

DOI: 10.11918/201905108

# 考虑蒙皮效应的雷达罩结构受力性能试验

王乐<sup>1,2</sup>, 武岳<sup>1,2</sup>, 薛鹏<sup>1,2</sup>, 孙宝华<sup>3</sup>, 孟松<sup>3</sup>

(1. 结构工程灾变与控制教育部重点实验室(哈尔滨工业大学), 哈尔滨 150090;  
2. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 哈尔滨 150090; 3. 哈尔滨哈玻拓普复合材料有限公司, 哈尔滨 150030)

**摘要:** 为研究蒙皮对雷达罩铝合金骨架整体稳定性能的影响, 针对一跨度 5.8 m, 矢高 4.3 m 的雷达罩进行了静力加载试验研究, 采用自行设计的多级分配梁加载体系对雷达罩进行多点同步分级加载, 分别考虑了全部覆盖蒙皮、部分覆盖蒙皮和纯骨架 3 种工况. 试验结果表明: 由于蒙皮对铝合金构件起到侧向支撑作用, 避免了构件过早产生绕弱轴的弹性失稳, 从而使结构整体稳定承载力显著提升; 即便是在少量蒙皮单元缺失的情况下, 结构整体稳定承载力仍较纯骨架工况高很多. 因此在进行此类结构设计时, 应考虑蒙皮与骨架的协同工作性能, 可更好地解决结构安全性与电磁透明性的难题.

**关键词:** 雷达罩; 铝合金结构; 膜结构; 蒙皮效应; 静力试验

中图分类号: TU317.1

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2020)08-0176-08

## Mechanical performance test of radome structure considering diaphragm effect

WANG Le<sup>1,2</sup>, WU Yue<sup>1,2</sup>, XUE Peng<sup>1,2</sup>, SUN Baohua<sup>3</sup>, MENG Song<sup>3</sup>

(1. Key Lab of Structures Dynamic Behavior and Control (Harbin Institute of Technology), Ministry of Education, Harbin 150090, China; 2. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 3. Harbin Topfrp Composite Co. Ltd., Harbin 150030, China)

**Abstract:** To study the influence of stressed skin on the global stability of aluminum alloy frame of radome structure, a static loading test was conducted on a radome which has a span of 5.8 m and a height of 4.3 m. A self-designed multi-stage distribution beam loading system was applied to the structure, and simultaneous multi-stage loading was realized on the structure at multiple points. Three load cases, i. e., completely covering skins, partially covering skins, and framework, were discussed respectively. Test results show that due to the lateral bracing of the stressed skin on the aluminum alloy members, the prematurely elastic instability of the members around the weak axis was avoided, which significantly improved the global stability bearing capacity of the structure. When a small amount of stressed skin was destroyed, the global stability bearing capacity was still much higher than that for the framework case. Therefore, in the design of such radomes, the cooperative performance of the stressed skin and the frame should be considered to solve the problems of structural safety and electromagnetic transparency.

**Keywords:** radome; aluminum alloy structure; membrane structure; diaphragm effect; static loading test

雷达罩用于保护雷达天线的罩体, 是一种集结构功能性与电磁波透明性为一体的构筑物<sup>[1-2]</sup>. 在电磁设计中, 要求雷达罩的结构构件尺寸要尽量纤细, 使其对电磁辐射特性的影响最小; 但另一方面, 纤细的构件又可能导致结构稳定承载力不足. 因此, 如何在使用功能和结构安全两者之间取得平衡, 是雷达罩结构设计中的关键问题<sup>[3]</sup>. 目前常用的雷达罩结构形式主要有以下几种: 充气罩、玻璃钢夹层罩和金属空间构架罩(见图 1), 金属空间构架罩方兴未艾, 具有巨大发展潜力<sup>[4-5]</sup>, 美国成功开发出世界

最大的 Haystack 雷达罩<sup>[6]</sup>, 本文针对的新型金属空间构架罩是由金属网格骨架与柔性薄膜蒙皮构成, 材料选取轻盈. 但目前国内外对其研究普遍重视电磁设计, 而轻视结构设计, 现有结构设计仅考虑骨架承担荷载并取较大的安全系数予以保证<sup>[7]</sup>, 较为保守. 考虑到薄膜蒙皮与骨架连接紧密, 膜结构不仅作为围护结构, 也同时参与到骨架结构体系的整体工作中, 但骨架蒙皮协同工作效应及机理尚不明确, 本文在此方面予以创新, 助力国防事业发展.

关于蒙皮效应的研究始于 20 世纪 50 年代, 美国、英国等学者<sup>[8-10]</sup>进行了大量试验研究, 涌现诸多研究成果, 受力蒙皮结构设计理念也成功地在诸多工程案例中实现, 如平面尺寸 386 m × 70 m 的大跨结构 Covent Garden 和高 221 m 的蒙皮钢结构 Mellon Center 大厦<sup>[11]</sup>. 国内自 80 年代以来, 以张耀

收稿日期: 2019-05-15

基金项目: 国家自然科学基金(51778182)

作者简介: 王乐(1995—), 男, 硕士研究生;

武岳(1972—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 武岳, wuyue\_2000@163.com

春教授为代表的学者们针对轻钢结构进行研究:查晓雄等<sup>[12]</sup>讨论了集装箱蒙皮结构的抗侧刚度,郑瑾<sup>[13]</sup>提出了适用于工程的蒙皮体抗剪设计公式,朱勇军等<sup>[14]</sup>提出了分析蒙皮支撑钢构件静力性能的有限元法,指出长细比较大的构件在蒙皮支撑作用下受力性能得到显著改善.近年来,诸位学者开始

关注空间结构的蒙皮效应问题:丁敏等<sup>[15]</sup>研究了覆盖薄膜对温室结构稳定性的影响,Liu等<sup>[16]</sup>对单层网壳结构研究发现蒙皮可以显著提高结构的稳定承载力,并改变结构屈曲模态.但目前对作用机理研究并不深入,考虑蒙皮效应的整体结构试验较为罕见.



