

古建筑木构件的化学加固

蔡 润

中国的古代建筑经过几千年的长久的发展历史，在一定的自然环境和社会历史条件下，经过不断的继承与革新，形成了独特的传统。保存和保护古建筑，主要是保存古代劳动人民在建筑、工程和艺术方面的成就，作为今天的借鉴，向人民进行历史唯物主义的教育。保护这一祖国的文化财富，以便“古为今用”更好地为社会主义服务。

我国的古建筑结构多用木材，而最普通的是木构架结构，这种梁柱系统的木构架结构至迟在汉代就已成熟。以立柱和横梁组成构架；以数层重叠的梁架、每层缩短、逐级加高、各层梁头和脊柱上承檩、檩间密排并列椽，构成屋顶的骨架。古代木构架结构构件的结合主要用榫卯。我国木结构中使用斗拱在世界建筑中是很特殊的。

例如，距今已有 1100 年历史的唐代南禅寺大殿，就是应用这种结构方法的范例，历经千年的风雨仍完整地保留至今。五台山南禅寺大殿建于唐建中三年（公元 782），是国内现存最古的一座唐代木构建筑，是全国重点文物保护单位。大梁久经风雨，木构件劈裂折损严重，尤以两根四椽栿（即大梁）劈裂垂弯严重，达 11 厘米，修缮前两椽支撑 11 根木柱，岌岌可危。又如，浙江宁波保国寺也是全国重点文物保护单位，是江南沿海一带一座规模较大的宗教建筑。建于北宋大中祥符六年、即公元 1013 年，寺内大雄宝殿是现存最早的建筑。长时期以来，寺内建筑构件就遭受白蚁危害，大殿的柱、阑额等木构件被白蚁蛀蚀尤为严重，有的檐柱已完全被白蚁蛀空，只剩表皮，而阑额和由额的榫头也已朽烂。如何更好地保护这些朽烂严重的古建筑，是文物保护修缮中的新课题。按过去办法，对风化严重劈裂折损的大梁或虫蛀一空的木柱采用木料换新，使原有的木构件从材料上就有了很大变动，往往大修、梁柱落架，被替换的构件更多，失去了保存和保留原来古建筑的完整性。1974 ~ 1975 年，我们先后用高分子化学材料加固修缮这两处古建筑，较多地保存原有构件使原有的梁柱通过灌注了高分子材料而得到加强继续起着原构中的作用。有些构件如阑额和由额榫头已朽烂，通过两端用不饱和聚酯玻璃钢作榫，阑额和由额不必用新料更换，可以继续发挥作用，没有改变原貌。用化学办法加固古建筑构件，为古建筑修缮开辟了新的途径。

一、化学材料

1. 环氧树脂

环氧树脂黏合性能好,通常常用的为双酚 A 型环氧树脂,具有高度的黏合力。这是由于结构中含有脂肪族羟基、醚基及其中极为活泼的环氧基、羟基和醚基的极性,使得环氧树脂分子和相邻表面之间产生电磁吸力,因而黏结力特别强,可以黏合各种金属和非金属材料。

对于古建筑大梁劈裂加固,应考虑施用富有韧性和抗弯性能好的黏合材料。作为以双酚 A 型环氧树脂为主体的材料中,选用 501 号活性稀释剂(环氧丙烷丁基醚),不仅能增加流动性、降低黏度,能渗入木质内,而且还能参加环氧树脂的固化反映,提高黏合效果,能延长使用期,提高黏合后的韧性,改善抗弯强度。

2. 不饱和聚酯树脂

不饱和聚酯树脂是由不饱和多元酸(或酐)和饱和二元醇的缩聚物,溶于可聚合的烯类单体(一般用苯乙烯)中,制成黏稠状树脂液。树脂在固代前是一种线型结构的高聚物,经固代聚合可得到三向交联不溶、不熔的体形结构高聚物,它固化时不析出挥发物,且具有室温固代成型的特点。不饱和聚酯树脂对木材有一定的黏结力,它灌注到柱中,能与所接触的木料表面黏合成一体。不饱和聚酯树脂的抗压强度为 1200 ~ 1700 千克/厘米² 超过了木材本身的抗压强度,显示了不饱和聚酯树脂浇铸料用于木结构古建筑柱子的加固有着十分明显的优点。

