

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2020077

国产落叶松正交胶合木胶层剪切强度评价

龚迎春¹, 任海青¹, 丁青锋²

(1. 中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京 100091; 2. 苏州昆仑绿建木结构科技股份有限公司, 江苏苏州 215100)



摘要: 正交胶合木 (Cross-laminated timber, CLT) 胶层剪切强度是其胶合质量评价的重要指标。依据层板模量 (8~12 GPa 为低、12~16 GPa 为中、16 GPa 以上为高)、层数 (3、5 层)、层板厚度 (15、25 mm)、组坯方向 (正交和 45°) 共设置 6 种组坯方式, 按照 LY/T 3039—2018《正交胶合木》测试 CLT 板胶层剪切强度。研究结果表明: 胶层剪切的破坏模式主要有沿着木材表面发生锯齿状剪切破坏和沿着横向层层板年轮方向剪切破坏; 加载速率对胶层剪切强度影响不显著; 除层板厚度对 CLT 板胶层剪切强度影响不显著外, 表层层板模量、层板层数、组坯方向对 CLT 板胶层剪切强度存在显著性影响。

关键词: 正交胶合木; 胶层剪切强度; 落叶松; 破坏模式; 组坯结构; 缝隙宽度

中图分类号: S781; S791.25; TS653; TU531.2 文献标识码: A 文章编号: 2096-9694 (2021) 02-0049-05

Evaluation of Bonding Shear Strength of Cross-Laminated Timber Fabricated with Domestic Larch

GONG Ying-chun¹, REN Hai-qing¹, DING Qing-feng²

(1. Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;

2. Suzhou Crownhomes Co., Ltd., Suzhou 215100, Jiangsu, China)

Abstract: The bonding shear strength of cross laminated timber (CLT) is an important index to evaluate the bonding quality of CLT. There were six kinds of layup methods including the modulus of outer laminate ($>8 \sim <12$ GPa (low), $\geq 12 \sim \leq 16$ GPa (middle), and >16 GPa (high), the number of layers (three layers and five layers), the thickness of timber (15 mm and 25 mm), and layup directions (orthogonal and inclined 45 degrees). Based on LY/T 3039—2018, the bonding shear strength of CLT plate was tested. The results showed that the main failure modes were serrated shear failure along the wood surface and shear failure along the annual ring of transverse direction of the laminate. The loading rate had no significant effect on the bonding shear strength of CLT. The MOE of outer laminate, the laminate number, and the direction of layup had significant effects on the bonding shear strength of CLT plate, except that the laminate thickness.

Key words: cross-laminated timber; bonding shear strength; *Larix kaempferi* (Lamb.) Carr.; failure modes; lay-up structure; gap width

收稿日期: 2020-05-12; 修改日期: 2021-01-27

基金项目: 国家重点研发计划“绿色建筑及建筑工业化”(2017YFC0703501); 国家木竹产业技术创新战略联盟科研计划“木竹多高层结构体系开发与设计”(TIAWBI201908)。

作者简介: 龚迎春 (1989—), 男, 助理研究员。Email: gongyingchun@caf.ac.cn

通讯作者: 任海青, 女, 研究员。Email: renhq@caf.ac.cn

正交胶合木（cross-laminated timber, CLT）是一种由 3 层或 3 层以上实木锯材或结构用木质复合材，相邻层相互垂直组坯，并采用结构胶黏剂加压预制而成的实体木质工程材，主要用于屋盖、楼板和墙体等木结构构件^[1]。CLT 相比较传统的建筑材料，更适合快速装配式建筑，具有更好双向力学性能、结构完整性、保温隔热性能、尺寸稳定性好等优势^[2-3]。目前国内外对 CLT 的研究主要集中在制备工艺^[4]、滚动剪切性能评价^[5]、连接性能^[6]、防火性能^[7]等。近几年随着市场推广力度加大、公众对 CLT 优势的认知加深，CLT 在全球发展迅速，年产量以近 15% 的速率增长^[8]，以 CLT 混合结构为代表的中高层、装配式木结构建筑已成为未来我国木结构发展的新趋势^[9-10]。为了确保 CLT 在使用寿命期间能够保持荷载传递和耐久性，有效评估 CLT 胶层的胶合质量至关重要，其中胶层剪切强度是评价 CLT 胶合质量的一个重要指标。

