性能的影响，结果表明，制件的拉伸强度和模量均随碳纤维含量的增加而升高，而断裂伸长率随纤维含量的增加而急剧下降[4]。Junaedi等进行了短纤维增强复合材料制件拉伸强度试验，研究结果表明，随着纤维含量的增加，制件拉伸强度呈非线性增长，拉伸强度显著依赖于纤维和聚合物基体的界面结合力以及纤维在拉伸方向上的取向程度[5]。Tiemann等对纤维增强复合材料的力学性能进行了研究[6]。结果发现，熔体流动方向的准静态性能随制件厚度的增加逐渐下降，制件力学性能高度依赖于纤维在基体中的取向程度，纤维沿熔体流动方向的取向程度越高，制件的力学性能越高。由上述研究结果可知，纤维含量对FRPC制件的力学性能影响较大，同时纤维在制件中的取向程度及其与聚合物基体的界面结合状态都直接影响制件的最终性能。

但近年研究发现，在注塑成型过程中施加超声振动外场，借助超声能量能够有效改变制件内部的结晶度和纤维取向形态，进而影响制件的力学性能。于同敏等将超声振动变幅杆与模具型腔镶块相连，通过镶块将超声能量传递给型腔内的聚丙烯熔体，研究发现，超声外场能有效促进聚合物分子形成结晶结构，进而提高制件的结晶度；但过高的超声功率会使制件的结晶度下降[7]。Zou以等规聚丙烯材料为对象，研究了超声振动对制件内部微观结构的影响[8]。结果显示，随着超声功率的增大，制件芯层厚度逐渐增大，过渡层中的晶粒尺寸先减小

doi:10.16865/j.cnki.1000-7555.2023.0241
收稿日期：2023-01-06
基金项目：国家重点研发计划项目(2022YFB3806203)、国家自然科学基金资助项目(52205339，51575080)
通讯联系人：祝铁丽，主要从事聚合物成型加工及模具设计制造技术研究，E-mail: zhutieli@dlut.edu.cn

后增大,制件整体结晶度提高。殷伊凡等将超声振子端面作为模具型腔的一部分,在注塑成型玻纤增强PBT薄壁制件时,发现超声振动可以升高熔体温度,提高流动性,从而使制件顺利成型,并且有利于制件中的玻纤沿熔体流动方向取向[9]。

本文对不同含量的碳纤维增强聚丙烯(CFPP)复合材料,进行在熔体充模流动阶段施加超声振动的注塑成型实验,并通过X射线衍射(XRD)和扫描电镜(SEM)观测分析及拉伸试验,研究了超声外场作用下不同纤维含量CFPP制件的结晶度、碳纤维的取向以及纤维与基体界面结合强度对制件力学性能的影响。

1　实验部分

1.1　制件与原料

注塑成型实验的制件结构及尺寸如Fig.1所示,制件顶部设计有2个标准哑铃型试样作为后续测试样品。实验所用材料为江苏新孚达复合材料有限公司生产的碳纤维质量分数分别为10%,15%和20%的聚丙烯复合材料,牌号分别为H1010CF,H1015CF和H1020CF。碳纤维的基本物性信息如Tab.1所示。

1.2　实验设备及工艺参数

实验系统由自行设计制造的超声辅助振动模具和日本住友公司的SE100EV-C360型注塑机组成。Fig.2为超声振动模具系统的原理示意图。其中超声变幅杆与模具镶块相连组成超声振子,在超声波发生器的激励下,超声振子可将超声能量传递给型腔内的聚合物熔体。根据CFPP材料的成型工艺特性,通过Mold Flow软件模拟确定了注塑成型实验工艺参数如Tab.2所示。在此工艺参数基础上,进行不加(0 W)和分别施加300 W,600 W和900 W超声功率的注塑成型实验。

1.3　测试与表征

1.3.1　XRD分析:在哑铃型拉伸试样中部截取10 mm长度部分作为XRD测试样件,测试仪器为日本理学Dmax-2400全自动Cukα1靶X射线衍射仪,X射线管工作电流和电压分别为100 mA和40 kV,设定扫描角度10°~50°,扫描速度5(°)/min。

