

文章编号: 1000-4750(2006)Sup.II-0210-07

轴心受压 CFRP—铝合金组合管 弹塑性屈曲性能分析

*钱 鹏^{1,2}, 叶列平^{1,2}, 冯 鹏^{1,2}

(1. 清华大学土木工程系, 北京 100084; 2. 清华大学结构工程与振动教育部重点实验室, 北京 100084)

摘 要: CFRP 管具有轻质高强的特点, 适合于建造大跨度空间网格结构, 但其破坏呈脆性, 且以节点连接破坏为主, 不能充分发挥 CFRP 材料的优点, 为此建议将 CFRP 与铝合金组合形成 CFRP - 铝合金组合管来改善其受力性能和构件连接性能。首先对 CFRP - 铝合金组合长管进行了轴心受压稳定试验研究, 得到其基本受力性能与破坏模式。利用有限元方法对组合管的特征值屈曲进行分析, 研究不同 CFRP 铺层角度、厚度和顺序的影响。根据特征值屈曲的分析结果, 引入初始几何缺陷, 对组合管进行了弹塑性屈曲分析, 并将分析结果与试验结果进行了对比, 确定了有限元分析模型的合理性, 进一步研究了不同长细比、铺层角度和厚度对组合管弹塑性稳定性能的影响机理。最后基于试验结果与数值分析结果, 通过修正 Perry 稳定计算公式, 得到了 CFRP - 铝合金组合长管屈曲荷载的计算公式。

关键词: 轴心受压; CFRP; 铝合金; 组合管; 弹塑性屈曲; 稳定

中图分类号: TU311 文献标识码: A

ELASTO-PLASTIC BUCKLING BEHAVIOR OF CFRP-ALUMINUM COMPOSITE PIPE UNDER AXIALLY COMPRESSIVE LOAD

*QIAN Peng^{1,2}, YE Lie-ping^{1,2}, FENG Peng^{1,2}

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

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

Abstract: Due to its light-weight and high-strength, CFRP pipes can be used for the construction of long-span lattice structures. But the shortcoming of connection failure between elements restricts the utilization of its high strength. So CFRP-Aluminum composite pipe, made of aluminum pipe with wrapped CFRP sheets, is proposed here to improve the loading capacity and connection behavior. The composite pipes under axial force were firstly tested to obtain its loading properties and failure modes. Then eigenvalue buckling behaviors were studied with FEM to investigate the influence of different ply angles, thickness and sequence. An initial imperfection was introduced into FE model based on test results to further study the elasto-plastic buckling behaviors of composite pipes influenced by different slenderness ratios, ply angles and thickness. Finally, based on the tested and numerical analysis results, a formula to calculate the buckling load of composite pipes under axially compressive load is obtained by correcting Perry formula.

Key words: axial compression; CFRP; aluminum alloy; composite pipe; elasto-plastic buckling; stability

收稿日期: 2006-01-16

基金项目: 国家自然科学基金重点基金(编号 50238030)

作者简介: *钱 鹏(1980), 男, 江苏宜兴人, 博士生, 从事结构工程研究;

叶列平(1960), 男, 浙江温州人, 教授, 博士, 博导, 从事结构工程研究(E-mail: ylp@tsinghua.edu.cn);

冯 鹏(1977), 男, 陕西耀县人, 讲师, 博士, 从事 FRP 结构研究(E-mail: fengpeng@tsinghua.edu.cn).

近年来,碳纤维增强复合材料(Carbon Fiber Reinforced Polymer,简称 CFRP)因其轻质高强和耐腐蚀性好的优点,被广泛地应用于工程结构^[1,2]。利用 CFRP 构件形成的空间结构,适应性强,维护费用低,运输安装便利,如日本开发了用 CFRP 卷管建造空间网架结构,重量只有钢网架的 25%。但由于 CFRP 构件的受力性能为弹脆性,且具有各向异性的特性,构件间的连接破坏往往成为控制结构承载力的关键^[3]。为了改善 CFRP 构件连接承载力,提高其延性,本文建议将 CFRP 与铝合金组合,形成 CFRP - 铝合金组合结构构件。这种新型高强、轻质、耐腐蚀组合结构可用于大跨度空间结构、开合结构和耐腐蚀结构,并可用于航天空间结构。针对工程中常用的空间网架结构杆件,本文研制了 CFRP - 铝合金组合管(见图 1)。



