温湿度和紫外老化对纸浆模塑材料性能的影响

田章，肖生苓，王全亮
（东北林业大学，哈尔滨 150040）

摘要：目的 研究温度、湿度和紫外老化对脱木素和未脱木素纸浆模塑材料性能的影响，定量地对比不同因素作用下2种材料的力学性能差异。**方法** 以废纸浆为原料，经打浆、脱木素、湿成型、热压等工艺制得脱木素和未脱木素等2种纸浆模塑材料；模拟不同的温湿度和紫外老化环境，测试2种纸浆模塑材料物理力学性能的变化。**结果** 在同等条件下，脱木素材料的拉伸强度与弯曲强度均高于未脱木素材料；2种材料的拉伸强度、弹性模量和弯曲强度随着含水率升高而大幅降低；当温度为20℃、含水率为0~40%时，脱木素材料的拉伸强度下降了45 MPa，未脱木素材料的拉伸强度下降了35 MPa。当温度为0℃、含水率为0~40%时，脱木素材料的弯曲强度下降了70 MPa，未脱木素材料的弯曲强度降低了62 MPa；当含水率低于20%时，脱木素材料的拉伸性能和弯曲性能更易受到温度影响；虽然2种材料的拉伸性能和弯曲性能均随着紫外老化时间的延长而不断降低，但其影响程度远小于温湿度。**结论** 湿度对材料的力学性能影响最大，其次是温度和紫外老化；脱去木素有利于提高纸浆模塑材料的力学性能和抗紫外老化性能。

关键词：纸浆模塑；温湿度；紫外老化；力学性能
中图分类号：TB484.1　**文献标识码：**A　**文章编号：**1001-3563(2019)17-0096-08
DOI：10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.17.014

Effects of Temperature, Humidity and Ultraviolet Aging on Properties of Pulp Molding Materials

TIAN Zhang, *XIAO Sheng-ling*, *WANG Quan-liang*
(Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

ABSTRACT: The paper aims to study effects of temperature, humidity and UV aging on properties of delignified and undelignin pulp molding materials, to quantitatively compare the differences in mechanical properties of the two materials under different factors. With waste paper pulp as raw material, pulping, delignification, wet forming, hot pressing and other processes were carried out to obtain two kinds of pulp molding materials: delignification and non-de-lignin; different temperature and humidity and ultraviolet aging environments were simulated to test changes in the physical and mechanical properties of two pulp molding materials. Under the same conditions, the tensile strength and flexural strength of delignified materials were higher than that of unde-lignin materials; the tensile strength, elastic modulus and flexural strength of the two materials decreased greatly with the increase of water content; at 20 °C and water content of 0~40%, the tensile strength of the delignified material was reduced by 45 MPa, and the tensile strength of the unde-lignin material was decreased by 35 MPa. At 0 °C and water content of 0~40%, the bending strength of the delignified material was reduced by 70 MPa, and

收稿日期：2019-03-20
基金项目：哈尔滨市应用技术研究与开发项目（优秀学科带头人A类）(2016RAXXJ004)
作者简介：田章（1996—），男，东北林业大学硕士生，主攻物流工程与纸浆模塑包装材料。
通信作者：肖生苓（1961—），女，博士，东北林业大学教授，主要研究方向为物流工程与生物质材料。

the bending strength of the unde-lignin material was reduced by 62 MPa; when the water content was less than 20%, the tensile properties and bending properties of lignin materials were more susceptible to temperature; although the tensile properties and bending properties of the two materials were continuously reduced with the extension of UV aging time, the degree of influence was much less than the temperature and humidity. Humidity has the greatest influence on the mechanical properties of the material, followed by temperature and UV aging. Removal of lignin is beneficial to improve the mechanical properties and UV aging resistance of the pulp molding materials.

KEY WORDS: pulp molding; temperature and humidity; ultraviolet aging; mechanical properties

纸浆模塑材料是一种应用日益广泛的材料，其具备良好的防撞、防震、防腐等性能，可以替代 EPS 发泡材料和传统木材。普通纸板一般先形成薄壁纸张，再组装成瓦楞、蜂窝等结构的材料，其一般用于承载较轻物品。纸浆模塑材料是一种通过工艺控制可以一次成型为高密度、高强度、高承载性且自支撑性能优良的材料，如重载纸浆模塑托盘综合承载质量可达 2~3 t。以上优异性能使得纸浆模塑材料在物流和包装领域被广泛应用[1—4]。机械强度是影响纸浆模塑材料应用的关键性能指标。纸浆模塑材料是以纤维素为主要成分的聚合物材料，在其冷压和热压工艺中，由于表面张力的原因，纤维间接触更加紧密，增加了纤维素间羟基的接触点，使产品相比于普通纸板有更高的强度。然而，其丰富的羟基基团也使得纤维材料极易吸收环境中的水分，进而导致纤维材料强度发生变化。此外，在长时间紫外线照射下，纸制品中的纤维基团会发生氧化降解反应，进而导致纸制品老化变脆[5—7]。复杂环境条件下，如振动、冲击、腐蚀和潮解等，会造成纸浆模塑材料的损坏，进而使其功能丧失[8]。在实际流通环境中，温度、湿度和紫外线老化是影响纸浆模塑材料力学性能的重要因素。我国幅员辽阔，不同地区的温湿度、降水量以及紫外线照射条件等差异较大[9]。探讨环境因素（温度、湿度和紫外老化）对纸浆模塑材料力学性能的影响，对其进一步开发利用具有重要的现实意义。

