http://pmse.scu.edu.cn

不同老化方法对生物基聚酰胺 56 结构与性能的影响

叶勒扎提·阿依提别克[1], 李鸿环[1], 赵元博[2], 阿不来提·阿不力米提[1], 买买提江·依米提[1]

(1. 新疆大学 化工学院,新疆 乌鲁木齐 830046; 2. 凯赛(乌苏)生物材料有限公司,新疆 乌苏 834700)

摘要: 为探究生物基聚酰胺 56(PA56)试样室内人工加速老化与户外暴晒老化的老化规律,采用热氧光老化和户外暴晒老化方法研究了老化时间对 PA56 试样结构及性能的影响。结果表明,PA56 经 2 种老化方法老化后,拉伸强度均有不同程度的下降;从红外和 X 射线粉末衍射图谱来看,经老化后,样品的化学结构没有发生变化,没有新的吸收峰和新晶型出现;随着老化时间的延长,PA56 的结晶度(X_c)逐渐减小,C═O 含量逐渐增加,户外暴晒老化 60 d 和热氧光老化 30 d 样品的 X_c 比未老化样品分别降低了 1.1% 和 0.8%,C═O 含量相较于老化前的 2.42% 分别提高到了 4.05% 和 3.76%。对比 2 种老化方法的力学性能随老化时间的变化,发现热氧光老化速率近似为户外暴晒老化的 3 倍。

关键词: 生物基聚酰胺 56;热氧光老化;户外暴晒;结晶;力学性能

中图分类号: TQ323.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7555(2025)09-0083-09

聚酰胺(PA)是主链上含有重复酰胺基团(—CONH—)的聚合物的总称,是常见的工程塑料[1,2]。目前市场上 99% 的聚酰胺产品的单体来源于石化产品,而我国的石油资源严重不足,并且石油基单体在生产过程中伴随着大量的碳排放,这导致了 CO_2 的增加和全球变暖[3]。因此,对可以生物降解、环保和可持续替代品的需求一直在增加。目前已经商品化的生物基聚酰胺产品中,主要有 PA11,PA1010,PA610,PA410 等[4]。可降解生物基聚酰胺的使用和改进对缓解石油资源的压力,减少碳排放,实现“碳中和”具有重要意义,并且迎合国家政策,满足市场的需求。虽然当前生物基聚酰胺的产量不足聚酰胺总量的 1%,但生物基聚酰胺的研究和产业化已吸引了杜邦、巴斯夫、阿科玛、赢创、广东金发、上海凯赛等国内外传统化工巨头的关注[5]。其中,上海凯赛研发的生物基聚酰胺 56,产量为 10 万吨/年,与其他聚酰胺相比,该材料具有优异的性能,是一种具有较大推广价值的生物基聚酰胺。

生物基聚酰胺 56,俗称尼龙 56(Nylon 56),具有优异的热性能、力学性能、耐磨性,可作为工程塑料使用,用于汽车、电子电气、扎带、薄膜等众多工程材料类下游产业[6]。但尼龙材料的结构中含有强极性的酰胺基团,使其易受氧气、温度、紫外光等外界因素的影响发生断裂降解,力学性能显著下降,出现变色变脆等现象[7,8],导致材料老化,限制了其在各个领域的应用。

截至目前,国内外学者对部分尼龙材料进行了老化研究[9,13],而对生物基聚酰胺 56 的老化缺乏认识。鉴于此,本文采用热氧光和户外暴晒老化,研究了老化方法对纯生物基聚酰胺 56 材料结构与性能的影响,通过 FT-IR,SEM,XRD,DSC 和 XPS 对该材料的老化规律和内在机理进行了研究,为生物基聚酰胺 56 工程塑料在干热环境中的使用提供了技术支持。

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2025.0172
收稿日期: 2024-09-12
基金项目: 新疆维吾尔自治区重点研发项目(2023B01003):
通讯联系人: 买买提江·依米提, 主要从事高分子材料在干热环境中老化与服役寿命规律研究, E-mail: mmtj10@sirna.cm

1 实验部分

1.1 原料与仪器

生物基聚酰胺 56(PA56):牌号 E-2260,密度为 0.63 g/cm^3,凯赛(乌苏)生物材料有限公司,粒料。

注塑成型机:XL-400VI,宁波高新协力机申液有限公司;万能试验机:ETM104B,深圳万测试验设备有限公司;电子冲击试验机:XJJD-50,承德金建检测仪器有限公司;紫外老化试验箱:UVTest,美国 Atlas 公司;傅里叶变换红外光谱仪:VERTEX 70 RAMI,德国 Bruker 公司;高分辨场发射扫描电镜:SU8220,日本日立公司;X 射线衍射仪:D8 advance,德国 Bruker 公司;差示扫描量热仪:DSC300,德国耐驰仪器制造有限公司;X 射线光电子能谱仪:K-Alpha,美国 Thermo Scientific。

