

杨木桌腿新型补强结构力学性能分析

陈于书, 许文萌

(南京林业大学家具与工业设计学院, 江苏南京 210037)

摘要: 以杨木为桌腿和望板材料, 采用双圆棒榫涂胶的接合形式制作桌腿部件, 配合常用桌腿部框架补强形式, 分析其在匀速垂直外力作用下的承载力及破坏形式, 在此基础上提出新型补强结构。结果表明: 常用结构的强度由大到小依次为: 金属连接塞角、平头螺钉连接带槽口木塞角、平头螺钉连接木塞角、木塞角和 L 型角码; 水曲柳木塞角强度大于杨木塞角; 新型补强结构强度比常用的形式有显著提升, 对提升家具结构强度有效。

关键词: 杨木; 桌腿; 补强结构; 强度; 塞角

中图分类号: TS63 文献标识码: B 文章编号: 1001-8654 (2017) 03-0044-05

Mechanical Properties of Poplar Table Legs Reinforced with Improved Structure

CHEN Yu-shu, XU Wen-meng

(College of Furniture and Industrial Design, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China)

Abstract: The authors reinforced poplar table legs by using double dowel joints and common reinforcing methods. Strength performance and deformation of the legs under uniform vertical load were analyzed. Based on the results, the authors improved reinforcement techniques and showed that by using innovative structures, legs with greater strength could be produced. Furthermore, legs made with the improved reinforcement techniques had higher test results than those made with common reinforcement methods, which means that the improved reinforcement could enhance furniture strength.

Key words: Poplar; table leg; reinforcement structure; strength; corner block

利用速生林木材资源, 是缓解我国木材供需矛盾的有效方法。与优质木材相比, 速生材存在密度低、材质疏松、强度差等特点, 限制了其在家具行业的应用。对此, 科技人员力争通过合理的结构设计, 提高速生材的强度, 使其能够满足家具结构的强度要求, 促进其在家具领域的应用。

现有的研究多针对实木家具结构连接形式以及力学性能等方面^[1-9], 而关于实木家具补强结构及作用方式的研究鲜有报道。

补强结构在弥补连接部位强度不足、提高结构的稳定性方面, 具有显著作用, 而目前常用的补强结构制作多依赖于经验, 缺乏理论支持。笔者以杨木基材制作桌腿构件, 分别采用几种常用补强结构, 分析补强结构在匀速垂直外力作用下的承载力及破坏形式; 在此基础上, 提出一种强度更高的补强形式, 以期为杨木家具结构的开发与设计提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

1) 家具基材:

白杨木 (*Populus alba*), 产自山东, 试材幅面为 1 800 mm×250 mm, 厚度分别为 30、60 mm。平均

收稿日期: 2016-08-05; 修改日期: 2017-02-17

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项“低质人工林木材家具制造关键技术研究示范项目”(201404502-1)。

作者简介: 陈于书(1972—), 女, 南京林业大学副教授, 博士。

含水率 11.5%，密度 502 kg/m^3 ，抗弯强度 76.3 N/mm^2 。

2) 连接件:

① 荷木 (*Schima spp.*) 圆棒榫，螺旋纹表面，规格为 $\phi 8 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ ，含水率约 9%，密度 721 kg/m^3 。

② 木塞角，材种分别为杨木 (*Populus alba*)、水曲柳 (*Acanthopanax ricinifolius*)。均制作两种尺寸： $100 \text{ mm} \times 45 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 和 $128 \text{ mm} \times 45 \text{ mm} \times 27 \text{ mm}$ 。

杨木塞角密度、抗弯强度同基材；水曲柳塞角木材平均含水率 11.8%，密度 686 kg/m^3 ，抗弯强度 118.6 N/mm^2 。

③ 五金件：五种，均外购。

十字沉头自攻螺钉，10.9 级碳钢材质， $\text{M4} \times 35 \text{ mm}$ 和 $\text{M4} \times 20 \text{ mm}$ 两种型号；

