

基于 NaOH 预处理的废纸纤维发泡材料工艺及配方研究

张惠莹¹, 张晶¹, 孙昊¹, 江兴亮², 张新昌¹

(1. 江南大学, 无锡 214122; 2. 句容市一马先包装厂, 句容 2124002)

摘要: 通过 2 种途径对废纸纤维发泡材料的工艺配方进行了优化, 以获得性能更好的废纸纤维发泡材料。一是对废纸纤维原料进行 NaOH 预处理, 研究了 NaOH 预处理对发泡材料性能的影响; 二是基于 NaOH 预处理, 采用微波加热发泡工艺改善了废纸纤维发泡材料的性能。结果表明: NaOH 预处理较大程度上改善了废纸纤维发泡材料的发泡倍率、密度及缓冲性能。试验确定了废纸纤维预处理的最佳条件和基于 NaOH 预处理的废纸纤维发泡材料的最佳工艺配方。

关键词: 废纸纤维; 发泡材料; 预处理; 微波加热

中图分类号: TB484; TB487 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2012)19-0061-06

Study on Formulation and Process of Waste Paper Fiber Foaming Materials Based on Pretreatment with NaOH

ZHANG Hui-ying¹, ZHANG Jing¹, SUN Hao¹, JIANG Xing-liang², ZHANG Xin-chang¹

(1. Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. Jurong City Yimaxian Paper Packing Factory, Jurong 2124002, China)

Abstract: Formulation and process of waste paper fiber foaming material was optimized using two ways to obtain better performance. One way was to study the influence of NaOH solution pre-treatment on performance of the waste paper fiber foamed material. The other way was using microwave heating foaming process to optimize the performance of the waste paper fiber foamed material based on pretreatment with NaOH. The results indicated that the foaming rate, density, and buffer performance of the waste paper fiber foaming material all has been improved through pretreatment with NaOH. The test determined the best pretreatment conditions and the best formulation and process of the waste paper fiber foamed material based on pretreatment with NaOH.

Key words: waste paper fiber; foamed material; pretreatment; microwave heating

以高分子塑料制备的发泡缓冲材料为产品提供了优良的保护性能, 促进了包装业的快速发展。然而此类材料无法生物降解, 较难循环再利用, 对环境造成了较大影响。

近年来国内外研究者致力于以植物纤维为主要原料的环保型发泡缓冲材料的研发, 如索晓红、骆光林、解林坤等人^[1-3]研究了制备纤维发泡材料的原料助剂配方; 苏笑海、Tsutomu Noguchi 等人^[4-6]探讨了纤维发泡材料的不同发泡成型工艺; 史锃瑛、黄俊彦等人^[7-8]研究了纤维发泡材料的发泡成型机理; 杨文斌等人^[9]探讨了植物纤维发泡材料的干燥工艺和

水分移动机理; 李友良、陈慧文、吕艳娜^[10-12]等人研究了以废纸为原料制备纤维发泡材料的配方及工艺。较之已经加工好的商品纸浆, 废纸再生缓冲发泡材料的原料具有来源广泛、成本低廉、供应充足等特点, 且从理论上而言, 所有回收废纸经过适当地处理, 都可以用于废纸再生缓冲发泡材料的生产^[13]。由于废纸已经历过一次或多次的打浆、压榨和干燥处理, 会导致废纸纤维的表面发生角质化现象。纤维发生角质化后, 其内表面减少、结构更紧实、亲水性下降、挺度增加、渗透试剂可及度降低^[14], 这些性能的变化导致了采用废纸纤维制备的发泡材料性能劣于原始植物

收稿日期: 2012-06-08

作者简介: 张惠莹(1987—), 女, 河南漯河人, 江南大学硕士生, 主攻包装结构与材料。

纤维,因此,对废纸纤维进行预处理来改善废纸纤维发泡材料的性能是十分有必要的。

作者在已有废纸纤维发泡工艺配方基础上,通过对废纸纤维进行 NaOH 预处理的试验研究和基于 NaOH 预处理的微波发泡工艺配方的试验研究,实现了改善废纸纤维发泡材料综合性能的效果。

1 试验

1.1 材料

废纸浆,将废瓦楞纸板剥离,将瓦楞芯纸弃之不用,留面纸、里纸粉碎后加入一定量水,用水力碎浆机碎浆,打浆后用用纱布把浆料滤水拧干至含水率 70%左右备用;玉米淀粉,生化试剂,句容市一马先包装厂;偶氮二甲酰胺,又称 AC 发泡剂,深圳市天唯达化工有限公司;碳酸氢钠、碳酸氢铵、丙三醇、碳酸钙、氢氧化钠,均为分析纯,国药集团化学试剂有限公司;硼砂,分析纯,句容市一马先包装厂生产。

