

文章编号: 1001-411X(2001)01-0081-04

刨花板热应力的研究

李凯夫, 高振忠, 孙 瑾

(华南农业大学林学院, 广东 广州 510642)

摘要: 刨花板在制造和使用过程中, 由于温度的变化而产生热应力. 从研究结果可知, 温度每增 1 °C, 界面热应力约提高 0.026 MPa, 界面残余应力约提高 0.006 MPa, 而对应的界面结合强度约降低 0.046 MPa, 这是不容忽视的影响. 如何定性和定量评价热应力, 是降低热应力和提高界面结合稳定性的关键.

关键词: 热应力; 界面; 残余应力; 刨花板

中图分类号: S757.1

文献标识码: A

刨花板是在高温下热压而成的, 在热量的作用下胶粘剂逐渐固化, 刨花与胶粘剂结合为一个整体. 因二者的热膨胀系数和材料自身的性能不同, 在降至室温过程中, 尽管刨花板处于不受力的状态, 而在刨花、胶层以及界面上都产生不容忽视的不均匀微观热应力; 刨花板在不同环境下使用时, 因温度变化也会产生热应力, 此现象称为刨花板的热效应^[1,2]. 刨花板的界面化学组分、分子排列、热性能、力学性能可以呈现出梯度性渐变或突变的特征^[3]. 2 种或多种材料复合过程中, 出现的界面热应力将直接影响材料的物理力学性能和功能^[4]. 为了制得性能稳定的刨花板, 通过调节刨花和胶粘剂热膨胀系数的匹配性, 设计合适的热效应界面层是制板的关键技术. 建立定量表征刨花板热应力的实用技术已成为迫切解决的课题之一, 如何定性和定量评价刨花板热应力, 是降低其热应力和提高界面结合稳定性的关键. 定量描述刨花与胶粘剂的热膨胀特性, 分析热应力的影响因素, 推导刨花板因温度变化而产生的热应力, 探索热应力对界面结合强度的影响规律, 为降低刨花板的热应力提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 材料

经长材刨片机加工成山杨刨花; 经削片、刨片加工成落叶松刨花. 刨花 $w(\text{水})$ 为 2.01%. 胶粘剂为工厂用脲醛树脂胶粘剂(U-233UF)和自制脲醛树脂胶粘剂(DN-12UF), $w(\text{固体})$ 为 62% 和 61%, pH 值为 7.1 和 7.3.

1.2 热膨胀测试

刨花和胶层的热膨胀系数是单位温度下长度或

体积变化程度的参量, 综合国内外已采用的测试方法(如 ASTM D696)^[5], 结合刨花与胶粘剂特性设计的测试系统组成为: (1) 变形量通过读数显微镜直接测量, 放大倍率 160 倍, 精度为 $\pm 0.001 \text{ mm}$; (2) 采用日本差动位移传感器, 测量范围 0 ~ 10 mm, 精度为 $\pm 0.001 \text{ mm}$. 选择石英管作为测试头, 最大限度消除测试误差; (3) 由加热器、温度计、油浴箱、测试桶、热电偶、温度显示装置构成一套加热控温系统, 控温精度 $\pm 0.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 温度从室温至 240 °C; (4) 差动位移传感器产生的信号经放大、数字模式转换, 在电视屏显示膨胀量; 由热电偶直接将温度显示在屏幕上.

1.3 试验设计

采用旋转组合设计法进行设计, 山杨刨花考察因素为刨花的长度(x_1 为 1 ~ 40 mm)、刨花宽度(x_2 为 2 ~ 20 mm)、刨花厚度(x_3 为 0.2 ~ 0.6 mm)和温度(x_4 为 20 ~ 180 °C); 胶块考察因素为固化剂量(x_{11} 为 0.01% ~ 7.80%)、防水剂量(x_{21} 为 0.5% ~ 2.0%)和温度(x_{31} 为 40 ~ 120 °C). 在旋转组合设计中, 取 $m_0=6$, 共做试验 23 次, 评价指标为刨花和胶块的热应变(y 和 z).

