



CECS xxx-xxxx

中国工程建设标准化协会标准

纤维增强复合材料加固原木结构技术规程
Technical Standard for Strengthening Timber
Structures with Fiber Reinforced Polymer
Materials

XX 出版社

前言

根据中国工程建设标准化协会《关于印发〈2022年第一批协会标准制订、修订计划〉的通知》（建标协字[2022]013号）的要求，标准编制组经广泛调查研究，认真总结实践经验，参考国内外有关先进标准，并在广泛征求意见的基础上，制定了本规程。

本规程的主要技术内容包括：总则、术语和符号、材料、设计、施工、检验与验收以及附录等。本规程是在总结近年来国内各高校和科研机构的研究成果及各设计、施工单位采用纤维增强复合材料进行结构加固的实践经验，参考国内外大量相关资料，并进行了大量试算和调研的基础上研制的。

本标准由中国工程建设标准化协会建筑物鉴定与加固专业委员会归口管理，东南大学负责具体技术内容的解释。执行过程中如有意见或建议，请寄送至东南大学（地址：江苏省南京市玄武区四牌楼2号东南大学建筑学院；邮编：210096）。

主编单位：东南大学

上海市建筑科学研究院（集团）有限公司

参编单位：江苏东南特种技术工程有限公司

四川省建筑科学研究院

江苏东南建筑工程结构设计事务所有限公司

中建一局华江建设有限公司

上海悍马建筑科技有限公司

北京交通大学

西安建筑科技大学

陕西省建筑科学研究院有限公司

故宫博物院

西南交通大学

南京海拓复合材料有限责任公司

北京市文物建筑保护设计所

南京市房屋安全服务中心

扬州大学

目次

1 总则.....	1
2 术语和符号.....	2
2.1 术语.....	2
2.2 符号.....	3
3 材料.....	7
3.1 一般规定.....	7
3.2 纤维布.....	8
3.3 纤维板.....	8
3.4 纤维筋.....	9
3.5 胶黏剂.....	10
4 设计.....	12
4.1 一般规定.....	12
4.2 抗弯加固设计.....	13
4.3 抗剪加固设计.....	16
4.4 抗压加固设计.....	17
4.5 榫卯节点加固设计.....	20
4.6 构造要求.....	22
5 施工.....	24
5.1 一般规定.....	24
5.2 粘贴纤维布（板）施工.....	25
5.3 内嵌纤维板（筋）施工.....	29
6 检验与验收.....	32
6.1 一般规定.....	32
6.2 纤维材料检验与验收.....	32
6.3 胶层检验及验收.....	33
6.4 工程验收.....	34
附录 A 纤维布（板）配套胶黏剂与木材的正拉粘结强度的测定方法.....	35
附录 B 纤维布（板、筋）加固原木结构施工质量现场检验方法.....	39

用词说明.....	43
引用标准名录.....	44
条文说明.....	45

Contents

1 General provisions	1
2 Terms and symbols.....	2
2.1 Terms.....	2
2.2 Symbols.....	3
3 Materials	7
3.1 General requirements	7
3.2 Fiber sheets	8
3.3 Fiber plates.....	8
3.4 Fiber rods	9
3.5 Adhesives	10
4 Design	12
4.1 General requirements	12
4.2 Design of flexural strengthening.....	13
4.3 Design of shear strengthening.....	16
4.4 Design of compressive strengthening	17
4.5 Design of mortise-tenon joints strengthening.....	20
4.6 Details	22
5 Construction.....	24
5.1 General requirements	24
5.2 Externally bonded fiber reinforced polymer sheets or plates	25
5.3 Near-surface mounted fiber reinforced polymer plates or rods	29
6 Inspection and acceptance.....	32
6.1 General requirements	32
6.2 Inspection and acceptance of fiber reinforced polymer materials	32
6.3 Inspection and acceptance of adhesive layers.....	33
6.4 Inspection and acceptance of engineering	34
Appendix A In-situ inspection method of bonding quality for fiber reinforced polymer sheets or plates.....	35

Appendix B In-situ inspection method of construction quality for strengthening of timber structures with bonded fiber reinforced polymer sheets, plates or rods.	39
Explanation of wording.....	43
List of quoted standards.....	43
Explanation of provisions	45

1 总则

- 1.0.1** 为实现纤维增强复合材料加固原木结构过程中的安全、高效、经济合理，并使纤维增强复合材料加固原木结构的设计、施工和验收有据可依，特制定本规程。
- 1.0.2** 本规程主要适用于原木结构建筑、塔楼、桥梁及一般构筑物的设计、施工和验收。
- 1.0.3** 采用纤维增强复合材料加固原木结构前，应按有关标准和规范，对原木结构的性能进行检测鉴定。
- 1.0.4** 采用纤维增强复合材料加固原木结构时，除应遵守本规程外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 纤维增强复合材料 fiber reinforced polymer composites (简称 FRP)

指采用连续纤维或纤维织物为增强相，聚合物胶黏剂为基体相，两相材料通过复合工艺组合而成的一种聚合物基复合材料，本规程中未作说明之处，均指单向纤维布（板、筋）与胶黏剂组成的复合材料。

2.1.2 原木结构 log timber structures

承重构件主要采用原木制作的建筑结构。

2.1.3 碳纤维布 carbon fiber sheets

连续碳纤维单向或多向排列、未经树脂胶黏剂浸渍固化的布状制品。

2.1.4 玻璃纤维布 glass fiber sheets

连续高性能玻璃纤维单向或多向排列、未经树脂胶黏剂浸渍固化的布状制品。

2.1.5 芳纶纤维布 aramid fiber sheets

连续芳纶纤维单向或多向排列、未经树脂胶黏剂浸渍固化的布状制品。

2.1.6 混杂纤维布 hybrid fiber sheets

两种或两种以上的纤维材料经一定的工艺配比混合，未经树脂胶黏剂胶合而成的布状制品。

2.1.7 碳纤维板 carbon fiber plates

连续碳纤维单向或多向排列，并经树脂胶黏剂浸渍固化的板状制品。

2.1.8 玻璃纤维板 glass fiber plates

连续玻璃纤维单向或多向排列、并经树脂胶黏剂浸渍固化的板状制品。

2.1.9 芳纶纤维板 aramid fiber plates

连续芳纶纤维单向或多向排列、并经树脂胶黏剂浸渍固化的板状制品。

2.1.10 碳纤维筋 carbon fiber rods

连续碳纤维单向或多向排列，并按特定的工艺经树脂胶黏剂浸渍固化的筋状制品，主要生产工艺包括编制型、绞线型和拉挤型。

2.1.11 玻璃纤维筋 glass fiber rods

连续高性能玻璃纤维单向或多向排列，并按特定的工艺经树脂胶黏剂浸渍固化的筋状制品，主要生产工艺包括编制型、绞线型和拉挤型。

2.1.12 芳纶纤维筋 aramid fiber rods

连续芳纶纤维单向或多向排列，并按特定的工艺经树脂胶黏剂浸渍固化的筋状制品，主要生产工艺包括编制型、绞线型和拉挤型。

2.1.13 底胶 primer

用于被加固原木结构构件表面基底处理的树脂胶。

2.1.14 找平胶 putty filler

用于对加固原木结构构件表面进行找平处理的树脂胶。

2.1.15 粘贴胶 adhesives

用于粘贴纤维布（板）的树脂胶。

2.1.16 重要构件 important structural member

其自身失效将影响或危及承重结构体系整体工作的承重构件。

2.1.17 一般构件 general structural member

其为孤立构件，自身失效不影响承重结构体系整体工作的承重构件。

2.2 符号

2.2.1 材料性能参数

E_t ——木材的顺纹弹性模量；

E_f ——纤维布（板、筋）的弹性模量；

f_{cu} ——木材顺纹极限抗压强度；

f_{tu} ——木材顺纹极限抗拉强度；

f_m ——木材抗弯强度；

f_c ——木材顺纹抗压强度；

f_{wc} ——约束木材的极限抗压强度；

f_{w0} ——无约束木材的极限抗压强度；

$f_{v,n}$ ——加固木梁的抗剪强度；

f_N ——木柱的抗压强度设计值；

f_{θ} ——纤维布的极限抗拉强度；

E'_f ——纤维材料的抗压弹性模量；

ε_f ——纤维材料的应变；
 ε'_f ——纤维材料的抗压应变；
 ε_{cy} ——木材抗压屈服应变；
 ε_{tu} ——木材抗拉极限应变（纤维布充分利用截面处的拉应变）；
 ε_{cf} ——纤维布允许拉应变；
 τ_f ——纤维布（板、筋）木材表面粘结强度设计值。

2.2.2 作用效应及承载力

F ——正拉粘结强度；
 F_f ——纤维材料提供的拉力；
 F_t ——木材截面抗拉区拉力；
 F_c ——木材截面抗压区拉力；
 F_{cu} ——木材截面塑性抗压区压力；
 F_{cy} ——木材截面弹性抗压区压力；
 M ——木材截面（节点）抗弯承载力设计值；
 N ——木柱轴心抗压承载力设计值；
 N_w ——木材承受的压力；
 N_f ——纤维材料承受的压力；
 P ——正拉粘结强度试验中的试样破坏荷载值；
 V ——木梁斜截面加固后抗剪承载力设计值；
 σ_f ——纤维材料的应力；
 $\sigma_{tu,f}$ ——纤维布受拉极限应力；
 $\sigma_{cu,t}$ ——木材极限受压应力；

2.2.3 几何参数

A ——木柱截面面积；
 A_w ——轴心抗压木柱木材截面面积；
 A_f ——纤维材料的截面面积；
 b ——矩形截面宽度；
 b_n ——考虑纤维贡献的等效宽度；
 b_f ——纤维材料沿木材矩形截面短边的长度；

d ——木槽的截面高度；
 h ——矩形截面高度；
 h_t ——截面抗拉区高度；
 h_{tu} ——临界受拉区高度；
 $h_{f,e}$ ——有效粘结高度；
 h_f ——纤维材料沿木材矩形截面长边的长度；
 i ——木柱截面回转半径；
 I_n ——考虑纤维材料贡献的等效全截面惯性矩；
 l_0 ——木柱长度；
 L_c ——纤维布有效粘结长度；
 S ——钢标准块的横截面积；
 S_n ——考虑纤维材料贡献的等效面积矩；
 t_0 ——环向纤维布的名义厚度；
 t_1 ——单层环向纤维布的名义厚度；
 t ——单层纤维材料的厚度；
 w ——木槽的截面宽度；

2.2.4 计算系数

α ——考虑不同纤维材料和材料层数的影响程度经验系数；
 α_s ——考虑三维实体计算的修正系数；
 α_k ——考虑尺寸效应和缺陷效应的修正系数；
 α' ——纤维片材厚度折减系数；
 β_f ——考虑纤维层数影响程度的修正系数；
 λ_1 ——考虑纤维材料不能充分发挥作用的折减系数；
 $\lambda_{f,t}$ ——纤维材料与木材的弹性模量之比；
 φ ——加固后的木柱稳定系数；
 φ_t ——考虑受拉区作用力修正系数；
 ω_c ——考虑受压区作用力修正系数；

ϕ ——考虑纤维影响程度的经验系数；

K_{Q1} ——天然缺陷影响系数；

K_{Q2} ——干燥缺陷影响系数；

K_{Q3} ——长期荷载影响系数；

K_{Q4} ——尺寸影响系数；

m ——木梁抗压屈服应变和抗拉极限应变之比；

k ——纤维板（筋）材料的弹性模量与木材的弹性模量之比；

n ——纤维布（板）粘贴层数；

3 材料

3.1 一般规定

3.1.1 纤维材料包括碳纤维、玻璃纤维、芳纶纤维。其品种和质量应符合以下规定：

1 承重结构加固用的碳纤维，应选用单向聚丙烯腈基（PAN 基）12k 或者 12k 以下的小丝束碳纤维（对一般结构，若有适配的结构胶，尚允许使用不大于 15k 的聚丙烯腈基碳纤维），严禁使用大丝束纤维。

2 承重结构加固用的玻璃纤维，应选用高强度玻璃纤维、含碱量小于 0.8% 的无碱玻璃纤维或耐碱玻璃纤维，通常称为 S 型、E 型和 AR 型玻璃纤维，不得使用中碱玻璃纤维及高碱玻璃纤维。

3 承重结构加固用的芳纶纤维，应选用饱和吸水率不大于 4.5% 的对位芳香族聚酰胺长丝纤维，且经人工气候老化 5000h 后，1000MPa 应力作用下的蠕变值不应大于 0.15mm。

