

湿热诱导对聚醚醚酮结晶与电绝缘性能的影响

段锦涛, 李海霞*, 魏驰原, 解静静, 史培鑫, 陶鹏良

(南京工业大学浦江学院土木与建筑工程学院, 江苏 南京 211200)

摘要: 在 85 °C 和 85% 相对湿度环境中对聚醚醚酮(PEEK)片材进行不同时间的湿热诱导实验, 考察湿热诱导对 PEEK 样品的结晶与电绝缘性能的影响。结果表明, PEEK 样品的结晶度先缓慢增加, 随后缓慢降低。结晶度从 54% 上升至 58%, 然后降低至 52%。不同湿热诱导时间下 PEEK 红外光谱中未出现新的吸收峰, 相对结晶度先增加后降低。随着湿热诱导时间的延长, PEEK 样品的断裂伸长率和断裂强度在 240 h 内逐渐上升, 在 240 h 后缓慢降低。随着湿热诱导时间的增加, 介电损耗($\tan \delta$)在低频率段 10^{-2} ~ 10^2 Hz 内的变化较为显著, 尤其是湿热诱导时间 120 h 时, $\tan \delta$ 频段谱增加明显, 且随着频率增加逐渐降低。超过 120 h 后, $\tan \delta$ 在频率段 10^{-2} ~ 10^3 Hz 内整体逐渐降低, 且降低速率逐渐加快。介电常数在整个测试范围内变化规律与 $\tan \delta$ 的变化趋势一致。随着老化时间的增加, 体积电阻率随着老化时间的增加先下降后上升。介电强度随着湿热诱导时间的增加基本保持不变, 均维持在 50 kV/mm 左右。

关键词: 湿热诱导; 聚醚醚酮; 结晶性能; 电绝缘性能

中图分类号: TQ323.4

文献标志码: A

文章编号: 1005-3360(2026)01-0037-05

DOI: 10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.01.007

Effect of Damp Heat Induction on Crystallization and Electrical Insulation Properties of Polyether Ether Ketone

DUAN Jintao, LI Haixia*, WEI Chiyuan, XIE Jingjing, SHI Peixin, TAO Pengliang

(School of Civil and Architectural Engineering, Nanjing Tech University Pujiang Institute, Nanjing 211200, China)

Abstract: Polyether ether ketone (PEEK) sheets were subjected to hydrothermal aging at 85 °C and 85% relative humidity for various durations to investigate the effect of damp heat induction on their crystallization and electrical insulation properties. The results show that the crystallinity first rose slowly and then declined slowly. It increased from 54% to 58% and subsequently decreased to 52%. No new absorption peaks appeared in the FTIR spectra after different damp heat induction times, and the relative crystallinity exhibited the same increase-then-decrease trend. Within 240 h, both the elongation at break and the tensile strength of the PEEK samples gradually increased with the extension of the damp heat induction time. Beyond 240 h, they declined slowly. With prolonged damp heat induction time, the dielectric-loss tangent ($\tan \delta$) changed most noticeably in the low-frequency range 10^{-2} ~ 10^2 Hz. After 120 h, $\tan \delta$ rose markedly across this band and then decreased progressively with increasing frequency. For damp heat induction exceeding 120 h, $\tan \delta$ decreased over the broader range 10^{-2} ~ 10^3 Hz, and the rate of decrease accelerated. The dielectric constant exhibited the same trend as $\tan \delta$ throughout the tested frequency window. The volume resistivity first decreased and then increased with further aging. The dielectric strength remained essentially constant at 50 kV/mm regardless of hydrothermal aging time.

