



铈盐对聚酰胺 6 热加工性能的影响研究

徐小艳, 刘可, 吕汪洋

(1. 浙江理工大学生物基纤维材料全国重点实验室, 杭州 310018; 2. 浙江省现代纺织技术创新中心, 浙江绍兴 312000)

摘要: 为研究铈盐对聚酰胺 6 (PA6) 结构与性能的影响, 采用溶液混合法制备了氯化铈质量分数介于 0.5%~10% 之间的 PA6 复合材料, 通过傅里叶红外光谱仪、X 射线衍射仪、差示扫描量热仪、热重分析仪和旋转流变仪研究材料酰胺基团配位作用、熔融结晶性能、热稳定性以及流变性能, 并分析氯化铈添加量对 PA6 性能的影响。结果表明: 铈离子与酰胺键形成配位作用, 氯化铈的加入阻碍了 PA6 的结晶行为, 导致 PA6 的结晶度从 45.6% 降至 36.2%; 随着氯化铈添加量的增加, PA6 的热稳定性降低, 分解温度从 362.2 °C 降低至 342.0 °C; 当氯化铈的质量分数 $\leq 1\%$ 时, PA6 复合材料的储能模量增加, 弹性提升, 而损耗模量、剪切黏度及扭矩减小, 熔体的流动性提高, 加工难度降低。该研究结果为镧系金属改性 PA6 材料的制备提供理论依据。

关键词: 聚酰胺 6; 氯化铈; 配位; 结晶; 热稳定性; 流变

中图分类号: TQ323.6; O614.33

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2026)03-0175-07

引文格式: 徐小艳, 刘可, 吕汪洋. 铈盐对聚酰胺 6 热加工性能的影响研究[J]. 浙江理工大学学报(自然科学), 2026, 55(2): 175-181.

Reference Format: XU Xiaoyan, LIU Ke, LÜ Wangyang. A study on the effect of cerium salt on the thermal processing properties of polyamide 6[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2026, 55(2): 175-181.

A study on the effect of cerium salt on the thermal processing properties of polyamide 6

XU Xiaoyan, LIU Ke, LÜ Wangyang

(1. State Key Laboratory of Bio-based Fiber Materials, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 2. Zhejiang Provincial Innovation Center of Advanced Textile Technology, Shaoxing 312000, China)

Abstract: To study the effect of cerium salt on the structure and properties of polyamide 6 (PA6), PA6 composites with cerium chloride mass fractions ranging from 0.5% to 10% were prepared by solution blending. The coordination effect of amide groups, melting and crystallization behavior, thermal stability, and rheological properties of the materials were investigated by Fourier transform infrared spectroscopy, X-ray diffraction, differential scanning calorimetry, thermogravimetric analysis, and rotational rheometer. The effect of cerium chloride addition on the properties of PA6 was analyzed. The results show that cerium ions form coordination with amide bonds. The addition of cerium chloride hinders the crystallization behavior of PA6, causing the crystallinity of PA6 to drop from 45.6% to 36.2%. With the increase of cerium chloride content, the thermal stability of PA6 decreases, and the decomposition temperature drops from 362.2 °C to 342.0 °C. When the mass fraction of cerium chloride is $\leq 1\%$, the storage modulus of PA6 composites increases, enhancing the elasticity of the material, while the loss modulus, shear viscosity and torque decrease, and the fluidity of the melt improves, reducing the processing difficulty. The research results provide a theoretical basis for the preparation of Lanthanide metal-modified PA6 materials.

Key words: PA6; cerium chloride; coordination; crystallization; thermal stability; rheology

收稿日期: 2025-03-11 网络出版日期: 2025-06-26

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(LDQ23E030001)