2 结果与分析

2.1 胶粘剂热应变

旋转组合设计分析得到的 DN-12UF 热应变回代后的回归方程为:

$$z_1 = 0.104 - 0.003x_{31} - 0.014x_{11}x_{21} - 0.002x_{21}x_{31} + 1.650 \times 10^{-5}x_{31}^2 \quad (1)$$

由(1)式得到热应变极大值和极小值的条件为:

x_{11} 为 0 和 7.8%, x_{21} 为 2%, x_{31} 为 40 和 120 °C. 当温

度升高时,胶块在短时间内结构就产生变化,首先是塑性增加,水分与挥发物散发,温度越高越明显,在高温时胶块产生收缩.将 $x_{31}=100^{\circ}\text{C}$ 、 $x_{21}=1\%$ 代入回归方程(1)中,得到 x_{11} 与热应变关系: $z_1=0.104-1.38\times 10^{-2}x_{11}$,由此式可见,当 $z_1=0$ 时, $x_{11}=7.73\%$.随着 x_{11} 增大,胶块的热应变下降.固化剂的增加使胶粘剂快速固化,胶粘剂分子交联程度增大,胶块的稳定性提高.当 x_{11} 达到 7.73% 时,胶块产生热收缩,在实测过程中,发现 DN-12UF 有此特殊现象,其原因有待今后深入研究.当胶块的热应变与刨花热应变接近时,可寻求最小的界面热应力,因此,确定适宜的 x_{11} 十分重要.将 $x_{11}=4.0\%$ 、 $x_{31}=100^{\circ}\text{C}$ 代入回归方程(1)中,得到 x_{21} 与热应变关系: $z_1=0.2682-0.2172x_{21}$,由此式可见,当 $z_1=0$ 时, $x_{21}=1.23\%$.随 x_{21} 增加,胶块的热应变下降,当 x_{21} 达到 1.23% ,胶块的热应变接近 0,继续增加防水剂量,胶块将热收缩,其原因是防水剂阻碍了胶粘剂固化,这一点值得特别注意,由此次试验可以确定 x_{21} 以不超过 1.2% 为宜.

旋转组合设计分析得到的 U-233UF 热应变回代回归方程为:

$$z_2=-1.45\times 10^{-3}x_{31}-2.85\times 10^{-4}x_{11}x_{31}-4.94\times 10^{-2}x_{21}^2+6.35\times 10^{-6}x_{31}^2 \quad (2)$$

由(2)式得到热应变极大值和极小值的条件: x_{11} 为 7.8% , x_{21} 为 2% , x_{31} 为 40 和 120°C .将 $x_{31}=100^{\circ}\text{C}$ 、 $x_{21}=1\%$ 代入回归方程(2)可得: $z_2=0.08-2.85\times 10^{-2}x_{11}$,由此式可见,随 x_{11} 增加,胶块的热应变下降,下降的幅度大于 DN-12UF;当 x_{11} 达到 2.86% 时,胶块的热应变接近 0,继续增加 x_{11} ,胶块将产生热收缩,只是转变点比 DN-12UF 来得快些,说明 U-233UF 热稳定性比 DN-12UF 差.

2.2 刨花热应变

旋转组合设计分析得出山杨刨花长度热应变的回代回归方程为:

$$y_1=0.003-1.466\times 10^{-3}x_1+1.283\times 10^{-4}x_4+0.003x_1x_3-3.250\times 10^{-6}x_1x_4-2.656\times 10^{-4}x_3x_4 \quad (3)$$

由(3)式得到热应变极大值和极小值的条件: x_1 为 40.00 和 1.00 mm , x_2 为 20.00 mm , x_3 为 0.50 mm , x_4 为 180 和 20°C . x_1 即木材纤维方向,属纵向热变形,木材纵向热膨胀系数远远小于其他方向^[6].将刨花 $x_2=11.00\text{ mm}$, $x_3=0.40\text{ mm}$, $x_4=100^{\circ}\text{C}$ 代入(3)式中可简化为: $y_1=4.727\times 10^{-3}-2.884\times 10^{-4}x_1$,由此式可见,刨花长度方向的热应变与 x_1 呈负相关关系, x_1 每增加 1 mm ,热应变减小 0.029% .当 x_1 为 16.39 mm 时,热应变接近 0;在 100°C 时, x_1 在 16.39

mm 范围内,随 x_1 的增加,刨花长度方向的热应变减小,因此,适当保持 x_1 是减少长度热应变的措施之一.

