

江苏建科建筑技术培训中心

粘钢、碳纤维加固检测



李利群 副教授

WWW.ZYLJC.CN

目 录

1. 粘钢、碳纤维加固法的基本概念.....	1
2. 粘钢、碳纤维加固的施工质量验收.....	4
3. 碳纤维布力学性能检测.....	5
4. 正拉粘结强度现场检测.....	10
5. 正拉粘结强度试验室测定方法.....	13
【思考题】	19

粘钢、碳纤维加固检测

1. 粘钢、碳纤维加固法的基本概念

1.1 粘钢加固法

粘钢加固法亦称粘贴钢板加固法，是将钢板采用特制的建筑结构胶粘贴于混凝土构件的表面，使钢板与混凝土形成统一的整体，利用钢板良好的抗拉强度，以提高构件承载能力、增强构件刚度的一种加固方法。

最早将钢板直接在混凝土表面进行补强加固是南非土木建筑工程学院建筑结构教授 Fleming 和 King，1967 年他们进行了素混凝土梁外粘钢板代替钢筋的试验，开创了粘钢补强加固的先河。在一些试验研究基础上，1983 年英国塞菲尔大学成功地用粘钢加固技术加固了一座公路桥，使原来限载量 110t 的桥通过了 500t 的载重卡车。我国第一个采用粘钢加固的工程是于 1978 年完成的辽阳化纤总厂变电所大楼的承载梁，收到了良好的效果，开创了我国粘钢加固的先例。

粘钢加固法具有施工简便、快捷、基本不增加被加固构件断面尺寸和重量，坚固耐用，经济合理，而且不影响结构的正常使用，对环境影响小以及加固后不影响结构的外观等优点。建筑结构胶将钢板（型钢）与混凝土紧密粘接，将加固件与被加固体合为一体，结构胶固化时间短，完全固化后即可正常受力工作。

粘钢加固法在实际工程中的应用非常广泛，适用于多种场合下的加固工程，如：钢筋焊接点断裂加固，施工中漏放钢筋加固，混凝土强度等级达不到、提高结构强度加固，加层抗震加固，旧房改造综合加固，生命线建筑物抗震加固，桥梁裂缝、旧桥维修加固，提高柱子承载力解决柱子轴压比超标加固，提高楼面荷载加固，阳台根部断裂加固，牛腿接点加固，悬挂式吊车梁提高荷载加固，火灾后梁柱混凝土损伤加固，断梁加固，截柱加固等等。

1.2 粘贴碳纤维布加固法

碳纤维布是一种碳纤维增强复合材料（CFRP），可用于结构构件的抗拉、抗剪和抗震加固。碳纤维布加固技术是利用专用结构胶将碳纤维布粘贴在混凝土表面，形成复合结构，CFRP 通过与混凝土之间协同工作，对构件或结构起到加固及改善受力性能的作用。通过碳纤维布加固，能有效改善结构状态（减少变形、降低原有结构应力、减少裂缝等）。

粘结碳纤维布加固是继粘钢加固技术应用后不久，上世纪 80 年代中期发展起来的一种新型聚合物纤维加固技术。与粘钢技术相比其突出优点是，碳纤维布拉伸强度比普通钢材要高出十多倍，弹性模量也相对较高，而且重量轻、柔软、很细很薄、耐腐蚀、施工更方便。可根据需要采用单层或多层缠绕粘贴加固，例如受压柱加固。而且长度不限可以连续粘贴加固，例如大跨度受弯梁加固。但也有缺点，在阳光下易老化，易燃（火灾），必要时可加以防护。

近几年碳纤维布加固方法比粘钢加固法在工程中的应用更为广泛。在建筑、桥梁、隧道、烟囱、海滩建筑防腐、工业厂房、市政道路工程、水利工程、电力工程等各领域的结构加固补强中有着广泛的应用。

1.3 适用范围

1) 适用于钢筋混凝土受弯、大偏心受压和受拉构件的加固。不适用于素混凝土构件, 包括纵向受力钢筋一侧配筋率小于 0.2% 的构件加固。

2) 长期使用环境温度不应超过 60°C; 处于特殊环境 (如高温、高湿、介质侵蚀、放射等) 的混凝土结构采用本方法加固时, 除应按国家现行有关标准的规定采取相应的防护措施外, 尚应采用耐环境因素作用的胶粘剂, 并按专门的工艺要求进行粘贴。

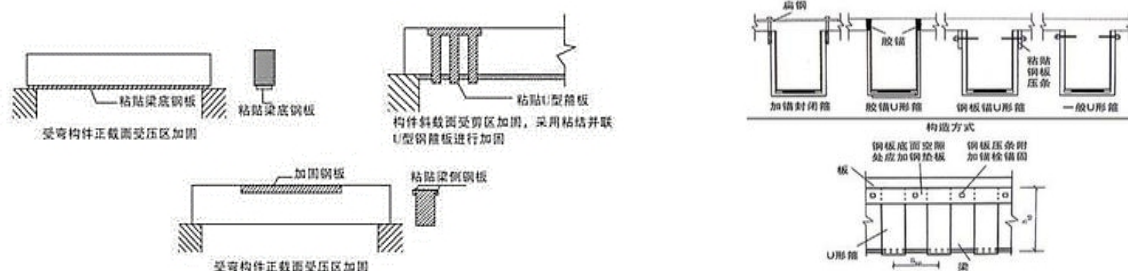
3) 当构件混凝土强度等级低于 C15 时, 不宜采用本方法加固。加固材料与基材混凝土表面的正拉粘结强度不得低于 1.5MPa。

1.4 设计要求

1) 粘钢加固

粘贴钢板加固钢筋混凝土结构构件时, 应将钢板受力方式设计成仅承受轴向应力作用。

采用粘钢加固钢筋混凝土受弯构件, 应在构件承受力不足区段 (正截面受拉区、正截面受压区或斜截面) 表面粘贴钢板, 这样可提高被加固构件的承载力, 且施工方便。对于梁正截面加固, 可将钢板粘贴在梁底面 (受拉面) 或梁顶面 (受压面); 当钢板全部粘贴在梁底面有困难时, 允许将部分钢板对称地粘贴在梁的两侧, 粘贴区域应控制在距受拉边缘 1/4 梁高范围内。当梁斜截面抗剪承载力不足时, 应采用粘贴箍板进行加固, 箍板可设计成加锚封闭箍、胶锚 U 形箍或钢板锚 U 形箍, 当受力很小时, 也可采用一般 U 形箍。箍板应垂直于构件轴线方向粘贴, 不得采用斜向粘贴。



钢筋混凝土受弯、受压、受拉构件粘钢加固设计计算, 可按国家现行标准《混凝土结构加固设计规范》GB 50367-2013 进行正截面和斜截面加固计算, 以确定钢板厚度及布置方式。

