

绿色包装与循环经济

纸尿裤回收共混发泡包装填充材料研究及应用

李俊鹏, 兰付强*

(河南省产品质量检验技术研究院, 郑州 450047)

摘要: **目的** 主要研究纸尿裤回收料与玉米淀粉、木薯淀粉、PE 等混合物制备共混发泡材料的过程, 并讨论其在包装填充中的应用。**方法** 纸尿裤经过高温消毒、分离、粉碎、环氧乙烷消毒、漂白、除异味等过程分离出 PE 底膜和纸浆等回收料, 将其与玉米淀粉、木薯淀粉、PE、添加剂等混合后在 160~170 °C 下制备共混发泡材料; 对该材料的密度、回弹性、压缩永久变形、水溶性、缓冲减震性能、可降解性能、重金属含量进行测试, 并研究纸尿裤回收料加入量对配方 1~4 的影响。**结果** 随着纸尿裤回收 PE 材料的增加, 其表观密度和实地密度增加约 0.7 kg/m³, 孔隙率约为 61.81%; 回弹性和压缩永久变形有所提升, 当压缩变形量<25%时恢复率>90%; 纸尿裤回收料的加入对缓冲减震性能影响不大; 材料水溶性随防水助剂的加入逐渐减弱, 降解 3 个月 after 体积减少 80%~90%, 质量损失率约为 15.62%; 随着纸尿裤回收料的加入, 重金属含量有所增加, 但远远小于标准值。**结论** 纸尿裤共混发泡材料可用作快递包装填充材料, 其孔隙率高, 具有一定的缓冲减震效果; 水溶性和可降解性良好, 可进行填埋处理, 无重金属污染。设计的高效自动填充打包机提高了纸尿裤回收共混发泡材料的使用效率, 其填充打包速度为人工的 10~15 倍。

关键词: 纸尿裤; 共混发泡材料; 孔隙率; 可降解性能

中图分类号: TB484

文献标志码: A

文章编号: 1001-3563(2025)05-0188-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2025.05.024

Research and Application of Filling Materials for Diaper Recycling Blended Foam Packaging

LI Junpeng, LAN Fuqiang*

(Henan Institute of Product Quality Inspection Technology, Zhengzhou 450047, China)

ABSTRACT: The work aims to research the process of preparing blended foam materials from diaper recycling materials mixed with corn starch, cassava starch, PE, etc., and discuss its application in packaging filling. Diapers were subject to high-temperature disinfection, separation, crushing, ethylene oxide disinfection, bleaching, deodorization and other processes to separate PE bottom films, pulp and other recycling materials. These materials were mixed with corn starch, cassava starch, PE, additives, etc., and then blended foam materials were prepared at 160-170 °C. The density, resilience, compression permanent deformation, water solubility, shock absorption and vibration reduction performance, degradability, and heavy metal content of the material were tested, and the effect of the addition amount of diaper recycling materials on formulas 1-4 was studied. The results showed that with the increase of diaper recycling PE materials, the apparent density and bulk density increased by about 0.7 kg/m³, and the porosity was about 61.81%.

收稿日期: 2024-09-19

基金项目: 国家市场监督管理总局技术保障专项项目(2019YJ028); 河南省产品质量检验技术研究院重点扶持科研项目(YZK202408)

*通信作者

Resilience and compression permanent deformation were improved, and when the compression deformation was less than 25%, the recovery rate was greater than 90%. The addition of diaper recycling materials had little effect on the shock absorption and vibration reduction performance. The water solubility of the material gradually weakened with the addition of waterproofing agents, and the volume reduced by 80% to 90% after 3 months of degradation, with a mass loss rate of about 15.62%. With the increase of diaper recycling materials, the heavy metal content increased, but it was far less than the standard value. In conclusion, diaper blended foaming materials can be used as packaging filling materials for express delivery, with high porosity and certain shock absorption and vibration reduction effects. They have good water solubility and degradability and can be landfilled without heavy metal pollution. The designed high-efficiency automatic filling and packaging machine improves the utilization efficiency of diaper recycling blended foam materials, and its filling and packaging speed is 10 to 15 times that of manual operation.

KEY WORDS: diapers; blended foam material; porosity; degradability

随着我国三孩政策的放开和老龄化进程的加快, 婴儿纸尿裤和成人纸尿裤的使用量急剧增加。据统计, 一个婴幼儿每年约使用 2 500 片纸尿裤, 全国每年约消耗 750 万 t 的纸尿裤产品。纸尿裤主要原料有无纺布、透气性 PE 膜、绒毛浆、高分子吸收树脂、原生木浆等, 除原生木浆、绒毛浆, 其他材料微生物难以分解^[1]。纸尿裤属于生活固体干垃圾, 其比重每年都在上升, 对环境的影响日渐增大。据美国密歇根大学 2021 年 7 月 27 日提供的消息, 该校科研人员将纸尿裤通过化学方式转化为压敏黏合剂, 可以防止数百万吨废弃物的产生^[2]。纸尿裤回收方式包括整体回收、简单拆解回收和完全分离回收等^[3]。垃圾回收利用公司 Renewi 与国际知名卫生用品公司 Essity 合作, 共同开发儿童纸尿裤和成人失禁用品二次回收利用技术, 并在荷兰首次试用^[4]。

