

胶合木 设计手册

■ 采用加拿大木材 ■

**Design of Glued-Laminated Timber
Using Canadian Species**

加拿大林产创新研究院和
加拿大木业协会编写
2017年10月

目录

1 概述.....	4
1.1 胶合木结构在国内外的现状及发展.....	5
1.2 中国胶合木设计规范和标准简介.....	8
2 胶合木分级、加工及质量控制.....	9
2.1 采用加拿大树种的胶合木层板与胶合木等级.....	9
2.2 胶粘剂.....	15
2.3 生产质量控制.....	16
2.4 参考文献.....	18
3 结构设计.....	19
3.1 胶合木结构和设计假定.....	19
3.2 构件设计.....	21
3.2.1 受弯构件.....	21
3.2.2 轴心受拉和受压构件.....	28
3.2.3 拉弯和压弯构件.....	31
3.3 连接设计.....	36
3.3.1 连接设计的要求.....	36
3.4 连接节点构造.....	39
4 防火设计.....	45
5 其他考虑因素.....	51
5.1 裂缝.....	51
5.2 开槽与钻孔.....	53
5.2.1 开槽.....	54
5.3 运输与存放.....	56

5.4 胶合木防腐处理	58
5.4.1 防腐处理胶合木的一般使用要求	58
5.4.2 胶合木防腐处理要求	59
5.4.3 现场切割、安装和紧固件	60
5.4.4 参考文献	60

1 概述

胶合木，即 Glued-laminated timber (Glulam)，是一种通过胶粘剂将组坯层板胶合在一起的工程木产品。用于制作胶合木的组坯层板由经过干燥、分等分级和纵向指接接长的规格材组成。对于直线形胶合木，组坯层板的厚度通常为 35 - 50mm；对于曲线形胶合木，组坯层板的厚度通常为 20 - 30mm。图 1.1 是胶合木产品加工生产过程的示意图。

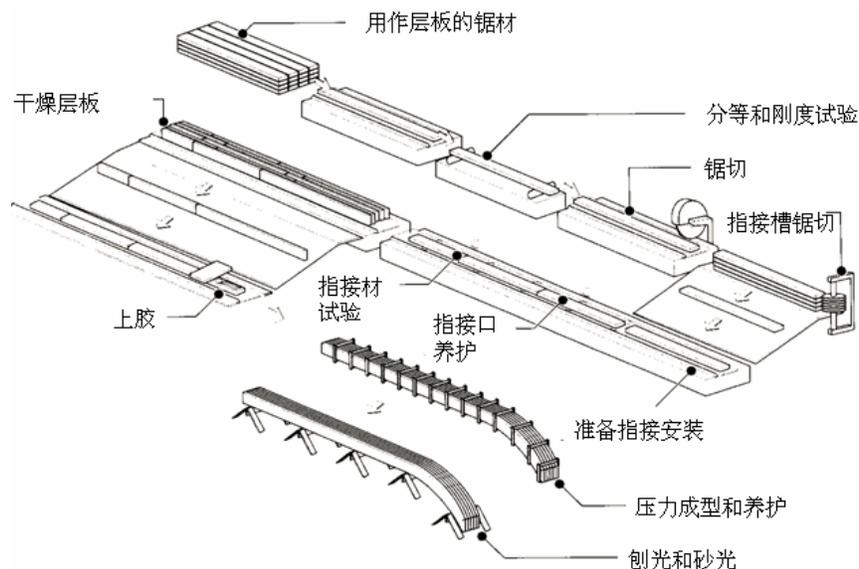


图 1.1 胶合木加工生产过程示意图

现代胶合木材在保留了天然木材的纹理和质感的同时，尽可能地去除了木材天然缺陷的影响。所以胶合木产品既可以满足建筑表现的要求，也可以满足结构强度和稳定等要求。概括来说，胶合木与传统的实木锯材相比，具有以下的特点：

(1) 强度高，材料的性能更均匀。

胶合木的组坯层板一般由规格材制作。由于在组坯层板的加工过程中剔除了原材料中的天然缺陷，并且通过胶合工艺按一定的组坯方式进行胶合，所以胶合木材料的强度较原木或锯材更高，材料的性能更均匀。另外，胶合木的组坯层板可根据构件截面应力的分布进行不同的组合，可以进一步提高材料的使用率。

(2) 不受天然木材尺寸的限制，可用于大跨结构。

原木或锯材的构件尺寸受到天然树木的限制，一般无法满足现代大跨度结构的要求。胶合木正好弥补了这一不足。通过对组坯层板在纵向进行指接接长和对组坯层板面层进行胶合，可以根据设计的需要制作构件的长度和截面尺寸，用于各种不同的大跨度结构。

(3) 尺寸稳定性好，不宜开裂和翘曲变形。

用于制作胶合木的层板进行过严格的干燥处理，一般含水率在 15% 以下。由于材质和含水率较均匀，加工制作好的胶合木构件一般不会发生干裂、扭曲、翘曲等变形。在使用过程中具有较好的尺寸稳定性。

(4) 可加工成各种构件，有很强的建筑表现力。

胶合木能够被加工成任何形状与尺寸，包括大型直梁和复杂的曲拱。通过使用胶合木，设计师可以在满足结构强度要求的同时，以充分表达建筑的艺术性。胶合木给人以温暖和舒适的外观感受，因此设计师在设计中经常特意将胶合木曝露以供欣赏。

另外，胶合木还具有良好的保温隔热性能、便于工业化预制、快速施工、自重较轻以及耐火和耐久等许多优点。相对于钢筋混凝土和钢材等主流建筑材料，胶合木无疑是一种更加绿色、生态以及低碳的建材选择。

1.1 胶合木结构在国内外的现状及发展

胶合木于 1893 年在瑞士巴塞尔被首次用于建造一座礼堂。当时胶合木作为专利产品，使用了一种以今天的标准看来并不防水的胶粘剂，因此，胶合木的使用仅限于干燥环境。二战期间，对大型军事建筑（如仓库，停机棚等）的需求激发了人们对胶合木的兴趣。合成树脂防水胶的开发使胶合木在桥梁和其他户外结构（胶合木需作防腐处理）得到了应用。

现在，胶合木被广泛用于各种工程领域，如商业建筑、体育场馆、桥梁（含车行桥）、公共类休闲娱乐场馆以及住宅类建筑。图 1.2 是近十年来国外一些优秀胶合木项目的图片。



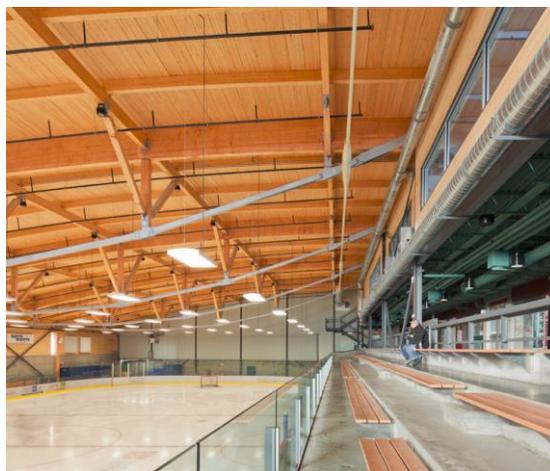
(a) 住宅



(b) 艺术中心



(c) 剧院



(d) 体育场馆



(e) 办公楼



(f) 桥梁

图 1.2 国外胶合木建筑在不同工程领域的应用

中国第一个胶合木结构于 1957 年在北京建成。之后由于国内林业资源的匮乏，木结构在建筑工程中的应用一度处于停滞的状态。随着改革开放和对绿色建筑的推广，胶合木结构再一次出现在中国建筑市场。目前，胶合木在北京、上海、天津、江苏省、河北省、山东省、四川省等许多地方都有不同工程领域应用的实例。图 1.3 为国内的一些工程案例的图片。



(a) 汽车展示中心



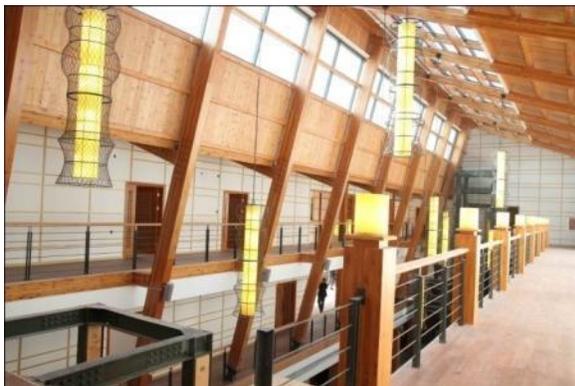
(b) 宗教建筑



(c) 社区会所



(d) 办公楼



(e) 绿色建筑示范中心



(f) 游乐中心入口

图 1.3 国内胶合木建筑在不同工程领域的应用

1.2 中国胶合木设计规范和标准简介

2011年中国颁布实施了《结构用集成材》GB/T 26899-2011。这本标准规定了组坯层板的力学性能、胶粘剂的选取、产品的检验以及产品标识要求。另外，这本标准还给出了对胶合木的生产及质量控制的相关要求。

2012年中国颁布实施了《胶合木结构技术规范》GB/T 50708-2012。这本规范对胶合木结构的构件设计、连接设计、构造要求、制作安装、防护与维护给出了具体的规定，为胶合木在实际工程中的应用提供了指导。

另外，《木结构设计规范》GB50005-2003，《木结构工程施工质量验收规范》（GB/T50206-2012），《木结构工程施工规范》GB50772-2012以及《建筑设计防火规范》GB50016-2014等规范也都纳入了胶合木结构设计、施工以及防火的内容。可以说，随着国内相关规范和标准的不断完善，胶合木结构在中国的应用将有广阔的前景。

2 胶合木分级、加工及质量控制

2.1 采用加拿大树种的胶合木层板与胶合木等级

《胶合木结构技术规范》GB/T 50708-2012 中规定的胶合木构件采用的层板分为普通胶合木层板、目测分级层板和机械分级层板。本手册主要介绍由目测分级层板和机械分级层板制作的胶合木。

目测分级层板材质等级为 4 级，其材质等级标准应符合表 2.1 的规定。当日测分级层板作为对称异等组合的外侧层板或非对称异等组合的抗拉侧层板，以及同等组合的层板时，表 2.1 中 I_d、II_d和 III_d三个等级的层板尚应根据不同的树种级别满足下列规定的性能指标：

1. 对于长度方向无指接的层板，其弹性模量（包括平均值和 5%的分位值）应满足表 2.2 规定的性能指标；
2. 对于长度方向有指接的层板，其抗弯强度或抗拉强度（包括平均值和 5%的分位值）应满足表 2.2 规定的性能指标。

表 2.1 目测分级层板材质等级标准

项次	缺陷名称		材质等级			
			I _d	II _d	III _d	IV _d
1	腐朽		不 允 许			
2	木节	在构件任一面任何 150mm 长度上所有木节尺寸的总和，不得大于所在面宽的	1/5	1/3	2/5	1/2
		边节尺寸不得大于宽面的	1/6	1/4	1/3	1/2
3	斜纹 任何 1m 材长上平均倾斜高度，不得大于		60mm	70mm	80mm	125mm
4	髓心		不 允 许			
5	裂缝		允许极其微小裂缝 在 3m 以上构件上裂纹长度不超 0.5m			
6	轮裂		不允许	不允许	小于板材宽度的 25%，但与边部距离不可小于宽度的 25%	

7	平均生长轮宽度	≤6mm	≤6mm	
8	虫蛀	允许有表面虫沟，不得有虫眼		
9	涡纹 在木板指接及其两端各 100mm 范围内	不允许		
10	其他缺陷	非常不明显		

表 2.2 目测分级层板强度和弹性模量的性能指标 (N/mm²)

树种级别及目测等级				弹性模量		抗弯强度		抗拉强度	
SZ1	SZ2	SZ3	SZ4	平均值	5%分位值	平均值	5%分位值	平均值	5%分位值
I _d				14000	11500	54.0	40.5	32.0	24.0
II _d	I _d			12500	10500	48.5	36.0	28.0	21.5
III _d	II _d	I _d		11000	9500	45.5	34.0	26.5	20.0
	III _d	II _d	I _d	10000	8500	42.0	31.5	24.5	18.5
		III _d	II _d	9000	7500	39.0	29.5	23.5	17.5
			III _d	8000	6500	36.0	27.0	21.5	16.0

机械分级层板的弹性模量平均值应满足表2.3的规定。对于长度方向有指接的机械分级层板，当这些层板被作为对称异等组合的外侧层板或非对称异等组合的抗拉侧层板，以及同等组合的层板时，除满足弹性模量平均值的要求外，其抗弯强度或抗拉应强度满足表2.3规定的性能指标。

表 2.3 机械分级层板强度和弹性模量的性能指标 (N/mm²)

分等等级	M _E 7	M _E 8	M _E 9	M _E 10	M _E 11	M _E 12	M _E 14	M _E 16	M _E 18	
弯曲弹性模量	7000	8000	9000	10000	11000	12000	14000	16000	18000	
抗弯	平均值	33.0	36.0	39.0	42.0	45.0	48.5	54.0	63.0	72.0
	5%分位值	25.0	27.0	29.5	31.5	34.0	36.5	40.5	47.5	54.0
抗拉	平均值	20.0	21.5	23.5	24.5	26.5	28.5	32.0	37.5	42.5
	5%分位值	15.0	16.0	17.5	18.5	20.0	21.5	24.0	28.0	32.0

各等级的机械分级层板除满足相应等级的性能指标外，尚应符合表 2.4 中规定的机械分级层板的目测材质要求。

表 2.4 机械分级层板的目测材质标准

内容	标准
腐朽	不允许
裂缝	允许极微小裂缝
变色	不明显
隆起木纹	不明显
层板两端部材质 (仅用于机械应力分级层板)	当分级设备无法对层板两端进行测量时，在层板端部，因缺陷引起的强度折减的等效节孔率不得超过层板中间部分的节孔率。
其他缺陷	非常细微

表 2.5 给出了满足中国目测分级层板材质等级标准（表 2.1）和性能指标（表 2.2）的加拿大目测分级规格材以及用于制作胶合木的目测分级层板。表 2.6 是满足中国机械分级层板性能指标（表 2.3）和材质标准（表 2.4）的加拿大机械分级规格材。

表 2.5 对应中国目测分级层板的加拿大目测分等规格材以及用于胶合木的目测分级层板

树种级别及目测等级	相应的加拿大树种及目测分级规格材	相应的加拿大目测分级层板	
SZ1	I _d	-	花旗松 B-F, B
	II _d	-	-
	III _d	花旗松 SS	花旗松 C
	IV _d	花旗松 No.2	花旗松 D
SZ2	I _d	-	落叶松 B-F, B
	II _d	-	-
	III _d	落叶松 SS	落叶松 C
	IV _d	落叶松 No.2	落叶松 D
SZ3	I _d	-	铁杉 B-F, B
	II _d	-	-

	III _d	铁杉 SS	铁杉 C
	IV _d	铁杉 No.2	铁杉 D
SZ4	I _d	-	鱼鳞云杉、北美红松、铁 - 冷杉、云杉、冷杉 B-F, B
	II _d	-	-
	III _d	鱼鳞云杉、北美红松、铁 - 冷杉、云杉、冷杉 SS	鱼鳞云杉、北美红松、铁 - 冷杉、云杉、冷杉 C
	IV _d	鱼鳞云杉、北美红松、铁 - 冷杉、云杉、冷杉 No.2	鱼鳞云杉、北美红松、铁 - 冷杉、云杉、冷杉 D

表 2.6 对应中国机械分级层板的加拿大机械分级规格材

分等等级	相应的加拿大机械分级规格材
M _E 7	-
M _E 8	-
M _E 9	1200f-1.2E
M _E 10	1650f-1.5E
M _E 11	1800f-1.6E
M _E 12	2100f-1.8E
M _E 14	2850f-2.3E
M _E 16	-
M _E 18	-

