

# 塑料温室薄膜承载性的非线性有限元分析

俞永华, 王剑平, 应义斌\*

(浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 杭州 310029)

**摘要:** 该文通过温室薄膜单轴拉伸试验, 确定材料的计算参数和本构模型; 应用非线性有限元与引入人工刚度的方法, 建立温室薄膜荷载效应分析的计算模型; 并结合相关规范, 探讨温室薄膜承载计算的安全系数的取值问题。在此基础上, 对温室薄膜在风载与雪载工况下作实例计算, 确定承载薄膜的第一主应力与变形值, 同时也分析不同薄膜预张力对承载性的影响, 以及薄膜第一主应力的具体分布。该研究为温室设计合理选用农膜, 提供参考计算模型与分析方法。

**关键词:** 塑料温室; 塑料薄膜; 非线性有限元分析; 骨架式膜结构

**中图分类号:** TU 331. 2; S625

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-6819(2007)9-0181-05

俞永华, 王剑平, 应义斌. 塑料温室薄膜承载性的非线性有限元分析[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 181- 185.

Yu Yonghua, Wang Jianping, Ying Yibin. Nonlinear finite element analysis of the bearing capacity of the film in plastic greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(9): 181- 185. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

塑料薄膜温室在我国农业生产上有着广泛的应用, 它在结构本质上属骨架支承式的膜结构。薄膜迭加于骨架之上, 主要起着围护与荷载传递的作用, 而骨架则起着支承传递来的荷载的作用, 它们分属结构工作中二个不同的部分。在以往的研究中, 一直侧重于对温室骨架结构的各种优化研究<sup>[1-3]</sup>, 而未将薄膜的承载受力作为完整结构中的一部分来研究探讨。

对于温室膜结构, 薄膜与骨架在结构工作中是相辅相成的, 骨架中的拱杆具有高承压能力, 而薄膜可以承受较好的抗拉力, 两者的结合, 构成了塑料薄膜温室主要的结构特征。在温室结构优化中, 对拱间距等参数的确定, 要受到膜材性能的约束。总体来说, 采用粗管径大间距的结构方案更利于发挥钢材的整体承载效率, 但这样对薄膜承载性能的要求也高。如今膜材性能不断提高, 如高强复合膜的出现, 也为温室结构再优化提供了空间。

目前国内塑料温室薄膜的种类与厚度规格众多, 且温室也存在不同类型与系列, 其结构参数相应也有明显的差异与变化。膜材与结构这两者的参数需要合理的匹

配。因此, 研究分析温室薄膜的承载性能, 是一项必要的工作。与温室的骨架结构相比, 温室薄膜受力属于柔性结构范畴, 其变形具有大位移、小应变的特点, 并呈现高度的非线性。在计算分析的过程中还要考虑薄膜褶皱现象, 以及为提高薄膜承载刚度, 需施加一定的张紧力等情况。它的设计方法与计算模型很不同于传统探讨的温室刚性结构, 在分析过程与计算收敛性等问题上表现更为复杂。

在建筑领域中常用的膜结构, 其结构体系以张拉式的索膜结构为主, 膜材多为纤维编织外加涂层的材料, 其结构计算一般经历初始形态分析、荷载分析、裁剪分析。温室膜结构与之相比, 有共性的一些内容, 但在结构体系与对应的设计方法、膜材的厚度与材性、以及在施工安装过程中对膜材最小预张力的控制等方面都存在着很大的差别。故本文针对温室膜结构的自身特点与要求, 并参照膜结构技术规程的相关内容<sup>[4]</sup>, 对温室薄膜的承载性能与计算方法作一些探讨。

## 1 膜材试验方法与测试

在中国农膜的国家标准中<sup>[5]</sup>, 规定了农膜用于质量检验与产品等级划分的最低力学指标, 如拉伸强度、断裂伸长率等。但这些指标如用于具体产品的农膜上作承载性分析, 一方面所需的力学参数还不完整, 另一方面对于不同产品的农膜, 其实际性能指标差异很大, 数据的针对性不强, 故采用试样进行试验测试。

