异型模压包装材料弹性模量的构成和刨花形态分析

张云秀[1]，关小平[2]
(1.天津职业大学，天津 300402；2.东北林业大学，哈尔滨 150040)

摘要：应用现代包装材料设计理论，从微观角度研究了木质包装材料的特性，构造出了具有自主知识产权的新型木质包装材料——异型模压包装材料。定性地分析了异型模压包装材料形成后，物理和力学参数变化的本质原因，定量地给出了刨花尺寸、微米化程度、铺装状态、施胶状态等因素对异型模压包装材料弹性模量的影响。通过对理论公式进行试验验证分析，证明了异型模压包装材料性能的优越性，并对其强度的提高做出了定量的标定。

关键词：细胞；刨花；重构；高压缩比；异型模压包装材料
中图分类号：TB484.2；TB487　**文献标识码**：A　**文章编号**：1001-3563(2012)09-0041-05

Analysis on Composing of Elastic Modulus of Heterotype Molded Packaging Material and Shaving Shape

ZHANG Yun-xiu[1]，*GUAN Xiao-ping*[2]
(1. Tianjin Vocational Institute，Tianjin 300402，China；2. Northeast Forestry University，Harbin 150040，China)

Abstract：The features of wood packaging material were studied in microstructure view according to the theory of modern packaging material design. A new wood packaging material，heterotype molded packaging material，with independent intellectual property was developed. The causes of changes of physical and mechanical parameters of the material after molded were analyzed qualitatively. The influences of shaving size，micron degree，veneer condition，and glue condition on the material were given quantitatively. The theoretical formulas were validated with experiments，which confirmed the advantages of heterotype molded packaging material and gave the quantitative demarcation in strength.

Key words：cell；shaving；reconsitution；high compression ratio；heterotype molded packaging material

在现代木材加工技术中，如何通过改变木材刨花结构形式的方法构造出高强度新型包装材料一直是重要研究方向[1-3]。在对包装材料的研究中发现，木质材料作为包装材料时提高其承重能力尤为重要，大型承重包装材料组合通常需要异型结构，在特定场合使用的包装材料往往需要材料本身具有各向异性的性能，而在所有材料中，经过特殊处理的木材最能适应这些需求。文中从微观角度研究了木材刨花结构形式对木质包装材料强度的影响，从基础理论研究入手，结合实验论证，推出了具有我国自主知识产权的新型木质包装材料——异型模压包装材料，这种新型包装材料具有高强度、高压缩比的特性[4]，在特定场合可以替代实木和塑料，满足了人们对高性能包装材料的追求。

1　构造高压缩比异型模压包装材料的条件

木材细胞壁的密度一般可以达到 1.53 g/cm^3，由于木材细胞组织呈现六棱形空心形状，因此大多数木材的密度仅约 0.5 g/cm^3，木材细胞结构的这一特点导致了木材的弹性模量降低、强度不高。因此，如果通过某种方法人为地将木材细胞的空腔消除，并将空

收稿日期：2011-12-15
基金项目：林业公益性行业科研专项(201004007)；国家自然科学基金(30800869)
作者简介：张云秀(1979－)，女，天津人，硕士，天津职业大学讲师，主要从事数控技术的教学和研究。

腔内影响强度的胶液体和节子类等缺陷剔除，并改变细胞的排列方式，可以大幅度地提高木质包装材料的强度。

随着微纳米技术的发展，木材的超薄刨花加工已不是难题，可以通过改变木材细胞的裂解方式来获得完全没有缺陷的超薄刨花，再利用异型模压技术将超薄刨花进行重构加工，理论上就可以制造出高强度高压缩比的异型模压包装材料。这种由木质包装材料重构得到的新型包装材料已经超出了传统木材的概念[5-7]。

2 异型模压包装材料与传统木质包装材料的区别

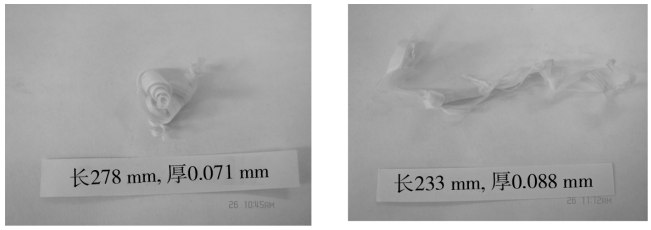
传统高压缩比木质包装材料加工主要依靠提高胶料比例和减少刨花尺寸及缝隙的方法来提高压缩比，若进一步提高压缩比往往以木粉为原料主体。