3.1.2 不同纤维增强复合材料各有其物理力学性能特点，可分别适用于不同类型的结构构件加固。碳纤维布宜用于梁、柱等主要受力构件的加固；当计算所需纤维布层数较多时，宜使用碳纤维板；清水面的木构件宜采用碳纤维筋或碳纤维板内嵌加固；芳纶纤维宜用于提高延性的加固；玻璃纤维宜用于次要受力构件的抗弯、抗剪加固。

3.1.3 加固修补用材料应具有产品合格证和产品性能检测报告，其主要力学性能指标应符合本章的相关要求，树脂类胶黏剂还应提供耐久性指标及施工和使用环境要求。

3.1.4 纤维布（板、筋）应与性能匹配的胶黏剂共同使用，并应有所使用的纤维布（板、筋）与胶黏剂性能相匹配的应用试验报告，供建设方和设计单位核查。

3.1.5 原木构件在加固前，如果木构件存在宽度不大于 3mm 的裂缝，应先采用木屑和结构胶混合的木屑胶泥修补裂缝；如果木构件存在宽度大于 3mm 的裂缝，应先采用木条和结构胶修补裂缝。

3.2 纤维布

3.2.1 纤维布的抗拉强度应按纤维布的截面积 A_f 计算，截面积取纤维布的名义厚度 t_f ，乘以宽度 w_f ，纤维布的名义厚度为纤维布的单位面积质量除以纤维密度。

3.2.2 纤维布的主要力学性能指标应符合表 3.2.2 的规定。

表 3.2.2 纤维布的主要力学性能指标

纤维布类型及等级		抗拉强度标准值 (MPa)	弹性模量 (MPa)	延伸率 (%)
碳纤维布	高强度 I 级	≥ 3500	$\geq 2.3 \times 10^5$	≥ 1.6
碳纤维布	高强度 II 级	≥ 3000	$\geq 2.1 \times 10^5$	≥ 1.4
玻璃纤维布		≥ 2000	$\geq 8.0 \times 10^4$	≥ 2.0
芳纶纤维布		≥ 2000	$\geq 1.1 \times 10^5$	≥ 2.0

3.2.3 纤维布的抗拉强度设计值及拉应变设计值应按表 3.2.3 采用。

表 3.2.3 纤维布的抗拉强度设计值及拉应变设计值

纤维布类型及等级		抗拉强度设计值 (MPa)	拉应变设计值
碳纤维布	高强度 I 级	1600	0.007
碳纤维布	高强度 II 级	1300	0.006
玻璃纤维布		600	0.008
芳纶纤维布		950	0.0085

3.2.4 承重结构采用纤维织物复合材料进行现场加固时，其织物的单位面积质量 m 应符合表 3.2.4 的规定。

表 3.2.4 不同品种纤维复合材料单位面积质量限值

纤维布类型	单位面积质量 m 限值 (g/m^2)
单层碳纤维布	$150 < m < 300$
单层玻璃纤维布	$300 < m < 450$
单层芳纶纤维布	$250 < m < 450$

3.3 纤维板

3.3.1 纤维板的抗拉强度应按板的截面（含胶黏剂）面积计算，截面面积（含胶黏剂）取实测厚度乘以宽度。

3.3.2 纤维板的厚度不宜大于 2.0mm，宽度不宜大于 200mm，纤维体积含量不宜

小于 60%。

3.3.3 纤维板的主要力学性能指标应符合表 3.3.3 的规定。

表 3.3.3 纤维板的主要力学性能指标

纤维板类型及等级		抗拉强度标准值 (MPa)	弹性模量 (MPa)	延伸率 (%)
碳纤维板	高强度 I 级	≥ 2400	$\geq 1.6 \times 10^5$	≥ 1.6
碳纤维板	高强度 II 级	≥ 2000	$\geq 1.4 \times 10^5$	≥ 1.5
玻璃纤维板		≥ 800	$\geq 4.0 \times 10^4$	≥ 2.0
芳纶纤维板		≥ 1200	$\geq 7.0 \times 10^4$	≥ 2.5

3.3.4 纤维板的抗拉强度设计值及拉应变设计值应按表 3.3.4 采用。

表 3.3.4 纤维板的抗拉强度设计值及拉应变设计值

纤维板类型及等级		抗拉强度设计值 (MPa)	拉应变设计值
碳纤维板	高强度 I 级	1050	0.007
碳纤维板	高强度 II 级	950	0.006
玻璃纤维板		320	0.008
芳纶纤维板		550	0.009

3.4 纤维筋

3.4.1 纤维筋的质量应符合国家现行有关产品标准的规定，其纤维铺向及铺层厚度应根据使用要求进行设计。

3.4.2 纤维筋的抗拉强度应按筋材的截面面积（含胶黏剂）计算，截面面积应按名义直径计算。

3.4.3 纤维筋的纤维体积含量不应小于 60%，主要力学性能指标应满足表 3.4.3 的规定。

表 3.4.3 纤维筋的主要力学性能指标

类型	抗拉强度标准值 (MPa)		弹性模量 (MPa)	延伸率 (%)
碳纤维筋	≥ 1800		$\geq 1.4 \times 10^5$	≥ 1.5
玻璃纤维筋	$d \leq 10\text{mm}$	≥ 700	$\geq 4 \times 10^4$	≥ 1.8
	$10\text{mm} < d \leq 22\text{mm}$	≥ 600		≥ 1.5
	$d > 22\text{mm}$	≥ 500		≥ 1.3
芳纶纤维筋	≥ 1300		$\geq 6.5 \times 10^4$	≥ 2.0

3.5 胶黏剂

3.5.1 粘贴纤维布（板、筋）对原木结构进行加固和修复时宜采用配套的底胶、找平胶和粘贴胶。

3.5.2 用于粘贴纤维布和纤维板等片材加固的粘贴树脂材料应采用环氧树脂，并与相应的片材配套使用。纤维筋的基体树脂可选用环氧树脂、乙烯基酯树脂和不饱和聚酯树脂。

采用一般环氧树脂为基体制配的胶黏剂，其热变形温度应大于 50℃，其长期正常使用环境温度，不宜高于 50℃；但如在其表面加隔热、防火处理或采用特种耐高温树脂作为基体胶结材料时，则可依据检测数据，由设计人员对使用环境温度作出调整，但不应超过 60℃。

3.5.3 底胶应具有粘度低、渗透性强、与木材粘结好等特点，其主要力学性能应满足表 3.5.3 的要求。

表 3.5.3 底胶的主要力学性能指标

性能	指标要求
混合后初粘度（23℃时）	$\leq 2000\text{MPa} \cdot \text{S}$
拉伸强度	$\geq 30\text{MPa}$
与木材的正拉粘结强度	$\geq 2.5\text{MPa}$ 且为木材内聚破坏

3.5.4 找平胶应具有粘度高、塑变性强与木材粘结好等特点。其主要力学性能应满足表 3.5.4 的要求。

表 3.5.4 找平胶的主要力学性能指标

性能	指标要求
拉伸强度	$\geq 30\text{MPa}$
与木材的正拉粘结强度	$\geq 2.5\text{MPa}$ 且为木材内聚破坏

3.5.5 粘贴胶应具有粘度低、强度高、纤维浸润性好、与木材粘结好等特点。其主要力学性能应满足表 3.5.5 的要求。

表 3.5.5 纤维布（板、筋）粘贴胶的主要力学性能指标

性能	指标要求
混合后初粘度（23℃时）	$4000\text{MPa} \cdot \text{S} \sim 10\ 000\text{MPa} \cdot \text{S}$

钢-钢拉伸剪切强度	≥10MPa
拉伸强度	≥40MPa
弯曲强度	≥50MPa
抗压强度	≥70MPa
弹性模量	≥2500MPa
伸长率	≥1.8%
与木材的正拉粘结强度	≥2.5MPa 且为木材内聚破坏

3.5.6 粘贴胶的热变形温度应按现行国家标准《塑料弯曲负载热变形温度试验方法》GB/T 1634 测定，热变形温度应大于 50℃。

3.5.7 胶黏剂应使用纤维布（板、筋）制作的纤塑片进行耐久性试验，应按照现行国家标准《机械工业产品用塑料、涂料、橡胶材料人工气候老化试验方法》GB/T 14522 规定的环境条件进行不低于 4000h 的加速老化后，进行抗拉强度试验，抗拉强度降低不应大于 10%。

3.5.8 胶黏剂应按现行国家标准《工程结构加固材料安全性鉴定技术规范》GB 50728 的规定进行胶黏剂的湿热老化性能检验，其老化后的拉伸剪切强度降低不应大于 10%。

3.5.9 使用粘贴纤维布（板、筋）加固后的构件应定期检测其工作状态和构件完损状况，检测的时间间隔可由设计单位确定，但第一次检测间隔时间室内不应迟于 10 年，室外不应迟于 5 年。经检测鉴定认为工作正常的，可继续使用。

4 设计

4.1 一般规定

4.1.1 采用胶黏剂将纤维布（板、筋）粘贴在木材构件表面，纤维布（板、筋）应设计成仅承抗拉应力作用。对于抗弯构件的正截面加固，纤维材料应粘贴在抗拉区，且纤维方向与受力方向一致；对于抗弯构件的斜截面加固，宜采用U形箍或环形箍的形式；对于抗压构件的正截面加固，纤维布宜采用环向围束的加固形式。纤维布不能设计为专门承抗压应力，但在反复荷载作用下，纤维布可在经受一定压应力作用后仍具有承抗拉应力的作用。

4.1.2 纤维布（板、筋）应按现行国家标准《定向纤维增强塑料拉伸性能试验方法》GB/T 3354 进行抗拉强度测试，抗拉强度标准值 f_{tk} 应根据置信水平 $C=0.99$ 、保证率95%的要求确定。

4.1.3 纤维布应采用专门的配套树脂类粘结剂可靠地粘贴于木材表面，受力过程中，应保证纤维布与木材的变形协调，在达到承载能力极限状态之前，避免出现粘结界面的过早剥离而导致纤维布受力失效。

4.1.4 采用纤维布（板、筋）对结构或构件加固时，应符合以下规定：

1 加固前，宜卸除作用在结构上的活荷载，如不能在完全卸载条件下进行加固，应考虑二次受力的影响。

2 应考虑加固引起的构件局部刚度变化而产生的内力重分布对构件本身或相邻构件可能产生的不利影响。

3 构件抗弯承载力加固后提高幅度不应超过40%，抗剪承载力加固后提高幅度不应超过30%，抗压承载力加固后提高幅度不应超过50%。

4 采用纤维布（板、筋）对梁、枋、檩等受弯构件进行抗弯加固时，纤维布粘贴层数不宜超过四层，纤维板粘贴层数不宜超过两层；采用纤维布对梁进行抗剪加固时，纤维布粘贴层数不宜超过两层；采用纤维布对长柱、短柱等受压构件进行抗压加固时，纤维布粘贴层数不宜超过四层。

5 抗弯加固时可对纤维布（板、筋）施加预张拉力，其中碳纤维布（板、筋）预张拉应变不宜大于0.004。

4.1.5 进行纤维布（板、筋）加固结构或构件的设计时，应符合以下规定：

1 尽量避免将节疤、斜理纹等缺陷放置在木梁的抗拉边。采用纤维布进行抗弯加固设计时，应在端部采取U形箍等锚固措施，保证纤维布与木构件协同工作。

2 尽量避免将节疤、斜理纹等缺陷放置在木梁的中和轴位置。

4.1.6 计算木构件材料强度时应乘以折减系数 K_Q ，其计算公式如下：

$$K_Q = K_{Q1} \cdot K_{Q2} \cdot K_{Q3} \cdot K_{Q4} \quad (4.1.7-1)$$

式中：
 K_{Q1} ——天然缺陷影响系数；
 K_{Q2} ——干燥缺陷影响系数；
 K_{Q3} ——长期荷载影响系数；
 K_{Q4} ——尺寸影响系数。

抗压强度和抗拉强度各折减系数建议取值如表 4.1.6 所示：

表 4.1.6 木构件材料强度折减系数取值

受力分类	压	拉	弯	剪	拉（抗拉面满布纤维布时）
K_{Q1}	0.80	0.66	0.75	-	0.85
K_{Q2}	-	0.90	0.85	0.82	0.90
K_{Q3}	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72
K_{Q4}	-	0.75	0.89	0.90	0.75

4.1.7 应当对加固构件的表面进行防护处理。防护材料应与胶黏剂可靠粘结，且应达到所需的防护要求。当被加固构件的表面有防火要求时，应按现行国家标准《建筑设计防火规范》GB 50016规定的耐火等级及耐火极限要求，对纤维复合材料进行防护。

