

# 张拉成形网格结构成形过程参数分析

王 成<sup>1,2</sup>, 张毅刚<sup>2</sup>

(1. 北京工业大学 空间结构研究中心, 北京 100124;

2. 中国建筑科学研究院 国家建筑工程质量监督检验中心, 北京 100013)

**摘 要:** 为进一步掌握张拉成形网格结构成形性能, 根据结构特点, 以结构上弦截面、腹杆、刚臂、高跨比、中心环梁等为主要影响参数, 通过理论模拟与分析, 结合其现场施工方法, 就一个 100 m 跨的张拉成形网格结构工程实例, 全面研究了各设计参数对结构成形性能的影响, 结果表明, 上弦截面、刚臂节间数和高跨比是影响结构成形的 3 个最主要的参数, 其余参数对结构成形内力影响不大, 适宜的刚臂对结构成形非常有利, 并得出了各参数对结构成形的影响特点。

**关键词:** 网格结构; 张拉成形; 预应力; 参数分析

中图分类号: TU 393

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2010)07-0948-09

20 世纪 80 年代, 澳大利亚的科研人员研发出一种新型大跨空间结构体系—STressed ARCH<sup>[1-3]</sup>, 即预应力拱架结构。文献[4-6]对其进行了深入的研究, 结果表明, 成形过程中, 必须以较大幅度增加索力值为代价, 而且对上弦钢管梁材料要求较高; 荷载作用下, 索不再发挥作用, 而须加大下弦钢管截面以承受压力。鉴于此, 文献[7-9]提出了体内张拉成形屋架, 并对其进行了受力机理的理论和试验研究, 研究表明, 体内张拉成形屋架结构使张拉成形更为容易, 对上弦钢管梁材料要求较低, 下弦索和下弦管效能均得以充分发挥。在此基础上, 文献[10-14]提出了张拉成形网格结构, 该结构形如球面网壳, 由径向辐射型布置的上弦、下弦、腹杆和环向连接构件组成, 其中上弦为钢管梁, 下弦为长度方向节间预留缝隙钢管(内穿预应力高强度钢索), 腹杆与上、下弦铰接, 径向布置的上下弦汇交于中央的上、下环, 周边外端 2~3 个网格设置刚臂。文献[15-18]对其进行了详细的形态、成形和受荷研究。为全面掌握结构性能特点, 进而为实际工程设计提供理论依据, 根据张拉成形网格结构特点, 针对影响其成形的结构参数, 总结出了各参数对结构变形和内力的影响规律。

## 1 初始计算模型

建立了 1 个张拉成形网格结构的模型, 如图 1 所示。成形前结构的直径(即跨度)为 106.7 m, 端部的刚臂为 3 个上弦节间, 结构的周圈支座为滑动支座, 只允许支座沿水平径向自由滑动。上弦及刚臂部分采用方钢管截面, 下弦及腹杆采用圆钢管, 钢材本构关系采用双线性弹塑性模型, 双折线应力应变曲线的弹性模量及塑性模量分别为

$$E_e = 206 \text{ GPa}; E_{ep} = 14.284 \text{ GPa}$$

材料的屈服应力  $\sigma_s = 250 \text{ MPa}$ , 预应力高强度钢索的屈服强度为 1.84 GPa, 弹性模量为 190 GPa, 钢材的线膨胀系数为  $1.2 \times 10^{-5}$ , 杆件截面尺寸见表 1。

上弦是张拉成形网格结构能否成形的关键, 同时也是成形时最主要的受力构件, 在进行参数分析时主要讨论了其对结构上弦受力情况的影响, 已有研究表明张拉成形网格结构的参数较多, 主要参数有: 1) 上弦梁截面; 2) 腹杆; 3) 刚臂; 4) 高跨比; 5) 中心环梁等。在参数分析中, 结构模型都是以上述初始模型为基

收稿日期: 2009-06-11.

作者简介: 王 成(1970—), 男, 河北张家口人, 高级工程师.

础, 改变相应的参数得到的. 本文选用 ANSYS 参数化设计语言 APDL 进行编程研究, 通过初应变法模拟下弦索张拉过程, 以对结构进行全面的成形参数影响分析<sup>[15]</sup>.