作者简介: 徐小艳(2000—), 女, 杭州人, 硕士研究生, 主要从事改性 PA6 性能分析方面的研究。

通信作者: 吕汪洋, E-mail: luwy@zstu.edu.cn

0 引言

聚酰胺6(PA6),具有良好的耐热性、耐磨性和机械性能,在纺织、电子和其他制造领域具有广泛的应用^[1]。PA6的分子链中含有酰胺基团,酰胺基团能够形成大量分子间氢键,因而对PA6的热稳定性、结晶行为、机械强度以及加工特性等产生重要影响^[2]。然而,氢键作用导致PA6熔融温度高、加工能耗大,且高温加工过程中易生成单体和环状低聚物,影响材料的稳定性。近年来,利用金属离子与高分子材料之间的络合反应来实现材料改性和功能材料开发,是材料领域的重要研究方向^[3-4]。研究表明,利用碱金属、碱土金属及过渡金属离子与PA6的酰胺基团配位,破坏分子链间氢键结构,能够降低熔融温度,改善加工性能^[5-8]。鲁圣军等^[9]采用氯化钙对PA6进行络合改性,制备了低熔点PA6,研究结果表明,Ca²⁺与氨基氮原子配位,破坏了PA6的氢键,降低了PA6的结晶能力。然而,传统金属盐改性PA6时存在熔体黏度升高、热稳定性下降等问题,限制了其工业化应用。镧系金属因其独特的4f电子构型及高配位能力,能够通过配位作用打破聚酰胺的氢键网络,实现加工性能与热稳定性的协同优化^[10]。艾丽等^[11]将自制的有机酸镧盐与聚酰胺66(PA66)混合,经纺丝制得PA66纤维,改善了PA66的抗黄变性和热氧稳定性。Sang等^[12]通过双螺杆挤出机制备了乙酸镧质量分数为0.08%~1%的PA66/乙酸镧共混物,研究结果表明,添加0.5%的乙酸镧时,共混物的加工性能得到有效改善,其在高频时的复数黏度低于纯PA66,而且相对于其他同类材料,实际生产该共混物能耗降低,且生产效率较高。然而,关于镧系金属对PA6的熔融结晶行为、热稳定性及流变性能的影响规律有待深入探究。

铈离子半径较大,有利于与PA6中的极性基团形成配位作用;同时,铈作为常见的镧系元素,相较于镧、铽等元素具有成本优势,这使得铈在工业化应用中更具经济可行性。本文以氯化铈为改性剂,采用溶液混合法制备不同质量比的氯化铈/PA6复合材料,研究铈离子与酰胺基团配位作用,分析氯化铈添加量对PA6的热稳定性、熔融结晶性及流变性能的影响,以研究铈盐对PA6材料结构与性能的影响。

1 实验部分

1.1 实验原料与仪器设备

实验原料:PA6切片(相对黏度为2.4)购于杭州聚合顺新材料股份有限公司;无水氯化铈(99.9%)、六氟异丙醇(色谱纯,≥99.5%)和无水乙醇(光谱纯,≥99.8%)均购于阿拉丁试剂(上海)有限公司。

仪器设备:热重分析仪(TG 209 F1 Libra,德国NETZSCH公司)、差示扫描量热仪(DSC214,德国NETZSCH公司)、旋转流变仪(MCR702e TwinDrive,奥地利Anton Paar公司)、傅里叶红外光谱仪(Nicolet is50,美国Thermo Fisher Scientific公司)和X射线衍射仪(Empyrean,荷兰PANalytical公司)。

1.2 氯化铈/PA6样品制备

将PA6切片溶解于六氟异丙醇溶液中,并加入溶解于无水乙醇的无水氯化铈;将氯化铈、PA6按质量比0.5/99.5、1/99.2/98.5/95、10/90充分混合搅拌均匀,脱除溶剂后得到的固体在真空烘箱中进行干燥处理(温度为105℃,真空度为-0.1MPa),得到氯化铈质量分数分别为0.5%、1%、2%、5%、10%的氯化铈/PA6样品,制备的样品根据其组成命名为Ce-0.5%、Ce-1%、Ce-2%、Ce-5%、Ce-10%。

1.3 测试与表征

1.3.1 热稳定性能测试

采用热重分析仪测试样品的热稳定性,称取5~8mg样品,置于氮气氛围中,气体流速设置为40mL/min,以10℃/min的速度从30℃升温至800℃。

1.3.2 熔融结晶性能测试

采用差示扫描量热仪测试样品的熔融结晶性能,称取5~8mg样品,置于氮气氛围中,气体流速设置为20mL/min,以10℃/min的升温速率从25℃升至250℃,在250℃恒温3min,再以10℃/min的降温速率从250℃降至25℃。

1.3.3 流变性能测试

采用旋转流变仪测试样品的流变性能,温度设置为260℃,置于氮气氛围中,描角频率范围为100~0.1rad/s,固定振幅为1%。

1.3.4 红外光谱测试

采用傅里叶红外光谱仪测试样品的红外光谱图,采用溴化钾压片法制备测试样品,光谱分辨率4cm⁻¹,测量波数为400~4000cm⁻¹,扫描32次。

1.3.5 X 射线衍射测试

采用 X 射线衍射仪测试样品的 X 射线衍射强度曲线, 测试条件为 Cu-K α 射线($\lambda=0.1541\text{ nm}$), Cu 靶, 扫描角范围为 $5^\circ\sim 80^\circ$ 。