目前, 纸尿裤废弃物比较常用的处理方法是直接焚烧用于能量回收或转化为垃圾衍生燃料 (Refuse Derived Fuel, RDF), 部分可生物降解的纸尿裤废弃物通常被送到厌氧性垃圾填埋场进行填埋处理^[5]。日本尤妮佳纸尿裤生产企业研发出臭氧处理技术, 纸尿裤的构成材料中纸浆约占 50%, 该企业已成功实现从回收的纸尿裤中提取纸浆等可再生原材料, 通过臭氧处理将异物洗净, 并进行杀菌、漂白。据悉, 臭氧处理后的纸浆中几乎检测不到细菌。我国的纸尿裤处理主要依靠填埋和焚烧方式, 但是填埋处理效果较差, 需要几十年甚至上百年才能完全分解纸尿裤。由于纸尿裤含有高分子材料, 焚烧处理会产生有害气体和颗粒, 污染环境, 研究纸尿裤的回收利用显得尤为重要。

福州大学研究 EVA/PE/淀粉复合发泡材料的制备方法, 以 EVA、PE 为主要原料、淀粉及无机粉料为辅料, 并配以甘油、交联剂、发泡剂 AC 和表面改性剂, 制备出 EVA/PE/淀粉复合发泡材料^[6]。曾广胜等^[7]以玉米淀粉为基体、竹粉为增强体、甘油/邻苯二甲酸二辛酯 (DOP) 混合物为增塑剂、偶氮二甲酰胺 (AC)/氧化锌 (ZnO) 为发泡剂、聚乙烯醇 (PVA) 为相容剂, 用注塑发泡法制备淀粉基热塑性发泡材料

(NFSC)。专注于天然高分子材料研究的余龙教授, 在世界上首次成功研制出全淀粉可生物降解材料并将其产业化, 在业界获得“starchman”(淀粉人)的美誉。孟令晗^[8]研究淀粉基发泡材料的生产技术, 并探索水分在淀粉基发泡材料生产过程中的作用机理及其对材料性能的影响机制; 针对淀粉发泡材料提出蒸汽改性法, 以达到改善材料对水敏感性的目的; 进一步引入高效界面黏结剂, 在材料表面黏结防水涂层, 实现防水型淀粉材料的制备。于彦存等^[9]研究水作为发泡剂制备发泡材料的进展情况以及此材料在包装中的应用, 证明水发泡塑料在包装上的应用更符合减量化要求, 属于易重复利用的绿色包装。

本课题在淀粉基发泡材料的基础上, 结合纸尿裤回收利用处理技术产出的回收料 (PE、纸浆等), 研究纸尿裤回收共混发泡材料。进一步对共混发泡材料的性能进行研究, 探讨纸尿裤回收共混发泡材料在快递填充包装中的应用。

1 试验

1.1 设备及材料

主要设备: 电热鼓风干燥箱 (AT-HG), 山东安尼麦特仪器有限公司; 环氧乙烷灭菌器 (HMQ-150), 河北荣丰消毒设备有限公司; 分析天平 (GR-200), 日本 AND 公司; 跌落试验机 (TW-220A), 东莞华科东尼仪器有限公司; 生物显微镜 (HAD-P5CE), 北京恒奥德仪器仪表有限公司; 双螺杆挤出试验机 (ZS-433-25), 东莞卓胜机械设备有限公司; 电感耦合等离子体发射光谱仪, Thermo Fisher Scientific; 原子荧光光度计, 北京吉天仪器有限公司; 恒温恒湿试验箱 (HR22300P), 上海汉测试验设备有限公司。

主要原料: 纸尿裤; 玉米淀粉 (质量分数为 99%, 密度为 1.396 g/cm³), 苏州欧扬化工科技有限公司; 木薯淀粉 (型号 003, 质量分数为 96%), 廊坊隆腾新材料有限公司。聚乙烯 (原生 LDPE, 密度为 0.91~0.925 g/cm³, 分子量分布 4 万~12 万), 燕山石化。

添加剂：发泡剂（偶氮二甲酰胺/氧化锌）、偶联剂（聚乙烯醇）、增塑剂（甘油/邻苯二甲酸二辛酯）、防水助剂（脲醛树脂）、颜料。

本课题研究用纸尿裤主要为往年省/市纸尿裤产品质量监督抽查过期样品、委托检验不要求取回样品及检验检测废弃样品。

1.2 试验方法

1.2.1 纸尿裤回收共混发泡材料制备

对收集的纸尿裤在强制对流干燥箱内进行高温消毒，温度(105±2)℃，时间8h，之后冷却至室温。高温消毒可杀死常见真菌、细菌、溶血性链球菌、大肠菌群、金黄色葡萄球菌、铜绿假单胞菌，同时除去纸尿裤中的非结晶水分。高温消毒后，真菌和细菌菌落总数均应<20 CFU/g，溶血性链球菌、大肠菌群、金黄色葡萄球菌、铜绿假单胞菌应未检出。将纸尿裤从中间剪开，分离出吸收树脂、绒毛浆、PE底膜及无纺布。将初步分离的材料进一步分离、粉碎清洗，然后通入臭氧/环氧乙烷进行消毒（主要针对枯草杆菌芽孢、短小杆菌芽孢、嗜热脂肪杆菌芽孢等，消毒后杀灭指数应≥10³），加入次氯酸钠进行漂白，再加入生石灰和活性炭祛除异味，最后得到塑料薄片和纸浆。塑料薄片主要为PE膜，将其重新熔融造粒备用（回收塑料中PE质量分数约为95%，非原生，密度约为0.930 g/cm³，分子量分布4万~30万）；纸浆内含有绒毛浆，二次制浆后烘干成纸浆板备用。纸尿裤回收共混发泡材料配比见表1，发泡温度为160~170℃，其中配方1未加入颜色及防水助剂。

