

# 刚壁气承轴心受压杆件的受力性能分析

李玉刚 黄河 钟杰

(西北工业大学, 陕西西安 710072)

**摘要:** 为在受压杆件中充分利用材料的抗拉强度, 提出一种新形式的杆件——刚壁气承轴心受压杆件, 介绍杆件的结构形式, 该杆件的主要特点为: 杆件的轴心压力完全由内部高压气囊承受, 约束刚壁不受压应力, 稳定性好, 承载力可调节。推导刚壁气承轴心受压杆件的承载力公式, 并与薄壁圆管进行比较, 表明刚壁气承轴心受压杆件具有很好的承载力, 当长细比较大时, 优势更加明显。以穹顶和射电望远镜结构为例, 探讨刚壁气承轴心受压杆件在超大跨度结构和超高精度结构中的应用前景, 结果表明: 应用刚壁气承轴心受压杆件可以大幅度地降低结构自重, 对于超高精度结构来说, 还可通过对杆件充气或放气来主动调节杆件的承载力, 随时补偿精度的损失, 具有很好的应用前景与现实需求。

**关键词:** 轴心受压杆件; 充气结构; 刚性管; 空间网格结构

**中图分类号:** TU353 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-131X(2019)01-0037-07

## Study on load-carrying capacity of inflatable axially compressive member with rigid-outer-wall

Li Yugang Huang He Zhong Jie

(Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** In order to make full use of the tensile strength of the axially loaded compressive members, a new type of compressive load-carrying member, i.e., the inflatable axially compressive members with rigid-outer-wall, denoted as IACMR, is proposed. The configuration and working modes of the newly proposed member are introduced in detail. The member has good stability and adjustable load-carrying capacity, and the axially compressive load applied to it is fully carried by the internal high-pressure airbag without resulting in compressive stress in the outer rigid wall. The load-carrying capacity formula of the newly proposed member is derived and compared with that of thin-walled steel tube. The results indicate that the member has enough load-carrying capacity when the slenderness ratio of this member is large. Taking dome structures and radio telescope structures as examples, the proposed members are used. A conclusion is drawn that the total weight of structure can be significantly reduced by using the proposed members. For structures with high surface precision, the load-carrying capacity can be adjusted by inflating or deflating the members to compensate the loss of surface precision. From the view of engineering application, the proposed member has good prospect.

**Keywords:** axially loaded compression member; inflatable structure; rigid tube; space frame structure

**E-mail:** ygli@nwpu.edu.cn

## 引言

网架、网壳等空间网格结构在体育场馆、火车站、

航站楼及一些特种结构中均有大量应用, 一般是由不同长度的刚性杆件按一定的拓扑关系组成的网格状高次超静定空间杆系结构。为以更少的材料跨越更大的空间, 学者们一直在追求更为合理的结构形态<sup>[1]</sup>, 而在挖掘杆件承载力方面的研究相对较少。

通常, 网格结构中的杆件是以轴向受力为主, 当采用铰接节点时, 杆件则仅承受轴力作用。对于受拉杆件来说, 可以通过采用高强度材料来提高杆

基金项目: 国家自然科学基金(51608445)、中央高校基本科研业务费专项资金(3102017jg02016)

作者简介: 李玉刚, 博士, 讲师

收稿日期: 2017-11-14

件的受拉承载力，而受压杆件的承载力一般取决于屈曲问题，对受压杆件屈曲强度的预测一直被学者们所关注。

理想直杆沿轴线受压时在弹性范围内的临界应力为<sup>[2]</sup>（即 Euler 公式）：

$$\sigma_{cr} = \pi^2 E / \lambda^2 \quad (1)$$

式中： $E$  为弹性模量； $\lambda$  为杆件的长细比。对于轴心受压圆柱壳，其屈曲应力的经典解为<sup>[3-4]</sup>：

$$\sigma_{cr} = \frac{E}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \left( \frac{t}{R} \right) \quad (2)$$

式中： $E$ 、 $\nu$  分别为弹性模量和泊松比； $t$ 、 $R$  分别为圆柱壳的厚度和半径。由式（1）、式（2）可知，在弹性阶段受压杆件的屈曲临界力仅与自身几何形状和弹性常数有关，不能通过提高材料抗压或抗拉强度来提高屈曲临界力，因而限制了高强度材料在空间网格结构中的应用。目前，抗拉强度超过 1GPa 的材料已不罕见，如日本东丽公司的 T1000G 碳纤维抗拉强度可达 6.37GPa<sup>[5]</sup>，而空间网格结构用材仍以屈服强度小于 Q420 的钢材为主<sup>[6]</sup>。此外，受稳定性的限制，受压杆件也不能较好地传递较长距离的压力，间隔一定距离须设置一个支撑节点，以此来减小长细比，这既增加了结构的自重，也降低了施工速度。

