

文章编号: 1006-4710(2015)02-0164-07

# 双向荷载作用下 FRP 复合材料 横担体系受力性能试验研究

马辉<sup>1</sup>, 刘云贺<sup>1</sup>, 郭宏超<sup>1</sup>, 王振山<sup>1</sup>, 刘明放<sup>2</sup>, 谭蓉<sup>2</sup>

(1. 西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048; 2. 陕西省电力设计院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 为了解 FRP 复合材料横担在双向挂线荷载作用下的力学性能, 本文对其进行了模拟双向荷载作用下的足尺试验研究, 观察了复合横担试验现象, 分析了复合横担整体受力与位移关系曲线, 并对横担梁和拉索的 FRP 复合材料及钢套管的应变分布规律进行了深入分析。研究结果表明: 复合横担体系在设计荷载作用下整体变形明显, 横担梁中部截面外鼓变形明显, 拉索侧向位移较大; 复合材料层间发生轻微撕裂现象, 复合材料与钢套管之间连接可靠, 未发生粘结滑移破坏; 荷载与位移之间基本呈线性变化, 曲线没有出现明显的突变或拐点, 复合横担基本处于弹性工作状态, 表现出较好的受力性能; 横担梁复合材料应变大于其钢套管应变, 横担梁中部截面应变最大; 拉索复合材料应变随荷载的增大而迅速增大, 且远大于其钢套管的应变; 拉索受力大于横担梁, 需对拉索采取一定的增强措施, 以保证横担体系的整体受力要求。复合横担试验荷载达到了工程设计要求。

**关键词:** 横担; FRP 复合材料; 双向荷载; 受力性能; 输电塔架

**中图分类号:** TM753

**文献标志码:** A

## Experimental research on mechanical properties of cross arm system using FRP composite material under two-way loads

MA Hui<sup>1</sup>, LIU Yunhe<sup>1</sup>, GUO Hongchao<sup>1</sup>, WANG Zhenshan<sup>1</sup>, LIU Mingfang<sup>2</sup>, TAN Rong<sup>2</sup>

(1. Faculty of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Shaanxi Electric Power Design Institute, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** In order to understand the mechanical properties of FRP composite cross arm under bi-directional hanged line load, the full scale experimental study of the FRP composite cross arm under two-way loads is performed. The experiment phenomenon of the composite cross arm is observed in detail. The resultant force-displacement curves and the strain distribution laws of composite material and steel casing in the cross arm beam and inhaul cables are also analyzed in depth. The results show that the overall deformation of cross arm system under the designed loading is very obvious. The middle cross-section's deformation of the cross arm beam is larger than other parts in this test. Meanwhile, the lateral displacement of inhaul cables is also obvious. A slight avulsion phenomenon between the FRP material layers has been observed. And the bond-slip failure has not happened between the composite materials and the steel casing, which reveals that the connection area is reliable. The linear variation is obtained in the load and displacement curve and it does not appear to have obvious mutation or an inclined point in the curve, which shows that the composite cross arm is in elastic working state and shows a good mechanical performance under two-way loads. The strain values of composite materials is larger than that in the steel casing in the cross arm beam and the middle cross-section's strain of the cross arm beam is the largest in all the strain values. In addition, the strain values of composite materials in the inhaul cables increase with an increase in magnitude of test loads, which is larger than the steel

**收稿日期:** 2014-10-09

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51408485); 陕西电力设计院资助项目。

**作者简介:** 马辉, 男, 讲师, 博士, 研究方向为钢与混凝土组合结构及再生混凝土结构。E-mail: mahuiwell@163.com。

casting' strain. According to the test, the load that the inhaul cable suffered is larger than that of the cross arm beam. Therefore, in order to ensure the bearing capacity of cross arm system, some strengthening measures should be adopted in the transmission tower. The test load of cross arm has met the requirements of engineering design and the research result has a great significance for the application of composite cross arm.

