

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.01.013

碳纤维增强聚苯硫醚复合材料结晶结构与性能调控

赵乐,陆承志,王少飞,杨雪勤,骆佳美,阳泽濠,刘勇,张辉

(东华大学材料科学与工程学院,上海 201620)

摘要:使用碳纤维斜纹布与聚苯硫醚(PPS)薄膜通过热压成型制备了碳纤维增强 PPS (PPS/CF) 复合材料层压板,通过在保温保压过程中设置不同的等温结晶温度,对复合材料中 PPS 结晶结构进行调控,系统讨论了不同等温结晶温度下,PPS 结晶度及晶粒尺寸对 PPS/CF 复合材料力学性能的影响。使用 X 射线衍射仪观察了复合材料中 PPS 的晶体结构,通过场发射扫描电子显微镜观察了复合材料的微观形貌,并利用动态机械分析测试探究了复合材料的黏弹性与 PPS 晶体结构之间的关系。结果表明,当等温结晶温度为 230℃ 时,复合材料中 PPS 在保持较小晶粒尺寸的同时结晶度高达 46.58%,此时复合材料具有良好的强度、刚性和界面粘结强度,其弯曲强度、弯曲弹性模量和层间剪切强度分别达到 709 MPa,81.9 GPa 和 23.8 MPa。

关键词:聚苯硫醚/碳纤维复合材料;等温结晶;结晶度;晶粒尺寸;力学性能

中图分类号:TQ324.8 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-3539(2022)01-0072-06

Control of Crystal Structure and Performances of Carbon Fiber Reinforced Polyphenylene Sulfide Composite

Zhao Le, Lu Chengzhi, Wang Shaofei, Yang Xueqin, Luo Jiamei, Yang Zehao, Liu Yong, Zhang Hui

(College of Material Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract : Using carbon fiber twill cloth and polyphenylene sulfide (PPS) film, a carbon fiber reinforced PPS (PPS/CF) composite laminate was prepared by thermocompression molding. The crystallization structure of PPS in the composite was controlled by setting different isothermal crystallization temperatures during thermal insulation and pressure holding. Under different isothermal crystallization temperatures, the effects of PPS crystallinity and grain size on the mechanical properties of PPS/CF composite were systematically discussed. The crystal structure of the PPS in the composite was observed with an X-ray diffractometer, the microscopic morphology of the composite was observed with a field emission scanning electron microscope, and the relationship between the viscoelasticity of the composite material and the crystal structure of PPS was explored using dynamic thermodynamic testing. The research results show that when the isothermal crystallization temperature is 230℃, the PPS in the composite maintains a small crystal grain size while the crystallinity is as high as 46.58%. Under this condition, the composite has good strength, rigidity and interfacial bonding strength, and its flexural strength, flexural modulus and interlaminar shear strength reach 709 MPa, 81.9 GPa and 23.8 MPa, respectively.

Keywords : polyphenylene sulfide/carbon fiber composite ; isothermal crystallization ; crystallinity ; grain size ; mechanical property

碳纤维增强热塑性树脂基复合材料(CF RTP)具有质轻高强、可塑能力强、成型周期短、抗冲击性良好以及可以回收再利用等优势^[1-3],已逐渐成为新一代碳纤维复合材料的发展方向。早在 20 世纪末碳纤维增强聚苯硫醚(PPS)(PPS/CF)复合材料已应

用于湾流 G650 高端商务机尾翼。近年来,随着航空工业的发展,CF RTP 更是被空客、波音等公司广泛应用于副翼翼肋、方向舵前缘和升降舵辅助翼肋等次承力结构。PPS 是 CF RTP 中最常见的热塑性树脂基体之一,其分子链是由苯环与硫原子交替排

基金项目:宁波市科学技术局项目(20191ZDYF020136)

通信作者:张辉,副研究员,硕士生导师,研究方向为碳纤维增强树脂基复合材料

收稿日期:2021-10-28

引用格式:赵乐,陆承志,王少飞,等.碳纤维增强聚苯硫醚复合材料结晶结构与性能调控[J].工程塑料应用,2022,50(1):72-77.

