

# 胶合板胶合强度与厚度结构关系的研究

叶克林

(中国林科院木材工业研究所)

## 摘 要

本文以单搭接胶合检验理论对胶合板胶合强度试件受力时所产生的应力进行了分析。结果表明,试件上存在着平行于外载 $P$ 的表板拉伸应力和芯板剪切应力、以及垂直于外载 $P$ 的胶合面剥离应力。这三种应力的分布都不均匀,最大值均出现在槽口部位;在厚度结构因素中,厚度比对应力集中系数的影响最大;在生产条件下,表板厚度对应力集中系数的影响可忽略。

对水曲柳、柳桉和榉木三种树种搭配的三层胶合板在一定的厚度比范围内进行了胶合强度测定。厚度比与胶合强度测定值的关系可由二次方程表示,由此得出厚度系数方程和厚度系数。在考虑厚度系数时应注意树种差异。

## A Study on the Curing Reaction of UF Resin with $\text{NH}_4\text{Cl}$ Hardener by DSC

Liu Ruogong

(Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry)

## Abstract

The curing reaction of two kinds of UF resins has been studied, namely, for plywood ( $F/U=1.7$ ) and for particleboard ( $F/U=1.63$ ), in the presence of  $\text{NH}_4\text{Cl}$  hardener. The result shows that there is a clear exothermic peak below  $100^\circ\text{C}$  with  $\text{NH}_4\text{Cl}$ . The temperature of the peak ( $T_p$ ) hardly changes at a definite time range, but the exothermic heat ( $\Delta H$ ) and the height of the peak lower with time. The  $T_p$  lowers and the height of the peak rises with increase of  $\text{NH}_4\text{Cl}$  amount, when the amount is about 1.5% (based dry resin) both of them are no change.

The exothermic peak is concerned with the disappearance of the group  $-\text{CH}_2\text{OH}$ , and then a primary curing reaction of UF resin takes place. The curing reaction order is 1.5, the active energy is  $80 \text{ KJ/mol}$  with 1.7%  $\text{NH}_4\text{Cl}$  (based dry resin) according to Kissinger's method by DSC.

## 前言

在胶合板胶合强度检验中,试件受力模型为纯拉伸剪切,实际上,试件上还附加了一个由于拉伸力不在同一轴线所产生的力矩和由于试件发生弯曲变形所产生的剥离力。此力矩和剥离力的大小因胶合板厚度结构的变化而变化,对胶合强度测定值产生不可忽视的影响。推行表板改薄工艺后,为保证胶合板产品一定的厚度,必须相应增加芯板的厚度,这样,弯曲力矩和剥离力的影响更为严重。因此,根据胶合板芯、表板厚度比(以下简称厚度比),一些胶合板标准制定了相应的厚度系数<sup>[1,2]</sup>,对胶合强度测定值进行修正。

胶合板厚度结构对胶合强度测定值的影响是一个比较复杂的问题,研究报道不多。柳下正对不同厚度结构的胶合板进行抽样检验<sup>[3]</sup>,根据厚度比提出了厚度系数,得到日本农林省的批准,作为日本普通胶合板标准执行。但柳下正提出的厚度系数仅考虑了厚度比因素,而忽略了另一厚度结构因素——表板厚度,对此也无任何解释。岡田直祐也认为<sup>[4]</sup>,单纯根据厚度比来决定厚度系数理由不充分。迄今为止,表板厚度对厚度系数的影响既未得到肯定,也未得到否认。



单板单搭接胶合试件



胶合板试件

图1 单板单搭接胶合和胶合板试件拉伸剪切示意图

均匀分布,试件破坏从应力集中的搭接端部开始;被粘物上存在着平行于外力的拉伸应力,胶层中存在着平行于外力的剪切应力,胶合面上存在着垂直于胶合面的剥离应力。相应的应力集中系数分别为:

拉伸应力集中系数:

$$\eta_{\sigma t} = \frac{\sigma_{拉} + \sigma_{弯max}}{\sigma_{t平均}}$$

本研究试图从应力分析入手研究厚度结构因素对胶合强度测定值的影响,根据应力分析结果进行实验和分析,提出胶合板胶合强度厚度系数,供我国胶合板标准修订时参考。

## 一、胶合板胶合强度试件应力分析

胶合板胶合强度试件(以下简称试件)至少包括两层顺纹方向单板、一层横纹方向单板和两个胶层。因为胶层非常薄,一般只有0.001—0.03mm<sup>[5]</sup>。因此,在讨论试件厚度结构影响时,胶层厚度可忽略不计,试件简单的由两层表板和一层芯板组成。

科尔曼指出<sup>[6]</sup>,胶层中的应力并非完全均态,应力最大值取决于胶合构件的几何形态,最大应力值引起胶合失效;并决定了整个胶层的强度。影响最大应力值的结构因素即为胶合强度测定值的结构因素,对其进行分析研究,可确定厚度结构对胶合强度测定值的影响。

观察单搭接胶合拉伸剪切状态和试件承受拉伸载荷时的状态可以发现,二者非常近似,见图1。因此,认为二者具有基本相同的应力分布。

单搭接胶合检验理论认为<sup>[7]</sup>,加载测试剪切时应力集中在搭接头端部,应力呈不

剪切应力集中系数:

$$\eta_{\tau} = \frac{\beta \cdot L}{8 \cdot T} (1 + 3K) \coth \frac{\beta \cdot L}{2 \cdot T} + \frac{3}{4} (1 - K)$$

式中:  $\beta$ ——系数

L——搭接长度

T——被粘物厚度

K——力矩系数

剥离应力集中系数:

本研究由孟宪树研究员指导,王培元、曹忠荣先生和施建平同志对本文提出宝贵意见,谨志谢忱。

$$\eta_{\sigma} = \lambda \cdot K \cdot \left( \frac{\sinh 2\lambda - \sin 2\lambda}{\sinh 2\lambda + \sin 2\lambda} \right) + 2 \cdot \lambda \cdot K' \cdot \left( \frac{\cosh 2\lambda + \cos 2\lambda}{\sinh 2\lambda + \sin 2\lambda} \right)$$

式中:  $K'$ ,  $\lambda$ ——系数

试件应力集中系数 以表板厚度  $T_f$  代替被粘物厚度  $T$ , 计算弯曲应力和力矩系数时考虑芯板厚度  $T_c$  的因素, 同时, 引入厚度比  $R = T_c / T_f$ , 注意到脲醛树脂弹性模量一般大于木材<sup>[8,9]</sup>, 可导出试件应力集中系数:

表板拉伸应力集中系数:

$$\eta_{\sigma f} = 1 + A(1 + R^2)T_f^{-1}$$

芯板剪切应力集中系数:

$$\eta_{\tau} = (1 + R)(B \cdot T_f^{-\frac{3}{2}} - C \cdot T_f^{-1}) + D \cdot T_f^{-\frac{1}{2}} + \frac{3}{4}$$

胶合面剥离应力集中系数:

$$\eta_{\sigma} = (1 + R)(E \cdot T_f^{-\frac{7}{4}} + F \cdot T_f^{-\frac{13}{4}})$$

式中:  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $E$ 、 $F$ ——试件条件一定时为常数。

以上应力分析表明, 影响试件最大应力值的厚度结构因素有厚度比和表板厚度。应力集中系数与厚度比加 1 的幂指数成单增函数关系, 与表板厚度的指数函数的倒数也成单增函数关系。在胶合板生产中, 表板厚度一般为 0.80—1.25 mm, 在此范围内, 其指数函数的倒数变化不大, 而厚度比范围一般为 1—4.5, 厚度比加 1 的幂指数则变化较大。因此, 在生产条件下, 厚度比对应力集中的影响程度比表板厚度的影响大得多, 在考虑对胶合板胶合强度测定值进行修正时, 为了实用和方便, 可不考虑表板厚度的影响, 将厚度系数作为厚度比的单值函数处理。

