

网络出版时间:2015-04-13 12:59

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2015.05.001

网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20150413.1259.001.html

栓皮栎软木膨化除杂工艺研究

赵泾峰¹,宋孝周¹,冯德君¹,雷亚芳¹,张英杰²

(1 西北农林科技大学 林学院,陕西 杨凌 712100;2 杨凌职业技术学院,陕西 杨凌 712100)

【摘 要】 【目的】研究软木膨化除杂的影响因素,确立较优的软木膨化除杂工艺。【方法】采用正交试验设计,对产自陕西、甘肃、湖北的栓皮栎软木的膨化除杂工艺进行优化。【结果】膨化压力、保压时间和预处理方式均是栓皮栎软木体积膨胀率和除杂率的主要影响因素,其中膨化压力的影响达到极显著水平,保压时间和预处理方式的影响达到显著或一般显著水平。在试验范围内,栓皮栎软木较优的膨化除杂工艺为膨化压力 0.9 MPa,保压时间 20 min,预处理方式为沸水蒸煮 1 h,软木厚度为 15~20 mm。【结论】在较优工艺下膨化栓皮栎软木的体积膨胀率为 40.35%,除杂率为 22.15%,可以获得良好的膨化效果。

【关键词】 栓皮栎软木;膨化;除杂;工艺优化

【中图分类号】 S792.160.8;TS65

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2015)05-0087-06

Expansion and impurity removal technology for *Quercus variabilis* cork

ZHAO Jing-feng¹, SONG Xiao-zhou¹, FENG De-jun¹, LEI Ya-fang¹, ZHANG Ying-jie²

(1 College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 Yangling Vocation & Technical College, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】 The research studied the factors influencing expansion and impurity remove from *Quercus variabilis* cork to obtain the optimal technology. 【Method】 Orthogonal experimental design was used to investigate the expansion and impurity removing technology for *Q. variabilis* cork from Shaanxi, Gansu and Hubei province. 【Result】 Extrusion pressure, pressure holding time and pretreatment method were the main factors of cork volume expansion and impurity removal rate. Effect of extrusion pressure was extremely significant while effect of holding time and pretreatment method were significant or generally significant. In the experimental range, the optimal conditions were: expansion pressure 0.9 MPa, holding time 20 min, pretreatment with boiling water for 1 h, and thickness 15—20 mm. 【Conclusion】 Under the optimal conditions, the volume expansion rate was 40.35% and impurity removal rate was 22.15%.

Key words: *Quercus variabilis* cork; expansion; impurity removal; technology optimization

软木来源于栓皮树发达的树皮,是一种珍稀资源。软木具有的优良特性促使人们对其利用向着附加值高的方向发展,特别是近几年兴起的软木地板、软木墙饰等高档软木装饰制品,尤其受到消费者的

青睐,蕴藏着很大的市场潜力^[1-2]。我国栓皮栎软木以初生软木为主,质地硬、色泽深,且含有大量杂质,严重影响了软木的加工利用和产品质量,因此软木在加工利用前必须先进行除杂处理,然后再进一步

【收稿日期】 2013-12-17

【基金项目】 陕西省科技计划项目(2011K01-27);国家林业局林业公益性行业科研专项(201004011)

【作者简介】 赵泾峰(1968—),女,陕西泾阳人,副教授,博士,主要从事软木性能及其加工利用研究。

E-mail: zhaojf928@nwsuaf.edu.cn

【通信作者】 冯德君(1968—),男,甘肃靖远人,副教授,主要从事木材及木材功能性改良研究。E-mail: mcyjsfdj@nwsuaf.edu.cn

制成各种软木制品^[3-5]。传统的热水蒸煮除杂法仅能除去部分溶于水的杂质,对软木层中的夹砂和夹杂不能有效去除;国内外普遍采用的先粉碎再风选、筛选的方法,虽除杂效果较好,但降低了软木的利用率和装饰价值;高温膨化除杂法仅能除去软木表面的部分杂质,除杂效率低,且使软木表面弹性降低,颜色变深,部分地改变了软木的性能,影响了软木的用途^[6-9]。因此,目前的软木除杂方法效果并不理想。为了达到软木膨化除杂的目的,还应探索软木膨化除杂工艺以提高软木的均质性和弹性,改善软木性能。