为在轴心受压杆件中充分利用高强度材料的抗拉强度，进而提高杆件的轴心受压承载力，本文提出了一种新形式的杆件——刚壁气承轴心受压杆件，首先介绍了杆件的结构形式，然后分析了杆件的受力性能，最后探讨了杆件的应用前景。

### 1 刚壁气承轴心受压杆件的结构形式

空间网格结构中的杆件主要以圆管、方管等型钢为主，对于一些有特殊要求的结构也会采用木、铝合金、碳纤维等材料，该类杆件虽然存在材料和形状上的差异，但受力方式是相同的，即杆件直接受压，该类杆件一般在弹性阶段工作。为充分利用材料屈服后的性能，学者们提出了很多不同结构形式的防屈曲支撑杆件。防屈曲支撑也是杆件（芯材）直接承压，但在芯材周围增加了外约束构件，可达到芯材屈服而杆件不屈曲的目的，一般用于结构的耗能减震。在太空结构中，考虑天地运输的特殊要求，常采用薄膜充气管作为支撑构件，其内部为空心，充气展开后形成密封管状结构，具有质量轻、

成本低、收纳比高等特点，在地面结构中也有类似的应用，比如气肋式膜结构等。本文综合考虑防屈曲支撑和薄膜充气管的优点，提出了一种新形式的杆件——刚壁气承轴心受压杆件。

刚壁气承轴心受压杆件由 6 部分组成，分别为圆形刚性管、螺纹盖、圆形持力板、充气阀门、气压计和气囊，其整体结构如图 1（a）所示。

圆形刚性管为薄壁圆管，其材料须具有较高的抗拉强度，可选用高强度钢材<sup>[7]</sup>或碳纤维<sup>[5]</sup>等材料，在刚性管两端外表面均带有螺纹，用于与两端的螺纹盖连接。在刚性管管壁预留气囊充气孔和气压计连通孔，孔洞周围需加强设计。

气囊沿圆形刚性管内部轴向放置，其几何尺寸与圆形刚性管内部体积相对应，气囊通过刚性管管壁的预留气囊充气孔和气压计连通孔分别与充气阀门和气压计连接（见图 1（b），图 1（c））。气囊可选用气密性好、具有一定伸缩性的轻质膜材，比如丁基橡胶膜材<sup>[8]</sup>等。气囊与刚性管内壁间涂润滑剂，以减小二者间的摩擦力。

杆件端部构造如图 1（d）所示，持力板为具有

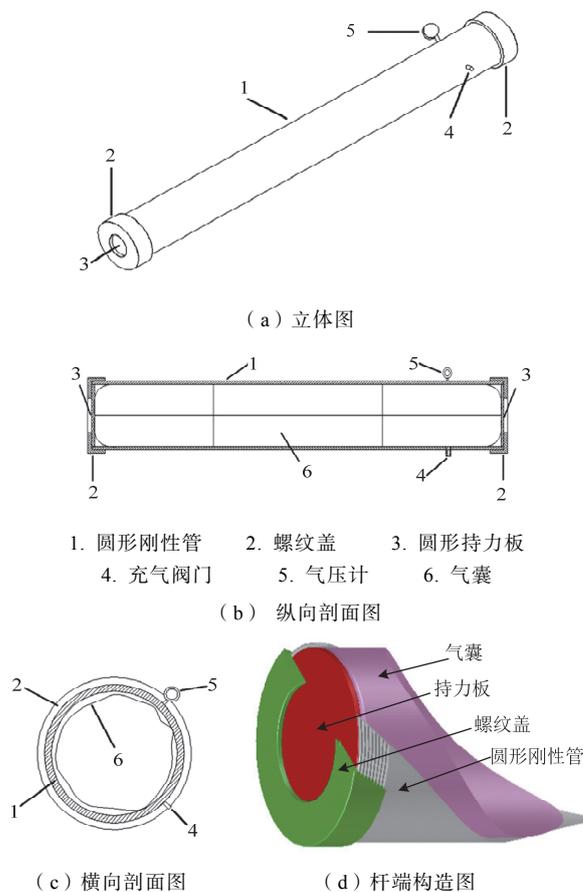


图 1 刚壁气承轴心受压杆件

Fig.1 The inflatable axially compressive member with rigid-outer-wall

一定厚度的圆形板，位于螺纹盖和气囊之间，用于传递外部荷载给气囊或将来自气囊的压力传递给螺纹盖，其直径略小于圆形刚性管内径，与刚性管接触的部分应光滑，保证持力板可在刚性管轴向自由滑动。螺纹盖可将来自持力板的压力传递给圆形刚性管，在其中心预留环形孔洞，用于持力板与外界的连接，孔洞直径小于持力板直径，并保证持力板与螺纹盖具有足够的传力面积。