金属连接塞角，镀锌钢材质，尺寸为 $100 \text{ mm} \times 45 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$ ；

L 型角码，不锈钢材质，尺寸为 $80 \text{ mm} \times 80 \text{ mm} \times 1.3 \text{ mm}$ ；

内六角平头螺钉，10.9 级碳钢材质，尺寸为 $\text{M8} \times 55 \text{ mm}$ 和 $\text{M8} \times 20 \text{ mm}$ ；

倒刺螺母，4.8 级锌合金材质，尺寸为 $\text{M8 mm} \times 13 \text{ mm}$ 。

3) 胶黏剂：聚醋酸乙烯酯乳液 (PVAc)，pH 值 6.4，固体含量为 47%，黏度 $0.68 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。

1.2 主要设备

万能力学试验机、精密推台锯、木工带锯机、立卧式可调木工钻床、平刨机等。

1.3 试件制作

杨木桌腿和望板的角部结构，如图 1 所示。

桌腿规格： $200 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ ；望板规格： $150 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ 。望板的端部与桌腿相应位置，以 $\phi 8 \text{ mm}$ 、表面 PVAc 胶的圆棒榫连接。

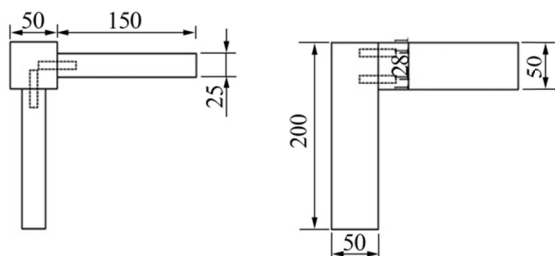


图 1 试件结构尺寸

Fig.1 Structure and dimensions of leg components

构件制作后静置两天，取 6 个未采用补强结构的组件作为对照试件。

经调研，确定五种常用的补强结构如图 2。塞角与望板采用十字沉头自攻螺钉连接，其中木塞角由杨木和水曲柳两种材质制作，共 8 组试件，每组制作 6 个试件。

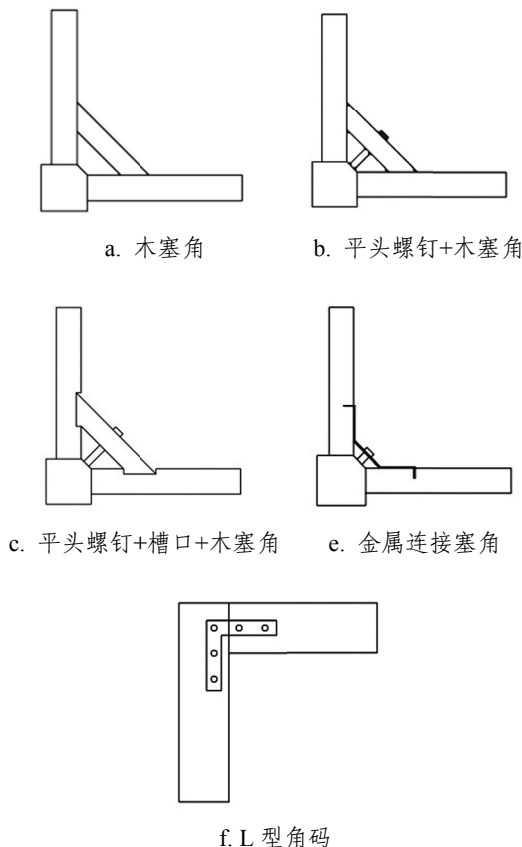


图 2 五种补强结构

Fig.2 Five common reinforcement structures

1.4 力学性能测试

桌子在实际使用过程中常被拖动，主要受到水平方向的推力。根据受力平衡，地面与桌腿会产生大小相等、方向相反的作用力，在桌腿与望板的连接处产生很大的弯曲力矩。在弯曲力矩作用下，桌腿结构呈悬臂梁结构，抗弯承载力是连接强度测试的主要项目。