植物纤维蒸汽爆破法是利用高温高压热蒸汽作用于纤维原料,并通过瞬间爆破过程实现纤维分离,该方法用于植物秸秆的膨化加工,拓展了植物纤维的利用空间^[10-11]。Silva Carvalho^[12]利用这一原理在密闭消毒容器中加入化学物质进行了栓皮櫟软木的热化学膨胀试验,获得了较好的体积膨胀效果,但该研究并未涉及软木的除杂率。软木来源于树皮,又不同于一般的纤维材料,其细胞为特殊的密闭结构,细胞壁无纹孔,无细胞间隙,胞间无毛细管作用,具有特殊的木栓脂成分,使软木不透气、不透水,在自然状态下的吸湿性很小,软木的含水率较低,其导热性也很差^[13-16]。目前,利用蒸汽爆破除去软木杂质的汽爆膨化方法,以及针对栓皮櫟软木的膨化除杂尚未有报道。本研究以国产栓皮櫟软木为对象,深入分析和研究其膨化除杂工艺的影响因素,旨在改善栓皮櫟软木原材料的性能,提高产品的附加值,扩大软木的应用范围,为国产栓皮櫟软木的加工利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

1.1.1 材 料 栓皮櫟软木(*Quercus variabilis*): 刨去内皮和外层黑皮的软木板,含水率 6%~10%,密度 0.2~0.36 g/cm³,分别产自陕西佛坪县、甘肃

天水市和湖北郧县,由陕西万林有限公司和西安汉鑫科技股份有限公司提供。

1.1.2 试 剂 无水甲醇(分析纯),西安化学试剂厂产品,配成 V(甲醇):V(水)=1:3 的甲醇水溶液备用。

1.2 仪器设备

电热蒸汽膨化处理设备,运行电压为 380 V,最大运行功率为 72 kW,额定工作压力 1.6 MPa,陕西东仪联合电气有限公司制造;另有 DHG-9123A 电热鼓风干燥箱和 JA2003 分析电子天平(1/1 000)等。

1.3 方 法

1.3.1 检验指标的确定 根据软木膨化的目的,采用体积膨胀率和除杂率作为软木膨化处理效果的检验指标^[7-9]。体积膨胀率是指软木在膨化前后的体积增大百分比;除杂率是在不破坏软木组分的前提下脱落杂质的质量分数。处理前后的试件均以烘干质量计。

1.3.2 试验方案的确定 综合影响软木膨化效果的因素,选择膨化压力、保压时间、预处理方式和软木厚度 4 个因素作为试验因素。通过单因素预试验,参考文献[9,17]的工艺参数并考虑软木膨化的目的等确定试验方案。根据预试验的结果,试验方案选择正交试验,每个因素取 3 个水平,按照正交表 L₂₇(3¹³)安排试验^[18],各因素水平见表 1。考虑企业实际生产软木墙饰的原料规格,将试件制成长度×宽度=40 mm×40 mm 的软木块。

1.3.3 试验的实施 软木膨化除杂试验工艺参考蒸汽爆破制浆技术^[10-11]建立,将经过预处理的软木块经饱和水蒸汽加热到一定压力后,再保压一段时间,处理结束后迅速释放压力(3 s 内),完成软木膨化除杂过程。试验的工艺流程如图 1 所示。将经过蒸煮预处理的软木块,放入压力爆破罐中,由蒸汽锅炉通入饱和蒸汽于压力爆破罐,并保压一段时间后迅速卸压,完成软木的汽爆膨化过程。

表 1 栓皮櫟软木膨化除杂工艺正交优化试验的因素水平表

因素 Factor				
水平 Level	A 膨化压力/MPa Expansion pressure	B 保压时间/min Pressure holding time	C 预处理方式 Pretreatment	D 软木厚度/mm Thickness
1	0.7	10	未蒸煮 Uncooked	10
2	0.8	15	甲醇水溶液浸泡 24 h Methanol water solution 24 h	10~15
3	0.9	20	沸水蒸煮 1 h Boiling water 1 h	15~20

