

黄柏木铣削加工后木材表面微观分析

吴哲,李赫,马岩*,杨春梅,刘烁,宋明亮

(东北林业大学,黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要:研究基于对黄柏木的横、径向切面的铣削加工试验,得到不同的加工表面,然后借助扫描电镜对加工后的表面木纤维的破坏形式进行了观察,随后分析了不同加工方向下,黄柏木表面纤维的断裂形式和形成机制,讨论了铣削方向对木材表面质量的影响因素。结果表明,横、径向加工方向的不同会影响加工效率及能耗;顺、逆纹加工路径的不同会影响纤维的断裂形态和形成机理;铣削过程中纤维拉断和撕裂情况的不同则会影响加工后的木材表面质量。研究结果为不同木材、不同加工方式和方法等因素对木材破坏机制影响的进一步试验分析奠定了基础。

关键词:铣削加工;木纤维;破坏机理;表面质量

中图分类号:S781.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2018)01-0252-05

Microscopic Observation on the Surficial Damage of *Phellodendron amurense* Timber after Milling Process

WU Zhe, LI He, MA Yan*, YANG Chun-mei, LIU Shuo, SONG Ming-liang

(Northeast Forestry University, Haerbin, Heilongjiang 150040, China)

Abstract:Timbers of *Phellodendron amurense* were milled along transverse and radial sections. Surfaces of the milled timber were observed by scanning electron microscope to examine the damages after being milled. The failure forms and mechanisms of the surface cellulose were analyzed. Factors affecting the wood surface quality by different milling directions were discussed. From the experimental results and mechanism analysis, it was concluded that milling directions affected the processing efficiency and energy consumption, the difference of the processing path determined the fracture morphology and formation mechanism, and in the process of milling, fiber breaking and tearing influenced the surface quality. The results of the experiments would lay the foundation for the further study on the effects of different woods, different processing methods on the failure mechanism of woods.

Key words: milling processing; wood fiber; failure mechanism; surface quality

木材是一种具有各向异性的生物材料,在木材生产中,提高木制品的表面质量是提高产品价值最经济、有效的方式之一,具有重要意义^[1]。一般在研究木材的切削加工时多从3个不同的切面入手,即横切面、径切面和弦切面。而对于木材切削的破坏机制研究和木材表面质量的评价通常需要从木材的宏观结构和微观结构入手。宏观结构主要考察木材

表面的一些特征:树皮、边材、心材髓心、年轮、管孔、树脂道、波痕、气味和光泽等;而微观结构则借助特殊仪器(光学显微镜、电子显微镜和透射电镜等)将木材断裂面放大几百倍甚至上千万倍对木材的细胞、细胞壁结构、管胞、木射线等特征进行观察,相对能更直观准确地判定破坏形式^[2-3]。由于在不同的自然条件下,木材的细胞活动能力、分裂周期以及生

收稿日期:2017-03-08 修回日期:2017-04-10

基金项目:国家自然科学基金(31200434);中央高校基本科研业务费专项资金(2572015CB10);中国博士后基金(2013M531007)。

作者简介:吴哲,男,博士,副教授,研究方向:木材加工。E-mail:wuzhepersonal@126.com

* 通信作者:马岩,男,教授,博士生导师,研究方向:林业机械设计与制造,现代木工机械设计与数控技术,生物质新材料深加工与利用,木材加工机械设计。E-mail:myan@vip.163.com

长速度会有所不同,使得木材的木纤维长度、细胞壁厚、壁腔比和胞壁率都会有较大差异,导致木纤维比量、导管比量和木射线比量也有差异^[4-6]。目前对木材细胞的研究主要集中在 2 个方面,一是通过纳米压痕试验评估和测量木材细胞壁的硬度和弹性模量,以此了解其机械性能;二是通过微压缩试验研究木材细胞壁的强度和断裂形式,以此来了解其力学性能^[7-8]。

本研究选用的试验材种为黄柏木,其具有光泽好、纹理直、结构粗,年轮明显均匀、材质松软细腻,不易劈裂和耐腐蚀性好等优点,是中高档实木家具的重要用材。但在现阶段黄柏木的铣削加工中存在着加工后木材表面质量参差不齐的问题,并且在该领域的研究中缺乏黄柏木微观结构的基础理论数据支持。马岩^[9]在对木材切削理论的研究中指出,加工技术参数选择非常重要,其中刀具的几何参数、切削厚度、切削速度、进给速度和摩擦系数都会影响最终的表面质量,但纹理的影响最为重要。因此为了提高黄柏木加工后的表面质量,对黄柏木的加工特性在微观层次上进行了研究试验。首先对黄柏木的不同切面进行铣削加工,然后采用扫描电镜(SEM)对加工后的表面进行微观形貌观察,随后分析木材在断裂过程中木纤维的破坏机理,为提高黄柏木的加工质量和进一步研究木材特性奠定研究基础。