Keywords: Damp heat induction; PEEK; Crystallization; Electrical insulation properties

聚合物诱导结晶主要包含 3 种情形: 热诱导、应变诱导及溶剂诱导。其中, 溶剂诱导结晶的典型特征为: 当结晶性聚合物受溶剂(或溶剂蒸气)作用时会出现两种情况, 一是在低于常规玻璃化转变温度(t_g)时被诱导发生结晶,

二是在高于常规 t_g 时结晶过程会被加速。从原理来看, 溶剂在可结晶聚合物中的输运, 通常会带来两方面的变化: 一方面会使聚合物的结晶度提高, 另一方面由于塑化效应, 会导致聚合物刚度下降。而诱导结晶这一现象, 对材

收稿日期 Submitted date 2025-03-02; 修回日期 Revised date 2025-04-21; 录用日期 Accepted date 2025-06-04

基金项目: 2023 年江苏省本科高校产教融合型品牌专业建设项目(苏教班高函[2023]16 号)

*联系人, 442060704@qq.com

引用本文: 段锦涛, 李海霞, 魏驰原, 等. 湿热诱导对聚醚醚酮结晶与电绝缘性能的影响[J]. 塑料科技, 2026, 54(1): 37-41.

Citation: DUAN J T, LI H X, WEI C Y, et al. Effect of damp heat induction on crystallization and electrical insulation properties of polyether ether ketone[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(1): 37-41.

料的力学性能有关键影响。因此,溶剂诱导的研究对含溶剂环境中聚合物的失效预测和性能监测具有重要意义^[1-2]。

溶剂扩散至聚合物内部并与其发生交互作用,致使聚合物链段间的相互作用力减弱,进而提升了链段的活性。当聚合物与溶剂间产生强烈的相互作用时,会促使大分子链发生重排,形成热力学稳定性更强的结晶形态。学术界普遍认为,与聚合物存在强相互作用的溶剂具有诱导结晶的作用,针对该类溶剂诱导结晶现象的相关研究成果较为丰富。杨始堃等^[3-4]研究甲醇、乙醇、丙酮、丁酮和乙酸乙酯溶剂对聚对苯二甲酸乙二酯(PET) t_g 的影响,验证溶剂可以对PET材料起到增塑的作用,具体效果是能够使其 t_g 下降,促使PET在更低的温度下发生结晶过程。同时,该团队还研究了PET溶剂诱导结晶的表层与断面结构形态。朱诚身等^[5]考察尼龙1010甲酸蒸气中的结晶现象,发现溶剂的诱导下结晶情况会发生变化,结晶温度会影响球晶形态和诱导结晶难易程度,温度较低时易发生正环状球晶结晶,温度较高时易发生放射状球晶结晶。邵海堂等^[6]研究诱导剂的种类、不同溶度参数和极性物化性质的诱导剂,诱导聚碳酸酯(PC)结晶的能力与形态。结果表明:在某些溶剂诱导作用下,PC的结晶能力能够得到显著提高。吴晓等^[7]利用时间分辨傅里叶变换红外光谱技术,对室温条件下溶剂诱导左旋聚乳酸(PLLA)薄膜结晶过程中的结构演变开展原位光谱研究,从分子水平上揭示PLLA从无序到有序的结构演变。结果表明:多种溶剂诱导PLLA结晶均形成 α' 晶型;多数溶剂诱导均能诱导PLLA结晶,但其诱导结晶能力不同。柯扬船等^[8]针对聚芳醚酮系列在1,2-二氯乙烷中的吸附行为以及溶剂与温度诱导的结晶行为展开研究。结果显示,脱附后残留的溶剂可诱导无定型膜发生结晶。而极化作用与诱导结晶过程会使膜的 t_g 提升10~14 °C,同时导致晶型发生改变。ZHANG等^[9]研究聚醚醚酮(PEEK)在二氯甲烷处理前后的晶体结构变化。这些研究从多维度揭示溶剂对不同聚合物结晶行为的影响机制,说明溶剂主要在解吸过程中诱导聚合物结晶。