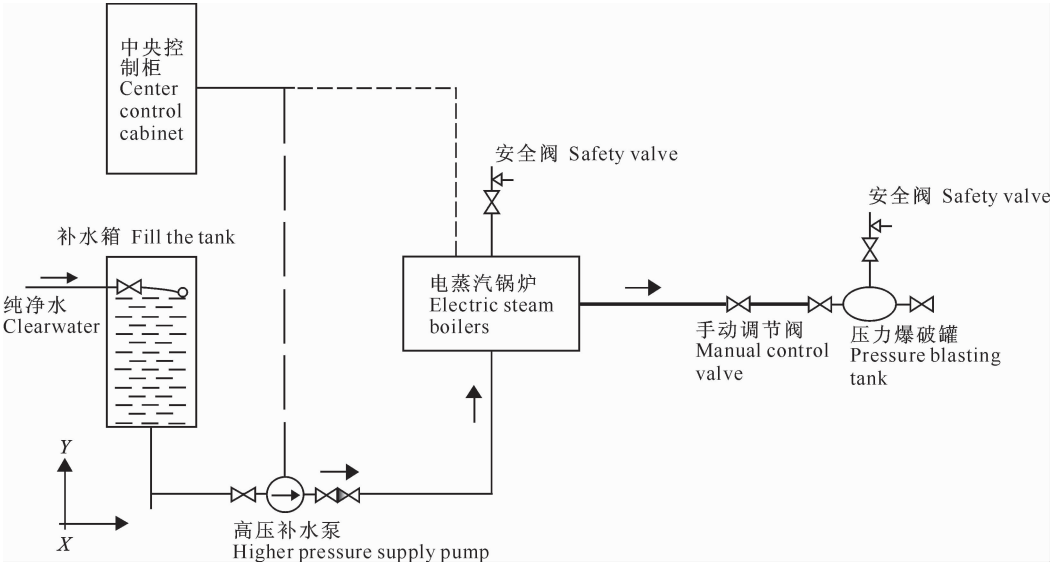


图 1 软木汽爆膨化除杂工艺流程图

Fig.1 Flow chart of cork expansion and impurity removal

由正交试验设计,进行了 27 次试验。试验处理中每组试件准备 60 个,从其中选取有效试件 45 个,试验结果取平均值。

2 结果与分析

2.1 栓皮栎软木体积膨胀率的影响因素

栓皮栎软木膨化除杂工艺的正交试验结果见表 2,对软木体积膨胀率的多因素方差分析结果见表 3。从表 3 可以看出,在试验范围内,影响软木体积

膨胀率的主要因素是膨化压力。膨化压力从 0.7 MPa 升高到 0.8 MPa,软木膨化的体积膨胀率随压力的升高平均减少 14.93%;当膨化压力从 0.8 MPa 升高到 0.9 MPa,体积膨胀率随压力的升高平均增加了 23.52%,增幅较大。软木细胞的膨胀主要是借助卸压时软木内外形成的压力差使水分汽化而膨胀,从而使软木体积膨胀增大。因此适宜的膨化压力为 0.9 MPa。

表 2 栓皮栎软木膨化除杂工艺 L₂₇(3¹³)正交试验设计及其计算结果

Table 2 Orthogonal experimental design and results for expansion and impurity removal process of <i>Q. variabilis</i> cork															
试验号 Sample No.	列号 Row No.												检验指标 Test indicator		
	A	B	A×B		C	A×C		B×C	D	空列 Empty column	B×C	空列 Empty column	体积膨胀率/% Volume expansion	除杂率/% Impurity rate	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			13
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	27.12	18.25
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	25.78	16.35
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	42.81	21.24
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3	35.75	19.29
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1	32.19	16.42
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2	39.16	18.36
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2	32.23	21.86
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3	42.87	19.83
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1	37.82	22.89
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	27.19	11.65
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1	28.41	17.29
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2	31.92	23.36
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2	25.15	19.28
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3	33.29	19.38
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1	27.16	15.35
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1	25.18	16.42
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2	35.84	22.13
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	34.46	20.25

续表 2 Continued table 2

试验号 Sample No.	列号 Row No.												检验指标 Test indicator		
	A	B	A×B		C	A×C		B×C	D	空列 Empty column	B×C	空列 Empty column	体积膨胀率/% Volume expansion	除杂率/% Impurity rate	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			13
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2	30.25	19.12
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3	34.47	22.26
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1	37.45	17.76
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1	35.95	20.29
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	39.48	21.48
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3	34.21	24.93
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3	39.84	22.18
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1	42.53	24.01
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2	37.59	22.24