1 材料与方法

选用黄柏木心材作为试材,未加工的试材尺寸是 20 cm×15 cm×2 cm,所有试材均在工厂实际生产的干燥工艺下干燥到含水率 6%~8%,且表面平整、光滑,无裂缝、瑕疵、节疤、腐朽等缺陷,经长期室温条件下保存后采取铣削方式加工。选择木材的横切面和径切面进行不同走刀方向的加工,分别加工出平面和与横切面呈 45°的坡面,在铣削径切面时,铣刀分别在顺纹和逆纹方向上走刀而加工出不同的平面,铣削完成后选取尺寸大小为 10 mm×8 mm×1 mm 的试样面进行观察分析。

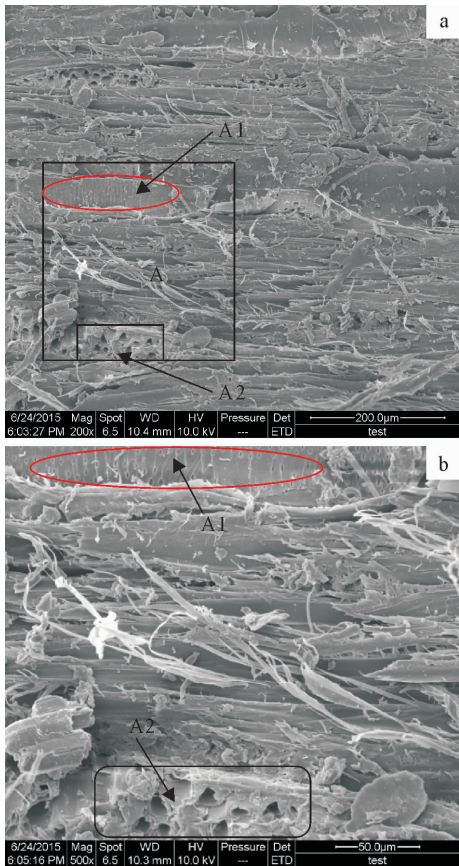
考虑到加工因素和木材含水率等条件对木材破坏的影响^[10],本研究在加工参数(切削力、切削速度、切削厚度)以及刀具的物理特性等一致的情况下完成对取材相同的黄柏木铣削加工。然后通过 SEM 观察木材的加工表面,采用 SEM 能更微观地了解木材结构,为加工后木材表面木纤维的破坏形貌分析提供更准确的指导。试验的全部式样在经加工、扫面后得到大量的木材表面原始图像样本,选取典型图像作为研究对象。

2 结果与分析

2.1 横切面铣削后微观组织的观察分析

2.1.1 横切面铣削加工后的形貌 本试验中,黄柏木的横断面在经过机械加工后,分别铣削其平行于横切面方向的平面和与横切面呈 45°的坡面,将加工后的平面置于扫描电镜下分别观察断面纤维的破坏情况。

图 1 为平行于横切面方向加工的平面电镜图,图 1a 为放大 200 倍的电镜图像,可见视野中最长的毛刺长度在 200 μm 左右,图片中除了可见的毛刺外还存在树脂道断裂孔和较为平整的片状加工面。为进一步观察木纤维形貌并分析其断裂机理,将图 1a 的 A 区放大到 500 倍得到图 1b 的图像。图中 A1 区(椭圆区域)是一平整区域,为理想的横断面加工结果,即所有管胞被横向切断,无纤维的拉断或撕裂现象,形成端向平面断裂纹孔,A2(矩形区域)为被截断的树脂道横截面孔和管孔,其他大部分为被加工不彻底的撕裂状破坏纤维,包括径向管胞纤维和横向木射线纤维。



