

文章编号:1673-2049(2007)03-0013-06

ETFE 气囊膜形态、结构特性与材料性能试验

陈务军¹, 唐雅芳², 任小强¹, 董石麟¹

(1. 上海交通大学 空间结构研究中心, 上海 200030; 2. 上海市建筑科学研究院, 上海 200031)

摘要:进行了聚偏四氟乙烯(ETFE)薄膜单向拉伸和反复荷载试验,分析了应力-应变曲线、滞回环曲线特征;根据受约束条件的力密度法找形分析方法,建立了充气膜设计分析理论,并介绍了 EasyVol 充气膜分析方法;通过数值算例分析,研究了 ETFE 气囊膜基本形态(菱形、六边形、矩形、圆形)、矢高、气压、初应力等对找形分析的影响及相互作用;进行了气囊膜在风压、风升作用下的荷载特性分析以及结构特性参数分析。该研究对 ETFE 气囊膜设计具有重要参考价值。

关键词:ETFE 薄膜;气囊膜;力学性能试验;结构形态

中图分类号:TU502.6

文献标志码:A

ETFE Air Cushion Membrane Configurations, Structural Performances and Material Properties Experiments

CHEN Wu-jun¹, TANG Ya-fang², REN Xiao-qiang¹, DONG Shi-lin¹

(1. Space Structures Research Center, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China;

2. Institute of Shanghai Building Science, Shanghai 200031, China)

Abstract: Firstly, uni-tension and cycle loading tests were carried out for ETFE film. The stress and strain curve and cycling curve were analyzed thoroughly. The results indicate that ETFE is super elastic and elastic-plastic. According to form finding method formulated from force density subjected to volume constraints, design analysis procedure was developed for pneumatic structure, and specialized EasyVol was introduced for air cushion membrane analysis. Through series numerical analysis, parametric effects on equilibrium form and inter discipline were investigated for various plan form (rhombus, hexagon, rectangular, circle), such as rise, rise-to-span, differential pressure, initial prestress. Finally, structural performance analysis was performed for cushion applied wind pressure and suction, as well as parametric effects investigation. The presented works are valuable to design of ETFE air cushion membrane.

Key words: ETFE film; air cushion membrane; mechanical property experiment; structural configuration

0 引言

虽然聚偏四氟乙烯(ETFE)薄膜已经发明了 30 余 a,但主要用于医药卫生行业。而其在建筑领域也有近 20 a 的应用历史,但只是 1995 年后被成功

应用于气囊膜,才获得快速发展和广泛关注。地标性建筑有:英国为迎接新世纪而建的“伊甸园(Eden of Garden)”、德国为 2006 年世界杯而建的“安联体育场(Allianz Arena)”及中国为 2008 年奥运会而建的“水立方”和“鸟巢”等^[1],此外在欧洲还有众多

收稿日期:2007-06-10

基金项目:国家高技术研究发展计划(“八六三”计划)项目(2006AA705211)

作者简介:陈务军(1969-),男,重庆市人,副教授,工学博士,E-mail:cwj@sjtu.edu.cn。

ETFE 膜建筑。

除了 ETFE 气囊膜制造技术原因外,各国仅见关于 ETFE 薄膜基本特性、应用综述^[2],但无详实的 ETFE 力学参数,以及基于 ETFE 薄膜的气囊膜设计原理、计算分析方法、结构特性研究。文献[3]中利用 ANSYS 软件分析了“水立方”中典型气囊膜结构特性,但分析的基本方法和结论有待商榷。

笔者首先对 2 种基本型号 ETFE 薄膜进行了单向拉伸试验,然后进行了反复荷载试验,然后介绍了气囊膜设计分析方法、EasyVol 数值分析方法,最后对基于 ETFE 特征的气囊膜常见形态找形、荷载特性等进行了数值分析研究。

1 拉伸试验

ETFE 薄膜厚度为 50~250 μm ,建筑常用的为 150、200、250 μm 薄膜。为适应不同建筑功能,ETFE 薄膜有可印刷(多颜色、彩色)、喷铝箔、可透光、透紫外线等不同种类,主要为日本、德国、美国生产。

ETFE 薄膜为聚偏四氟乙烯高分子热塑性薄膜,无织物纤维布,各向同性体,因此无经纬向试件。试验采用日本旭硝子化工提供的建筑常用 ETFE 薄膜 200NJ、250NJ,试件长 280 mm,宽 50 mm,有效长度 200 mm,两端夹持长度各 40 mm,误差小于 1 mm。由 Instron45 先预拉,然后常速(300 mm \cdot min⁻¹)拉伸至破坏,试件塑性变形,截面颈缩拉断。

