

doi:10.3969/j.issn.1671-5152.2016.10.002

上海地区温室供暖耗气量计算

□ 同济大学机械与能源工程学院 (201804) 刘振 秦朝葵

摘 要: 本文详细分析了温室的热工过程, 得出影响温室能耗的主要因素包括温室的太阳辐射、贯流放热量、通风换气放热量、室内土壤的地中导热量、室外气象、室内温度和作物的蒸腾作用等。通过能耗模拟软件计算了上海地区单层塑料膜温室在不同室内控制温度、不同供暖方式下的全年耗气量, 结合实际调研得出, 上海地区在种植常见瓜果类(番茄、黄瓜等)作物时塑料薄膜温室的全年累计耗气量约为 $5\text{m}^3\sim 7\text{m}^3$ 天然气/ $(\text{m}^2\text{温室}\cdot\text{a})$ 。

关 键 词: 温室 热工过程 DeST 供暖耗气量

Gas Consumption of Greenhouse Heating in Shanghai

Liu Zhen, Qin Chaokui School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai

Abstract: In this paper detailed analysis of thermal process in the greenhouse was analyzed. Main factors influencing energy consumption of greenhouse include solar radiation, penetration heat loss, ventilation heat loss, heat conduction of indoor soil, outdoor weather, indoor temperature and crop transpiration etc. The annual gas consumption of single-layer plastic-film greenhouse under different indoor temperatures and different heating modes in Shanghai was calculated. By comparison with in-site investigation, it was concluded that the annual gas consumption of plastic-film greenhouse is about $5\text{m}^3\sim 7\text{m}^3$ natural gas/ $(\text{m}^2\text{greenhouse}\cdot\text{a})$ with planting common fruits (tomato, cucumber etc) in Shanghai area.

.Keywords: Greenhouse thermal process DeST gas consumption for heating

1 前言

温室是在环境相对可控条件下, 采用工程技术手段、改变自然光温条件、创造优化动植物生长的环境因子, 使之全天候生长的设施工程。随着上海地区耕地面积的逐年减少, 技术密集化、集约化和商品化程度高的现代温室在提高土地产出率、资源利用率和劳动生产率的同时, 保障了城市的农产品供给, 得到

了市政府的大力支持, 取得了迅速发展。据统计^[1], 2015年上海地区各类温室约9 338.79hm², 其中玻璃温室95.73hm², 塑料薄膜温室8 577.66hm², 加温温室约占466.94hm²。

温室属于一种高能耗的抗逆性生产设施, 其能源消耗不容忽视, 一般温室的加温能耗占温室生产成本的30%~40%, 一些高纬度地区连栋温室的能耗甚至占到温室生产成本的50%~60%^[2]。目前, 上海地区

的温室主要通过燃煤、燃油和电加热进行供暖,但随着化石原料的枯竭、大气污染(酸雨、雾霾等)的加剧以及全球气候变暖对CO₂等温室气体的限排规定执行,传统的煤炭和石油资源越来越不满足当今环保节约型社会经济发展的需要。近年来,可再生能源(如太阳能、地热能、生物质能)在一些节能示范工程中已取代了传统的化石能源作为温室的新型加温热源,但其投资成本大、运行费用高、供暖可靠性差的特点限制了其广泛应用。而天然气作为一种优质清洁能源,气源供给充足,价格区间合理,越来越受到人们的青睐。从2009年开始,进口LNG、川气等后续气源相继抵沪,上海天然气供应形势逐步由阶段性不足转为阶段性富余,为下游市场的开辟带来了广阔的天地。天然气除了作为温室冬季的加温热源外,其燃烧产物CO₂还可以作为植物光合作用的原料,是温室理想的热源形式。

温室的能耗预测不仅是评价和优化温室结构与环境调控的重要指标,也是燃气公司拓展下游市场的重要依据。目前温室的供暖能耗预测方法有3类^[3],

(1) 建立在不稳定传热理论基础上的小气候动态模拟预测。这种方法对各种影响因素考虑较细,得出的结果也比较精确,但只能预测短期的能耗(1h~24h),并且对计算机性能要求极高。(2) 建立在稳定传热理论基础上的简易估算法,此种方法简单方便,但精度欠缺。

(3) 动静态结合模型,通过将静态模型加以改进,考虑太阳辐射在温室内的储存量以及土壤的蓄热量,克服了动态模型的复杂性使模型便于操作,同静态模型相比,精度进一步提高,并能进行长时段的能耗预测模拟。这种方法在温室能耗预测上还鲜有应用,但在建筑能耗预测方面已经比较成熟,如常用的能耗模拟软件DeST、EnergyPlus、DOE-2等。

本文通过分析温室内的热工过程,得出影响温室能耗的主要因素,并通过软件DeST进行全年逐时动态仿真,预测上海地区塑料薄膜温室在不同加热方式、不同室内控制温度下的全年供暖耗气量。