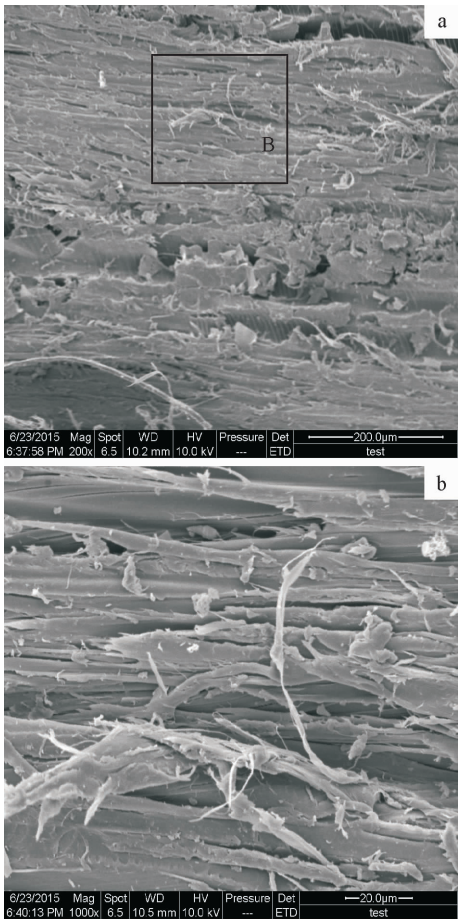
注:a. 200 倍电镜图像;b. 500 倍电镜图像。

图 1 横向平面

Fig. 1 Transverse plane

图 2 为与横切面呈 45°方向加工后的平面电镜

图像,在图像中明显可见由于铣削加工而留下的破坏沟槽,且图中没有断裂横纹孔和树脂道截面孔,被破坏的木材表面除了撕裂的条状纤维外多是呈现片状或结状的断裂状态。为进一步观察破坏纤维的微观形态,将图 2 中 B 区进一步放大到 1 000 倍(图 2b 所示)进行观察分析,图像中断裂的纤维多呈现片状且排布较为整齐,产生了更大的形变拉伸。对比平面和坡面的电镜图像可知,在横向铣削时加工平面得到的木材表面质量更好。



注:a. 200 倍电镜图像;b. 1 000 倍电镜图像。

图 2 横向坡面

Fig. 2 Transverse slope

2.1.2 横切面的形貌形成机理 铣削后的横断面有如此的形貌,其加工机理为:图 1 和图 2 中都存在着撕裂状纤维,这些纤维在受力后,首先发生拉伸变形,随着加工刀具的继续推进,纤维受力越来越大,发生塑性变形后继续被拉直至在受力集中的点处被拉断。由于细胞的含水率、细胞形态、细胞壁结构有所不同,使得在同等加工条件下会形成不同形态的断裂情况,即图 1、图 2 的各种形状、大小和方向的断裂纤维。以轴向纤维细胞为例,除了前面提到的由于横向力的挤压使之拉断外,还由于横向木射线和细胞间存在的联系以及胞间质作用使得在横向切

削过程中,撕裂也是纤维断裂的原因,这种撕裂的情况在径向加工中尤为明显。

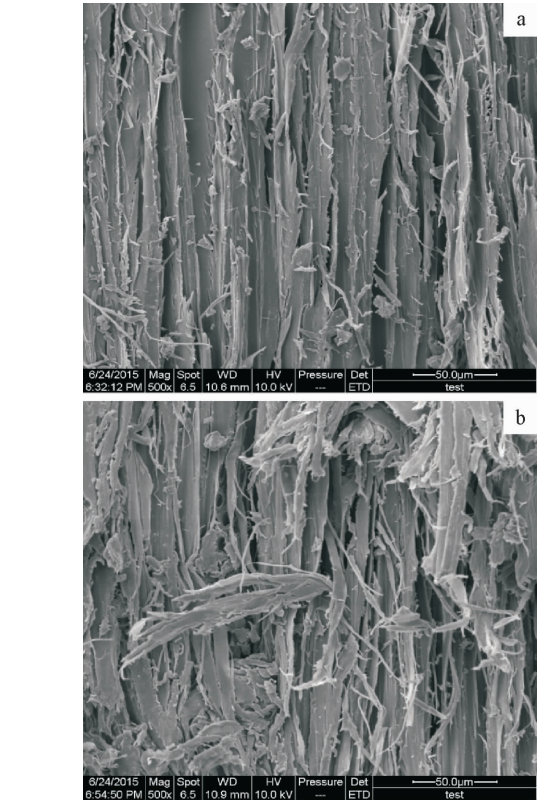
从 2 组图的不同点分析:图 1 中存在着断裂纹孔平面和树脂道横截面,这些孔其实是细胞腔壁受到横向剪切力而被直接切断的结果。图 2 中不存在像图 1 中的那样孔截断平面,是因为这样的孔在被铣削时存在铣削角度和加工面坡度,纹孔在一定角度上都被挤压撕裂了,形成了片状或条状纤维形态。在加工坡面时纤维受力更多的是一种复合力,即轴向的拉伸力和横向的剪切力,在刀具前进过程中还可能有扭转力存在(一般不考虑)。在复合力的作用下,木材纤维的受力情况体现为一种斜向的碾压力,这种碾压力不仅使纤维细胞被拉断而且会在一定程度上破坏细胞结构,使细胞内容物、胞间质以及树脂被压缩在一起,导致断裂处的纤维形态多为片状、条状结构。