刚壁气承轴心受压杆件的结构形式不同于防屈曲支撑、薄膜充气管以及普通型材杆件，在杆件承受轴心压力时，压力完全由杆件内部高压气体承担，抗拉强度很高的刚性管主要起约束气体横向膨胀的作用。杆件可以承受较大的轴心压力（极限受压承载力取决于刚性管材料的抗拉强度），同时也可承受较大的轴心拉力和较小的弯矩作用。

## 2 杆件受力性能分析

杆件的受力过程可以分为 3 个阶段。阶段 1 为充气过程，杆件还不承受轴向压力，在这一阶段杆件内外气压差不断增大，刚壁轴向预拉力随之增加；在阶段 2，杆件开始承受轴向压力，随杆件轴向压力的增加，刚壁的轴向预拉力也逐渐释放，直至消失；当轴向压力大于气囊膨胀产生的压力时，杆件进入阶段 3，在该阶段，杆件轴向压力继续增加，持力板开始移动，气囊被压缩。下面将分别对这 3 个阶段的杆件进行分析。

### 2.1 阶段 1

刚壁气承轴心受压杆件安装完成后，初始状态如图 2 (a) 所示，此时杆件内外气压差  $p=0$ ，长度为  $L$ ，刚壁不受力。

使用充气泵连接气囊充气阀门对气囊进行充气，用气压计监测气囊内部气压，充气至气压差设计值  $p_0$ 。在充气过程中，气囊随着气压增大而膨胀，对刚性管管壁和位于其两端的持力板产生压力作用，持力板在压力作用下滑动至刚性管两端，并将压力传递给螺纹盖，螺纹盖所受压力与刚性管所受轴向拉力平衡。在此平衡状态下，刚性管的管壁受环向和轴向的拉应力作用，持力板的位移与杆件在长度方向的变形保持同步，均为  $S_0$ ，如图 2 (b) 所示。

刚性管内径为  $d$ ，壁厚为  $t$ ，在设计气压差  $p_0$  作用下，持力板承受来自气囊的总压力

$$P_0 = p_0 \frac{\pi d^2}{4}$$

在  $P_0$  作用下，刚性管的轴向拉应力

$$\sigma_1 = \frac{P_0}{\pi dt} = \frac{p_0 d}{4t} \quad (3)$$

取长度为  $l$  的一段杆件为研究对象，其 1/2 截面受力如图 3 (a) 所示，内压  $p_0$  沿  $y$  方向的合力为

$$F_y = \int_A p_0 l \frac{d}{2} d\beta \sin \beta = \int_0^\pi p_0 l \frac{d}{2} \sin \beta d\beta = p_0 dl$$

