

应县木塔修缮用木材的防裂措施

樊承谋 王林安 潘景龙
(哈尔滨工业大学土木工程学院)

摘要:作者根据国家标准《古建筑木结构维护与加固技术规范》GB 50165-92的规定,建议选用兴安落叶松为应县木塔修缮用材。针对这种木材易于开裂的特性和修缮后再传承千年的要求,该文根据落叶松木材气干过程中开裂程度的试验及落叶松和冷杉胶合梁胶合质量对比试验的结果,提出了采用侧边破心方木钉连接组合梁和层板胶合木两项防裂措施,能将木塔修缮中需置换的木构件干缩裂缝深度控制在GB 50165-92规定的限值内。

关键词:应县木塔,落叶松,干缩裂缝,层板胶合木

中图分类号:S781.5 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-1522(2006)01-0098-05

FAN Cheng-mou; WANG Lin-an; PAN Jing-long. **Measures to control seasoning checks of wood used for the repair of the ancient wooden tower in Yingxian County, Shanxi Province.** *Journal of Beijing Forestry University* (2006)28(1):98-102[Ch, 6 ref.] School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090, P. R. China.

The *Larix gmelini* is suggested by the authors to be used to repair the ancient wooden tower in Yingxian County of Shanxi Province in accordance with the provision of *Technical Code for Maintenance and Strengthening of Ancient Timber Buildings*, i.e. GB 50165-92. Since the checks during seasoning are more deeper than that of the other species and Yingxian County wooden tower is demanded to be handed down for thousand years after the repair, based on the testing results of an investigation for finding out the regularity of the seasoning checks and the contrast test of glued-laminated timber beams made of larch and fir, two measures to control seasoning checks are suggested: nail-connected beam of a pair of sawn timbers, the wide side of which is cut along diameter of the round timber; and glued-laminated timber. The checks of the timber members used to the repair of wooden tower in Yingxian County will be controlled within the limit stipulated in GB 50165-92.

Key words wooden tower in Yingxian County, *Larix gmelini*, seasoning check, glued-laminated timber (Glulam)

古木建筑是中华文明的重要组成部分,现欣逢盛世,国家要投资修缮现存古木建筑以传承文明。2002年国家文物局主持召开“应县木塔修缮方案评审会”,要求利用国际上木结构的最新科技来修缮这座千年木塔,使其再传承千年。

1 修缮用树种的选择

辽代修建应县木塔采用的是华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)^[1],目前已很难获得。因此根据国

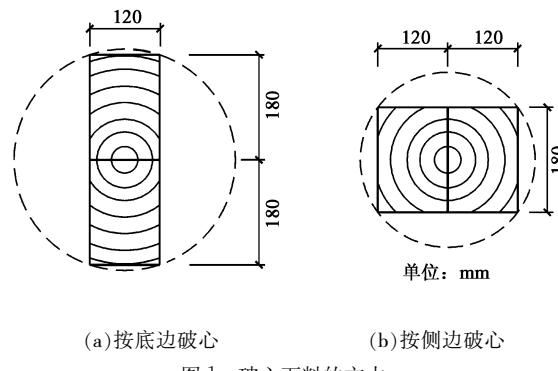
家标准GB 50165-92^[2]第6.3.1条“古建筑木结构承重构件的修复或更换,应优先采用与原构件相同的树种木材,当确有困难时,也可按表6.3.1中选取强度等级不低于原构件的木材代替”,建议选用其表中所列东北落叶松中的兴安落叶松(*Larix gmelini*)。这是强度等级最高(TC17)的针叶树种,并且耐腐性强。承德避暑山庄及外八庙皆采用这一树种修建。

兴安落叶松木材在气干过程中干缩裂缝的深度远远大于其他针叶树种。为防止落叶松木材干缩裂

缝对结构的危害,应探索其在气干过程中裂缝的开展程度.

2 兴安落叶松气干过程中裂缝的开展程度

原木或带髓心的方木在干燥过程中开裂的原因有二:一是木材切向收缩率大于径向而产生沿年轮的环向拉应力;二是木材内外含水率不同,外层木材含水率降低到纤维饱和点以下开始收缩,而内层木材体积不变,产生收缩应力.当这两项应力之和超过木材的横纹抗拉强度时,即出现裂缝.