图 1 为 ETFE 薄膜应力-应变曲线,两者形态一致,呈现明显的弹塑性特征,在约 $\sigma_b/3$ 前总体上呈弹性,应变小于 0.2,随后有一个短的非弹性阶段,应变达到 0.3,最后呈现明显塑性特征,有较小的塑性强化,试件破坏时应变达到 4 以上。

由表 1 可知,试件破坏时 200NJ、250NJ 两者面应力基本相同,均值为 44.04 MPa,抗拉强度随 ETFE 薄膜厚度增加而增大。ETFE 薄膜强度较小,工作应力一般小于 10~15 MPa(0.2 σ_b ~0.3 σ_b),而应变却可达 0.2,与一般织物膜工作应变(0.5 $\times 10^{-2}$ ~5.0 $\times 10^{-2}$)、工作应力(20~30 MPa,小于 0.2 σ_b)差异巨大。

2 反复加载试验

反复加载试验主要测试 ETFE 薄膜在较低工作应力范围内的力学特征。以 0.05 σ_b ~0.10 σ_b (均值)为加载最大值,以 0.5 kN \cdot m⁻¹为最小值,速度为 50 mm \cdot min⁻¹,采用 MTS-809 进行试验,反复加载 15 次。该试验选用 ETFE200NJ,取最大值 225 N,

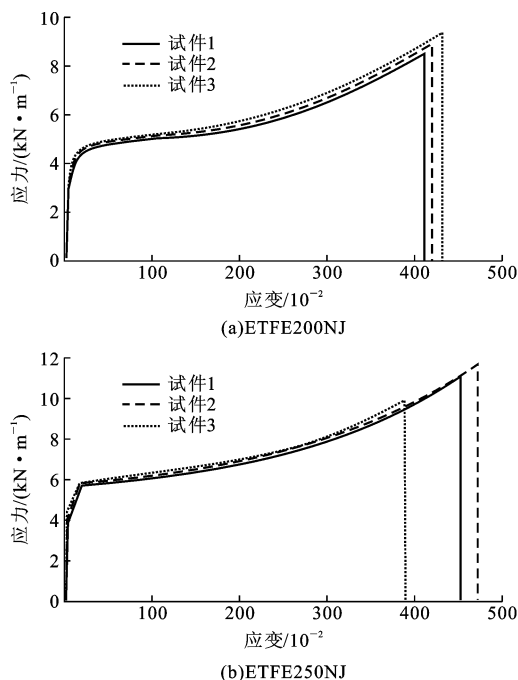


图 1 ETFE 薄膜应力-应变曲线

Fig. 1 Strain and Stress Curve of ETFE Film

最小值 25 N。

图 2(a)为 ETFE200NJ 试件 3 反复荷载下应力-应变试验曲线,在较小单调荷载下试件仍发生约 12 $\times 10^{-2}$ 应变,呈弹塑性。在第 1 个荷载下降段,有弹性应变恢复约 2 $\times 10^{-2}$;在第 2 个循环荷载下应变发展,有一滞回环,仍呈弹塑性特征;随后在反复循环荷载下,应力应变特征相似,应变随循环荷载步增加,滞回环约一致近似平移。

由图 2(a)可知:ETFE 薄膜任何阶段基本呈弹塑性,且在反复荷载下应变逐渐发展,恢复应变较小,这主要是由于 ETFE 薄膜热塑性高分子间发生不可恢复滑移造成的。取一个标准循环荷载加载的应力-应变曲线,如图 2(b)所示,然后用 $y = y_0 + A_1 e^{-x/t_1} + A_2 e^{-x/t_2}$ 拟合,可得到一条逐渐平缓的拟合曲线。根据 ETFE 薄膜一般工作应力水平,由拟合曲线可得到相应点的切线模量,即为局部弹性刚度。3 个试件所得试验曲线与计算结果具有很好的一致性。表 2 为应力为 1 kN \cdot m⁻¹(预张力态)和 4 kN \cdot m⁻¹(正常工作态)对应的弹性刚度。应力水平低时弹性刚度,应力水平高时弹性刚度低,所取割线模量介于两者之间。总之,ETFE 薄膜在低应力水平下仍呈现弹塑性特征,弹性刚度较织物膜低。