1.3.2　SEM表征:拉伸试样经液氮浸泡及脆断处理后,利用Q150T ES型真空镀膜仪对其断裂表面进行喷铂金处理,采用美国FEI公司的QUANTA 450型

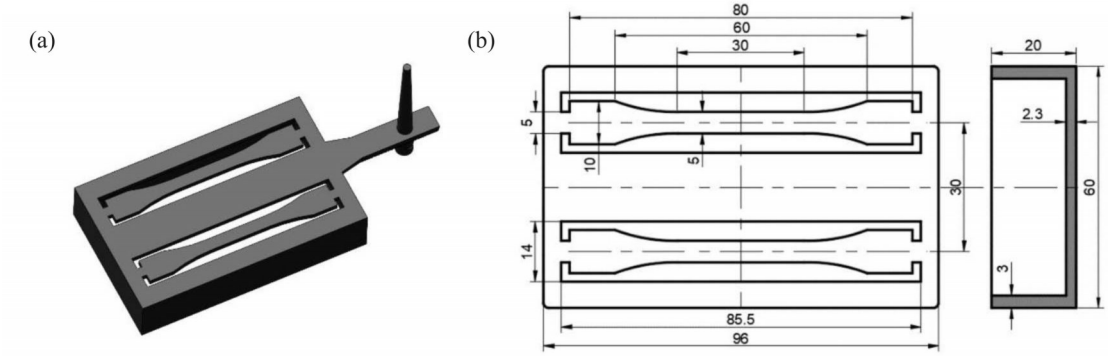


Fig. 1　Structure and dimension of parts
(a): part structure; (b): part size

Tab. 1　Physical parameters of carbon fibers

Parameter name	Parameter value	Parameter name	Parameter value
Density	1.80 g·cm^{-3}	Linear density	1560 g·km^{-1}
Elongation at break	2.0%	Filament number	24000
Tensile strength	4900~4950 MPa	Mean length	3~6 mm
Elastic modulus	245 GPa	Mean diameter	5~8 μm
Carbon content	≥95%		

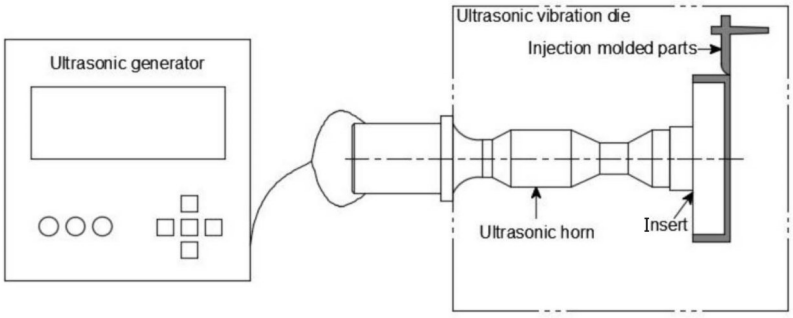


Fig. 2 Schematic diagram of the ultrasonic vibration die system

Tab. 2 Injection molding experimental standard process parameters

Melt temperature /℃	Mold temperature /℃	Injection pressure /MPa	Injection speed /(mm·s^{-1})	Hold pressure/MPa
230	50	60	60	50

钨丝灯扫描电子显微镜，对各脆断面同一位置进行观测，加速电压设置为20 kV。

1.3.3 拉伸强度测试：按照国标GB/T1040-2006进行拉伸试验，试验设备为美国应斯特朗公司Instron 5965型双立柱台式万能材料试验机，每组试验参数下取连续成型的5个样件进行测试，取算术平均值作为该组参数下的拉伸强度值。

2 结果与讨论

2.1 超声振动对制件凝聚态结构的影响

2.1.1 超声振动对结晶度的影响：在熔体充模流动阶段施加不同超声功率进行注塑成型实验，对所得制件进行XRD分析，并将得到的XRD图谱通过Jade软件处理，得到不同纤维含量的CFPP制件的结晶度随超声功率的变化曲线，如Fig.3所示。