PEEK作为一种高性能结晶型热塑性聚合物,属于特种工程材料范畴。其具有强度高、模量高、绝缘稳定性优异、断裂韧性高以及尺寸稳定性良好等特点,在航空航天、汽车制造、核用电缆等领域获得广泛应用^[10-12]。然而PEEK的工况环境比较复杂,有众多因素,如热、水蒸气、氧气、机械外力等,共同导致其结构和性能在使用过程中产生变化。而关于PEEK的湿热诱导研究较少,本研究以水蒸气作为溶剂诱导PEEK结晶,主要分析探讨湿热对PEEK结晶性能和电绝缘性能的影响。

1 实验部分

1.1 主要原料

PEEK薄膜,厚度0.5 mm,劳士领工程塑料(苏州)有限公司。

1.2 仪器与设备

傅里叶变换红外光谱仪(FTIR), VERTEX70, 德国布鲁克公司;微机控制电子万能试验机, ETM-A, 深圳万测试验设备有限公司;X射线衍射仪(XRD), D8 ADVANCE, 德国布鲁克AXS公司;介质谱分析仪, IDAX300, 美国Megger公司;高阻计, ZC-36, 上海第六电表厂有限公司;交流介质强度试验仪, ADT-5/50, 上海蓝波高电压技术设备有限公司。

1.3 样品制备

1.3.1 样品准备

将PEEK薄膜裁剪成对应大小的样品, 7.5 mm×4.0 mm的哑铃形拉伸试样, 直径为10 cm的圆形样片。

1.3.2 湿热诱导过程

将制备好的样品放入湿热老化箱中, 控制实验条件为相对湿度85%、温度85 °C, 将样品在湿热老化箱中保持对应时间后, 取出测试性能。

1.4 性能测试与表征

XRD测试:将试验中处理过的PEEK薄膜剪取成大小适当的片状样品, 然后将其置于X射线衍射仪上测试。扫描速度为8 (°)/min, 波长为0.154 nm。

力学性能测试:将哑铃形样品放置于电子万能试验机上, 依据GB/T 1040.2—2022进行测试, 测试速率为50 mm/min。5次测试, 取平均值。

FTIR测试:对老化后不同时间的PEEK样品进行测试, 采用衰减全反射模式。扫描范围为2 000~500 cm^{-1} , 分辨率为4 cm^{-1} , 扫描次数为32次。测量完成后, 对所有的红外光谱的原始数据进行归一化处理, 再进行红外光谱图的绘制。

体积电阻率测试:把PEEK薄膜样品裁成圆片, 放置在体积电阻率测试仪上, 按照GB/T 31838.4—2019进行测试, 测试电压设为1 000 V。

介电频域谱测试:根据GB/T 1409—2021, 在25 °C条件下, 在0.01~1 000.00 Hz的频率范围内对样品进行测试。

工频击穿电压测试:使用交流介质强度试验仪对老化不同时间的PEEK圆形片材进行测试, 记录击穿时的介电强度。

2 结果与讨论

2.1 XRD分析

图1为不同湿热诱导时间下样品的XRD谱图和结晶度曲线。从图1a可以看出, PEEK样品主要有4个衍射峰, 位置依次为18.8°、20.7°、22.9°和28.9°, 分别对应晶型中的(110)、(111)、(200)和(211) 4个晶面^[13-16]。图中两个相对较强的峰为(110)面和(200)面, 随着湿热诱导时间的增加, 峰的强度逐渐增强又逐渐减弱。取无定形态的峰面积(图1b中馒头峰)占整个衍射面积的百分比作为结晶度。从图1c可以看出, 在湿热诱导时间为240 h以内, PEEK样品的结晶度先缓慢增加, 随后缓慢降低。结晶度从54%上升至58%, 然后降低至52%。

