

讨论与建议

欧洲木材热处理技术的研究及应用

丁涛¹, 蔡家斌¹, 耿君²

(1. 南京林业大学材料科学与工程学院, 江苏南京 210037; 2. 河南聆海整体家具有限公司, 河南鹤壁 458000)

摘要: 介绍欧洲主要木材热处理技术及其特点。以 Thermowood 为代表的常压热处理技术, 是目前欧洲的主流木材热处理技术, 工艺相对简单, 处理装置投资少, 种类多, 产能高; 加压热处理技术具有周期短, 温度低的优点; 负压热处理则可以保证产品质量均匀, 设备维护容易; 混合式热处理可通过设备组合和工艺设计优化, 以较小容积的设备实现较高产能。

关键词: 欧洲; 木材热处理; 技术; Thermowood

中图分类号: S781.7 文献标识码: B 文章编号: 1001-8654(2015)05-0029-05

Research and Application of Wood Thermal Modification Technologies in Europe

DING Tao¹, CAI Jia-bin¹, GENG Jun²

(1. College of Materials Science and Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China;

2. Henan Linkhigh Furniture Co., Ltd., Hebi 458000, Henan, China)

Abstract: This paper analyzed wood thermal modification technologies in Europe. Atmospheric steam treating technology is mainly used and typically represented by Thermowood technology with features such as relatively simple process, low investment cost, diverse equipment supply and high unit output. Pressurized steam process has the advantage of shorter treating time and lower treating temperature. Vacuum process can guarantee uniform product quality with easy equipment maintenance. For the combined process, small-volume equipment can achieve high production capacity by optimal equipment combination and process design.

Key words: Europe; wood thermal modification; technology; Thermowood

木材热处理是近年来快速发展的一种木材改性技术。在木材热处理技术的理论研究和生产应用领域, 欧洲一直处于领先地位。2011 年欧洲热处理木材的产量为 25 万 m³, 占世界热处理木材总产量的 70%^[1]; 2012 年的产量进一步增加至 31.5 万 m³, 2013 年的产量达 34.9 万 m³^[2]。

根据处理环境的压力水平, 木材热处理技术分为常压、加压、负压和混合热处理 4 大类。在前文总结欧洲热处理木材产业和标准化概况的基础上^[3], 本文分别阐述各类木材热处理技术的特点, 旨在为国内相关科研、教学及企业人员提供参考。

1 热处理技术概览

欧洲木材热处理技术种类多样, 已获得产业化应用的技术主要有 12 种(表 1), 且每年仍不断有新的热处理技术在向产业化推进。

收稿日期: 2014-08-07; 修改日期: 2015-07-10

基金项目: 引进国际先进农业科学技术计划(“948”计划)项目“速生木材热压-高温热处理关键技术引进”(2011-4-12); 江苏省高校优势学科建设工程资助项目。

作者简介: 丁涛(1977—), 男, 南京林业大学副教授。

表 1 欧洲木材热处理主要技术

Tab. 1 Main thermally modified timber technologies in Europe

技术名称	提供商	国家	处理 介质	处理温 度/℃	处理时 间/h
Thermowood	Valutec, Jartek	芬兰	常压蒸汽	185~215	36~72
Plato	Plato Wood BV	荷兰	水/饱和 蒸汽 ^a	150~180 ^a	84~108
			过热蒸汽 /氮气 ^b	150~190 ^b	
BESSON	Dumoulin Wood	法国	-	200	20~25
Perdure	PCI Industries	加拿大/ 法国	常压 蒸汽	200~240	12~18
WTT	WTT A/S	丹麦	加压 蒸汽	140~210	12~24
MENZ OHT	Menz Holz	德国	菜籽油	210~220	20~40
Moldrup	IWT	丹麦	加压 蒸汽	180~210	12~30
ATK	Baschild	意大利	常压 蒸汽	160~230	24~72
TERMO VUOTO	WDE Maspell	意大利	真空	190~230	-
Retification	Retiwood	法国	氮气	210~240	>24
Thermoholz	Mirako GmbH	奥地利	常压 蒸汽	160~220	20~80
Vacu	Timura	德国	真空	170~230	-