表 2.7、2.8 和 2.9 给出了用加拿大目测分级规格材、目测分级层板或材机械分级规格材制作的对称异等组合胶合木、非对称异等组合胶合木和同等组合胶合木。

表 2.7 用加拿大木材制作的对称异等组合胶合木

	TC _{YD} 24
最外层层板	2850f-2.3E; 花旗松 B-F, B
外层层板	2100f-1.8E; 落叶松 B-F, B
中间层层板	1800f-1.6E; 花旗松 C; 铁杉 B-F, B

内层层板	1200f-1.2E; 落叶松 D; 铁杉 SS
------	--------------------------

TC _{YD} 21	
最外层层板	2100f-1.8E; 落叶松 B-F, B
外层层板	1800f-1.6E; 花旗松 C; 铁杉 B-F, B
中间层层板	1650f-1.5E; 花旗松 D; 花旗松 No.2; 落叶松 C; 鱼鳞云杉 B-F, B; 北美红松 B-F, B; 铁 - 冷杉 B-F, B; 云杉 B-F, B; 冷杉 B-F, B
内层层板	铁杉 No.2; 鱼鳞云杉 SS; 北美红松 SS; 铁 - 冷杉 SS; 云杉 SS; 冷杉 SS

TC _{YD} 18	
最外层层板	1200f-1.2E; 落叶松 D; 铁杉 SS
外层层板	铁杉 No.2; 鱼鳞云杉 SS; 北美红松 SS; 铁 - 冷杉 SS; 云杉 SS; 冷杉 SS
中间层层板	鱼鳞云杉 No.2; 北美红松 No.2; 铁 - 冷杉 No.2; 云杉 No.2; 冷杉 No.2
内层层板	鱼鳞云杉 No.2; 北美红松 No.2; 铁 - 冷杉 No.2; 云杉 No.2; 冷杉 No.2

表 2.8 用加拿大木材制作的非对称异等组合胶合木

		TC _{YF} 23
受拉侧	最外层层板	2850f-2.3E; 花旗松 B-F, B
	外层层板	2100f-1.8E; 落叶松 B-F, B
	中间层层板	1800f-1.6E; 花旗松 C; 铁杉 B-F, B
	内层层板	1200f-1.2E; 落叶松 D; 铁杉 SS
受压侧	内层层板	1200f-1.2E; 落叶松 D; 铁杉 SS
	中间层层板	1650f-1.5E; 花旗松 D; 花旗松 No.2; 落叶松 C; 鱼鳞云杉 B-F, B; 北美红松 B-F, B; 铁 - 冷杉 B-F, B; 云杉 B-F, B; 冷杉 B-F, B
	外层层板	1800f-1.6E; 花旗松 C; 铁杉 B-F, B
	最外层层板	1800f-1.6E; 花旗松 C; 铁杉 B-F, B

TC _{YF} 20	
---------------------	--

受拉侧	最外层层板	2100f-1.8E; 落叶松 B-F, B
	外层层板	1800f-1.6E; 花旗松 C; 铁杉 B-F, B
	中间层层板	1650f-1.5E; 花旗松 D; 花旗松 No.2; 落叶松 C; 鱼鳞云杉 B-F, B; 北美红松 B-F, B; 铁 - 冷杉 B-F, B; 云杉 B-F, B; 冷杉 B-F, B
	内层层板	铁杉 No.2; 鱼鳞云杉 SS; 北美红松 SS; 铁 - 冷杉 SS; 云杉 SS; 冷杉 SS
受压侧	内层层板	铁杉 No.2; 鱼鳞云杉 SS; 北美红松 SS; 铁 - 冷杉 SS; 云杉 SS; 冷杉 SS
	中间层层板	1200f-1.2E; 落叶松 D; 铁杉 SS
	外层层板	1650f-1.5E; 花旗松 D; 花旗松 No.2; 落叶松 C; 鱼鳞云杉 B-F, B; 北美红松 B-F, B; 铁 - 冷杉 B-F, B; 云杉 B-F, B; 冷杉 B-F, B
	最外层层板	1650f-1.5E; 花旗松 D; 花旗松 No.2; 落叶松 C; 鱼鳞云杉 B-F, B; 北美红松 B-F, B; 铁 - 冷杉 B-F, B; 云杉 B-F, B; 冷杉 B-F, B

		TC _{YF17}
受拉侧	最外层层板	1200f-1.2E; 落叶松 D; 铁杉 SS
	外层层板	铁杉 No.2; 鱼鳞云杉 SS; 北美红松 SS; 铁 - 冷杉 SS; 云杉 SS; 冷杉 SS
	中间层层板	鱼鳞云杉 No.2; 北美红松 No.2; 铁 - 冷杉 No.2; 云杉 No.2; 冷杉 No.2
	内层层板	鱼鳞云杉 No.2; 北美红松 No.2; 铁 - 冷杉 No.2; 云杉 No.2; 冷杉 No.2
受压侧	内层层板	鱼鳞云杉 No.2; 北美红松 No.2; 铁 - 冷杉 No.2; 云杉 No.2; 冷杉 No.2
	中间层层板	鱼鳞云杉 No.2; 北美红松 No.2; 铁 - 冷杉 No.2; 云杉 No.2; 冷杉 No.2
	外层层板	鱼鳞云杉 No.2; 北美红松 No.2; 铁 - 冷杉 No.2; 云杉 No.2; 冷杉 No.2
	最外层层板	鱼鳞云杉 No.2; 北美红松 No.2; 铁 - 冷杉 No.2; 云杉 No.2; 冷杉 No.2

表 2.9 用加拿大木材制作的同等组合胶合木

TC _{T30}
2850f-2.3E; 花旗松 B-F, B

TC _T 27
2100f-1.8E; 落叶松 B-F, B

TC _T 24
1800f-1.6E; 花旗松 C; 铁杉 B-F, B

TC _T 21
1650f-1.5E; 花旗松 D; 花旗松 No.2; 落叶松 C; 鱼鳞云杉 B-F, B; 北美红松 B-F, B; 铁 - 冷杉 B-F, B; 云杉 B-F, B; 冷杉 B-F, B

TC _T 18
1200f-1.2E; 落叶松 D; 铁杉 SS

2.2 胶粘剂

结构用胶粘剂应根据胶合木结构的使用环境，包括气候、含水率、温度、木材树种、防腐剂（如果使用）及生产制造方法等因素选择。

根据 GB/T 26899-2011 《结构用集成材》，胶粘剂类型可分为：I 类胶粘剂-适用于所有使用环境；II 类胶粘剂-适用于使用环境 1、2 及温度低于 50 摄氏度。表 2.10 为不同使用环境下允许的胶粘剂。

表 2.10 生产胶合木允许采用的胶粘剂

使用环境	定义	可选胶粘剂
1	一年内，在相对于温度为 20°C 和仅有几周空气相对湿度超过 65% 条件的环境。在此环境下，对于绝大多数针叶材来说，年平均平衡含水率不超过 12%。	层板用胶： 间苯二酚树脂、苯酚-间苯二酚树脂、水基异氰酸酯聚合物 指接用胶： 间苯二酚树脂、苯酚-间苯二酚树脂、水基异氰酸酯聚合物 三聚氰胺、三聚氰胺-脲醛树脂
2	一年内，在相对于温度为 20°C 和仅有几周空气相对湿度超过 85% 条件的环境。在此环境下，对于绝大多数针叶材来说，年平均平衡含水率高于 12%，但不超过 20%。	层板用胶： 间苯二酚树脂、苯酚-间苯二酚树脂 指接用胶： 间苯二酚树脂、苯酚-间苯二酚树脂、三聚氰胺
3	一年内，木材平衡含水率高于使用环境 2 条件下的木材平衡含水率，例如构件完全暴露在室外大气中。对于绝大多数针叶材来说，年平均平衡含水率超过 20%。	层板用胶： 间苯二酚树脂、苯酚-间苯二酚树脂 指接用胶：

	间苯二酚树脂、苯酚-间苯二酚树脂、三聚氰胺树脂
--	-------------------------

为确保胶合木在使用年限内的结构完整性，胶粘剂的以下性能至关重要：防水性、耐久性、高温和低温性能、常温和受热条件下蠕变、耐盐水性等。胶粘剂生产商应证明其生产的胶粘剂满足相关规范的性能要求。在北美地区，用于胶合木的胶粘剂应满足美国 ASTM D2559 和加拿大 CSA 0112.9 中的性能要求。仅简单标注胶粘剂使用的化学品名称是不够的。

胶粘剂生产商需向胶合木生产商提供胶粘剂相关信息，包括与环境相关的胶粘剂类型、缝隙填充能力、胶和加压和固化时间及其他技术要求，包括胶粘剂的正确操作和使用方法及安全性。

未在表格 2.10 中列出的胶粘剂类型，若能够满足结构木材用胶粘剂标准中的所有性能要求，亦可使用。

2.3 生产质量控制

胶合木作为一种工程木产品，生产过程需要全程明确的质量控制。胶合木的生产企业应满足国家标准《结构用集成材》GB/T 26899-2011 的相关要求，该标准对胶合木的生产设备、生产方式、检验和记录保存做出了规定。为了确认胶合木达到要求的质量，要进行初期检验、全数检验和抽样检验，根据试验结果对各工厂的品质管理责任人进行考核，检验记录要全部保存。初期检验是对胶合木制造商是否具有制造胶合木所要求的机械设备和技术水平的检查。全数检验是对胶合木层板是否具有合格品质性能的检查。抽样检验是对胶合木的制造过程中是否具有合格质量管理能力的检查，所有检查结果都应作为生产记录进行保存。

初期检验：生产开始时和生产工艺变更时（包括树种、胶粘剂、材料等级、机械设备等的变更），进行未指接层板的抗弯试验或抗拉试验、指接层板的抗弯试验或抗拉试验、胶合木剥离试验（减压加压剥离试验或浸渍和煮沸剥离试验）、含水率检测、甲醛释放量检测，同时进行直线形胶合木的抗弯试验或弯曲胶合木的抗拉和抗压试验，对胶合木的力学性能和胶合性能进行确认。

全数检验：应对胶合木层板进行外观检验或抗弯性能检验，指接层板的抗弯保证荷载检验或抗拉保证荷载检验。强度分等以及抗弯或者抗拉保证荷载力学试验机的精度应定期校准，确保在合格的精度范围内工作。通过保证荷载检验的层板，无需再进行抽样检验（未指接层板抗弯试验或抗拉试验，以及指接层板抗弯试验或抗拉试验）。

抽样检验：从胶合木层板以及制造的胶合木中，根据生产量抽取必要的试样，进行下列各项检验以保证胶合木的质量。对最外层以及外层的层板进行抗弯试验或抗拉试验，对指接层板进行抗弯试验或抗拉试验。但是，已进行层板的弹性模量检验或机械强度检验（MSR）、指接层板的弯曲或抗拉保证荷载检验时，可不进行该项抽样检验。试样的数量应根据检验批层板的数量，按表 2.11 规定的样本数量任意抽取。对胶合木进行剪切试验、浸渍剥离试验、煮沸剥离及减压加压试验、含水率试验。试样的抽取应根据经验批的胶合木根数来抽取，每批抽取试样数量见表 2.12。

表 2.11 层板抗弯试验或抗拉试验的抽样方法

层板的数量	层板样本数量
≤ 90	5
91 - 280	8
281 - 500	13
501 - 1200	20
≥ 1201	32

表 2.12 胶合木剥离试验、剪切试验和抗弯试验的抽样方法

胶合木的数量	样本数量	
≤ 10	3	如需复检，则选取左栏列举数量 2 倍的样本数。
11 - 20	4	
21 - 100	5	
101 - 500	6	
≥ 501	7	

作为生产控制的一部分，胶合木制造商应按下列内容记载所生产的胶合木，所有资料需保存 10 年以上。

- | | |
|-----------------------------|-----------|
| 1 生产工厂名称 | 齿底宽度 |
| 2 生产年月日 | 指接嵌合度 |
| 3 胶合木制品编号 | 胶粘剂种类 |
| 4 生产负责人姓名 | 胶合压力 |
| 5 检验负责人姓名 | 8 层板的组坯 |
| 6 胶合木概要 | 9 层板胶合 |
| 6.1 品名（组合、用途） | 9.1 工厂内温度 |
| 6.2 强度等级（ M_e 等级、外观等级） | 9.2 工厂内湿度 |
| 6.3 胶合等级（使用环境） | 9.3 胶粘剂 |
| 6.4 树种名称（各树种顺序） | 种类 |
| 6.5 形状、尺寸（厚度、宽度、长度、曲率半径、斜度） | 配比 |
| 6.6 层板层数 | 粘度 |
| | 温度 |

6.7 检验方法	涂胶量
7 层板加工	9.4 从固化剂混合到涂胶的时间
7.1 含水率、温度	9.5 组坯时间
7.2 表面精加工	9.6 胶压作业时间
7.3 尺寸（厚度、宽度）	9.7 胶合压力
7.4 指接	9.8 胶压时间
指接方式（斜接、指接）	9.9 固化温度
接头长度	9.10 养护温度
接头斜度	9.11 养护时间
齿距	10 其他
齿顶宽度	

在加拿大，胶合木生产商应满足加拿大标准 **CSA O177** 标准规定的生产设备、生产方式和记录程序要求，并得到相关认证部门认证。胶合木的生产应满足 **CSA O122** 标准的规定。根据 **CSA O177** 和 **CSA O122** 标准，应从生产线上随机选取胶层试样和指接试样进行强度测试。

胶合木构件的生产应有完整的质量控制记录，包括层板等级、胶层和指接试验结果。质量控制记录还应包括生产条件，如淋胶速度、装配时间、养护环境及养护时间等。认证机构应定期对生产商进行质量检查，以确保生产过程和产品质量达到要求。

2.4 参考文献

1. ASTM D2559, Standard Specification for Adhesives for Bonded Structural Wood Products for Use Under Exterior Exposure Conditions
ASTM D2559, 室外暴露条件下结构木材用胶粘剂标准
2. CSA O112.9, Evaluation of adhesives for structural wood products (exterior exposure)
CSA O112.9, 结构木材胶粘剂标准（室外暴露）