(a)按底边破心 (b)按侧边破心

图1 破心下料的方木

FIGURE 1 The sawn timber cut from the round timber along the diameter

四川省建筑科学研究院曾对易于开裂的云南松进行防裂措施的研究.提出按底边“破心下料”的方木,能保证干缩裂缝的深度不超过截面宽度的1/4.图1(a)示出从直径为380 mm的原木截取120 mm×180 mm按底边破心的方木.这项研究成果已被国家标准《木结构设计规范》GB50005-2003^[3]列入第3.1.14条,作为采用湿材制作方木桁架下弦的防裂措施.

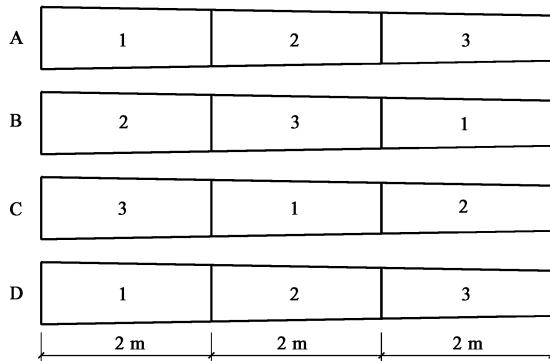


图2 对比试验各组试材截取方法

FIGURE 2 Methods of cutting samples for each contrast test of check development

兴安落叶松的胸径一般不超过300 mm,若采取按底边破心下料难以获得结构用材所需的截面尺寸,因此,作者提出按侧边破心下料的方案.图1(b)示出从直径为300 mm的原木中可获得截面尺寸达

到120 mm×180 mm、按侧边破心下料的方木.

为了掌握兴安落叶松按侧边破心下料方木的防裂效果,作者从大兴安岭林区采集了16根原木,进行下列3项试验:①对比不同截面尺寸带髓心方木的开裂程度;②对比按侧边破心下料方木与带髓心方木的开裂程度;③对比不同厚度按侧边破心下料方木的开裂程度.

每项对比试验需用3~4根原木,为消除原木之间及沿高度方向材性变异的影响,各组试材应按图2的要求截取.每隔1至1个半月测定1次裂缝深度和含水率.为消除各段试材端部水分散发较快的影响,每次都应先切除端部250 mm长度的试材后,截取测定裂缝深度和含水率的试件(见表1).从第一年的6月至次年的12月,540 d共测定8次.除截面较大的试件160 mm×200 mm外,其他各种试件均在1年内达到当地平衡含水率.图3示出截面为60 mm×180 mm试件含水率与气干时间的关系曲线见图3,二者呈对数关系.

$$W = 15(1 + 1.3 e^{-0.014 t}) \times 100\% \quad (1)$$

式中,W为木材含水率(%),t为时间(d).

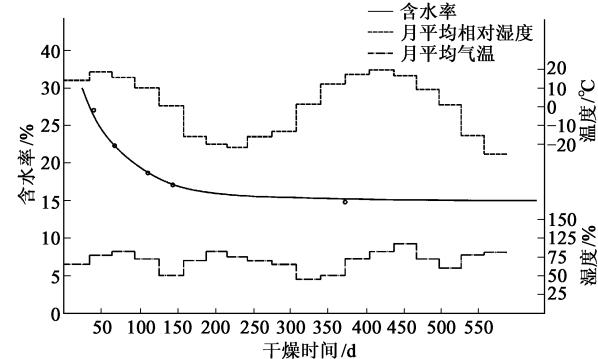


图3 试材含水率与气干时间关系曲线

FIGURE 3 The curve of relation between moisture content and seasoning time

160 mm×200 mm带髓心方木试件在气干过程中干缩裂缝的发展见表1,具有不同截面特征的方木试件经540 d后的干裂试验结果见表2.从表2中可见,兴安落叶松方木气干过程中不可避免地产生不同程度的干缩裂缝.带髓心方木100%的试件干缩裂缝深度超过宽度的1/4,其中72.4%的试件裂缝深度超过截面宽度的1/2;侧边破心下料的方木,因释放沿年轮方向的干缩应力,可较好地减轻干裂的发生和发展,80.7%试件的干缩裂缝深度不超过截面宽度的1/6,仅有1.75%试件的裂缝深度超过截面宽度的1/3.气干时方木截面尺寸对干裂的发生与发展也存在较大影响,小截面尺寸方木内外层木材的含水率差别较小,利于降低干缩应力.例如带髓心方木100 mm×150 mm与160 mm×200 mm相比,干裂深度超过1/2截面宽度的数量从90%下降为57.1%.