在  $y$  方向，管壁纵截面上只有力  $F_N$  (见图 3 (b))，由  $y$  方向的静力平衡条件，可知：

$$F_N = \frac{F_y}{2} = \frac{p_0 dl}{2}$$

进一步可得纵截面上的应力

$$\sigma_2 = \frac{F_N}{A} = \frac{p_0 dl}{2tl} = \frac{p_0 d}{2t} \quad (4)$$

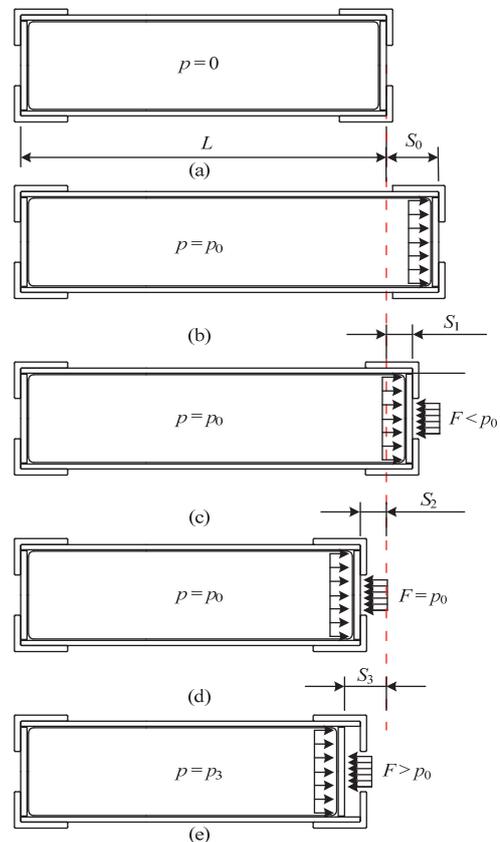


图 2 杆件不同状态轴向变形示意图

Fig.2 Deformations of the member in different states

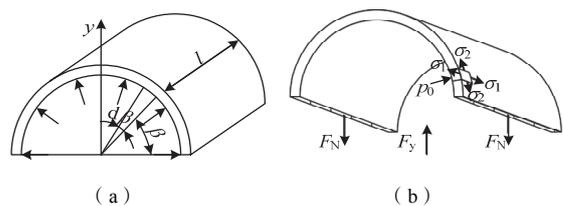


图 3 刚壁受力图

Fig.3 Force diagram of the rigid wall

在刚性管管壁纵截面和横截面上都没有切应力,所以这两个平面均为主平面,即 $\sigma_1$ 和 $\sigma_2$ 都是主应力。由式(3)和式(4)可知,作用于刚性管内壁上的气压 $p_0$ 远小于 $\sigma_1$ 和 $\sigma_2$ (刚性管为薄壁圆管),可忽略不计,管壁可近似地认为是二向应力状态。

由广义胡克定律可得管壁在纵向的应变

$$\varepsilon = \frac{1}{E}(\sigma_1 - \mu\sigma_2) = \frac{(1-2\mu)d}{4Et} p_0$$

式中: $E$ 和 $\mu$ 分别为刚性管的弹性模量和泊松比。则持力板位移或杆件在长度方向的变形

$$S_0 = \varepsilon L = \frac{(1-2\mu)dL}{4Et} p_0 \quad (5)$$

对于高强钢或碳纤维等材料, $\mu$ 是小于0.5的常数,即在气压差 $p_0$ 作用下,杆件将产生轴向拉伸变形,且变形量与 $p_0$ 线性相关。此外,由式(3)、式(4)可知,刚壁在环向和轴向均受拉应力,且以环向拉应力为主,环向拉应力是轴向拉应力的2倍。

## 2.2 阶段 2

刚壁气承轴心受压杆件之间的连接示意如图4所示,这里采用的是螺栓球节点,亦可采用其他节点形式。锥头与持力板焊接,在正常工作状态时,杆件会受到来自节点的轴向压力作用 $F$ ,该压力直接作用在持力板的中心区域,在此状态下,持力板同时承受来自气囊膨胀产生的轴向压力和来自节点的轴向压力 $F$ 。当 $F$ 小于来自气囊膨胀产生的轴向压力时,持力板与螺纹盖紧贴,并向管壁传递轴向拉力,持力板位移或杆件在长度方向的变形为 $S_1$ ,如图2(c)所示。



图 4 杆件连接示意图

Fig.4 Sketch of bar connection

因为 $S_1$ 引起的杆件内部体积变化量相对于原有体积来说非常微小,可忽略不计。由理想气体状态方程可知,杆件内外气压差仍为 $p_0$ 。管壁在杆件横截面和纵截面上的拉应力分别为

$$\sigma_1 = \frac{P_0 - F}{\pi dt} = \frac{p_0 d}{4t} - \frac{F}{\pi dt} \quad (6)$$

$$\sigma_2 = \frac{p_0 d}{2t} \quad (7)$$

由式(6)、式(7)可知,随着 $F$ 的增大,管壁纵截面上的拉应力 $\sigma_2$ 保持不变,但管壁横截面上的拉应力 $\sigma_1$ 在逐渐减小,直至消失。即在这一阶段杆件轴向压力在增大,管壁受力却为卸载阶段。管壁在纵向的应变

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E}(\sigma_1 - \mu\sigma_2) = \frac{(1-2\mu)d}{4Et} p_0 - \frac{F}{E\pi dt}$$

则,则杆件在长度方向的变形

$$S_1 = \frac{(1-2\mu)dL}{4Et} p_0 - \frac{FL}{E\pi dt} = S_0 - \frac{FL}{E\pi dt} \quad (8)$$