图1 常用雷达罩结构形式

Fig.1 Commonly used radome structures

因此本文针对一真实雷达罩结构开展了静力加载试验研究,通过全部覆盖蒙皮、部分覆盖蒙皮和纯骨架3种工况的对比,揭示蒙皮与骨架的协同工作机理,从而为实际工程应用奠定基础.

锚螺栓与反力槽固定,见图3(c).

## 1 试验目的与试验方案

### 1.3 加载装置设计

#### 1.1 试验目的

雷达罩在实际环境中风荷载为控制荷载,现有的试验条件下难以对结构施加风荷载,借鉴网壳结构常用加载方式,自行设计了多级分配梁加载体系对结构顶部6个节点均匀加载.分配梁加载体系是由拉杆和分配梁构成,见图4,可以实现对体量较大结构的多点同时加载.为了追踪结构荷载-位移全过程,布置了三层分配梁,通过一个千斤顶进行加载.该套体系千斤顶布置在最下层分配梁的三分点处,通过力的比例分配,将千斤顶施加的总拉力 $P$ 较为精确且均匀地分配给上部6个节点,每个节点分到荷载均为 $P/6$ .千斤顶固定在刚度很大的钢反力梁上,反力梁提供加载装置的反力.

新型金属空间构架雷达罩由铝合金作为骨架,由预紧力 $1\text{ kN/m}$ 的膜材作为蒙皮.为充分了解该类结构在考虑蒙皮效应时的受力特点与结构性能,为相关数值模拟提供检验模型,也为了对同领域雷达罩设计提供依据,进行了静力加载试验.

#### 1.2 试验模型

表1 试件基本参数

Tab.1 Parameters of specimens

试件	材料	截面/mm	弹性模量/MPa
杆件	6061-T6 铝合金	$9 \times 65$	58 966.5
蒙皮	PVDF 膜材	0.7	626.8

试验模型最大跨度 $5.8\text{ m}$ ,矢高 $4.3\text{ m}$ ,3/4截球型(图2),设计中保证了仅由2类三角单元组成,方便安装.杆件及蒙皮相关参数见表1.模型全装配式安装,现场将50块三角单元(图3(a))通过圆盘盖板节点(图3(b))连接拼装,单元相交处两根杆件通过预留的螺栓孔进行栓接.模型底部固定在十边形圈梁上,圈梁10个顶点与钢板焊接,再通过地

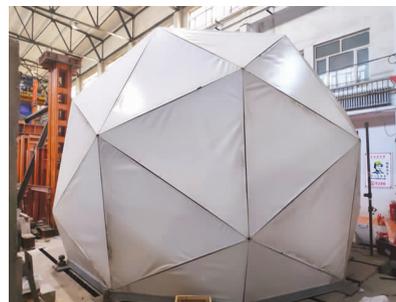
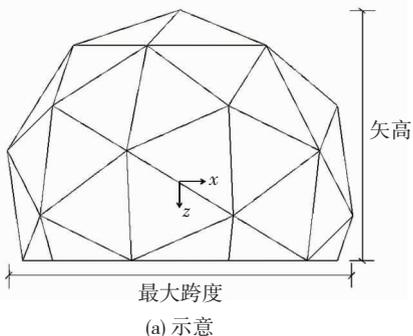