Zhao Le, Lu Chengzhi, Wang Shaofei, et al. Control of crystal structure and performances of carbon fiber reinforced polyphenylene sulfide composite[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(1):72-77.

列而成^[4],苯环为树脂提供了刚性,硫醚键则增加了树脂的柔顺性,使得 PPS 具有极低的吸湿率、突出的热稳定性和优异的耐溶剂性能^[5-6];同时规整的分子链结构使 PPS 具有很强的结晶能力,在一定条件下其结晶度高达 60% 以上,这在很大程度上影响着复合材料的刚性和界面粘结强度。因此,如何调控 PPS 的结晶结构进而改善 PPS/CF 复合材料的力学性能成为其应用研究的关键。

模压成型作为 CFRTTP 生产中常用的成型技术,具有简单高效、制件质量好、尺寸精度高、受环境影响小等优点^[7],适用于批量化、高强度复合材料制件的成型。Batista 等^[8]研究了模压成型后冷却速率对 PPS/CF 复合材料力学性能的影响,发现复合材料的层间剪切强度随着冷却速率的增加而减小,这与树脂基体结晶度减小密切相关。曹硕等^[9]通过非等温结晶方式研究了 PPS 结晶行为与复合材料力学性能之间的关系,发现随着冷却速率的加快,PPS 容易形成更多的晶核且晶粒生长时间变短,但相对结晶度减小,导致材料刚性变差。刘延宽等^[10]研究了结晶度对 PPS/CF 复合材料刚性的影响,发现复合材料的刚性随 PPS 结晶度的升高而升高。Zhao 等^[11]以碳纤维布和 PPS 非织造布为增强材料和基体,通过热压成型制备了 PPS/CF 复合材料,并研究了 PPS/CF 复合材料中 PPS 在不同热处理条件下的再结晶过程,发现 PPS 的球晶尺寸随着热处理温度的升高而增加,但当温度超过 240℃ 后球晶尺寸基本不变,且复合材料的力学性能在 240℃ 进行热处理时达到最优。

由以上可以看出,PPS 的结晶行为对 PPS/CF 复合材料力学性能有显著影响。但是现有研究大多是对 PPS/CF 复合材料中 PPS 的非等温结晶和再结晶过程进行分析,无法直观有效地控制 PPS 的结晶过程。而模压过程中 PPS/CF 复合材料在特定温度下的保温保压工艺实际为 PPS 的等温结晶过程,其对 PPS 的结晶行为及 PPS/CF 复合材料力学性能的影响还需要进一步讨论。笔者通过改变 PPS/CF 复合材料在保温保压过程中的等温结晶温度来影响树脂基体的结晶过程,并深入讨论 PPS 的结晶度和晶体形态对 PPS/CF 复合材料力学性能的影响。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PPS 薄膜: Torayca®TorelinaTM #38-3030, 东丽株式会社;

碳纤维斜纹布: Torayca®T300 3K, 280 g/m², 宜兴市中碳科技有限公司;

丙酮: 上海凌峰化学试剂有限公司。

1.2 实验仪器与设备

真空固化箱: XH-407C 型, 东莞市重兴机械设备有限公司;

真空烘箱: DZF-6020 型, 上海精宏实验设备有限公司;

差示扫描量热 (DSC) 仪: Q20 型, 美国 TA 公司;

X 射线衍射 (XRD) 仪: Dmax-2550VB 型, 德国布鲁克公司;

场发射扫描电子显微镜 (FE-SEM): JSM-7500F 型, 日本电子株式会社;

电子万能力学试验机: 208B-TS 型, 深圳市兰博三思材料检测有限公司;

动态机械分析 (DMA) 仪: DMA-1 型, 瑞士梅特勒-托利多公司。

1.3 PPS/CF 复合材料制备

将碳纤维布 (450 mm × 1 000 mm) 浸入盛有丙酮的回流装置中, 70℃ 回流 12 h, 然后用去离子水反复浸泡冲洗 5 次以上以去除碳纤维表面残余丙酮, 80℃ 烘干 12 h 备用。