表1 共混发泡材料配比
Tab.1 Ratio of blended foam materia %

配方 编号	玉米 淀粉	木塑 淀粉	聚乙烯	回收 塑料	回收 纸浆	添加剂
1	40	10	20	10	10	10
2	35	10	20	15	10	10
3	35	10	20	10	15	10
4	30	10	20	15	15	10

1.2.2 共混发泡材料性能测试

1.2.2.1 密度与孔隙率

采用GR-200分析天平，通过排水法测试纸尿裤共混发泡材料的实地密度。首先测量材料在空气中的质量 m_1 ，因材料密度<1.0 kg/dm³，需借助夹子使其完全浸入水中，然后测试材料在水中的质量 m ，根据天平自带计算公式计算其实地密度。表观密度采用质量体积法，测量尺寸为100 mm×100 mm×100 mm的纸尿裤回收共混发泡材料的质量，根据公式易得其表观密度。孔隙率为表观密度与实地密度的比值^[10]。

1.2.2.2 回弹性能和压缩永久变形

纸尿裤回收共混发泡材料落球回弹性能依据《软

质泡沫聚合材料 落球法回弹性能的测定》(GB/T 6670—2008)中的方法A进行试验^[11]，试样尺寸为100 mm×100 mm×50 mm，钢球直径为16 mm，质量为16.8 g，下落高度为500 mm。纸尿裤共混发泡材料压缩永久变形试验依据《软质泡沫聚合材料 压缩永久变形的测定》(GB/T 6669—2008)在常温下进行^[12]，试样尺寸为50 mm×50 mm×50 mm，压缩永久变形分别为25%和50%。

1.2.2.3 水溶性

恒温恒湿试验箱温度为23℃，湿度为50%，圆形玻璃容器加入一定量蒸馏水，液面高度约40 mm，观察放入试样初始时间以及30与120 min后的状态。

1.2.2.4 缓冲减震性能

本次选择配方1和配方4这2种材料进行试验，跌落高度选取0.5、1.0、1.5、1.8、2.3 m，跌落方向选择面跌落、棱跌落、角跌落^[13]。双瓦楞包装纸箱尺寸为250 mm×250 mm×250 mm，内装物为玻璃器皿，尺寸为150 mm×150 mm×150 mm，质量为1.2 kg。共混发泡材料填充于包装纸箱，确保玻璃器皿处于包装中心且各方向不晃动。试验完成后记录玻璃器皿的破损情况，本次试验不考虑瓦楞纸箱的破损变形情况。

1.2.2.5 可降解性能测试

可降解性能试验环境温度为23℃，湿度为50%，试验土壤来自某单位花园苗圃，pH值为6.9~7.2，其中富含腐殖质。将配方1~4的挤出成型材料放入土壤，为了便于观察，本试验对纸尿裤共混发泡材料进行半埋处理，试验时间为3个月，每隔21 d观察一次，记录发泡材料的变化情况。试验期间对土壤进行水分补充，令其始终保持40%~50%的湿度状态。

1.2.2.6 重金属含量

共混发泡材料重金属含量按照《玩具安全 第4部分：特定元素的迁移》(GB 6675.4—2014)进行测试^[14]。

2 结果与分析

2.1 组织结构及密度

共混发泡材料挤出成型如图1所示。由图1a~b可知，其表面和断面存在较多蜂窝状的疏松气孔，有些气孔比较大，约占直径的1/2；内部气孔沿挤出方向纵向排列，外表相对紧密，两端呈橘皮状。图1c为共混发泡材料在显微镜下放大10倍的照片，可见其发泡组织比较均匀，呈典型蜂窝状组织结构。

共混发泡材料气孔结构（按横断面统计）主要有圆形、椭圆形、狭长形、棒状形等。圆形和椭圆形气孔结构组织比较均匀，排列紧密且气孔较小；狭长形和棒状形气孔结构组织比较疏松，形状不规则且气孔较大。以单个气孔最大直径进行统计，不同尺寸气孔结构百分比如图2所示。气孔结构可能与共混发泡过程的温度、材料混合均匀性、水分、挤出速度等因素有关。