## 二、实验

### 1. 试验设计

根据前述分析, 确定厚度比为胶合强度测定值的单一影响因素, 选取水曲柳 (*Fraxinus mandshurica*)、椴木 (*Tilia spp.*) 和柳桉 (*Shorea spp.*) 为单板材料, 以单一树种或混合树种搭配进行随机区组单因子试验, 重复三次。

### 2. 试验材料

#### A. 单板:

| 项 目<br>树 种 | 厚度(mm)    | 含水率(%) | 幅面(cm) |
|------------|-----------|--------|--------|
| 水 曲 柳      | 1.00—3.90 | 6—8    | 35×35  |
| 椴 木        | 0.80—2.00 | 6—8    | 35×35  |
| 柳 桉        | 0.80—3.70 | 5—12   | 35×35  |

B. 脲醛树脂胶: 固含量 54—58%  
固化剂  $\text{NH}_4\text{Cl}$

### 3. 胶合板结构和树种搭配

| 代号 | 树 种 搭 配 |     | 层 数 |
|----|---------|-----|-----|
|    | 表 板     | 芯 板 |     |
| SS | 水曲柳     | 水曲柳 | 三 层 |
| LL | 柳 桉     | 柳 桉 | 三 层 |
| DL | 椴 木     | 柳 桉 | 三 层 |

### 4. 胶合工艺

#### A. 涂胶量:

| 结 构 | 双面涂胶量 ( $\text{g}/\text{m}^2$ ) |
|-----|---------------------------------|
| SS  | 280—350                         |
| LL  | 240—310                         |
| DL  | 240—310                         |

B. 涂胶方式: 芯板两面手工涂刷,

C. 陈化时间: 30—40 min,

D. 热压工艺:

| 结 构 | 热压时间(s) | 热压压力(MPa) | 热压温度( $^{\circ}\text{C}$ ) |
|-----|---------|-----------|----------------------------|
| SS  | 150—240 | 0.98      | 105±5                      |
| LL  | 120—260 | 0.78      | 105±5                      |
| DL  | 130—220 | 0.98      | 105±5                      |

卸压后放置 24 小时供测试。

### 5. 试件及测试方法

A. 试件制取如图 2。

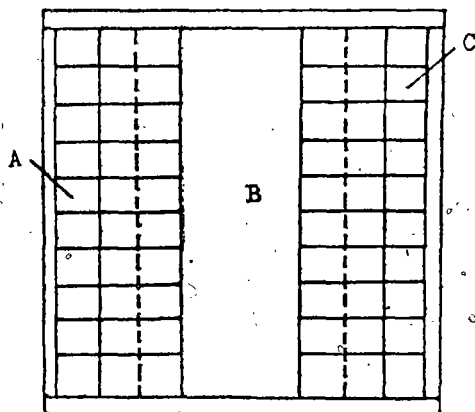


图2 试件制取示意图

图中: A—顺芯板裂隙

B—备用

C—逆芯板裂隙

## B. 测试方法及数据处理

试件在 $63 \pm 3^\circ\text{C}$ 温水中浸泡3小时,取出冷却10分钟后置于密闭塑料袋中,保证试件在湿状条件下进行拉伸剪切试验。试验时,槽口方向始终一致。记录试件最大破坏载荷,目测试件木破率。

为消除试件形状对胶合强度测定值的影响和计算上的便利,试件均为B型,不乘系数0.9。

同一水平的胶合强度测定值的平均值以 $\bar{x}$ 表示,木破率平均值以 $\bar{w}$ 表示,胶合强度测定值的最大值和最小值分别以 $x_{\max}$ 和 $x_{\min}$ 表示,变异系数以 $v$ 表示。