4.2 抗弯加固设计

4.2.1 采用纤维增强复合材料对木梁构件进行抗弯加固设计时，应符合以下基本假定：

- 1 木梁抗弯后，应变符合平截面假定；
- 2 对木材的木节、虫洞、裂缝等天然缺陷使用折减系数 K_Q 对强度折减；
- 3 木材在抗拉、抗压和抗弯状态下的弹性模量相同；

4 木材顺纹应力-应变关系采用如图4.2.1所示的Bechtel和Norris模型，顺纹抗拉为线弹性直至断裂，顺纹抗压为理想弹塑性，木材抗压区极限压应变约为

抗压区屈服应变的3.3倍；

5 纤维材料采用线弹性应力-应变关系，且不传递压应力；

6 在达到抗弯承载力极限状态前，纤维材料与木材之间的粘结可靠，没有出现滑移，即二者变形相同，同时忽略纤维材料与胶层对受力高度的影响。

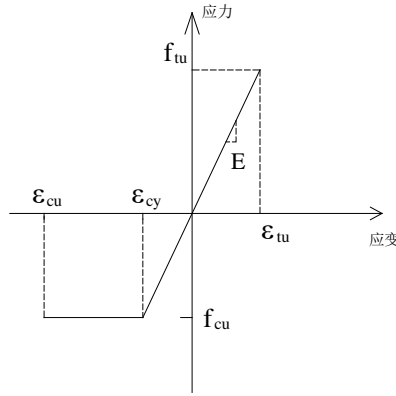


图 4.2.1 木材顺纹应力—应变曲线

4.2.2 采用纤维布对木梁进行抗弯加固时，应按图 4.2.2 所示方案加固。在确保纤维布不拉断的前提下，假定木梁弯曲受拉破坏，破坏前受压区处于塑性阶段。应按下列公式计算：

$$M \leq \varphi_t \frac{f_m b h_t^2}{3} + \phi \frac{f_m E_f A_f h_t}{E_t} + \omega_c \frac{f_m b (h - h_t)^3}{3 h_t} \quad (4.2.2-1)$$

$$h_t = \frac{\alpha_s f_m b h^2}{2 \beta_f E_f \frac{f_m}{E_t} A_f + 2 f_m b h} \quad (4.2.2-2)$$

式中： M ——木材截面抗弯承载力设计值（N·mm）；

f_m ——木材抗弯强度（MPa）；

b, h ——矩形截面宽度、高度（mm）；

h_t ——截面抗拉区高度（mm）；

E_t ——木材的顺纹弹性模量（MPa）；

E_f ——纤维布的弹性模量（MPa）；

A_f ——纤维布截面面积（mm²）；

α_s ——考虑三维实体计算的修正系数，采用碳纤维布时取 0.9985，采用碳-芳混杂纤维布时取 1.0；

β_f ——考虑纤维层数影响程度的修正系数，采用碳纤维布时取 2.591，采

用碳-芳混杂纤维布时取 1.0;

φ_t ——考虑受拉区作用力修正系数, 采用碳纤维布, 粘贴 1~2 层时取 1.0, 粘贴 3~4 层时取 2.841, 采用碳-芳混杂纤维布, 粘贴 1~2 层时取 1.0;

ω_c ——考虑受压区作用力修正系数, 采用碳纤维布, 粘贴 1~2 层时取 1.0, 粘贴 3~4 层时取 0.2528, 采用碳-芳混杂纤维布时取 1.0, 粘贴 1~2 层时取 1.0;

ϕ ——考虑纤维影响程度的经验系数, 采用碳纤维布, 粘贴 1~2 层时取 1.189, 粘贴 3~4 层时取 3.351, 采用碳-芳混杂纤维布, 粘贴 1 层时取 4.79, 粘贴 2 层时取 4.89。

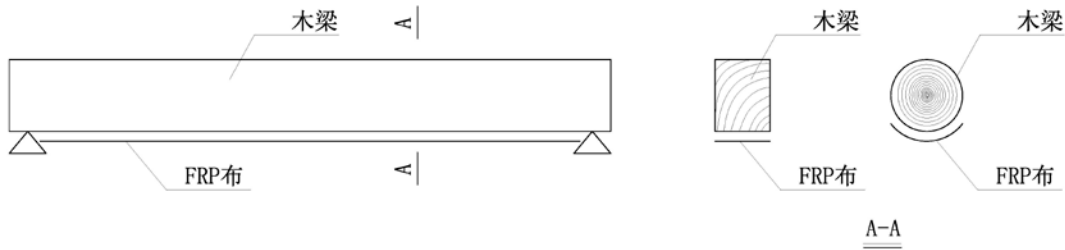


图 4.2.2 纤维布加固抗弯木梁方案

4.2.3 采用内嵌纤维板（筋）对木梁进行抗弯加固时, 应按图 4.2.3 所示方案加固; 当 $m \leq 1$ 且 $h_t > h_{tu}$ 时, 应按下列公式计算:

$$M \leq \alpha_K f_{cu} \left[\frac{h_t^2 b}{3} + \frac{(2h_t - d)^2}{4h_t} kA_f - \frac{(2h_t - d)}{3} dw + \frac{m(h - h_t)^2}{2} b - \frac{m^3 h_t^2}{6} b \right] \quad (4.2.3-1)$$

$$h_t = \frac{mhb + dw - kA_f + \sqrt{(kA_f - dw - mhb)^2 - (m+1)^2 b(d^2 w - kA_f d)}}{(m+1)^2 b} \quad (4.2.3-2)$$

$$h_{tu} = \frac{h}{1 + 3.3m} \quad (4.2.3-3)$$

式中: M ——木材截面抗弯承载力设计值 (N·mm);

f_{cu} ——木材顺纹极限抗压强度 (MPa);

b, h ——木梁的截面宽度、高度 (mm);

w, d ——木槽的截面宽度、高度 (mm);

h_t ——截面抗拉区高度 (mm);

A_f ——纤维材料的截面面积 (mm²);

m ——木梁抗压屈服应变和抗拉极限应变之比即 $m = \varepsilon_{cy} / \varepsilon_{tu}$ ；

k ——纤维板（筋）材料的弹性模量与木材的弹性模量之比即 $k = E_c / E_w$

h_{tu} ——临界受拉区高度；

α_K ——考虑尺寸效应和缺陷效应的修正系数，采用内嵌纤维板时取 0.833，采用内嵌纤维筋时取 0.791。

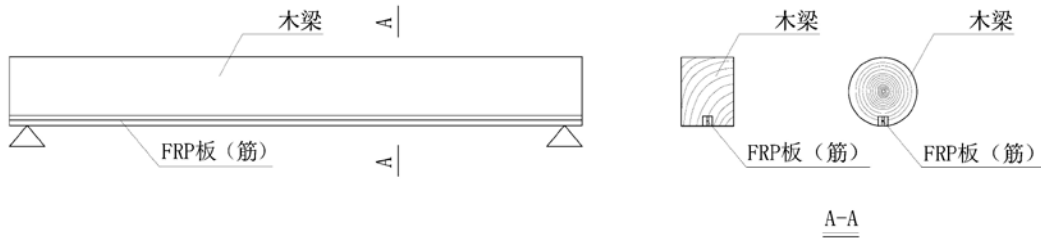


图 4.2.3 内嵌纤维板（筋）加固抗弯木梁方案

4.3 抗剪加固设计

4.3.1 采用纤维布对木梁进行抗剪加固时，应按图 4.3.1 所示方案加固，并按下列公式计算：

$$V \leq \frac{\alpha f_{v,n} I_n b_n}{S_n} \quad (4.3.1-1)$$

式中： $f_{v,n}$ ——加固木梁的抗剪强度（MPa）；

V ——木梁斜截面加固后抗剪承载力设计值（N）；

α ——考虑不同纤维材料的影响系数，采用碳纤维布时取 1，采用碳-芳 HFRP 布时，粘贴 1 层时取 0.988，粘贴 2 层时取 1.702。

b_n ——考虑纤维布贡献的等效宽度（mm）， $b_n = b + 2t \frac{E_f}{E_t} = b + 2\lambda_{f,t} \cdot t$ ；

b, h ——木梁的截面宽度、高度（mm）；

$\lambda_{f,t}$ ——纤维材料与木材的弹性模量之比；

t ——单层纤维布的厚度（mm）；

I_n ——考虑纤维材料贡献的等效全截面惯性矩（mm⁴）， $I_n = \frac{bh^3}{12} + \frac{2tnh_f^3}{12}$ ；

S_n ——考虑纤维贡献的等效面积矩（mm³）， $S_n = \frac{bh^2}{8} + \frac{2tnh_f^2}{8}$ ；

h_f ——纤维的竖向高度（mm），与木梁等高时 $h_f = h$ ；

n ——纤维布的粘贴层数。

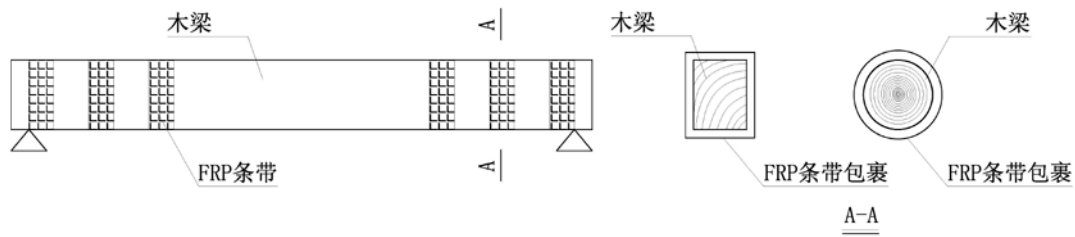


图 4.3.1 纤维布加固抗剪木梁方案

4.3.2 根据有限元模拟结果，最大应力主要发生在加固纤维布各面搭接处，因此采用纤维布进行抗剪加固时应该注意搭接处的局部加强。

4.4 抗压加固设计

4.4.1 采用纤维布对木柱进行抗压加固时，应按图 4.4.1 所示方案加固；其中短木柱按下列公式计算：

$$f_N \leq f_{wc} \quad (4.4.1-1)$$

$$f_{wc} = f_{w0} + \alpha f_{w0} \left(\frac{2f_{\theta}t_{\theta}}{d' f_{w0}} \right)^{\beta} \quad (4.4.1-2)$$

式中： f_N ——木柱的抗压强度设计值（MPa）；

f_{wc}, f_{w0} ——约束和无约束木材的极限抗压强度（MPa）；

f_{θ} ——纤维布的极限抗拉强度（MPa）；

t_{θ} ——环向纤维布的名义厚度（mm）， $t_{\theta} = nt_0$ ， t_0 为单层环向纤维布的名义厚度（mm）， n 为纤维布的粘贴层数；

d' ——圆形截面取直径，矩形截面取外接圆的直径（mm）；

α ——考虑不同纤维材料和纤维材料层数的影响系数，采用碳纤维布时，环向间隔粘贴 1 层时取 0.463，环向间隔粘贴 2 层时取 0.369；

β ——采用碳纤维布时取 1.0。

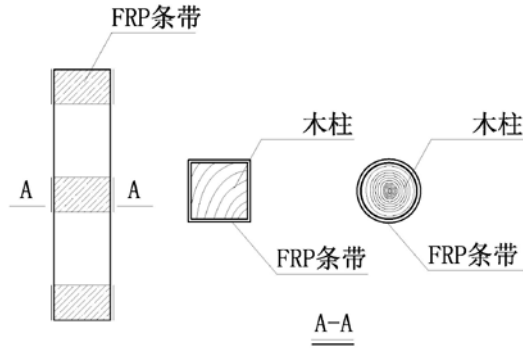


图 4.4.1 纤维布加固抗压木柱方案

4.4.2 采用纤维布对长木柱进行抗压加固时，根据现行国家标准《木结构设计标准》GB 50005，按下列公式计算：

$$N \leq \varphi \cdot f_c \cdot A \quad (4.4.2-1)$$

$$\lambda = \frac{l_0}{i} = \frac{l_0}{\sqrt{I_n / A}} \quad (4.4.2-2)$$

1 树种强度等级为 TC15、TC17 及 TB20：

当 $\lambda \leq 75$ 时

$$\varphi = \frac{1}{1 + \left(\frac{\lambda}{80}\right)^2} \quad (4.4.2-3)$$

当 $\lambda > 75$ 时

$$\varphi = \frac{3000}{\lambda^2} \quad (4.4.2-4)$$

2 树种强度等级为 TC11、TC13、TB11、TB13、TB15 及 TB17：

当 $\lambda \leq 91$ 时

$$\varphi = \frac{1}{1 + \left(\frac{\lambda}{65}\right)^2} \quad (4.4.2-5)$$

当 $\lambda > 91$ 时

$$\varphi = \frac{2800}{\lambda^2} \quad (4.4.2-6)$$

式中： N ——木柱轴心抗压承载力设计值（N）；

φ ——纤维布加固后的木柱稳定系数；

f_c ——约束木材的顺纹抗压强度 (MPa)，由公式 4.4.2 计算，采用碳纤维布环向间隔粘贴 1 层时 α 取 0.704，环向间隔粘贴 2 层时 α 取 0.557；