随着 $F$ 的增大, $S_1$ 逐渐减小,杆件由伸长逐渐变为缩短,在这一阶段持力板仍紧贴螺纹盖,持力板位移也为 $S_1$ ,直到当 $F=P_0$ 时,持力板才开始脱离螺纹盖(见图2(d)),此时由式(8)可知,杆件在长度方向的变形

$$S_2 = \frac{-\mu dL}{2Et} p_0 \quad (9)$$

## 2.3 阶段 3

当 $F>P_0$ 时,持力板向杆件内部滑动压缩气囊,气体体积缩小,杆件内外气压差增大至 $p_3$ ,持力板脱离螺纹盖,其位移为 $S_3$ ,如图2(e)所示。在此状态下,刚性管管壁只受环向拉应力。

由理想气体状态方程可知

$$(p_3 + p_{\text{atm}})V_3 = (p_0 + p_{\text{atm}})V_0 \quad (10)$$

式中: $p_{\text{atm}}$ 为外部气压; $V_0$ 、 $V_3$ 分别持力板移动前后杆件内部气体体积,

$$V_0 = \frac{\pi d^2 L}{4}, \quad V_3 = \frac{\pi d^2 (L + S_3)}{4}$$

将 $V_0$ 、 $V_3$ 代入式(10)有

$$(p_3 + p_{\text{atm}})(L + S_3) = (p_0 + p_{\text{atm}})L \quad (11)$$

持力板在杆件内部气压和外力的作用下保持平衡,由平衡条件可得

$$p_3 = \frac{4F}{\pi d^2}$$

将 $p_3$ 代入式(11),可求得

$$S_3 = \frac{(p_0 + p_{\text{atm}})}{\left(\frac{4F}{\pi d^2} + p_{\text{atm}}\right)} L - L \quad (12)$$

取 $E=2.06 \times 10^{11}$ Pa、 $\mu=0.3$ 、 $p_{\text{atm}}=1.01 \times 10^5$ Pa、 $p_0=1 \times 10^6$ Pa、 $L=5$ m、 $d=0.279$ m、 $t=0.01$ m,由式(5)、

式 (8)、式 (9)、式 (12) 可绘制在阶段 1、2、3 持力板位移  $S$  随外力  $F$  的变化曲线, 如图 5 所示。

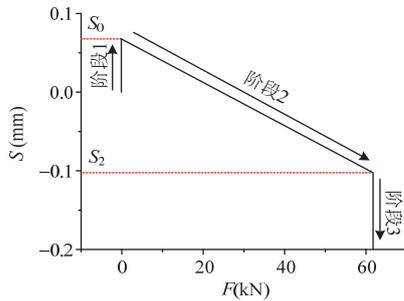


图 5 S-F 曲线

Fig.5 Curve S-F for support board displacement and force

由图 5 可知, 杆件充气时 (阶段 1), 在轴向预拉力作用下杆件伸长, 伸长量为  $S_0$ 。随轴向压力  $F$  的增加,  $S$  分两个阶段下降, 即阶段 2 和阶段 3。在阶段 2,  $S$  的变化非常微小, 呈直线下降, 这是因为在  $F < P_0$  时,  $S$  是由刚性管轴向应力和环向应力的变化而产生。当  $F = P_0$  时, 持力板开始脱离螺纹盖, 在阶段 3,  $S$  主要是由气体被压缩而引起, 故相对于阶段 2 呈曲线快速下降。

刚壁气承轴心受压杆件可以在阶段 2 或阶段 3 工作, 这取决于杆件所受轴向压力和杆件内外气压差, 也可通过充气或放气来改变杆件内部气压, 最终达到改变杆件轴向受力和变形的目的。

由上述分析可知, 刚壁气承轴心受压杆件不管在哪个阶段工作, 刚壁均不承受轴向压应力, 来自节点的轴向压力完全由杆件内部的高压气囊承受, 高压气囊进一步将压力转化为刚壁的环向拉应力, 达到了充分利用刚壁材料受拉强度, 提高杆件轴心受压承载力的目的。这里需要说明的是, 由于气囊与刚性管间摩擦系数的存在, 气囊会向刚性管传递摩擦力 (动摩擦力或静摩擦力), 但该力相对于  $F$  来说是非常小的, 故本文未予考虑。