旋转组合设计分析得到山杨刨花宽度热应变的回代回归方程为:

$$y_2=-3.051\times 10^{-4}+6.503\times 10^{-6}x_4-8.970\times 10^{-6}x_1^2-3.072\times 10^{-5}x_2^2 \quad (4)$$

由(4)式得到应变极大值和极小值的条件: $x_1=26.67$ 和 40.00 mm , $x_2=8.00$ 和 20.00 mm , $x_4=180$ 和 20°C .刨花的宽度多为木材径向,实木径向热膨胀系数居中,远大于纵向,小于弦向^[9].将 $x_1=15.00\text{ mm}$, $x_4=100^{\circ}\text{C}$ 代入(4)式中可简化为: $y_2=1.673\times 10^{-3}-3.072\times 10^{-5}x_2^2$.对此式求导,一阶导数为 $-6.143\times 10^{-5}x_2$,二阶导数为 $-6.143\times 10^{-5}<0$,则热应变与 x_2 呈抛物线关系,随 x_2 增大,热应变减小,当 x_2 为 7.38 mm 时,热应变接近 0,继续增宽,热应变又增大,适当增加 x_2 有利于热稳定性提高. x_2 每增加 1 mm ,热应变减小 0.031% ,比 x_1 影响要小 1 个数量级,从刨花板制造原理看, x_2 应小于 6 mm ,常规采用的 x_2 多为 $3\sim 4\text{ mm}$,此时对应的热应变(室温至 100°C 时)为 0.16% .

旋转组合设计分析得到山杨刨花厚度热应变的回代回归方程为:

$$y_3=0.098-4.331\times 10^{-3}x_2-0.223x_3-4.989\times 10^{-4}x_4+6.167\times 10^{-3}x_2x_3+1.319\times 10^{-5}x_2x_4+7.750\times 10^{-4}x_3x_4+9.723\times 10^{-2}x_3^2+4.593\times 10^{-7}x_4^2 \quad (5)$$

由(5)式热应变极大值和极小值的条件: $x_2=20.00\text{ mm}$, $x_3=0.10$ 和 0.50 mm , $x_4=60$ 和 2°C .刨花的厚度常为木材的弦向,木材的弦向热应变最大.将 $x_2=11.00\text{ mm}$, $x_4=100^{\circ}\text{C}$ 代入(5)式中可简化为: $y_3=0.019-0.088x_3+0.097x_3^2$,对此式求导,一阶导数为 $-0.088+0.194x_3$,二阶导数为 $0.194>0$,则热应变与 x_3 呈抛物线关系,当 x_3 为 0.45 mm 时,厚度方向的热应变为 1.91% .

2.3 热应力推导

根据 Turner 方程可计算热膨胀系数^[6,7],山杨刨花长、宽和厚方向热膨胀系数分别为 7.41×10^{-5} 、 4.31×10^{-5} 和 4.71×10^{-5} ;落叶松刨花热膨胀系数分别为 8.83×10^{-5} 、 5.50×10^{-5} 和 7.60×10^{-5} .落叶松刨花各向热膨胀系数都比山杨刨花大,主要原因是由于落叶松木材结构粗大,性脆,早晚材急变,抽提物含量大,材质不均,受热后结构变化较大所致;而山杨木材结构较细腻,材质均一.从刨花自身质量