3 气囊膜设计分析方法

薄膜自身无定形,随预力作用而产生稳定平衡

表 1 ETFE 薄膜试验结果

Tab. 1 Experiment Results of ETFE Film

| 试 件 | ETFE200NJ | | | | ETFE250NJ | | | |
|--|-----------|--------|--------|--------|-----------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 均值 | 1 | 2 | 3 | 均值 |
| $\sigma_b/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$ | 8.49 | 8.97 | 9.37 | 8.94 | 11.18 | 11.52 | 9.81 | 10.84 |
| σ'_b/MPa | 42.45 | 44.85 | 46.85 | 44.72 | 44.72 | 46.08 | 39.24 | 43.36 |
| $\epsilon_b/\%$ | 409.55 | 419.05 | 430.70 | 419.77 | 453.20 | 472.50 | 388.15 | 438.15 |

注: σ_b 为考虑薄膜厚度的抗拉极限强度; σ'_b 为不考虑薄膜厚度的抗拉极限强度; ϵ_b 为破断延伸率。

表 2 ETFE200NJ 弹性刚度

Tab. 2 Elastic Stiffness of ETFE200NJ Film

| 工 况 | 预应力水平($1 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$, 5 MPa) | | | | 工作应力水平($4 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$, 20 MPa) | | | |
|-------------------------------------|--|--------|--------|--------|--|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 均值 | 1 | 2 | 3 | 均值 |
| $E/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$ | 206.33 | 138.40 | 134.59 | 159.77 | 26.78 | 35.86 | 25.08 | 798.85 |
| E'/MPa | 1 031.65 | 692.00 | 672.95 | 29.24 | 133.90 | 179.30 | 125.40 | 146.20 |

注: E 为考虑薄膜厚度的弹性刚度; E' 为不考虑薄膜厚度的弹性刚度。

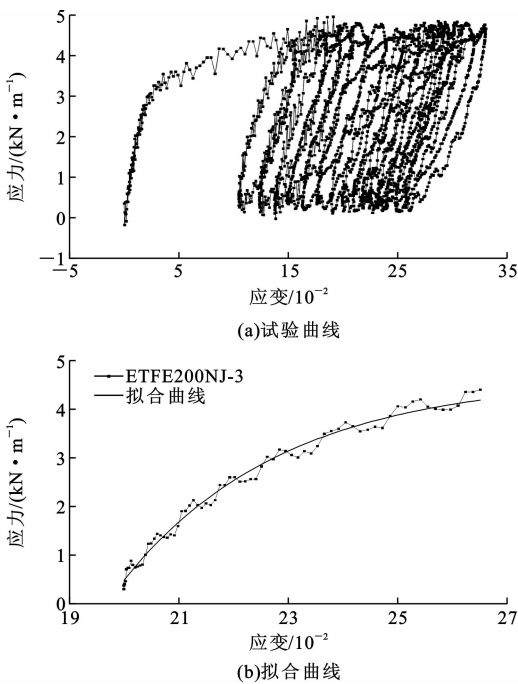


图 2 ETFE200NJ 反复荷载试验应力-应变曲线

Fig. 2 Strain and Stress Curves of ETFE200NJ

Cycling Loading Test

形态。张拉膜由机械张拉产生预应力,充气膜则由充气产生预应力。预应力是膜抗力体系的重要因素,起到膜成形、维持形态、抵抗外荷载和作用,而不是单纯荷载或作用。文献[4]中规定预应力为永久荷载。文献[5]、[6]中规定将膜预应力作为永久荷载进行膜设计,但未对荷载组合系数、抗力分项系数作出合理规定。对较刚性结构体系,如预应力网壳,预应力等同为普通永久荷载影响较小。对形态完全由预力决定的轻结构体系,预应力仅等同为永久荷载进行设计有待商榷,特别是封闭建筑空间的充气

膜(气囊膜或气承膜)。ASCE 17—96^[7]中采用分项系数的极限状态设计方法,规定了气承膜内气压与永久荷载不同的组合系数,便是充分认识到气压既是抗力因素又是永久荷载,不同于一般永久荷载。

气囊膜可按式(1)进行设计

$$\gamma_0 S(P+P_0) \leq R(P+P_0) \quad (1)$$

式中: γ_0 为结构重要性系数; P 为大气压; $S(P+P_0)$ 为将 P_0 作为荷载的荷载效应组合设计值(可参考 ASCE 17—96); $R(P+P_0)$ 为与气压成函数关系的膜抗力设计值。

