

# CFRP 增强铝合金组合杆件的受力性能与设计方法

冯 鹏<sup>1</sup>, 林旭川<sup>1</sup>, 钱 鹏<sup>2</sup>, 叶列平<sup>1</sup>

(1. 清华大学 土木工程系, 北京 100084; 2. 华东建筑设计研究有限公司, 上海 200002)

**摘 要:** 铝合金和 CFRP(碳纤维增强复合材料)都具有轻质、耐腐蚀性强、无磁性等优点,将两者组合应用于结构中既能发挥出它们共同的优势,又能相互弥补各自不足。本文以轴心受力为主的杆系空间结构为背景,对圆管截面和方管截面的 CFRP 增强铝合金构件的受力性能进行了系统的试验研究,包括 18 个短管轴压试验,15 个长管轴压稳定试验和 6 个弯曲试验。基于试验进行了理论分析,提出了基于铝合金名义屈服强度的组合构件轴心受压承载力计算公式和组合管局部屈曲承载力计算公式;并提出了组合构件抗弯刚度的计算方法;还比较了多个计算模型,建议了组合长管轴压稳定承载力的计算方法。这些设计计算方法,为合理应用 CFRP 增强铝合金组合构件建造大跨空间结构提供了设计依据。

**关键词:** FRP(纤维增强复合材料); 铝合金; 屈曲; 抗弯刚度; 组合构件

**中图分类号:** TU 395, TU 318.9

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1671 - 9379(2008)01 - 0034 - 10

## Mechanical Behavior and Design Methodology of CFRP Strengthened Aluminium Members

FENG Peng<sup>1</sup>, LIN Xuchuan<sup>1</sup>, QIAN Peng<sup>2</sup>, YE Lieping<sup>1</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. East China Architectural Design & Research Institute Co. Ltd, Shanghai 200002, China)

FENG Peng:fengpeng@tsinghua.edu.cn

**Abstract:** Light-weight, anti-corrosive and nonmagnetic are the common advantages of aluminium and CFRP (carbon fiber reinforced polymer). It can make their advantages more effective and cure their shortages each other to combine them together as a structural member. CFRP strengthened aluminium hybrid pipes and square tubes, which are to be used as axial loaded members in spatial structures, are investigated by a series of experiments and theoretical analysis on 18 axial compressed short columns, 15 axial compressed long columns and 6 flexural specimens. Based on the results of the analysis of the tests, the formulae of the axial compressive strength of the hybrid members is presented, which is related to the nominal yield strength. And the formula for the local buckling strength and the flexural stiffness are also proposed. By comparing the existed approaches, an approach to determine the stability factors of hybrid member is proposed. All above as the methodology on the design of CFRP strengthened aluminium hybrid members for long-span spatial structures is established.

**Keywords:** FRP (fiber reinforced polymer/plastic); aluminium; buckling; flexural stiffness; hybrid member

铝合金与 FRP(纤维增强复合材料)作为两种新型结构材料,在结构工程领域得到了广泛的应用<sup>[1,2]</sup>,我国专

收稿日期:2007 - 06 - 08;收到修改稿日期:2007 - 08 - 17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50608047)

作者简介:

冯 鹏(1977 - ),男,博士,讲师,主要从事新型轻质结构及 FRP 在工程结构中的应用方面的研究。

E-mail:fengpeng@tsinghua.edu.cn.

林旭川(1984 - ),男,硕士研究生。主要从事 FRP 在工程结构中的应用方面的研究。

门针对这两种材料的结构设计规范《铝合金结构设计规范(征求意见稿)》和《纤维增强复合材料工程应用技术规范(征求意见稿)》分别已初步编制完成。这两种材料在性能上具有许多类似的优势,如:自重轻、耐腐蚀、免维护、无磁性和易于成型等,将它们组合在一起使用时不会使这些优势丧失,还能相互弥补各自在性能上的一些不足:FRP 一般为线弹性、脆性,在结构中不利于内力重分布,而铝合金具有一定的延展性;FRP 受力呈各向异性,受力方向复杂的节点处很难处理,而铝合金相对较易于连接;但铝合金的弹性模量和强度较低,而 FRP,尤其是 CFRP(碳纤维增强复合材料),沿纤维方向的弹性模量和强度相对较高。因此,提出将两者组合形成 CFRP 增强铝合金构件,既可以获得较高的刚度和承载力,又具有一定的延性。

CFRP 增强铝合金组合构件与全 FRP 构件相比,具有明显的经济优势和良好的延性;与纯铝合金结构相比,能够减轻结构自重并在保证延性的前提下具有更高的刚度和承载力。因此,这种组合构件更适合用于大跨度的桥梁、空间结构以及“可动”结构。而 CFRP 和铝合金均有良好的耐腐蚀性能和无磁性,因此这种组合构件也适用于海洋环境、潮湿环境或有无磁要求的特殊结构。实际上,FRP 与铝合金的组合构件已被成功的应用于航空、航天、汽车、船舶等领域中<sup>[3,4]</sup>,但在土木工程中的应用和研究还很少。Triantafillou 等<sup>[5]</sup>和 Lee 等<sup>[6]</sup>曾对铝合金 - CFRP 受弯组合构件的性能进行了分析,通过试验发现用少量的 CFRP 就能显著的提高铝合金构件的刚度和承

载力;Motavalli 等<sup>[7]</sup>还研究了高弹模单向 CFRP 与铝合金组合构件在低温下的受力性能,对两种材料线膨胀系数不同所造成的影响进行了分析,通过试验得到的破坏温度为 - 74.3 (制作加工温度为 60 ) ;Kim 等<sup>[8]</sup>还对组合受弯构件的经济性进行了分析,认为与纯铝合金或全 FRP 结构相比,组合构件的性能价格比具有优势:CFRP- 铝合金组合构件要轻于铝合金构件,而刚度和承载力更大,并且加工和连接方便,不需要任何模具,杆件之间还可以采用机械方法连接。近年在工程结构加固方面,有采用 FRP(玻璃纤维增强复合材料)加固修复铝合金结构<sup>[9]</sup>以及其它金属结构<sup>[10-12]</sup>的研究和工程应用,这些都充分说明了这种组合构件在结构工程领域应用的可行性与前景。

本文以轴心受力为主的杆系空间结构为背景,对圆管截面和方管截面的 CFRP 增强铝合金构件的受力性能进行了系统的试验和理论研究,对组合构件的轴心受压承载力和抗弯性能进行了分析,并提出了相应的设计计算方法。

## 1 CFRP 增强铝合金组合构件

### 1.1 材料

本文中采用的铝合金材料为挤压成型的 T6061-T6(圆管)和 T6063-T6(方管),对构件原位取样进行拉伸试验得到铝合金的基本力学性能参数,如表 1,试验得到的拉伸应力 - 应变曲线如图 1 所示。

表 1 铝合金的材料性能指标

性能参数	6063-T6 方管	6063-T6 方管	6061-T6 圆管
壁厚/mm	1.2	3.0	3.1
名义屈服强度 $f_{0.2}$ /MPa	198	227	291
极限应力 $f_u$ /MPa	217	247	305
极限应变 $\epsilon_u/\mu$	21929	24938	10031
弹性模量 $E_A$ /GPa	68.6	68.6	69.8
泊松比 $\nu$	0.359	0.351	0.360

