

榫卯结构破坏特征及其抗拉强度的试验

李重根, 胡传双, 廖红霞, 李鹏, 曾志立

(华南农业大学林学院, 广东广州510642)

摘要: 试验研究了马尾松 *Pinus massoniana* 木材榫卯结构拉伸试验的破坏特征及干、湿2种初始含水率状态下的抗拉伸强度随含水率变化的情况。结果表明榫卯接合构件的强度-行程曲线是一条峰、谷值不断下降的锯齿状曲线, 分析认为榫卯结构的拉伸破坏过程是一个静摩擦与动摩擦交替变化的过程; 高含水率马尾松材制作的榫卯结构随着含水率进一步下降, 抗拉强度下降非常明显, 而低含水率马尾松材制作的榫卯结构随着含水率升高, 抗拉强度会增加。因此, 用于制作木制品的木材需将含水率干燥到当地气候的平衡含水率以下, 以保证木制品结构的稳定性; 增加榫头与榫眼的过盈量实现紧配合有助于提高榫卯结构的接合强度。

关键词: 榫卯结构; 拉伸强度; 含水率; 木制品

中图分类号: S781.6

文献标识码: A

文章编号: 1001-411X(2007)04-0108-04

Effects of Moisture Content and Embedding Tolerance on the Pulling-Out Characteristics of the Rectangular Mortise-Tenon Joint

LI Chong-gen, HU Chuan-shuang, LIAO Hong-xia, LI Peng, ZENG Zhi-li

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

Abstract: Effects of moisture content and embedding tolerance on the pull-out resistance of the rectangular mortise and tenon joint of mason pine (*Pinus massoniana*) wood were studied. The main findings were summarized as follows: 1) The pull-out load vs. pull-out displacement curve of the rectangular mortise and tenon joint insisted of a linearly ascending part and a descending part, which was thought to be a cyclic static and dynamic friction procedure. 2) The pull-out strength increased when the moisture content of the mortise-tenon joint was increasing from low initial moisture content (13.3%), whereas the pull-out strength decreased when the moisture content of mortise-tenon joint was decreasing from high initial moisture content (22.1%). The initial moisture content of mortise-tenon joint must be dried below the point of the equilibrium moisture content of the local area to maintain the designed strength of the wood products. 3) The pull-out load increased with the increase of the assembling tolerance within the range, in which the mortise and tenon joint would not be damaged while assembling.

Key words: mortise-tenon connection; tensile strength; moisture content; wood products

榫卯接合作为实木家具的主要连接结构, 其接合强度直接影响到框架式实木家具的稳定性及使用寿命, 因此有关家具榫卯结构力学性能方面的研究越来越被国内外学者关注。张福范^[1]用能量法分析了结构齿槽的应力, 并建立了应力传递过程的数学模型。杨明津等^[2]研究了榫头施胶的直角榫构件的

力学性能, 研究结果表明, 其最大弯矩由过盈配合向间隙配合呈降低的趋势。岳翠银^[3]探讨了分别采用PVAc、UF和混合胶胶粘剂接合圆榫与不同物理力学性能的A类刨花板对抗拉强度的影响, 结果表明圆榫接合抗拉强度随刨花板密度及静曲强度的增大而增大, 影响程度为UF > 混合胶 > PVAc; 随刨花板吸

收稿日期: 2007-01-10

作者简介: 李重根(1957—), 男, 副教授; 通讯作者: 胡传双(1978—), 男, 副教授, 博士, Email: cshu@scau.edu.cn

基金项目: 华南农业大学校长基金(4400-K05107)

水厚度膨胀的增大而减少,影响程度为混合胶 > UF > PVAc. Eckelman^[4]通过试验回归的方法推导出了实木构件侧边圆榫的抗拉力的经验公式,并考虑了配合系数及胶种对抗拉力的影响. Eckelman 等^[5]还研究了榫肩对圆榫抗弯力矩的影响. 松本弘毅^[6]对圆榫和直角榫接合的变形和强度 2 方面进行研究,并通过计算求出理论值与试验值之比,指出提高直角榫胶合面积和提高胶合质量,均可增加直角榫接合强度和刚度. Jensen^[7]对阔叶材胶合暗榫进行了轴向拉伸试验,并提出了线弹性破坏机制(LEFM)/理想塑性模型和线弹性应力分析模型,很好地预测了胶合条件下的阔叶材暗榫顺纹理方向的拔出应力. 本文通过试验研究了木材初始含水率及榫卯过盈配合公差等因素对马尾松直角榫卯接合抗拉强度的影响,分析榫卯结构的破坏特征,为木材榫卯连接的设计和力学强度性能的评价提供参考.