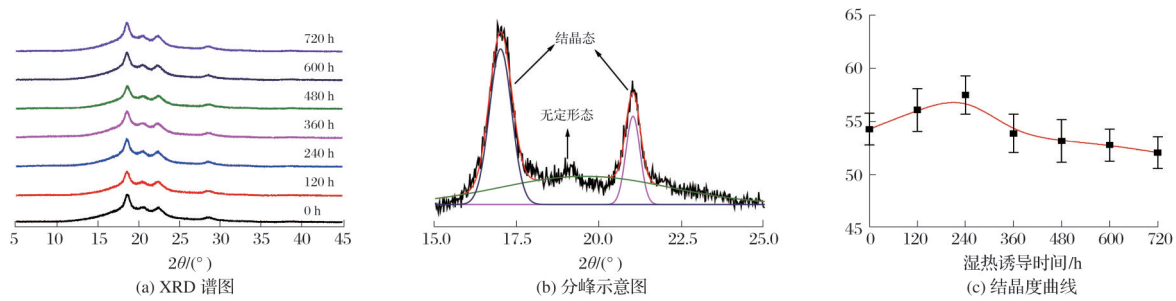
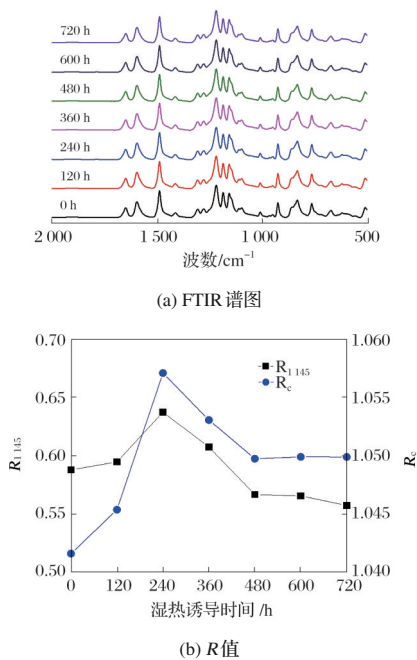


图1 不同湿热诱导时间下样品的XRD谱图和结晶度曲线

Fig.1 XRD patterns and crystallinity curves of samples under different damp heat induction times

2.2 FTIR分析

图2为不同湿热诱导时间下样品的FTIR谱图和 R 值。

图2 不同湿热诱导时间下样品的FTIR谱图和 R 值Fig.2 FTIR spectra and of R value of samples under different damp heat induction times

从图2a可以看出, $1\ 648\ \text{cm}^{-1}$ 处为羰基伸缩振动, $1\ 595\ \text{cm}^{-1}$ 和 $1\ 486\ \text{cm}^{-1}$ 处为 Φ -氧- Φ 骨架平面振动, $1\ 310\ \text{cm}^{-1}$ 和 $927\ \text{cm}^{-1}$ 处为 Φ -CO- Φ 的伸缩振动, $1\ 225$ 、 $1\ 218$ 、 $1\ 183\ \text{cm}^{-1}$ 处为 Φ -O- Φ 的伸缩振动, $1\ 157$ 、 $1\ 145$ 、 $1\ 008\ \text{cm}^{-1}$ 处为PEEK主链中C—H面内弯曲振动, 861 、 835 、 $765\ \text{cm}^{-1}$ 处为苯环C—H的面外弯曲振动^[17-21]。不同湿热诱导时间下的PEEK的FTIR光谱未出现新的吸收峰, 各特征峰的位置亦未发生改变, 这表明并无新官能团生成。然而部分特征峰的强度却出现了变化, 根据文献[22]方法计算PEEK在不同湿热诱导时间下的相对结晶度(R_c), 即对应 $1\ 280\ \text{cm}^{-1}$ 和 $1\ 310\ \text{cm}^{-1}$ 波段的峰强比值。从图2b可以看出, 湿热诱导初期, R_c 增加较快, 湿热诱导后期下降缓慢。这是因为在湿热诱导初期, 样品表面的水分子主要在热作用下扩散至PEEK内部, 与聚合物发生相互作