3 结构设计

3.1 胶合木结构和设计假定

胶合木可以加工成几乎任何尺寸与形状的构件，包括大型直梁和复杂的曲拱。结构构件的多样性为设计师提供了各种可能。图 3.1 给出了常用的胶合木结构体系。

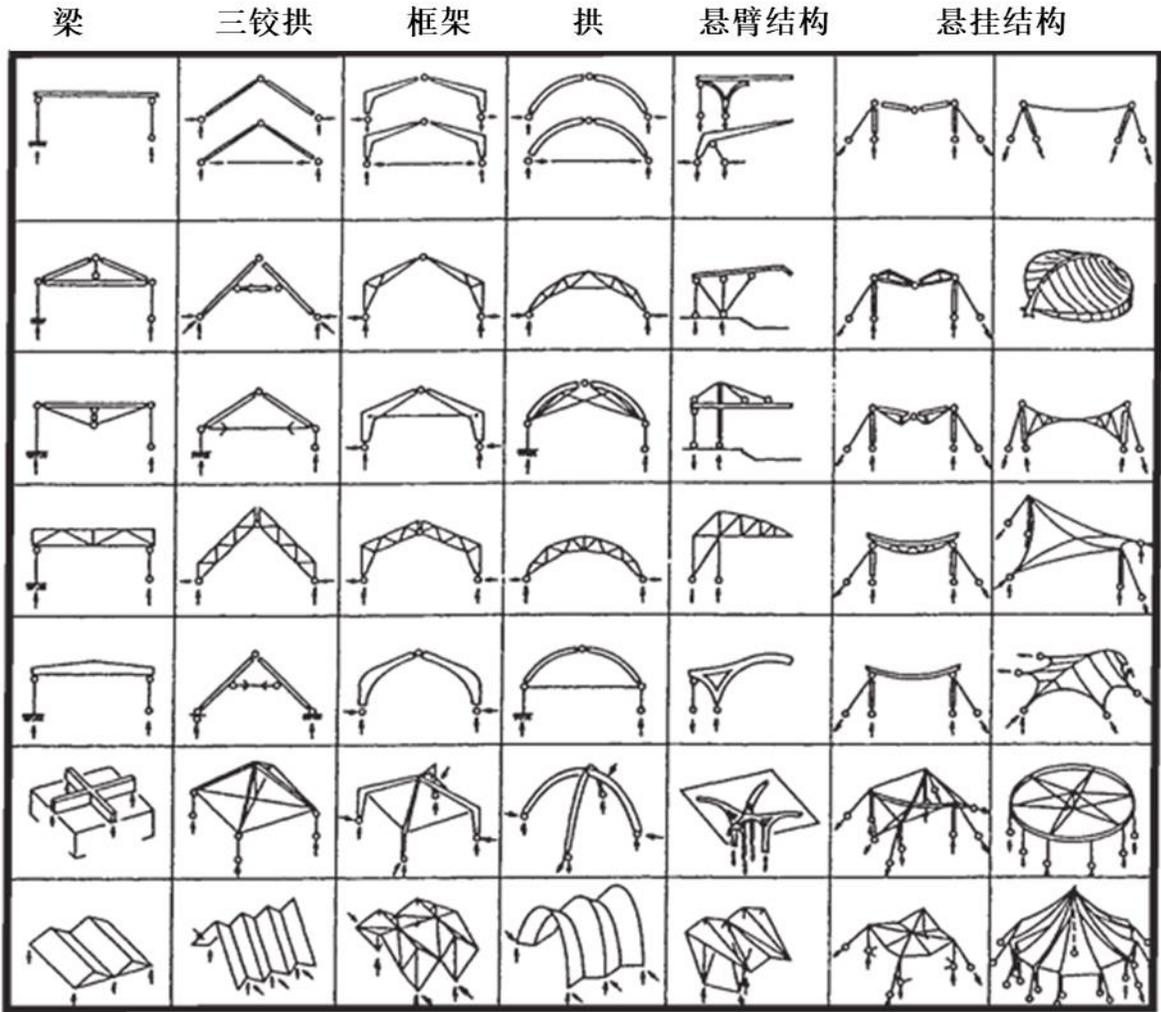


图3.1 木结构体系：梁、三铰拱、框架、拱、悬臂结构、悬挂结构 (Winter, 2004)

胶合木结构通常采用铰接梁柱式结构与刚框架结构这两种结构形式。梁柱式结构通常使用金属连接件将梁柱构件铰接连接。图 3.2 为用于多层梁柱式胶合木结构的金属连接件。梁柱间采用斜撑以增加结构的侧向刚度和抵抗水平力。

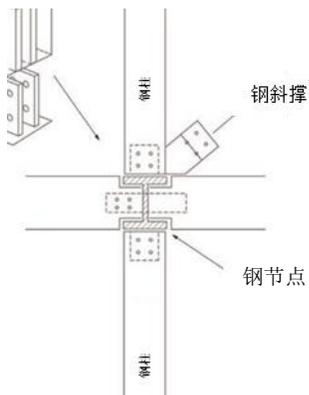


图 3.2 多层梁柱结构钢节点示意图

当不宜采用斜撑时，可采用刚框架结构（结构构件间采用“刚性”抗弯连接件连接）以抵抗水平荷载的作用。刚框架结构一般用于单层结构，也可用于二层或三层结构。

连接节点设计时，应保证连接节点的设计假定和实际受力相符。例如，当连接节点设计为铰接时，应避免实际结构在该连接节点出现弯矩，以免引发结构破坏。刚性连接有多种形式，如用钉、螺丝、螺栓、销钉或者胶粘剂连接的金属板，用螺栓、销钉或螺丝连接的插入式钢板，或者用植筋连接（图 3.3）。由于木结构连接很难形成刚性连接，因此设计时应合理假定连接节点的扭转-弯矩关系，以准确预估结构的变形和强度。

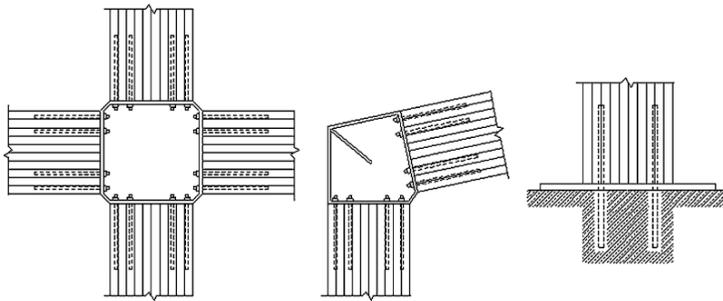


图 3.3 植筋连接应用示意图

3.2 构件设计

胶合木构件在各种受力情况下，应根据《胶合木结构技术规范》GB/T 50708-2012 进行计算。下面分别介绍不同受力构件的设计方法。为了帮助读者更直观地理解和使用规范中的各种设计方法，在部分章节中给出了算例以供参考。

3.2.1 受弯构件

(1) 直线等截面构件

受弯构件的抗弯承载能力应按下列式计算：

1) 按强度计算：

$$\frac{M}{W_n} \leq f_m \quad (3.1)$$

2) 按稳定验算：当构件截面宽度小于截面高度、沿受压边长度方向没有侧向支撑并且构件在端部没有防止构件转动的支撑时，受弯构件的侧向稳定应按下列式计算：

$$\frac{M}{\phi_l W_n} \leq f'_m \quad (3.2)$$

式中

f_m - 胶合木抗弯强度设计值 (N/mm²)

f'_m - 不考虑高度或体积调整系数的胶合木抗弯强度设计值 (N/mm²)

M - 受弯构件弯矩设计值 (N·mm)

W_n - 受弯构件的净截面抵抗矩 (mm³)

ϕ_l - 受弯构件的侧向稳定系数，按下列公式计算：

$$\phi_l = \frac{1 + \left(\frac{f_{mE}}{f'_m} \right)}{1.9} \sqrt{\left[\frac{1 + \left(\frac{f_{mE}}{f'_m} \right)}{1.9} \right]^2 - \frac{\left(\frac{f_{mE}}{f'_m} \right)}{0.95}}$$

$$f_{mE} = \frac{0.67E}{\lambda^2}$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{l_e h}{b^2}}$$

式中： f'_m - 不考虑高度或体积调整系数的胶合木抗弯强度设计值 (N/mm²)；

E - 弹性模量(N/mm²)；

f_{mE} - 受弯构件抗弯临界屈曲强度设计值(N/mm²)；

λ - 受弯构件的长细比，不得大于50；

b - 弯构件的截面宽度 (mm)；

h - 受弯构件的截面高度 (mm)；

l_e - 构件计算长度。

3) 受弯构件的顺纹抗剪承载能力，应满足下式的要求：

$$\frac{VS}{Ib} \leq f_v$$

式中： f_v - 胶合木顺纹抗剪强度设计值(N/mm²)；

V - 受弯构件剪力设计值 (N)；

I - 构件的全截面惯性矩 (mm⁴)；

b - 构件的截面宽度 (mm)；

S - 剪切面以上的截面面积对中和轴的面积矩 (mm³)。

4) 受弯构件的挠度，应满足下式的要求：

$$\omega \leq [\omega]$$

式中： $[\omega]$ - 受弯构件的挠度限值 (mm)

ω - 构件按荷载效应的标准组合计算的挠度 (mm)。

5) 双向受弯构件的抗弯承载能力，应按下式验算：

$$\frac{M_x}{W_{nx}f_{mx}} + \frac{M_y}{W_{ny}f_{my}} \leq 1$$

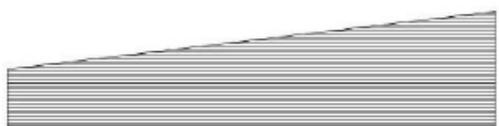
式中： M_x 、 M_y — 相对于构件截面x轴和y轴产生的弯矩设计值（N•mm）；

f_{mx} 、 f_{my} — 调整后的胶合木正向弯曲或侧向弯曲的抗弯强度设计值（N/mm²）；

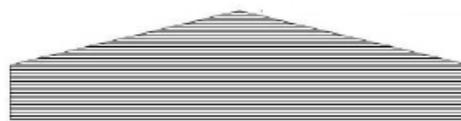
W_{nx} 、 W_{ny} — 构件截面沿x轴y轴的净截面抵抗矩（mm³）。

(2) 直线变截面构件

变截面直线形受弯构件包括单坡和双坡变截面构件，见图3.1。从构件斜面最低点到最高点的高度范围内，应采用相同等级的层板。构件的斜面制作应在工厂完成，不得在现场切割制作。本节仅对斜面在受压边的构件作出规定，不考虑斜面在受拉边的构件。



(a) 单坡变截面构件



(b) 双坡变截面构件

图3.1 变截面直线形受弯构件

1) 均布荷载作用下，支座为简支的单坡或对称双坡变截面矩形受弯构件的抗弯（包括稳定）、受剪以及横纹承压承载力进行验算，最大弯曲应力处离截面高度较小一端的距离 z ，最大弯曲应力处截面的高度 h_z 和最大弯曲应力处抗弯承载能力应按下列公式进行验算：

$$z = \frac{1}{2h_a + l \tan \theta} h_a$$

$$h_z = 2h_a \frac{h_a + l \tan \theta}{2h_a + l \tan \theta}$$

$$\sigma_m \leq \phi_i k_i f'_m$$

$$\sigma_m = \frac{3ql^2}{4bh_a(h_a + l \tan \theta)}$$

式中：

σ_m — 最大弯曲应力处的弯曲应力(N/mm²)；

h_a — 构件最小端的截面高度（mm）；

l — 构件跨度（mm）；

θ — 构件斜面与水平面的夹角（°）；

q — 均布荷载设计值（N/mm）；

f'_m — 不考虑高度或体积调整系数的胶合木抗弯强度设计值(N/mm²)；

k_i — 弯截面直线受弯构件设计强度相互作用调整系数
 φ_l — 受弯构件的侧向稳定系数

2) 最大弯曲应力处顺纹受剪承载能力应按下式验算

$$\sigma_m \tan \theta \leq f_v$$

式中: f_v — 胶合木抗剪强度设计值(N/mm²);

3) 支座处顺纹受剪承载能力按等截面直线型受弯构件的方法进行验算。

4) 最大弯曲应力处横纹受压承载能力应按下式验算:

$$\sigma_m \tan^2 \theta \leq f_{c,90}$$

式中: $f_{c,90}$ — 胶合木横纹承压强度设计值(N/mm²)。

5) 单个集中荷载作用下, 单坡或对称双坡变截面矩形受弯构件的最大承载力应按下列规定进行验算:

1 当集中荷载作用处截面高度大于最小端截面高度的2倍时, 最大弯曲应力作用点位于截面高度为最小端截面高度的2倍处, 即最大弯曲应力处离截面高度较小一端的距离 $z = h_a / \tan \theta$;

2 当集中荷载作用处截面高度小于或等于最小端截面高度的2倍时, 最大弯曲应力作用点位于集中荷载作用处;

3 最大弯曲应力处抗弯承载能力应按下列公式进行验算:

$$\sigma_m \leq \varphi_l k_i f'_m$$

$$\sigma_m = \frac{6M}{bh_z^2}$$

式中: σ_m — 最大弯曲应力处的弯曲应力(N/mm²);

M — 最大弯矩设计值(N·mm);

b — 构件截面宽度 (mm);

h_z — 最大弯曲应力处的截面高度 (mm);

φ_l — 受弯构件的侧向稳定系数

k_i — 构件设计强度相互作用调整系数

f'_m — 不考虑高度或体积调整系数的胶合木抗弯强度设计值(N/mm²)。

6) 均布荷载或集中荷载作用下单坡或对称双坡变截面矩形受弯构件的挠度 ω_m , 可根据变截面构件的等效截面高度, 按等截面直线型构件计算:

1 均布荷载作用下, 等效截面高度 h_c 应按下式计算:

$$h_c = k_c h_a$$

式中： h_c —— 等效截面高度；
 h_a —— 较小端的截面高度；
 k_c —— 截面高度折算系数

均布荷载作用下变截面梁截面高度折算系数取值

对称双坡变截面梁		单坡变截面梁	
当 $0 < C_h \leq 1$ 时	当 $0 < C_h \leq 3$ 时	当 $0 < C_h \leq 1.1$ 时	当 $1.1 < C_h \leq 2$ 时
$k_c = 1 + 0.66C_h$	$k_c = 1 + 0.62C_h$	$k_c = 1 + 0.46C_h$	$k_c = 1 + 0.43C_h$

注：表中 $C_h = \frac{h_b - h_a}{h_a}$ ； h_b 为最高截面高度； h_a 为最小端的截面高度

2 集中荷载或其他荷载作用下，构件的挠度应该按线弹性材料力学方法确定。

(3) 曲线受弯构件

1) 对于变截面曲线形受弯构件，抗弯承载能力的验算应将变截面直线部分按本规范第5.2节的规定验算，曲线部分应按下列公式验算：

$$K_\theta \frac{6M}{bh_b^2} \leq \phi_1 k_r f'_m$$

$$K_\theta = D + H \frac{h_b}{R_m} + F \left(\frac{hb}{R_m} \right)^2$$

式中： M —— 曲线部分跨中弯矩设计值(N·mm)；

b —— 构件截面宽度 (mm)；

h_b —— 构件在跨中的截面高度 (mm)；

ϕ_1 —— 受弯构件的侧向稳定系数；

K_θ —— 几何调整系数；式中，D、H和F为系数；

R_m —— 构件中心线处的曲率半径；

f'_m —— 不考虑高度或体积调整系数的胶合木抗弯强度设计值(N/mm²)。

(2) 曲线形矩形截面受弯构件的受剪承载能力应按下式验算：

$$\frac{3V}{2bh_a} \leq f_v$$

式中： f_v —— 胶合木抗剪强度设计值(N/mm²)；

V —— 受弯构件剪力设计值 (N)；

b — 构件截面宽度 (mm) ;
 h_a — 构件在端部的截面高度 (mm) 。

(3) 变截面曲线形受弯构件的挠度应按下列公式进行验算

$$\omega_c = \frac{5q_k l^4}{32Eb(h_{eq})^3}$$
$$h_{eq} = (h_a + h_b)(0.5 + 0.735 \tan \theta_r) - 1.41h_b \tan \theta_B$$

式中: φ_c — 构件跨中挠度 (mm) ;

q_k — 均布荷载标准值(N/mm);

L— 跨度 (mm) ;

E— 弹性模量;

b — 构件的截面宽度 (mm) ;

h_{eq} — 构件截面等效高度 (mm) ;

h_b — 构件在跨中的截面高度 (mm) ;

h_a — 构件在端部的截面高度 (mm) ;

θ_B — 底部斜角度数;

θ_r — 顶部斜角度数;

计算范例 1:

【工程要求】

胶合木梁中心间距为 4m, 跨度 L 为 5m, 楼面恒荷载为 1.25KN/m^2 , 楼面活荷载为 3.5KN/m^2 。按上述要求设计强度控制的单跨简支胶合木梁。

【工程设计法】

1. 荷载组合

恒荷载和活荷载的组合设计值:

$$Q = 1.2 \times 1.25 + 1.4 \times 3.5 = 6.4\text{KN} / \text{m}^2$$

梁中心间距为 4m, 则:

$$q = 6.4 \times 4 = 25.6 \text{KN} / m$$

2. 设计计算

试选铁-冷杉 200mm×400mm 的 TCT21 规格材，并验算其强度。

面积 $A = 200 \times 400 = 80000 \text{mm}^2$

惯性矩 $I = \frac{200 \times 400^3}{12} = 1066666667 \text{mm}^4$

截面模量 $W = \frac{200 \times 400^2}{6} = 5333333 \text{mm}^3$

查阅《胶合木结构技术规范》GB/T 50708-2012 表 4.2.2-4 可以得到：

抗弯强度设计值 $f_m = 21 \text{N} / \text{mm}^2$

抗减强度设计值 $f_v = 2.0 \text{N} / \text{mm}^2$

查阅《胶合木结构技术规范》GB/T 50708-2012 条文 4.2.3-2 可以得到：

抗弯强度调整系数 $k_v = \left[\left(\frac{130}{b} \right) \left(\frac{305}{h} \right) \left(\frac{6400}{L} \right) \right]^{10} = 0.96$

