



# 木结构螺栓连接设计中销槽承压强度值的确定方法\*

张刚 王朝晖 王金平 刘柯珍 张忠利

**摘要:** 木材销槽承压强度是木结构螺栓连接节点设计的一个重要参数。结合国内外主要国家木材销槽承压强度的测定方法和模拟计算公式,将模拟计算结果与试验结果进行比较,分析表明螺栓直径5%偏移法作为木材销槽承压强度的判定方法较为合理,且兴安落叶松的5%偏移法试验测定结果与美国木结构设计规范NDS规定模拟值误差在-2.02%~10.44%之间。设计人员可在未经过试验测定兴安落叶松销槽承压强度时,对模拟计算得到的销槽承压强度值乘以折减系数0.91作为设计参考值。

**关键词:** 木结构;销槽承压强度;5%偏移法;模拟计算公式

中图分类号:TU366.2 文献标识码:A 文章编号:1001-5299(2014)04-0022-05

## Determination Methods of Wood Embedding Strength for Bolt Connection of Wooden Structure

ZHANG Gang WANG Zhao-hui WANG Jin-Ping LIU Ke-zhen ZHANG Zhong-li

(Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry;

Key Laboratory of Wood Science and Technology of State Forestry Administration, Beijing 100091, China)

**Abstract:** Wood embedding strength is an important parameter for designing the bolt connection of wooden structure. The international and domestic determination methods and simulation formulas of wood embedding strength were described and listed in this paper, and the results of simulation formula and experiment results were compared. The result obtained 5% off-set as an evaluating method of wood embedding strength was more reasonable, and theoretical values of wood embedding strength from NDS were in good agreement with the experimental values of *Larix gmelini* dimension lumbers and glued-laminated timber by 5% off-set. And the result error between experiment and simulation formula is in the range from -2.02% to 10.44%. When without the experiment values of *Larix gmelini* of wood embedding strength, designers could regard the value which calculated the simulation value of bearing strength by multiplying the reduction factor of 0.91 as an embedding strength design reference of *Larix gmelini*.

**Key words:** Wooden structure; Embedding strength; 5% off-set; simulation formula

螺栓、钢销、钉、螺丝等细而长的销轴紧固件统称为销轴类连接件,它们的特点是通常承受的荷载与连接件本身长度方向垂直,故称为侧向抗剪连接,屈服时通常发生销轴自身弯曲和木材销槽承压破坏,具有良好的韧性,在工程中广泛应用。木材的销槽承压强度是

确定螺栓连接承载力的重要参数与通常的抗压强度不同。当螺栓连接为I模式屈服破坏时,螺栓连接侧向抗剪承载力直接由木材销槽承压强度决定。笔者综合阐述了国内外木材销槽承压强度的测定方法,列出国内外木材销槽承压强度的理论计算公式并将美国木结构设计规范NDS<sup>[1]</sup>中销槽承压强度的计算结果与试验结果进行比较,为木材销槽承压强度的选取提供参考。

\* 基金项目:中央级公益性科研院所重点项目“国产落叶松材木结构关键技术研究(CAFINT2010K01)”

张刚,在读硕士研究生,中国林业科学研究院木材工业研究所

王朝晖(通讯作者),单位同第一作者,E-mail:zhwang@caf.ac.cn

修回日期:2014-05-28

## 1 木材销槽承压强度的测定方法

### 1.1 木材销槽承压强度的测试方法



通过试验测定木材销槽承压强度的方法有半孔和全孔 2 种方法。半孔法测试过程中螺栓不能发生弯曲,加载面直接作用于半孔上的螺栓进行平压见图 1;半孔法测试方法简单,易于实现,试验结果误差较小;由于测试过程中螺栓不发生弯曲,测试结果能够准确反映木材整体的销槽承压强度,但与实际使用情况不完全相符。全孔法试验要求较高,试验结果的影响因素较多,但更接近木材销槽承压时实际受力状态。