用, 破坏了聚合物链段间的缠结力, 进而提升了链段的运动能力, 促使其 R_c 迅速上升; 而随着湿热诱导时间的延长, 材料分子链的排列逐渐趋于稳定, 但样品在持续受热的作用下可能进一步发生交联反应与热氧老化, 最终导致PEEK样品的 R_c 缓慢下降。湿热诱导对PEEK结晶度的影响是“水分子增塑-链段重排-结晶促进”与“热氧老化-交联抑制-结晶破坏”双重作用的动态平衡结果。同时, 从FTIR光谱中观察到 $1\ 145\ \text{cm}^{-1}$ 处的峰强度随着湿热诱导时间变化明显, 将 $1\ 145\ \text{cm}^{-1}$ 处的峰强与主链 $1\ 218\ \text{cm}^{-1}$ 处的峰强比值记作 R_{1145} 。从图2b可以看出, R_{1145} 的变化规律与 R_c 相似。这是由于湿热诱导初期样品主要在表面水分子作用下, PEEK链段间作用力降低使主链C—H面内弯曲变得容易, 后期由于热氧老化使得主链C—H面内弯曲受阻。

2.3 力学性能分析

图3为不同湿热诱导时间下样品的力学性能。

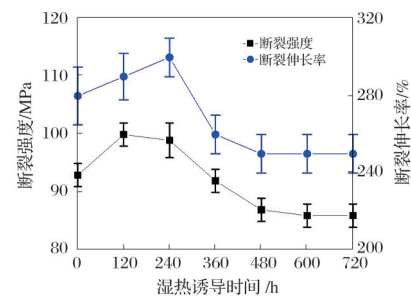


图3 不同湿热诱导时间下样品的力学性能

Fig.3 Mechanical properties of samples under different damp heat induction times

从图3可以看出, 在湿热诱导时间延长过程中, PEEK样品的断裂伸长率在240 h内从280%提升至300%, 240 h后又缓慢降低至250%; 其断裂强度也呈类似的变化规律, 从93 MPa提高至99 MPa后逐渐下降至86 MPa。主要原因在于PEEK样品的断裂伸长率和断裂强度与其结晶状态、分子链结构密切相关。通常来讲, 半结晶高分子由结晶区、无定形区和受限无定形区组成^[23]。在湿热诱导前期, 水分子的作用使PEEK无定形区和受限无定形区的分子链运动更为活跃, 致受限无定形区减少、无定形区增多, 进而提升断裂伸长率; 与此同时, 分子链运动加剧为结晶过程提供了有利条件, 使结晶度提高, 从而使断裂强度增

强。而在湿热诱导后期(热老化时间达 720 h), PEEK 无定形区主要发生热氧化降解, 这使其断裂伸长率和断裂强度均出现下降^[24]。

2.4 体积电阻率分析

图 4 为不同湿热时间下样品的体积电阻率。从图 4 可以看出, 体积电阻率随着湿热诱导时间的增加先降低后逐渐上升到原始状态水平。这是因为湿热诱导期间水分子的参与一方面增加 PEEK 材料的极性, 另一方面增大了 PEEK 无定型区分子链间的空间。这两方面均有利于电子的移动, 导致体积电阻率降低^[25]。随着湿热诱导时间增加, PEEK 材料发生老化, 产生热氧化和交联, 其中交联占主导地位, 交联度的提升对电子的迁移产生了阻碍作用, 进而使体积电阻率增大^[26-27]; 而当热氧化和交联达到平衡时, 体积电阻率不再增加。

