复合材料学报 Acta Materiae Compositae Sinica
第30卷 第5期 10月 2013年
Vol. 30 No. 5 October 2013

文章编号：1000-3851(2013)05-0086-08

麦秸秆粉/PP木塑复合材料紫外线加速老化性能

侯人鸾[1,2]，何春霞*[1,2]，薛 娇[1,2]，于 旻[1,2]，窦川川[1]

（1. 南京农业大学 工学院，南京 210031；2. 江苏省智能化农业装备重点实验室，南京 210031）

摘 要： 以麦秸秆粉为填充材料(质量分数50%)，以聚丙烯(PP)膜为基体材料，采用混炼模压成型制备麦秸秆/PP木塑复合材料，对其进行紫外线加速老化实验，对比研究不同填充材料的木塑复合材料老化前后的力学性能和颜色变化，用FTIR分析探讨了复合材料老化机制，用SEM观察其表面微观形貌。结果表明，紫外线加速老化会导致麦秸秆/PP复合材料力学性能降低，当老化时间小于960 h时，麦秸秆/PP木塑复合材料弯曲强度、拉伸强度下降幅度较小，老化时间大于960 h时，力学性能下降幅度较大，材料褪色明显；老化1200 h其弯曲强度、拉伸强度、冲击强度分别下降67.2%、47.89%、32.41%；麦秸秆纤维中羟基加速了PP的紫外光降解，最终材料表面出现明显裂纹，部分纤维剥落并伴随有PP粉化现象。

关键词： 木塑复合材料；紫外线加速老化；力学性能；颜色变化；FTIR分析

中图分类号： TB332 **文献标志码：** A

UV accelerated aging properties of wheat straw/PP wood plastic composite

HOU Renluan[1,2], HE Chunxia*[1,2], XUE Jiao[1,2], YU Min[1,2], DOU Chuanchuan[1]

(1. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China;
2. Jiangsu Key Laboratory for Intelligent Agricultural Equipment, Nanjing 210031, China)

Abstract: Wheat straw/polypropylene(PP) wood-plastic composites (WPC) filled with 50% wheat straw powder were prepared by mixing compression molding. WPC were accelerated ageing by ultra violet (UV) radiation. The mechanical properties and color change of the original and ageing PP wood-plastic composites filled with different plant fiber were investigated. UV weathering mechanism was analyzed by FTIR. The tensile sections of the composites were observed by SEM. The results show that the mechanical performance decreases substantially caused by the UV accelerated ageing. When the aging time is less than 960 h, bending strength and tensile strength decrease slightly. Then the mechanical performance decreases rapidly and WPC fade obviously. Bending strength, tensile strength and impact strength decrease respectively 67.2%, 47.89%, 32.41% when ageing time is 1200 h. The hydroxyl in the wheat straw fiber evidently accelerates the degradation of PP. Finally the partial fiber drops out from the face of material with cracks while PP occurs pulverization phenomena.

Keywords: wood plastic composite; UV accelerated aging; mechanical properties; color change; FTIR analysis

木塑复合材料(WPC)具有木材及塑料的双重优良特性，且可回收再利用，为环境友好型材料，在建筑、装饰等领域得到迅速发展[1]。但受光、热、氧气、水、污染物等环境因素的影响，木塑复合材料在使用时易老化，出现力学性能下降、表面褪色和物化性质发生改变的现象，影响材料的外观和使用寿命[2]。研究木塑复合材料的老化规律和机制对防治其老化有重要意义，也是促进其发展的主要举措。木塑复合材料在日常使用时，通常经过较长时间的大气自然老化才能达到其使用寿命，相关研究表明，稻壳/聚乙烯(PE)木塑复合材料经过自然老化12个月后表面才有显著化学变化，表面颜色变化与1500 h紫外光加速老化的材料类似[3]，其中夏季老化作用明显，曝晒6个月时材料的弯曲强度下降达20.27%[4]，与之相比紫外光加速老化试验周期较短。紫外光照射使木塑复合材料表面氧

收到初稿日期： 2012-09-24；**收到修改稿日期：** 2013-01-10；**网络出版时间：** 2013-03-19 16:16:58
网络出版地址： www.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20130319.1616.014.html
基金项目： 中央高校基本科研业务费专项基金项目(KYZ200921)
通讯作者： 何春霞，教授，博士生导师，目前主要从事纳米复合材料方面的研究 E-mail：chunxiahe@tom.com