图2 试验模型

Fig.2 Test model

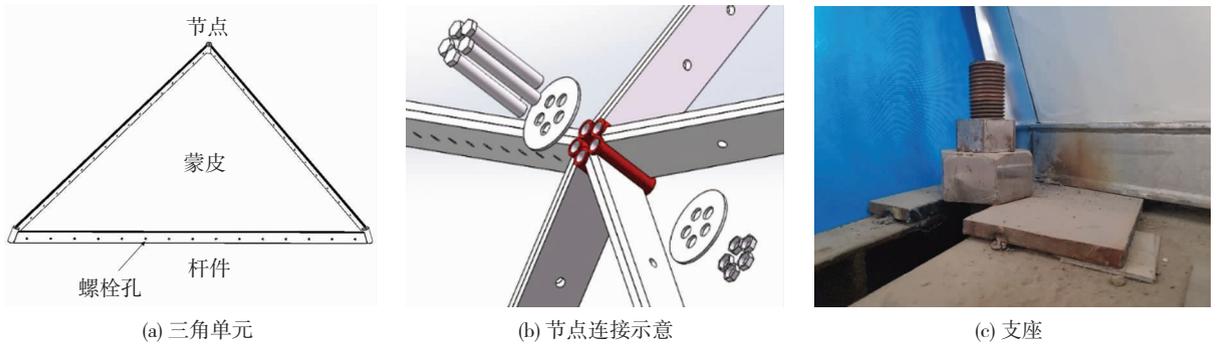


图 3 模型安装

Fig. 3 Installation of model

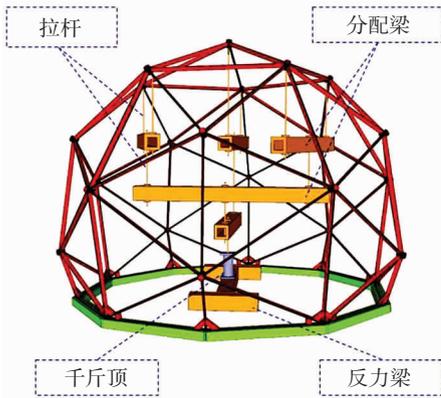


图 4 分配梁加载体系

Fig. 4 Distribution beam loading system

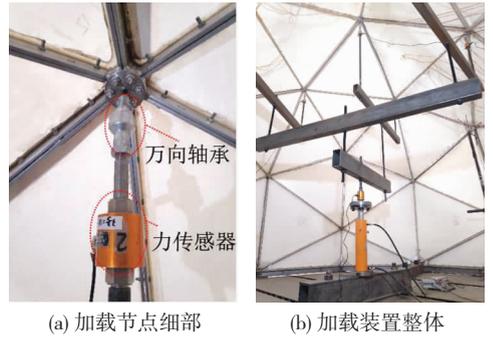


图 5 加载装置

Fig. 5 Test setup

### 1.4 加载方案

正式加载前,先采用预加载进行调试.正式加载按顺序分为 3 种工况,即 3 次单向循环加载: 1) 全部覆盖蒙皮工况.在结构弹性范围内加载,之后卸载.该工况的主要目的是检验雷达罩在覆盖蒙皮时的结构性能,研究其稳定承载力;2) 部分覆盖蒙皮工况.去除部分三角单元上的蒙皮,加载至其荷载-位移曲线即将进入非线性阶段后立刻卸载.主要目的是模拟实际工作中部分蒙皮损坏,检验其对结构稳定性能的影响;3) 纯骨架工况.将全部三角单元的蒙皮去除,加载至其屈曲后立刻卸载.

雷达罩加载节点的节点盘中央均预留螺栓孔,通过一根 M10 高强螺栓穿过节点盘加载,见图 5.由于结构变形后各节点在竖向会产生相对位移,为保证拉杆始终保持竖直方向,在结构节点与拉杆之间设置万向轴承,使拉杆可以随着节点相对位移而自由转动.为了检验分配到节点的荷载均匀性,在每个加载节点下都布置了力传感器,结构的总荷载由千斤顶施力处的力传感器读出(后文中涉及的所有荷载值除特殊说明外,均为结构的总荷载).

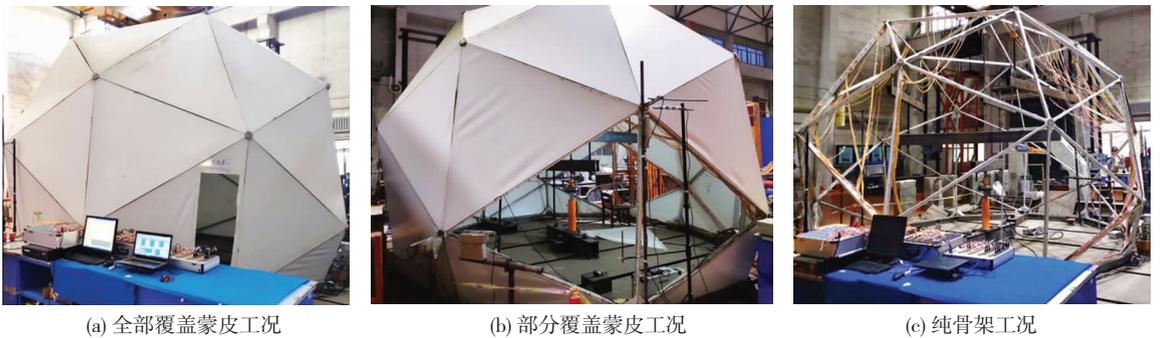


图 6 加载工况示意

Fig. 6 Diagram of loading cases

加载过程中首先用荷载控制加载,每级荷载增量为 5 kN,每级加载持续 5 min,随逐渐去除蒙皮,荷载增量逐渐减小为 2 kN.在纯骨架工况接近极限荷载时,为得到结构的屈曲后平衡路径,根据结构顶

点的位移量来控制加载,每级位移增量为 2 mm.

### 1.5 测点布置

试验中结构、约束、荷载均对称,因此在模型 1/5 区域布置测点,在外布置少量校核性测点,见图 7.

为得到节点位移与荷载的关系,布置了 9 个位移计测量节点竖向位移,布置了 2 个位移计用于测量杆件 L15 和 L19 跨中竖向位移,另外布置了 10 个位移计测节点水平位移. 3 个百分表布置在 3 个支座节点处,用于测量支座径向位移. 合位移通过节点或杆件编号表示,编号 D - K17 表示 17 号节点的合位移,计算为

$$D = \sqrt{D_x^2 + D_y^2 + D_z^2}, \quad (1)$$

式中  $D_x$ 、 $D_y$ 、 $D_z$  为两两正交位移计读取的位移值.