试验样本取自杭州新光塑料有限公司的 PE(聚乙烯) 抗老化无滴农膜, 厚 0.12 mm, 力学性能测试方法采用单向拉伸试验, 拉伸仪器为新三思 CMT4000 系列

收稿日期: 2006-09-11 修订日期: 2007-07-21

基金项目: 浙江省重大科技攻关项目(021122542)资助

作者简介: 俞永华(1970-), 男, 博士研究生, 主要从事设施农业工程研究。杭州市凯旋路 268 号 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 310029。Email: yhyu@zju.edu.cn

\*通讯作者: 应义斌(1964-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 生物系统工程。杭州市凯旋路 268 号 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 310029。Email: ybying@zju.edu.cn

的微机控制电子万能试验机。依据有关的国家标准<sup>[6]</sup>, 采用标准取样器进行取样, 试样每组采用纵横向各取 5 片, 薄膜拉伸宽度为 10 mm, 拉伸标距为 50 mm, 测得平均厚度为 0.096 mm。在固定标距后进行试验拉伸, 试验记录模每片样本的拉伸数据, 经汇总得到的力-位移曲线分别见图 1 与图 2。由样本测得的数据经换算得到的弹性模量、拉伸屈服应力、拉伸强度等力学指标见表 1, 表中数值是取测试样本的平均值, 这些指标与薄膜的承载性直接相关。

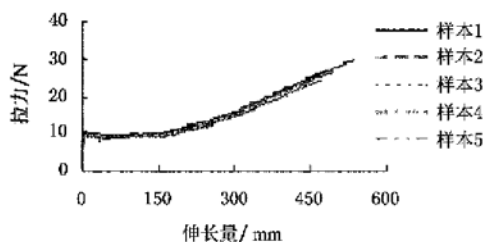


图 1 薄膜样本横向拉伸的力-位移曲线图

Fig. 1 Force and displacement diagram of the film sample in transverse tension

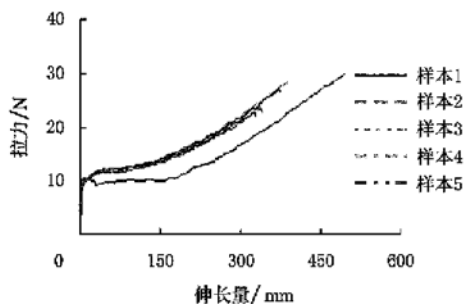


图 2 薄膜样本纵向拉伸的力-位移曲线图

Fig. 2 Force and displacement diagram of the film sample in longitudinal tension

表 1 膜材测试的力学指标

Table 1 Mechanical indexes of membrane material

力学指标	弹性模量 /MPa	断裂伸长率 /%	拉伸断裂应力 /MPa	拉伸屈服应力 /MPa
横向	237.9	971	26.7	8.85
纵向	210	714	25.9	12.32

从图 1 与图 2 的试验曲线可见, 薄膜有明显的屈服台阶, 整个屈服过程经历的变形很大, 在材料屈服前呈明显的线弹性特性。由表 1 的试验数据可见, 薄膜为正交异性材料, 但数值差异不大, 从简化计算的角度出发, 可以将薄膜近似为等向弹性材料。如追求更精确的分析, 应考虑材料的正交异性特征。

温室薄膜是结构组成的一部分, 它需满足承载能力极限状态与正常使用极限状态的要求, 因此对其最大工

作应力与变形量要有所限定。在薄膜应力达到屈服时, 会产生明显的塑性, 变形量也随之快速增加, 这将不能满足通常要求的正常使用极限状态, 而薄膜在进入屈服阶段之前, 由图 1 与图 2 可知, 材料拉伸的整体变形量很小, 故将薄膜的工作应力限定在屈服应力之下是必要的。在这范围之内, 材料的本构关系从前面的试验曲线形状可知, 它是理想的线弹性模型, 因此按此构建本构模型, 与实际情况相符。在后续温室薄膜的非线性承载力分析中, 也可以不考虑复杂的材料非线性情况, 使整体计算得到简化。