2.2 径切面铣削后微观组织的观察分析

2.2.1 径切面铣削加工后的形貌 本试验中黄柏木的径切面在经过机械加工后进行铣削,与加工横切面相同,也需要加工出平面和坡面 2 种情况,不同的是,在径向加工时要考虑到顺、逆纹的进给方向对木材表面质量的影响。故而在加工出平面和坡面后,铣削的进给方向要分为顺、逆纹的加工方向进给,以此得到的平面置于扫描电镜下放大 500 倍的图像(图 3,图 4)。2 组图片中,纤维的形态都为片状或条状,没有出现纹孔截面或者树脂道横截面,对比横切面所形成的纤维毛刺更长、更多,排列更有序。对比平面(坡面)的顺纹和逆纹图像,顺纹加工得到的纤维毛刺排列更有序,方向一致、形态类似,逆纹加工得到的纤维毛刺排列更杂乱、方向各异,形态也有较大差异;对比顺纹加工(逆纹加工)的平面和坡面图像,平面的纤维毛刺排列更整齐有序,长度较坡面的短,而坡面的纤维毛刺排列较杂乱,存在阶梯式的差异,片状和丝状的纤维形态更多。总之,顺纹的加工方式要比逆纹的加工得到的平面质量更好;平面的加工方式比坡面的加工方式得到的平面质量效果更好。

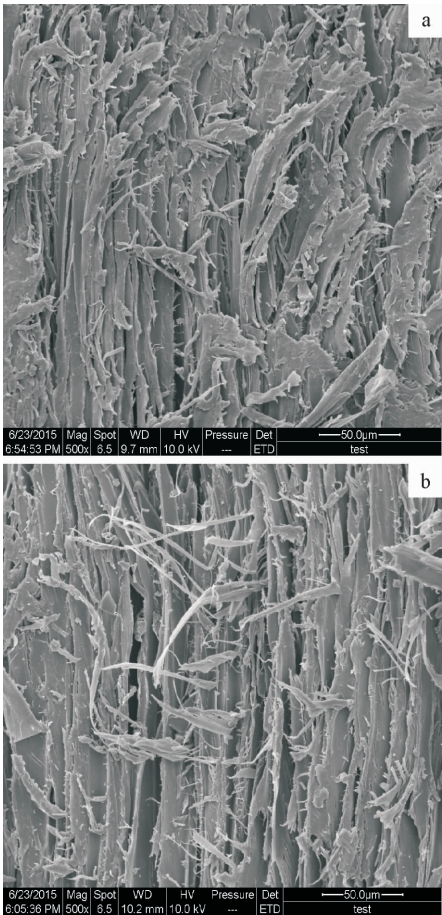
2.2.2 径切面的形貌形成机理 在径向加工中除了很少的木纤维被横向拉断外,大多数纤维的断裂情况都是被径向撕裂的,如果将管胞理想为六边形结构,那么刀刃的切削情况可分为胞内切削和胞外切削。胞内切削就是将细胞内部刨开将细胞质等内容物释放,胞外切削则是不破坏细胞结构将细胞相互间分割开,由于细胞在木材内部的不规则排列,故在加工时 2 种切削方式都会存在。在微米木纤维加工刀具的设计中,保证加工质量的前提下,刀尖圆弧

