

应用领域

高性能芳纶纤维/环氧树脂复合材料
在混凝土结构加固中的应用张国庆^{1*}, 游阳明²

(1. 广东工业大学材料与能源学院, 广州 510059; 2. 河北沧州师范专科学校, 沧州 060001)

摘要:介绍了用于混凝土结构加固的高性能芳纶纤维(Aramid)产品(Kevlar[®])及其与环氧树脂构成的复合材料的主要技术特性以及AFRP工法补强设计依据和施工方法。同时就该材料在我国首个实际工程项目-铁路湘黔线湘潭特大桥加固中的应用和补强加固效果进行了总结。

关键词:芳纶纤维; 纤维增强塑料; 补强

纤维增强塑料(FRP)用于混凝土结构加固的研究在近年来十分活跃。由于构成FRP的主要受力材料具有高强度、轻量性等特征,因此赋予了该类复合材料优异的补强加固效果。特别是采用具有良好混凝土渗透能力的环氧树脂来粘接纤维片材到混凝土表面,提高了建筑结构的耐久性和韧性。该类材料有如下特性:(1)所使用的FRP片是超高强度、轻质和耐腐蚀的,几乎不会增加构造物重量,也不会改变构造物形状;(2)浸胶FRP片是缠绕在混凝土建筑结构表面的,比传统的钢板加固更加简便快捷;(3)材料中含有防腐材料,可以用在许多严重腐蚀环境下,如盐腐蚀结构。FRP片中的高强纤维分两种:碳纤维(Carbon fiber)和芳族聚酰胺纤维(Aramid fiber),所构成的复合材料分别称为CFRP和AFRP。特别是后者非常适用于抗震加固,对于铁路桥梁抗震加固具有其它材料不具备的独特优势,因此本文予以重点推荐和介绍。

1 高性能芳纶纤维(Kevlar[®])的性能和特点1.1 芳纶纤维(Kevlar[®])性能

Kevlar[®]纤维是一种全芳族聚酰胺纤维(即芳纶纤维Aramid),由美国杜邦公司1974年开始率先商业化生产。最早开发目的主要是用于航天航空和军工领域,近年随着生产规模提高成本大大降低,使得用于土木行业成为可能。Aramid主要成分是对苯二甲酰对苯二胺聚合物(PPTA),其中既含脂肪族主链又含芳族主链,所以有牢固的分子结构。用于结构加固的材料由直径为12 μ m左右的单丝汇集在一起形成的多纤维片材构成。

该材料的主要性能为:高拉伸强度、高弹性模量、优良吸能性和减震性;耐磨、耐冲击、抗疲劳、尺寸稳定和耐化学腐蚀性;优良的绝缘性能;高耐热、低膨胀、低导热和高的抗切割强度等。该材料的部分技术参数见表1所示。

1.2 芳纶纤维(Kevlar[®])结构加固性能

采用高性能纤维Kevlar[®]对混凝土结构进行加固补强方法(AFRP工法)与传统加固技术相比具有强度高、重量轻等优点。由于纤维布的强度是钢材的5倍,密度却只有钢板的1/5,结构加固后所增加的附加荷重很小,对结构受力有利。芳纶纤维材料耐腐蚀好,可以经受酸、碱、盐的侵蚀,对于提高结构耐久

作者简介:张国庆(1963—),男,博士,副教授,主要从事纤维混凝土材料、混凝土结构加固维修材料研究。

* 通讯联系人。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

性十分有利,特别适合港工结构和腐蚀环境下的工业结构。

表 1 典型 Aramid 纤维(Kevlar®)单向片技术参数

Table 1 Specification of uni-directional aramid fiber sheet (Kevlar®)

规 格	单位重量 /(g·m ⁻²)	幅 宽 /cm	拉伸强度 /MPa	弹性模量 /GPa	设计屈服强度 /(tf·m ⁻¹)	厚 度 /mm
AK-40	280	10, 30, 50	2060	118	40	0.193
AK-60	415	10, 30, 50	2060	118	60	0.286
AK-90	623	10, 30, (50)	2060	118	90	0.430
AK-120	830	10, 30, (50)	2060	118	120	0.572

