

学号：20161443

天 津 商 业 大 学 毕 业 设 计（论 文）

植物纤维多孔材料的制备及其缓冲性能的研究

**Research on preparation of plant fiber porous material
and its cushioning properties**

学 院:	机械工程学院
教 学 系:	包装工程系
专业班级:	包装工程 1601 班
学生姓名:	马泽玉
指导教师:	石 岩 教授

2020 年 6 月 6 日

目 录

内容摘要.....	I
Abstract.....	II
1 导言.....	1
1.1 多孔材料的介绍和定义.....	1
1.2 植物纤维多孔材料的制备.....	1
1.3 植物纤维多孔材料的研究进展.....	2
1.4 溶解浆的介绍.....	5
1.5 本课题研究的目的是和意义.....	6
1.6 本课题要解决的主要问题.....	7
1.7 本课题的实验方案.....	7
2 三种不同溶解浆的植物纤维多孔材料的制备实验.....	9
2.1 实验原料与药品.....	9
2.2 实验仪器与设备.....	9
2.3 试验方法.....	10
3 实验结果与讨论.....	15
3.1 不同条件制备的植物纤维多孔材料的成型情况.....	15
3.2 添加不同助剂的植物纤维多孔材料干燥前后的收缩率.....	16
3.3 添加不同助剂的植物纤维多孔材料的断面形貌.....	17
3.4 添加不同助剂的植物纤维多孔材料的振动缓冲性能.....	18
3.5 添加不同助剂的植物纤维多孔材料的静态压缩性能.....	19
5 总结.....	21

参考文献..... 23

致谢..... 25

内容摘要：随着日益增长的环保要求，来源于植物源的可降解缓冲包装材料的使用和开发引起了广泛的关注。所以本课题以三种不同植物源的商业溶解浆为原料，在NaOH/尿素水溶液溶剂中的溶解，通过模塑成型-再生进行了植物纤维多孔材料的制备及其缓冲性能的研究。通过模塑成型材料干燥前后径向与高度方向尺寸的测量，比较了用不同助剂制备的多孔材料的径向收缩率与高度方向的收缩率，借助扫描电镜观察了所制备材料的断面形貌，通过静态压缩试验绘制应力-应变曲线和缓冲系数-最大应力曲线来分析植物纤维多孔材料的力学性能，通过振动缓冲性能测试比较了制备材料的振动缓冲性能。结果表明在 7%NaOH/12%尿素水溶液溶剂中溶解和在 99.5%CH₃COOH 中再生制备的材料比较柔软、再生容易，试样纤维与纤维间分布最好且孔隙大小和位置分布最为均匀。另外以阔叶木溶解浆为原料制备的植物纤维多孔材料较硬，以针叶木溶解浆为原料制备的植物纤维多孔材料和以竹溶解浆为原料添加淀粉制备的植物纤维多孔材料具备一定的振动缓冲性能和静态压缩缓冲性能。

关键词：溶解浆；植物纤维；纤维素；多孔材料；缓冲材料

Abstract: With the increasing requirements of environmental protection, the use and development of degradable cushioning packaging materials derived from plant sources have attracted wide attention. As a result, the preparation and cushioning properties of porous materials of plant fibers were studied by molding-regeneration using commercial dissolved pulp from three different plant sources in NaOH/ urea aqueous solution solvent. The radial shrinkage and height shrinkage of porous materials prepared with different additives were compared by measuring the radial and height dimensions after drying. The cross-section morphology of the prepared materials was observed by Scanning Electron Microscopic(SEM). The stress-strain curve and cushioning coefficient-maximum stress curve were drawn by static compression test. The results showed that the prepared materials from dissolution in 7%NaOH/12% urea aqueous solution and regeneration by 99.5%CH₃COOH are soft and easy to regenerate, and the distribution between the fiber and the fiber is the best, and the pore size and position are the most uniform. In addition, the porous materials of plant fiber prepared from hardwood dissolving pulp are hard, the porous materials of plant fiber prepared from softwood dissolving pulp and the porous materials of plant fiber prepared from bamboo dissolving pulp added with starch have certain vibration cushioning properties and static compression cushioning properties.

Key Words: dissolved pulp; plant fiber; cellulose; porous materials; cushioning materials

1 引言

1.1 多孔材料的介绍和定义

多孔材料也被称为发泡材料，是因为其内部具有许多的孔隙结构。所有的多孔材料都具有以下两种特征：第一是多孔材料内部有许多的孔结构；第二是多孔材料的孔结构用于满足设计要来获得所需的产品品质因数^[1]。多孔材料作为当前一种新型包装材料，其性能特点如下：

（1）多孔材料不仅原料丰富、价格便宜、不污染环境，而且有助于产品的出口销售，它也可以代替某些难降解对环境有污染的缓冲材料，例如 EPE 和 EPS 等缓冲材料。

（2）与于 EPS 泡沫材料相比，它具有优异的抗静电性能和耐腐蚀性，并且抗冲击性优于纸浆模塑产品。缓冲性能与泡沫塑料制品基本相同，并且不必设计复杂的几何形状就可以达到我们所需要的缓冲性能，从而提高了生产效率和降低了产品的生产难度。

（3）多孔材料的分子结构不均匀，而且里面还有部分杂质^[2]。目前由于发泡技术还尚未成熟，导致多孔材料很难实现大规模的制造。

（4）成本相对其它缓冲包装材料较低。与纸浆模塑成型相比，它不需要成型模具和热压模具等复杂的形状，多孔材料的生产工艺简单、制造周期短、能耗小和原料丰富。

（5）在检测多孔材料的机械性能方面，减震和抗冲击性优于纸浆模塑产品，并且适用于各种功能性产品的生产，例如添加防腐剂、阻燃剂、增塑剂等一些助剂制成不同功能产品。

（6）多孔材料通常也可以被用为生产大型家用电器的缓冲衬垫及部分电子产品的内部填充物^[3]。

1.2 植物纤维多孔材料的制备

目前，植物纤维多孔材料大多是由草类植物纤维、稻草茎和其它农作物秸秆为主要制造原料，利用发泡技术添加一定比例的废纸和添加剂作为助剂来制造的一种可降解无污染的包装缓冲材料^[4,5,6]。在制造植物纤维多孔材料的过程中，主要使用木材、竹子、棉花和纸浆等材料，其通常为粉末或纤维状态，另外还要加入发泡剂、胶黏剂、增塑剂等助剂。由于原料种类和配比的不同，所制备的植物纤维多孔材料的性能也有所不同^[7]。

1.3 植物纤维多孔材料的研究进程

迄今为止，有大量国内外的研究者从各个领域各个方面对植物纤维多孔材料进行了一系列的研究，总体可以归类为以下三类：

- （1）植物纤维多孔材料制作工艺的探究，依据发泡方式分为不添加化学发泡剂和添加化学发泡剂两种方法，依据制造步骤的不同，分为“一步法”和“两步法”；
- （2）植物纤维多孔材料配方的研究，目前研究中大多数使用植物秸秆、废纸、稻草和竹子等纤维作为原料，而且所用到的助剂种类和及配比也不相同；
- （3）植物纤维多孔材料发泡原理的探究，大量研究者对植物纤维多孔材料的发泡原理进行了一系列详细的研究，对纤维发泡的过程和各阶段泡孔的受力情况也进行了详细的研究^[8]。

1.3.1 植物纤维多孔材料的配方研究

植物纤维多孔材料中的植物纤维包括废纸纤维、木材类植物纤维和秸秆类纤维等。从农作物中提取的纤维具有生产周期短和种类广泛等优点，其通常用于植物纤维多孔材料的原料。

国内外研究者通常使用农业作物作为纤维原料的来源，但是由于气候和当地条件的不同，种植的农作物的种类也大不相同。在欧美等国家，通常种植大豆使用大

豆纤维，但是与其他国家的农作物相比，中国的农作物种类更多，主要使用竹纤维、玉米纤维和棉纤维。

P. Cinelli 和 E. Chiellini 等^[9]是通过将聚乙烯醇、马铃薯淀粉和玉米纤维混合，然后将它们放入模具中进行烘烤和发泡制成的植物纤维多孔材料。研究表明，添加玉米纤维可改善多孔材料的防水性能，但会降低机械性能、延展性和柔韧性。聚乙烯醇的添加减轻并进一步改善了上述三种性能下降的趋势，同时进一步提升了植物纤维多孔材料的防水性。