1.2 标准样条的制备及老化实验

1.2.1 标准样条的制备:将 PA56 粒料放入鼓风干燥箱中,在 80 ℃干燥 12 h,将干燥后的粒料通过注塑成型机注塑成标准样条。注塑条件:喷嘴温度为 230 ℃,一段温度 265 ℃,二段温度 270 ℃,注射压力 9 MPa,冷却时间 5 s。将注塑得到的标准样条用于户外暴晒和热氧光老化实验。

1.2.2 户外暴晒老化实验:该试验在吐鲁番自然环境试验研究中心暴晒场进行。实验于 2024 年 4 月 19 日投样,到 2024 年 6 月 17 日结束,总周期 60 d,气象数据如 Tab.1 所示。PA56 样条置于样品箱,用夹具固定在架子上,样品箱正面朝南,倾斜角度为 45°,分别在 0 d,10 d,20 d,30 d,40 d,50 d 和 60 d 取样,进行性能测试。

Tab. 1 Meteorological data of Turpan

Time	Mean sunshine/h	Mean maximum temperature/℃	Average humidity/%	Ultraviolet radiation/(MJ · m^{-2})
04.19~04.28	9.86	31.53	24.04	0.64
04.29~05.08	10.67	35.53	19.51	0.71
05.09~05.18	8.19	40.27	25.14	0.68
05.19~05.28	7.41	38.30	40.78	0.69
05.29~06.07	10.28	37.22	25.54	0.86
05.08~06.17	10.09	41.82	34.00	0.92

1.2.3 热氧光老化实验:根据国标 GB/T 14522-2008,将 PA56 标准样条放入老化试验箱中进行为期 30 d 的室内热氧光老化试验,分别在 0 d,5 d,10 d,15 d,20 d 和 30 d 取样,并进行性能测定。试验条件为空气气氛,每个周期包括 4 h 紫外老化(温度为 60 ℃),4 h 冷凝(温度为 50 ℃)。紫外光灯选用功率为 40 W 的 UVA-340 灯管,辐射强度设为 0.68 W/m^2。

1.3 测试与表征

1.3.1 力学性能测试:拉伸性能测试参照国标 GB/T 1040.2—2006,哑铃状拉伸样条,在电子万能材料拉伸仪上进行,以 50 mm/min 的拉伸速度拉伸测试样条,每个试样进行 5 次平行试验,取数据的平均值。

冲击强度测试根据国标 GB/T 1043.2—2018 进行,用电子简支梁冲击机对材料在室温进行缺口冲击强度的测试,每个样品测定 5 次取平均值。冲击速度为 2.9 m/s,量程为 5 J,样条长 80 mm,宽度 10 mm,厚度 4 mm。

1.3.2 FT-IR 分析:采用傅里叶变换红外光谱仪分析 PA56 样品的化学结构变化。扫描范围 500~4000 cm^{-1},分辨率为 4 cm^{-1},扫描次数为 16。

1.3.3 SEM 分析:使用高分辨场发射扫描电镜观察 PA56 样品老化前后拉伸断裂面的形貌。样品在测试前需喷金处理,测试电压为 3 kV。

1.3.4 XRD 分析:利用 X 射线衍射仪分析 PA56 样品的结构变化。采用 Cu 靶,电压 40 kV,扫描范围 5°~40°,扫描速度 5(°)/min。

1.3.5 DSC 分析:采用差示扫描量热仪进行 PA56 样品的熔融和结晶性能测试。称取约 10 mg 样品放入铝坩埚中,将铝坩埚盖紧密压实。在氮气氛围下,从 30 ℃升温至 300 ℃,之后恒温 5 min,消除热历史,然后降温至 30 ℃,再次升温至 300 ℃,记录整个过程中的热流变化,升降温速度为 10 ℃/min。结晶度

(X_c)计算方法见式(1)

