

亚微米木基生物弹性材料医用夹板弹性模量研究和建模分析

邢力平,张广恒*,臧杰,张力航,李伟

(东北林业大学,黑龙江 哈尔滨 150040)

摘 要:选用亚微米级刨花作为研究对象,结合现代医用夹板设计理论,采用将亚微米刨花压缩的方法制作异型医用夹板,与传统医用夹板相比较从微观结构研究亚微米木基生物弹性材料医用夹板的特性。以微观角度探索亚微米木基生物弹性材料医用夹板的形成机理,通过研究木纤维横截面的微观结构特征并提出提高医用夹板柔韧性的方法,采用微米级的切削厚度破坏木材微观结构的六棱形形态,构造出新型的具备高柔韧性的亚微米木基生物弹性材料医用夹板。通过对落叶松及毛白杨 2 种树种的刨切试验以及模压医用夹板试件的制作,得出模压医用夹板的刨花最优尺寸。对新型医用夹板弹性模量的理论分析,引入在模压医用夹板受到外力之后应力应变存在的关系式,对平面内的弹性模量进行积分,求出其理论弹性模量,并得出理论上定向铺装的亚微米刨花板的弹性模量在其主方向上 5 倍于普通亚微米刨花板的结论。通过研究模压医用夹板弹性模量提高的原因,给出影响模压医用夹板弹性模量除亚微米刨花的大小、密度、施胶量、胶合是否严密以外的其他影响因素,引入微观结构孔穴比系数、亚微米木基生物弹性材料医用夹板的压缩程度系数、亚微米木基生物弹性材料医用夹板与胶料的胶合系数以及亚微米木基生物弹性材料医用夹板的不直系数,并将对其强度产生影响的相关系数代入计算公式,推导出亚微米木基生物弹性材料医用夹板弹性模量的力学表达式。提出亚微米木基生物弹性材料医用夹板的压缩量也会影响模压医用夹板强度的观点,通过代入公式得出模压后亚微米木基生物弹性材料医用夹板的密度对模压医用夹板强度的影响。

关键词:微观结构;亚微米刨花;弹性模量;模压;高柔韧性;模压医用夹板

中图分类号:S781.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2017)01-0272-07

Elastic Modulus and Modeling Analysis of Submicron Wood-based
Bio-medical Elastic Material Splint

XING Li-ping,ZHANG Guang-heng*,ZANG Jie,ZHANG Li-hang,LI Wei

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

Abstract: It is a frontier research to use biomedical materials as medical assistant tools and substituted materials in modern biomedical technology. This paper selected micron or submicron shavings as research objects, combined with the design theory of modern medical splint, using the method by which the micron or submicron shavings were compressed to abnormal shaped medical splints, and compared with traditional medical splint to find out the features of wood-based bio-medical elastic material splints. Based on relative fundamental theory, the formation mechanism of wood-based bio-medical elastic material splint was probed from the microstructure observation. The microstructure of the cross section of the woody fibers were observed, methods to promote the the flexibility of the splint were proposed. The six prism shaped wood microstructure was deconstructed by micron level cutting to construct the new kind of high flexibility submi-

收稿日期:2016-04-25 修回日期:2016-07-27

基金项目:国家自然科学基金项目(31170517);黑龙江省自然科学基金(C201336)。

作者简介:邢力平,女,硕士,教授,研究方向:机械设计及理论(林业机械与木工机械)。E-mail: xlp0413@163.com

* 通信作者:张广恒,男,硕士研究生,研究方向:机械设计及理论(林业机械与木工机械)。E-mail: 18845649787@163.com

cron wood-based bio-elastic material medical splint. Then the best size of medical molded plywood wood shavings was inferred through the production of molded medical splint specimen and sliced experiment of two kinds of timbers,including larch and tomentosa. In order to derive its theoretical elastic modulus,the paper introduced the stress-strain relations and integrated the elastic modulus on the plane. Through theoretical analysis on elastic modulus of the new medical splint,it was concluded that the common sub-micron particle elastic modulus was one fifth of the main direction. By analyzing the reasons for the increase of elastic modulus of medical molded plywood,other factors were also given,such as the size of wood shavings,density,glue amount, and gluing strength. New coefficients were introduced, such as un-straight ratio, which were then used to introduce the mechanical expression of elastic modulus. This process provided a basis for the micromechanics theory of composite elasticity for the medical splint. It was proposed that the amount of compression which affected the strength of medical molded plywood would be described quantitatively.