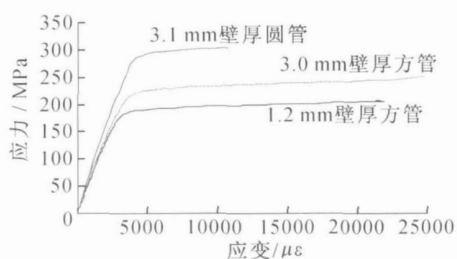


图 1 铝合金材料的拉伸应力 - 应变曲线

配套的环氧树脂构成 CFRP,单层 CFRP 的平均厚度为 0.38mm,对纤维铺设方向为 0°, 90° 和 45° 的三组试件分别进行拉伸试验,得到 CFRP 单层薄板的基本弹性参数,见表 2。其中的 CFRP 表现为线弹性脆性。本文中的 CFRP 采用 $[0/90]_n$ 的正交铺层,其中与杆件轴线平行的纤维铺层提供整体的刚度和承载力,垂直杆件轴线的纤维铺层提高构件局部承载力。

### 1.2 构件制作

CFRP 与铝合金一般通过树脂基体将两者粘接组合,

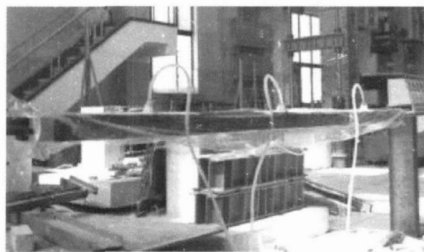
采用名义厚度为 0.167mm 的 T30 单向碳纤维布与

可采用多种加工工艺,如手糊、真空袋压、拉挤等。本文试验研究中的构件为铝合金管外壁包裹 CFRP,圆管采用手糊工艺,方管采用真空袋压辅助工艺,如图 2 所示,最终得到如图 3 所示的组合管件。在实际应用中,可采用

铝合金铆钉将组合构件与铝合金锥头连接,再通过高强不锈钢螺栓与球节点连接(如图 4 所示),从而形成空间网格结构。

表 2 CFRP 的材料性能参数

CFRP 厚度 0.38mm	纵向		横向		纵横剪切	
	$E_L$ / GPa	110.7	$E_T$ / GPa	5.4	$G_{LT}$ / GPa	2.3
弹性模量	$E_L$ / GPa	110.7	$E_T$ / GPa	5.4	$G_{LT}$ / GPa	2.3
强度	$X_t$ / MPa	2034	$Y_t$ / MPa	10.7	$S$ / MPa	31.7
纵横泊松比	$\nu_{LT}$	0.367				
比重	/ kg/m <sup>3</sup>	1450				

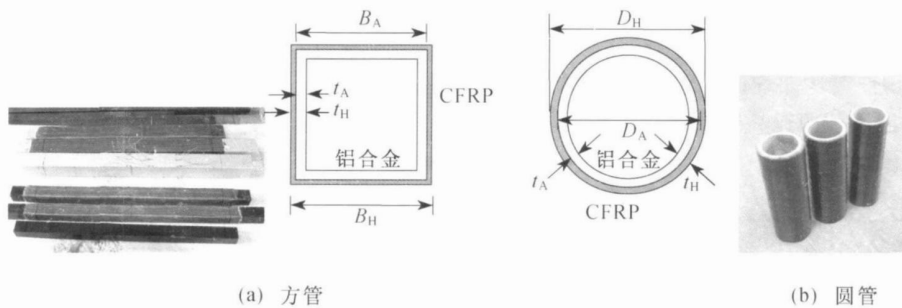


(a) 真空袋压辅助方法



(b) 手糊法

图 2 CFRP 增强铝合金组合构件的加工



(a) 方管

(b) 圆管

图 3 CFRP 增强铝合金组合构件

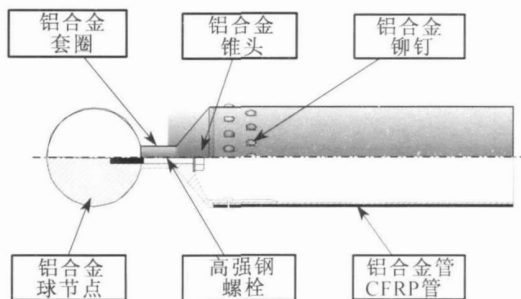


图 4 组合管端的连接节点

## 2 组合短管的轴心受压承载力

### 2.1 试验研究

为研究组合管的极限抗压承载能力,进行了短柱轴心受压试验,包括 12 根圆管、6 根方管,其中 5 个为纯铝合金对比构件,各试件数据及试验结果如表 3 所示。可

以看到,随着 CFRP 用量的增加,构件的承载能力都有显著提高,这说明采用 CFRP 对既有的铝合金结构进行加固是非常有效的。

试验中构件的最终破坏形式如图 5 所示,荷载 - 变形曲线如图 6,最终的破坏主要为局部屈曲,但各试件因径厚比或宽厚比的不同局部屈曲发生的时刻也不同,并且随着 CFRP 层数的增加管壁向外鼓出的趋势也逐渐减小。根据破坏形式可分为三类:(1) 径厚比或宽厚比较小的构件,如 HP50 系列,在铝合金屈服后承载力仍有少许的提高,最终铝合金达到极限强度,发生塑性局部屈曲,从而承载力逐渐降低直至破坏;(2) 径厚比或宽厚比较大的构件,如 HT50 系列,铝合金屈服后马上就出现局部屈曲,铝合金在没有达到极限强度时承载力就开始降低,直到破坏;(3) 径厚比或宽厚比很大的构件,如 HT76 系列,在弹性段就出现局部屈曲,从而导致承载力丧失,在这种

情况下,铝合金和 CFRP 的材料强度都没有得到充分的利用,在实际应用中应予以避免。因此,组合构件应通过控制宽厚比和径厚比来防止构件的弹性局部屈曲。

表 3 组合短管抗压试验及主要结果

构件编号	数量	$B_A \times t_A / \text{mm}$ $D_A \times t_A / \text{mm}$	CFRP 铺层	$B_H \times t_H / \text{mm}$ $D_H \times t_H / \text{mm}$	试验 承载力 $P_u / \text{kN}$	计算抗压 承载力 $P_{ul} / \text{kN}$	计算屈曲 承载力 $P_{cr} / \text{kN}$	试验承载力 / 计算承载力
HP50-0	3	49.7 × 3.1	无	-	147.7	135.0	-	1.094
HP50-1	3	49.7 × 3.1	[0/90]	52.5 × 4.6	177.0	163.1	-	1.085
HP50-2	3	49.7 × 3.1	[0/90] <sub>2</sub>	54.6 × 5.7	212.7	192.5	-	1.105
HP50-3	3	49.7 × 3.1	[0/90] <sub>3</sub>	57.0 × 6.5	228.3	224.2	-	1.018
HT76-0	1	76.0 × 1.1	无	-	29.1	66.6	21.2	1.373
HT76-2	1	76.1 × 1.2	[0/90] <sub>2</sub>	79.4 × 2.8	90.7	150.7	88.5	1.025
HT76-4	1	76.0 × 1.2	[0/90] <sub>4</sub>	82.9 × 4.6	166.6	232.1	210.9	0.790
HT50-0	1	50.0 × 3.0	无	-	116.0	128.0	226.6	0.906
HT50-2	1	50.2 × 3.1	[0/90] <sub>2</sub>	54.0 × 5.0	154.7	189.8	1336	0.815
HT50-4	1	50.2 × 3.1	[0/90] <sub>4</sub>	59.3 × 8.2	246.4	251.9	2359	0.978