2 结果与讨论

2.1 红外光谱分析

图 1 为不同质量比氯化铈/PA6 的红外光谱图, 由图 1 可知: 3302 cm^{-1} 处对应聚酰胺分子链酰胺基团上 N-H 的伸缩振动吸收峰, 1640 cm^{-1} 处对应 C=O 的伸缩振动吸收峰, 1539 cm^{-1} 处对应 C-N 的伸缩振动吸收峰; 引入氯化铈后, PA6 的 C=O 伸缩振动吸收峰强度增加, 而 N-H 伸缩振动吸收峰的强度减弱, 其原因可能是铈离子破坏了 PA6 分子链间通过 N-H \cdots O=C 氢键形成的稳定结构, 削弱了原有氢键的强度, 使 N-H 基团的伸缩振动强度减弱, 且铈离子可能与羰基氧发生配位, 通过电子相互作用拉低 C=O 键的电子云密度, 使偶极矩增大, 从而增强其红外吸收峰强度; 酰胺带红外特征吸收峰发生变化, 表明铈离子与酰胺键发生配位作用^[13-14]。

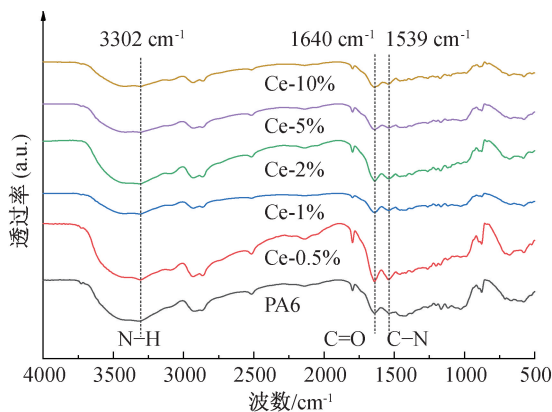


图 1 不同质量比氯化铈/PA6 的红外光谱图

2.2 X 射线衍射(XRD)分析

图 2 为不同质量比氯化铈/PA6 的 XRD 谱图, 由图 2 可知: PA6 的主要衍射角为 20.0° 和 23.8° , 该衍射峰位置对应于典型的 α 晶型特征峰, 表明材料的晶粒主要以 α 晶型存在; 当氯化铈的添加质量分数为 0.5% 时, 样品的衍射峰强度与 PA6 的衍射峰强度几乎相等; 随着氯化铈添加量的增加, 样品的衍射峰强度逐渐减弱, 表明样品的结晶度降低。

表 1 为不同质量比氯化铈/PA6 的 XRD 数据, 采用基于衍射峰的面积比例法计算结晶度。由表 1 可知: 随着氯化铈添加量的增加, PA6 的结晶度逐渐下降, 氯化铈的引入干扰了 PA6 分子链的规整排

列, 降低了分子链的规整度, 阻碍了基体 PA6 有序排列形成晶体的行为, 导致结晶度降低。

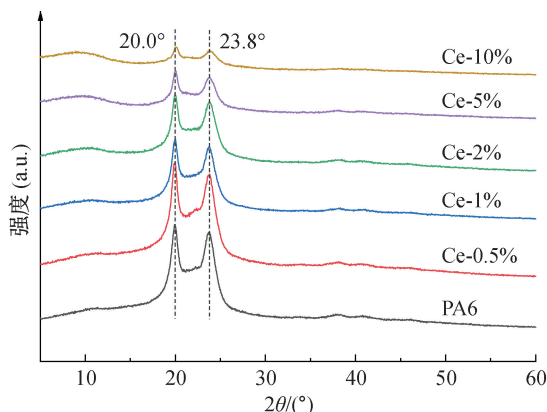


图 2 不同质量比氯化铈/PA6 的 XRD 图

表 1 不同质量比氯化铈/PA6 的 XRD 数据

样品	积分总面积	结晶峰积分面积	结晶度/%
PA6	36216	16913	46.7
Ce-0.5%	35381	16346	46.2
Ce-1%	29030	12454	42.9
Ce-2%	25191	10152	40.3
Ce-5%	12178	4311	35.4
Ce-10%	6209	1956	31.5