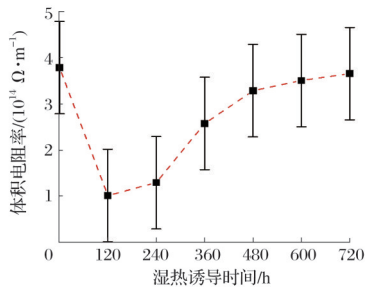


图 4 不同湿热时间下样品的体积电阻率

Fig.4 Volume resistivity of samples under different damp heat induction times

2.5 介电频域谱分析

图 5 为不同湿热诱导时间下样品的介电频域谱图。从图 5a 可以看出, 随着湿热诱导时间的增加, 介电损耗 ($\tan \delta$) 在低频率段 $10^{-2} \sim 10^2$ Hz 内的变化较为显著, 尤其湿热诱导时间为 120 h 时, $\tan \delta$ 频域谱增加明显, 且随着频率增加逐渐降低。超过 120 h 后, $\tan \delta$ 在频率段 $10^{-2} \sim 10^3$ Hz 内整体逐渐降低, 且降低速率逐渐加快。出现这种现象主要是由于交变电场对材料极化过程的影响呈现出显著的频率依赖性, 在不同频率段内发生的极化类型存在明显差异。低频段是载流子主导的极化体系, 电导损耗主要作用在低频段, 湿热诱导 PEEK 材料, 主要载流子为微量水分子。因此, 湿热诱导进行 120 h 时, 材料中载流子数目增多 (主要为水分子), 电导损耗也急剧增大。频率越小, 电导率的增加对 $\tan \delta$ 的作用更为显著, 随着频率越大, 电导率的增加对 $\tan \delta$ 的作用慢慢变小。随着湿热诱导时间的增加, 水分子的含量降低, $\tan \delta$ 降低; 另一方面, 随着湿热诱导作用时间的增加, PEEK 老化, 链段运动受阻, 载流子运动受阻, 进而使 $\tan \delta$ 在较低频率下出现降低^[28-30]。

介电常数是表征材料电介质在静电场作用下介电特性或极化特性的关键参数, 其数值大小与材料的分子结构、极性强弱、温度及电场频率等因素密切相关。从图 5b 可以看出, 介电常数在整

个测试范围内变化规律与 $\tan \delta$ 的变化趋势一致, 说明随湿热诱导作用时间的增加, PEEK 材料极性先增加后降低。

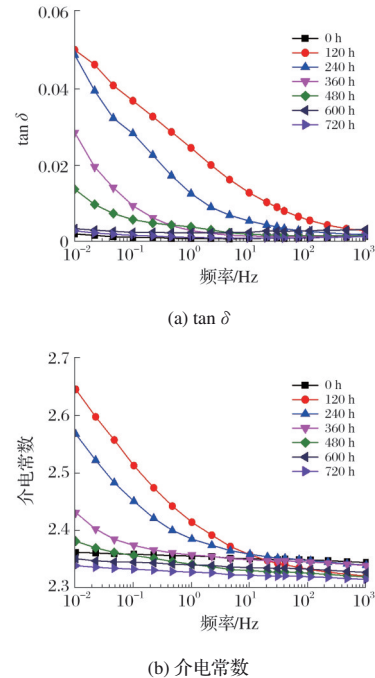


图 5 不同湿热诱导时间下样品的介电频域谱图
Fig.5 Dielectric frequency domain spectra of samples under different damp heat induction times

2.6 介电强度(击穿电压)分析

图 6 为不同湿热诱导时间下样品的介电强度。从图 6 可以看出, 介电强度随着湿热诱导时间的增加基本保持不变, 均维持在 50 kV/mm 上下, 可见湿热诱导对 PEEK 样品的介电强度影响不大。固体绝缘的击穿形式存在多种, 像电击穿、热击穿以及电化学击穿等, 不管是何种形式的击穿, 均和电压的作用时间存在紧密关联。电击穿具有以下特点: 电压作用时间较短, 击穿电压较高, 其击穿电压与绝缘介质温度、散热条件、介质厚度、频率等因素无关联, 但与电场的均匀程度关联较大^[31]。PEEK 样品的介电强度测试是在高压电场下进行的, 且作用时间短。因此, 即便湿热诱导对 PEEK 结晶度和极性产生了变化, 但在高压电场下, 几乎不影响 PEEK 材料的瞬间击穿。

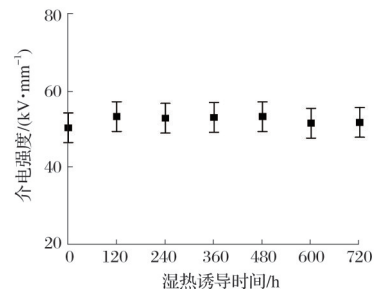


图 6 不同湿热诱导时间下样品的介电强度
Fig.6 Dielectric strength of samples under different damp heat induction times