注 a、b、分别为 Plato 技术第 1、2 阶段的处理介质与温度。

处理介质是木材热处理技术的特征性工艺条件,对木材热处理工艺参数和产品性能具有重要影响。表 1 所列处理温度的波动范围为:最低 140~210 ℃、最高 180~240 ℃,其差异即由热处理介质的不同而引起。木材热处理温度总体上是以 200 ℃为中心进行波动,如果偏离太远,对产品性能不利。

水蒸气是目前普遍采用的木材热处理介质,可以过热蒸汽或饱和蒸汽两种形式供应。前者用于常压处理环境(开放系统),而后者则用于构建加压处理环境(密封系统)。表 1 中有 6 种热处理技术以蒸汽为唯一处理介质,1 种以其为阶段性处理介质,可见其应用广泛性。

此外,氮气、菜籽油、水和负压空气(真空)也可以用作木材热处理介质,形成惰性处理环境。

2 常用木材热处理技术

2.1 常压木材热处理技术

多数木材热处理在常压条件下完成,典型代表为 Thermowood 技术。常用的加热介质为常压蒸汽,起

到加热木材、降低处理环境的氧气含量,以及在处理末了阶段对木材进行调湿的功能。此外,Perdure, ATK 和 Thermoholz 木材热处理技术也是常压蒸汽下处理木材。常压蒸汽成本低且易处理,排放后无需收集处理,因此被普遍应用。

另一种用来构建常压热处理环境的气体是氮气,主要代表为法国 Retification 热处理技术(图 1)。其产业化应用始于 1995 年,Retiwood 公司是主要供应商,年产能约 10 000 m³。

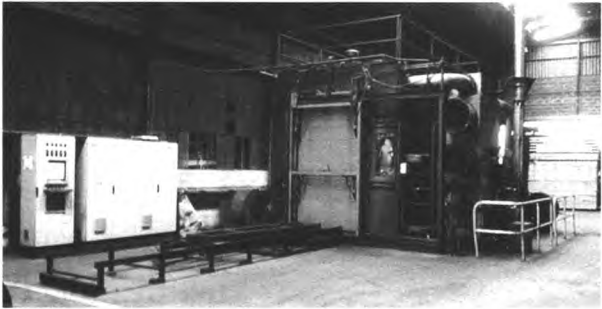


图 1 Retification 热处理装置

Fig. 1 Retification thermal modification equipment

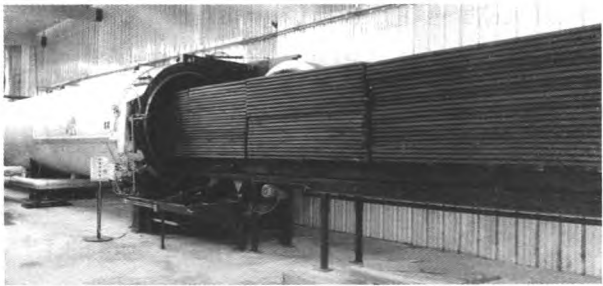
德国 Menz Holz 公司采用菜籽油为介质,其优点是木材受热更加均匀,处理温度的控制也更精确。菜籽油的沸点远高于水,因而处理环境可保持常压水平。但木材与油在处理过程中会发生相互作用,热油在使用寿命终结后存在收集和处理的问

2.2 加压木材热处理技术

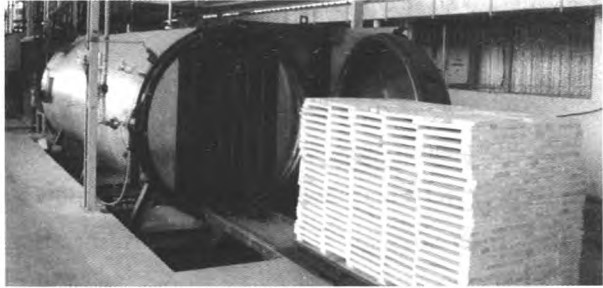
加压条件下木材热处理的探索始于 20 世纪 50 年代。研究发现,压力对处理材性能的影响显著,在封闭系统中木材的热解程度更高^[6]。近年来,该技术在学术界和产业界都获得了越来越多的关注,丹麦 WTT 和 IWT 等公司已实现了产业化应用(图 2)。