图 1 CFRP—铝合金组合管
Fig.1 CFRP—aluminum alloy composite pipe

本文首先对 9 根 CFRP - 铝合金组合管(以下简称“组合管”)轴心受压稳定试验研究,得到了组合管的基本受力性能和破坏模式。然后利用有限元软件 ANSYS^[4]建立三维有限元分析模型对其进行数值分析,补充试验研究参数的不足。最后,基于试验结果与数值分析结果,修正 Perry 稳定公式,得到了组合管的稳定承载力计算公式。

1 试验研究概况

铝合金管外壁粘贴包裹 CFRP 布铺层形成 CFRP - 铝合金组合管。铝合金材料为热处理铝合金材料 6061-T6,其基本力学性能参数见表 1。外包 CFRP 铺层可视为线弹性正交各向异性材料,其基本力学参数可以简化为 4 个。根据材性试验结果,如表 2 所示。

根据铝合金管的长细比的不同将试件分为 3 组,每组试件的 CFRP 铺层结构不同,铝合金管截面尺寸均为 49.7mm × 3.1mm,具体几何参数如表 3

所示。试验加载装置如图 2 所示。

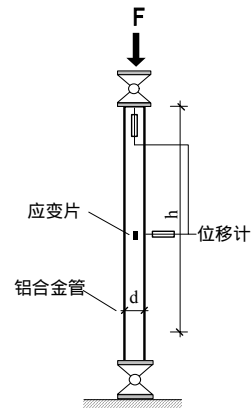


图 2 ACCP 轴压试验装置
Fig.2 ACCP setup for stable test

表 1 铝合金材料的力学性能参数
Table 1 Aluminum material parameters

$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\epsilon_{0.2}$ / $\mu\epsilon$	σ_u /MPa	ϵ_u / $\mu\epsilon$	E/GPa	ν
259	3881	323	17504	69.8	0.36

表 2 CFRP 材料的力学性能参数
Table 2 CFRP material parameters

E_1 /GPa	E_2 /GPa	G_{12} /GPa	ν_{21}
71.5	3.37	1.53	0.36

通过在试件两端设置单向刀铰;在试件中部沿周边均匀布置 4 片应变片测量纵向应变,并在加载端和杆件中部分别设置了竖向位移计和水平位移计。试验时用千斤顶按 10kN/min 速度匀速加载直至杆件破坏。试验过程中,试件从加载初始就开始产生横向变形;达到屈曲荷载时,横向变形已很大。对于 ACCP60 与 ACCP70 两组试件,发生的是弹塑性屈曲;而 ACCP120 组试件,则是弹性屈曲。最终破坏时,没有发现 CFRP 与铝合金发生剥离。各试件的试验结果如表 3 所示,其中 P_{cr} 为屈曲荷载; D_v 、 D_h 分别表示试件屈曲时的最大竖向与横向位移。

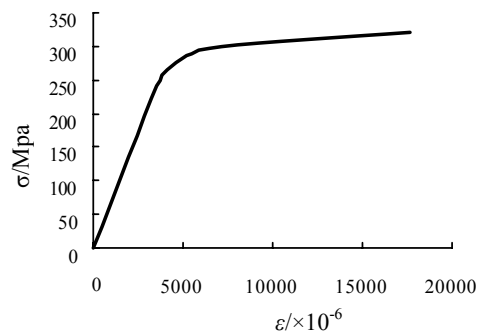


图 3 铝合金的应力应变关系
Fig.3 Aluminum stress and strain relation

表 3 CFRP - 铝合金组合管的几何参数和主要试验结果
Table 3 CFRP-aluminum composite pipes geometric parameters and test results

试件编号	构件长度/mm	管外径/mm	CFRP 厚度/mm	CFRP 铺层	P_{cr}/kN	D_v/mm	D_h/mm
ACCP60-0	950	49.7	/	无	90	3.9	2.5
ACCP60-2	950	54.6	2.7	[0/90] ₂	103	3.3	0.9
ACCP60-3	950	57.0	3.5	[0/90] ₃	120	4.7	0.9
ACCP70-2	1100	54.6	2.7	[0/90] ₂	90	2.9	3.8
ACCP70-3	1100	57.0	3.5	[0/90] ₃	111	2.5	0.9
ACCP120-0	1950	49.7	/	无	19	5.9	6.0
ACCP120-1	1950	52.5	1.5	[0/90] ₁	24	7.4	14.0
ACCP120-2	1950	54.6	2.7	[0/90] ₂	30	9.7	22.4
ACCP120-3	1950	57.0	3.5	[0/90] ₃	36	10.0	26.3

