

doi: 10.11707/j.1001-7488.20200115

圆钢钉和自攻螺钉钉入角度对规格材握钉力性能的影响^{*}

滕启城^{1,3} 王菲彬² 阙泽利¹ 曾楠³

(1. 南京林业大学材料科学与工程学院 南京 210037; 2. 南京林业大学风景园林学院 南京 210037; 3. 保国寺古建筑博物馆 宁波 315033)

摘 要: 【目的】基于规格材上不同角度钉入圆钢钉和自攻螺钉的握钉力性能测试,研究不同钉入角度、木材密度和木材径、弦向对握钉力性能的影响,为木结构钉连接设计提供更完善的科学依据。【方法】以落叶松和白云杉规格材为研究对象,参考握钉力性能试验国家标准,选取国产直径 2.5 mm 的圆钢钉和直径 4.0 mm 的自攻螺钉,长度均为 50 mm,在满足国标最小钉边距、端距和间距的要求下,与木纤维分别成 90°(横纹)、60°、45°和 0°(顺纹)钉入规格材,在自主设计的多角度握钉力试验夹持装置上以 3 mm·min⁻¹ 恒定速度拔出并得到破坏荷载,比较分析不同条件下的握钉力。【结果】1) 随着钉入角度减小,钉拔出时的荷载-位移曲线峰愈加尖锐,自攻螺钉握钉力大于白圆钢钉,密度较大的落叶松的握钉力大于白云杉,且对自攻螺钉的握钉力刚度明显大于白云杉,但相同角度条件下拔出时的荷载-位移曲线特征基本相似; 2) 90°钉入时圆钢钉和自攻螺钉的握钉力均大于 0°,但从 90°到 0°圆钢钉的握钉力先增大后减小,而自攻螺钉则相反; 3) 白云杉径面自攻螺钉的握钉力大于弦面,其圆钢钉的握钉力没有规律,落叶松径面圆钢钉的握钉力小于弦面,其自攻螺钉的握钉力没有规律。【结论】钉与木纤维之间的角度对规格材握钉力具有显著影响,随着角度减小,规格材对自攻螺钉的握钉力先降低后增大,而对圆钢钉的握钉力则相反。规格材径面和弦面的握钉力没有确定关系,在木结构握钉力设计值计算时无需考虑年轮角度参数。欧洲木结构设计规范(BS EN 1995-1-1:2004)推荐的计算公式为螺钉握钉力随着钉入角度减小而减小,测试结果证明该公式在 0°时握钉力估算过于保守。端面钉入的自攻螺钉被拔出时,荷载-位移曲线和破坏特征均表明其为明显的脆性破坏,在实际工程中木构件端面上使用自攻螺钉连接需要有效的增强措施和强度验算。

关键词: 钉入角度; 自攻螺钉; 握钉力; 圆钢钉; 木材

中图分类号: S781.64 文献标识码: A 文章编号: 1001-7488(2020)01-0154-08

Effects of Angles on the Screw and Nail Withdrawal Strength in Dimension Lumber

Teng Qicheng^{1,3} Wang Feibin² Que Zeli¹ Zeng Nan³

(1. College of Material Science and Engineering, Nanjing Forestry University Nanjing 210037; 2. College of Landscape and Architecture, Nanjing Forestry University Nanjing 210037; 3. Baoguo Ancient Architecture Museum Ningbo 315033)

Abstract: 【Objective】By testing the withdrawal strength of round nails and self-tapping screws those were driven into larch and spruce dimension lumber under different angles, the effects of driving angle between axial and wood fiber, wood density, and tangential face and radial face on the withdrawal strength were studied. 【Method】Round nails(Ø2.5 mm) and self-tapping screws(Ø4.0 mm), were respectively driven into the larch(*Larix gmelinii*) and spruce(*Picea glauca*) lumber, and the withdrawal strength was tested following the Chinese national standard, meeting the minimum requirement of edge and end distance and spacing of nails or self-tapping screws, nails or self-tapping screws were driven into dimension lumber at 90°, 60°, 45° and 0°, respectively, and then pulled out at constant speed of 3 mm·min⁻¹ using self-designed nail/screw withdrawal strength test holding device until the failure load. The influences of different parameters on nail/self-tapping screws withdrawal strength were estimated through calculation and comparative analysis of failure load. 【Result】1) With the decrease of the driving angle, the load-displacement curve became more sharp, and the withdrawal strength value of self-tapping screw was obviously greater than that of round nails. The withdrawal strength of value nail/screw in larch with higher-density was greater than that in spruce, and the withdrawal stiffness of self-tapping screw in