看, 落叶松刨花表面比山杨刨花粗糙. 从加工方式看, 落叶松刨花经削片和刨片加工而成, 结构较疏松; 而山杨刨花是经长材刨片机加工而成, 表面光滑, 结构紧密, 从显微镜观察可明显看出二者表面的差异. U-233UF 和 DN-12UF 的热膨胀系数分别为 1.08×10^{-3} 和 1.09×10^{-3} , DN-12UF 的热膨胀系数比 U-233UF 的热膨胀系数稍大, 它们的热膨胀系数与刨花相差较大, 它们与刨花结合后, 遇热或降温时将产生热应力. DN-12UF 在 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上变软, 这有利于缓解胶层与刨花间的热应力; U-233UF 在 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上变硬, 这将会造成热应力增大. 在常温状态使用时, 刨花板内的胶层和刨花均无热应变, 当被加热后, 若胶层和刨花以独立状态存在时, 胶层热应变为 ϵ_{m}^t , 刨花热应变为 ϵ_{f}^t , ϵ_{m}^t 大于 ϵ_{f}^t ; 但由于胶层和刨花互相牵制, 胶层的热应变从 ϵ_{m}^t 降至 ϵ_{m}^{Ot} , 刨花的热应变从 ϵ_{f}^t 增至 ϵ_{f}^{Ot} , 由此胶层受到压应力 (σ_{m}^R)、刨花受到拉应力 (σ_{f}^R), 在板材内产生残余热应力 $\sigma_{\text{m}}^R = \sigma_{\text{f}}^R$, 刨花板最终的应变 ϵ_{f}^O 称为热应变. 当刨花板的温度升高 Δt , 其纵向与横向的应变分别为 ϵ_{L}^t 和 ϵ_{T}^t , 刨花在纵、横方向的变形分别为 $\alpha_{\text{fL}} \Delta t$ 和 $\alpha_{\text{fT}} \Delta t$, 刨花与胶粘剂中的应力分别为 σ_{f}^R 和 σ_{m}^R , 根据力的平衡条件和应变协调关系可得: $\epsilon_{\text{L}}^t = \epsilon_{\text{fL}}^t = \epsilon_{\text{mL}}^t$, $\epsilon_{\text{L}}^t = \alpha_{\text{fL}} \Delta t$, $\epsilon_{\text{fL}} = \sigma_{\text{f}}^R / E_{\text{fL}} + \alpha_{\text{fL}} \Delta t$, $\epsilon_{\text{mL}} = \sigma_{\text{m}}^R / E_{\text{m}} + \alpha_{\text{m}} \Delta t$, $\sigma_{\text{f}}^R / E_{\text{fL}} + \alpha_{\text{fL}} \Delta t = \sigma_{\text{m}}^R / E_{\text{m}} + \alpha_{\text{m}} \Delta t$, $\sigma_{\text{f}}^R V_{\text{f}} + \sigma_{\text{m}}^R V_{\text{m}} = 0$. 由上可推得热应力为:

$$\begin{cases} \sigma_{\text{f}}^R = E_{\text{fL}} E_{\text{m}} V_{\text{m}} [(\alpha_{\text{m}} - \alpha_{\text{fL}}) / (E_{\text{fL}} V_{\text{f}} + E_{\text{m}} V_{\text{m}})] \Delta t, \\ \sigma_{\text{m}}^R = E_{\text{fL}} E_{\text{m}} V_{\text{f}} [(\alpha_{\text{fL}} - \alpha_{\text{m}}) / (E_{\text{fL}} V_{\text{f}} + E_{\text{m}} V_{\text{m}})] \Delta t. \end{cases} \quad (6)$$