Key words:microstructure; submicron shaving; elastic modulus; molded; high flexibility; medical molded plywood

采用将亚微米刨花压缩的方法制作异型医用夹板,与传统的实木及塑料医用夹板相比,有着更好的柔韧性、弹性、相容性、通透性等特点。制作该种异型医用夹板所需要的亚微米刨花是一种比较新颖的生物质材料,其比塑料以及实木具有更加优良的特性,既可以满足病人对医用夹板舒适度的要求,又能具备良好的医疗效果。如何改变木材亚微米刨花的形态并加工制作成为与人类皮肤相容性比较高的新型医用夹板,在医学领域的生物材料加工技术方面一直是一个重要的研究方向^[1-2]。研究中发现,构造新型医用夹板时需要一定厚度和纹理的微米亚微米刨花按照一定的铺装方向,在调整好厚度、密度和弹性模量等参数的情况下才会构造出具有更高性能的新型医用夹板^[3]。由于人体关节的曲线为异型曲线,拿人体肘部为例,为迎合肘部活动的需要以及适应肘部天然的弯曲度,医用夹板的曲线也应该为异型的,而木材作为医用夹板的材料具有各向异性的性质,是各种材料中最能满足各种要求的一种选择。

1 亚微米刨花模压医用夹板的特点

随着对亚微米技术的不断探索,亚微米木基生物弹性材料发展到今天,为了得到完整的亚微米木纤维刨花,可以选择将木材裂解的方式来改变木材的微观结构以得到不被破坏完整的亚微米木纤维刨花^[4-5],然后将所得亚微米木纤维刨花进行异型模压加工,理论上即可得出新型医用夹板。木材微观结构壁的物质密度大概为 $1.53\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,和木材内部组织结构相关,大部分的木材微观结构壁物质密度为 $0.5\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。木材的微观结构组织呈现六棱形空心形状^[6],由于这种结构组织一定情况下会影响这种微观结构的弹性模量,所以通过某种方法人为改变木材微观结构的排列方式,应该可以大幅度地

提高材料的弹性模量^[7]。这种由薄木层积成的医用夹板优于传统木材,具备与人体皮肤更好的相容性、更高的透气性、更高的柔韧性以及更高弹性模量的生物医用材料^[8-9]。本研究从微观角度研究了亚微米木基生物弹性材料医用夹板是如何形成的,并从基础理论入手,通过试验论证得到具备自主知识产权的新型薄木层医用夹板。

2 模压医用夹板的高柔韧性形成机理

当运用传统的木材切削方式即采用毫米级以上的切削厚度时,由于木材细胞直径远小于切削的厚度及切削刃的圆弧半径,就会出现碟簧效应及木材细胞内容物的流动现象,而存在这 2 种现象的原因是木材微观结构的六棱形形态特点。为了破坏这种木材微观结构的六棱形形态,我们选择其他的木材切削方式,即采用微米级的切削厚度,此时刀刃的圆弧半径是小于木材细胞直径的,可使木纤维的细胞壁破裂从而破坏六棱形形态,使细胞不再存在碟簧效应和细胞内容物挤出后再回流的情况,从而消除了以上 2 种现象。没有了碟簧效应和木材细胞内容物的流动现象,木材微观结构的弹性回复也被随之消除。如果在加工医用夹板时,将亚微米刨花的断面尺寸始终控制在微米范围内,通过部分去除亚微米刨花微观结构空腔并应用模压压缩的加工方法即可形成其高柔韧性和回弹性。木材微观结构的纵向截断需要劈裂木纤维,阻力大功耗也大,因此微米木纤维亚微米刨花应按照木料顺纹的方向进行加工。切开的微观结构如图 1,采用将亚微米刨花微观结构部分切削以后再压缩的加工方法,是能够轻易得出性能指标超过普通木材的高柔韧性异型医用夹板的。

木纤维微观结构横截面的结构特征一般指在一个加工厚度完成后,单个微观结构在这一层内所呈

现的结构特征。取切削厚度为木材细胞当量圆直径的一半,约为 0.018 mm,刀刃切削时一定严格按照顺纹方向纵向切削,微观结构经剖分后的横截面结构特征可以出现图 1 的 3 种情形^[10]。