3. 强度验算

抗弯验算：

$$q = 25.6 \text{KN} / m$$

$$M = \frac{qL^2}{8} = \frac{25.6 \times 5^2}{8} = 80 \text{KN} \cdot m$$

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{80 \times 10^6}{5333333} = 15.0 \text{N} / \text{mm}^2 < 0.93 \times 21 = 19.53 \text{N} / \text{mm}^2$$

抗剪验算：

$$V = \frac{qL}{2} = \frac{25.6 \times 5}{2} = 64 \text{KN}$$

$$\tau = \frac{VS}{lb} = \frac{64 \times 10^3 \times 200 \times 400^2 / 8}{1066666667 \times 200} = 1.2 < 2.0 \text{N} / \text{mm}^2$$

满足条件，可以选用。

计算范例 2:

【工程要求】

胶合木梁中心间距为 4m，跨度 L 为 5m，楼面恒荷载为 2.0KN/m²，楼面活荷载为 3.0KN/m²。按上述要求设计挠度限值为 1/150 的单跨简支胶合木梁。

【工程设计法】

1. 荷载组合

恒荷载和活荷载的标准组合值:

$$Q = 1.0 \times 2 + 1.0 \times 3 = 5.0 \text{KN} / \text{m}^2$$

梁中心间距为 4m，则:

$$q_k = 5.0 \times 4 = 20.0 \text{KN} / \text{m}$$

2. 设计计算

试选铁-冷杉 200mm×400mm 的 TCT21 规格材，并验算其挠度。

查阅《胶合木结构技术规范》GB/T 50708-2012 表 4.2.2-4 可以得到:

弹模 $E = 6500 \text{N} / \text{mm}^2$

惯性矩 $I = \frac{200 \times 400^3}{12} = 1066666667 \text{mm}^4$

3. 挠度验算

$$w = \frac{5qL^4}{384EI} = \frac{5 \times 20.0 \times 5000^4}{384 \times 6500 \times 1066666667} = 23.5 \text{mm} < \frac{5000}{150} = 33.3 \text{mm}$$

满足条件，可以选用。

3.2.2 轴心受拉和受压构件

(1) 轴心受拉构件的承载能力应按下式验算:

$$\frac{N}{A_n} \leq f_t$$

式中: f_t — 胶合木顺纹抗拉强度设计值(N/mm²);

N —轴心拉力设计值 (N) ;
 A_n —净截面面积(mm²)。

当采用机械分级层板制作胶合木时，其机械分级层板强度性能指标和抗拉强度调整系数见下表。

机械分级层板强度性能指标 (N/mm²)

分布等级		ME7	ME8	ME9	ME10	ME11	ME12	ME14	ME16	ME18
抗弯 强度	平均值	33.0	36.0	39.0	42.0	45.0	48.5	54.0	63.0	72.0
	5%分位值	25.0	27.0	29.5	31.5	34.0	36.5	40.5	47.5	54.0
抗拉 强度	平均值	20.0	21.5	23.5	24.5	26.5	28.5	32.0	37.5	42.5
	5%分位值	15.0	16.0	17.5	18.5	20.0	21.5	24.0	28.0	32.0

注：表中层板的抗拉强度，应根据层板的宽度，乘以表 3.1 规定的调整系数。

表 3.1 抗拉强度调整系数

层板宽度尺寸	调整系数
$b \leq 150\text{mm}$	1.00
$150\text{mm} < b \leq 200\text{mm}$	0.95
$200\text{mm} < b \leq 250\text{mm}$	0.90
$b \geq 250\text{mm}$	0.85

(2) 轴心受压构件的承载能力应按下列要求进行验算：

1 按强度验算：

$$\frac{N}{A_n} \leq f_c$$

2 按稳定验算：

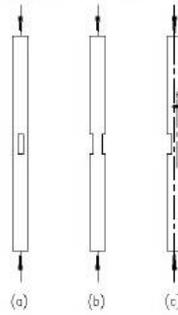
$$\frac{N}{\varphi A_0} \leq f_c$$

式中： f_c —胶合木顺纹抗拉强度设计值(N/mm²)；
 N —轴心压力设计值 (N) ；
 A_0 —受压构件截面的计算面积(mm²)；
 φ —轴心受压构件稳定系数。

按稳定验算时受压构件截面的计算面积 A_0 应按下列规定采用：

- 1 无缺口时，取 $A_0 = A$ (A 受压构件的全截面面积， mm^2) ；
- 2 缺口不在边缘时，取 $A_0 = 0.9A$ ；
- 3 缺口在边缘且为对称时，取 $A_0 = A_n$ ；
- 4 缺口在边缘但不对称时 应按偏心受压构件计算；

5 验算稳定时，螺栓孔可不作为缺口考虑。



轴心受压构件稳定系数的取值应按下列规定：

1) 轴心受压构件稳定系数应按下列公式计算：

$$\phi = \frac{1 + (f_{cE}/f_c)}{1.8} - \sqrt{\left[\frac{1 + (f_{cE}/f_c)}{1.8} \right]^2 - \frac{f_{cE}/f_c}{0.9}}$$

$$f_{cE} = \frac{0.47E}{(l_0/b)^2}$$

$$l_0 = k_l l$$

式中： f_c — 胶合木顺纹抗拉强度设计值(N/mm²)；

E — 弹性模量(N/mm²)；

b — 矩形截面边长，其他形状截面，可用 $r\sqrt{12}$ 代替，（ r 为截面的回转半径）；

对于变截面矩形构件取有效边长 b_c ， b_c

l_0 — 计算长度；

l — 构件实际长度；

k_l — 长度计算系数

长度计算系数 k_l 的取值

失稳模式						
k_l	0.65	0.8	1.2	1.0	2.1	2.4
端部支座条件示意图						
	不能转动, 不能移动		不能转动, 自由移动		自由转动, 自由移动	
	自由转动, 不能移动					

2) 当沿受压构件长度方向布置有使构件不产生侧向位移的支撑时, 轴心受压构件稳定系数=1。

3.2.3 拉弯和压弯构件

(1) 拉弯构件的承载能力应按下列公式验算:

1 按强度计算:

$$\frac{N}{A_n f_t} + \frac{M}{W_n f_m} \leq 1$$

2 按稳定计算:

$$\frac{1}{\phi_l f'_m} \left(\frac{M}{W_n} - \frac{N}{A_n} \right) \leq 1$$

式中: N — 轴心压力设计值 (N);

M — 矩设计值(N·mm);

A_n — 件净截面面积(mm²);

W_n — 件净截面抵抗矩(mm³);

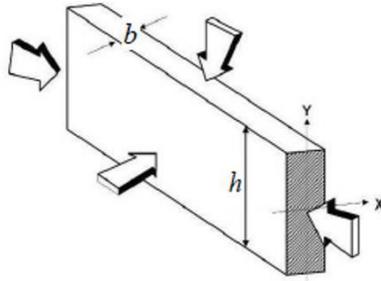
ϕ_l — 弯构件的稳定系数;

f_t — 合木顺纹抗拉强度设计值(N/mm²);

f_m — 合木抗弯强度设计值(N/mm²);

f'_m — 考虑高度或体积调整系数的胶合木抗弯强度设计值(N/mm²)。

(2) 当轴向受压构件沿一个或两个截面主轴方向承载弯矩时 (图 5.5.2), 承载能力应按下列公式验算:



压弯构件示意图

$$\left(\frac{N}{A_n f_c} \right)^2 + \frac{M_x}{W_{nx} f_{mx} \left[1 - \frac{N}{A_n f_{cEx}} \right]} + \frac{M_y}{W_{ny} f_{my} \left[1 - \left(\frac{N}{A_n f_{cEy}} \right) - \left(\frac{M_x}{W_{nx} f_{mE}} \right)^2 \right]} \leq 1$$

$$f_{cEx} = \frac{0.47E}{(l_{ox}/h)^2}$$

$$f_{cEy} = \frac{0.47E}{(l_{oy}/b)^2}$$

$$f_{mE} = \frac{0.67E}{\lambda^2}$$

式中：N— 轴向压力设计值 (N)；

M_x 、 M_y — 相对于 x 轴（构件窄面）和 y 轴（宽面）的弯矩设计值 (N_{mm})；

A_n — 构件净截面面积 (mm²)；

W_{nx} — 相对于 x 轴的净截面抵抗矩 (mm³)；

W_{ny} — 相对于 y 轴的净截面抵抗矩 (mm³)；

f_c — 顺纹抗压强度设计值 (N/mm²)；

f_{mx} 、 f_{my} — 胶合木构件相对于 x 轴（构件窄面）和 y 轴（宽面）的抗弯强度设计值 (N/mm²)；

E— 弹性模量 (N/mm²)；

λ — 受弯构件的长细比，不得大于 50；

b —构件截面宽度 (mm) ;

h —构件截面高度 (mm) ;

l_{ox} 、 l_{oy} —计算长度

且,

1 对于 x 轴单向弯曲或双向弯曲时 $\frac{N}{A} < f_{cEx}$

2 对于 y 轴单向弯曲或双向弯曲时 $\frac{N}{A} < f_{cEy}$

3 对于双向弯曲时 $\frac{M_x}{W_{nx}} < f_{mE}$

计算范例 1:

【工程要求】

胶合木柱中心间距为 12m, 计算长度为 3.3m, 楼面恒荷载为 2.0KN/m², 楼面活荷载为 3.0 KN/m², 楼面的跨度为 10m, 且木柱存在 0.25h 的初始偏心距。按上述要求设计强度控制时的胶合木柱。

【工程设计法】

1. 荷载组合

恒荷载标准值:

$$G_k = 2.0 \times \frac{10}{2} \times 12 = 120KN$$

恒荷载设计值:

$$G = 1.2 \times G_k = 1.2 \times 120 = 144KN$$

活荷载标准值:

$$Q_k = 3.0 \times \frac{10}{2} \times 12 = 180KN$$

活荷载设计值:

$$Q = 1.4 \times Q_k = 1.4 \times 180 = 252KN$$

恒荷载和活荷载的组合设计值:

$$N = G + Q = 144 + 252 = 396 \text{KN}$$

2. 设计计算

试选云杉-松-冷杉类(S-P-F) 250×250mm 截面的 TCT18 胶合木柱, 并对其强度进行验算。

$$\text{面积 } A_n = 250 \times 250 = 62500 \text{mm}^2$$

$$\text{截面模量 } W_n = \frac{250 \times 250^2}{6} = 2604167 \text{mm}^3$$

$$\text{抗弯强度调整系数 } k_v = \left[\left(\frac{130}{b} \right) \left(\frac{305}{h} \right) \left(\frac{6400}{L} \right) \right]^{\frac{1}{10}} = 1.0$$

查阅《胶合木结构技术规范》GB/T 50708-2012 表 4.2.2-4 可以得到:

$$\text{抗弯强度设计值 } f_m = 18 \text{N/mm}^2$$

$$\text{抗压强度设计值 } f_c = 17 \text{N/mm}^2$$

$$\text{偏心距 } e_0 = 0.25h = 0.25 \times 250 = 62.5 \text{mm}$$

3. 强度验算

$$M = Ne_0 = 396 \times 1000 \times 62.5 = 24750000 \text{N} \cdot \text{mm}$$

$$\frac{N}{A_n f_c} + \frac{M}{W_n f_m} = \frac{396000}{62500 \times 17} + \frac{24750000}{2604167 \times 18} = 0.57 < 1$$

满足条件, 可以选用。

计算范例 2:

【工程要求】

胶合木柱中心间距为 12m, 计算长度为 3.3m, 楼面恒荷载为 2.0KN/m², 楼面活荷载为 3.0 KN/m², 楼面的跨度为 10m, 且木柱存在 0.25h 的初始偏心距。按上述要求设计稳定控制时的胶合木柱。

【工程设计法】

1. 荷载组合

恒荷载标准值:

$$G_k = 2.0 \times \frac{10}{2} \times 12 = 120 \text{KN}$$

恒荷载设计值:

$$G = 1.2 \times G_k = 1.2 \times 120 = 144 \text{KN}$$

活荷载标准值:

$$Q_k = 3.0 \times \frac{10}{2} \times 12 = 180 \text{KN}$$

活荷载设计值:

$$Q = 1.4 \times Q_k = 1.4 \times 180 = 252 \text{KN}$$

恒荷载和活荷载的组合设计值:

$$N = G + Q = 144 + 252 = 396 \text{KN}$$

2. 设计计算

试选云杉-松-冷杉类(S-P-F) 250×250mm 截面的 TCT27 胶合木柱, 并对其稳定进行验算。

$$\text{面积 } A_n = 250 \times 250 = 62500 \text{mm}^2$$

$$\text{惯性矩 } I = \frac{250 \times 250^3}{12} = 325520833 \text{mm}^4$$

$$\text{截面模量 } W_n = \frac{250 \times 250^2}{6} = 2604167 \text{mm}^3$$

$$\text{抗弯强度调整系数 } k_v = \left[\left(\frac{130}{b} \right) \left(\frac{305}{h} \right) \left(\frac{6400}{L} \right) \right]^{\frac{1}{10}} = 1.0$$

查阅《胶合木结构技术规范》GB/T 50708-2012 表 4.2.2-4 可以得到:

$$\text{抗弯强度设计值 } f_m = 27 \text{N/mm}^2$$

$$\text{抗压强度设计值 } f_c = 25 \text{N/mm}^2$$

$$\text{偏心距 } e_0 = 0.25h = 0.25 \times 250 = 62.5 \text{mm}$$

$$\text{长细比 } \lambda = \frac{l_0}{i} = \frac{l_0}{\sqrt{\frac{I}{A}}} = \frac{3300}{\sqrt{\frac{325520833}{62500}}} = 45.7$$

查阅《木结构设计规范》表 4.2.1-1 确定 SPF 的强度等级为 TC11，根据本规范条文 5.1.4-2 可以得到：

$$\text{稳定系数 } \varphi = \frac{1}{1 + \left(\frac{\lambda}{65}\right)^2} = \frac{1}{1 + \left(\frac{45.7}{65}\right)^2} = 0.67$$

3. 稳定验算

$$K = \frac{Ne_0}{Wf_m \left(1 + \sqrt{\frac{N}{Af_c}}\right)} = \frac{396000 \times 62.5}{2604167 \times 27 \times \left(1 + \sqrt{\frac{396000}{62500 \times 25}}\right)} = 0.28$$

$$\varphi_m = (1 - K)^3 = (1 - 0.28)^3 = 0.38$$

$$\frac{N}{\varphi\varphi_m A_0} = \frac{396000}{0.67 \times 0.38 \times 62500} = 24.8 \text{ N/mm}^2 < f_c = 25 \text{ N/mm}^2$$

满足条件，可以选用。

3.3 连接设计

胶合木构件的连接应根据《胶合木结构技术规范》GB/T 50708-2012 进行计算并满足相应的构造规定。构件连接设计时，应避免因不同紧固件之间的偏心作用产生横纹受拉。同一连接中，不宜采用不同种类的紧固件。