化、聚合物基体结晶性能变化及其界面结合力减弱，导致力学性能降低[5]。经氙灯加速老化的高密度聚乙烯(HDPE)木塑复合材料表面会出现裂纹、木粉相对含量增加及低分子物增多现象，老化 110 h 后，其弯曲强度和弯曲弹性模量分别下降 10%和 20%[6]。除受紫外光照射影响，水分存在也使木塑复合材料老化后力学性能严重下降。研究发现，在水中浸泡 2000 h 的聚丙烯(PP)木塑复合材料弯曲模量下降 39%，弯曲强度下降 22%[7]；浸水饱和后的 HDPE 木塑复合材料拉伸模量下降 40%[8]。而表面褪色现象主要由植物纤维的氧化变质所致，氙弧灯照射 2000 h 的纯 HDPE 发生褪色现象，但褪色程度相对于同样条件老化后的 HDPE 木塑复合材料小 9 倍多[9]。同时植物纤维会促进木塑复合材料中基体的氧化降解，两者又存在协同老化作用[10-11]。紫外线加速老化 PE 及 PP 木塑复合材料，前 700 h 内表面褪色较快，颜色变化呈非线性，木粉含量越高褪色越快，此外 PP 基木塑复合材料比 PE 基的更易褪色[12]。木塑复合材料中基体成分[13]、植物纤维种类[14-15]、处理方法[16-18]及二者界面结合程度[5,19]、成型工艺[20]都会影响其老化过程。目前国内外研究的木塑复合材料主要以木粉为填充材料，而较少采用农作物秸秆为原料；以农作物秸秆和聚合物结合制备木塑复合材料不仅能充分利用可再生资源[21]，减少对森林资源的过度开发，而且由于秸秆粉的结构比普通木粉更复杂，其细胞单元尺寸和类型多变，具有较短纤维和更薄细胞壁，因此其木塑复合材料老化规律也较复杂，对其老化机制的研究具有重要的实际应用意义。本文作者对麦秸秆/PP 木塑复合材料进行紫外线加速老化实验，探讨麦秸秆/PP 木塑复合材料在不同老化时间下的力学性能和颜色变化，并对其表面进行红外光谱分析，对其表面微观结构进行观察和分析，对比探讨分析木粉填充及麦秸秆填充的 PP 木塑复合材料的老化机制，以寻求提高其抗老化性能的改善方法。

1 实验方法

1.1 主要原料

麦秸秆，江苏省江阴市璜塘镇，粉碎过筛粒度为 250 μm；硅烷偶联剂 KH550，上海耀华有限公司；硬脂酸锌为工业级，上海延安油脂厂；聚丙烯(PP)塑料薄膜，江阴东方塑料包装有限公司。

植物纤维的主要化学成分为纤维素、半纤维素和木质素，除此之外还有少量抽出物和灰分等，在植物生长过程中分别起结构支撑、提供营养、防止病毒入侵及保持水分等作用，植物纤维内部成分含量及纤维尺寸的不同会对其老化后性能有一定影响，其中木质素和抽出物为吸收紫外线辐射的主要成分[22]，纤维长度是木塑复合材料力学性能重要指标。表 1 为麦秸秆和部分种类木粉纤维的化学成分[23]。可知，麦秸秆纤维成分中木质素含量与松木和杉木相比较小，但其灰分含量远大于木粉。表 2 为麦秸秆和部分种类木粉纤维尺寸及细胞壁厚度[23]。

表 1 各类植物纤维化学成分及含量(质量分数)[23]

Table 1 Chemical components and mass fraction of different types of plant fiber[23]

Plant fiber types	Producing area	Mass fraction/%				
		Cellulose	Lignin	Pentosan	Ash	Pectin
Wheat straw	Hebei	40.40	22.34	25.56	6.04	0.30
Pine	Sichuan	51.86	28.42	8.54	0.33	0.94
Spruce	Western Sichuan	46.92	28.43	11.62	0.73	1.32

表 2 各类植物纤维尺寸及细胞壁厚度[23]

Table 2 Dimension analyses of different types of plant fiber[23]

Fiber types	Average length/mm	Average width/μm	Length-width ratio	Average thickness/μm
Wheat straw	1.32	12.9	102	5.2
Pine	3.61	50	72	8.7
Spruce	3.06	51.9	59	—

1.2　麦秸秆/PP 木塑复合材料制备

将硅烷偶联剂 KH550 与乙醇按照体积比 1∶5 配制溶液，均匀喷入麦秸秆粉(粒度为 250 μm)中，并进行搅拌，于 105 ℃烘干。KH550 用量为麦秸秆粉质量的 2%。将处理后的麦秸秆粉与 PP 薄膜置于混炼机中混炼，前辊温度为 175 ℃，后辊温度为 180 ℃。将混合物置于平板硫化机中热压成型，热压温度为 180 ℃，压力为 12.5 MPa，保压时间为 8 min，制备麦秸秆/PP 木塑复合材料(其中麦秸秆粉质量分数为 50%，内润滑剂硬脂酸锌质量分数为 1.5%，PP 质量分数为 48.5%。尺寸：120 mm×100 mm×5 mm)，再将成型的材料加工成性能测试所要求的尺寸。

1.3　麦秸秆/PP 紫外线加速老化及性能测试

紫外线加速老化：按 GB/T 16422.3－1997[24] 对麦秸秆/PP 木塑复合材料进行紫外线加速老化，使用荧光紫外灯型号为 UV－A340 型，12 h 为一个老化周期(光照 8 h，凝露 4 h)，黑板温度为60 ℃，凝露温度为 50 ℃，每 20 周期取样 1 次，共 100 周期。

力学性能：按 GB/T 1040.4－2006[25] 测试麦秸秆/PP 木塑复合材料拉伸强度，拉伸速度为 2 mm/min；按 GB/T 9341－2008[26] 测试麦秸秆/PP 木塑复合材料弯曲强度，加载速度为 2 mm/min，按 GB/T 1043.1－2008[27] 测试麦秸秆/PP 木塑复合材料冲击强度，以上实验均为室温条件，结果为 3 次平均值。

