

文章编号: 1000-4750(2012)Suppl I-0190-04

# 弹簧支撑 ETFE 枕式膜结构分析

毛元庆, 吴明儿

(同济大学建筑工程系, 上海 200092)

**摘 要:** 张拉式膜结构和充气式膜结构是 ETFE 薄膜结构的主要形式, 该文分析了弹簧支撑 ETFE 枕式膜结构与传统充气式膜结构的优劣, 在已有的 ETFE 弹簧支撑枕式膜结构的基础上, 通过增加拉杆和进行单个单元的拼接, 对原有结构体系进行拓展。利用 ANSYS 对新结构体系进行了找形分析、雪荷载和风荷载下的应力分析, 计算膜面应力和膜面位移, 并与已有结构进行对比。

**关键词:** 膜结构; ETFE; 结构分析; 弹簧支撑; 数值计算

中图分类号: TU359 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2011.11.S048

## NUMERICAL ANALYSIS OF ETFE FOIL SPRING CUSHION STRUCTURES

MAO Yuan-qing, WU Ming-er

(Department of Building Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Tensile membrane structures and inflatable membrane structures are the two forms of traditional ETFE foil structures. In this paper, a new ETFE foil spring cushion structural system was developed and compared with the traditional ETFE foil air cushion system. Two numerical models, i.e. a spring cushion unit model with tension rods in it and a spring cushion model with two units, were analyzed by means of ANSYS software package. The shape-finding analysis and stress analysis considering snow loading and wind loading were carried out. The structural behaviors of an ETFE foil spring cushion system were investigated.

**Key words:** membrane structure; ETFE; structural analysis; spring-supported; numerical analysis

ETFE 薄膜可以单层张拉的方式应用于建筑结构中, 形成张拉式或骨架式膜结构, 除此之外, ETFE 薄膜还可以气枕的形式应用于建筑的屋盖和墙体结构中。ETFE 薄膜气枕式结构是一种充气式膜结构, 其上下膜面通常采用一层或多层 ETFE 薄膜, 膜边缘夹紧固定后充气即形成气枕, 充气内压使薄膜产生张力并提供气枕刚度。气枕式膜结构具有透光性能好、结构重量轻、抗老化、自洁性及保温性能好等优点, 可制成各种形状, 通过钢结构、铝合金结构或索网等将多个气枕连接组成大跨度空间结构。自从 20 世纪 80 年代以来, 欧洲不少体育场、展览厅以及温室暖房等建筑中, ETFE 薄膜气枕式膜结构都得到了应用, 如英国康沃尔郡面积 3

万平方米的温室植物园“伊甸园”和德国慕尼黑安联球场等<sup>[1]</sup>。中国国家游泳中心“水立方”, 其屋盖和墙体采用了 ETFE 薄膜气枕式结构, 这也是该结构首次在国内大型建筑结构中的应用实例<sup>[2]</sup>。

ETFE 薄膜结构的研究可分为利用有限元进行的数值分析研究以及模型试验研究。数值分析研究包括气枕结构初始形态的分析<sup>[3]</sup>, 荷载作用下的静力分析<sup>[4-5]</sup>, 以及温度、矢跨比、膜材厚度等参数对结构特性的影响分析等<sup>[6]</sup>。模型试验研究包括气枕形状测试、加压以及铺砂加压试验<sup>[7]</sup>、试验房设计、施工及后期测试试验研究<sup>[8]</sup>。气枕式膜结构靠内部气压使薄膜产生张力并提供气枕刚度, 但由于无法做到绝对的气密性, 因此气枕式膜结构在使用

收稿日期: 2010-05-02; 修改日期: 2012-01-18

通讯作者: 吴明儿(1965—), 男, 浙江萧山人, 教授, 博士, 从事空间结构研究(E-mail: wuminger@tongji.edu.cn).

作者简介: 毛元庆(1985—), 男(土家族), 湖南吉首人, 硕士生, 从事膜结构研究(E-mail: myq206@163.com).