### 2.4 杆件的极限承载力

由上述分析可知, 刚壁气承轴心受压杆件的承载力取决于刚壁材料的受拉强度。在受压极限状态时, 极限承载力

$$F = \frac{\pi n d^2}{4} \sigma_2 \quad (13)$$

由式 (4) 可得气压与刚壁环向应力的关系为

$$p = \frac{2t}{d} \sigma_2$$

将  $p$  代入式 (13), 可得

$$F = \frac{\pi d t}{2} \sigma_2 \quad (14)$$

由式 (14) 可知刚壁气承轴心受压杆件的轴心受压承载力除了与自身几何参数  $d$  和  $t$  线性相关外, 还与刚性管管壁材料的极限抗拉强度线性相关, 即可以通过提高材料的抗拉强度来提高杆件受压承载力。为与圆管轴心受压承载力进行对比, 我们以内径和壁厚分别为 298mm 和 1mm 的薄壁圆管为例, 弹性模量取  $2.06 \times 10^5 \text{MPa}$ , 泊松比取 0.3, 抗拉和抗压强度设计值取 2000MPa, 圆管惯性矩  $I = 1049.732 \text{cm}^4$ , 截面积  $A = 9.393 \text{cm}^2$ , 回转半径  $i = 10.571 \text{cm}$ 。

由公式 (14) 可知, 刚壁气承轴心受压杆件的承载力  $F = 936.195 \text{kN}$ , 此时的杆件内外气压差  $p = 13.423 \text{MPa}$ 。不考虑圆管的初始几何缺陷, 当  $l < 5.2 \text{m}$  时, 表现为圆柱壳屈曲, 由式 (2) 可得屈曲应力为  $831.179 \text{MPa}$ , 远小于抗压强度设计值, 此时临界力为  $780.727 \text{kN}$ , 亦低于刚壁气承轴心受压杆件。当  $l > 5.2 \text{m}$  时, 表现为整体失稳, 圆管的屈曲临界应力随长度的增加而快速下降。由式 (1)、式 (2) 计算的圆管屈曲荷载与杆件长度的关系如图 6 所示, 由图可知, 刚壁气承轴心受压杆件与圆管相比具有明显优势, 特别是对于长管, 当  $l = 10 \text{m}$  时 (长细比为 95), 圆管的屈曲荷载仅为刚壁气承轴心受压杆件承载力的 22.8%。

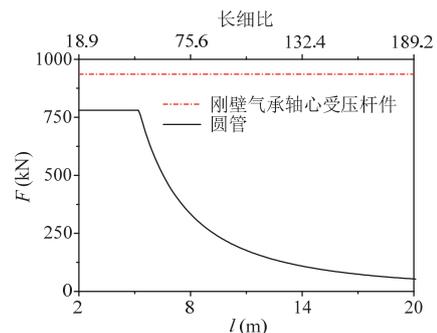


图 6 理想圆管的屈曲荷载

Fig.6 Buckling load of an ideal circular tube

需要说明的是, 图 6 中的曲线是未考虑初始几何缺陷的承载力, 由于初始几何缺陷的存在, 圆管实际的承载力应在图中曲线的下方, 换言之, 图中曲线为圆管实际承载力的上限。此外, 当采用诸如碳纤维等高强度材料时, 刚壁气承轴心受压杆件的优势将更加显著。

### 3 刚壁气承轴心受压杆件的应用前景

随着我国经济的发展与科技的进步,近年来涌现出了大批优秀的空间结构,并且结构的尺度仍然在朝更大的方向发展。建造这样的大型或超大型空间结构,为实现其超大跨度(针对穹顶等屋盖结构)或超高精度(针对射电望远镜等特种结构),需要耗费大量的建材,而超常的自重也限制了结构向更大尺度方向的发展。由于刚壁气承轴心受压杆件具有稳定性好、轻质高强以及可充分利用高强度材料等一系列优点,使其至少在超大跨度结构和超高精度结构方面具有广阔的应用前景。

#### 3.1 超大跨度结构

目前,300m量级跨度的空间结构已不再罕见,如南京奥体中心体育场跨越东西看台上空的变断面三角桁架拱的跨度达到了372.40m<sup>[9]</sup>。学者们对千米级超大跨度穹顶结构也进行了预研<sup>[10-11]</sup>,张清文等<sup>[10]</sup>针对800m超大跨度穹顶选取的结构形式为凯威特型巨型网格(见图7),杆件采用Q420圆管,每平方米投影面积用钢量达到了191.737kg。