颜色测试：根据 CIE 1976L* a* b* 表色系统测试老化前后试样的颜色变化，每个试样不同位置测试 6 次，取平均值。颜色变化可用下式表示：

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2}$$

式中：ΔE 为色差；L 取值为 0～100，$+\Delta L$ 表示变白，$-\Delta L$ 表示变黑；a 取值为－150～＋150，$+\Delta a$ 表示变红，$-\Delta a$ 表示变绿；b 取值为－150～＋150，$+\Delta b$ 表示变黄，$-\Delta b$ 表示变蓝。

傅里叶变换红外光谱分析采用 Nicolet iS－10 傅里叶变换红外光谱仪扫描老化前后麦秸秆/PP 木塑复合材料表面，扫描次数为 16 次。采用 JSM－6300 扫描电子显微镜观察麦秸秆/PP 木塑复合材料老化表面微观结构。

2　结果与讨论

2.1　麦秸秆/PP 木塑复合材料力学性能及方差分析

2.1.1　麦秸秆/PP 木塑复合材料力学性能

图 1 为麦秸秆/PP 木塑复合材料随紫外线加速老化时间变化的力学性能。可知，随老化时间增加，麦秸秆/PP 木塑复合材料力学性能不断下降。当老化时间小于 960 h 时，复合材料弯曲强度、拉伸强度下降幅度较小，老化时间大于960h时PP

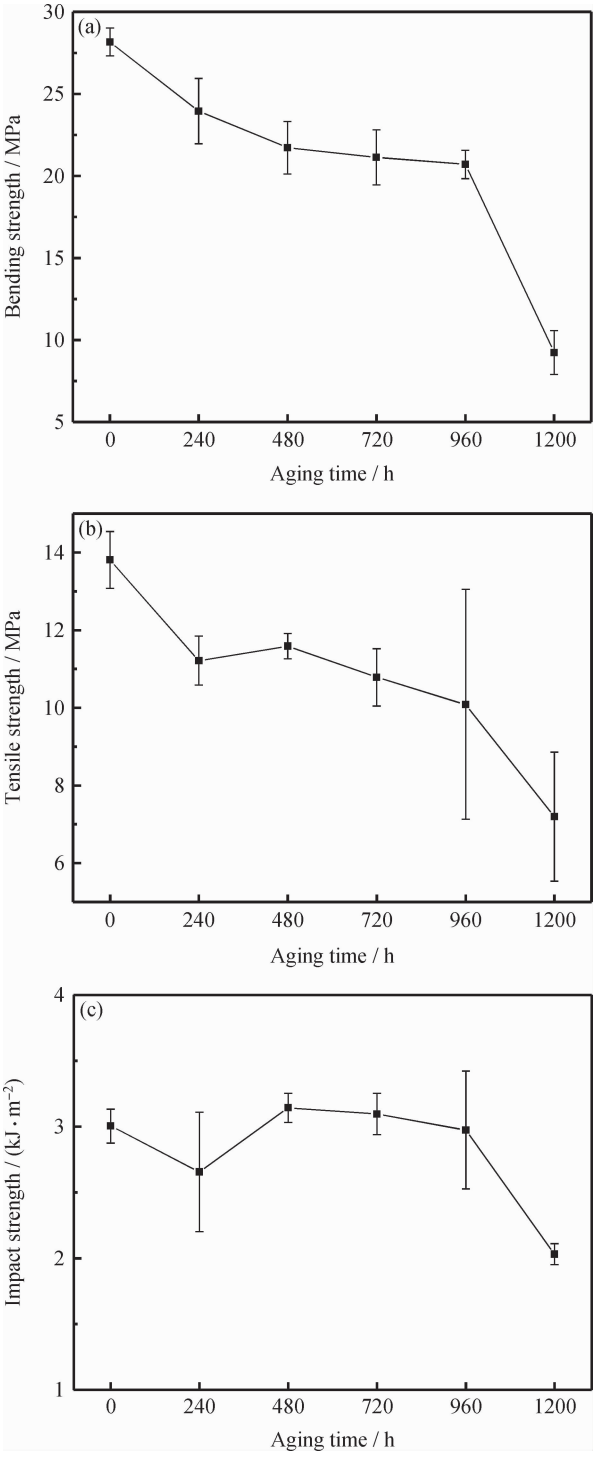

图 1　麦秸秆/聚丙烯(PP)木塑复合材料的力学性能与紫外线加速老化时间关系(麦秸秆质量分数为 50%)

Fig. 1　Mechanical properties of wheat straw/polypropylene(PP) composites with 50% wheat straw by UV accelerated weathering

