

# 有限元平衡迭代法在充气膜温室屋面的应用

田 忠 喜

(聊城大学 建筑工程学院, 山东 聊城 252059)

**摘 要:**结合工程实例,针对大跨度双层充气膜屋面覆盖出现的兜水、漏水和其它构造问题进行了成因分析。通过基于有限元平衡迭代法的充气膜结构找形分析,计算了充气膜承载力,确定最佳设计参数,并结合构造做法,建立了技术措施。

**关键词:**有限元;充气膜;兜水;温室

**中图分类号:**TU 262 **文献标识码:**B **文章编号:**1001-0009(2013)09-0046-03

随着我国温室建设的发展,双层充气膜温室以其良好的透光和保温性能得到越来越广泛的应用,但我国多是引进国外温室,自己适用的技术则刚刚发展,在充气膜的工程应用中,也出现了充气膜由于承载力不足和构造不合理等因素而引起的兜水、漏水、风力损毁的问题,因此,在充气膜设计中引入充气膜找形理论,分析充气膜承载力问题和相关构造,以确定和验证经验参数,建立技术措施具有重要的意义。

## 1 工程概况

某北方温室建设项目,为满足高大植物培育要求,温室最大跨度要求 14 m,最大高度要求 8 m(檐口),温室总建筑面积约 3 200 m<sup>2</sup>,分为一、二、三、四区和 1 个展厅,总平面布置见图 1<sup>[1]</sup>。

温室上部采用平行弦桁架,用于安装外遮阳,屋面采用圆拱型桁架结构,弧形桁架梁上弦杆用于安装双层充气膜,充气膜分区分别为 24 m×9 m、32 m×7 m、33 m×7 m。下弦杆安装内遮阳。其中一、三、四区门式钢架跨度为 14 m,二区跨度 18 m(图 2)。

温室屋顶覆盖材料为双层充气膜,下层为无滴膜,

**作者简介:**田忠喜(1979-),男,硕士,副教授,研究方向为建筑结构。E-mail:391838343@qq.com。

**基金项目:**聊城大学校基金资助项目(x0810044)。

**收稿日期:**2012-12-17

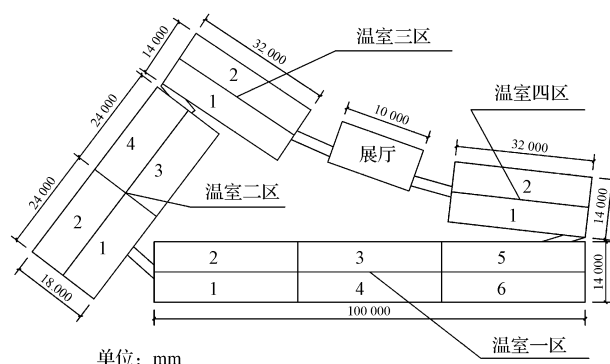


图 1 温室总平面和充气膜安装分区图  
Fig. 1 Greenhouse general plane and inflatable membrane mounted partition

膜厚 1.5 mm,上层为长寿膜,膜厚 2 mm,充气膜的使用年限为 5 a,选用镀锌的卡槽和卡簧固定充气膜,在屋面的脊部和檐口,通过连接屋面镀锌檩条固定双层充气膜,2 层膜固定之后,安装充气泵,向 2 层膜之间充气,整个项目的总平面图和各温室充气膜分区见图 1。

工程项目竣工后,出现温室充气膜在充气状态下排水不畅,在屋面檩条之间的充气膜出现雨水聚集现象,在充气膜固定点部位出现渗漏,并随着降水量的增加所兜雨水量增加(图 3),檩条出现被压弯现象,形成一定的结构破坏隐患。

工程项目中温室屋面在充气状态下强度不能满足

illumination. Water requirement rate over time was fluctuant, and the peak appeared in the 20th, 50th, 80th day. The high correlation was found between environmental factors and water requirement rate. A very significant positive correlation between water requirement rate and daily mean temperature, daily mean illumination, daily mean pan evaporation was showed, and the correlation coefficients that respectively were 0.935, 0.894 and 0.878. A very significant negative correlation between water requirement rate and daily mean humidity was also be found, and the correlation coefficient was -0.848. Six environmental factors were influenced and restricted each other, but daily mean temperature and daily mean illumination were the key factors that influenced watermelon water requirement rate.

