

CFRP-铝合金组合管 Keiwitt 网壳弹塑性稳定性

钱 鹏, 冯 鹏, 叶列平

(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)

摘 要: 采用有限元方法研究碳纤维增强复合材料(CFRP)-铝合金组合管构成的 Keiwitt 网壳结构的弹塑性稳定性能, 并与纯铝合金网壳进行对比。先通过组合管轴心受压的试验结果校验了有限元模型; 再对 CFRP-铝合金组合管构成的网壳进行全过程分析, 其中考虑几何和材料非线性, 获得了极限承载力; 并研究矢跨比、初始缺陷和非对称荷载分布等参数对网壳稳定性和极限承载力的影响; 最后比较了组合管网壳与纯铝合金网壳的经济性。结果表明, 组合管网壳的材料费用虽较高, 但其承载力高, 对几何缺陷和非对称荷载敏感性小, 适合于建造大跨结构。

关键词: 组合构件; 网壳; 大跨空间结构; 轻质结构; 有限元分析

中图分类号: TU 395

文献标识码: A

文章编号: 1000-0054(2007)09-1423-04

Elasto-plastic stability of Keiwitt latticed domes made of carbon fiber reinforced polymer-aluminum alloy composite pipes

QIAN Peng, FENG Peng, YE Lieping

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

Abstract: The elasto-plastic stability of Keiwitt latticed domes made by carbon fiber reinforced polymer (CFRP)-aluminum alloy composite pipes is investigated using the finite element method. It was compared with the pure aluminum latticed domes. The finite element model of the composite pipes was verified by comparison with axial compressive test results. The complete loading process of the domes using composite pipes was then analyzed to get their ultimate capacity using nonlinear geometric and material effects. The model was used to analyze the influence of various parameters, including the rise-span ratio, initial imperfections, and unsymmetrical loads, on the stability and ultimate bearing capacity of the dome. Finally, the economics of latticed domes built using composite pipes and pure aluminum alloy pipes is compared. The results show that composite pipe latticed domes have higher loading capacities and less sensitivity to geometric imperfections and unsymmetrical loads although their material costs are more than that of pure aluminum alloy tubes. Hence, latticed domes made by

CFRP-aluminum alloy composite pipes are suitable for long-span structures

Key words: composite element; latticed dome; long-span spatial structures; light-weight structure; finite element analysis

碳纤维增强复合材料(carbon fiber reinforced polymer, CFRP)和铝合金材料均具有轻质和耐腐蚀的优点。两者形成的组合构件和结构已在航空工业中得到广泛应用^[1], 也被用于各种交通工具的制造^[2]。近年来, CFRP 开始在土木工程结构中得到推广应用^[3]。但由于 CFRP 材料的各向异性的特点, 纯 CFRP 杆件连接部位的剪切破坏往往成为控制杆件承载力的关键, 且破坏具有脆性特征, 使得 CFRP 材料的高强特性无法得到发挥^[4]。本文针对大跨杆系结构, 开发了 CFRP-铝合金组合管, 其由铝合金管外部粘贴碳纤维布加工而成。网壳结构是一种空间结构形式, 稳定性能是其最主要的受力特性^[5-7]。

本文将 CFRP-铝合金组合管应用于 Keiwitt 网壳结构中, 采用有限元方法进行了非线性全过程分析, 与铝合金管网壳结构进行了比较; 还对主要的结构参数进行了分析。

1 分析模型

有限元分析采用 ANSYS^[8] 进行, 铝合金管采用 Beam 188 单元, 为圆环截面, 材料为各向同性材料。因 CFRP 的横向铺层(T 方向)的刚度和承载力都远小于纵向铺层(L 方向), 且构件在整体结构中主要受轴向力, 因此仅考虑 CFRP 层的轴向特性, 采用 Beam 4 单元模拟, 与纯铝管单元进行耦合模拟组

收稿日期: 2006-05-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50238030)