A ——木柱截面面积 (mm²)。

l_0 ——木柱长度 (mm)；

i ——木柱截面回转半径 (mm)；

I_n ——考虑纤维布等效面积贡献的木柱全截面惯性矩 (mm⁴)，

$$I_n = \frac{bh^3}{12} + \frac{2tnh_f^3}{12} + \frac{tnh_f b^2}{2} + \frac{tnb_f h^2}{2}。$$

b 、 h ——木柱短边、长边的长度 (mm)；

b_f 、 h_f ——纤维沿木柱短边、长边的长度 (mm)；

木柱长度，应按实际长度乘以下列系数：

表 4.4.2 木柱长度系数

两端铰接	1.0
一端固定，一端自由	2.0
一端固定，一端铰接	0.8

4.4.3 采用内嵌纤维板（筋）对木柱进行抗压加固时，应按图 4.4.3 所示方案加固，并按下列公式计算：

$$N \leq N_w + N_f = f_{cu} A_w + \lambda_1 E_f' \varepsilon_f' A_f \quad (4.4.3-1)$$

式中： N ——木柱轴心抗压承载力设计值 (N)；

N_w ——木材所承受的压力 (N)；

N_f ——纤维板（筋）承受的压力 (N)；

A_w ——轴心抗压木柱木材截面面积 (mm²)。

f_{cu} ——木材顺纹的极限抗压强度 (MPa)；

λ_1 ——考虑纤维材料不能充分发挥作用的折减系数，碳纤维取 0.65；

E_f' ——纤维板（筋）的抗压弹性模量 (MPa)；

ε_f' ——纤维板（筋）的抗压应变；

A_f ——纤维板（筋）的截面面积 (mm²)。

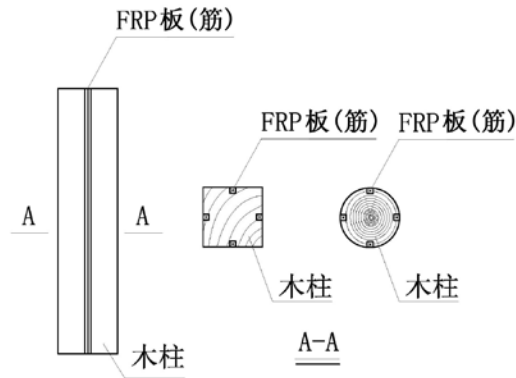


图 4.4.3 内嵌纤维板（筋）加固抗压木柱方案

4.5 榫卯节点加固设计

4.5.1 采用纤维布对榫卯节点进行加固设计时，应符合以下基本假定：

1 在受外荷载状态下，残损的榫卯节点已失去抗弯（拉拔）承载能力，荷载全部由抗拉区纤维布以及与抗压区榫肩木材来承担，残损的榫卯节点只起到抗剪和支撑的作用；同时抗压区纤维布不承压应力。

2 假定抗拉区纤维布的外边缘最先达到极限应变而断裂破坏。

3 沿额枋环箍的纤维布只起到固定并防止剥离揭起的作用，对纤维布的抗拉变形没有影响；沿远离加载端的方向，纤维布应变沿额枋高度是线性变化。

4 假定破坏时，抗压区木材强度采用木材横纹抗压强度值；且抗压区木材已经全部进入弹塑性状态。

4.5.2 采用纤维布对榫卯节点进行抗压加固时，应按图 4.5.2 所示方案加固，并按下列公式计算：

$$M \leq 2 \times n \cdot \sigma_{tu,f} \cdot h_{f,e} t \cdot \alpha' \left(h - \frac{h_{f,e}}{2} - \frac{h - h_t}{2} \right) \quad (4.5.2-1)$$

$$\sigma_{tu,f} = E_f \cdot \varepsilon_{cf} \quad (4.5.2-2)$$

$$n \cdot \sigma_{tu,f} \cdot h_{f,e} t = \frac{b}{2} \sigma_{cu,t} (h - h_t) \quad (4.5.2-3)$$

$$\alpha' = 1 - \frac{n E_f t}{420000} \quad (4.5.2-4)$$

$$h_{f,e,opt} = \frac{2bh \cdot \sigma_{cu,t}}{\sigma_{cu,t} \cdot b + 2t \cdot \sigma_{tu,f}} \quad (4.5.2-5)$$

式中： M ——加固榫卯节点的抗弯承载力（N·mm）；

b, h ——额枋的宽度、高度（mm）。

$\sigma_{u,f}$ ——防止纤维布最终产生脆性拉断破坏而采用的允许极限拉应力（MPa）；

E_f ——纤维布的弹性模量（MPa）；

ε_{cf} ——纤维布允许拉应变，取0.01和不大于纤维布极限拉应变 ε_{tu} 的2/3两者中的较小值；

$\sigma_{cu,t}$ ——木材极限受压应力（MPa）；

α' ——纤维片材厚度折减系数；

n ——纤维布的粘贴层数；

t ——单层纤维布的厚度（mm）；

$h_{f,e}$ ——有效粘结高度（mm），一般取 $h_{f,e} = h/4$ ，理论最优有效粘结高度为 $h_{f,e,opt}$ ；

此外，不同使用条件下、不同设计使用年限的木材的弹性模量和强度设计值应按照现行国家标准《木结构设计标准》GB 50005 乘以相应的调整系数，距今不同时间的古建筑木结构的设计强度应按照现行国家标准《古建筑木结构维护与加固技术标准》GB/T 50165 乘以相应的调整系数，还需要考虑抗压区木材等效矩形应力系数，建议取 0.85。

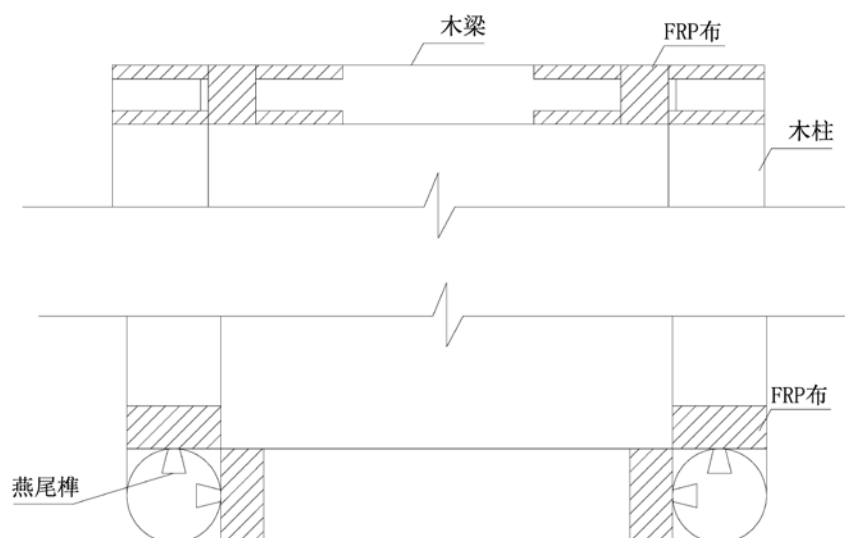


图 4.5.2 纤维布加固榫卯节点方案

4.5.3 出于加固设计的安全性考虑，建议加固后榫卯节点的抗弯承载力提高幅度

也不宜超过 40%。

4.5.4 为了保证加固节点不发生碳纤维布与木材的剥离破坏，考虑到施工条件及施工质量的差别、粘结界面剪应力和拉应力共同作用等因素的影响，建议纤维布的粘结长度 L 按下式计算：

$$L \geq L_e + 200 = \frac{E_f \cdot \varepsilon_w \cdot A_f}{\tau_f \cdot h_{f,e}} + 200 \quad (4.5.4-1)$$

式中： L_e ——有效粘结长度（mm）；

E_f ——纤维布的弹性模量（MPa）；

A_f ——纤维布的截面面积（mm²）；

τ_f ——纤维布和木材界面的平均粘结强度值，建议取值为 0.8~1.2MPa；

$h_{f,e}$ ——纤维布有效粘结高度（mm）；

ε_w ——纤维布充分利用截面处的拉应变。

4.6 构造要求

4.6.1 纤维布沿纤维受力方向的搭接长度不应小于100mm。当采用多条或多层纤维布加固时，各条或各层纤维布的搭接位置宜相互错开。

4.6.2 采用纤维布加固木梁等构件抗弯性能时，应对纵向纤维布采用环向加箍等方式进行可靠锚固，可抑制纵向纤维布发生端部剥离破坏，充分发挥纵向纤维布的高抗拉强度，保证加固效果。且应避免将节疤、斜理纹等缺陷放置在木梁等构件的抗拉边。

4.6.3 采用纤维布加固木梁等构件抗剪性能时，避免将节疤、斜理纹等缺陷放置在木梁等构件的中和轴位置。

4.6.4 环向粘贴纤维布加固木柱等抗压构件时，优先采用条带式，避免采用满裹式，包裹纤维布的层数不宜少于两层，碳纤维布的搭接长度不小于 100 mm。

4.6.5 采用纤维布加固梁柱或柱枋榫卯节点时，纵向纤维布粘贴于梁或枋的每侧长度不小于 300 mm，环向封闭纤维箍不少于 2 道。

4.6.6 采用纤维布加固梁或柱墩接节点时，新旧木料之间应先采用结构胶进行粘结，环向粘贴纤维布的搭接长度不小于 100 mm。

4.6.7 榫卯节点加固时，应当符合以下构造要求：

- 1 为了保证纤维布不发生剥离破坏，在额枋粘贴纤维布的两端各加一道环

箍纤维布。

2 为在粘贴纤维布之前，应将木材表面采用丙酮清洗干净；为了保持纤维布的耐久性，可在纤维布的表面涂刷一层油漆；另外，建议暴晒、易淋雨的节点区域不要采用纤维布加固。

5 施工

5.1 一般规定

5.1.1 纤维增强复合材料加固施工应由具有专业资质的施工方实施。

5.1.2 表面粘贴纤维布（板），施工方应按以下步骤逐步实施：

- 1 施工准备。
- 2 卸载。
- 3 木构件表面及倒角等处理。
- 4 底胶配制并涂刷。
- 5 找平胶配制，对不平整处进行修复处理。
- 6 纤维片材剪裁。
- 7 浸渍树脂胶或粘贴树脂胶的配制、涂刷。
- 8 粘贴首层纤维布（板）。
- 9 指触干燥后进行下一层纤维布（板）的粘贴施工。
- 10 表面防护与处理。

5.1.3 内嵌纤维板（筋），施工方应按以下步骤逐步实施：

- 1 施工准备。
- 2 木构件表面及倒角等处理。
- 3 开槽并清理槽中木屑。
- 4 结构胶配置、涂刷。
- 5 内嵌纤维板（筋）。
- 6 表面防护与处理。

5.1.4 施工宜在5℃~35℃环境温度条件下进行，并应符合配套胶黏剂的施工使用温度。当环境温度低于5℃时，应使用适用于低温的配套胶黏剂或采用使环境升温的处理措施。

5.1.5 施工时应考虑环境湿度对胶黏剂固化的不利影响，因此相对湿度不宜大于85%。如确需在潮湿的木构件上进行施工，木材表面的含水率应低于15%。

5.1.6 底胶、找平胶和粘贴胶的质量，应在使用前进行抽样检验，合格后方可使用。配制时，应检查拌和容器的清洁，不应有尘灰、水分和油渍，严禁在灰尘

较多处拌和，也不应将剩胶混入再拌。胶黏剂应称量准确，计量误差不得超过1%。胶黏剂胶配制应按产品使用说明规定的配比称量置于容器中。搅拌时应按同一方向搅拌直至肉眼观察无丝状、无色差。搅拌好的粘结剂应在产品规定的初凝时间内使用完毕，过时不能再使用。