A—Aramid;K—Kevlar;宽:见表中;长:50m/卷

由于该加固技术的独特优势,进行加固时的施工非常简单、安全、无需大型机具,并且操作空间不受限制,其最小操作空间 20~30cm。此外高性能芳纶纤维为导电率极小的绝缘体,用于电气化铁路桥墩补强施工后,可避免雷电引起的破坏,同时可隔绝混凝土桩与海水间的化学作用,延缓结构内部钢筋锈蚀。

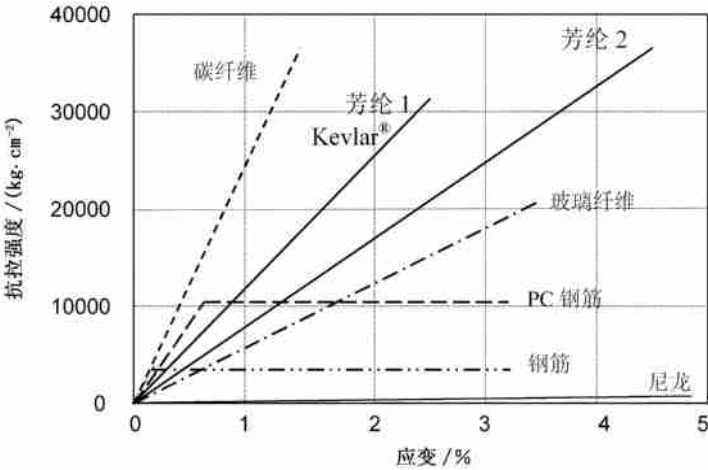


图 1 材料荷载-应变关系

Figure 1 Relationship of strain and tensile strength

纤维片材通过底胶(亦称亲和胶)及浸渍树脂与混凝土结构粘合并将结构包裹起来,硬化后构成复合材料与主体混凝土一道承担荷载。表 2 给出了构成复合材料体系的环氧树脂硬化后的指标。现场施工时所用底胶的作用是浸透混凝土,增强混凝土与浸渍树脂及纤维布的结合性。要求底胶与混凝土接触面粘结良好,无气泡、无空隙。高性能纤维布通过浸渍树脂与混凝土紧密粘贴后作为整体受力材料,提高了结构的抗弯曲、抗剪性能和抗疲劳性能,有效控制裂纹的发展。芳纶纤维布/环氧树脂整个复合体系的基本力学性能见表 3 所示。

表 2 树脂硬化后的指标

Table 2 Typical physical properties of resin after cured

项 目	规定值
比 重	1.15±0.10
抗压强度/ MPa	70.0 以上
压缩弹性模量/ MPa	1.5×10 ³ 以上
抗弯强度/ MPa	40.0 以上
张拉强度/MPa	30. 0 以上
拉伸剪切强度/ MPa	10.0 以上

表 3 芳纶纤维布浸透树脂硬化后的力学指标(试验值)

Table 3 Typical physical properties of aramid sheet/epoxy composite

试验项目	试验值
抗拉强度/mPa	4285(纤维布破坏)
搭接部分抗拉强度/mPa	4075(纤维布破坏)
与混凝土的粘结强度/mPa	3.5(混凝土破坏)

2 高性能纤维补强设计依据：

- 对混凝土结构进行补强加固的设计依据^[1]：
- 2.1 补强弯曲强度 M_{AFud}
- 2.2 补强剪切强度： $V_{AFyd} = V_C + V_S + V_{AFd}$
- 2.3 补强韧度： $U_{AFd} = 2.2 + 3.2 V_{AFyd} \cdot l_a / M_{AFyd}$
- 对结构断面进行破坏极限状态安全分析，判断设计补强断面力 R_{AFd} 及设计断面力 S_{rd} 是否满足下式，同时对结构韧性安全分析也用同样的方法