收稿日期: 2017-11-23; 修回日期: 2018-05-31。

基金项目: 国家自然科学基金项目(31670566)。

* 阙泽利为通讯作者。

larch was obviously larger than that in spruce. But the shapes of curves in different angles were nearly the same. 2) The withdrawal strength of nail/screw which were driven at 90° was greater than that at 0° , but from 90° to 0° , the withdrawal strength increased firstly and then decreased, and the variation trend of withdrawal strength of self-tapping screw showed opposite. 3) The withdrawal strength of self-tapping screw driven in the radial face of spruce was greater than that in tangential face, but that of round nail was not regular. The withdrawal strength of round nail in tangential face of larch was smaller than that in radial face, but that of self-tapping screw was not regular. 【Conclusion】 The angle had a significant influence on withdrawal strength of nails and screws. With the decrease of angle, screws withdrawal strength decreased firstly and then increased, the trend of round nails was opposite. There was no definite correlations between withdrawal strength in tangential face and radial face, and the parameter of driving angle with tree ring should not be considered in the calculation of withdrawal strength design value in timber structure. The formula recommend in European code for design of timber structures(BS EN 1995-1-1: 2004) showed the withdrawal strength of screw fall off with the decrease of driving angle, but the test result indicated that the estimation of withdrawal strength at 0° was too conservative. When pulling out the screws driven in the end face, the damage was obvious brittle fracture. So an effective reinforcement and calculation of strength was necessary for the self-tapping screws connection in timber end face in practical timber structural engineering.

Key words: driving angle; self-tapping screw; withdrawal strength; nail; dimension lumber

销轴类连接是现代木结构建筑应用最广泛的连接方式,而钉是木结构中出现最早也是最常见的一种金属连接件,因具有连接紧密、操作方便和耗能能力强等优点在木结构中普遍使用(阙泽利等, 2014a; 费建波等, 2010; 常程等, 2019)。如用于屋面与楼面木龙骨间的连接、结构板材与搁栅间的连接、剪力墙的蒙皮结构、墙面挂板的铺装、施工时临时支撑的固定等(陈恩灵, 2008)。通常,钉都是以 90° 垂直钉入被连接件,但在一些特殊场合,如轻型木结构中墙骨柱

采用斜圆钢钉与底板相连(图 1a),或采用斜自攻螺钉与顶梁板相连(图 1b),自攻螺钉钉长最长可达 1 m。美国木结构设计规范(NDS) 最早根据试验测得的握钉力强度极限值,提出了基于木材密度、钉直径和钉入深度的普通圆钢钉和木螺钉等握钉力设计值计算公式(ANSI/AF&PA NDS—2005)。我国国标规定了关于木材圆钢钉握钉力试验方法和人造板材的自攻螺钉握钉力试验方法,但未对不同角度的木材螺钉握钉力测试和计算方法提出明确要求。

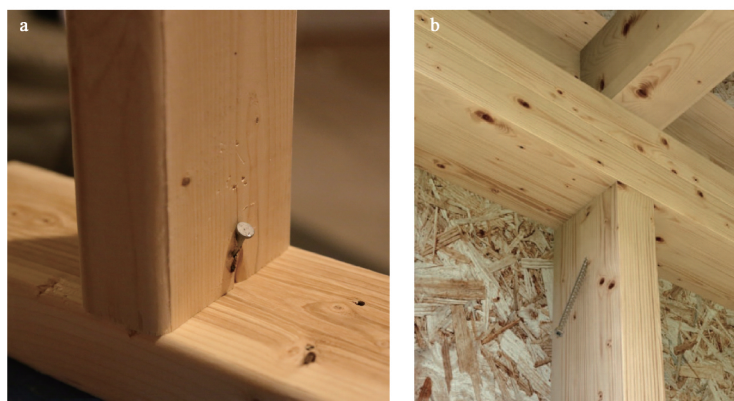


图 1 木结构建筑中斜螺钉连接实例

Fig.1 Example of inclined nails and self-tapping screws used in timber structure

钉连接节点可分为垂直于钉轴线的侧向剪力和平行于钉杆的拔出力 2 个方向上的承载(陈恩灵等, 2008)。握钉力是衡量钉连接性能的重要指标之一,多年来,国内外许多学者对钉入深度、钉直径、钉表面形状及放置时间和环境等参数对握钉力的影响开展了大量试验研究(Thomas, 1997; Douglas *et al.*, 2001; 2004; Bejtka, 2006; Frese *et al.*, 2010; 阙泽利等, 2014b)。欧洲木结构规范(BS EN 1995-1-