注: 1. HP: 圆管; HT: 方管; 紧跟的数字为铝合金管的标称边长或直径;“-”后数字为 CFRP 铺层数。  
2. 表中下划线表示根据试验中出现的破坏模式计算的承载力。

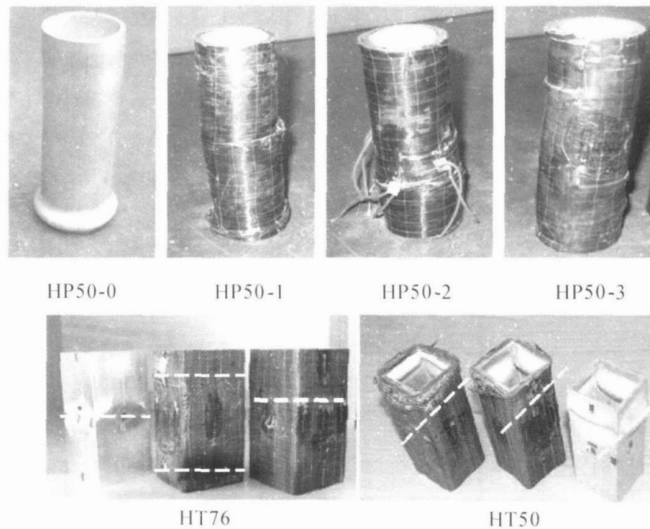


图 5 组合管的代表性最终破坏模式

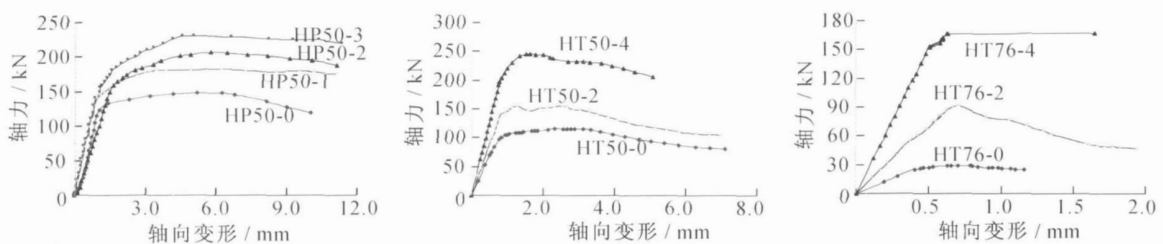


图 6 短管轴压试验的荷载 - 变形曲线

2.2 受压承载力

组合截面上铝合金提供的抗压刚度的比例。如下式:

对于组合管可定义组合截面抗压刚度系数  $A$ , 反映

$$A = \frac{E_A A_A}{\sum_{i=1}^n E_{Li} A_i + E_A A_A} \quad (1)$$

其中  $E_A$  为铝合金的弹性模量,  $A_A$  为铝合金部分的截面积,  $E_{Li}$  为第  $i$  层 CFRP 在纵向上的等效弹性模量,  $A_i$  为该层 CFRP 的有效面积。HP50 系列组合管的  $\alpha$  为 0.6 ~ 0.83, HT50 系列组合管为 0.53 和 0.70, HT76 系列为 0.32 和 0.48。根据铝合金和 CFRP 变形协调的假设, 如果构件在发生局部屈曲以前, 铝合金的应力就达到了屈服, 则可用下面的公式计算组合构件的抗压承载能力:

$$P_{ul} = \left[ \sum_{i=1}^n E_{Li} A_i + E_A A_A \right] \frac{f_{0.2}}{E_A} = \frac{f_{0.2} A_A}{A} \quad (2)$$

### 2.3 局部稳定承载力

在试验中, 宽厚比较大的构件发生了弹性局部屈曲, 其承载力可根据复合材料力学中经典层和板理论的方法确定:

$$P_{cr} = 2 \left[ \frac{D_{22}^2}{(B_H - 2t_H)^2} \right] \cdot \left[ \frac{D_{11}}{D_{22}} + \frac{D_{12} + 2D_{66}}{D_{22}} \right] \cdot 4(B_H - t_H) \quad (3)$$

其中  $D_{ij}$  为 CFRP 增强铝合金板的单位刚度特征矩阵中的分量, 可按照层合板理论计算, 其中仅需将铝合金考虑为其中一层复合材料。本文中 CFRP 的纤维铺层为  $[0/90]_n$  的正交铺层, 铝合金为各向同性材料, 则可近似认为  $D_{11} = D_{22}$ , 则(3)式为

$$P_{cr} = 2 \left[ \frac{D_{22}^2}{(B_H - 2t_H)^2} \right] \cdot \left[ 1 + \frac{D_{12} + 2D_{66}}{D_{22}} \right] \cdot 4(B_H - t_H) \quad (4)$$

而对纯铝合金, 则可写为

$$P_{cr} = \frac{E_A t_A^3}{3(1 - \nu^2)(B_A - 2t_A)^2} \cdot 4(B_A - t_A) \quad (5)$$

此式与《铝合金结构设计规范(征求意见稿)》中的受压板件的弹性屈曲承载力计算公式一致。

在实际设计中, 应选取  $P_{cr}$  和  $P_{ul}$  中的较小值作为组

合构件的截面抗压承载力, 对于各试件的计算结果在表 3 中列出。可以看到, 除 HT76-4 以外, 其它各构件的计算结果与试验结果都吻合较好。这是因为 HT76-4 因局部的粘结不好而在试验中发生了 CFRP 增强层与铝合金的分层屈曲, 这在荷载 - 变形曲线中也能明显看出, 因此计算值与试验值相差较大。

此外 HP 系列圆管的计算值比实际值偏小, 这主要是受压承载力的计算公式中采用的是名义屈服强度  $f_{0.2}$ , 而实际铝合金有强化效应。而 HT50 系列方管的计算值比实际值偏大, 这是主要由于方管截面在实际试验中截面上应力以及加载端的摩擦力分布不均匀, 对承载力有一定的降低。

从计算公式可以看到, 垂直于构件轴线的横向纤维对构件的局部屈曲有较大的影响, CFRP 增强层中的横向纤维增加可以显著提高构件局部屈曲承载力; 而纵向纤维, 对于构件的屈服承载力有较大的贡献。因此, 在组合构件中应进行 CFRP 的铺层设计, 选择合理的纵横纤维的比例, 才能获得最佳的效果。

## 3 组合管的受弯性能

### 3.1 试验研究

为获得 CFRP 增强铝合金组合构件的抗弯刚度的计算方法, 为组合构件的整体稳定性能的研究提供设计参数, 本文进行了 2 组共 6 个组合方管的弯曲试验。试验采用四点受弯加载, 加载装置如图 7 所示, 试件的具体参数及主要结果见表 4。