作者简介: 钱鹏(1980—), 男(汉), 江苏, 博士研究生。

通讯联系人: 叶列平, 教授, E-mail: ylp@tsinghua.edu.cn

合管。分析时采用试验实测的CFRP与铝合金的材料本构关系,分别如图1和图2所示。

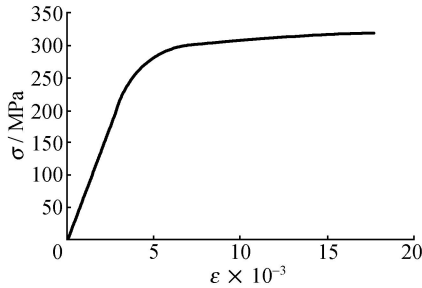


图1 铝合金的应力(ε)-应变(σ)关系

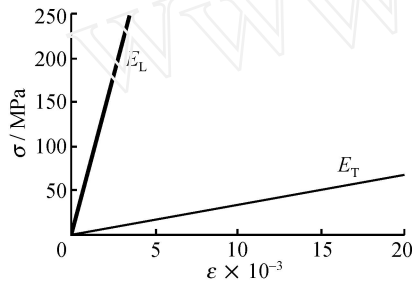


图2 CFRP的应力(ε)-应变(σ)关系

为了验证有限元模型的可靠性,利用Beam 188和Beam 4的组合单元建立组合管有限元模型,对1根纯铝管ACP和3根组合管ACCP1、ACCP2、ACCP3的轴心受压性能进行分析,并与试验结果^[9]进行对比,如图3所示。可以看出有限元模型能够很好地模拟组合管的轴心受压性能,与试验结果相比误差均在5%以下。

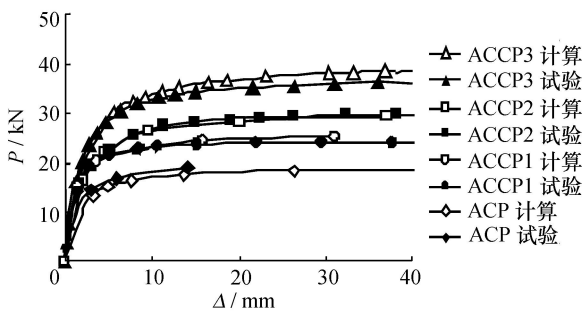


图3 构件轴心受压荷载(P)-横向变形(Δ)关系

K6型网壳由组合管杆件单元构成。跨度L为60m,杆件长度控制在3~5m的范围之内,取网格分割频率(NF)为8,如图4所示。实际工程中,单层网壳一般固接在支承结构上,因此也采用周边固支情况,且杆件间连接也均为刚性连接。

2 分析参数

2.1 构件参数

对比纯铝管和组合管网壳结构:定义管件中

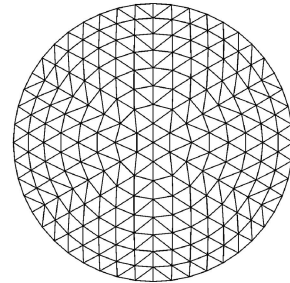


图4 K6型Keiwick网壳分析模型平面图

CFRP层厚度与管件总壁厚之比为组合比,取组合比为0、1/4两种情况进行分析。对于同一跨度的网壳,主肋与纬杆相同,采用大截面;斜杆采用小截面,取两种不同的杆件截面尺寸的组合。这样有4种构件组合,分别为A-S、C-S、A-T、C-T,具体尺寸见表1,其中A-S、A-T对应纯铝合金网壳,C-S、C-T对应为CFRP-铝合金组合杆网壳。

表1 杆件(斜杆)截面尺寸

	断面/mm	壁厚/mm	断面/mm	壁厚/mm	组合比
A-S	Φ146	5	Φ152	6	0
C-S	Φ146	5	Φ152	6	1/4
A-T	Φ168	6	Φ194	6	0
C-T	Φ168	6	Φ194	6	1/4

2.2 结构参数

本文研究的结构参数包括矢跨比、初始缺陷和荷载分布。根据常见工程情况,矢跨比分别取 $f/L = 1/5, 1/6, 1/7$ 。初始缺陷采用一致缺陷模态法进行分析,范围取为 $L/1000 \sim L/300$ 。在其他参数的分析中,以 $L/1000$ 作为基本初始缺陷。恒载按满跨均布荷载考虑;活荷载按满跨均布和半跨均布两种情况考虑,活荷载 q 和恒载 g 的比例分别取0、1/4和1/2^[10]。