表 1 所列为松木和用三种配方黏合松木试块,在 4 吨木材万能材料试验机测试的情况。

从表 1 测试结果来看,有些指标数值低于木材本身极限强度值,这可能是选取试块木材本身有强弱之故。用环氧树脂为主体的黏合剂黏结木材,从破坏效果看,均为木材本身开裂。从黏结剪切强度看,用 650 聚酰胺作固化剂比用多乙烯多胺作固化剂要好,这是由于聚酰胺既是环氧树酮的固化剂又是增韧剂,改善了环氧树脂黏合效果。用不饱和聚酯树脂作为黏合木材,从破坏效果看,在黏合面开裂,说明不饱和聚酯树脂并不是木材优良的黏合剂。这与不饱和聚树脂产品介绍是相符的,即适宜于灌注料和玻璃钢,能起到承压作用。在古建筑修缮中,用于糟朽木柱灌注和玻璃钢加强还是具有使用价值,但不适宜作木材黏合剂。

表 1 黏结测试

测试试块和黏结配方	抗弯强度/ (千克/厘米 ²)	抗弯强度/ (千克/厘米 ²)	抗弯强度/ (千克/厘米 ²)		破坏状况
		弦向	径向	弦向	
松木	601	73	82		
#6101 环氧树脂 100	720	49	55		木材开裂
#501 活性稀释剂 15					
多乙烯多胺 16					
#6101 环氧树脂 100	594	91	66		木材开裂
#501 活性稀释剂 15					
#650 聚酰胺 80					
#196 不饱和聚酯树脂 100	698	65	53		黏合面开裂
过氧化环己酮浆 4					
环烷酸钴苯乙烯液 1					

表 2 所列用不饱和聚酯树脂配合无碱玻璃布作成玻璃钢代替糟朽木材，在 100 吨万能材料试验机作抗弯强度的测试情况。

表 2 模拟糟朽木材贴敷聚酯玻璃钢测试

名称	抗弯强度/（千克/厘米 ² ）	破坏状况
1000 毫米×53 毫米×80 毫米	439	
糟朽深占 1/3，糟朽长占 1/3，贴敷玻璃钢	531	木材开裂，少量黏合面开裂
糟朽深占 2/3，糟朽长占 1/3，贴敷玻璃钢	409	木材开裂
糟朽深占 1/3，两段糟朽长占 2/5，贴敷玻璃钢	512	木材开裂
糟朽深占 1/3，糟朽长占 1/3，贴敷玻璃钢	488	木材开裂

- 注：1. 配方
- 196 不饱和聚酯树脂：100
 - 过氧化环己酮浆：4
 - 环烷酸钴苯乙烯液：1
2. 0.2 毫米无碱无蜡玻璃布
3. 各贴敷聚酯玻璃钢后总体尺寸与对照原本尺寸一致

从表 2 测试来看，用不饱和聚酯树脂玻璃钢代替糟朽木材作加强、抗弯强度大多数是得到提高，为现场施工提供了一定的理论依据。

二、施 工 实 例

（一）南禅寺

1. 损坏状况

南禅寺已有 1100 余年历史，梁架向左走闪 20～26 厘米，檐柱向前倾斜 30～35 厘米。各种木构件有的风化，有的折断，脱榫劈裂现象甚为严重。西山四根丁栿等折断，明间两根四椽栿是殿顶负荷的主要承重构件，长 11.7 米，两栿均劈裂垂弯严重，以檐外华拱头测量，西栿垂弯 11 厘米，垂弯已接近梁的 1%，现状已不能继续维持，修缮前两栿用 11 根木柱支撑。

对于折断的丁栿，四椽栿与缴背组合成拼合梁用黏结配方；大于 4 毫米宽的裂缝用灌缝配方；小于 4 毫米宽的裂缝用注射配方，以兽用注射器注入缝内。

室内温度维持 15～25℃，室内温度低，则用炉火提高室内温度，使环氧树脂固代反应趋于完全，提高强度。

2. 施工工艺

1) 丁栿折断处，先用钢刷刷净浮尘，刷去木材风化层，用压缩空气吹净。用表 3 黏结配方准确称量，搅拌均匀，用刷子均匀涂于黏合面上，再让两个黏合面吻合上，并用两道铁箍束紧，提高黏合效果。

表 3 不同黏结剂配方

名称 类别	#6101 环氧树脂	#501 活性稀释剂	多乙烯多胺
黏 接	100	10	14
灌 缝	100	15	15
注 射	100	20	16

2) 两根四椽栿（大梁）倒放平地上（即垂弯处让其向上），再逐渐加大青石反压，逐渐加到 12 块大青石（计 30，375 公斤），基本上压平。稳定一昼夜后，搬走大青石。将两根四椽栿相对侧放。一端用麻绳束紧，中心垂弯处用硬木墩顶住；另一端绑一导链，慢慢收紧导链，稳定一昼夜。无论青石反压或导链收紧，均有木纹微响，西栿完全绞直，东栿只矫正 6 厘米，尚有 5 厘米未完全绞直，看来垂弯已完全固化。