表 3 栓皮栎软木体积膨胀率影响因素的方差分析

Table 3 Variance analysis on volume expansion of *Q. variabilis* cork

方差来源 Sources of variation	偏差平方和 Deviation square sum	自由度 Degree of freedom	方差 Mean square	F 值 F value	显著性 Significance
A	239.59	2	119.80	10.62	☆☆☆
B	104.06	2	52.03	4.61	☆☆
A×B	18.52	4	4.63	0.41	—
C	122.19	2	61.09	5.10	☆☆
A×C	83.00	4	20.75	1.84	—
B×C	132.91	4	33.23	2.86	—
误差 Error	90.25	8	11.28		
总和 Total	790.52	26			

注： $F_{0.01}(2,8)=8.65$ ， $F_{0.05}(2,8)=4.46$ ， $F_{0.10}(2,8)=3.11$ 。当 $F>F_{0.01}$ 时，用☆☆☆表示达极显著水平；当 $F_{0.05}<F\leq F_{0.01}$ 时，用☆☆表示达显著水平； $F\leq F_{0.10}$ 时，用“—”表示不显著水平。

Note: $F_{0.01}(2,8)=8.65$ ， $F_{0.05}(2,8)=4.46$ ， $F_{0.10}(2,8)=3.11$ 。“☆☆☆” indicates extremely significant ($F>F_{0.01}$)；“☆☆” indicates significant ($F_{0.05}<F\leq F_{0.01}$)；“—” indicates insignificant ($F\leq F_{0.10}$)。

保压时间是影响软木体积膨胀率的次要因素。保压时间从 10 min 延长到 20 min，软木的体积膨胀率平均增加了 15.05%。软木的渗透性和导热性均较差，热量和水分进入软木内部比较困难。适当延长保压时间，有助于热量和水分进入，并使水分获得足够的热量而充分汽化，从而使软木细胞也得到充分膨胀，软木的体积膨胀率也就越大。因此适宜的保压时间为 20 min。

预处理方式也是影响软木体积膨胀率的次要因素。未预处理的软木体积膨胀率平均为 30.96%，经沸水蒸煮 1 h 预处理后再膨化的软木体积膨胀率平均为 35.84%，较未预处理软木的体积膨胀率增加了 15.76%。因此可通过在膨化前对软木进行预处理以增加软木中的水分，利用水分的汽化达到软木膨化的目的。由此可知，适宜的预处理方式为沸水蒸煮 1 h。

软木厚度及各因素的交互作用对软木体积膨胀率的影响都很小。综合分析确定软木体积膨胀率的

较佳工艺条件为：厚度 10 mm 的软木块，经沸水蒸煮 1 h 后在 0.9 MPa 压力下保压处理 20 min。

2.2 栓皮栎软木除杂率的影响因素

对软木除杂率进行多因素方差分析，结果见表 4。从表 4 可以看出，在试验范围内，影响软木除杂率的主要因素是膨化压力。当膨化压力从 0.7 MPa 升高到 0.8 MPa 时，软木膨化的除杂率随膨化压力的升高平均减少 5.38%；当膨化压力从 0.8 MPa 升高到 0.9 MPa 时，除杂率随膨化压力的升高平均增加 17.66%，增幅较大。因此适宜的膨化压力为 0.9 MPa。

保压时间是影响软木除杂率的次要因素。保压时间从 10 min 延长到 20 min，软木除杂率平均增加 14.66%。预处理方式也是影响软木除杂率的次要因素，未预处理的软木除杂率平均为 18.7%，经沸水蒸煮 1 h 预处理后再膨化的软木除杂率平均为 20.71%，较未预处理的软木除杂率增加了 10.75%。软木的厚度及各因素的交互作用对软木除杂率的影

响都很小。因此适宜的保压时间为 20 min,适宜的 预处理方式为沸水蒸煮 1 h。

表 4 栓皮栎软木除杂率影响因素的方差分析

Table 4 Variance analysis on impurity removal rate of *Q. variabilis* cork

方差来源 Sources of variation	偏差平方和 Deviation square sum	自由度 Degree of freedom	方差 Mean square	F 值 F value	显著性 Significance
A	60.78	2	30.39	11.30	☆☆☆
B	45.01	2	22.51	8.37	☆☆
A×B	9.28	4	2.32	0.86	—
C	24.60	2	12.30	4.57	☆
A×C	30.70	4	7.67	2.85	—
B×C	16.55	4	4.14	1.54	—
D	16.31	2	8.16	3.03	—
误差 Error	16.12	6	2.69		
总和 Total	203.23	26			