**Key words:** cross arm; FRP composite material; multi-way loading; mechanical properties; transmission tower

随着我国社会经济的持续发展,越来越多的新型材料广泛应用于各项建设中,取得了良好的社会效益。目前,在我国输电塔架中大部分采用的材料是钢材,即钢结构输电塔架<sup>[1]</sup>。由于钢材的缺点,导致这种输电塔架耐久性、耐腐蚀等性能不足,严重地制约了我国电力事业的发展,因此,使用新型材料是其进一步发展的必经之路。FRP 是一种新型复合材料,由纤维增强环氧树脂制成,具有轻质高强、耐久性、耐腐蚀以及绝缘性能好等优点<sup>[2-6]</sup>,具有广泛的应用前景。基于 FRP 材料优点,将其应用于输电塔架中是未来发展的方向之一。事实上,不少学者已对 FRP 材料在塔架中的应用进行初步研究。刘汉立等人<sup>[1]</sup>根据杆塔结构的发展和需求等几个方面对复合材料输电杆塔进行了介绍;张平等人<sup>[7]</sup>研究了输电杆塔用 GFRP 复合材料在热氧老化环境下的抗老化性问题,结果表明热氧老化环境对 GFRP 材料性能有明显影响,使其强度明显降低;施荣等人<sup>[8]</sup>通过力学知识对 750 kV 输电杆塔复合横担选型及承载力进行了研究,并与试验结果进行了对比,验证了该复合横担塔设计较为合理。上述研究为 FRP 材料的推广应用奠定了一定的基础,但大部分研究都是从理论和有限元分析入手,缺少试验研究,尤其是足尺试验研究,故有必要对其开展试验研究。为进一步了解 FRP 复合材料塔架的结构性能,特别是复合材料横担体系在多向荷载作用下的受力性能,本文对双向荷载作用下 FRP 复合材料横担体系受力性能进行了足尺试验。在此基础上,深入研究复合横担梁及拉索的受力性能特征,研究结论对进一步推动 FRP 复合材料在我国输电塔架结构中的应用奠定了基础。

## 1 工程背景

本项目依托陕西省电力设计院 330 kV 输电线路项目,该工程中线路复合杆塔塔头部分(包括横担等)采用 FRP 复合材料,输电塔腿、塔身及地线支架等均采用钢结构,图 1 为该输电塔构架三维图。图 2~图 3 为横担体系节点区域连接方式,其中横担梁和拉索采用钢套管式节点,采用胶接、螺栓及卸扣等混合连

接方式,FRP 复合材料与金属件(钢套管等)之间采用胶接,其余构件之间采用螺栓或卸扣连接。图 4 为该 330 kV 输电塔构架图。针对复合横担特点,本文选择具有两个挂线端的 B<sub>1</sub> 横担作为研究对象。