5.1.7 原材料应严格按照厂商提供的说明书进行妥善运输和保存。

5.2 粘贴纤维布（板）施工

I 施工准备

5.2.1 施工方应对所使用的纤维布（板）、配套树脂胶、机具等做好施工前的准备工作。材料检验要求参照本规程6.1.1节。

5.2.2 施工方应认真阅读设计施工图，理解设计意图和要求，熟悉施工现场和被加固木构件的实际状况，拟定施工方案和施工计划，具体施工时应按编制的施工方案实施。

5.2.3 施工方在表面处理和粘贴纤维布（板）前，应按加固设计部位放线定位。

II 卸载

5.2.4 施工方应在外贴纤维布（板）加固前对构件进行合理的卸载。根据具体情况选择使用直接卸载或间接卸载的方法。直接卸载是全部或部分地直接搬走作用于原结构上的可卸荷载。直接卸载直观、准确、但可卸荷载量有限，一般只限于部分活荷载。间接卸载是借助一定的设备，加反向力于原结构，以抵消或降低原有作用效应。间接卸载量值较大，甚至可使作用效应出现负值。间接卸载有楔升卸载和顶升卸载两种，前者以变形控制，误差较大；后者以力控制，较为准确。一般而言，对于承受均布荷载的构件，应采用多点均布顶升。

III 表面处理

5.2.5 施工方应按照现行国家标准《古建筑木结构维护与加固技术标准》GB/T 50165 的要求对木构件裂缝进行修复处理。

5.2.6 被加固木构件表面应先进行修角加工，对于内凹角，宜采用修补木屑胶泥修补成圆角，圆角半径大于 20mm，对于菱形柱或有尖锐凸角的结构，宜用研磨机将棱角修饰成圆弧形，圆弧半径大于 20mm。用修补木屑胶泥做表面修饰，

用弧形量具检测，保证修饰角半径大于 20mm。

5.2.7 被加固木构件表面应无污垢且粘贴纤维布（板）之前木构件表面必须充分干燥。以盘式打磨机、钢丝刷等工具处理构件表面，保证构件表面平坦规整、无松动、无脆弱碎块及无污物，不可因研磨产生尖锐端部及棱角。油渍类污物用中性洗涤剂脱脂，用高压气枪消除灰尘。

IV 涂刷底层树脂胶

5.2.8 施工方应按生产厂提供的工艺规定配制底层树脂胶。

5.2.9 根据现场实际气温决定用胶量并严格控制使用时间。一次配胶量不宜过多，一般情况下 1h 内用完。胶的搅拌采用低速机械搅拌，搅拌时可能发热，搅拌时间不宜过长，以 3min 为宜。

5.2.10 施工方应用滚筒刷或特制的毛刷将底胶均匀涂抹于木构件表面。待胶固化后（固化时间视现场气温而定，以指触干燥为准）再进行下一工序施工。

V 找平处理

5.2.11 施工方应按生产厂提供的工艺规定配制找平胶。

5.2.12 被加固木构件表面凹陷部位用找平材料填补平整，有段差或转角的部位，应抹成平滑曲面。尽量减小高度差，且不应有棱角。转角处应用找平胶修复为光滑的圆弧，半径应不小于 20mm。

5.2.13 用刀头宽度不小于 100mm 的刮刀对凹坑实施填塞修补、找平，找平程度以眼观目测无明显的刮板或刮刀痕迹且纹路平滑为准。

5.2.14 粘贴面修补找平基底树脂胶干燥后，表面存在凹凸不平现象，为保证粘结质量，用细砂纸对其进行打磨，打磨效果要达到手感较为光滑的效果。然后尽快进行下一工序的施工。

VI 纤维布的剪裁

5.2.15 剪裁场地保证平整、洁净。剪裁区域不得进行其他施工。

5.2.16 按设计规定尺寸剪裁纤维布，尽量避免搭接，除非特殊要求，纤维布的长度一般应在 3m 之内。裁剪时特别注意不能割断纵向纤维丝（经线），必须满足设计尺寸，严禁斜切纤维布，保证剪裁后的纤维加固方向与粘贴部位的方向

一致，并防止出现拉丝现象。裁剪后的纤维布的宽度不应小于 100mm。

5.2.17 裁剪尺寸须包含纵横向重叠部分，剪裁下来的纤维布不能折叠，对裁剪下来的纤维布应卷成 20cm 的圆筒，并按型号标准竖向排放。粘贴前必须保持纤维布表面洁净。

VII 浸渍树脂胶或粘贴树脂胶的配制、涂刷

5.2.18 施工方应按生产厂提供的工艺规定配制粘结剂。

5.2.19 按粘贴面积确定每次用量，以防失效浪费。一般情况下每次拌制总重量不超过 2kg。

5.2.20 严格按重量比计量使用配制。

5.2.21 按厂家配合比和工艺要求进行配制，且应有专人负责。搅拌应顺时针一个方向搅拌，直至颜色均匀，无气泡产生，并应防止灰尘等杂质混入。

5.2.22 调制好的粘结剂应及时使用。

VIII 粘贴纤维布（板）材

5.2.23 施工方粘贴纤维布宜符合下列要求：

1 粘贴纤维布前应对木构件表面采用丙酮进行再次擦拭，确保粘贴面无粉尘（以手抚无灰尘为宜）。

2 木构件表面涂刷结构胶时，刷涂均匀，涂刷范围不超出控制线外 10mm，涂刷范围内胶的薄厚应一致。拐角部位胶量适当增加（75%的面胶涂抹在纤维布的粘贴面，粘贴后，剩余的 25%面胶涂抹于纤维布的外表面）。

3 纤维布粘贴时，做到放卷用力适度，使纤维布延展平滑顺畅。保证在规定时间内，将已按设计尺寸裁剪好的纤维布条迅速粘贴到位。粘贴时必须确定受力方向，纤维布粘贴方向必须确保与受力方向一致。

4 用滚筒刷或特制的毛刷沿纤维方向多次涂刷，挤出气泡，并使胶水充分浸透纤维布。涂刷时不得损伤纤维布。纤维布需要搭接时，必须满足搭接长度不小于100mm。

5 多层粘贴重复上述步骤，待纤维布表面指触干燥后立即进行下一层的粘贴。如超过40分钟，则应等12小时后，再涂刷粘结剂粘贴下一层。

6 在最后一层的碳纤维布表面均匀涂抹一层浸润树脂胶。

5.2.24 施工方粘贴纤维板应符合下列要求：

- 1 按设计要求的尺寸切割纤维板，并按照配比要求配置粘贴胶。
- 2 粘贴纤维前应对木构件表面采用丙酮进行再次擦拭，确保粘贴面无粉尘（以手抚无灰尘为宜）。
- 3 当采用表面未经粗糙化处理的纤维板时，应将纤维板粘贴面打磨处理。
- 4 将纤维板表面擦拭干净至无粉尘，并立即涂刷胶黏剂，胶层应呈突起状，最小厚度不应小于2mm。
- 5 将涂有胶黏剂的纤维板用手轻压贴于需粘贴的位置。用橡皮滚筒顺纤维方向均匀平稳压实，使胶黏剂从两边挤出，保证密实无空洞。施工方应按设计要求对木构件裂缝进行灌缝或表面封闭处理。
- 6 需粘贴两层纤维板时，应连续粘贴，不宜搭接。当不能立即粘贴时，再开始粘贴前应对底层纤维板重新进行清理。

IX 表面防护与处理

5.2.25 纤维布（板）粘贴后，用塑料布覆盖 24 小时以上进行养护。环境平均温度 10℃以下时，初期固化时间约两天；环境平均温度 10℃~20℃时，初期固化时间约一到两天；平均温度在 20℃以上时，初期固化约一天。

5.2.26 平均温度在20℃以上时，完全固化需七天，平均温度在10℃时需固化两周才能受力使用。

5.2.27 纤维布（板）粘贴区域在胶体未固化前不得进行其他工序施工。

5.2.28 当需要做表面防护时，纤维布（板）外表面宜粘贴洁净砂，或按设计施工拉结件，以保证防护材料与原有纤维布（板）之间有可靠的粘结。

5.2.29 表面若需油漆处理则应按以下步骤逐步实施：

- 1 在纤维布加固后的木构件表面用生漆腻子找平，刮第一遍生漆腻子，待生漆腻子干后，用油灰刀将木构件表面多余的生漆腻子刮除，并用耐水砂纸打磨刮完生漆腻子后的木构件，打磨后除净粉尘。

- 2 刮第二遍生漆腻子，待生漆腻子干后，用耐水砂纸打磨刮完生漆腻子后的木构件，打磨后除净粉尘。

- 3 刮第三遍生漆腻子，待生漆腻子干后，用耐水砂纸打磨刮完生漆腻子后的木构件，打磨后除净粉尘。

4 按传统作法上底漆，待底漆干后，用耐水砂纸细磨上完底漆后的木构件，打磨后除净粉尘。用长刷给木构件上传统油漆，将传统油漆刷匀。

X 施工安全及注意事项

5.2.30 粘贴在木构件表面上的纤维复合材，不应直接暴露于阳光或有害介质中，其表面应进行防护处理。表面防护材料应对纤维及胶黏剂无害，且应与胶黏剂有可靠的粘结强度及相互协调的变形性能。碳纤维为导电材料，使用碳纤维布（板）时应尽量远离电气设备及电源，或采取可靠的防护措施。

5.2.31 施工中应避免纤维板的弯折。

5.2.32 纤维材料用配套胶黏剂的原料应密封储存，远离火源，避免阳光直接照射。

5.2.33 胶黏剂应密封储存，配置和使用场所应保持通风良好。

5.2.34 工作场所应配备专用的灭火器，并由专人负责防火安全。

5.2.35 现场施工人员根据使用胶黏剂材料采取相应的劳动保护措施，并应遵守施工场地其他安全规定。

5.3 内嵌纤维板（筋）施工

I 施工准备

5.3.1 施工方应对所使用的纤维板（筋）、配套树脂胶、机具等做好施工前的准备工作。材料检验要求参照本规程6.1.1节。

5.3.2 施工方应认真阅读设计施工图，理解设计意图和要求，熟悉施工现场和被加固木构件的实际状况，拟定施工方案和施工计划，具体施工时应按编制的施工方案实施。

5.3.3 内嵌纤维板（筋）开槽前，应按加固设计部位放线定位。

II 表面处理

5.3.4 施工方应按照现行国家标准《古建筑木结构维护与加固技术标准》GB/T 50165 的要求对木构件裂缝进行修复处理。

5.3.5 若被加固木构件表层存在小范围和少量的腐蚀和虫蛀，应该先除去已腐蚀的表层，然后用钢丝刷、压缩空气将裂缝内的碎渣、蛀虫等清除干净。

5.3.6 被加固木构件表面应先进行修角加工，对于内凹角，宜采用修补木屑胶泥修补成圆角，圆角半径大于 20mm，对于菱形柱或有尖锐凸角的结构，宜用研磨机将棱角修饰成圆弧形，圆弧半径大于 20mm。用修补木屑胶泥做表面修饰，用弧形量具检测，保证修饰角半径大于 20mm。

III 开槽并清理槽中木屑

5.3.7 按要求尺寸进行开槽。开槽时，尽可能减少对原结构的损害，并在合适的位置按设计施工图进行开槽。开槽深度一般根据材料尺寸决定，通常要求稍大于加固材料尺寸。

5.3.8 清除槽中的木屑。应用空压机或其他除尘设备仔细清理。

5.3.9 用小钢丝刷对木槽内部进行清理，使得结构胶能够与木材有更好的接触。

IV 结构胶配置

5.3.10 选择有利于施工且具有高触变性的环氧树脂作为结构胶，避免使用流动性较强的环氧树脂材料。

V 内嵌纤维板（筋）

5.3.11 内嵌纤维板（筋）宜符合下列要求：

- 1 在槽内灌入结构胶，结构胶量不宜过多，以 1/2 的槽深为宜。
- 2 在将纤维板（筋）置入槽中时，应进行挤压，使其与结构胶进行充分接触。
- 3 在槽内继续灌结构胶至距离表面5mm。

VI 表面防护与处理

5.3.12 若当纤维板（筋）嵌入后，结构胶溢出槽外，应用刮刀等工具将溢出的树脂抹去，同时在开槽处表面采用木屑胶泥进行涂抹，尽可能使得加固木构件表面的风貌整体一致。

5.3.13 表面若需油漆处理则应按以下步骤逐步实施：

- 1 在纤维板（筋）加固后的木构件表面用生漆腻子找平，刮第一遍生漆腻子，待生漆腻子干后，用油灰刀将木构件表面多余的生漆腻子刮除，并用耐水砂纸打磨刮完生漆腻子后的木构件，打磨后除净粉尘。

