

# CFRP 增强铝合金组合管网架的设计与分析\*

林旭川<sup>1</sup> 冯鹏<sup>1</sup> 叶列平<sup>1</sup> 陈超核<sup>2</sup>

(1 清华大学 土木工程系 结构工程与振动教育部重点实验室 北京 100084

2 海南大学 土木建筑工程学院 海口 570228)

**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, 将两者组合应用于空间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。本文提出 CFRP 增强铝合金组合管并将其应用于网架结构中, 在近海、潮湿、免磁等特殊环境中具有显著的应用优势。网架中构件以轴心受力为主, 为此提出了基于铝合金名义屈服点的组合构件轴心承载力计算公式和组合管局部屈曲承载力计算公式, 建议了组合长管轴压稳定承载力的计算方法。基于这些设计计算方法, 分析了一个 24m×48m 的正放四角锥网架, 为合理应用 CFRP 增强铝合金组合构件建造空间结构提供了依据和参考。

**关键字:** CFRP 铝合金 组合管 设计方法 大跨空间结构

## Design Methodology for the Space Truss of CFRP Strengthened Aluminum Members

Xuchuan Lin, Peng Feng, Lieping Ye

( Department of Civil Engineering, Key Laboratory of Structural Engineering and Vibration of China Education Ministry, Tsinghua University, Beijing, 100084)

Chaohe Chen

(Civil Engineering College, Hainan University, Haikou, 570228)

**Abstract:** Light-weight, anti-corrosive and nonmagnetic are the common advantages of aluminum and CFRP (carbon fiber reinforced polymer). It can make their advantages more efficient and remedy their shortages to combine them together. CFRP strengthened aluminum hybrid pipes and square tubes suggested in the paper are applicable to space truss structures and have significant advantages in the application areas of avoid-magnetic structures, offshore structures and structures in damp environment. For members of truss structures mainly bear axial force, based on the nominal yield strength of aluminum alloy, the formulae for the axial strength and the local buckling strength of hybrid members are put forward while an approach to determine the overall stability capacity of hybrid member suggested. In the end, a brief sample of 24m×48m square pyramid space grids is presented to show the exact design procedures. The formulae provide basis for rational design of CFRP strengthened aluminum hybrid members in special truss structures.

**Keywords:** FRP (fiber reinforced polymer/plastic); hybrid member; aluminum; design formula; spatial structures;

### 1 引言

铝合金与 CFRP (碳纤维增强复合材料) 作为两种新型结构材料, 在结构工程领域已得到了较为广泛的应用<sup>[1,2]</sup>。它们都具有质量轻、耐腐蚀性好和无磁性等优点, 将两者组合在一起形成的 CFRP 增强铝合金组合构件与全 CFRP 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, 这种组合构件适用于对结构自重敏感的大跨度桥梁、空间结构以及“可动”结构, 而 CFRP 和铝合金的独特

优势, 也使这种组合构件适用于腐蚀性、潮湿或有无磁要求的特殊环境中。

航空、航天、汽车、船舶等领域中, CFRP 与铝合金的组合构件已被成功的应用<sup>[3,4]</sup>, 但在土木工程中的应用和研究还较少。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;

\*国家自然科学基金项目(50608047)资助。

第一作者: 林旭川 男 1984 年 10 月出生 硕士研究生。

工业建筑 2007 年增刊

Motavalli等<sup>[7]</sup>研究了高弹模单向CFRP与铝合金组合在低温下的受力性能,获得了两者共同受力的温度条件;

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构件相比,组合构件的性能价格比更具有优势: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,且加工和连接方便,不需要模具,杆件间还可用机械连接。

网架结构是最为常见的一种空间结构形式,其中构件以轴心受力为主,因此,CFRP增强铝合金构件应用于网架结构中的关键问题为轴心受力性能。本文建议了轴心受力CFRP增强铝合金组合管的设计计算方法,并设计分析一个24m×48m的正放四角锥网架。