表1 SS结构胶合强度测试结果

| 厚度比  | 试件数 | 胶合强度 (MPa) |            |           |      | $\bar{w}$<br>(%) |
|------|-----|------------|------------|-----------|------|------------------|
|      |     | $x_{\max}$ | $x_{\min}$ | $\bar{x}$ | $v$  |                  |
| 1.00 | 58  | 1.97       | 0.88       | 1.53      | 0.18 | 58               |
| 1.50 | 60  | 1.55       | 0.78       | 1.11      | 0.12 | 73               |
| 1.74 | 56  | 1.43       | 0.55       | 1.05      | 0.17 | 72               |
| 1.87 | 53  | 1.27       | 0.47       | 0.93      | 0.18 | 70               |
| 2.23 | 53  | 1.26       | 0.31       | 0.86      | 0.17 | 58               |
| 2.73 | 53  | 1.22       | 0.45       | 0.76      | 0.18 | 62               |
| 3.30 | 57  | 0.90       | 0.39       | 0.65      | 0.15 | 66               |
| 3.57 | 57  | 0.88       | 0.33       | 0.58      | 0.15 | 91               |
| 3.73 | 60  | 0.84       | 0.35       | 0.59      | 0.16 | 51               |

## 三、试验结果与分析

### 1. 试验结果

三种供试三层胶合板的胶合强度测定结果见表1、表2和表3。

表2 LL结构胶合强度测试结果

| 厚度比  | 试件数 | 胶合强度 (MPa) |            |           |      | $\bar{w}$<br>(%) |
|------|-----|------------|------------|-----------|------|------------------|
|      |     | $x_{\max}$ | $x_{\min}$ | $\bar{x}$ | $v$  |                  |
| 1.00 | 52  | 2.20       | 1.16       | 1.74      | 0.12 | 29               |
| 1.26 | 58  | 2.35       | 1.15       | 1.57      | 0.12 | 60               |
| 1.45 | 60  | 1.86       | 1.25       | 1.61      | 0.10 | 32               |
| 1.79 | 55  | 1.79       | 0.88       | 1.33      | 0.14 | 20               |
| 2.11 | 60  | 1.24       | 0.84       | 1.04      | 0.12 | 20               |
| 2.56 | 54  | 0.98       | 0.43       | 0.71      | 0.16 | 16               |
| 3.06 | 60  | 0.84       | 0.33       | 0.60      | 0.16 | 14               |
| 3.36 | 60  | 0.78       | 0.37       | 0.58      | 0.14 | 11               |
| 4.57 | 60  | 0.73       | 0.29       | 0.56      | 0.16 | 31               |

表3 DL结构胶合强度测试结果

| 厚度比  | 试件数 | 胶合强度 (MPa) |            |           |      | $\bar{w}$<br>(%) |
|------|-----|------------|------------|-----------|------|------------------|
|      |     | $x_{\max}$ | $x_{\min}$ | $\bar{x}$ | $v$  |                  |
| 1.16 | 60  | 1.51       | 0.92       | 1.19      | 0.10 | 8                |
| 1.27 | 60  | 1.26       | 0.69       | 0.94      | 0.17 | 5                |
| 1.53 | 58  | 1.27       | 0.41       | 0.97      | 0.15 | 23               |
| 1.69 | 59  | 1.14       | 0.41       | 0.84      | 0.16 | 45               |
| 2.22 | 60  | 1.04       | 0.49       | 0.81      | 0.15 | 24               |
| 2.63 | 58  | 0.82       | 0.33       | 0.65      | 0.17 | 21               |
| 3.66 | 50  | 0.49       | 0.24       | 0.37      | 0.18 | 26               |
| 4.01 | 56  | 0.55       | 0.18       | 0.35      | 0.25 | 33               |
| 4.38 | 59  | 0.53       | 0.24       | 0.39      | 0.17 | 22               |