德国不莱梅 PSP 公司开发了一种由废纸纤维和面粉制成的新型材料。在制造过程中不使用化学发泡剂，并且在制造过程中对环境零污染。其原理是将废纸切碎，磨成纤维浆，与面粉以 2: 1 的比例混合，倒入挤出机中，然后挤出成圆柱形颗粒。这种新型材料不仅可以用作一般包装材料，还可以通过二次开发将其转变为二次绝缘和绝热抗静电材料^[10]。G.M.Ganjyal 等^[11]首先用碱处理玉米纤维，然后将其填充到淀粉中混合后挤出成型，分析得出两者之间的相容性非常差，因此发现向系统中添加少量纤维会显著增加植物纤维多孔材料的机械性能。

丁毅和李尧^[12]等开发了一种新型的缓冲材料。利用膨化和模压成型，并以稻草秸秆、果渣和淀粉为原料，制造出一种具有振动缓冲性能、优异弹性和冲击吸收性能的新型多孔材料。

1.3.2 植物纤维多孔材料制造工艺的研究

植物纤维多孔材料的制造工艺过程中最重要的是发泡和成型。

(1) 植物纤维多孔材料的发泡

植植物纤维多孔材料有使用化学发泡剂和不使用化学发泡剂的两种发泡方法，但是发泡原理基本相同。不使用化学发泡剂的发泡方法是利用由蒸汽产生的气压使得气泡膨胀，而使用化学发泡剂的方法是使用化学发泡剂加热至一定温度使发泡剂分解产生气体，产生的气体将泡孔充胀。虽然所使用的材料不同，但原理是利用

气压提供压力以使泡孔膨胀^[13]。许多研究人员对不使用化学发泡剂的发泡方法进行了评估，因为此过程仅使用了蒸汽发泡，原材料到制造和使用过程中对环境无污染，所以这是一项很有前途的技术。

由于发泡过程易于控制，因此目前大量使用使用化学发泡剂的发泡方法。当前常用的发泡剂主要有碳酸氢铵，碳酸铵和碳酸氢钠。但是，某些化学发泡剂分解产生的气体可能会对环境产生负面影响，因此在制备多孔材料时，发泡剂的选择非常重要^[14]。

（2）植物纤维多孔材料的成型

植物纤维多孔材料的成型方法有两种即一步成型法和两步成型法。一步成型方法是原材料经混合、制浆、浇注、泡孔成型、固化和脱模最终生产成产品。两步成型法的过程是将植物纤维压碎成小于 5 mm² 的细纤维，将它们与增粘剂按一定比例混合，然后挤出形成直径约为 1-3 mm 的圆柱状颗粒。原材料在挤出过程中，受到水蒸气的压力发泡膨胀，形成膨胀的颗粒。将膨胀的颗粒放入用热压成型的各种模具中后，可以获得各种形状的缓冲材料^[15]。目前，国外对植物纤维多孔材料的制备多一般采用两步成型法，因为两步成型法所制得的多孔材料即可降解而且也对环境零污染。在中国，主要使用一步成型法但是当化学发泡剂分解时产生的气体会对环境造成不利影响，并且无法在一次成型中调整产品的结构。多样性也远少于两步成型法所制得产品。近年来，由于国家环境保护政策的实施和公众对环境保护的意识不断地提高，国内研究正逐渐转向不使用化学发泡剂的发泡方法来制备植物纤维多孔材料。

李媛媛^[16]以秸秆纤维为原料，用一步成型法制备了一种新型的植物纤维多孔材料。在实验中，使用了两种不同的发泡剂 Na_2CO_3 和 NH_4CO_3 进行了对比实验，发现 NH_4CO_3 比前者更有效，而且价格更便宜。苏晓海^[17]开发了一种双发泡植物纤维多孔材料。将植物纤维、淀粉以及其他原料和添加剂放入反应罐中进行反应，然后通过

双轴挤压成型将发泡膨胀的颗粒挤出，然后将其吹入特定的腔体以发生二次膨胀，成品的形状具体取决于模具。

1.3.3 植物纤维多孔材料发泡机理的研究

如图 1 所示，植物纤维多孔材料的泡孔成型分为气泡核的形成、膨胀生长和稳定固化三个阶段。在气泡核形成阶段，将粘合剂、成核剂和其他添加剂添加到体系中，然后将发泡剂自由地分散在熔体中以形成气泡核。在理想条件下，每个发泡剂分子可以形成一个细胞核，并且细胞核均匀分布，从而导致更均匀的细胞形成和理想的材料性能。在气泡核的膨胀和生长阶段，气泡内部的压力大小与半径成反比，因而气泡越小，内部压力越高。随着气泡彼此接近，气体从较小的气泡扩散到较大的气泡，并且气泡半径相应地增加。彼此相邻的气泡是防止气泡在膨胀过程中增长的主要原因。它表示为表面熔体的表面张力和粘度。气泡稳定凝固阶段：气泡连续生长使泡孔的体积和表面积持续增加，气泡壁的厚度变薄变得非常不稳定，但是体积的扩大使得气泡的内部压力将变得太小而无法产生气体，达到稳定的固化阶段。如果它扩散到其他气泡，气泡将继续变形并且将无法达到稳定的凝固阶段^[18]。

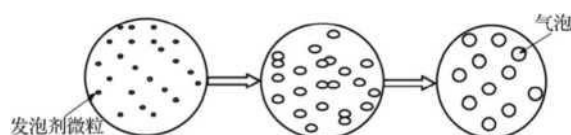


图 1 发泡材料气泡成型过程

资料来源：石璞,欧阳龙,蔡淑容.植物纤维发泡材料的发泡机理与成型工艺探讨[J].包装学报,2013,5(03):55-58.

1.4 溶解浆的介绍

1.4.1 溶解浆定义及特征

溶解纸浆是一种化学精制的纸浆，是通过对天然含有纤维素的植物（棉，木材等）进行化学处理和精制而获得的，其半纤维素、木质素和其它杂质的含量非常低。溶解浆的特点是聚戊糖含量低、灰分含量低、 α -纤维素含量高、白度高。

与普通纸浆相比，溶解纸浆的产量较低，通常为 30%至 35%。溶解浆对纤维素有很高的要求，纤维素含量是溶解浆浆溶解的最重要的特征^[19]。

1.4.2 溶解浆的分类

根据 α -纤维素的含量，可将溶解浆分为低 α -纤维素溶解浆和高 α -纤维素溶解浆，低 α -纤维素溶解浆中 α -纤维素的含量小于 90%，高 α -纤维素溶解浆中 α -纤维素的含量高于 90%^[20]。根据所使用的原料，溶解浆大致分为竹溶解浆、棉花溶解浆和木材溶解浆。由于原料不同，所得的溶解纸浆具有不同的性质、质量和用途。按制浆方式分类：棉短绒采用碱法，木材可通过亚硫酸盐法或预水解硫酸盐法制浆。不同的制浆方式对溶解纸浆的质量标准也有重大影响。溶解浆按是否出售，分为商业浆和自用浆。中国的棉花溶解浆主要是自用浆。木材溶解纸浆和竹子溶解纸浆具有丰富的原材料来源和大量的产出，制造必须靠近原材料的位置，大多数是商业纸浆^[21]。

1.4.3 溶解浆的制备原料

国外生产溶解浆主要以木材为主要原料，例如大多数欧洲国家主要使用冷杉、云杉和其他针叶白松树，而大部分亚洲国家使用热带硬木和松树为主。中国的木材资源相对较少，为了解决这一缺点，近些年已尝试使用非木材原料生产溶解浆。在以上原材料中，溶解浆的主要原料是木材，其可分为针叶木和阔叶木。针叶木木结构相对紧密，化学浆中的大多数异物都可以在洗涤过程中去除，从而提高了溶解浆的质量。虽然阔叶木拥有紧密的组织结构，但是木质素含量低而且杂细胞占比也比较多，因此，由针叶木制成的溶解纸浆的质量相对较好。另外，由于竹子的纤维含量接近木材的纤维含量，因此它也可以用于生产相对较好溶解浆。然而，相对于其它原料竹子的半纤维素含量高，在制造过程中需要增添相应的工艺过程。

1.4.4 溶解浆的制备方法

目前主要有两种制备溶解浆的方法：第一种是预水解硫酸盐法，第二种是酸性亚硫酸盐法^[22]。

（1）预水解硫酸盐法

预水解硫酸盐法是在酸性硫酸盐法蒸煮之前，增添预水解过程，其主要目的是减少半纤维素含量（木聚糖）和提高纸浆反应性^[23]。预水解硫酸盐法主要应用于半纤维素含量或树脂含量较高的原料。预水解硫酸盐法主要包括两大步骤：预水解和硫酸盐蒸煮，这两大步骤可以生产高纤维素的溶解浆，预水解主要包括蒸汽水解、水水解、酸水解方法^[24]。