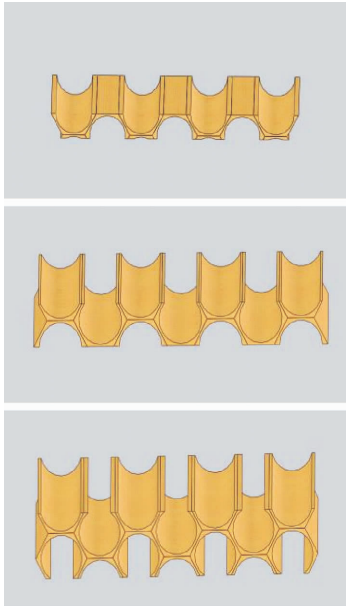


图 1 微观结构加工成微米木纤维以后的 3 种变化情形

Fig. 1 Processed into micron wood fiber cell changes

由于微观结构空腔内存在影响木材强度的胶液和节子类等的缺陷,如果将空腔内的上述缺陷剔除,亚微米微观结构的结构被破坏,这样的亚微米木基生物材料医用夹板可以形成高柔韧性^[11]。

3 模压医用夹板亚微米刨花最优形状确定和刨花加工的试验数据

通过分析医用夹板亚微米刨花的各主要参数,对于各种主要参数来说,其性能差别的根本在于其亚微米刨花单元(一定长、宽、厚度的刨花)形态的差别,亚微米刨花单元的粗细对强度、压缩比、相容性、弹性模量和握钉力等性能方面的影响较大^[12]。这些差异的本质也是因为亚微米刨花单元尺寸的不同所造成的,因此如何提高亚微米刨花医用夹板的性能应该首先考虑从亚微米刨花单元的研究入手,如何去木材本身普遍存在的天然缺陷,研究不同亚微米刨花形态对亚微米刨花医用夹板性能产生影响的各个方面,并在影响其强度、弹性以及相容性等性能方面取其有利的一面去其不利的一面,从理论上确定模压医用夹板亚微米刨花最优参数的思想基础。

定义模压医用夹板亚微米刨花单元的厚度近似于微观结构外径,取微观结构外径的 0.75~1.25 倍,这一要求可以通过亚微米木基生物弹性材料刨

切技术实现。为了能够使人造板同时保证纵向高强度的情况下保证横向拉伸强度,在参考了市场上其他人造板特性的情况下,定义亚微米刨花单元的宽度在 16~25 mm^[13]。在长度方面,应保证顺纹切削的条件下尽可能的长,调查发现,可以使模压产生稳定强度和相应的弹性、压缩比的亚微米刨花单元长度至少要达到 30 mm,由此,可以定义模压医用夹板的亚微米刨花长度在 60~160 mm。如果以上条件都可以满足,在理论上模压医用夹板的静曲强度和弹性模量都可以达到要求。

在实际加工过程需要控制的所有参数中,刨花的厚度是最难加工达到的,对落叶松(*Larix gmelinii*)^[14]和毛白杨(*Populus tomentosa*)^[15] 2 个树种分别进行了亚微米刨花刨切试验,试验中落叶松削片最薄厚度可以达到 0.033 mm,毛白杨最薄厚度可以达到 0.037 mm,均可以形成我们要求的模压医用夹板理想亚微米刨花的厚度。图 2(a)和图 2(b)分别是落叶松和毛白杨的亚微米刨花切削达到要求厚度尺寸的照片。当刨花加工成微米级厚度的亚微米刨花以后,就会出现如图 3 所示的絮状结构。



(a)落叶松 100 mm×30 mm×0.033 mm



(b)白杨 100 mm×15 mm×0.037 mm

图 2 落叶松(毛白杨)经刨切实验亚微米刨花最薄厚度
Fig. 2 The most thin thickness of the submicron particle through slicing experiment of Larch(Tomentosa)



图 3 亚微米刨花加工到最薄厚度时的絮状结构
Fig. 3 The floc structure after processing to the most thin thickness of the submicron shavings

图 4 是亚微米木基生物弹性材料模压医用夹板经异型模压之后的医用夹板试件,由于模压过程中其材料的铺装方向是随机的,所以模压医用夹板在其材料主平面内的弹性模量在理论上应该是相同的。