$$X_c=\frac{\Delta H_m}{\Delta H_m^0} \quad (1)$$

式中:ΔH_m——测试样品的熔融焓,J/g;ΔH_m^0——PA56 完全结晶时的标准熔融焓,取值为 188.7 J/g[14]。

1.3.6 XPS 分析:采用 X 射线光电子能谱仪分析 PA56 样品表面元素的变化。激发源为 Al Kα,电压 12 kV,电流 6 mA。对 C 1s 进行分峰处理,并通过 C 1s(284.8 eV)进行定标。

2　结果与讨论

2.1　力学性能分析

Tab.2 是不同方法老化前后的力学性能,Fig.1 是 2 种方法老化的拉伸强度保留率和缺口冲击强度保留率随老化时间的变化曲线图。从图和表中可以看出,未经老化的 PA56 的拉伸强度为 99.88 MPa,随着老化时间的延长,2 种方法老化的拉伸强度均有明显下降的趋势。户外暴晒老化的 PA56 样品拉伸强度在前 30 d 下降幅度不是很明显,当老化时间达到 40 d 时,PA56 的拉伸强度迅速下降,从 90.03 MPa 降到了 45.01 MPa,跟未老化 PA56 的拉伸强度比较,下降幅度达到了 45.06%。老化 60 d 后,拉伸强度保留率为 27.71%。在老化 10 d 时,拉伸强度略有提升,这是由于材料表面受到温度和紫外光高强度辐照的影响,在老化初期分子链发生交联反应,使 PA56 的拉伸强度提高。缺口冲击强度随老化时间的延长呈现逐渐下降的趋势。未老化 PA56 的缺口冲击强度为 2.94 kJ/m^2,户外暴晒老化 60 d 后,缺口冲击强度下降到了 1.15 kJ/m^2,冲击强度保留率为 39.11%。热氧光老化 PA56 的拉伸强度整体随着老化时间的延长逐渐下降。在老化 5 d 时,拉伸强度从 99.88 MPa 骤降到了 69.01 MPa,下降幅度达到 30.91%。当老化时间为 15 d 和 30 d 时,拉伸强度保留率分别为 38.96% 和 27.59%。结合 Fig.1 和 Tab.2 可以看出,热氧光老化 PA56 的缺口冲击强度随着老化时间的延长而增加。缺口冲击强度从未老化时的 2.94 kJ/m^2 达到老化 30 d 后的 6.55 kJ/m^2,提高了 3.61 kJ/m^2,缺口冲击强度保留率为 222.79%。这是因为 PA56 是吸水材料,热氧光老化有湿度这个因素,水分的存在会破坏 PA56 中氨基与羰基基团间的氢键,导致 PA56 链间的内应力减小,结晶度降低,结晶度越低,无定形部分含量就越高,使材料变得更加柔韧和耐冲击[15,16]。所以,老化时间越长,水含量越多,缺口冲击强度随着吸水含量的增加而增大。值得注意的是,对比 2 种老化方法,发现热氧光老化对 PA56 的老化效果更加明显。以拉伸强度保留率 50% 为 PA56 的失效指标,PA56 户外暴晒老化需要 35 d 左右,热氧光老化则需要 12 d 左右,经过简单换算可知,热氧光老化速率近似为户外暴晒老化的 3 倍。

Tab. 2　Mechanical properties before and after aging by different methods

Aging method	Sample name	Aging time/d	Tensile strength/MPa	Impact strength/(kJ·m^{-2})
Unaged	PA56-0 d		99.88	2.94
Outdoor exposure to aging(OE)	PA56-OE-10 d	10	102.75	2.04
	PA56-OE-20 d	20	95.38	1.98
	PA56-OE-30 d	30	90.03	1.80
	PA56-OE-40 d	40	45.01	1.66
	PA56-OE-50 d	50	35.28	1.41
Thermal oxygen photoaging(TOP)	PA56-OE-60 d	60	27.68	1.15
	PA56-TOP-5 d	5	69.01	3.39
	PA56-TOP-10 d	10	54.15	4.59
	PA56-TOP-15 d	15	38.91	5.56
	PA56-TOP-20 d	20	38.11	6.27
	PA56-TOP-30 d	30	27.56	6.55