国内外对纸浆模塑材料力学性能变化的研究较多。Curling[10]等探究了秸秆在纸浆模塑制品制造中的应用，发现含 80%（质量分数）秸秆的纸浆模塑材料的拉伸性能优于膨胀聚苯乙烯和 EPS，且具有良好的生物降解性。王全亮等[11]研究发现，废纸板纤维模塑材料在热压干燥过程中，原始水分增加会提高材料的密度和强度，且材料强度与密度呈正相关。李琛等[12]在探究成型工艺对瓦楞纸箱力学性能的影响时，发现热压压力与试样抗张强度、弹性模量、断裂伸长率呈正相关；此外，在热压温度为 165 ℃、打浆度为 27 ºR 的条件下，材料挺度最好。Wang 等[13]研究发现，对浆料纤维选择性去除细胞壁表层的木素，能够显著提高纤维模塑材料的拉伸强度和弯曲强度，且材料的疏水性也得到一定改善。Virginia 等[14]通过在纸浆模塑材料中加入碳纤维，有效改善了材料的耐水性和力学强度。陆新宗等[15]利用漆酶对杨木浆进行生物酶处理，氧化降解纸浆中的残余木素，使得纸浆模塑包装材料的抗张性能明显提高。

陆智明等[16]研究发现，在纤维材料的热成型过程中，温度过高或时间过长会使纤维材料的强度下降。邵珍珠等[17]研究表明，当相对湿度高于 50%时，纸浆模塑材料的静态抗压能力随相对湿度的升高而降低；当湿度一定时，该制品的静态抗压性能随温度的升高而增强，当温度升至 40 ℃时，抗压性能达到最高；在温度为 40 ℃、相对湿度为 50%的条件下，静态抗压性能最好；在温度为 5 ℃，相对湿度为 30%时性能最差。肖颖喆等[18]在 5，23，40 ℃下对纸浆模塑材料进行静态抗压测试，发现在温度为 40 ℃、相对湿度为 50%的条件下，制品的第 2 次屈曲载荷较高；温度为 5，23 ℃时制品的第 2 次平均屈曲载荷分别降低了 16.7%和 30.0%，这表明在 40 ℃时纸浆模塑制品的静态抗压性能较优。彭春虎等[19]测定了不同湿度条件下（相对湿度为 50%、70%、80%和 90%）纸浆模塑材料的力学性能，其静态压缩试验和动态冲击试验结果显示，随着湿度的增加，纸浆模塑制品的静态和动态缓冲性能明显下降。

近年来，国内外对于纸浆模塑制品的研究主要集中在生产机械的优化改进、模具设计、产品表面处理与改性以及制品结构设计等方面，对于温湿度及紫外线老化对纸浆模塑材料力学性能的影响研究较少。文中模拟温湿度及紫外老化条件，通过力学测试分析，研究温度、湿度及紫外老化环境因素对脱木素和未脱木素纤维材料力学性能的影响，为纸浆模塑材料的生产和应用提供重要数据参考和理论依据。

1　试验

1.1　原料及试剂

原料主要有废旧瓦楞纸板，购自哈尔滨某废品回收站。试剂主要有冰醋酸（CH_3COOH），分析纯，天津市富宇精细化工有限公司；亚氯酸钠（$NaClO_2$），质量分数为 80%，上海麦克林生化科技有限公司。

1.2 主要仪器及设备

主要仪器有 ZT4-00 型打浆机、ZT7-01 型纸样成形器、ZT16-00 型标准纤维解离器，兴平中通试验装备有限公司；ZG-20T 型热压机，东莞正工机电设备科技有限公司；CMT5504 型万能力学试验机，深圳新三思材料检测有限公司；DH3600Π型电热恒温培养箱，天津市泰斯特仪器有限公司；BX53 型生物显微镜，上海赖氏电子科技有限公司；ZN-P 型紫外老化试验箱，上海迈捷试验设备有限公司；BC/BD-88HA 型卧式转换型冷藏/冷冻箱，河南新飞电器有限公司。

1.3 方法

1.3.1 浆料的制备

将废旧纸板裁切成约 20 mm×20 mm 的片状，水中浸渍 4 h，根据 GB/T 3703—1999 对浆料进行打浆处理。根据 GB/T 3332—2004 测定打浆度，制得平均打浆度为 23 °R 的废纸板浆（Waste Paperboard Pulp，WPP）。依据 GB/T 2677.10—1995，将原始浆料在 75 ℃下水浴加热，随后加入冰醋酸和亚氯酸钠进行反应去除木素。称量等量浆料在 75 ℃下水浴加热做对照组。反应结束后，浆料经多次洗涤、甩干、密封 12 h 平衡水分备用。

1.3.2 纸浆模塑材料的制备

纸样成形器抄制定量为 800 g/m^2 的湿纸坯，随后对纸坯进行预压（冷压），压力为 10 MPa、时间为 1 min，冷压后每片纸坯质量控制为 85 g，密封 12 h 平衡水分备用。对平衡水分后的纸坯进行热压，温度为 170 ℃、压力为 8 MPa、保温 20 min，然后取出并冷却，得到直径为 200 mm、厚度约为 0.7 mm、定量约为 720 g/m^2 的所需模塑材料。制浆过程中产生的废水中含有大量有机物，课题组其他成员通过絮凝、沉降等步骤去除废液中的悬浮固体，通过生化处理，降解废水中的有机物，以解决废水问题。