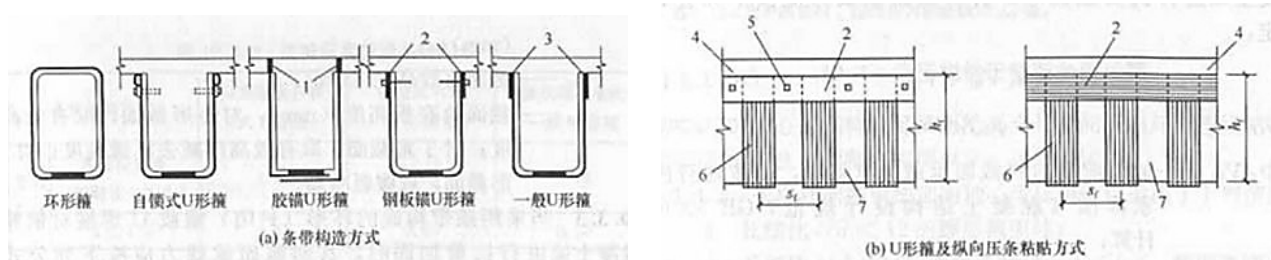
对钢筋混凝土受弯构件进行正截面加固时, 其受拉面沿构件轴向连续粘贴的加固钢板宜延长至支座边缘, 且应在钢板的端部 (包括截断处) 及集荷载作用点的两侧, 设置 U 形钢箍板 (对梁) 或横向钢压条 (对板) 进行锚固。

2) 碳纤维布加固

外贴碳纤维布加固钢筋混凝土结构构件时, 应将碳纤维布受力方式设计成仅承受拉应力作用。

采用碳纤维布加固钢筋混凝土受弯构件, 应在构件的受拉面 (梁、板底面或梁顶面负弯矩区段) 粘贴碳纤维布; 当碳纤维布全部粘贴在梁底面有困难时, 允许将部分碳纤维布对称地粘贴在梁的两侧面, 粘贴区域

应控制在距受拉边缘 $1/4$ 梁高范围内。当梁的斜截面抗剪承载力不足时, 可采用碳纤维条带布进行加固, 将条带粘贴成垂直于构件轴线方向的环形箍或其他有效的 U 形箍, 不得采用斜向粘贴方式。



钢筋混凝土受弯、受压、受拉构件粘贴碳纤维布加固设计计算, 可按国家现行标准《混凝土结构加固设计规范》GB 50367-2013 进行正截面和斜截面加固计算, 以确定碳纤维布层数及布置方式。碳纤维布加固构造要求应符合国家现行有关标准的规定。

1.5 施工工艺

1) 粘钢加固

粘贴面处理 → 加压固定及卸荷系统准备 (根据实际情况和设计要求, 卸荷步骤有时省去) → 胶粘剂配制 → 涂胶和粘贴 → 固化、卸加压固定系统 → 检验 → 维护。

2) 碳纤维布加固

表面处理 → 涂刷底胶 → 修补找平 → 胶料配制 → 粘贴碳纤维 → 表面防护 → 检验

1.6 加固材料的技术要求

1) 主要材料

(1) 粘钢加固法所用的主要材料有: 钢板、胶粘剂, 辅助的材料有 (膨胀) 螺栓等。

(2) 碳纤维布加固法所用的主要材料有: 碳纤维布、胶粘剂, 其他配套辅材等。

2) 材料性能要求

(1) 钢板: 应采用 Q235 级或 Q345 级钢材, 钢材质量应符合现行国家标准《碳素结构钢》GB/T 700-2006 和《低合金高强结构钢》GB/T 1591-2018 的规定。钢材的性能设计值应按现行国家标准《钢结构设计规范》GB 50017-2017 的规定采用。不得使用无出厂合格证、无中文标志或未经进场检验的钢材。钢板的厚度一般在 $2\sim 6\text{mm}$ 之间, 可根据工程实际需要由设计确定, 特殊情况时可适当加厚。钢材的各项性能指标应符合相应行业及有关规范的要求。

(2) 碳纤维布: 应采用纤维连续、排列均匀的纤维复合材。对承重结构加固用的碳纤维, 应选用聚丙烯腈基不大于 15K 的小丝束纤维; 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; 承重结构加固用的玻璃纤维, 应选用高强度玻璃纤维、耐碱玻璃纤维或碱金属氧化物含量低于 0.8% 的无碱玻璃纤维, 严禁使用高碱的玻璃纤维和中碱的玻璃纤维。承重结构工程严禁采用预浸法生产的纤维织物。

结构加固用的碳纤维布的安全性能必须符合现行国家标准《工程结构加固材料安全性鉴定技术规范》GB

50728-2011 的规定。碳纤维布的性能设计值应按现行国家标准《混凝土结构加固设计规范》GB 50367-2013 的规定采用。

(3) 胶粘剂：承重结构用的胶粘剂按其基本性能分为 A 级胶合 B 级胶；对重要结构、悬挑构件、承受动力作用的结构构件，应采用 A 级胶；对一般结构构件可采用 A 级胶或 B 级胶。胶粘剂的性能应符合现行国家标准《工程结构加固材料安全性鉴定技术规范》GB 50728-2011 的有关规定。承重结构加固工程中严禁使用不饱和聚酯树脂和醇酸树脂作为胶粘剂。

2. 粘钢、碳纤维加固的施工质量验收

2.1 验收依据

《建筑结构加固工程施工质量验收规范》GB 50550-2010；

《建筑工程施工质量验收统一标准》GB 50300-2013；

《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204-2015；

《砌体工程施工及验收规范》GB 50203-2011；

《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50205-2020；

《胶粘剂 拉伸剪切强度的测定(刚性材料对刚性材料) 》GB/T 7124-2008；

《工程结构加固材料安全性鉴定技术规范》GB 50728-2011。

2.2 检验项目

1) 外观检验

(1) 依照加固图纸逐一校对钢板或碳纤维布的粘贴位置、尺寸、数量进行检验和验收。对外粘钢板，其中心位置与设计中心线位置的线偏差不应大于 5mm，长度负偏差不应大于 10mm；对碳纤维布，其粘贴位置与设计要求的位置相比，其中心线偏差不应大于 10mm，长度负偏差不应大于 15mm。

(2) 其他外观检查项目主要包括：溢胶色泽、硬化程度，以及有效粘结面积，胶层厚度，胶层是否均匀，有无局部过厚过薄，甚至缺胶的情况。胶层厚度可用刻度放大镜测量，每个构件检查 2 处（胶层最厚和最薄各一处），粘钢胶的厚度应在 $2.5 \pm 0.5\text{mm}$ 之间，碳纤维布胶层厚度应在 $1.5 \pm 0.5\text{mm}$ 之间

2) 粘贴质量检验

加固材料（钢板或碳纤维布）与基材混凝土之间的粘结质量可采用下列方法进行检查，规范要求，有效粘贴面积不应小于总粘贴面积的 95%：

(1) 锤击检查法：用铁锤沿粘贴面轻轻敲击加固材料表面，如无空洞声，这表示已粘贴密实；

(2) 加载法：使用荷载试验，即将卸去的荷载重新全部加上，其结构的变形和裂缝开展应满足设计与使用要求；

(3) 应力应变测试法：对于使用此法的重要构件与建筑，即在钢筋、钢板或混凝土事先埋入应力应变传感器，对加固前后的空载、加荷等情况测出其应力应变结果，以检验其加固效果。