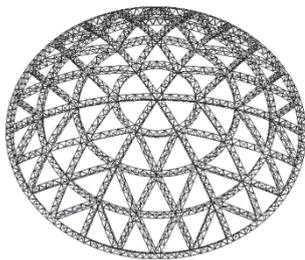


图7 凯威特巨型网格结构<sup>[10]</sup>

Fig.7 Construction of Kiewitt type mega-latticed structures<sup>[10]</sup>

文献[10]中桁架的节间长度为10m,选取的杆件截面如下:腹杆为 $\Phi 480 \times 12\text{mm}$ ,上横杆为 $\Phi 330 \times 10\text{mm}$ ,交点为 $\Phi 930 \times 24\text{mm}$ ,上弦为 $\Phi 910 \times 24\text{mm}$ ,下弦为 $\Phi 1600 \times 53\text{mm}$ ,最外圈下弦为 $\Phi 1620 \times 53\text{mm}$ ,上斜杆为 $\Phi 390 \times 10\text{mm}$ 。为与刚壁气承轴心受压杆件比较,我们以1根上弦杆为例进行分析,截面积 $A=668.028\text{cm}^2$ ,回转半径 $i=31.336\text{cm}$ ,抗压强度设计值取360MPa,长细比 $\lambda=31.91$ ,查规范附录C可得稳定系数 $\phi=0.876$ ,由规范可得杆件的轴心承载力<sup>[6]</sup>:

$$F = \phi Af = 2.11 \times 10^7 \text{N}$$

如果替换为刚壁气承轴心受压杆件,并选用碳纤维材料,抗拉强度设计值取5GPa,密度取

1800kg/m<sup>3</sup>,刚壁厚度取2mm,在保证同样承载力的前提下,由公式(14)可知刚壁内径 $d=1341.2\text{mm}$ ,刚壁截面积仅为原杆件的12.63%,质量也仅为原杆件的2.90%,可以预计在不降低承载力的前提下每平方米投影面积材料用量将小于6kg。如果考虑因杆件自重减轻而引起设计需求的减少,材料用量还将进一步降低。

#### 3.2 超高精度结构

我们以射电望远镜结构为例来说明刚壁气承轴心受压杆件在此类结构中的应用前景。射电望远镜是一种接收来自天体无线电信号的观测设备,如图8所示。来自天体的无线电信号极其微弱,增大反射面口径(增加接收信号的面积)和提高反射面面形精度一直是提高射电望远镜使用效率的两个主要途径。

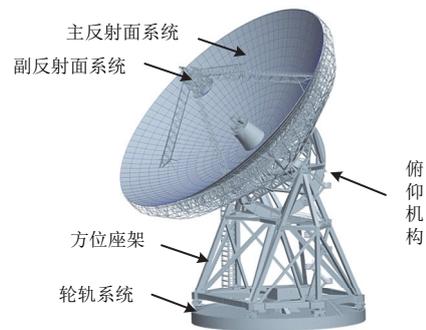


图8 全可动射电望远镜结构模型

Fig.8 All movable telescope structure model

为追求大口径与高精度,射电望远镜结构通常具有非常大的体重,比如美国Green Bank射电望远镜(110m $\times$ 100m)重达7300t<sup>[12]</sup>。由3.1节的分析可知,对于射电望远镜结构来说,用刚壁气承轴心受压杆件替换圆管,同样可以起到减重的目的,随着结构自重的下降,反射面面形精度会随之提高,进而促进射电望远镜结构向更大口径方向发展。

与大跨度屋盖结构不同的是,为跟踪观测天体,射电望远镜的反射面背架结构要在方位和俯仰两个方向运动,在自重作用下,反射面会产生不均匀变形,从而造成反射面面形精度的损失,图9为上海65m射电望远镜结构RMS值随俯仰角的变化曲线<sup>[13]</sup>,可知越远离基准俯仰角反射面面形精度越低。此时,通常会在主反射面背架每个上弦节点处安装促动器,并与主反射面板相连,用于补偿主反射面由于结构姿态调整引起的变形,从而提高面形精度。

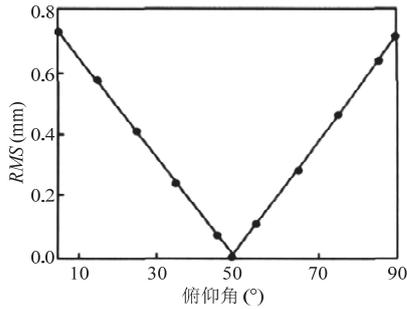


图 9 自重作用下反射面 RMS

Fig.9 RMS of reflector surface under the gravity load

而采用刚壁气承轴心受压杆件的射电望远镜结构, 可以不用安装促动器, 而是通过对杆件进行充气或放气来实时调节杆件的承载力(见图 5), 进而控制结构变形, 提高反射面面形精度。同理, 也可以调节由温度作用引起的结构变形。