1.3.3 温湿度试验

试验采用电热恒温箱和冰箱来控制温度。结合实际环境条件，设置 5 个温度梯度（−20，0，20，40，70 ℃）。纸浆模塑材料在一定湿度下易吸收水分，湿度最终会影响吸湿量，也就是其含水率。设置含水率梯度前需测出 2 种纸浆模塑材料在 5 个温度梯度下的最大吸湿量。在同一块纸浆模塑材料上裁取 30 mm×30 mm 小样片进行吸湿试验，将吸湿前经过绝干处理的小样片放入−20~70 ℃且湿度饱和的密闭环境中，同时放置一组小样片浸渍在水中，分别于 24 h 和 48 h 后去除游离水计算吸湿率。

1.3.4 紫外老化试验

紫外老化箱内模拟自然光进行紫外老化试验。依据 GB/T 22894—2008 确定紫外时间为 0，10，20，30，40 d，共 5 个梯度。将脱木素和未脱木素材料的各 4 份试样悬挂在老化箱中，避免相互接触、遮挡或折叠，保持箱内温度在 80 ℃左右，相对湿度在 65%左右。定期各取出 1 份试样，连同空白试样分别密封保存于黑暗环境中。

1.4 力学性能测试

拉伸试验参照 GB/T 1040.3—2006 设定夹具间初始距离为 100 mm、标距为 100 mm、试样平均宽度约为 15 mm、试样厚度约为 0.7 mm，同温度和含水率条件下设置 6 组平行实验，取均值为最终数据。试验过程中控制温度和含水率。

弯曲试验采用三点弯曲法，根据 GB/T 9341—2008，试样长度为 80 mm、试样跨度为 40 mm、弯曲速度为 15 mm/min、试样宽度约为 15 mm、试样厚度约为 0.7 mm，同温度和含水率条件下设置 4 组平行实验，取均值为最终数据。试验过程中控制温度和含水率。

拉伸应变 ε 反映了材料塑性性能，计算公式见式（1）。

$$\varepsilon=\frac{\Delta L_0}{L_0}\times 100\% \tag{1}$$

式中：ΔL_0 为试样断裂时标距间长度的增量（mm）；L_0 为试样标距间原始长度（mm）；ε 为断裂拉伸应变（%）。

弹性模量计算公式见式（2）。

$$E=\frac{\Delta F}{\Delta x}\times\frac{L}{bt} \tag{2}$$

式中：ΔF 为拉伸应力增量（N）；b 为试样条宽度（mm）；t 为试样条厚度（mm）；X 为拉伸位移（mm）；Δx 为拉伸位移增量（mm）；L 为拉伸时标距（mm）。此试验中，L 为 100 mm，b 为 15 mm，t 为 0.720 mm，根据试验中计算机记录拉伸应力和材料应变值，进而计算弹性模量。

1.5 数据处理及方法

采用 Spss 20.0 和 Excel 2016 统计软件进行数据处理及差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 温湿度试验结果与分析

不同吸湿条件下的吸湿率见图 1。由图 1 可知，随着温度升高，对应的饱和湿度增加，材料吸水率增加。根据图 1 结果，设定脱木素材料的含水率为 0，5%，10%，20%，40%，60%，80%和 84%，共 8 个梯度；设定未脱木素材料的含水率为 0，5%，10%，

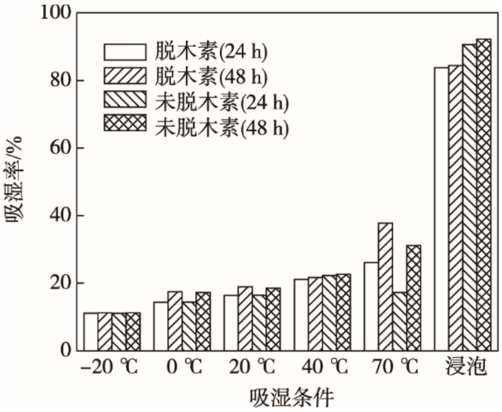


图 1　不同吸湿条件下的吸湿率
Fig.1 Moisture absorption rate under different moisture absorption conditions

20%，40%，60%，80%和 90%，共 8 个梯度。

2.2　温度及含水率对材料拉伸强度和弹性模量的影响

2.2.1　拉伸强度结果与分析

在不同的温度条件下，脱木素和未脱木素材料拉伸强度随含水率的变化情况见图 2。从图 2 可以看出，当温度为−20 ℃时，在脱木素材料含水率从 0 上升到 5%的过程中，拉伸强度会小幅度上升。此外，同一温度下脱木素材料和未脱木素材料的拉伸强度均随着含水率的增加而降低，且脱木素材料拉伸强度始终大于未脱木素。由 Wang 等[20]的研究可知，木质素脱除后，纤维间出现了明显的粘附物质和结块，纤维间接触面积和结合紧密度增加，因此脱木素可提高材料的拉伸性能。