1: 2004) 提供了一个握钉力关于钉入角度的设计值计算公式(BS EN 1995-1-1: 2004),但国内外针对相对木纤维的钉入角度对握钉力性能的影响试验研究较少。鉴于此,本研究以木结构中常用的落叶松(*Larix gmelinii*) 和白云杉(*Picea glauca*) 规格材为对象,研究不同钉入角度、木材密度和木材径、弦向对握钉力性能的影响,以为木结构钉连接设计提供更完善的科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

落叶松规格材产地俄罗斯,其纹理通直,有部分活节,尺寸为 $38\text{ mm}\times 89\text{ mm}\times 4\,200\text{ mm}$,平均密度为 $0.657\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,平均含水率为16.4%;白云杉规格材产地加拿大,其纹理通直,有少量活节,尺寸为 $38\text{ mm}\times 89\text{ mm}\times 4\,000\text{ mm}$,平均密度为 $0.469\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,平均含水率为15.3%。参考《木质结构材料用销类连接件连接性能试验方法》(LY/T 2377—2014)中对握钉力试件尺寸的规定,从2种规格材上顺纹截取150 mm长无瑕试件。圆钢钉为普通低碳圆钢钉,依据《木材握钉力试验方法》(GB/T 14018—2009)要求,钉型选取为 $\Phi 2.5\text{ mm}\times 50\text{ mm}$,钉杆光滑,表面无锈迹、无缺失、钉尖挂铁或弯曲等缺陷;螺钉选用如图2所示十字沉头型自攻螺钉,表面镀锌。

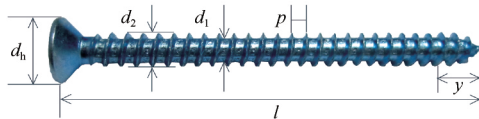


图2 握钉力测试用自攻螺钉

Fig.2 Self-tapping screws used in withdrawal test

l : 长度 Length (50 mm); d_h : 钉帽直径 Head diameter (7.1 mm); d_1 : 螺纹内径 Inner thread diameter (3.0 mm); d_2 : 螺纹外径 Outer thread diameter (4.0 mm); P : 螺纹间距 Screw pitch (1.65 mm); y : 不完整螺纹长度 Length of incomplete thread (4.6 mm) .

1.2 试件制备

如图3所示,与木纤维分别成 90° (横纹)、 60° 、 45° 和 0° (顺纹)钉入自攻螺钉和圆钢钉。每个试件

仅测试同一角度2颗钉,钉的间距和边距依据《木质结构材料用销类连接件连接性能试验方法》(LY/T 2377—2014)规定:顺纹方向上间距和边距不小于 $10d$,横纹方向上不小于 $5d$ 。自攻螺钉钉入时不预钻引导孔,直接用螺丝刀手工拧入30 mm,圆钢钉采用锤子手工匀速钉入30 mm。钉入前,采用游标卡尺(精度为0.02 mm)测量钉的直径和长度。一钉一测,即钉入一颗圆钢钉或自攻螺钉在10 min内完成握钉力测试,再在试样的下一个位置钉入下一测试钉,且每次钉入后测量钉的外露长度,以精确计算钉入深度。

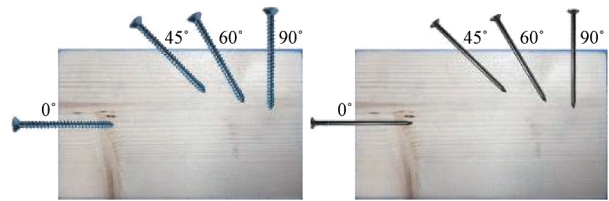


图3 不同角度钉入自攻螺钉(左)和圆钢钉(右)示意

Fig.3 Schematic diagram of screws(left) and nails(right)

driven with different angles

1.3 试验方法

采用最大荷载为100 kN的岛津万能力学试验机(型号AG-10C),测试时环境温度 $20\sim 25^\circ\text{C}$,相对湿度35%~45%。因《木结构握钉力试验方法》(GB/T 14018—2009)和《人造板及饰面人造板理化性能试验方法》(GB/T 17657—2013)仅提供了垂直钉入试件的握钉力测试和夹持装置,并不能测试斜角钉入时的握钉力,因此本研究根据试验要求,自主设计了一套多角度握钉力试验夹持装置(阙泽利等,2017),如图4所示,其中 α 为钉入角度。测试

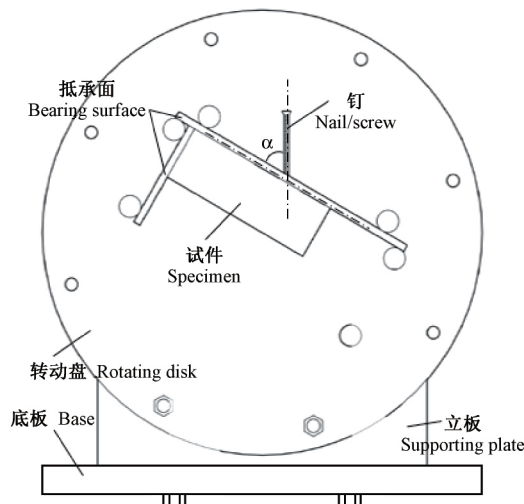


图4 多角度握钉力试验夹持装置示意(左)与实物(右)