木塑复合材料力学性能下降幅度较大，老化 1200 h 后弯曲强度下降了 67.2%，拉伸强度下降了 47.89%，冲击强度下降 32.41%。这可能由于聚丙烯分子链上含有叔氢，在紫外线光照和有氧环境下，会发生光氧化反应，产生羰基化合物和氢过氧化物[28]，导致聚丙烯分子降解，使材料产生表面开裂、内部结构松散现象。同时麦秸秆纤维中含有大量的羟基，羟基的存在进一步加速了聚丙烯的链引发速率，进而加速了聚丙烯分子链的断裂，使材料的力学性能进一步下降。聚丙烯基复合材料的氧化降解一般分为诱导阶段和逐渐降解阶段。当老化时间小于 960 h 时，麦秸秆/PP 木塑复合材料处于氧化诱导阶段，其氧化降解速度较慢，当老化时间大于 960 h 时，麦秸秆/PP 木塑复合材料处于逐渐降解阶段，其氧化降解速度较快。图 2 为麦秸秆和木粉为填料的 PP 木塑复合材料随老化时间变化的弯曲强度保持率[29]。可知，老化时间小于 1000 h 时，二者弯曲强度保持率变化趋势相似，但老化时间大于 1000 h 时，麦秸秆/PP 木塑复合材料弯曲强度下降较明显，而木粉/PP 复合材料弯曲强度变化不明显。这可能是由于木粉纤维中纤维素含量较高且纤维长度较长，而纤维素正是构成纤维细胞壁的网状骨架，使木粉/PP 复合材料的力学性能较好，而且麦秸秆中木质素含量与木粉相近但其抽出物和灰分较多使麦秸秆/PP 复合材料更易吸收紫外线而老化；此外，木粉/PP 复合材料的氧化诱导阶段相对较长，老化 8 周还未使其进入降解阶段，因此其弯曲强度变化较小。

除了紫外线光照影响，水蒸汽对木塑复合材料的降解也有促进作用，凝露阶段，大量的水汽使得木质纤维与聚丙烯基体界面粘合强度减小，其间发生低效应力转移，木质纤维细胞壁吸水膨胀，使其与基体的界面结合处产生微裂纹。而且水汽促进了光降解的发生，细胞壁膨胀、低界面结合能力、微裂纹都使水分和紫外线渗入木塑复合材料内部而加剧老化，其力学性能大幅度下降。

2.1.2 不同老化时间麦秸秆/PP 力学性能方差分析

为研究不同老化时间对麦秸秆/PP 木塑复合材料力学性能的方差分析，以老化时间为因素，5 种不同老化时间为水平，将试验数据用 SPSS 软件进行单因素方差分析，判断各组样本是否具有显著性差异，由于篇幅所限以冲击强度为例，结果见表 3 和表 4。为满足方差其次性条件，将数据取倒数进行单因素方差分析。

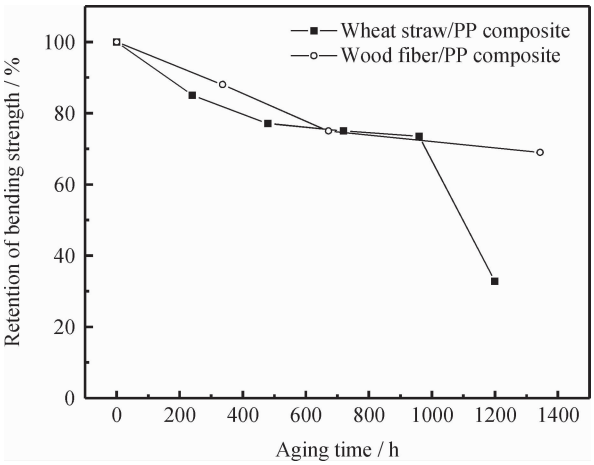

图 2 麦秸秆/PP 复合材料(麦秸秆质量分数：50%)及木粉/PP 复合材料(木粉质量分数：50%)随紫外线老化时间变化的弯曲强度保持率[29]

Fig. 2 Bending strength retention of wheat straw/PP composite with 50% wheat straw and wood fiber/PP composite with 50% wood fiber by UV accelerated weathering

对麦秸秆/PP 木塑复合材料进行紫外线加速老化后，由表 3 单因素方差分析可见，冲击强度的检验统计量的显著性水平 P 小于 0.05，说明不同老化时间对麦秸秆/PP 木塑复合材料的力学性能有显著影响。

2.2 麦秸秆/PP 木塑复合材料颜色变化

图 3 为麦秸秆/PP 木塑复合材料随老化时间的颜色变化。可见，随老化时间的延长复合材料褪色明显，老化 0～960 h 色差 ΔE 和表征黑白颜色变化 ΔL 数值均增大，老化 960～1200 h 时略有下降，ΔE 最大值为 27.56。ΔL 变化趋势与 ΔE 基本相同，表明材料的变化主要是表面变白(褪色)。与 ΔL 相比，表征红绿颜色变化 Δa 和表征黄蓝颜色变

表 3 麦秸秆/PP 木塑复合材料冲击强度方差分析(麦秸秆质量分数：50%)

Table 3 Variance analysis of impact strength of wheat straw/PP composite with 50% wheat straw

		Sum of squares	Degree of freedom	Mean square	F	Significance level P
Impact strength	Between groups	0.065	5	0.013	6.933	0.004
	Within groups	0.021	11	0.002		
	Total	0.085	16			

F=Mean square between groups/Mean square within groups

表 4　麦秸秆/PP 木塑复合材料冲击强度均值多重比较(麦秸秆质量分数：50%)

Table 4　Mean multiple comparisons of impact strength of wheat straw/PP composite with 50% mass fraction of wheat straw