3.3.1 连接设计的要求

各种连接的承载力设计值应根据下列规定采用：

(1) 对于某一树种，单根紧固件连接的承载力设计值，与该树种木材的不同材质等级无关；

(2) 连接中，当类型、尺寸以及屈服模式相同的紧固件的数量大于或等于两根时，总的连接承载力设计值为每一单个紧固件承载力设计值的总和。

销轴类紧固件的端距、边距、间距和行距最小尺寸应符合表 3.1 的规定。

表 3.1 销轴类紧固件的端距、边距、间距和行距的最小值尺寸

距离名称	顺纹荷载作用时	横纹荷载作用时
------	---------	---------

最小端距 e_1	受拉构件	$\geq 7d$	$\geq 4d$	
	受压构件	$\geq 4d$		
最小边距 e_2	当 $l/d \leq 6$	$\geq 1.5d$	荷载作用边	$\geq 4d$
	当 $l/d > 6$	取 $1.5d$ 与 $r/2$ 两者较大值	无荷载作用边	$\geq 1.5d$
最小间距 s	$\geq 4d$		横纹方向	
			中间各排	$\geq 3d$
最小行距 r	$\geq 2d$			外侧一排
				$\geq 1.5d$, 并 $\leq 125\text{mm}$
几何位置示意图			当 $l/d \leq 2$	$\geq 2.5d$
			当 $2 < l/d < 6$	$\geq (5l+10d)/8$
			$l/d \geq 6$	$\geq 3d$

注：用于确定最小边距的 l/d 值（ l 为紧固件长度， d 为紧固件的直径），应取下列两者中的较小值：

- 1 紧固件在主构件中的贯入深度 l_m 与直径 d 的比值 l_m/d ；
- 2 紧固件在侧面构件中的总贯入深度 l_s 与直径 d 的比值 l_s/d 。

对于采用单剪或对称双剪连接的销轴类紧固件，每一剪面承载力设计值 Z 应按下列4种破坏模式进行计算，并取各计算结果中的最小值作为销轴类紧固件连接的承载力设计值。

1 销槽承压破坏：

1) 对于单剪连接或双剪连接时主构件销槽承压破坏应按下式计算：

$$Z = \frac{1.5dl_m f_{em}}{R_d}$$

2) 对于侧构件销槽承压破坏应按下式计算：

$$\text{单剪连接时 } Z = \frac{1.5dl_s f_{es}}{R_d}$$

$$\text{双剪连接时 } Z = \frac{3dl_s f_{es}}{R_d}$$

注：单剪连接中的主构件为厚度较厚的构件；双剪连接中的主构件为中间构件。

式中： d — 紧固件直径（mm）：对于有螺纹的销体， d 为根部直径；当螺纹部分的长度小于承压长度的 1/4 时， d 为销体直径；

l_m 、 l_s — 主、次构件销槽承压面长度（mm）；

f_{em} 、 f_{es} — 主、次构件销槽承压强度标准值（N/mm²）

R_d — 与紧固件直径/破坏模式及荷载与木纹间夹角有关的折减系数

折减系数 R_d

破坏模式	折减系数 R_d
销槽承压破坏	$4K_\theta$
销槽局部挤压破坏	$3.6K_\theta$
单个或两个塑性铰破坏	$3.2K_\theta$

注：表中 $K_\theta = 1 + 0.25(\theta/90)$ ； θ --- 荷载与木材顺纹方向的最大夹角（ $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ ）。

2 销槽局部挤压破坏应按下式计算：

$$Z = \frac{1.5k_1 d l_s f_{es}}{R_d}$$

$$k_1 = \frac{\sqrt{R_e + 2R_e^2(1+R_t+R_t^2) + R_t^2 R_e^3} - R_e(1+R_t)}{1+R_e}$$

式中： R_e — 为 f_{em}/f_{es} ；

R_t — 为 l_m/l_s ；

3 单个塑性铰破坏：

1) 对于单剪连接时主构件单个塑性铰破坏应按下式计算：

$$Z = \frac{1.5k_2 d l_m f_{em}}{(1+2R_e)R_d}$$

$$k_2 = -1 + \sqrt{2(1+R_e) + \frac{2f_{yb}(1+2R_e)d^2}{3f_{em}l_m^2}}$$

式中： f_{yb} — 销轴类紧固件抗弯强度标准值（N/mm²）

2) 对于侧构件单个塑性铰破坏应按下式计算：

$$\text{单剪连接时} \quad Z = \frac{1.5k_3dl_s f_{em}}{(2+R_e)R_d}$$

$$\text{双剪连接时} \quad Z = \frac{3k_3dl_s f_{em}}{(2+R_e)R_d}$$

$$k_3 = -1 + \sqrt{\frac{2(1+R_e)}{R_e} + \frac{2f_{yb}(2+R_e)d^2}{3f_{em}l_s^2}}$$

4 主侧构件两个塑性铰破坏应按下式计算：

$$\text{单剪连接时} \quad Z = \frac{1.5d^2}{R_d} \sqrt{\frac{2f_{em}f_{yb}}{3(1+R_e)}}$$

$$\text{双剪连接时} \quad Z = \frac{3d^2}{R_d} \sqrt{\frac{2f_{em}f_{yb}}{3(1+R_e)}}$$

3.4 连接节点构造

连接节点的构造应保证连接节点能有效传递荷载、耐久并及尽可能减少维护。木材顺纹方向的强度与横纹方向的强度差异很大，且木材的横纹抗拉强度远远小于横纹抗压强度。这些特性对连接节点的构造有直接的影响，设计时应加以考虑。

应尽量避免木材由于胀缩在连接节点处引起的劈裂。与钢结构类似，钢结构构造应考虑因温度变化而造成钢材的膨胀和收缩，木结构连接节点的构造应考虑木材由于含水率的变化而引起的胀缩。由于木材因含水率变化所产生的胀缩主要发生在横纹方向，连接节点的构造不应限制因木材胀缩造成的变形。即使在有防水保护的结构中，胶合木在安装完成后也会因较低相对湿度而流失水分，造成收缩。当使用单块金属连接板时，应避免在木材横纹方向设置多排螺栓。虽然胶合木在生产时环境相对干燥，但在使用过程中仍会收缩直至胶合木的含水率达到当地平衡含水率。

连接的构造应避免在木结构构件中造成横纹拉应力。例如梁端受拉处开口的简支梁（见节点构造 A5）会引起横纹拉应力。应避免在顺纹方向设置多排间隔紧密的紧固件，尤其是当螺栓孔与螺栓没有缝隙时。对于这类连接，构件的转动可能会产生次弯矩，在连接处导致横纹拉应力。

应采用防潮层、泛水板和其他保护设施进行防潮和防水。无防水保护的木结构应进行适当的防腐处理。施工过程中应对木材进行保护。拱与柱基不应嵌入混凝土楼面；当混凝土楼面有可能潮湿时，拱与柱基应高出混凝土楼面 25mm。

连接节点应能有效排水以避免潮湿所产生的问题。紧固件和连接件需采用不锈钢或者防锈材料涂刷。

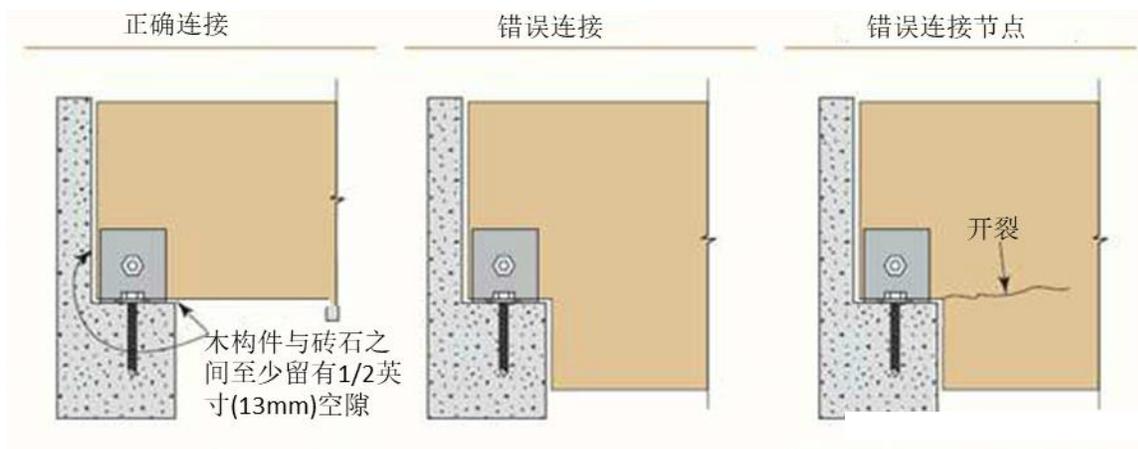
设计时应考虑荷载引起的梁端转动。应避免梁端的连接节点限制梁端的转动。除非设计的连接节点有足够的强度以抵抗产生的弯矩，否则木材在连接节点处会劈裂。

总之，连接节点的构造应遵循以下原则：

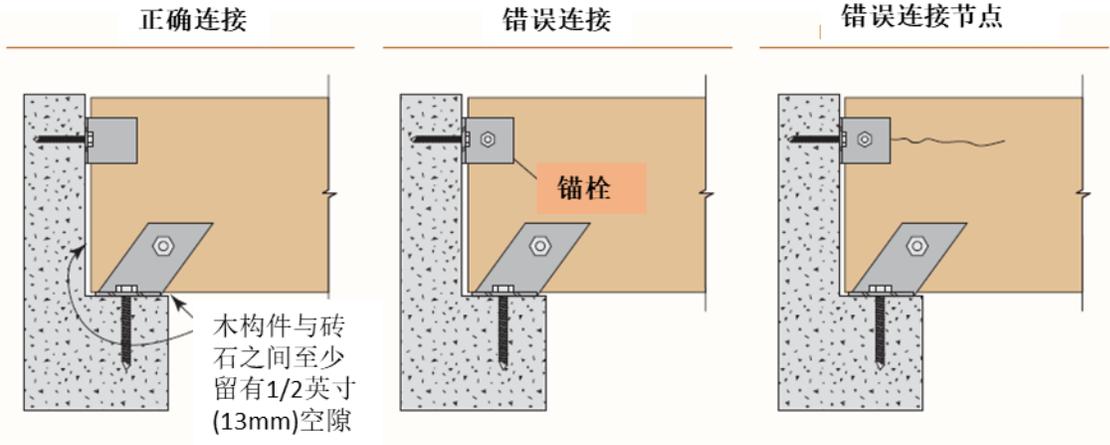
1. 尽可能通过构件端部承压传递荷载；
2. 允许胶合木构件在环境湿度变化时发生尺寸变化；
3. 节点的构造应避免构件产生横纹受拉；
4. 避免在连接节点处水分聚积；
5. 避免胶合木构件与砖石或混凝土直接接触；
6. 避免连接节点偏心受力；
7. 减少木材端部暴露于外部环境。

连接实例

胶合木结构常见连接形式如图 3.4-3.9 所示。图中分别列出了正确和错误的连接节点构造以及错误构造可能引起的结构破坏。

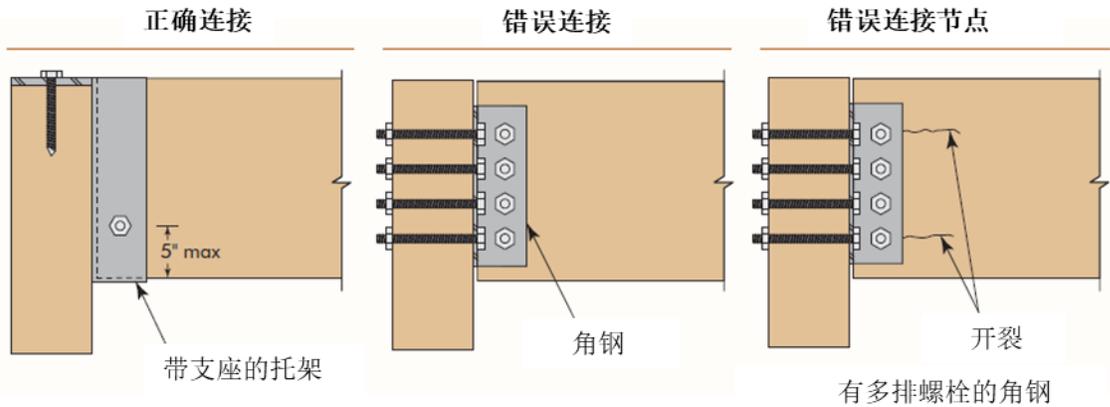


梁端开口会由于剪应力集中和横纹受拉应力在内角处产生劈裂。端部开口不应超过梁高的 1/10 或 75mm（3 英寸）的较小值，并且应通过端部开口计算公式进行验算。

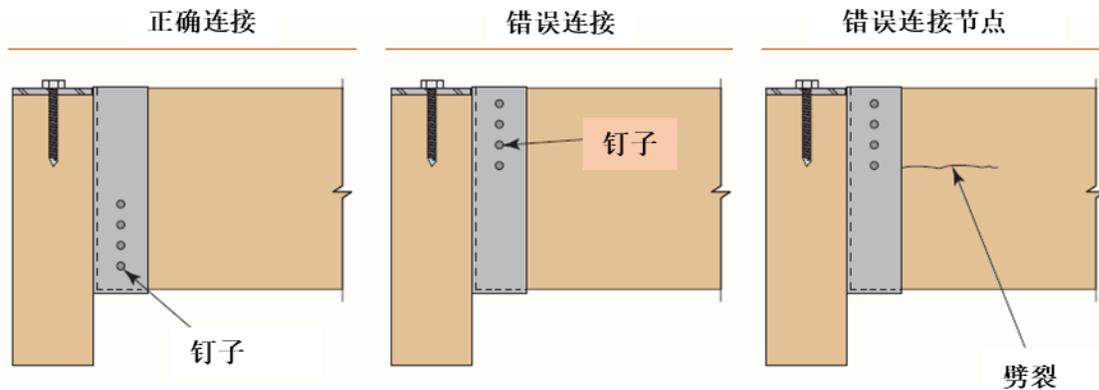


当梁在底部连接并且在顶部有侧向约束时，梁的收缩会造成梁的支承反力从底部转移到顶部连接处，造成梁在顶部连接处劈裂。当梁在荷载作用下发生变形时，如果顶部约束不允许梁端发生转动，也会引起劈裂。