ACCP120-1: Aluminum alloy CFRP Circular Pipes (铝合金 CFRP 圆形组合管)120(铝合金管的长细比为 120) - 1(铺层的层数)
[0/90]₂: [0/90]表示一个子层合板, 下标 2 表示子层合板的重复数目

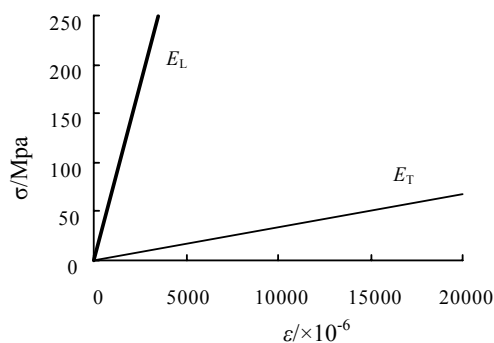


图 4 CFRP 的应力应变关系
Fig.4 CFRP stress and strain relation

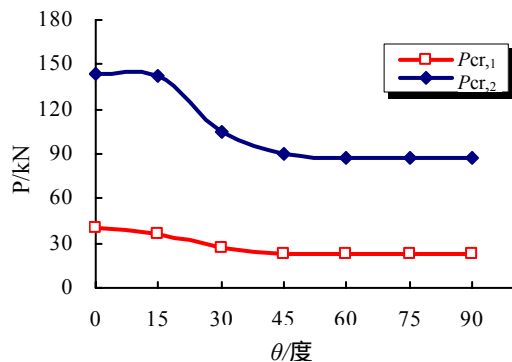


图 5 屈曲荷载与铺层角度的关系曲线
Fig.5 Buckling loads and ply angles relation

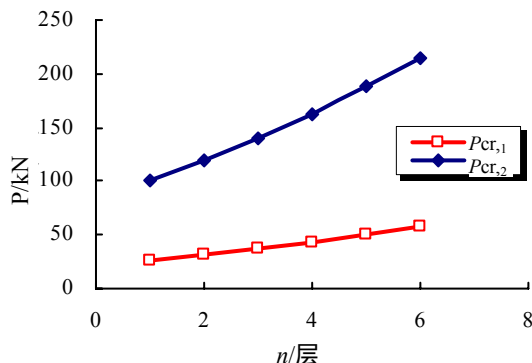


图 6 屈曲荷载与铺层层数的关系曲线
Fig.6 Buckling loads and ply numbers relation

2 特征值屈曲及屈曲模态分析

为了深入研究组合管的轴心受力性能, 弥补试验研究参数范围的不足, 本文采用 ANSYS 软件建立三维有限元模型对组合管的弹塑性屈曲性能进行模拟。铝合金管采用 Solid45 三维实体单元^[4], 并采用试验实测的多折线弹塑性本构关系(见图 3); 外包 CFRP 铺层采用 Solid46 三维实体层合单元模型^[4], 按各向异性弹性材料考虑, 其本构关系如图 4 所示。分析时, 假定铝合金管与外包 CFRP 铺层界面粘结良好且无相对变形, 接触界面上的铝合金单元与 CFRP 单元共节点。

首先对两端铰接轴心受压组合管进行特征值屈曲分析, 研究不同铺层角度、厚度和顺序对特征值屈曲荷载和模态的影响:

(1) CFRP 铺层角度的影响。取 CFRP 铺层数为 4 的组合管进行分析, 采用对称角度铺层结构 $[-\theta/\theta/\theta/-\theta]$, θ 为 CFRP 铺层角度, 即纤维与管轴线的夹角在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间每 15° 变化一次。图 5 为第一阶、第二阶特征值屈曲荷载 $P_{cr,1}$ 和 $P_{cr,2}$ 随 CFRP 铺层角度的变化曲线, 可见 $\theta=0^\circ$ 时, 屈曲荷载值最大, 随铺层角度的增加, 屈曲荷载值减小, 在 $0^\circ \sim 60^\circ$ 之间呈非线性递减, 而在 $60^\circ \sim 90^\circ$ 之间, 屈曲荷载值基本为常数。

(2) CFRP 铺层层数的影响。取正交铺层 $[0/90]_n$ 的组合管进行分析, CFRP 铺层层数 n 从 1 变化到 6, 对特征值屈曲荷载值的影响见图 6。由图可知, $P_{cr,1}$ 和 $P_{cr,2}$ 均随 CFRP 铺层层数呈非线性递增, 这是因为杆件受弯刚度随 CFRP 铺层层数呈非线性增加。