半径会尽量加大,但是不同木材的细胞直径差别高达 5~8 倍,很难根据细胞的直径来确定刀尖圆弧半径的大小,就会出现对管胞的撕裂现象。又由于加工刀具相对走刀方向的不同,即顺纹加工和逆纹加工的差异,导致加工表面的纤维形态表现出不同的条形撕裂状纤维。顺纹铣削时,由于是沿着木材纹理方向,超前劈裂空隙更容易产生,而逆纹的超前劈裂则需要消耗能量使逆纹纤维断裂。顺纹加工时纤维被拉断或撕裂的过程一气呵成,而逆纹加工时,木材纹理会阻碍刀具前进,刀具反作用于纤维强行将纤维折断、撕裂,由于这种相对暴力的走刀形式使得加工后的表面纤维排列参差不齐。而平面和坡面的不同则在于:铣削平面时,被铣削的面上纤维本身排列就比较整齐,又由于是平面且加工方向一致,各纤维所受的拉力、压力和力矩等受力情况大致相同,导致被加工后的平面上纤维的破坏形式、撕裂状态也都类似。当铣削坡面时,由于加工坡度的存在,使得加工方式更多的是胞内切削,即纤维细胞更多的是径向被刨开了。在铣削木材时,纤维毛刺除了受到径向的拉力外,还受到轴向压力,压力与坡面形成的力矩使得破坏后的纤维被压缩成片状,并在坡度上存在一定形貌差异。



注:a.顺纹加工的径向平面图像;b.逆纹加工的径向平面图像。

图 3 径向平面
Fig. 3 Radial plane



注:a.顺纹加工的径向坡面图像;b.逆纹加工的径向坡面图像。

图 4 径向坡面
Fig. 4 Radial slope

2.3 横切面与径切面形貌形成机理的比较分析

木材在受到横向作用力时,加工刀具(其刃口假定为圆弧且无缺陷)沿着切削的方向(端向)进给,刚接触时刀刃并不是直接切断纤维而是挤压表面层的纤维,此时越靠近髓心处的纤维所受的压力越小,当切刀继续推进时,表面层受到的压力逐渐变大直到超过受力纤维的强度极限而使木材的表面层纤维被破坏而拉断,靠近髓心处的纤维所受的压力也会增大,随着刀具的不断推进,压力以此变为剪力,木材沿着切削方向不断被破坏,最终形成了横断面。

木材在受到径向作用力时,前刀尖半径一般小于加工厚度且刀具前角为正值,这样木材的管胞就会被从径向破坏,纤维细胞被剖分开。前刀面挤压木材的切削层使纤维细胞的管胞层之间产生剪切应力,随着刀具的不断前进,剪切应力依次变为临界值,由于力的不断增大使得已经发生塑性变形的木纤维沿着前刀面向上劈裂。不断形成的剪切应力逐渐传递到未形成的木纤维上,导致木材在剪切应力的作用下沿纵向不断地劈裂、变形和破坏,形成光滑的条状纤维。

综上所述,在横向加工时木材纤维的破坏过程是由挤压到拉断,径向加工时木材纤维的破坏过程是由剪切到劈裂。虽然径向加工所需的力小,但由试验中所得横切面与径切面的图像对比可知,径切面加工所得的平面质量却不如横切面的好,即使同为径向加工(对比图 3 与图 4),顺纹加工要比逆纹加工所得的平面质量好。

3 结论与讨论

木材作为典型的各向异性材料,其抗压强度、抗弯强度、抗弯弹性模量和冲击韧性在横、径向差距较大,又因为碟簧效应以及木材细胞内容物具有的流动性使得在加工过程中大部分能量被消耗,故在横断面切削时的阻力要比径向切削时大得多^[11-13]。在加工过程中选择适当的加工方向可以大大节省能量消耗而且提高加工效率,因为木材细胞在轴向上的连接力比横向细胞间的相互作用力大得多,且同等当量直径的纤维较钢丝的强度大,纤维的拉断破坏比撕裂破坏所消耗能量大,故木材径向劈裂所需要的力和木材其他方向的切力相比要小得多^[14-15]。本研究在考虑这些力学因素的前提下,着重研究了加工方向和木材纹理对加工效果的影响,通过对黄柏木铣削试验结果的分析得出结论:在相同加工方向上加工平面时,同一个面上的纤维所受的拉力、压力和剪力等大致相同,使得纤维的破坏形式很一致;加工坡面时,由于被加工面坡度的存在,坡面上的纤维受到的拉力、压力和力矩不尽相同,导致各纤维受力不均使破坏形式存在阶梯式差异;在径向加工过程中,顺纹加工时容易产生超前劈裂空隙,即纤维更易被拉断或撕裂,而逆纹加工时由于木材纹理的方向性,会阻碍超前劈裂的产生,导致纤维不易被拉断或撕裂,故顺纹加工不仅比逆纹加工节省能耗而且纤维毛刺排列有序、形态类似,木材表面更光滑,质量更好。