## 2 CFRP增强铝合金组合管网架结构

### 2.1 组合管构造

CFRP增强铝合金组合构件可通过真空袋压辅助法将碳纤维布与基体树脂混合并按一定的铺层粘结在铝合金的表面,如图1所示。制成的构件如图2所示。



图1 CFRP增强铝合金构件的加工

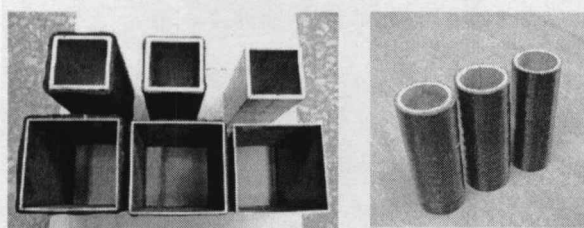


图2 组合管构件

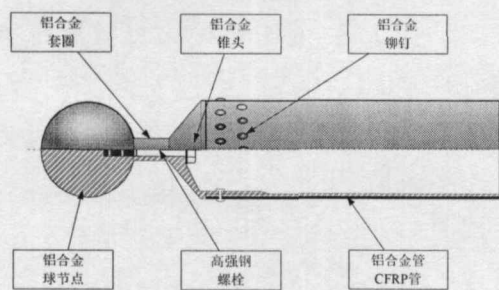


图3 CFRP增强铝合金杆件的端部节点

在构件端部,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3所示,从而形成空间网格结构。

杆件的截面形状一般为圆管或正方形管,如图4所示。两者的轴心受力性能类似,圆管相对简单,本文的设计以正方形管为例。

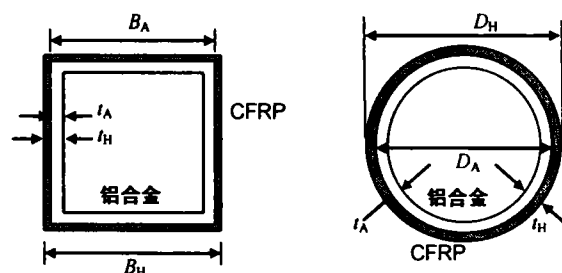


图4 正方形管(左)与圆形管(右)截面形状

### 2.2 组合管网架

网架平面尺寸为24m×48m,网架高1.4m,为正放四角锥构成,网格尺寸3m×3m,如图5所示。整个网架四周为铰接支座,附加均布荷载按照0.50kN/m<sup>2</sup>计算,考虑满布和半跨布置两种工况。

网架结构中,构件以轴向受力为主,其轴向承载力为主要控制变量,在设计中应考虑(1)截面轴拉和轴压承载力,(2)管件局部抗压稳定承载力和(3)轴压稳定承载力。同时,构件的轴向刚度对整体结构的变形其控制作用,抗弯刚度对构件整体屈曲承载力有较大的影响,也应予以考虑。

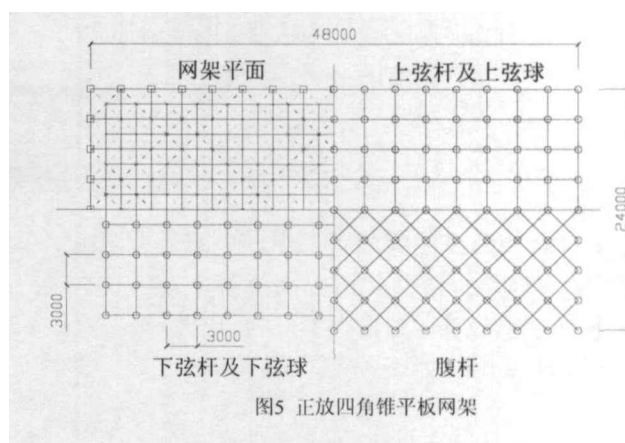


图5 正放四角锥平板网架

## 3 组合管的刚度

### 3.1 组合管截面轴向刚度

通过试验<sup>[9]</sup>发现,组合管在弹性工作状态下,CFRP与铝合金之间粘结紧密,能够很好的共同工作,因此基于平截面假定和层合板理论,组合

管的轴向刚度可按公式(1)计算:

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

可定义组合截面抗压刚度系数 $\kappa_A$ , 为组合截面中铝合金提供的抗压刚度的比例。如下式:

$$\kappa_A = \frac{E_A A_A}{\sum_{i=1}^n E_{Li} A_i + E_A A_A} \quad (2)$$

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。

### 3.2 组合管截面抗弯刚度

与抗压刚度类似, 组合管的抗弯刚度可按公式(3)计算:

$$(EI) = \sum_{i=1}^n E_{Li} I_i + E_A I_A = \frac{E_A I_A}{\kappa_I} \quad (3)$$