3 全过程曲线及极限荷载

3.1 满跨均布荷载作用下的全过程曲线

图5给出了满跨均布荷载($q+g$)作用下3种矢跨比 f/L 和4种截面形式共12个网壳的荷载-竖向位移全过程曲线,竖向位移为每级荷载下的最大结点位移。每个结构都分别按无初始几何缺陷和 $L/1000$ 初始几何缺陷两种情况进行了分析,并取得第一个临界点处荷载值作为结构的极限荷载值。无缺陷网壳达到极限荷载时,其位移一般不超过跨度的1/250;有 $L/1000$ 初始缺陷网壳达到极限荷载时的位移约为跨度的1/200。

由图5可见,截面尺寸越大,极限荷载值和刚度就越大;截面尺寸相同,无缺陷组合管网壳的极限

荷载值比铝合金网壳提高 6% ~ 13%, 但对网壳刚度的提高不大; 初始几何缺陷为 $L/1000$ 的组合管网壳的极限荷载比铝合金网壳提高 11% ~ 35%, 且刚度也明显提高。对于有初始几何缺陷的情况, 与铝合金网壳相比, 组合管网壳极限荷载随矢跨比增加

而提高幅度比无缺陷情况增长更快: C-S 构件组比 A-S 构件组网壳的极限承载力提高幅度随矢跨比的增加差值从 0.17 kN/m^2 增加到 1.03 kN/m^2 , C-T 构件组比 A-T 构件组从 0.37 kN/m^2 增加到 0.92 kN/m^2 。

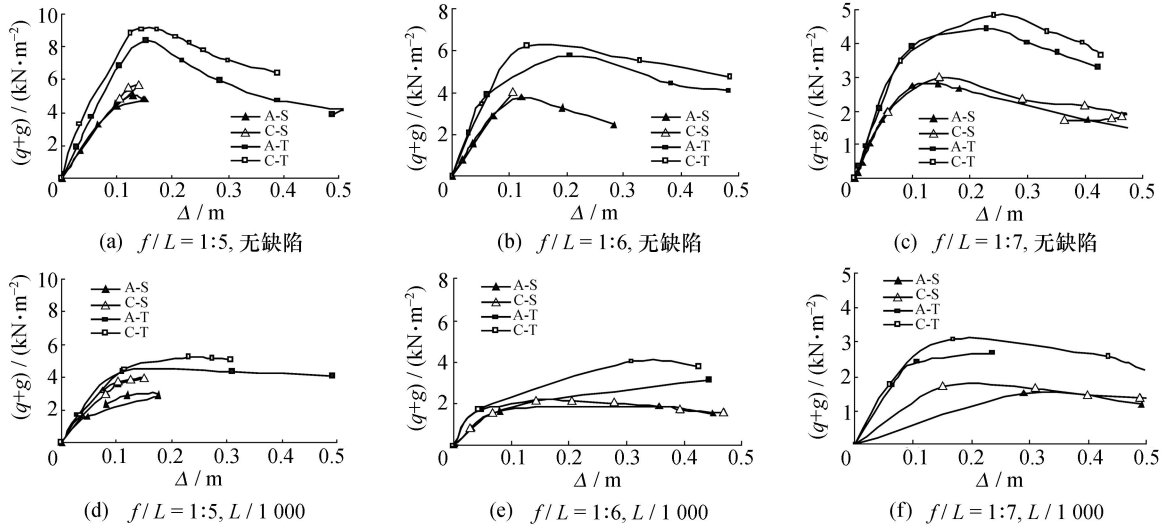


图 5 满跨均布荷载作用下网壳的全过程曲线

3.2 初始缺陷的影响

由特征值屈曲分析可得到满跨均布荷载下网壳的最不利屈曲模态, 定义缺陷影响系数为有初始缺陷网壳与无初始缺陷网壳的极限承载力之比, 反映网壳结构对初始缺陷的敏感程度。取 $L/1000$ 的初始几何缺陷进行稳定分析, 结果如表 2 所示: 缺陷影响系数在 48% ~ 69% 变化, 相同截面尺寸的组合管网壳比铝合金网壳的缺陷影响系数均要大。这表明组合管网壳对初始缺陷的敏感性小。