(3) CFRP 铺层顺序的影响。取 4 层 CFRP 正交

铺层的组合管进行分析，其中两层纤维的铺层角度为 0°，另外两层为 90°，通过变化它们之间的铺层顺序，研究 CFRP 铺层顺序的影响，计算结果见表 4，可见 CFRP 铺层顺序的变化对特征值屈曲荷载的影响很小，可以忽略。

表 4 铺层顺序的影响
Table 4 Influence of ply sequence

铺层	[0 ₂ /90 ₂]	[90 ₂ /0 ₂]	[0/90] ₂	[0/90 ₂ /0]	[90/0 ₂ /90]
$P_{cr,1}/kN$	30.8	31.8	31.0	31.3	31.3
$P_{cr,2}/kN$	118.2	122.0	118.7	120.1	120.1

表 5 考虑 1/1000 初始几何缺陷的有限元与试验结果比较
Table 5 Comparison between test and FE results considering 1/1000 initial geometric imperfection

编号	P_{Ex}/kN	P_{FEM}/kN	$\bar{\lambda}$	$f_{0.2A}/kN$	φ_{Ex}	φ_{FEM}	相对误差
ACCP60-0	90	87.7	1.18	132	0.681	0.663	-2.6%
ACCP60-2	103	100.0	1.14	193	0.534	0.518	-2.9%
ACCP60-3	120	110.5	1.12	225	0.533	0.491	-7.9%
ACCP70-2	90	89.6	1.32	193	0.467	0.465	-0.4%
ACCP70-3	111	107.0	1.30	225	0.493	0.475	-3.6%
ACCP120-0	19	18.7	2.43	132	0.144	0.142	-1.6%
ACCP120-1	24	24.7	2.39	167	0.144	0.148	2.9%
ACCP120-2	30	31.0	2.35	193	0.156	0.161	3.3%
ACCP120-3	36	37.8	2.30	225	0.160	0.168	5.0%

3 弹塑性屈曲分析

3.1 数值模型校核

由特征值屈曲分析可知，不同的几何参数对组合管轴心受压的屈曲模式没有影响。因此，可以以一阶屈曲模式为基础引入初始几何缺陷对组合管进行弹塑性屈曲分析。由于本次试验采用的是热处理挤压铝合金管，铝合金管件的力学缺陷很小，因此只考虑初始几何缺陷^[5]。分别取杆长的 1/1000、1/750 和 1/500 的一阶特征值屈曲模式进行分析，结果表明初始缺陷为 1/1000 的一阶特征值屈曲模式的计算结果与试验结果比较符合，如表 5 所示，其中 $\bar{\lambda}$ 为正则化长细比，其定义见下式：

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{f_{0.2}}{E}} \tag{1}$$

$$\lambda = \frac{\mu L}{r}, \quad r = \sqrt{\frac{I_A + \sum I_{Ci} E_{L,Ci} / E_A}{A_A + \sum A_{Ci} E_{L,Ci} / E_A}}$$

式中， $E_{L,Ci}$ 为第 i 层 CFRP 的轴向弹性模量； E_A 为

铝合金的弹性模量； I_{Ci} 为第 i 层 CFRP 的截面惯性矩； I_A 为铝合金的截面惯性矩； A_{Ci} 为第 i 层 CFRP 的截面面积； A_A 为铝合金的截面面积； r 为组合杆截面的回转半径。

由表 5 可知，除了 ACCP60-3 的有限元结果比试验结果小 7.9% 之外，其它试件有限元结果与试验结果的相对误差均在 $\pm 5\%$ 之内，均方差平均为 -0.9% 只有 4.0%。因此，以下数值分析均以初始缺陷为 1/1000 的一阶特征值屈曲模式的有限元模型来分析不同铺层厚度与长细比对组合管弹塑性屈曲性能的影响。

3.2 铺层角度的影响

由于 CFRP 铺层角度的改变，将影响截面的抗弯刚度进而影响构件的长细比。为了便于比较分析，选取三组长度分别为 1.15m、2.32m 和 3.46m 的组合管进行分析，组合管的截面均为 54.8×5.4 ，其中铝合金管截面为 50×3 。同一组管件的 CFRP 铺层层数均为 4，每层厚度为 0.6mm，采用对称角度铺层 $[-\theta/\theta/\theta/-\theta]$ ，纤维铺层角度 θ 从 0° 变化到 90°。