笔者团队已经开展了胶黏剂种类、施胶量、压力等因素对国产落叶松 CLT 胶合质量的影响的研究，确定了较优的工艺参数^[11]；在此基础上，进一步研究加载速率、层板模量、层板厚度、层板层数、组坯方向以及缝隙宽度对国产落叶松 CLT 胶层剪切强度的影响，旨在为 CLT 胶合质量评价体系的建立提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 材料

原材料选用国产落叶松（*Larix kaempferi* (Lamb.) Carr.）锯材，平均含水率为（12±0.96）%，平均密度（0.58±0.074）g/cm³。利用应力波法对 2 000 根国产落叶松锯材进行动态弹性模量测定，定义弹性模量 8~12 GPa 为低模量组，平均值为 10.33 GPa，占比 33.8%；12~16 GPa 为中模量组，平均值为 13.86 GPa，占比 49.9%；16 GPa 以上为高模量组，平均值为 16.21 GPa，占比 16.3%。

单组份聚氨酯胶，主剂为米黄色黏稠液体，固体含量 100%，黏度 9 Pa·s，外购。

1.2 主要设备

Fakopp 锯材应力波测定仪、网格型淋胶机、自主研发的冷压机、Instron 5582 万能力学试验机。

1.3 试验方法

CLT 板目标规格 2 700 mm×1 240 mm×75 mm（45 mm），重复压制 3 块。单面施胶，施胶量 200 g/m²，冷压压力 1.2 MPa，保压时间 1.5 h，制备不同组坯方式的 CLT 板（因素水平见表 1）。其中，选取 M-CLT 组，分析缝隙宽度对 CLT 胶层剪切强度的影响。

表 1 CLT 组坯方式
Tab.1 Layout of specimen

试板 编号	层板模量		组坯方向	层板厚 度 / mm	层数	CLT 厚 度 / mm
	顺纹层	横向层				
L-CLT	低模量	低模量	//-⊥-//	25	3	75
M-CLT	中模量	低模量	//-⊥-//	25	3	75
H-CLT	高模量	低模量	//-⊥-//	25	3	75
B-CLT	中模量	低模量	//-⊥-//	15	3	45
Z-CLT	中模量	低模量	//-⊥-//-⊥-//	15	5	75
X-CLT	中模量	低模量	//-45°-// 45°-//	15	5	75

注：//表示上下表层锯材顺纹组坯，⊥表示中间层锯材横向组坯，45°表示中间层锯材 45°组坯。

从 CLT 面板中随机获取 1 000 mm×300 mm（长×宽）的截面，制备胶层剪切强度试件，如图 1 所示。胶层剪切强度试件目标尺寸 60 mm×55 mm×*h*，样本数总计 252 块，每块可进行 2 次剪切试验。试件在温度（20±2）℃、相对湿度（65±5）% 环境下进行平衡处理后，参考 LY/T 3039—2018《正交胶合木》，A1~A14 试件在加载速率 3 mm/min 条件下进行胶层剪切试验，B1~B14 和 C1~C14 试件在加载速率 5 mm/min 条件下进行胶层剪切试验。

胶层剪切强度（*f_v*）计算公式见式 1。

$$f_v = \frac{F_{max}}{a \times b}$$

(1)