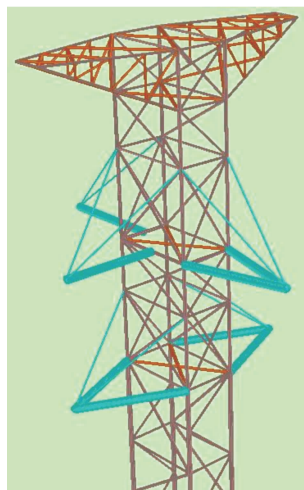


图 1 塔架三维模型图

Fig. 1 The three dimensional model of tower

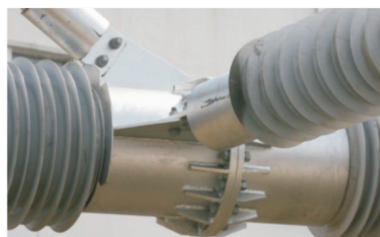


图 2 节点连接形式

Fig. 2 Connection form of node



图 3 套管式节点示意图

Fig. 3 The schematic diagram of casing node

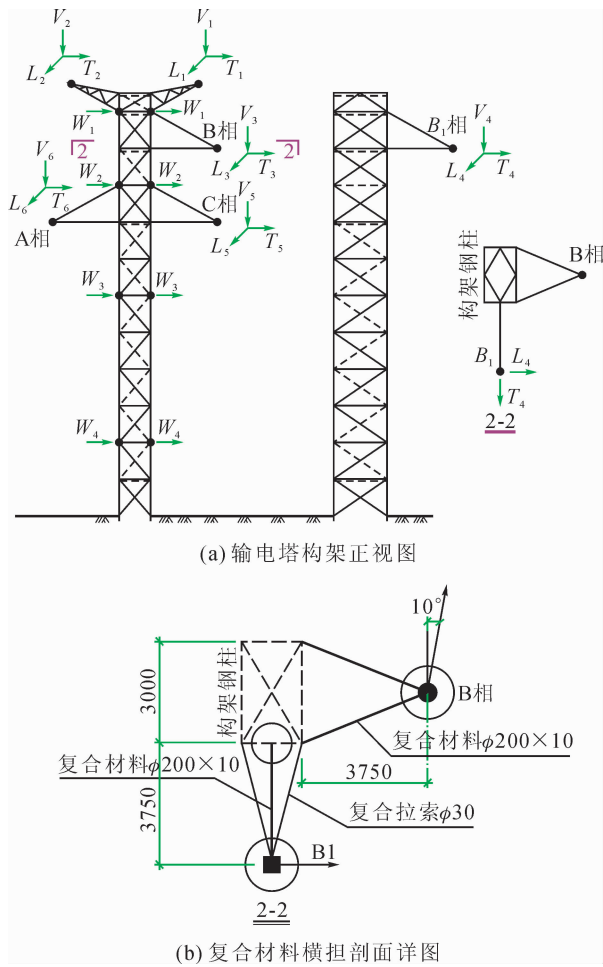


图4 复合材料输电塔构架示意图

Fig. 4 The structure diagram of composite transmission tower

## 2 试验概述

为了解  $B_1$  相复合材料横担的力学性能,本文结合该横担的受力特征,对其进行双向荷载作用下足尺试验研究。依据该试验,观察分析  $B_1$  相横担的试验过程及试验现象,重点分析该横担的荷载-位移关系曲线、横担梁及拉索各材料的应变分布规律等。在此基础上,提出 FRP 复合材料横担相关设计建议,研究结论可为该复合材料横担的推广应用提供技术参考。

### 2.1 复合材料横担试件

在实际工程中,  $B_1$  相横担具有两个挂线端,承受两个相互垂直的荷载作用,如图 4 所示,  $B_1$  横担试件由江苏神马电力股份有限公司制作完成。该试件由一个横担梁和两个拉索组装而成,拉索与横担梁采用卸扣连接,其中横担梁和拉索直径分别为 200 mm、30 mm。横担体系在  $V_4$  方向的高度为 2.0 m,  $T_4$  方向的水平长度为 3.75 m;两拉索间距为 1.8

m。采用 FRP 复合材料,其主要力学性能指标见表 1。

表 1 FRP 复合材料主要力学性能指标  
Tab. 1 The main mechanical performance indexes of FRP composite material

力学性能参数	标准值
纵向抗拉强度	400 MPa
纵向拉伸模量	35 GPa
横向抗拉强度	48 MPa
横向拉伸模量	5 GPa
纵向抗压强度	400 MPa
纵向压缩模量	35 GPa
横向抗压强度	35 MPa
横向压缩模量	7 GPa
纵向弯曲模量	18 GPa
纵向弯曲强度	400 MPa
横向弯曲强度	30 MPa
横向弯曲模量	5 GPa
纵横剪切模量	3 GPa
剪切强度	9 MPa
泊松比	0.25~0.35

### 2.2 确定试验荷载

本次试验荷载由实际工程设计荷载确定(见表 2)。试验荷载主要包括最大设计荷载和富余荷载,其中富余荷载按最大设计荷载的 4 倍考虑,即富余度系数为 4.0。

表 2 横担试件试验荷载汇总表  
Tab. 2 The summary of test loads for cross arm

加载试件	受力方向	最大设计荷载/kN	合力/kN	富余度荷载/kN	合力/kN
$B_1$ 相横担	$V_4$	12.00		48.00	
	$T_4$	0.00	12.53	0.00	50.11
	$L_4$	3.60		14.40	