$$r_i \cdot S_{rd} / R_{AFd} \leq 1.0$$

式中， r_i 构造系数 1.0~1.2

$S_{rd} = \sum \{ r_a \cdot S(Fd) \}$

设计剪切力 V_{rd}

设计塑性率 U_{AFd}

设计弯矩 M_{rd}

$R_{AFd} = R_{(fd)} / r_b$

式中 r_b 一构件系数

$R_{(fd)}$ 一断面强度

3 补强加固方法及措施

3.1 表面打磨处理

首先对桥台碳化表面进行打磨处理。使用手提打磨机除去混凝土表面的涂层、油类及混凝土浮浆，清理出干净的混凝土表面。对于脱落剥离劣化处、裂纹较深处先注入环氧树脂腻子或用砂浆填充进行修补、磨平，并用水冲洗干净。

3.2 涂抹底胶层

待混凝土表面干透后，把调配好的底胶均匀的涂在混凝土表面上。

3.3 涂抹浸渍树脂并粘贴纤维布

待底胶固化到一定程度后开始进行粘贴纤维布施工。根据设计补强方案，先涂一层按比例调配好的浸渍树脂胶，再张贴纤维布，同时用专用工具压实并赶出底涂树脂与纤维布之间的空气，使纤维布完全被树脂胶浸透。确认纤维布已经充分浸透底涂树脂并指触硬化后，再在外层涂一层浸渍树脂。在外层浸渍树脂未硬化前应在其表面撒一层 1/4 粒米大小石英砂，以提高树脂表面与涂装砂浆之间的粘合性。根据结构受力需要，可以设计混凝土结构贴两层或多层纤维。其施工方法与第一层的施工方法相同。纤维布的粘贴应根据裂缝的走向及受力情况布置。等待浸渍树脂完全硬化后再进行表面水泥砂浆抹面，并且使砂浆颜色与原混凝土颜色保持一致。



图 2 湘潭特大桥桥墩开裂形状图
Figure 2 Cracks distribution in Xiangtan bridge

4 湘潭特大铁路桥补强实例

湘潭特大铁路桥位于湘黔线 K20+208 处,该桥始建于 1936 年,于 1953 年建成通车,至今已有六十多年的历史。由于桥梁的建成年代悠久,混凝土表面碳化十分严重。上世纪 80 年代末该桥东桥台就曾产生裂纹,1990 年对桥梁台帽进行了包箍加固,但效果不好。随着湘黔线列车的行车速度提升,2000 年该桥再次产生裂纹,并呈现愈演愈烈的趋势。其中东台帽(帽梁)产生的水平裂纹最长达 4.5m,宽达 1~2mm,深达 3~4mm。帽石(帽梁)及下台柱同时也产生多处裂纹(见图 2),严重威胁着行车安全,管理部门不得不进行限速行驶,并派人值守。

根据对湘潭特大桥的实地考察论证、分析,确定采用高性能 Aramid 对桥梁进行结构补强,以提高结构强度,保证大桥的安全使用。该桥的补强加固设计方案如图 3 所示。

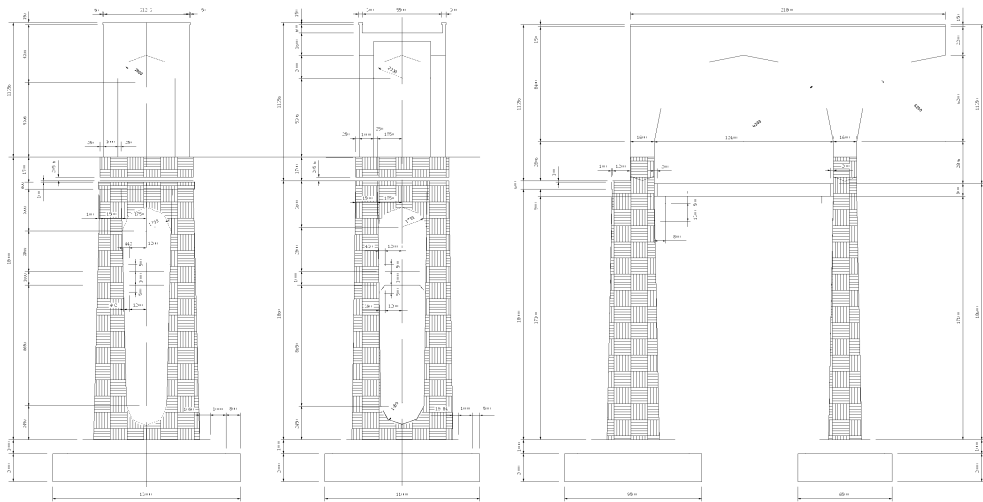


图 3 湘潭特大桥补强设计图
Figure 3 Reinforcement design of Xiangtan Bridge

施工要点:^[2]