异型模压包装材料的加工过程中，需要将刨花加工的端面尺寸控制在微米级，理论上，压碎细胞所需的能耗巨大，而细胞的纵向劈裂则相对容易。因此，在加工时先通过劈裂的方式去除掉细胞空腔，再将去掉细胞空腔的刨花进行重构压缩，通过这种方式得到的高压缩比板强度高于普通高压缩比板。

3 实验

通过对现有木质包装材料的刨花单元分析发现，对于各种碎料板来说，板种差别的实质是刨花单元形态的差别，如人造板的刨花单元最细、重组木的刨花单元最粗、均质刨花板的刨花单元厚度尺寸一致性最好、华夫板的刨片最大等。这些板材在强度、握钉力等性能上表现出来的差异本质上也是由刨花单元尺寸的差异造成的。因此，研究提高木质包装材料性能可以从研究刨花单元入手，研究如何剔除木材的天然缺陷，彻底消除各种刨花形态对木质包装材料性能的影响，增加其在强度和物化性能方面的优势。这也是从理论上确定高强度异型模压包装材料刨花最优形状的基础。

将异型模压包装材料刨花单元的厚度定义为细胞外径的 0.4～0.95 倍，这一要求可以通过超薄刨花刨切技术实现。定义刨花单元的宽度在 16～25 mm 之间，这是借鉴了 OSB 的特性，在保证纵向高强度的同时，提高横向拉伸强度。在长度方面，应在保证顺纹切削的条件下尽可能长，调查发现，刨花长度至少要达到 30 mm 才可以使重构后材料产生稳定的高强度，因此定义异型模压包装材料刨花长度为 60～160 mm。满足以上条件，理论上可以使异型模压包装材料的弹性模量和静曲强度达到最大。上述参数中刨片的厚度在实际加工中最难达到，对红松和毛白杨 2 个树种分别进行了超薄刨花刨切实验，实验中红松削片最薄可达 0.071 mm，毛白杨最薄可达 0.088 mm，均可以达到要求的异型模压包装材料理想刨花的厚度。红松和毛白杨刨切加工后达到尺寸要求的刨花照片见图 1。形成微米长刨花以后，会出现图 2 所示的絮状结构。



a 红松 b 毛白杨

图 1 红松和毛白杨经过超薄刨花加工后的木质包装材料

Fig. 1 Picture of wood packaging material when populus tomentosa was ultra-thin cut

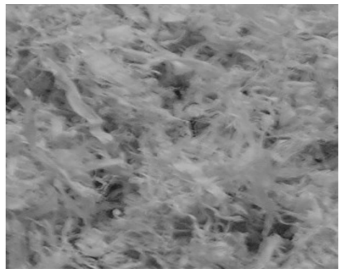


图 2 刨花加工到超薄刨花时的絮状结构

Fig. 2 Flocculent structure of wood shavings after ultra-thin cut

超薄刨花木质包装材料压制成型后的异型模压包装材料试件见图 3，因其材料的铺装是随机的，因此在材料的主平面内异型模压包装材料的强度在理论上是相同的。

4 弹性模量的理论分析

假设异型模压包装材料强度计算单元满足复合材料力学中的横观各向同性条件，则异型模压包装材

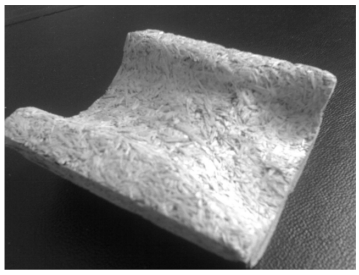


图 3　异型模压包装材料试件图像

Fig. 3 Specimen image of the heterotype molded packaging material

料在受外力作用后,应力和应变之间存在下列关系:

$$\begin{bmatrix}\varepsilon_r\\ \varepsilon_t\\ \varepsilon_l\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\frac{1}{E_{rt}} & -\frac{\lambda_{rt}}{E_{rt}} & -\frac{\lambda_{rl}}{E_l}\\ -\frac{\lambda_{rt}}{E_{rt}} & \frac{1}{E_{rt}} & -\frac{\lambda_{rl}}{E_l}\\ -\frac{\lambda_{rt}}{E_{rt}} & -\frac{\lambda_{rl}}{E_{rt}} & \frac{1}{E_l}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\delta_r\\ \delta_t\\ \delta_l\end{bmatrix} \tag{1}$$

$$\begin{bmatrix}\gamma_{rt}\\ \gamma_{rl}\\ \gamma_{tl}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0 & 0 & \frac{2(1-\lambda_{rt})}{E_{rt}}\\ 0 & \frac{1}{G_{rt}} & 0\\ \frac{1}{G_{rt}} & 0 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\tau_{tl}\\ \tau_{rl}\\ \tau_{rt}\end{bmatrix} \tag{2}$$