考虑到  $B_1$  横担在试验中要保证两个不同方向荷载同步加载较难实现,因此,为简化试验难度,本次试验采用各向荷载的合力对横担试件进行加载,合力按分力合成原则得到,  $B_1$  相横担的合力空间位置如图 5 所示,其中加载合力与  $xoz$  平面 ( $V_4$ - $L_4$  平面)、 $zoy$  ( $V_4$ - $T_4$  平面)、 $xoy$  平面 ( $T_4$ - $L_4$  平面) 的夹角分别为  $0^\circ$ 、 $17^\circ$ 、 $73^\circ$ 。

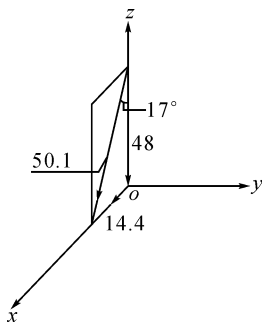


图 5 横担试验荷载合力

Fig. 5 The resultant force of cross arm

### 2.3 横担试件连接及安装

结合实际输电塔架工程情况,将复合材料横担梁和拉索按设计连接方式组装成为横担体系,然后通过连梁将其整体安装在钢架反力墙上。在横担试件安装之前,根据试件几何尺寸,预先加工横担试件与反力墙的连接装置,最终实现横担体系的试验安装。图 6 为 B<sub>1</sub> 相复合横担足尺试验现场安装照片。



图 6 B<sub>1</sub> 相复合材料横担试验安装现场

Fig. 6 On-site installation of B<sub>1</sub> composite cross arm

### 2.4 测试方案及加载制度

#### 2.4.1 测试方案

图 7 和图 8 为横担梁和拉索中钢套管和复合材料应变测点布置。横担梁两端钢套管中部对称截面各布置 2 个应变片,在其 FRP 复合材料均匀对称布置三道应变,共 6 个应变片。拉索的应变片布置方式与横担梁应变片布置方式相同,每个拉索的应变片共 10 个。横担梁和拉索的应变片均采用等间距布置,且在同一截面对称布置两个应变片,以测试该截面的应变分布规律。横担试件各个截面的应变数据均由 TDS-303 数据采集仪自动采集。

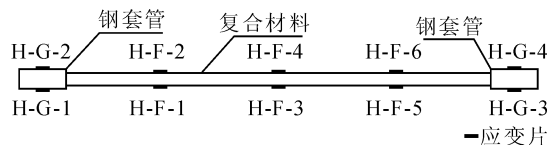


图 7 横担梁应变片布置及编号

Fig. 7 The strain gauges of cross arm beam

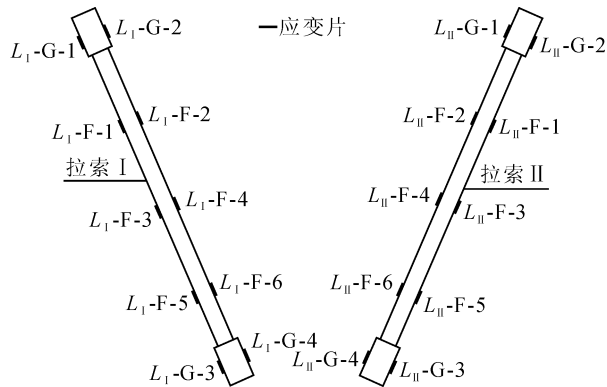


图 8 拉索应变片布置及编号

Fig. 8 The strain gauges of inhaul cables

#### 2.4.2 加载制度

由于本次试验采用合力形式对横担试件进行试验加载,根据合力的大小和方向对试验加载方向进行定位,并采用 4 个定滑轮改变合力的传递方向,最终通过钢丝水平连接到 MTS 电液伺服作动器上,从而实现加载,其中钢绞线直径为 24 mm,定滑轮的额定荷载为 30 t,钢丝及定滑轮连接布置如图 6 和图 9 所示。为测量复合横担加载端的合力与位移变化情况,本次试验在定滑轮与试件加载端的连接钢丝之间布置 50 t 拉压力传感器,并且在横担试件加载端的合力方向布置相应的位移计,钢丝末端与 MTS 连接作动器,如图 9 和图 10 所示。