检查时，应将粘贴的钢板或碳纤维布分区，逐区测定空鼓面积（即无效粘贴面积）；若单个空鼓面积不大于 10000mm^2 ，可钻孔注射补胶修复；若单个空鼓面积大于 10000mm^2 ，则应揭去重贴，并重新检查验收。对于碳纤维布尚应检查端部的搭接长度，受力方向的搭接长度不小于 200mm 或 300mm（粘贴层数超过 3 层时），非受力方向的搭接长度不小于 100mm。

3）正拉粘结强度检验

采用粘结强度检测仪现场进行加固材料（钢板或碳纤维布）与基材混凝土的正拉粘结强度试验，根据试验结果可以综合评估胶液的固化质量、粘合面处理效果、胶粘剂与加固材料及基材混凝土的粘结强度。规范规定，加固材料与基材混凝土表面的正拉粘结强度的不应低于 1.5MPa。

正拉粘结强度试验测定的检查数量、方法及结果评定应符合现行国家标准《建筑结构加固工程施工质量验收规范》GB 50550-2010 的规定。

3. 碳纤维布力学性能检测

规范规定，碳纤维布在材料进场使用前应对材料的力学性能和质量指标进行见证取样复验。检验数量按进场批号，每批号见证取样 3 件，从每件中按每一检验项目各截取一组试样的用料。碳纤维布的检查、检验和复验结果必须符合现行国家标准《混凝土结构加固设计规范》GB 50367-2013 的规定及设计要求。

3.1 检测依据

《定向纤维增强聚合物基复合材料拉伸性能试验方法》GB/T 3354-2014；
《纤维增强塑料性能试验方法总则》GB/T 1446-2005；
《塑料 试样状态调节和试验的标准环境》GB/T 2918-2018；
《碳纤维片材加固混凝土结构技术规程（2007 年版）》CECS 146-2003；
《定向纤维增强聚合物基复合材料弯曲性能试验方法》GB/T 3356-2014；
《混凝土结构加固设计规范》GB 50367-2013；
《建筑结构加固工程施工质量验收规范》GB 50550-2010；
《碳纤维增强塑料孔隙含量和纤维体积含量试验方法》GB/T 3365-2008；
《增强制品试验方法 第 3 部分：单位面积质量的测定》GB/T 9914.3-2013；
《结构加固修复用碳纤维片材》JG/T 167-2016；
《碳纤维复丝拉伸性能试验方法》GB/T 3362-2017；
《结构加固修复用碳纤维片材》GB/T 21490-2008；
《桥梁结构用碳纤维布材》JT/T 532-2004。

3.2 碳纤维布拉伸性能试验

1) 仪器设备及环境条件

- (1) 试验机载荷相对误差和测量变形的仪器仪表相对误差均不应超过 $\pm 1\%$ 。
- (2) 机械式和油压式试验机使用吨位的选择应使试样施加载荷落在满载的 $10\sim 90\%$ 范围内（尽量落在满载的一边），且不应小于试验机最大吨位的 4% 。
- (3) 试验机能获得恒定的试验速度。当试验速度不大于 10mm/min 时，误差不应超过 20% ；当试验速度大于 10mm/min 时，误差不应超过 10% 。
- (4) 电子拉力试验机和伺服液压式试验机使用吨位的选择应参照相应说明书。
- (5) 试验设备应定期经具有相应资格的计量部门进行校准。
- (6) 实验室标准环境条件：温度 $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$ ；相对湿度 $(50\pm 10)\%$ 。
- (7) 实验室非标准环境条件：若不具备实验室标准环境条件时，选择接近实验室标准环境条件的实验室环境条件。

2) 试样及试样制备

(1) 试样形状、尺寸

试样应具备对称均衡的铺层形式。试样形状与尺寸见图 3-1 和表 3-1。

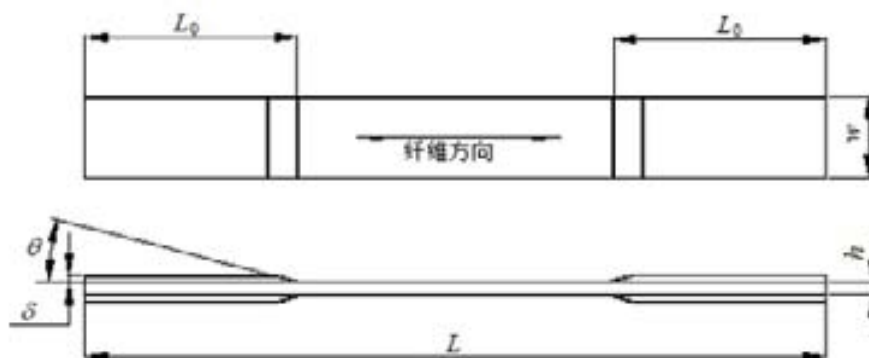


图 3-1 拉伸性能试样示意图

表 3-1 拉伸试样几何尺寸 (mm)

试样铺层	L	w	h	L_0	δ	θ
0°	230~250	12.5 ± 0.1	1~3	50	1.5~2.5	$15^{\circ}\sim 90^{\circ}$
90°	170~200	25 ± 0.1	2~4	—	—	—
多向层合板	230~250	25 ± 0.1	2~4	50	1.5~2.5	$15^{\circ}\sim 90^{\circ}$
注： 0° 试样推荐厚度为 1mm；其他试样推荐厚度为 2mm。						

(2) 试样数量：力学性能试样每组不少于 5 个，并保证同批有 5 个有效试样。物理性能试样按相应标准的规定。

(3) 试样制备

试样可以采用机械加工法和模塑法进行加工。

①采用机械加工法时, 试样的取位区, 一般宜距板材边缘(已切除工艺毛边)30mm 以上, 最小不得小于 20mm。若取位区有气泡、分层、树脂淤积、皱褶、翘曲、错误铺层等缺陷, 则应避开。若对取位区有特殊要求或需从产品中取样时, 则按有关技术要求确定, 并在试验报告中注明。

碳纤维片材一般为各向异性材料, 故应按各向异性材料的两个主方向或预先规定的方向(例如板的纵向和横向)切割试样, 且应严格保证纤维方向和铺层方向与试验要求相符。碳纤维片材试样应采用硬质合金刀具或砂轮片等加工。加工时要防止试样产生分层、刻痕和局部挤压等机械损伤。加工试样时, 可采用水冷却(禁止用油)。加工后, 应在适宜的条件下对试样及时进行干燥处理。对试样的成型表面不宜加工。当需要加工时, 一般应单面加工, 并在试验报告中注明。