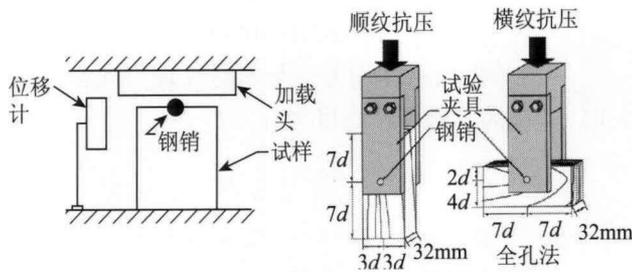


图 1 木材销槽承压强度试验测试方法

目前测定木材销槽承压强度的试验方法,主要参照美国 ASTM(D5764—97a)<sup>[2]</sup>和欧盟 EN 383—2007<sup>[3]</sup>。两者都是采用单个螺栓测定木材的销槽承压强度。前者采用半孔或全孔两种测试方法,后者仅采用全孔测试方法。它们都对测试试件的尺寸和孔洞的位置做出规定,但两者规定不同,见表 1。测试时,ASTM(D5764—97a)规定只能通过试件的压缩试验测定木材的销槽承压强度,而 EN 383—2007 规定可通过试件的压缩或拉伸试验测定木材的顺纹销槽承压强度,通过试件的压缩试验测定木材的横纹销槽承压强度。

表 1 ASTM(D5764—97a)与 EN 383—2007 关于木材销槽承压强度测试方法的规定差异及目的

规定存在的差异	ASTM (D5764—97a)	EN 383—2007	目的
试件厚度	38mm 或 2d	1.5d~4d	避免销轴在测试过程中发生弯曲或开裂
孔洞的端距	距受力端 ≥ 50mm 或 4d	顺纹时 7d	避免试件在测试过程中开裂
	距非受力端 ≥ 50mm 或 2d	横纹时 20d	

注: d 为紧固件的直径。

### 1.2 木材销槽承压强度的判定方法

通过试验可以得到在荷载作用下的荷载 - 位移曲线;将通过荷载 - 位移曲线上某点对应的销槽承压荷载  $F_c$  与直径  $d$  和构件厚度  $t$  乘积的比值  $F_c/dt$  定义为木材的销槽承压强度。那么对于同一试验结果,不同的木结构螺栓连接设计中销槽承压强度值的确定方法——张刚

销槽承压荷载  $F_c$  判定方法,将得到不同的木材销槽承压强度。

通常采用的销槽承压荷载  $F_c$  判定方法有:5%偏移法、5mm 最大位移法,见图 2。5%偏移法指试验得到的荷载 - 位移曲线上与初始线性阶段平行的直线沿水平方向移动 5%直径的位移,该斜直线与曲线的交点对应的荷载定义为销槽承压荷载  $F_c$ ,见图 2(a);5mm 最大位移法指试验得到的荷载 - 位移曲线减去由实验装置在对应荷载时因变形产生的位移,校正后的荷载 - 位移曲线对应的最大荷载或者 5mm 位移处对应的荷载为销槽承压荷载  $F_c$ ,见图 2(b)。

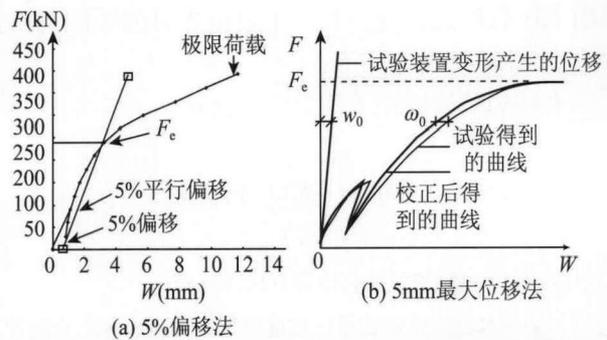


图 2 木材销槽承压强度试验中荷载 - 位移曲线上荷载  $F_c$  的两种判定方法

Sawata K 等<sup>[4]</sup>对 5%偏移法和 5mm 最大位移法进行比较,结果表明这两种方法测得木材顺纹的销槽承压强度比较接近,约为 0.9 倍的木材顺纹承压强度;而 5%偏移法测得木材的横纹销槽承压强度结果小于 5mm 最大位移法得到的结果,约为 0.4 倍的木材顺纹抗压强度。产生上述现象原因是:木材顺纹承压的应力 - 应变模型是理想弹塑性模型,而木材横纹承压的应力 - 应变模型是弹性 - 线性强化型;从 Sawata K 等<sup>[4]</sup>试验得到鱼鳞云杉和库页冷杉机械等级锯材层板的销槽承压强度 - 位移曲线可以清楚看到木材的这种特性,见图 3。