木材加工时为获得较高的加工表面质量,加工方向上要遵循“横向优先于径向,平面优先于坡面,顺纹优先于逆纹”的原则,这样不仅加工后的表面平整光滑,而且为后续的进一步加工创造合理条件。

木材切屑形成的破坏点一般分为两种,一种是在最大应力点处木材被破坏,另一种是在木材所受应力和纤维的强度比率最大的点处发生木材破坏^[16]。本研究依据这两种破坏形式的形成原因分别从横向和径向研究了木材微观形貌的形成机理,即木材加工的过程就是纤维断裂的过程,不同的加工方向使木材纤维断裂的情况也不同,而受力纤维的拉断和撕裂情况会直接影响加工后的质量。纤维

的破坏形式是拉断还是撕裂,除了与加工方向和受力情况有关外,还与所选用的试材本身的自然条件、加工方式等因素有关,本试验只选用了黄柏木一种木材作为试材,后续的研究可选用多种木材、多种加工方式进一步研究木材特性。

参考文献:

[1] 杨铁滨,侯玉婷,刘一星,等. 基于图像的木材机械加工表面质量评价研究[J]. 森林工程,2015,31(1):59-62.
YANG T B,HOU Y T,LIU Y X,*et al.* Image-based evaluation of machining wood surface quality[J]. Forest Engineering, 2015,31(1):59-62. (in Chinese)

[2] 徐有明. 木材学[M]. 北京:中国林业出版社,2006.

[3] 李敏华,李桂兰,谭必明,等. 黄连木与紫油木木材解剖特性比较研究[J]. 西北林学院学报,2012,27(5):189-193.
LI M H,LI G L,TAN B M,*et al.* Comparative anatomical characteristics of timber between *Pistacia chinensis* and *P. weinmannifolia*[J]. Journal of Northwest Forestry University,2012,27(5):189-193. (in Chinese)

[4] 佟达,张燕,宋魁彦. 天然林五角槭木材材质径向变异规律初探[J]. 森林工程,2012,28(1):36-43.
TONG D,ZHANG Y,SONG K Y. Preliminary study on radial variation patterns of wood properties of *A. mono maxim* natural forest[J]. Forest Engineering,2012,28(1):36-43. (in Chinese)

[5] 张超男,赵西平,刘高均,等. 帽儿山林场古栎木根内导管特征的差异[J]. 西北林学院学报,2014,29(1):64-68.
ZHANG C N,ZHAO X P,LIU G J,*et al.* Variations of vessel characteristics in the roots of *Quercus mongolica* in Maoer mountain forest farm[J]. Journal of Northwest Forestry University,2014,29(1):64-68. (in Chinese)

[6] 徐速,曾凡锁,赵兴堂,等. 不同种源水曲柳木材主要化学成分含量变异分析[J]. 西北林学院学报,2016,31(2):234-238.
XU S,ZENG F S,ZHAO X T,*et al.* Analysis on the variation of main chemical components of different source of *Fraxinus mandschurica*[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016,31(2):234-238. (in Chinese)

[7] ZHANG X,ZHAO Q,WANG S,*et al.* Characterizing strength and fracture of wood cell wall through uniaxial micro-compression test[J]. Composites Part A Applied Science & Manufacturing,2010,41(5):632-638.

[8] 上官蔚蔚,邢新婷,费本华,等. 木材细胞壁力学试验方法研究进展[J]. 西北林学院学报,2011,26(6):149-153.
SHANGGUAN W W,XING X T,FEI B H,*et al.* Advances in the experimental methods of mechanical test of wood cell wall [J]. Journal of Northwest Forestry University,2011,26(6): 149-153. (in Chinese)

[9] 马岩. 国外木材切削理论研究的进展[J]. 木材加工机械,2008 (4):34-39.
MA Y. The development of theory of wood cutting abroad [J]. Wood Processing Machinery,2008(4):34-39. (in Chinese)

nese)