表 2 缺陷影响系数(初始缺陷为 $L/1000$ 时)

	$f/L = 1/5$	$f/L = 1/6$	$f/L = 1/7$
A-S	0.58	0.48	0.53
C-S	0.69	0.52	0.56
A-T	0.52	0.54	0.61
C-T	0.58	0.64	0.63

在满跨均布荷载作用下分析初始曲线大小对承载力的影响, 得到缺陷影响系数随初始缺陷变化的规律如图 6 所示。对于组合管, 当初始缺陷在 $0 \sim L/500$ 变化时, 缺陷影响系数随着初始缺陷的增大而迅速减小, 随矢跨比的增大而增大; 在 $L/500 \sim L/300$ 之间, 缺陷影响系数达到最小值。

3.3 荷载分布形式的影响

考虑两种活载与恒载比例 ($q/g = 1/4, 1/2$, 活

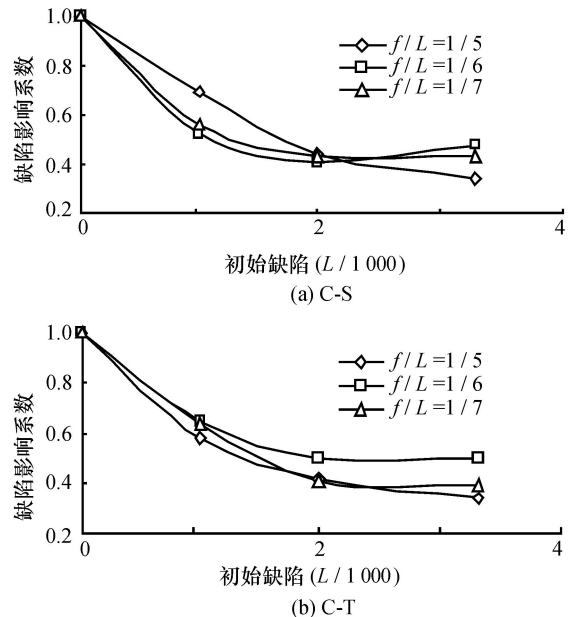


图 6 缺陷影响系数随初始缺陷变化的规律

荷载 q 按半跨分布) 的不对称荷载作用对网壳稳定性能的影响。定义不对称荷载影响系数为无初始缺陷网壳在不对称荷载作用下与满跨荷载作用下极限承载力的比值, 反映网壳结构对非对称荷载的敏感性。表 3 列出了 4 种截面和 3 种矢跨比的网壳在两种荷载比作用下计算得到的不对称荷载影响系数。

表3 不对称荷载影响系数

	$q/g = 1/4$			$q/g = 1/2$		
	$f/L: 1/5$	$1/6$	$1/7$	$1/5$	$1/6$	$1/7$
A-S	0.93	0.94	0.97	0.89	0.88	0.93
C-S	0.91	0.97	0.98	0.86	0.91	0.93
A-T	0.92	1.01	0.99	0.88	0.97	0.95
C-T	0.98	1.03	1.00	0.93	0.98	0.96

由表3可见,当荷载比 q/g 分别为 $1/4$ 和 $1/2$ 时,不对称荷载影响系数的最小值分别为0.91和0.86,当不对称荷载比从 $1/4$ 增加到 $1/2$,网壳的不对称荷载影响系数相应下降0.04~0.06。总体上看,组合管网壳比铝合金网壳的不对称荷载影响系数平均高0.015,这说明组合管网壳的极限承载力受不对称荷载削弱作用更小。

4 经济性分析

CFRP-铝合金组合构件具有合理的经济性是此结构体系研究的前提。铝合金和CFRP的密度分别为 2.7 g/cm^3 和 1.35 g/cm^3 ,价格分别约为:30元/kg和155.8元/kg。如果定义网壳的材料费用与极限承载力之比作为网壳的经济性指标 p_1 ,同样结构参数的组合管网壳和铝合金网壳经济性指标比值见表4。

表4 两种网壳经济性指标的比值

	q/g					
	无初始缺陷			$L/1000$ 初始缺陷		
	$f/L: 1/5$	$1/6$	$1/7$	$1/5$	$1/6$	$1/7$
C-S/A-S	1.25	1.33	1.33	1.05	1.23	1.27
C-T/A-T	1.30	1.31	1.30	1.17	1.10	1.24