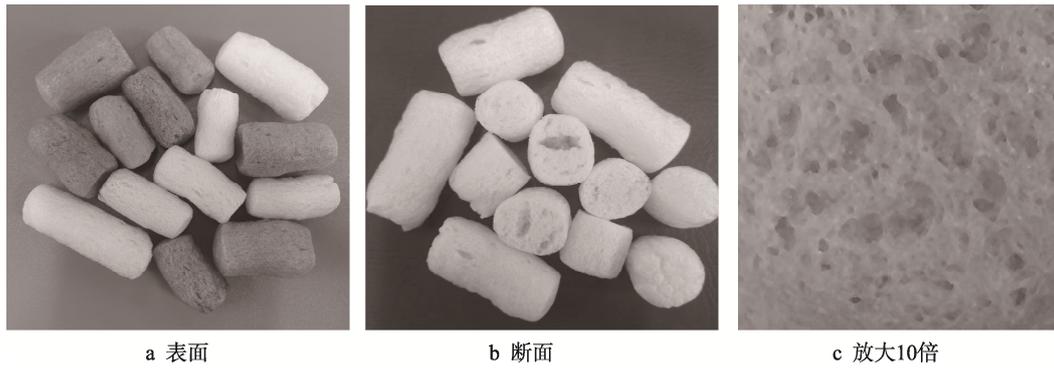


图 1 共混发泡材料挤出成型
Fig.1 Extrusion of blended foam material

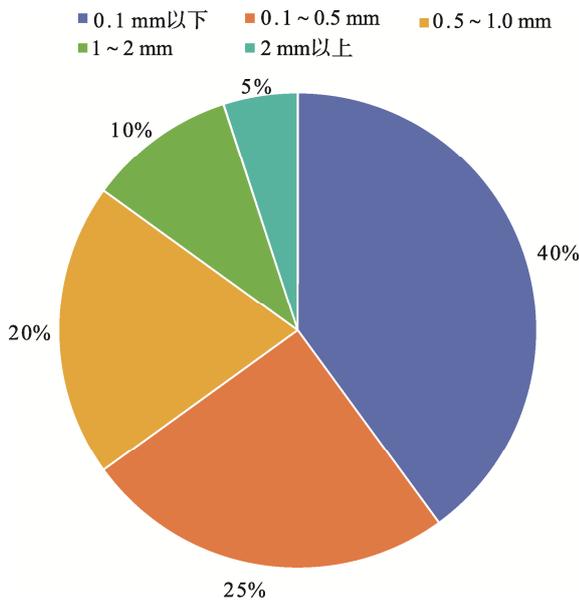


图 2 不同尺寸气孔结构百分比
Fig.2 Percentage of stoma structures of different sizes

配方 1~4 材料的表观密度和实地密度如图 3 所示。由图 3 可知: 配方 1 表观密度最小(23.62 kg/m³), 配方 4 表观密度最大(24.32 kg/m³), 最大差值为 0.7 kg/m³, 平均表观密度为 23.91 kg/m³; 配方 1 实地密度最小 (38.32 kg/m³), 配方 4 实地密度最大(39.04 kg/m³), 最大差值为 0.72 kg/m³, 平均实地密度为 38.68 kg/m³。根据平均表观密度和平均实地密度计算其孔隙率, 约为 61.81%。回收塑料和回收纸浆的加入一定程度上增加了材料密度, 当添加比例从 20% 增加到 30% 时, 密度增加约 0.7 kg/m³。这可能是因为随着回收塑料的加入, 高密度聚乙烯 (HDPE) 含量逐渐增加, 提高了材料密度。

2.2 回弹性能及压缩永久变形

配方 1~4 落球回弹性能 (回弹率)、压缩永久变形恢复率测试结果见表 2。由表 2 可知, 落球回弹率分别为 15.2%、15.7%、15.0%、16.6%, 均不足 20%。当回收塑料添加比例从 10% 增加到 15% 时, 回弹率提高 0.7%~1.6%。回收塑料中 PE 质量分数为 95%, 分子量

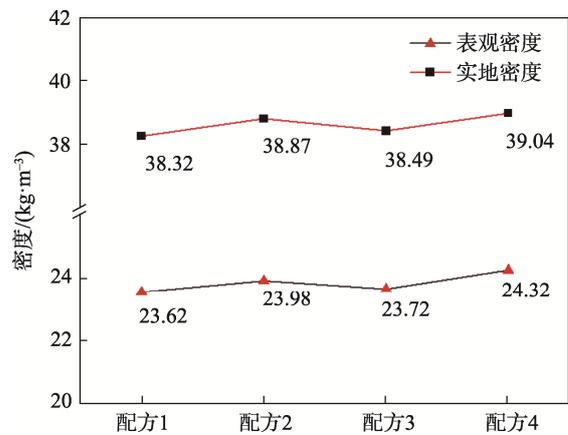


图 3 不同配方表面密度和实地密度
Fig.3 Apparent density and true density of different formulations

分布 4 万~30 万, 密度介于高密度聚乙烯 (LDPE) 和高密度聚乙烯 (HDPE) 之间, 这是因为纸尿裤在生产过程中为了增加 PE 底膜的抗拉强度和耐磨性添加部分 HDPE, 回收塑料的加入相当于添加 HDPE。HDPE 呈线性排列, 支链较少, 分子排列规整, 堆砌紧密, 而 LDPE 有较多的支链, 主链上长短不一的支链影响大分子排列的规整性和柔顺性。分子量越大回弹率越高, HDPE 分子链更加柔顺, 回弹率也较高, 因此随着回收塑料的加入, 落球回弹率有所提升。

当压缩永久变形为 25% 时, 配方 1~4 共混发泡材料的压缩永久变形恢复率分别为 93.2%、94.2%、92.9%、94.8%, 压缩变形量 < 10%, 恢复性良好。当压缩永久变形为 50% 时, 配方 1~4 压缩永久变形恢复率分别为 74.3%、74.8%、74.3%、76.9%, 其压缩变形量约为 25%, 恢复性较差。当受到外界压力时, 共混发泡材料内部产生内应力, 材料中大分子链发生位移, 从而产生弹性变形, 随着压力的增大, 共混发泡材料中大分子链滑移产生塑性变形。根据应力集中原理, 共混发泡材料狭长形、棒状形不规则大气孔结构首先受到破坏, 塑性变形和大气孔结构破坏共同导致材料不可逆, 造成永久变形, 恢复性较差。从表 2 不

表2 回弹性能、压缩永久变形恢复率测试结果

Tab.2 Test results of resilience and compression permanent deformation recovery %

测试项目	配方 1	配方 2	配方 3	配方 4
落球回弹率	15.2	15.7	15.0	16.6
压缩永久变形 (25%) 恢复率	93.2	94.2	92.9	94.8
压缩永久变形 (50%) 恢复率	74.3	74.8	74.3	76.9