式中：*F_{max}*—胶层最大破坏载荷，N；*a*—胶层受剪面长度，mm；*b*—胶层受剪面宽度，mm。

2 结果与讨论

2.1 加载速率对 CLT 板胶层剪切强度影响

不同加载速率下，CLT 板的胶层剪切强度见图 2。

由图 2 可知：整体上采用 5 mm/min 进行加载的胶层剪切强度平均值小于采用 3 mm/min 进行加载的胶层剪切强度，其胶层剪切强度平均值分别

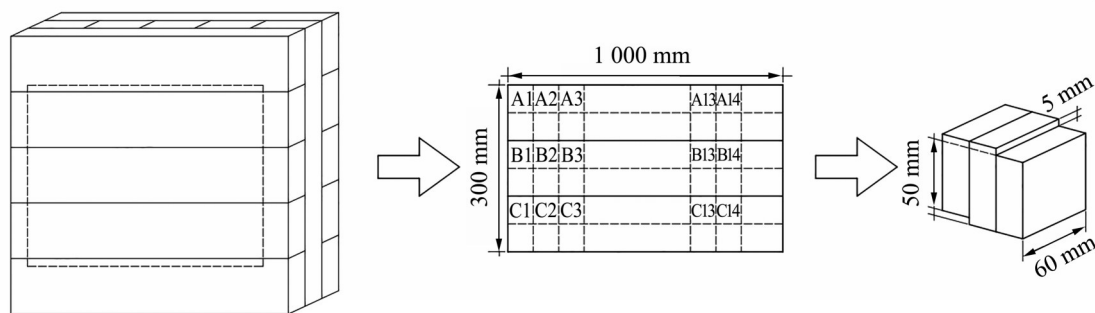


图1 CLT胶层剪切试件取样示意图

Fig.1 Diagram of bonding shear specimen of CLT

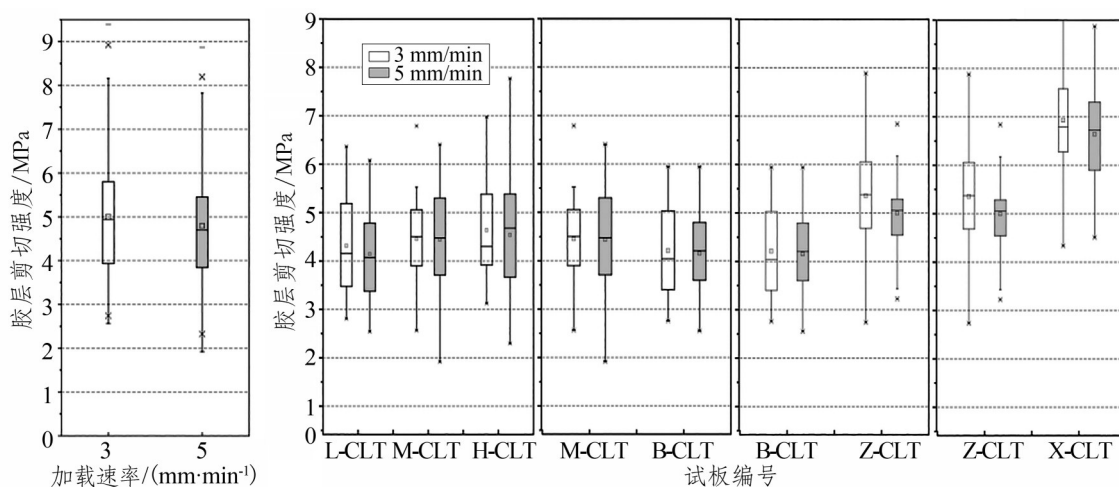


图2 不同加载速率CLT板胶层剪切强度

Fig.2 Bonding shear strength of CLT plates with different loading rates

为 4.79、5.00 MPa，中位数分别是 4.70、5.10 MPa。采用 SPSS 10.0 软件对不同加载速率 CLT 板胶层剪切强度进行显著性方差分析， P 值大于 0.05，说明在 0.05 显著性水平上加载速率对胶层剪切强度影响不显著。

但各组试件在不同加载速率条件下，胶层剪切强度变化趋势不一致，其最大值和最小值差异显著，表明加载速率对试件胶层剪切强度存在一定影响。ISO 12597: 2007 “Timber Structures-Glued Laminated Timber - Method of Test for Shear Strength of Glue Lines” 对胶层剪切强度没有规定加载速率，但规定至少在加载 20 s 后发生破坏；GB/T 26899—2011 《结构用集成材》对胶层剪切强度规定加载速率为 9 800 N/min，说明胶层剪切强度的加载速率需规定在一定范围内。