过程中不可避免的存在漏气的问题,为了维持气枕式结构的正常工作,需要充气系统和气压监控系统;除此之外,结构还存在着额外消耗能源、送风管网占用建筑空间、为保证气密性而施工难度增加等问题。为了克服气枕的这些问题,作者等提出利用压缩弹簧代替充气的弹簧支撑 ETFE 枕式膜结构(图 1)<sup>[9]</sup>。压缩弹簧在张紧膜面的同时,能有效地吸收膜材徐变而产生的结构变形,保证膜面处于张紧状态。临时建筑中的试验性应用<sup>[8]</sup>以及数值分析和模型实验<sup>[10]</sup>表明,新型的 ETFE 枕式膜结构施工安装方便,膜面平整,维护简单。

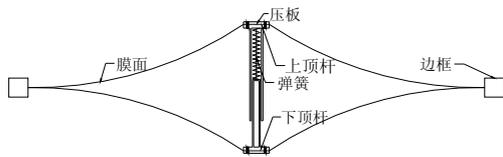


图 1 弹簧支撑 ETFE 枕式膜结构

Fig.1 Spring-supported ETFE cushion structure

本文在以上研究工作的基础上,分析多个弹簧支撑 ETFE 枕式膜结构组合后的结构特性。

## 1 弹簧支撑 ETFE 枕式膜结构

本文研究图 2 和图 3 所示两种模型的弹簧支撑 ETFE 枕式膜结构特性。

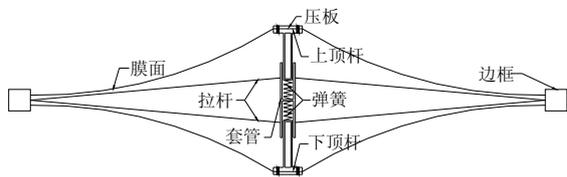


图 2 模型 1

Fig.2 Model 1



图 3 模型 2

Fig.3 Model 2

与图 1 结构形式相比,图 2 结构(模型 1)增加了中间套管和拉杆。中间套管通过拉杆与边框连接固定,套管中间设有隔板,隔板两侧各自连接有弹簧,当上顶杆、下顶杆伸入中间套管挤压上弹簧、下弹簧时,弹簧的弹性回复力便作用于上顶杆、下顶杆,使膜面沿相反方向得到顶升并被张紧。这种结构形式将中间套管与边框连接固定,使得膜面中间位置有了稳定的支撑,同时上下膜面可以由不同的弹簧顶升,可方便地进行独立设计,缺点是结构复杂化了。

图 3(模型 2)对单个枕式结构进行组合,形成由 2 个(或以上)单元结构组成的膜面,由此可得到更大的膜面覆盖结构体系。

## 2 数值分析

### 2.1 模型 1

取边框 2m×2m 的正方形弹簧支撑 ETFE 枕式膜结构为分析模型,矢高为 0.25m,矢跨比为 1/8。ETFE 薄膜厚度为 0.25mm,膜材切线弹性模量为 880MPa,剪切模量为 258MPa,泊松比为 0.42,抗拉强度为 50MPa,弹性极限为 16.9MPa<sup>[11]</sup>;拉杆弹性模量为 206GPa;上下两弹簧刚度均选用 3000N/m。ANSYS 分析中膜面采用 shell41 膜单元,压板、弹簧和拉杆分别采用 shell63 单元、link8 单元和 link10 单元。以膜面初始应力 5MPa、膜面矢高 0.25m 为目标进行膜面找形计算,得到图 4 所示找形结果,此时弹簧初始压力为 609N。图 5 为找形后膜面的应力分布,可以看到膜面应力分布均匀,基本达到目标应力值。

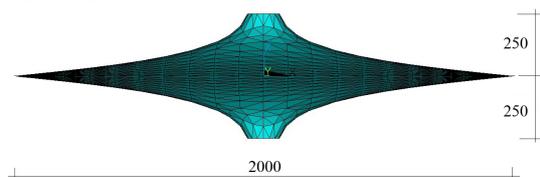


图 4 模型 1 找形结果

Fig.4 Shape finding result of Model 1

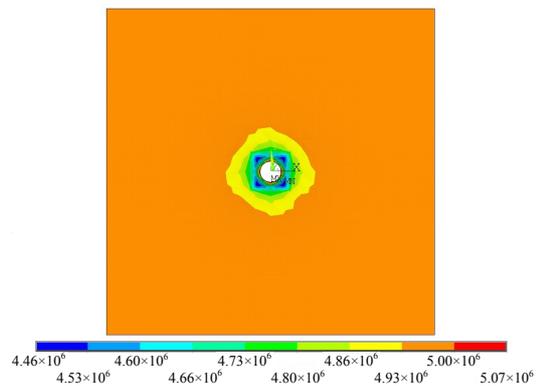


图 5 模型 1 膜面预应力 /Pa

Fig.5 Membrane prestress distribution of Model 1

不考虑体型系数等影响,对其进行雪荷载(上层膜面: 200N/m<sup>2</sup>)和风荷载(上层膜面: 风吸 550N/m<sup>2</sup>)作用下的应力分析,并与未加拉杆的结构进行比较,结果如表 1。