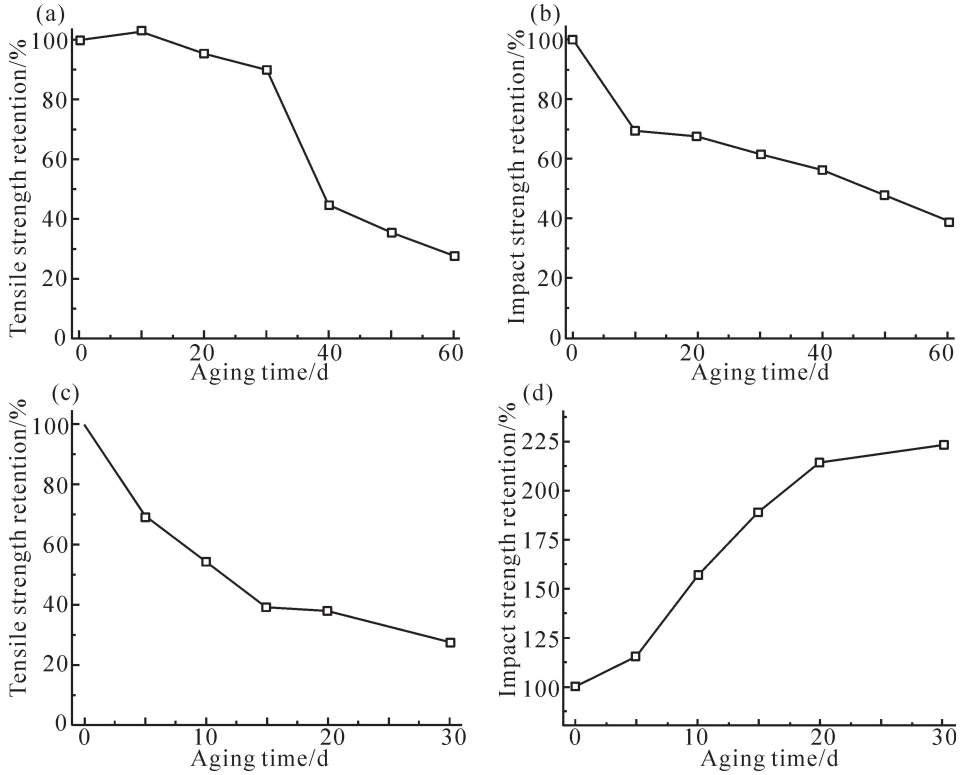


Fig. 1 Mechanical properties of PA56 samples by different aging methods: (a) tensile strength retention of aging by outdoor exposure; (b) impact strength retention rate of aging by outdoor exposure; (c) tensile strength retention of thermal oxygen photoaging; (d) impact strength retention of thermal oxygen photoaging

2.2 FT-IR 分析

Fig.2 为 PA56 未老化及分别采用热氧光老化 30 d 和户外暴晒老化 60 d 样品的红外谱图。从图中可以看出,PA56 在 3295 cm^{-1} 和 3086 cm^{-1} 处的特征峰与 N—H 的伸缩振动有关,2934 cm^{-1} 和 2863 cm^{-1} 的吸收峰对应—CH_2—基团的不对称和对称伸缩振动,1630 cm^{-1} 的峰对应于 C ═O 的伸缩振动,1543 cm^{-1} 处的峰归因于 C—N 伸缩振动和酰胺键中 N—H 的弯曲振动[17]。对比图谱来看,经不同老化方法老化后,样品的化学结构没有发生变化,没有新的吸收峰出现。只是未老化样品在 1630 cm^{-1} 和 1543 cm^{-1} 处的吸收峰经老化后往高波数方向位移,发生了蓝移现象。同时,此处 C ═O 和 N—H 吸收峰的强度发生了明显变化,热氧光老化后样品的峰强度增加。这是由于 PA56 吸收的水分与酰胺键发生了水解反应[17]。

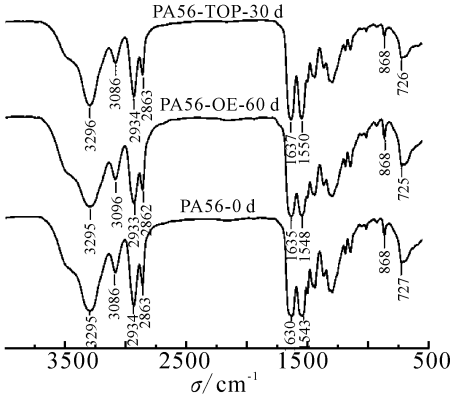


Fig. 2 Infrared spectra of PA56 after aging by different aging methods

2.3 SEM 分析

Fig.3 为 PA56 样品采用不同老化方法老化后的拉伸断面形貌图。其中,Fig.3(a)为 PA56 未老化时的形貌图,Fig.3(b)和 Fig.3(c)分别为户外暴晒老化 60 d 与热氧光老化 30 d 的断面形貌图。可以看出,未老化 PA56 的断面比较粗糙,有明显的丝状结构,具有韧性断裂的特征。经过 2 种方法老化后,PA56 的断面出现很明显的变化,出现无规则排布的裂纹,呈现脆性断裂特征,这说明长时间高温和高强度的紫外光辐射加快了分子链运动,产生链段松弛等现象,使其失去了力学性能。

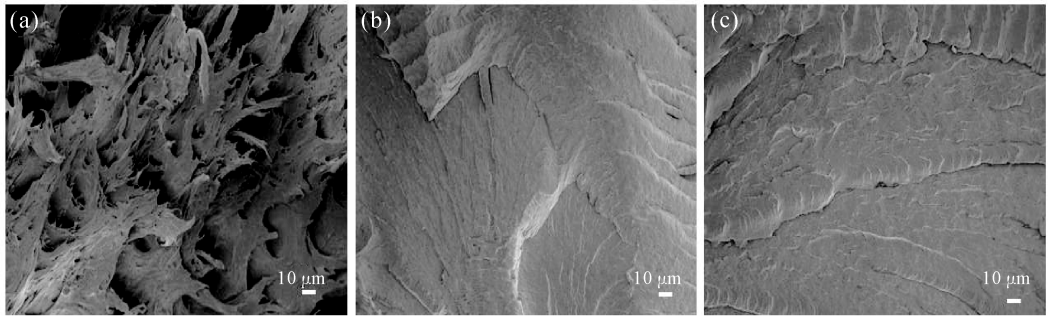


Fig. 3　SEM images of PA56 after aging by different aging methods: (a)PA56-0 d; (b) PA56-OE-60 d; (c) PA56-TOP-30 d