注: 结晶度 = 结晶峰积分面积 / 积分总面积 $\times 100\%$ 。

2.3 熔融结晶性能

熔融结晶行为是决定材料在纺丝过程中加工性能的关键因素之一。为探究氯化铈添加量对 PA6 熔融结晶性能的影响, 对样品进行热分析。当晶相、非晶相和熔点达到热力学平衡时, 结晶度的计算公式为:

$$X_c/\% = \frac{\Delta H_m}{(1-\varphi)\Delta H_m^0} \times 100 \quad (1)$$

其中: X_c 为结晶度, %; φ 为添加氯化铈的质量分数; ΔH_m 为熔融焓; ΔH_m^0 为 PA6 结晶度达到 100% 时的熔融焓^[15], 取 190 J/g 。

图 3 为不同质量比氯化铈/PA6 的升温熔融和降温结晶曲线, 图 3 显示: 随着氯化铈添加量的增加, PA6 熔融温度逐渐降低; 随着氯化铈添加量的增加, PA6 结晶温度逐渐降低。因此, 氯化铈的引入, 对 PA6 的熔融结晶过程产生影响。

表 2 为不同质量比氯化铈/PA6 的 DSC 数据, 表 2 显示: PA6 的熔融温度和结晶温度分别为 $221.4\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $190.1\text{ }^\circ\text{C}$ 。当氯化铈的添加质量分数 $\leq 1\%$ 时, 样品的熔融温度和结晶温度下降 $1.9\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $2.7\text{ }^\circ\text{C}$, 氯化铈/PA6 能保持良好的结晶性能; 当氯化铈的添加质量分数 $\geq 2\%$ 时, 随着添加量的增加,

熔融温度从 219.0 °C 降低至 204.5 °C, 结晶温度从 182.8 °C 降低至 155.4 °C, 均出现较大幅度的降低。由于氯化铈的加入会削弱 PA6 氢键间作用力, 从而降低其熔融温度; 并且氯化铈与 PA6 分子链的络合配位作用会限制降温过程 PA6 结晶速率, 导致结晶

温度降低。PA6 的结晶度为 45.6%, 随着氯化铈添加量的增加, 样品的结晶度逐渐降低, 当添加质量分数为 10% 时, Ce-10% 结晶度降低至 36.2%, 其可能原因是氯化铈的引入破坏了分子链的规整排列, 阻碍晶体的生长, 导致晶体结晶度降低。

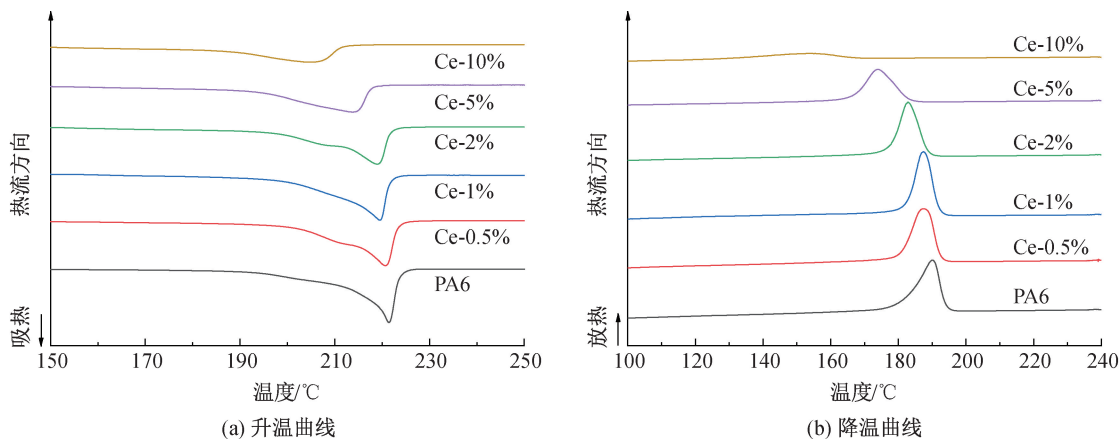


图 3 不同质量比氯化铈/PA6 的升温熔融和降温结晶曲线

表 2 不同质量比氯化铈/PA6 的 DSC 数据

样品	熔融温度/°C	结晶温度/°C	熔融焓/(J·g ⁻¹)	结晶焓/(J·g ⁻¹)	结晶度/%
PA6	221.4	190.1	86.6	62.2	45.6
Ce-0.5%	220.7	187.3	83.6	62.3	44.2
Ce-1%	219.5	187.4	81.3	62.3	43.2
Ce-2%	219.0	182.8	80.6	60.4	43.3
Ce-5%	213.7	170.4	76.1	52.6	42.1
Ce-10%	204.5	155.4	62.0	26.7	36.2