Dependent variable	(I)Aging time/h	(J)Aging time/h	Mean difference(I-J)	Std. error	Significance level *P*
Impact strength	1200	0	0.159754771*	0.035278817	0.001
		240	0.106078958*	0.035278817	0.012
		480	0.174611049*	0.035278817	0.000
		720	0.169278334*	0.039442917	0.001
		960	0.149856633*	0.035278817	0.001

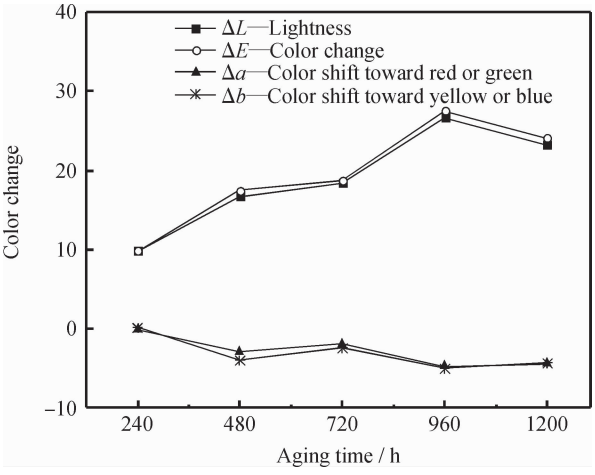

图 3　麦秸秆/PP 木塑复合材料的颜色变化与紫外线加速老化时间关系

Fig. 3　Color change of wheat straw/PP composites by UV accelerated weathering

化 Δb 数值绝对值相对较小，均小于 5，因此 Δa 和 Δb 不是影响 ΔE 的主要因素。麦秸秆/PP 木塑复合材料经紫外线加速老化后出现褪色现象，可能是由于材料表面的 PP 基体和麦秸秆纤维发生光降解所引起；相关研究表明[9]，麦秸秆纤维光降解对材料的褪色作用较大；麦秸秆纤维中的木质素经紫外光照氧化产生大量对苯醌生色基团，随着老化时间的延长，对苯醌结构逐渐减少，同时转化成对苯二酚，其具有光致褪色能力，最终引起材料表面褪色[30]。

2.3　麦秸秆/PP 木塑复合材料 FTIR 分析

图 4 为木塑复合材料随老化时间变化的红外光谱图[29]。图 4(a)中未老化麦秸秆/PP 木塑复合材料明显的吸收峰分别位于 1034.89 cm^{-1}、1375.71 cm^{-1}、2838.34 ～ 2949.71 cm^{-1} 和 3334.94 cm^{-1} 处。与之相比，老化 480 h 时，在 1646.02 cm^{-1} 和 1715.93 cm^{-1} 处吸收峰明显增强，3334.94 cm^{-1} 处吸收峰明显减弱；老化 1200 h 时 1646.02 cm^{-1} 吸收峰又大幅度增强。3334.94 cm^{-1} 吸收峰为麦秸纤维中羟基 O—H 伸缩振动峰；1715.93 cm^{-1} 吸收峰为强 C═O 伸缩振动峰；1646 cm^{-1} 吸收峰为 C═C 伸缩振动峰，是木质素中与羰基共轭的链烯。当老化时间小于 480 h 时，PP 氧化生成叔氢过氧化物，在紫外光辐照下，麦秸秆纤维中羟基的参与加速了 PP 的光氧老化，使其氢过

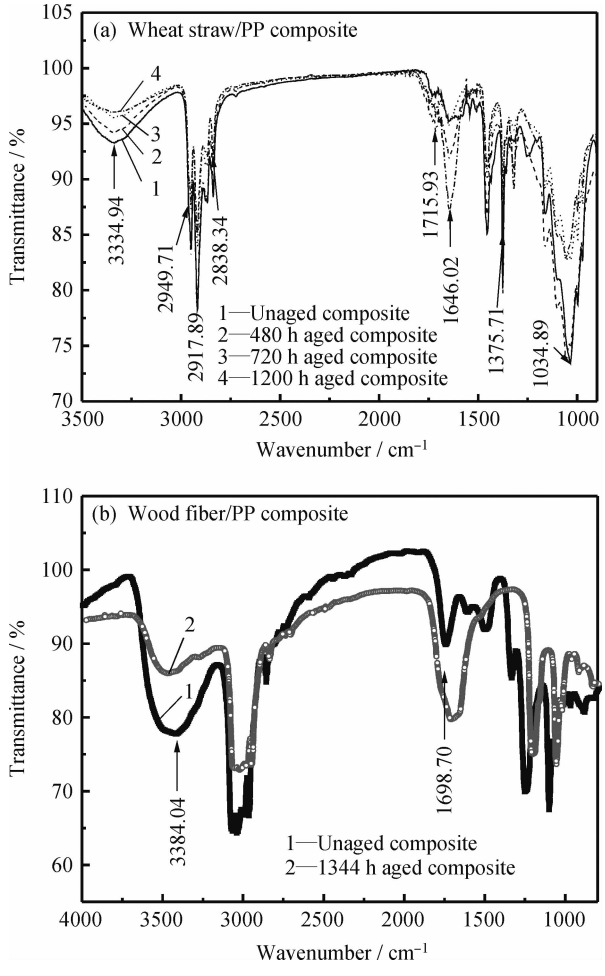

图 4　麦秸秆/PP 复合材料(麦秸秆质量分数：50%)及木粉/PP 复合材料(木粉质量分数：50%)随紫外线老化时间变化的 FTIR[29]