由表4可见,无初始缺陷组合管网壳与铝合金网壳的 p_1 比值在1.25~1.33变化,平均为1.3; $L/1000$ 初始缺陷的组合管网壳与铝合金网壳的 p_1 比值在1.05~1.27变化,平均为1.18。因此在考虑 $L/1000$ 初始缺陷的实际结构中,组合比为 $1/4$ 的组合管网壳的结构材料费用比铝合金网壳高18%。考虑结构自重减轻对下部结构以及施工的影响,总体造价两者应相当,组合管网壳略高。

5 结论

1) 组合管网壳的极限承载力和刚度大。组合构件可减小网壳的非线性变形,降低其塑性程度,从而提高网壳极限承载力和刚度。无缺陷和 $L/1000$ 初始几何缺陷的组合管网壳(组合比 $1/4$),其极限承载能力比对应的铝合金网壳分别高6%~13%和11%~35%。

2) 组合管网壳初始几何缺陷敏感性小。初始几何缺陷为 $L/1000$ 的组合管网壳(组合比 $1/4$)比铝合金网壳的缺陷影响系数大2%~11%。增加组合管中CFRP比例有助于降低网壳的几何缺陷敏感性。

3) 组合管网壳荷载不对称分布敏感性小。组合管网壳(组合比 $1/4$)的不对称荷载影响系数比铝合金网壳平均高出0.015。适当提高CFRP的比例,可降低不对称荷载分布的不利影响。

4) 组合管网壳自重轻。适合建造超大跨度结构。经济性上组合管网壳比纯铝合金网壳的材料费用略高。

参考文献 (References)

- [1] Hollaway L C. The evolution of and the way forward for advanced polymer composites in the civil infrastructure [C] // Proc Intl Conf FRP Composites in Civil Engineering, 2001: 27 - 40
- [2] Lee D G, Kim H S, Kim J W, et al Design and manufacture of an automotive hybrid aluminum/composite drive shaft [J]. *Composite Structures*, 2004, 63: 87 - 99
- [3] 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 FRP in civil engineering [J]. *Civil Engineering Journal*, 2006, 39(3): 24 - 36 (in Chinese)
- [4] 钱鹏, 叶列平. 碳纤维杆的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 Guanqun. Experimental study of CFRP pipes under axial force [J]. *Industrial Construction*, 2004, 34(4): 11 - 14 (in Chinese)
- [5] 赵阳, 董石麟. 组合管网壳结构的几何非线性稳定分析 [J]. 空间结构, 1994, 1(2): 17 - 24
ZHAO Yang, DONG Shilin. The geometrically nonlinear stability analysis of the composite reticulated shell [J]. *Spatial Structures*, 1994, 1(2): 17 - 24 (in Chinese)
- [6] 曹正罡, 范峰, 沈世钊. K6型单层球面网壳的弹塑性稳定 [J]. 空间结构, 2005, 11(3): 22 - 26
CAO Zhenggang, FAN Feng, SHEN Shizhao. Elastic-plastic stability of K6 single layer latticed domes [J]. *Spatial Structures*, 2005, 11(3): 22 - 26 (in Chinese)
- [7] 王娜. 网壳结构弹塑性稳定 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨建筑大学, 1994
WANG Na. Elastic-plastic stability of latticed domes [D]. Harbin: Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 1994 (in Chinese)
- [8] ANSYS, Inc. ANSYS User's Manual [M]. ANSYS Agency, Beijing, China, 1999
- [9] 钱鹏. FRP管及FRP-铝合金组合管轴心受力性能的研究 [D]. 北京: 清华大学, 2006
QIAN Peng. Study of FRP and FRP-Aluminum alloy composite members under axial force [D]. Beijing: Tsinghua University, 2006 (in Chinese)
- [10] 沈世钊, 陈昕. 网壳结构稳定性 [M]. 北京: 科学出版社, 1999: 78 - 79
SHEN Shizhao, CHEN Xin. Stability of Latticed Domes [M]. Beijing: Science Press, 1999: 78 - 79. (in Chinese)