2.4　XRD 分析

Fig.4 为 PA56 样品经不同老化方法老化不同时间后的 XRD 谱图。从图中可以看出,PA56 样品在 12.89°,20.97°有 2 个衍射峰,20.97°处为强衍射峰,属于 PA56 的 γ 晶型,分别对应于(004)和(100)/(110)/(010)晶面[18]。对比 2 种老化方法老化不同时间后的曲线,可以发现,未老化 PA56 样品在 $2\theta\approx$ 12.89°处的衍射峰不是很明显,几乎为一条直线。经 2 种老化方法老化不同时间后,$2\theta\approx$12.89°,20.97°处衍射峰的强度随老化时间的延长均发生了明显变化,特征峰衍射强度逐渐增大。再仔细对比,发现户外暴晒老化后,PA56 在 $2\theta\approx$12.89°衍射峰强度增加不是很明显,而热氧光老化后的比较明显。这可能是由于水分进入 PA56 的晶体结构,导致晶体内部重新排列,引起晶体尺寸的增大,从而影响衍射峰的强度。值得注意的是,从谱图中可以看出,没有出现新的衍射峰,说明没有发生晶型的转变。

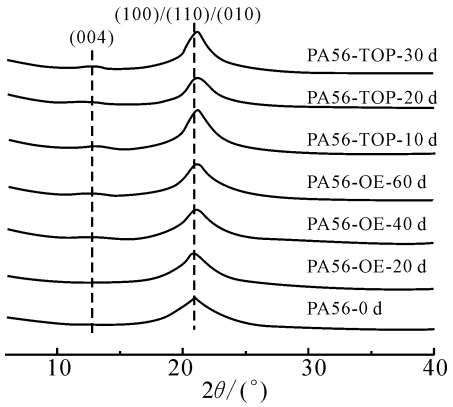


Fig. 4　XRD patterns of PA56 after aging by different methods

2.5　DSC 分析

Fig.5(a)和 Fig.5(b)分别是 PA56 经 2 种老化方法老化不同时间后的二次加热曲线和冷却曲线。DSC 测试结果列于 Tab.3 中。从 Fig.5(a)和 Fig.5(b)可以看出,未老化 PA56 在 272.1 ℃有 1 个最大的熔融峰,在 233.9 ℃处有明显的最大结晶峰。结合 Fig.5 和 Tab.3 可以看出,经老化处理后,随着老化时间的延长,样品的熔融温度和熔融峰的面积都呈下降趋势,结晶峰也有明显的变化,这是因为 PA56 在老化过程中吸收了大量的热量,严重破坏了链段之间作用力,发生了分子链断裂和降解。结合 Tab.3 可以发现,未老化 PA56 的 X_c 为 18.5%,经老化处理后,户外暴晒老化 60 d 和热氧光老化 30 d 的样品的 X_c 比未老化样品分别降低了 1.1% 和 0.8%,这说明 PA56 受到温度、紫外光、湿度和氧的影响,发生了热氧化降解和光降解,从而破坏了 PA56 的分子链结构,改变了其晶体结构,导致结晶度下降。通常,随着高分子材料结晶度的增加,其拉伸强度也会提高。反之,结晶度降低,拉伸强度也会降低。这是因为在结晶区域,分子链排列更加紧密,分子链之间的相互作用较强,从而能提高材料的拉伸强度。结合 2.1 中力学性能数据和 Tab.3 来看,PA56 的拉伸强度随老化时间的延长而降低,而 PA56 的结晶度也是随老化时间的延长而降低,这符合结晶度降低,拉伸强度随之降低这一说法。