## 2 非线性有限元模型

温室薄膜属柔性材料, 它只有面内刚度而无面外刚度, 它只能承受拉力而不能承受压力、弯矩等作用。在外荷载作用下, 它主要通过变形(曲率变化)来平衡外荷载, 即模型会产生明显的形变。因此在结构计算分析时必须考虑变形对平衡的影响, 即考虑结构的几何非线性。

膜单元采用三角形平面单元<sup>[7]</sup>, 其中  $i, j, m$  分别为三角形单元的节点编号, 每个节点有 3 个平移自由度。单元在整体坐标系下的位移增量为  $[\Delta U_e]$ 。

$$[\Delta U_e] = \{\Delta x_i \Delta y_i \Delta z_i \Delta x_j \Delta y_j \Delta z_j \Delta x_m \Delta y_m \Delta z_m\} \quad (1)$$

由于薄膜不能抗压, 在受力过程中很可能会产生褶皱, 在计算中需要对产生褶皱的单元进行判别与处理<sup>[8]</sup>。判别标准有 3 种: 主应力标准、主应变标准、混合标准。如采用主应力标准判别<sup>[9]</sup>, 薄膜单元为平面应力单元,  $\sigma_1$  与  $\sigma_2$  分别为第一、二主应力。1) 当  $\sigma_2 > 0$ , 为双向受拉; 2) 当  $\sigma_2 \leq 0, \sigma_1 > 0$  为单向受拉, 产生褶皱, 需要处理; 3) 当  $\sigma_1 < 0$ , 为完全松弛, 该单元应力取为零, 应力应变关系用一个对角元素为很小正值的对角矩阵代替。通过上述的判别处理, 可实现膜单元只能受拉, 不能受压和受弯的要求。

温室薄膜的预张力与膜结构规程中规定的最小数值相比, 属极小。因此温室膜结构表现的初始刚度很低, 往往在一些荷载组合工况下, 产生较多褶皱单元, 这些单元失去刚度, 会造成整体刚度矩阵的奇异。因此在模型计算进程中, 遇到这种不稳定的情况, 常会得不到分析的结果。采用专业的膜结构软件进行分析, 遇到此情况时, 是通过增加预张力的方法来解决。而温室薄膜的预张力受膜材强度与厚度这种先天不足的因素制约, 往往难以达到较高的预张力。因此本文通过给褶皱单元施加一个人工刚度的办法, 来克服温室膜结构在受力分析过程中的不稳定现象, 解决计算不收敛的问题。采用人工刚度的方法为: 在构建有限元模型过程中, 采用共用

节点的方法在膜单元上叠加一层壳单元, 该单元可以受拉、受压等, 它的杨氏弹性模量相对于薄膜材料很小, 通常可取为膜单元弹性模量的 1% 左右。这样处理后, 可以帮助模型克服增加荷载的过程中的不稳定现象, 最终达到平衡取得收敛解。由于迭加的壳单元弹性模量相对膜单元很小, 对计算结果的影响也甚小。

根据几何非线性有限元的 U. L 列式法<sup>[10,11]</sup>, 膜结构的平衡方程为:

$$([K_L] + [T_{NL}]) \times \{\Delta U\} = {}^{t+\Delta t}\{R\} - {}^t\{F\} \quad (2)$$

式中  $[K_L]$  —— 线性刚度矩阵;  $[T_{NL}]$  —— 非线性刚度矩阵;  $\{\Delta U\}$  —— 节点位移增量, m;  ${}^{t+\Delta t}\{R\}$  ——  $t + \Delta t$  时刻的节点荷载, N;  ${}^t\{F\}$  —— 等效节点力向量, N。