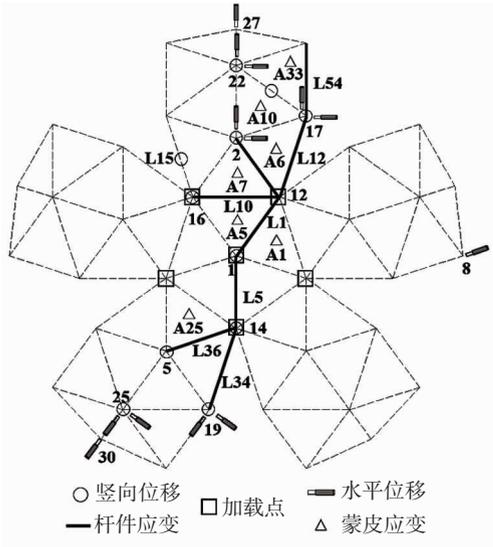


图 7 位移及应变测点布置

Fig. 7 Displacement and strain measurement arrangement

采用应变采集系统测量杆件和蒙皮的应变:同一根结构杆件布置纵向应变片 12 个,分别置于跨中及靠近节点处,蒙皮布置应变花,见图 8. 通过杆件的应变可以计算杆件所受的轴力  $N$  和双向弯矩  $M_y$ 、 $M_z$ ,通过应变花数据可以计算蒙皮的 Mises 应力  $\sigma_s$ ,计算公式为:

$$\begin{cases} N_x = E_a b h \frac{\varepsilon_{u1} + \varepsilon_{u2} + 2\varepsilon_T}{2}, \\ M_y = E_a \frac{b h^3}{12} \frac{1}{y} \frac{(\varepsilon_{u1} - \varepsilon_T) - (\varepsilon_{d1} - \varepsilon_T)}{2}, \\ M_z = E_a \frac{h b^3}{12} \frac{2}{b} \frac{(\varepsilon_{u1} - \varepsilon_T) - (\varepsilon_{u2} - \varepsilon_T)}{2}. \end{cases} \quad (2)$$

$$\left. \begin{matrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \end{matrix} \right\} = \frac{E_m}{2} \left[ \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{90}}{1 - \mu} \pm \frac{1}{1 + \mu} \times \sqrt{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{90})^2 + 2(\varepsilon_{45} - \varepsilon_0 - \varepsilon_{90})^2} \right], \quad (3)$$

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + \sigma_2^2 + \sigma_1^2]}. \quad (4)$$

式中:  $E_a$ 、 $E_m$  分别为杆件、蒙皮的弹性模量,  $b$  为截面宽,  $h$  为截面高,  $y$  为应变片中心到中性轴的距离,  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  为主应力,  $\mu$  为泊松比,  $\varepsilon$  为应变值.

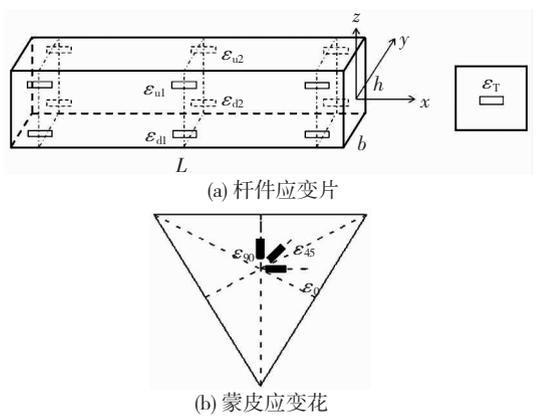


图 8 应变片布置

Fig. 8 Strain gages arrangement

## 2 试验结果及分析

### 2.1 全部覆盖蒙皮工况

选取 5 个主要测点的荷载 - 合位移曲线见图 9, 可以发现最大加载至 100 kN 时结构仍处于线性阶段, 试验模型未发生失稳现象. 在整个加载过程中, 见图 10, 蒙皮的 Mises 应力均小于膜材的抗拉强度, 蒙皮应力值一直在增长, 说明蒙皮的确参与了结构整体工作. 从图 10 还可发现, 蒙皮的应力大小与蒙皮所在位置有关: 结构下部蒙皮应力较大, 而上部的蒙皮应力较小.

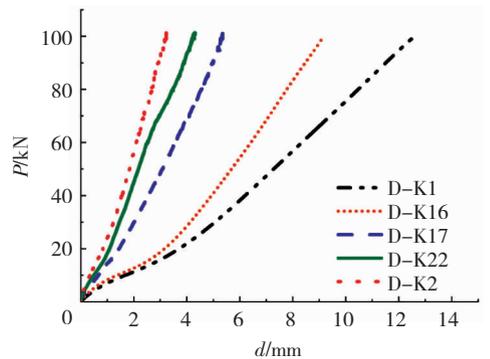


图 9 全部覆盖蒙皮工况测点荷载 - 位移曲线

Fig. 9 Load-displacement curves of nodes under the load case of completely covering skins

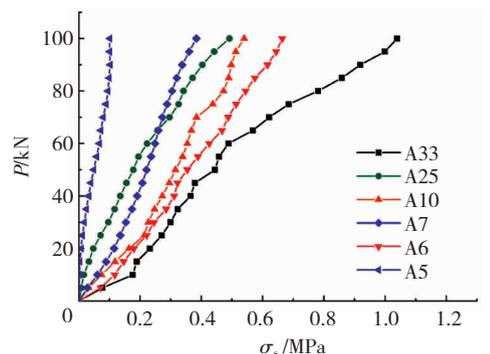


图 10 全部覆盖蒙皮工况蒙皮荷载 - Mises 应力曲线

Fig. 10 Load-Mises stress curves of stressed skins under the load case of completely covering skins

图 11 为全部覆盖蒙皮工况下杆件的荷载 - 内力曲线,在整个加载过程中,轴力的增长基本呈线性,说明结构在弹性范围内工作且未出现失稳现象.杆件 L12 与 L34 轴力较大,是因为两根杆紧邻加载点.杆件中弯矩  $M_x$  相比  $M_y$  较小,小一个数量级,结构杆件的内力主要以轴力与弯矩  $M_y$  为主.