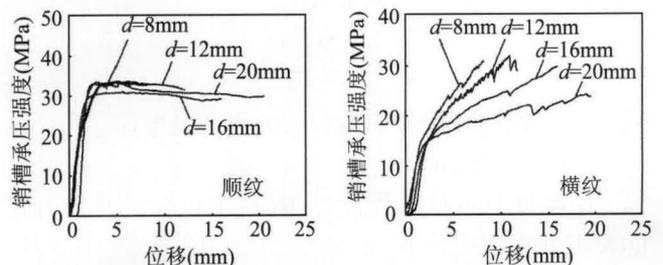


图 3 木材的销槽承压强度 - 位移曲线

分析木材销槽承压强度试验中销轴周围的应力分



布可知:当试件尺寸一定时,销轴与木材的接触面积随销轴直径的增大而增加,同时销轴对木材水平方向的挤压作用也随之增加,即增大销轴直径可以增加销槽的承压荷载  $F_e$ ,同时提高了木材开裂破坏的可能性。由此可知考虑到销轴直径因素的 5% 偏移法判定木材销槽承压荷载更为合理。

## 2 国内外木材销槽承压强度的模拟计算公式及比较

### 2.1 国内外木材销槽承压强度的模拟计算公式

以下分别列出国内外木结构设计规范给出的木材销槽承压强度的模拟计算公式。

1) 我国《木结构设计手册》(第三版)<sup>[5]</sup>中给出木材销槽承压强度设计值公式,主要由木材的顺纹抗压强度设计值决定,具体如下:

木材的顺纹销槽承压强度设计值:

$$f_{e,0} = f_{c,0}$$

木材的横纹销槽承压强度设计值:

$$f_{e,90} = k_{90} f_{c,0}$$

式中:  $f_{c,0}$ —木材顺纹抗压强度设计值(N/mm<sup>2</sup>);

$k_{90}$ —木材横纹销槽承压强度降低系数(见《木结构设计手册》(第三版)表 5.3.2)。

2) 我国《胶合木结构技术规范》GB/T 50708—2012<sup>[6]</sup>规定了木材销槽承压强度的模拟计算公式:

木材的顺纹销槽承压强度:

$$f_{e,0} = 77G$$

木材的横纹销槽承压强度:

$$f_{e,90} = \frac{212G^{1.45}}{\sqrt{d}}$$

式中:  $G$ —主构件材料的平均全干相对密度(比重);

$d$ —螺栓直径(mm)。

3) 美国木结构设计规范 NDS<sup>[1]</sup>规定木材销槽承压强度的模拟计算公式如下:

木材的顺纹销槽承压强度:

$$f_{e,0} = 77.2G$$

木材的横纹销槽承压强度:

$$f_{e,90} = \frac{212G^{1.45}}{\sqrt{d}}$$

式中:  $G$ —主构件材料的平均全干相对密度(比重);

$d$ —螺栓直径(mm)。

4) 加拿大木材工程设计<sup>[7]</sup>规定木材销槽承压强度的模拟计算公式如下:

木基材料的顺纹销槽承压强度:

$$f_{e,0} = 50G(1-0.01d)$$

木基材料的横纹销槽承压强度:

$$f_{e,90} = 22G(1-0.01d)$$

式中:  $G$ —主构件材料的平均全干相对密度(比重);

$d$ —螺栓直径(mm)。

5) 欧洲木结构设计规范<sup>[8]</sup>对木材销槽承压强度的模拟计算公式规定比较详细,主要由木材的密度、荷载作用方向与木材纹理的夹角、荷载持续时间、顺纹方向之间的间距以及木构件的树种共同决定。对单个螺栓,木材销槽承压强度的模拟计算公式如下:

木材顺纹的销槽承压强度为:

$$f_{e,0} = 0.082(1-0.01d)\rho_k$$

当螺栓的荷载作用方向与木材纹理方向存在夹角  $\alpha$  时,木材的销槽承压强度为:

$$f_{e,\alpha} = \frac{f_{e,0}}{K_{90}\sin^2\alpha + \cos^2\alpha}$$

式中:  $\rho_k$ —木材气干密度的 5% 分位值(kg/m<sup>3</sup>);

$f_{e,0}$ —木材顺纹的销槽承压强度;

$$K_{90} = \begin{cases} 1.35+0.015d & \text{针叶材} \\ 1.30+0.015d & \text{单板层积材} \\ 0.90+0.015d & \text{阔叶材} \end{cases}$$

6) 日本木结构设计规范<sup>[9]</sup>给出的木材销槽承压强度的模拟计算公式如下:

木材的顺纹销槽承压强度:

$$f_{e,0} = 57.07\rho - 0.68$$

木材的横纹销槽承压强度:

$$f_{e,90} = (30.54\rho + 0.19)d^{-0.2}$$

式中:  $\rho$ —木材平均气干相对密度;

$d$ —螺栓直径(mm)。

综上所述,各国给出的木材销槽承压模拟计算公式都与木材的密度有关,只是密度的定义不同;除我国和美国的木材顺纹销槽承压强度模拟计算公式与直径无关,其余的模拟计算公式均与螺栓的直径有关。总体上欧洲木结构设计规范对木材销槽承压强度的规定比较全面,考虑了荷载作用时间、材料和树种对木材销槽承压强度的影响;我国《胶合木结构技术规范》GB/T 50708—2012 仅考虑了木材的密度和螺栓直径对木材销槽承压强度的影响。

### 2.2 国内外木材销槽承压强度的模拟公式计算结果比较

各国木结构设计规范给出的木材销槽承压强度模拟计算公式都有一定差别。为了客观说明各个模拟计算公式的不同,笔者对不同密度和直径对应的计算结果进行比较。此处采用钢销,木材选用兴安落叶松,比较结果见表 2。表中的密度为平均全干密度,变异系数



为 10%，从表 2 可知：我国《木结构设计手册》中木材顺纹销槽承压强度的设计值相对较小，随着密度和钢销直径的变化其计算结果保持不变，与实际情况不符；我国《胶合木结构技术规范》GB/T 50708—2012 和美国木结构设计规范对木材销槽承压强度的模拟计算结果整体

高于欧洲，这主要是因为欧洲木结构设计规范中木材销槽承压强度模拟公式计算得到的结果为木材销槽承压强度的下限 5%分位值，美国的计算结果则为木材销槽承压强度的平均值。美国规范给出的木材销槽承压强度模拟公式的计算结果整体均高于其他 4 个国家或地区。

表 2 木材销槽承压强度不同公式的计算结果(数字) (MPa)

全干密度(g/cm <sup>3</sup> )	0.40		0.50		0.60		0.70	
	顺纹	横纹	顺纹	横纹	顺纹	横纹	顺纹	横纹
螺栓直径								
d=12mm								
1	15.0	10.2	15.0	10.2	15.0	10.2	15.0	10.2
2	30.8	16.2	38.5	22.4	46.2	29.2	54.0	36.5
3	30.8	16.2	38.5	22.4	46.2	29.2	54.0	36.5
4	17.6	7.7	22.0	9.7	26.4	11.6	30.8	13.6
5	26.4	17.2	32.6	21.3	38.6	25.2	44.5	29.1
6	24.3	8.2	30.2	10.2	35.9	12.0	41.5	13.8
d=14mm								
1	15.0	9.8	15.0	9.8	15.0	9.8	15.0	9.8
2	30.8	15.0	38.5	20.7	46.2	27.0	54.0	33.8
3	30.8	15.0	38.5	20.7	46.2	27.0	54.0	33.8
4	17.2	7.6	21.5	9.5	25.8	11.4	30.1	13.2
5	25.8	16.5	31.8	20.4	37.7	24.2	43.5	27.9
6	24.3	8.0	30.2	9.9	35.9	11.7	41.5	13.4
d=16mm								
1	15.0	9.0	15.0	9.0	15.0	9.0	15.0	9.0
2	30.8	14.0	38.5	19.4	46.2	25.3	54.0	31.6
3	30.8	14.0	38.5	19.4	46.3	25.3	54.0	31.6
4	16.8	7.4	21.0	9.2	25.2	11.1	29.4	12.9
5	25.2	15.8	31.1	19.6	36.9	23.2	42.5	26.7
6	24.3	7.8	30.2	9.6	35.9	11.4	41.5	13.1

