

国内外木质材料甲醛释放量检测标准比较

尹梦婷, 邹献武, 吕斌, 杨帆, 付跃进, 周勤

(中国林科院木材工业研究所; 国家人造板与木竹制品质量监督检验中心, 北京 100091)

摘要: 在分析木质材料中甲醛来源及存在形式的基础上, 通过比较欧美日及国际标准化组织最新木质材料甲醛检测标准, 找出我国现行木质材料甲醛检测标准与国外标准的差异, 为提高我国木质材料产品的甲醛检测和控制技术水平提供参考。

关键词: 木质材料; 甲醛释放量; 检测方法; 标准

中图分类号: TS67 文献标识码: B 文章编号: 1001-8654 (2018) 01-0019-06

Comparison of Methods for Determining Formaldehyde Emissions from Wood-based Materials among Chinese and Foreign Standards

YIN Meng-ting, ZOU Xian-wu, LV Bin, YANG Fan, FU Yue-jin, ZHOU Qin

(Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry;

National Center for Quality Supervision and Testing of Wood and Bamboo Products, Beijing 100091, China)

Abstract: A series of Chinese standards has been formulated for testing formaldehyde emissions from wood-based materials. The authors analyzed sources and types of formaldehyde that existed in wood-based materials. Different testing methods were then used to compare among relevant standards in China, Europe, America, Japan and The International Standardization Organizations (ISO). The research provides a reference for improving testing and controlling formaldehyde emissions from wood-based materials.

Key words: wood-based materials; formaldehyde emissions; determining method; standard

据统计, 2016 年我国人造板产量为 3.0042 亿 m^3 , 产值约 6 484 亿元; 人造板产品消费约 2.81 亿 m^3 , 出口约 0.14 亿 m^3 , 出口额约 66.31 亿美元^[1], 生产量、消费量和出口量均居世界前列^[2]。

人造板生产普遍使用脲醛胶、酚醛胶或三聚氰胺甲醛胶等含甲醛的胶黏剂, 胶中游离甲醛在人造板使用过程中会缓慢释放。当室内环境中甲醛含量超过 $0.3 \text{ mg}/\text{m}^3$ 时, 对人体有不同程度的毒害^[3]。

为了控制人造板中游离甲醛的含量, 世界各国及国际标准化组织相继颁布了一系列木质材料中甲醛检测的标准, 但各个标准间检测方法存在差异, 不能直接进行对比。分析各种甲醛检测方法之间的差异, 对完善我国标准体系、提供制修订依据, 具有重要的意义。

1 木质材料中甲醛的来源及存在形式

木质材料包括实木板方材和人造板。

实木中甲醛的来源主要有: 木材本身组分自然水解所散发出的甲醛^[4]; 木材防腐、防虫、阻燃防火等处理使用含醛药剂引入的甲醛^[5-7]。

人造板中甲醛的来源主要有: 1) 在醛类胶制备

收稿日期: 2017-10-30; 修改日期: 2017-12-13

基金项目: 国家重点研发计划课题“木质家居材料健康安全性能检测与评价技术研究”(2016YFD0600706)。

作者简介: 尹梦婷 (1993—), 女, 中国林科院木材工业研究所硕士研究生。

责任作者: 吕斌, 男, 中国林科院木材工业研究所研究员。

过程中,未参与反应的甲醛,导致人造板中残留有游离甲醛^[8-9];2)人造板生产用醛类胶,热压后未完全固化的线型结构也会向外散发甲醛^[10];3)人造板堆放和使用过程中,胶层老化引起甲醛的少量缓慢释放^[11]。

根据甲醛的不同来源,其存在形式为:1)与胶黏剂或木材纤维组分以化学结合的甲醛;2)与胶黏剂或木材纤维组分产生物理吸附的甲醛;3)游离于胶黏剂或木材纤维间的甲醛。这些甲醛释放的难易程度与其结合强度成反比,化学结合尤其是已经形成体型结构结合的甲醛最难释放,其次是物理吸附的甲醛,板材浅层游离状态的甲醛最容易释放。

2 甲醛检测方法比较

2.1 穿孔萃取法

原理:通过液-固萃取,先用热甲苯溶出试样中的甲醛,然后将溶有甲醛的甲苯与水进行液-液萃取,使甲醛转移到水中,再测定甲醛水溶液的浓度,计算试样所含甲醛质量。

由于该方法几乎将试样中的游离甲醛和物理吸附甲醛全部萃取出来,甚至一些化学结合的甲醛,在长时间热甲苯的萃取作用下,也会发生化学键断裂,形成游离甲醛而被萃取^[12],因此测定的甲醛包括在日常使用条件下并不能释放的甲醛,故检测值往往大于实际释放量值。