当温度为 20 ℃、含水率为 0~40%时，脱木素材料拉伸强度下降了 45 MPa，降幅为 82%；未脱木素材料拉伸强度下降了 35 MPa，降幅为 87%。这归因于材料含水率上升，纤维中吸附了大量液态水，导致纤维之间变得相对分散，结合力降低。脱木素和未脱木素材料在含水率达 40%以后拉伸强度均趋于稳定，原因是纤维对水的吸附趋于饱和，对拉伸强度的影响减小。

在含水率为 0~20%时，脱木素材料拉伸强度随温度的变化幅度相对较大，未脱木素材料拉伸强度随着温度的变化幅度相对较小。当含水率为 0、温度为−20~20 ℃时，脱木素材料的拉伸强度提高约 22 MPa，未脱木素材料拉伸强度上升约 7 MPa，说明脱木素材料更易受温度的影响。相比于含水率，温度对脱木素材料和未脱木素材料拉伸强度的影响较小。

不同温度下脱木素和未脱木素材料断裂拉伸应变率与含水率的变化关系见图 3。由图 3 可知，2 种

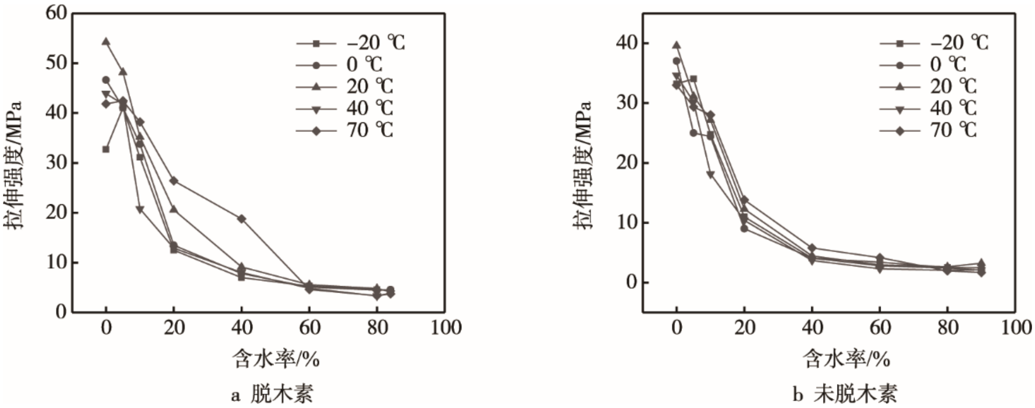


图 2　不同温度条件下同种材料拉伸强度随含水率的变化情况
Fig.2 Tensile strength of the same material changing with water content under different temperature conditions

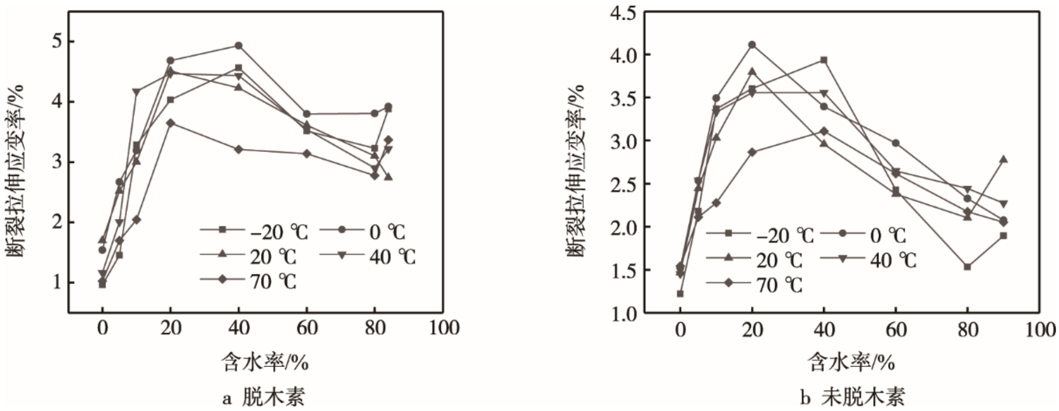


图 3　不同温度条件下同种材料断裂拉伸应变率随含水率的变化情况
Fig.3 Tensile strain at break of the same material changing with water content under different temperature conditions

材料的断裂拉伸应变率均随含水率增加而先增加后降低。当含水率低于 20%时，2 种材料的断裂拉伸应变率随含水率升高呈直线上升趋势；当含水率高于 20%时，则缓慢降低，脱木素材料的应变下降幅度较小，未脱木素材料的应变下降较为明显。2 种材料的断裂拉伸应变率均低于 5%。