式中:E_{rt}为 XOY 平面内的弹性模量;E_l 为 Z 向弹性模量;ε_n 为 n 方向上的应变;λ_{nm}为应力在 n 方向横向应变的泊松比;δ_n 为 n 方向上的正应力;γ_{nm}为 n,m 平面内的切应变;τ_{nm}为 n,m 坐标轴中的切应力;$n=r,t,l,m=t,l,r$。

异型模压包装材料为随机铺装,因此刨花的初始分布方向是任意的,但经压力作用后,绝大多数刨花的走向在平行于 XOY 的平面内,仅有少量刨花是在 Z 向分布的,因其数量极少,可以忽略不计,因此假设压制后刨花走向完全平行于 XOY 平面。在此前提下,可以设在 XOY 平面内各方向上 E_{rt} 相同,但异型模压包装材料的 E_{rt}和木质包装材料主方向弹性模量 E_l 的方向是不同的,如果将 E_l 投影到 E_{rt}的方向上,并在整个平面积分,积分后应该满足如下关系[8]:

$$E_{rt}\approx 0.212E_l=E_{rt}^1 \tag{3}$$

式(3)相当于在 E_{rt}的方向上求 E_l 的平均值,因此可以将 E_{rt}^1设为刨花在 E_{rt}方向的弹性模量,则模型可以假设成完全由 E_{rt}^1构成的定向异型模压包装材料。由式(3)也可得出结论:理论上随机铺装的异型模压包装材料的强度相当于定向铺装构成的异型模压包装材料强度的 21.2%。

5　弹性模量提高的微观力学解释

式(3)解释了由于铺装引起的单根刨花单元弹性模量的方向变化导致总体弹性模量下降这一理论,但式(3)仅能近似地、定性地反映原料材种和刨花铺装方向的改变对异型模压包装材料力学性能中弹性模量的影响,没有反映加工过程中其它因素对弹性模量的影响。实际上,整个木质包装材料的加工过程中,刨花的尺寸、密度、施胶量、胶合程度等因素对异型模压包装材料的弹性模量的影响都是不容忽视的。因此,推导异型模压包装材料的弹性模量仅靠式(3)是不严密的,需要重点讨论其他因素对异型模压包装材料弹性模量的影响。

胶量配比对异型模压包装材料弹性模量的影响可以借助式(4)进行计算[9]:

$$E_{rt}\approx V_m(E_{rt}^1+E_gK) \tag{4}$$

式中:E_g 为胶料的弹性模量;V_m 为木质包装材料的体积率;K 为胶料与包装材料的体积比,即施胶率。在实际工程中 E_g 很难测得,使用脲醛胶时 E_g 约为 E_l 的 1.3 倍。

木质包装材料微米化之后对木材弹性模量的影响可以通过引入强度增加系数 R 来说明:

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

式中:ρ 为木质包装材料的密度;Φ 为超薄刨花木质包装材料的孔穴压缩变化率。

当由超薄刨花组成的木质包装材料压成异型模压包装材料的孔穴大于原来材种的细胞孔穴比值时,$\Phi>0$;小于原来材种的细胞孔穴比值时,$\Phi<0$;两者相等时,$\Phi=0$。

系数 R 能够定量地反映出超薄刨花木质包装材料压缩程度对弹性模量的影响。当用超薄刨花木质包装材料压制出轻质低密度刨花板时,该板对弹性模量的影响可以通过 R 反映出来,当压制出高压缩比刨花板时,可以通过 R 反映出板材强度增强的比例数。

木质包装材料施胶后,刨花与胶料的胶合程度会对压缩后材料的强度产生影响,因此引入木质包装材料与胶料的胶合系数 ξ,ξ 在 0～1 之间变化,当刨花和胶完全胶合时,$\xi=1$;当刨花和胶没有胶合时,$\xi=0$;当刨花和胶的胶合的状态不均时,ξ 值由实验标定。

在实际加工中,异型模压包装材料经压缩后刨花

在 Z 向仍有分布,不可能完全是直的,也会对异型模压包装材料的强度产生影响。因此,引入不直系数 L,L 也在 0～1 之间变化,当刨花完全是的直的,Z 向没有分布时,L＝0;当刨花不直,Z 向也有分布时, L≠0,其值由实验标定。