2.4 热稳定性能

氯化铈对 PA6 材料的热稳定性产生一定的影响。图 4 为不同质量比氯化铈/PA6 的热重曲线, 由图 4 可知: PA6 只有 1 个失重阶段, 而氯化铈/PA6 样品会产生 2 个失重阶段。氯化铈/PA6

在 ~140 °C 失重, 是由于氯化铈暴露在空气中易吸湿, 形成结晶水合物, 而干燥处理的温度并不能完全脱除其中的水分, 当温度升高至 ~140 °C 时, 水合氯化铈受热脱水, 从而产生重量损失^[16]。

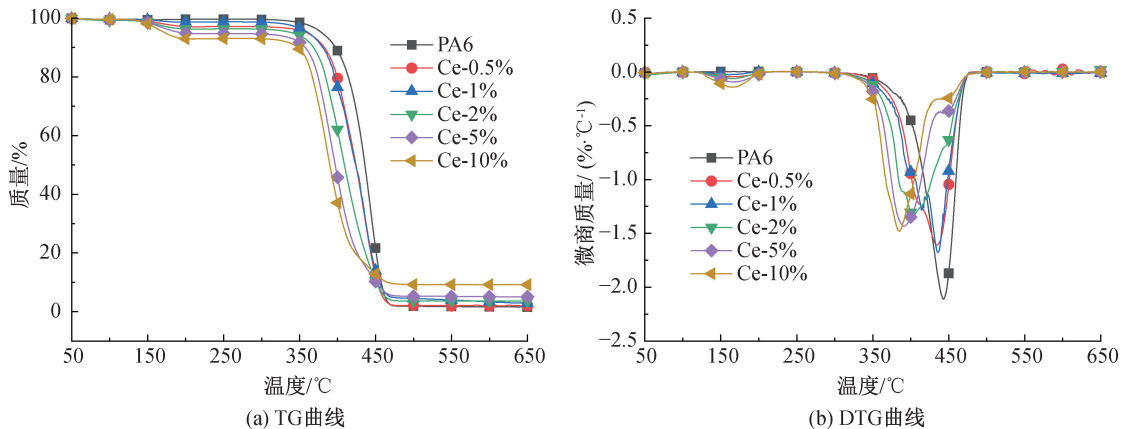


图 4 不同质量比氯化铈/PA6 的热重曲线

表 3 为不同质量比氯化铈/PA6 的热重分析数据, 由表 3 可知: 当氯化铈添加质量分数为 0.5%、1%、2%、5%、10% 的样品初始失重温度

分别为 358.6、350.3、348.7、344.3 °C 和 342.0 °C, 降解均早于 PA6 的 362.2 °C 发生; 随着氯化铈添加量的增加, PA6 的初始失重温度和终止失

重温度均不断下降, 这表明氯化铈的加入, 促进了 PA6 的热分解, 降低样品的热稳定性, 这可能是由于铈离子与酰胺键的配位会降低热分解所需的活化能, 从而使酰胺键更容易发生断裂, 导

致热分解温度提前; 样品残炭量从 1.16% 增加至 8.96%, 残炭量的增加是由于 PA6 中氯化铈的添加量增加导致的, 氯化铈的引入并不会提高 PA6 的成炭性能。

表 3 不同质量比氯化铈/PA6 的热重分析数据

样品	初始失重温度/°C	最大失重速率温度/°C	终止失重温度/°C	残炭量/%
PA6	362.2	443.3	464.6	1.16
Ce-0.5%	358.6	430.5	461.7	2.03
Ce-1%	350.3	429.9	462.4	2.09
Ce-2%	348.7	402.5	461.0	3.75
Ce-5%	344.3	389.9	459.8	4.79
Ce-10%	342.0	382.9	457.3	8.96

2.5 动态流变分析

2.5.1 储能模量和损耗模量

储能模量 G' 和损耗模量 G'' 分别用于表征材料的弹性性能和黏性性能。图 5 为不同质量比氯化铈/PA6 的储能模量和损耗模量变化趋势图, 由图 5 可知: 样品的 G' 和 G'' 随着角频率的增加而增大, 这是由于角频率的增加, 导致样品的弛豫时间相对缩短, 并且样品的 G'' 大于 G' , 表明材料表现出显著的黏弹性特征, 其流变行为更接近于液体。图 5(a) 显示: 当氯化铈的添加质量分数 $\geq 1\%$ 时, 样品的 G' 随着添加量的增加而增大, 这可能归因于铈离子和分