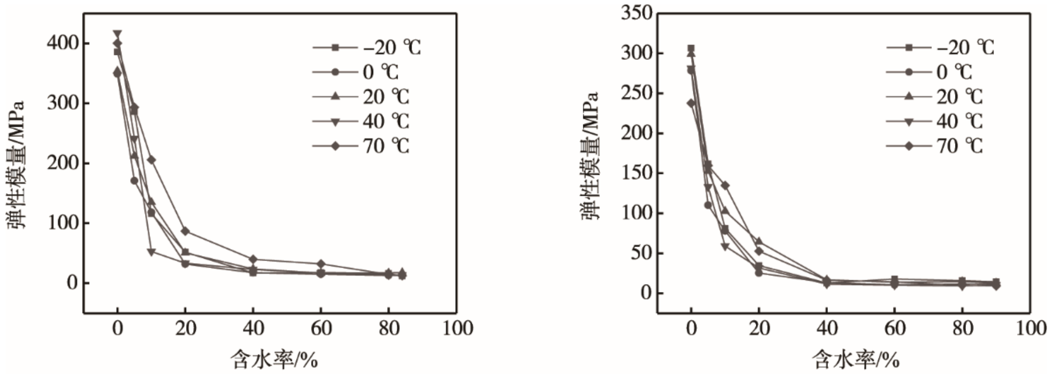
2.2.2　弹性模量结果与分析

在不同的温度条件下，脱木素和未脱木素材料弹性模量随含水率的变化曲线见图 4。由图 4 可知，材料在拉伸过程中呈现出 3 个阶段，即弹性阶段、弹塑性阶段和断裂破坏阶段[21]。同一温度下，脱木素和未脱木素材料的弹性模量随着含水率增加均逐渐降低。在同一含水率情况下，脱木素材料的弹性模量高于未脱木素材料。含水率为 0~20%时，材料弹性模量大幅降低，之后趋于稳定。

当温度为 20 ℃、含水率位 0~20%时，脱木素材料的弹性模量下降了 300 MPa，降幅为 86%；未脱木素材料弹性模量下降了 240 MPa，降幅为 80%。在含水率为 0~20%的区间内，脱木素材料弹性模量随温度的变化幅度相对较大，未脱木素材料弹性模量随着温度的变化幅度相对较小。当含水率为 10%、温度为 40~70 ℃时，脱木素材料的弹性模量提高了约 150 MPa，未脱木素材料的弹性模量上升约 75 MPa，说明脱木素材料的弹性模量更易受温度影响。相比于含水率，温度对纸浆模塑材料的弹性模量影响较小。

2.3　温度及含水率对材料弯曲强度的影响

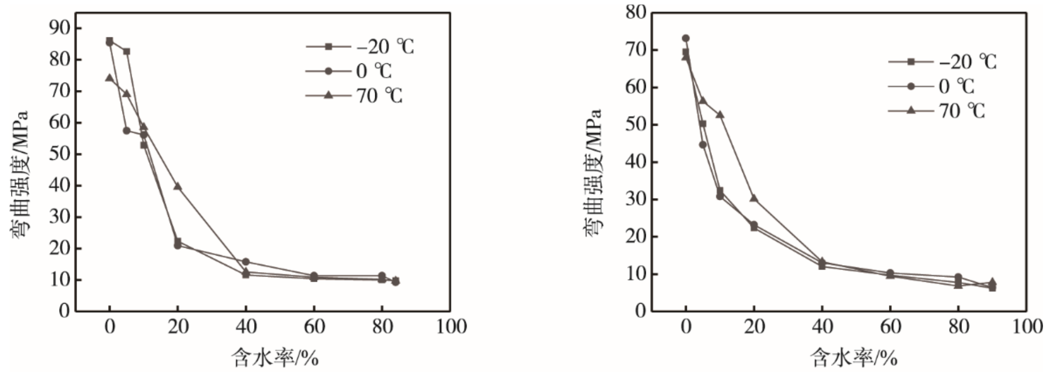
试样在弯曲过程中承受的最大弯曲应力称为弯曲强度。在不同温度梯度情况下同种材料弯曲强度随含水率的变化趋势见图 5。由图 5 可知，在−20，0，70 ℃温度梯度下，脱木素材料与未脱木素材料的弯曲强度均随着含水率的升高而降低。当温度为 0 ℃、含水率为 0~40%时，脱木素材料弯曲强度降低了 70 MPa，降低幅度约为 82%；未脱木素材料弯曲强度降低了 62 MPa，降低幅度约为 84%。相比之下，脱木素材料下降幅度较大。在相同温度和含水率下，脱木素材料的弯曲强度大于未脱木素。在含水率为 0、温度为−20 ℃时，脱木素材料的弯曲强度达到最大值（86.2 MPa）。在含水率为 0、温度为 0 ℃时，未脱木素材料的弯曲强度达到最大值（73.1 MPa）。当含水率为 20%、温度为−20~70 ℃时，脱木素材料的弯曲强度升高了 17 MPa，未脱木素材料的弯曲强度升高 8 MPa，说明脱木素材料弹性模量更易受温度影响。脱木素材料与未脱木素材料的弯曲强度受温度影响较小，含水率是造成材料弯曲强度变化的主要因素。



a 脱木素　　b 未脱木素

图 4　不同温度条件下同种材料弹性模量随含水率的变化情况

Fig.4 Elastic modulus of the same material changing with water content under different temperature conditions



a 脱木素　　b 未脱木素

图 5　不同温度条件下同种材料弯曲强度随含水率的变化情况

Fig.5 Flexural strength of the same material changing with water content under different temperature conditions

Spss 20.0 软件通过非参数检验获得的材料拉伸强度与弯曲强度变化显著性差异情况见表 1。由表 1 可知，各等温曲线间，纸浆模塑材料拉伸强度与弯曲强度随含水率变化情况并无显著性差异（$P>0.05$），说明两种纸浆模塑材料拉伸强度和弯曲强度均极易受含水率影响，同时也可看出温度带来的影响非常小。结合图 2 和图 5 可以看出，在含水率为 0~20%时，纸浆模塑材料的拉伸强度和弯曲强度降幅达 80%左右，在实际使用中严格控制其含水率对于延长纸浆模塑制品的使用寿命具有重要意义。