1 材料与方法

材料取自于一马尾松 *Pinus massoniana* 原条的中段,在距原条基部 1.3 m 处向上截取一段 1.5 m

长的原木,并立即将其加工成截面面积约为 60 mm × 60 mm 方条,经初步测试,木材的含水率(w ,下同)为 30% ~ 130%. 为了研究木材初始含水率及含水率变化对榫卯接合抗拉强度的影响,将试材分为 2 批进行试验前的预处理,一批试材在气候箱调整到初始含水率约为 22%,用于研究木材含水率由高到低的变化过程对榫卯接合强度的影响;另一批则调整到初始含水率约为 13%,用于测试木材含水率由低到高的变化过程对榫卯接合强度的影响.

将方条含水率分别调整到 22% 和 13% 后,按照表 1 尺寸制作榫头和榫眼试件并装配成榫卯构件以研究过盈量对榫卯接合抗拉强度的影响. 榫卯构件制作并装配完毕后,放置在气候箱进行调湿处理,使榫卯构件由初始含水率为 13% 分别调整到含水率为 16%、19% 和 22%,初始含水率为 22% 的分别调整到 19%、16% 和 13%. 对调整后的不同含水率试件,在日本岛津精密力学试验机(SHIMADZU AG-50KNI)上进行拉伸试验,拉伸速度设定为 5 mm/s,拉伸直至榫卯构件完全脱落为止. 每种条件下,试验重复 3 次.

表 1 榫头榫眼参数

Tab. 1 Experimental parameters of the tenon and mortise

初始含水率 initial moisture content/%	中间含水率 experiencing moisture content/%	榫头尺寸 size of tenon/mm			榫眼尺寸 size of mortise/mm			榫头与榫眼的 配合公差 embedding tolerance of tenon-mortise/mm
		宽 width	厚 thickness	长 length	长 length	宽 width	深 depth	
22	22、19、16、13	28.0	9.5	25.0	27.5	9.5	27.0	-0.5
					27.7			-0.3
					27.9			-0.1
13	13、16、19、22	28.0	9.5	25.0	26.7	9.5	27.0	-1.3
					27.0			-1.0
					27.5			-0.5
					27.7			-0.3

2 结果与分析

榫卯接合的抗拉强度-行程曲线如图 1 所示,由图 1 可以观察到抗拉强度-行程曲线是一条峰、谷值不断下降的锯齿状曲线. 王松年等^[8]认为榫卯结构过盈配合时,在榫卯接触面法向应力作用下,两表面的粗糙峰相互啮合并产生弹塑性变形,形成一定的机械互锁作用,并且由于分散的微凸体峰顶相接触,其真实接触面积很小,在接触点处将产生很大的接触应力,并发生塑性变形. 当峰顶塑性变形而紧密接触时,界面间的表面分子力发生作用,将产生“界面接合”,形成粘着结点和接合力. 木材是弹塑

性体,具有黏弹特性,两粗糙表面发生相对滑动之前,微观粗糙峰在切向拉拔力的作用下随时间的延长会发生一定量的弹塑性变形. 在直线上升部分,拉伸力主要作用是克服榫卯构件接触面粗糙峰的机械互锁、微观结构弹塑性变形所形成的静摩擦力,其峰值大小主要由材料本身性质、表面状态和榫卯之间的摩擦系数决定.

如果将曲线的每一段上升和下降看作为一个变化周期,可以认为榫头从榫眼中拔出的过程是一个外界拉伸力克服榫头与榫眼之间静摩擦与动摩擦交替变化的过程. 榫头最初是与榫眼完全接触的,当榫头与榫眼受到外界的拉力时,榫头由于受到榫眼壁

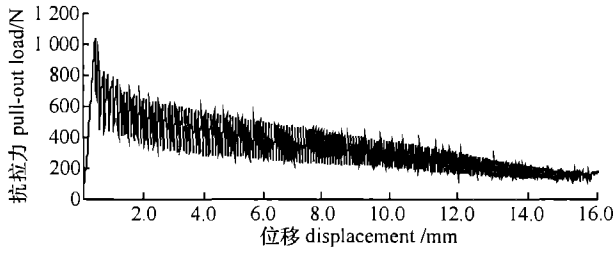
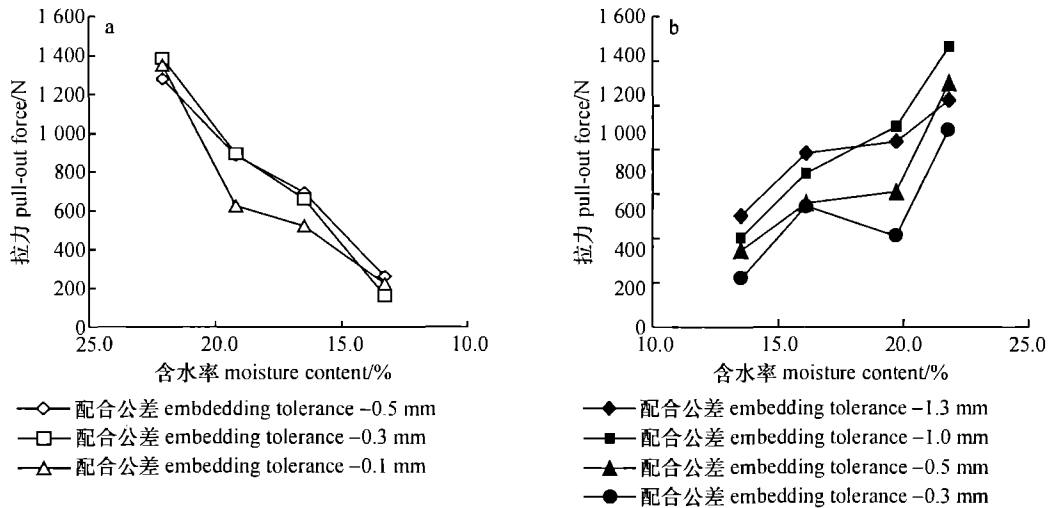