一般情况下 ξ 和 L 是不能用理论公式表达的,需要通过检测和标定。

将上述对弹性模量产生影响的因素代入到式(4)可得:

$$E_{rt} \approx RE_1 V_m \xi(1.3K+0.212L) \quad (6)$$

木质包装材料的压缩量也会对异型模压包装材料的强度产生影响,可以通过下面 2 个式子体现:

$$C_y = V_m v_y / v_m \quad (7)$$

$$C_g = KV_m v_y / v_g \quad (8)$$

式中:C_y 为异型模压包装材料压缩比;v_m 为刨花自然状态下体积;C_g 为胶料压缩比;v_g 为胶料自然状态下体积;v_y 为异型模压包装材料体积;

将式(7),(8)代入式(4),基本可以定量描述压缩量对 E_{rt} 的影响。由于压缩后的木质包装材料密度和体积成反比,因此也可以定量地描述出压缩后木质包装材料的密度对异型模压包装材料强度的影响。

6 理论公式的验证

结合上述理论研究,选用红松作为实验树种,利用实验室设备加工出了异型模压包装材料的试件(见图 3)。此试件为非定向铺装形式,经过测试,其弹性模量已经达到 5 171 MPa,超过优等的人造板材,握钉力可以达到 1 933 N、静曲强度达到 39 MPa。据此可以推定,如果采用定向铺装方式,试件的弹性模量将能超过普通 OSB 主方向弹性模量。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包装材料。

红松的弹性模量是 9 800 MPa,由式(3)可得 E_{rt}＝2 058 MPa。这个数值和红松刨花板的弹性模量近似。考虑到胶的影响,取 V_m＝0.9,K＝10%,代入式(4)可以求得 E_{rt}＝2 113 MPa,和科尔曼试验求得的统计结果近似[10]。

通常情况下,经过铺装施压以后少数刨花在 Z 向的分布对材料强度影响的程度不大,假设影响不超过 5%,则取 L＝0.95。设加工过程中,异型模压包装材料的刨花与胶料达到充分结合状态,胶料接触系数 ξ＝1,取施胶率 K＝10%,再根据实验得出的 E_{rt}＝5 171 MPa,就可以从式(6)反推出木质包装材料微米化强度增加系数 R＝1.77。在相同工艺的条件下,进行刨花微米化处理以后的异型模压包装材料的弹性模量比处理前提高 77%,比国家标准的优质板提高 113%,而单位密度弹性模量比国家标准优质板提高 65%。同理,将上述条件代入式(5),得到超薄刨花木质包装材料的孔穴压缩变化率 Φ＝2.4,这个数值可以定量地反映出异型模压包装材料刨花加工到微米以后对强度产生的影响。随着异型模压包装材料实验数据的累积,这个数值可以更准确地标定,从而充分体现异型模压包装材料的优越性。

7 结论

从木材细胞的微观角度出发,定性地解释了异型模压包装材料形成后物理和力学参数变化的本质原因。在满足复合材料力学中的横观各向同性假设下,给出异型模压包装材料应力和应变之间的关系,积分求出主方向木纤维的理论弹性模量,在综合分析了刨花尺寸、微米化程度、密度、孔穴压缩变化率、刨花板施胶量、整体铺装状态、胶合程度以及压缩比等因素对异型模压包装材料弹性模量的影响后,将其转化成参数与异型模压包装材料的弹性模量形成定量的数学关系和力学表达式,为异型模压包装材料复合弹性力学的微观力学理论提供了基础。

文中还通过实验的方式证明了异型模压包装材料性能的优越性,并以木质包装材料微米化强度增加系数和超薄刨花木质包装材料的孔穴压缩变化率 2 个参数对异型模压包装材料强度的提高做了定量的标定。

采用新工艺,在普通压机上很容易加工出密度超过 1 g/cm^3 的碎料板,因此可以实现在普通木质包装材料生产线上生产超高压缩比板。这一研究为小规模、高质量木质包装材料生产线的开发提供了理论依据,为开创具有中国特色的木质包装材料生产模式奠定了基础。

文中提出的异型模压包装材料弹性模量计算和实验方案仅是一种初探,许多理论和工艺问题还有待通过系统的实验进一步地修正和验证。

参考文献:

[1] 马岩.微米木纤维定向重组细胞纤维含量的定量求解理

论研究[J].生物数学学报,2002,17(3):353－357.
MA Yan. Research on Quantitative Analysis of Micron Wood Cells' Fiber Content after Directional Reconstructed[J]. Biomath,2002, 17(3):353－357.