难看出,随着纸尿裤回收塑料的加入,压缩永久变形恢复率逐渐增高。这是因为回收塑料主要成分为 PE,在共混发泡过程中与玉米淀粉、木薯淀粉、发泡剂、偶联剂、增塑剂等发生一系列物理化学变化,形成复杂的三维网状结构,PE 材料的增加导致大分子链滑移减少,只能产生大分子链构象的改变,储存了弹性势能。在外界压力作用下,压缩产生内应力,在反方向上表现出回弹力^[15]。

硬质泡沫塑料是指无柔韧性且压缩硬度大,应力达到一定值能产生形变,解除应力后不能恢复原状的泡沫塑料。国际标准化组织(International Organization for Standardization, ISO)规定,压缩至 50%再解除压力后厚度减少 10%以上的泡沫塑料为硬质泡沫塑料。纸尿裤共混发泡材料压缩至 50%后厚度减少 25%左右,符合硬质泡沫塑料的特征,但它又具有一定的回弹性能,可归为半硬质发泡材料。

配方 1~4 共混发泡材料在 1 dm² 面积上施加不同载荷的压缩变形量试验结果见表 3。由表 3 可知:随着质量载荷的增加,共混发泡材料压缩变形量逐渐增加;质量载荷超过 10 kg 后,变形量>10%;质量载荷为 3 kg 时,变形量<5%。

2.3 水溶性

共混发泡材料的水溶性试验结果如图 4 所示。由图 4a 可知,试验前共混发泡材料呈柱状结构,颗粒饱满均匀,漂浮铺满水面。图 4b 为浸泡 30 min 后的状态,共混发泡材料部分溶解为棉絮状,

表3 1 dm²面积上不同载荷压缩变形量Tab.3 Compressive deformation under different loads on 1 dm² area

质量 载荷/kg	配方 1 变形量/%	配方 2 变形量/%	配方 3 变形量/%	配方 4 变形量/%
0.5	无变化	无变化	无变化	无变化
1.0	无变化	无变化	无变化	无变化
1.5	1.9	1.8	2.0	1.7
2.5	2.7	2.5	2.8	2.3
3.0	4.7	4.7	4.9	4.6
4.0	6.6	6.4	6.3	6.3
5.0	7.3	6.9	7.4	6.9
8.0	9.4	9.2	9.3	8.9
10.0	11.4	11.0	11.3	10.9

体积缩小为原来的 1/2,约占水面 70%且发生团聚现象。图 4c 为浸泡 120 min 后的状态,共混发泡材料进一步溶解为棉絮状,体积缩小为原来的 1/3,约占水面 50%,团聚更加明显。

共混发泡材料在吸水后,淀粉基遇水发生分解,发泡膨胀的气孔出现收缩,导致体积变小。淀粉基遇水后发生水溶,表面呈黏糊状,在表面张力的共同作用下出现团聚现象。

由图 4c 可知,白色共混发泡材料(配方 1)水溶性较好,最后彻底分解为白色棉絮状。这可能是因为白色共混发泡材料中没有加入防水颜色助剂,玉米淀粉、木薯淀粉含量较高,同时降低了增塑剂和偶联剂的使用比例,更易溶于水。配方 2~4 因防水颜色助剂、回收塑料和回收纸浆的比例增加,使得共混发泡材料具有一定的防水性能,其水溶性较差,表现为局部溶解和体积收缩。

玉米淀粉分子为直链结构,木薯淀粉分子为支链结构,且在高温、高剪切力和低 pH 值条件下具有稳定性。分子链型不同,其吸水、保水、峰值黏度均不同,

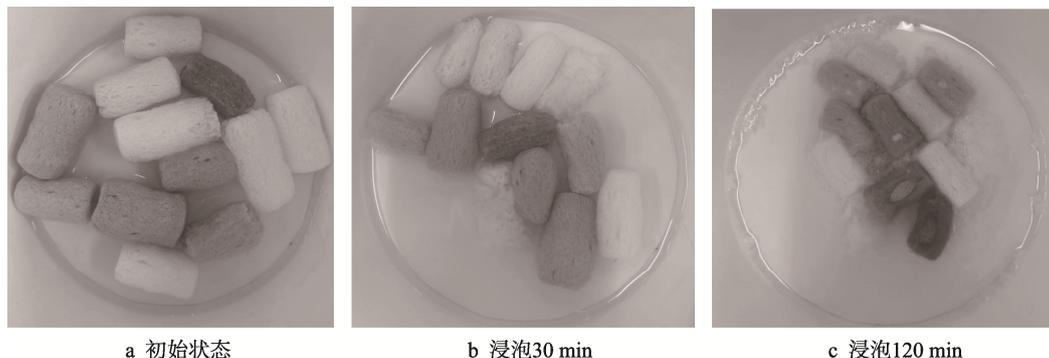


图4 共混发泡材料的水溶性试验结果

Fig.4 Water solubility test results of blended foam material

两者混合使用能够综合各自优点, 与 PE 在发泡剂、偶联剂、增塑剂、防水助剂共同作用下得到性能稳定的发泡材料。另外, 提高防水助剂和木薯淀粉的含量可以在一定程度解决共混发泡材料的水溶性问题。

将纸尿裤共混发泡材料放置在 25%~90%湿度的环境中 3 个月, 并未发现其性状、外观等发生明显变化, 这是因为环境湿度不会破坏材料的化学键结构, 即该材料在实际使用中不受环境湿度影响。

2.4 缓冲减震性能

共混发泡材料缓冲减震跌落试验结果见表 4, 可见 1.5 m 高度及以下跌落时玻璃器皿各方向均无破损, 高度在 1.8 m 以上时玻璃器皿出现轻微裂伤。配方 1 和配方 4 试验结果无明显差异。