表 1　材料拉伸强度与弯曲强度的变化显著性差异
Tab.1 Significant difference in tensile strength and flexural strength of materials

曲线类别	类别	*P*值
脱木素材料各等温曲线	拉伸强度	0.959
未脱木素材料各等温曲线	拉伸强度	0.953
脱木素材料各等温曲线	弯曲强度	0.998
未脱木素材料各等温曲线	弯曲强度	0.951

2.4　紫外老化对材料拉伸性能的影响

材料拉伸强度和断裂拉伸应变率随紫外老化时间的变化关系见图 6。由图 6 可知，材料在紫外老化影响下，其拉伸强度和断裂拉伸应变率均随着紫外老化时间的延长而减小，且两者下降速度均较慢。在紫外老化 0~40 d 的过程中，脱木素材料的拉伸强度降低了约 15 MPa，断裂拉伸应变率降低了约 0.68%；未脱木素材料的拉伸强度降低了约 9 MPa，断裂拉伸应变率降低了约 0.8%。随着紫外老化时间的增加，材料强度降低，脆性增强。在相同的紫外老化时长下，脱木素材料的拉伸强度均大于未脱木素材料，断裂拉伸应变小于未脱木素材料。紫外老化时长变化导致 2 种材料拉伸强度变化差值均在 15 MPa 以内，断裂拉伸应变变化差值均在 1%以内。

不同紫外老化时长条件下试样的拉伸应力-位移曲线见图 7。每条曲线代表 1 个试样，2 种材料在各个紫外老化时长下有 5 条曲线，标号 1—25 为脱木素材料，26—50 为未脱木素材料。由图 7 可知，脱木素材料的力学强度明显高于未脱木素材料，说明脱木素材料的拉伸应力要高于未脱木素材料。在拉伸过程的弹性阶段，脱木素材料的弹性模量高于未脱木素材料。对比图 2，含水率是影响材料拉伸性能的主要因素，其次是温度和紫外老化。

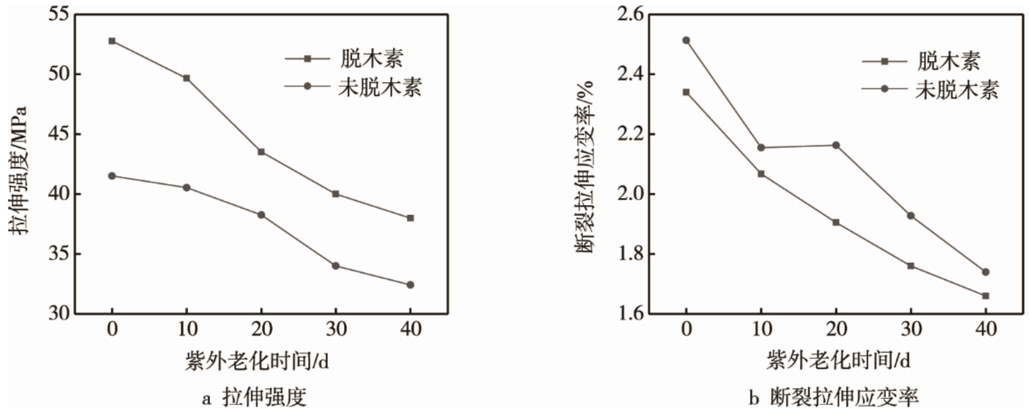


图 6　2 种材料拉伸强度和断裂拉伸应变率随紫外老化时间的变化情况
Fig.6 Tensile strength and tensile strain rate of two materials changing with UV aging duration

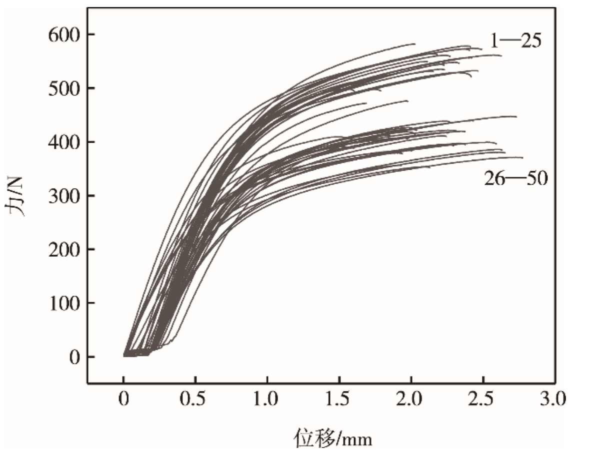


图 7　不同紫外老化时长下 2 种材料的拉伸应力-应变曲线
Fig.7 Tensile stress-strain curves of two materials under different UV aging durations

2.5　紫外老化对材料弯曲性能的影响

材料弯曲强度和弯曲模量随紫外老化时间的变化趋势见图 8。由图 8 可知，经紫外老化处理后，未脱木素材料的弯曲强度和弯曲模量均随着紫外老化时间的增加而降低。脱木素材料的弯曲强度和弯曲模量下降速度较慢，紫外老化时间至 40 d 时，脱木素材料弯曲强度降低 12 MPa，弯曲模量降低 1.8 MPa。未脱木素材料下降速度较快，紫外处理 40 d 时，弯曲强度降低了 25 MPa，弯曲模量降低了 3 MPa。