[2] 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.
MA Yan. Prospect Nanometer and Micrometer Science and Technology for Applying to the Wood Industry[J]. Scientia Silvae Sinicae,2001,37(8):109－113.

[3] 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细胞裂解理论研究[J].林业科学,2003,39(3):111－115.
MA Yan. Study on Cell Break Theory of Using Wood Fiber Micro-meter Aligned Reconstituted Technology Forming Super High-intensity Wood-based Panel[J]. Scientia Silvae Sinicae,2003,39(3):111－115.

[4] 马岩.微米木纤维形成异型模压包装材料的理论初探[J].林产工业,2005,32(7):5－8.
MA Yan. Study on Heterotype Molded Packaging Material Formed by Micron Wood Fiber[J]. China Forest Products Industry,2005,32(7):5－8.

[5] 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.
KOLLMANN. Principles of Wood Science and Technology[M]. Beijing: China Forestry Press, 1991.

[6] 成俊卿.木材学[M].北京:中国林业出版社,1985.
CHENG Jun-qing. Wood Science[M]. Beijing: China Forestry Press,1985.

[7] 战丽,杨春梅,马岩.微纳米和微米木纤维理论研究的现状与工业化前景[J].林业机械与木工设备,2003(7):4－6.
ZHAN Li, YANG Chun-mei, MAYan. Study on Theory of Nano-micro-meter and Micrometer Wood Fiber and Its Industrialized Future [J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2003(7):4－6.

[8] 马岩.重组木力学模型及刚度参数分析方法探讨[J].东北林业大学学报,1995,23(4):107－111.
MA Yan. Discuss on Mechanical Model of Scrimber and Rigidity Parameters Analysis Method[J]. Journal of Northeast Forestry University,1995,23(4):107－111.

[9] 战丽,齐英杰,马岩,等.重组木复合刨花板截面弹性模量求解方法的研究[J].木材加工机械,2002(4): 8－11.
ZHAN Li, QI Ying-jie, MA Yan. Research on Solving Process for Transverse Section Elastic Modulus of Reconstituted Composite Particle Board[J]. Wood Processing Machinery, 2002(4):8－11.

[10] 战丽,马岩.木材细胞纤维分布与定量数学描述理论研究[J].林业机械与木工设备,2003,31(8):14－16.
ZHAN Li, MA Yan. Study on Fibers' Distributed of Wood Cell and Quantitative Mathematical Descriptive [J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2003,31(8):14－16.

(上接第 9 页)

[2] 王雅先,尉富恩.贴标质量的研究[J].内蒙古科技与经济,2004,21:67－68.
WANG Ya-xian, WEI Fu-en. Study on Quality of Labeling[J]. Inner Mongolia Scientech and Economy, 2004, 21:67－68.

[3] 杨绮云,李为涛.贴标机供标机构的动力学分析及控制系统设计[J].包装工程,2006,27(5):45－47.
YANG Qi-yun, LI Wei-tao. Dynamical Analysis and the Design of Control System of the Paper Deliver Mechanism of the Label machine[J]. Packaging Engineering, 2006,27(5):45－47.

[4] 吴群波,王知行,张益民.基于虚拟现实的计算机辅助组合机构设计研究[J].机械设计,1998,15(11):17－19.
WU Qun-bo, WANG Zhi-xing, ZHANG Yi-min. Research into the Computetr Aided Compound Mechanisms Desigh Based on Virtual Reality[J]. Machine Design, 1998,15(11): 17－19.

[5] LI S, PETZOLD L. Software and Algorithms for Sensitivity Analysis of Large-scale Differential-algebraic Systems[J]. Journal of Comp and App Math, 2000, 13:131－145.

[6] SYRDAL A, HIRSCHBERG J, MEGORY J, et al. Automatic TOBI Prediction and Alignment to Speed Manual Labeling of Prosody[J]. Speech Communication, 2001, 33:135－151.

[7] TRYON R G, DEY A. Reliability-based Computational Model for Material Development and Structural Design [J]. International Journal of Materials and Product Technology, 2001, 16(45):333－357.

[8] 陈立平,张清云,任卫群,等.机械系统动力学分析及ADAMS应用教程[M].北京:清华大学出版社,2005.
CHEN Li-ping, ZHANG Qing-yun, REN Wei-qun, et al. Dynamic Analysis of Mechanical System and ADAMS Teaching[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.