2.5 可降解性能

纸尿裤回收共混发泡材料可降解试验如图 5 所示。

表 4 共混发泡材料缓冲减震跌落试验结果
Tab.4 Result of drop test of buffering and damping of blended foam material

跌落形式	跌落高度				
	0.5 m	1.0 m	1.5 m	1.8 m	2.3 m
面跌落	均无破损	均无破损	均无破损	有轻微裂伤	损坏
棱跌落	均无破损	均无破损	均无破损	均无破损	轻微裂伤
角跌落	均无破损	均无破损	均无破损	有轻微裂伤	损坏

由图 5b 可知, 在 21 d 后, 土壤中长出草芽, 一定程度上证明其中富含腐殖质; 共混发泡材料与土壤发生浸润, 体积缩小为原来的 1/2 左右, 这可能是因为潮湿的土壤环境使材料局部出现水溶性和气孔收缩。

试样降解 3 个月后如图 6 所示。由图 6a 可知, 试样与土壤发生完全浸润, 呈卷曲片状结构, 长度方向尺寸为 10~20 mm, 厚度为 2~3 mm。试样长度

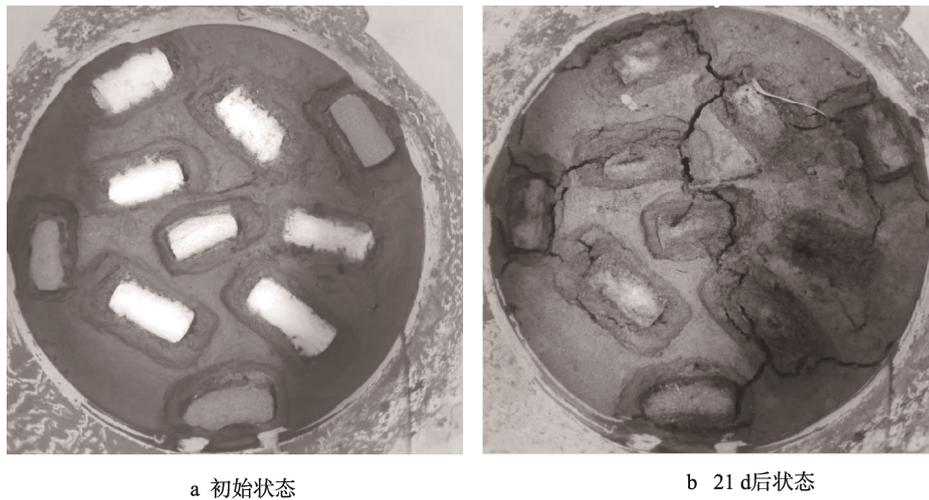


图 5 可降解试验
Fig.5 Degradable test

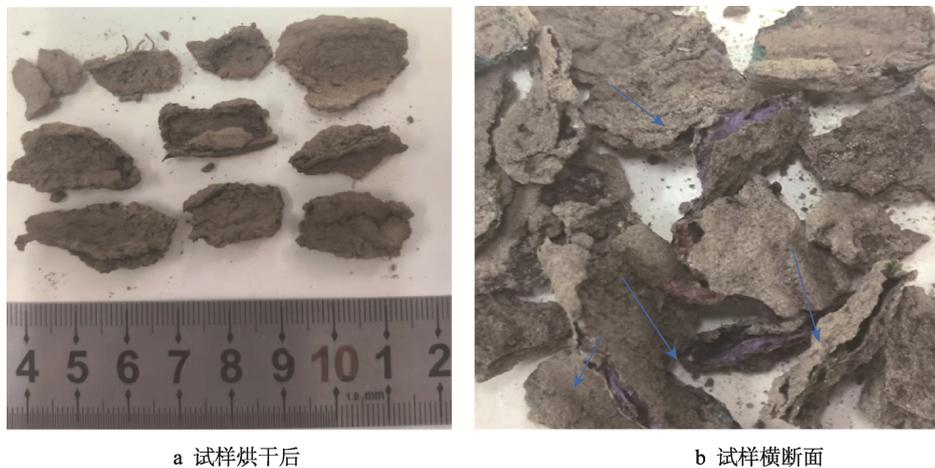


图 6 试样降解 3 个月后
Fig.6 Samples after 3 months of degradation

方向收缩33%~67%，径向收缩约80%，经计算，3个月后体积减少80%~90%。由图6b可知，断面显示存在未降解的共混发泡材料。降解后，材料表面粗糙，其断口存在片层状结构，脆性较大，易于粉碎。

置于腐殖质土壤中的共混发泡材料，其降解方式主要为微生物降解。微生物以共混发泡材料为底物，由需氧微生物转化为CO₂、H₂O、矿物质和生物质，或在厌氧性生物作用下转化为CO₂、CH₄和腐殖质，这2个过程一般均经过生物附着、解聚、同化作用和矿化作用^[16]。采用土壤分离过滤沉淀法计算共混发泡材料3个月的质量损失率约为15.62%，超过10%，降解效果较好。

2.6 重金属含量

配方1~4重金属测试结果见表5。砷、镉、铬、铅、汞5个元素未检出，其检测结果数值均小于检出限。配方4中镉含量的检出结果为1 mg/kg，配方1~3中未检出。配方1中硒含量未检出，配方2~4中检出结果分别为2、3、5 mg/kg。配方1~4中钡含量的检出结果分别为2、4、6、10 mg/kg。配方1有1个元素被检出，配方2有2个元素被检出，配方3有2个元素被检出，配方4有3个元素被检出，其原因可能是随着回收塑料和回收纸浆的加入，重金属含量有所增加。根据《玩具安全 第4部分：特定元素的迁移》（GB 6675.4—2014）的要求，镉含量≤60 mg/kg，砷含量≤25 mg/kg，钡含量≤1 000 mg/kg，可见4个配方重金属检出值远远小于标准值，符合国家安全标准。