表1 试件(160 mm×200 mm 方木)含水率变化及裂缝开展程度示例

TABLE 1 The development of checks with moisture at certain seasoning periods of specimen 160 mm×200 mm

气干时间/d	72	145	377	540
试件特征:				
①含水率在截面上的变化	2.5 5.3 7.8 2.0 2.1 7.9 8.3 5.8 2.2	21 4.4 9.1 3.5 3.2 8.9 7.6 2.8 1.8	18 2.7 5.9 3.9 3.9 3.9 1.5 2.8 3.5 3.1 2.5	5.4 5.6
平均含水率/%	50	43	31	19
裂缝深度占截面宽度百分比/%	26	51	58	69
试件截取方法及尺寸/mm $h=200$ $b=160$ $\delta=15$ $s=250$				

表2 不同截面特征的方木经 540 d 气干后的开裂程度

TABLE 2 The development of checks of sawn timber with different sectional characteristics after 540 days seasoning

组别	截面特征	试件尺寸/(mm×mm)	试件数量	540 d 后含水率/%	不同裂缝深度的试件占总试件数的百分率/%				
					≤1/6	1/6~1/4	1/4~1/3	1/3~1/2	≥1/2
1	带髓心	160×200	10	19.1				10	90
		120×180	5	15.5				20	80
		100×150	7	15.3			28.6	14.3	57.1
2	带髓心 按侧边破心	120×180	7	16.1				14.3	28.6
		120×180	15	15.7	73.3	26.7			57.1
3	按侧边破心	80×200	10	14.9	80	10	10		
		70×200	19	15.2	84.2	10.5		5.3	
		60×180	13	15.8	84.6		15.4		

3 兴安落叶松的防裂措施

GB 50165-92“承重结构木材材质标准”(表6.3.3)规定:原木受压构件或次要受弯构件属于Ⅱ等材,其裂缝深度(有对面裂缝时用两者之和)不得大于直径的一半.木塔柱子的干缩裂缝应符合此项规定,即方木受弯构件或压弯构件属于Ⅰ等材,其裂缝深度不得大于材宽的1/4,次要受弯构件裂缝深度亦不得大于材宽的1/3.木塔梁、枋的干缩裂缝也应符合此项规定.

从开裂规律研究的结果获知,采用破心下料的措施控制方木干缩裂缝深度受原木直径的制约,并且不适合直接采用原木的木柱.因此,根据木塔构件截面的形状和尺寸分别提出以下2项防裂措施.

3.1 侧边破心方木钉连接组合构件

木塔梁、枋使用最多的截面尺寸为170 mm×

255 mm,次之为170 mm×370 mm,少量达到320 mm×600 mm.由于这些梁、枋的截面尺寸都大于160 mm×200 mm,显然不能采用带髓心的方木.对于前2种截面尺寸的方木,亦即大部分的梁、枋,可参照轻型木结构楼盖主梁所采用的钉连接规格材组合梁.采用侧边破心方木85 mm×255 mm和85 mm×370 mm,髓心朝外用直径 $d=5$ mm,长度 $L=130$ mm的圆钉沿梁高布置2列从两侧钉入拼合.横纹间距 S_2 和 S_3 均应大于4 d ,顺纹间距 $S_1 \leq 300$ mm, $S_0 = 100 \sim 150$ mm(见图4).GB 50005-2003第6.2.6条规定“对于硬质阔叶材和落叶松采用钉连接应预先钻孔”,防止钉入时木材劈裂,孔径取4 mm,孔深115 mm(即伸入第2块方木30 mm).采用侧边破心方木的170 mm×255 mm钉连接组合梁见图4.

85 mm×255 mm和85 mm×370 mm侧边破心方木分别可从直径为306和408 mm的原木中截取,因

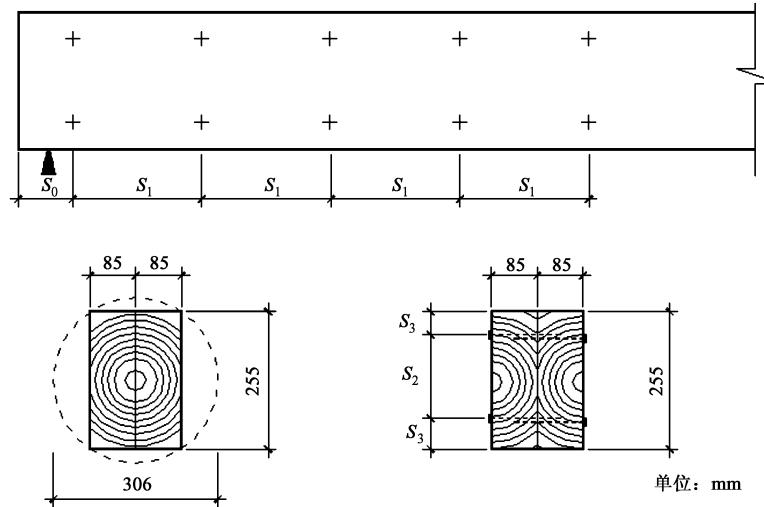


图4 侧边破心方木钉连接组合梁

FIGURE 4 Nail-connected beam of pair of sawn timber, the wide side of which is cut along diameter of the round timber

此这项措施有可能实现.