注：1)表中 1、2、3、4、5、6 分别对应我国《木结构设计手册》、《胶合木结构技术规范》和美国、加拿大、欧洲、日本对木材销槽承压强度的理论公式；  
1 的结果为设计值；  
2)表中的数据是将全干密度转换成相应公式中规定密度形式后计算得到的；  
3)全干相对密度  $G = \text{全干密度} / 4\text{℃时水的密度}$ ；5%分位值 = 平均值  $\times (1 - 1.65 \times 10\%)$ ；  
4)密度的下限 5%分位值 = 平均密度  $\times (1 - 1.65 \times 10\%)$ ；  
5)气干密度与全干密度的转换公式： $\rho_v = \rho_0 (100 + w) / (100 + 0.85 \rho_0 w)$ ， $w\%$ 为木材的含水率，此处取  $w = 15$ 。

### 2.3 兴安落叶松销槽承压强度的试验与理论结果比较

试验选取取自黑龙江省塔河林业局的兴安落叶松和材质为 Q235 的钢销，规格材试件 31 个，试件尺寸为 140mm(长)  $\times$  140mm(宽)  $\times$  38mm(厚)；胶合木试件 24 个，试件尺寸为 140mm(长)  $\times$  140mm(宽)  $\times$  76mm(厚)或 114mm(厚)或 152(厚)；胶合木由兴安落叶松规格材和异氰酸酯双组份胶黏剂胶合而成，随钢销直径增大而试件厚度增大(2 层、3 层、4 层)；参照 ASTM (D5764—97a)对兴安落叶松规格材和胶合木的销槽承压强度进行测定。验结果表明，兴安落叶松具有较高的销槽承压强度。将兴安落叶松销槽承压强度的试验结果与美国 NDS 的模拟公式计算结果进行比较，见表 4。由表 4 可知：美国 NDS 给出木材销槽承压强度模拟公式的计算结果与参照美国 ASTM (D5764—97a)试验测定的木材销槽承压强度存在误差，兴安落叶松顺纹时销槽承压强度的试验与模拟公式结果误差范围在 -2.02%~7.77%之间，横纹时的结果误差范围在 2.29%~10.44%之间。这主要是因为模拟公式是由不同树种的大量试验

压强度进行测定。验结果表明，兴安落叶松具有较高的销槽承压强度。将兴安落叶松销槽承压强度的试验结果与美国 NDS 的模拟公式计算结果进行比较，见表 4。由表 4 可知：美国 NDS 给出木材销槽承压强度模拟公式的计算结果与参照美国 ASTM (D5764—97a)试验测定的木材销槽承压强度存在误差，兴安落叶松顺纹时销槽承压强度的试验与模拟公式结果误差范围在 -2.02%~7.77%之间，横纹时的结果误差范围在 2.29%~10.44%之间。这主要是因为模拟公式是由不同树种的大量试验



表3 兴安落叶松规格材与胶合木的销槽承压强度试验结果

材料	螺栓直径(mm)	平均气干密度(g/cm <sup>3</sup> )	含水率(%)	销槽承压强度(MPa)
规格材	12	0.589(11.43%)	10.4	39.9(15.00%)(顺纹)
	10	0.608(11.03%)	10.2	27.4(25.07%)(横纹)
		0.590(8.46%)	10.1	44.6(14.23%)(顺纹)
胶合木	12	0.604(9.97%)	10.4	24.9(19.38%)(横纹)
		0.613(10.08%)	10.3	44.2(11.86%)(顺纹)
	18	0.599(8.87%)	11.2	21.8(17.92%)(横纹)
		0.614(12.29%)	10.4	42.3(11.76%)(顺纹)