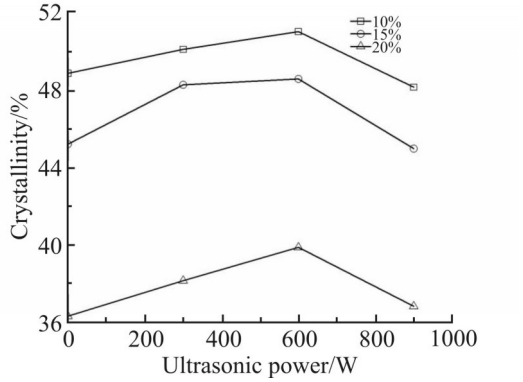


Fig. 3 Crystallinity curves of parts with different fiber contents as a function of ultrasonic power

由Fig.3可知，无论是否施加超声振动，CFPP制件的结晶度均随碳纤维含量的增加而明显降低；且纤维含量越高，制件结晶度下降越多。这是由于熔体中碳纤维含量增加会阻碍分子链运动，使熔体黏度增大，流动性能降低；而注射压力产生的流动剪切作用也难以使弥散于熔体中形态各异的碳纤维沿流动方向形成规整的取向形态；同时，增加碳纤维也会阻碍流动熔体中的分子链产生取向排列而形成晶核以及分子链快速向晶核表面扩散运动以生长为晶体，因此碳纤维含量增加时，制件的结晶度明显降低。

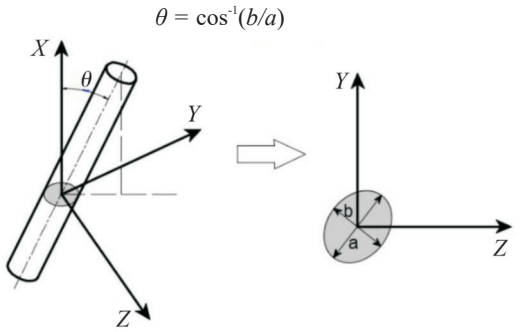


Fig. 4 Definition of the orientation angle

而对于不同纤维含量的CFPP制件结晶度，则均呈现出随超声功率增加先升高再降低的变化趋势。这是因为在较低功率的超声振动场作用下，超声能量改变熔体黏度的作用较小，因而熔体黏度相对较高，充模流动时熔体分子受到的剪切作用较强，流动剪切产生的分子链取向排列，有利于其形

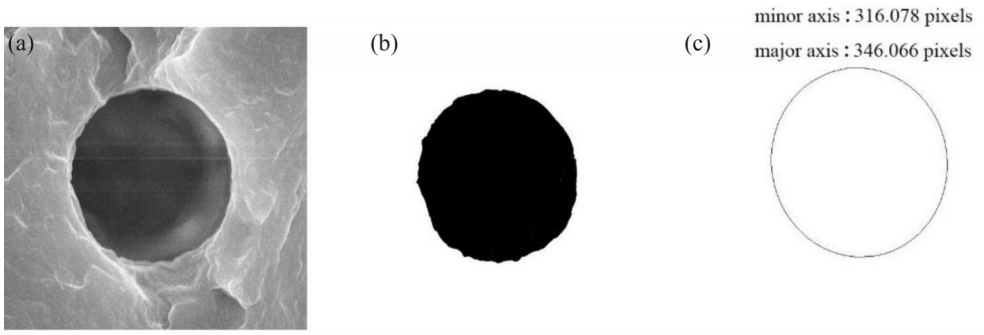


Fig. 5 Characterization of the orientation angle
(a): SEM image; (b): image after PS processing; (c): measurement result

成晶核并生长为晶体,因此制件结晶度随超声功率增加呈现出升高的趋势。当超声功率为600 W时,10%,15%和20%碳纤维含量制件的结晶度分别提高了4.4%,7.4%和9.8%。但当超声功率继续增大到超过600 W后,超声能量及其高频振动作用大大增强了分子链的自身活性及其热运动能力,而激烈热运动的分子链既不容易排列成规整有序的取向形态而生成晶核,也不利于分子链向晶核表面的稳定扩散,致使晶核的数量大大减少,晶体的生长受到抑制,因此制件的结晶度明显下降。这表明成型流动过程中施加过高的超声振动功率并不会使制件结晶度得到持续提高。