3) 已矫正的椽栿用压缩空气吹尽浮尘土, 侧放架上, 让裂缝向上。按表 3 黏结配方, 调入土粉作环氧树脂腻子, 将裂缝底部赋平。

4) 按表 3 灌缝配方的环氧树脂浆液倒入裂缝内, 一般 300 克的配方总量倒入缝内大约 1.5 米长, 分段倒入环氧树脂浆液。为防止环氧树脂爆聚, 每隔三四小时倒满一层浆液。在灌缝时如底部有漏浆, 可用湿软的肥皂腻子, 能很好地止浆。

5) 对于小于 4 毫米宽的裂缝, 用兽用注射器, 注入表 3 注射配方。

6) 待裂缝灌满, 让其在 15 ~ 25℃ 室内环境温度中完全固化。

7) 待裂缝加固完毕, 将四椽栿与缴背用表 3 黏结配方, 黏合成一体, 组成拼合梁, 同时用铁箍束紧 (西椽两道, 东椽四道), 提高黏合效果, 箍断面 7 厘米 × 0.5 厘米。这样做形制和结构上原貌未变, 但在实效上, 由于在化学上和工程上互为补强, 加强了四椽栿的负荷强度。

以上经化学加固的木构件归安复原后, 各种构件均承受着它应承载的负荷, 没有发现任何问题, 特别是两根四椽栿, 在修缮前所支撑的 11 根木柱已全部取掉。从 1974 年 11 月安装完后, 直到如今没有发生任何变化。

(二) 保国寺

1. 损坏状况

保国寺大殿的木结构多年来受到白蚁不同程度的危害, 其中东北角柱、相邻的两檐柱及其依附的阑额、由额, 已被白蚁蛀蚀朽烂。除东北角柱和后檐柱必须换新外, 东山北平柱和一根阑额因有较好的表层, 采用化学方法灌注不饱和和聚酯树脂, 对糟朽阑额用不饱和和聚酯树脂玻璃钢作榫头, 并用玻璃钢作箍束紧。

东山北平柱, 柱根直径 50 厘米, 柱头直径 40 厘米, 柱高 390 厘米。柱身内部从上到下被黑胸散白蚁蛀蚀中空, 其蛀蚀程度以柱高 0 ~ 90 厘米和 300 ~ 390 厘米两段为最严重, 其中空范围直径直径 10 ~ 20 厘米, 柱的中部一段较轻微, 中空的范围最小直径 5 厘米。蛀身周围表面也是多处剥蚀, 在柱与阑额、由额交接的部位有几处朽烂了的洞眼。

后檐东次间阑额, 通长 (包括榫头) 282 厘米, 断面尺寸为 35 厘米 × 20 厘米, 两端榫头全被白蚁蛀蚀朽烂, 其一端还延伸到阑额内约 70 厘米, 直径 5 ~ 10 厘米。