Fig.4 Device for withdrawal strength test with multi angles schematic(left) and photo(right)

时,先调整好圆盘角度,使钉保持竖直方向,握紧钉头后以 $3\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速度均匀加载,1~2 min 内将钉子拔出。记录最大荷载,按照式(1)计算试件的握钉力,精确至 $0.01\text{ N}\cdot\text{mm}^{-1}$:

$$P = P_{\max} / L_0 \quad (1)$$

式中: P 为试件的握钉力($\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$); P_{\max} 为最大荷

载(N); L 为钉入深度(mm)。

2 结果与分析

2.1 试验结果

对落叶松和白云杉规格材进行不同钉入角度的握钉力试验,结果如表 1、2 所示。

表 1 落叶松和白云杉自攻螺钉握钉力试验结果^①

Tab.1 The screw withdrawal strength of larch and spruce

树种 Tree species	角度 Angle/ (°)	试件数 Amount	平均密度 Average density/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	测试时 含水率 Moisture content(%)	年轮宽度 Ring width/ mm	晚材率 Latewood percentage (%)	握钉力 Withdrawal strength of screw			
							径面 Radial face/ ($\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$)	变异系数 Coefficient of variation(%)	弦面 Tangential face/ ($\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$)	变异系数 Coefficient of variation(%)
落叶松 <i>Larix gmelinii</i>	90	30	0.65	16.5	1.4(0.15)	32(5.31)	115.21	10.27	115.89	6.08
	60	20	0.68	16.1	1.4(0.17)	34(13.17)	82.22	23.06	77.96	18.42
	45	20	0.63	15.4	1.5(0.31)	26(6.83)	66.93	12.62	73.21	11.09
	0	30	0.65	16.5	1.5(0.33)	25(8.69)	87.84	8.51	—	—
白云杉 <i>Picea glauca</i>	90	20	0.45	13.1	1.7(0.44)	23(3.77)	94.99	15.22	88.20	6.88
	60	20	0.51	14.6	1.8(0.30)	25(4.96)	69.03	18.51	64.94	16.33
	45	20	0.49	12.7	1.7(0.25)	30(5.52)	71.16	11.20	66.23	6.18
	0	20	0.45	13.1	1.3(0.21)	32(6.40)	74.85	15.08	—	—

①括号内数值为标准差。下同。The values in parentheses are standard deviations. The same below.

表 2 落叶松和白云杉圆钢钉握钉力试验结果

Tab.2 The nail withdrawal strength of larch and spruce

树种 Tree species	角度 Angle/ (°)	试件数 Amount	平均密度 Average density/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	测试时 含水率 Moisture content(%)	年轮宽度 Ring width/ mm	晚材率 Latewood percentage (%)	握钉力 Withdrawal strength of screw			
							径面 Radial face/ ($\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$)	变异系数 Coefficient of variation(%)	弦面 Tangential face/ ($\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$)	变异系数 Coefficient of variation(%)
落叶松 <i>Larix gmelinii</i>	90°	29	0.64	16.6	1.6(0.45)	34(8.63)	14.60	18.15	18.13	19.69
	60°	20	0.70	16.6	1.9(0.30)	38(5.76)	21.00	32.55	21.20	26.15
	45°	20	0.66	16.4	1.2(0.12)	36(5.93)	18.73	19.92	22.19	20.42
	0°	30	0.64	16.6	1.6(0.19)	33(7.75)	11.69	16.82	—	—
白云杉 <i>Picea glauca</i>	90°	20	0.44	12.6	1.5(0.2)	29(5.80)	13.00	8.90	14.10	16.60
	60°	20	0.49	13.4	1.6(0.44)	34(6.40)	19.67	17.60	19.93	16.73
	45°	20	0.52	13.6	1.0(0.07)	42(6.24)	19.37	14.80	18.66	21.04
	0°	20	0.44	12.6	1.6(0.39)	32(7.47)	11.09	24.73	—	—

2.2 试验现象

圆钢钉以不同角度钉入规格材时,仅少数硬度较大的落叶松弦切面上出现轻微开裂现象(图 5a),被拔出过程中没有明显现象,钉子完全拔出后,规格材表面仍保持平整,钉杆仍笔直光滑,没有黏附木纤维(图 5b)。