2.1.2 *超声振动对纤维取向的影响*:研究表明,添加纤维在基体聚合物熔体中形成取向排列形态时,复合材料制件具有更高的拉伸强度。目前在纤维增强聚合物的内部纤维取向表征方面,已有许多研究工作者开展了相应的工作。其中比较有代表性的是,先用SEM观测得到复合材料制件断面的高倍放大图像[10~14],再测量断面上纤维脱离基体后留下的椭圆形孔洞边界的几何参数,通过计算与椭圆形孔洞对应的纤维在制件断面法线方向上的夹角(称为取向角),来表征纤维的取向程度。具体方法如Fig.4所示,*YZ*平面为制件断面,熔体流动方向为*X*轴。当纤维脱离基体后,在*YZ*平面上留下椭圆形痕迹,计算椭圆的短轴*b*与长轴*a*之比的反余弦,即为纤维与熔体流动方向*X*轴之间的取向角(θ)。

本文借鉴此方法,结合图像分析软件对制件脆断面纤维的取向进行了表征。如Fig.5所示,首先通过PS软件确定制件断面SEM图片中的一个椭圆外形(见Fig.5(a)),再将PS处理后的图片(见Fig.5(b))导入Image J软件自动测量椭圆参数(见Fig.5(c)),得到该椭圆的几何参数为短轴316.078像素,长轴346.066像素,则其取向角θ=cos^{-1}(316.078/346.066)=24.03°。

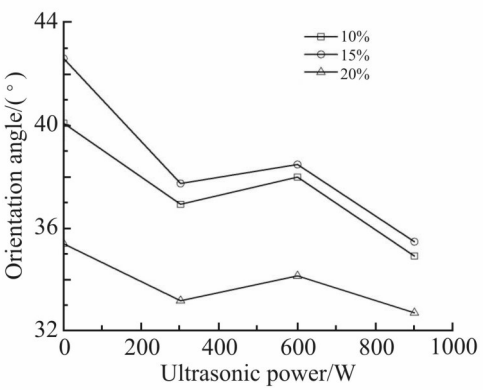


Fig. 6 Average orientation angle curves of parts with different fiber contents as a function of ultrasonic power

将处理后得到的制件脆断面上所有椭圆所对应的纤维取向角取平均值,用以表征该参数下制件内部纤维的取向程度,平均值越大则纤维沿熔体流动方向的取向程度越差。计算结果显示,不同纤维含量CFPP制件的平均纤维取向角随超声功率的增大而减小,变化曲线如Fig.6所示。

由Fig.6可知,不同纤维含量的CFPP制件在未施加超声振动时其纤维的取向角均较大,碳纤维质量分数为10%,15%和20%的制件中纤维的取向角分别为40.07°,42.59°和35.37°,均明显高于施加超声振动时的纤维取向角。而当碳纤维含量一定时,随超声功率增加,不同纤维含量制件中的碳纤维取向角,均呈现出先增大后减小的变化趋势;即在超声功率由300 W增加到600 W时,制件中碳纤维的取向角逐渐增大;而当超声功率由600 W增大到900 W时,碳纤维的取向角又不断减小。这是因为当超声功率较低(300 W)时,超声能量对降低熔体黏度的作用有限,熔体黏度相对较高,流动阻力大,而注射压力带来的流动剪切作用相对增强,高剪切

作用迫使卷曲分子链沿流动方向发生伸展取向，同时流动熔体也拖带着弥散于熔体中的碳纤维沿流动方向取向排列，因此碳纤维的取向角相对较小；而当超声功率逐渐增大到600 W时，超声能量随之增加，增多的超声能量激发了熔体分子的运动活性，使其黏度降低，流动阻力减小，剪切作用相对减弱，但流动剪切仍使较多的分子链在剪切力作用下产生流动取向；同时，高活性分子热运动产生的相

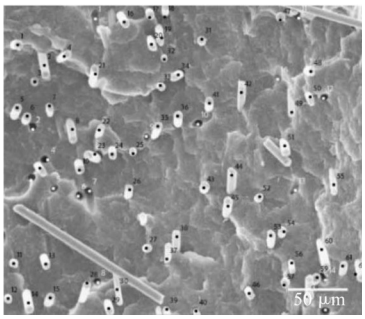


Fig. 7 Sectional SEM image

互冲击碰撞，又在不断改变着熔体中碳纤维的空间形态，使其偏离了流动取向方向[15,16]，因此纤维的取向角会逐渐增大，此时10%，15%和20%碳纤维含量制件内部的纤维取向程度，相比于未施加超声振动的制件，分别提高了5.2%，9.7%和3.5%。当超声功率继续增大到900 W时，超声能量进一步增大，熔体黏度继续降低，分子运动活性进一步增强，激烈的分子热运动使分子链及其与碳纤维间的距离增大；同时流动剪切作用又在迫使熔体分子链及碳纤维沿流动方向趋于取向态排列；但取向态的分子链同时又会受分子热运动作用发生解取向而恢复卷曲，取向的刚性碳纤维则不会因分子热运动改变其形态。因此，碳纤维的取向角逐渐减小。