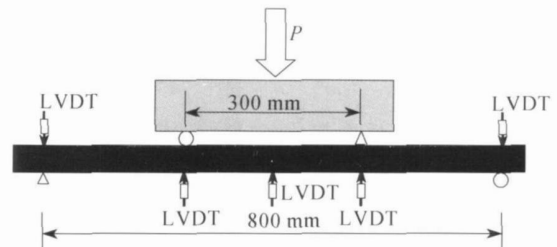


图 7 受弯试验装置示意图

表 4 组合管受弯试验及主要结果

构件编号	$B_A \times t_A / \text{mm}$	CFRP 铺层	$B_H \times t_H / \text{mm}$	试验极限弯矩 $M_{u1} / (\text{N} \cdot \text{m})$	截面抗弯系数 $W / 10^4 \text{mm}^3$	等效有效强度 $f_{e, \text{test}} / \text{MPa}$
ACST76-0	76.4 × 3.2	无	-	424	21.9	194.0
ACST76-2	76.4 × 3.2	$[0/90]_2$	80.3 × 5.3	636	37.0	171.7
ACST76-4	76.4 × 3.2	$[0/90]_4$	85.4 × 7.7	1039	57.0	182.3
ACST50-0	50.0 × 3.0	无	/	215	8.3	258.1
ACST50-2	50.2 × 3.1	$[0/90]_2$	61.4 × 6.0	331	22.3	148.7
ACST50-4	50.2 × 3.1	$[0/90]_4$	75.8 × 8.7	616	47.2	130.6

ACST76 组具有较大的截面和较大的宽厚比。其中 ACST76-0 是纯铝合金构件, 在加载初期挠度增长与荷载

增长呈线性关系;屈服后,荷载增长缓慢,发生明显的弯曲变形;接着加载点下的侧壁逐渐向外发生局部屈曲,荷载稍有下降,直至最后构件失效,如图 8(a)所示。ACST76-2 在加载初期与 ACST76-0 有着类似的性能,但加载中可以听到“噼啪”的响声,这是 CFRP 中的胶逐渐发生破坏;随着荷载的增大声响逐渐密集,达到峰值后中间截面的 CFRP 层开始向外鼓出,此后荷载逐渐下降直到挠度很大后卸载;最终失效模式如图 8(b),中间截面的铝合金内壁发生了向内屈曲,外表 CFRP 断裂,其它部位没有发现破坏。ACST76-4 的试验现象与 ACST76-2 类似,但荷载变形曲线上没有明显的屈服点,荷载达到峰值后就逐渐下降,挠度增加很快,最终管件侧壁的屈曲和 CFRP 的破裂都发生在加载点处的截面,如图 8(c)。ACST50 组具有较小截面和较小宽厚比,各个构件的试验现象与 ACST70 系列中对应的构件类似,除了 ACST50-2 的失效截面的位置略有不同。

各个构件的荷载-变形曲线如图 9 所示,其中 ACST76-2 和 ACST50-4 在屈服后因 LVDT 脱离没有获得最终的曲线。可以看到,在试验中各个试件都有比较明显的塑性变形,同时均有 CFRP 断裂,在破坏截面附近铝合金管发生向内或向外的局部屈曲,而 CFRP 局部出现剥离或分层,但在构件的其余位置 CFRP 和铝合金粘结很好。所有试件的失效过程都是延性的,但是当

CFRP 较厚时,ACST50-4 和 ACST76-4 都会因局部的剥离而导致承载力的降低,而较薄时可以保证其与铝合金共同工作。这与文献[6]中的试验现象略有不同,这是由于本文中的 CFRP 采用了真空袋压辅助方法加工,并且用了较多的横向铺层在外部整体包裹,从而有效地避免了剥离破坏的发生。

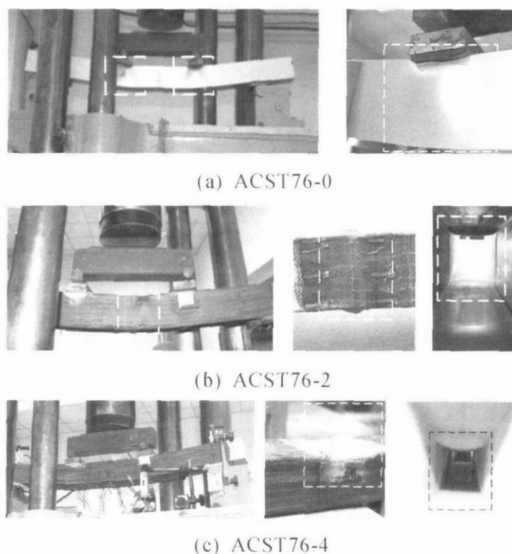


图 8 受弯构件的破坏

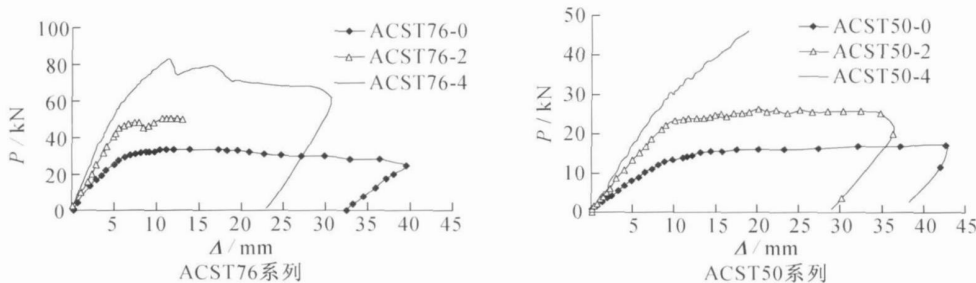


图 9 弯曲试验的荷载-变形曲线

### 3.2 受弯承载力分析

对于组合管受弯可以定义组合截面抗弯刚度系数  $\alpha$ ,反映组合截面中两部分材料的贡献比例。

$$\alpha = \frac{E_A I_A}{\sum_{i=1}^n E_{Li} I_i + E_A I_A} \quad (6)$$

其中,  $I_{Li}$  为第  $i$  层 CFRP 截面惯性矩;  $E_A I_A$  为铝合金管的抗弯刚度。根据等效截面的概念,可以定义构件的等效有效强度为:

$$f_{e, \text{test}} = \frac{M_u}{W} \quad (7)$$

其中  $W$  为假设构件为均一材料根据实际截面尺寸而确定的截面抗弯系数。则可计算出各试件的等效的有效强度,见表 4。可以看到,组合构件的  $f_{e, \text{test}}$  比铝合金和

CFRP 自身强度都低,说明材料的强度并没有得到充分的利用。因此,在组合构件的设计中也需要对 CFRP 铺层进行优化。但由于 CFRP 的密度仅为铝合金结构的 50~60%,虽然组合构件的有效等效强度较低,但是其比强度高,在大跨空间结构中仍有一定的优势。

### 3.3 抗弯刚度分析

试验中通过应变片量测得到了中间截面和加载点截面的应变分布,基于中间截面上部和下部应变  $\epsilon_{\text{top}}$  和  $\epsilon_{\text{bot}}$  可以由式(8)计算出截面的曲率,从而获得组合截面的弯矩-曲率关系,如图 10 所示。

$$\phi = \frac{\epsilon_{\text{bot}} - \epsilon_{\text{top}}}{B_H} \quad \text{或} \quad \phi = \frac{\epsilon_{\text{bot}} - \epsilon_{\text{top}}}{B_A} \quad (8)$$