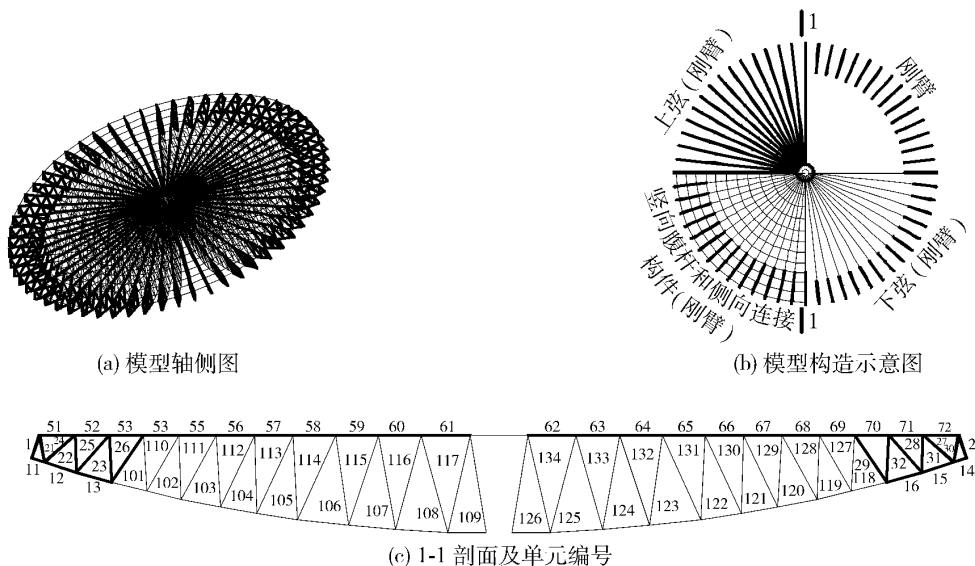


图 1 有限元模型

Fig.1 Finite element model

表 1 杆件截面

Table 1 SFLL member cross-section

杆件	上弦梁、刚臂	中心环梁	腹杆	下弦	索	侧向撑杆
截面尺寸/mm	□400×800×30	□400×800×30	Φ 300×8	□400×16	Φ 7×151	Φ 300×8
面积/mm <sup>2</sup>	68 400	68 400	7 335	9 244	5 810	7 335

## 2 参数分析

### 2.1 上弦截面

#### 2.1.1 上弦截面宽度

改变上弦梁截面的宽度, 建立截面宽度分别为 400、500、600、700、800、900、1 000 mm 的 7 个模型, 当张拉结构下弦水平即成形完毕时, 计算结果如图 2~4 所示.

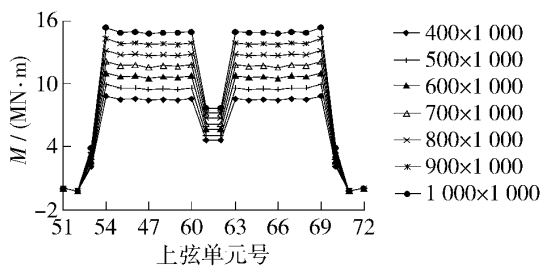


图 2 上弦弯矩分布

Fig.2 Distribution of bending moment of upper chord

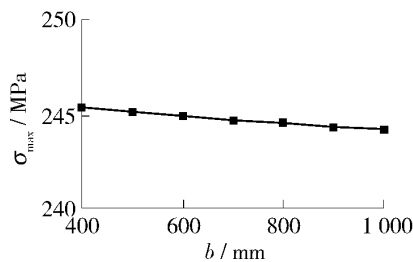


图 3 上弦最大截面应力

Fig.3 Max-stress of upper chord cross section

图 2 是成形完毕时各个模型不同截面宽度的上弦弯矩 ( $M$ ) 分布图. 从图中可以看出, 随着宽度的变化, 上弦的弯矩分布形状基本没有变化, 刚臂部分和中心环的弯矩均较小, 中间可弯曲部分弯矩较大且均匀. 随着宽度的增加, 弯矩分布有趋于不均匀的趋势, 靠近刚臂单元弯矩与其他单元弯矩相差越来越大.

从图3~4中可知,随截面宽度( $b$ )增加,上弦单元弯矩和轴力( $N$ )都随之线性增加;而上弦截面最大应力( $\sigma_{max}$ )随截面宽度的增加而减小,表明截面应力在向宽度方向发展.