图1 抗拉力 - 位移曲线图

Fig. 1 Plot of pull-out load vs. pull-out displacement

给它的静摩擦力而阻止其被拉出,当外界拉力大于静摩擦力时,榫头开始从榫眼中拉出而产生相对位移.榫头与榫眼产生相对滑移时,榫头与榫眼的界面力由静摩擦力转变为动摩擦力,由于动摩擦力远小于静摩擦力,表现为曲线的下降段.但由于榫头与榫眼试件的表面都存在一定的粗糙度,当榫头在榫眼中移动了一个很小的位置时,很快就受到下一个阻力位的阻止而停止了相对移动,外界拉力又必须克服新的静摩擦力,才能形成新一轮静、动摩擦力的交替位移.随着榫头与榫眼之间的相对位移,它们之间的接触面积也随着减小,并最终导致接触表面压力、摩擦系数和磨损率的下降,从而静摩擦力即拉伸力峰值也随之降低,表现在曲线上就是第2个峰、谷值比第1个要小.依此类推可以解释整个榫卯接合的抗拉强度 - 行程曲线图.

图2a是初始含水率为22.1%的榫卯接合试件在含水率逐渐下降过程中,各含水率状态下测得的榫卯接合强度,图2b则是初始含水率为13.3%的试件在含水率逐渐升高过程中,各含水率状态下测得的榫卯接合强度.从图2中可以观察到高含水率榫卯结构的接合强度高于低含水率榫卯结构的接合强度,笔者认为随着木材含水率的变化,木材的尺寸产生变化导致了榫卯构件抗拉强度的变化.对于榫眼试件而言,长度方向正好是木材的顺纹方向,木材的收缩很小;但对于与之配合的榫头试件而言,榫头的宽度方向是在方材的弦向或者径向,无论是弦向还是径向,其尺寸的收缩量都远大于纵向.由于榫卯构件榫头的宽度方向尺寸变化远大于榫眼的长度方向变化,当榫结构的木材含水率升高时,榫头的宽度尺寸增加,使其在榫眼中受到更大的侧面压应力,抗拉强度增加.通过对图2a与b比较还可以看出,由初始含水率为13%的试验材料做成的榫卯构件比由初始含水率为22%的试验材料做成榫卯构件后再干燥到含水率为13%时的抗拉强度大.分析其原因认为,低含水率榫卯构件榫头与榫眼配合是在含水率为13%时按实验设计制做而成,而从高含水率下降到13%时其配合已经不是原先设计的配合值,榫头由于尺寸的减小使得配合的负偏差减小,其接合强度自然就要减小.



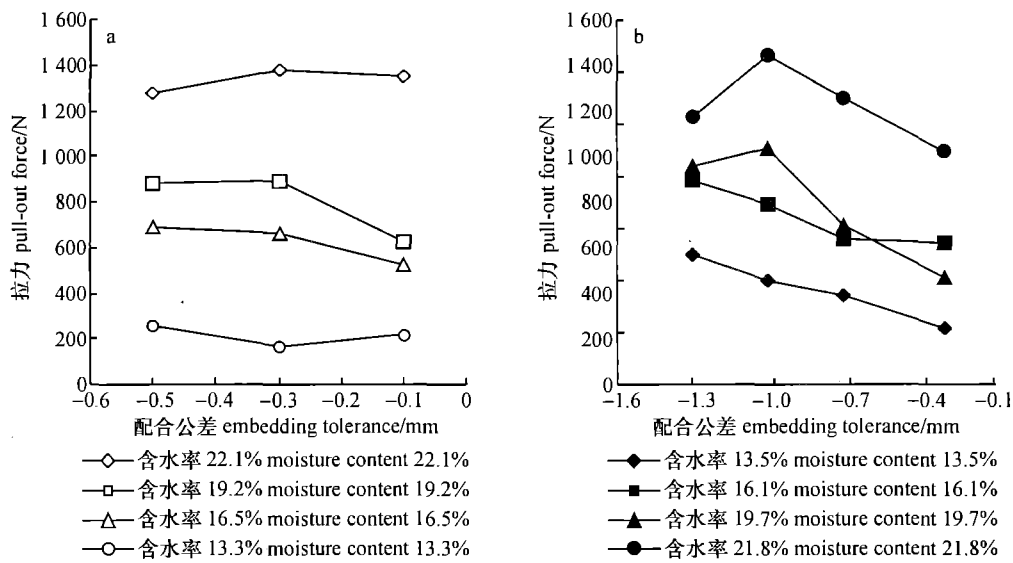
a: 初始含水率为 22.1% initial moisture content 22.1%; b: 初始含水率为 13.3% initial moisture content 13.3%