### 2.2 部分覆盖蒙皮工况

考虑雷达罩在实际环境中,可能会局部膜材撕裂,因此在试验中设置几种局部缺失蒙皮情形,探究其对结构整体稳定和局部杆件稳定的影响,8 种缺失蒙皮情形见图 12.

对各种蒙皮缺失情形进行一次单向循环加载.结构顶点的荷载 - 位移曲线(图 13(a))可反映缺

失蒙皮对结构整体刚度、承载力的影响.缺失蒙皮情形 1、2 与全蒙皮模型结构整体刚度接近,加载至 66 kN 左右,出现杆件 L54 和 L67 弹性失稳现象(见图 14).发生缺失情形 3~8 时,结构整体刚度下降到 4.6 kN/mm 左右,结构整体较早进入非线性,整体稳定承载力明显降低.以节点 K17 的荷载 - 合位移曲线为例,反映缺失蒙皮对局部刚度、承载力的影响,见图 13(b).发生缺失情形 1 时,局部初始刚度为 15.1 kN/mm,发生缺失情形 2 时,局部刚度下降为 11.8 kN/mm,发生缺失情形 3~8 时,局部刚度接近,在 10.3~9.7 kN/mm,可发现缺失蒙皮使得缺失相邻区域的局部刚度下降,而对相距较远区域局部刚度影响较小.

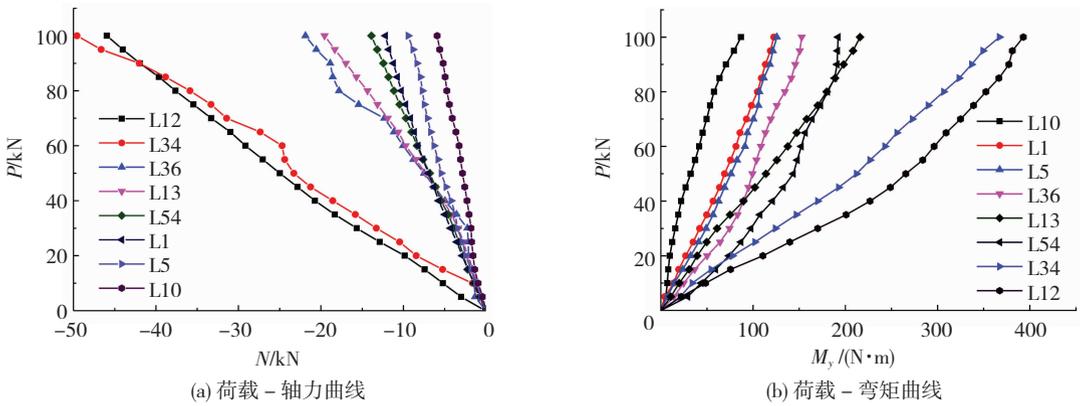


图 11 全部覆盖蒙皮工况杆件荷载 - 内力曲线

Fig. 11 Load-internal force curves of members under the load case of completely covering skins

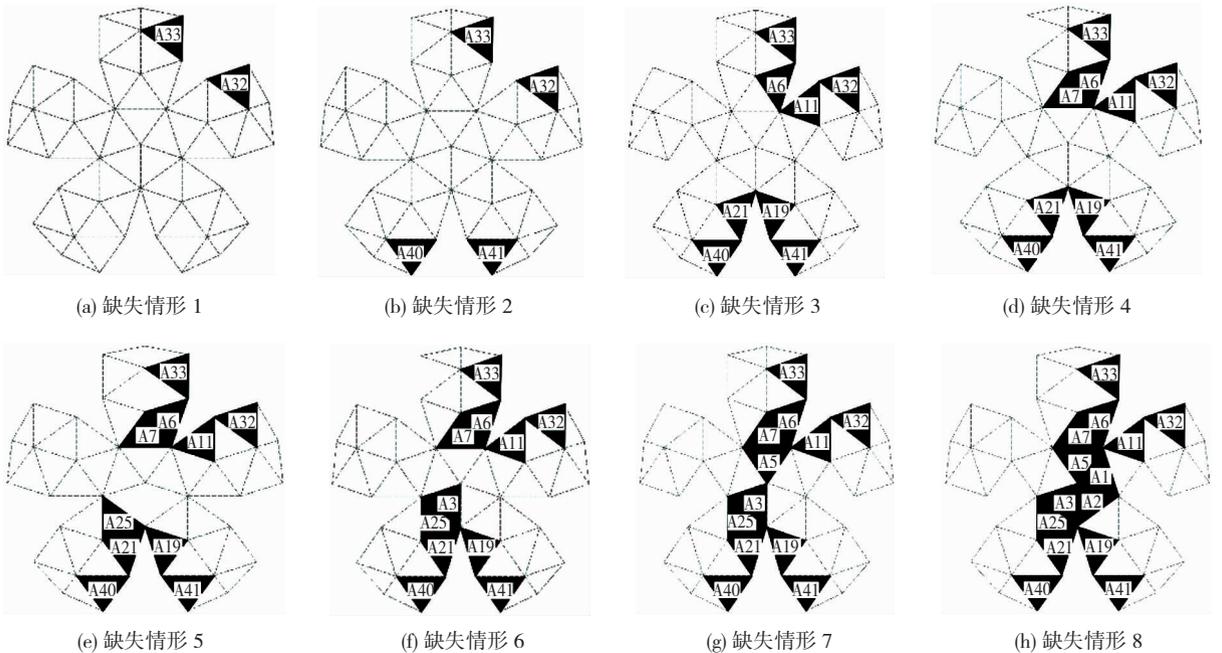
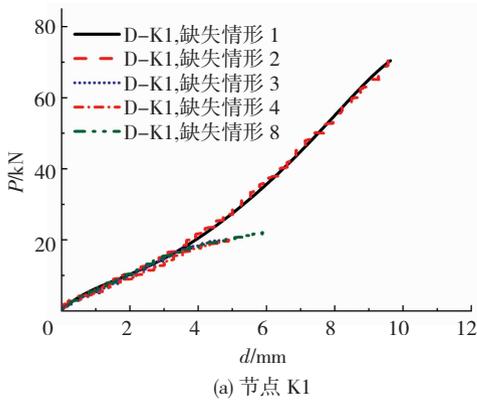