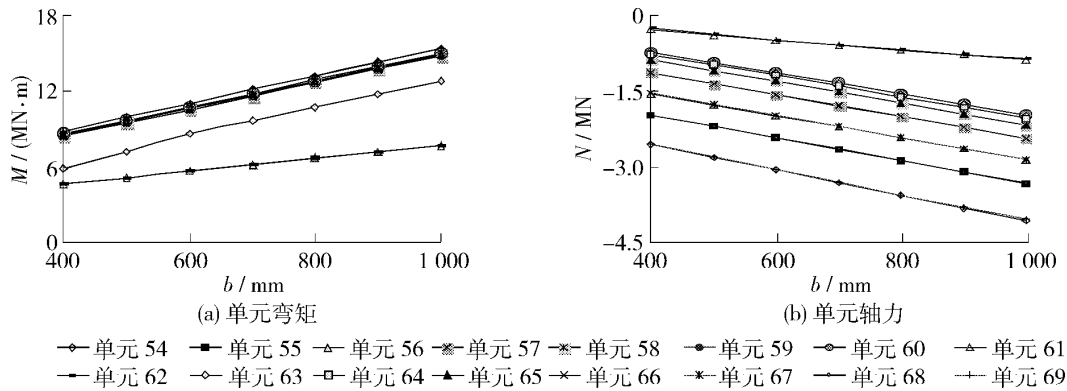


图4 上弦单元弯矩和轴力

Fig. 4 Bending moment and axial force of upper chord element

2.1.2 上弦截面高度

改变上弦梁截面的高度,建立截面高度( $h$ )分别为400、500、600、700、800、900、1000 mm等7个模型,当结构下弦水平即成形完毕时,计算结果如图5~7所示.

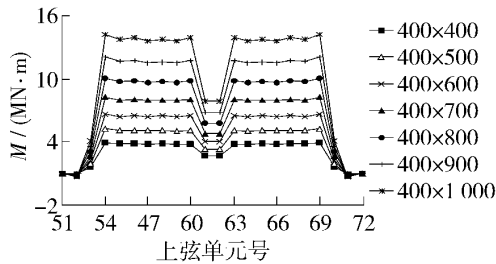


图5 上弦弯矩分布

Fig. 5 Distribution of bending moment of upper chord

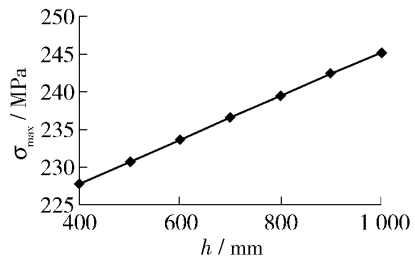


图6 上弦最大截面应力

Fig. 6 Max-stress of upper chord cross section

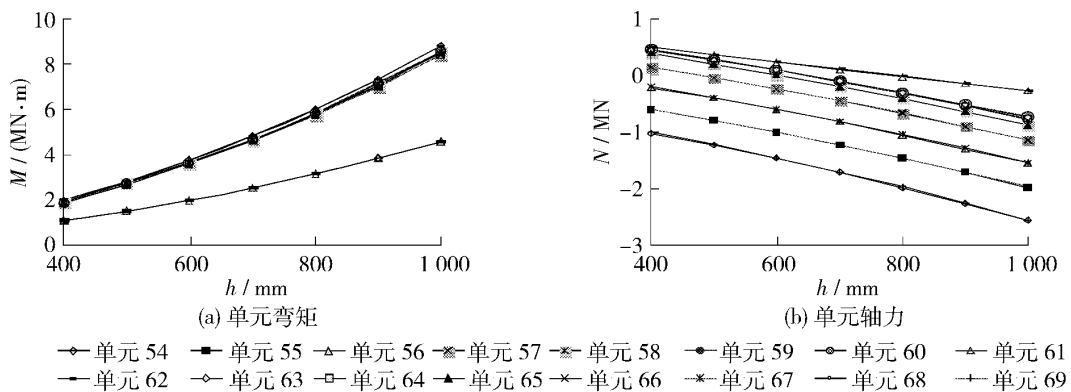


图7 上弦单元弯矩和轴力

Fig. 7 Bending moment and axial force of upper chord element

从图5可以看出,与截面宽度变化时的弯矩分布相类似,随着高度的变化,上弦的弯矩分布形状基本没有变化,但随着高度的增加,可弯曲部分的弯矩分布有趋于不均匀的趋势,靠近刚臂单元弯矩与其他单元弯矩相差越来越大.上弦最大应力、单元弯矩和轴力变化如图6~7所示,可以得知,随截面高度增加,上弦单元弯矩和轴压力都随之增加,与截面宽度变化时不同的是此时不再是线性变化;上弦截面最大应力随截面高度的增加而增大,表明截面应力在向高度方向发展.

## 2.2 腹杆

### 2.2.1 腹杆截面

以初始模型为基础,改变腹杆的截面,建立如表 2 所示的 9 个模型,结构成形完毕时的计算结果如图 8~10 所示.从图中可以看到,腹杆截面尺寸的变化对上弦最大弯矩( $M_{max}$ )和上弦最大应力基本没有影响,对上弦最大轴力( $N_{max}$ )的影响也很小,所以腹杆截面尺寸对结构成形的内力和应力都没有明显的影响.