1.2 方法

1.2.1 废纸纤维的预处理

按前期探索试验中得到的预处理条件范围,在塑料密封袋中,将一定浓度的 NaOH 溶液与废纸浆混合,配成浆浓 10%的均匀浆料,然后置于恒温水浴锅中进行一定温度的恒温水浴处理,每隔 10 min 左右取出揉搓一次,使浆料与处理液充分混合,至一定时间后取出。随后,用自来水将浆料洗涤干净,挤干至含水率 70%左右后装入密封袋备用。

1.2.2 纤维发泡材料的制备

配置一定浓度的糊化淀粉和聚乙烯醇(PVA)溶液,分别取一定量的淀粉溶液、PVA 溶液与一定量的废纸浆混合,随后加入丙三醇、碳酸氢钠、偶氮二甲酰胺、碳酸氢铵等助剂,置于搅拌机中搅拌至纸浆与助剂充分混合均匀;取出混合浆料置于自制发泡模具中,轻压上表面至平整后放入微波炉中加热发泡,在一定功率下经微波加热一定时间取出称重,随后转入恒温干燥箱中干燥至恒重,即得到试验用的纤维发泡材料试样。

1.2.3 试验设计

已有的工艺配方^[15]为湿纸浆(含水率 70%):水:甘油:碳酸氢钠:偶氮二甲酰胺:淀粉:聚乙烯醇:碳酸钙:硼砂约为 107:200:3.8:0.5:1.5:1.8:1.2:3:0.2,微波发泡功率 800 W、时间 15

min。在此工艺配方基础之上,通过 2 组正交试验研究一种基于 NaOH 预处理的废纸纤维发泡材料的工艺配方,从而改善废纸纤维发泡材料的综合性能。

NaOH 预处理试验^[16]是指采用原有工艺配方,通过对废纸纤维原料进行 NaOH 预处理,改善废纸纤维的自身特性,从而弥补废纸纤维发泡材料性能的不足。通过正交试验,探讨纤维预处理中 NaOH 的用量(占绝干纸浆的质量分数)、处理温度和处理时间 3 个因素分别对废纸纤维发泡材料性能的影响,正交试验设计见表 1。

表 1 NaOH 预处理正交试验因素水平

Tab.1 Factors and levels of orthogonal test of the pretreatment with NaOH

水平	因素		
	NaOH 质量分数/%	处理时间/min	处理温度/℃
1	1	30	60
2	2	60	70
3	3	90	80

微波发泡工艺配方试验是指基于 NaOH 预处理,对已有工艺配方中的重要因素及微波发泡工艺参数进行正交试验研究,达到再次改善废纸纤维发泡材料性能的效果。通过正交试验研究发泡剂种类、材料初始含水率、微波发泡功率及时间 4 个因素对发泡材料性能的影响,正交试验设计见表 2。

表 2 工艺配方正交试验因素水平

Tab.2 Factors and levels of orthogonal test of formulation and process

水平	发泡剂种类	因素		
		初始含水率/%	微波功率/W	微波时间/min
1	NaHCO ₃ (0.5 g)+AC(1.5 g)	85	800	9
2	NH ₄ HCO ₃ (0.5 g)+AC(1.5 g)	90	640	10
3	NH ₄ HCO ₃ (1 g)+AC(1 g)	95	480	11

1.2.4 性能测试

1) 发泡倍率(α)的测定。由于试样在圆柱形模具内发泡,径向尺寸不变,故用最小分度值为 0.02 mm 的游标卡尺分别测得发泡后与发泡前试样的厚度,发泡后的厚度比发泡前厚度即为试样的发泡倍率 α 。

2) 材料密度(ρ)的测定。参照《GB/T 8168—2008 包装用缓冲材料静态压缩试验方法》推荐的缓冲材料密度测试方法进行,首先将试样裁切成 10 cm × 10 cm 的方块,随后取刚性平板放置试样上施加

(0.20±0.02) kPa 的压缩载荷,保持 30 s 后在载荷状态下,用最小分度值为 0.02 mm 的游标卡尺测量试样四角的厚度求平均值,求得试样体积 V ,用电子天平称量试样发泡干燥后的稳态质量 m ,试样质量 m 与体积 V 的比为试样密度 ρ 。