通过相关研究^[12-13]确定模压成型温度为 330℃, 成型压力为 2.5 MPa。同时发现 PPS/CF 复合材料中 PPS 的结晶峰位于 230 ~ 255℃, 综合考虑模具的热传递效率, 将保温保压过程中的等温结晶温度分别设置为 210, 220, 230, 240℃。此外, 将自然冷却方式记为 Nc。

将碳纤维布与 PPS 薄膜交替铺层放入清洁干净的模具中, 通过四段加压方式使树脂充分浸渍碳纤维完成成型过程^[14], 如图 1 所示。

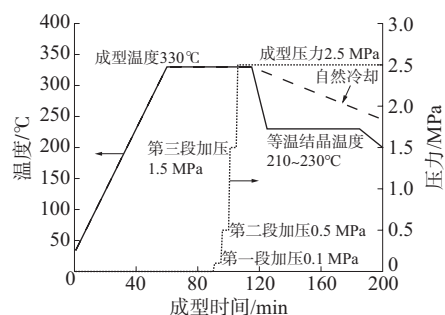


图1 PPS/CF 复合材料模压工艺流程

1.4 测试与表征

(1) DSC 测试。

采用 DSC 仪记录样品在氮气气氛下熔融过程

中热焓的变化。将样品以 $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的升温速率从 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升温至 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$; 保温 5 min 后以相同速率降温至 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, 记录 DSC 曲线。

(2) XRD 测试。

使用 XRD 仪对 PPS/CF 复合材料进行多晶衍射。衍射角 2θ 为 $3^{\circ}\sim 60^{\circ}$, 扫描速率为 $2^{\circ}/\text{min}$ 。可根据式 (1) 和式 (2) 分别计算出复合材料中 PPS 的结晶度和晶粒尺寸。

$$X_c = S_c / (S_c + S_a) \quad (1)$$

式中: X_c ——结晶度;

S_c ——各衍射峰面积之和;

S_a ——弥散隆峰面积。

$$X_s = K\lambda / \beta \cos \theta \quad (2)$$

式中: X_s ——所规定晶面族方向的晶粒尺寸;

K ——形状因子, 取 0.92 ;

λ ——单色入射 X 射线波长;

β ——实测样品的半峰宽;

θ ——所规定晶面族产生衍射时, 入射线与该晶面之间的夹角。

(3) FE-SEM 观察。

使用 FE-SEM 观察 PPS/CF 复合材料的断面形貌。取弯曲测试后的样条, 在液氮中折断后切取 $13\text{ mm} \times 8\text{ mm} \times 2\text{ mm}$, 贴样喷金进行观察。

(4) 力学性能测试。

使用万能试验机分别以 ASTM D7264-2015 和 ASTM D2344-2016 测试 PPS/CF 复合材料的弯曲强度和层间剪切强度。弯曲强度测试中试样跨厚比为 $32:1$, 宽度为 13 mm , 长度为 78 mm , 测试速率为 $1.0\text{ mm}/\text{min}$, 加载头半径为 3 mm ; 层间剪切强度中试样的跨厚比为 $4:1$, 宽度为 4 mm , 测试速率为 $1.0\text{ mm}/\text{min}$ 。

(5) DMA 分析。

使用 DMA 仪对 PPS/CF 复合材料进行动态热力学测试。测试模式为三点弯曲, 频率 1 Hz , 升温速率 $3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 扫描的温度范围为 $50\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$, 振幅为 $10\text{ }\mu\text{m}$, 试样尺寸为 $40\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 。

2 结果与讨论

2.1 等温结晶温度对 PPS/CF 复合材料中 PPS 结晶性能影响

(1) DSC 分析。

图 2 为自然冷却及不同等温结晶温度下 PPS/CF 复合材料的 DSC 曲线。在图 2a 中, 随着等温结晶温度的升高, PPS/CF 复合材料的熔融峰向高温区