[13] 牛凯,李华威,何瑞珍,等. 郑州市带状绿地不同空间结构类型温湿度效应分析[J]. 西北林学院学报,2015,30(6):237-241. NIU K,LI H W,HE R Z,*et al.* Effects of different spatial structure of urban greenbelts on air temperature and relative humidity in Zhengzhou [J]. Journal of Northwest Forestry University,2015,30(6):237-241. (in Chinese)

[14] 康博文,王得祥,刘建军,等. 城市不同绿地类型降温增湿效应的研究[J]. 西北林学院学报,2005,20(2):54-56. KANG B W,WANG D X,LIU J J,*et al.* The effects of reducing temperature and increasing humidity by different greenland in urban area [J]. Journal of Northwest Forestry University,2005,20(2):54-56. (in Chinese)

[15] 吴菲,朱春阳,李树华. 北京市 6 种下垫面不同季节温湿度变化特征[J]. 西北林学院学报,2013,28(1):207-213. WU F,ZHU C Y,LI S H. Seasonal changes of temperature and humidity of six urban underlying surfaces in Beijing [J]. Journal of Northwest Forestry University,2013,28(1):207-213. (in Chinese)

[16] 朱春阳,李树华,纪鹏. 城市带状绿地结构类型与温湿效应的关系[J]. 应用生态学报,2011,22(5):1255-1260. ZHU C Y,LI S H,JI P. Relationships between urban green belt structure and temperature-humidity effect [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2011,22(5):1255-1260. (in Chinese)

[17] 杨持. 生态学实验与实习[M]. 北京:高等教育出版社,2003:160-172.

[18] 王远飞,沈愈. 上海市夏季温湿效应与人体舒适度[J]. 华东师范大学学报:自然科学版,1998(3):60-66. WANG Y F,SHEN Y. The temperature-humidity effect and human comfort in Shanghai summer[J]. Journal of East China Normal University:Natural Science,1998(3):60-66. (in Chinese)

[19] 纪鹏,朱春阳,王洪义,等. 城市中不同宽度河流对滨河绿地四季温湿度的影响[J]. 湿地科学,2013,11(2):240-245. JI P,ZHU C Y,WANG H Y,*et al.* Effect of different width of urban river on air temperature and relative humidity of riverside greenbelts in four seasons[J]. Wetland Science,2013,11(2):240-245.

[20] 纪鹏,朱春阳,李树华. 河流廊道绿带结构的温湿效应[J]. 林业科学,2012,48(3):58-65. JI P,ZHU C Y,LI S H. Effects of the different structures of green belts on the temperature and humidity in river corridors [J]. Scientia Silvae Sinicae,2012,48(3):58-65. (in Chinese)

(上接第 256 页)

[10] JIANG J X,WANG J W,ZHANG X,*et al.* Microstructure change in wood cell wall fracture from mechanical pretreatment and its influence on enzymatic hydrolysis[J]. Industrial Crops and Products,2017,97:498-508.

[11] 廖声熙,崔凯,孙庆丰,等. 云南松人工林正常木与应压木物理力学性质比较. 西北林学院学报,2013,28(6):161-164. LIAO S X,CUI K,SUN Q F,*et al.* Comparative study on physical and mechanical properties of normal and compressed woods from *Pinus yunnanensis* plantations [J]. Journal of Northwest Forestry University,2013,28(6):161-164. (in Chinese)

[12] ADYA P,SINGH,GEOFFREY DANIEL. The S2 layer in the tracheid walls of picea abies wood: inhomogeneity in lignin distribution and cell wall microstructure[J]. Holzforschung,2005,55(4):373-378.

[13] 黄腾华,符韵林,李 宁. 擎天树木材物理力学性质研究[J]. 西北林学院学报,2013,28(5):160-163. HUANG T H,FU Y L,LI N. Physical and mechanical properties of *Shorea chinensis* wood [J]. Journal of Northwest Forestry University,2013,28(5):160-163. (in Chinese)

[14] 杨春梅. 微米木纤维切削功耗计算理论及 MFHB 形成机理 [D]. 哈尔滨:东北林业大学,2007.

[15] 孙建华,熊 勋. 对伐木剪剪伐立木的力学分析及劈裂机理的研究[J]. 森林工程,2000,16(2):23-25.

[16] STANZL-TSCHEGG S E,KEUNECKE D,TSCHEGG E K. Fracture tolerance of reaction wood (yew and spruce wood in the TR crack propagation system)[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials,2011,4:688-698.