（2）酸性亚硫酸盐法

酸性亚硫酸盐法通过在酸性条件下磺化亚硫酸盐和木质素以形成磺化木质素来增加木质素的亲水性，从而使得木质素和半纤维素很好的溶解在液体中，进一步去除掉半纤维素和木质素。亚硫酸盐法目前是最常用的制浆方法，也是美国不列颠哥伦比亚省发明的传统酸性亚硫酸盐法。首次使用是在 1867 年。亚硫酸盐法主要用于生产制造低聚戊糖和高树脂含量的针叶木制浆^[25]，所制得的溶解浆色泽浅、纯度高是最大的优点，而且所需漂白使用的化学试剂较少。

在漂白过程中以上两种溶解浆的制造方法的目的是相同的。一是在纤维素未分解前将纸浆中木质素含量减小到一定程度，二是在蒸煮过程中分解可溶性纸浆中的半纤维素。三是在漂白过程中调节浆料的粘度，以便于在预水解过程中和在漂白过程中（亚硫酸盐过程）除去。溶解浆的半纤维素含量应低于一定水平，以使粘胶制备过程顺利进行。在用酸性硫酸盐法制造溶解浆时，首先需要进行初步水解，然后通过高温、酸和电解质的作用去除原材料中的一些不需要的半纤维素^[26]。

1.5 本课题研究的目的和意义

随着近几年中央不断地推出新的政策，呼吁地方政府和企业加大对环保工作的重视程度，环保成为一个国家发展中必不可少的一个重要因素。作为一个跨行业的多学科相互渗透的交叉学科，包装行业在全球范围获得了持续稳定的增长。预计在

2020 年，中国将取代美国成为全球最大的包装市场。在所有包装形式中，以保护商品、便于运输的缓冲包装所占的比例最大。发泡聚苯乙烯（EPS）因其优良的缓冲性能仍然是目前最广泛使用的缓冲包装材料，多用作产品的防震动内衬垫等材料，但是因为 EPS 不能在自然条件下分解，大量国家已经限制了发泡聚苯乙烯的使用。随着科技的不断进步，以可再生的生物质资源—植物纤维素纤维为基体制备的多孔材料因其低密度、高孔隙率和良好的化学惰性等特点，将在缓冲包装、高阻隔包装等功能性包装材料上具有广泛的应用前景^[27]。国外大多采用物理发泡工艺生产该发泡材料，但这种方式对设备和成本的要求较高，且很难控制其发泡工艺过程。而国内大多数用添加化学发泡剂的方式来制得多孔材料，但是化学发泡剂在生产过程中和利用后的处理流程中会对环境造成相应的损害。目前发泡剂发泡成型的研究不太成熟，也没有建立缓冲性能与孔隙结构参数相关关系，植物纤维多孔材料因而无法实现大规模地工业化生产。鉴于此，本课题以阔叶木溶解浆、针叶木溶解浆、竹溶解浆为原料进行植物纤维多孔材料的制备及其缓冲性能的研究。

1.6 本课题主要解决的问题

基于三种溶解浆在NaOH/尿素水溶液中的溶解，通过模塑成型-再生进行了溶解浆植物纤维多孔材料的制备研究及其缓冲性能的研究。通过模塑成型材料干燥前后径向与厚度方向尺寸的测量，比较添加不同助剂制备的多孔材料的径向收缩率与高度方向的收缩率，借助扫描电镜观察制备的材料断面形貌，找出三种溶解浆在NaOH/添加剂水溶液溶剂中低温溶解-再生-物理致孔的成型技术制备植物纤维多孔材料的成型工艺条件。最后通过对制成的所有试样进行喷金做电镜观察、振动缓冲性能测试和静态压缩性能测试，来确定相对较好的植物纤维多孔材料所对应的成型条件。

1.7 本课题的实验方案

(1) 不同条件下植物纤维多孔材料的成型效果

首先以针叶木溶解浆为原料,比较了其在 6%强氧化钠/4%尿素水溶液溶剂和 7%氢氧化钠/12%尿素水溶液溶剂中的低温溶解、在两种无机酸(5%稀硫酸和 99.5%冰乙酸)中再生制备的材料成型情况,从而确定更适合模塑成型制备植物纤维多孔材料所使用的 NaOH/尿素水溶液的组成和相对应的无机酸。

(2) 添加不同助剂对植物纤维多孔材料收缩的影响

考虑到 CMC、干酪素和淀粉在水溶液中的粘性和亲水性,将其添加到低温溶解-解冻搅拌均匀的浆纤维-纤维素-溶剂的混合体系中,再搅拌均匀获得均质的粘稠的成型用湿坯料。因为湿坯料成型后经干燥会存在径向和厚度方向的收缩,所以应用此原理观察其不同助剂对所制得材料的收缩影响。

(3) 不同植物纤维多孔材料的截面形貌比较

不同植物纤维多孔材料表现出不同的形貌,加入 CMC、干酪素和淀粉三种助剂借助扫描电镜观察是否有更好的截面形貌。

(4) 植物纤维多孔材料的振动缓冲性能

在不同的植物纤维多孔材料中分别添加 CMC、干酪素和淀粉三种不同的助剂,通过测试对应材料的共振频率,判断添加不同助剂的植物纤维多孔材料是否有一定的缓冲能力和添加哪种助剂的缓冲效果好。

(5) 植物纤维多孔材料的静态压缩性能

将制作的添加不同助剂的植物纤维多孔材料试样进行静态压缩实验处理,获得应力应变曲线,进一步对所获得的数据用 Origin 软件进行处理,获得最大应力与缓冲系数曲线,综合分析所制备的植物纤维多孔材料的静态压缩性能。

2 三种溶解浆植物纤维多孔材料的制备实验

2.1 实验原料与药品

- (1) 针叶木溶解浆(α -纤维素含量为 93.74%, DP=1520, 水分 5.45%, 结晶度 85.0%)
- (2) 阔叶木溶解浆(α -纤维素含量大于等于 98.77%, DP=800, 水分 6.11%, 结晶度 86.4%)
- (3) 竹溶解浆(DP=1228, α -纤维素含量>92%, 结晶度 77.2%, 水分 6.11%)
- (4) 尿素(分析纯)
- (5) 氢氧化钠(分析纯)
- (6) 含量为 5%的稀硫酸(分析纯)
- (7) 含量为 99.5%和 38%两种的冰乙酸
- (8) 干酪素(分析纯)
- (9) 羧甲基纤维素(CMC)(分析纯)
- (10) 淀粉(分析纯)

2.2 实验仪器与设备

- (1) LQ-C10002 电子天平(MAX=1000g, d=0.01g, e=0.1g)
- (2) FA2004 型电子天平(MAX=200g, d=0.0001g, e=0.001g)
- (3) 84-1A 磁力搅拌机
- (4) FYL-YS-128 型低温冰箱
- (5) JFC-3000FC 型喷金仪
- (6) HiROX SH-5000M 扫描电镜
- (7) 微机采集系统(采集仪、微机采集软件 YD—16 传感器、CA—3 型电荷放大器)

(8) 电子万能材料试验机 (AG-IC-100KN, 日本岛津)

(9) 玻璃器皿、PP 塑料瓶盖、保鲜膜

(10) 磁子、药匙、、直尺、镊子、剪刀、纺锤型刀具

(11) 称量纸、A4 纸、pH 试纸、温度计

(12) 扫描电镜双面导电碳胶带 (日新, 7311 导电胶)



(a)LQ-C10002 电子天平



(b)FA2004 型电子天平



(c)84-1A 磁力搅拌机



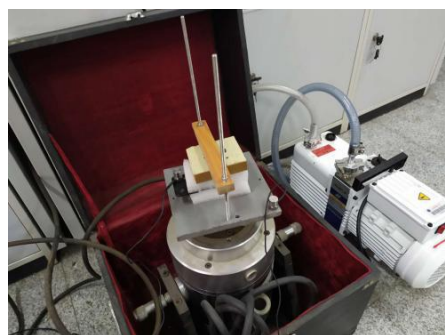
(d)FYL-YS-128 型低温冰箱



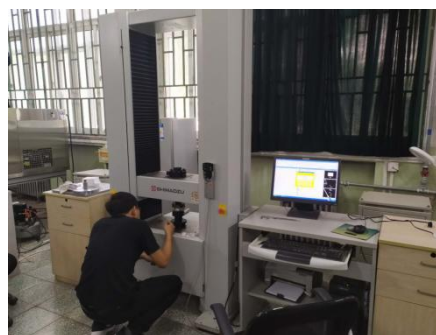
(e)JFC-3000FC 型喷金仪



(f)HiROX SH-5000M 扫描电镜



(g)振动缓冲测试仪



(h)电子万能材料试验机

图2 实验所涉及的仪器

2.3 实验方法

2.3.1 植物纤维多孔材料的制备

首先观察了三种溶解浆在 7%氢氧化钠/12%尿素水溶液和 6%氢氧化钠/4%尿素水溶液中低温溶解、在两种无机酸（99.5%CH₃COOH 和 5%H₂SO₄）中再生制备材料的成型情况，从而确定更适合模塑成型制备植物纤维多孔材料所使用的 NaOH/尿素水溶液体系，随后按照如图 3 所示的制备流程进行了植物纤维多孔材料的制备，最后将所制备的植物纤维多孔材料进行相应的缓冲性能测试。