在本试验范围内，3 和 5 mm/min 加载速率对

胶层剪切强度平均值影响不显著，因此对层板模量、层板厚度、层板层数和组坯方向 CLT 板的胶层剪切强度的统计分析将不区分加载速率。

2.2 不同组坯 CLT 板的胶层剪切强度

不同组坯方式 CLT 板胶层剪切强度的平均值和变异系数见表 2。

表2 不同组坯 CLT 板胶层剪切强度

Tab.2 Bonding shear strength of CLT plates with different layouts

CLT 编号	样本数	胶合剪切强度/MPa				
		最大值	平均值	最小值	标准偏差	变异系数/%
L-CLT	82	6.05	3.99	2.41	0.87	21.9
M-CLT	82	6.45	4.22	1.82	0.93	22.0
H-CLT	83	7.77	4.57	2.30	1.12	24.4
B-CLT	78	5.95	4.17	2.55	0.90	21.5
Z-CLT	81	7.88	5.12	2.74	0.92	18.0
X-CLT	77	9.39	6.74	4.34	1.11	16.5

由表 2 可知：不同组坯方式 CLT 板胶层剪切强度平均值范围在 3.99~6.74 MPa，变异系数范围 16.5%~24.4%。木材为各向异性材料，横纹剪切强度是顺纹剪切强度的 1/3~1/2，CLT 采用正交组坯相邻层纤维相互垂直，因此其剪切强度相比较结构用集成材（Glulam）的胶层剪切强度偏低。CLT 板胶层剪切强度的破坏模式主要有沿着木材表面发生锯齿状剪切破坏和沿着横向层层板年轮方向剪切破坏，见图 3。

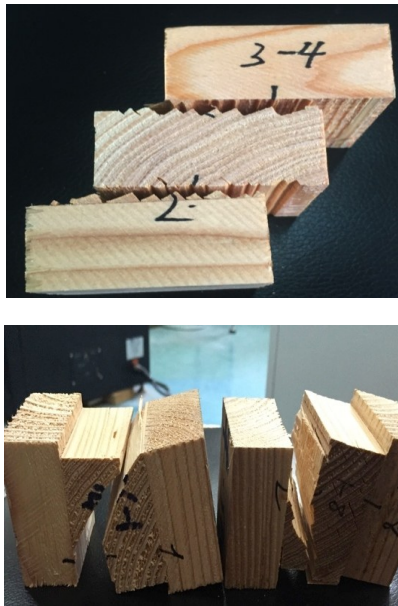


图 3 CLT 胶层剪切破坏模式
Fig.3 Failure modes of the bonding shear strength for CLT

Stehr. M^[12]等用扫描电镜观察锯切和刨切后的木材表面，研究发现木材表面的细胞强度比木材内部细胞强度低，剪切破坏常发生在木材表面的细胞或细胞附近。

2.2.1 层板模量的影响

由表 2 可知：随着表层层板模量的增加，CLT 板胶层剪切强度呈小幅度递增趋势，H-CLT 比 M-CLT 组剪切强度平均值增加 8.29%，M-CLT 组比 L-CLT 组剪切强度平均值增加 5.76%。由于 CLT 剪切强度破坏模式主要沿着木材表面发生锯齿状剪切破坏，随着表层层板模量的增加能够增加 CLT 板胶层剪切强度。有研究表明^[13]采用锯材和结构复合材制备混合 CLT，表层采用结构复合材能够显著提高 CLT 板力学强度。