3.2 层板胶合木

对于截面尺寸达到 $320 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$ 的梁、枋,建议采用经过窑干的落叶松木板,按 GB 50005-2003 的规定,制成层板胶合木梁;各层木柱的直径为 $480 \sim 630 \text{ mm}$,应按需置换的木柱直径,先制成正方形的层板胶合木,然后加工成圆形截面.

落叶松属于硬质针叶树种,木材含树脂多;窑干时易于开裂;并且弹性模量高,胶合加压不易保证胶合面的平整度.因此提出以下 3 项保证胶合质量的措施:①选材时不允许有树脂囊;②采用软基准干燥,加多喷蒸次数,将窑干时间延长,比软质针叶树种木材加长 1 倍以上;③根据 GB 50005-2003 规定的层板厚度范围 $30 \sim 45 \text{ mm}$,取其最低限值 30 mm ,降低层板的刚度以获得平整的胶合面.

4 落叶松层板胶合木胶合质量的检验

为检验落叶松层板胶合木的胶合质量,作者进行了落叶松胶合梁与易于胶合的软质针叶树种冷杉

胶合梁的对比试验.

这两种木材胶合梁均按 GB 50206-2002^[4] 第 5.2.1 条的规定,采用间苯二酚树脂胶胶合而成.并按附录 A“层板胶合木制作技术”的规定,将木板的含水率控制在 15% 以下,胶合时室内温度不低于 15°C ,空气相对湿度在 40% 至 75% 的范围内,直至胶合梁养护完毕.

4.1 落叶松胶合梁载荷试验

根据保证胶缝质量的要求,采用 7 块经过窑干的 $30 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$ 落叶松木板,长度 3.2 m. 按 GB 50005-2003“胶合木结构构件的木材材质等级”(表 3.1.8)和“胶合木结构板材材质标准”(表 A.2.1)的规定,上、下边缘各 2 层 II 等材,中间 3 层 III 等材层叠加压胶合成截面为 $120 \text{ mm} \times 210 \text{ mm}$ 的胶合梁,试验跨度为 3.0 m,采用三分点加载. 梁试件破坏后,在断裂的木板端头截取 2 个清材受弯小试件测定抗弯强度,并随即测定木材含水率.

9 根落叶松胶合梁的试验数据列于表 3,统计分析结果列于表 4.

表 3 落叶松胶合梁的试验结果

TABLE 3 Testing results of larch glued-laminated timber beams

试件 编号	截面尺寸		破坏荷载/ kN	抗弯强度/ ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$)	无疵小试样抗 弯强度/($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$)	相对 强度	含水率/ %	破坏特征
	宽度/mm	高度/mm						
L-1	120	187	44.8	31.9	97.7	0.327	7.0	底下第 1 层跨中木节处断裂
L-2	119	199	59.8	35.9	116.0	0.309	8.1	加载点外 58 mm 底下第 1 层 木节旁沿斜纹断裂
L-3	120	183	45.8	33.9	81.0	0.419	7.8	底下第 1 层跨中木节处断裂
L-4	115	190	53.8	39.2	87.8	0.446	7.4	加载点下第 1 层木节处断裂
L-5	116	198	42.8	25.4	76.9	0.330	8.2	加载点外 100 mm 底下 第 1 层木节处断裂
L-6	122	202	52.9	32.0	82.1	0.390	7.5	底下第 1 层跨中木节处断裂
L-7	120	202	49.7	30.3	106.0	0.286	7.8	底下第 1 层跨中木节处断裂
L-8	115	204	60.8	38.3	112.9	0.339	7.9	底下第 1 层跨中木节处断裂
L-9	117	188	60.8	44.3	114.6	0.387	7.4	加载点下第 1 层木节处断裂

注:相对强度为胶合梁抗弯强度与无疵小试样抗弯强度的比值.