参考 GB/T 10357.1-2013《家具力学性能试验 桌类强度和耐久性》，在万能力学试验机上，对试件进行抗弯承载力的测试。

垂直载荷 P 在桌腿试件上进行匀速加载 (如图 3 所示)，加载速度 10 mm/min ，观察构件的破坏形式，记录相关数据。

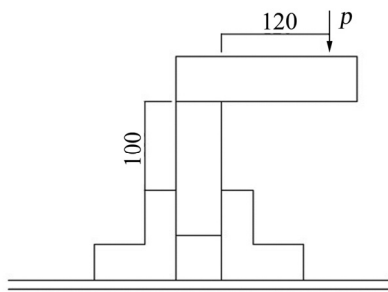


图3 试件加载形式

Fig.3 Loading of components

2 结果分析与结构优化

2.1 常规家具补强结构

9组试件在加载试验中,呈现初次破坏、强度恢复、完全破坏三个阶段,各阶段对应的载荷值和位移见表1。

对照试件的载荷-位移曲线,如图4所示。

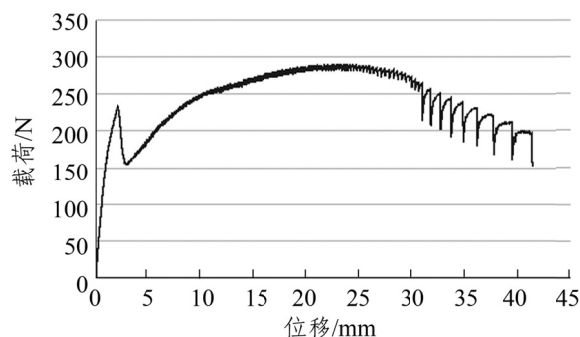


图4 对照试件的载荷-位移图

Fig.4 Load-displacement curve for bending moment capacity of controls

随着位移的增大,加载提高,试件承载力达到第一个极值,然后迅速下降至初始极限的一半;随着位移继续加大,荷载缓慢上升,再次达到峰值后缓慢下降,至不再受力。第一个极值为胶层破坏时对应载荷,胶层破坏后试件的强度并没有完全丧失,而是又经过一段载荷上升的过程。原因是双圆榫较长,在完全拔出之前一直产生弯矩。

不同形式补强试件的载荷-位移曲线(略),其变化趋势与对照试件基本相同,同样产生了两个波峰和一个波谷,表明在开始加载阶段,补强结构的连接作用并没有取代双圆榫的连接作用。

1) 在初次破坏阶段,以金属连接塞角的承载力最大。金属连接塞角与木塞角形式相比,试件的接合强度提高了44.4%。原因在于试件结构之间接合更加紧密,金属连接塞角与桌腿的之间的平头螺钉距离更短,紧固效果更明显。因此,在补强结构设计中,首先要考虑补强形式与构件之间相互配合的紧密度,作用距离增加,结构提供强度的延时效应越明显。

单一杨木塞角补强试件及其与其他结构联合补强试件,在初次破坏时的载荷平均值如图5所示。试件强度大小依次为:S-N-P、S-P、L-C、P。杨木塞角使试件承载力提高了29.7%,但有木塞角的三种补强试件的极限承载力相差不超过0.9%,表明此三种木塞角试件的承载力相当,在木塞角作用下,平头螺钉和槽口结构的增强作用不明显。