3 快递包装中的应用

3.1 快递包装填充物

纸尿裤回收共混发泡材料具有质量轻、易于打包、不受产品形状限制、抗振和抗冲击性能好等优点，适用于快递包装填充物，特别适用于质量在3 kg以下的玻璃、陶瓷、骨瓷或形状复杂的快递物品。纸尿裤回收共混发泡材料可以和封边充气袋、珍珠棉、袋中袋、气柱

等联合使用，增加快递包装填充的灵活性，其较好的生物降解性能对于环境保护具有更加深远的意义。

3.2 高效打包填充技术

高效自动填充打包机示意如图7所示，主要由料斗、光栅自动阀门、二分板、传送装置、摇盖折叠杆、传送滚轮等部分组成，可以实现自动加料、合盖、封装等过程。

料斗可以存储大量填充材料，当填充材料不足1/3时可及时补充，不影响连续作业。光栅自动阀门可实现填充材料的流量控制，通过参数设置精确控制填充流量，实现不同包装流量的调节。二分板设计使得填充材料均匀分布在被包装产品两边。摇盖折叠杆配合旋转装置，实现包装纸箱摇盖的折叠封口。传送滚轮实现填充打包的可持续连续化操作。

自动填充打包机的工作流程如下。料斗内加入纸尿裤共混发泡材料颗粒，颗粒直径约15 mm，长度约30 mm。传动装置将纸箱传送至二分板位置停止运行，光栅自动阀门打开进行加料。达到设计的加料量后放入快递产品，光栅自动阀门再次打开进行加料。待加料结束后传动装置继续运行，纸箱通过摇盖折叠杆左侧时摇盖被折叠，随后纸箱在传动装置上转动，左右互换至下一摇盖折叠杆。两侧摇盖均被折叠后进入下一个胶带打包程序。

该高效自动填充打包机构成简单，能够自动识别填充纸箱，实现批量产品的快速打包以及共混发泡材料填充包装的自动化。根据自动化流水作业计算，其填充打包速度为人工的10~15倍。

3.3 填充物的回收再利用

纸尿裤回收共混发泡材料的填充物可以回收再利用，压缩变形<10%时可对填充物进行循环使用；压缩变形量>10%时可以加入清水，与橡皮泥、彩泥等混合后改变填充物的颜色，用于手工玩具制作。由于纸尿裤回收共混发泡材料具有良好的可降解性能，即便不进行回收再利用，也可对其进行填埋处理。

表5 共混发泡材料重金属含量
Tab.5 Heavy metal content of blended foam materials

配方编号	镉	砷	钡	镉	铬	铅	汞	硒
1	未检出	未检出	2	未检出	未检出	未检出	未检出	未检出
2	未检出	未检出	4	未检出	未检出	未检出	未检出	2
3	未检出	未检出	6	未检出	未检出	未检出	未检出	3
4	1	未检出	10	未检出	未检出	未检出	未检出	5

注：镉检出限为0.2，砷检出限为0.2，钡检出限为0.01，镉检出限为0.02，铬检出限为0.05，铅检出限为0.2，汞检出限为0.03，硒检出限为0.2。

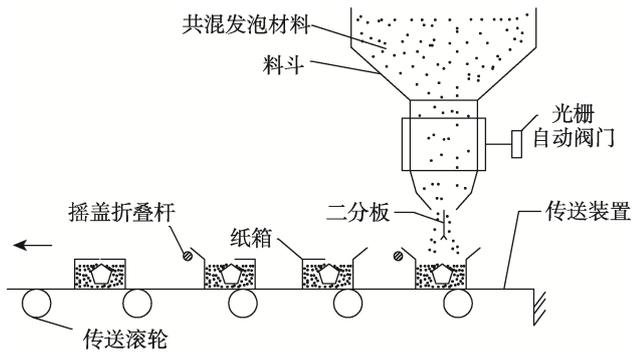


图 7 高效自动填充打包机示意

Fig.7 Schematic diagram of efficient automatic filling baler

4 结论

通过本文分析可以得出以下几点结论。

1) 纸尿裤共混发泡材料存在较多蜂窝状的疏松气孔, 有些气孔较大, 约占直径的 1/2。随着回收料的加入, 纸尿裤共混发泡材料的密度增加约 0.7 kg/m^3 。回收塑料中 PE 从 10% 增加到 15% 时, 其回弹率增加 0.7%~1.6%, 整体回弹率不足 20%。

2) 当压缩永久变形为 25% 时, 共混发泡材料的压缩变形量 < 10%, 恢复性良好; 当压缩永久变形为 50% 时, 其压缩变形量约为 25%, 恢复性较差。纸尿裤回收共混发泡材料符合硬质泡沫塑料的特征, 但它具有一定的回弹性能, 可归为半硬质发泡材料。随着质量载荷的增加, 共混发泡材料压缩变形量逐渐增加; 质量载荷超过 10 kg 后, 变形量 > 10%; 质量载荷为 3 kg 时, 变形量 < 5%。

3) 回收塑料和回收纸浆的比例增加, 使得共混发泡材料具有一定的防水性能, 水溶性较差, 表现为局部溶解和体积收缩。降解 3 个月后, 其体积减少 80%~90%, 质量损失率约为 15.62%。

4) 随着回收塑料和回收纸浆的加入, 重金属含量有所增加, 但重金属检出值远远小于标准值, 符合国家安全标准。

5) 纸尿裤回收料的加入对缓冲减震性能影响不大, 在 1.5 m 高度内跌落, 玻璃器皿各方向无破损。

6) 纸尿裤回收共混发泡材料具有质量轻、易于打包、不受产品形状限制、抗振和抗冲击性能好等优点, 能够循环利用并可进行填埋处理。设计的高效自动填充打包机提高了纸尿裤回收共混发泡材料的使用效率, 其填充打包速度为人工的 10~15 倍, 可以实现自动流水线作业。

参考文献:

[1] 栗亚. 纸尿裤吸收芯体的结构与性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2019.