### 2. 方差分析

| 结 构   | SS | LL | DL |
|-------|----|----|----|
| 显 著 性 | ** | ** | ** |

注\*\*: 一高度显著

### 3. 讨论

A. 根据试验结果,将 $\bar{x}$ 乘上现行国家标准规定的厚度系数,绘成图3,为便于比较,将 $\bar{x}$ 乘上日本普通胶合板标准规定的厚度系数,绘成图4,

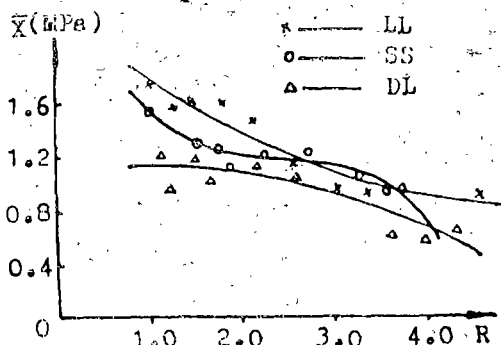


图3  $\bar{X}$ -R关系图 (GB)

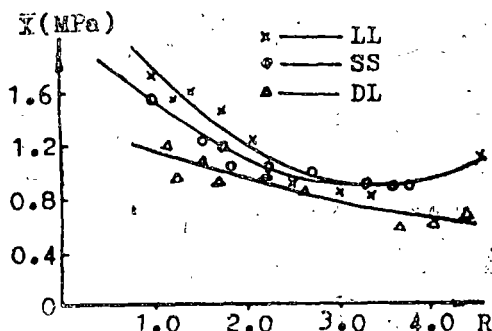


图4  $\bar{X}$ -R关系图 (JAS)

从上述结果看,即使乘上了厚度系数后,也不能全部补偿由于厚度结构的改变对胶合强度测定值产生的影响,有必要进一步深入研究。

上述试验结果还表明,胶合板树种不同或树种搭配不同,其厚度比对胶合强度测定值的影响程度是有所差异的。这可能是由供试材料本身差异所致。树种不同,其化学组成和力学性质也会不同,化学组成影响胶合,直接与绝对胶合强度有关,因此,现行国家标准对不同树种胶合板的胶合强度有不同规定<sup>[1]</sup>。而树种的力学性质差异(主要是弹性模量)则决定了试件抵抗外载产生变形的能力,弹性模量越大,其应力集中越小,胶合强度测定值相应增大。

B.以表1、表2和表3中 $\bar{X}$ 为纵坐标,以厚度比为横坐标,绘成图5。

试验结果表明,厚度比R从1开始,胶合强度测定值 $\bar{X}$ 随R的增大而下降,R达到3以后,下降趋势渐缓。SS结构胶合板当

R从1增大到2时, $\bar{X}$ 下降了34%,若R继续增大到3, $\bar{X}$ 下降了22%,R继续增大到3.75, $\bar{X}$ 只下降3%;LL结构胶合板当R从1增大到2, $\bar{X}$ 下降了40%;R继续增大到3, $\bar{X}$ 下降了22%,R继续增大到4, $\bar{X}$ 下降10%;DL结构胶合板,R从1增大到2, $\bar{X}$ 下降了31%,R继续增大到3, $\bar{X}$ 下降了22%,R继续增大到4, $\bar{X}$ 下降14%。从试验中还观察到,随着R增大,试件受载破坏方式也发生变化,从小变形以剪切破坏为主转为大变形以剥离破坏为主,特别当R大于3以后,试件受载时由于同时承受较大的弯曲力矩,表板刚性相对减弱,所以很快发生较大的旋转变形,试件多发生胶合面的剥离破坏。