表 2 腹杆截面模型

Table 2 Model of web member cross-section

模型	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4	模型 5	模型 6	模型 7	模型 8	模型 9
截面规格/mm	245 × 7	245 × 8	245 × 10	273 × 10	299 × 10	245 × 14	195 × 20	211 × 20	273 × 16
截面面积/cm <sup>2</sup>	52.339	59.565	73.827	82.624	90.792	101.60	109.96	120.01	129.182

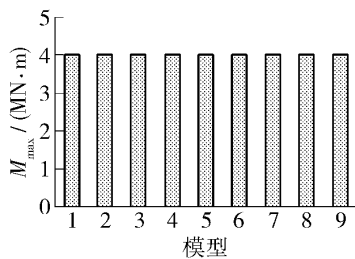


图 8 上弦最大弯矩

Fig. 8 Maximal bending moment of upper chord

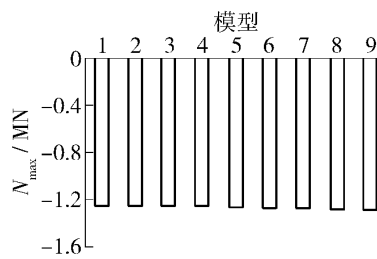


图 9 上弦最大轴力

Fig. 9 Maximal axial force of upper chord

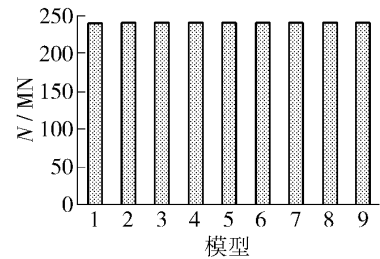


图 10 上弦最大截面应力

Fig. 10 Max-stress of upper chord cross section

### 2.2.2 腹杆数目

腹杆数目的多少反映了腹杆的疏密程度,以基本模型为基础,取不同腹杆数目的模型 6 个,其腹杆间距由疏到密依次增大,腹杆数目分别为 32、36、40、44、52、64 个,计算结果如图 11~13 所示.从图中可以看出,随着腹杆数目的变化,上弦截面最大弯矩、最大轴力和最大应力的变化都很小.由此可见,腹杆数目的大小对结构成形的影响很小.

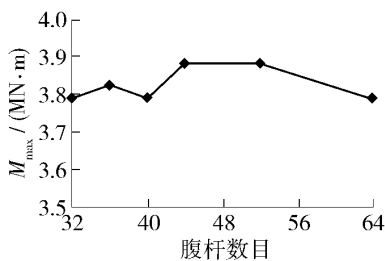


图 11 上弦最大弯矩

Fig. 11 Maximal bending moment of upper chord

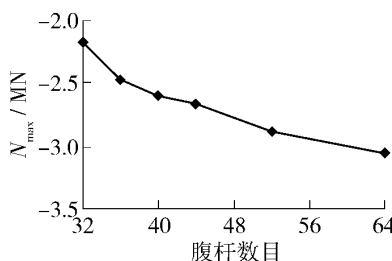


图 12 上弦最大轴力

Fig. 12 Maximal axial force of upper chord

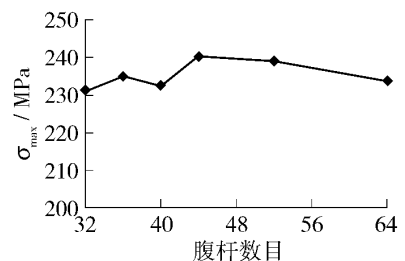


图 13 上弦最大截面应力

Fig. 13 Max-stress of upper chord cross section

## 2.3 刚臂节间数目

刚臂节间数目决定了刚臂的长度,通过改变刚臂节间数目,建立了 0、1、2、3、4、5 刚臂节间等 6 个模型,计算结果如图 14~17 所示,其中 0 刚臂节间(没有刚臂)时结构成形失败.从图中可以得知:

- 1) 结构周端刚臂是结构成形必须的支承和约束,不设置刚臂部分,结构将不能成形.
- 2) 刚臂节间数对结构成形后的弯矩分布形状影响很小,弯矩分布均为刚臂部分和中心环较小,可变部分较大且均匀.
- 3) 当刚臂节间数小于 4 个时,上弦最大弯矩、最大轴力和截面最大应力都随着刚臂节间数目的增多