典型的加压热处理环境是由蒸汽实现,也有采用热水为介质。在相同温度下,蒸汽压力越高,环境湿度越大,对木材物理和化学变化的影响越大。一方面,高湿环境可在较低的温度下,使木材细胞壁中的无定形化合物发生软化,增加其流动性与反应活性^[7];另一方面,密封的加压环境,使木材的酸性热解产物聚集在处理装置中,作为催化剂可加速木材的热解反应。

要实现同样的改性效果,加压蒸汽热处理可在较低的温度下处理,处理能耗降低,处理周期缩短。此外,研究表明,高湿环境还提高了处理材的终了含水率,有助于缩短处理后的调湿时间^[8-9]。



WTT 设备



IWT 设备

图 2 加压蒸汽热处理装置

Fig. 2 Thermal modification equipment using pressurized steam as heating medium

表 1 数据显示,采用加压蒸汽环境的 WTT 和 Moldup(IWT)工艺,其处理周期明显短于其他处理工艺,理论分析的结论与产业实践结果一致。然而,由于系统密封性的要求,处理装置一般只能采用罐式结构,其容积大多不足 20 m³,而常压系统的处理窑容积可高达 150 m³。要达到相同产能,加压系统的投资成本偏高,且运行中还需考虑更多安全性问题。

2.3 负压空气(真空)热处理

除了提高处理环境压力,也可以通过抽真空的方式形成负压环境,进行木材热处理。该工艺的压力范围一般为 0.015~0.035 MPa,加热方式有对流或接触传导两种。

负压热处理系统的特点是无需额外的保护气,只需将部分空气抽出装置,即可产生惰性环境;木材在热处理过程中挥发出的有机气体,如甲酸和乙酸,也被排出装置,减少对木材热解的催化作用,使得热处理条件更加温和,并有助于减少对处理装置的腐蚀,消除处理材的气味。

一般认为,负压系统的能耗水平较低,这是因为装置内部所需的气流循环量较低甚至为零,且由于处理窑的排气量大大减少,系统的废气处理成本与能耗也显著降低。如果木材干燥也在同样的装置内进行,真空干燥的速度快于常规干燥,干燥周期缩短。

负压木材热处理技术目前已获得产业化推广,如意大利达意(WDE)公司的 Termovuoto 热处理技术和德国 Timura 公司的 Vacu 技术。

Termovuoto 通过对流对木材进行加热(图 3),而 Vacu 则采用热板对木材进行接触式加热(图 4)。相比对流加热,接触式加热的效率更高,板材表面温度分布更均匀,而且金属热板的压力也抑制了板材的变形,但是处理窑的有效容积会因此而减少。

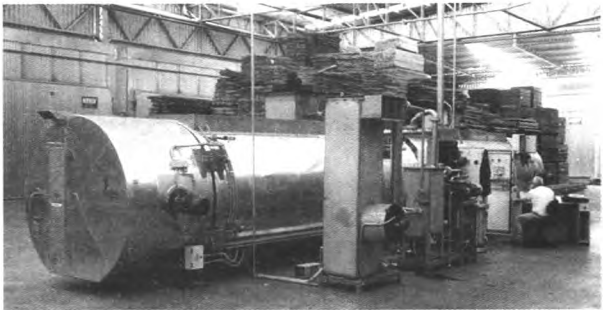
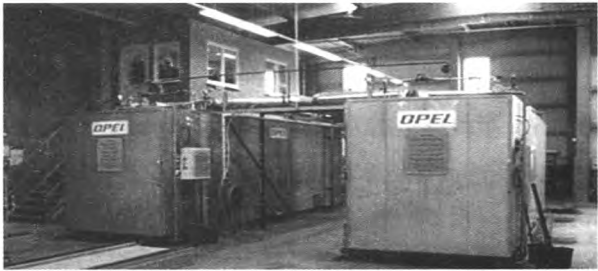