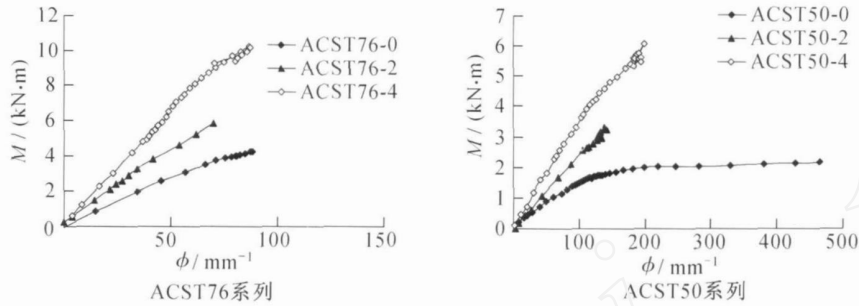


图 10 弯曲试验的弯矩-曲率关系

可以看出,组合构件的截面刚度随着 CFRP 层数的增加而线性增大。根据曲线的弹性段,可以获得构件的等效的弹性抗弯刚度 ( $EI$ ),它是影响组合构件整体屈曲行为特性的重要参数。基于平截面假定和层合板理论,组合管的抗弯刚度可按公式(9)计算:

$$(EI) = \sum_{i=1}^n E_L I_i + E_A I_A = \frac{E_A I_A}{l} \quad (9)$$

表 5 列出了由上式计算的抗弯刚度与试验结果比较。可以看出,计算结果与试验非常吻合。说明组合构件在受弯加载的初期铝合金和 CFRP 层结合紧密,没有滑移或剥离发生。采用 MSC. MARC 有限元软件根据此假设进行计算,在线性段和屈服初期荷载-位移曲线与试验吻合也很好,如图 11 所示。可以看到,此假设在构件的屈服以前成立,结构设计中主要为弹性设计,因此可用此方法计算组合构件的抗弯刚度。

表 5 组合管抗弯刚度计算

构件编号	试验结果 ( $EI$ ) <sub>test</sub> / ( $kN \cdot m^2$ )	计算结果 ( $EI$ ) <sub>cal</sub> / ( $kN \cdot m^2$ )	( $EI$ ) <sub>cal</sub> / ( $EI$ ) <sub>test</sub>
ACST76-2	83.40	83.50	1.001
ACST76-4	118.60	118.85	1.002
ACST50-2	26.50	27.04	1.020
ACST50-4	33.70	35.18	1.044

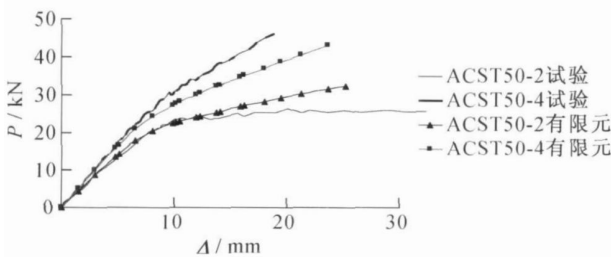


图 11 弯曲构件的荷载-挠度曲线

## 4 组合长管的受压稳定性能

### 4.1 试验研究

为获得组合管在轴心受力作用下的稳定性能,进行

了组合长管的轴心受压试验,包括 9 根圆管、6 根方管,其中 4 个为纯铝合金对比构件,各试件尺寸如表 6 所示。各试件的试验现象基本类似:随着竖向荷载的增加出现横向弯曲并逐渐增大,各构件的横向位移就不断增加;轴向荷载到达一定值后,横向位移迅速增大,荷载开始变小或基本不变,最终杆件出现显著的横向弯曲,杆件发生单波形的整体屈曲破坏;卸载后残余变形很小,CFRP 与铝合金之间没有出现明显的脱开,说明两者的能够较好的保持共同工作。加载过程如图 12 所示。

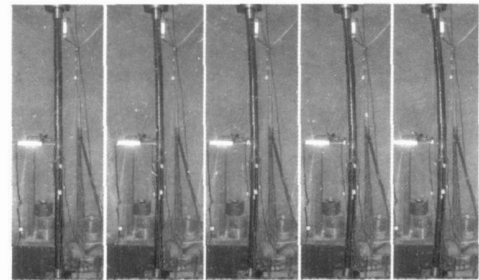


图 12 ACCP70 轴压试验的过程

各构件的荷载-横向变形关系曲线如图 13 所示。可以看到,随着 CFRP 层数的增加,组合构件的承载力也不断增大,说明采用 CFRP 对既有的铝合金结构进行加固是非常有效的。表 6 中列出了各个构件的屈曲荷载。对于屈曲后承载力下降的构件,取其荷载最大值为屈曲荷载值;而对于承载力仍然上升的构件,根据 Southwell 于 1932 提出的图解法来求解屈曲荷载值<sup>[13]</sup>。

### 5.2 屈曲承载力分析

目前对纯铝合金轴心受压构件<sup>[14~17]</sup>和纯 FRP 轴心受压构件<sup>[18]</sup>的整体屈曲性能分别有相应的研究,而对于组合构件的研究则较少。本文试验中的各试件组合截面中两部分材料的抗弯刚度贡献比系数  $\eta$  在 0.43 ~ 1.0 之间,并且从试验中可以看到,组合构件屈曲特性与纯铝合金的类似,因此,这些构件中铝合金部分主导这些构件的屈曲特性。铝合金轴心受压构件屈曲承载力可通过以下方法确定。

#### (1) Euler 方法

表 6 组合管抗弯刚度计算

构件编号	试件长度/mm	$B_A \times t_A / \text{mm}$ $D_A \times t_A / \text{mm}$	CFRP 铺层	$B_H \times t_H / \text{mm}$ $D_H \times t_H / \text{mm}$	试验屈曲荷载 $P_{cr} / \text{kN}$
ACCP60-0	950	49.7 × 3.1	无	-	90
ACCP60-2	950	49.7 × 3.1	[0/90] <sub>2</sub>	54.6 × 5.8	103
ACCP60-3	950	49.7 × 3.1	[0/90] <sub>3</sub>	57.0 × 6.6	120
ACCP70-2	1100	49.7 × 3.1	[0/90] <sub>2</sub>	54.6 × 5.8	90
ACCP70-3	1100	49.7 × 3.1	[0/90] <sub>3</sub>	57.0 × 6.6	111
ACCP120-0	1100	49.7 × 3.1	无	-	19
ACCP120-1	1950	49.7 × 3.1	[0/90]	52.5 × 4.6	24
ACCP120-2	1950	49.7 × 3.1	[0/90] <sub>2</sub>	57.0 × 6.6	30
ACCP120-3	1950	49.7 × 3.1	[0/90] <sub>3</sub>	57.0 × 6.6	36
ACST127-0	2452	50.4 × 3.1	无	-	18.8
ACST127-2	2448	50.2 × 3.1	[0/90] <sub>2</sub>	54.5 × 4.9	29.3
ACST127-4	2449	50.2 × 3.1	[0/90] <sub>4</sub>	59.1 × 7.3	43.2
ACST153-0	2949	50.2 × 3.1	无	-	11.3
ACST153-2	2948	50.2 × 3.1	[0/90] <sub>2</sub>	54.4 × 5.1	20.3
ACST153-4	2948	50.1 × 3.1	[0/90] <sub>4</sub>	57.8 × 7.1	30.7