图 3.4 梁与支座的连接（图片由 APA 提供）

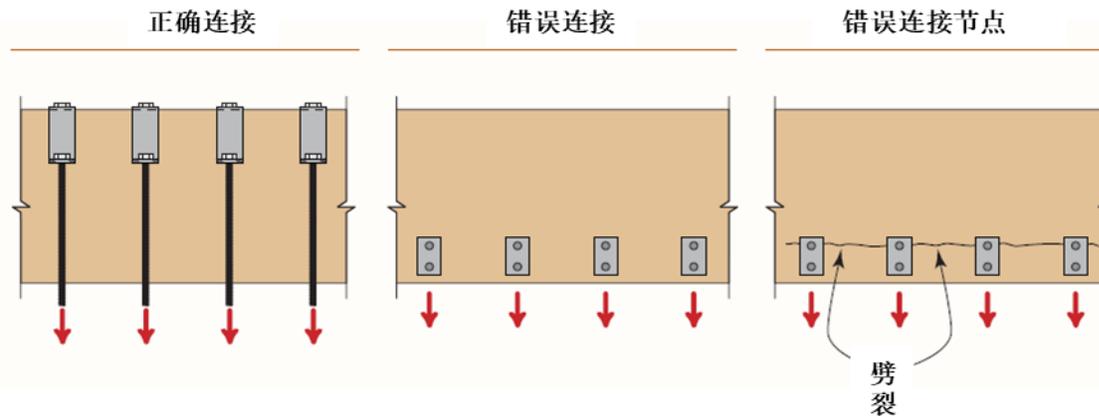


如上图所示，由于梁收缩引起螺栓处木材横纹受拉，有多排螺栓的角钢造成悬吊梁开裂。正确的做法是采用如图带支座的托架。



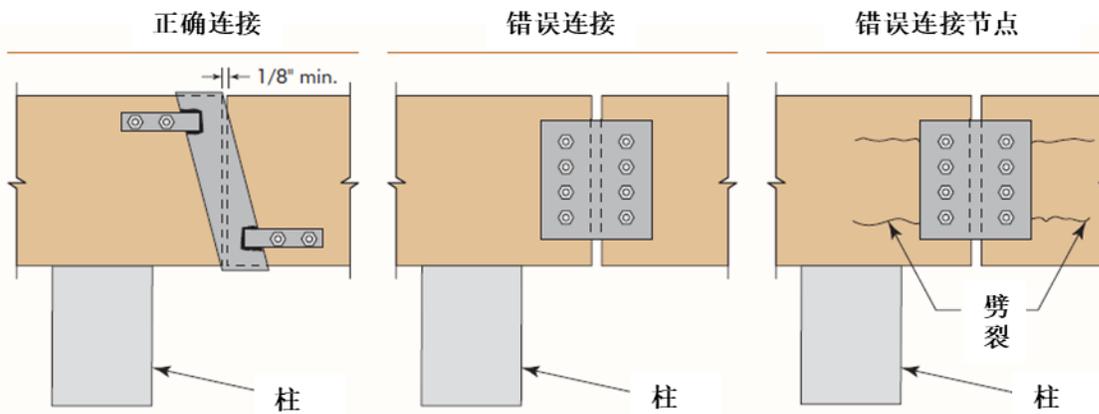
悬吊梁收缩会造成荷载从支座传递到钉子。即使是钉子，也会使梁发生劈裂。

图 3.5 梁与梁的连接（图片由 APA 提供）

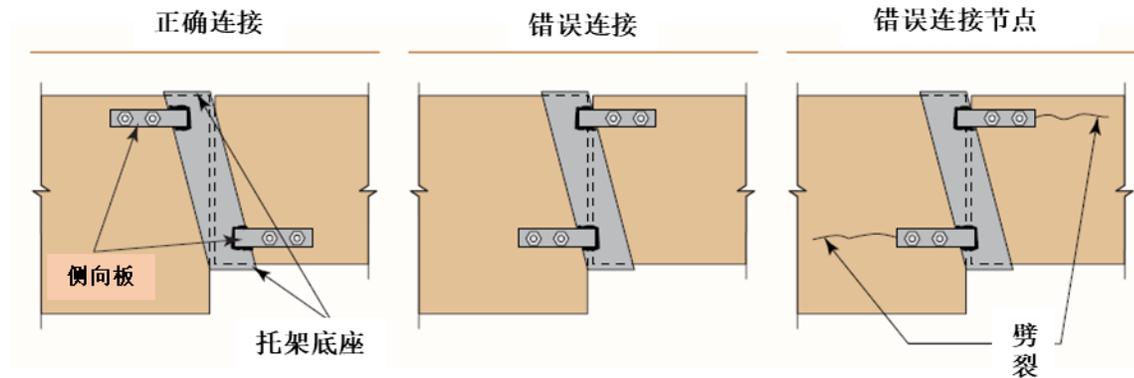


较大的集中荷载（如暖通系统、吊车轨道或者主要结构构件等）悬挂于梁底部时，会产生横纹拉应力，造成劈裂。

图 3.6 梁悬挂较大的集中荷载（图片由 APA 提供）

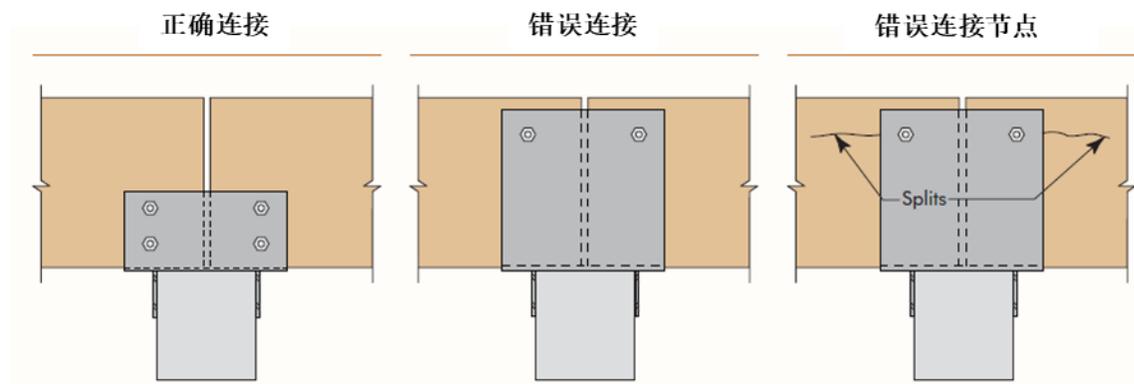


当拼接板两侧的构件收缩时，拼接板会造成两侧的构件劈裂；拼接板会阻止构件的收缩，从而使构件在连接处产生横纹拉应力，造成劈裂。

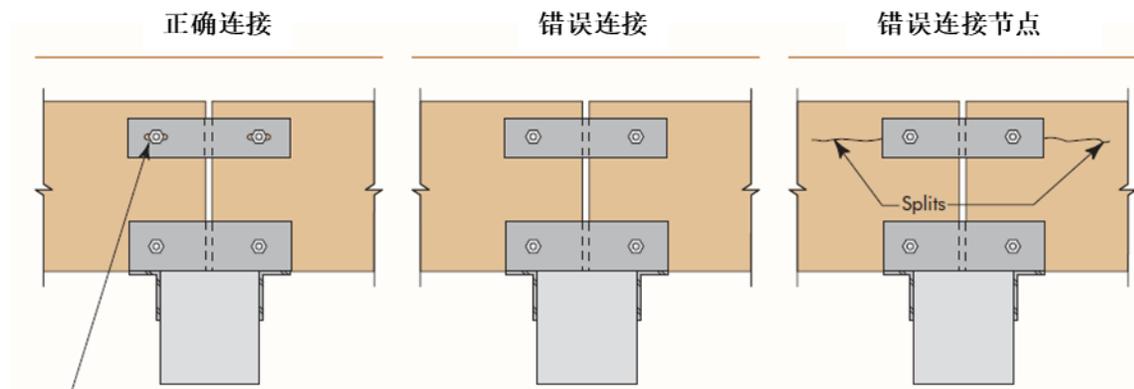


当将拼接板倒置时，胶合木梁的收缩会将荷载由托架底座转移到侧向板连接处，使梁在连接处产生横纹拉应力，造成劈裂和梁失效。

图 3.7 悬臂梁连接-无拉伸约束（图片由 APA 提供）



当梁收缩时，荷载会传递给螺栓，造成梁劈裂。该节点构造也限制了梁在荷载作用下所产生的转动，从而导致梁劈裂。

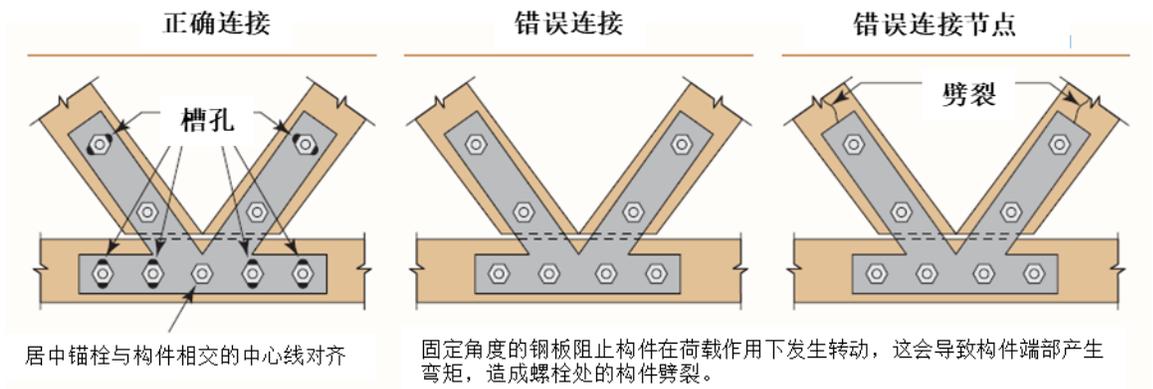


水平支撑板上的槽孔
避免上方作用导致轴力

若没有沟槽，梁在荷载作用下发生的转动会引起拉伸连接板处的构件劈裂

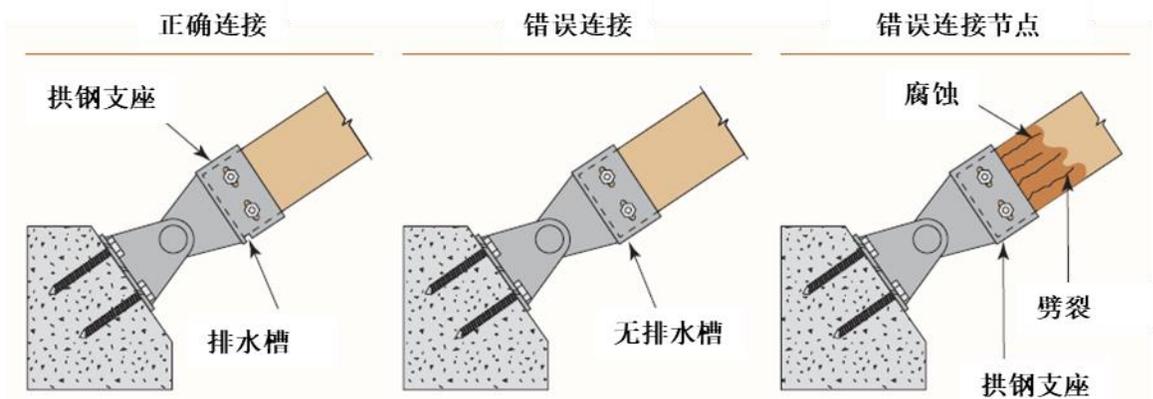
若没有沟槽，梁在荷载作用下发生的转动会引起拉伸连接板处的构件劈裂。

图 3.8 梁柱-U 型支架-木材或管柱 (图片由 APA 提供)



固定角度的钢板阻止构件在荷载作用下发生转动，这会导致构件端部产生弯矩，造成螺栓处的构件劈裂。

图 3.9 桁架连接节点 (图片由 APA 提供)



胶合木拱钢支座应带有排水槽以减小水分积聚，造成构件腐蚀。内部螺栓必须靠近以避免木材收缩引起的劈裂。

图 3.10 胶合木拱与基础的连接 (图片由 APA 提供)

4 防火设计

一直以来，人们普遍认识到木材有能力在火灾中保持结构构件的完整性。受火时，胶合木外层燃烧炭化形成阻燃层，能够防止木材内部的继续燃烧。通过对炭化层与内部没有遭到破坏的部分的厚度比例进行测量，可以建立预测木材耐火性的理论公式，并且通过承受荷载的梁柱燃烧试验对公式加以验证。

《胶合木结构技术规范》GB/T 50708-2012 规定了胶合木梁柱耐火极限的计算方法。图 4.1 为构件燃烧后的剩余截面。表 4.1 列出了根据燃烧后剩余截面尺寸计算得出的几何特征。

有效炭化速率 β_e 应根据下式计算：

$$\beta_e = \frac{1.2\beta_n}{t^{0.187}} \quad (4.1)$$

式中：

β_e -根据耐火极限 t 确定的有效炭化速率

β_n -木材燃烧 1 小时的名义线性炭化速率 (mm/h)

t - 耐火极限（小时）

系数 1.2 考虑了直接与炭化层相邻的木材的强度和刚度的降低；采用针叶树种制作的胶合木构件的名义线性炭化速率 $\beta_n = 38 \text{ mm / h}$ 。

防火设计或验算燃烧后的矩形构件承载力时，构件的各种强度值应采用《胶合木结构技术规范》GB/T 50708-2012 附录 B 规定的强度特征值，并应乘以下列调整系数：

1 抗弯强度、抗拉强度和抗压强度调整系数应取 1.36。验算时，受弯构件稳定系数和受压构件屈曲强度调整系数应取 1.22；

2 受弯和受压构件的稳定计算时，应采用燃烧后的截面尺寸，弹性模量调整系数应取 1.05；

3 当考虑体积调整系数时，应按燃烧前的截面尺寸计算体积调整系数。

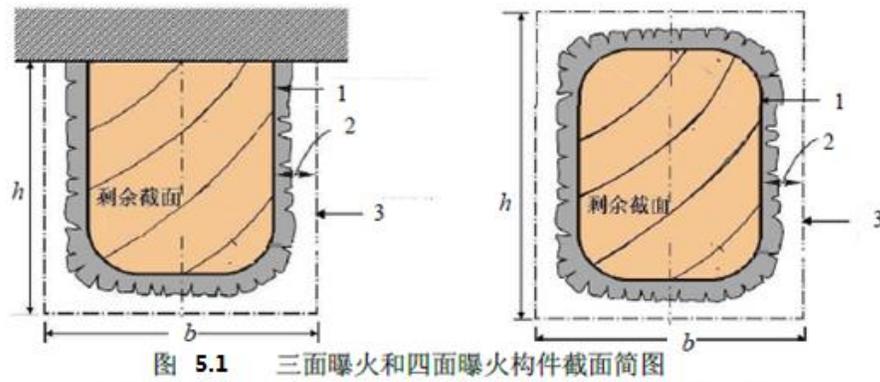


图 5.1 三面曝火和四面曝火构件截面简图

1——构件燃烧后剩余截面边缘；2——有效炭化厚度 T；3——构件燃烧前截面边缘

图 4.1 构件燃烧后截面尺寸减小

表 4.1 构件燃烧后的截面尺寸

截面几何特征	三面曝火时	四面曝火时
截面积 mm^2	$A(t) = (b - 2\beta_e t)(h - \beta_e t)$	$A(t) = (b - 2\beta_e t)(h - 2\beta_e t)$
截面抵抗矩（主轴方向） mm^3	$W(t) = \frac{(b - 2\beta_e t)(h - \beta_e t)^2}{6}$	$W(t) = \frac{(b - 2\beta_e t)(h - 2\beta_e t)^2}{6}$
截面抵抗矩（次轴方向） mm^3	—	$W(t) = \frac{(h - 2\beta_e t)(b - 2\beta_e t)^2}{6}$
截面惯性矩（主轴方向） mm^4	$I(t) = \frac{(b - 2\beta_e t)(h - \beta_e t)^3}{12}$	$I(t) = \frac{(b - 2\beta_e t)(h - 2\beta_e t)^3}{12}$
截面惯性矩（次轴方向） mm^4	—	$I(t) = \frac{(h - 2\beta_e t)(b - 2\beta_e t)^3}{12}$

注：表中， h ——燃烧前截面高度（mm）； b ——燃烧前截面宽度（mm）； t ——耐火极限时间（h）； β_e ——有效炭化速率（mm/h）

当胶合木构件考虑耐火极限的要求时，其层板组坯应满足以下构造规定：

(1) 对于耐火极限为 1.00h 的胶合木梁，当构件为非对称异等组合时，应在受拉边减去一层中间层板，并增加一层表面抗拉层板（图 4.2b）。当构件为对称异等组合时，应在上下两边各减去一层中间层板，并各增加一层表面抗拉层板。构件设计时，按未改变层板组合的情况进行（图 4.3b）。

(2) 对于耐火极限为 1.50h 或 2.00h 的胶合木构件，当构件为非对称异等组合时，应在受拉边减去二层中间层板，并增加二层表面抗拉层板（图 4.2c）。当构件为对称异等组合时，应在上下两边各减去二层中间层板，并各增加二层表面抗拉层板。构件设计时，按未改变层板组合的情况进行（图 4.3c）。