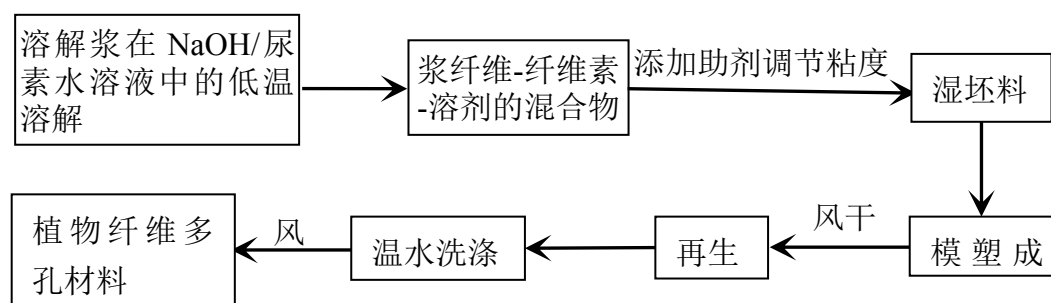


图 3 浆纤维增强缓冲材料的制备流程

(1) 三种溶解浆的准备

首先用洗干净小过度的手将针叶木溶解浆、竹制溶解浆和阔叶木溶解浆板撕成大约 1cm×1cm 的浆块，然后将它们放入带有相应标签的 2500 ml 广口瓶中，并在恒温恒湿的环境中放置约 2 周以便使用。

(2) 纤维素水溶液溶剂体系的配制

使用 LQ-C10002 电子天平（如图 2（a）所示）称量 7 g 氢氧化钠固体和 12 g 尿素固体，并组成 7%NaOH / 12%尿素溶剂。将称量好的固体依次倒入事先称有 81g 蒸馏水的塑料瓶中，并贴上特殊标签以方便识别，在塑料瓶中放入磁子然后在搅拌器上搅拌纸制完全溶解。由于在此过程中氢氧化钠溶解会散发热量，因此通常只能在冷却至室温后使用此溶液。完成上述步骤便可得到 100g 的 7%NaOH / 12%尿素溶

剂。同理 6%NaOH / 4% 尿素水溶液的配制过程与 7%NaOH / 12% 尿素水溶液一样，只是所需要的质量有所不同，需 6g 氢氧化钠、4g 尿素和 90g 蒸馏水混合搅拌溶解来制得 6% 的 NaOH / 4% 的尿素水溶液溶剂。由于氢氧化钠具有吸水的特性，因此，如果长时间放置，溶剂系统会变质，因此一次不能配置太多，最好现用现配。

(3) 三种溶解浆在两种 NaOH/尿素水溶液中的低温溶解实验

根据先前的实验结论：在上述溶剂体系中，三种溶解浆的 5% 浓度具有最高的溶解效果。因此，在该实验中，我们使用 5% 浓度进行了实验，并且构建了与以下三种类型的溶解浆相对应的溶解浆纤维-纤维素-溶剂溶解体系。

首先使用 FA2004 电子天平（如图 2（b）所示），以 5% 的溶解浆浓度称重 3 种预先计算的溶解浆，然后将 7% 的 NaOH / 12% 的尿素溶剂和 6% 的 NaOH / 4% 的尿素溶剂称重加入到对应的三种溶解浆种。将搅拌磁子放在装有上述样品的塑料样品瓶中，将其放在 DF-6 多头磁力搅拌器中（如图 2（c）所示），搅拌 6-12 个小时，使其充分搅拌均匀。然后将搅拌后的样品放在 -11° C 的低温冰箱中放置 6 个小时（如图 2（d）所示），取出并放回室温使用。

(4) 三种溶解浆湿坯料的调制

选择三种助粘剂，即 CMC、干酪素和淀粉，并添加到混合系统中以增加粘度。所用的干酪素和 CMC 具有相同的质量，均为溶解浆质量的 37%。根据淀粉粘合剂的制备，淀粉的剂量设置为溶解浆质量的 25% 和 30% 以进行实验。低温冷冻熔化后，将称量的助粘剂添加到样品中，再次将其放入搅拌器中，并充分搅拌约 3 小时，以完全分散助粘剂。

(5) 三种溶解浆湿坯料的模具成型

将上面准备的样品倒入事先准备好的塑料瓶盖中（高 20 毫米，直径 15 毫米）。为了方便能更好地倒模，选择在塑料瓶盖内部表面覆盖一层保鲜膜，此种做法也可以时制得的样品外表面比较平整。将样品溶液用勺子缓缓地倒入塑料瓶盖模具中，

倒入一半的样品后再用勺子将所倒溶液压实并去除产生的气泡，接着继续缓慢倒入溶液时溶液高于塑料瓶盖 2mm，然后用勺子压实挂去多余的溶液，最后让其自然风干，等倒好的样品上表面干燥到一定程度是，将样品从塑料瓶盖中取出至于玻璃器皿中再进行自然风干，等到试样干燥到一定湿度时便可进行凝固浴的再生。

(6) 半干态植物纤维多孔材料的凝固浴再生

将模具成型干燥后的试样进行凝固浴再生处理。实验中，用 99.5%的冰醋酸再生试样。首先将试样放入 99.5%的冰醋酸中，浸泡 4 分钟左右。在这段时间内，用勺子将样品轻轻挤入样品池中，使其与碱完全反应，然后将其取出并放入约 35° C 的水中浸泡，洗掉多余的冰醋酸后，用 pH 试纸测量样品，若成酸性则继续用温水洗涤直到 pH 为中性，最后让洗涤后的样品自然干燥，等待下一步处理测试。

2.3.2 植物纤维多孔材料的缓冲性能测试

(1) 植物纤维多孔材料干燥前后的收缩率

干燥过程中试样水分的减少会使样品的高度方向和厚度方向均有收缩。收缩率也是判断植物纤维多孔材料的重要指标，所以在干燥之前和之后测量样品的直径和高度，并根据以下公式计算收缩率：

$$D = (1 - d_1/d_0) \times 100\% \quad (1)$$

$$H = (1 - h_1/t_0) \times 100\% \quad (2)$$

公式中 D 为材料成型的径向收缩率；H 为材料成型的高度方向的收缩率； d_0 是材料成型干燥前的径向直径； d_1 是材料成型干燥后的径向直径； h_0 是材料成型干燥前的厚度； h_1 是材料成型干燥后的厚度。

(2) 三种溶解浆植物纤维多孔材料的扫描电镜观察

因为所制得试样没有导电性，所以首先要用喷金仪（如图 2（e）所示）对已经切好并用导电胶固定在 T 形台上的试样进行喷金处理使其具有一定的导电性，然后在电镜（如图 2（f）所示）下观察试样的孔隙及纤维的长短。喷金处理处理前后的