注： $F_{0.01}(2,6)=10.92$ ， $F_{0.05}(2,6)=5.14$ ， $F_{0.10}(2,6)=3.46$ 。当 $F>F_{0.01}$ 时，用☆☆☆表示影响达极显著水平；当 $F_{0.05}<F\leq F_{0.01}$ 时，用☆☆表示影响达显著水平；当 $F_{0.10}<F\leq F_{0.05}$ 时，用☆表示影响为一般显著水平； $F\leq F_{0.10}$ 时，用“—”表示无显著影响。
Note： $F_{0.01}(2,6)=10.92$ ， $F_{0.05}(2,6)=5.14$ ， $F_{0.10}(2,6)=3.46$ 。“☆☆☆” indicates extremely significant ($F>F_{0.01}$)；“☆☆” indicates significant ($F_{0.05}<F\leq F_{0.01}$)；“☆” indicates generally significant ($F_{0.10}<F\leq F_{0.05}$)；— indicates no difference ($F\leq F_{0.10}$)。

综合分析得到软木除杂率的较佳工艺条件为：厚度 15~20 mm 的软木块，经沸水蒸煮 1 h 后在 0.9 MPa 压力下保压处理 20 min。

从上述分析可以看出，当膨化压力从 0.7 MPa 上升到 0.9 MPa 时，软木体积膨胀率、除杂率均先降低后升高，在 0.8 MPa 时达到最低，其原因可能与 0.8 MPa 时的卸压速度较慢有关。因为软木细胞的膨胀主要是借助瞬间卸压时在软木内外形成的压力差，如果卸压速度较慢，软木内外在瞬间未能形成较大的压力差，则膨胀效果较差，因此 0.8 MPa 的卸压速度如果低于 0.7 MPa，有可能形成较小的压力差，降低了体积膨胀率和除杂率，影响了膨化效果。

各试验因素对软木体积膨胀率与除杂率的影响是一致的。一般情况下，软木的体积膨胀率越大，杂质脱落就越容易，除杂率也就越大。同时综合试验因素的安全性和试验成本，确定软木高温膨化除杂的较佳工艺条件为：厚度 15~20 mm 的软木块，经沸水蒸煮 1 h 后在 0.9 MPa 压力下保压处理 20 min。经试验验证，在该较优工艺下软木的除杂率为 22.15%，体积膨胀率为 40.35%，均高于试验的平均值，膨化除杂效果良好。

3 结 论

1) 影响栓皮栎软木体积膨胀率和除杂率的主要因素是膨化压力。当膨化压力升高到一定值后，膨化压力越高，在瞬间卸压时形成的压力差越大，水分汽化越充分，体积膨胀就越大，软木体积膨胀率和除杂率都会有大幅的提高。但为了试验的可操作性

和设备的安全性，适宜的膨化压力为 0.9 MPa。

2) 保压时间和预处理方式是影响栓皮栎软木体积膨胀率和除杂率的次要因素。软木的含水率较低，渗透性和导热性均较差，进行预处理可以增加软木的水分含量；适当延长保压时间，有助于热量和水分的进入，并获得足够的热量而充分汽化，从而使软木细胞得到充分膨胀，软木的体积膨胀率和除杂率也就越大。但蒸煮和保压时间不宜过长，以免使软木表面颜色加深，适宜的预处理方式为沸水蒸煮 1 h，保压 20 min。软木的厚度对软木体积膨胀率和除杂率的影响较小。

3) 综合考虑试验目的，栓皮栎软木膨化除杂的较佳工艺为：厚度 15~20 mm 的软木块，经沸水蒸煮 1 h 后在 0.9 MPa 压力下保压处理 20 min。该工艺是在有限的试验范围内对软木原料改性处理的初步试验结果，结合生产实际还应进一步探索更好的工艺。

4) 对于质量较差的国产栓皮栎软木，通过膨化除杂进行性能改良，生产高科技含量和高附加值的软木制品蕴育着非常大的市场机遇，目前的研究才刚刚开始，需要大力开展栓皮栎软木原料改性方面的基础理论研究，即充分利用先进研究手段，通过对软木物理化学特性、杂质性能、膨化机理等的更深入研究，为栓皮栎软木膨化除杂的工业化生产和性能提高提供技术参数和理论依据。

[参考文献]

[1] 罗社宏. 探索软木行业发展之路 [J]. 陕西林业, 2008(6): 14-15.