式(1)中气囊内气压为 $P_i = P + P_0$,气囊外气压为 $P_e = P$,内外气压差为 $\Delta P = P_0$,正是由于这个气压差使膜成形并产生抗力。标准大气压值为 101.325 kPa,大气压 P 随所在位置纬度、高度、温度等有所变化^[8]。

在荷载作用的“瞬时状态”,假设气囊内气体质量不变,不与外界发生气体和热交换,温度不变。此时,气体满足热力学玻伊耳定律,即

$$\frac{P_i V}{T} = C_1, P_i V = C_2 \quad (2)$$

式中: P_i 为气囊内气压, $P_i = P + P_0$; V 为气囊内气体体积; T 为气体温度; C_1 、 C_2 为常数。

荷载分析时,由于气囊发生大位移,气囊体积发生改变,相应内气压产生变化,从而导致气囊抗力水平改变。因此,在结构非线性分析过程的每一个循环步内,还应满足

$$P_i^1 V_1 = P_i^2 V_2 = C_2 \quad (3)$$

并进行双重循环迭代计算,求出稳定收敛解;否则,求出的内压、膜应力存在误差,导致结论不正确。

在气囊膜使用过程中,随季节温度变化,大气压

会出现较小变化(可忽略不计),但由于温度改变导致内气压变化,进而显著影响气囊膜结构特性。

$$\frac{P_1^i V_1}{T_1} = \frac{P_2^i V_2}{T_2} = \frac{(P_1^i + \Delta P)(V_1 + \Delta V)}{T_1 + \Delta T} \quad (4)$$

式中: T_1 、 T_2 为温度。

如年温差 $\Delta T = \pm 20$ K, 取 $T_1 = 288.15$ K, $P \approx 100$ kPa, $P_0 = 0.3$ kPa, 并假设体积变化忽略(实际气囊体积有较小被动变化), 则气压的变化为 $\Delta P = \pm 6.962$ kPa, 远超过一般气囊膜内气压最大值和最小值, 因此, 需要控制设备主动对气囊内气压进行调节, 泵出或泵入气体以维持相对稳定的正常工作气压。良好的气压自动控制系统是大型 ETFE 气囊膜成功的关键因素之一。

4 计算分析理论和方法

基于连续介质力学的薄膜线弹性理论, 文献[9]中给出了详实的气囊膜形态(任意曲面、球面、柱面、截锥面、组合曲面等)在对称雪载或非对称雪载下变形、内力的解析公式。

气囊膜在荷载作用下会产生大位移, 出现强几何非线性, 线性分析理论不满足工程设计要求。虽然张拉膜分析文献很多, 但充气膜分析理论较少。气压力始终法向作用于膜面, 随气囊形态改变, 法向量也改变, 这是非保守力。根据非线性连续介质力学理论, 文献[10]中以气囊内空气为不可压缩介质, 建立了统一的大位移有限元列式和增量迭代非线性分析方法。文献[11]中采用动能阻尼动态松弛法由增量列式增量迭代求解气囊膜。文献[12]中首次建立了张拉膜找形与荷载非线性分析的一般理论力密度法, 提出了充气膜分析理论受约束条件的力密度法, 并开发了 EasyVol^[13]。

基于非线性找形分析理论, Linkwitz 和 Schek 首先提出了力密度法 (Force Density Method, FDM), 随后逐渐发展完善, 至今仍然是欧洲各国最流行的索网和张拉膜结构找形分析方法。膜结构分析力密度法的第 1 步是采用膜线单元模拟膜面, 然后对膜线网格体系进行分析, 最后等代求膜面应力。

根据初始条件(初始位置坐标、力密度、节点荷载)求出体系平衡状态位形。无外荷载时, 根据力密度得到对应平衡形态, 就是找形分析。Easy 软件采用高度稀疏矩阵压缩存储, 并由矢量共轭梯度迭代法求解^[14]。

仅根据初始力密度和初始基本几何条件还不能求出气囊膜(充气膜)惟一稳定平衡形态, 还需要设定合理气压、封闭体积、最小曲面表面积等。

给定约束条件为气压为常量, 可按照相似的方法, 建立以气压为目标函数的约束条件, 并计算相应平衡形态。气压始终法向作用于膜面, 膜面形态改变, 对应膜面法向量也变化, 气压法向应随之修正。