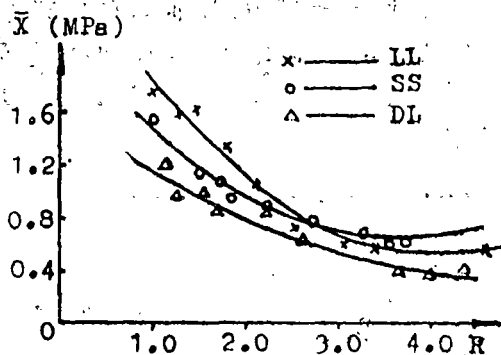


图5  $\bar{X}$ -R关系图

上述分析表明, $\bar{X}$ 与R为非线性关系。另一方面,根据前述应力分析结果,表板拉伸应力集中系数、芯板剪切应力集中系数和胶合面剥离应力集中系数与R为一次方或二次方关系。试件受载时,这三种应力集中决定了胶合强度测定值,因此,假定 $\bar{X}$ -R为二次方关系,进行回归分析和回归检验,结果见下表。

| 胶合板结构 | 回归方程 $\bar{X}(R)$                  | 显著性 |
|-------|------------------------------------|-----|
| SS    | $\bar{X}=2.2877-0.9423R+0.1321R^2$ | **  |
| LL    | $\bar{X}=2.8625-1.1730R+0.1456R^2$ | **  |
| DL    | $\bar{X}=1.6146-0.5064R+0.0495R^2$ | **  |

c.厚度系数方程 进行胶合强度修正

时，应乘的厚度系数与胶合板厚度比有关。  
以等厚结构(厚度比R为1)胶合板强度为基准<sup>[1,2]</sup>，则厚度系数方程可由下式决定：

$$\eta(R) \cdot \bar{x}(R) = \bar{x}(1)$$

式中： $\bar{x}(1)$ ——厚度比为1时的胶合强度；

$\bar{x}(R)$ ——厚度比为R时的胶合强度测定值；

$\eta(R)$ ——厚度比为R时应乘的厚度系数。

$$\begin{aligned} \text{则：} \eta(R) &= \frac{\bar{x}(1)}{\bar{x}(R)} \\ &= \frac{a + b + c}{a + b \cdot R + c \cdot R^2} \end{aligned}$$

式中：a、b、c—— $\bar{x}(R)$ 的回归方程系数  
代入前述三种混合树种搭配三层胶合板的 $\bar{x}(R)$ 及相应回归系数，得到三个厚度系数方程：

| 胶合板结构 | 厚度系数方程 $\eta(R)$                                   |
|-------|----------------------------------------------------|
| SS    | $\eta(R) = \frac{1}{1.5484 - 0.6378R + 0.0894R^2}$ |
| LL    | $\eta(R) = \frac{1}{1.5599 - 0.6392R + 0.0793R^2}$ |
| DL    | $\eta(R) = \frac{1}{1.3947 - 0.4374R + 0.0428R^2}$ |

D. 本研究结果所得厚度系数

根据三个厚度系数方程，厚度比以0.25为间隔，列出了在试验条件下三种不同树种搭配的三层胶合板的胶合强度厚度系数，详见表4。

如应力分析所示，胶合板试件应力集中受厚度比的影响程度因树种不同而异，试验结果也证实了这一点，胶合板树种搭配不同，厚度系数存在着某些差异，不可忽视。在制定厚度系数有关标准时，要考虑按树种分别取其相应的厚度系数值。胶合板为混合树种搭配时，可按搭配树种中最高指标取值。

表4 厚度系数表

| 结构<br>R | SS   | LL   | DL   | 平均值  |
|---------|------|------|------|------|
| 1.00    | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 1.25    | 1.12 | 1.13 | 1.09 | 1.11 |
| 1.50    | 1.26 | 1.28 | 1.20 | 1.25 |
| 1.75    | 1.42 | 1.46 | 1.32 | 1.40 |
| 2.00    | 1.59 | 1.67 | 1.45 | 1.57 |
| 2.25    | 1.77 | 1.91 | 1.60 | 1.76 |
| 2.50    | 1.95 | 2.18 | 1.76 | 1.96 |
| 2.75    | 2.12 | 2.49 | 1.94 | 2.81 |
| 3.00    | 2.27 | 2.80 | 2.14 | 2.40 |
| 3.25    | 2.38 | 3.12 | 2.35 | 2.62 |
| 3.50    | 2.43 | 3.40 | 2.58 | 2.80 |
| 3.75    | —    | 3.60 | 2.81 | —    |
| 4.00    | —    | 3.67 | 3.04 | —    |
| 4.25    | —    | —    | 3.25 | —    |
| 4.50    | —    | —    | 3.42 | —    |
| 4.75    | —    | —    | 3.55 | —    |
| 5.00    | —    | —    | 3.62 | —    |