Fig. 4　FTIR spectra of original and ageing wheat straw/PP composite with 50% wheat straw and wood fiber/PP composite with 50% wood fiber by UV accelerated weathering[29]

氧化基团发生 β 断裂反应，最终生成酮。当老化时间大于 720 h 时，PP 氧化作用明显，分子链大量断裂；而 3334.94 cm^{-1}吸收峰变化不明显，这可能是由于在材料分子链断裂的过程中有一部分发生交联反应，这也是冲击强度短暂上升的原因，如图 1(c)；但随着时间的延长，分子链断裂占据主导地位，使材料的力学性能下降。图 4(b)中老化 8 周后木粉/PP 复合材料在 1700～1800 cm^{-1}吸收峰明显增强，为 PP 紫外线老化后产物吸收峰；与其相比，图4(a)麦秸秆/PP 复合材料 FTIR 中 1034.89 cm^{-1}吸收峰变化较明显，1034.89 cm^{-1}为无机物的 SiO_2 等的 Si—O 不对称伸缩振动峰，是由麦秸秆中灰分等引起的，而其他吸收峰的位置有部分移位，这是由于木粉和麦秸秆中各化学成分种类及含量的不同所引起的。

2.4 麦秸秆/PP 木塑复合材料表面微观结构

图 5 为麦秸秆/PP 木塑复合材料不同老化时间的微观结构。从图 5(a)可知，材料未老化前表面比较完整，缺陷较少，说明聚丙烯较完全包裹麦秸秆纤维，有利于抑制水分子进入复合材料内部。而不同老化时间的麦秸秆/PP 木塑复合材料表面均有不同程度的裂纹和缺陷，由图 5(b)～5(d)可知，老化 240 h 后材料表面的麦秸秆纤维与聚丙烯基体结合边缘出现细小裂纹，可能是由于聚丙烯在紫外加速老化过程中发生光降解反应，分子链断裂形成短链，断裂的分子链在力作用下向两端收缩，形成了裂纹。从而使得较多水分子进入材料内部，破坏麦秸秆纤维与聚丙烯之间的界面结合，随老化时间的延长，裂纹逐渐向宽度和深度方向延伸，引起复合材料力学强度的下降。由图 5(e)、5(f)可知，麦秸秆纤维与聚丙烯之间的剥离情况更加严重，老化 1200 h 后复合材料表面聚丙烯基体粉化严重，部分麦秸秆纤维表面出现大量毛刺并伴随纤维自身断裂现象，这可能是由于水分在聚丙烯降解后进入复合材料内部，在水、热和紫外线的作用下，老化严重的表面层会发生部分的脱落，被剥离出来的麦秸秆纤维也发生降解，使材料表面出现麦秸秆粉化现象，从而也使材料的力学性能进一步降低。

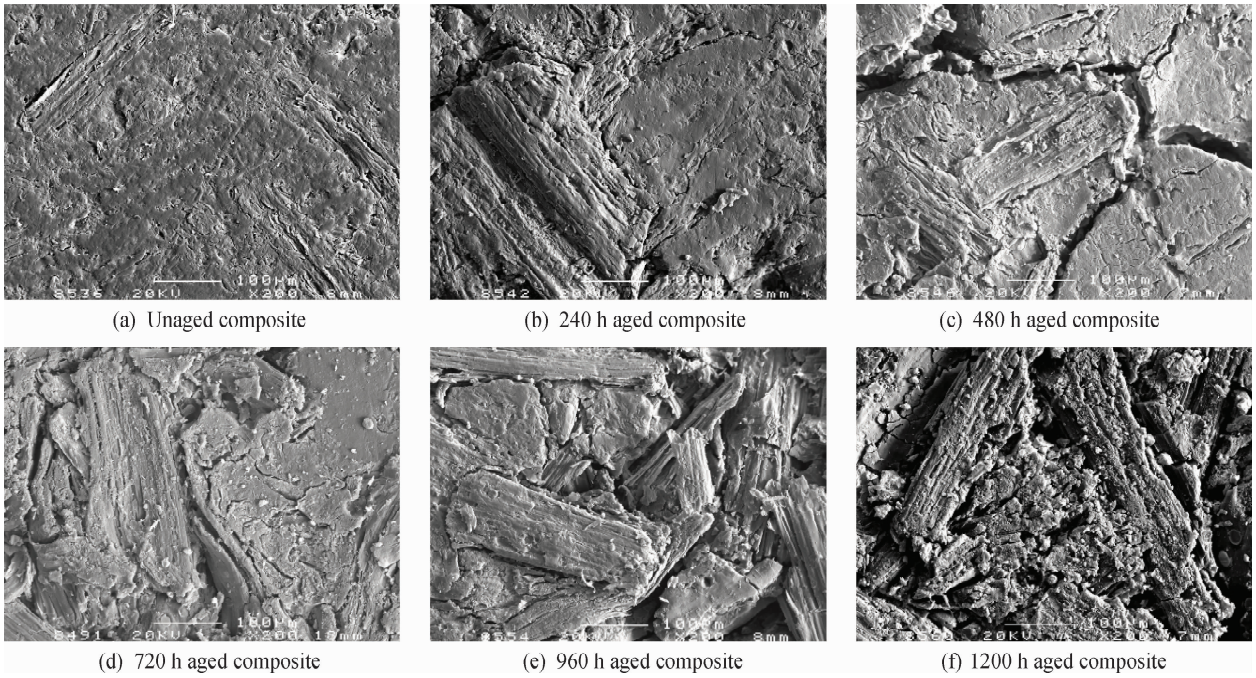
(a) Unaged composite
(b) 240 h aged composite
(c) 480 h aged composite
(d) 720 h aged composite
(e) 960 h aged composite
(f) 1200 h aged composite