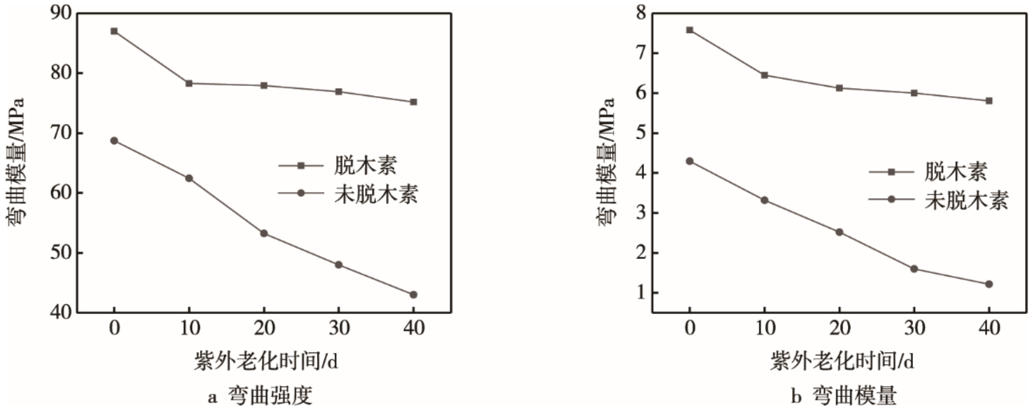


图 8 2 种材料弯曲强度和弯曲模量随紫外老化时间的变化情况
Fig.8 Flexural strength and flexural modulus of the two materials vary with UV aging duration

脱木素材料与未脱木素材料的拉伸强度随紫外老化时间变化虽不具有显著性差异（P=0.117，P>0.05），但 2 种材料弯曲强度随紫外老化时间延长具有显著性差异（P=0.009，P<0.05），因此，脱除木素可有效保持经紫外老化后纸浆模塑材料的弯曲性能。

3 结语

以废旧瓦楞纸板为原料，经打浆、脱木素、成型、热压等工艺制备脱木素和未脱木素纸浆模塑材料，研究温湿度及紫外老化对其物理力学性能的影响，得出以下结论。

1）不同温度下，含水率对纸浆模塑材料拉伸强度和弯曲强度具有极大的影响。在含水率 0~40%时，纸浆模塑材料拉伸强度下降约 82%，弯曲强度下降约 80%。当含水率高于 40%时，纸浆模塑材料的力学性能缓慢下降并逐渐趋于稳定。

2）不同含水率下，温度对纸浆模塑材料力学性能无显著性影响。随着温度升高，纸浆模塑材料拉伸强度和弯曲强度虽然均小幅升高，但脱木素材料对温度更敏感。在相同条件下，脱去木素有利于提高纸浆模塑材料的力学性能。

3）虽脱除木素对纸浆模塑材料拉伸强度随紫外时长的变化无显著性影响，其拉伸强度随着紫外时长增大而降低，但脱木素对于材料弯曲强度随紫外时长的变化具有显著性影响。紫外老化 40 d 时，未脱木素材料弯曲强度降低约 40%，脱木素材料仅降低约 13%，可见脱木素可有效保持纸浆模塑材料的弯曲性能。

4）对纸浆模塑材料力学性能影响最大的环境因素是湿度，其次是温度和紫外老化；脱木素有助于增强纸浆模塑材料的力学性能和抗紫外老化性能。综上所述，对纸浆模塑材料进行适当的脱木素处理，降低湿度、控制其流通环境温度，并减少室外紫外照射，可有效延长纤维模塑制品的使用寿命。

参考文献：

[1] 刘全祖，沈祖广，黄良，等. 纸浆模塑制品的研究现状与发展趋势[J]. 包装工程, 2018, 39(7): 97—103.
LIU Quan-zu, SHEN Zu-guang, HUANG Liang, et al. Research Status and Development Trend of Pulp Molded Products[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(7): 97—103.

[2] 荣人慧. 木质剩余物高木素含量纸浆模塑包装材料的研究[D]. 哈尔滨：东北林业大学, 2017.
RONG Ren-hui. Research on Wood Lignin High Lignin Content Pulp Molding Packaging Materials[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2017.

[3] DIDONE M, TOSELLO G. Moulded Pulp Products Manufacturing with Thermoforming[J]. Packaging Technology and Science, 2018.

[4] 王全亮，肖生苓，岳金权，等. 重载纸浆模塑托盘研究现状及存在的问题[J]. 化工新型材料, 2017, 45(4): 7—9.
WANG Quan-liang, XIAO Sheng-ling, YUE Jin-quan, et al. Research Status and Existing Problems of Heavy Duty Pulp Molding Pallets[J]. New Chemical Materials, 2017, 45(4): 7—9.

[5] 陈玲，黄晓霞. 非水相 MgO 脱酸体系在纸质档案脱酸中的老化行为——以书写纸为例[J]. 档案学通讯, 2018(1): 97—102.
CHEN Ling, HUANG Xiao-xia. Aging Behavior of Non-aqueous MgO Deacidification System in Deacidification of Paper Archives—a Case Study of Writing Paper[J]. Archives of Communications, 2018(1): 97—102.