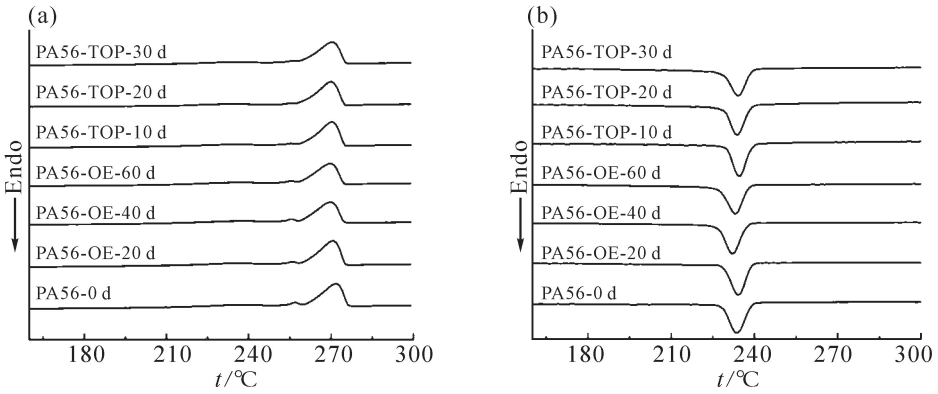


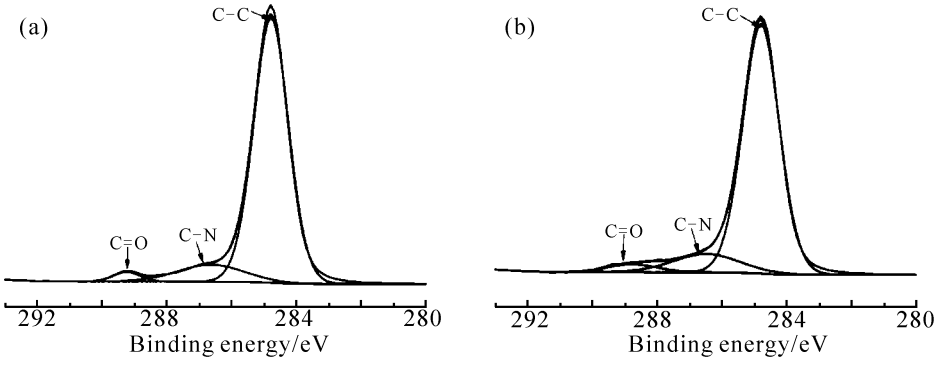
Fig. 5 DSC heating (a) and cooling curves (b) of PA56 samples after aging by different methods

Tab. 3 DSC data of PA56 samples after aging by different methods

Samples	T_m/℃	T_c/℃	ΔH_m/(J·g^{-1})	X_c/%
PA56-0 d	272.1	233.9	34.9	18.5
PA56-OE-20 d	270.9	234.2	34.5	18.3
PA56-OE-40 d	270.2	232.2	33.3	17.6
PA56-OE-60 d	269.9	233.2	32.8	17.4
PA56-TOP-10 d	270.6	234.5	34.3	18.2
PA56-TOP-20 d	270.1	233.7	33.9	18.0
PA56-TOP-30 d	270.2	234.4	33.4	17.7

2.6 XPS 分析

Fig.6 和 Tab.4 分别为 PA56 经不同老化方法老化不同时间后的 XPS C 1s 拟合图和表面元素组成及键接占比的定量结果。从图中可以明显观察到，C 1s 图谱中有 3 个峰，分别对应样品中的 C—C，C—N 和 C ═O 键。结合 Tab.4 中的结果可见，未老化 PA56 中的 C—C，C—N 和 C ═O 的占比分别为 86.81%，10.77%，2.42%。经 2 种老化方法老化后，样品 PA56 的各个键的占比发生了明显的变化。C—C 键的含量呈现下降的趋势，C—N 和 C ═O 键的含量呈上升的趋势。通常，高分子聚合物材料的老化程度可以通过 C ═O 键含量的改变来加以判断。从 Tab.4 可以观察到，随着老化时间的增加，2 种老化方法的 C ═O 含量逐渐增加。户外暴晒老化 60 d 和热氧光老化 30 d 时，C ═O 含量相较于老化前时的 2.42%，分别提高到了 4.05% 和 3.76%。说明老化到此时间段时，PA56 受紫外光、温度等因素的影响，分子链断裂，达到了材料的失效点。