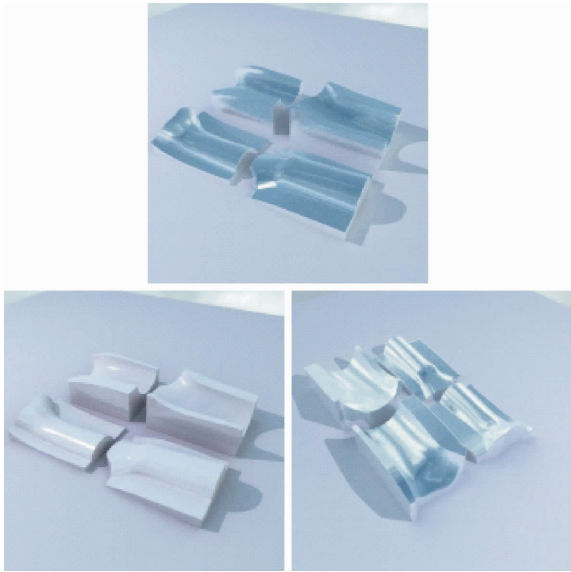


图 4 模压医用夹板试件照片

Fig. 4 The sample photo of molded medical splint

4 通过理论分析模压医用夹板弹性模量

对于模压医用夹板的强度计算单元来说,假设其符合复合材料力学中的宏观各向同性条件,由广义胡克定律,当模压医用夹板在受到一个外力时,其应力及应变将会存在以下关系^[16]:

$$\begin{cases} \epsilon_x = \frac{1}{E_{xy}}(\delta_x - \lambda_{xy}\delta_y) - \frac{1}{E_z}\lambda_{xz}\delta_z \\ \epsilon_y = -\frac{1}{E_{xy}}(\lambda_{xy}\delta_x - \delta_y) - \frac{1}{E_z}\lambda_{xz}\delta_z \\ \epsilon_z = -\frac{1}{E_{xy}}(\lambda_{xy}\delta_x + \lambda_{xz}\delta_y) + \frac{1}{E_z}\delta_z \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \gamma_{xy} = \frac{1}{G_{xy}}\tau_{xy} \\ \gamma_{xz} = \frac{1}{G_{xy}}\tau_{xz} \\ \gamma_{yz} = \frac{1}{G_{xy}}\tau_{yz} \end{cases} \quad (2)$$

式中: E_{xy} —XOY 平面内的弹性模量(MPa); E_z —Z 方向上的弹性模量(MPa); ϵ_n —n 方向上的应变; λ_{nm} —应力在 n 方向横向应变的泊松比; δ_n —n 方向上的正应力(N); γ_{nm} —nm 平面内的切应变; τ_{nm} —nm 坐标轴中的切应力(N)。其中 m、n 代表 2 个不同的坐标方向,即 m、n=X、Y、Z。

由于模压医用夹板在模压之前的亚微米刨花铺装时没有进行朝向的处理,因此,亚微米刨花在不受

力的情况下其分布的朝向也是随机的,一旦受到某个方向的压力作用即模压受力时亚微米刨花的方向绝大部分平行于模压平面(XOY 面),但也不能排除会有少部分亚微米刨花是呈 Z 向分布,因其数量不多,可以不必考虑。因此,我们可以理想地认为模压后的亚微米刨花的方向分布是平行于模压平面 XOY 的,如图 5 所示。

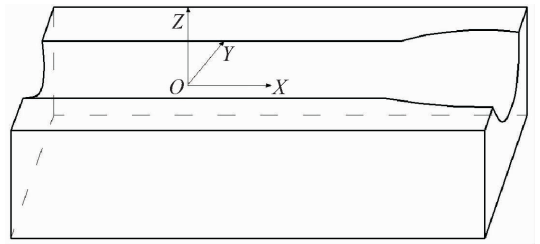


图 5 医用夹板亚微米刨花分布的坐标表示

Fig. 5 The coordinate express of the medical splint submicron shaving pavement

在此前提下,可以设平面 XOY 内分布在各个方向上的弹性模量 E_{xy} 的大小是相同的,但其与医用夹板主方向上的弹性模量 E_z 的大小和方向是不一样的,倘若将分布在平面内主方向上的弹性模量 E_z 投影到面内各方向上弹性模量 E_{xy} 上,并在整个平面内进行积分计算,计算结果应满足如下关系:

$$E_{xy} \approx V_m(E_{xy}^1 + E_g K) \approx \frac{53}{250}E_z = E_{xy}^1 \quad (3)$$

式中: E_g —胶料的弹性模量(MPa); V_m —亚微米木基生物弹性材料医用夹板的体积率; E_{xy}^1 —主方向上的弹性模量(MPa); K —胶料与医用夹板的体积比,即施胶率。

式(3)等同于在 XOY 平面内 E_{xy} 的方向上求 E_z 的平均值,所以可以把 E_{xy}^1 设为亚微米刨花分布在 E_{xy} 方向上的弹性模量,则模型的弹性模量就可以假设为是由 E_{xy}^1 所构成的定向模压医用夹板。通过式(3)亦能得出结论:随机铺装的模压医用夹板强度在理论计算中为定向铺装强度的 21.2%,或者说,理论上定向铺装的亚微米刨花板的弹性模量是非定向铺装的普通亚微米刨花板的 5 倍^[17]。