采用穿孔萃取法的标准主要有:我国标准 GB/T 17657-2013《人造板及饰面理化试验方法》第4.58节、国际标准 ISO 12460-5“Wood-based panels — Determination of formaldehyde release — Part 5: Extraction method (called the perforator method)”和欧盟标准 EN 120:1992“Wood based panels — Determination of formaldehyde content — Extraction method called the perforator method”。但这些标准在试样准备、分析方法和结果计算方面均有所不同。

2.1.1 试样制备

三个标准对穿孔萃取法试样制备的要求比较,列于表1。

三个标准均限定制备试样的总质量为500 g,小样的尺寸规格亦相同,但对于含水率测定试样的要求不同。其中 GB/T 17657-2013 要求含水率测定试样

表1 穿孔萃取法试样制备要求

Tab.1 Sample preparation of perforator methods in different standards

标准代号	试样准备		平衡处理条件	
	尺寸/mm	总质量/g	温度/℃	相对湿度/%
GB/T 17657-2013	25×25	500	20±1	60±5
ISO 12460-5	25×25	500	23±1	50±5
EN120:1992	25×25	500	23±1	45±5

质量为100 g;而 ISO 12460-5 和 EN 120:1992 没有规定含水率测定试样的质量,而是要求取 25 mm×25 mm×板厚的小样12块。

在试样的平衡处理条件上,我国标准选择低温高湿的条件,更适合我国国情。平衡处理后,要求相隔24 h 两次称重结果之差不超过试样质量的0.1%,即视为质量恒定。

2.1.2 分析过程

三个标准的分析过程基本一致,其中我国标准充分考虑了操作过程的影响,在萃取过程中,规定在穿孔器和液封三角瓶中加入更多蒸馏水,以更好地实现甲醛吸收和穿孔仪洗涤,尽量减少萃取出来的甲醛损失,从而提高测量精度。

对于萃取后吸收液的甲醛浓度定量过程,三个标准的规定几乎相同。不同的是:GB/T 17657-2013 和 ISO 12460-5 还考虑了试样的甲醛含量受含水率影响^[13],因此引入了含水率修正系数。针对不同板种及含水率范围,提出了修订系数,以降低含水率对测试结果的影响。

2.2 干燥器法

原理:在一定温度下,把已知表面积的试样放入密闭的干燥器中,试样释放的甲醛被一定体积的水吸收,测定一定时间内水中吸收的甲醛含量。该方法操作简便快捷,也没有穿孔萃取法使用甲苯带来的环境污染问题,我国最为常用。

该方法的不足之处是只能测定试样扩散到空气中的甲醛,而试样中虽然游离、但并未被水吸收的甲醛则未被计入,因此,测定值低于试样释放甲醛的实际值。

采纳干燥器法(9~11 L)的标准主要有:GB/T 17657-2013 第4.59节、ISO 12460-4“Wood-based panels — Determination of formaldehyde release —

Part4: Desiccator method”、ASTM D 5582-14 “Determination of formaldehyde emission according to the American desiccator method”和 JIS A 1460:2015 “Building boards determination of formaldehyde emission—Desiccator method”。此外，我国即将被取代的标准 GB 18580-2001《室内装饰装修材料人造板及其制品中甲醛释放限量》采用了 40 L 干燥器法。

2.2.1 试样制备

国内外相关标准对干燥器法试样制备的要求见表 2。

GB/T 17657-2013 的要求与 ISO 12460-4 和 JIS A 1460: 2015 完全一样。而 ASTM D 5582-14 要求，当

试样各个面的甲醛释放特性有显著区别、且只有一个面暴露于建筑空间时，需要准备 16 块 127 mm×70 mm 的试样，每两块试样要背靠背贴合。

GB 18580-2001 中，其试样尺寸可以是长（300±1）mm，宽（150±1）mm，四周及背面用不含甲醛的铝胶带密封；也可以是长（150±1）mm，宽（150±1）mm，四周用不含甲醛的铝胶带密封，但总被测表面积都是 450 cm²。由于 40 L 干燥器法的试样平衡处理时间只有 1 天，且对环境相对湿度没有要求，试样的表面积最小，因此，检测结果的准确性不如 9~11 L 干燥器法。