移动。推测是因为随着等温结晶温度的升高, 复合材料中 PPS 的结晶度逐渐增加, 并且伴随着一定的热氧化交联反应, 因此需要更高的温度将分子的组装结构全部破坏掉。由图 2b 可见, 随着等温结晶温度的降低, PPS/CF 复合材料的结晶峰依次变宽且向低温区移动。主要是因为复合材料中 PPS 分子链的热运动随着等温结晶温度的降低逐渐减缓, 使得 PPS 结晶度减小且球晶缺陷逐渐增多, 进而导致复合材料的结晶峰变宽^[15]。DSC 测试相应的特征温度列于表 1。其中 T_p 为结晶峰值温度; T_c 为起始结晶温度; T_m 为熔融温度。从表 1 中发现, 随着等温结晶温度的升高, T_c-T_p 值先减小后增大且在 $230\text{ }^{\circ}\text{C}$ 出现最小值, 而 T_c-T_p 值与结晶速率呈反比关系^[16], 说明随着等温结晶温度的升高, PPS/CF 复合材料中 PPS 的结晶速率先增大后减小, 且在 $230\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时结晶速率达到最大。

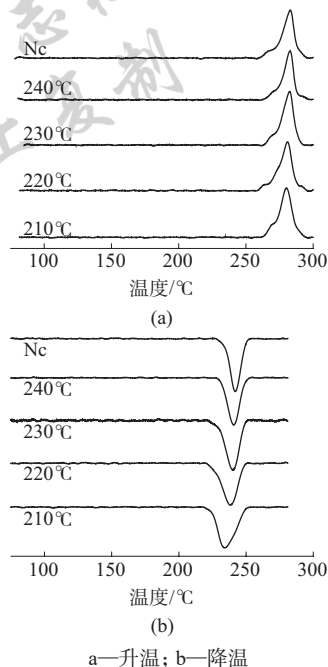


图 2 自然冷却及不同等温结晶温度下 PPS/CF 复合材料 DSC 曲线

表 1 自然冷却及不同等温结晶温度下 PPS/CF 复合材料

方 式	的特征温度			
	T_p	T_c	T_c-T_p	T_m
Nc	241.98	253.65	11.67	283.03
210 $^{\circ}\text{C}$ 等温结晶	233.96	251.10	17.14	280.12
220 $^{\circ}\text{C}$ 等温结晶	238.63	251.08	12.45	281.01
230 $^{\circ}\text{C}$ 等温结晶	240.17	251.31	11.14	282.46
240 $^{\circ}\text{C}$ 等温结晶	240.68	253.64	12.96	282.72

(2) XRD 分析。

自然冷却及不同等温结晶温度下 PPS/CF 复合材料的 XRD 测试结果如图 3 所示。在图 3 中可以观察到 3 个强结晶峰, 其 2θ 为 25.57° , 20.59° 和

18.90°,依次对应(112),(200)和(110)晶面,说明复合材料中的PPS晶体属于正交晶系^[17]。通过式(1)计算得到复合材料中PPS的结晶度;由式(2)计算得到复合材料中PPS(112)晶面的晶粒尺寸,计算结果见表2。由表2结果发现,PPS/CF复合材料中PPS的结晶度随着等温结晶温度的升高呈现先增加后减小的趋势,这主要是因为随着等温结晶温度的升高,PPS分子链进入晶格的速率加快,使球晶生长更加完善。但是当复合材料等温结晶温度过高或自然冷却时,PPS的热氧化交联反应^[18]在很大程度上限制了其分子链的规则排列,使得PPS结晶度出现明显下降。同时在表1中发现,当复合材料等温结晶温度为240℃和采用自然冷却时,其 T_m 并没有因PPS结晶度的减小而降低,这也与PPS长时间处于高温状态发生热氧化交联反应有关。此外,从表2还可以发现,经过等温结晶后PPS/CF复合材料中PPS晶粒尺寸明显下降,这可能是由于自然冷却的PPS/CF复合材料降温极为缓慢,较小的过冷度使PPS分子链有足够的能量重新排列进入晶格,形成疏松而完善的球晶。而PPS/CF复合材料在等温结晶时,较大过冷度有利于PPS的成核和生长,使其形成细小且密集的球晶。