图 3 WDE 公司的 Termovuoto 热处理装置

Fig. 3 Termovuoto thermal modification equipment provided by WDE



加热板



热处理窑

图 4 Timura 公司的 Vacu 热处理装置

Fig. 4 Vacu thermal modification equipment running at Timura

和加压热处理类似,负压条件也限制了热处理装置的容积。另外,由于对热解有促进作用的水分和有机挥发物都被抽到窑外,负压热处理的温度略高于其他热处理技术的温度。

2.4 混合式热处理

混合式木材热处理技术是交替使用不同压力环境对木材进行处理。目前此类技术唯一实现产业化的荷兰的 Plato 工厂,建于 2000 年,位于荷兰 Arnhem,整套生产线包括用于 2 个 20 m³ 的水热处理装置,1 个 80 m³ 的干热处理装置,另外配套 8 台 160 m³ 的常规干燥窑。其产能为 35 000 m³/a^[4],是欧洲热处理木材产能最大的 5 个企业之一^[2]。

Plato 工艺包含两次热处理,共有 5 个步骤:

1) 木材预干燥。湿材可直接水热处理。但试验表明,将木材预先干燥至含水率 18% 左右,可显著提高处理材的质量。

2) 水热处理。预干后的木材被装载到不锈钢水热处理罐中,以水或饱和蒸汽为加热介质,在 150~180 °C 下进行热处理。水环境可使升温控制精度更高,窑内温度分布更均匀,同时避免了冷却阶段木材的干燥。然而,用该工艺处理阔叶材和低渗透性针叶材时效果不理想。如果采用饱和蒸汽对预干后的板材进行处理,则可以获得很好的表现质量。

3) 中间干燥。木材在水热处理后干燥,可在常规木材干燥窑中完成,终含水率设定为 8%~9%。

4) 干热处理。在第 2 个热处理阶段,窑干材被置于常压蒸汽或氮气环境中,热处理温度为 150~190 °C。

5) 木材调湿。将接近绝干状态的热处理木材,再次装入常规干燥窑,用饱和蒸汽进行调湿处理,将含水率升至 4%~6%。

研究表明,每个阶段对处理材的性能均有不同影响^[10-11]。半纤维素的水解主要发生在水热处理阶段,酸性、加压的高湿或水环境有利于该反应的进行,减少木材中游离羟基的数量,改善木材的尺寸稳定性。

在干热处理阶段,半纤维素的降解有限,主要是木素的缩合反应,形成交联的网状结构,使木材的尺寸稳定性进一步增强。

由于水热环境对半纤维素水解的促进作用,Plato 工艺比其他工艺的热处理温度相对较低。此外,由于处理过程分为两个阶段,每个阶段的处理时间大大缩短,其中第一阶段为 4~5 h,第二阶段为 14~16 h^[12]。通过设备组合和工艺设计优化,Plato 技术可以用容积较小的设备,实现较高的生产能力。

以 Arnhem 工厂为例,2 台 20 m³ 水热处理装置和 1 台 80 m³ 干热处理装置,年产量可超过 20 000 m³,理论产能高达 35 000 m³/a。

然而,两段式工艺增加了系统的复杂性和设备投资。Arnhem 工厂兴建时的投资高达 1 350 万欧元^[4]。相比之下,Stora Enso 在芬兰 Kotka 的工厂,采用 Thermowood 技术,仅投资 400 万欧元,即实现了 20 000 m³ 的年产能^[13-14]。