四、结论及建议

1. 应力分析表明，胶合板胶合强度试件上存在着表板拉伸应力、芯板剪切应力和胶合面剥离应力。在厚度结构因素中，这三种应力集中系数主要受厚度比影响，在实际生产条件下可不考虑表板厚度的影响。
2. 试验结果表明，厚度比增大导致胶合强度测定值下降。厚度比小于3，下降趋势较大，厚度比大于3，下降趋势渐缓。
3. 厚度比对胶合强度测定值的影响视树种不同而异，建议按树种对厚度系数取值。

参考文献

- (1) 中国国家标准，1975，GB 739—75，技术标准出版社。
- (2) 日本农林标准，1977，普通胶合板，农林省告示第6号。
- (3) 柳下正…，1961，合板的接着力试验方法について，〔日〕木材工業，16 (6)。
- (4) 岡田直祐…，1960，合板直構成する単板の厚さと接着力の関係について(第1報)合板接着力補正系数について，〔日〕木材工業，15 (6)。
- (5) 李庆章译，1988，胶合板胶层区域的显微研究，森工文摘，SG881284。

(6) 科尔曼 F.F.P.著, 杨秉国译, 1984, 木材学与木材工艺学原理—人造板, 中国林业出版社。

(7) 杨玉昆等, 1980, 合成胶粘剂, 科学出版社。

(8) 钱知勉, 1980, 塑料性能应用手册, 上海科学技术文献出版社。

(9) 成俊卿主编, 1985, 木材学, 中国林业出版社。

## A Study on the Relationship between the Tensile strength and the Thickness Structure in plywood

Ye Kelin

(Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry)

### Abstract

In this article, the state of stress in tensile-shear strength-testing pieces of plywood was analyzed with the theory of single--lap joint. The results showed that there are three kinds of stresses in the testing pieces, the tensile stress in the face veneer and the shear stress in the core veneer, both of which are parallel to the load  $P$ , and the peeling stress in the adhesion surface, which is perpendicular to the load  $P$ . These stresses distribute unevenly and the maximum values all appear at the corner of kerfs. the stress concentration coefficients are mainly affected by the thickness ratio among the thickness structure factors and the effect of the face veneer thickness on the stress concentration coefficients may be ignored in practice.

Three kinds of 3-ply panels were made of Ash, Basswood and Lauan in the laboratory. The results of the tensile--shear strength test showed that the thickness ratio has considerable influence on the tensile--shear strength. The relation between them could be described with a quadratic equation which varied with species of veneers and from which the thickness coefficient equation and the thickness coefficients were made. The thickness coefficient must be of consideration with the consisting species of plywood.

### 征 订

#### 人造板胶粘剂及表面加工研讨会论文集

由中国林产工业公司、国家林业投资公司林产工业项目部和中國林学会木材工业学会于1989年4月在芜湖市召开全国人造板胶粘剂及表面加工学术研讨会。收到的论文内容包括胶粘剂及表面加工的发展方向 and 战略, 研究和生产实践的经验; 引进技术和设备的应用情况, 胶粘剂节约代用的经验和措施; 以及胶粘剂原料供应和基地建设等问题。会议委托本编辑部编辑出版论文集。该论文集共收录论文37篇, 约20万字, 于1989年11月出版, 每本酌收工本费5元(包括邮寄费)。凡需订购的单位和个人, 可将订款由邮局汇至北京颐和园中国林科院木材所《木材工业》编辑部(邮政编码100091)。并请详细写明您的通讯地址、邮政编码, 以便投寄。发票与论文集同时寄奉。

《木材工业》编辑部