分析结果表明纤维铺层角度对弹塑性屈曲性能的影响与其对弹性特征值屈曲的影响情况基本相同，0° 为最优铺层角度，此时 CFRP 对提高组合管的屈曲荷载值最为有效。

3.3 铺层厚度的影响

分别选取长细比为 20、30、40、50、60、80、120 和 180 的 8 组组合管进行分析，CFRP 采用 $[0/90]_n$ 正交铺层，每层厚度 0.6mm，铺层数 $n = 2 \sim 5$ ，另外还考虑了纯铝合金管和铺层为 $[0/90]_2$ 的纯 CFRP 管。对于同一组管件，增加铺层的同时，通过调整试件的长度使得长细比 λ 保持相同。计算结果如图 7 所示，其中 P_n 为铺层数 n (以 $[0/90]$ 为一个铺层单位) 的组合管屈曲荷载值； P_0 为纯铝合金管的屈曲荷载值。由图 7 可以得到以下结论：

(1) 同一组构件， P_n/P_0 随着铺层数 n 的增大而增大，这是因为组合管截面弯曲刚度随 CFRP 铺层数的增加而增大。但当长细比 λ 大于 30 时， P_n/P_0 随着铺层数 n 的增大基本呈线性关系增加；而当长细比 λ 小于 30 时， P_n/P_0 随着铺层数 n 的增大呈非线性关系增加；

(2) 当 $\lambda > 60$ ($\bar{\lambda} \geq 1.25$) 时，组合管的破坏为弹性屈曲破坏，因此同一组组合管的稳定系数几乎相

同;当 $\lambda < 60$ ($\bar{\lambda} < 1.25$) 时,组合管为弹塑性屈曲破坏,随着 CFRP 层数的增加,组合管的稳定系数不断提高。

3.4 长细比的影响

取组合管长度为 0.36m~3.5m,整体长细比在 20~200 范围内变化进行分析。组合管的截面为 54.8×5.4 ,其中铝合金管截面为 50×3 ,CFRP 铺层为 $[0/90]_2$,每层厚度为 0.6mm,共 4 层。计算结果如图 8 所示。图中每一条曲线表示不同长细比组合管在整个加载过程中,相对荷载值 $P/f_{0.2}A$ 与相对横向位移 δ/l 的关系,图中虚线是不同长细比组合管最大荷载值点的连线。由图 8 可知, $P/f_{0.2}A$ 最大值随长细比 λ 增大呈非线性递减;长细比 λ 越大, $P/f_{0.2}A$ 达到最大值时的 δ/l 也越大;随着长细比的增加,组合管的破坏由弹塑性失稳,逐渐变为弹性失稳。

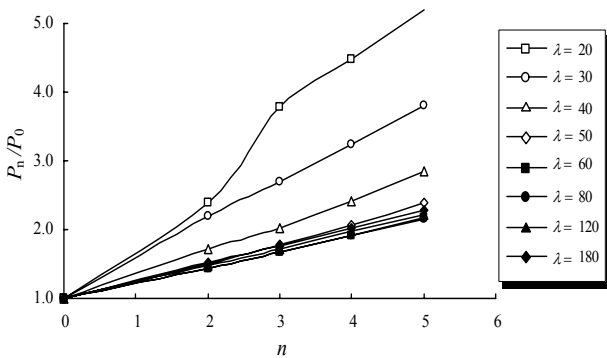


图 7 P_n/P_0-n 关系
Fig.7 P_n/P_0-n relation

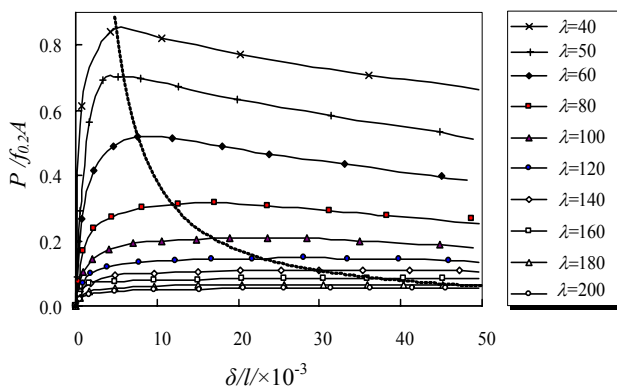


图 8 $P/f_{0.2}A - \delta/l$ 关系
Fig.8 $P/f_{0.2}A - \delta/l$ relation

由于铝合金不是一种理想弹塑性材料,当构件长细比足够小时,应力超过 $f_{0.2}$ 后,铝合金和 FRP 的应力值还会继续增加,因此组合管的稳定系数将会大于 1.0,本文从偏于安全的角度考虑建议当其