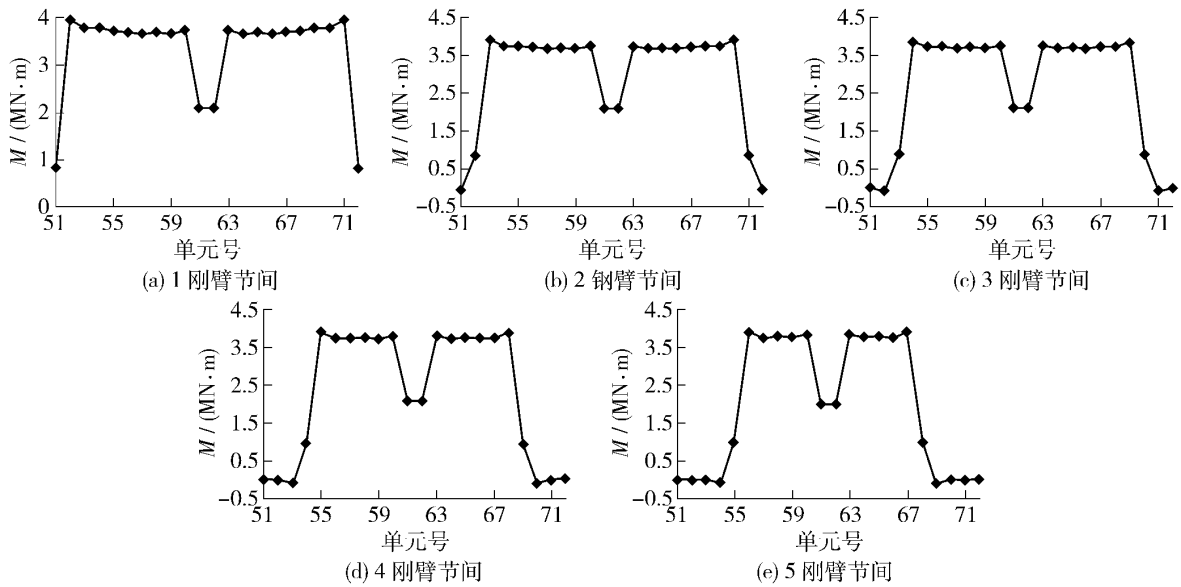


图 14 上弦弯矩分布

Fig. 14 Distribution of bending moment of upper chord

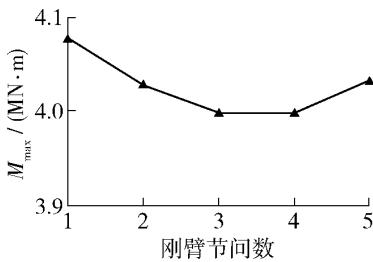


图 15 上弦最大弯矩

Fig. 15 Maximal bending moment of upper chord

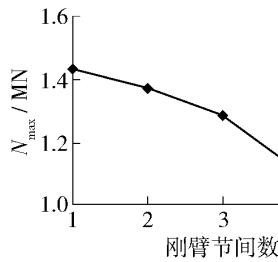


图 16 上弦最大轴力

Fig. 16 Maximal axial force of upper chord

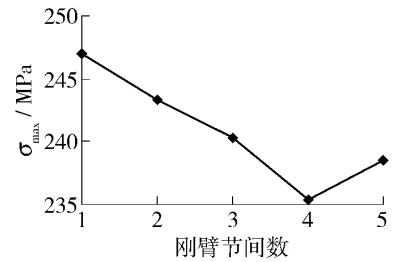


图 17 上弦最大应力

Fig. 17 Max-stress of upper chord cross section

而减小,而当刚臂节间数目超过4个时反而随刚臂节间数目的增多而增大,由此可见,适当增加刚臂对结构成形有益,但刚臂节间数目不宜过多.

### 2.4 高跨比

高跨比为成形后结构总高度与跨度的比值,对6种不同上弦截面的模型,各取9个不同高跨比,研究高跨比对结构成形的影响,计算结果如图18、19所示.对于不同的上弦截面,当结构的高跨比增大时,上弦截面最大弯矩、最大应力都有所增大,但高跨比超过0.14后的最大弯矩值增长明显减慢甚至减小,截面

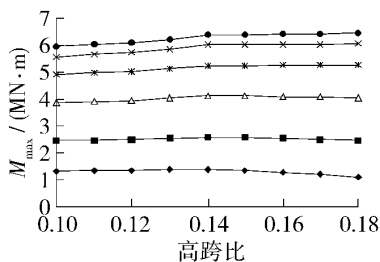


图 18 上弦最大弯矩

Fig. 18 Maximal bending moment of upper chord

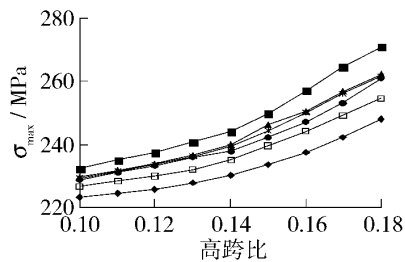


图 19 上弦最大应力

Fig. 19 Max-stress of upper chord cross section

最大应力则加速增加,截面容易形成塑性铰,不利于结构的成形.可见,对本文 100 m 跨度的结构,高跨比在 0.14 左右是一个比较特殊的点.