3 Thermowood 技术案例介绍

芬兰的 Thermowood 是目前产业化程度最完善的热处理技术,Thermowood 是国际 Thermowood 协会 (International Thermowood Association, ITWA) 于 2000 年注册的商标名,目前基于 Thermowood 技术的热处理产品,在欧洲的市场份额高达 72%~76%^[1]。

3.1 Thermowood 工艺

采用常压过热蒸汽为处理介质,主要以欧洲赤松 (*Pinus sylvestris*)、欧洲云杉 (*Picea abies*)、垂枝桦 (*Betula pendula*) 和欧洲山杨 (*Populus tremula*) 为处理对象,工艺过程由 3 个阶段构成:

1) 干燥阶段,干燥温度最高 130 °C,干燥时间根据木材初含水率进行调整;

2) 加热阶段,在 185~215 °C 条件下加热处理 2~3 h。具体温度取决于木材树种与产品用途;

3) 冷却与调湿阶段,喷雾化水降低窑内温度,将木材含水率控制在 4%~7%^[4]。

3.2 Thermowood 系统构成

1) 热油锅炉 燃料采用生物质燃料、天然气、燃油或电,产生的热能用于加热处理窑和木材,也用于产生蒸汽,作为处理过程中的保护气。

2) 处理窑 大多为不锈钢壳体,可经受热处理的高温,并抵御在木材处理过程中释放出来的酸性气体;窑内配备有风机,以保证温度分布的均匀性。

3) 装卸载装置 板材置于轨道式小车上,采用叉车进行装卸载。

4) 控制系统 根据工艺要求及材种变化,调节处理基准。

5) 排气处理装置 通过燃烧法净化处理排气,必要时可加装一套余热回收系统。

3.3 设备供应商

ITWA 会员企业中有 2 家设备供应商: Jartek Oy 和 Valutec Oy。

Jartek Oy 的 Thermowood 业务由其子公司 Tekmaheat Oy 负责, 提供 3 种型号 Tekmaheat 热处理窑(图 5)^[5]。

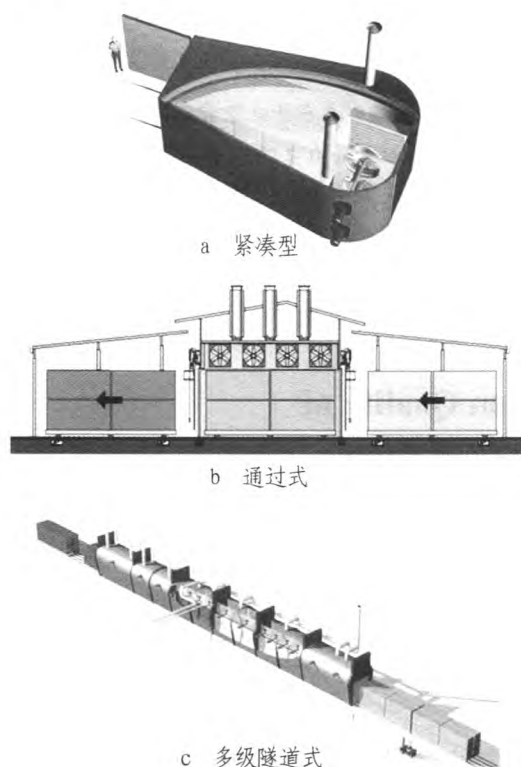


图 5 3 种型号 Tekmaheat 热处理窑
Fig. 5 Compact, Drive-through and Multistage tunnel-type kilns made by Tekmaheat

图 5a 是容积为 $15 \sim 25 \text{ m}^3$ 的紧凑型窑, 年产量约 $1\,600 \sim 3\,300 \text{ m}^3$ 。

图 5b 为通过式处理窑, 木材从窑的一端装入, 另一端运出。也是销量最多的一种型号, 容积为 $40 \sim 60 \text{ m}^3$, 年产量 $5\,000 \sim 10\,000 \text{ m}^3$ 。