图2 不同含水率状态榫卯结构抗拉强度

Fig. 2 Pull-out load of the mortise-tenon joint under different moisture content

在通常情况下,用于制作家具的木材原料含水率一般都在13%以下,制成的家具制品在使用过程中含水率会略有升高,其榫卯接合强度也随之增加.但当初始含水率高过家具制品使用地的平衡含水率时,随着周围气候环境的变化,家具制品在使用过程中的含水率会下降到平衡含水率附近,导致榫卯接

合强度的下降,从而影响家具结构的接合强度和使用寿命.因此,在制作家具时,木材必须干燥到家具使用地平衡含水率最小值以下,以保证家具制品在使用中的设计接合强度.否则木制品的结构在使用过程中将会因为含水率的下降而失去其固有强度和稳定性.



a: 初始含水率为 22.1% initial moisture content 22.1%; b: 初始含水率为 13.3% initial moisture content 13.3%

图3 榫卯配合公差对抗拉强度的影响

Fig. 3 Effects of embedding tolerance on pull-out load of the mortise-tenon joint

图3是不同紧配合条件下榫卯构件的抗拉强度曲线,从图3中可以观察到:随着配合过盈量的减小,在初始含水率为22.1%和13.3%这2种条件下榫卯结构抗拉力都出现了下降趋势.因此,增加配合的紧密程度有助于提高榫卯接合的抗拉强度.如上分析所述,通过榫头与榫眼的紧配合,使得榫眼对榫头产生一个因挤压而形成的正压力.当将榫头从榫眼中拉出来,主要是要克服榫头与榫眼内壁之间的摩擦力,它的大小正好与榫眼对榫头侧面的正压力成正比.因此,增加挤压应力可以增加其摩擦力,也就提高了榫配合的抗拉力.

3 结论

通过试验研究了配合过盈量和含水率对榫卯构件抗拉强度的影响,主要结论如下:

1) 榫卯接合构件的强度-行程曲线是一条峰、谷值不断下降的锯齿状曲线,分析认为,榫卯结构的拉伸破坏过程是一个静摩擦与动摩擦交替变化的过程.

2) 增加榫卯接合构件的配合过盈量有助于提高榫卯构件的接合强度,过盈量的极限是榫头在进入榫眼过程中不至于使榫眼产生破坏.

3) 在制作实木家具时,必须将木材干燥到家具使用地平衡含水率最小值以下,以保证家具制品在

使用中的设计接合强度.否则木制品的榫卯接合点在使用过程中将会因为含水率的下降而导致木制品失去其设计强度和缩短使用寿命.

参考文献:

- [1] 张福范. 木结构槽齿与榫接的应力分析[J]. 清华大学学报, 1983, 23(3): 13-26.
- [2] 杨明津. 方榫接合强度之研究(二): 榫头尺寸对暗榫接合强度之影响[J]. 林产工业, 1981, 5(3): 21-30.
- [3] 岳翠银. 圆榫与刨花板接合抗拉强度的研究[J]. 林业科技开发, 1998(2): 38-40.
- [4] ECKELMAN C A. Engineering concepts of single-pin dowel joint design[J]. Forest Prod J, 1969, 19(12): 52-60.
- [5] ECKELMAN C A, ERDIL Y, HAVIAROVA E. Effect of shoulders on bending moment capacity of round mortise and tenon joints[J]. Forest Prod J, 2006, 56(1): 82-86.
- [6] 松本弘毅. だぼおよびほぞ接合の効率について[C] // 日本木材学会. 日本木材学会北海道支部公演集: 1. 日本北海道: 日本木材学会北海道分会, 1986, 1: 32-35.
- [7] JENSEN J L. Axially loaded glued-in hardwood dowels[J]. Wood Science and Technology, 2001, 35: 73-78.
- [8] 王松年, 苏诒福, 江亲瑜. 摩擦学原理及应用[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1990: 41.

【责任编辑 李晓卉】