注:括号内数值为对应数值的变异系数。

拟合得到的,与具体的试验结果比较则会存在误差。因此,对于兴安落叶松计算的销槽强度值与半孔销槽压缩5%偏移法获得实测值虽然有误差,但基本在10%范围内,模拟计算值乘以折减系数0.91后更接近实测值。这个参考折减系数虽然偏于保守,但在充分发挥材料性能的同时能够保证木构件节点连接的性能安全。

表4 兴安落叶松的销槽承压强度试验结果与NDS中模式公式计算结果比较

螺栓直径(mm)	规格材		胶合木				
	12	10	12	18	12	18	
纹理方向(°)	顺纹	顺纹	横纹	顺纹	横纹	顺纹	横纹
试验结果(MPa)	39.9	44.6	27.4	44.2	24.9	42.3	21.8
NDS结果(MPa)	43	43.7	30.2	45.1	27.5	44.8	22.3
误差 Error (%)	7.77	-2.02	10.22	2.04	10.44	5.91	2.29

注:1)误差=[(NDS计算结果-试验结果)/试验结果]×100%。

### 3 建议与结论

1)我国新颁布的《胶合木结构技术规范》GB/T 50708—2012中给出了螺栓销槽承压强度的模拟计算公式,销槽承压强度主要由木材密度、螺栓直径和加载方向与木材纹理角度决定。将来修订时可考虑不同树种密度变异、荷载作用时间对木材销槽承压

强度的影响。

2)木材销槽承压强度的半孔测试法能够准确测得木材的销槽承压强度,但与实际受力情况不完全相符;全孔测试法能够准确反映实际受力情况时木材的销槽承压强度,但影响因素较多。5%偏移法能够反映直径对木材销槽承压强度的影响,作为销槽承压强度试验中销槽承压荷载 $F_c$ 的判定方法较为合理。

3)针对兴安落叶松的销槽承压强度,将参照美国ASTM(D5764—97a)半孔法测定的试验结果与依据美国NDS模拟公式的计算结果进行比较,两者之间存在误差;顺纹时销槽承压强度的试验结果与模拟公式计算结果误差范围在-2.02%~7.77%之间,横纹时在2.29%~10.44%之间。因此可根据兴安落叶松密度及销轴直径估算其销槽承压强度。

### 4 参考文献

- 1 American Forest & Paper Association. ANSI/AF&PA NDS-1997 National Design Specification for Wood Construction[S]. AF&PA: Washington, D. C. 1997.
- 2 American Society for Testing and Materials International. ASTM D5764-97a (2007) Standard test method for evaluation dowel-bearing strength of wood and wood-based products[S]. 2007.
- 3 British Standards Institution. BS EN 383:2007 Timber Structures — Test methods—Determination of embedment strength and foundation values for dowel type fasteners[S]. BSI, London. 2004.
- 4 Sawata K, Yasumura M. Determination of embedding strength of wood for dowel-type fasteners[J]. Journal of Wood Science, 2002, 48(2): 138~146.
- 5 《木结构设计手册》编委会. 木结构设计手册(第三版)[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2005.
- 6 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 50708-2012 胶合木结构技术规范[S]. 2012.
- 7 Canadian Standard Association(CSA). Engineering Design In Wood[S]. Mississauga, Ontario, Canada, 2009.
- 8 British Standards Institution. BS EN 1995-1-1 Eurocode 5: Design of timber structures-Part 1-1: General-Common rules and rules for buildings[S]. BSI, London. 2004.
- 9 日本建筑学会. 木质构造极限状态设计指针(案)·同解说[S]. 2003.

(责任编辑 李永康)

#### · 会讯 ·

#### 第四届世界木材与木制品贸易大会 9月将在青岛召开

本刊讯:近日从中国木材与木制品流通协会木材进出口商分会秘书处得到消息,第四届世界木材与木制品贸易大会将于2014年9月15~16日在青岛举行。

会议宗旨将秉承从战略高度和现实问题出发,研究探索世界木材与木制品贸易可持续发展之路,打造世界木材与木

制品贸易国政府、企业界、学术界和国际组织相互交流沟通的重要平台和渠道。除主题演讲外,大会还将围绕中国以及世界范围内木材与木制品贸易热点话题进行深入讨论,设分会场、小型展览、商务洽谈、颁奖盛典等特色环节,最大限度地扩大和促进与会代表之间的交流与合作。