图 5 紫外线加速老化麦秸秆/PP 木塑复合材料表面微观结构

Fig. 5 Microstructure surface of wheat straw/PP composites by UV accelerated weathering

3 结 论

(1) 紫外线加速老化对复合材料力学性能影响较大。老化时间大于 960 h 时，麦秸秆/聚丙烯(PP)木塑复合材料力学性能大幅度下降。老化 1200 h 时，材料的弯曲强度、拉伸强度、冲击强度分别下降 67.2%、47.89%、32.41%。老化后木

粉/PP 木塑复合材料弯曲性能变化较小。

（2）麦秸秆/PP 木塑复合材料颜色变化主要表现为表面变白、褪色，老化 960 h 颜色变化色差 ΔE 最大，为 27.56，褪色明显。

（3）麦秸秆纤维中羟基的参与加速了 PP 的紫外线光氧老化；不同老化时间下的麦秸秆/PP 木塑复合材料微观表面均有不同程度的裂纹和缺陷，随老化时间的延长，裂纹逐渐向宽度和深度方向延伸。在水、热和紫外线的作用下，PP 和麦秸秆纤维的降解是造成材料裂纹和材料缺陷的原因。

参考文献：

[1] Tamrakar S, Lopez-Anido R A, Kiziltas A, et al. Time and temperature dependent response of a wood-polypropylene composite [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2011, 42(7): 834-842.

[2] 李晶晶，李大纲，郭　勇，等. 环境对尿不湿边角料/聚乙烯复合材料的材色影响 [J]. 塑料工业，2010，38(9)：72-75.
Li Jingjing, Li Dagang, Guo Yong, et al. Effect of environment on color of the diapers scrap/PE composite [J]. China Plastics Industry, 2010, 38(9): 72-75.

[3] 王伟宏，王清文，张征明. 稻壳/聚乙烯复合材的自然老化与紫外光加速老化 [J]. 林业科学，2008，44(8)：90-94.
Wang Weihong, Wang Qingwen, Zhang Zhengming. Natural weathering and accelerated UV weathering of rice-hull-polyethylene composite [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2008, 44(8): 90-94.

[4] 周吓星，林巧佳，陈礼辉. 自然气候老化对木塑复合材料蠕变性能的影响 [J]. 福州大学学报：自然科学版，2011(1)：96-100.
Zhou Xiaxing, Lin Qiaojia, Chen Lihui. Impact of the natural weathering on the creep behavior of wood-plastic composite [J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science Edition, 2011(1): 96-100.

[5] 周　箭，张启龙，杨　辉，等. 抗紫外 PVDF 基木塑复合材料的热分析 [J]. 材料科学与工程学报，2009，27(6)：845-849.
Zhou Jian, Zhang Qilong, Yang Hui, et al. Thermal analysis of anti-ultraviolet poly(vinylidene fluoride)/wood flour composites [J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2009, 27(6): 845-849.

[6] 王林娜，蔡建臣，薛　平. 木塑复合材料加速老化性能的研究 [J]. 工程塑料应用，2010，38(2)：63-66.
Wang Linna, Cai Jianchen, Xue Ping. Study on accelerated aging properties of wood plastic composite [J]. Engineering Plastics Application, 2010, 38(2): 63-66.

[7] Stark N, Clemons C. Durability of wood and polyethylene composite lumber[R]. Madison: USDA Forest Serviee, 2003.

[8] Rangaraj S V, Smith L V. Effect of moisture on the durability of a wood/thermoplastic composite [J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2000, 13(2): 140-161.

[9] Stark N M, Matuana L M. Ultraviolet weathering of photostabilized wood-flour-filled high-density polyethylene composites [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2003, 90(10): 2609-2617.

[10] Dominkovics Z, Danyadi L, Pukanszky B. Surface modification of wood flour and its effect on the properties of PP/wood composites [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2007, 38(8): 1893-1901.

[11] Espert A, Las Heras de L A, Karlsson S. Emission of possible odourous low molecular weight compounds in recycled biofibre/polypropylene composites monitored by head-space SPME-GC-MS [J]. Polymer Degradation and Stability, 2005, 90(3): 555-562.

[12] Falk R H, Lundin T, Felton C. The effects of weathering on wood-thermoplastics composites intended for outdoor applications[C]//Forest Products Society. Proceedings of the 2nd Annual Conference on Durability and Disaster Mitigation in Wood-Frame Housing. Madison: FPS, 2000: 175-179.

[13] 赵永生，王克俭，朱复华，等. 蒙脱土/硅烷改性木粉/PVC 复合材料 [J]. 复合材料学报，2007，24(3)：63-71.
Zhao Yongsheng, Wang Kejian, Zhu Fuhua, et al. Properties of montmorillonite/silane-modified wood flour/PVC composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(3): 63-71.