注:ACCP:圆管, ACST:方管;紧随的数字表示纯铝管的长细比;“-”后数字为 CFRP 铺层数

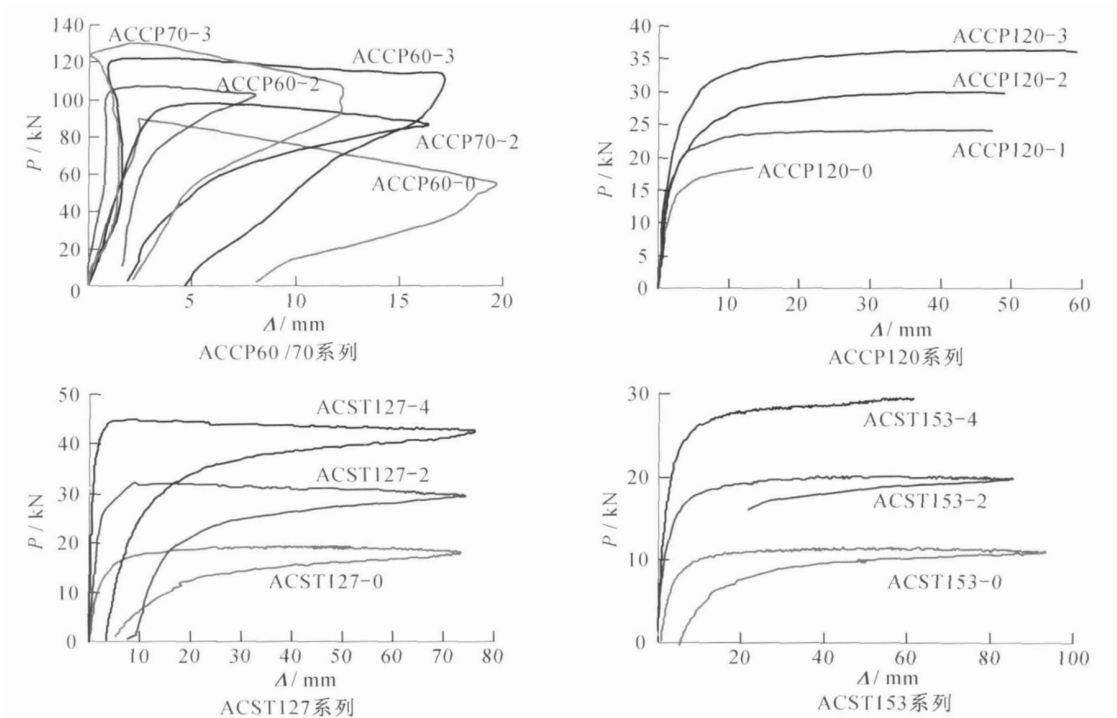


图 13 长管轴压试验的荷载-横向变形关系

杆件的一阶 Euler 屈曲荷载值可由下式求得:

$$P_E = \frac{2(EI)}{L^2} \quad (10)$$

其中截面抗弯刚度(EI)可按公式(9)确定。

对于本文研究的组合杆,取铝合金的屈服强度为  $f_{0.2}$ ,则组合管的稳定系数可以表示为:

$$= \frac{P}{f_{0.2} A} = \frac{2(EI)}{f_{0.2} AL^2} \quad (11)$$

其中 A 为等效面积,为

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n E_{Li} A_i + E_A A_A}{E_A} = \frac{A_A}{A} \quad (12)$$

(2) 修正的 Perry 公式

Perry 公式是基于边缘屈服准则的理论公式,我国《冷弯薄壁型钢结构技术规范(GB50018-2002)》采用此式作为稳定系数的表达。文献[14]基于对铝合金工字形与圆管的轴心受压试验研究,分析了材料特性、初始弯曲、初始偏心和截面形状对铝合金压管极限承载力的影响,最后基于试验研究与数值分析结果提出了修正的 Perry 公式,得到以下对称截面热处理铝合金挤压型材压杆稳定系数的计算公式:

$$\begin{aligned} \bar{\lambda} < 0.175, & \quad \phi = 1, \\ 0.175 < \bar{\lambda} < 1.0, & \quad \phi = 1.061 - 0.341 \bar{\lambda} - 0.031 \bar{\lambda}^2, \\ \bar{\lambda} > 1.0, & \quad \phi = \frac{1}{2} \left[ (1.05 + 1.09 \bar{\lambda}^2) - \sqrt{(1.05 + 1.09 \bar{\lambda}^2)^2 - 4 \bar{\lambda}^2} \right] \end{aligned} \quad (13)$$

对于组合管的长细比可为:

$$\bar{\lambda} = \frac{L}{r}, \quad r = \frac{\sqrt{EI}}{\sqrt{E_A A}} \quad (14)$$

r 为组合管截面的回转半径, L 为杆件的有效计算长度,因此,稳定系数可以表示为下式,

$$\phi = \frac{E_A}{2 f_{0.2}} = \frac{1}{\bar{\lambda}^2}, \quad \bar{\lambda} = \sqrt{\frac{E_A}{2 f_{0.2}}} \quad (15)$$

其中,  $\bar{\lambda}$  为正则化的长细比,是组合管长细比与屈服应力等于屈服强度时组合管长细比的比值。

(3) 钢结构规范的修正曲线

我国的《钢结构设计规范》(GB50017 - 2003) 中采用了基于极限荷载理论的公式计算柱子曲线,文献[15]在轴心受压铝合金工字形与圆管试验的基础上修正了钢结构规范的柱子曲线,提出了如下的计算公式。

$$\begin{aligned} \bar{\lambda} < 0.215, & \quad \phi = 1 - \bar{\lambda}^2 \\ \bar{\lambda} > 0.215, & \quad \phi = \frac{1}{2} \left[ (2 + 3 \bar{\lambda}^2 + \bar{\lambda}^4) - \sqrt{(2 + 3 \bar{\lambda}^2 + \bar{\lambda}^4)^2 - 4 \bar{\lambda}^2} \right] \end{aligned}$$

圆管截面取:  $\bar{\lambda}_1 = 0.65, \bar{\lambda}_2 = 0.390, \bar{\lambda}_3 = 0.465$

工形截面取:  $\bar{\lambda}_1 = 0.41, \bar{\lambda}_2 = 0.993, \bar{\lambda}_3 = 0.162$  (16)