由于没有预导孔,自攻螺钉以不同角度拧入时略显困难,少数落叶松试件横纹面出现轻微开裂(图 5c),拔出时可观察到明显的木纤维黏附在自攻螺钉上被一同拔出,完全拔出后,规格材横纹面上钉孔周围鼓起(图 5d)。从横纹面拔出的钉杆表面裹一层絮状木纤维,易脱落,端面拔出的钉杆表面裹一层束状木纤维,紧密不易脱落。

图 6 所示为 2 种规格材不同钉入角度握钉力测

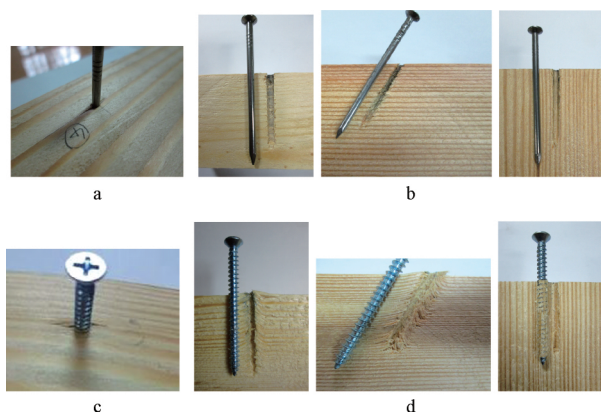


图 5 圆钢钉和自攻螺钉钉入和拔出中的现象

Fig.5 The phenomena during nailing and pull-out process of round nails and screws

试后靠近钉尖位置钉槽剖面图。结合表 1 和表 2 , 落叶松和白云杉的年轮宽度在 1.0~1.9 mm 之间 , 落叶松晚材率为 25%~38% , 白云杉晚材率为 23%~42% , 圆钢钉直径 2.5 mm 和自攻螺钉直径 4.0 mm 均大于 2 种木材的年轮宽度 , 所以钉入点均在年轮上。圆钢钉钉槽内壁光滑 , 且整个钉入和拔出过程中仅在钉径 2.5 mm 范围内的木纤维受到明显挤压破坏。横纹面上自攻螺钉钉孔在 2 倍钉径 8.0 mm 范围内木纤维发生明显变形 , 且越靠近表面范围越大 , 而端面上自攻螺钉被拔出后除在平整的槽内留下明显的螺钉刻痕外 , 钉径 4.0 mm 范围外木纤维没有明显破坏现象。

2.3 不同钉入角度时抗拔荷载-位移关系

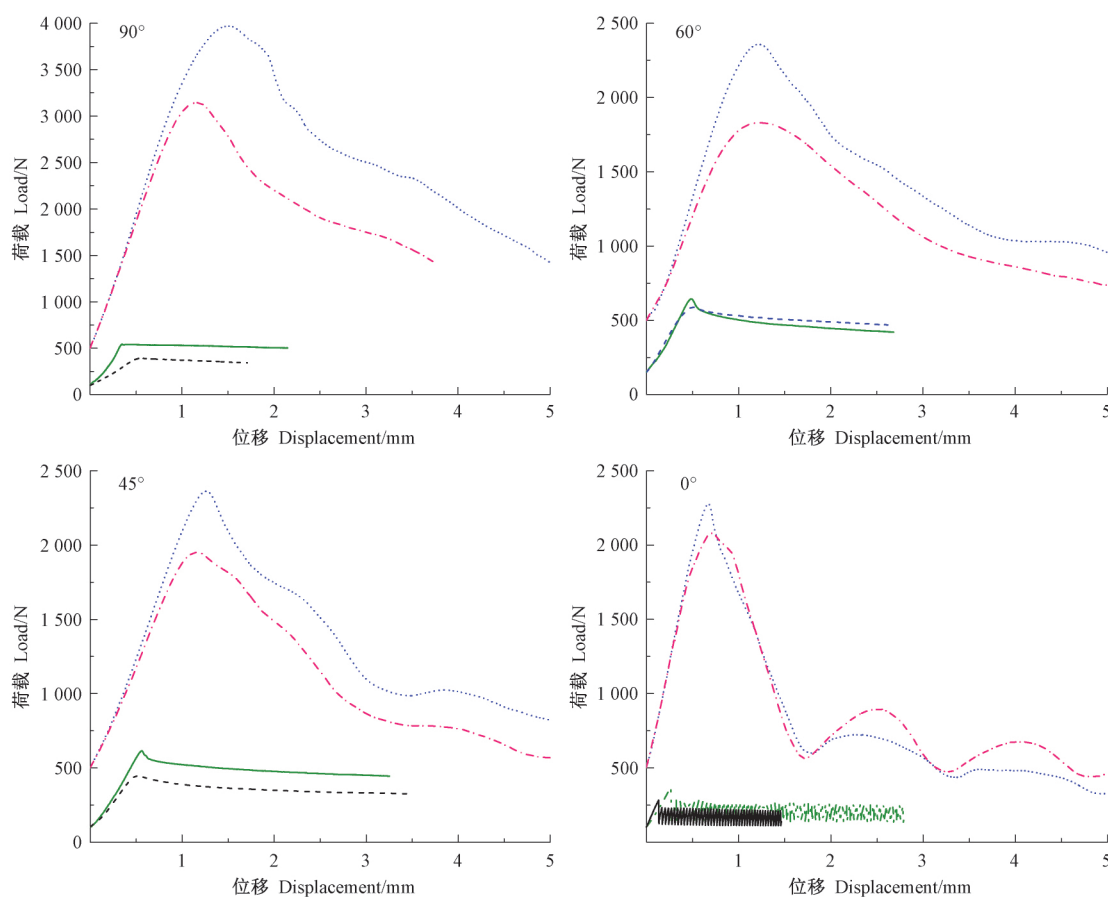
相同角度相同钉型时 , 落叶松和白云杉荷载-位移曲线的规律均较一致(图 7)。由于落叶松密度大于白云杉 , 因此落叶松荷载-位移曲线均高于白云杉。90°圆钢钉拔出时 , 荷载-位移曲线呈线