### 2.5 中心环梁

#### 2.5.1 中心环的大小

以初始模型为基础,改变上环或者下环的半径,分别建立上环半径( $R_u$ )和下环半径( $R_d$ )为 1、1.5、2、2.5、3、3.5、4、4.5、5 m 等 9 个模型,计算结果如图 20~25 所示.从图中可以看到,中心环大小的变化对上弦最大弯矩和上弦最大应力的影响很小,对最大轴力的影响也比较小,所以中心环大小的变化对结构的内力没有明显的影响.

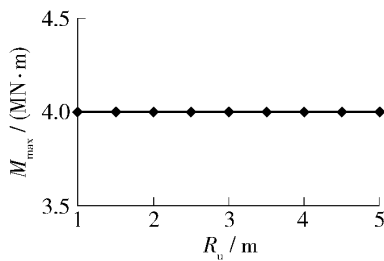


图 20 上弦最大弯矩与上环半径的关系

Fig. 20 The relation between maximal bending moment of upper chord and radius of upper center ring

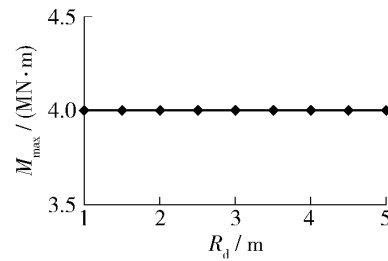


图 21 上弦最大弯矩与下环半径的关系

Fig. 21 The relation between maximal bending moment of upper chord and radius of lower center ring

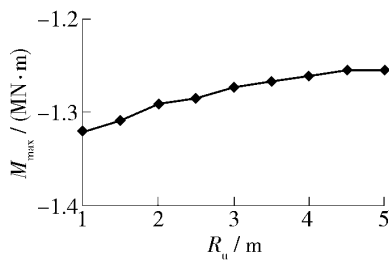


图 22 上弦最大轴力与上环半径的关系

Fig. 22 The relation between maximal axial force of upper chord and radius of upper center ring

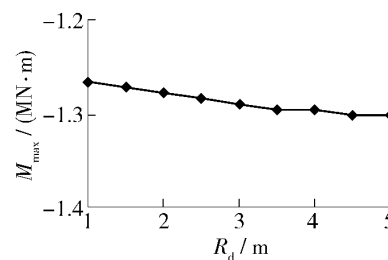


图 23 上弦最大轴力与下环半径关系

Fig. 23 The relation between maximal axial force of upper chord and radius of lower center ring

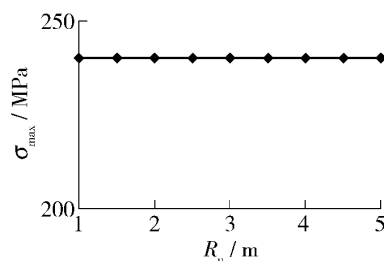


图 24 上弦最大应力与上环半径关系

Fig. 24 The relation between max-stress of upper chord and radius of upper center ring

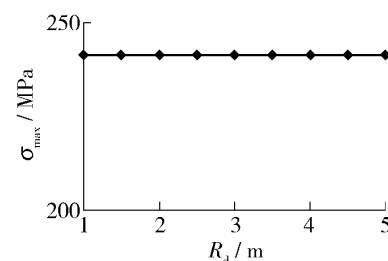


图 25 上弦最大应力与下环半径关系

Fig. 25 The relation between max-stress of upper chord and radius of lower center ring

#### 2.5.2 中心环梁的刚度

以初始模型为基础,改变上环的刚度,建立如表 3 所示的 6 个模型,其中矩形和圆管形各 3 个.为研究截面类型对结构的影响,模型 1、2、3 的面积和惯性矩与模型 4、5、6 的面积和惯性矩分别相同.计算结果如图 26~28 所示.