Luo S H. Explor the cork industry development path [J]. Shaanxi Forest, 2008(6):14-15. (in Chinese)

[2] 甘启蒙,吕 宏. 我国软木工业概况 [J]. 林业机械与木工设备, 2009, 37(3):10-12.

Gan Q M, Lü H. Development status of cork industry in China [J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2009, 37(3): 10-12. (in Chinese)

[3] 罗伟祥,张文辉,黄一钊,等. 中国栓皮栎 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2009:255-276.

Luo W X, Zhang W H, Huang Y Z, et al. Chinese cork oak [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2009:255-276. (in Chinese)

[4] 杜子伟,王域民,王芝兰,等. LY/T 1317—99 栓皮 [S]. 北京: 中华人民共和国林业部, 1999.

Du Z W, Wang Y M, Wang Z L, et al. LY/T 1317—99 Cork [S]. Beijing, Ministry of Forestry of the People’s Republic of China, 1999. (in Chinese)

[5] Rudnitskaya A, Delgadillo I, Rocha S M, et al. Quality evaluation of cork from *Quercus suber* L. by the electronic tongue [J]. Analytica Chimica Acta, 2006, 563:315-318.

[6] 杜子伟. 软木制品及其应用 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1989:27-31.

Du Z W. Cork and its application [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1989:27-31. (in Chinese)

[7] 赵泾峰. 栓皮栎软木膨化除杂工艺与机理研究 [D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2012.

Zhao J F. Research expansion impurities removing technology and mechanisms of *Quercus variabilis* cork [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2012. (in Chinese)

[8] 马召亮,雷亚芳,赵泾峰. 软木膨化处理现状与发展趋势 [J]. 西北林学院学报, 2010, 25(1):154-156.

Ma Z L, Lei Y F, Zhao J F. Current situations and development trend of the expansion of cork [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2010, 25(1):154-156. (in Chinese)

[9] 赵泾峰,雷亚芳,马召亮. 软木的膨化处理工艺研究 [J]. 木材工业, 2009, 23(6):31-33.

Zhao J F, Lei Y F, Ma Z L. A study on expansion process of cork [J]. China Wood Industry, 2009, 23(6): 31-33. (in Chinese)

[10] 叶 红,李家璜,陈 彪,等. 蒸爆技术及其在植物纤维素资源中的应用简介 [J]. 化工生产与技术, 2001, 8(1):19-20.

Ye H, Li J H, Chen B, et al. Steam explosion pretreatment and its application of lignocellulose [J]. Chemical Production and Technology, 2001, 8(1):19-20. (in Chinese)

[11] 宋先亮,蒋建新. 蒸汽爆破法制浆的研究进展 [J]. 湖南造纸, 2007(4):17-19.

Song X L, Jiang J X. Progress of steam explosion pulping [J]. Hunan Papermaking, 2007(4):17-19. (in Chinese)

[12] Silva Carvalho J. Thermochemical process for the expansion of cork bark Portugal, PT101215 [P]. 1993-10-29.

[13] Pereira H, Emilia R M, Fortes M A. The cellular structure of cork from *Quercus suber* L. [J]. Iawa Bulletinns, 1987, 8(3): 213-217.

[14] Silva S P, Sabino M A, Fernandes E M, et al. Cork: Properties, capabilities and applications [J]. International Materials Reviews, 2005, 50(6):345-365.

[15] 刘艳贞,雷亚芳,周 伟,等. 欧洲栓皮栎软木构造与物理性质研究进展 [J]. 西北林学院学报, 2007, 22(6):144-147.

Liu Y Z, Lei Y F, Zhou W, et al. Research and development of the structure and physical properties of cork from *Quercus suber* L. [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2007, 22(6):144-147. (in Chinese)

[16] 雷亚芳,刘艳贞,周 伟,等. 栓皮栎软木的微观构造 [J]. 林业科学, 2009, 45(1):167-170.

Lei Y F, Liu Y Z, Zhou W, et al. The microstructure of cork from *Quercus variabilis* [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2009, 45(1):167-170. (in Chinese)

[17] Pereira H. The thermochemical degradation of cork [J]. Wood Sci Technol, 1992, 26(4):259-269.

[18] 任露泉. 试验优化设计与分析 [M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2003:246-278.

Ren L Q. Experimental design and analysis optimization [M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2003: 246-278. (in Chinese)