3) 弹性比能(u)的测定。依照《GB/T 8168—2008》推荐的试验方法,采用万能材料试验机对材料进行静态压缩试验,得到力-变形曲线,经转换得缓冲材料的压缩应力-压缩应变曲线,利用该曲线求取材料在 40% 应变时的弹性比能;

4) 残余应变(ϵ)的测定。试样经静态压缩后,卸去载荷,3 min 后测定试样厚度,则压缩前后的厚度差与试样压缩前厚度的百分比,即为试样的残余应变 ϵ 。

2 结果与讨论

2.1 正交试验结果评价方法

评价缓冲包装材料的指标较多,比如冲击能量的

吸收性、振动能量的吸收性、回弹性、蠕变性、温度稳定性、湿度稳定性、耐破损性等^[15]。对于纤维发泡缓冲包装材料来说,除上述指标外,发泡倍率和材料密度也是至关重要的。试验将通过材料试样的发泡倍率、密度、弹性比能和残余应变的测试来反映纤维发泡材料的各项性能指标。

由于试验结果由多个指标评价反映,不能衡量各因素对试样综合性能的影响,故采用综合评价方法^[16]对正交试验结果进行描述和分析。综合考虑 4 个评价指标对材料综合性能的影响重要性,将综合评分标准定为发泡倍率占总分的 10%,密度、弹性比能、残余应变各占 30%,得出各试样的综合得分。

2.2 NaOH 预处理试验结果分析

NaOH 预处理试验的综合评分结果见表 3,对总分结果进行极差分析,见表 4。由表 4 中的极差分析结果可以看出,纤维预处理的 3 个条件因素对其发泡缓冲包装材料性能影响的主次顺序为:NaOH 用量→处理时间→处理温度。

表 3 NaOH 预处理试验结果

Tab.3 Test results of the pretreatment with NaOH

编号	因素水平			试验结果				总分
	NaOH 质量分数	处理时间	处理温度	发泡倍率	ρ /(g·cm ⁻³)	u /(J·cm ⁻³)	ϵ /%	
1	1	1	3	1.470	0.102	0.124 8	10.70	83.0
2	2	1	1	1.546	0.089	0.110 4	11.04	89.6
3	3	1	2	1.471	0.106	0.174 7	10.42	75.5
4	1	2	2	1.563	0.093	0.128 6	10.62	85.5
5	2	2	3	1.533	0.102	0.111 7	10.40	86.6
6	3	2	1	1.529	0.108	0.182 3	11.29	72.3
7	1	3	1	1.584	0.098	0.140 4	10.27	82.8
8	2	3	2	1.560	0.102	0.145 8	11.92	76.7
9	3	3	3	1.517	0.109	0.196 6	11.82	69.7

表 4 NaOH 预处理试验极差分析表

Tab.4 Range analysis of the pretreatment test with NaOH

项目	因素		
	NaOH 质量分数	处理时间	处理温度
水平 1 均值	83.8	82.7	81.6
水平 2 均值	84.3	81.5	78.5
水平 3 均值	72.5	76.4	79.8
极差 R	11.8	6.3	3.1

各因素对材料性能的影响趋势见图 1。从图 1 可以看出,随着 NaOH 用量增加,材料的综合性能先变好后变坏,NaOH 用量为绝干纸浆质量的 2%时,材

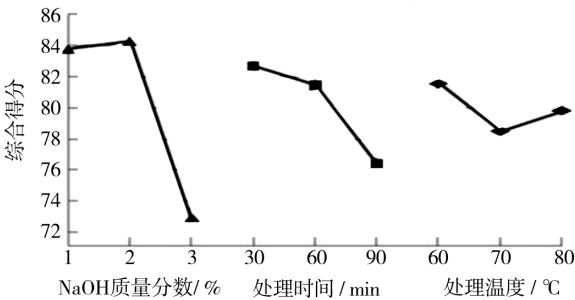


图 1 NaOH 预处理试验因素趋势

Fig.1 Index diagram of the pretreatment test with NaOH

料的综合性能最好。处理温度和处理时间对材料性能的影响不是特别明显,当处理时间长于 60 min 后,材料性能迅速下降,因此碱处理时间应控制在 60 min 以内。随着处理温度的增加,材料的性能先变坏后变好,考虑生产成本,应将处理温度控制在较低范围内。