大于 1 时取其值等于 1。

图 9 为不同铺层厚度的组合管的稳定系数随正则化长细比变化的计算分析结果。其中,Al 表示纯铝管, $[0/90]_n$ 表示铺层数 n (以 $[0/90]$ 为一个铺层单位)的组合管,CFRP 表示纯 CFRP 管。由图可知,组合管稳定系数随正则化长细比的变化可以分成两段:

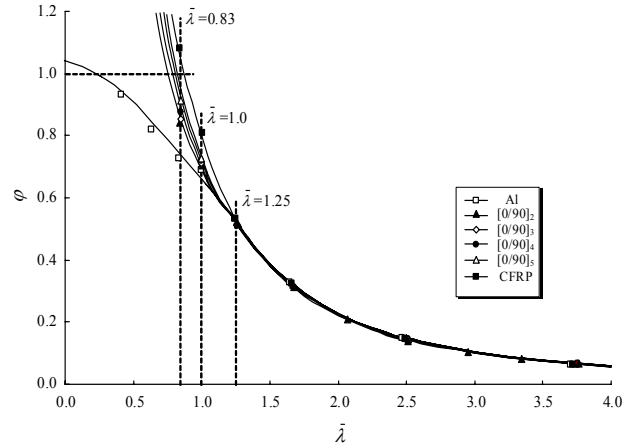


图 9 稳定系数与正则化长细比的关系

Fig.9 Relation between stability coefficient and normal slenderness ratio

(1) $\bar{\lambda} \geq 1.25$ ($\lambda \geq 60$) 时,无论是纯 FRP 管、纯铝合金管,还是组合管,都发生弹性屈曲破坏,不同铺层数的组合管的柱子曲线基本相同;

(2) $\bar{\lambda} < 1.25$ ($\lambda < 60$) 时,纯 CFRP 管是弹性屈曲破坏,纯铝合金管为弹塑性屈曲破坏,而组合管则是介于两者之间,CFRP 铺层数越多,越接近弹性屈曲破坏,CFRP 铺层数越少则越接近弹塑性屈曲破坏。因此,对于相同长细比的组合管,CFRP 铺层数越多,稳定系数越高。

4 CFRP-铝合金组合长管的设计公式

本文主要研究 $\bar{\lambda} \geq 1.25$ 组合长管的稳定承载力计算公式,对于 $\bar{\lambda} < 1.25$ 的组合短管,需考虑局部屈曲等影响因素,将另文进行分析研究。

轴心受压组合长管稳定承载力可用下式计算:

$$P_{cr} = \phi f_{0.2}A$$

$$A = \sum A_{Ci} E_{L,Ci} / E_A + A_A \tag{2}$$

其中, $f_{0.2}A$ 为组合管的强度; ϕ 为稳定系数。对于本文研究的组合管,其轴心受压稳定承载力,理论上与以下薄壁钢结构的 Perry 稳定公式^[6](见式 3)最为接近,因此,本文以 Perry 公式为基本函数表达

式,对数值计算结果和试验结果拟合得到组合管稳定系数的表达式。

$$\varphi = \frac{1}{2\bar{\lambda}^2} [(1 + \varepsilon_0 + \bar{\lambda}^2) - \sqrt{(1 + \varepsilon_0 + \bar{\lambda}^2)^2 - 4\bar{\lambda}^2}] \quad (3)$$

式中, ε_0 为等效相对初弯曲。为了明确组合管中 CFRP 对屈曲荷载的影响,定义以下截面抗弯刚度组合比 ξ 来反映截面中 CFRP 抗弯刚度与截面总抗弯刚度的比值。

$$\xi = (\sum E_{L,Ci} I_{Ci}) / (\sum E_{L,Ci} I_{Ci} + E_A I_A) \quad (4)$$

根据《冷弯薄壁型钢结构技术规范 GB50018-2002》^[7],可假定 ε_0 表达式为:

$$\varepsilon_0 = a_1 + a_2 \bar{\lambda}^2 \quad (5)$$

根据本文的试验结果和数值分析结果,采用最小二乘法进行回归,对于 $\bar{\lambda} \geq 1.25$ 的组合管,得到式(6)。

表 6 长管稳定系数的计算结果与试验结果的比较

Table 6 Comparison between test and calculative results of long pipe stability coefficient