2 刮第二遍生漆腻子，待生漆腻子干后，用耐水砂纸打磨刮完生漆腻子后的木构件，打磨后除净粉尘。

3 刮第三遍生漆腻子，待生漆腻子干后，用耐水砂纸打磨刮完生漆腻子后的木构件，打磨后除净粉尘。

4 按传统作法上底漆，待底漆干后，用耐水砂纸细磨上完底漆后的木构件，打磨后除净粉尘。用长刷给木构件上传统油漆，将传统油漆刷匀。

VII 施工安全及注意事项

5.3.14 碳纤维为导电材料，使用碳纤维板（筋）时应尽量远离电气设备及电源，或采取可靠的防护措施。

5.3.15 纤维材料用配套结构胶的原料应密封储存，远离火源，避免阳光直接照射。

5.3.16 结构胶应密封储存，配置和使用场所应保持通风良好。

5.3.17 工作场所应配备专用的灭火器，并由专人负责防火安全。

5.3.18 现场施工人员根据使用结构胶材料采取相应的劳动保护措施，并应遵守施工场地其他安全规定。

6 检验与验收

6.1 一般规定

6.1.1 在开始施工之前，应确认纤维材料及粘结材料的产品合格证、出厂检验报告，材料的各项性能指标符合本规程的要求。并根据国家相关施工验收规范要求要求进行材料抽样送检工作。

6.1.2 采用纤维增强复合材料对结构进行修复或加固时，应严格按本规程第5章有关条款进行各工序隐蔽工程检验与验收。如施工质量不能满足本规程第5章有关条款要求时，应立即采取补救措施或返工。

6.1.3 纤维材料与原有结构物的粘结必须密实。有效粘结面积不得低于95%。

6.2 纤维材料检验与验收

6.2.1 施工完毕，施工单位先自行目测或用小锤轻击进行检查。每平方米纤维布（板）内空鼓数量不得超过10个。当纤维布（板）的单个空鼓面积小于100 mm²时，可采用针管注胶的方式进行补救。当纤维布（板）的单个空鼓面积大于1000mm²时，宜将该处纤维布（板）切除，重新搭接粘贴同等型号的纤维布（板）。

6.2.2 每个构件测得的异常点不应大于总测点的5%。如大于5%，则需对所有加固区域进行检测，记录所有异常区域，并对所有异常区域进行有效处理（按照本规程6.2.1节）。

6.2.3 纤维布的检验及验收标准见表6.2.1：

表 6.2.1 纤维布施工质量检验及验收标准

序号	检验项目	合格标准	检验方法	检验数量
1	纤维布粘贴位置	与设计要求位置相比，中心线偏差不大于10mm	钢尺测量	全部
2	纤维布粘贴量	不小于设计量	根据测量计算	全部
3	粘贴外观缺陷	不得有间隙、孔洞、气泡等外观缺陷	目测	全部
4	粘贴质量	(1) 单个空鼓面积小于100mm ² 时充胶修复；大于1000mm ² 时割除修补；(2) 空鼓面积之和与总粘贴面积之比小于5%	锤击法或其它有效方法	全部

6.2.4 粘贴质量不符合要求需割除修补时，应沿空鼓边沿将空鼓部分的纤维布割

除，以每边向外缘扩展 100mm 长的同样纤维布，采用同样配套树脂胶补贴在原位，其施工步骤和工艺应按该工艺的要求进行。

6.2.5 纤维板（筋）在施工中不得有凸出现象。

6.3 胶层检验及验收

6.3.1 底胶的主要检验方法应满足表6.3.1的要求。

表6.3.1 底胶的主要检测方法

性能	检测方法
混合后初粘度（23℃时）	按GB/T 22314
拉伸强度	按GB/T 2567
与木材的正拉粘结强度	按本规程附录A

6.3.2 找平胶的检验方法应满足表6.3.2的要求。

表6.3.2 找平胶的主要检测方法

性能	检测方法
拉伸强度	按GB/T 2567
与木材的正拉粘结强度	按本规程附录A

6.3.3 粘贴胶的检验方法应满足表6.3.3的要求。

表6.3.3 纤维布（板）粘贴胶的主要检测方法

性能	检测方法
混合后初粘度（23℃时）	按GB/T 22314
刚-刚拉伸剪切强度	按GB/T 7124
拉伸强度	按GB/T 2567
弯曲强度	按GB/T 2567
抗压强度	按GB/T 2567
弹性模量	按GB/T 2567
伸长率	按GB/T 2567
与木材的正拉粘结强度	按本规程附录A

6.3.4 底胶层厚度不应大于2mm，纤维布层间胶厚度不应大于1mm。

6.3.5 内嵌纤维板（筋）的结构胶涂刷应均匀且不得出现流坠现象。

6.3.6 嵌入纤维板（筋）后，纤维表面不应有多余胶体，涂抹在槽口表面的木屑胶泥应尽可能与加固木构件表面的风貌整体一致。

6.4 工程验收

6.4.1 如对现场施工质量或粘结剂质量有怀疑时，可在现场进行正拉粘结测试，现场正拉粘结测试方法见本规程附录B。

6.4.2 加固工程竣工验收应按照国家相关施工验收规范要求执行，验收时应包括以下施工文件：

- 1 纤维材料及胶黏剂的产品合格证及相应的测试报告。
- 2 木构件表面打磨、修补的隐蔽工程验收记录。
- 3 粘贴部位、数量及空鼓检查记录。

附录 A 纤维布（板）配套胶黏剂与木材的正拉粘结强度的测定方法

A.0.1 不同纤维增强复合材料各有其物理力学性能特点，可分别适用于不同类型的结构构件加固。碳纤维布宜用于梁、柱等主要受力构件的加固；当计算所需纤维布层数较多时，宜使用碳纤维板；芳纶纤维宜用于提高延性加固；高强玻璃纤维宜用于次要受力构件的抗弯、抗剪加固；玄武岩纤维仅可用于抗震设防类别为丙类的建筑板构件的抗弯加固。

A.0.2 加固修补用材料应具有产品合格证和产品性能检测报告，其主要力学性能指标应符合本章的相关要求，树脂类胶黏剂还应提供耐久性指标及施工和使用环境要求。

A.0.3 纤维布（板）应与性能匹配的胶黏剂共同使用，并应有所使用的纤维布（板）与胶黏剂性能相匹配的应用试验报告，供建设方和设计单位核查。

A.1 适用范围

A.1.1 本方法适用于纤维布（板）胶黏剂单层或复合涂层与木材间正拉粘结强度的测定。

A.2 试验设备和试样

A.2.1 拉力试验机的量程选择应与试样的破坏荷载相适应。试验时所用的夹具应能使试样对中、固定，试验机应使拉力平稳地增加。

A.2.2 试验所用机具应采用钢材加工而成，如图 A.2.2 所示。

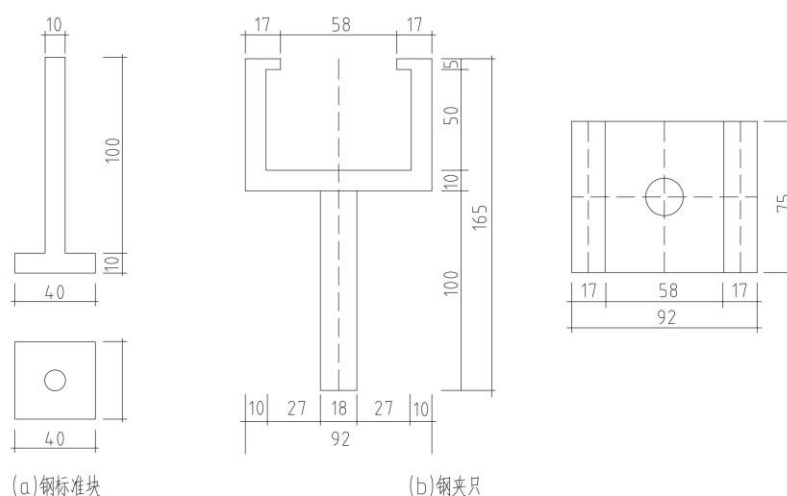


图 A.2.2 试验机具尺寸示意图

A.2.3 试验所用木材试块的尺寸70mm×70mm×40mm。预切缝深度取2mm~3mm，宽度1mm~2mm，如图A.2.3所示。

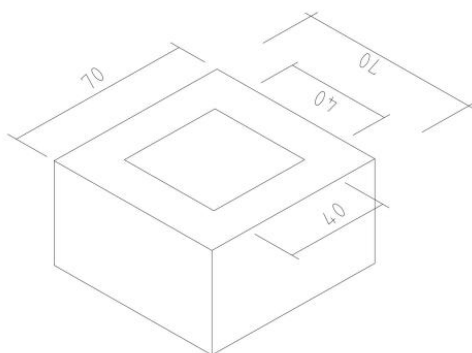


图 A.2.3 木材试块尺寸

A.2.4 试样为钢标准块与木材试块组合件。在木材试块上按照正常的施工次序粘贴纤维布（板），然后将钢标准块与木材试块粘结。试样的组成如图A.2.4所示。

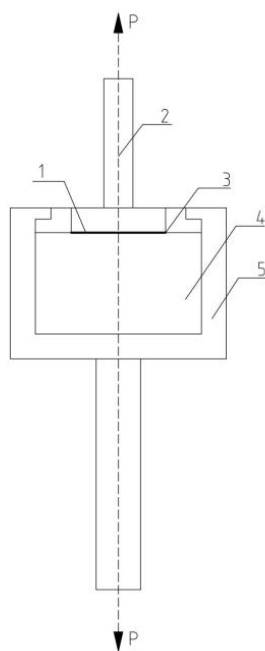


图 A.2.4 试样组成示意图

1- 配套胶黏剂及纤维布（板）；

2- 钢标准块；3-预切缝；4-木材试块；5-钢夹具

胶黏剂的制备和固化，应按相应的胶黏剂产品技术条件或胶黏剂施工工艺说明书中规定的条件进行。

A.3 试验条件

A.3.1 试验环境应保持在：温度 $23^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度 60% ~70%。

A.4 试验步骤

A.4.1 将制备好的试样放入拉力试验机的夹具内并对中。

A.4.2 以 1500N/min~2000N/min 的速度进行加载，直至破坏。记录试样破化的荷载值 P ，并观察破坏形式。

A.5 试验结果

A.5.1 正拉粘结强度按下式计算：

$$F = \frac{P}{S} \quad (\text{A.5.1})$$

式中： F ——正拉粘结强度（MPa）；

P ——试样被拉开破坏时的荷载值（N）；

S ——钢标准块的横截面积（mm²）。

A.5.2 破坏形式

- 1 木材内聚破坏：木材自身破坏，以 A_f 表示。
- 2 层间破坏：胶黏剂与木材间复合涂层界面破坏，以 B_f 表示。
- 3 碳纤维片材破坏：破坏发生在碳纤维片材内部，以 C_f 表示。
- 4 粘结失效：破坏发生在碳纤维片材与钢标准块之间，以 D_f 表示。

破坏形式为 A_f 、 B_f 时，量测结果符合粘结强度试验要求。如出现两种或两种以上的破坏形式，则应注明。破坏形式为 C_f 、 D_f 时，量测结果应予以剔除。

A.5.3 每组被测试样应不少于 5 个，每个试样的 f 值与该组算术平均值的误差不超过 $\pm 15\%$ 为有效值，并至少取其中 3 个有效值的算术平均值作为该组正拉粘结强度试验结果。

A.5.4 试验结果用正拉粘结强度试验结果和破坏形式共同表示，如：3.5MPa， A_f 。

A.5.5 试验报告应包括下述内：

- 1 胶黏剂的名称、牌号、批号和来源。
- 2 制备试样的工艺条件。
- 3 试样的编号和数量。
- 4 试验时环境的温度、湿度。

-
- 5 拉力试验机的型号、量程、加载速度。
 - 6 试样的破坏荷载、破坏形式、加载速度。
 - 7 试验中出现的偏差和异常现象。
 - 8 试验日期、试验人员。

附录 B 纤维布（板、筋）加固原木结构施工质量现场检验方法

B.1 适用范围

B.1.1 本方法适用于纤维布（板、筋）加固木结构施工质量的现场检验。

B.2 检验项目及合格标准

B.2.1 外贴纤维布加固原木结构施工检验项目及合格标准应满足

- 1 粘贴位置：与设计要求位置相比，中心线偏差应小于或等于 10 mm。
- 2 粘贴量：应大于或等于设计量。
- 3 粘贴外观缺陷：不得有间隙、空洞、气泡等外观缺陷。
- 4 粘贴质量：单个空鼓面积小于 10 cm²时应充胶修复，大于 10 cm²时应割除修补；空鼓面积之和与总粘贴面积之比应小于 5 %。