2.1.3 *超声振动对纤维与基体界面结合强度的影响*：添加纤维与聚合物基体的接触界面需要具有足够的结合强度，才能将制件受到的外载荷传递给增强纤维，从而提升制件的力学性能，因此纤维与聚合物基体的界面结合强度对制件的力学性能有着至关重要的影响。目前评价纤维与基体界面结合强度的方法有多种，其中能够进行定量或半定量测量的方法[17]，主要有单丝纤维拔出法、临界纤维长度

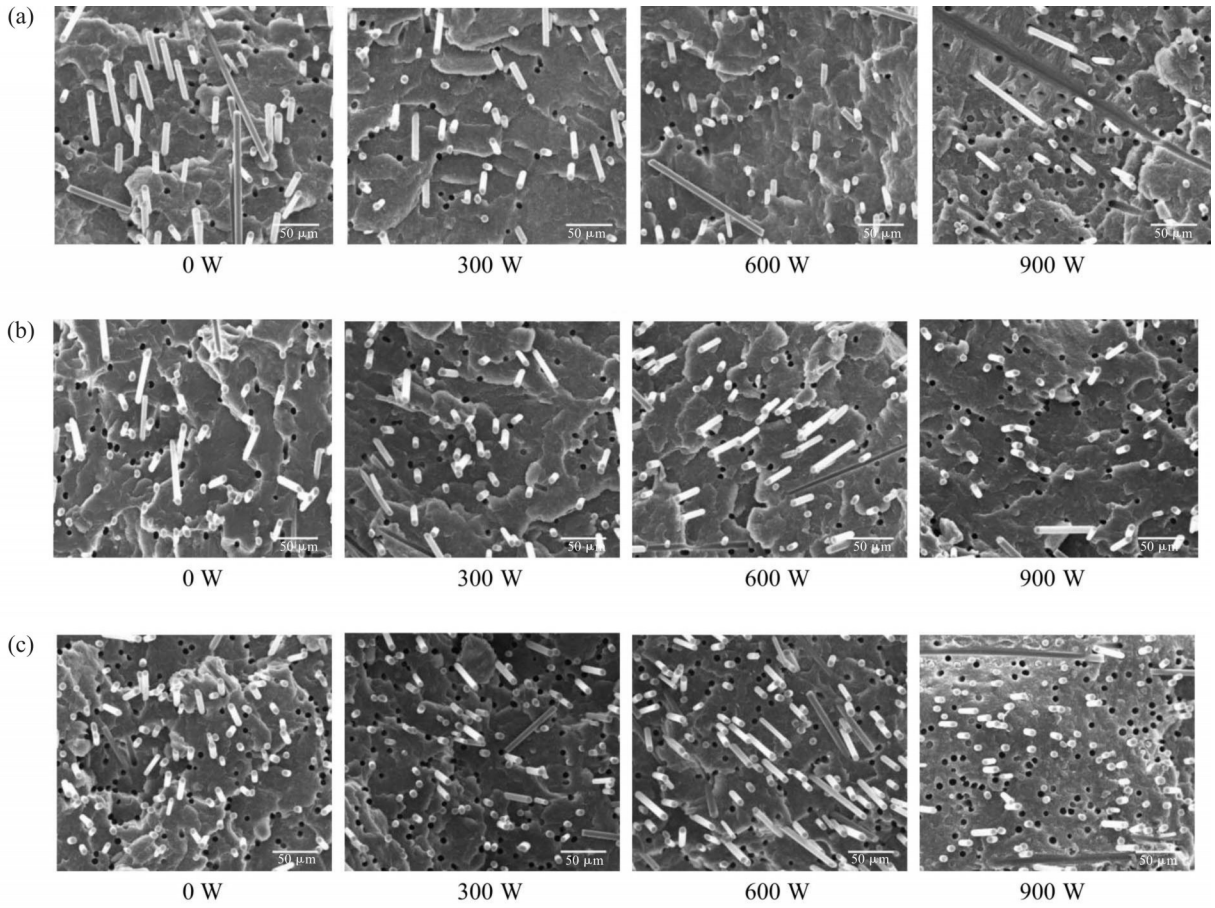


Fig. 8 SEM images of sections of parts with different fiber mass fractions under different ultrasonic power
(a): 10%; (b): 15%; (c): 20%