对于温室薄膜的安装, 厂家都要求张紧安装。薄膜张紧度的大小对其承载刚度与应力有很大影响, 在计算时需将此影响考虑在内。在通用的有限元软件分析中, 对预张力的模拟可采用降温法<sup>[12]</sup>, 即通过对薄膜施加温度荷载来实现初始预应力, 具体计算公式见式(3):

$$\sigma = \alpha(T_2 - T_1)E \quad (3)$$

式中  $\alpha$  —— 膜材膨胀系数,  $\text{m}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $T_2, T_1$  —— 变化后与变化前的温度,  $^\circ\text{C}$ ;  $\sigma$  —— 膜面预张的应力,  $\text{N}/\text{m}^2$ ;  $E$  —— 膜材的弹性模量,  $\text{N}/\text{m}^2$ 。

对于不同的季节时期, 薄膜温度变化很大, 与施工安装时的初始温度相比, 存在着较大的温差, 形成的温度荷载将引起薄膜预张力的变化。与其它膜结构相比, 这是塑料温室很显著的特点。由温差产生的薄膜预张力的变化, 计算公式同公式(3)。

由于目前对温室薄膜的安装, 只有张紧的要求, 而没有具体数值的规定。薄膜的预张力如不加设定或设定数值过低, 会导致薄膜出现褶皱, 承载后产生变形过大, 以及在风荷作用下出现明显的风振现象等。反之如预张力过大, 对施工的安装与固膜等都带来一定的难度, 且薄膜在承载后, 也会造成总应力过大等缺点。在膜结构技术规程中有最小预张力要求, 但温室膜材与之比较, 由于在材性与厚度方面差异很大, 其规定的数值远超过温室薄膜的承载力。此外在膜结构的一些文献中提到<sup>[7]</sup>, 膜材张拉应力一般设在膜材拉伸强度的 5% 之内, 通常为 1.5% ~ 4%。同样也由于膜材差异等原因, 其参考性不强。

关于膜结构计算模型边界支承条件的确定, 考虑到塑料薄膜温室属骨架支承膜结构, 这类膜结构由于其支承结构的刚度较大, 可将膜材与刚性骨架的连接处考虑为固定支承边界, 并且忽略骨架与薄膜间的滑移。文中为简化分析, 对温室卡槽与压膜线等固膜方式都近似简化为固定边界方式。

### 3 设计承载力计算的取值探讨

对于温室薄膜的承载计算, 需要考虑常见的雪载与风载这两类工况, 并对薄膜承载的强度与刚度进行校核控制。中国膜结构技术规程中的设计公式, 形式上虽然是采用概率极限法, 但实质上也是根据单一容许应力法转换而来的<sup>[4]</sup>。其单一安全系数  $K$  值按短期荷载与长期荷载, 分别取作 3.5 与 7, 再根据  $K$  值换算成规范公式中的分项系数。由于上述的  $K$  值参照国内外永久建筑的标准, 温室膜结构与之相比, 在设计标准与膜材的性质等方面都很不一样, 如只简单地照搬此标准, 会因保守造成浪费, 而目前我国还没有这方面的标准来规范其取值。现通过借鉴国外相近标准, 如在相关文献中提到的 JIS-93 标准<sup>[13]</sup>, 按临时建筑考虑的膜结构, 其使用年限低于 3 年, 它的安全系数取为 3.3, 这与塑料薄膜温室的情况很接近。此外, 在塑料薄膜温室的类型中也有双层充气膜温室, 也借鉴相关的充气膜结构, 其膜的设计强度 ( $T_r, \text{N}/\text{m}^2$ ) 计算公式如下<sup>[13]</sup>:

$$T_r = \Phi L_i T_{sm} \geq T_{fm} \quad (4)$$

式中  $\Phi$  —— 抗力系数, 取 0.5,  $\Phi = 0.5$ ;  $T_{sm}$  —— 膜经向或纬向拉伸强度, 由膜带拉伸试验确定,  $\text{N}/\text{m}^2$ ;  $T_{fm}$  —— 最不利荷载组合下膜经向或纬向内力,  $\text{N}/\text{m}^2$ ;  $L_i$  —— 使用周期因子, 对设计周期内保持至少 90% 初始设计强度的膜  $L_i = 0.65$ , 当强度低于 90%,  $L_i$  应线性减小。