在找形分析时充气膜约束条件可以为体积常量或气压常量, 而荷载分析时则常为封闭体积内无气体交换与热交换, 即 $PV = C$, C 为常数, 单纯体积、气压约束只能理解为特殊荷载工况。

EasyVol 模块是 Easy 软件中专门用于充气膜结构分析的模块, 它基于 EasyForm、EasySan 模块和基本集成环境, 自身还包括 2 个模块: 找形和荷载分析。EasyVol 可进行气囊膜和气承膜找形、荷载分析, 以及组合体系的结构分析。

图 3 为 $10 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ 矩形气囊膜, 膜线网格为 $0.2 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$, 设初始等应力为 $0.8 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。当给定气压为 0.25 kPa , 找形得到气囊膜体积为 $46.369 5 \text{ m}^3$, 矢高为 $0.889 1 \text{ m}$, 如图 3(b) 所示; 相反, 给定体积, 找形得到平衡气囊后, 内气压为 $0.249 3 \text{ kPa}$, 气囊矢高为 $0.886 6 \text{ m}$ 。无论给定气压, 还是体积约束条件, 找形分析结果一致。

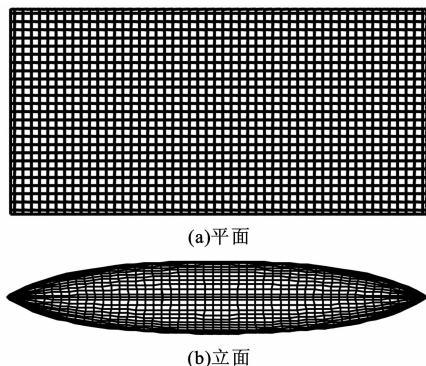


图 3 矩形气囊膜单元

Fig. 3 Rectangular Air Cushion Membrane Unit

5 形态与结构特性

单元化、网格化气囊膜是 ETFE 应用于大型空间结构的主要体系。空间网格基本形式主要有: 矩形(图 3)、平行拱(柱面坐标系下矩形)、方形、菱形、(正)多边形(五边形、六边形、八边形)、圆形、椭圆形等。

5.1 基本单元形态

菱形、六边形、圆形是最基本的 ETFE 气囊膜单元, 可适应灵活的空间网格和几何尺寸, 也最能代表和反映气囊膜形态与结构特征。如“安联体育场”

用菱形气囊膜单元,“伊甸园”用六边形气囊膜单元,“水立方”用六边形、菱形气囊膜单元等。下面将详细研究这 3 种基本气囊膜单元的形态、荷载特性。

图 4 为菱形气囊膜单元,对角长为 $12\text{ m}\times 6\text{ m}$,初应力为 $0.8\text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$,膜线网格为 $0.2\text{ m}\times 0.2\text{ m}$,气压为 0.25 kPa 。找形后的气囊矢高为 0.718 4 m ,上下对称,气囊厚为 1.436 8 m ,矢跨比为 $1/16.7$ 、 $1/8.35$,体积为 24.475 2 m^3 , $PV=2\text{ 453.641 3 kN}\cdot\text{m}$,取大气压为 100 kPa (下同)。

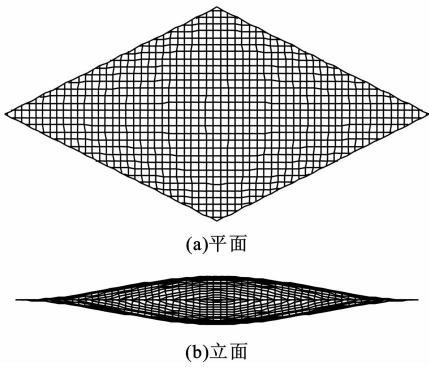


图 4 菱形气囊膜单元

Fig. 4 Rhombus Air Cushion Membrane Unit

图 5 为六边形气囊膜单元,边长为 6 m ,初应力为 $1.1\text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$,膜线网格为 $0.4\text{ m}\times 0.4\text{ m}$,气压为 0.25 kPa 。找形结果气囊矢高为 1.808 1 m ,上下对称,气囊厚为 3.616 2 m ,矢跨比为 $1/6.637$,体积为 172.362 m^3 , $PV=17\text{ 275.704 8 kN}\cdot\text{m}$ 。