法、微脱粘法,但这些方法都需要制作特定的微观实验样品,因而使用不便。本文通过计算制件脆断面上碳纤维的保留率,来反映不同参数下成型制件内部碳纤维与基体界面结合能力的强弱。Fig.7 所示为制件断面的 SEM 图片,图中黑色圆点表示保留的纤维,白色圆点表示纤维脱离基体后留下的孔洞。通过计算黑色和白色圆点的数量,即可得到纤维保留率,如 Fig.7 中显示,制件断面上保留的纤维数量为 62,孔洞数量为 16,故纤维保留率为 62/(62+16)=79.5%。

不同纤维含量 CFPP 制件在不同超声功率下的断面扫描电镜图像如 Fig.8 所示,对应的不同纤维含量制件纤维保留率随超声功率的变化曲线如 Fig.9 所示。

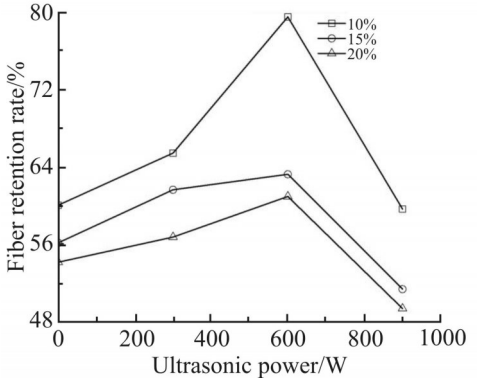


Fig. 9 Curves of fiber retention rate in section of parts with different fiber mass fractions as a function of ultrasonic power

制件断面上纤维保留率的多少,可反映纤维与基体接触界面结合强度的大小。纤维保留率越高,界面结合强度越大。由 Fig.9 曲线可知,未施加超声振动时,不同纤维含量的 CFPP 制件脆断面上碳纤维的保留率均较低。随超声功率的逐渐增加,不同纤维含量的 CFPP 制件脆断面上的碳纤维保留率均呈现出先升高后降低的趋势。这是因为不断增加的超声能量降低了熔体黏度,从而使柔性分子链更容易与纤维表面形成紧密贴合与包覆;同时在超声振动的机械挤压力作用下,熔融的聚合物基体对添加纤维的包覆、贴合更加紧实,从而使凝固后的制件中的碳纤维与基体的接触界面结合强度提高;当超声功率为 600 W 时,10%,15%和 20%碳纤维含量制件内部纤维与基体接触界面的结合强度分别提高了 32.5%,12.7%和 12.6%。但当超声功率过高时,碳纤维的保留率大幅降低,甚至低于未施加超声振动时的保留率数值,这是由于过高的超声能量会使熔体分子的活性大大增强,激烈的分子热运动使分子链及其与碳纤维间的距离增大,同时热运动的分子链间相互碰撞及超声的高频振动,都会影响熔体分子链对碳纤维的紧密贴合与缠结包覆,因而使基体分子与碳纤维接触界面的结合强度降低。

同时由 Fig.9 的碳纤维保留率曲线还可发现,随着碳纤维含量增加,制件中碳纤维与基体接触界面的结合强度逐渐下降。这是因为熔体中碳纤维含量增加会使其黏度增大,流动性能降低,阻碍了聚合物分子对碳纤维的充分缠结与包覆作用,从而降低了基体与碳纤维接触界面的结合强度。