2.2.2 层板厚度和层板层数的影响

当层板层数、层板模量、组坯方向相同，M-CLT 组与 B-CLT 组的胶层剪切强度分别为 4.22、4.17 MPa，层板厚度对 CLT 的剪切强度影响不大。当层板厚度、层板模量、组坯方向相同，层数从 3 层（B-CLT）增加到 5 层（Z-CLT），CLT 板胶层剪切强度增加 22.78%。当 CLT 总厚度（75 mm）相同，5 层（Z-CLT）组的胶层剪切强度相比较 3 层（M-CLT）组的胶层剪切强度增加了 21.33%。有研究结果表明^[10]CLT 的层板层数从 3 层增加到 7 层，其浸渍剥离率从 8.9% 上升到 12.2%。浸渍剥离也是评估胶层胶合质量的关键指标，随着层数的增加影响了 CLT 的耐久性。因此，在制造 CLT 板时需要综合考虑层板层数、层板厚度等因素对 CLT 板物理力学性能的影响，需要调整加压压力和施胶量，控制胶层的厚度和密实度，以提高 CLT 板的综合力学强度指标。

2.2.3 组坯方向对 CLT 板的胶层剪切强度影响

其他条件相同，45°组坯与正交组坯的 CLT 相比，CLT 板胶层剪切强度增加 31.64%，由于 45°组坯的横向层受力介于横纹和顺纹受力之间，可抵抗部分剪应力，提高了 CLT 板胶层剪切强度。

为进一步分析不同因子对 CLT 板胶层剪切强度的显著性影响，采用数据统计软件在 0.05 显著性水平上进行显著性方差分析，结果见表 3。

表 3 CLT 板胶层剪切强度方差分析

Tab.3 Analysis of variance of the bonding shear strength of CLT plates

因子	层板模量	层板厚度	层板层数	组坯方向
	<0.05, 影响显著			
P 值	L 与 M	P=0.256	0.723	<0.05
	M 与 H	P<0.05	影响不显著	影响显著
	L 与 H	P<0.05	影响显著	影响显著

由表 3 可知：除层板厚度对 CLT 板胶层剪切强度影响不显著外，层板模量、层板层数、组坯方向对 CLT 板胶层剪切强度存在显著性影响。其中，对层板模量进行最小显著差异分析，L-CLT 与 M-CLT 之间不存在显著性差异。

2.3 缝隙宽度对 CLT 板的胶层剪切强度影响

CLT 在组坯时侧面可不施胶，造成 CLT 存在缝隙，CLT 手册^[14]规定允许存在 ≤6 mm 缝隙。选取

M-CLT 组，分析缝隙宽度对 CLT 胶层剪切强度的影响，结果见表 4。

表 4 不同缝隙 CLT 板胶层剪切强度
Tab.4 Bonding shear strength of CLT plates with different gaps

缝隙宽度/mm	样本数	胶层剪切强度/MPa		
		平均值	标准偏差	变异系数/%
0	28(35.7%)	4.41	0.81	18.3
0~2	29(35.7%)	4.33	0.76	17.5
2~4	11(11.90%)	4.17	0.88	21.1
4~6	10(11.90%)	3.67	1.22	33.3
>6	4(4.76%)	3.36	1.08	32.1

由表 4 可知：在本试验范围内随着缝隙宽度的增加，CLT 板胶层剪切强度呈递减趋势。由于缝隙的存在使缝隙端部产生应力集中，加速了胶层裂纹的扩展，降低了胶层剪切强度。同时，胶层在破坏前发生较大的塑性变形，随着缝隙宽度的增加，缝隙处的应力集中加剧，对胶层的束缚力减小，胶层剪切强度降低。缝隙宽度在 2 mm 以下，CLT 板胶层剪切强度没有明显减少趋势；但缝隙宽度超过 4 mm 时，相比较无缝隙 CLT，其胶层剪切强度下降 16.78%，且变异系数明显增大，影响了 CLT 的使用耐久性和稳定性。因此在工业化生产时，当侧面不施胶，需要对缝隙宽度进行把控，防止缝隙过大影响 CLT 板的物理力学性能。