通过比较, 可以发现两者实际的安全系数值很接近。温室薄膜通常在经历夏季高温后易老化, 老化后也会带来强度降低等问题<sup>[14]</sup>。关于薄膜老化的问题, 可以通过公式(4)中的周期因子  $L_i$  对设计强度加以修正。

参照膜结构工程的荷载组合<sup>[13]</sup>, 温室薄膜常用的工况组合如下:

工况 1: 恒载 + 雪载 + 预张力(属长期荷载)

工况 2: 恒载 + 风载 + 预张力(属短期荷载)

温室薄膜由于它自身的特殊性, 它的预张力应考虑两部分组成, 一部分是施工安装时的初始预张力, 另一部分是温度荷载产生的预拉力变化。

对于温室薄膜的上述工况, 其承载力计算的设计表达式:

$$K(S_{G_k} + S_{Q_k}) \leq R_k \quad (5)$$

式中  $K$  —— 安全系数, 取 3.3, 或按公式(4)计算, 取两者的最小值;  $S_{G_k}$  —— 永久荷载效应标准值;  $S_{Q_k}$  —— 可变荷载效应标准值;  $R_k$  —— 结构抗力标准。

温室薄膜的变形控制, 也是结构设计中需要考虑的内容之一。在膜结构技术规程中对骨架支承式膜结构的

要求是,其最大位移的限值应符合有关骨架结构设计标准的规定。对塑料薄膜温室骨架的变形控制参见文献[15],其限值取  $L/100$ ,  $L$  为屋顶跨度值(m)。在温室实际生产应用中,薄膜的变形较其承载力而言,它对温室使用的影响要小很多,故薄膜的强度校核应作为设计主要控制的要素,而对薄膜变形量的控制,可作为相对次要的要素,根据实际情况加以把握。

#### 4 算例分析

以三连栋华东型连栋温室为例,跨度 7 m,脊高 2 m,拱间距 1.33 m,拱形为尖顶双圆弧,拱半径为 4.9 m。计算取基本风压为  $0.65 \text{ kN/m}^2$ ,基本雪压为  $0.3 \text{ kN/m}^2$ 。风压体型系数由上述体型尺寸,并参考温室荷载规范,确定在温室中间跨区域负压值最大,其值为  $-0.5$ ,故本文在此区域取一标准单元作分析。风振系数取 1.2,雪载分布系数在拱顶部分取 0.6,在天沟部分取 1.4。结构安全系数取 3.3,计算确定的膜材容许应力为  $7.8 \text{ MPa}$ 。

分析程序采用 ANSYS 通用有限元软件与浙江大学编写的膜结构软件。边界按固定边界考虑,在温室屋脊处考虑设有固膜卡槽,薄膜压膜线的布置与拱杆为一一对应,即与拱杆布置的间距相等。最后取薄膜的标准受力单元,即半跨,两拱间的薄膜作分析。其有限元模型如图 3 所示,采用三角形平面的膜单元,应用人工刚度方法,双层迭加的单元数共 416 个,并将膜面上的荷载转化成等效力作用在节点上。

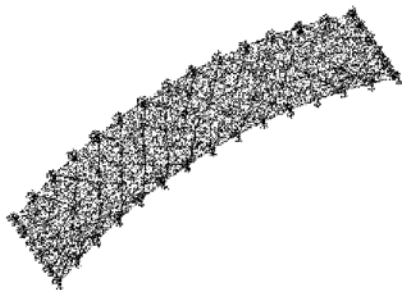


图 3 温室薄膜的有限元计算模型

Fig. 3 Finite element model of the greenhouse film

在风载工况下,薄膜厚度取  $0.12 \text{ mm}$ ,薄膜预张力在没有明确规定数值的情况下,按无预应力、 $0.5$ 、 $1$ 、 $1.5$ 、 $2$ 、 $2.5 \text{ MPa}$  进行分别计算。得到薄膜在不同预张力作用下的第一主应力与位移量,数值见表 2。