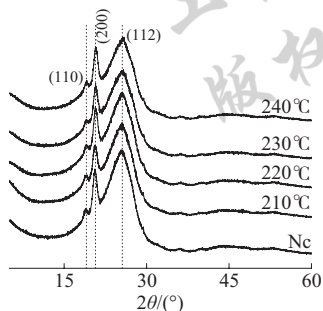


图3 自然冷却及不同等温结晶温度下PPS/CF复合材料XRD曲线

表2 自然冷却及不同等温结晶温度下PPS/CF复合材料结晶性能

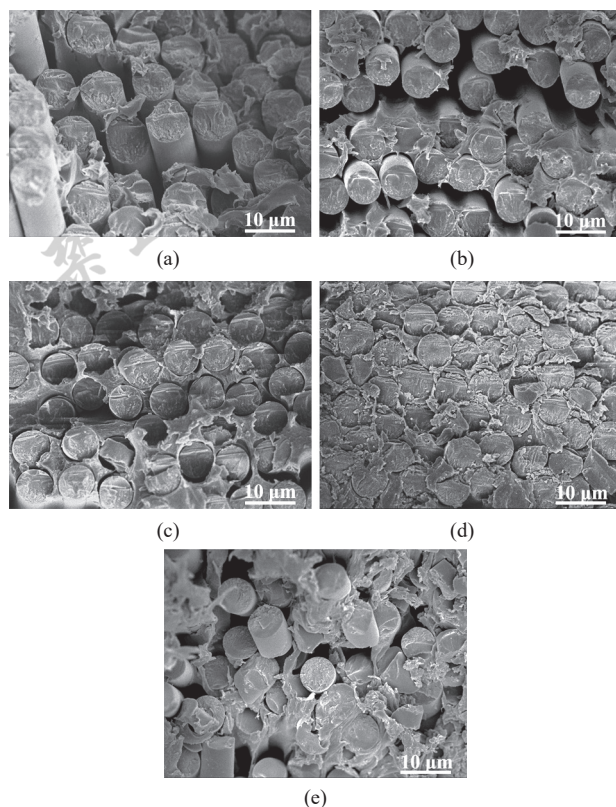
项 目	Nc	等温结晶温度/℃			
		210	220	230	240
$X_c/\%$	41.56	44.17	44.73	46.58	30.56
$X_{s(112)}/nm$	3.2	2.0	2.0	2.0	2.2

注: X_c 为PPS的结晶度; $X_{s(112)}$ 为PPS(112)晶面的晶粒尺寸。

(3) 断面形貌分析。

图4为自然冷却及不同等温结晶温度下PPS/CF复合材料弯曲断裂试样截面的SEM照片。在图4a中,自然冷却的PPS/CF复合材料在断面处出现了明显的碳纤维拔出现象,且沿纤维轴向出现大量空隙,此时复合材料的失效形式主要以基体-纤维的破坏为主。由图4b、图4c和图4d可见,经过等温结晶后,大多数碳纤维在复合材料断裂后仍然

被树脂基体粘结为一个整体,且随着等温结晶温度的升高,复合材料中PPS树脂对碳纤维的包裹性逐渐增强,纤维和基体之间的孔隙逐渐减小。特别是当等温结晶温度为230℃时,复合材料断面平整且树脂均匀包裹于碳纤维周围,在纤维与树脂界面处孔隙基本消失。结合表2可知,此时复合材料中的PPS在保持较小的晶粒尺寸的同时具有最高的结晶度,这种晶体结构可能在一定程度上提高了碳纤维与树脂的界面粘结强度。在该条件下复合材料的失效形式为纤维与基体的共同断裂。在图4e中,碳纤维的集束性很差且纤维表面附着树脂较少,这可能是因为复合材料在发生弯曲断裂时,PPS的热氧化交联使树脂层无法有效阻碍裂纹传递,最终导致纤维与树脂出现界面脱粘。



a—Nc; b—210℃等温结晶; c—220℃等温结晶;
d—230℃等温结晶; e—240℃等温结晶

图4 自然冷却及不同等温结晶温度下PPS/CF复合材料弯曲断裂试样截面SEM形貌

2.2 等温结晶温度对复合材料力学性能的影响

(1) 静态力学性能分析。

表3列出自然冷却及不同等温结晶温度下PPS/CF复合材料弯曲性能和层间剪切强度。由表3可以看出,与自然冷却相比,经过等温结晶后PPS/CF复合材料的弯曲性能和层间剪切强度显著提升。