5 模压医用夹板弹性模量提高的原因

通过式(3)可以充分地解释是由于亚微米刨花单元铺装方向的改变而引起的总体弹性模量的下降,但并不能反映出其他因素在加工时对弹性模量所造成的干扰,只能部分地反映出引起模压医用夹板弹性模量变化的原因。事实上在亚微米木基生物弹性材料医用夹板的整个加工阶段,不仅仅是由于木材的种类和亚微米刨花的铺装方向的改变而造成

了弹性模量的变化,刨花的尺寸、铺装密度、施胶量的多少以及胶合是否严密等其他因素也同样影响着模压医用夹板的弹性模量大小,因此要想求得模压医用夹板的弹性模量仅靠式(3)是不够的。接下来我们将着重分析其他造成模压医用夹板弹性模量变化的因素。

模压医用夹板弹性模量的众多影响因子中,胶量配比的影响因素不可忽视,可以通过式(4)计算^[18]:

$$E_{xy} \approx V_m E_1 + V_g E_g K \tag{4}$$

式中: E_1 —主方向上胶料的弹性模量(MPa)。

在使用脲醛胶时胶料的弹性模量 E_g 通常优于不使用时,依经验来看,使用后的胶料弹性模量 E_g 一般为不使用时胶料弹性模量 E_1 的 1.3 倍左右,但在实际工程中 E_g 很难测得数据。

亚微米木基生物弹性材料模压医用夹板在微米化之后对木材本身弹性模量的增加效果我们可以通过引入亚微米木基生物弹性材料医用夹板强度增加系数 R 来表明:

$$\Phi = \frac{1.53}{\rho_M} (R - 1) \tag{5}$$

式中: ρ_M —亚微米木基生物弹性材料医用夹板的密度; Φ —亚微米木基生物弹性材料医用夹板的孔穴压缩变化率。

当亚微米木基生物弹性材料经模压制成医用夹板之后的孔穴比原材种微观结构孔穴大时, $\Phi > 0$;比原材种微观结构孔穴小时, $\Phi < 0$;模压之后孔穴大小无变化时, $\Phi = 0$ 。

引入的系数 R 一定程度上可以表示出亚微米木基生物弹性材料医用夹板的模压程度对其弹性模量的影响。当亚微米木基生物弹性材料医用夹板模压程度比较低时,可以利用 < 1 的系数来反映出该医用夹板对弹性模量的影响。当用亚微米木基生物弹性材料压制高柔韧性亚微米刨花医用夹板时,可以利用 > 1 的系数来反映强度增加的比例数对该医用夹板对弹性模量的影响。

亚微米木基生物弹性材料模压医用夹板施胶以后,亚微米刨花与胶料并不一定完全胶合,其胶合程度同样也会影响到压缩之后医用夹板材料的强度,因此通过引入亚微米木基生物弹性材料医用夹板与胶料的胶合系数 ξ 来反映这一影响, ξ 取值(0,1),当亚微米刨花和胶料的胶合比较完全时, $\xi = 1$;当亚微米刨花和胶完全没有胶合时, $\xi = 0$;当亚微米刨花和与胶料的胶合状态不确定时,就需要通过试验的方法来测得 ξ 的值。

在医用夹板的模压过程中,由于刨花铺装时的

随机性,亚微米刨花在压缩之后不免会在 Z 向仍有分布,毫无疑问刨花的这种分布对模压医用夹板的强度也会产生影响。因此,通过引入不直系数 L 来反映这一影响, L 同样取值(0,1),当亚微米刨花在 Z 向没有分布即亚微米刨花完全是直的情况下,取 L 的值为 0;当亚微米刨花在 Z 向存在分布时即刨花不直的情况下, L 的值不为 0,其值可通过试验进行标定。

通常情况下胶合系数 ξ 和不直系数 L 无法通过理论公式进行表达,而是需要经过试验来进行检测和确定。

将所述对模压医用夹板弹性模量产生影响的各种因素引入式(4)可以得到下式:

$$E_{xy} \approx 1.3 K R E_1 V_m \xi + \frac{53}{250} L R E_1 V_m \xi \tag{6}$$

亚微米木基生物弹性材料医用夹板的压缩量也会影响到模压医用夹板的强度,由式(7)、(8)得以体现:

$$C_Y = V_m v_Y / v_m \tag{7}$$

$$C_g = K V_m v_y / v_g \tag{8}$$

式中: C_Y —模压医用夹板压缩比; V_m —亚微米刨花自然状态下体积(m^3); C_g —胶料压缩比; v_g —胶料自然状态下体积(m^3); v_Y —模压医用夹板体积(m^3)。