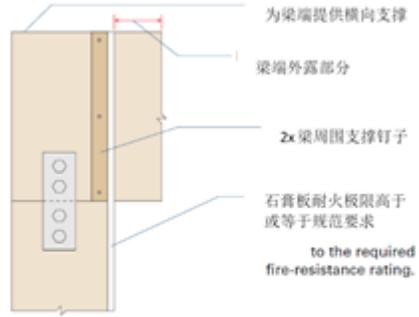


图 4.2 非对称异等组合



图 4.3 对称异等组合

由于金属紧固件导热迅速，因此必须对暴露在外的金属紧固件进行等同于结构构件的防火处理。当需要进行防火设计时，连接件与紧固件必须用木材、耐火石膏板或者其他任何能够满足防火时间要求的材料进行保护。常见金属件和紧固件的节点构造见图 4.4-4.8。



立面图

图 4.4 隔离式梁柱连接节点构造

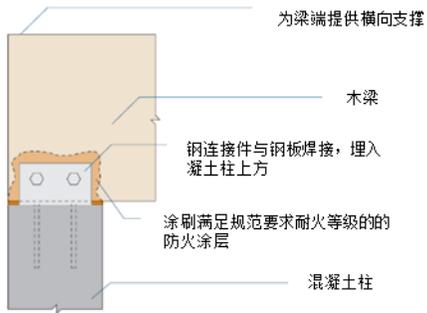


图 4.6 外露式梁柱连接件节点构造（无外观要求）

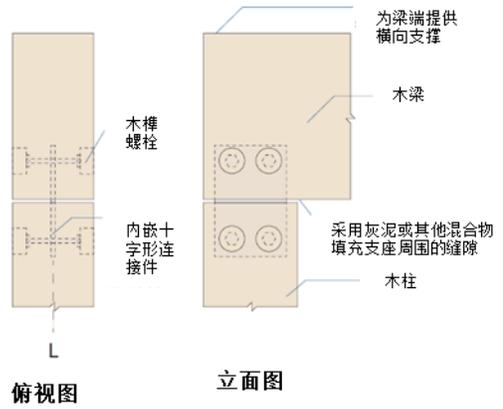


图 4.5 外露式梁柱连接节点构造（有外观要求）

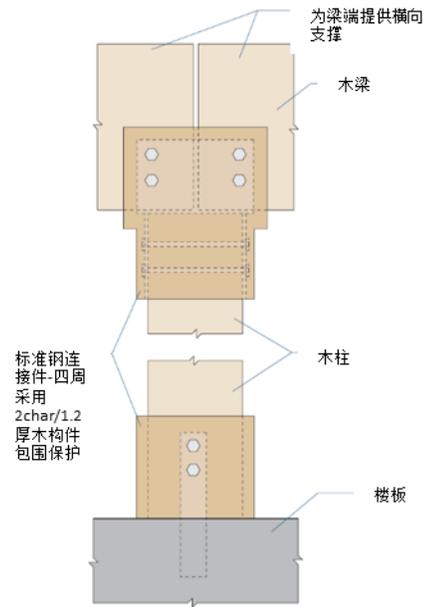


图 4.7 包覆式柱与柱连接节点构造

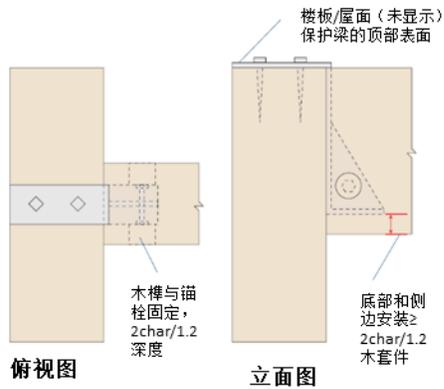


图 4.8 主次梁隐蔽式节点构造

计算范例：

【工程要求】

胶合木梁中心间距为 4m，跨度 L 为 5m，楼面恒荷载为 $2.0\text{KN}/\text{m}^2$ ，楼面活荷载为 $3.0\text{KN}/\text{m}^2$ 。按上述要求设计满足四面曝火要求时的单跨简支胶合木梁。

【工程设计法】

1. 荷载组合

恒荷载和活荷载的标准组合值：

$$Q = 1.0 \times 2 + 1.0 \times 3 = 5.0\text{KN}/\text{m}^2$$

梁中心间距为 4m，则：

$$q_k = 5.0 \times 4 = 20.0\text{KN}/\text{m}$$

2. 设计计算

试选铁-冷杉 200mm×400mm 的 TCT21 规格材，并验算其四面曝火条件下的强度。

查阅《木结构设计规范》可知胶合木梁耐火极限设计值为 1h，由此查阅《胶合木结构技术规范》表 7.1.4 得到相应的有效炭化速率 β_e 为 45.7mm/h，有效炭化层厚度 T 为 46mm。

$$\text{有效宽度 } b' = 200 - 2 \times 45.7 = 108.6\text{mm}$$

有效高度 $h' = 400 - 2 \times 45.7 = 354.3 \text{ mm}$

查阅《胶合木结构技术规范》附录 B 可以得到：

抗弯强度特征值 $f_{mk} = 28 \text{ N/mm}^2$ ，抗弯强度调整系数为 1.36

截面模量 $W = \frac{108.6 \times 354.3^2}{6} = 1723735 \text{ mm}^3$

抗弯强度调整系数 $k_v = \left[\left(\frac{130}{b} \right) \left(\frac{305}{h} \right) \left(\frac{6400}{L} \right) \right]^{\frac{1}{10}} = 0.96$

3. 强度验算

$$q = 20.0 \text{ KN/m}$$

$$M = \frac{qL^2}{8} = \frac{20.0 \times 5^2}{8} = 62.5 \text{ KN} \cdot \text{m}$$

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{62.5 \times 10^6}{1723735} = 36.26 \text{ N/mm}^2 < 0.96 \times 28 \times 1.36 = 36.56 \text{ N/mm}^2$$

满足条件，可以选用。

参考文献：

1. Lie, T.T., 1977. A method for assessing the fire resistance of laminated timber beams and columns. Fire Research Section, Division of Building Research, National Research Council of Canada, Ottawa, Ont., Canada.
Lie, T.T., 1997. 胶合木梁和柱的耐火极限评估方法，加拿大国家研究院建筑研究所防火研究室

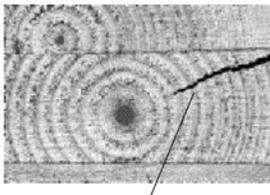
5 其他考虑因素

5.1 裂缝

环境相对湿度与温度的变化会引起木材含水率的变化，从而引起木材胀缩。如果木材内部与表面含水率相差过大，木材胀缩产生的尺寸变化则会引起较大的横纹拉应力，从而引发与年轮垂直方向的开裂（干裂）。这种现象在大尺寸的锯材梁上非常普遍。

由于用于制作胶合木的层板较薄（通常是 40 mm），因此层板的内部与表面的含水率会比较均匀。由于层板的最大含水率控制在 15% 以内，因此与锯材相比，胶合木不易发生因温湿度变化产生干裂。

与干裂不同，脱层是层板间胶粘不当引起的胶合木层间缝隙。干裂的特征是沿着木材纤维方向的撕裂，而脱层是表面光滑，没有木材纤维撕裂的缝隙。质量合格的胶合木构件中很少出现脱层。脱层可能发生在任一胶层，而干裂经常出现在靠近外层的第一个胶层（图 5.1），也可能发生在表面层板。位于第一个胶层的干裂往往是外层板面层暴露于环境中的结果。



干裂
木材纤维断裂，表面粗糙

图 5.1 胶合木干裂

裂缝尺寸评估:

对于弯曲构件，干裂往往只影响水平剪切强度，对临界剪切区外的强度影响不大。干裂对构件的抗弯强度与抗拉强度几乎没有影响。如图 5.2 所示，临界剪切区通常是指简支梁端部 3 倍梁高，梁中部 $1/2$ 的区域。对于连续梁，临界剪切区也包括梁中间支座的类似区域。

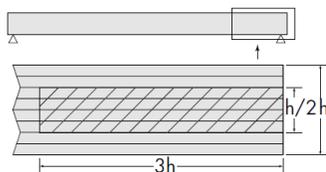


图 5.2 胶合梁端部临界剪切区

规范中的剪切强度设计值一般用于承受恒荷载、活荷载、风载与地震荷载等荷载的矩形截面胶合木梁。考虑到在使用过程中木材可能产生开裂，设计时可将规范中的剪切

强度设计值折减 10%。使用时当开裂深度小于截面宽度的 10%时，即便裂缝出现在临界剪力区，也无须对其进行工程分析。

若设计师假定在胶合梁临界剪切区无裂缝出现，则水平剪应力可增加 10%。如果是这样的话，当在临界剪切区有任何裂缝时，应按照以下步骤对临界剪切区的裂缝进行工程分析。

裂缝类型包括侧向开裂与端部开裂（如图 5.3）。侧向开裂是木材在梁两侧出现的裂缝，开裂深度为各条裂缝深度的均值。端部开裂是发生在梁端部整个截面上的裂缝，开裂长度为每一端面各条裂缝长度的均值。临界剪切区裂缝容许尺寸计算公式如下：

$$\text{容许侧向开裂深度} = 0.1 \times b \tag{5.1}$$

$$\text{容许端部开裂长度} = 0.1 \times 3 \times b \tag{5.2}$$

b 为梁宽。

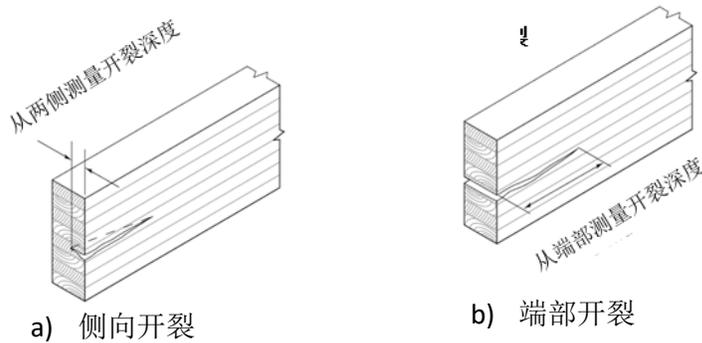


图 5.3 侧向开裂与端部开裂

临界剪切区外的裂缝容许尺寸可根据梁内部剪应力分布的线性比例确定。图 5.4 为理论与理想剪应力分布图。

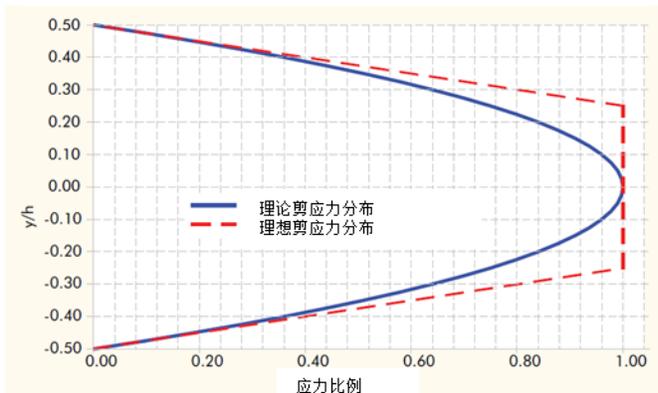


图 5.4 理论与理想剪应力分布图

一般而言，容许裂缝尺寸随着距梁中部的距离增加而增加。临界剪切区外裂缝容许尺寸根据下式进行计算：

$$\text{允许侧向开裂深度} = C \times b \quad (5.3)$$

$$\text{允许端部开裂长度} = C \times 3 \times b \quad (5.4)$$

式中： $C = 3.6 (y/h) - 0.8 \leq 0.85$

h = 胶合梁高

y = 距梁中部的距离， $0.25h \leq y \leq 0.50h$ 。

图 5.5 为基于公式 5.3 确定的容许侧向裂缝深度

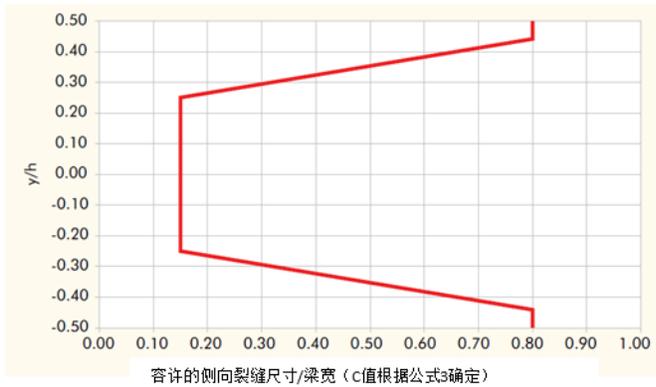


图 5.5 容许侧向裂缝深度

以上所有裂缝容许尺寸适用于胶合木结构中的受弯构件（梁）。当裂缝沿着木材顺纹方向出现在胶合木梁的上下表面时，裂缝对结构没有影响。对于受压构件（柱），裂缝对结构的承载力影响不大。然而当裂缝将构件完全劈裂时，构件的长细比会增加，从而影响受压构件的承载力。在这种情况下，受压构件的承载力应根据新的长细比进行折减。为确保构件的结构安全，应该由熟悉木结构设计的设计师进行详细评估。

需要注意的是，即便临界剪切区外相对较大的裂缝不对结构安全造成影响，但它们的存在表明周围的湿度与温度环境不大理想。因此，应找出造成这些裂缝的原因并予以纠正，以免裂缝扩展引起结构性危害。

5.2 开槽与钻孔

胶合梁由不同强度、刚度及树种的层板制造而成，内层采用较低等级而外层采用较高等级层板，最高等级的层板用于最外受拉层。因此，最外层层板上的钻孔、刻槽及开口等会对梁构件强度及适用性造成双重影响。其一，最外层板上的开槽与钻孔会减少横截面面积；其二，破坏了具有最大强度的外层木纤维。而且在开槽和钻孔区产生应力集中，应尽量避免如开槽、削尖或钻孔等超出设计或施工图纸范围的现场修改。万不得已需要修改时，必须在深入了解其对结构完整性的影响后才可以进行。

本节对施工现场的胶合木梁开槽、切削及钻孔提供参考。图中的梁为简支梁，梁的上表面为受压侧。所有的公式和开槽要求均基于同样的假定。对于连续梁和悬臂梁也可参考本节内容，但需要依据合理的工程判断进行谨慎仔细的分析。

5.2.1 开槽

受弯构件，尤其在受拉一侧应尽可能避免开槽。除了构件端部一些特殊情况外，在构件受拉侧不允许开槽。在受弯构件的受拉侧开槽会在槽口四周产生应力集中，减弱构件的强度，同时会减小抵抗弯矩和剪力的横截面面积。槽口会造成横纹拉应力，与水平剪力共同作用会造成从槽口内角处开始的劈裂。采用多角形槽口替代方角槽口可减小应力集中；用半径为 12mm（1/2 英寸）的圆弧形槽口替代方角槽口亦可减少应力集中。

对于梁端受拉侧的方角缺口，设计者可以考虑使用全螺纹自攻螺丝来防止劈裂（如图 5.6）。有多种设计方法确定自攻螺丝的尺寸。设计方法的选择和节点构造应由工程师决定。当使用自攻螺丝时，应根据生产商要求预钻自攻螺丝的引导孔。

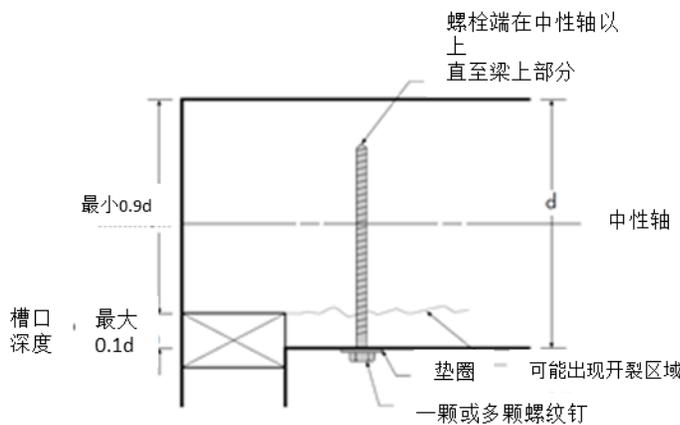


图 5.6 推荐使用的受拉侧槽口增强方式

当胶合木构件在支座受压处开槽时，受压侧槽口对梁强度影响稍小，分析公式如图 5.7。由于图 5.7 中构件的槽口出现在最大剪力和零弯矩的区域，因此以上的设计公式仅适用单跨简支梁。这也是为什么图 5.7 中的设计公式均为剪切方程式。当受压侧槽口区域存在较大弯矩时，梁的抗弯承载力应采用净截面和相应层板的设计应力进行验算。