(4) 欧洲 ECCS 的计算方法

欧洲钢结构协会(ECCS)建议了铝合金管的稳定系数计算公式如下<sup>[16]</sup>:

$$\begin{aligned} 0 < \bar{\lambda} < \bar{\lambda}_0, & \quad \phi = 1.0 \\ \bar{\lambda} > \bar{\lambda}_0, & \quad \phi = \frac{1}{2} \left[ 1 + \sqrt{2 - \frac{\bar{\lambda}^2}{\bar{\lambda}_0^2}} \right] \end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned} & \left[ 1 - 2 \left( \frac{\bar{\lambda}}{\bar{\lambda}_0} \right)^\mu \sqrt{2 - \frac{\bar{\lambda}^2}{\bar{\lambda}_0^2}} \right] \end{aligned} \right\}$$

$$\frac{1}{2} \left[ \left( 1 + \sqrt{2 - \frac{\bar{\lambda}^2}{\bar{\lambda}_0^2}} \right) - 4 \bar{\lambda}^2 \right]^{1/2}$$

$$\bar{\lambda}_0 = 0.2226, \quad \mu = 0.159, \quad \mu = 0.996, \quad \bar{\lambda}_0 = 1.1$$

$$\bar{\lambda} < 1.1, \quad \mu = 0.083; \quad \bar{\lambda} > 1.1, \quad \mu = 0 \quad (17)$$

(5) 美国铝合金结构设计手册计算方法

美国铝合金结构设计手册<sup>[17]</sup>中建议了铝合金管的稳定系数计算公式如下:

$$\begin{aligned} \bar{\lambda}_1 & < \bar{\lambda} < \bar{\lambda}_2, & \quad \phi = \frac{\phi_c}{k_c} \\ \bar{\lambda} < \bar{\lambda}_1 & < \bar{\lambda}_2, & \quad \phi = \phi_c \left[ 1 + \left( \frac{f_y}{6900} \right)^{0.5} \right] \\ \left\{ 1 - \frac{\sqrt{6}}{20} \left[ 1 + \left( \frac{f_y}{6900} \right)^{0.5} \right] \right\} \\ \bar{\lambda} > \bar{\lambda}_2, & \quad \phi = \frac{\phi_c}{\bar{\lambda}^2} \end{aligned} \quad (18)$$

式中  $k_c$  为压缩系数,取  $k_c = 1.12$

$$\bar{\lambda} < 1.2, \quad \phi_c = 1 - 0.21 \bar{\lambda} - 0.95;$$

$$\bar{\lambda} > 1.2, \quad \phi_c = 0.14 \bar{\lambda} + 0.58 - 0.95$$

$$\bar{\lambda}_1 = \frac{20 k_c \left[ \left( \frac{f_y}{6900} \right)^{0.5} \right] - 20}{\sqrt{6} k_c \left[ 1 + \left( \frac{f_y}{6900} \right)^{0.5} \right]^{1.5}};$$

$$\bar{\lambda}_2 = \frac{40}{3 \sqrt{6} \left[ 1 + \left( \frac{f_y}{6900} \right)^{0.5} \right]^{0.5}}$$

(6) 我国铝合金规范(建议稿)中的计算方法

我国《铝合金结构设计规范(征求意见稿)》中也建议了基于 Perry 公式拟合的轴心受压构件稳定系数计算公式,具体如下:

$$\begin{aligned} \phi & = \frac{1}{2} \left\{ (1 + \bar{\lambda}^2) - \left[ (1 + \bar{\lambda}^2)^2 - 4 \bar{\lambda}^2 \right]^{1/2} \right\}, \quad 1 \\ & = (\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) \end{aligned} \quad (19)$$

对于弱硬化材料构件:  $\bar{\lambda}_0 = 0.2, \bar{\lambda}_1 = 0.15$ ;对于强硬化材料构件:  $\bar{\lambda}_0 = 0.35, \bar{\lambda}_1 = 0.1$ 。

本文中的铝合金材料为弱硬化材料,但在前面的研究中可以发现,CFRP 增强铝合金组合构件在受弯时具有显著的硬化特性,因此可根据抗弯刚度系数  $\bar{\lambda}_1$  将组合构件分为两类:  $\bar{\lambda}_1 = 0.75 \sim 1.0$  时按照弱硬化考虑,  $\bar{\lambda}_1 = 0.4 \sim 0.75$  时按照强硬化考虑,采用《铝合金结构设计规范(征求意见稿)》建议的公式进行计算。

根据以上计算方法,可分别得到本文中 15 个构件的

稳定系数,计算结果与试验结果如表 7 所示。可以看到,唯一略偏于保守的公式。因此建议采用此式计算 CFRP 增强铝合金构件的轴压稳定承载力。

表 7 各种稳定系数计算方法与试验结果的对比

	试验屈曲荷载/kN	—	$\lambda$		式(11)	式(13)	式(16)	式(17)	式(18)	式(19)
ACCP60-0	90	1.18	1.000	0.681	0.718	0.559	0.555	0.554	0.535	0.543
ACCP60-2	103	1.14	0.636	0.534	0.769	0.587	0.581	0.580	0.569	0.495
ACCP60-3	120	1.12	0.515	0.533	0.797	0.601	0.595	0.594	0.587	0.506
ACCP70-2	90	1.32	0.636	0.467	0.574	0.469	0.571	0.469	0.439	0.406
ACCP70-3	111	1.30	0.515	0.493	0.592	0.481	0.597	0.480	0.451	0.415
ACCP120-0	19	2.43	1.000	0.144	0.169	0.152	0.153	0.157	0.156	0.155
ACCP120-1	24	2.39	0.787	0.144	0.175	0.157	0.159	0.162	0.160	0.160
ACCP120-2	30	2.35	0.636	0.156	0.181	0.162	0.164	0.168	0.165	0.155
ACCP120-3	36	2.30	0.515	0.160	0.189	0.169	0.171	0.174	0.171	0.161
ACST127-0	18.8	2.29	1.000	0.169	0.191	0.170	0.176	0.176	0.172	0.174
ACST127-2	29.3	2.22	0.633	0.179	0.203	0.181	0.187	0.187	0.181	0.172
ACST127-4	43.2	2.13	0.432	0.193	0.220	0.196	0.202	0.202	0.194	0.185
ACST153-0	11.3	2.74	1.000	0.102	0.133	0.120	0.125	0.125	0.128	0.123
ACST153-2	20.3	2.65	0.637	0.124	0.142	0.128	0.133	0.133	0.135	0.124
ACST153-4	30.7	2.55	0.432	0.135	0.154	0.138	0.143	0.143	0.144	0.133
误差均值(%)					21.0	3.5	8.1	5.8	3.8	-1.9
误差方差					0.928	0.328	0.486	0.400	0.422	0.398

## 5 结论与展望

本文研究 CFRP 增强铝合金组合管这一新型结构的轴心受压和受弯的性能,通过系统的试验研究和理论分析提出了相应的设计计算方法。主要结论如下:

(1) 进行了 18 个 CFRP 增强铝合金组合短管轴压试验,提出了 CFRP 增强铝合金组合短管截面极限承载力的计算方法,在宽厚比或径厚比较小时,CFRP 增强铝合金组合管中的铝合金能够达到屈服,而承载力可按照达到铝合金的名义屈服强度进行计算;并建议了 CFRP 增强铝合金组合短管局部屈曲荷载的计算公式。当宽厚比或径厚比较大时,容易出现局部屈曲破坏,其承载力可按照复合材料层合板的屈曲荷载进行计算。