统计项目	GB50017-2003	GB50018-2002	ECCS	美国铝合金	修正 Perry	本文公式(6)
$(\varphi_C / \varphi_E)_{\max}$	1.14	1.03	1.13	1.16	1.15	1.12
$(\varphi_C / \varphi_E)_{\min}$	0.99	0.91	0.98	0.92	1.01	1.03
平均值 m	1.07	0.97	1.06	1.06	1.09	1.06
均方差 σ	5.0%	4.0%	5.4%	9.6%	5.2%	4.0%
变异系数 σ / m	4.6%	4.2%	5.1%	9.0%	4.8%	3.3%

表 7 长管稳定系数的计算结果与数值结果的比较

Table 7 Comparison between numerical and calculative results of long pipe stability coefficient

统计项目	GB50017-2003	GB50018-2002	ECCS	美国铝合金	修正 Perry	本文公式
$(\varphi_C / \varphi_E)_{\max}$	1.08	0.97	1.08	1.24	1.10	1.06
$(\varphi_C / \varphi_E)_{\min}$	0.97	0.89	0.96	0.91	0.99	0.98
平均值 m	1.02	0.92	1.01	1.02	1.03	1.01
均方差 σ	2.6%	1.8%	3.0%	11.6%	2.6%	2.0%
变异系数 σ / m	2.5%	1.9%	3.0%	11.4%	2.5%	1.5%

目前国内外有关设计规范常用的稳定系数计算方法有:GB50018-2002 的 Q235 曲线^[7],GB50017-2003 的 b 类曲线^[8],ECCS 用于热轧铝合金的 a 类曲线^[9]以及美国铝合金设计手册^[10]中的设计曲线。这些文献计算公式和式(6)的计算结果与试验结果对比的统计情况见表 6;与数值结果对比的统计情况见表 7。表中, $(\varphi_C / \varphi_E)_{\max}$ 和 $(\varphi_C / \varphi_E)_{\min}$ 分别表示稳定系数的计算结果与试验结果或数值结果之比的最大值和最小值。对比结果表明,式(6)的计算

值与数值结果和试验结果的吻合很好,两者之比的平均值分别为 1.01 与 1.06,最大离散度为 3.3%,是所有计算公式中结果最好的。

$$\bar{\lambda} \geq 1.25, \varphi = \frac{1}{2\bar{\lambda}^2} \{ [(a_1 + 1) + (a_2 + 1)\bar{\lambda}^2] - \sqrt{[(a_1 + 1) + (a_2 + 1)\bar{\lambda}^2]^2 - 4\bar{\lambda}^2} \} \quad (6)$$

$$a_1 = -0.2\xi^2 + 0.06\xi + 0.10$$

$$a_2 = 0.09\xi^2 - 0.03\xi + 0.05$$

5 结语

本文以 CFRP - 铝合金组合管的轴心受压试验研究为基础,通过有限元方法,对组合管的弹塑性稳定性能进行了分析,研究了不同的 CFRP 铺层角度、厚度和顺序的影响,得到以下研究结果:

(1) 组合管的破坏模式与一般 FRP 脆性破坏的模式不同,其破坏呈现出一定的延性,与铝合金管的破坏模式较为接近。

(2) 长度和 CFRP 铺层角度相同的组合管,弹塑性屈曲荷载随铺层角度变化的规律与弹性特征值屈曲结果完全相同;当 CFRP 铺层角度为 0 度时,CFRP 对提高组合管的屈曲荷载值最为有效。

(3) 对于正交铺层的组合管,变化 CFRP 铺层顺序对组合管屈曲荷载的影响不大,可以忽略。

(4) 组合管的稳定系数随着正则化长细比的减小成非线性递增。当正则化长细比减小到某一数值时,组合管的稳定系数将会大于 1,这是由于组合管的稳定系数的是以 $f_{0.2}$ 为屈服标准定义的,但铝合金材料实际上不是一种理想弹塑性材料,当其应力在达到 $f_{0.2}$ 之后,铝合金与 CFRP 的应力值还会继续增加,导致组合管的稳定系数大于 1。但由于此时组合管的变形已较大,因此在设计时可偏安全的取稳定系数为 1。

(5) 随着组合管长细比的减小,组合管的破坏模式将由弹性失稳逐渐转变为弹塑性失稳。因此,组合管稳定系数可以根据正则化长细比的分成两段: $\bar{\lambda} \geq 1.25$ ($\lambda \geq 60$),为弹性屈曲阶段,CFRP 铺层层数对提高组合管的稳定系数的影响不大; $\bar{\lambda} < 1.25$ ($\lambda < 60$)为弹塑性屈曲阶段;增加 CFRP 层数可以明显提高组合管的稳定系数。