性 , 达到最大力后并没有立即下降 , 而是表现为明显的延性 , 呈线性缓慢降低 , 随着钉入角度逐渐减小 , 荷载最高点处出现越来越明显和尖锐的峰; 0°时荷载达到最大力后骤然降低 , 因为拔钉时钉杆挤压周围木材 , 形成一定摩擦力 , 在达到极限强度前握钉力主要由抵抗静摩擦力产生 , 静摩擦力最大时握钉力达到极限 , 随着位移继续增大 , 静摩擦力转变为动摩擦力 , 动摩擦力逐渐减小到一定程度后又转变为静摩擦力 , 逐渐增大 , 在静摩擦力和动摩擦力的转换中 , 荷载-位移曲线上下波动 , 但由于钉杆与木材间的接触面减少 , 握钉力整体呈下降趋势。90°钉入自攻螺钉时 , 曲线线性增长 , 达到最大力后缓慢下降 , 形成一个圆钝的峰 , 但随着钉入角度减小 , 峰逐渐变得尖锐 , 与圆钢钉握钉力峰随角度变化规律相同 , 且钉入角度越小 , 曲线下降过程中出现更多矮峰。落叶松对自攻螺钉握钉力的刚度略大于白云杉。



图 6 不同角度下钉尖部位剖视

Fig.6 The section view of tips position under different angles



·····自攻螺钉-落叶松 Screw-*Larix gmelinii* - - -自攻螺钉-白云杉 Screw-*Picea glauca* - · - ·圆钢钉-落叶松 Nail-*Larix gmelinii* —圆钢钉-白云杉 Nail-*Picea glauca*

图7 不同角度圆钢钉和自攻螺钉的荷载-位移曲线

Fig.7 The load-displacement curve of screws and nails with different angles

2.4 钉入角度对握钉力的影响

随着钉入角度减小,落叶松和白云杉圆钢钉的握钉力均呈先增大后减小的趋势,且 0° 时握钉力小于 90° ,与顺纹方向上圆钢钉握钉力小于横纹方向上的规律一致(图8)。落叶松和白云杉自攻螺钉的握钉力随着钉入角度减小先减小后增大, 0° 时握钉力同样小于 90° ,这是因为当 90° 钉入规格材时,木材像楔子一样嵌入螺纹的两齿之间,当螺钉拔出时,两齿之间的楔形木材受到剪切破坏,此时剪切力较大。而以 0° 钉入,即螺钉平行于木纤维,对螺钉产生束缚作用的仅为平行贴近钉杆外侧的少数木纤维,且平行木纤维易完全被螺钉带出,抗拔力主要来自木材顺纹抗剪力。握钉力强度的通用计算公式 $P=KG^aDL$ (K 为经长期荷载、含水率变化等因素调整后的常数, a 为密度指数, G 为木材密度, D 为钉直径, L 为钉入深度),在相同钉型和相同钉入深度条件下,木材密度越大,握钉力越大。试验落叶松规格材密度为 $0.657\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,白云杉密度为 $0.469\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,所以落叶松的握钉力均大于白云杉。