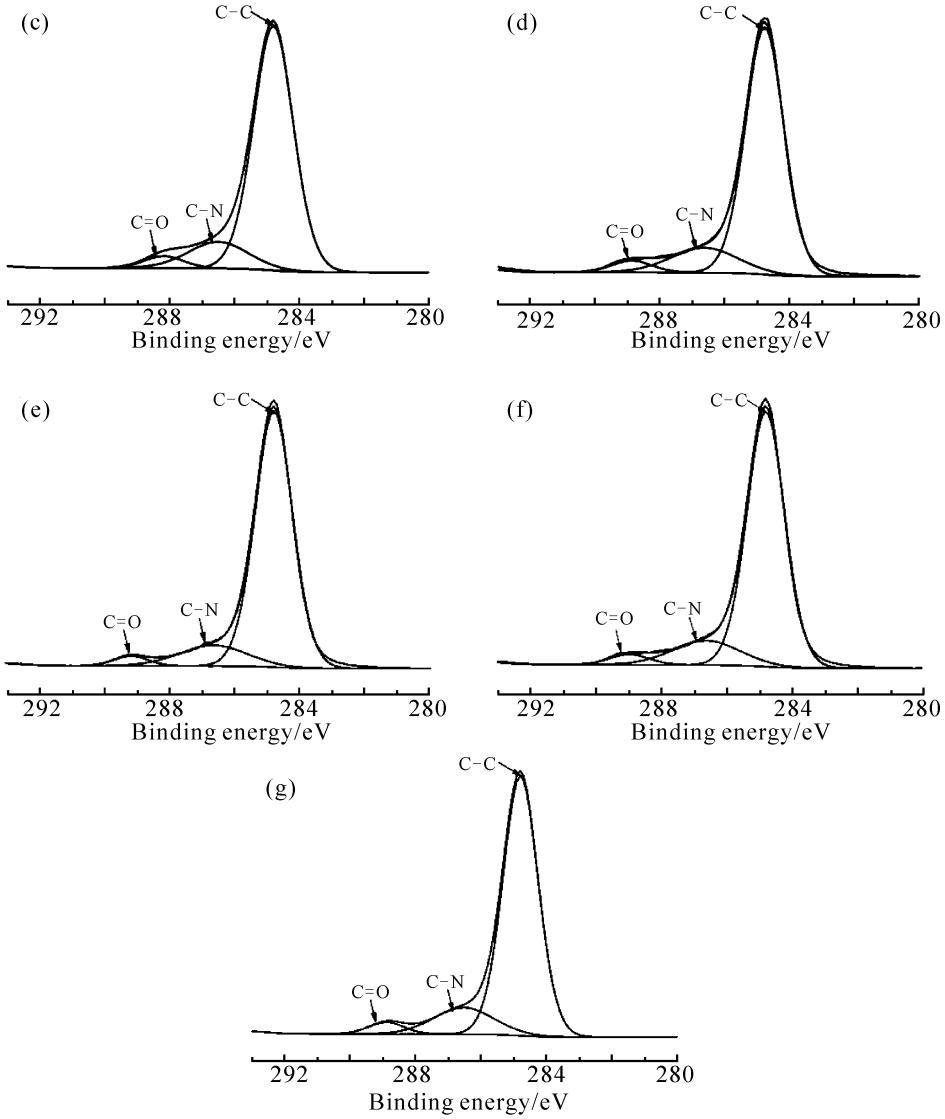


Fig. 6　XPS C 1s spectra of PA56 samples after aging by different methods: (a) PA56-0 d; (b) PA56-OE-20 d; (c) PA56-OE-40 d; (d) PA56-OE-60 d; (e) PA56-TOP-10 d; (f) PA56-TOP-20 d; (g) PA56-TOP-30 d

Tab. 4　XPS data of PA56 samples after aging by different methods

Samples	C—C/%	C—N/%	C ═O/%
PA56-0 d	86.81	10.77	2.42
PA56-OE-20 d	84.81	11.46	3.73
PA56-OE-40 d	83.13	12.99	3.88
PA56-OE-60 d	81.67	14.27	4.05
PA56-TOP-10 d	84.77	12.30	2.92
PA56-TOP-20 d	82.34	14.10	3.56
PA56-TOP-30 d	81.92	14.32	3.76

3 结论

(1)通过室内外老化实验,受到高温、高紫外辐照、湿度、氧的影响,户外暴晒老化 40 d 和热氧光老化 15 d 时,PA56 试样的分子链断裂,发生光降解和热氧化降解,失去了使用价值。

(2)从 FT-IR 和 XRD 结果来看,经老化后,PA56 的化学结构和晶型没有发生变化;SEM 结果表明,PA56 由韧性断裂转变为脆性断裂。

(3)XPS 和 DSC 结果表明,随着老化时间的延长,C═O 含量逐渐增加,X_c 逐渐降低。相比于老化前,户外暴晒老化 60 d 和热氧光老化 30 d 时的 C═O 含量分别提高了 4.05% 和 3.76%,X_c 分别降低了 1.1% 和 0.8%。

(4)对比发现,PA56 热氧光老化的效果更明显,以拉伸强度保留率 50% 为 PA56 的失效指标,通过力学性能的分析,热氧光老化速率近似为户外暴晒老化的 3 倍。

参考文献:

[1] 许凯, 李振虎, 李超, 等. 生物基聚酰胺的制备与应用研究进展[J]. 合成树脂及塑料, 2023, 40(6): 58-61.
Xu K, Li Z H, Li C, *et al.* Preparation and application research progress of bio-based polyamides[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2023, 40(6): 58-61.

[2] Xue C F, Xu Q M, Wu Y S, *et al.* Fabrication of bio-based polyamide 56 and antibacterial nanofiber membrane from cadaverine[J]. Chemosphere, 2020, 266: 128967.

[3] He LL, An T F, He M, *et al.* Achieving anti-moisture absorption and high thermal properties in bio-based polyamide 56/F-based heat-resistant agent composites through crystal regulation[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2023, 34: e54301.

[4] Quiles C L, Montanes N, Boronat T, *et al.* Evaluation of the engineering performance of different bio-based aliphatic homopolyamide tubes prepared by profile extrusion[J]. Polymer Testing, 2017, 61: 421-429.

[5] 董建勋, 屈建海, 冯晓燕, 等. 世界生物基聚酰胺发展现状及展望[J]. 合成纤维工业, 2015, 38(5): 51-56.
Dong J X, Qu J H, Fen X Y, *et al.* Development status and prospects of world bio-based polyamides[J]. China Synthetic Fiber Industry, 2015, 38(5): 51-56.

[6] Yang H Y, Liu W T. Bio-based polyamide 56: recent advances in basic and applied research[J]. Polymer Engineering and Science, 2023, 8: 2484-2497.