图 9 钢丝末端与 MTS 连接

Fig. 9 The connection between the wire and MTS



图 10 力传感器及位移计布置

Fig. 10 The layout of force sensors and displacement meter

本试验加载共分为两个加载阶段,第一阶段为从开始加载至最大设计荷载,其最大值为 12.53 kN;第二阶段为从最大设计荷载加载至富余度荷载,其最大值约为 50.11 kN,试验荷载均由 MTS 电液伺服系统分级施加。结合上述试验荷载加载要求,复合横担试件的加载制度大致如下:第一加载阶段中,每级试验荷载为最大设计荷载的 10%;第二加载阶段中,在 80% 富余度荷载之前,每级试验荷载取设计富余度荷载的 10%,之后每级试验荷载取设计富余度荷载的 5%,直至试验结束。

### 3 复合横担体系试验过程及现象

本次复合横担受力性能足尺试验在西安理工大学结构实验室进行。试验加载之前,对试验仪器进行校核,以保证其正常工作;同时对横担试件进行预先加载,使横担中各组成构件之间连接拉紧,以保证荷载的传递。加载后,采用近距离拍照、观测及现场记录等方法对试件的试验过程及现象进行观察分析,图 11 为  $B_1$  相横担的试验现象。

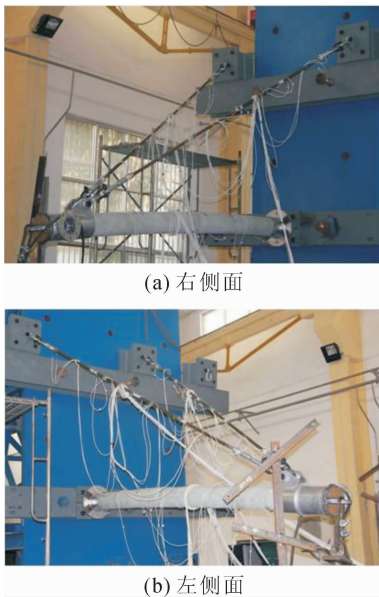


图 11  $B_1$  相复合材料横担试验现象  
Fig. 11 The experiment phenomenon of  $B_1$  composite cross arm

该试验过程可大致叙述如下。

1) 加载初期,横担试件无明显试验现象,其各截面应变逐渐增大,但应变值很小,横担梁及拉索均处于弹性状态,即应变与荷载之间呈线性变化规律;当荷载加载至 25 kN 时,横担试件发出轻微的撕裂声响,应变值增加较快,试件整体位移变形逐渐增大。

2) 当试验荷载加载至 45 kN 时,横担试件发生

数次撕裂声响,表明试件内力增加,其应变值增大;横担梁复合材料中部截面略有外鼓,变形较为明显,说明横担梁中部受力最大,这主要由于横担梁在荷载作用下主要处于受弯状态,使得横担梁中部截面受力变形最大,从而导致中部截面产生外鼓现象。此外,拉索在荷载作用下基本处于轴向受力状态,其各截面的应变随荷载的增大而不断增大,试件整体位移变形较为明显。

3) 加载至约 55 kN 时,横担试件发出数次清脆的撕裂声响,横担梁中部外鼓变形明显;横担梁的复合材料表面出现细微撕裂现象,此时横担梁各截面的应变迅速增加;拉索各截面应变随荷载的增加迅速增加,试件整体位移变形很明显。

4) 加载至约 65 kN 时,横担试件仍伴随有清脆的撕裂响声,横担中部外鼓变形继续增大,且现象十分明显;复合材料面层撕裂现象持续发生且伴随有轻微撕裂声;试件整体位移变形十分明显。

5) 加载至约 75 kN 时,横担整体位移变形进一步增大,横担梁中部截面变形十分明显。此时,试验荷载已到横担最大设计荷载和富裕度荷载,结束试验。

## 4 横担试验结果分析

### 4.1 横担荷载-位移曲线

图 12 为  $B_1$  相复合横担试件的荷载-位移关系曲线。由图 12 可知,随着位移的增加,横担试件的承载力逐渐增大,且试验荷载与位移变形之间基本呈线性变化规律,曲线在试验荷载加载范围内没有出现明显的突变或拐点,表明  $B_1$  相复合横担试件在试验荷载作用下基本处于弹性工作状态,表现出良好的受力性能。试验荷载大小已到达其最大设计荷载和富裕度设计荷载的要求,其富裕度系数接近于 6.0,大于该工程设计规定的富裕度系数 4.0,达到了复合横担在双向荷载作用下足尺试验研究目的,该横担满足实际工程需要,可应用于输电塔架结构中。