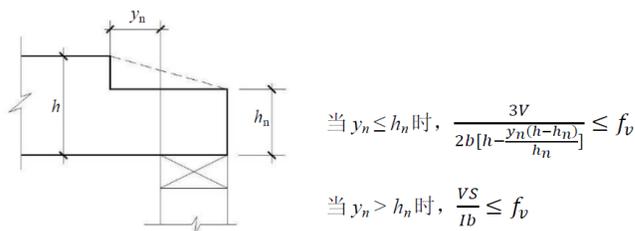


图 5.7 受弯构件端部受压边槽口剪切强度设计公式

当为了铺设管线，需要在胶合木顶部受压区开槽时，开槽位置的应力应小于设计弯曲应力的 50%。应采用净截面验算槽口处的弯曲和剪切强度。

现场开槽应精确切割，避免出现过度切割。在槽口内角位置预钻一个导向孔作为锯片停止切割的位置，可帮助形成弧形圆角并减少过度切割。

孔

水平孔：

类似开槽，在胶合木梁上开孔会切断木材纤维，减小净截面面积，并在开孔处产生应力集中，从而造成胶合木梁在开孔处承载力降低。因此要限制水平孔的尺寸及位置，确保胶合木梁的结构性能。图 5.8 为均布荷载作用下，简支梁上允许开孔的位置。开孔应位于非临界应力区（应力小于 50%设计弯曲应力和 50%设计剪切应力）。对于受力更加复杂的梁或者连续梁，可根据同样的原理确定开孔的位置。

除非由工程师或设计师专门设计，否则现场钻孔只可用于管线，不可用于承重五金件或其他连接件的连接点。管线包括电线、电缆、小管径喷淋管、光缆和其他小而轻的材料。

如图 5.8 所示，开孔应设置在胶合木梁的非临界应力区，开孔的间距应不小于 600mm（2 英尺）；当胶合木梁的弯曲应力大于设计抗弯强度的 50%时，在该区域开孔不允许出现在胶合木梁受拉侧的最外四层层板。孔直径不应超过层板厚度（40mm）和 1/10 梁高两者的较小者。当胶合木构件的截面尺寸大于结构设计所需的截面尺寸时，孔径也可通过工程分析适当增大。

除了开孔的位置外，还应校核剩余净截面的抗弯和抗剪强度。此外，确定孔洞的位置和尺寸时应考虑胶合木梁在正常使用情况下的变形，以确保梁的变形不会影响所支撑的设备和管线。

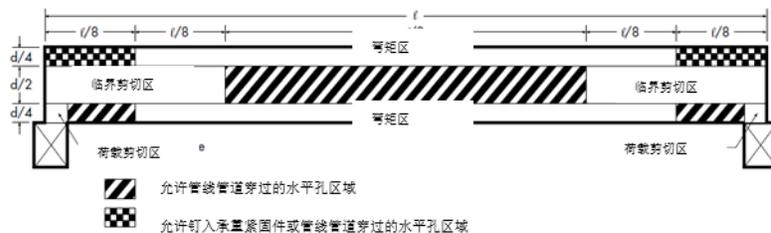


图 5.8 均布荷载作用下简支梁水平孔位置

垂直孔：

根据经验，垂直孔洞处梁的强度折减是孔径与梁宽之比的 1.5 倍。例如，当 150 mm（6 英寸）宽的梁有 25mm（1 英寸）的垂直孔洞时，梁的强度折减约为 $(1 \times 1.5)/6 = 1/4$ 。因此，当需要设置垂直孔洞时，其位置应位于梁的弯曲应力不大于设计抗弯强度 50% 的区

域。对于均布荷载作用的简支梁，这个区域为从梁端到 $1/8$ 梁高的区间。钻孔时应采用钻头引导装置，以保证钻头在经过木节或密度不均匀区域时不会偏转。

支承悬挂设备的孔洞：

对于悬挂在胶合木梁上的重量较大的设备和管线，应使这些设备和管线的荷载作用于胶合木构件的顶部，避免出现横纹拉应力。所有用于悬挂暖通设备或者水管等较大荷载的水平孔洞必须位于构件截面中性轴以上的受压区，孔洞处梁的弯曲应力小于 50% 弯曲设计强度（如图 5.8）。用于固定灯具等较轻荷载的紧固件应安装在构件受拉侧最外四层层板以外的区域。当胶合木梁有承受荷载的孔洞时，应在孔洞处验算胶合木梁的强度

现场开槽与开孔的保护：

通常情况下，生产商会在胶合木的端部涂保护涂层，以防止在运输和现场存储过程中胶合木端部吸收或释放水分。在施工现场对胶合木端部开槽会改变开槽区域吸收或释放水分的性能，引起干裂甚至槽口底部的局部劈裂。为了减少以上情况发生的可能性，胶合木端部开槽后应立刻进行防水密封处理。建议对其他切口及孔洞进行同样的处理。可用刷子、擦帚、滚筒或者喷枪进行局部防水密封处理。

5.3 运输与存放

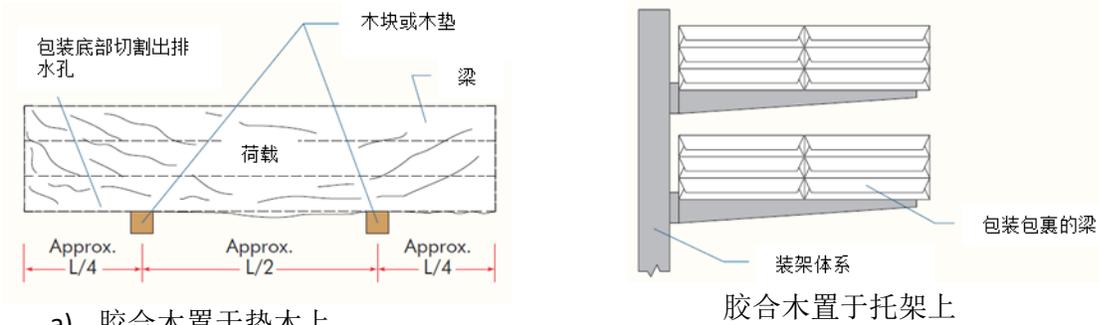
胶合木必须妥善保存并小心装卸，以确保其力学性能。胶合木出厂时通常会根据要求对胶合木进行防水密封处理、上漆、和包装。胶合木在装货、卸货以及运输过程中、在存放场地和施工现场都应得到合理保护以防破坏。

装货与卸货：

胶合木一般用叉车装卸。为了安全稳定地装卸，应将胶合木的侧面而非底部平放到叉车上。应注意当胶合木较长时，抬放其侧面可能会造成胶合木过度弯曲。为了控制胶合木的弯曲，可使用两台或两台以上的叉车共同搬运。当用吊车装卸胶合木时，应在吊索处的所有胶合木的边缘放置垫块，以保护胶合木的边沿。应采用织布吊索起吊胶合木。当胶合木较长时，为避免胶合木在起吊过程中出现破坏，应采用舒展杆起吊胶合木。

场地存放：

胶合木宜存放在平整、排水良好的场地。利用如图 5.9 所示的方木、垫木或托架将胶合木与地面隔离。若胶合木有包装，则应保留包装以防止潮水、灰尘、日晒和划伤。长期存放时，应在包装的底部划开口用于通风和排水（如图 5.9a）。良好的通风和排水能有效减少材料变潮、变色及腐蚀。



a) 胶合木置于垫木上

图 5.9 胶合木场地存放示意

图

运输:

胶合木用拖车或卡车运输时，应使用方木或垫木支撑。胶合木既可侧放也可平放，并用皮带捆扎以防移位。捆扎胶合木时应用软物或木块保护梁边缘。

施工现场的存放:

在施工现场存放胶合木时，应尽可能覆盖胶合木以避免湿气、尘土和日晒。应将胶合木存放于平整、排水良好的地面上，并用木块隔开。应对胶合木切割后的开口立刻进行密封处理。应允许胶合木在安装完毕后可以逐渐调整适应当地的温度与湿度环境。避免使胶合木构件暴露于湿度、温度急剧变化的环境中，这可能会造成胶合木开裂。

密封、刷漆与包装:

应对胶合木梁端进行密封处理以帮助阻止潮湿渗透和在端部裂缝。胶合木出厂后如有切割，则应对切割后的开口进行密封处理（如图 5.10）。

胶合木上下表面及侧面的密封处理能够帮助抵抗灰尘和水分渗透并控制裂缝开展。当木材需要着色或体现自身的色泽时，需指定可刷漆的渗透型密封剂。也可在胶合木上刷底漆以用于防潮和防污并为胶合木提供可刷漆的表面。

在运输和存放时通常将胶合木防水包装以防止潮湿、污尘和划伤。应采用不透明包装以避免阳光引起木材变色。可将胶合木单独或成捆包装。对胶合木有较高外观要求时，应直到安装时才去除包装，以减少直接暴露于施工工地的机会。安装时应彻底去除包装，以免因日晒出现不均匀的表面褪色。

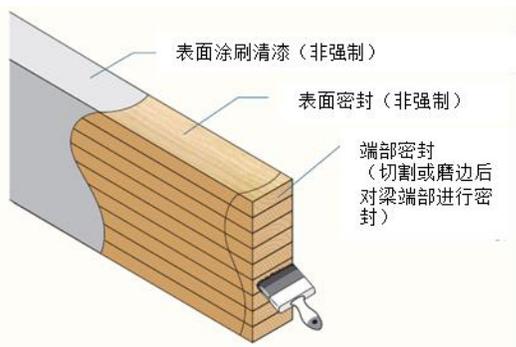


图 5.10 梁端密封处理示意图

5.4 胶合木防腐处理

5.4.1 防腐处理胶合木的一般使用要求

下列环境条件下使用的胶合木必须进行加压防腐处理：

- 1 浸入淡水、海水或咸水中；
- 2 埋入土壤、砌体或混凝土中；
- 3 长期暴露在室外，并与土壤、砌体或混凝土直接接触。

下列环境条件下使用的胶合木必须进行加压防腐处理，或者采用具有与加压防腐木材性能相当的天然耐久木材（例如北美黄柏）。

- 1 长期暴露在室外，但处于地面以上环境；
- 2 长期处于通风不良，且经常潮湿的室内环境；
- 3 处于易遭受虫害，特别是白蚁危害的环境中。

防腐木材的使用及分类应满足表 5.1-5.4 的规定（GB50828-2012）

表 5.1 木材及其制品使用分类

使用分类	使用条件及环境	主要生物败坏因子	典型胶合木用途
C1	在室内干燥环境中使用，且不接触土壤，避免气候和水分的影响	蛀虫	建筑内部构件
C2	在室内环境中使用，且不接触土壤，有时受潮湿和水分的影响，但避免气候的影响	蛀虫、白蚁、木腐菌	建筑内部构件
C3.1	在室外环境中使用，但不接触土壤，暴露在各种气候中，包括淋湿，但表面有油漆保护，避免直接暴露在雨水中	蛀虫、白蚁、木腐菌	建筑外部地面以上构件，受到屋檐等的保护

C3.2	在室外环境中使用，但不接触土壤，暴露在各种气候中，包括淋湿，表面无保护，但避免长期浸泡在水中	蛀虫、白蚁、木腐菌	建筑外部地面以上构件，没有受到屋檐等的保护，但避免长期浸泡在水中
C4.1	在室外环境中使用，暴露在各种气候中，且与地面接触或长期浸泡在淡水中	蛀虫、白蚁、木腐菌	建筑外部，与地面或淡水接触构件
C4.2	在室外环境中使用，暴露在各种气候中，且与地面接触或长期浸泡在淡水中。难于更换或关键结构部件	蛀虫、白蚁、木腐菌	建筑外部与地面或淡水接触构件，难于更换或关键结构部件
C5	长期浸泡在海水（咸水）中使用	海生钻孔动物	在海水（咸水）中使用部件

5.4.2 胶合木防腐处理要求

根据胶合木使用环境，防腐处理要求，树种和防腐剂种类，及后期处理（表面是否刷漆等）等条件，防腐处理可以在胶合后或者胶合前进行。一般情况下，对胶合木进行成品处理用油性防腐剂，其优点为不必在防腐处理后对木材进行重新干燥，不会造成木材尺寸变形，但后期可能不宜进行油漆，一般不适用于室内环境。另一种防腐处理方法是在胶合以前对木材进行加压防腐处理，多采用水性防腐剂，水性防腐剂处理后再对木材进行重新干燥再胶合，木材可能会尺寸变形，确保胶合质量。

表 5.2 树种和使用分类

树种	胶合前处理		胶合木成品处理		
	C1, C2, C3.1, C3.2	C4.1	C1, C2, C3.1, C3.2	C4.1, C4.2	C5
花旗松	✓	✓	✓	✓	✓
铁杉	✓	✓	✓	✓	✓
Hem-fir 铁-冷杉	✓	✓	✓	✓	✓

表 5.3 胶合木成品防腐处理防腐剂保留量要求(kg/m³)

防腐剂	使用分类						
	C1	C2	C3.1	C3.2	C4.1	C4.2	C5
克里苏油	-	-	-	-	160	160	400
8-羟基喹啉铜(Cu8)	0.32	0.32	0.32	0.32	-	-	-
环烷酸铜(CuN)	-	-	0.64	0.64	0.96	-	-

表 5.4 胶合木胶合前防腐处理要求 (kg/m³)

防腐剂	使用分类						
	C1	C2	C3.1	C3.2	C4.1	C4.2	C5
硼化合物	2.8	4.5	-	-	-	-	-
季铵铜 ACQ-2, ACQ-3, ACQ-4	4.0	4.0	4.0	4.0	6.4	-	-
铜唑 CuAz-1	3.3	3.3	3.3	3.3	6.5		
铜唑 CuAz-2, CuAz-3	1.7	1.7	1.7	1.7	3.3		
铜唑 CuAz-4	1.0	1.0	1.0	1.0	2.4		
铜铬砷 CCA-C	-	-	4.0	4.0	6.4		
氨溶砷酸铜锌 ACZA	-	-	4.0	4.0	6.4		
8-羟基喹啉铜(Cu8)	0.32	0.32	0.32	0.32	-	-	-
环烷酸铜(CuN)			0.64	0.64	0.64		
克里苏油					160	-	-

5.4.3 现场切割、安装和紧固件

连接胶合木的紧固件应进行防锈处理以抵抗高湿、防腐剂中的化学药品及其他环境如盐碱、污染等对紧固件的影响。通常油性防腐剂对紧固件没有影响，水性防腐剂可能会腐蚀紧固件。通常热浸镀锌连接件可用于各种环境，但一些腐蚀严重的环境下应采用更加防锈的材料，例如不锈钢。铜基溶液处理的木构件不应直接接触铝质金属件。

胶合木的制作、切割与钻孔应在防腐处理前完成。若在胶合木局部需要加工处理或者胶合木局部表面发生破损，则应对这些局部区域应进行防护处理。萘酸铜可用于胶合木暴露区域的再处理。局部处理应依据相关标准进行，如浸渍、涂刷、喷涂、浸泡或涂层。

5.4.4 参考文献

American Wood Preservation Association standards

Canadian Standards Association Standards, O80 Series-15: Wood Preservation, 2015

APA Engineered Wood, Preservative treatment of glue laminated timber, 2006

国标 GB50828-2012：防腐木材工程应用技术规范



www.canadawood.cn