将(7)、(8)代入式(6),可知压缩量对 E_{xy} 的影响基本上是可以被定量描述的。又由于模压后的亚微米木基生物弹性材料医用夹板体积与密度成正比,因此模压后亚微米木基生物弹性材料医用夹板的密度对模压医用夹板强度的影响也可以被定量地描述出来。

6 理论公式的实验室验证分析

结合以上理论研究,在实验室加工出了如图 4 所示的模压医用夹板试件。本次试验我们选择的树种为毛白杨,铺装方式为非定向铺装,经过检验,检验报告显示该试件弹性模量达到 2 937 MPa,已经超过优质的人造板材,静曲强度达到 27.9 MPa,握钉力也已达到 1 099 N。结合以上试验数据可以推定,倘若在铺装时采用定向铺装的方式,试件的弹性模量将能进一步提高并超过普通定向结构刨花板(OSB)主方向上的弹性模量。如果进一步改进胶的品种,提高吸水膨胀率,就可以替代现在的实木和各种碎料板,成为很有前途的一种新型医用夹板。

为了进一步说明理论公式的可行性,选择落叶松作为计算对象。落叶松的弹性模量为 9 800 MPa,代入式(3)可以得到 E_{xy} 的值为 2 058 MPa。

所得结果与落叶松亚微米刨花板的弹性模量大致相同。考虑到胶的作用,取 $V_m=0.9$, $K=10\%$,代入式(4)可以求得 $E_{xy}=2\ 108\ \text{MPa}$,这一结果和科尔曼试验求得的落叶松弹性模量平均值在 $0.72\sim 2.91\ \text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}\times 10^5$ 的统计数据近似^[19]。

一般情况下,医用夹板在经过铺装加压之后仅有少量亚微米刨花仍在 Z 向有分布,其对材料强度的影响不大,假设该影响 $<5\%$,此时取 L 值为 0.95 。假设模压加工过程中医用夹板的亚微米木基生物弹性材料与胶料结合的比较充分,则取胶合系数 ξ 为 1 ,取施胶率 K 的值为 10% ,再根据试验所得数据 $E_{xy}=5\ 168\ \text{Mpa}$,通过式(6)就可以反推出亚微米木基生物弹性材料模压医用夹板的微米化强度增加系数 R 为 1.76 。也就意味着,在工艺完全相同的前提下,亚微米刨花在进行微米化处理之后的模压医用夹板的弹性模量比之不进行微米化处理提高了 76% ,是国家标准优质板弹性模量的 2.13 倍,而单位密度的弹性模量为国家标准优质板的 1.65 倍。而将上述取值代入到式(5)时,即可得到亚微米木基生物弹性材料亚微米木基生物弹性材料医用夹板的孔穴压缩变化率 Φ 的值为 2.3 ,这个结果就可以定量地表示出模压医用夹板的亚微米刨花在加工到微米之后对其强度所起的作用。随着亚微米木基生物弹性材料模压医用夹板更多试验数据的不断积累,就可以给出更加准确的数值标定,从而更能体现出模压医用夹板的优越性。

7 结论与讨论

通过对模压医用夹板弹性模量具体参数的分析,将亚微米木基生物弹性材料医用夹板微观力学和木材微观结构学引入到亚微米木基生物弹性材料医用夹板力学研究中,为新型亚微米木基生物弹性材料医用夹板力学参数的计算引入新的研究方向。并且在综合考虑了亚微米木基生物弹性材料医用夹板的亚微米刨花的大小、刨花压缩密度、微米化程度、施胶量以及胶合程度、压缩比以及孔穴压缩变化率、整体铺装状态等因素对模压医用夹板弹性模量的作用之后,把这些参数和亚微米木基生物弹性材料医用夹板的弹性模量组构为定量的力学以及数学关系表达式,为模压医用夹板亚微米刨花复合弹性力学的微观力学研究提供了理论基础。

对木材微观结构模压后产生的变化进行分析来解释使模压医用夹板强度明显提高的原因,并利用亚微米木基生物弹性材料医用夹板的微米化强度增加系数以及亚微米木基生物弹性材料医用夹板的孔穴压缩变化率,对模压医用夹板强度的提高进行了

定量的标定,从而证明了模压医用夹板的优越性。并结合本研究结果推定利用市场上的普通压机就可以比较容易地加工出密度高于 $1\ \text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的碎料板,也就可以实现在普通医用夹板的生产线上生产出高柔韧性板。同时也为满足小型企业开发生产出小规模、高质量的医用夹板生产线提供了理论依据。

参考文献:

[1] 马岩. 纳微米科学与技术及在木材工业的应用前景展望[J]. 林业科学, 2001, 37(8): 109-113.