- (1) 应确认涂底胶前混凝土表面确实已经干燥。因雨水或露水每一层胶表面可能含有一定水份,应先除去附着水,方能进行下一道工序;
- (2) 贴纤维布时要赶出底涂树脂与纤维布之间的空气使其密实;
- (3) 施工中保证纤维布与混凝土之间的粘接质量最为重要。如果粘接面积小于 90%则判定无效,需重新施工;
- (4) 浸渍树脂标准用量:底层 0.20~0.22kg/m²,上层 0.40~0.44kg/m²;
- (5) 搭接长度:重叠搭接长度大于 20cm。

5 结语

从现场施工及补强加固后的效果来看,用高强芳纶纤维布(Kevlar®)对结构进行补强,具有工期短,施工条件要求低,施工简单,可操作性强等施工优点。补强后结构表面跟新混凝土表面一样,补强结构增加厚度几乎可以忽略不计,而补强后的结构受力能力大大提高,包括结构的抗弯、抗剪、抗冲击疲劳性能。根据计算,补强后的结构受力能力提高了 1.5~2.5 倍。加固后四年来的运行实际情况说明本工程达到设计要求。实践表明,运用高性能的芳纶纤维布(Kevlar®)/环氧树脂复合材料对混凝土结构进行补强加固是一种安全、方便、经济、可靠的方法,其应用前景将会是非常广泛的。

(下转第 106 页)

Discussion on the Teaching Way for the Course of Polymer Physics

LIU Yin-feng, LIU Li, WU Ruo-feng

(Department of Polymer Materials, Shanghai University, Shanghai 201800, China)

Abstract: The characteristics of polymer physics has recently challenged the teaching way because it consists of various contents related to the knowledge both of physics and chemistry. The acceptors will face to both science and engineering requirements from the industries or research institutions when they graduate. And since the polymer science is a new established science with less than 100 years history, there are more and more achievements in polymer physics that should be supplied to the teaching course. We suggest that the teaching material should be reorganized bilingually with case analysis and the teaching process should be grasped the main line of the relationship between structures and properties. Good teaching results will be achieved when the interactive way is conducted, expression is modified, the achievements especially by ourselves are introduced, and various teaching aids and multimedia courseware are managed.

Key words: Polymer physics; Teaching way; Reform; Education

(上接第 101 页)

参考文献:

- [1] M. G. N. 普瑞斯特雷(美) F. 塞勃勒(美) G. M. 卡尔维.《桥梁抗震设计与加固》. 1997, 7.
[2] 《アラミド繊維シートによる道路高架橋柱の耐震補強工法》. 施工指針. 道路合技研究所, 平成 8 年 11 月.

Application of High Performance Aramid Fiber/Epoxy Composite Materials in the Reinforcement of Concrete Structure

ZHANG Guo-qing¹, YOU Yang-ming²

(1. Faculty of Materials and Energy, Guangdong University of Technology Guangzhou 510090, China;

2. Teacher's School of Cangzhou, Hebei, Cangzhou 061001, China)

Abstract: The technical specifications of aramid fiber sheet and fiber/epoxy composite materials used for reinforcement of concrete structure are generally introduced in the present paper. The basis for design and construction procedure of AFRP technology are also given at the same time. As the first application case of this composite material and AFRP technology in civil engineering of China, the reinforcement of Xiangtan huge bridge in Hunan-Guizhou railway is summarized to show the advantage in construction and the perfect strengthening results.

Key words: Aramid fiber; FRP; Reinforcement