2.2　超声振动对制件拉伸强度的影响

对不同碳纤维含量的 CFPP 制件在不同超声功率下获得的试样进行拉伸测试,得到试件的拉伸强度随超声功率变化的曲线如 Fig.10 所示。

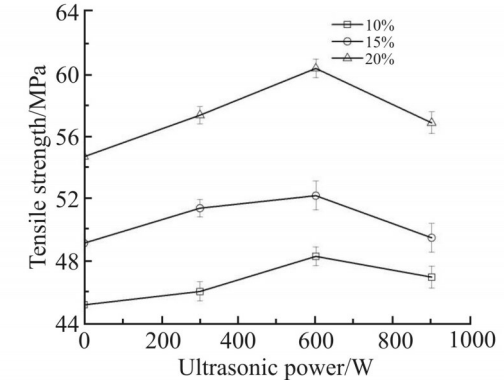


Fig. 10 Curves of tensile strength of parts with different fiber mass fractions as a function of ultrasonic power

由 Fig.10 曲线可见,未施加超声振动时,不同碳纤维含量 CFPP 制件的拉伸强度值均较低;但随着施加的超声功率不断增大,不同碳纤维含量 CFPP 制件的拉伸强度均呈先增大后减小的变化趋势,并均在超声功率 600 W 时达到最高值,比不加超声振动时的制件拉伸强度分别提高了约 6.9%,6.2%和 10.4%。这是由于随超声功率增大,制件内部的结晶度、碳纤维的取向程度及纤维与基体的结合强度都会增大,因此制件的拉伸强度增大;但超声功率超过 600 W 时,较高的超声能量使分子链运动活性进一步增大,强烈的分子热运动阻碍了分子链规整排列生成晶核以及晶体的生长,同时也阻碍了熔体分子与碳纤维的紧密接触,使其界面结合强度降低,致使 CFPP 制件的拉伸强度明显下降。同时 Fig.10 曲线还显示,无论是否施加超声振动作用,制件中碳纤维的含量越高其拉伸强度值越大,如碳纤维质量分数 20%的 CFPP 制件的拉伸强度,分别高于

15%和10%质量分数的制件约13.4%和22.9%，这表明以碳纤维作为增强体的聚合物复合材料制件能够承担更大的载荷。

3 结论

本文通过在不同纤维含量CFPP的注塑成型充填流动阶段施加超声振动，并借助XRD，SEM及拉伸试验对制件凝聚态结构和拉伸强度进行了测试分析，可以得出以下结论。

（1）随着纤维含量的升高，制件内部结晶度逐渐下降，且纤维与基体接触界面的结合强度也有所降低，但制件拉伸强度有所提高，可知增强纤维的含量对制件力学性能的影响最为明显。

（2）在纤维增强复合材料熔体充填流动阶段施加适当的超声功率（≤600 W），可以借助超声外场能量影响充填流动阶段熔体的流动行为和分子链形态变化，有效改善制件内部分子的凝聚态结构以及纤维的取向形态，从而提高制件的力学性能。

参考文献：

[1] Ravishankar B, Nayak S K, Kader M A. Hybrid composites for automotive applications – a review[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2019, 38: 835-845.

[2] 尹宏杰, 王松博, 宋园园,等. 碳纤维增强共聚酰胺6-66复合材料的制备及性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2021, 37(10): 53-61.
Yin H J, Wang S B, Song Y Y, *et al*. Fabrication and properties of carbon fiber reinforced copolyamide 6- 66 composites [J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2021, 37(10): 53-61.

[3] 吴瑞, 李岩, 于涛. 不同种类纤维增强复合材料湿热老化性能对比[J]. 复合材料学报, 2022, 39(9): 4406-4419.
Wu R, Li Y, Yu T. Comparative study on the hygrothermal durability of different fiber reinforced composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(9): 4406-4419.

[4] Aparna S, Purnima D, Adusumalli R B. Effect of short carbon fiber content and water absorption on tensile and impact properties of PA6/PP blend based composites[J]. Polymer Composites, 2020, 41: 5167-5181.

[5] Junaedi H, Albahkali E, Baig M, *et al*. Ductile to brittle transition of short carbon fiber- reinforced polypropylene composites[J]. Advances in Polymer Technology, 2020, 2020: 6714097.

[6] Tiemann J, Mola J, Land P, *et al*. Quasi static and fatigue properties of long carbon fiber reinforced polyamide[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2022, 31: 94-104.