[2] 马岩. 利用微米木纤维定向重组技术形成超高强度纤维板的微观结构裂解理论研究[J]. 林业科学, 2003, 39(3): 111-115.

[3] 张扬, 马岩. 薄木层积材颈椎夹板构造机制及其弹性模量计算[J]. 林业科学, 2013, 29(8): 102-107.
ZHANG Y, MA Y. Mechanism of the structure and elastic modulus calculation of the sliced veneer laminated timber cervical splint[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2013, 29(8): 102-107. (in Chinese)

[4] HILL C A S, JONES D. Dimensional changes in Corsican pine sapwood due to chemical modification with linear chain anhydrides[J]. Holzforschung, 1999, 53(3): 267-271.

[5] MAEKAWA T, FUJITA M, SAIKI H. Characterization of cell arrangement by polar coordinate analysis of power spectral patterns[J]. J. Soc. Mater. Sci. Japan, 1993, 42(473): 126-131.

[6] 张云秀, 关小平. 异型模压包装材料弹性模量的构成和刨花形态分析[J]. 包装工程, 2012, 33(9): 42-45.

[7] 马岩. 木材横断面六棱规则细胞数学描述理论研究[J]. 生物数学学报, 2002, 17(3): 353-357.

[8] 邢力平, 马岩. 重组木弹性模量微观力学理论分析的实验验证[J]. 东北林业大学学报, 2002, 30(4): 91-93.
XING L P, MA Y. The experimental verification of micro-mechanics theory analysis for scrimber's elastic modulus[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2002, 30(4): 91-93. (in Chinese)

[9] 张扬, 马岩. 碳纤维增强木基复合材料的制备及力学性能[J]. 西北林学院学报, 2015, 30(6): 232-236.
ZHANG Y, MA Y. The preparation and mechanical properties of wood-based composite materials reinforced by carbon fiber[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015, 30(6): 232-236. (in Chinese)

[10] 马岩. 微米木纤维低密度轻质板制造技术探讨[J]. 木材工业, 2006, 20(4): 19-21.
MA Y. Exploring the processing technology for low density boards with micro wood fiber[J]. China Wood Industry, 2006, 20(4): 19-21. (in Chinese)

[11] 张扬, 马岩, 杨春梅. 薄木层积材颈椎夹板构造机制及其弹性模量计算[J]. 林业科学, 2013, 49(8): 103-107.
ZHANG Y, MA Y, YANG C M. Mechanism of structure and elastic modulus calculation of the sliced veneer laminated timber cervical splint[J]. Scientia Silvae Sinicae. 2013, 49(8): 103-107. (in Chinese)

[12] 成俊卿, 等. 木材学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1985: 468-469.

[13] 马岩,阿伦. MFLB 构成机理及孔穴压缩变化率对其力学性能的影响[J]. 林业科学,2007,43(6):123-127.
MA Y, A L. Structure mechanism and effects of hole compressibility on the mechanical strength of MFLB[J]. Scientia Silvae Sinicae,2007,43(6):123-127. (in Chinese)

[14] 刘丰禄,姜芳,张建中,等. 落叶松生材 12 个弹性常数的试验研究[J]. 西北林学院学报,2015,30(6):227-231.
LIU F L, JIANG F, ZHANG J Z, *et al.* Twelve elastic constant values of larch forest[J]. Journal of Northwest Forestry University,2015,30(6):227-231. (in Chinese)

[15] 郭健,康永祥,夏国威,等. 毛白杨人工林生长季根呼吸特征研究[J]. 西北林学院学报,2016,31(2):15-19.
GUO J, KANG Y X, XIA G W, *et al.* Characteristics of root respiration in growing period of *populus tomentosa* plantations[J]. Journal of Northwest Forestry University,2016,31(2):15-19. (in Chinese)

[16] 金康宁,谢群丹. 材料力学[M]. 北京:北京大学出版社,2006:140-142.