从数值计算结果可以得出以下结论:

- 1) 增加拉杆可以减少膜面和顶板的位移。
- 2) 增加拉杆以后作用于上层膜面的荷载通过

拉杆传递到支撑框架,因此下层膜面变形很小,应力与初始状态相差很小。

3) 增加拉杆对于上层膜面在荷载作用下的膜面应力影响不大。

表 1 两种工况下的应力分析(模型 1)

Table 1 Stress analysis considering snow load and wind load (Numerical model 1)

项目	上层膜面雪荷载200N/m <sup>2</sup>		上层膜面风吸荷载550N/m <sup>2</sup>	
	有拉杆	无拉杆	有拉杆	无拉杆
顶板位移/mm	-7.5	-11.8	11.6	16.7
底板位移/mm	0	-6.5	0	9.9
膜面最大位移/mm	-14.3	-17.7	26.6	28.1
上膜面应力/MPa	Max: 6.7	Max: 6.3	Max: 8.8	Max: 9.1
	Min: 4.3	Min: 4.0	Min: 2.4	Min: 3.4
下膜面应力/MPa	Max: 5.2	Max: 6.3	Max: 5.3	Max: 5.0
	Min: 4.5	Min: 5.0	Min: 4.5	Min: 2.9
弹簧力/N	上: -832.8		上: -262.5	
	下: -609.4	-765.7	下: -607.9	-406.5
拉杆力/N	上: 714.8		上: 1431.1	
	下: 1275.1	—	下: 564.7	—

## 2.2 模型 2

取 2 个 2m×2m 的正方形弹簧支撑双层 ETFE 枕式膜结构,组合形成边框为 4m×2m 的分析模型。弹簧应力为 583.3N,膜面应力为 5MPa 的膜面找形结果如图 6 所示,膜面矢高为 0.25m。图 7 为找形后膜面的应力分布,可以看到膜面应力分布均匀,基本达到目标应力值。计算中 ETFE 薄膜参数、弹簧参数、单元选取等同分析模型 1。

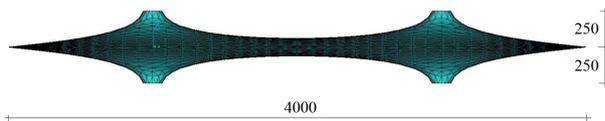


图 6 模型 2 找形结果

Fig.6 Shape finding result of Model 2

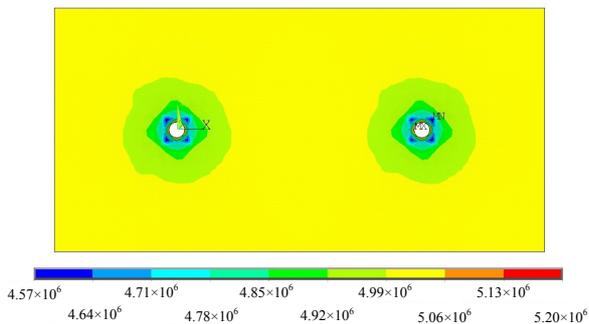


图 7 模型 2 膜面预应力 /Pa

Fig.7 Membrane prestress distribution of Model 2

同样进行雪荷载和风荷载作用下的应力分析,并与单元结构(未加拉杆,见图 1)进行比较,结果如表 2。

从结果我们可以得出,模型 2 相对于单元结构:膜面中央部分位移增大,顶板及底板的位移略有增大;上膜面最大应力和最小应力在荷载作用下分别略有增大和变小,但下膜面应力变化不大;弹簧力在荷载作用下的改变量变化不大。

表 2 两种工况下的应力分析(模型 2)

Table 2 Stress analysis considering snow load and wind load (Numerical model 2)

项目	上层膜面雪荷载200N/m <sup>2</sup>		上层膜面风吸荷载550N/m <sup>2</sup>	
	模型 2	单元结构	模型 2	单元结构
顶板位移/mm	-16.2	-11.8	20.5	16.7
底板位移/mm	-9.2	-6.5	13.2	9.9
膜面最大位移/mm	-41.0	-17.7	52.5	28.1
上膜面应力/MPa	Max: 7.2	Max: 6.3	Max: 10.5	Max: 9.1
	Min: 3.8	Min: 4.0	Min: 2.2	Min: 3.4
下膜面应力/MPa	Max: 6.8	Max: 6.3	Max: 4.8	Max: 5.0
	Min: 5.2	Min: 5.0	Min: 2.6	Min: 2.9
弹簧力/N	-786.2	-765.7	-356.5	-406.5