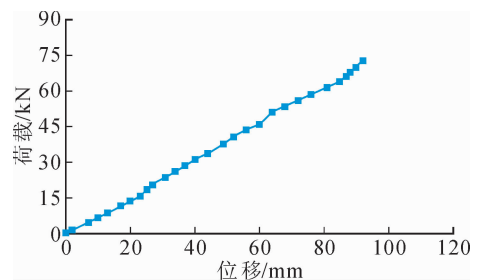


图 12 横担试件荷载-位移关系曲线  
Fig. 12 The load-displacement curve of cross arm

## 4.2 横担梁及拉索荷载-应变曲线

### 4.2.1 横担梁荷载-应变曲线

横担梁中钢套管和复合材料各典型截面的荷载-应变曲线如图 13 和 14 所示。

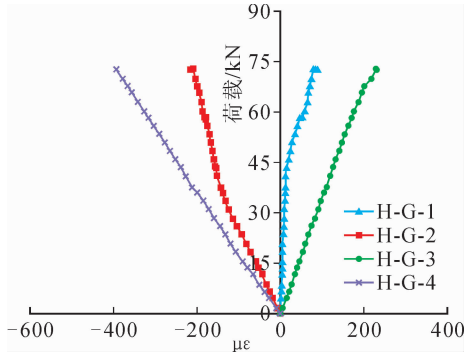


图 13 横担梁中钢套管各截面荷载-应变曲线  
Fig. 13 The load and strain curves of section of steel casing in the cross arm

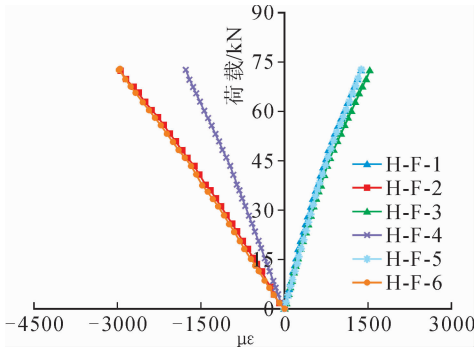


图 14 横担梁中 FRP 复合材料各截面荷载-应变曲线  
Fig. 14 The load and strain curves of section of FRP composite material in the cross arm

由图 13~图 14 可得出复合横担梁各典型截面应变变化具有如下特征。

1) 横担梁的钢套管应变值很小,钢套管最大应变值约为  $400 \mu\epsilon$ ,远低于其屈服应变,且荷载与应变呈线性变化规律,说明钢套管处于弹性受力阶段。同时也表明,加载端处的横担梁钢套管应变值大于另一端横担梁钢套管的应变值,即加载端一侧的钢套管在双向荷载作用下受力较大。

2) 测点位置越靠近横担梁加载端,则横担梁复合材料应变值越大。横担梁复合材料的最大应变值大于  $3000 \mu\epsilon$ ,明显大于钢套管的应变,表明横担梁复合材料在双向荷载作用下为主要受力部位。在整个试验加载过程中,横担梁复合材料仍处于以弹性受力为主,未进入其深度塑性阶段。

由上述分析可知,钢套管应变值较小,其应变随荷载的增大而增大;复合材料的应变值较钢套管大,复合材料同一截面上、下测点的应变基本一致,且加

载端处复合材料应变最大。总体上看,横担梁处于弹性受力状态,表现出良好的受力性能。

### 4.2.2 拉索荷载-应变曲线

$B_1$  相横担中拉索 I 和拉索 II 的位置如图 8 所示,拉索 I 中各典型截面的荷载-应变曲线如图 15 和 16 所示。拉索 II 各典型截面的荷载-应变曲线如图 17 和 18 所示。由图 15~图 18 可知,复合横担体系中拉索的各典型截面应变分布具有如下特征。