在综合考虑产品的生产成本和使用性能的前提下,由正交试验分析结果,可以确定废纸纤维预处理的最佳条件为: NaOH 的用量为绝干纸浆质量的

2%,且在 60 ℃ 恒温条件下处理 60 min。

2.3 工艺配方试验结果分析

在纤维预处理基础上,对原工艺配方进行优化试验,按照综合评分标准计算试验结果见表 5,对综合评分结果进行极差分析,见表 6。由表 6 中的极差分析结果可以看出,4 个优化条件对废纸纤维发泡材料性能影响的主次顺序为:初始含水率→微波功率→微波时间→发泡剂种类。

表 5 工艺配方试验结果

Tab.5 Results of orthogonal test of formulation and process

编号	因素水平				试验结果				总分
	发泡剂种类	初始含水率	微波功率	微波时间	发泡倍率	ρ /(g·cm ⁻³)	u /(J·cm ⁻³)	ϵ /%	
1	1	1	3	2	1.175	0.1059	0.1676	13.67	69.3
2	2	1	1	1	1.253	0.0964	0.1443	11.83	78.5
3	3	1	2	3	1.206	0.1010	0.118	9.96	86.4
4	1	2	2	1	1.125	0.0969	0.116	10.71	85.9
5	2	2	3	3	1.159	0.0969	0.1431	11.51	79.1
6	3	2	1	2	1.243	0.0914	0.1158	12.09	84.8
7	1	3	1	3	1.173	0.0843	0.0964	10.88	95.5
8	2	3	2	2	1.135	0.0893	0.1098	9.90	92.4
9	3	3	3	1	1.049	0.0905	0.1108	14.60	81.8

表 6 工艺配方试验的极差分析

Tab.6 Range analysis of orthogonal test of formulation and process

项目	因素			
	发泡剂种类	初始含水率	微波功率	微波时间
水平 1 均值	83.6	78.1	76.7	82.1
水平 2 均值	83.3	83.3	88.2	82.2
水平 3 均值	84.3	89.9	86.3	87.0
极差 R	1.0	11.8	11.5	4.9

各优化条件对发泡材料性能的影响趋势见图 2。

从图 2 可以看出,发泡剂种类和微波时间对材料性能的影响不大,碳酸氢铵与偶氮二甲酰胺按 1:1 复配的发泡效果略优,发泡时间 11 min 时较好。初始含水率与微波功率对发泡材料性能的影响明显。随着初始含水率的增加,发泡材料性能越来越好,说明水分子的存在有利于微波能量的吸收,发泡剂分解迅速且彻底,但过高的含水率会使干燥过程耗能较大,因此初始含水率定为 95%。微波功率为 640 W 即中高火发泡时,发泡材料的综合性能最好,功率过低,材料吸收的微波能量较少,发泡剂不能完全分解,而功

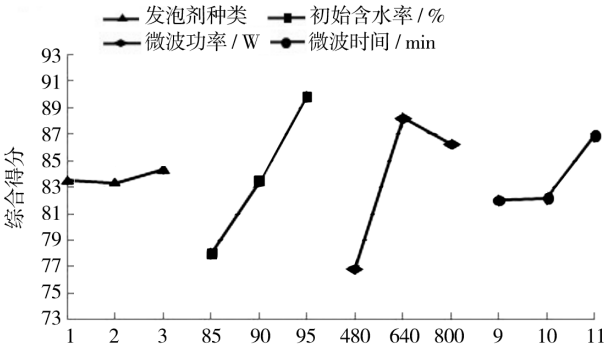


图 2 工艺配方试验的因素趋势

Fig. 2 Index diagram of formulation and process test

率过高时,材料短时间升温速度太快,此时材料的粘度不够,大量蒸发的水分子变成水蒸气冲破材料表面逸散,使材料内部产生过多的大孔,影响其力学性能。

2.4 对比试验结果分析

采用原配方制备的发泡材料作为空白试样;在 NaOH 预处理试验得出的最佳预处理条件下,采用原配方制备发泡缓冲材料作为试样 I;采用工艺配方试验所得结果制备发泡材料作为试样 II。分别测试各

组试样的平均发泡倍率、密度、弹性比能和残余应变等性能参数,对比结果见表 7。

表 7 各试样性能对比

Tab. 7 Performance comparison of samples

	发泡倍率	ρ /(g·cm ⁻³)	u /(J·cm ⁻³)	残余应变 /%
空白试样	1.456	0.111	0.174 3	12.82
试样 I	1.553	0.089	0.111 2	10.89
试样 II	1.252	0.084	0.0981	9.94