**Key words:** plastic shed; watermelon (*Citrullus lanatus*); water requirement rate; environmental factors

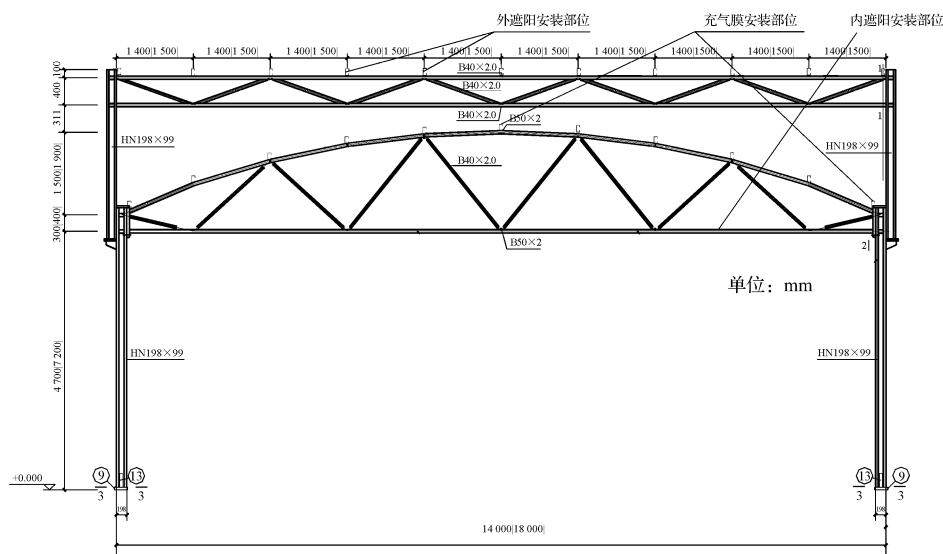


图2 温室用钢架(18 m跨度)

Fig. 2 Steel frame of greenhouse (18 m span)



图3 充气膜屋面上形成的水兜

Fig. 3 The water bag on inflatable membrane roof

风荷要求,大风引起充气膜屋面的起伏。而充气状态下温室屋面膜面脊部低于两侧,脊部和檐口充气膜固定点防水处理成为重点,良好的防、排水处理才能保证脊部和檐口不渗、不漏。而屋面上方用于安装外遮阳幕布的平行桁架梁下弦与上次膜面高差太小,在温室屋面充气状态下,充气膜受到下弦桁架结构的压迫,形成一定的排水隐患。

## 2 工程质量问题原因分析

良好的透光性和保温性是充气膜温室屋面被采用的重要原因,在一般工程项目中,膜面分区跨度最大为6 m<sup>[2]</sup>,该设计中,屋面跨度最大达18 m,充气膜跨度最大达9 m,最小也达到7 m,分区长度最大达33 m。其充气膜分区面积分别为216、224、231 m<sup>2</sup>,在工程设计阶段,未对充气膜的充气压力与屋面雨、雪荷载的关系做充分分析和精确计算,导致屋面在使用状态下承载力不能满足要求,造成较为严重的结构安全隐患。

## 3 充气膜结构找形分析和相关参数的确定

### 3.1 有限元平衡迭代法的充气膜结构找形分析

在柔性结构体系中,膜结构的几何曲面和预应力使其具有刚度。在边界条件一定的情况下,膜结构的结构

初始形状与施加的预应力系统的大小和分布是相互关联的。当给予充气膜足够的预应力,使充气膜拉紧、无褶皱,才能满足屋面承载雨荷载和风荷载的要求<sup>[3]</sup>。

根据工程实例,计算模型的选取采用正方形,边长为20 m,边界条件为刚性边界。迭代时,从平面状态下进行起步,逐渐充气,使内压达到60 Pa,分6次迭代,每次增加10 Pa。 $t=2$  mm为薄膜厚度, $E_x=E_y=1 \times 10^9$  N/m为经纬方向弹性模量, $\mu_x=\mu_y=0.3$ 为泊松比。最后形成的充气结构初应力为 $\sigma_0=1.43 \times 10^7$  N/m<sup>2</sup>(图4)

以上的找形分析计算, $\sigma_{\min}=1.425 \times 10^7$  N/m<sup>2</sup>为选用温室充气膜膜面计算模型最小应力, $\sigma_{\max}=1.43 \times 10^7$  N/m<sup>2</sup>为温室充气膜膜面计算模型最大应力,可以看到 $\sigma_{\min}$ 和 $\sigma_{\max}$ 差距不大,所示计算模型为是应力均匀分布的最小曲面;空间曲面面积为 $S=523.16$  m<sup>2</sup>,而空间曲面面积按理论求得为 $S=536.45$  m<sup>2</sup>,可以看到误差是在2%以内;另外温室充气膜膜面计算模找形得到的膜面应力分布均匀,充气膜的膜面积也在误差范围内,可以认为有限元平衡迭代法找形是正确、有效的。