3 结论

1) 采用 5 mm/min 进行加载的 CLT 胶层剪切强度略小，在 0.05 显著性水平上加载速率对胶层剪切强度影响不显著。

2) 除层板厚度对 CLT 板胶层剪切强度影响不显著外，表层层板模量、层板层数、组坯方向对 CLT 板胶层剪切强度存在显著性影响。

3) 随着缝隙宽度的增加，CLT 板胶层剪切强度呈递减趋势，建议在工业化生产时，需要提高层板的加工精度，减少缝隙宽度对 CLT 的物理力学性能影响。本试验分析的缝隙宽度是基于一条胶层上的总缝隙宽度，对单个缝隙宽度以及缝隙个数对胶层剪切强度的影响将在后期进一步研究。

参考文献：

- [1] 龚迎春, 任海青. 正交胶合木的特性及发展前景[J]. 世界林业研究, 2016, 29(3): 71-74.
GONG Y C, REN H Q. Characteristics and development prospect of cross-laminated timber[J]. World Forestry Research, 2016, 29(3): 71-74.
- [2] 王志强, 罗冬, 郑维, 等. 混合结构对正交胶合木剪力墙抗侧性能的影响[J]. 林业工程学报, 2017, 2(2): 145-151.
WANG Z Q, LUO D, ZHENG W, et al. Effect of hybrid structure on lateral load resistance of cross-laminated timber shear wall[J]. Journal of Forestry Engineering, 2017, 2(2): 145-151.
- [3] 王志强, 付红梅, 罗欢, 等. 速生杨木横向层正交胶合木滚动剪切性能[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2016, 38(5): 116-120.
WANG Z Q, FU H M, LUO H, et al. Planar shear properties of fast-growing poplar in hybrid cross laminated lumber[J]. Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition), 2016, 38(5): 116-120.
- [4] 龚迎春. 国产日本落叶松正交胶合木制备工艺及力学性能评价[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2017.
- [5] GU M Z, PANG W C. Rolling shear strengths of southern pine cross laminated timber[J]. Wood Design Focus, 2014(26): 25-33.
- [6] Ringhofer A, Brandner R, Schickhofer G. Withdrawal resistance of self-tapping screws in unidirectional and orthogonal layered timber products[J]. Materials and Structures, 2015, 48(5): 1435-1447.
- [7] 吕雯蓉, 曹龙, 王思群, 等. 正交胶合木(CLT)防火性能的研究[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2018, 38(5): 191-199.
LÜ W R, CAO L, WANG S Q, et al. Review on fire-resistant performance of cross-laminated timber (CLT)[J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences), 2018, 38(5): 191-199.
- [8] Betti M, Brunetti M, Lauriola M P, et al. Comparison of newly proposed test methods to evaluate the bonding quality of Cross-Laminated Timber (CLT) panels by means of experimental data and finite element (FE) analysis[J]. Construction and Building Materials, 2016, 125: 952-963.
- [9] 熊海贝, 欧阳禄, 吴颖. 国外高层木结构研究综述[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(9): 1297-1306.
XIONG H B, OUYANG L, WU Y. State-of-the-art research of tall wood buildings[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2016, 44(9): 1297-1306.
- [10] Knorz M, Torno S, van de Kuilen J W. Bonding quality of industrially produced cross-laminated timber (CLT) as determined in delamination tests[J]. Construction and Building Materials, 2017, 133: 219-225.
- [11] GONG Y C, WU G F, REN H Q. Block shear strength and delamination of cross-laminated timber fabricated with Japanese larch[J]. BioResources, 2016, 11(4): 10240-10250.
- [12] Stehr M, Johansson I. Weak boundary layers on wood surfaces[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2000, 14(10): 1211-1224.
- [13] WANG Z Q, GONG M, CHUI Y H. Mechanical properties of laminated strand lumber and hybrid cross-laminated timber[J]. Construction and Building Materials, 2015, 101: 622-627.
- [14] Karacabeyli E, Douglas B. CLT handbook: cross-laminated timber [M]. Canada: FPInnovations and American Wood Council, 2013.

(本文编校 张 鹏、向 琴)