(6) 对于 $\bar{\lambda} \geq 1.25$ 的组合长管,采用本文的建议公式的计算值与试验结果和数值结果都吻合较好,因此可用于计算组合长管的屈曲荷载值。

参考文献：

- [1] Hollaway L C. The evolution of and the way forward for advanced polymer composites in the civil infrastructure. proceedings of the international conference on frp composites in civil engineering, Hong Kong. Elsevier Science Ltd [C].2001: 27~40.
- [2] 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): 24~36
Ye Lieping, Feng Peng. Application and development of fiber-reinforced polymer in engineering structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(3): 24~36. (in Chinese)
- [3] 钱鹏, 叶列平, 翁冠群. CFRP 管轴心受力性能的试验研究[J]. 工业建筑, 2004, 34(4): 11~14.
Qian Peng, Ye Lieping, Weng Guan-qun. Experimental study of CFRP pipes under axial force [J]. Industrial Construction, 2004, 34(4): 11~14. (in Chinese)
- [4] ANSYS, Inc. ANSYS 6.1 User's Manual [M]. 2000.
- [5] Mazzolani F M. Aluminum alloy structure [M]. Boston: Pitsman, 1985.
- [6] 陈骥. 钢结构稳定理论与设计(第二版) [M]. 北京: 科学出版社, 2003, 9.
Chen Ji. Stability of steel structures theory and design (2nd Edition) [M]. Beijing: Science Press, 2003, 9. (in Chinese)
- [7] 中华人民共和国国家标准(GB50018-2002). 冷弯薄壁型钢结构技术规范[S].
National Standard of PRC (GB50017-2003). Technical specifications for cold-rolled thin-wall forming shapes [S]. (in Chinese)
- [8] 中华人民共和国国家标准(GB50017-2003). 钢结构设计规范[S].
National Standard of PRC (GB50017-2003). Code for design of steel structure [S]. (in Chinese)
- [9] Mazzolani F M. The bases of the european recommendations for design of aluminum alloy structures [M]. Aluminio, 1980(2): 77~94.
- [10] Aluminum Association. Specification for aluminum structures, 2nd edition [S]. USA, 1994.

(上接第 35 页)

- [5] 董石麟. 我国大跨度空间结构的发展与展望[J]. 空间结构, 2000, 6(2): 3~13.
Dong Shilin. The development and prospect of long-span steel space structures in China [J]. Spatial Structures, 2000, 6(2): 3~13. (in Chinese)
- [6] 夏开全, 董石麟. 局部双层网壳结构的几何非线性分析[J]. 空间结构, 1999, 5(2): 29~37.
Xia kaiquan, Dong shilin. Geometrically nonlinear analysis of partial double-layer reticulated shell [J]. Spatial Structures, 1999, 5(2): 29~37. (in Chinese)
- [7] 曾银枝, 钱若军, 王人鹏, 杨联萍. 铝合金穹顶试验研究[J]. 空间结构, 2000, 6(4): 47~52.
Zeng Yinzhi, Qian Ruojun, Wang Renpeng, Yang Lianping. Experimental research on the aluminous-alloy dome [J]. Spatial Structures, 2000, 6(4): 47~52. (in Chinese)
- [8] 林有军, 沈世钊. K6 型单层球面网壳结构的稳定性[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1997, 30(2): 39~44.
Lin Youjun, Shen Shizhao. Stability of K6 single layer reticulated shells [J]. Journal of Harbin University of C.E. & Architecture, 1997, 30(2): 39~44. (in Chinese)
- [9] 沈世钊, 陈昕. 网壳结构稳定性[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
Shen Shizhao, Chen Xin. Stability of reticulated shells [M]. Beijing: Science Press, 1999. (in Chinese)
- [10] 王红, 李丽娟, 朱艳峰. 单层球面网壳的几何非线性稳定分析[J]. 华南理工大学学报, 2003, 31(增刊): 107~109.
Wang Hong, Li Lijuan, Zhu Yanfeng. Nonlinear stability analysis of single layer latticed domes [J]. Journal of South China University of Technology, 2003, 31(Sup.): 107~109. (in Chinese)
- [11] 王红, 袁兵, 李丽娟, 唐石丁. 单层铝合金球面网壳的几何非线性稳定分析[J]. 广东工业大学学报, 2003, 20(3): 1~4.
Wang Hong, Yuan Bing, Li Lijuan, Tang Shiding. Analysis of nonlinear stability of single aluminum alloy layer latticed domes [J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2003, 20(3): 1~4. (in Chinese)