表1 试件在不同试验阶段的承载力及位移

Tab.1 Loads and displacements of components during loading

构件形式及代号	初次破坏阶段		强度恢复阶段		完全破坏阶段	
	波峰1 载荷/N	位移 1/mm	波谷载荷/N	位移 2/mm	波峰2 载荷/N	位移 3/mm
固定对照构件 (C)	200.0	1.9	107.6	2.9	235.5	24.5
杨木塞角 (P)	258.5	2.7	154.8	3.4	373.0	27.1
水曲柳塞角 (A)	269.2	2.2	167.2	2.6	425.2	30.7
平头螺钉+杨木塞角 (S-P)	259.0	2.4	181.0	2.8	464.8	29.5
平头螺钉+水曲柳塞角 (S-A)	271.3	2.8	210.6	3.4	494.1	28.0
平头螺钉+槽口+杨木塞角 (S-N-P)	260.9	2.4	191.0	2.9	534.5	28.0
平头螺钉+槽口+水曲柳塞角 (S-N-A)	282.2	2.8	202.3	3.1	587.1	26.6
金属连接塞角 (M)	288.9	2.7	200.9	2.9	567.1	30.5
L型角码 (L-C)	211.3	2.8	150.1	3.2	418.9	31.6

注: 位移1、2、3分别指不同阶段达到极限载荷时,万能力学试验机压头对应的位移量。

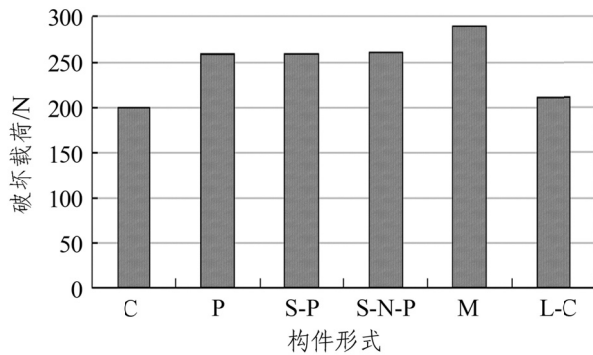


图5 不同试件初次破坏载荷平均值

Fig.5 Average primary breaking load for different components

2) 在初次破坏以后, 双圆棒榫结构强度失效, 载荷值下降, 此时试件主要依靠补强件起连接作用。随着位移的增加, 补强件的连接强度增加, 载荷值停止下降且恢复上升。

图6 为双圆棒榫结构强度失效的过程中, 压头对不同补强结构(杨木塞用)试件作用中的位移差值。位移差值越小, 说明补强结构的增强作用越明显。

在整个过程中, 仍以金属连接塞角的作用最明显, L型角码次之, 再次是3种杨木塞用试件(S-N-P、S-P、P)。L型角码在此阶段的增强作用比初次破坏时明显, 是由于L型角码结构紧贴在试件上, 增强作用优于木塞角。

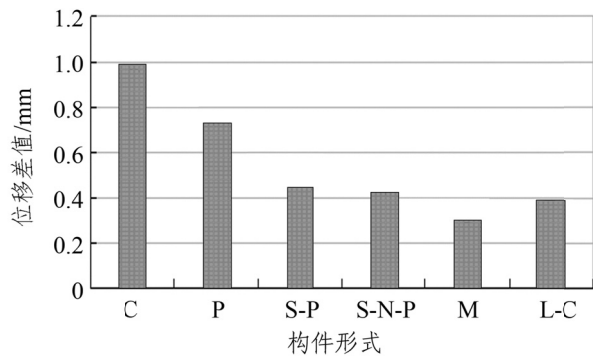


图6 压头在强度失效过程中位移差

Fig.6 Displacement of press headings at strength failure

3) 在第三阶段, 试件在外力的作用下发生完全破坏。如图7所示, 仍以金属连接塞角M的承载力最大, 其次是S-N-P、S-P、L-C、P。与对照试件C相比, 其承载力分别提高了140.8%、126.9%、97.4%、77.9%和58.4%; S-N-P试件的强度增幅又高于S-P试件, 表明平头螺钉的增强作用优于槽口。