[7] 于同敏, 张拯恺, 段春争. 注塑工艺参数和超声外场对聚丙烯制件结晶结构的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2019, 35(10): 124-130.
Yu T M, Zhang Z K, Duan C Z. Influence of injection process parameters and ultrasonic field on crystalstructure of polypropylene parts[J].Polymer Materials Science & Engineering, 2019, 35(10): 124-130.

[8] Zou D, Yu T, Duan C. Thermodynamic and shear effects of ultrasonic vibration on the flow - induced crystallization of polypropylene[J]. Polymers for Advanced Technologies, 2021, 32: 4233-4250.

[9] 殷伊凡, 林荣川, 胡盛财. 超声振动场对玻纤增强型PBT薄壁塑件成型性能的影响[J]. 塑料科技, 2015, 43(1): 51-54.
Yin Y F, Lin R C, Hu S C. Effect of ultrasonic vibration field on molding performance of glass fiber reinforced PBT thin- wall plastic parts[J]. Plastics Science and Technology, 2015, 43(1): 51-54.

[10] Friedrich K. Microstructure and fracture of fiber reinforced thermoplastic polyethylene terephthalate(PET) [J]. Materials Testing, 1982, 24: 411-412.

[11] Fischer G, Eyerer P. Measuring spatial orientation of short fiber reinforced thermoplastics by image analysis[J]. Polymer Composites, 1988, 9: 297-304.

[12] Fakirov S, Fakirova C. Direct determination of the orientation of short glass fibers in an injection - molded poly (ethylene terephthalate) system[J]. Polymer Composites, 1985, 6: 41-46.

[13] Bernasconi A, Cosmi F, Hine P J. Analysis of fibre orientation distribution in short fibre reinforced polymers: a comparison between optical and tomographic methods[J]. Composites Science and Technology, 2012, 72: 2002-2008.

[14] Thi T B N, Morioka M, Yokoyama A, *et al*. Measurement of fiber

orientation distribution in injection- molded short- glass- fiber composites using X- ray computed tomography[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 219: 1-9.

[15] Etcheverry M, Barbosa S E. Glass fiber reinforced polypropylene mechanical properties enhancement by adhesion improvement [J]. Materials, 2012, 5: 1084-1113.

[16] Liang X, Liu Y, Liu Z, *et al*. Ultrasonic injection molding of glass fiber reinforced polypropylene parts using tungsten carbide-cobalt mold core[J]. Materials & Design, 2021, 205: 109771.

[17] 王静, 徐爽, 姚健, 等. 复合材料界面微观力学表征方法及界面细观力学模型研究进展[J]. 高分子材料科学与工程, 2023, 39 (3): 155-162.

Wang J, Xu S, Yao J, *et al*. Progress of micromechanical characterization method and fine mechanical model of composite material interface [J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2023, 39(3): 155-162.

Effect of Ultrasonic Vibration on Properties of Polypropylene Reinforced with Different Carbon Fiber Contents

Ying Liu, Yong Yang, Tongmin Yu, Xueli Zhao, Sai Ma, Tieli Zhu

(*State Key Laboratory of High-Performance Precision Manufacturing, School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024,China*)

ABSTRACT: Using polypropylene composites reinforced with different mass fractions of carbon fiber (10%, 15% and 20%) , the molding experiments assisted by ultrasonic vibration were carried out for shell parts with standard tensile specimen at the bottom. By XRD, SEM and tensile test, influences of ultrasonic vibration on the crystallinity, fiber orientation, bonding strength of the contact interface between carbon fiber and matrix and tensile strength of the parts were studied. It is found that when the ultrasonic vibration of 600 W is applied to the filling stage of injection molding, the crystallization degree of the parts with 10%, 15% and 20% carbon fiber content is increased by 4.4%, 7.4% and 9.8%, and the fiber orientation degree is increased by 5.2%, 9.7% and 3.5%, respectively. The bonding strength between carbon fiber and matrix is increased by 32.5%, 12.7% and 12.6%, resulting in the tensile strength of the parts increased by 6.9%, 6.2% and 10.4%, respectively. However, when the ultrasonic power rises to 900 W, both the crystallization degree and bonding strength between carbon fiber and matrix decrease, resulting in a decrease in the tensile strength of the parts.

Keywords: ultrasonic vibration; carbon fiber reinforced polypropylene; condensed matter structure; tensile strength