[17] 张扬,马岩. 微米木纤维颈锥夹板的制备及其弹性模量模型[J]. 中南林业科技大学学报,2015,35(5):129-132.
ZHANG Y, MA Y. Preparation of micron wood fibre cervical splint and its elastic modulus model[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2015, 35(5):129-132. (in Chinese)

[18] 战丽,齐英杰,马岩,等. 重组木复合亚微米刨花板截面弹性模量求解方法的研究[J],木材加工机械,2002,2(4):8-11.

[19] 科尔曼. 木材学与木材工艺学原理[M]. 江良游,译. 北京:中国林业出版社,1991:304-306.

(上接第 243 页)

[5] 徐强,吴斐华,朱丹妮. 枞酮作为肝病治疗药物的应用:2005,100408789[P]. 2005-11-14.

[6] 康胜利,王素贤,朱廷儒. 中药白鲜皮活性成分的研究[J]. 沈阳药学院学报,1983(6):11.

[7] 朱丹妮,陈婷,余亚云. 高效液相色谱法测定白鲜皮中枞酮含量[J]. 中国药科大学学报,1998,29(4):319-320.
ZHU D N, CHEN T, YU Y Y. Determination of fraxinellone in *Dictamnus dasycarpus* by HPLC [J]. Journal of China Pharmaceutical University,1998,29(4):319-320. (in Chinese)

[8] 李翔,汤华钊,苟小军,等. 白鲜皮的化学成分研究[J]. 中药材,2008,31(12):1816-1819.
LI X, TANG H Z, GOU X J, *et al.* Study on chemical constituents of the root of *Dictamnus dasycarpus* [J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2008, 31(12):1816-1819. (in Chinese)

[9] 谭仁祥. 植物成分分析[M]. 北京:科学出版社,2002:677.

[10] 杨晓娟,刘艳芳,鲍忠,等. RP-HPLC 同时测定白鲜皮中 3 种活性成分的含量[J]. 中国中药杂志,2010,35(2):187-190.
YANG X J, LIU Y F, BAO Z, *et al.* Simultaneous determination of three active compounds in root barks of *Dictamnus dasycarpus* by RP-HPLC [J]. China Journal of Chinese Material Medica,2010,35(2):187-190. (in Chinese)

[11] 周亚福,王宇超,黎斌,等. 秦岭终南山白鲜皮枞酮、黄柏酮和白鲜碱含量的测定[J]. 基因组学与应用生物学,2016,34(2):1-5.
ZHOU Y F, WANG Y C, LI B, *et al.* Determination of the contents of fraxinellone, obacunone and dictamnine in Dictamn Cortex of Qinling Mountains [J]. Genomics and Applied Biology,2016,34(2):1-5. (in Chinese)

[12] 董娟娥,张靖. 植物中环烯醚萜类化合物研究进展[J]. 西北林学院学报,2004,19(3):131-135,142.
DONG J E, ZHANG J. Advances in the research of iridoids occurring in plants [J]. Journal of Northwest Forestry University,2004,19(3):131-135,142. (in Chinese)

[13] 马惠芬,和丽萍,郎南军,等. 麻疯树树皮的挥发性化学成分研究[J]. 西北林学院学报,2011,26(4):180-183.
MA H F, HE L P, LANG N J, *et al.* Volatile components *Jatropha curcas* barks[J]. Journal of Northwest Forestry University,2011,26(4):180-183. (in Chinese)

[14] 吕迪,王得祥,谢小洋,等. 油松释放萜烯类挥发性成分研究[J]. 西北林学院学报,2016,31(1):231-237.
LYU D, WANG D X, XIE X Y, *et al.* Terpene volatile components released from *Pinus tabulaeformis* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(1):231-237. (in Chinese)

[15] 胡正海,苏红文. 西洋参根的形态发育与主要药用成分积累的关系[J]. 中草药,1996,27(9):162-164.

[16] 谭玲玲,胡正海,蔡霞,等. 北柴胡营养器官中主要化学成分的组织化学定位及其含量比较[J]. 分子细胞生物学报,2007,40(4):214-222.
TAN L L, HU Z H, CAI X, *et al.* Histochemical localization and the content compare of main medicinal components of vegetative organs in *Bupleurum chinense* DC[J]. Journal of Molecular Cell Biology,2007,40(4):214-222. (in Chinese)

[17] 王子刚,于海娇,秦梦,等. 东北地区野生白鲜皮 3 种药用成分含量分析[J]. 河北农业科学,2014,18(3):79-81,100.