[6] 黄昌海. 纸浆模塑制品的生产与设计要点[J]. 印刷技术, 2016(24): 34—36.
HUANG Chang-hai. Key Points in Production and Design of Pulp Molded Products[J]. Printing Techniques, 2016(24): 34—36.

[7] PÉREZ M K, REINALDO M, VITOR T E A. A Coupled Process Configuration, Lot-sizing and Scheduling Model for Production Planning in the Molded Pulp

Industry[J]. International Journal of Production Economics, 2018: 227—243.

[8] WEI C, WANG W, LIU H, et al. Mechanical Properties of Phenol/Formaldehyde Resin Composites Reinforced by Cellulose Microcrystal with Different Aspect Ratio Extracted From Sisal Fiber[J]. Polymers for Advanced Technologies, 2017, 28(8): 1013—1019.

[9] 王倩茹，范广洲，文小航．中国区域高分辨率土壤温湿度特征分析[C]// 第 34 届中国气象学会年会 S6 东亚气候多时间尺度变异机理及气候预测论文集，2017: 2.
WANG Qian-ru, FAN Guang-zhou, WEN Xiao-hang. Analysis of High Temperature Soil Temperature and Humidity Characteristics in China[C]// the 34th Annual Meeting of Chinese Meteorological Society S6 East Asian Climate Multi-Time Scale Variation Mechanism and Climate Prediction Proceedings, 2017: 2.

[10] CURLING S F, LAFLIN N, DAVIES G M, et al. Feasibility of Using Straw in AStrong, Thin, Pulp Moulded Packaging Material[J]. Industrial Crops and Products, 2017, 97: 395—400.

[11] 王全亮，肖生苓．重载纤维模塑材料热压成型的传热规律研究[J]．中南林业科技大学学报，2017, 37(12): 139—145.
WANG Quan-liang, XIAO Sheng-ling. Study on Heat Transfer Law of Hot Press Forming of Heavy Duty Fiber Molding Materials[J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2017, 37(12): 139—145.

[12] 李琛，荣人慧，肖生苓．成型工艺对废旧瓦楞纸箱制备包装材料性能的影响[J]．科技导报，2015, 33(12): 61—66.
LI Chen, RONG Ren-hui, XIAO Sheng-ling. Effect of Molding Process on Properties of Waste Corrugated Box Preparation Packaging Materials[J]. Science & Technology Review, 2015, 33(12): 61—66.

[13] WANG Q L, XIAO S L, SHI S Q, et al. Effect of Light-delignification on Mechanical, Hydrophobic, and Thermal Properties of High-strength Molded Fiber Materials[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 955.

[14] GOUW V P, JUNG J, SIMONSEN J, et al. Fruit Pomace as a Source of Alternative Fibers and Cellulose Nanofiber as Reinforcement Agent to Create Molded Pulp Packaging Boards[J]. Composites Part A Applied Science & Manufacturing, 2017, 99: 48—57.

[15] 陆新宗，肖生苓，王全亮，等．漆酶对杨木纸浆模塑包装材料抗张性能的影响[J]．森林工程, 2018, 34(2): 54—59.
LU Xin-zong, XIAO Sheng-ling, WANG Quan-liang, et al. Effect of Laccase on Tensile Properties of Poplar Pulp Molding Packaging Materials[J]. Forest Engineering, 2018, 34(2): 54—59.

[16] 陆智明．蔗渣改性生物基复合材料的制备与研究[D]．广州：华南理工大学, 2012.
LU Zhi-ming. Preparation and Research of Bagasse Modified Bio-based Composites[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.

[17] 邵珍珠．纸浆模塑在不同温湿度条件下的缓冲性能研究[D]．长沙：湖南工业大学, 2016.
SHAO Zhen-zhu. Study on Cushioning Performance of Pulp Molding Under Different Temperature and Humidity Conditions[D]. Changsha: Hunan University of Technology, 2016.

[18] 肖颖喆，邵珍珠，莫灿梁．温度对纸浆模塑制品静态抗压性能的影响[J]．包装工程, 2016, 37(9): 36—39.
XIAO Ying-zhe, SHAO Zhen-zhu, MO Can-liang. Effect of Temperature on Static Compressive Properties of Pulp Molded Products[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(9): 36—39.

[19] 彭春虎．纸浆模塑制品缓冲性能实验研究与有限元分析[D]．广州：暨南大学, 2011.
PENG Chun-hu. Experimental Study and Finite Element Analysis of Cushioning Properties of Pulp Molded Products[D]. Guangzhou: Jinan University, 2011.

[20] WANG Q L, XIAO S L, SHI S Q, et al. The Effect of Delignification on the Properties of Cellulosic Fiber Material[J]. Holzforschung, 2018, 72(6), 443—449.

[21] 张吉雷，郑会宝，张永侠，等．纤维增强复合材料断裂拉伸应变测试技术的研究[J]．计量与测试技术, 2017, 44(5): 30—32.
ZHANG Ji-lei, ZHENG Hui-bao, ZHANG Yong-xia, et al. Research on Fracture Tensile Strain Testing Technology of Fiber Reinforced Composites[J]. Metrology & Testing Technology, 2017, 44(5): 30—32.