对于受弯组合管可定义组合截面抗弯刚度系数 $\kappa_I$ , 为组合截面中铝合金提供的抗弯刚度比例。

$$\kappa_I = \frac{E_A I_A}{\sum_{i=1}^n E_{Li} I_i + E_A I_A} \quad (4)$$

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。

## 4 组合管的承载力

### 4.1 短管轴心承载力

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, 即 $f_{0.2}$ , 虽然构件的承载力仍能提高, 但比较有限, 因此在实际设计中偏于保守的采用下面的公式计算组合构件的抗压承载能力:

$$P_{ul} = \left( \sum_{i=1}^n E_{Li} A_i + E_A A_A \right) \frac{f_{0.2}}{E_A} = \frac{f_{0.2} A_A}{\kappa_A} \quad (5)$$

由于CFRP的抗拉强度要高于铝合金的名义屈服强度 $f_{0.2}$ , 因此组合管的轴心抗拉承载力应高于 $P_{ul}$ 。但在实际设计中, 考虑不应让铝合金出现屈服, 因此仍采用(5)确定其抗拉承载力。

### 4.2 抗压局部稳定承载力

圆管的防局部屈曲能力较好, 只要满足铝合金径厚比要求即能满足局部稳定要求, 对于不满足局部稳定要求的圆管可以通过加强圆管端部使其满足局部稳定要求。

对于方管, 构件发生弹性局部屈曲的承载力

可根据复合材料力学中经典层合板理论的方法确定:

$$P_{cr} = 2 \left[ \frac{\pi^2 D_{22}}{(B_H - 2t_H)^2} \right] \left[ \sqrt{\frac{D_{11}}{D_{22}} + \frac{D_{12} + 2D_{66}}{D_{22}}} \right] \times 4(B_H - t_H) \quad (6)$$

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(6)式为

$$P_{cr} = 2 \left[ \frac{\pi^2 D_{22}}{(B_H - 2t_H)^2} \right] \left( 1 + \frac{D_{12} + 2D_{66}}{D_{22}} \right) \times 4(B_H - t_H) \quad (7)$$

如为纯铝合金结构, 则上式变为

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 E_A t_A^3}{3(1-\nu^2)(B_A - 2t_A)^2} \cdot 4(B_A - t_A) \quad (8)$$

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。

## 5 屈曲分析

通过比较试验和有限元计算的结果, 发现各种稳定系数计算方法中基于Perry公式拟合公式结果较好, 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:

$$\varphi = \frac{1}{2\bar{\lambda}^2} \left[ B - \left( B^2 - 4\bar{\lambda}^2 \right)^{1/2} \right] \quad (9)$$

式(9)尚需满足 $\varphi \leq 1$ , 其中 $B$ 为过程量

$$B = 1 + \eta + \bar{\lambda}^2, \quad \eta = \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) \quad (10)$$

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

文中的铝合金材料为弱硬化材料, 但在研究中发现, 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 $\kappa_I$ 将组合构件分为两类:  $\kappa_I = 0.75 \sim 1.0$ 时按照弱硬化考虑;  $\kappa_I = 0.4 \sim 0.75$ 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。

## 6 网架结构计算

采用以上的设计计算公式设计网架结构。如采用的所有杆件截面都相同。铝合金为牌号6063-T6 挤压方管，铝合金的名义屈服强度  $f_{0.2}=170MPa$ ，取铝合金管边长为  $B_A=120mm$ ，铝合金厚度  $t_A=15mm$ ， $E_A=70GPa$ ， $\nu=0.35$ ；

CFRP 采用单向碳纤维布与环氧树脂复合而成，每层平均厚 0.4mm，纵向弹模  $E_1=110GPa$ ，横向弹模  $E_2=5.4GPa$ ，纵横泊松比  $\nu_{12}=0.37$ ，纵横剪切模量  $G_{12}=2.3GPa$ 。按照[0/90]<sub>4</sub>的方式逐层铺设，包裹在铝合金管外，

采用 SAP2000 分析计算，计算中根据杆件平均密度取  $2560kg/m^3$  计算构件自重，将均布荷载等效为桁架上弦节点上的力，重力荷载直接加到每个单元。均布荷载  $0.50kN/mm^2$  满跨加载和半跨加载的计算结果如表 1，满跨轴力图见图 6，网架变形如图 7。