从图中可以看到,6个模型的上弦最大弯矩、最大轴力和最大应力基本没有变化,所以中心环刚度和环的截面形式对结构成形没有明显的影响。

表3 模型中心环截面

Table 3 Center ring cross-section of SFL model

截面类型	中心环截面形状为矩形			中心环截面形状为圆管		
	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4	模型 5	模型 6
截面尺寸/mm	300 × 300 × 30	800 × 800 × 30	1 500 × 1 500 × 30	Φ 139 - Φ 172	Φ 428 - Φ 461	Φ 832 - Φ 865
截面面积/cm <sup>2</sup>	324	924	1 764	324	924	1 763
截面惯性矩/m <sup>4</sup>	0.000 4	0.009 1	0.063 6	0.000 4	0.009 1	0.063 4

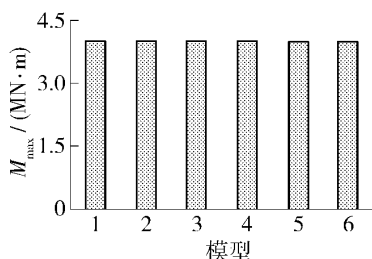


图 26 上弦最大弯矩与上环刚度的关系

Fig. 26 The relation between maximal bending moment of upper chord and stiffness of upper center ring

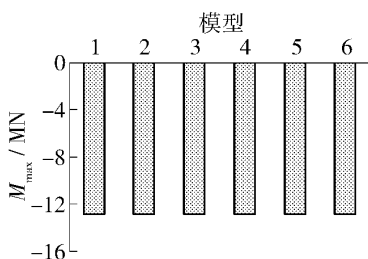


图 27 上弦最大轴力与上环刚度的关系

Fig. 27 The relation between maximal stress of upper chord force and stiffness of upper center ring

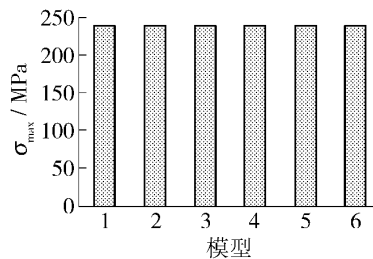


图 28 上弦最大应力与上环刚度的关系

Fig. 28 The relation between maximal stress of upper chord force and stiffness of upper center ring

### 3 结论

1) 上弦截面、刚臂节间数和高跨比是影响结构成形的3个最主要的参数,其余参数对结构成形内力影响不大。

2) 随着上弦梁截面宽度和高度的变化,上弦的弯矩分布形状基本没有变化,但可弯曲部分的弯矩分布有趋于不均匀的趋势。随截面高度增加,上弦单元弯矩和轴压力都呈非线性增加,而随截面宽度增加都呈线性增加。上弦梁截面宽度增加时,上弦截面的最大应力呈线性减小的趋势;而上弦梁截面高度增加时,上弦截面的最大应力呈线性增大的趋势。

3) 刚臂的设置是结构顺利张拉成形的重要保证,适当加强刚臂对结构成形非常有利,合理的刚臂节间数选取是结构实际设计的必要内容。

4) 实例分析表明,随高跨比增大时,上弦截面最大弯矩、最大应力都有所增大;但当高跨比超过0.14后,最大弯矩值增长明显减慢甚至减小,截面最大应力则加速增加,对本例的张拉成形网格结构来说,高跨比在0.14左右是一个比较合适的值,应予足够重视。

#### 参考文献:

- [1] CLARKE M J, HANCOCK G J. Finite-element nonlinear of stressed-arch frams [J]. Journal of Structural Engineering, 1991, 117(10): 2819-2837.
- [2] CLARKE M J, HANCOCK G J. Test and nonlinear analyses of small-scale stressed-arch frames [J]. Journal of Structural Engineering, 1995, 121(2): 187-200.
- [3] CLARKE M J, HANCOCK G J. Design of top chord of stressed-arch frams [J]. Journal of Structural Engineering, 1995, 121