由表 2 可知在薄膜预张力增加的情况下,最大位移值呈减少状态,这表明薄膜承载刚度是在增加。但同时,相应地第一主应力也随之增大。在实际设计中,当出现薄膜的最大承载应力低于容许应力较多,而对应的位移值又较大时,应通过增加预张力来减少其位移值,

达到对薄膜合理的应用。另一方面,对预张力的增加,也要把握好尺度,如只简单地一味增加,会造成第一主应力超过容许应力,将不能满足承载性的要求,且过大的预张力对施工安装来讲,也会带来困难。

表 2 薄膜在风载和不同预张力作用下的最大位移与应力

Table 2 Maximal displacement and stress of the film on the condition of wind load and different pre-tension

预张力/MPa	位移/m	第一主应力/MPa
0	0.0913	5.16
0.5	0.0839	5.40
1.0	0.0763	5.65
1.5	0.0689	5.92
2.0	0.0616	6.21
2.5	0.0542	6.53

在雪载工况下,计算确定薄膜在拱顶部分的雪载为  $0.18 \text{ kN/m}^2$ ,在天沟部分的雪载为  $0.42 \text{ kN/m}^2$ 。薄膜厚度取  $0.12 \text{ mm}$ ,预应力按  $2.5 \text{ MPa}$  考虑。计算得到的主应力云图如图 4 所示。最大的主应力位于薄膜下半部分,即在薄膜受荷较大的区域内。节点的最大应力,即第一主应力,是校核薄膜承载力的主要依据。由图 4 的分析结果得到,最大的第一主应力为  $6.1 \text{ MPa}$ ,最大位移量为  $0.081 \text{ m}$ 。薄膜各单元的主应力方向如图 5 所示,其中最大主应力方向,基本平行于薄膜的短边。这也说明对于拱间距不大的这类温室,其薄膜承力是以短向受力为主,这与结构中单向板的情况相类似。

通过上述计算分析,可知该薄膜在风载与雪载工况下,应力值均在许可范围内,满足承载力要求。在雪载工况下的变形,比骨架要求的位移限量略偏大,但作为次要控制因素,其影响不大。总体上该薄膜是适用于此类结构的温室。

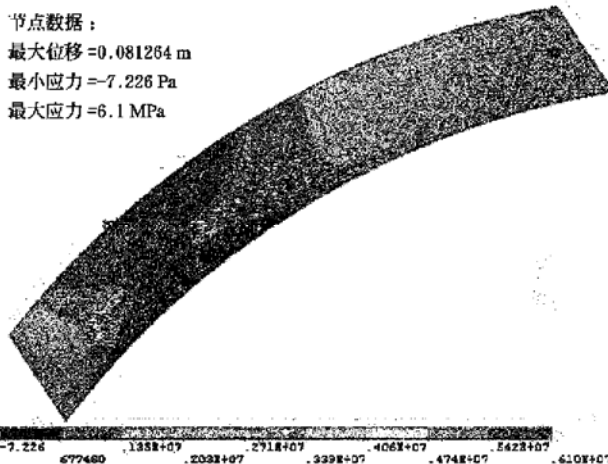


图 4 雪载工况下薄膜的主应力云图

Fig. 4 Principal stress of the film on the snow load condition

应力方向: 第一主应力

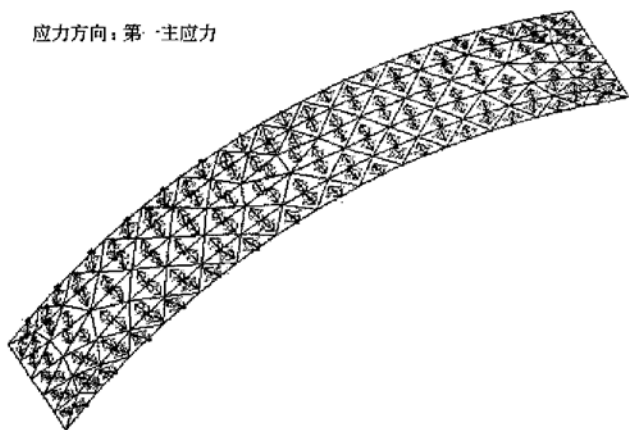


图5 雪载工况下薄膜的主应力方向图  
Fig.5 Principal vector of the film on the snow load condition