②采用模塑法时, 模塑成型的试样按产品标准或技术规范的规定进行制备。在试验报告中注明制备试样的工艺条件及成型时受压的方向。

试样的加强片宜采用织物或无维布增强复合材料, 也可采用铝合金板, 除 90℃单向板试样不使用加强片外, 其他试样均应使用加强片, 加强片的粘贴宜在切割试样前进行。设置加强片是为了能有效的把载荷加到试样上, 并防止因明显的不连续性而引起试样的提前失效。

3) 试验方法与操作步骤

(1) 外观检查。试验前, 试样需经外观检查, 如有缺陷和不符合尺寸及制备要求者, 应予作废。

(2) 状态调节。试验前, 试样在实验室标准环境条件下至少放置 24h; 若不具备实验室标准环境条件, 试验前, 试样可在干燥器内至少放置 24h; 特殊状态调节条件按需要而定。

(3) 尺寸测量。在状态调节后, 测量并记录试样工作段 3 个不同截面的宽度和厚度, 分别取算术平均值, 宽度测量精度到 0.02mm, 厚度测量精确到 0.01mm。

(4) 试样安装。将试样对中夹持于试验机夹头中, 试样的中心线应与试验机上下夹头的中心线保持一致。应采用合适的夹头夹持力, 以保证试样在加载过程中不打滑并对试样不造成损伤。

(5) 安装应变计或引伸计。每组试样中选择 1~2 个试样, 在其工作段中心两个表面对称位置背对背地粘贴应变计或安装引伸计, 并计算试样的弯曲百分比。若弯曲百分比不超过 3%, 则同组的其他试样可使用单个传感器; 若弯曲百分比大于 3%, 则同组所有试样均应背对背粘贴应变计或安装引伸计, 试样的应变取两个背对背对称应变计或引伸计测得应变的算术平均值。应变计的粘贴在试样安装前进行, 对于高温湿态试样应在状态调节前粘贴应变片, 其他试验状态的试样应状态调节后粘贴应变片。

(6) 试验加荷。按 1mm/min~2mm/min 加载速度对试样进行连续加载, 连续记录试样的载荷-应变(或载荷-位移)曲线。若观测到过渡区或第一层破坏, 则记录该点的载荷、应变和损伤模式。若试样破坏, 则记录失效模式、最大载荷、破坏载荷以及破坏瞬间或尽可能接近破坏瞬间的应变。若采用引伸计测量变形, 则由载荷-位移曲线通过拟合计算破坏应变。失效模式的判定、描述及代码详见 GB/T 3354-2014。

4) 数据处理与试验结果

(1) 拉伸强度

碳纤维布拉伸强度按式(3-1)计算, 结果保留 3 位有效数字:

$$\sigma_t = \frac{P_{\max}}{w \cdot h} \quad (3-1)$$

式中: σ_t ——拉伸强度, MPa;

$P_{\max}$ ——试样破坏前承受的最大载荷, N;

w ——试样宽度, mm;

h ——试样厚度, mm。

(2) 拉伸弹性模量

90°试样拉伸弹性模量在 0.0005~0.0015 的纵向应变范围内按式 (3-2) 或式 (3-3) 计算, 其他试样拉伸弹性模量在 0.001~0.003 纵向应变范围内按式 (3-2) 或式 (3-3) 计算, 结果保留 3 位有效数字:

$$E_t = \frac{\Delta P \cdot l}{w \cdot h \cdot \Delta l} \quad (3-2)$$

$$E_t = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon} \quad (3-3)$$

式中: E_t ——拉伸弹性模量, MPa;

l ——试样工作段内的引伸计标距, mm;

ΔP ——载荷增量, N

ΔP ——与 ΔP 对应的引伸计标距长度内的变形增量, mm;

$\Delta \sigma$ ——与 ΔP 对应的拉伸应力增量, MPa。

$\Delta \varepsilon$ ——与 ΔP 对应的应变增量, mm/mm。

(3) 拉伸破坏应变

由引伸计测量的纵向拉伸破坏应变按式 (3-4) 计算, 结果保留 3 位有效数字:

$$\varepsilon_h = \frac{\Delta l_b}{l} \quad (3-4)$$

式中: ε_h ——纵向拉伸破坏应变, mm/mm;

Δl_b ——试样破坏时引伸计标距长度内的纵向变形量, mm。

(4) 试验结果

应给出每个试样的性能值、算术平均值、标准差及离散系数。若有要求, 尚应给出一定置信度的平均值的置信区间。各测量性能值的算术平均值、标准差和离散系数按 GB/T 1446-2005 的规定进行计算, 其中算术平均值计算到三位有效数字, 标准差和离散系数计算到二位有效数字。

3.3 碳纤维增强塑料纤维体积含量试验

碳纤维增强塑料纤维体积含量试验是在碳纤维增强塑料上取一与纤维轴向垂直的截面作为试样, 进行磨平抛光, 用光学显微镜或图像分析仪测定纤维所占面积与观测面积二者之比的百分数值, 即为该试样的纤维体积含量。适用于测定单向、正交及多向铺层的碳纤维增强塑料的孔隙含量、纤维体积含量。芳纶和玻璃纤

维增强塑料也可参照采用。不适用于织物增强塑料。

1) 仪器设备

(1) 试验用设备:

①图像分析仪: 具有定量测量分析软件(颗粒面积、面积百分比)和数据处理系统, 放大倍数和分辨率能满足试验要求;

②金相显微镜: 能放大到 1200 倍以上;

③计数器;

④求积仪;

⑤金相磨片及抛光设备。

(2) 试验用材料:

包埋材料, 可用室温固化的环氧树脂体系; 水磨砂纸, 选用 No.320、400、600、800 四种; 抛光织物, 选用丝绒、呢料等; 抛光膏, 选用 W0.5 或 W1 人造金刚石抛光膏。

2) 试样制备要求

(1) 取样

单向铺层试样(正交及多向铺层试样, 每一铺层方向), 沿垂直于纤维轴向的横截面取样, 长为 20 mm、宽为 10 mm、高为试样厚度。试样在切取过程中应防止分层、开裂等现象。每组试样不少于 3 个。

(2) 制样

将试样用包埋材料包埋。将包埋好的试样在磨片机上依次用由粗到细的水磨砂纸在流动水下湿磨, 然后在抛光机上用适当的抛光织物和抛光膏抛光, 直至试样截面形貌在显微镜下清晰可见为止。

磨平、抛光过程中, 每更换一次砂纸都应将试样彻底清洗干净。如有抛光膏堵塞孔隙现象, 可用超声波清洗器清洗试样。

3) 试验步骤

(1) 图像分析法

将制备好的试样置于图像分析仪的载物台上。调节观测面亮度及聚焦平面以获得清晰的纤维截面形貌。观测面内不得有空隙。调节图像分析仪的放大倍数到 500 倍以上, 并能清晰区分单根纤维。测定纤维所占面积与观测面积之比的百分比数值并记录试验结果。每个试样不少于 3 个视野。