图 6 为圆形气囊膜单元,内接四边形边长为 6 m ,初应力为 $1.0\text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$,膜线网格为 $0.4\text{ m}\times 0.4\text{ m}$,气压为 0.25 kPa 。找形后气囊矢高为 1.143 4 m ,上下对称,气囊厚为 2.286 8 m ,矢跨比为 $1/7.421$,体积为 172.362 m^3 , $PV=6\text{ 871.693 8 kN}\cdot\text{m}$ 。

设初应力一致,均为 $0.8\text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$,表 3 为形态

表 3 气囊膜单元矢高与内气压关系

Tab. 3 Relationship Between Air Cushion Membrane Element Rise and Inner Pressure

| 内气压/kPa | | 0.05 | 0.10 | 0.15 | 0.20 | 0.25 | 0.30 | 0.35 | 0.40 | 0.45 | 0.50 | 0.55 | 0.60 |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| 矢高/ m | 菱形单元 | 0.000 | 0.287 | 0.431 | 0.575 | 0.718 | 0.862 | 1.006 | 1.149 | 1.527 | 1.802 | 2.284 | x |
| | 六边形单元 | 0.454 | 0.908 | 1.362 | 2.027 | 2.734 | 4.293 | x | x | x | x | x | x |
| | 圆形单元 | 0.286 | 0.572 | 0.859 | 1.145 | 1.431 | 2.007 | 2.534 | x | x | x | x | x |

表 4 气囊膜单元矢高与初应力关系

Tab. 4 Relationship Between Air Cushion Membrane Element Rise and Initial Prestress

| 初应力/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$) | | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.9 | 1.0 | 1.1 | 1.2 | 1.3 | 1.4 | 1.5 |
|---------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 矢高/ m | 菱形单元 | 1.437 | 1.149 | 0.958 | 0.821 | 0.718 | 0.639 | 0.575 | 0.523 | 0.479 | 0.442 | 0.411 | 0.383 |
| | 六边形单元 | x | x | x | 3.636 | 2.734 | 2.309 | 2.027 | 1.808 | 1.634 | 1.397 | 1.297 | 1.211 |
| | 圆形单元 | x | 3.503 | 2.311 | 1.635 | 1.431 | 1.272 | 1.145 | 1.041 | 0.954 | 0.881 | 0.818 | 0.763 |

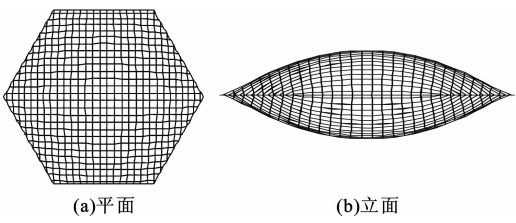


图 5 六边形气囊膜单元

Fig. 5 Hexagon Air Cushion Membrane Unit

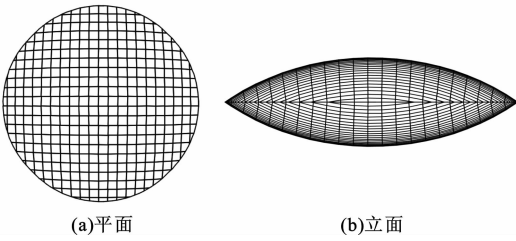


图 6 圆形气囊膜单元

Fig. 6 Circle Air Cushion Membrane Unit

分析结果,x 表示初应力与内压不能形成平衡形态。给定内气压为 0.25 kPa ,表 4 为气囊膜单元矢高与初应力关系。

5.2 基本单元结构特性

菱形气囊膜单元参数同前,并由第 2 节试验取 ETFE200NJ 弹性刚度为 $25\text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$ 。上表面作用风升为 $0.5\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$,变形见图 7,上表面矢高增加为 0.982 4 m ,下表面矢高减小为 0.475 2 m ,气囊厚度为 1.457 6 m ,增厚 20.8 mm 。气囊体积为 24.520 1 m^3 ,增加 0.044 9 m^3 , $PV=C$,气压降低为 0.066 5 kPa ,减小 0.183 5 kPa 。上表面长轴向应力为 $0.9\sim 1.1\text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$,短轴向应力为 $1.4\sim 1.6\text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$ 。初应力态时应力为 $0.8\sim 1.1\text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$ 。下表面长轴应力为 $0.6\sim 0.7\text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$,而短轴向应力约为 $0.3\text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$,均小于初应力态,短轴减小幅度大。