在平衡处理时，各个标准都要求背景甲醛浓度低于试样释放的甲醛浓度，以避免试样吸收环境中的甲醛。

2.2.2 分析过程

各国标准对干燥器法分析过程见表 3。

ASTM D 5582-14 仅用 25 mL 蒸馏水吸收甲醛，吸收时间最短，仅有 120 min，显色时首选变色酸法，需要用到浓硫酸。这些操作条件不仅使得分析过程危险，而且影响检测精度。但是，该标准引入 Berge 方程来修正检测温度的影响，值得肯定。

GB/T 17657-2013 与 ISO 12460-4、JIS A 1460: 2015 的要求相同：都是使用 300 mL 蒸馏水吸收甲醛，吸收时间同是 24 h。试样释放的甲醛能够被水充分吸收，检测结果误差相对较小。

表 2 干燥器法试样制备要求
Tab.2 Sample preparation of desiccator methods
in different standards

标准代号	试样准备		平衡处理		
	尺寸/ mm	数量或总表 面积/cm ²	温度/ ℃	相对湿 度/%	时间/ d
GB/T 17657-2013	长 150±1.0 宽 50±1.0	接近 1 800	20±2	65±5	7
ISO 12460-4	长 150±1.0 宽 50±1.0	接近 1 800	20±2	65±5	7
ASTM D 5582-14	长 127±2 宽 70±2	8 块，封边 及端部	24±1	50±10	7 d± 4 h
JIS A 1460:2015	长 150±1 宽 50±1	接近 1 800	20±2	65±5	7
GB 18580-2001 (40 L)		450	20±1		1

表 3 干燥器法分析过程
Tab.3 Analytical procedures for desiccator methods in different standards

标准代号	吸收过程			显色剂	显色过程			显色温 度/℃	显色时间 /min	检测波 长/nm
	蒸馏水/ mL	温度/ ℃	持续 时间		加入量/mL					
					显色剂	待测液	其他			
GB/T 17657-2013	300±1	20±0.5	24 h±10 min	0.15 g/mL 乙酸铵+ 0.2% (v/v) 乙酰丙酮+ 0.3% (v/v) 冰醋酸	25	25		65±2	10	412
ISO 12460-4	300±1	20±0.5	24 h±10 min	0.15 g/mL 乙酸铵+ 0.2% (v/v) 乙酰丙酮+ 0.3% (v/v) 冰醋酸	25	25		65±2	10	412
ASTM D5582-14	25	24±0.6	(120±1) min	1% 变色酸	0.1	4	6 (浓硫酸)	95~100	15±2	580
JIS A 1460:2015	300±1	20±0.5	24 h±5 min	0.15 g/mL 乙酸铵+ 0.2% (v/v) 乙酰丙酮+ 0.3% (v/v) 冰醋酸	25	25		65±2	10	412
GB 18580-2001 (40 L)	20	20±1	24 h	0.20 g/mL 乙酸铵+ 0.4% (v/v) 乙酰丙酮	乙酸铵: 10 乙酰丙酮: 10	10		65±2	10	412

干燥器法受检测原理所限,检测结果精度不高。各个标准的检测结果精度及偏差(表 4)对比结果显示,干燥器法甲醛检测结果的重现性在 15%~20%,仅适用于工厂产品质量的简单控制,不适合对产品质量评价更精确的场合。

表 4 干燥器法分析结果
Tab.4 Analytical results of desiccator methods
in different standards

标准代号	检测结果的精度及偏差	
	重现性/%	精度/(mg/L)
GB/T 17657-2013	<20	0.01
ISO 12460-4	<20	0.01
ASTM D5582-14	±15	0.01
JIS A 1460:2015	<20	0.1
GB 18580-2001 (40 L)	-	0.1

2.3 气候箱法

原理:将一定表面积样品,放入温度、相对湿度、空气流速和空气置换率控制在一定值的气候箱内,甲醛从样品中释放出来,与箱内空气混合,定期抽取箱内空气,将空气中的甲醛用水洗提,测定洗提液中的甲醛量及抽取的空气体积,计算出每 m³ 空气中试样的甲醛释放量。

该方法也是测定试样释放到空气中的甲醛量,因为考虑了环境温度、相对湿度、空气流动等环境因素的影响,比干燥器法更接近实际使用情况,所以为世界各国所推崇,也逐渐成为我国法定裁决的主要检测方法。