2. 配方

(1) 柱子灌注料配方

#307-2 不饱和聚酯树脂

100 份

过氧化环己酮浆（固化剂）	4 份
萘酸钴苯乙烯液（促进剂）	2 ~ 3 份
石英粉（200 目）	100 ~ 120 份

(2) 聚酯玻璃钢树脂液配方

#307—2 不饱和聚酯树脂	100 份
过氧化环己酮浆	4 份
萘酸钴苯乙烯液	1 ~ 2 份
厚 0.2 ~ 0.4 毫米无碱、无蜡玻璃布	

(3) 黏合配方

#6101 环氧树脂	100 份
二甲苯	10 份
二乙烯三胺	10 份

(4) 腻子配方

环氧树脂腻子系用黏合配方环氧树脂中加入干燥石英粉调和而成。
聚酯腻子系用不饱和聚酯树脂浆液配方中加入大量的干燥石英粉调和而成。

(5) 白蚁毒剂

氯丹油剂，工业品为暗褐色黏稠液体，有针叶松树味。氯丹灭白蚁残效期高，对人体毒害小。用煤油稀释配成 2% 浓度的氯丹油剂。

3. 施工工艺

(1) 木柱灌注

- 1) 在柱子的东北面从上到下用刀锯锯开宽 13 厘米的槽口，保留其木条待下次灌注时黏合。从上到下分为九段，每段长度在 50 厘米左右。
- 2) 将木柱内部所有朽烂木屑用木工刮刀剥挖干净，直到柱身周围见到好木为止，再用皮老虎吹风，使木柱内部不留任何木屑等脏物。
- 3) 用环氧树脂腻子将木柱周围上下的漏洞和裂缝处腻子住，对于大的孔眼，辅以木头配合环氧树脂腻子封闭严实。
- 4) 用环氧树脂及其腻子将槽口木条归安黏合，在底部柱础洒上白蚁毒剂，并分段从槽口灌注入配好的不饱和聚酯树脂料（见柱子灌注料配方），分段灌注，每段高度不超过 1 米。每次灌注的树脂料为 3 ~ 4 千克为宜（不包括填料量），每次灌注间隔时间在半小时以上，直到灌满整个木柱。

5) 将木柱表面被白蚁蛀蚀过的朽烂部分剥挖干净, 根据残损的范围、形状及深度, 补配以木条或木块, 并用环氧树脂黏结, 以聚酯树脂腻子填实大小缝隙。

6) 以锉刀等工具将黏结固化后的腻子及补配木块打磨平整。

7) 随旧色刷掺有红土的桐油。

(2) 阑额樨头的制作及黏结

1) 将阑额的朽烂樨头及其延伸部分去除, 顺着阑额的上下面中心两端各锯开宽 10 厘米, 长 70 厘米的卯口 (有一端开卯的位置及长度恰好是被白蚁蛀蚀的部分), 并在有卯口的长度范围内, 将阑额的断面四周各去除 1 厘米。

2) 将 250 厘米 × 18 厘米 × 8 厘米和 250 厘米 × 13 厘米 × 8 厘米两根红抄木, 用环氧树脂黏结成为一根 250 厘米 × 31 厘米 × 8 厘米的方木 (因工地无大木料, 只能拼合而成)。

3) 用无碱无蜡玻璃布巾敷方木上, 刷涂不饱和聚酯树脂浆液, 刷涂浆液要薄而匀, 玻璃布能被树脂液浸润为宜。浆液太多要流挂, 浆液太少不能润湿玻璃布。在刷涂过程中, 随时用刷子赶走气泡 (气泡的存在, 会带来固化后玻璃钢强度的下降), 以手糊法缠绕制成两根 81 厘米 × 33 厘米 × 10 厘米玻璃钢外壳新樨头。

4) 将硬固后的玻璃钢新樨头与开好卯口的阑额, 经进一步加工而达到交接吻合之后, 再以环氧树脂灌注其缝隙, 同时以环氧树脂腻子腻好。

5) 阑额与新樨头黏结部分, 用聚酯树脂和玻璃布缠绕约 1 厘米厚, 直至与阑额断面达到完全吻合一致为止。这样就做成了一道宽 60 厘米、厚 1 厘米的玻璃钢箍, 利用聚酯树脂的收缩性转变成紧箍的作用。

6) 最后几层玻璃布使用的聚酯树脂中加入 1% 的广红土和 0.6%~0.7% 的黑烟子, 随旧色断白。

7) 将阑额表皮上的洞眼、大的缝隙和严重缺角的部分, 用聚酯树脂腻子补齐抹平, 最后以带色的聚酯胶液涂刷断白。

8) 在木柱卯口内刷上白蚁毒剂, 再安上阑额樨头。

三、结 论

1) 本文着重介绍了用环氧树脂和不饱和聚酯树脂分别作为黏合材料和木柱灌注料以及玻璃钢樨头用于古建筑修缮中, 取得了良好的效果, 特别是在施工现场, 如南禅寺和保国寺的修缮中, 至今仍未发现任何变化。用化学方法与工程修缮相结合, 是古建筑修缮一次新工艺。

2) 作为大梁劈裂垂弯加固, 配方还可以改进, 选用更大增韧效果的聚硫橡胶和聚

酰胺, 改进现有配方, 能提高抗弯强度, 是今后可以研究改进的一项工作。

3) 环氧树脂是良好的木材黏合剂, 但价格较贵, 酚醛树脂也是良好的木材黏合剂, 价格便宜 (成本只及环氧树脂的 $1/4 \sim 1/6$)。今后也应研究用酚醛树脂加固木构件。

4) 本文只是介绍了对重要木构件用化学保护的方法, 此外在古建筑中, 尚有不少构件因长期裸露, 遭受自然因素的破坏, 不少构件严重风化。对于已风化的木构件如何用化学方法去保护, 也有待进一步研究解决。

(原刊于《文物保护技术》辑刊 1981 年第一辑第 54 ~ 64 页)