图 5c 是多级隧道式处理窑, 年产量可达 $30\,000 \sim 40\,000 \text{ m}^3$ 。木材同样由一端装入, 另一端运出, 窑长 70 m , 宽 4 m , 由 6 个单元串联构成: 前 3 个单元是木材干燥段, 第 4 个单元为热处理段, 最后 2 个单元为冷却段。由连续式输送机输送木材, 每 12 h 通过 1 个单元。冷却阶段的余热可回收用于干燥阶段。

Valutec Oy 供应 2 种热处理窑。一种为紧凑型, 容积为 20 m^3 , 年产量 $2\,000 \sim 3\,000 \text{ m}^3$; 另一种大

型处理窑, 容积 100 m^3 , 年产量 $10\,000 \sim 15\,000 \text{ m}^3$ 。

除上述两家企业外, Stellac Oy 的设备供应商也曾是 ITWA 成员, 可提供年产能 $1\,000 \sim 50\,000 \text{ m}^3$ 的处理窑。后来该公司自行制定了称为 Stellac 的热处理工艺, 并将相应热处理木材命名为 Stellac wood。

4 结语

欧洲木材热处理产业目前呈现多种技术并存的局面, 各技术都有其优点与不足。常压蒸汽热处理是一种较为常规的处理工艺, 设备投资相对较小, 种类较多, 单台设备即可以达到较高的产能。加压热处理技术具有周期短、温度低的优点; 真空热处理可以保证产品质量的均匀性, 对设备的维护需求相对较低, 缺点都是处理窑容积有限, 产能受到限制。混合式热处理通过装置组合和工艺优化, 可以以较小的设备实现较高的产能, 但工艺复杂, 且设备投资高。

欧洲木材热处理技术值得我国借鉴之处如下:

1) 根据处理对象的不同而调整优化处理工艺。

我国木材热处理工艺粗放, 大多仅根据产品用途而有所调整, 往往忽略原料树种和来源的差异对产品质量的影响。

以 Thermowood 为例, 虽然其处理工艺和产品已经高度标准化, 但其技术输出到其他国家时, 会根据当地树种调整工艺; PLATO 工艺也根据处理材的渗透性差异, 调整处理介质, 以保证产品质量。

2) 高标准和完善的硬件系统。

木材热处理的环境比常规干燥苛刻, 处理设备需承受更高的温度和腐蚀性。因此, 欧洲木材热处理设备在材料和制造上多采用更高的标准, 如壳体材料多选用不锈钢, Jartek 的处理窑可提供长达 20 年的质量保证。相对而言, 我国热处理装置在选材和制造方面的标准较低, 一些产品在使用 $4 \sim 5$ 年后即出现明显问题。

3) 有机气态挥发物的排放控制。

欧洲木材热处理系统大多配备了废气净化处理装置, 如 Thermowood 系统采用燃烧净化装置, Plato 系统采用喷淋净化装置。我国木材热处理产业以至整个木材加工产业长期忽略废气处理。随着污染物排放标准日趋严格, 生产厂商和设备供应商应及早完善生产系统, 减少废气排放。

(下转第 39 页)

表 4 白榆锯材适宜的优化干燥基准

Tab. 4 Optimized drying schedule for elm lumber

处理阶段	含水率/%	干球温度/℃	EMC/%	时间/h
预热阶段		60	20	5
干燥保持	>30	55	14~12	
中间处理	30	65	18	6
	>25	57	8	
干燥保持	>15	60	6	
	<15	65	4	
平衡处理	10	65	8	6
终了处理	10	68	15	6
表面干燥	10	65	4	12