(2) 显微镜法

将制备好的试样置于金相显微镜的载物台上。在 200 倍放大倍数下每个试样摄取 3 个观测面的照片各一张, 用来测定各观测面积及其内的纤维根数, 观测面内不得有孔隙。在 1200 倍(或大于 1200 倍)放大倍数下摄取显微照片一张, 用来测定纤维的平均截面积。在摄得的照片上用求积仪或其他方法求得 25 根纤维的平均截面积。如纤维为圆形截面, 可测量直径来计算截面积。

4) 试验结果

(1) 图像分析法

每组试样的纤维体积含量以各个视野中观测面积内测定结果的平均值及标准差和离散系数为试验结果。

（2）显微镜法

每个视野中观测面积内的纤维体积含量 v (%)按式（3-5）计算：

$$V_f = \frac{N \cdot A_f}{A} \times 100\% \quad (3-5)$$

式中： V_f ——每个观测面内的纤维体积含量，%；

N ——观测面积内的纤维根数；

A_f ——单根纤维的平均截面积， μm^2 ；

A ——观测面积， μm^2 。

4. 正拉粘结强度现场检测

粘结材料粘合加固材与基材的正拉粘结强度是评定外粘或外包型钢工程、外粘纤维复合材工程以及外粘钢板工程质量的重要指标，在施工过程或完工验收均需要做粘结材料粘合加固材与基材的正拉粘结强度检验。不论是粘钢加固或粘贴碳纤维布加固，其施工粘贴质量好坏，都必须依据国家相关规范标准，采用专用检测设备现场检测其正拉粘结强度是否满足规范要求，作为交工验收的依据。

4.1 检测依据

《建筑结构加固工程施工质量验收规范》GB 50550-2010；

《混凝土结构加固设计规范》GB 50367-2013；

《数显式粘结强度检测仪》JG/T 507-2016；

《碳纤维片材加固混凝土结构技术规程（2007 年版）》CECS 146-2003；

《桥梁结构用碳纤维布材》JT/T532-2004。

4.2 适用范围

本方法适用于现场条件下以结构胶粘剂或高强聚合物砂浆为粘结材料，粘合（包括浇注、喷抹）下列加固材料与基材，在均匀拉应力作用下发生内聚、粘附或混合破坏的正拉粘结强度测定。

- 1) 结构胶粘剂粘合纤维复合材与基材混凝土；
- 2) 结构胶粘剂粘合钢板与基材混凝土（也适用于检验原构件混凝土的抗拉强度）；
- 3) 高强聚合物砂浆喷抹层粘合钢丝绳网片与基材混凝土；
- 4) 界面胶（剂）粘合新旧混凝土。

当承重结构加固设计要求做纤维织物与胶粘剂的适配性检验时，应采用本方法进行正拉粘结强度的测定。

4.3 仪器设备

结构加固工程现场使用的粘结强度检测仪，应坚固、耐用且携带和安装方便；其技术性能不应低于现行

国家标准《数显式粘结强度检测仪》JG/T 507-2016 的要求。检测仪应每年检定一次。

钢标准块的形状可根据实际情况选用方形或园形。方形钢标准块的尺寸为 $40\text{mm} \times 40\text{mm}$; 园形钢标准块的直径为 50mm ; 钢标准块的厚度不应小于 20mm , 且应采用 45 号钢制作。

钢标准块应带有传力螺杆, 其尺寸和夹持构造, 应根据所使用的检测仪确定。

当适配性检验需在模拟现场条件下进行时, 应配备仰贴纤维复合材用的钢架。该钢架宜采用角钢制作, 其顶部构造应能搁置并固定 3 块板面尺寸不小于 $600\text{mm} \times 2100\text{mm}$ 的预制混凝土板; 其板下的空间应能满足仰贴作业的需要。预制混凝土板的强度等级应按受检产品的适用范围确定, 但不得低于 C30。

4.4 取样规则

1) 粘贴、喷抹质量检验的取样, 应符合下列规定:

(1) 梁、柱类构件以同规格、同型号的构件为一检验批。每批构件随机抽取的受检构件应按该批构件总数的 10% 确定, 但不得少于 3 根; 以每根受检构件为一检验组; 每组 3 个检验点。

(2) 板、墙类构件应以同种类、同规格的构件为一检验批, 每批按实际粘贴、喷抹的加固材料表面积 (不论粘贴的层数) 均匀划分为若干区, 每区 100m^2 (不足 100m^2 , 按 100m^2 计), 且每一楼层不得少于 1 区; 以每区为一检验组, 每组 3 个检验点。

(3) 现场检验的布点应在粘接材料 (胶粘剂或聚合物砂浆等) 固化已达到可以进入下一工序之日进行。若因故需推迟布点日期, 不得超过 3d。

(4) 布点时, 应由独立检验单位的技术人员在每一检验点处, 粘贴钢标准块以构成检验用的试件。钢标准块的间距不应小于 500mm , 且有一块应粘贴在加固构件的端部。

2) 适配性检验

(1) 应由独立检验机构会同有关单位, 在 12°C 和 35°C 的气温 (自然或人工环境均可) 中各制备 3 个试样, 并分别进行检验;

(2) 应以安装在钢架上的 3 块预制混凝土板为基材, 在两种气温中, 每块板分别仰贴一条尺寸为 $0.25\text{m} \times 2.1\text{m}$ 、由 4 层纤维织物粘合而成的试样;

(3) 应以每一试样为一检验组, 每组 5 个检验点。每一检验点粘贴钢标准块后即构成一个试件。

4.5 试件制备

1) 基材表面处理: 检测点的基材混凝土表面应清除污渍并保持干燥。

2) 切割预切缝: 从清理干净的表面向混凝土基材内部切割预切缝, 切入混凝土深度为 $10 \sim 15\text{mm}$, 缝的宽度约 2mm 。预切缝形状为边长 40mm 的方形或直径 50mm 的园形, 视选用的切缝机械而定。切缝完毕后, 应再次清理混凝土表面。

当检验原构件混凝土抗拉强度标准值 f_t 时, 预切缝应采用钻芯机钻成直径为 50mm 、深度为混凝土保护层厚度加 $20\text{mm} \sim 30\text{mm}$ 的圆柱状。