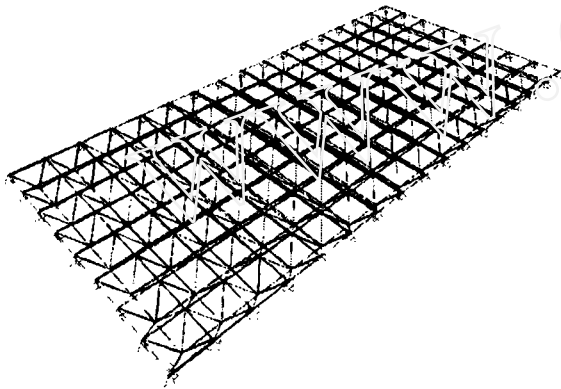


图6 满跨均布荷载工况的轴力图

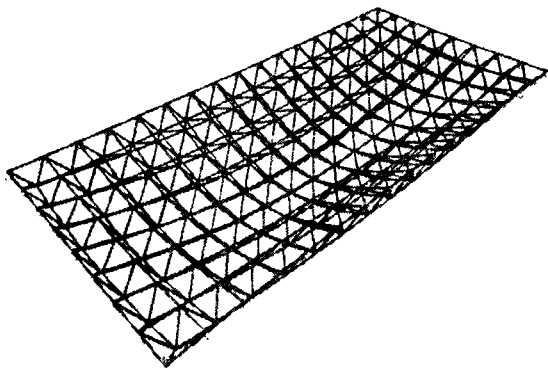


图7 满跨均布荷载下的变形(放大200倍)

### 1) 验算轴心受压构件整体稳定承载力

设计轴力  $N=253.8kN$ ，采用《铝合金结构设计规范(征求意见稿)》轴心受力构件整体稳定公式进行计算。

计规范(征求意见稿)》轴心受力构件整体稳定公式进行计算。

表1 SAP2000计算结果

荷载工况	满跨均布荷载+自重	半跨均布荷载+自重	自重
最大轴压力(N)	253761	138277	82783
最大轴拉力(N)	254039	137187	82879
最大挠度/mm	24.6	20.3	12.16

截面非对称性系数  $k_1=1$ ；焊接缺陷影响系数  $k_2=0.5$ ；考虑板件局部屈曲的修正系数  $\eta_e=1$ ；

组合截面抗弯刚度系数

$$\kappa_1 = \frac{E_A I_A}{\sum_{i=1}^n E_{L_i} I_i + E_A I_A} = 0.782$$

组合截面抗压刚度系数

$$\kappa_A = \frac{A_A E_A}{\sum_{i=1}^n E_{L_i} A_i + E_A A_A} = 0.829$$

从而得等效截面惯性矩为

$$I = \frac{I_A}{\kappa_1} = 8896392mm^4$$

等效截面面积为

$$A = \frac{A_A}{\kappa_A} = \frac{6829.5}{0.835} = 5966mm^2$$

构件等效的回转半径  $i = \sqrt{\frac{I}{A}} = 38.6mm$

构件长细比

$$\lambda = \frac{l}{i} = \frac{3000}{52.6} = 77.7$$

修正正则化长细比

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{\eta_e f_{0.2}}{E_A}} = \frac{77.7}{\pi} \sqrt{\frac{1.0 \times 170}{70000}} = 1.22$$

$\kappa_1$  在 0.75~1.0 之间，按照弱硬化材料计算：

$\alpha = 0.2, \bar{\lambda}_0 = 0.15$ ，可得，

$$\eta = \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) = 0.2 \times (1.22 - 0.15) = 0.214$$

$$B = 1 + \eta + \bar{\lambda}^2 = 2.70$$

$$\varphi = \frac{1}{2\lambda^2} \left[ B - (B^2 - 4\lambda^2)^{1/2} \right] = 0.518$$