按照优化的干燥基准,分别在 50、80、100 m³ 三种规格的干燥窑中对白榆锯材进行验证干燥试验,并检测所有锯材的干燥质量,结果取平均值(表 5)。

表 5 显示,采用 3 种规格干燥窑干燥的白榆锯材,干燥质量均满足 GB/T 6491-2012 规定的二级要求,干燥周期缩短为 15~18 天。

3 结论

1) 采用本试验得出 20 mm 厚白榆锯材的优化干燥基准,干燥锯材的终含水率、分层含水率偏差、残

表 5 优化干燥基准下试材的干燥质量

Tab. 5 Drying quality of lumber with optimized drying schedules

检测指标	检测值			标准规定值	
	1	2	3	(二级)	
终含水率/%	8.5	9.6	9.1	8~12	
分层含水率偏差/%	1.8	1.5	1.1	3.5	
残余应力/%	2.9	2.7	1.9	≤3.5	
弯曲/%	顺弯	1.0	1.3	0.8	2.0
	横弯	0.5	0.8	0.6	1.0
	翘弯	2.1	3.0	2.5	4.0
	扭曲	0.9	1.3	1.3	2.0
开裂	纵裂/%	5	4	4	6
	内裂/条	0	0	0	不许有
干燥周期/d	18	15	17		

余应力、弯曲和开裂等,均满足 GB/T 6491-2012 二级干燥质量要求。

2) 按照优化的基准进行干燥,白榆锯材的干燥周期缩短为 15~18 天,干燥效率明显提高,满足企业干燥生产的需要。

3) 实际生产中,需根据干燥窑的具体条件以及锯材规格、初含水率等,适当调整干燥基准参数。

(责任编辑 张一萍)

(上接第 33 页)

参考文献:

[1] Tetri T. Developments and markets of thermally modified wood products[C]//Proceedings of the 2nd COST Action FP0904 Conference. Nancy, France; Université de Lorraine, 2012; 130-131.

[2] UNECE. Forest products annual market review 2012-2013 [R]. Geneva, Switzerland: United Nations Economic Commission for Europe, 2013;34.

[3] 丁涛,蔡家斌,耿君. 欧洲木材热处理产业和标准化[J]. 木材工业, 2015, 29(3): 26-30, 42.

[4] ITWA. Thermowood handbook[G]. Finland: International Thermowood Association, 2003.

[5] CRIQ. Profile of forest products, second transformation: wood treated at high temperature[R]. Québec, Canada; Centre de Recherche Industrielle du Québec, 2003.

[6] Stamm A J. Thermal degradation of wood and cellulose [J]. Industrial and Engineering Chemistry, 1956, 48(3): 413-417.

[7] Borrega M, Kärenlampi P. Effect of relative humidity on thermal degradation of Norway spruce (*Picea abies*) wood[J]. Journal of Wood Science, 2008, 54(4): 323-328.

[8] Rosen H N, Bodkin R E. Steam drying lumber above atmospheric pressure[C]//Proceedings Western Dry Kiln Clubs 32nd Annual Meeting, Madison, US; Forest Products Laboratory, 1983.

[9] Dagbroa O, Tornaiainenb P, Karlssona O, et al. Colour responses from wood, thermally modified in superheated steam and pressurized steam atmospheres[J]. Wood Material Science & Engineering, 2010, 5(3-4): 211-219.

[10] Tjeerdsma B F, Militz H. Chemical changes in hydrothermal treated wood: FTIR analysis of combined hydrothermal and dry heat-treated wood[J]. Holz Roh- Werkst, 2005(3):102-111.

[11] Boonstra M, Tjeerdsma B. Chemical analysis of heat treated softwoods[J]. Holz als Roh- und Werkstoff, 2006, 64(3): 204-211.

[12] Rapp A O. Review on heat treatments of wood[G]. Hamburg, Germany; BFH The Federal Research Centre for Forestry and Forest Products Information and Documentation, 2001; 26.

[13] Fordaq. Stora Enso timber investing in heat treatment of wood [EB/OL]. Brussels, Belgium; Fordaq, 2001. http://holz.fordaq.com/fordaq/news/Stora_Enso_Timber_investing_in_3061.html.

[14] Fordaq. Thermowood production doubel[EB/OL]. Brussels, Belgium; Fordaq, 2005. http://drevesina.fordaq.com/fordaq/news/Thermowood_StoraEnsoTimber_TekmaHeat_kiln_11329.html.

(责任编辑 向 琴)