E_{fL} 是刨花顺纹抗拉弹性模量, E_{m} 是胶块的弹性模量, α_{fL} 是刨花纵向热膨胀系数, α_{m} 是胶块的热膨胀系数, V_{f} 和 V_{m} 分别是刨花和胶层所占的体积. 当刨花板受热时, 刨花与胶层的界面处约束力将对各组分材料产生影响, 因为 $\alpha_{\text{f}} < \alpha_{\text{m}}$, 胶层沿纵向受压, 刨花沿纵向受拉, σ_{mL}^R 、 σ_{fL}^R 增大, σ_{mT}^R 、 σ_{fT}^R 减小. 对于刨花: $\epsilon_{\text{fL}} = \sigma_{\text{fL}}^R / E_{\text{fL}} - V_{\text{f}} \sigma_{\text{fT}}^R / E_{\text{fL}} + \alpha_{\text{fL}} \Delta t$ (纵向), $\epsilon_{\text{fT}} = \sigma_{\text{fT}}^R / E_{\text{fT}} - V_{\text{f}} \sigma_{\text{fL}}^R / E_{\text{fT}} + \alpha_{\text{fT}} \Delta t$ (横向); 对于胶层: $\epsilon_{\text{mL}} = \sigma_{\text{mL}}^R / E_{\text{m}} - V_{\text{m}} \sigma_{\text{mT}}^R / E_{\text{m}} + \alpha_{\text{fL}} \Delta t$ (纵向), $\epsilon_{\text{mT}} = \sigma_{\text{mT}}^R / E_{\text{m}} - V_{\text{m}} \sigma_{\text{mL}}^R / E_{\text{m}} + V_{\text{fT}} \alpha_{\text{m}} \Delta t$ (横向). 只考虑温度效应而不考虑外力影响, 则有 $\sigma_{\text{cL}} = 0$, $\sigma_{\text{cT}} = 0$, $\tau_{\text{cL}} = 0$; 对于刨花板还应满足混合定律, 即 $\sigma_{\text{cL}} = \sigma_{\text{fL}}^R V_{\text{fL}} + \sigma_{\text{mL}}^R V_{\text{mL}} = 0$, $\sigma_{\text{cT}} = \sigma_{\text{fT}}^R = \sigma_{\text{mT}}^R = 0$; 若界面粘接很好时, 刨花板的应变与各组分材料的应变应有 $\epsilon_{\text{cL}} = \epsilon_{\text{fL}} = \epsilon_{\text{mL}}$, $\epsilon_{\text{cT}} = \epsilon_{\text{fT}} V_{\text{fT}} + \epsilon_{\text{mT}} V_{\text{mT}}$; 若界面粘接不好时, 刨花板的应变由于界面处约束减弱, 与原来状态相比则有: $\epsilon_{\text{cL}} = \epsilon_{\text{cL}} +$

$\Delta \epsilon_{\text{cL}} = \epsilon_{\text{fL}} + \Delta \epsilon_{\text{cL}}$, $\epsilon_{\text{cT}} = \epsilon_{\text{cT}} + V_{\text{cT}} \Delta \epsilon_{\text{cL}} = \epsilon_{\text{fL}} V_{\text{fL}} + \epsilon_{\text{mT}} V_{\text{mT}} + V_{\text{cT}} \Delta \epsilon_{\text{cL}}$. 现引入界面影响系数 C , 且定义: 当 $C \geq 1$ 时, 表示界面粘接良好; 当 $C = 0$ 时, 表示界面粘接不好, 通常取 $0 < C \leq 1$. 当刨花板受热后, 因为 $\alpha_{\text{f}} < \alpha_{\text{m}}$ 约束减弱, 由此引起的应变为: $\Delta \epsilon_{\text{cL}} = (1 - C)(\alpha_{\text{m}} - \alpha_{\text{f}}) \Delta t$. 在刨花板制造过程中, 因空气、污染、制造工艺条件等因素的影响, 在界面中常产生缺陷, 故设 $C = 0.8$, 可得到芯层刨花与胶层之间因界面结合有缺陷而产生的附加热应变 $\Delta \epsilon_{\text{cL}} = 18(\alpha_{\text{m}} - \alpha_{\text{f}})$, 由此产生附加的热应力可由 (6) 式得 0.47 MPa (山杨和 DN-12UF) 和 0.46 MPa (落叶松和 DN-12UF). 当采用山杨刨花与 DN-12UF 制板时, 刨花板从热压机出来降至室温后, 刨花受到的拉应力为 2.31 MPa , 胶层受到的压应力等于刨花受的拉应力, 只是符号相反; 山杨刨花与 U-233UF 产生的热应力为 2.30 MPa ; 落叶松刨花与 DN-12UF 产生的热应力为 2.26 MPa ; 落叶松刨花与 U-233UF 产生的热应力为 2.22 MPa .