## 3 结论

本文介绍了两种弹簧支撑 ETFE 枕式结构模型,并利用 ANSYS 软件对这两种结构模型进行了找形分析以及雪载和风载作用下的应力分析,分析结果与无拉杆单元结构进行了对比,得出以下结论:

(1) 单元结构增加拉杆(模型 1),可将上膜面所受荷载传递到支撑框架,能较有效地减少膜面位移。

(2) 单元结构增加拉杆(模型 1)使得上膜面和下膜面相对独立,设计师可以根据设计要求对上膜面、下膜面选择不同的材料;同时我们也可以选择不同刚度的弹簧来支撑上下膜面,得到不同的膜面形状,以达到相应的建筑效果。

(3) 将单个枕式结构拼接组合,可以形成覆盖空间更大的 ETFE 弹簧支撑枕式结构。与单元结构相比,组合形成的结构膜面应力变化不大,而膜面最大位移(两单元之间的中央部分膜面)有所增大。

本文对两种模型进行了数值分析验证可行性,今后还将开展模型试验,进一步考察其结构性能。

## 参考文献:

- [1] Annette LeCuyer. ETFE technology and design [M]. Berlin: Birkhauser Basel, 2008: 128—131.
- [2] 陈先明, 赵志雄, 张欣. 国家游泳中心(水立方)ETFE 膜结构技术在水立方中的应用[J]. 建筑技术, 2008, 39(2): 195—198.  
Chen Xianming, Zhao Zhixiong, Zhang Xin. Application

- of ETFE membrane structure on National Aquatics Center (Water Cube) [J]. *Architecture Technology*, 2008, 39(2): 195—198. (in Chinese)
- [3] 许晶, 薛素铎, 向阳. 气枕式 ETFE 膜结构的初始形态分析[J]. *空间结构*, 2006, 12(1): 43—47.  
Xu Jing, Xue Suduo, Xiang Yang. Initial form analysis of ETFE cushions [J]. *Spatial Structures*, 2006, 12(1): 43—47. (in Chinese)
- [4] 刘建明, 吴明儿, 张其林. ETFE 双层气枕计算分析及比较[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2007, 37(5): 910—914.  
Liu Jianming, Wu Minger, Zhang Qilin. Structural analysis and comparison for double-layer ETFE cushions [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2007, 37(5): 910—914. (in Chinese)
- [5] 薛素铎, 许晶, 向阳. 荷载作用下气枕式 ETFE 膜结构受力性能分析[J]. *空间结构*, 2007, 13(1): 45—51.  
Xue Suduo, Xu Jing, Xiang Yang. Static analysis of ETFE cushions in membrane structures [J]. *Spatial Structures*, 2007, 13(1): 45—51. (in Chinese)
- [6] 徐国宏, 袁行飞, 傅学怡, 顾磊, 董石麟. ETFE 气枕结构设计——国家游泳中心气枕结构设计简介[J]. *土木工程学报*, 2005, 38(4): 66—72.  
Xu Guohong, Yuan Xingfei, Fu Xueyi, Gu Lei, Dong Shilin. Design of ETFE cushions——A brief introduction to the ETFE cushion design of Beijing Olympic National Swimming Center [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2005, 38(4): 66—72. (in Chinese)
- [7] 吴明儿, 刘建明, 张其林. ETFE 薄膜气枕模型试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2008, 29(6): 126—131.  
Wu Minger, Liu Jianming, Zhang Qilin. Experimental study on ETFE foil cushion [J]. *Journal of Building Structures*, 2008, 29(6): 126—131. (in Chinese)
- [8] Wu Minger, Wang Jue, Liu Jianming, Zhang Qilin. Design of an experimental aluminum hall with ETFE membrane roofs [C]. *Proceedings of the IASS symposium, Venice, Italy: 2007.*
- [9] 吴明儿. 改进的双层枕式膜结构 [P]. 中国: 200610148740.5, 2006.  
Wu Minger. Improved double-layer membrane cushion structures [P]. China: 200610148740.5, 2006. (in Chinese)
- [10] Wu Minger, Wu Yuanyuan, Kim Jae-Yeol. ETFE foil spring cushion structure and its analytical method [J]. *Thin-Walled Structures*, 2011, 49(9): 1184—1190.
- [11] 吴明儿, 刘建明, 慕全. ETFE 薄膜单向拉伸性能[J]. *建筑材料学报*, 2008, 11(2): 241—247.  
Wu Minger, Liu Jianming, Mu Tong. Uniaxial tensile properties of ETFE foils [J]. *Journal of Building Materials*, 2008, 11(2): 241—247. (in Chinese)