目前采用气候箱法的标准主要有:GB 18580-2017《室内装饰装修材料人造板及其制品中甲醛释放限量》,GB/T 17657-2013第4.60节;ISO 12460-1“Wood-based panels—Determination of formaldehyde release—Part1: Formaldehyde emission by the 1- cubic-metre chamber method”;ASTM E 1333-14“Determining formaldehyde concentrations in air and emission rates from wood products using a large chamber”(内部容积 < 22 m³)、ASTM D6007-14“Determination of formaldehyde emission according to the American

small chamber method”(容积0.02~1 m³);以及EN 717-1:2004“Wood-based panels— Determination of formaldehyde release — Part 1: Formaldehyde emission by the chamber method”。这些标准在试样准备、分析方法和结果计算等方面尚有差异。

2.3.1 试样制备

最新修订的 GB 18580-2017,试验方法同 GB/T 17657-2013 中的 1 m³气候箱法规定,试样尺寸要求和 ISO 12460-1 完全一样(表 5)。

ASTM D 6007-14 对试样尺寸没做具体要求,但是规定了不同材料的 Q/A 比值(每 m²测试面积上单位时间内的气体流量, m/h),据此计算得到 1 m³气候箱内空气置换率为 0.5 次/h 时,试样被测表面积 L (m²/m³),见表 6。

表 5 气候箱法试样制备要求

Tab.5 Sample preparation of chamber methods in different standards

标准代号	试样准备			平衡处理			
	尺寸/ mm	数量/ 块	表面积/ m ²	温度/ ℃	相对湿度/ %	空气置换 率/(次/h)	时间/ d
GB 18580-2017	长 500±5 宽 500±5	2	1	23±1	50±5	1	15±2
GB/T 17657-2013	长 500±5 宽 500±0	2	1	23±1	50±5	1	15±2
ISO 12460-1	长 500±5 宽 500±5	2	1	23±1	50±5	1	15±2
ASTM D 6007-14	见表 7			24±3	50±5		2 h±15 min
ASTM E 1333-14	见表 7			24±3	50±5		7 d±3 h
EN 717-1:2004	长、宽 500	2	1				

表 6 ASTM 标准气候箱法承载率要求

Tab.6 Loading rates of chamber methods specified in
ASTM standards

产品类型	Q/A/ (m/h)	L/(m ² /m ³)
阔叶材胶合板墙板	0.526	0.95
刨花板地板、刨花板、阔叶材胶合板	1.172	0.43
中密度纤维板	1.905	0.26
刨花板门芯	3.811	0.13

注:两项 ASTM 标准要求误差均为±2%。

当空气置换率为 1 次/h 时,试样总被测表面积数值 L 比表 6 中的数值增加一倍。可见,ASTM D 6007-14 对于同样容积和空气置换率下的试样承载率

要求,因材料而异。除了胶合板墙板外,其他材料的要求均低于 GB/T 17657-2013 的要求。

ASTM E 1333-14 对不同产品类型的试样也有承载率要求,胶合板墙板的承载率最高,其次是刨花板,再次是中纤板和门芯级刨花板,可能是考虑到不同材料在室内使用过程的最大承载率存在一定的差异。

除了 EN 717-1: 2004 外,其他标准都要求进行试样预处理(表 5)。平衡过程尤其要注意环境的甲醛浓度,应低于试样释放的甲醛浓度,否则将导致试样从背景环境中吸附甲醛。

ASTM D 6007-14 规定,当侧边暴露面积大于表面积的 5%时要进行封边;而 GB/T 17657-2013、ISO 12460-1 和 EN 717-1:2004 都要求,未封边的长度与试样表面积的比例为 1.5 m/m²。对于地板等非标准构造样品,需将 2 块试样背靠背粘起来,且所有侧边均需用铝箔密封。

2.3.2 分析过程

气候箱法分析过程的比较,列于表 7。

1) ASTM D 6007-14 和 ASTM E 1333-14 的测试温度是 25℃,比其他标准偏高 2℃,相对湿度亦维持在 50%左右的较高水平;我国 GB 18580-2017 和 GB/T 17657-2013,与 ISO 12460-1 的测试条件完全一致,相对湿度也维持在 50%左右,略高于欧盟标准要求。

2) EN 717-1:2004 仅要求放置 3 h 后即可可以采样分析,而我国两个标准与 ISO 12460-1 都要求放置 24 h 后才能采样分析;ASTM E 1333-14 虽然规定,平