2.5 径、弦面对握钉力的影响

当圆钢钉或自攻螺钉以非 0° 钉入,即与木纤维不平行时,必然与年轮之间存在一个角度。试验时,根据钉位于径面或弦面来区分与年轮之间的角度,将结果分为2组。3种角度白云杉自攻螺钉的握钉力为径面>弦面,但落叶松没有明显规律;3种角度落叶松圆钢钉的握钉力为径面<弦面,而白云杉没有明显规律(图9)。可见径面和弦面对握钉力没有直接影响,在握钉力设计值计算时,不需要引入年轮角度调整系数(赵荣军等,2010)。

3 结论

与木纤维所成钉入角度发生改变时,圆钢钉和自攻螺钉的握钉力表现出明显变化。由于圆钢钉握钉力来自摩擦力,自攻螺钉握钉力来自剪切力,不同机制使二者产生截然相反的变化趋势。

不同树种木材的握钉力受密度影响产生差异,而达到最大拔出荷载时的位移受钉型影响较大。

自攻螺钉连接构件端面应考虑采用交叉布置等增强方式避免出现轴向抗拔超过极限荷载后的脆性

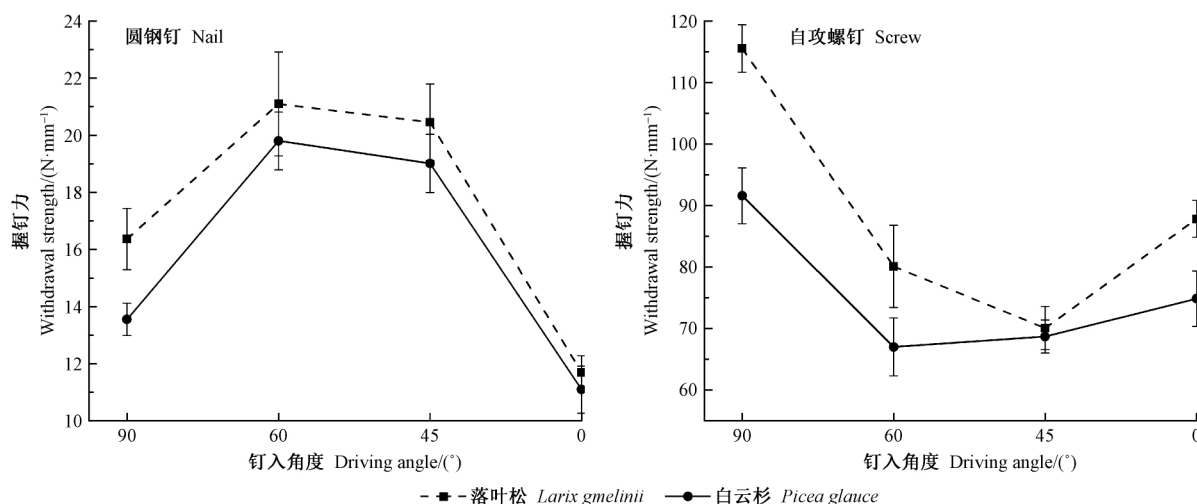


图 8 不同钉入角度时握钉力的比较

Fig.8 Comparison of withdrawal strength at different angles

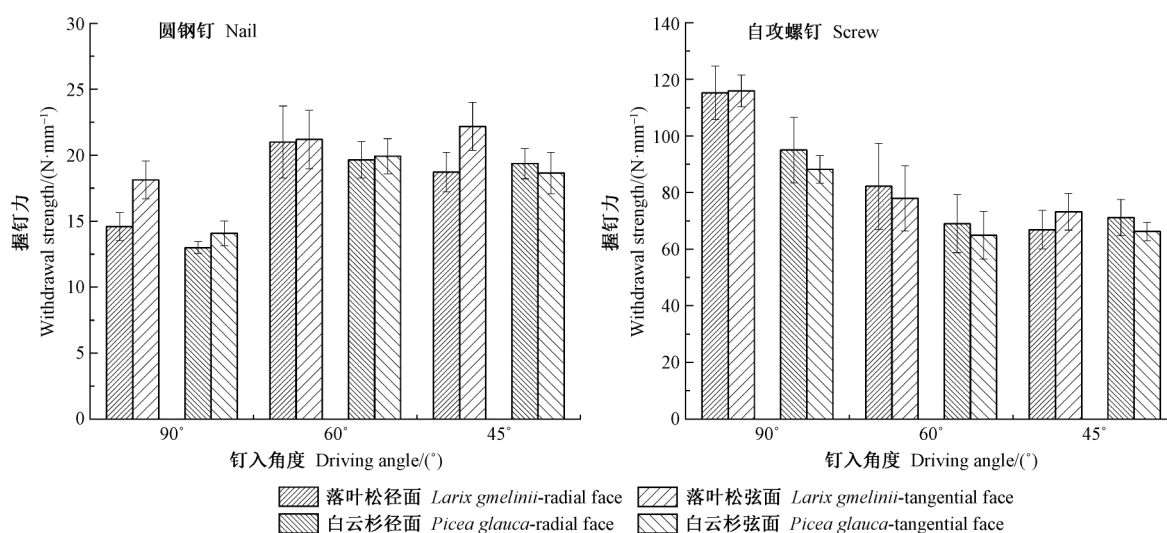


图 9 径面和弦面握钉力的比较

Fig.9 Comparison of withdrawal strength in tangential face and radial face

破坏,增强节点承载的安全系数。相比于圆钢钉和传统木螺钉,自攻螺钉有连接强度高、易拆装和可重复使用等优势。针对自攻螺钉连接节点的深入研究有助于完善节点设计体系,避免不合理方式连接构件,对建造更加绿色、环保、安全、经济的木结构建筑有重要意义。

参 考 文 献

- 常程,方毅飞,刘义凡,等. 2019. 斜螺钉在正交胶合木中的抗拔性能研究. 建筑技术, 50(4): 416-418.
- (Chang C, Fang Y F, Liu Y F, et al. 2019. Study on pull-out performance of tilted self-tapping screw in cross-laminated timber. Architecture Technology, 19(3): 38-43. [in Chinese])
- 陈恩灵. 2008. 木结构钉连接力学性能研究. 北京: 中国林业科学研究院硕士学位论文.
- (Chen E L. 2008. Research on the nailed joint in timber structure. Beijing: MS thesis of Chinese Academy of Forestry. [in Chinese])
- 陈恩灵,费本华,郭伟. 2008. 木结构握钉力的研究与发展. 木材加工机械, 19(3): 38-43.
- (Chen E L, Fei B H, Guo W. 2008. Review of nail withdrawal strength in wood construction. Wood Processing Machinery, 19(3): 38-43. [in Chinese])
- 费建波,王鹏. 2010. 木结构连接概述与分析. 山西建筑, 36(19): 100-101.
- (Fei J B, Wang P. 2010. General discussion and analysis on the connection of wooden structures. Shanxi Architecture, 36(19): 100-101. [in Chinese])
- 阙泽利,杨玲,王菲彬,等. 2014a. 盐溶液对木结构规格材握钉力的影响. 西南林业大学学报, 34(4): 101-104.