图 12 局部缺失蒙皮情形

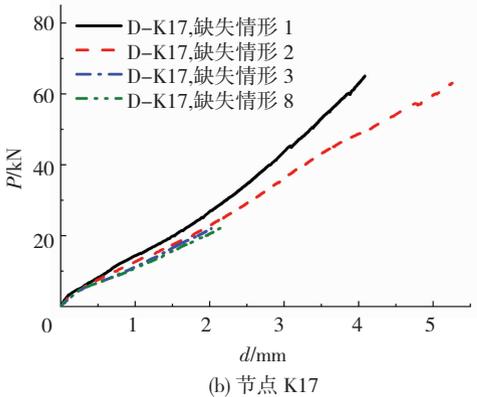
Fig. 12 Local loss of stressed skins

综上所述,当第二环弦杆两侧未缺失蒙皮时,承载力没有显著降低,仅伴随缺失蒙皮处局部刚度的降低,而当第二环弦杆两侧缺失蒙皮时,结构进入非线性

时荷载值降低.因此对于此类结构中受力较大、易失稳的第二环弦杆为薄弱杆件,在其两侧缺失蒙皮后对结构稳定承载力有明显的影



(a) 节点 K1



(b) 节点 K17

图 13 部分覆盖蒙皮工况节点荷载 - 位移曲线

Fig. 13 Load-displacement curves of nodes under the load case of partially covering skins



图 14 缺失情形 1、2 试验现象

Fig. 14 Test phenomena of skin loss cases 1, 2

### 2.3 纯骨架工况

在加载过程中看到局部受压杆件发生失稳的过程(图 15),发生于第二环长弦杆(L34、L26、L12、L15、L42)处,因其受压弯联合作用,在没有蒙皮的支撑作用下,发生明显的侧向弯曲变形,率先发生弹性失稳,导致结构失效。

纯骨架工况的荷载 - 位移曲线见图 16,在纯骨架工况加载至结构失稳过程中,初始阶段结构呈现出线弹性性能,当荷载加载至 17 kN 左右时,结构刚度开始下降,表现出非线性性能。当荷载达到 19.4 kN 时,结构发生失稳。此后荷载保持不变,而变形持续增大。第二环弦杆杆件发生明显弯曲变形,率先发生

弹性失稳。结构顶点位移达到 7.6 mm 时卸载,卸载后第二环弦杆杆件变形恢复。

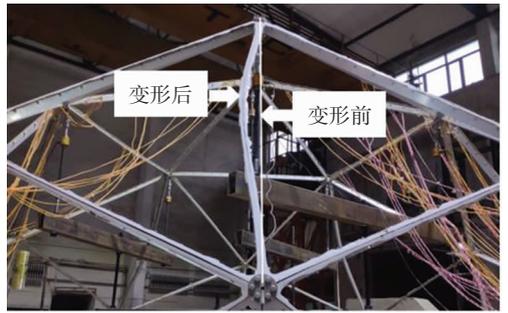


图 15 纯骨架工况破坏模式

Fig. 15 Failure mode of the framework load case

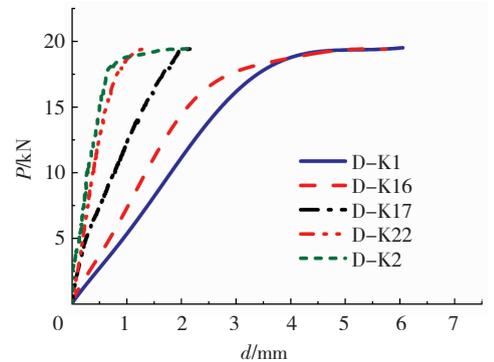


图 16 纯骨架工况节点荷载 - 位移曲线

Fig. 16 Load-displacement curves of nodes under framework load case

图 17 为纯骨架工况下杆件的荷载 - 轴力( $P-N$ )曲线,可以看出靠近加载点的杆件轴力比远离加载点的轴力大,伴随杆件 L12 与 L34 的失稳发生了内力重分布。