试样如图 4 所示。

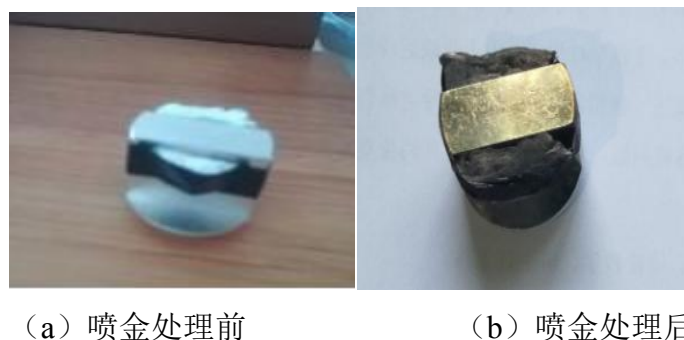


图 4 喷金前后的试样

等喷金处理后，用电子显微镜观察喷金处理后的试样以分析每个试样横断截面的孔分布和纤维间的粘合情况。

(3) 植物纤维多孔材料的振动缓冲性能测试

因为一般的缓冲材料都会有阻尼特性，会在材料的加载与卸载过程中损耗一定能量，最终形成对振动的衰减。阻尼是物体受力至发生形变所需要的时间。多孔材料试样在不同载荷下具有不同的固有频率。通过扫频振动仪（如图 2（g）所示）可获得多孔材料固有频率。试样可接受到振动激励设备（例如扫频激振器）产生的变频振动信号。当激振频率与试样固有频率相同时会产生共振，此时被放大倍数的振动加速度会在采集显示器上出现。微机采集系统可以动态采集显示扫频的加速度信号波形，并可以实时显示变化的加速度峰值，所以共振时的加速度峰值被我们观察到。多孔材料试样会衰减传过的振动加速度，这种衰减可用振动传递率来表示，振动传递率 Tr 为激振加速度与试件加速度之比，传递率计算公式： $Tr=a_2/a_1$ 。

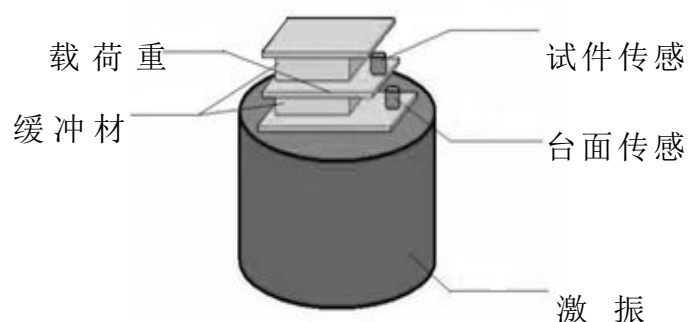


图5 浆纤维增强缓冲材料振动性能测试示意图

(4) 植物纤维多孔材料的静态压缩性能测试

植物纤维多孔材料的静态压缩试验是将试样用电子万能材料试验机（如图2（h）所示）施加低速压缩载荷的方法而获得样品材料的相关静态压缩的特性曲线，通过静态压缩实验，首先可以得到植物纤维多孔材料的 $C-\sigma$ 曲线，计算出缓冲系数 (C) ，从而得到缓冲系数-应力 $(C-\sigma)$ ，再从获得的曲线来评价多孔材料的缓冲特性。由于原料的限制，所制成的样品大小为直径 25mm 厚度 30mm。图6 是多孔材料的静

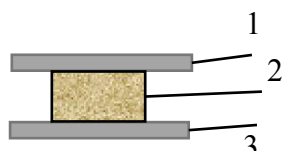


图6 静态压缩试验原理

1-上压板；2-试样；3-下压板

态压缩原理，上压板对试样施加载荷，加载速度为 0.5mm/min。缓冲效率是一个没有单位的物理量，是指单位厚度的植物纤维多孔材料在压缩状态下所吸收的能量，如果缓冲效率好，则说明单位体积植物纤维多孔材料所吸收的能量越多，设计包装件缓冲衬垫时所需用的植物纤维多孔材料就越少。缓冲系数是缓冲效率的倒数，也是一个没有单位的物理量，缓冲效率越大则缓冲系数越小，因此在设计缓冲衬垫等产品时是要求选择最小的缓冲系数或接近于最小的缓冲系数。

3 实验结果与讨论

3.1 不同条件制备的植物纤维多孔材料的成型情况

三种溶解浆的相关参数如表 1 所示。

表 1 三种溶解浆的特征

项目参数	平均聚合度 a	α -纤维素含量 b (%)	结晶度 c (%)
针叶木溶解浆 (SDP)	1520	93.74	85.0
阔叶木溶解浆 (HDP)	800	98.77	86.4
竹溶解浆 (BDP)	1228	95.45	77.2

为了选择更合适的溶解纤维素的水溶液溶剂，我们首先以羧甲基纤维素 (CMC) 为增粘剂，观察了针叶木溶解浆在 7%氢氧化钠/12%尿素水溶液和 6%氢氧化钠/4%尿素水溶液的两种溶剂中的溶解的好坏、在 99.5%CH₃COOH 和 5%H₂SO₄ 中再生制备的植物纤维多孔材料的外观和软硬情况，结果如表 2 所示。

表 2 不同材料的成型效果

纤维素溶剂	凝固浴	再生后外观效果
6%NaOH/4%尿素水溶液	5%H ₂ SO ₄	很差，硬
	99.5%CH ₃ COOH	差，较硬
7%NaOH/12%尿素水溶液	5%H ₂ SO ₄	较好，较软
	99.5%CH ₃ COOH	好，软

由表 3 可知，植物纤维多孔材料在 7%NaOH/12%尿素水溶液溶剂中溶解和在 99.5%CH₃COOH 中再生制备比在 6%NaOH/4%尿素水溶液溶剂中溶解和在 5%H₂SO₄

中再生制备容易、效果好、多孔材料柔软且再生过程容易。得出的结论是溶解浆在 7%NaOH/12%尿素水溶液溶剂中的溶解能力要比 6%NaOH/4%尿素水溶液溶剂中的溶解效果好，因而等多的植物纤维素被溶解，增加了成型湿坯料的粘度。此外，当凝固浴为 99.5%CH₃COOH 时，99.5%CH₃COOH 与 NaOH 反应生成的醋酸钠易溶于水，使得试样中的氢氧化钠溶剂更易于被除去，留出更多的再生空隙，从而使得 99.5%CH₃COOH 洗完的试样更柔软一点。而当凝固浴为 5%H₂SO₄ 时，5%H₂SO₄ 与 NaOH 反应生成 Na₂SO₄，因 Na₂SO₄ 在水中的溶解度会受水温的影响，因此生成的硫酸钠会堵塞纤维材料中的空隙，不能完全除去多孔材料中的氢氧化钠溶剂，使得试样呈碱性且偏硬。此外，在之前的研究结果中也有类似的现象，如图 7 所示^[28]，在三种不同的 NaOH/添加剂水溶液溶剂中，7%NaOH/12%尿素水溶液溶剂中溶解获得样品干燥后纤维素分子直径大小一致，形成比较松散且有一定粘性的织态状。因此，在接下来的实验过程中，我们选用 7%NaOH/12%尿素水溶液作为三种溶解浆的溶解溶剂，99.5%CH₃COOH 作为凝固浴进行植物纤维多孔材料的制备实验。

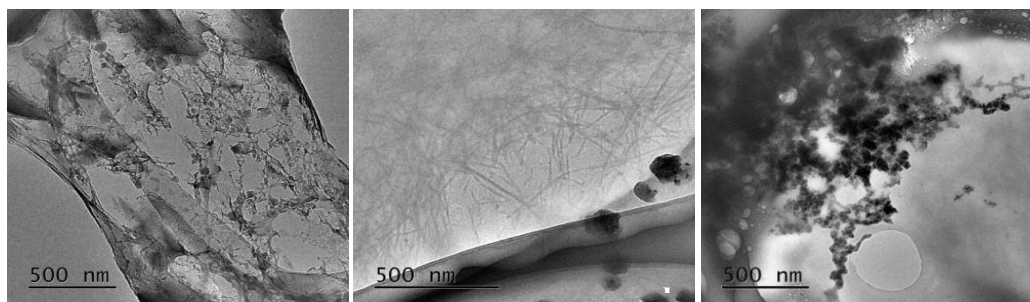


图 7 竹溶解浆在不同 NaOH/添加剂溶剂中溶解后的 TEM 图像
(a. 7%NaOH/12%尿素；b. 9.5%NaOH/4.5%硫脲；c. 8%NaOH/8%尿素/6.5%硫脲)

3.2 添加不同助剂的植物纤维多孔材料干燥前后的收缩率

干酪素、淀粉和 CMC 在水溶液中具有粘性和亲水性，将其添加到低温溶解-解

冻至搅拌均匀的植物纤维-纤维素-溶剂的混合体系中，再搅拌三个小时左右，获得粘稠的均质的成型用湿坯料。湿坯料成型后经过风干后得到的试样会存在径向和高度方向的不同收缩，干燥后收缩结果如图 8 所示。由图 8 可知，随着添加不同添加剂，最终制备的植物纤维多孔材料干燥前后表现出不同的高度和径向方向的收缩率。以针叶木溶解浆为原料添加 CMC 助剂制备植物纤维多孔材料的径向收缩率较小，添加淀粉助剂制备的针叶木溶解浆植物纤维多孔材料的径向收缩率较大，以针叶木溶解浆为原料添加干酪素助剂制备的植物纤维多孔材料的径向收缩率最大。而以阔叶木溶解浆和阔叶木溶解浆为原料分别添加三种助剂制备的植物纤维多孔材料的径向收缩率都较小，且相差不大。总体来看添加淀粉制备的竹溶解浆植物纤维多孔材料的径向收缩率和高度方向的收缩率都相对较小，这可能与竹溶解浆含有较高的细小纤维组分(见表 3)及淀粉与溶解生成的纤维素溶液交联更均匀相关。