推测其原因, PPS/CF 复合材料在等温结晶过程中, 较大的过冷度使 PPS 形成小尺寸球晶, 使树脂基体界面层增多, 因此当复合材料受到外部载荷时树脂基体可以吸收更多的能量从而有效地阻止裂纹的扩散。

表 3 自然冷却及不同等温结晶温度下 PPS/CF 复合材料力学性能

项 目	Nc	等温结晶温度 /℃			
		210	220	230	240
弯曲强度 /MPa	436	663	691	709	511
弯曲弹性模量 /GPa	73.5	75.1	75.8	81.9	75.1
层间剪切强度 /MPa	16.1	21.8	23.2	23.8	19.8

从表 3 还可以看出, PPS/CF 复合材料的弯曲性能随等温结晶温度的升高呈现先增加后减小的趋势, 其中, 相对于自然冷却方式, 不同等温结晶温度下复合材料的弯曲强度提升明显, 当等温结晶温度为 230℃ 时, PPS/CF 复合材料的弯曲性能最优, 其弯曲强度和弯曲弹性模量分别达到 709 MPa 和 81.9 GPa。另外, 当等温结晶温度由 210℃ 提高至 230℃ 时, PPS/CF 复合材料的层间剪切强度由 21.8 MPa 提升至 23.8 MPa, 提升幅度为 9.17%; 继续提高结晶温度至 240℃, 复合材料的层间剪切强度迅速下降, 下降幅度达 17.09%。结合表 2 和表 3 分析可得, 经过等温结晶后 PPS/CF 复合材料的弯曲性能和层间剪切强度与 PPS 的结晶度呈正相关, 因此 PPS 结晶度的提升可能有利于复合材料刚性和界面粘结的提升, 所以此时复合材料的失效形式以纤维与基体的共同断裂为主。当等温结晶温度为 240℃ 时, PPS/CF 复合材料的弯曲性能和层间剪切强度迅速下降, 这是由于复合材料中的 PPS 因发生热氧化交联反应而产生替代结构^[19], 使得复合材料在发生弯曲断裂时裂纹沿纤维轴向迅速扩展, 进而出现图 4e 中纤维与树脂发生界面脱粘的现象, 故等温结晶温度为 240℃ 时复合材料的力学性能出现明显下降。

(2) 动态热力学性能分析。

图 5 为 PPS/CF 复合材料在自然冷却及不同等温结晶温度下的储能模量和内耗角正切。从图 5 可以发现, 当等温结晶温度为 230℃ 时, 复合材料具有最高的储能模量和最小的内耗峰值, 表明在该条件下 PPS 树脂对碳纤维的浸润效果良好, 复合材料具有良好的界面粘结^[20]。此外, 从图 5 还可以发现, 当测试温度小于 PPS 的 T_g (90℃) 时, 经等温结晶处理的 PPS/CF 复合材料的储能模量均高于在自然冷却条件下制备的复合材料, 推测其原因, 经过等温

结晶处理后复合材料中 PPS 形成更加完善的微晶结构, 使复合材料界面作用力增强, 摩擦内耗降低, 储能模量提升。而当测试温度高于 PPS 的 T_g 时, 自然冷却条件下制备的复合材料的储能模量下降却并不明显, 甚至高于等温结晶温度为 210, 220, 240℃ 时所制备的 PPS/CF 复合材料, 推测可能是因为随着测试温度大于 PPS 的 T_g , PPS 分子链段开始运动, 而在自然冷却条件下制备的复合材料中 PPS 具有较大的晶粒尺寸, 因此在一定程度上限制了 PPS 无定形区分子链的热运动, 使其储能模量下降缓慢。