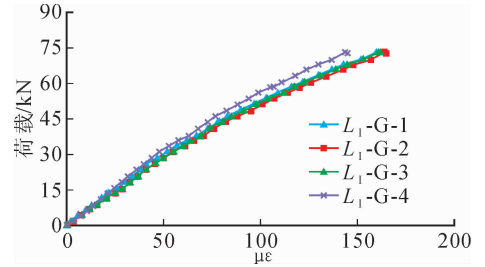


图 15 拉索 I 钢套管各截面荷载-应变曲线  
Fig. 15 The load and strain curves of section of steel casing in the inhaul cable I

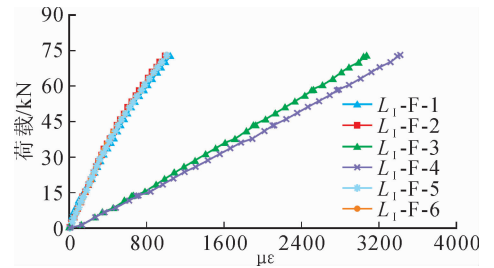


图 16 拉索 I 复合材料各截面荷载-应变曲线  
Fig. 16 The load and strain curves of section of FRP composite material in the inhaul cable I

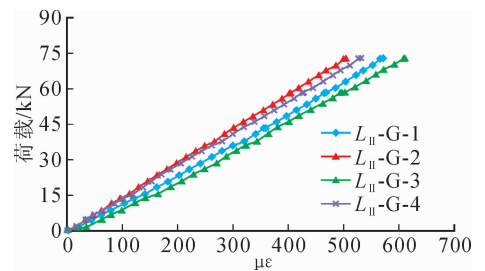


图 17 拉索 II 钢套管各截面荷载-应变曲线  
Fig. 17 The load and strain curves of section of steel casing in the inhaul cable II

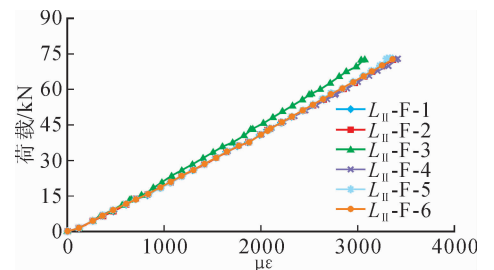


图 18 拉索 II 复合材料各截面的荷载-应变曲线  
Fig. 18 The load and strain curves of section of FRP composite material in the inhaul cable II

1) 在双向荷载作用下,在同一拉索构件中,越靠近试件加载端的钢套管应变值越大,且在同一截面上、下测点钢套管应变基本相同,分布较为均匀。两个拉索的钢套管应变值较小,其应变最大值约为  $600 \mu\epsilon$ ,远未达到其屈服状态,且应变与荷载之间近似呈线性变化,表明拉索钢套管近似处于弹性受力状态,表现出良好的工作性能。

2) 每个拉索中部复合材料应变最大,越靠近两端的复合材料应变越小,且同一截面上、下测点应变值基本一致,表明截面应变分布均匀。拉索复合材料的应变值远大于拉索钢套管应变值,两个拉索中复合材料最大应变值为  $3\ 600 \mu\epsilon$ ,该值大于横担梁复合材料应变值,表明试件在双向荷载作用下,拉索构件的受力大于横担梁。拉索复合材料应变与荷载近似呈正比例关系,即复合材料处于弹性工作状态,表现出良好的受力性能。此外,拉索 II 复合材料的应变大于拉索 I,这主要是由于横担试件在双向荷载作用下拉索 II 受力大于拉索 I 受力导致的。总体上看,与横担梁相比,拉索的侧向变形较大,表明拉索在多向荷载作用下较横担梁容易发生破坏。

从上述分析可知,在双向荷载作用下,横担梁和拉索近似呈弹性受力阶段,表现出良好的工作状态。满足实际工程设计要求。此外,由于拉索受力最大,故须对其采取加强措施以提高横担体系的受力性能。

## 5 结 论

本文对  $B_1$  相复合材料横担体系进行了双向荷载作用下足尺试验研究,观察其试验过程及现象,分析复合横担梁及拉索的应变特征,研究复合横担体系的受力性能特征,得到以下主要结论。