表 3 三种溶解浆的纤维参数

参数	0.2-7.5mm 质 纤维质均宽度	0.0-0.2mm 数均细	扭结指数	粗度	
	均长度 Lw (mm)	(μm)	小纤维含量 (%)	(mm ⁻¹)	(μg/m)
针叶木溶解浆 (SDP)	1.496	37.2	23.2	0.937	206.1
阔叶木溶解浆 (HDP)	0.587	18.2	39.9	0.713	53.6

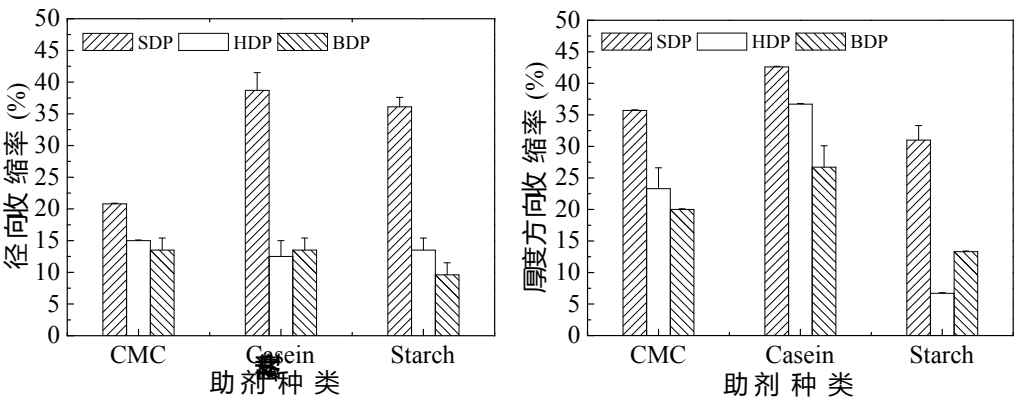


图 8 添加不同助剂制备的植物纤维多孔材料的收缩率

3.3 添加不同助剂的植物纤维多孔材料的断面形貌

以阔叶木溶解浆、竹溶解浆、和针叶木溶解浆为原料添加羧甲基纤维素和添加淀粉制备的植物纤维多孔材料的断面形貌如图 9 所示。由图 9 可知，以针叶木溶解浆为原料添加助剂制备的植物纤维多孔材料的纤维较短，表明大部分长纤维降解成短纤维；添加羧甲基纤维素制备的试样断面孔隙都比较均匀；以阔叶木溶解浆为原料添加淀粉制备的试样纤维结合致密、纤维较长，但孔隙较少；以竹溶解浆为原料添加淀粉制备的试样纤维蓬松且较长。

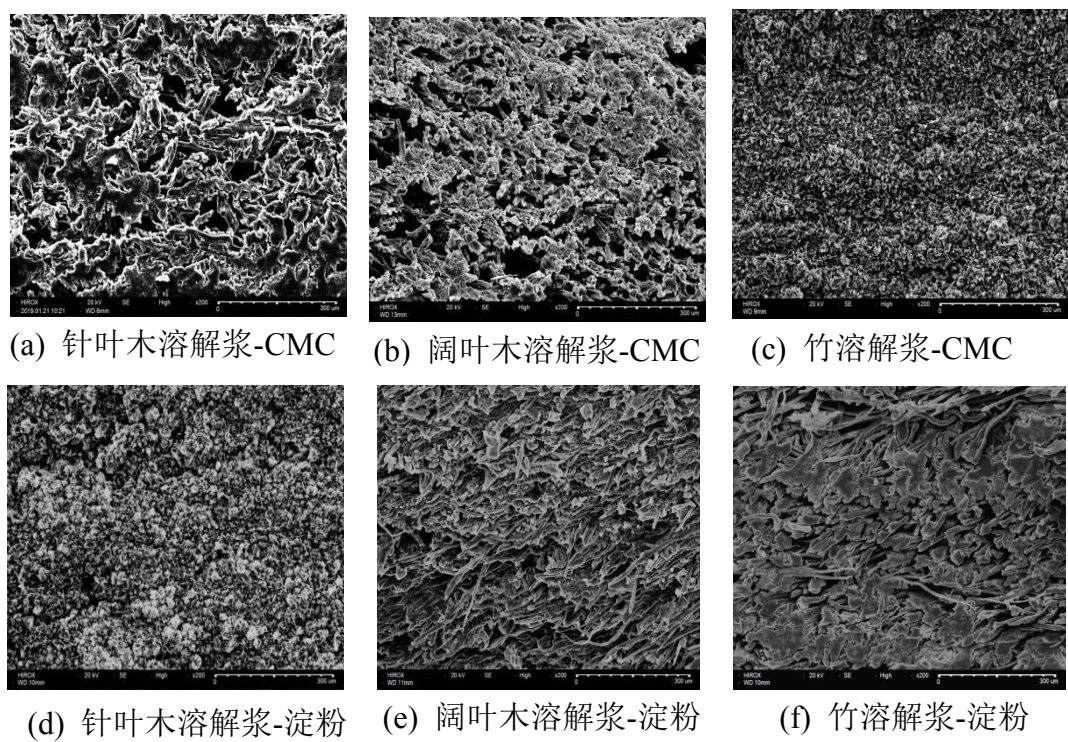


图 9 添加不同助剂的植物纤维多孔材料的断面形貌(×200)

3.4 添加不同助剂的植物纤维多孔材料的振动缓冲性能

以针叶木溶解浆为原料添加 CMC 制备的植物纤维多孔材料和以竹溶解浆为原料添加淀粉制备的植物纤维多孔材料的振动加速度-频率特性曲线如图 10 所示，曲线峰值所对应的就是植物纤维多孔材料的共振频率。由图 10 可知，以针叶木溶解浆为

原料添加 CMC 制备的植物纤维多孔材料和以竹溶解浆为原料添加淀粉制备的植物纤维多孔材料发生共振时的固有频率分别为 103.52Hz 和 102.78Hz，表明制备的植物纤维多孔材料具备一定的振动缓冲性能。

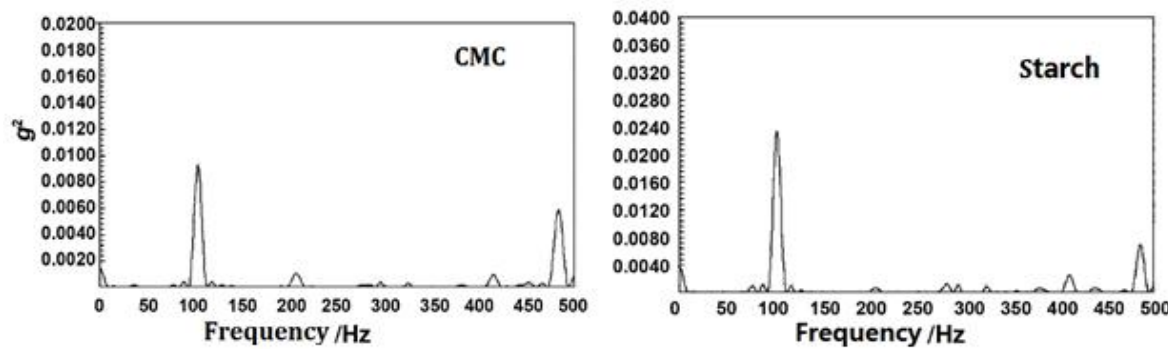


图 10 植物纤维多孔材料的振动加速度-频率特性曲线

3.5 添加不同助剂的植物纤维多孔材料的静态压缩性能

以针叶木溶解浆为原料不添加助剂和添加 CMC、淀粉制备的植物纤维多孔材料及以竹溶解浆为原料不添加助剂和添加 CMC、淀粉制备的植物纤维多孔材料的应力-应变曲线如图 10 所示，另加包装常用的缓冲材料 EPE 和 EPS 在同样的静态压缩条件下测得应力-应变曲线如图 11 所示。由图 11 可知，在同一应变条件下所制备的植物纤维多孔材料所对应的应力要比 EPE 和 EPS 大，说明制备的试样比 EPE 和 EPS 要硬；以针叶木溶解浆为原料添加淀粉制备的多孔材料缓冲效果最差；以针叶木溶解浆为原料添加 CMC 制备的多孔材料比较柔软，在实验时两次都压溃试样；以竹溶解浆为原料不添加助剂和添加 CMC、淀粉制备的植物纤维多孔材料缓冲性能好，说明以竹溶解浆为原料制备的多孔材料比较柔软。