衡处理后的样品放置 16~20 h 后可以采样分析,但是实际情况是,大容积气候箱中的甲醛浓度达到均一稳定的时间应该更长。所以,EN 717-1:2004 和 ASTM E1333-14 在采样前放置时间上有待改进。

3) ISO 12460-1 要求,每次取样后,必须测量吸收溶液的质量;如果质量损失超过 3%,则应该修正。将 2 个气体洗瓶的溶液充分混合,然后用移液管取 10 mL 的吸收液,用乙酰丙酮法测定溶液中的甲醛含量。该方法适合浓度超过 0.005 mg/m³ 的情况;对于较低浓度的测定,应增加气体体积,或减少吸收溶液的量。

2.4 气体分析法

原理:将一个已知表面积的试样,放在温度、湿度、气流和压力均控制在一定值的密闭检测室内,当试样中释放出来的甲醛与检测室内的空气混合后,连续抽取气体并用蒸馏水洗涤吸收,根据测定的浓度、抽样时间、试样的暴露面积,计算试样的甲醛释放量。

气体分析法的原理与气候箱法类似,只是测定温度更高,测定时间更短,而且检测的是单位面积试样在单位时间内的甲醛释放速率,计量单位为 mg/(m²·h)。

采用气体分析法的标准主要有:我国 GB/T 17657-2013 第 4.61 节和欧盟 EN 717-2:1995 “Wood-based panels—Determination of formaldehyde release—Part2: Formaldehyde release by the gas analysis method”。但两者在试样准备、分析方法和结果计算方面有差异。

表 7 气候箱法分析过程
Tab.7 Analytical procedures of chamber methods in different standards

标准代号	气候箱参数					采样过程		
	温度/ ℃	相对湿度/ %	承载率/ (m ² /m ³)	空气流速/ (m/s)	空气置换率/ (次/h)	蒸馏水/ mL	采样流量/ (mL/min)	持续时间/ min
GB 18580-2017	23±0.5	50±3	1.0±0.02	0.1~0.3	1.0±0.05	2×25	2	60
GB/T 17657-2013	23±0.5	50±3	1.0±0.02	0.1~0.3	1.0±0.05	2×25	2	60
ISO 12460-1	23±0.5	50±3	1.0±0.02	0.1~0.3	1.0±0.05	2×25	2	60
ASTM D 6007-14	25±1.0	50±4	见表 7			1×20 ^a	1±0.05	30~60 min±5s ^b
ASTM E1333-14	25±1.0	50±4	见表 7		0.5±0.05	2×20 ^a	1±0.05	60 min±5s
EN 717-1:2004	23±0.5	45±3	1.0±0.02	0.1~0.3	1.0±0.05	2×25	2	60

注 a: 1%亚硫酸氢钠溶液; b: 当试样甲醛释放量低或要求与 E1333-14 标准匹配时,采样时间可以设为 60 min。

2.4.1 试样制备

GB/T 17657-2013 对试样尺寸规定了误差范围,便于实际操作,而 EN 717-2:1995 则无要求。两个标准都要求至少重复一次试验,如果 2 次试验平均值之差 $>0.5 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,还应进行第三次测试。试验前都要求所有侧边密封,具体要求见表 8。

表 8 气体分析法试样制备要求

Tab.8 Sample preparation process by gas analysis method

标准代号	试样尺寸/mm		备注
	长	宽	
GB/T 17657-2013	400 $\pm$ 2	50 $\pm$ 1	每次试验用 1 块,侧边全部密封
EN 717-2:1995	400	50	

2.4.2 分析过程

GB/T 17657-2013 要求洗瓶中蒸馏水量范围为 20~30 mL,而 EN 717-2:1995 要求 20~80 mL。我国标准更有利于统一测试设备,减少系统误差。

其他测试条件的要求完全一致,装置均为(60 $\pm$ 0.5) $^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 $\leq 3\%$ 的带压密闭箱;空气流量控制在(60 $\pm$ 3) L/h,载有试样释放甲醛的空气,每 h 经过一组新的串联洗瓶,连续测试 4 h;用乙酰丙酮法测定洗液中甲醛浓度,以算术平均值表示试样的甲醛释放量。

3 小结

作为木质材料的生产、消费和出口大国,我国已制订了全面、系统的木质材料甲醛检测标准。这些标准基本是参照了国际标准的可取之处,又结合了我国的国情,还考虑到实际操作过程的影响,精