3 结论

本文在 85 °C 和 85% 相对湿度环境中对 PEEK 片材进行了不同时间的湿热诱导实验。结果表明:不同时间的湿热作用对 PEEK 样品的结晶与电绝缘性能产生明显的诱导作用。XRD 测试结果表明,PEEK 样品的结晶度先缓慢增加,随后缓慢降低。结晶度从 54% 上升到至 58%, 然后降低至 52%。FTIR 测试结果表明,不同湿热诱导时间下 PEEK 红外光谱中未出现新的吸收峰,相对结晶度先增加后降低。随着湿热诱导时间的延长,PEEK 样品的断裂伸长率和断裂强度在 240 h 内逐渐上升,在 240 h 后缓慢降低。随着湿热诱导时间的增加, $\tan \delta$ 在低频率段 $10^2 \sim 10^3$ Hz 内的变化较为显著,尤其是湿热诱导时间 120 h 时, $\tan \delta$ 频域谱增加明显,且随着频率增加逐渐降低,超过 120 h 后 $\tan \delta$ 在频率段 $10^2 \sim 10^3$ Hz 内整体逐渐降低,且降低速率逐渐加快;介电常数在整个测试范围内变化规律与 $\tan \delta$ 的变化趋势一致。随着老化时间的增加,体积电阻率随着老化时间的增加先下降后上升;介电强度随着湿热诱导时间的增加基本保持不变,均维持在 50 kV/mm 上下。