4.2 冷杉胶合梁载荷试验

根据对比试验的要求,采用软质针叶树种冷杉,按与落叶松胶合梁相同的材质标准、截面尺寸、胶合工艺及试验方法,测定了7根冷杉胶合梁的抗弯强度及相应的无疵小试样的抗弯强度。试验数据及其统计分析结果列于表5、6。这批胶合梁的木材含水率皆为12%左右。

表5 冷杉胶合梁的试验结果
TABLE 5 Testing results of fir glued-laminated timber beams

试件 编号	截面尺寸		破坏荷载/ kN	抗弯强度/ (N·mm ⁻²)	无疵小试样抗 弯强度/(N·mm ⁻²)	相对 强度	破坏特征
	宽度/mm	高度/mm					
F-1	116	212	43.7	25.4	66.6	0.381	底下跨中第1层木节处断裂
F-2	115	215	35.9	20.3	71.8	0.283	底下跨中第1层木节处断裂
F-3	114	215	33.9	19.4	72.1	0.269	底下跨中第1层木节处断裂
F-4	115	215	50.9	29.0	65.8	0.441	加载点下第2层木节处断裂
F-5	115	214	47.9	27.4	72.8	0.376	加载点下第1层木节处断裂
F-6	114	213	44.9	25.9	66.6	0.389	底下跨中第1层木节处断裂
F-7	115	214	44.3	25.3	68.8	0.368	底下跨中第1层木节处断裂

表6 冷杉胶合梁试验数据统计分析

TABLE 6 The analysis of fir glued-laminated timber beams testing data

项目	平均值	标准差	变异系数
胶合梁抗弯强度/(N·mm ⁻²)	24.5	3.5	14
无疵小试样抗弯强度/(N·mm ⁻²)	69.2	3.0	4
相对强度	0.358	0.061	17

4.3 对比试验结果

冷杉胶合梁和落叶松胶合梁的全部胶缝完整无损;破坏特征相同,都在底层木节处拉断;并且相对强度几乎相等,充分说明落叶松胶合梁所采取的3项措施确实能保证胶合质量。

5 结论

本文遵照GB 50165-92的规定,建议选用兴安落叶松为应县木塔修缮用材。根据落叶松木材540 d气干过程中开裂程度的试验结果,提出采用侧边破心方木钉连接组合梁,作为大部分需置换梁、枋的防裂措施;并根据16根落叶松和冷杉胶合梁胶合质量对比试验结果,提出采用层板胶合木作为需置换大截面尺寸梁、枋和木柱的防裂措施,有望克服落叶松木材易于开裂的缺点,将干缩裂缝深度控制在GB 50165-92规定的限值内。

参考文献

[1] 倪士珠,李源哲.古建筑木结构用材的树种调查及主要材性实测分析[J].四川建筑科学,1994(1):11-14.

表4 落叶松胶合梁试验数据统计分析

TABLE 4 The analysis of testing data of larch glued-laminated timber beams

项目	平均值	标准差	变异系数
胶合梁抗弯强度/(N·mm ⁻²)	34.6	5.6	16
无疵小试样抗弯强度/(N·mm ⁻²)	97.2	15.7	16
相对强度	0.359	0.054	15

NI S Z, LI Y Z. Investigation and analysis on testing data of main performances of species used for ancient timber buildings [J]. *Sichuan Building Research*, 1994(1), 11-14.

[2] 四川省建筑科学研究院主编·GB 50165-92 古建筑木结构维护与加固技术规范[S].北京:中国建筑工业出版社,1992.

Sichuan Academy of Building Research·GB 50165-92 Technical code for maintenance and strengthening of ancient timber building [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1992.

[3] 中国建筑西南设计研究院,四川建筑科学研究院主编·GB 50005-2003 木结构设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2003.

China Southwest Architectural Design Research Institute, Sichuan Academy of Building Research·GB 50005-2003 Code for design of timber structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003.

[4] 哈尔滨工业大学主编·GB50206-2002 木结构工程施工质量验收规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2002.

Harbin Institute of Technology·GB50206-2002 Code for construction quality acceptance of timber structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002.

[5] 陈明达·应县木塔[M].北京:文物出版社,1966.

CHEN M D. *Yingxian wooden tower* [M]. Beijing: Cultural Relic Publishing, 1966.

[6] 李铁英·应县木塔现状结构残损要点及机理分析[D].太原:太原理工大学,2004.

LI T Y. The main structural damages and damage mechanism analysis on Yingxian wooden tower[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2004.

(责任编辑 李文军)