根据所获得的应力-应变曲线以所制得材料的大小计算出缓冲系数，最终所获得的缓冲系数-最大应力曲线如图 12 所示，由图 12 可知，以竹溶解浆为原料添加 CMC 和淀粉制备的植物纤维多孔材料最低缓冲系数最大，说明缓冲效率越小；EPE 的最

小缓冲系数比 EPS 的最小缓冲系数要小，说明 EPE 的缓冲效率好；无添加助剂制备的多孔材料最小缓冲系数在 EPE 和 EPS 之间，但最小缓冲系数所对应的最大应力要比 EPE 和 EPS 要大的多。利用缓冲系数-最大应力曲线设计缓冲衬垫有两种方法，第一种是对于全面缓冲包装设计：已知缓冲垫面积 A 等于产品表面积，首先按照公式 $\sigma_m = WG/A$ 求出对应样品的最大应力，其次找出 $(C-\sigma_m)$ 曲线中应最大应力所对应的缓冲系数，最后由公式 $T=CH/G$ 求出缓冲衬垫的厚度 T ；第二种是局部缓冲包装设计：即过原点切线法，过原点 $(0, 0)$ ，作 $C-\sigma_m$ 曲线的法线，找出交点 (C_0, σ_{m0}) 就是极值点，按照极值点来设计出的缓冲衬垫用料最省。由此可知用第一种方法设计时，当最大应力小于 $55 \times 10 \text{KPa}$ 时，以针叶木溶解浆为原料添加淀粉制备的植物纤维多孔材料所需要的材料最多，以竹溶解浆为原料添加淀粉制备的植物纤维多孔材料所需材料最少。当最大应力大于 $55 \times 10 \text{KPa}$ 时，以针叶木溶解浆为原料添加 CMC 制备的植物纤维多孔材料所需要的材料最少，以针叶木溶解浆为原料添加淀粉制备的植物纤维多孔材料所需要的材料最多。由此可见，以竹溶解浆为原料添加淀粉制备的植物纤维多孔材料和以针叶木溶解浆为原料添加 CMC 制备的植物纤维多孔材料缓冲效果相对较好。由于此实验存在误差，无法用第二种设计方法判别所制材料的好坏。

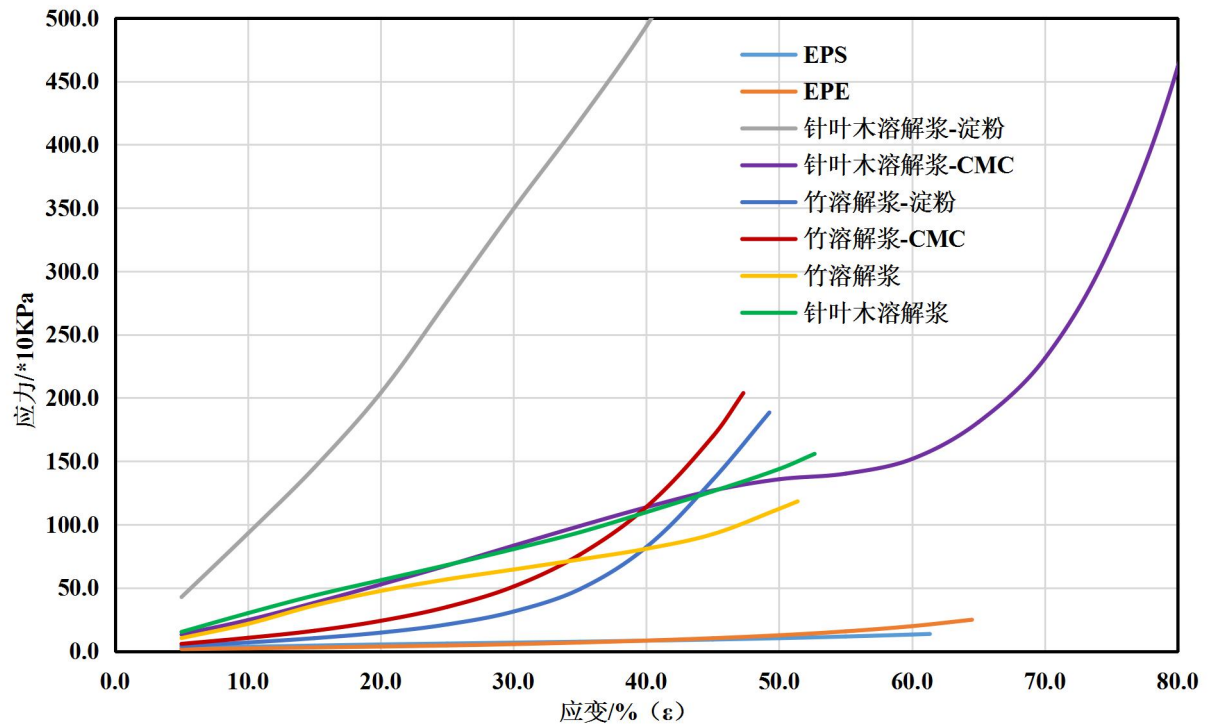


图 11 植物纤维多孔材料的应力-应变曲线

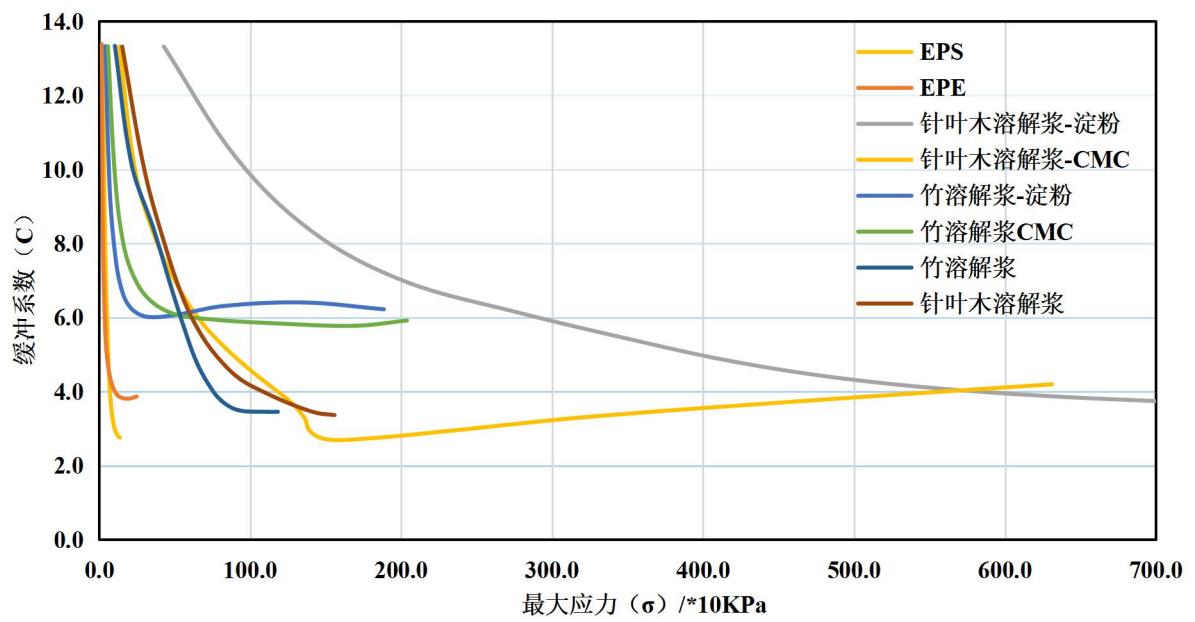


图 12 植物纤维多孔材料的缓冲系数-最大应力曲线

4 总结

本课题研究了三种植物溶解浆在 7%NaOH/12%尿素水溶液和 6%NaOH/4%尿素水溶液中低温溶解、在两种无机酸（99.5%CH₃COOH 和 5%H₂SO₄）中再生制备材料的成型情况以及所制备材料相关缓冲性能。在整个实验中得出以下总结：