## 5 结 论

本文对温室薄膜边界条件作了简化处理, 计算了薄膜的承载力, 得到如下结果:

1) 采用非线性有限元方法, 提出了温室薄膜承载力的计算模型, 并采用人工刚度的方法, 加强计算的稳定性与收敛性。针对具体的设计应用, 提出的计算公式与安全系数取值有参考价值。

2) 对温室薄膜施加预张力, 可以有效地提高承载刚度与减小变形量。本文分析了薄膜预张力对应力与变形量的影响, 表明以第一主应力控制为主, 变形控制为辅的双控方法, 可计算确定薄膜合适的预张力。

## [参 考 文 献]

- [1] 宋占军. 五连拱温室的结构计算[J]. 农业工程学报, 1998, 14(1): 164-168.
- [2] 郑金土, 李扬. 连栋塑料温室 GLP-728 结构的力学分析和优化设计初探[J]. 农业工程学报, 2000, 16(1): 79-82.
- [3] 沈正炳, 黄文彬. 多联栋温室框架结构的弹塑性计算[J]. 农业工程学报, 2000, 16(2): 105-108.
- [4] 膜结构技术规程. CECS 158: 2004[Z]. 北京: 中国计划出版社, 2004.
- [5] GB 4455-94. 农业用聚乙烯吹塑薄膜[S]. 1995.
- [6] GB 13022-91. 塑料薄膜拉伸性能试验方法[S]. 1991.
- [7] 魏德敏, 戴维炎. 张拉膜结构的有限元分析[J]. 力学与实践, 2005, 27(1): 46-50.
- [8] 谭 锋, 杨庆山, 李作为. 薄膜结构分析中的褶皱判别准则及其分析方法[J]. 北京交通大学学报, 2006, 30(1): 35-39.
- [9] 张 华, 周星德, 单 建. 薄膜结构的几何非线性分析[J]. 应用力学学报, 2004, 21(2): 106-109.
- [10] 王勖成. 有限元单元法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [11] 郭乙木, 陶伟明. 线性与非线性有限元及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [12] 江锡虎, 谢步瀛, 陈慧进. 充气膜结构非线性分析的ANSYS实现[J]. 结构工程师, 2006, 22(1), 38-42.
- [13] 陈务军. 膜结构工程设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [14] 赵志超. 农膜用聚乙烯树脂的主要性能与开发应用[J]. 塑料加工与应用, 2002, 24(2): 11-23.
- [15] 吴德让. 农业建筑学[M]. 北京: 农业出版社, 1994.

# Nonlinear finite element analysis of the bearing capacity of the film in plastic greenhouse

Yu Yonghua, Wang Jianping, Ying Yibin<sup>\*</sup>

(College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China)

**Abstract:** A calculation parameter and a constitutive model for greenhouse film were obtained by a uniaxial tensile test. And a calculation model of the load effect for the greenhouse film was developed by the nonlinear finite element method and the method with artificial stiffness was applied. According to the relative criterion, the safety coefficient of bearing capacity for the greenhouse film was discussed. Based on the models and methods mentioned above, the example for the bearing capacity of the film was calculated on the working conditions of snow and wind load, and the first principal stress and deformation of the film were obtained. In addition, the influence of different pre-tensions on the bearing capacity of the film, and the concrete distribution of first principal stress were discussed. This paper presented the calculation model and theoretical method for the proper application of the film in the greenhouse design.

**key words:** plastic greenhouse; plastic film; nonlinear finite element analysis; space frame membrane