B.2.2 内嵌纤维板（筋）加固木构件施工后，应检验其木构件开槽尺寸、木构件表面平整度、木构件与结合胶的黏合度、结构胶的流缀度以及加固后风貌的一致性，确保这些项目均满足要求。

B.3 检验方法

B.3.1 外贴纤维布加固原木结构施工检验方法。

- 1 纤维布黏贴位置：钢尺测量法。
- 2 纤维布粘贴量：测量计算法。
- 3 粘贴外观缺陷：目测法。
- 4 粘贴质量：锤击法和试验法（B.4 – B.6）。

B.3.2 内嵌纤维板（筋）加固原木结构施工质量检验方法。

- 1 木构件开槽尺寸：钢尺测量法。
- 2 木构件表面平整度：目测法。
- 3 木构件与结构胶的黏合度：试验法（B.4 - 4.6）。
- 4 结构胶的流缀度：目测法。
- 5 加固后风貌的一致性：目测法

B.4 试验设备和试样

B.4.1 粘贴强度检测仪。

对粘贴强度检测仪的要求，可按照现行行业标准《数显式粘结强度检测仪》JG/T 507 的规定。粘结强度检测仪应每年检定一次，发现异常时应随时维修、检定。

B.4.2 取样规则。

现场检验应在已完成纤维布（板）粘贴加固的结构表面上进行。按实际粘贴纤维布（板）的加固结构表面面积计，500 m² 以下工程取一组试样，500 m² 至 1000 m² 工程取两组试样，1000 m² 以上工程每 1000 m² 取两组试样。试样应由检验人员随机抽取，试样间距不得小于 500 mm。

B.4.3 现场试样制备要求。

- 1 表面处理：被测部位的加固表面应清除污渍并保持干燥。
- 2 切割预切缝：从加固表面向木材基体内部切割预切缝，切入木材深度 2 mm~3 mm，宽度 1 mm~2 mm。预切缝形状为直径 40 mm 的圆形。
- 3 粘贴钢标准块，采用取样粘结剂粘贴直径为 40 mm 的圆形钢标准块（图 B.4.3）。取样粘结剂的正拉粘结强度应大于纤维布（板）粘贴胶黏剂的正拉粘结强度。钢标准块粘贴后应及时固定。

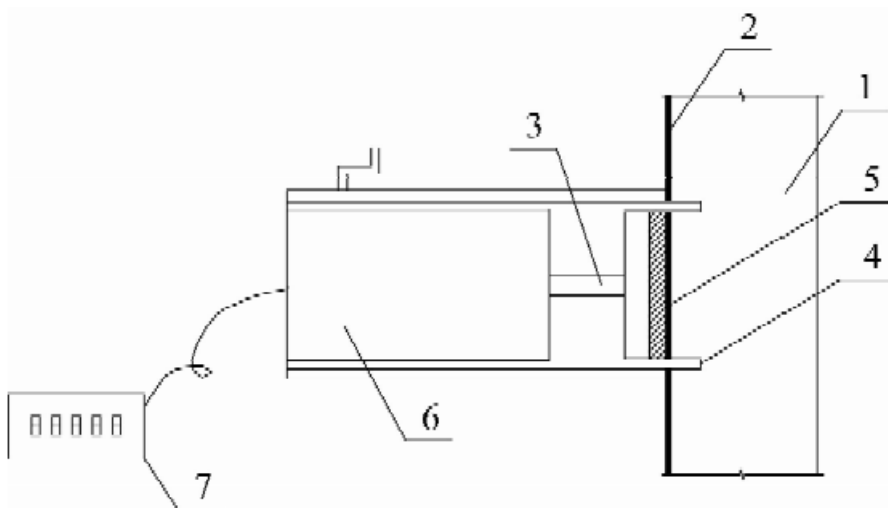


图 B.4.3 纤维布（板）粘结质量现场检验

- 1—被加固木材；2—粘贴的纤维布（板）；3—钢标准块；
4—预切缝；5—取样粘结剂；6—粘结强度检测仪；7—读数表

B.5 试验步骤

B.5.1 按照粘结强度检测仪生产厂提供的使用说明书，连接钢标准块。

B.5.2 以 1500~2000 N / min 匀速加载，记录破坏时的荷载值，并观察破坏形态。

B.6 试验结果

B.6.1 强度计算。

正拉粘结强度应按下式计算：

$$F = \frac{P}{S} \quad (\text{B.5.1})$$

式中： F ——正拉粘结强度（MPa）；

P ——试样破坏时的荷载值（N）；

S ——钢标准块的粘结面面积（mm²）。

B.6.2 破坏形式。

- 1 木材破坏：木材试块破坏，以 A_f 表示。
- 2 层间破坏：胶黏剂与木材间复合涂层界面破坏，以 B_f 表示。
- 3 碳纤维片材破坏：纤维布（板）内部破坏，以 C_f 表示。
- 4 粘结失败：碳纤维布（板）与钢标准块之间破坏，以 D_f 表示。

B.6.3 实验结果的表示

每组取 3 个被测试样，以算术平均值作为该组正拉粘结强度的试验结果。

实验结果应包括破坏形式、3 个试样的正拉粘结强度值和该组正拉粘结强度的试验平均值。

B.6.4 按照下列判据对施工质量进行判定：

- 1 破坏形式为 A_f ，施工质量判定为合格。
- 2 破坏形式为 B_f 、 C_f 、 D_f 时，如满足每组试样的正拉粘结强度试验平均值不小于 2.5 MPa，且其中单个试样的正拉粘结强度最小值不小于 2.25 MPa 的要求，施工质量判定为合格。
- 3 破坏形式为 B_f 、 C_f ，如不能满足每组试样的正拉粘结强度试验平均值不

小于 2.5 MPa，且其中单个试样的正拉粘结强度最小值不小于 2.25 MPa 的要求，施工质量判定为不合格，或根据实际工程情况加大样本数量重新检验。

4 破坏形式为 D_f 时，如不能满足每组试样的正拉粘结强度试验平均值不小于 2.5 MPa，且其中单个试样的正拉粘结强度最小值不小于 2.25 MPa 的要求，应重新制备试样和检验。

B.6.5 试验报告应包括下列内容：

- 1 建设单位、委托单位、施工单位和检验单位的名称。
- 2 制备试样的工艺条件。
- 3 工程名称、取样单位、试样的数量和编号。
- 4 试验时环境的温度、湿度。
- 5 粘结强度检测仪的型号、量程、加载速度。
- 6 试样的破坏荷载值、破坏形式、粘结强度及其平均误差。
- 7 试验中出现的偏差和异常现象。
- 8 试验日期、试验人员。

用词说明

为便于在执行本规程条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

1 表示很严格，非这样做不可的：

正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；

2 表示严格，在正常情况下均应这样做的：

正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；

3 表示允许稍有选择，在条许可时首先应这样做的：

正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；

4 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”

引用标准名录

- 1 《纤维增强复合材料工程应用技术标准》 GB 50608
- 2 《木结构设计标准》 GB50005
- 3 《古建筑木结构维护与加固技术标准》 GB/T 50165
- 4 《塑料弯曲负载热变形温度试验方法》 GB/T 1634
- 5 《机械工业产品用塑料、涂料、橡胶材料人工气候老化试验方法》
GB/T 14522
- 6 《工程结构加固材料安全性鉴定技术规范》 GB 50728
- 7 《定向纤维增强塑料拉伸性能试验方法》 GB/T 3354
- 8 《建筑设计防火规范》 GB 50016
- 9 《数显式粘结强度检测仪》 JG/T 507
- 10 《碳纤维增强复合材料加固混凝土结构技术规程》 T/CECS 146
- 11 《纤维增强复合材料加固混凝土结构技术规程》 DG/TJ 08-012

中国工程建设标准化协会标准

纤维增强复合材料加固原木结构技术规程
Technical Standard for Strengthening Timber
Structures with Fiber Reinforced Polymer
Materials

条文说明

目次

3 材料.....	X
3.1 一般规定.....	X
3.2 纤维布.....	X
3.5 胶黏剂.....	X
4 设计.....	X
4.1 一般规定.....	X
4.2 抗弯加固设计.....	X
4.4 抗压加固设计.....	X
5 施工.....	X
5.1 一般规定.....	X
6 检验与验收.....	X
附录 B.....	X

3 材料

3.1 一般规定

3.1.1 本条指出粘贴纤维布对原木结构进行加固所采用的材料种类。

3.1.2 碳纤维布强度高、弹性模量高，建议用于梁、柱等主要受力构件的加固中，主要受力构件的破坏会引起相关其他受力构件的破坏；当计算所需的纤维布层数较多时，建议使用碳纤维板；芳纶纤维布的韧性好、延伸率大，适合于提高构件延性加固中；高性能玻璃纤维布建议用于板及其他承抗弯矩、剪力较小的受力构件加固和修复中。

按照上海建科院的试验数据（见表 1），用碳纤维布制得的纤维增强复合材料（简称纤塑片，下同）强度较高，因此加固性能好于高性能玻璃纤维布，但玻璃纤维布有明显价格优势，因此对某些加固工程，经设计计算确认也可使用高性能玻璃纤维布。

表 1 纤维布种类和层数对纤维布拉伸性能的影响

浸渍树脂	纤维种类和层数	单位宽度拉断力 (N/mm)	每层单位宽度拉断力 (N/mm)
A	二层玻	293	146
A	三层玻	422	141
A1	三层玻	378	126
A2	三层玻	297	99
A	四层玻	565	141
A2	四层玻	436	109
B	四层玻	493	123
A	一层碳	432	432
A	二层碳	994	497
A	三层碳	1306	435
B	二层碳	871	436
A2	二层碳	802	401

芳纶纤维布是电、磁绝缘体，适合用于使用环境中存在电气设备、磁场的环境中。

碳纤维导电，使用时要远离电气设备及电源。

3.1.3 本条指出粘贴纤维布对原木结构进行加固和修补所采用材料的一般要求。

3.2 纤维布

3.2.1 由于纤塑片是纤维和胶黏剂复合而成，而这两种材料的性能相差较大，为避免胶含量对纤维布拉伸性能的影响，计算纤维布的抗拉强度时，本规程中按纤维的净面积计算。而且所用胶黏剂需满足本规程中粘贴胶的要求。

纤维布的名义厚度由单位面积质量除以纤维密度得到。纤维布的名义厚度为理论值，而不是纤维布的实测厚度，因为纤维布质地柔软，实测厚度离散性很大。纤维密度应由厂商提供，但应同时出具检测单位的测定证明材料。

目前市场上常用的纤维布的名义厚度见表 2。

表 2 常用纤维布的单位面积质量、名义厚度

纤维布类别	纤维单位面积质量 (g/mm ²)	密度 (g/mm ³)	名义厚度 (mm)
碳纤维布	200	1.8×10 ³	0.111
	300		0.167
芳纶纤维布	280	1.44×10 ³	0.193
	415		0.286
	623		0.429
高性能玻璃纤维布	440	2.6×10 ³	0.169

注：表中纤维单位面积质量为长方向的纤维质量，不包括纬纱的质量。

3.2.2 本条规定了纤维布的性能要求。

目前用于土建结构加固的纤维布以单向为主，厂商提供的性能指标多为纤维单丝强度。

表 3 碳纤维纤塑片拉伸性能

编号	碳纤维纤塑片宽度 (mm)	碳纤维纤塑片名义厚度 (mm)	拉断力 (N)	强度 (MPa)
1	14.0	0.128	6015	3357
2	14.0	0.128	5938	3314
3	13.2	0.128	5691	3368
4	14.2	0.128	6115	3364
5	14.2	0.128	6711	3692
6	13.5	0.128	6627	3835
7	13.1	0.128	5898	3517

8	13.6	0.128	6087	3497
9	13.4	0.128	6278	3660
10	13.2	0.128	5832	3451
11	13.3	0.128	5375	3157
12	13.1	0.128	6400	3817
平均值 (MPa)	3502	标准差 (MPa)	210	

表 4 玻璃纤维纤塑片拉伸性能

编号	玻璃纤维纤塑片宽度 (mm)	玻璃纤维纤塑片名义厚度 (mm)	拉断力 (N)	强度 (MPa)
1	15.1	0.169	7052	2938
2	14.9	0.169	6260	2486
3	13.5	0.169	6423	2815
4	14.4	0.169	7066	2904
5	14.5	0.169	5892	2404
6	12.8	0.169	5292	2446
7	13.8	0.169	6737	2889
8	13.8	0.169	6044	2591
9	13.8	0.169	5640	2418
10	12.8	0.169	5898	2726
平均值 (MPa)	2662	标准差 (MPa)	217	