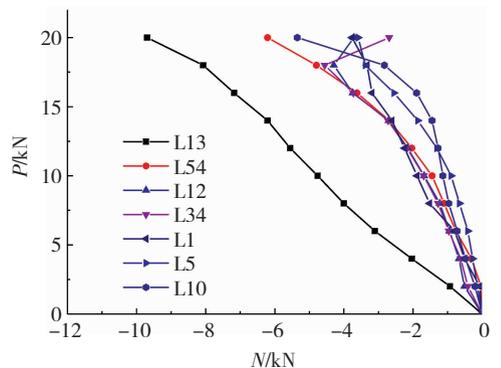


图 17 纯骨架工况杆件荷载 - 轴力曲线

Fig. 17 Load-axial force curves of members under framework load case

### 3 试验结果对比分析

不同工况下结构顶点及下部节点 K17 的荷载 - 位移曲线见图 18、19,纯骨架工况较全部覆盖蒙皮工况稳定承载力有明显降低,结构初始刚度略有下降,雷达罩结构中骨架与蒙皮的协同工作使得结构极限承载力显著提高。在发生蒙皮缺失情形 1、2

时,仅使得缺失蒙皮局部的刚度降低,承载力没有明显下降,从缺失情形 3 开始因缺失了薄弱杆件附近蒙皮,结构较早进入非线性,承载力下降. 因此雷达罩在使用使用过程中缺失少量非关键部位的蒙皮不会对结构性能产生明显不利影响,仍可继续承载使用,而如果缺失薄弱杆件附近的蒙皮会使得结构较早发生失效. 还可以发现,是否有蒙皮对加载初期结构的初始刚度影响不大,直到纯骨架发生屈曲时才发挥作用.

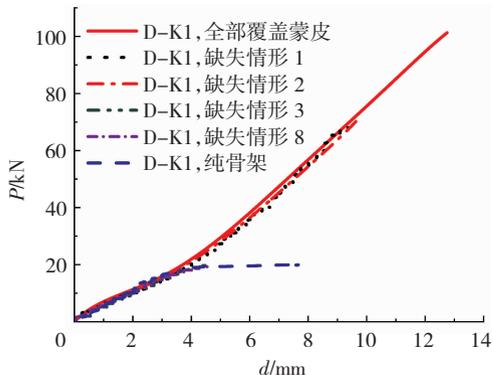
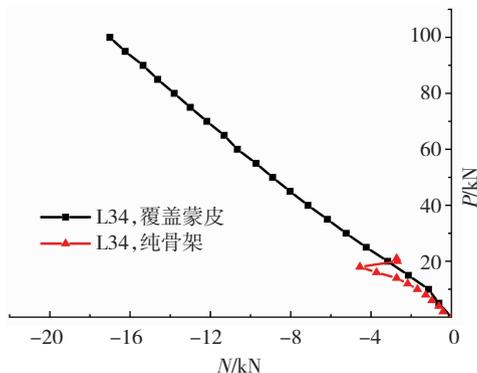


图 18 不同工况下结构顶点的荷载 - 位移曲线

Fig. 18 Comparison of load-displacement curves of K1 under different load cases



(a) 荷载 - 轴力曲线

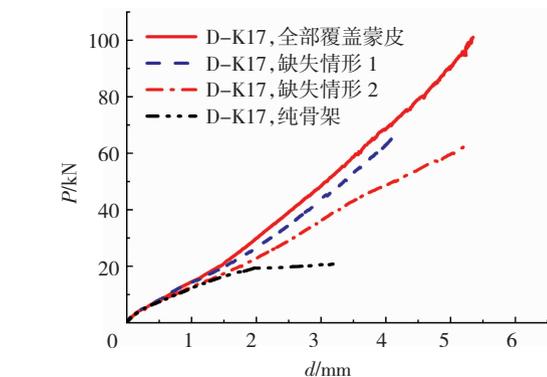
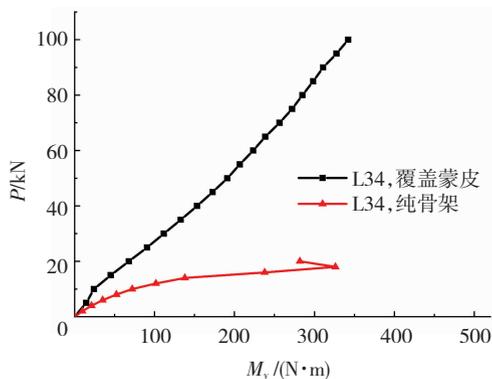


图 19 不同工况下下部节点 K17 的荷载 - 位移曲线

Fig. 19 Comparison of load-displacement curves of K17 under different load cases

进一步提取了不同工况下同一根杆件 L34 的内力(轴力  $N$ 、弯矩  $M_y$ ) 进行对比分析,荷载 - 内力曲线见图 20,通过荷载 - 内力图可以发现,因为二阶效应的存在,使得杆件 L34 跨中出现附加弯矩,纯骨架工况较覆盖蒙皮工况下杆件的弯矩增长更明显. 因此蒙皮与骨架的协同工作改变了内力重分布,避免了整体结构中部分杆件的内力集中,提升了结构的受力性能.



(b) 荷载 - 弯矩曲线

图 20 不同工况下杆件 L34 荷载 - 内力曲线

Fig. 20 Load-internal force curves of member L34 under different load cases

## 4 结 论

1) 新型金属空间构架雷达罩确实存在蒙皮与骨架协同工作现象,蒙皮本身受力较小,但蒙皮与骨架协同工作的存在使得雷达罩结构稳定承载力显著提高,因此在进行设计时,蒙皮效应使得在同样满足结构安全性的前提下,骨架截面尺寸可进一步减小,电磁透明性进一步改善.