3) 粘贴钢标准块: 应选用快固化、高强胶粘剂进行粘贴。钢标准块粘贴后应立即固定; 在胶粘剂 7d 的

固化过程中不得受到任何扰动。

4.6 试验步骤

1) 试验应在布点日期算起的第 8 天进行。试验时应按粘结强度测定仪的使用说明书正确安装仪器, 并连接钢标准块 (图 4-1)。

2) 以均匀速率连续加荷, 控制在 1~1.5min 内破坏; 记录破坏时的荷载值, 并观测其破坏形式。

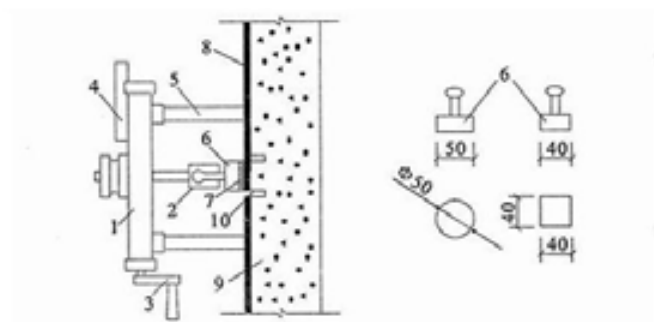


图 4-1 仪器安装及钢标准块连接示意图
1-粘结强度测定仪; 2-夹具; 3-加荷摇柄; 4-数字式测力计; 5-反力支撑架; 6-钢标准块; 7-高强、快固化的粘结剂; 8-基材表面粘结或喷涂的加固材料层; 9-基材混凝土; 10-混凝土表面预切缝

4.7 试验结果

1) 正拉粘结强度应按下式计算:

$$f_{ti} = P_i / A_{ai} \quad (4-1)$$

式中 f_{ti} ——试件 i 的正拉粘结强度, Mpa;

P ——试件 i 破坏时的荷载值, N;

A_{ai} ——钢标准块 i 的粘合面面积, mm^2 。

2) 破坏形式

(1) 内聚破坏

——基材混凝土内聚破坏: 即混凝土内部 (本体) 发生破坏;

——胶粘剂内聚破坏: 可见于使用低性能、低质量胶粘剂的胶层中;

——聚合物砂浆内聚破坏: 可见于使用低强度水泥, 或低性能、低质量聚合物的聚合物砂浆层中。

(2) 粘附破坏 (层间破坏)

——胶层与基材混凝土之间的界面破坏;

——聚合物砂浆层与基材混凝土之间的界面破坏。

(3) 混合破坏

——粘合面出现两种, 或两种以上的破坏形式。

注: 钢标准块与高强、快硬化胶粘剂之间的界面破坏, 属检验技术问题, 与破坏形式判别无关, 应重新粘贴, 重做试验。

3) 试验结果正常性判别

若破坏形式为基材混凝土内聚破坏, 或虽出现两种或两种以上的破坏形式, 但基材混凝土内聚破坏形式的破坏面积占粘合面面积 85% 以上, 均可判为正常破坏。

若破坏形式为粘附破坏、胶粘剂或聚合物砂浆内聚破坏, 以及基材混凝土内聚破坏的面积少于 85% 的混合破坏, 均应判为不正常破坏。

4.8 检验结果的合格评定

1) 加固材料粘贴、喷抹质量的合格评定

(1) 组检验结果的合格评定, 应符合下列规定:

①当组内每一试样的正拉粘结强度 f_{ti} 均达到 $f_{ti} \geq 1.5\text{MPa}$, 且为混凝土内聚的要求时, 应评定该组为检验合格组;

②若组内仅一个试样达不到上述要求, 允许以加倍试样重新做一组检验, 如检验结果全数达到要求, 仍可评定该组为检验合格组;

③若重做试验中, 仍有一个试样达不到要求, 则应评定该组为检验不合格组。

(2) 检验批的粘贴、喷抹质量的合格评定, 应符合下列规定:

①当批内各组均为检验合格组时, 应评定该检验批构件加固材料与基材混凝土的粘合质量合格;

②若有一组或一组以上为检验不合格组, 则应评定该检验批构件加固材料与基材混凝土的粘合质量不合格;

③若检验批由不少于 20 组试样组成, 且检验结果仅有一组因个别试样粘结强度低而被评为检验不合格组, 则仍可评定该检验批构件的粘合质量合格。

2) 适配性检验的正拉粘结性能合格评定, 应符合下列规定:

(1) 当不同气温条件下检验的各组均为检验合格组时, 应评定该型号纤维织物与拟配套使用的胶粘剂, 其适配性检验的正拉粘结性能合格;

(2) 若本次检验中, 有一组或一组以上检验不合格, 应评定该型号纤维织物与拟配套使用的胶粘剂, 其适配性检验的正拉粘结性能不合格;

(3) 当仅有一组, 且组中仅有一个检测点不合格时, 允许以加倍的检测点数重做一次检验。若检验结果全组合格, 仍可评定为适配性检验的正拉粘结性能合格。

5. 正拉粘结强度试验室测定方法

5.1 检测依据

《建筑结构加固工程施工质量验收规范》GB 50550-2010;

《混凝土结构加固设计规范》GB 50367-2013;

《数显式粘结强度检测仪》JG/T 507-2016;

《碳纤维片材加固混凝土结构技术规程 (2007 年版)》CECS 146-2003;

《桥梁结构用碳纤维布材》JT/T532-2004。

5.2 适用范围

本方法适用于试验室条件下以结构胶粘剂、界面胶（剂）或聚合物砂浆为粘结材料粘合（包括涂布、喷抹、浇注等）下列加固材料与基材，在均匀拉应力作用下发生内聚、粘附或混合破坏的正拉粘结强度测定。

- 1) 纤维复合材料与基材混凝土;
- 2) 钢板与基材混凝土;
- 3) 结构用聚合物砂浆(或复合砂浆层)与基材混凝土;
- 4) 结构界面胶(剂)与基材混凝土。

不方法不适用于测定室温条件下涂刷、粘合与固化的，质量大于 300g/m² 碳纤维织物与基材混凝土的正拉粘结强度。

5.3 仪器设备

拉力试验机的力值量程选择，应使试样的破坏荷载，发生在该机标定的满负荷的 20%~80%之间；力值的示值误差不得大于 1%。

试验机夹持器的构造应能使试件垂直对中固定，不产生偏心和扭转的作用。

试件夹具应由带拉杆的钢夹套与带螺杆的钢标准块构成，且应以 45 号碳钢制作；其形状及主要尺寸如图 5-1 所示。

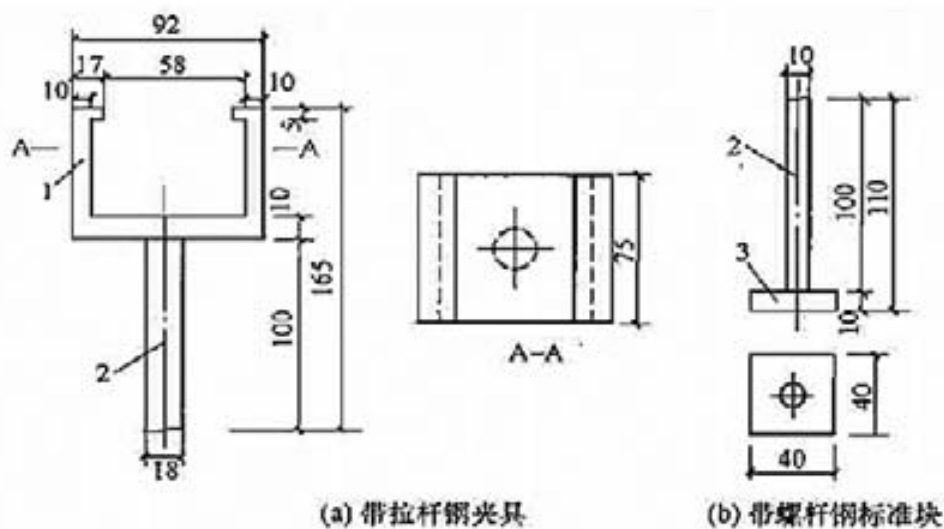


图 5-1 试件夹具及钢标准块尺寸
1—钢夹具；2—螺杆；3—标准块

5.4 试件

1) 试件的构造要求

试验室条件下测定正拉粘结强度应采用组合式试件, 其构造应符合下列规定:

(1) 以胶粘剂为粘结材料的试件应由混凝土试块 (图 5-2)、胶粘剂、加固材料 (如纤维复合材或钢板等) 及钢标准块相互粘合而成 (图 5-3a);

(2) 以结构用聚合物砂浆为粘结材料的试件应由混凝土试块、结构界面胶 (剂) 涂布层、现浇的聚合物砂浆层及钢标准块相互粘合而成 (图 5-3b);

(3) 若检验结构界面胶 (剂), 应将聚合物砂浆层换为细石混凝土层。

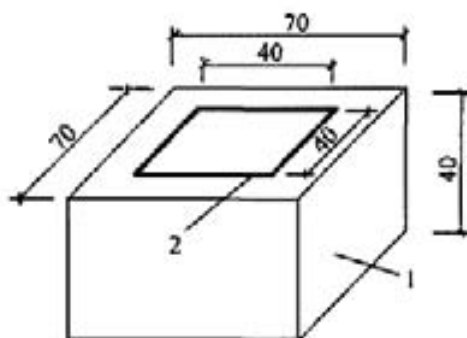


图 5-2 混凝土试块形式及尺寸

1—混凝土试块; 2—预切缝

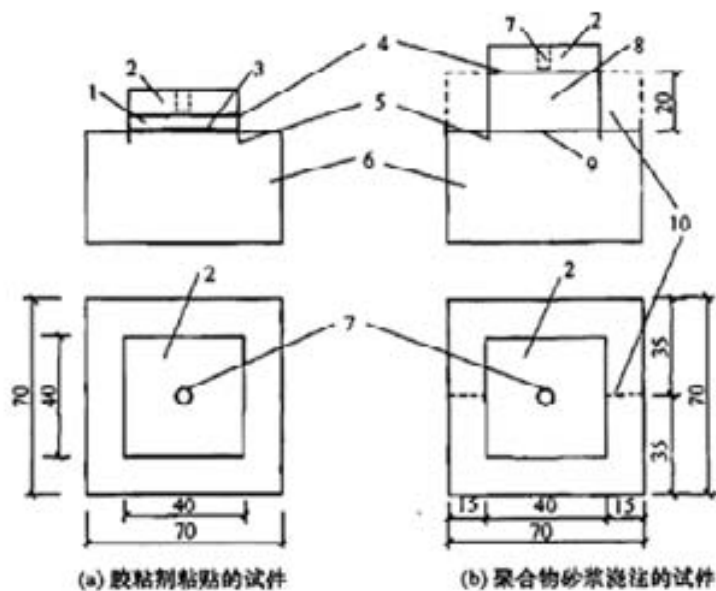


图 5-3 正拉粘结强度试验的试件

1—加固材料; 2—钢标准块; 3—受检胶的胶缝; 4—粘贴标准块的快固胶; 5—预切缝; 6—混凝土试块; 7— $\phi 10$ 螺孔; 8—现浇聚合物砂浆层 (或复合砂浆层); 9—结构界面胶 (剂); 10—虚线部分表示浇注砂浆用可拆卸模具的安装位置

2) 试样的制备要求

试样各组成部分的制备应符合下列规定:

(1) 受检粘结材料应按产品使用说明书规定的工艺要求进行配制和使用。

(2) 混凝土试块:

①试块的尺寸为 70mm×70mm×40mm;

②混凝土强度等级, 对 A 级和 B 级胶粘剂均应为 C40~C45; 对 A 级和 B 级界面胶 (剂), 应分别为 C40 和 C25。对 I 级和 II 级聚合物砂浆, 其试块强度等级与界面胶 (剂) 的要求相同;

③试块浇注后应经 28d 标准养护;

④试块使用前, 应以专用的机械切出深度为 4mm~5mm 的预切缝, 缝宽约 2mm, 如图 5-2 所示。预切缝围成的方形平面, 其净尺寸应为 40mm×40mm, 并应位于试块的中心;

⑤混凝土试块的粘结面 (方形平面) 应作打毛处理。打毛深度应达骨料新面, 且手感粗糙, 无尖锐突起。试块打毛后应清理干净, 不得有松动的骨料和粉尘。

(3) 加固材料: 受检加固材料的取样应符合下列要求:

①纤维复合材应按规定的抽样规则取样; 从纤维复合材中间部位裁剪出尺寸为 40mm×40mm 的试件; 试件外观应无划痕和折痕; 粘合面应洁净, 无油脂、粉尘等影响胶粘的污染物。

②钢板应从施工现场取样, 并切割成 40mm×40mm 的试件, 其板面及周边应加工平整, 且应经除氧化膜、锈皮、油污和糙化处理; 粘合前, 尚应用工业丙酮擦洗干净。

③聚合物砂浆和复合砂浆, 应从一次性进场的批量中随机抽取其各组分, 然后在试验室进行配制和浇注。

(4) 钢标准块:

钢标准块 (图 5-1b) 宜用 45 号碳钢制作; 其中心应有安装 $\phi 10$ 螺杆用的螺孔。标准块与加固材料粘合的表面应经喷砂或其他机械方法的糙化处理; 糙化程度应以喷砂效果为准 (参见 GB 50550-2010 第 9.3.2 条及注)。标准块可重复使用, 但重复使用前应完全清除粘合面上的粘结材料层和污迹, 并重新进行表面处理。

(5) 试件的粘合、浇注与养护:

首先在混凝土试块的中心位置, 按规定的粘合工艺粘贴加固材料 (如纤维复合材料或薄钢板), 若为多层粘贴, 应在胶层指干时立即粘贴下一层。当检验聚合物砂浆或复合砂浆时, 应在试块上先安装摸具, 再浇注砂浆层; 若产品使用说明书规定需涂刷结构界面胶 (剂) 时, 还应在混凝土试块上先刷上界面胶 (剂), 再浇注砂浆层。试件粘贴或浇注时, 应采取措施防止胶液或砂浆流入预切缝。粘贴或浇注完毕后, 应按产品使用说明书规定的工艺要求进行加压、养护; 分别经 7d 固化 (胶粘剂) 或 28d 硬化 (砂浆) 后, 用快固化的高强胶粘剂将钢标准块粘贴在试件表面。每一道作业均应检查各层之间的对中情况。