[14] 何春霞，顾红艳，薛盘芳. 四种植物纤维粉/聚丙烯复合材料应用性能 [J]. 农业工程学报，2010，26(2)：381-384.
He Chunxia, Gu Hongyan, Xue Panfang. Performances of polypropylene composite material filled with four kinds of plant fiber powders [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(2): 381-384.

[15] Fabiyi J S, McDonald A G. Effect of wood species on property and weathering performance of wood plastic composites [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2010, 41(10): 1434-1440.

[16] 于　旻，何春霞，刘军军，等. 不同表面处理麦秸秆对木塑复合材料性能的影响 [J]. 农业工程学报，2012，28(9)：171-177.
Yu Min, He Chunxia, Liu Junjun, et al. Effects of different surface treatment for wheat straw on performances of wood-plastic composites [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(9): 171-177.

[17] 李永峰，刘一星，于海鹏，等. 甲基丙烯酸缩水甘油酯改善木塑复合材料性能 [J]. 复合材料学报，2009，26(5)：1-7.
Li Yongfeng, Liu Yixing, Yu Haipeng, et al. Property improvement of wood polymer composites with glycidyl methacrylate [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2009, 26(5): 1-7.

[18] 关苏军，万春风，汪丽娜，等. 玄武岩纤维增强木塑复合材料

的力学性能［J］. 复合材料学报，2011，28(5)：162-167.
Guan Sujun，Wan chunfeng，Wang Lina，et al. Mechanical properties of basalt fiber reinforced wood-plastic composites［J］. Acta Materiae Compositae Sinica，2011，28(5)：162-167.

［19］Bengtsson M，Gatenholm P，Oksman K. The effect of crosslinking on the properties of polyelene/wood flour composites［J］. Composites Science and Technology，2005，65(10)：1468-1479.

［20］何春霞，侯人鸾，薛　娇，等. 不同模压成型条件下 PP 木塑复合材料性能研究［J］. 农业工程学报，2012，28(15)：145-150.
He Chunxia，Hou Renluan，Xue Jiao，et al. Study on performances of PP wood-plastic composites with different processing methods［J］. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering（Transactions of the CSAE），2012，28(15)：145-150.

［21］侯人鸾，何春霞，于　旻. 稻秸秆/玉米淀粉胶复合材料的制备及性能［J］. 合成材料老化与应用，2012，41(2)：1-5.
Hou Renluan，He Chunxia，Yu Min. Preparation and properties of rice straw/cornstarch adhesive composite［J］. Synthetic Materials Aging and Application，2012，41(2)：1-5.

［22］Fabiyi J S. Chemistry of wood plastic composite weathing［D］. Idaho：University of Idaho，2007.

［23］杨淑惠. 植物纤维化学［M］. 北京：中国轻工业出版社，2001.
Yang Shuhui. Plant fiber chemistry［M］. Beijing：China Light Industry Press，2001.

［24］国家技术监督局. GB/T 16422.3－1997 塑料实验室光源暴露试验方法 Ⅲ：荧光紫外灯［S］. 北京：中国标准出版社，1997.
State Quality Supervision Bureau. GB/T 16422.3－1997 Plastics－Methods of exposure to laboratory light sources Ⅲ：Fluorescent UV lamps［S］. Beijing：China Standard Press，1997.

［25］中国国家标准化管理委员会. GB/T 1040.4－2006 塑料拉伸性能的测定 Ⅳ：各向同性和正交各向异性纤维增强复合材料的试验条件［S］. 北京：中国标准出版社，2006.
Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 1040.4－2006 Plastics－Determination of tensile properties Ⅳ：Test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforces plastic composites［S］. Beijing：China Standard Press，2006.

［26］中国国家标准化管理委员会. GB/T 9341－2008 塑料弯曲性能的测定［S］. 北京：中国标准出版社，2008.
Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 9341－2008 Plastics－Determination of flexural properties［S］. Beijing：China Standard Press，2008.

［27］中国国家标准化管理委员会. GB/T 1043.1－2008 塑料简支梁冲击性能的测定 Ⅰ：非仪器化冲击试验［S］. 北京：中国标准出版社，2008.
Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 1043.1－2008 Plastics－Determination of charpy impact properties Ⅰ：Non-instrumented impact test［S］. Beijing：China Standard Press，2008.

［28］党文杰. 紫外加速老化对木纤维聚丙烯复合材料性能的影响［D］. 黑龙江：东北林业大学，2007.
Dang Wenjie. Influence of ultraviolet accelerated weathering on the properties of wood fiber/polypropylene composites［D］. Heilongjiang：Northeast Forestry University，2007.

［29］Selden R，Nystrom B，Langstrom R. UV aging of polypropylene/wood-fiber composites［J］. Polymer Composites，2004，25(5)：543-553.

［30］石　光，秦　炜，林少全，等. 木塑复合材料老化性能研究进展［J］. 包装工程，2009，30(1)：120-123.
Shi Guang，Qin Wei，Lin Shaoquan，et al. Research progresses of aging performance of wood-plastic composite［J］. Packaging Engineering，2009，30(1)：120-123.