子链之间存在相互作用, 限制分子链运动, 从而使熔体的刚性和强度得到提升。图 5(b) 显示: PA6 和不同质量比氯化铈/PA6 的 G'' 随角频率增加而增大, 当添加质量分数 $\leq 1\%$ 时, 样品的 G'' 随着添加量的增加而减小; 当添加质量分数 $\geq 2\%$ 时, 样品的 G'' 随着添加量的增加而增大。PA6 分子链中存在大量氢键, 当氯化铈添加量较低 ($\leq 1\%$) 时, 铈离子与酰胺键之间的相互作用会破坏分子间氢键, 减少分子链的缠结增加流动性, 导致 G'' 降低; 而当氯化铈添加量较高 ($\geq 2\%$) 时, 大量的氯化铈可能会聚集在一起, 形成具有不同动态机械特性的区域, 从而导致 G'' 增加。

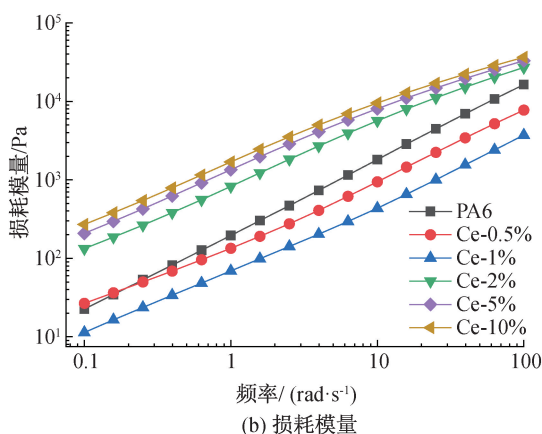
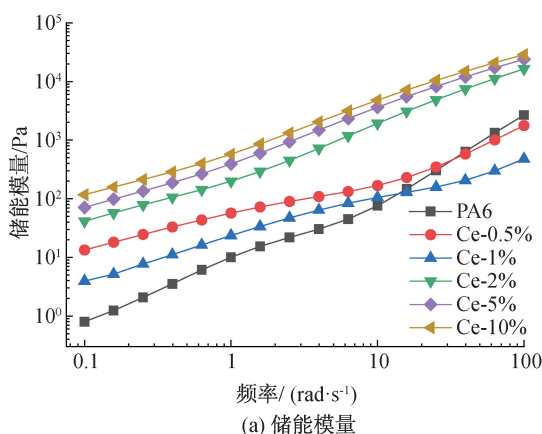


图 5 不同质量比氯化铈/PA6 的储能模量和损耗模量变化趋势

2.5.2 剪切黏度

图 6 为不同质量比氯化铈/PA6 的剪切黏度随剪切速率的变化曲线, 由图 6 可知: 随着剪切速率的增加, 不同氯化铈添加量的样品的剪切黏度逐渐下降。这是因为随着剪切速率增加, 大分子链间的部分缠结点被破坏, 缠结点密度降低, 导致剪切黏度减小^[17]。氯化铈的添加量对熔体的剪切速率有较强的影响。当添加质量分数 $\leq 1\%$ 时, 样品的剪切黏度随着添加量的增加而减小; 当添加质量分数 $\geq 2\%$

时, 样品的剪切黏度随着添加量的增加而增大。其原因是当氯化铈添加量较低 ($\leq 1\%$) 时, 分子链间的氢键被破坏, 分子链的流动性增加, 导致剪切黏度减小; 当氯化铈添加量较高 ($\geq 2\%$) 时, 团聚或者相分离的发生, 使氯化铈在 PA6 基体中分散不均匀, 导致剪切黏度增大。

2.5.3 损耗因子

损耗因子 $\tan \delta$ 是表征高分子材料黏弹性行为的物理量, 其定义式为:

$$\tan \delta = \frac{G''(\omega)}{G'(\omega)} \quad (2)$$

其中: ω 为角频率。

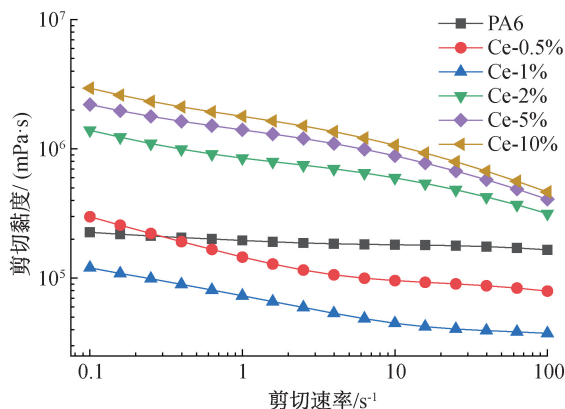


图6 不同质量比氯化铈/PA6的剪切黏度随剪切速率变化曲线

图7为不同质量比氯化铈/PA6的损耗因子 $\tan\delta$ 随频率的变化曲线,由图7可知: $\tan\delta$ 均大于1,表明在测试频率范围内,PA6及不同氯化铈添加量的PA6均以黏性响应为主导。随着角频率的增大, $\tan\delta$ 先趋于平缓,后出现先增大后减小的趋势;与不同质量比氯化铈/PA6的 $\tan\delta$ 相比,PA6的 $\tan\delta$ 更大,说明加入氯化铈会降低PA6的 $\tan\delta$,表明添加氯化铈会降低PA6的黏性响应,从而增加材料的黏度损失;当氯化铈的添加质量分数 $\geq 2\%$ 时,样品的 $\tan\delta$ 随着添加量的增大而减小,损耗模量和储能模量相差的数量级减小。这是因为氯化铈的引入大幅提升了材料的弹性性能,同时黏性性能仅略有提升,从而提高材料的整体刚性,这一现象与储能模量和损耗模量随着氯化铈添加量的增加而增大的趋势相一致。

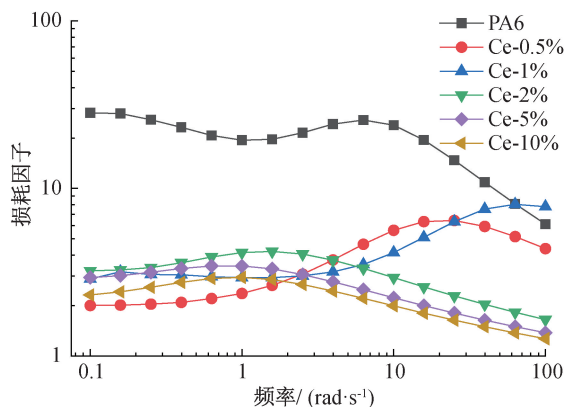


图7 不同质量比氯化铈/PA6的损耗因子随频率变化曲线

2.5.4 扭矩

图8为不同质量比氯化铈/PA6的扭矩随频率的变化曲线,由图8可知:随着角频率的增大,熔体

流动速率加快,从而使更多分子链运动,进而导致扭矩增大。当氯化铈的添加质量分数 $\leq 1\%$ 时,样品的扭矩随添加量的增加而减小;当添加质量分数 $\geq 2\%$ 时,样品的扭矩随添加量的增加而增大。这是因为当氯化铈的添加量较低($\leq 1\%$)时,分子链间的氢键被破坏,使得分子链的流动性增加,扭矩减小;当氯化铈的添加量较高($\geq 2\%$)时,氯化铈在PA6基体中形成聚集,从而增加材料内部的阻力,导致扭矩增加。

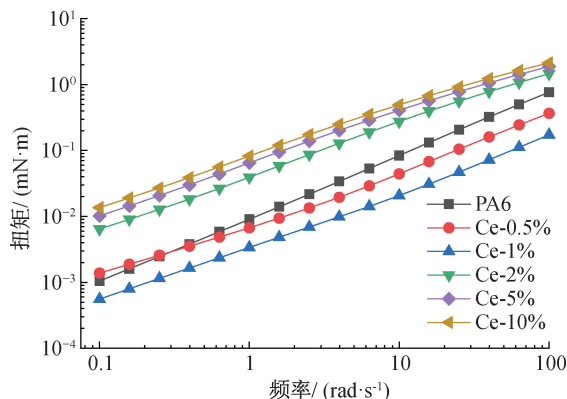


图8 不同质量比氯化铈/PA6的扭矩随频率变化曲线

3 结论

本文采用溶液混合法制备了不同氯化铈和PA6质量比的复合材料,分析了铈离子与酰胺基团之间的相互作用,并对材料的热稳定性、熔融结晶行为以及动态流变特性进行分析,主要研究结论如下:

a) 铈离子破坏PA6分子链间的氢键,并与酰胺基团发生配位作用。氯化铈的引入阻碍PA6的结晶,但PA6的晶型保持不变,主要以 α 晶型存在;随着氯化铈添加量的增加,结晶度降低,因氯化铈阻碍分子链规整排列,高添加量下发生团聚,加剧PA6非晶化趋势。

b) 随着氯化铈添加量的增加,样品的初始热分解温度从 $362.2\text{ }^\circ\text{C}$ 降低至 $342.0\text{ }^\circ\text{C}$,铈离子促进PA6的热分解,降低PA6的热稳定性。

c) 当氯化铈的添加质量分数 $\leq 1\%$ 时,铈离子削弱氢键作用,使得PA6的熔体黏度降低,从而提升加工流动性,更适用于注塑、纺丝等动态加工工艺;当氯化铈的添加质量分数 $\geq 2\%$ 时,因团聚效应导致PA6的储能模量、损耗模量、剪切黏度和扭矩显著增加,使得熔体的流动性变差。