3 结论

综上所述, 因刨花与胶层特性不同而产生的热应力和因界面薄弱而产生的界面附加热应力已达到了不容忽视的程度. 在刨花板制造过程中, 板材芯层产生的热应力约为 2.30 MPa , 芯层温度越高, 热应力越大; 因界面缺陷而产生的附加热应力约为 0.46 MPa . 通过定量分析热应力的变化及其影响因子的作用可知, 当温度为 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 对应的界面热应力为 0.64 MPa , 界面附加热应力约为 0.13 MPa , 不论胶种如何, 当与山杨刨花胶合后得到的界面结合强度为 $3.00 \sim 3.74\text{ MPa}$; 当温度为 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 对应的界面热应力达到 $2.20 \sim 2.30\text{ MPa}$, 界面附加热应力约为 0.46 MPa , 对应的界面结合强度降至 $0.23 \sim 0.34\text{ MPa}$. 可见, 温度每增 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 界面热应力提高约 0.026 MPa , 界面附加热应力约增加 0.006 MPa , 界面结合强度降低约 0.046 MPa , 这是不容忽视的影响. 由此可见, 根据不同的树种和刨花类型, 确定适当胶种与调胶配方, 控制刨花尺寸是确保界面结合强度和减小热应力的关键技术.

参考文献:

[1] 沃丁柱. 复合材料大全[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000. 218—226.
[2] 王震鸣. 复合材料力学和复合材料结构力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1991. 126—148.
[3] DRZAL L T, RICH M J, LLOYD P E. Adhesion of fibers to epoxy matrices. I. The role of fiber surface treatment[J]. Jour-

nal of Adhesion, 1982, 122(16): 1—8.

[4] HERRA P J, DRZAL L T. Comparison of methods for the measurement of fiber/matrix adhesion in composites[J]. Composites, 1992, 28(2): 1—7

[5] JOHN W. 塑料测试手册[M] . 徐定宇等译. 北京: 中国石化出版社, 1992. 70—82.

[6] 成俊卿. 木材学[M] . 北京: 中国林业出版社, 1985. 465—504.

[7] 渡边治人. 木材应用基础[M] . 张勤丽译. 上海: 上海科学技术出版社, 1986. 239—262.

Study on the Heat Stress of Particleboard

LI Kai-fu, GAO Zhen-zhong, SUN Jin

(College of Forestry, South China Agric. Univ., Guangzhou 510642 China)

Abstract: Heat stress was created in the course of manufacturing and using particleboard because of changed temperature. The regression results showed as far as the temperature was increased 1 ℃, the interface heat stress rose about 0. 026 MPa, the interface remnant stress rose about 0. 006 MPa, while interface combination strength decreased by 0. 046 MPa. This influence is too significant to ignore. How to evaluate heat stress quantitatively as well as qualitatively is critical to lowering heat stress and raising the stability of interface combination.

Key words: heat stress; interface; remnants’ stress; particleboard

【责任编辑 周志红】

简讯

“九五”期间华南农业大学科研课题数量和经费稳步上升

1996 年以来, 华南农业大学的科研工作取得了显著的进展, 科研实力和水平有了明显提高, “九五”期间华南农业大学共承担科研课题 1 206 项, 到位经费总数达到 8 089 万元, 其中国家科技攻关项目 44 项, 国家部委重点课题 82 项, 国家自然科学基金 77 项, 省科委、省重点课题 77 项。1996 年在研课题 583 项, 经费 824 万元; 1997 年在研课题 567 项, 经费 1 101 万元; 1998 年在研课题 639 项, 经费 1 772 万元; 1999 年在研课题 665 项, 经费 1 909 万元; 2000 年度在研课题共计 667 项, 到位经费 2 483 万元, 其中国家攻关课题 42 项, 经费 328 万元; 国家部委重点课题 50 项, 经费 290 万元; 国家自然科学基金 57 项, 经费 429 万元; 省科委、省重点 66 项, 经费 641 万元; 省基金课题 91 项, 经费 757 万元。

华南农业大学比较突出和有特色的研究领域有: 农业生物技术; 主要农作物、动物和经济林木遗传育种工程及其配套技术; 热带、亚热带果蔬贮运保鲜工程; 植物和动物营养生理及其调控的研究; 动植物病虫害防治技术体系研究; 农业经济研究; 农业机械化的研究; 持续农业与农业生态学研究等。

科技处严会超供稿