（1）三种植物溶解浆在 7%NaOH/12%尿素溶剂中溶解和在 99.5%CH₃COOH 中再生制备比在 6%NaOH/4%尿素水溶液溶剂中溶解和在 5%H₂SO₄ 中再生制备效果好、多孔材料柔软且再生过程容易；

（2）从收缩率来分析，以针叶木溶解浆为原料添加 CMC 助剂制备植物纤维多孔材料的径向收缩率较小，添加淀粉助剂制备的针叶木溶解浆植物纤维多孔材料的径向收缩率较大，以针叶木溶解浆为原料添加干酪素助剂制备的植物纤维多孔材料的径向收缩率最大。而以阔叶木溶解浆和阔叶木溶解浆为原料分别添加三种助剂制备的植物纤维多孔材料的径向收缩率都较小，且相差不大。总体来看添加淀粉制备的竹溶解浆植物纤维多孔材料的径向收缩率和高度方向的收缩率都相对较小。从电子显微镜的结果来看，孔径大小和分布非常均匀，纤维间的粘合性极好。基于此，建议添加其它添加剂以进一步优化孔分布和纤维结合。

（3）在三种不同植物源的溶解浆中，针叶木溶解浆和竹溶解浆制备的植物纤维多孔材料缓冲性能较好，阔叶木溶解浆制备的植物纤维多孔材料缓冲性能较差。总体来看，以竹溶解浆为原料添加淀粉制备的植物纤维多孔材料和以针叶木溶解浆为原料添加 CMC 制备的植物纤维多孔材料缓冲效果相对较好。

（4）因为实验过程中很难将所制备试样中的醋酸钠和硫酸钠洗净，而且难以确定试样在再生之前的干燥程度，如果再生制备前的试样太干后续洗涤过程几乎起不到作用，太湿无法洗涤，所以试样在测试相关缓冲性能时存在一定的误差。建议在

实验中摸索确定合适的干燥程度以便在后续测试中获得更好的缓冲性能。

(5) 因所制备的部分试样收缩后形状不好, 测量试样尺寸大小时数据不太准确, 所以获得的静态压缩实验数据存在一定的误差。建议将淀粉和 CMC 同时按比例加入相应的湿配料或者加入一些其他带有胶粘性质的添加剂观察其收缩成型及软硬情况。

(6) 本毕业论文题目是由国家级大学生创新训练计划项目产生, 所以有充足时间进行实验, 是在大四上学期就完成了整个毕业论文的实验内容。此实验所获得的成果有以第一作者身份已在《功能材料》上发表 CSCD 科技论文 1 篇, 作为共同作者在《中国造纸学报》上发表 CSCD 科技论文 1 篇, 作为第 2 作者发表国际会议论文 1 篇, 申请中国发明专利 1 项(ZL 202010193022X)。

参考文献

- [1]刘培生.多孔材料引论[M].北京:清华大学出版社,2004,9:1.
- [2]梁双,苏琼,王彦斌,等.植物纤维发泡材料的研究进展[J].当代化工研究,2018(12).
- [3]王能友.植物纤维发泡制品的性能和特点[J].中国包装工业,2003(01):24-25.
- [4]王瑜,张萍,高德等.植物纤维含量对聚乳酸/玉米秸秆纤维发泡材料(PFFM)性能的影响研究[J].化工新型材料, 2012, 40 (6) :79-81.
- [5]曾广胜,林瑞珍,徐成等.发泡废纸板纤维/LDP 复合材料的加工流变性及泡孔形态[J].复合材料学报, 2013, 30 (2) :89-93.
- [6]未友国,敖宁建,张渊明.植物纤维/蒙脱土/橡胶发泡复合材料微孔结构的研究[J].电子显微学报, 2008, 27 (5) :379-383.
- [7]李琛.木质剩余物纤维多孔型材料制备及缓冲特性研究[D].博士论文.黑龙江:东北林业大学,2013:10-14
- [8]张惠莹.废纸纤维发泡材料的配方优化及微波发泡工艺研究[D].硕士论文.江苏:江南大学,2013:9-11
- [9]P. Cinelli,E. Chiellini,J.W. Lawton,S.H. Imam. Foamed articles based on potato starch, corn fibers and poly(vinyl alcohol)[J]. Polymer Degradation and Stability,2005,91(5).
- [10]曹斌.木质剩余物缓冲包装材料制备工艺的研究[D].硕士论文.黑龙江:东北林业大学,2013:8-10
- [11]G. M. Ganjyal,N. Reddy,Y. Q. Yang,M. A. Hanna. Biodegradable packaging foams of starch acetate blended with corn stalk fibers[J]. Journal of Applied Polymer Science,2004,93(6).
- [12]丁毅,李尧,曾珊琪,刘春燕,周志明.植物纤维类缓冲包装材料的研制[J].包装工

程,2006(02):50-51.

[13]黄俊彦.植物纤维类发泡材料的成型机理及生物发泡方法探讨[J].中国包装工业,2010(11):30-32.

[14]罗瑜莹,肖生苓,李琛,穆丽新.植物纤维多孔缓冲包装材料的研究现状与展望[J].包装工程,2016,37(07):17-22.

[15]石璞,欧阳龙,蔡淑容.植物纤维发泡材料的发泡机理与成型工艺探讨[J].包装学报,2013,5(03):55-58.

[16]李媛媛.发泡植物纤维模压制品的关键生产技术研究[D].硕士学位.重庆:重庆工商大学,2008:7-10

[17]苏笑海.双发泡植物纤维包装材料的生产方法[P].中国专利:CN1270912,2000.10.25

[18]郭震,黄俊彦.植物纤维类发泡材料的成型机理及生物发泡方法探讨[J].包装工程,2010,31(15):55-57+65.

[19]Hemanathan Kumar .Lew P. Christopher . Recent trends and developments in dissolving pulp production and application[J].Cellulose, 2017, Vol.24 (6), pp.2347-2365

[20]崔宇,陈嘉川,杨桂花.溶解浆的制备及其应用[J].纸和造纸,2011,30(6):27-32.

[21]黄祖壬,张晗.溶解浆市场概况[J].造纸信息,2011,(10):28-36.

[22]J F hinck et al. Chapter VIII, Dissolving pulp manufacture in volume 4, sulfite science & technology of pulp and paper manufacture, third edition, O V Ingruber, M J Kocurek, and A Wong, ed. Published by the Technical Section, Canadian Pulp and Paper Association Montreal, QC, Canada:213-243.

[23]陈灿.竹子造纸浆制备溶解浆的研究[D].广州:华南理工大学,2014.

[24]沈葵忠,房桂干,等.溶解浆的质量指标及生产技术述评[J].林业工程学报,2018,3(5):12-19.

[25]谢来苏,詹怀宇,陈嘉翔,等.制浆原理与工程[M].北京:中国轻工业出版社,2001:75.

- [26]程琳,王伟.常见缓冲包装材料的应用现状[J].中国包装科研测试中心,2014(6).
- [27]邹元虎.蔗渣纤维/聚乙烯醇发泡复合材料的制备及其性能研究[D].浙江:浙江理工大学,2016.
- [28] Shi Yan, Zhang Kuo, Sun Haitong, Zhu Yatong, Hu Zhenxing, Zheng Quan, Yang Fang. Dissolution behavior of higher DP bamboo dissolving pulp fiber in NaOH/ additive aqueous solution[J]. Journal of Functional Materials, 2017, 48(6): 06001–06006.

致 谢

随着时间的流逝，大学即将毕业并要开始适应新的环境了。在过去的四年中，我遇到了很多支持我的老师、同学、朋友和家人，在你们的帮助下我在各个方面都取得了长足的进步，在这几年里非常的感谢你们！

首先我要感谢我的指导老师石岩老师。在实验过程中，根据实验结果调整实验方案并且不厌其烦的指导我实验所涉及到的步骤和细节。在论文写作的过程中，石老师为我梳理论文的脉络，耐心的指导我修改论文的内容和结构，使我的毕业论文能够顺利地完。石老师对于实验和论文严谨认真的态度深深地感染了我，让我学到了无论做什么都要严谨认真才行。在这里，我向石老师致以真诚的谢意，感谢您在指导我毕业论文时为我做的点点滴滴！

其次，我要感谢我的家人在过去四年中对我的默默支持和无私奉献。感谢我们的包装专业老师，你们不仅为我提供了专门知识，而且以实际行动为我们提供许许多多的帮助，并教会了我们社交的原则。我感谢与我在一起四年的学生，感谢你们在过去四年中对我的帮助！

最后，我要感谢母校天津商业大学。学校为我们提供了良好的生活环境，良好的教育环境和良好的实验条件，使我们可以学习和实践四年来在大学中学到的知识。