- (Que Z L, Yang L, Wang F B, et al. 2014a. The effect of salinity on the nail-holding power of dimension lumber. Journal of Southwest Forestry University, 34(4): 101-104. [in Chinese])
- 阙泽利,杨玲,王菲彬,等. 2014b. 导孔直径对木结构用规格材握

- 螺钉力性能的影响. 西北林学院学报, 30(5): 195-198.
- (Que Z L, Yang L, Wang F B, *et al.* 2014b. Effect of vessel diameter on screw withdrawal strength in dimension lumber of wood structure. Journal of Northwest Forestry University, 30(5): 195-198. [in Chinese])
- 阙泽利, 杨晓林, 滕启城, 等. 2017. 钉拔握钉力测试装置. 中国, 201710510447. 7. 2017. 06. 28.
- (Que Z L, Yang X L, Teng Q C, *et al.* 2017. Test device of universal nail/screw holding power. China, 201710510447. 7. 2017. 06. 28. [in Chinese])
- 赵荣军, 费本华, 陈恩灵, 等. 2010. 杉木规格材圆钢钉握钉强度研究. 建筑材料学报, 13(4): 463-467.
- (Zhao R J, Fei B H, Chen E L, *et al.* 2010. Nail withdrawal strength of Chinese fir dimension lumbars. Journal of Building Materials. 13 (4): 463-467. [in Chinese])
- Bejtka I. 2006. Verstärkung von Bauteilen aus Holz mit Vollgewindeschrauben. Karlsruhe: PhD thesis of Universität Karlsruhe.
- Douglas R R, Samuel L Z. 2004. Review of end grain nail withdrawal research. United States Department of Agriculture, Forest Products Laboratory General Technical Report, FPL-GLR-151, 28.
- Douglas R R, Steve G W, Donald A B. 2001. Withdrawal strength of threaded nails. Journal of Structural Engineering, 127 (4): 442-449.
- Frese M, Fellmoser P, Blaß H J. 2010. Modelle für die Berechnung der Ausziehtragfähigkeit von selbstbohrenden Holzschrauben. European Journal of Wood & Wood Products, 68(4): 373-384.
- Thomas T M. 1997. Design axial withdrawal strength from wood II. Plain-shank common wire nails. Forest Products Journal, 47 (6): 103-109.

(责任编辑 石红青)