[7] 邵潇庆. 聚酰胺-硅氧烷共聚物的制备及其性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2023.
Shao X Q. Synthesis and properties of polyamide-siloxane copolymer[D]. Jinan: Shandong University, 2023.

[8] 安振华, 赵东艳, 叶焱, 等. 一种尼龙老化评价的新方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42(1): 43-48.
An Z H, Zhao D Y, Ye Y, *et al.* A novel aging evaluation method of nylon[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2022, 42(1): 43-48.

[9] Du W C, Ruan W J, Chen D L, *et al.* Biocomposites from polyamide 11 reinforced by organic silane modified jute fibers: fabrication and characterization[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2022, 11: 51795.

[10] 冯德才, 黄牧, 叶坤豪, 等. 不同条件下尼龙材料光老化行为的研究[J]. 塑料工业, 2021, 49(3): 91-94.
Fen D C, Huang M, Ye K H, *et al.* Study on the light aging of nylon materials under different conditions[J]. China Plastics Industry, 2021, 49(3): 91-94.

[11] Ksouri I, Haddar N. Long term ageing of polyamide 6 and polyamide 6 reinforced with 30% of glass fibers: temperature effect[J]. Journal of Polymer Research, 2018, 25: 153.

[12] Tuomas P, Mika S, Jouni P. Mechanical properties and fracture characterization of additive manufacturing polyamide 12 after accelerated weathering[J]. Polymer Testing, 2021, 104: 107376.

[13] 李登辉, 贾义军, 陈国军. 不同抗氧体系的玻纤增强 PA66 的热氧老化性能[J]. 工程塑料应用, 2020, 48(11): 106-111.
Li D H, Jia Y J, Chen G J. Thermal oxidative ageing performance of glass fiber reinforced PA66 with different antioxidant systems[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(11): 106-111.

[14] Xu Y H, Zhao C Y, Guo W H, *et al.* EPDM-g-MAH toughened bio-based polyamide 56 to prepare thermoplastic polyamide elastomer and the performance characterization[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2022, 139: e52346.

[15] 娄淑梅, 陈鹏, 陈志远, 等. 热处理工艺对玻纤增强聚酰胺 66 抗老化性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2022, 38(11): 81-87.
Lou S M, Chen P, Chen Z Y, *et al.* Effect of hygrothermal treatment processes on mechanical properties and microstructure of hygrothermally aged glass fiber reinforced polyamide 66[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2022, 38(11): 81-87.

[16] 李晖, 魏莉萍, 王湘明, 等. 吸水率对尼龙 66 力学性能的影响研究[J]. 工程塑料应用, 2008(8): 64-67.
Li H, Wei L P, Wang X M, *et al.* Investigation on the influences of water absorption to the mechanical properties of Nylon 66 materials[J]. Engineering Plastics Application, 2008(8): 64-67.

[17] 李宏伟, 王刚, 吴雅楠, 等. 土埋条件下生物基锦纶 56 与锦纶 6 纤维的老化行为[J]. 高分子材料科学与工程, 2023, 39(8): 120-125.
Li H W, Wang G, Wu Y N, *et al.* Aging behavior of bio-based nylon 56 and nylon 6 fiber under soil-buried conditions[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2023, 39(8): 120-125.

[18] Yan Y R, Gooneie A, Ye H X, *et al.* Morphology and crystallization of biobased polyamide 56 blended with polyethylene terephthalate[J]. Macromolecular Materials and Engineering, 2018, 303: 1800214.

Effects of Different Aging Methods on the Structure and Properties of Biobased Polyamide 56

Yelzati Ayitibek[1], Honghuan Li[1], Yuanbo Zhao[2], Ablat Ablimit[1], Mamatjan Yimit[1]
(*1. School of Chemical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;*
2. Cathay (Wusu) Biomaterials Co., LTD, Wusu 834700, China)

ABSTRACT: In order to investigate the effects of indoor accelerated aging and outdoor exposure on the structure and properties of biobased polyamide 56 (PA56) samples, the effects of different aging time on the structure and properties of PA56 samples were studied by thermal oxygen photoaging and outdoor exposure aging methods. The results show that the tensile strength of PA56 decreases in different degrees after aging by two aging methods. According to the infrared spectra and X-ray powder diffraction patterns, the chemical structure of the samples does not change after aging, and no new absorption peaks and new crystal types appear. With the increasing of aging time, the crystallinity (X_c) of PA56 gradually decreases, and the content of C═O gradually increases. The X_c of the samples subjected to outdoor exposure aging for 60 d and thermal oxygen photoaging for 30 d is decreased by 1.1% and 0.8%, respectively, compared with that of the samples without aging, and the content of C═O increases to 4.05% and 3.76%, respectively, compared with 2.42% before aging. By comparing the mechanical properties of the two aging methods with aging time, it is found that the aging rate of thermal oxygen photoaging is approximately 3 times that of outdoor exposure to aging.

Keywords: bio-based polyamide 56; thermal oxygen photoaging; outdoor exposure; crystallization; mechanical property