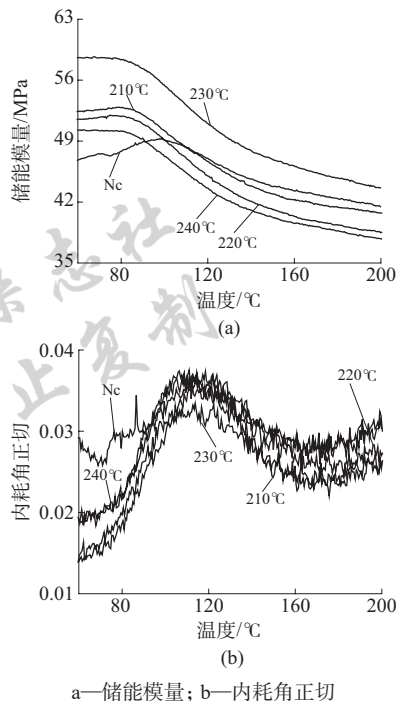


图 5 自然冷却及不同等温结晶温度下 PPS/CF 复合材料 DMA 曲线

3 结论

采用薄膜叠层模压成型的方法制备了 PPS/CF 复合材料, 通过改变等温结晶温度, 探究了 PPS 结晶度及晶粒尺寸对 PPS/CF 复合材料力学性能的影响。结论如下:

(1) 等温结晶处理对 PPS/CF 复合材料中 PPS 的晶粒尺寸有较大影响。经过等温结晶处理后, 复合材料中 PPS 球晶的平均尺寸明显减小, 材料的力学性能显著提升;

(2) PPS/CF 复合材料中 PPS 的结晶度随等温结晶温度的升高呈现先增后减的趋势, 当等温结晶温度为 230℃ 时, 复合材料中 PPS 的结晶度最高。在该条件下制备的 PPS/CF 复合材料具有良好的力学性能, 弯曲强度为 709 MPa, 弯曲弹性模量为 81.9 GPa, 层间剪切强度为 23.8 MPa;

(3) 当等温结晶温度过高时, PPS/CF 复合材料中的 PPS 因发生氧化交联反应而变硬变脆, 此时复合材料中 PPS 的结晶度仅为 30.56%, 在该条件下制备的 PPS/CF 复合材料的力学性能迅速下降。

综上所述, 通过改变模压成型保温保压过程中的等温结晶温度来影响复合材料中 PPS 的结晶过程, 可以使 PPS 形成细小且密集的球晶, 显著提升了复合材料的力学性能, 特别是弯曲强度得到明显改善。因此本研究在 PPS/CF 复合材料结晶结构调控和性能优化方面具有一定的指导意义。