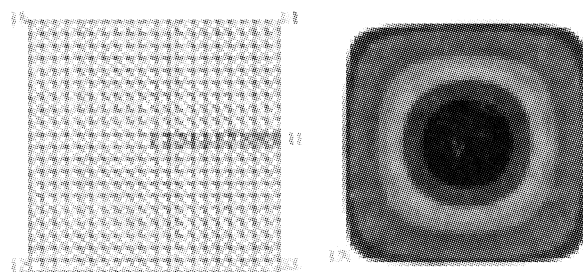


图4 计算模型单元划分和形态分析结果

Fig. 4 The calculation model unit partition and speciation analysis

### 3.2 参数的确定及合理构造的应用

3.2.1 充气压力的确定 充气风机的选型是根据温室屋面充气膜内部空气压力。为保证充气膜充气状态下有稳定的形状,抵抗风载和雨载,要求充气膜内部有较大的压力,但压力的提供来自于充气泵,当压力过大时,对充气膜固定点的拉力就会增大,加上风荷对整个充气膜的横向加载,可能将充气膜从固定点拔起,影响其整体稳定。根据当地风荷载和雨雪荷载的情况,经过有限元平衡迭代法的充气膜结构找形分析计算,结合经验参数确定间层空气压力为 60 Pa。当温室面积为 1 000 m<sup>2</sup> 时,采用一台 30 W 的离心风机即能满足要求,若保持充气膜内 250 Pa 的静压,充气膜具有稳定的膜面形状,当有风荷载时,膜面有轻微起伏,但能够满足要求,且其形成的膜面形状可充分满足雨荷载的要求,在对结构构造进一步优化后,雨水和顺利可以从屋面排出,没有引起充气膜的变形和兜水,满足了项目要求<sup>[4]</sup>。

3.2.2 充气厚度的确定 充气膜温室屋面其厚度对温室的保温性能有重要的影响,为保证温室的保温性能和良好的采光,必须选择合适的充气膜厚度,经过大量工程实践和实验,充气膜的厚度在 10~15 cm 时,充气膜的抗风干扰能力,固定点的拉力要求较为适宜。充分考虑充气膜在充气状态下降起的高度,增高外遮阳桁架高度,外膜高于内膜,膜顶距平行桁架下弦大于 30 cm。在充气状态下,充气膜与桁架下弦有足够的距离,在大风天气,也能满足充气膜的小的起伏,屋面的沟壑消失,有利于屋面雨水的顺利排出。

3.2.3 充气膜分区面积的确定 充气膜的分区面积对充气膜的承载力影响较大,分区面积过大对于保证充气膜内压非常困难,对施工的要求提高,要充分保证卡槽和卡簧固定充气膜牢固、密闭。经过有限元平衡迭代法分析,充气膜分区最好为方形,另面积不易超过 100 m<sup>2</sup>。分区也不易过小,过小会增加工程造价。

3.2.4 屋面坡度的确定 采用尖拱型结构体系<sup>[5]</sup>,确定坡度不小于 5%,使雨水顺利排出,充气膜脊部在充气状

态下脊部高于两侧,并在脊部增加排水槽,并设置纵向排水坡度。

3.2.5 其它需要改进的温室构造 将卡槽和压膜线来固定薄膜替换为铝合金型材或注塑件作固膜卡具,可减少证双层充气膜漏气,承受雪荷载时,关停充气泵,使上下膜面紧贴在一起,增加导热系数,因温室室内温度较高,膜面上的雪会很快融化,再进行充气,使膜面重新鼓起来,具备承载力。

## 4 结论

根据有限元平衡迭代法的充气膜结构找形分析和工程实际确定的参数,结合结构构造的选择<sup>[6]</sup>,工程经整改后,经过近 1 a 的使用,未出现兜水和漏水的现象,效果良好。

透光性和保温性使充气膜具备良好的可使用性,充气膜温室建造技术传入我国后,在温室建设中得到广泛的使用,但采用充气膜作为温室的屋面,应充分考虑当地的雨荷载、风荷载和雪荷载,还要考虑合理的屋面坡度、安装跨度、充气厚度等因素,通过有限元平衡迭代法的充气膜结构找形分析进行计算,确定充气膜相关参数,并结合合理的结构构造,解决了大跨度温室建设中存在的兜水和漏水问题,减少了经济损失。

### 参考文献

- [1] 田忠喜. 大跨度温室屋面建设问题商榷[J]. 北方园艺, 2008(10): 83-84.
- [2] 江锡虎. 充气膜结构全过程分析和造型技术研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.
- [3] 李群汇. 基于有限元平衡迭代法的充气膜结构找形分析[J]. 山西建筑, 2009, 35(31): 31-53.
- [4] 周长吉. 双层充气塑膜温室经济技术评价[J]. 农业工程学报, 1999, 15(1): 159-163.
- [5] 胡建. 温室结构类型初探[J]. 农业工程技术(温室园艺), 2007(3): 22-23.
- [6] 管小冬, 王松涛. 大型充气膜结构及膜材的发展概述[J]. 建筑施工, 2008, 30(2): 135-138.

## Finite Element Equilibrium Iteration Method in Engineering Applications Inflatable Greenhouse Film

TIAN Zhong-xi

(School of Architecture and Engineering, Liaocheng University, Liaocheng, Shandong 252059)

**Abstract:** With practical examples, for the large span roof covering membrane appears double inflatable pocket of water, leaks and other structural problems, the causes were analyzed. Through the finite element equilibrium iteration method based on the finding of inflatable membrane structures, inflatable membrane computing capacity, the design parameters were determined and combined the structural approach the solutions to the technical measures were found.

**Key words:** finite element equilibrium(FEM); inflatable membrane; pocket water; greenhouse