#### 4 结论

针对目前结构中常用杆件的局限, 本文提出了一种新形式的杆件——刚壁气承轴心受压杆件, 该杆件的主要特点是: 内部气囊承压, 约束刚壁不受压应力, 可以充分利用材料的抗拉强度, 以及承载力可调节等。介绍了杆件的结构形式, 分析了杆件在不同状态的受力性能, 推导了杆件的承载力公式。与圆管的承载力进行对比分析表明: 刚壁气承轴心受压杆件具有很好的承载力和稳定性, 特别是在杆件较长时, 优势更加明显。

以超级穹顶和射电望远镜结构为例, 探讨了杆件在超大跨度结构和超高精度结构中的应用前景, 结果表明: 采用刚壁气承轴心受压杆件可以大幅度地降低结构的自重, 对于射电望远镜结构, 还可以通过控制杆件的内部气压, 实现反射面面形精度的实时调节。

此外, 由于杆件具有较好的稳定性, 因此可以制作得更长, 从而减少工程结构中节点的数量, 进而降低结构的自重, 也可降低施工难度并提高建造速度。

#### 参考文献

[1] 沈世钊, 武岳. 结构形态学与现代空间结构[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(4): 1-10 (Shen Shizhao, Wu Yue. Structural morphology and modern space structures [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(4): 1-10 (in

Chinese))  
 [2] 周绪红, 郑宏. 钢结构稳定[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004  
 [3] Timoshenko S P, Gere J M. Theory of elastic stability [M]. 2nd edition. New York: McGraw-Hill Book Company, 1961  
 [4] Brush D O, Almroth B O. Buckling of bars, plates and shells [M]. New York: McGraw-Hill Company, 1975  
 [5] 李威, 郭权锋. 碳纤维复合材料在航天领域的应用[J]. 中国光学, 2011, 4(3):201-212 (Li Wei, Guo Quanfeng. Application of carbon fiber composites to cosmonautic fields [J]. Chinese Optics, 2011, 4(3): 201-212 (in Chinese))  
 [6] GB 50017—2003 钢结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2003 (GB 50017—2003 Code for design of steel structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003 (in Chinese))  
 [7] 施刚, 班慧勇, 石永久, 等. 高强度钢材钢结构研究进展综述[J]. 工程力学, 2013, 30(1): 1-13 (Shi Gang, Ban Huiyong, Shi Yongjiu, et al. Overview of research progress for high strength steel structures [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(1): 1-13 (in Chinese))  
 [8] 梁滔, 胡杰, 李树毅, 等. 丁基橡胶的发展现状及发展建议[J]. 高分子通报, 2014(2): 41-45 (Liang Tao, Hu Jie, Li Shuyi, et al. Current situation and development suggestion of butyl rubber [J]. Polymer Bulletin, 2014(2): 41-45 (in Chinese))  
 [9] 任家骥. 南京奥体中心工程预应力技术的应用[J]. 钢结构, 2006, 21(2): 30-34 (Ren Jiaji. Application of prestressing technology in Nanjing Olympic Sports Center [J]. Steel Construction, 2006, 21(2): 30-34 (in Chinese))  
 [10] 张清文, 姚丽, 范峰. 超大跨度凯威特型巨型网格结构选型及参数分析[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(11): 29-37 (Zhang Qingwen, Yao Li, Fan Feng. Structural selection and parametric analysis of super-large span Kiewitt type mega-latticed structures [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(11): 29-37 (in Chinese))  
 [11] 张恒飞. 800m 超大跨度穹顶结构选型研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015 (Zhang Hengfei. Structural selection of an 800-meter-span dome [D]. Harbin : Harbin Institute of Technology, 2015 (in Chinese))  
 [12] 刘岩. 超大口径全可动望远镜结构选型及精度控制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013 (Liu Yan. Structural selection and accuracy control of the large aperture all-movable telescope [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013 (in Chinese))  
 [13] 钱宏亮, 刘岩, 范峰, 等. 65m 天线结构主反射面面形精度分析[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(11): 3027-3033 (Qian Hongliang, Liu Yan, Fan Feng, et al. Surface precision analysis on main reflector of 65m antenna structure [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(11): 3027-3033 (in Chinese))

李玉刚(1983— )、男, 博士, 讲师。主要从事大跨空间结构抗震、巨型望远镜结构技术研究。

黄河(1988— )、男, 博士, 助理教授。主要从事空间可展开天线结构体系研究。

钟杰(1987— )、男, 博士, 助理教授。主要从事大跨空间结构抗震研究。