参考文献

- [1] El-Dessouky H M, Lawrence C. Ultra-lightweight carbon fibre/thermoplastic composite material using spread tow technology[J]. Composites Part B:Engineering, 2013, 50(7):91-97.
- [2] Vieille B, Aucher J, Taleb L. Carbon fiber fabric reinforced PPS laminates:Influence of temperature on mechanical properties and behavior[J]. Advances in Polymer Technology, 2011, 30(2):80-95.
- [3] Ye Lin, Chen Zuorong, Meng Lu, et al. De-consolidation and re-consolidation in CF/PPS thermoplastic matrix composites[J]. Composites Part A Applied Science & Manufacturing, 2005, 36(7):915-922.
- [4] 姜正飞. 碳纤维织物增强聚苯硫醚基复合材料成型工艺及性能[D]. 上海: 东华大学, 2014.
- [5] Jiang Zhengfei. Molding process and properties of carbon fiber fabric reinforced polyphenylene sulfide composite[D]. Shanghai:Donghua University, 2014.
- [6] Díez-Pascual A M, Naffakh M. Tuning the properties of carbon fiber-reinforced poly(phenylene sulphide) laminates via incorporation of inorganic nanoparticles[J]. Polymer, 2012, 53(12):2369-2378.
- [7] Zhai Huan, Zhou Xiaodong, Fang Li, et al. Study on mechanical properties of powder impregnated glass fiber reinforced poly(phenylene sulphide) by injection molding at various temperatures[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2010, 115(4):2019-2027.
- [8] 余剑英, 周祖福. 连续纤维增强热塑性复合材料的制备成型技术及其应用前景[J]. 武汉工业大学学报, 1998, 20(4):22-24.
- [9] Yu Jianying, Zhou Zufu. Preparation and molding technology of continuous fiber reinforced thermoplastic composites and its application prospects[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 1998, 20(4):22-24.
- [10] Batista N L, Olivier P, Bernhart G, et al. Correlation between degree of crystallinity, morphology and mechanical properties of PPS/carbon fiber laminates[J]. Materials Research, 2016, 19(1):195-201.
- [11] 曹硕, 黄鑫林, 朱妹, 等. 碳纤维增强聚苯硫醚 (CF/PPS) 航空复合材料的结晶行为及力学性能[J]. 材料科学与工程学报, 2019, 37(4):571-577.
- [12] Cao Shuo, Huang Xinlin, Zhu Shu, et al. Crystallization behavior and mechanical properties of carbon fiber reinforced polyphenylene sulfide (CF/PPS) aeronautical composites[J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2019, 37(4):571-577.
- [13] 刘延宽, 周雪霖. 热处理时间对 CF/PPS 结晶度与力学性能的影响分析[J]. 塑料工业, 2018, 46(1):87-90.
- [14] Liu Yankuan, Zhou Xuelin. Analysis on the effect of heat treatment time on crystallinity and mechanical properties of CF/PPS[J]. China Plastics Industry, 2018, 46(1):87-90.
- [15] Zhao Liang, Huang Ziping, Xiong Siwei, et al. Polyphenylene sulfide composite laminate from flexible nonwovens and carbon fiber fabrics prepared by thermal lamination and thermal treatment[J]. Polymer Bulletin, 2019, 76(11):5633-5648.
- [16] 张佳新, 梅启林. CF/PPS 编织复合材料的制备及力学性能研究[J]. 复合材料科学与工程, 2020(1):76-81.
- [17] Zhang Jiaxin, Mei Qilin. Preparation and mechanical properties of CF/PPS knitted composites[J]. Composites Science and Engineering, 2020(1):76-81.
- [18] 邱军, 姜世峰, 张玲玲. 碳纤维布增强聚苯硫醚复合材料的性能研究[J]. 工程塑料应用, 2002, 30(9):1-3.
- [19] Qiu Jun, Jiang Shifeng, Zhang Lingling. Study on the property of carbon fiber cloth reinforced PPS composites[J]. Engineering Plastics Application, 2002, 30(9):1-3.
- [20] Phillips H J, Shenoi R A. Damage tolerance of laminated tee joints in FRP structures[J]. Composites Part A Applied Science & Manufacturing, 1998, 29(4):465-478.
- [21] 刘延宽, 周雪霖, 纪朝辉, 等. 熔融温度对 PPS 结晶度与结晶行为的影响[J]. 工程塑料应用, 2019, 47(10):102-105.
- [22] Liu Yankuan, Zhou Xuelin, Ji Zhaohui, et al. Analysis on the effect of melting time on crystallinity and crystallization behavior of PPS[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(10):102-105.
- [23] Maiti S N. Effect of maleation on polyamide-6/EPDM-G-MAH blends[J]. Soft Materials, 2007, 4(1):85-100.
- [24] Tabor B J, Magré E P, Boon J. The crystal structure of poly-p-phenylene sulphide[J]. European Polymer Journal, 1971, 7(8):1127-1133.
- [25] Lee K H, Park M, Kim Y C, et al. Crystallization behavior of polyphenylene sulfide (PPS) and PPS/carbon fiber composites:Effect of cure[J]. Polymer Bulletin, 1993, 30(4):469-475.
- [26] Black R M, List C F, Wells R J. Thermal stability of p-phenylene sulphide polymers[J]. John Wiley & Sons, Ltd, 1967, 17(10):269-275.
- [27] Alexandre M A, Dantras E, Lacabanne C, et al. Effect of PEKK oligomers sizing on the dynamic mechanical behavior of poly(ether ketone ketone)/carbon fiber composites[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2020, 137(24). DOI:10.1002/app.48818.