由表 7 可以看出,试样 I 的发泡倍率、密度、缓冲性能较空白试样都有较大程度的改善。这是因为 NaOH 预处理可以使纤维润胀,引起纤维的变形并破坏原有的氢键结合,使纤维产生更多新的游离羟基,使得纤维间进行自然交织的“水桥”连接,在发泡和干燥过程中,水分蒸发溢出,纤维间形成疏松稳定的网络结构。同时纤维润胀程度的提高使纤维表面变得粗糙,纤维表面孔隙打开,提高了其对助剂的可及度。因此,经过纤维预处理的发泡材料各项性能更优。

试样 II 较试样 I 和空白试样的密度、弹性比能、残余应变等性能都有较大改善,说明双重优化配方中高的初始含水率和适宜的微波加热功率更适用于材料的微波加热发泡工艺。这是因为发泡前较高的含水率使纤维之间由多层“水桥”连接,纤维处于自然柔顺状态,加热发泡时水分蒸发,原来水分子占据的空间收缩为微孔,纤维间变成自然交织状态。同时由于采用的是微波加热发泡工艺,高含水率的物料含有大量的自由水分,而水分子的介电常数和介电因子较大,吸收微波能量并产生热量的能力强,材料温度升高快,有利于发泡剂的充分分解和水分子的快速蒸发。试样 II 的发泡倍率较其他 2 组较低,这是因为发泡前物料中水分较多,占据一定的体积,因此发泡前试样体积较大,但未影响发泡材料的密度及力学性能。

3 结论

1) NaOH 预处理能较大程度上改善废纸发泡材料的发泡倍率、密度、弹性比能及残余应变等性能,3 个条件因素对其发泡缓冲包装材料性能影响的主次顺序为 NaOH 用量→处理时间→处理温度,确定最佳废纸纤维预处理条件为:NaOH 的用量为绝干纸浆

质量的 2%,且在 60℃ 恒温条件下处理 60 min。

2) 采用微波加热发泡制备植物纤维材料时,材料初始含水率和微波加热功率对发泡材料的综合性能影响较大,在对废纸纤维进行 NaOH 预处理的基础上,制备纤维发泡材料的最佳配方工艺为:湿纸浆(含水率 70%):水:甘油:碳酸氢铵:偶氮二甲酰胺:淀粉:聚乙烯醇:碳酸钙:硼砂约为 107:300:3.8:1:1:1.8:1.2:3:0.2,微波功率 640 W,微波时间 11 min。

3) 确定了一种基于 NaOH 预处理的废纸纤维发泡材料的微波发泡工艺配方,制备出的废纸纤维发泡材料性能更优。

参考文献:

- [1] 索晓红,李新平. 纤维素纤维发泡缓冲包装材料制备工艺初探[J]. 包装工程,2006,27(6):116—118.
SUO Xiao-hong, LI Xin-ping. Research on Preparation of Fiber for Foaming and Buffering Packaging Material[J]. Packing Engineering, 2006, 27(6): 116—118.
- [2] 骆光林,裴璐. 纸浆发泡缓冲材料研究[J]. 包装工程, 2007, 28(5): 46—47.
LUO Guang-lin, PEI Lu. Study on Pulp Foaming Buffer Material[J]. Packing Engineering, 2007, 28(5): 46—47.
- [3] 解林坤,强明礼,何蕊,等. 蔗渣纤维发泡缓冲包装材料研究[J]. 包装学报,2009,1(1):19—22.
XIE Lin-kun, QIANG Ming-li, HE Rui, et al. Study of Foam Cushioning Packaging Material of Bagasse Fibres [J]. Packaging Journal, 2009, 1(1): 19—22.
- [4] 苏笑海. 双发泡植物纤维包装材料的生产方法:中国, CN 00114543. 6[P]. 2000-10-25.
SU Hai-xiao. Production Method of Double-foaming Cushioning Packaging Material of Bagasse Fibres; China, CN 00114543. 6[P]. 2000-10-25.
- [5] NOGUCHI Tsutomu, MIYASHITA Mayumi, INAGAKI Yasuhito, et al. A New Recycling System for Expanded Polystyrene Using a Natural Solvent; Part I: A New Recycling Technique [J]. Packaging Technology and Science, 1988(11): 19—27.
- [6] NOGUCHI Tsutomu, MIYASHITA Mayumi, INAGAKI Yasuhito, et al. A New Recycling System for Expanded Polystyrene Using a Natural Solvent; Part II: A New Recycling Technique [J]. Packaging Technology and Science, 1988(11): 29—37.
- [7] 史钰瑛,刘晔. 缓冲包装材料发泡机理及泡体破坏因素