参考文献

- [1] 杨坤, 李光宪, 杨其, 等. 溶剂诱导聚合物结晶的研究进展[J]. 高分子通报, 2006(3): 10-16.
- [2] SANJEEVA MURTHY N. Hydrogen bonding, mobility, and structural transitions in aliphatic polyamides[J]. Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics, 2006, 44(13): 1763-1906.
- [3] 杨始堃, 钟俊文, 陈玉君. 聚对苯二甲酸乙二酯溶剂诱导结晶 III. 溶剂对聚对苯二甲酸乙二酯玻璃化转变温度的影响[J]. 高分子学报, 1995(2): 176-181.
- [4] 杨始堃, 钟俊文. 聚对苯二甲酸乙二酯溶剂诱导结晶研究: II. 表层与断面结构形态形成的探讨[J]. 高分子学报, 1993(2): 195-200.
- [5] 朱诚身, 钟素娜. 尼龙 1010 的溶剂诱导结晶[J]. 高分子材料科学与工程, 1997(增刊 1): 84-87.
- [6] 邵海莹, 舒畅, 范仲勇. 溶剂诱导双酚 A 型聚碳酸酯快速结晶的研究[J]. 中国塑料, 2008, 22(1): 7-13.
- [7] 吴晓, 谷明刚, 张建明. 溶剂蒸气诱导非晶左旋聚乳酸薄膜结晶的原位光谱研究[J]. 青岛科技大学学报(自然科学版), 2012(5): 463-467.
- [8] 柯扬船, 朱志宁, 牟忠诚, 等. 聚芳醚酮膜的溶剂吸附与诱导结晶行为[J]. 功能高分子学报, 1998(1): 49-54.
- [9] ZHANG M, NING K, LI T, et al. Solvent-induced crystallization in polyetheretherketone exposed to methylene chloride: During solvent sorption or during solvent desorption[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1999, 74(14): 3376-3379.
- [10] 罗盟, 田小永, 尚俊凡, 等. 高性能纤维增强聚醚醚酮复合材料挤出成型增材制造现状与挑战[J]. 航空制造技术, 2020, 60(15): 39-47.
- [11] 聂家洪, 宋增瑞, 宁慧铭. 热塑性 CF/PEEK 复合材料非等温结晶动力学改进模型[J/OL]. 重庆大学学报, 1-8[2025-06-01]. <https://link.cnki.net/urlid/50.1044.N.20250518.1049.002>.
- [12] 原文慧. 基于结晶调控的热塑性 CF/PEEK 复合材料钻削构件力学性能增强研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2025.
- [13] 谭海容. 复杂条件下聚醚醚酮的辐照效应研究[D]. 上海: 中国科学院大学(中国科学院上海应用物理研究所), 2019.
- [14] 熊孟云, 石家宾, 杨洋, 等. 碳纤维增强聚醚醚酮的非等温结晶行为与力学性能[J]. 合成纤维, 2019(7): 20-27.
- [15] 张卫鹏. 硅灰石增强聚合物基复合材料制备及人工关节磨屑智能识别研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2024.
- [16] 刘新. 半结晶型联苯聚芳醚酮共聚物的合成、结晶行为及性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2023.
- [17] ZHU S, QIAN Y, HASSAN E A M, et al. Enhanced interfacial interactions by PEEK-grafting and coupling of acylated CNT for GF/PEEK composites[J]. Composites Communications, 2020, 18: 43-48.
- [18] WANG X K, HUANG Z G, LAI M L, et al. Highly enhancing the interfacial strength of CF/PEEK composites by introducing PAIK onto diazonium functionalized carbon fibers[J]. Applied Surface Science, 2020, 510: 145400.
- [19] BADEGHAISH W, WAGIH A, RASTOGI S, et al. Effect of high-temperature acid aging on microstructure and mechanical properties of PEEK[J]. Polymer Testing, 2024, 134: 108429.
- [20] JAILANI N A, JAMIL A H A, NOH M H, et al. The effect of ionic liquid on the solubility of polyetheretherketone (PEEK)[J]. Journal of Ionic Liquids, 2024, 4(2): 100103.
- [21] AHMAD J, MOHAMAD G N. Aging behavior of PEEK, PTFE, and PI insulation materials under thermal oxidative and humid conditions for aerospace applications[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2025, 142: e56858.
- [22] YAO S F, CHEN X T, YE H M. Investigation of structure and crystallization behavior of poly(butylene succinate) by fourier transform infrared spectroscopy[J]. The Journal of Physical Chemistry B, 2017, 121(40): 9476-9485.
- [23] CHENG S, WU Z, WUNDERLICH B. Glass-transition and melting behavior of poly(thio-1, 4-phenylene) [J]. Macromolecules, 1987, 20(11): 2802-2810.
- [24] 韩哲文, 季昌国, 林林, 等. 丁腈橡胶热空气和热油老化化学性能研究及服役寿命预测[J]. 绝缘材料, 2024, 57(12): 66-73.
- [25] ABDIHAMZEHKOLAEI A, AHAD M T, SIDDIQUE Z. Volume resistivity of viton polymer under thermal aging[J]. Polymers, 2021, 13(5): 773.
- [26] 程明亮, 张亚, 龚敏, 等. 交联工艺对 XLPE 电气性能影响研究[J]. 机电信息, 2024(21): 1-6.
- [27] KANG P H, LEE C, KIM K Y. Radiation and thermal effects on the dielectric relaxation properties of PEEK[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2007, 13(2): 250-256.
- [28] HE D X, GU J F, WANG W, et al. Research on mechanical and dielectric properties of XLPE cable under accelerated electrical-thermal aging[J]. Polymers for Advanced Technologies, 2017, 28(8): 1020-1029.
- [29] GENG P L, SONG J C, TIAN M Q, et al. Influence of thermal aging on AC leakage current in XLPE insulation[J]. AIP Advances, 2018, 8(2): 025115.
- [30] 杨寅明. 油纸不均匀热老化对变压器频域谱的影响研究[J]. 自动化仪表, 2022, 43(4): 16-21.
- [31] 雷清泉, 李盛涛. 关于工程电介质中几个经常涉及的问题与思考[J]. 高电压技术, 2015, 41(8): 2473-2480.