度高,结果准确可靠。

美国标准中,考虑试验过程温度的影响并加以修正,同时气候箱法测定过程考虑了试样材料种类的区别,制定不同的承载率要求,这些细节值得我国标准修订时借鉴。

参考文献:

- [1] 中国林产工业协会,国家林业局林产工业规划设计院. 中国人造板产业报告 2017[R], 2017.
- [2] 肖小兵. 我国人造板产业发展现状[J]. 木材工业, 2016, 30(2): 11-14, 28.
- [3] 徐有明,李婷,夏青青. 细木工板生产和市场管理存在问题及其改进方向[J]. 林业科技开发, 2015, 29(05): 5-9.
- [4] 周定国. 人造板甲醛释放[M]. 北京: 中国林业出版社, 2015.
- [5] 祝淘,毛伟光,包小霞. 环保型木材保护剂的研究与开发[J]. 中华卫生杀虫药械, 2007(2): 150-151.
- [6] 姬宁,杨守禄,李丹. 单板类人造板防腐研究概述[J]. 林业科技开发, 2015, 29(3): 7-10.
- [7] 孙芳利, PROSPER Nayebare Kakwara, 吴华平, 等. 木竹材防腐技术研究概述[J/OL]. 林业工程学报, 2017(5): 1-8.
- [8] 周大勇,许全民,章丽娜,等. 家具中有害物质释放机理的研究探讨[J]. 轻工标准与质量, 2013(1): 31-33.
- [9] Mohamed Z.M. Salem, Martin Böhm, Jaromír Srba, Jitka Beránková. Evaluation of formaldehyde emission from different types of wood-based panels and flooring materials using different standard test methods[J]. Building and Environment, 2012, 49: 86-96.
- [10] 朱海欧,卢志刚,李翔,等. 人造板标准甲醛检测技术和方法解析[J]. 木材工业, 2009, 23(5): 37.
- [11] Jarnstorm H, Saarela K, Kalliokoski P. Comparison of VOC and ammonia emissions form individual PVC materials, adhesives and form complete structures[J]. Environment International, 2008, 34(3): 420-427.
- [12] 郭飞燕,于海霞,马轩,等. 高效液相色谱法测定人造板中甲醛含量的新方法[J]. 林业科技开发, 2015, 29(06): 109-112.
- [13] 于晓芳,王喜明,樊志刚. 板材含水率对游离甲醛释放量的影响[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2011, 32(04): 238-241.

(责任编辑 姜征、向琴)

(上接第 18 页)

- [2] 赵二东,李黎,严雄林. 开槽圆锯片热变形的试验研究[J]. 木材工业, 2004, 18(6): 25-27, 31.
- [3] Li S, Wang C, Zheng L, et al. Dynamic stability of cemented carbide circular saw blades for wood-cutting [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 238: 108-123.
- [4] Gary S, Mats E, Anders G. Practical measurement of circular saw vibration mode shapes [J]. Wood Material Science and Engineering, 2012, 7(3): 162-166.
- [5] Ishihara M, Murakami H, Ootao Y. Genetic algorithm optimization for tensioning in a rotating circular saw under a thermal load [J]. Journal of Thermal Stresses, 2012, 35(12): 1057-1075.
- [6] Li B, Zhang Z, Li W, et al. A numerical simulation on multi-spot pressure tensioning process of circular saw blade [J]. Journal of Wood Science, 2015, 61(6): 578-585.

- [7] 刘大海,黎俊初,常春. 基于 ABAQUS 的筋板件时效成型面回弹补偿算法[J]. 塑性工程学报, 2012, 19(6): 74-78.
- [8] 王明涛,曾元松,尚建勤,等. 基于 ABAQUS 的大尺寸弹丸喷丸过程数值模拟[J]. 塑性工程学报, 2012, 19(5): 109-114.
- [9] 庄茁,由小川,廖剑晖,等. 基于 ABAQUS 的有限元分析和应用[M]. 第 1 版. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- [10] 李传信,耿旭德. 普通圆锯片固有频率的理论探讨[J]. 吉林学院学报, 1996, 12(3): 159-163.
- [11] Gary S, Mote J. Analysis of roll tensioning and its influence on circular saw stability [J]. Wood Science and Technology, 1983, 17(4): 287-302.
- [12] Gary S, Mote J. Analysis of optimal roll tensioning for circular saw stability [J]. Wood and Fiber Science, 1984, 16(3): 323-338.

(责任编辑 劳万里、向琴)