对结构胶粘剂的加压、养护, 若工期紧, 且征得有关各方同意, 允许采用以下快速固化、养护制度:

①在 40℃条件下烘 24h; 烘烤过程中仅允许有 2℃的正偏差;

②自然冷却至 23℃后, 再静置 16h, 即可贴上标准块。

(6) 试件的安装:

试件应安装在钢夹具(图 5-4)内并拧上传力螺杆。安装完成后各组成部分的对中标志线应在同一轴线上。

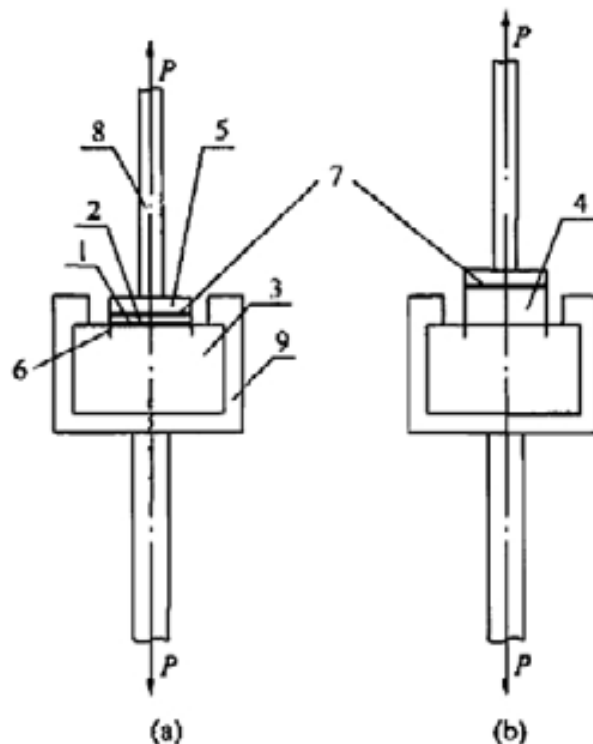


图 5-4 试件组装

1—受检胶粘剂；2—被粘合的纤维复合材或钢板；3 混凝土试块；4—聚合物砂浆层；5—钢标准块；6—混凝土试块预切缝；7—快固化高强胶粘剂的胶缝；8—传力螺杆；9—钢夹具

(7) 试样数量的规定:

常规试验的试样数量每组不应少于 5 个；仲裁试验的试样数量应加倍。

5.5 试验环境

试验环境应保持在：温度 $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、相对湿度 $(50 \pm 5)\% \sim (65 \pm 10)\%$ 。仲裁性试验的试验室相对湿度应控制在 $45\% \sim 55\%$ 。

若试样系在异地制备后送检，应在试验标准环境条件下放置 24h 后才进行试验，且应作异地制备的记载于检验报告上。

5.6 试验步骤

将安装在夹具内的试件(图 5-4)置于试验机上下夹持器之间，并调整至对中状态后夹紧。以 3mm/min 的均匀速率加荷直至破坏。记录试样破坏时的荷载值，并观测其破坏形式。

5.7 试验结果

1) 正拉粘结强度应按下式计算:

$$f_{ti} = P_i / A_{ai} \quad (5-1)$$

式中 f_{ti} ——试样 i 的正拉粘结强度, Mpa;

P ——试样 i 破坏时的荷载值, N;

A_{ai} ——金属标准块 i 的粘合面面积, mm²。

2) 试样破坏形式

(1) 内聚破坏: 分为基材混凝土内聚破坏和受检粘结材料的内聚破坏。后者可见于使用低性能、低质量的胶粘剂(或聚合物砂浆和复合砂浆)的场合;

(2) 粘附破坏(层间破坏): 分为胶层或砂浆层与基材混凝土之间的界面破坏及胶层与纤维复合材或钢板之间的界面破坏;

(3) 混合破坏: 粘合面出现两种或两种以上的破坏形式。

3) 破坏形式正常性判别

(1) 当破坏形式为基材混凝土内聚破坏, 或虽出现两种或两种以上的混合破坏形式, 但基材混凝土内聚破坏形式的破坏面积占粘合面面积 85% 以上, 均可判为正常破坏;

(2) 当破坏形式为粘附破坏、粘结材料内聚破坏或基材混凝土内聚破坏面积少于 85% 的混合破坏, 均应判为不正常破坏。

(3) 钢标准块与检验用高强、快固化胶粘剂之间的界面破坏, 属检验技术问题, 应重新粘贴; 不参与破坏形式正常性评定。

5.8 检验结果的合格评定

1) 组试验结果的合格评定, 应符合下列规定:

(1) 当一组内每一试件的破坏形式均属于正常时, 应舍去组内最大值和最小值, 而以中间三个值的平均值作为该组试验结果的正拉粘结强度 推定值; 若该推定值不低于现行国家标准《混凝土结构加固设计规范》GB 50367-2013 规定的相应指标(对界面胶、界面剂暂按底胶的指标执行), 则可评定该组试件正拉粘结强度检验结果合格;

(2) 当一组内仅有一个试件的破坏形式不正常, 允许以加倍试件重做一组试验。若试验结果全数达到上述要求, 则仍可评该组为试验合格组。

2) 检验批试验结果的合格评定应符合下列要求:

(1) 若一检验批的每一组均为试验合格组, 则应评该批粘结材料的正拉粘结性能符合安全使用的要求;

(2) 若一检验批中有一组或一组以上为不合格组, 则应评该批粘结材料的正拉粘结性能不符合安全使用要求;

(3) 若检验批由不少于 20 组试件组成, 且仅有一组被评为试验不合格组, 则仍可评该批粘结材料的正

拉粘结性能符合使用要求。

3) 试验报告的要求:

出具的试验报告应包括下列内容:

- (1) 受检胶粘剂、聚合物砂浆或界面剂的品种、型号和批号;
- (2) 抽样规则及抽样数量;
- (3) 试样制备方法及其养护条件;
- (4) 试件的编号和尺寸;
- (5) 试验环境的温度和相对湿度;
- (6) 仪器设备的型号、量程和检定日期;
- (7) 加荷方式及加荷速度;
- (8) 试件的破坏荷载及破坏形式;
- (9) 试验结果整理和计算;
- (10) 取样、测试、校核人员及测试日期。

【思考题】

- 1、碳纤维复合材的力学性能检验指标有哪些?
- 2、讨论碳纤维布拉伸性能试验,对仪器设备和试验环境有哪些要求?
- 3、碳纤维增强塑料纤维体积含量试验,有几种方法,简述各种方法试验步骤?
- 4、讨论纤维复合材正拉粘结强度项目的测定时,粘贴、喷抹质量检验的取样的具体要求有哪些?试验检测方法?
- 5、纤维复合材正拉粘结强度项目的测定时,对检验结果如何判定?规范标准有何要求?
- 6、粘钢加固其正拉粘结强度项目测定时,对检测结果如何判定?规范标准有何要求?
- 7、检测正拉粘结强度的计算方法?