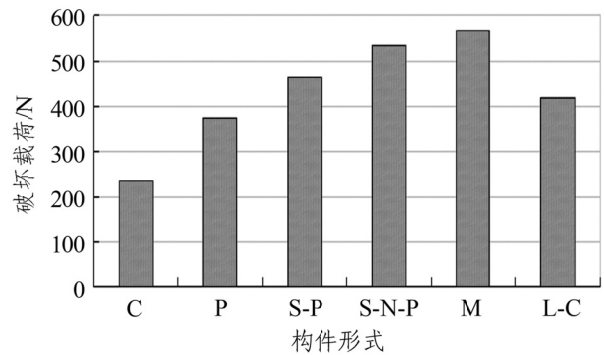


图7 不同试件完全破坏载荷平均值

Fig.7 Average completely breaking load for different components

如图8所示, 在此阶段中, 木塞角构件均以水曲柳的承载力高于杨木, 尤其是“平头螺钉+槽口+木塞角”联合结构下, 水曲柳木塞角试件的强度最高。这是由于在无缝配合下, 槽口的处理方式提高了连接构件的紧密度, 使补强结构更好地发挥作用。但杨木由于材质疏松, 木纤维容易被挤压, 其木塞用增强作用小于水曲柳木塞用。

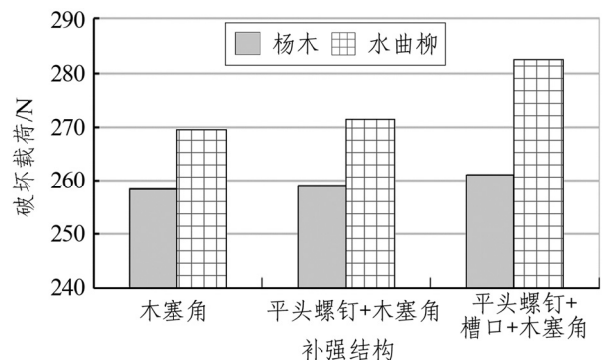


图8 杨木与水曲柳塞角的强度对比

Fig.8 Strength comparison between poplar and ash corner blocks

2.2 新型补强结构

通过以上分析, 补强结构在尚未完全发挥作用时, 桌腿结构已经被破坏。由于杨木材质疏松, 采用十字沉头自攻螺钉连接的补强件, 容易拉断木纤维而拔出, 影响整体补强效果。因此, 补强件和结构件连接时, 需增加连接件与杨木的接触面积。并且, 常用的补强结构只能应用在固定式结构中, 不便于产品的运输。

针对以上缺点, 对桌腿部结构提出新的补强方案, 如图9所示。

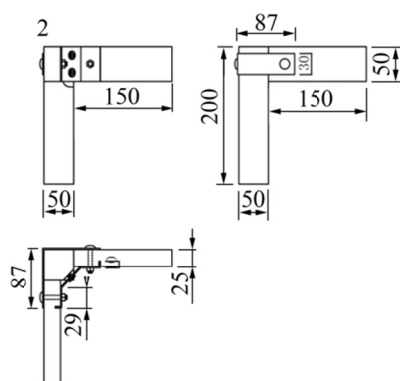


图9 改进型补强结构的三视图

Fig.9 Three-dimensional drawing of improved reinforcement structures

该结构(NS)由外侧结构件和内侧结构件组成,两者通过螺丝螺母配合连接,将两望板进行固定,然后桌腿通过空套螺丝连接到内部连接件上,实现整体结构的连接。整个补强结构为可拆装式,方便运输。借鉴传统实木家具的包角结构,限制桌腿的侧向位移,增强桌子的牢固性。

对新型补强结构进行破坏试验,载荷及位移数据见表2。

表2 新型补强结构的加载试验数据
Tab.2 Experimental data of improved reinforcement structures

试验过程	波峰1 载荷/N	位移1/ mm	波谷 载荷/N	位移 2/mm	波峰2 载荷/N	位移3/ mm
检测结果	616.5	15.7	-	-	-	-

前文所述的常用补强结构被破坏后,补强件才逐渐发挥作用;而由表2结果分析可知,新型补强结构直接达到结构强度的最大值616.5 N。与常用补强结构比较,结果如图10所示。