- (2): 201-213.
- [4] 丁明. 张拉整体桁架结构成形机理研究[D]. 北京: 北京工业大学建筑工程学院, 2003: 56-68.  
DING Ming. Mechanism research for STRARCH tension process[D]. Beijing: College of Construction and Civil Engineering, Beijing University of Technology, 2003: 56-68. (in Chinese)
- [5] 许玲玲. 张拉整体拱架结构工作阶段受力性能研究[D]. 北京: 北京工业大学建筑工程学院, 2004: 45-65.  
XU Ling-ling. Load behaviors research for strarch working stage[D]. Beijing: College of Construction and Civil Engineering, Beijing University of Technology, 2004: 45-65. (in Chinese)
- [6] 张宏. 张拉拱成形拱架模型试验研究[D]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2005: 30-62.  
ZHANG Hong. Experiment study of stretch forming arch structure[D]. Beijing: China Academy of Building Research, 2005: 30-62. (in Chinese)
- [7] 祖青, 李彬双. 体内预应力钢屋架张拉成型及内力分布研究[J]. 工业建筑, 2008, 38(8): 535-538.  
ZU Qing, LI Bin-shuang. Tension forming and internal force distribution of internal-prestressed steel roof truss[J]. Industrial Construction, 2008, 38(8): 535-538. (in Chinese)
- [8] 宋威, 韩青, 张毅刚, 等. 新型体内预应力钢屋架塑性扩展研究[J]. 工业建筑增刊, 2006: 368-374.  
SONG Wei, HAN Qing, ZHANG Yi-gang, et al. Study on plastic expanding of the prestressed steel truss with cable in bottom chord[J]. Industrial Construction, 2006(Supp.): 368-374. (in Chinese)
- [9] 韩青. 体内预应力钢屋架的受力机理及试验研究[D]. 北京: 北京工业大学建筑工程学院, 2006: 46-401.  
HAN Qing. Force mechanism and experimental study of the internal-prestressed steel roof truss [D]. Beijing: College of Construction and Civil Engineering, Beijing University of Technology, 2007: 67-98. (in Chinese)
- [10] 张毅刚, 王成, 谭争光, 等. 一种新型的空间结构形式——体内张拉成形空间网格结构[J]. 工业建筑增刊, 2007: 71-74.  
ZHANG Yi-gang, WANG Cheng, TAN Zheng-guang, et al. A novel spatial structures-internal stretch forming space lattice structure[J]. Industrial Construction, 2007(supp.): 71-74. (in Chinese)
- [11] 张毅刚, 王成. 辐射型体内张拉成形空间网格结构[P]. 中国: ZL200620113271.9, 2007, 5.
- [12] 刘立杰, 郝际平, 陈东兆. 一种新型后张拉整体成型穹顶的成型的试验研究[J]. 建筑结构, 2004(2): 39-44.  
LIU Li-jie, HAO Ji-ping, CHEN Dong-zhao. Experiment study on forming process of a new post-tensionning dome [J]. Building Structure, 2004(2): 39-44. (in Chinese)
- [13] 王秀丽, 孙晓骥, 赵玉慧. 地震作用下弦支穹顶结构动力稳定性参数分析[J]. 空间结构, 2008(3): 22-27.  
WANG Xiu-li, SUN Xiao-ji, ZHAO Yu-hui. Parametric study of dynamic stability of suspend domes under earthquake [J]. Spatial Structure, 2008(3): 22-27. (in Chinese)
- [14] 张毅刚, 薛素铎, 杨庆山, 等. 大跨空间结构[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 312-370.
- [15] 王成, 张毅刚. 体内张拉成形空间网格结构成形性能研究[J]. 北京工业大学学报, 2009, 35(2): 185-190.  
WANG Cheng, ZHANG Yi-gang. Study on forming process property of the ISFSL [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2009, 35(2): 185-190. (in Chinese)
- [16] 王成, 张毅刚. 体内张拉成形空间网格结构的形态分析-几何位移迭代法[J]. 北京工业大学学报, 2009, 35(3): 316-322.  
WANG Cheng, ZHANG Yi-gang. Form-finding analysis of Internal-prestressed reticulated space structure through posttensioning: Geometrical displacement iteration method [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2009, 35(3): 316-322. (in Chinese)
- [17] 王成, 张毅刚. 体内张拉成形空间网格结构径向迭代找形算法[J]. 土木建筑与环境工程, 2009, 31(2): 45-50.  
WANG Cheng, ZHANG Yi-gang. Displacement-iteration form-finding arithmetic in R coordinates of ISFSL [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2009, 31(2): 45-50. (in Chinese)
- [18] 龚曙光, 谢桂兰. Ansys 操作命令与参数化编程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 50-72.



## Parametric Analysis on Forming Process of Stretch Forming Lattice Structure

WANG Cheng<sup>1,2</sup>, ZHANG Yi-gang<sup>2</sup>

(1. Space Structures Research Center, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. National Center for Quality Supervision and Test of Building Engineering, China Academy of Building Research, Beijing 100013, China)

**Abstract:** In order to catch on the forming performance of the stretch forming lattice structure (SFL), upper chord cross section, web member, rigid arm, high-span ratio, diameter and stiffness of center ring are selected as the main parameters affecting the forming process of SFL, which basing on the structural property. Taking practically tensioning method into consideration, a study of parameter effect on the forming process is carried out as far as an SFL with a long span of 100m is concerned by the theoretical simulating and analysis. The result shows that upper chord cross section, rigid arm number, high-span ratio are the most important factors affected the shaping process. The other parameters have little effect on forming process. It is favorable to the erection of SFL into its final configuration to choose reasonable stiffness of rigid arm. The structural properties about the forming process affected by the parameters are also given.

**Key words:** lattice structure; tensioned shaping; prestress; parametric analysis

(责任编辑 苗艳玲)