图 7 菱形气囊膜单元上表面风升作用变形

Fig. 7 Deformation of Rhombus Air Cushion Membrane Element with Wind Suction Applied on Upper Surface

在图 4 菱形气囊膜单元中,上表面作用风压为 0.5 kPa。图 8 为气囊膜变形,上表面矢高为 0.455 5 m,矢跨比为 1/13.17,下表面矢高为 0.991 1 m,上下表面矢高分别减小 0.262 9 m 和增加 0.272 7 m,气囊厚度为 1.446 6 m,增加 9.8 mm,体积为 24.397 3 m³,减小 0.077 9 m³,气压为 0.57 kPa,增加 0.32 kPa;上表面长轴向应力为 0.6~0.8 kN·m⁻¹,短轴向应力为 0.2~0.4 kN·m⁻¹,均小于初应力,下表面长轴应力为 0.8~1.1 kN·m⁻¹,而短轴向应力约为 1.3~1.7 kN·m⁻¹。在风压与风升作用下,气囊膜受力总体相反,但并不对称,体积的微小变化将对气压产生较大影响,进而严重影响承载力和形态稳定性,特别是气压较小时气囊膜形态失去稳定性。图 5、6 的气囊膜单元具有形似荷载作用特性。



图 8 菱形气囊膜单元上表面风压作用变形

Fig. 8 Deformation of Rhombus Air Cushion Membrane Element with Wind Pressure Applied on Upper Surface

6 结 语

ETFE 薄膜在较低荷载下应变较小(小于 0.2),呈近似线性,但即使在较低反复荷载下仍发生不可恢复应变,呈弹塑性。气囊膜设计分析应考虑内气压是抗力因素和长期荷载因素,在设计时内气压与一般永久荷载采用不同的荷载组合系数。在非线形分析过程必须考虑内气压变化符合理想气体玻伊耳定律及对平衡形态和数值计算收敛的影响。菱形气囊单元具有较好的形态稳定和承载力。

参考文献:

References:

[1] 陈务军.膜结构工程设计[M].北京:中国建筑工业出版社,2005.
CHEN Wu-jun. Membrane Structure Engineering Design [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005.

[2] 胥传喜,陈楚鑫,钱若军. ETFE 薄膜的材料性能及其工程应用综述[J]. 钢结构, 2003, 18(6): 1-4.
XU Chuan-xi, CHEN Chu-xin, QIAN Ruo-jun. An Introduction of Material Properties and Engineering Applications of ETFE Foil[J]. Steel Construction, 2003, 18(6): 1-4.

[3] 徐国宏,袁行飞. 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 Guo-hong, YUAN Xing-fei. Design of ETFE Cushion, a Brief Introduction to the ETFE Cushion Design of Beijing Olympic National Swimming Centre [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(4): 66-72.

[4] GB 50009—2001, 建筑结构荷载规范[S].
GB 50009—2001, Load Code for Design of Building Structures[S].

[5] DGJ 8—97-2002, 膜结构技术规程[S].
DGJ 8—97-2002, Technical Specifications of Membrane Structure[S].

[6] CECS 158: 2004, 膜结构技术规程[S].
CECS 158: 2004, Technical Specifications for Membrane Structure[S].

[7] ASCE 17—96, Air-supported Structures[S].

[8] KHOURY G A, DAVID L J. Gillett Airship Technology[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.

[9] OTTO F. Tensile Structures Design Structure and Calculation of Building of Cables, Nets and Membranes[M]. Cambridge: MIT Press, 1967.

[10] BONET J, WOOD R D, MAHANEY J. Finite Element Analysis of Air Supported Membrane Structures [J]. Comput Methods Appl Mech Engrg, 2000, 190(10): 579-595.

[11] MAIN J A, PETERSON S W. Load-deflection Behavior of Space-based Inflatable Fabric Beams[J]. Aerospace Engrg, 1994, 7(2): 225-238.

[12] SCHEK H J. The Force Density Method for Form Finding and Computation of General Networks[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1974, 3(1): 115-134.

[13] DIETER S, LUTAR G. Calculation of Pneumatic Structures with Easy Volume[M]. Salzburg: Pyeong Chang, 2005.

[14] 唐雅芳. 气囊膜形态、结构特性与新型膜材力学性能试验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2006.
TANG Ya-fang. Form, Structural Performance of Air Cushion Membrane and Mechanical Experiments of New Type of Architectural Fabrics [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2006.