从而得,

$$\frac{N}{\eta_e k_1 k_2 \varphi A} = \frac{253761}{1.0 \times 1.0 \times 0.5 \times 0.518 \times 5966}$$

$$= 164.4 \text{ N/mm}^2 < f_{0.2} = 170 \text{ N/mm}^2$$

满足稳定承载力条件。

## 2) 局部稳定承载力验算

铝合金为各向同性材料, 材料刚度系数矩阵:

$$E_A = 70 \text{ GPa}, \quad \nu = 0.35,$$

$$Q_{11} = Q_{22} = \frac{E_A}{1-\nu^2} = \frac{70}{1-0.35^2} = 79.77 \text{ GPa},$$

$$Q_{12} = \frac{\nu E_A}{1-\nu^2} = \frac{0.35 \times 70}{1-0.35^2} = 27.92 \text{ GPa},$$

$$Q_{66} = \frac{E_A}{2(1+\nu)} = \frac{70}{2 \times (1+0.35)} = 25.93 \text{ GPa}$$

CFRP为各向异性, 铺层单层材料刚度系数矩阵:

$$E_1 = 110 \text{ GPa}, \quad E_2 = 5.4 \text{ GPa}, \quad \nu_{12} = 0.37,$$

$$G_{12} = 2.3 \text{ GPa}$$

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1-\nu_{12}\nu_{21}} = 110.7 \text{ GPa},$$

$$Q_{22} = \frac{E_2}{1-\nu_{12}\nu_{21}} = 5.43 \text{ GPa},$$

$$Q_{12} = \frac{\nu_{21} E_2}{1-\nu_{12}\nu_{21}} = 2.01 \text{ GPa},$$

$$Q_{66} = G_{12} = 2.3 \text{ GPa}$$

将单层材料刚度系数代入层合板刚度系数公

式  $D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n (\overline{Q}_{ij})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3)$ , 得

$$D_{11} = 106810 \text{ N} \cdot \text{m},$$

$$D_{22} = 109842 \text{ N} \cdot \text{m},$$

$$D_{12} = 27876 \text{ N} \cdot \text{m},$$

$$D_{66} = 26126 \text{ N} \cdot \text{m}$$

将  $D_{ij}$  代入式(6)得

$$P_{cr} = 1985520 \text{ N} > N = 253761 \text{ N}$$

显然局部稳定要求满足。

## 3) 验算轴心受拉承载力

根据轴心承载力公式可得

$$P_{ul} = \left( \sum_{i=1}^n E_L A_i + E_A A_A \right) \frac{f_{0.2}}{E_A}$$

$$= f_{0.2} \frac{A_A}{\kappa_A} = 1014202 \text{ N} > N = 253761 \text{ N}$$

## 4) 变形计算

结构计算得到网架结构最大竖向挠度为 24.6mm, 为  $1/4000$  跨度, 满足要求。

## 6 结论

本文建议了大跨空间结构中轴心受力CFRP增强铝合金组合构件的设计计算方法, 包括: (1) 基于铝合金名义屈服点的组合构件轴心受压承载力计算公式; (2) 基于层合板理论的组合管局部屈曲承载力计算公式; (3) 组合管受压稳定承载力的计算方法; (4) 组合构件刚度的计算方法。并基于此方法对一个  $48 \times 24 \text{ m}$  的空间平板网架进行了计算分析。

### 参考文献

- [1] 叶列平, 冯鹏. FRP 在工程结构中的应用与发展. 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. 建筑科学, 2006, 22(5): 100-105
- [3] Harris C E, Starnes Jr. J H and Shuart M J. Design and Manufacturing of Aerospace Composite Structures, State-of-The-Art Assessment. Journal of Aircraft, 2002, 39(4): 545-560
- [4] Lee D G, Kim H S and Kim J W, et al. Design and Manufacture of an Automotive Hybrid Aluminum/Composite Drive Shaft. Composite Structures, 2004, 63(1): 87-99
- [5] Triantafyllou T C, Kim P and Meier U. Optimization of Hybrid Aluminum/CFRP Box Beams. 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 .Key Engineering Materials, 2006, 306-308: 769-774
- [7] Motavalli M, Terrasi GP, and Meier U. On the Behaviour of Hybrid Aluminium/CFRP Box Beams at Low Temperatures. 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. Applied Composite Materials, 1998, 5(3): 175-187
- [9] 蒋燕, 冯鹏, 叶列平, 齐玉军. 真空袋压辅助粘贴 CFRP 增强铝合金构件受弯性能试验研究. 见: 工业建筑, 2006, 36(增刊), 第四届全国 FRP 会议论文集, 309-313

www.cnki.net