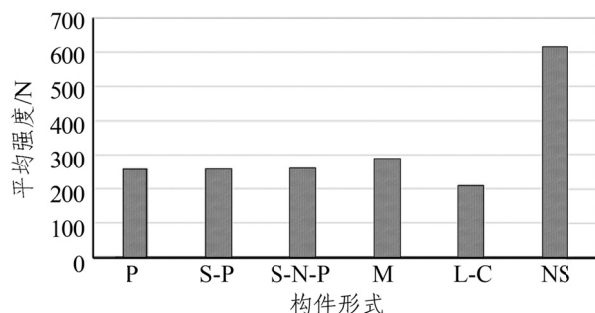


图10 新型与常规补强结构平均强度值比较

Fig.10 Strengths of improved and common reinforcement structures

可见新型改进补强结构的作用更明显,其强度甚至高于补强性能最优的金属连接塞角1倍多。产生差异的原因主要与两种补强结构的作用原理有关,新型补强结构主要采用全包围形式,对桌腿部分通过限制X、Y、Z轴向的移动与旋转,抵消连接处的剪切力、弯曲力,增强了桌腿抗弯承载力;平头螺钉的使用,增大了连接件与木材的接触面积,降低木材纤维被破坏的机率,也在一定程度上提升结构整体的抗破坏强度。

3 结论

1) 常规补强结构中,以金属片塞角的增强作用最高,其次为“螺钉+槽口+木塞角”联合结构、“螺钉+木塞角”。为简化槽口加工及降低生产成本,在实际应用中,建议采用“螺钉+木塞角”代替“螺杆+槽口+木塞角”。

2) 水曲柳塞角的强度大于杨木塞角。实际生产中,建议采用硬质家具边角料制作塞角。

3) 新型补强结构的设计更加合理,整体结构明显提升,相比金属片塞角强度提升了1倍多,可用于杨木桌类家具的结构设计,以弥补杨木材质强度的不足,提升家具结构的整体强度。

参考文献:

- [1] Kasal A, Eckelman CA, Haviarova E, et al. Bending moment capacities of I-shaped mortise and tenon joints under compression and tension loadings[J]. Bioresources, 2015, 10 (4): 7009-7020.
- [2] 李素瑕, 刘文金. 几种连接方式对脱脂马尾松家具结构强度的影响[J]. 西北林学院学报, 2014, 29 (1): 169-173.
- [3] 蔡绍祥, 向仕龙, 刘德桃. 家具部件的连接技术[J]. 木材加工机械, 2005, 16 (4): 21, 33-36.
- [4] Nicholls T, Crisan R. Study of the stress strain state in corner joints and box type furniture using finite element analysis[J]. Holzals Roh-undwerkstoff, 2002, 60 (1): 66-67.
- [5] 孙德林, 姚文亮. 基于速生木材特性的实木家具结构设计[J]. 林产工业, 2014, 41 (1): 37-38.
- [6] 周忠祥. 实木家具斜角榫接合方式的改进与应用[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2007, 28 (4): 200-203.
- [7] Erdil Y Z, Kasal A, Eckelman C A. Bending moment capacity of rectangular mortise and tenon furniture joints[J]. Forest Products Journal, 2005, 55 (12): 209-213.
- [8] Smardzewski J, Klos R, Fabisiak B. Determination of the impact of creeping of furniture joints on their rigidity[J]. Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 2013, 37 (6): 802-811.
- [9] 宋明强, 沈隽. 有限元法与ANSYS在家具结构分析中的应用[J]. 西北林学院学报, 2008, 23 (1): 174-177.

(责任编辑 向琴)