(2) 进行了 6 个 CFRP 增强铝合金组合管弯曲试验,发现 CFRP 增强铝合金组合管具有较好的延性,并建议了弹性阶段的抗弯刚度的计算方法。

(3) 进行了 15 个 CFRP 增强铝合金组合长管轴压稳定性能试验,通过将试验结果与现有的计算方法的比较,建议了组合管的稳定承载力计算方法。

本文研究还发现,组合管中 CFRP 的铺层方向以及和铝合金的比例关系对构件的承载力有较大的影响,而

CFRP 具有很强的可设计性,可针对构件的受力特性进行合理的设计,进一步提升 CFRP 增强铝合金组合构件的性能,以获得最佳的受力性能。

## 参考文献:

- [1] 叶列平,冯鹏. FRP 在工程结构中的应用与发展[J]. 土木工程学报,2006,39(3):25-37.
- [2] 钱鹏,叶列平. 铝合金及 FRP-铝合金组合结构在结构工程中的应用[J]. 建筑科学,2006,22(5):100-105.
- [3] Harris C E, Starnes Jr. J. Hand Shuart MJ. Design and Manufacturing of Aerospace Composite Structures, State-of-The-Art Assessment[J]. Journal of Aircraft, 2002, 39(4):545-560.
- [4] Lee D G, Kim H S and Kim J W, et al. Design and Manufacturing of an Automotive Hybrid Aluminum/Composite Drive Shaft[J]. Composite Structures, 2004, 63(1):87-99.
- [5] Triantafillou T C, Kim Pand Meier U. Optimization of Hybrid Aluminum/CFRP Box Beams[J]. International Journal of Mechanical Science, 1991, 33(9):729-739.
- [6] Lee S H, Kim H J and Choi N S. Bending Performance Analysis of Aluminum composite Hybrid Tube[J]. Key Engineering Materials, 2006, 306-308:769-774.

(下转第 62 页)

的优点。

(2) 在参考国内外相关工作基础上进行了相应的研究工作,同时进行了大量的铝网架结构构件系列材料试验、焊接试验等,积累了一定数量的理论与试验成果,建立一整套大跨度铝合金网架结构的设计、制作及安装的技术方法,制定了中国建筑科学研究院“铝合金格构结构制作与安装规定”(内部标准),并开发研制了一套铝网架结构计算机辅助设计及加工制作软件程序。目前已经完成设计与建造铝网架结构工程二十余项。

(3) 本项目研究工作于 2001 年 3 月通过建设部组织的部级鉴定,获得 2003 年“华夏科技进步”二等奖,研发的铝网架铝管件与封板(锥头)的非焊接、冷加工压力成型连接技术获得国家发明专利。

(上接第 33 页)

(3) 本文在参考国外规范及对焊接梁试验研究的基础上,提出了纵向焊接铝合金梁构件的设计公式。研究表明,考虑塑性发展时,由《欧洲铝合金结构建议》、欧洲规范 EC9 及本文建议公式所得曲线基本一致。除长细比较小这种情况外,试验结果高于公式计算结果,表明公式计算结果富有较大安全度,从而验证了建议公式的可靠性,为我国《铝合金结构设计规范》的编制提供了依据和参考;当不考虑塑性发展时,本文将试验结果与公式计算结果也进行了比较。可以看出,试验结果高出公式计算结果较多。说明与考虑塑性发展相比,不考虑塑性发展计算结果偏于保守。

## 参考文献:

- [1] Eurocode 9: Design of Aluminium Structures. Part 1. 1: General rules[S]. ENV 1999-1-1, CEN, Brussels, 1997.
- [2] 焊接接头拉伸试验方法(GB2651-89) [S]. 北京:中国标准出版社,1989.

(上接第 43 页)

- [7] Motavalli M, Terrasi GP, and Meier U. On the Behaviour of Hybrid Aluminium/CFRP Box Beams at Low Temperatures [J]. Composites, Part A, 1997, 28A: 121-129.
- [8] Kim P. A Comparative Study of the Mechanical Performance and Cost of Metal, FRP, and Hybrid Beams [J]. Applied Composite Materials, 1998, 5(3): 175-187.
- [9] Pantelides C P, Nadeau J and Cercone L. Repair of Cracked Aluminum Overhead Sign Structures with Glass Fiber Reinforced Polymer Composites [J]. Journal of Composites for Construction, 2003, 7(2): 118-126.
- [10] 郑云, 叶列平, 岳清瑞. FRP 加固钢结构的研究进展 [J]. 工业建筑, 2005, 35(8): 20-34.
- [11] 彭福明, 郝际平, 岳清瑞, 等. FRP 加固钢结构轴心受压构件的弹性稳定分析 [J]. 钢结构, 2005, 20(3): 18-20.
- [12] Shaat A, Fam A. Strengthening of Short HSS steel Columns Using FRP Sheets [C]. Proceedings of the 4th International

致谢:

参加本项目工作的还有中国建筑科学研究院的宋涛、郝成新、赵鹏飞、赵基达、邓曙光、张明等,在此一并表示感谢。

## 参考文献:

- [1] 钱基宏, 等. 某零磁实验室全铝网架结构实验研究及设计与施工 [C]. 中国土木工程学会桥梁及结构工程分会空间结构委员会主编: 第九届空间结构学术会议论文集, 浙江: 萧山 2000.
- [2] 网架结构设计与施工规程 (JGJ 7-91) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1991.
- [3] Aluminum Design Manual [M]. America: The Aluminum Association, Inc, 1994.
- [4] Federico M, Mazzolani. Aluminum Alloy Structure [M]. Pitman Publishing Limited. 1985.

- [3] 金属维氏硬度试验 (GB/T 4340-1999) [S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [4] 焊接接头机械性能试验取样方法 (GB2649-89) [S]. 北京: 中国标准出版社, 1989.
- [5] 李静斌. 铝合金结构连接静力强度的理论和试验研究 [D]. 上海: 同济大学, 2006.
- [6] 焊缝及熔敷金属拉伸试验方法 (GB2652-89) [S]. 北京: 中国标准出版社, 1989.
- [7] 铝合金结构设计规范 (送审稿) [S].
- [8] Federico M. Mazzolani. Aluminium alloy structures (2nd edition) [M]. London: E & F. Spon, 1995.
- [9] 金鑫. 单轴对称截面铝合金压杆极限承载力研究 [D]. 上海: 同济大学, 2005.
- [10] 吴亚舸. 铝合金受压板件局部屈曲与受弯构件弯扭屈曲承载力研究 [D]. 上海: 同济大学, 2006.

- Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures (ACMBS-IV). Calgary, Canada: CSCE, 2004. (CDROM).
- [13] Southwell R V. Theory of Elasticity [M]. London: Oxford University Press, 1941.
- [14] 沈祖炎, 郭小农. 对称截面铝合金挤压型材压杆的稳定系数 [J]. 建筑结构学报, 2001, 22(4): 31-38.
- [15] 罗永峰, 季跃, 芮渊, 等. 铝合金结构轴心压管稳定性研究 [J]. 同济大学学报, 2001, 29(4): 401-405.
- [16] Mazzolani F M. The Bases of the European Recommendations for Design of Aluminum Alloy Structures [J]. Aluminium, 1980, (2): 77-94.
- [17] Aluminum Association. Specification for Aluminum Structures [S]. 2nd Edition. USA, 1994.
- [18] 钱鹏, 冯鹏, 叶列平. GFRP 管轴心受压性能的试验研究 [J]. 天津大学学报 (自然科学版), 2007, 40(1): 19-23.