LI Y. Study on the Structure and Properties of Absorbent Core of Diapers[D]. Shanghai: Donghua University, 2019.

[2] CHAZOVACHII P T, SOMERS M J, ROBO M T, et al. Giving Superabsorbent Polymers a Second Life as Pressure-Sensitive Adhesives [J]. Nature Communications, 2021, 12 (1): 4524.

[3] 祝良海, 马帆峰, 谢祖民, 等. 废弃纸尿裤的处理和回收利用研究进展[J]. 高分子通报, 2022(2): 25-31.

ZHU L H, MA F F, XIE Z M, et al. Research Progress on the Treatment and Recycling of Waste Nappies [J]. Polymer Bulletin, 2022(2): 25-31.

[4] 佚名. Essity 和 Renewi 合作研发纸尿裤和失禁护理用品回收利用技术[J]. 中华纸业, 2018, 39(16): 75.

ANONYMOUS. Essity and Renewi Cooperate to Develop Recycling Technology for Diapers and Incontinence Care Products [J]. Chinese Paper Industry, 2018, 39(16): 75.

[5] 康玉强, 袁琳. 新形势下固体废弃物的焚烧处理分析[J]. 清洗世界, 2024, 40(10): 99-101.

KANG Y Q, YUAN L. Cleaning World, 2024, 40(10): 99-101.

[6] 福州大学. EVA/PE/淀粉复合发泡材料的制备方法: CN200610069806.1[P]. 2009-10-14.

Fuzhou University. Preparation Method of EVA/PE/Starch Composite Foam Material: CN200610069806.1[P]. 2009-10-14.

[7] 曾广胜, 梁洁, 江太君, 等. 淀粉基热塑性发泡材料的配方研究[J]. 包装学报, 2019, 11(2): 59-65.

ZENG G S, LIANG J, JIANG T J, et al. Formulation of Starch-Based Thermoplastic Foam Composites[J]. Packaging Journal, 2019, 11(2): 59-65.

[8] 孟令晗. 淀粉基发泡材料的制备与性能及防水性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.

MENG L H. Study on Preparation, Properties and Waterproofing of Starch-Based Foaming Materials[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.

[9] 于彦存, 韩常玉. 水发泡材料研究进展及其在包装领域的应用[J]. 塑料包装, 2018, 28(3): 16-20.

YU Y C, HAN C Y. Research Progress in Water Foaming Materials and Its Application in Packaging[J]. Plastics Packaging, 2018, 28(3): 16-20.

[10] 文琼华, 孟江燕, 龚楚, 等. 碳纤维增强树脂基复合材料孔隙率检测方法的分析比较[J]. 玻璃钢/复合材料

- 料, 2016(7): 32-37.
- WEN Q H, MENG J Y, GONG C, et al. Comparative Analysis of Testing for Porosity of the Carbon Fiber Reinforced Resin Matrix Composites[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2016(7): 32-37.
- [11] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 软质泡沫聚合材料 落球法回弹性能的测定: GB/T 6670—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009. State Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, Standardization Administration of China. Determination of Resilience of Soft Foam Polymeric Materials by Falling Ball Method: GB/T 6670-2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.
- [12] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 软质泡沫聚合材料 压缩永久变形的测定: GB/T 6669—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009. State Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, Standardization Administration of China. Determination of Compressive Permanent Deformation of Soft Foam Polymer: GB/T 6669-2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.
- [13] 国家技术监督局. 包装 运输包装件 跌落试验方法: GB/T 4857.5—1992[S]. 北京: 中国标准出版社, 1992. State Bureau of Technical Supervision. Drop Test Method for Packaging and Transportation: GB/T 4857.5-1992 [S]. Beijing: Standards Press of China, 1992.
- [14] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 玩具安全 第 4 部分: 特定元素的迁移: GB 6675.4—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. State Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, Standardization Administration of China. Safety of Toys: Part 4: Migration of Certain Elements: GB 6675.4-2014[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [15] 蒋志成, 张星烁, 王兆波. HDPE/SBR TPV 压缩永久变形的可逆回复及机制研究[J]. *特种橡胶制品*, 2020, 41(3): 5-9. JIANG Z C, ZHANG X S, WANG Z B. Study on Mechanism and Reversible Recovery of HDPE/SBR TPV Compression Set[J]. *Special Purpose Rubber Products*, 2020, 41(3): 5-9.
- [16] 贾悦, 邢云天, 戴建荣, 等. 土壤中氯硝柳胺降解影响因素的研究[J]. *中国血吸虫病防治杂志*, 2020, 32(6): 559-564. JIA Y, XING Y T, DAI J R, et al. Study on the Factors Affecting the Degradation of Niclosamide in the Soil[J]. *Chinese Journal of Schistosomiasis Control*, 2020, 32(6): 559-564.