- 的研究[J]. 包装工程, 2007, 28(7): 31—33.
- SHI Cheng-ying, LIU Ye. Research of the Foaming Mechanism and Bubble Destruction Factors of Cushioning Foaming Material[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(7): 31—33.
- [8] 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.
- HUANG Jun-yan. Discussion on the Forming Mechanism of Plant Fiber Foaming Material and the Method of Biological Foaming Method[J]. China Packaging Industry, 2010(11): 30—32.
- [9] 杨文斌, 谢拥群. 植物纤维发泡包装材料的干燥[J]. 干燥技术与设备, 2007, 5(6): 279—283.
- YANG Wen-bin, XIE Yong-qun. Drying of Plant Fiber Foaming Packing Material[J]. Drying Technology and Equipment, 2007, 5(6): 279—283.
- [10] 李友良, 王家俊, 邵锋伟, 等. 废纸浆发泡缓冲包装材料的研究[J]. 包装工程, 2008, 29(11): 5—7.
- LI You-liang, WANG Jia-jun, SHAO Feng-wei. Study on Making Foam Cushion Packaging Material by Waste Paper Pulp[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(11): 5—7.
- [11] 陈慧文. 废纸原料制备缓冲包装材料的工艺探索[J]. 造纸科学与技术, 2008, 27(3): 43—47.
- CHEN Hui-wen. Study on the Preparation of Waste-paper Foamed Packing Material[J]. Paper Science & Technology, 2008, 27(3): 43—47.
- [12] 吕艳娜, 张运展, 欧建志, 等. 用废纸制取包装缓冲材料的研究[J]. 包装工程, 2004, 25(6): 78—79.
- LV Yan-na, ZHANG Yun-zhan, OU Jian-zhi. Study on Making Buffer Packaging Material by Wastepaper[J]. Packaging Engineering, 2004, 25(6): 78—79.
- [13] 许洁, 巨杨妮, 王文明, 等. 废纸再生缓冲发泡材料的碳足迹及碳减排[J]. 包装学报, 2011, 3(3): 11—14.
- XU Jie, JU Yang-ni, WANG Wen-ming. Carbon Footprint and Low Carbon Production Process of Waste Paper Fiber Foaming Buffer Material[J]. Packaging Journal, 2011, 3(3): 11—14.
- [14] 邹君, 李庆春. 蔗渣纤维缓冲包装材料的研制[J]. 广西轻工业, 2008(6): 37—38.
- ZOU Jun, LI Qing-chun. Bagasse Fiber Buffering and Packaging Material Development[J]. Guangxi Journal of Light Industry, 2008(6): 37—38.
- [15] 巨杨妮, 张新昌. 基于复配发泡剂的纸纤维发泡缓冲包装材料制备工艺[J]. 包装工程, 2012, 33(5): 43—46.
- JU Yang-ni, ZHANG Xin-chang. The Process of Paper Fiber Foaming Packaging Material Based on Composite Foaming Agent[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(5): 43—46.
- [16] 张惠莹, 张晶, 江兴亮, 等. NaOH 预处理对废纸纤维发泡材料性能的影响[J]. 包装学报, 2012(3). (余不详)
- ZHANG Hui-ying, ZHANG Jing, JIANG Xing-liang. Influence of the Pretreatment with NaOH on the Property of Waste Paper Fiber Foamed Material[J]. Packaging Journal, 2012(3).
- [17] 吴有炜. 试验设计与数据处理[M]. 苏州: 苏州大学, 2002.
- WU You-wei. Experiment Design and Data Processing [M]. Suzhou: Suzhou University, 2002.

(上接第 24 页)

- LV Guang-qing. Indirect Inverse Substructure Computation on Dynamic Stiffness of Discrete Coupling Unit-of-packaging[J]. Noise and Vibration Control, 2009, 27(2): 16—18.
- [6] 吕广庆, 朱勇. 离散化包装耦合体动刚度的间接逆子结构分析计算方法[J]. 包装工程, 2008, 29(10): 61—69.
- LV Guang-qing, ZHU Yong. Indirect Inverse Substructure Computation on Dynamic Stiffness of Discrete Coupling Unit-of-packaging [J]. Packaging Engineering, 2008, 29(10): 61—69.
- [7] WANG Zhi-wei, WANG Jun, ZHANG Y B, et al. Application of the Inverse Substructure Method in the Investigation of Dynamic Characteristics of Product Transport System[J]. Packaging Technology and Science (Published Online Oct. 2011).