1) 随着位移的增加,复合横担的承载力逐渐增大,荷载与位移之间基本呈线性变化规律,试验曲线没有出现明显的突变或拐点,表明  $B_1$  相复合横担在双向荷载作用下基本处于弹性工作状态,表现出较好的受力性能。

2) 复合横担梁中部外鼓变形明显,复合拉索侧移变形较大。复合材料与钢套管之间连接可靠,未出现粘结强度破坏,满足荷载传递要求。FRP 复合材料在双向荷载作用下出现轻微撕裂现象,但复合材料层间未发生粘结滑移破坏,可共同抵制外荷载作用。

3) 复合横担梁以受弯状态为主,横担梁中 FRP 复合材料应变远大于钢套管应变,横担梁中部截面应变最大,即该部位受力最大;拉索构件以受拉状态为主,复合材料应变随荷载的增大而迅速增大,且远大于拉索钢套管的应变。

4) 在双向荷载作用下横担梁的应变明显小于拉索,即拉索受力大于横担梁,故在实际工程设计

中,需对拉索采取一定的增强措施,以保证复合横担体系的整体承载力。

5) 复合横担试验荷载达到了工程最大设计荷载和富裕度荷载要求,富裕度系数约为 6.0,大于该工程设计规定富裕度系数 4.0,表明该复合横担能够满足实际工程设计要求,可应用于输电塔架结构中。

## 参考文献:

- [1] 刘汉立. 复合材料输电杆塔的研究与应用[J]. 纤维复合材料, 2011, 38(1): 38-40.  
Liu Hanli. Research and application of composite transmission poles and towers [J]. Fiber Composites, 2011, 38(1): 38-40.
- [2] 赵慧敏, 王俊, 刘伟庆, 等. 氯离子与荷载耦合条件下玻璃纤维增强复合材料耐久性试验研究[J]. 工业建筑, 2013, 43(10): 102-105.  
Zhao Huimin, Wang Jun, Liu Weiqing, et al. Experimental study of durability of GFRP under coupling effect of chloride ion with loading [J]. Industrial Construction, 2013, 43(10): 102-105.
- [3] 曾智, 李玉龙, 郭亚洲, 等. 两种典型铺层玻璃纤维复合材料的拉伸力学行为[J]. 航空材料学报, 2013, 33(3): 74-80.  
Zeng Zhi, Li Yulong, Guo Yazhou, et al. Tension mechanical behavior of two angle-ply of glass-fiber reinforced composites [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2013, 33(3): 74-80.
- [4] 张斌, 郭章新. 复合材料输电线杆应力-应变关系研究[J]. 电网与清洁能源, 2008, 24(4): 27-30.  
Zhang Bin, Guo Zhangxin. Study on stress-strain of composite material transmission pole [J]. Power System and Clean Energy, 2008, 24(4): 27-30.
- [5] 刘为. 多因素条件下 GFRP 腐蚀性能演变规律的研究[J]. 纤维复合材料, 2009, (2): 53-55.  
Liu Wei. Research on corrosive evolution rules of GFRP under multi-factor conditions [J]. Fiber Composites, 2009, (2): 53-55.
- [6] 李趁趁, 高丹盈, 黄承逵. 碳纤维与玻璃纤维增强聚合物复合材料耐久性[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(2): 150-154.  
Li Chenchen, Gao Danying, Huang Chengkui. Durability of carbon and glass fiber reinforced polymer composites [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(2): 150-154.
- [7] 张平, 龙玉成, 孙青, 等. 输电杆塔玻璃钢纤维增强复合材料抗老化性试验研究[J]. 电力建设, 2012, 33(9): 67-71.  
Zhang Ping, Long Yucheng, Sun Qing, et al. Experimental study on ageing resistance of glass fiber reinforced polymer in transmission tower [J]. Electric Power Construction, 2012, 33(9): 67-71.
- [8] 施荣, 郁杰, 朱勇, 等. 750 kV 输电塔复合横担选型及承载力研究[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(9): 23-26.  
Shi Rong, Yu Jie, Zhu Yong, et al. Research on bearing capacity and composite cross arm selection for the 750 kV transmission tower [J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(9): 23-26.