2) 是否有蒙皮对结构的初始刚度影响不大,直到发生屈曲时才发挥作用. 在少量非薄弱杆件两侧缺失蒙皮时,蒙皮对整体结构的支撑效应仍较强,对稳定承载力影响较小;在薄弱杆件处缺失蒙皮会显著破坏蒙皮的支撑效应,降低结构的稳定承载力,在

实际工程中应加以重视.

3) 从蒙皮与骨架协同工作机理来看,蒙皮为骨架提供侧向弹性支撑,提高了骨架的稳定承载力,改变了结构中内力的重分布,避免了部分杆件的内力集中,增强了结构的空间整体性,从而使得结构的整体稳定性有较大提升.

## 参 考 文 献

[1] SHAVIT R. Design of large ground-based space-frame radomes [C]// Proceedings of Forum for Electromagnetic Research Methods and Application Technologies. Orlando: University of Central Florida, 2014:6

[2] 王超,顾叶青,王晨. 雷达天线罩结构设计方法的研究进展与展望[J]. 电子机械工程,2015(6):1

- WANG Chao, GU Yeqing, WANG Chen. Review and prospect of design methods of antenna radome structure [J]. *Electro-Mechanical Engineering*, 2015(6):1. DOI:10.3969/j.issn.1008-5300.2015.06.001
- [3] 沈世钊. 网壳结构的稳定性[J]. *土木工程学报*, 1999, 32(6):11  
SHEN Shizhao. Stability of latticed shells [J]. *China Civil Engineering Journal*, 1999, 32(6):11. DOI:10.3321/j.issn:1000-131X.1999.06.002
- [4] 唐守柱, 何炳发, 王仁德. 金属空间桁架天线罩分析与研究[J]. *现代雷达*, 2006, 28(4):62  
TANG Shouzhu, HE Bingfa, WANG Rende. Analysis and study on metal space frame radomes[J]. *Modern Radar*, 2006, 28(4):62. DOI:10.3969/j.issn.1004-7859.2006.04.018
- [5] 唐守柱, 刘兴贵, 何炳发. 球型毫米波金属桁架天线罩研究[J]. *现代雷达*, 2015(9):55  
TANG Shouzhu, LIU Xingguai, HE Bingfa. A study on spherical-shell millimeter-wave metal space frame radome [J]. *Modern Radar*, 2015(9):55. DOI:10.16592/j.cnki.1004-7859.2015.09.013
- [6] USOFF J M. Haystack ultra-wideband satellite imaging radar antenna [C]//*Proceedings of 2014 IEEE Benjamin Franklin Symposium on Microwave and Antenna Sub-systems for Radar, Telecommunications, and Biomedical Applications (BenMAS)*. Philadelphia: IEEE, 2014:1. DOI:10.1109/BenMAS.2014.7529449
- [7] 王明强. 玻璃钢地面雷达天线罩[M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社, 2003:52  
WANG Mingqiang. FRP ground radome [M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2003:52
- [8] NILSON A H. Shear diaphragms of light gage steel[J]. *Journal of the Structural Division*, 1960, 86(11):111
- [9] BRYAN E R. Stressed skin design and construction: a state of art report[J]. *The Structural Engineer*, 1976, 54(9):41
- [10] DAVIES J M, BRYAN E R. Manual of stressed skin diaphragm design[M]. London: Wiley, 1982:1. DOI:10.1139/183-057
- [11] 史艳莉, 王秀丽. 受力蒙皮结构的研究及发展[J]. *钢结构*, 2004, 19(4):10  
SHI Yanli, WANG Xiuli. Development and research of stressed skin diaphragms[J]. *Steel Construction*, 2004, 19(4):10. DOI:10.3969/j.issn.1007-9963.2004.04.004
- [12] 查晓雄, 范坤杰. 集装箱房抗侧刚度分析: 整箱蒙皮效应[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2017, 49(6):102  
ZHA Xiaoxiong, FAN Kunjie. Analysis on the lateral stiffness of container house: diaphragm effect of the whole [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2017, 49(6):102. DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201512074
- [13] 郑瑾. 轻钢建筑围护体系蒙皮效应的试验及理论研究[D]. 上海: 同济大学, 2007  
ZHENG Jin. Experimental and theoretical research on the diaphragm effects of the cladding systems of light gauge steel structures [D]. Shanghai: Tongji University, 2007. DOI:10.7666/d.y1031920
- [14] 朱勇军, 张耀春, 刘锡良. 蒙皮支撑的钢构件静力工作性能研究[J]. *工业建筑*, 1998(5):32  
ZHU Yongjun, ZHANG Yaochun, LIU Xiliang. Static behavior of diaphragm braced steel members[J]. *Industrial Construction*, 1998(5):32. DOI:10.3321/j.issn:1000-8993.1998.05.009
- [15] 丁敏, 李密密, 施旭栋. 考虑覆盖材料蒙皮效应的温室结构稳定承载力计算[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(增刊1):224  
DING Min, LI Mimi, SHI Xudong. Stable bearing capacity calculation of greenhouse structures considering skin effect of covering material [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(S1):224. DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.2016.zl.031
- [16] LIU Hongbo, CHEN Zhihua, XU Shuai, et al. Structural behavior of aluminum reticulated shell structures considering semi-rigid and skin effect [J]. *Structural Engineering & Mechanics*, 2015, 54(1):121. DOI:10.12989/sem.2015.54.1.121

(编辑 赵丽莹)