将镧系金属的最佳添加质量分数应控制在 1% 以内,可以有效调控PA6的热加工性能,在改善PA6的流动性的同时,赋予其良好的熔融结晶性和

热稳定性。对于高添加量的镧系金属,可通过有机配体修饰降低表面能,改善其与 PA6 的相容性,从而提升镧系金属在材料中的分散性,以探究高添加量镧系金属对 PA6 性能的调控潜力。

参考文献:

- [1] Wang H, Cao P S, Zhu S L, et al. Preparation of bamboo charcoal-reinforced polyamide 6 composites modified with diverse additives; Synergy and interface improvement [J]. *Industrial Crops and Products*, 2024, 222: 119851.
- [2] Demirel T, Tunçel K Ş, Karacan I. An evaluation of the beneficial effects of polyamide 6's thermal stabilization by ferric chloride complexation as a novel carbon fiber precursor [J]. *Fibers and Polymers*, 2024, 25(4): 1301-1312.
- [3] Wei Y, Luo Y, Wang Z Z, et al. Optimization of polyamide 1012 powder for laser powder bed fusion via complexation with metal ions[J]. *Additive Manufacturing*, 2024, 79: 103917.
- [4] 姜超, 安晶晶, 彭中梁, 等. 金属离子与聚酰胺相互作用的研究进展[J]. *塑料*, 2016, 45(4): 81-84, 112.
- [5] Xu S H, Fang Y Q, Chen Z Y, et al. Impact of lithium chloride on the performance of wood fiber reinforced polyamide 6/high-density polyethylene blend composites[J]. *Polymer Composites*, 2019, 40(12): 4608-4618.
- [6] Mohammad A, Köhler T, Biswas S, et al. A flexible solid-state ionic polymer electrolyte for application in aluminum batteries [J]. *ACS Applied Energy Materials*, 2023, 6(5): 2914-2923.
- [7] Esmaeili N, Kandola B K, Ebdon J R, et al. Comparison of the effects of antimony trioxide and zinc, calcium and copper stannates on the thermal degradation of polyamide-6, 6 [J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2023, 214: 110402.
- [8] 陈雪莉, 黄莉茜, 李睿, 等. Ca^{2+} 络合作用对生物基 PA56 纤维结构与性能的影响[J]. *东华大学学报(自然科学版)*, 2023, 49(6): 53-58.
- [9] 鲁圣军, 甘华华, 何敏, 等. PA6/ CaCl_2 复合材料络合配位的红外研究[J]. *塑料工业*, 2012, 40(5): 65-67.
- [10] 刘宁宁. 稀土热稳定剂的制备及其在聚酰胺纺丝过程中的应用研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2019: 8-45.
- [11] 艾丽, 徐路燕, 邓智文, 等. 有机酸镧盐的合成及其改性 PA66 的性能研究[J]. *合成纤维工业*, 2015, 38(6): 9-12.
- [12] Sang X X, Zhang J N, Ke Y C, et al. The influence of rare earth ions on the rheological behavior of polyamide[J]. *Chinese Journal of Polymer Science*, 2015, 33(10): 1453-1461.
- [13] 段锦华, 李海利, 赵鑫鹏, 等. 尼龙 6/金属盐复合材料的制备及性能研究[J]. *精细化工中间体*, 2017, 47(3): 49-56.
- [14] Zhou C, Wang Y M, Wang H J, et al. Effect of CaCl_2 surface modification on the durability of PA6/PU fabrics[J]. *Fibers and Polymers*, 2025, 26(4): 1587-1596.
- [15] 俞晓, 杨勉, 张顺花, 等. 三聚氰胺氰尿酸阻燃改性聚酰胺 6 的流变性能[J]. *现代纺织技术*, 2024, 32(9): 48-55.
- [16] Xue S F, Wu W Y, Bian X, et al. Dehydration, hydrolysis and oxidation of cerium chloride heptahydrate in air atmosphere [J]. *Journal of Rare Earths*, 2017, 35(11): 1156-1163.
- [17] Liao H R, Yu T, Li Y. Rheological properties of graphene oxide/polyamide 6 composites[J]. *Polymer Composites*, 2023, 44(12): 8683-8692.

(责任编辑:张会巍)