表 5 芳纶纤维拉伸性能

编号	纤度 (dtex)	拉断力 (N)	强度 (MPa)
1	600	207.63	5020
2	591	208.24	5110
3	990	345.74	5060
4	591	194.93	4780
5	588	203.64	5020
6	596	202.71	4930
7	612	211.31	5010
8	1002	354.78	5130
9	965	354.31	5320
10	5930	2027.00	4960
11	5800	2006.71	5020
平均值 (MPa)	5032	标准差 (MPa)	134

3.2.4 纤维布的单位面积质量越小，其受力性能相对越差。质量太大时，则施工时粘贴胶越不容易完全浸透，施工质量越难以保证，某些力学性能也不能达到所希望的要求。故本条规定了纤维布单位面积质量的范围，该范围参考了现行国家标准《纤维增强复合材料工程应用技术标准》GB 50608 和《工程结构加固材料安全性鉴定技术规范》GB 50728。

3.5 胶黏剂

3.5.1 本条指出粘贴纤维布应采用配套的树脂类胶黏剂。找平胶的作用是填充木材表面的空洞、裂缝等，使加固表面平整，增加与纤维布的粘贴面积，是加固工程必不可少的。但如果找平材料粘度较大，则与木材的粘结强度较低将会影响加固效果。

3.5.2 可用于纤维增强复合材料结构加固的环氧树脂热变形温度通常为 50℃ 以上，因此其长期使用环境温度应低于 50℃，但如果采用隔热、防火措施后，大于 50℃ 的环境温度传到纤维材料表面的温度可能不超过 50℃。如果所采用的树脂，其力学性能均满足本规程的规定，但其热变形温度可大于 50℃，则可允许其用于与其相适用的环境温度。

3.5.3—3.5.4 条规定了底胶、找平胶和粘贴胶的性能要求。胶黏剂的性能直接影响粘贴质量和加固效果。以粘贴胶为例，胶黏剂的种类对纤维增强塑料片（简称纤塑片）的抗拉强度影响较大，同样条件下，不同树脂所制得的纤塑片，最小值仅为最大值的 50% 左右。

由此可见，胶黏剂在加固技术中起着至关重要的作用，胶黏剂的性能达不到要求，会导致加固效果降低，严重的甚至导致加固失效。本规程中表 3.5.4 所规定的胶黏剂的主要性能指标，是根据国内外有关纤维布加固规程中规定的指标值和我们试验结果中能满足加固要求的指标所定出。

3.5.6 根据日本木材学会有关纤维布设计施工指南说明，4000 h 的加速老化，相当于日本一般气象条件下 20 年的自然老化，为确保加固构件的寿命起见，本规程规定至少要进行 4000 h 纤塑片的人工老化试验。根据同济大学对于风洞叶片的长期性能观察发现，用加速老化试验性能良好的环氧胶黏剂制作的纤维增强复合材料，其使用寿命可达到 40 年以上。

4 设计

4.1 一般规定

4.1.1 用纤维布对构件进行加固利用的是其抗拉强度，故纤维布应设计成承受拉应力，禁止设计成承受压应力。对于受弯构件的正截面加固，纤维布通常粘贴在受拉区，纤维方向与加固受力方向一致。对于受弯构件的斜截面加固，纤维布的纤维方向与主拉应力方向一致，但为了施工的方便通常粘贴成与构件轴向垂直。对于受压构件的正截面加固，采用环向间隔围束，以环向约束的方式提高构件的强度。

当纤维丝铺设方向与主拉应力方向不一致时，应充分考虑纤维丝方向与受力方向之间的夹角对纤维布（板）发挥作用的不利影响。

4.1.2 木结构设计标准是以概率理论为基础的极限状态设计法，由于纤维布加固木结构结构的试验数据和加固工程的实践还不足以用概率理论进行设计，为适应加固工程之需，本规程暂定采用允许应变方法进行设计。

4.1.4 采用纤维布体系对构件某项性能进行加固，可能发生破坏形式的转移，如进行受弯加固后的构件有可能发生受剪破坏，柱中进行受剪加固后柱端塑性区有可能出现破坏，故还应验算构件其他性能的承载力。

当初始弯矩小于未加固截面受弯承载力的 30%，尤其是截面没有开裂时，初始拉应变对受弯承载力的影响很小，可以不考虑二次受力的影响。

玻璃纤维布不宜在梁的受弯加固中使用，主要是考虑以下两个因素：

(1) 该材料的弹性模量偏低，受弯加固后构件的挠度难以满足使用状态的要求。

(2) 目前纤维布市场上的玻璃纤维布种类很多，质量良莠不齐，无法保证加固的效果。

受弯加固时随着粘贴层数的增加，纤维布从木材表面剥离的倾向增大，且其拉断时的应变也有所降低，故提出纤维布不宜超过 4 层；如果超过 4 层，应进行抗剥离验算。受压加固时，层数多于 4 层的加固形式，还没有见到有关试验数据，故从安全出发，建议纤维布加固柱时层数不大于 4 层。

4.1.7 木构件材料强度不能直接采用材性测试的清材小试件强度，主要是因

为清材小试件无缺陷、尺寸小、试验时荷载为瞬时作用，而构件则有缺陷（天然缺陷和干燥缺陷，如木节、裂缝等，且缺陷大小和位置都是随机的）、尺寸大并承受长期荷载作用。因此，将清材小试件强度转化为构件材料强度时应乘以折减系数 K_Q 。

4.2 抗弯加固设计

4.2.3 采用内嵌纤维板（筋）对木梁进行抗弯加固时，存在以下三种破坏状态：

- 1 木梁弯曲受拉破坏，破坏前受压区处于弹性状态。
- 2 木梁弯曲受拉破坏，破坏前受压区处于塑性阶段。
- 3 木梁弯曲受压破坏。

本规程给出的公式适用于充分发挥各材料强度与延性的加固模式，即破坏模式 2。对于特殊的设计要求，若必须采用其他两种破坏模式进行设计，则可采用下列公式进行承载力计算：

对于第 1 种破坏模式， $m > 1$ 时，应按下列公式计算：

$$M \leq F_t \frac{2h}{3} + F_f \left(\frac{2h + h_t}{3} - \frac{d}{2} \right) \quad (4.2.3-1)$$

$$F_t = \frac{1}{2} f_{tu} h_t b - E_f \varepsilon_f dw \quad (4.2.3-2)$$

$$\varepsilon_f = \frac{2h_t - d}{2h_t} \varepsilon_{tu} \quad (4.2.3-3)$$

对于第 3 种破坏模式， $m \leq 1$ 且 $h_t < h_{tu}$ 时，应按下列公式计算：

$$M \leq \frac{43}{66} F_{cu} (h - h_t) + \frac{20}{99} F_{cy} (h - h_t) + \frac{2}{3} F_t h_t + F_f \left(h_t - \frac{d}{2} \right) \quad (4.2.3-4)$$

$$F_{cu} = f_{cu} \frac{2.3(h - h_t)}{3.3} b \quad (4.2.3-5)$$

$$F_{cy} = \frac{1}{2} f_{cu} \frac{h - h_t}{3.3} b \quad (4.2.3-6)$$

$$F_t = \frac{1}{2} \frac{3.3h_t^2}{h - h_t} f_{cu} h_t b - E_f \varepsilon_f dw \quad (4.2.3-7)$$

$$\varepsilon_f = \frac{2h_t - d}{2h_t} \varepsilon_{tu} = \frac{2h_t - d}{2h_t} \frac{3.3h_t}{h - h_t} \varepsilon_{cy} \quad (4.2.3-8)$$

$$h_{tu} = \frac{h}{1 + 3.3m} \quad (4.2.3-9)$$

式中： M ——木材截面抗弯承载力设计值（N·mm）；

f_{tu} ——木材极限抗拉强度（MPa）；

f_c ——木材抗压强度（MPa）；

b, h ——截面宽度、高度（mm）；

w, d ——木槽的截面宽度、高度（mm）；

h_t ——（mm）；

F_f ——纤维材料的拉力（N） $F_f = A_f \sigma_f = A_f E_f \varepsilon_f$ ；

F_t ——木材截面抗拉区拉力（N）；

F_c ——木材截面抗压区压力（N）；

F_{cu} ——木材截面塑性抗压区压力（N）；

F_{cy} ——木材截面弹性抗压区压力（N）；

E_f ——纤维材料弹性模量（MPa）；

ε_f ——纤维材料的应变，与相邻木材的应变相同；

ε_{tu} ——木材抗拉极限应变；

ε_{cy} ——木材抗压屈服应变；

σ_f ——纤维材料的应力（MPa）；

A_f ——纤维材料的截面面积（mm²）；

m ——木梁抗压屈服应变和抗拉极限应变之比即 $m = \varepsilon_{cy} / \varepsilon_{tu}$ ；

h_{tu} ——临界受拉区高度。

4.4 抗压加固设计

4.4.1 由于纤维布的约束，考虑到纤维布与柱体间连接可靠，因此必然导致柱体外表面剪应力提高，根据有限元模拟结果，应力最大处发生在靠近荷载处的纤维布与木柱连接处，因此需要着重注意纤维布和木材之间的连接可靠度。

对于矩形截面木柱，引入 FRP 约束矩形木柱的有效约束区域的概念，确定等效圆直径 d 的取值

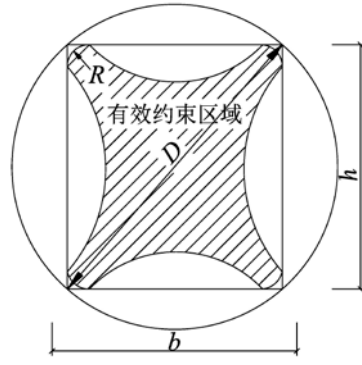


图 4.4.1 矩形木柱的有效约束区域

5 施工

5.1 一般规定

5.1.1 纤维复合材料加固施工的许多关键技术涉及复合材料的基本特征，与传统的钢材、预应力技术有较大的区别，因此在用纤维复合材料加固木材构件时，为了符合国家和地方资质的配套要求，必须要由具有特种施工技术资质和纤维加固经验的施工队伍进行加固和修复。

5.1.4 在 25℃时普通环氧树脂与固化剂拌合后的使用时间约为 30 分钟，温度越高，使用时间越短。为保证施工质量，减少材料的浪费，故建议不宜在过高温度环境下施工。

5.1.5 由于纤维材料的直径只有几微米，所以容易吸尘、吸潮。对玻璃纤维的性能影响尤为严重。

5.1.6 每次拌合量越大，反应热越不容易散发，反应速度就越快，使用时间就越短，施工质量难以保证。故每次拌合量不宜太大。

6 检查与验收

为了确保加固施工质量，按照现行国家标准《古建筑木结构维护与加固技术标准》GB/T 50165 的要求，考虑到木材的材料特性以及木结构风貌保护的施工特点，增添补充了相应的验收标准。

附录 B 纤维布（板、筋）加固原木结构施工质量现场检验方法

B.2 检验项目及合格标准

B.2.1 外贴纤维布加固原木结构施工检验时应检验全部粘贴部位，粘贴质量不符合要求需割除修补时，应沿空鼓边沿将空鼓部分的纤维布割除，以每边向外缘扩展 100mm 长的同样纤维布，采用同样配套树脂胶补贴在原位，其施工步骤和工艺应按该工艺的要求进行。

B.2.2 内嵌纤维板（筋）加固原木结构施工质量检验及验收标准应满足：

- 1 木构件开槽尺寸：应满足构造和连接要求。
- 2 木构件表面平整度：纤维板（筋）不得有突出现象。
- 3 木构件与结构胶的黏合度：单个空鼓面积小于 10 cm²时应充胶修复，大于 10 cm²时应割除修补；空鼓面积之和与总粘贴面积之比应小于 5%。
- 4 结构胶的流缀度：胶体涂刷应均匀且不得出现流缀现象。
- 5 加固后风貌的一致性：涂抹在槽口表面的木屑胶泥应保证与加固木构件表面风貌整体一致。

B.3 检验方法

B.3.1 目测法检验时应仔细观测补强区域外观上的缺陷，包括是否有间隙、孔洞、气泡等，如若发现则必须补好。锤击法检验时可用小锤轻击或手压粘贴面判断粘贴效果，总有效粘结面积不应小于 95%，如出现轻微空鼓（面积小于 100 cm²）可采取针管注胶的方法进行补救。若空鼓面积大于 100 cm²，宜将空鼓处的纤维布切除，补粘四周搭接长度大于 20 cm 的纤维布块。