2 温室能耗的影响因素

温室的能耗与温室结构、室外气象、室内控制温度、加热方式等因素相关,又被称作温室运行的基础

能耗。同建筑能耗一样,温室能耗的大小也主要取决于温室的热工过程。

2.1 热工过程

温室是用覆盖材料和围护结构包围起来的一个半封闭系统。该系统包含了空气、作物、加热设备、土壤等物质,并不断与周围环境进行着物质和能量交换。图1为温室内热量收支平衡示意图^[4]。

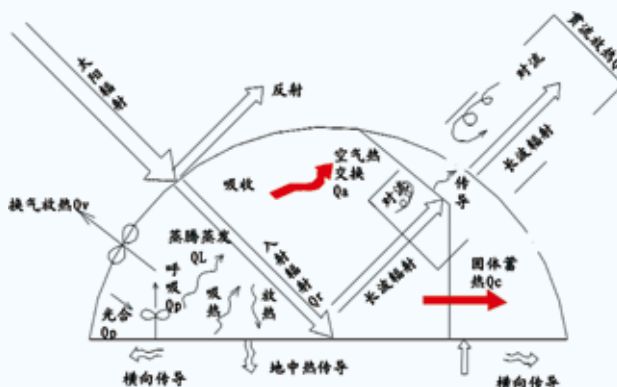


图1 温室内热量收支平衡示意图

在正常情况下,温室内的热量来源 Q_{in} 包括^[4]:进入室内的太阳总辐射(即直射辐射和散射辐射,用 Q_r 表示)和人工加热量(Q_g)两方面,即 $Q_{in}=Q_r+Q_g$;而温室内的热量支出 Q_{out} 主要取决于贯流放热量(Q_t)、通风换气放热量(Q_v)、室内土壤的地中导热量(Q_s)三方面,即 $Q_{out}=Q_t+Q_v+Q_s$ 。同建筑设计热负荷一样,温室的设计热负荷是温室在最不利情况下维持作物生长所需要的热量,即 Q_{out} ,它是温室加温设备容量选型的依据,也是影响温室能耗大小的重要方面。

温室的得热量 Q_r 主要取决于太阳总辐射、温室的透光率和透光面积以及光照时间。 Q_g 主要取决于加温设备容量、加温方式、散热面积和加温时间等。

贯流放热量 Q_t 是指通过温室覆盖材料所放出的热量,是温室主要的散热方式,占温室总散热量的70%左右,它是辐射、对流、导热3种传热方式共同发生作用的结果。它的传热过程可以分为3个阶段,即室内的热量先以对流和辐射的方式传到覆盖材料的内表面,然后以导热方式将其放到外表面,最后在外表面又一次以对流和辐射方式将其放至外界。单位时间内 Q_t 与温室覆盖材料的面积、覆盖材料的热导率及内外表面的辐射传热系数和对流传热系数成正比,而与

材料的厚度成反比。即材料的导热率、辐射传热系数和对流传热系数越大,材料越薄,贯流放热系数就越大。对于单层塑料薄膜,贯流放热系数约为 $6.8\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ 。 Q_v 是指由于室内外空气交换所导致的热量损失,占温室散热损失的20%左右。它主要取决于温室的自然(或强制)通风及建筑材料的破损、门窗缝隙以及温室的覆盖面积等因素。 Q_s 是指温室内土壤上下层垂直方向或室内外水平方向存在温差而导致的热量传导,占温室散热损失的10%左右。它与土壤的导热率、土壤中的温差及土壤面积成正比,而与具有温差的土壤两点间的厚度成反比。此外,由于土壤具有蓄热作用,室内地表温度白天大于地中温度,而在夜间又小于地中温度,因此,土壤中热量白天向下传导, Q_s 取正值,夜间向上传导, Q_s 取负值。

Q_L 是指由于物质相变所引起的热量交换。在自然情况下,温室内的这种热量交换主要是由水汽相变所造成的,这种潜热交换并没有将热量放出室外。 Q_c 是指由于各种物质材料蓄热系数不同所引起的热交换。它主要与物质材料的体积、热容量及导热率等因素有关。 Q_a 是空气蓄热升温 and 放热降温所引起的热交换,它主要与空气热容量及空气体积有关。通常,在空气湿度不大的情况下,空气热容量基本上是一定的。因此,空气量的多少就成了影响空气热交换的主要因素。即温室的体积越大,白天吸热升温 and 夜间降温放热就越多,这样,白天升温 and 夜间降温也就越缓慢;反之,白天升温吸热量 and 夜间降温放热量就越少,这样,白天升温 and 夜间降温也就越快。 Q_p 是指作物光合和呼吸作用的热量交换。温室内部的这种热量交换对于调节温室内的微气候环境具有重要作用,保证了作物生长的适宜环境,但这部分热量并没有直接排到室外,造成温室的热损失。

从上述温室内的热工过程来看,与建筑内的热工过程基本一致,但温室与常规建筑物相比,有如下特点:

(1) 温室的围护结构主要是塑料薄膜或玻璃,基本上没有蓄热能力。

(2) 温室内作物具有蒸腾作用,不具有蓄热能力。

温室独特的建筑外形(拱圆形)和围护结构(透光材料)使得温室内的热工过程更加复杂。例如:白天,太阳光辐射和热辐射在穿过围护结构时,

由于温室拱圆形的结构,必定有部分辐射直接穿出室外,而这部分辐射能量的大小难以确定。

其次,温室是具有一定高度的,当日间太阳辐射强烈或采用加热措施时,温室内会形成一定的分层而导致自然对流,其直接后果就是沿着温室的内表面形成一定厚度的上升流动的边界层,从而加强了薄膜自身的保温效果。在夜间,这种保温作用会随着边界层的变化而变化,导致温度分布不均匀。而软件中的能耗计算模型假定室内空气温度分布均匀,造成了计算上的偏差。

2.2 影响因素

温室能耗除了受上述热工过程中各项传热过程(Q_L 、 Q_v 、 Q_s 等)影响之外,还取决于室外气象参数、作物的蒸腾作用和土壤的蓄热作用。一般来说,影响温室能耗的气象参数主要是空气温度、湿度、太阳辐射、风速风向、地表温度以及天空背景辐射温度等。DeST以我国270个台站1971年~2003年的实测数据为基础,研制了所有这些台站的逐时气象数据,根据建筑节能设计标准选出了具有代表性的典型气象年。对于作物的蒸腾速率,在DeST中可通过设置室内产湿量的大小来代替作物的蒸腾作用。对于具有蓄热作用的土壤或其他不透明围护传热,DeST采用状态空间法计算,一次性求解温室的传热特性系数,求解过程中考虑了温室各围护内表面之间的长波辐射换热以及与空气的对流换热,从而严格保证了温室的热平衡。对于温室的透明围护结构,DeST采用K-Sc模型,通过设置透明材料的传热系数和太阳辐射、太阳光透过率计算温室的得热量和散热量,从而求解温室的逐时能耗。

3 温室DeST模型

3.1 物理模型

本文以上海地区最常见的塑料温室规格为基础,结合现有加温温室的结构特点,在DeST里面建立了一个单栋占地面积为 600m^2 的标准塑料薄膜温室。如图2所示,模型的基本参数如表1所示。

3.2 参数设置

模型的参数设置主要包括外围护结构和室内参数设置,温室覆盖材料聚乙烯薄膜的透光率一般可达

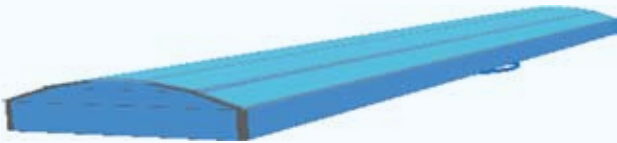


图2 塑料温室DeST模型

到90%以上，但随着使用时间的推移，其透光率会下降，一般会维持在80%左右，由于软件模拟的是全年的累计热负荷，所以太阳光透过率取80%，太阳辐射透过率与太阳光类似，软件里取75%。室内参数设置主要包括温室内的温度、湿度以及各种室内热扰的设置，温室同常规建筑不同，内部发热热源很少，基本上可以忽略不计。温室室内与室外的通风散热损失，可通过设置塑料温室的换气次数来计算。根据表1数据，在DeST中设置温室围护结构塑料薄膜的性能参数和通风换气次数如图3所示。

4 温室供暖耗气量预测

虽然温室内的热工过程较建筑热工过程相比复杂得多，但基本传热过程都是对流、辐射、导热的组合。温室内质能平衡方程与建筑内质能平衡方程相似，而且动态传热数学模型也极为相似，这为我们采用建筑能耗模拟软件DeST来计算温室的全年耗气量提供了依据。软件进行能耗模拟时，假定室内空气温度、湿度分布均匀，且忽略了作物的光合作用和呼吸作用（能耗计算中一般忽略不计），在计算结果上带来一定偏差。通过走访调研上海地区加温温室的能耗情况发现，上海孙桥现代农业园区玻璃温室采用热水供暖系统的年耗气量为 $4.1\text{m}^3\text{天然气}/(\text{m}^2\text{温室}\cdot\text{a})$ ，而能耗模拟软件DeST对其模拟的结果为 $4.5\text{m}^3\text{天然气}/(\text{m}^2\text{温室}\cdot\text{a})$ ，两者相差8.8%，满足工程上误差的要求。

表1 塑料温室基本参数设置

温室结构参数				
长（m）	跨度（m）	肩高（m）	拱高（m）	朝向
60	10	2	1.5	南北
围护结构参数				
材料	厚度（mm）	传热系数K（W/m ² ·K）	太阳能透过率（%）	可见光透过率（%）
聚乙烯	0.2	6.8	75	80
温室冬季室内设计参数				
室内温度（℃）		换气次数（次·h ⁻¹ ）		
白天	夜间	白天	夜间	
作物适宜温度	作物适宜温度	1.0	0.2	
供暖时间				
供暖季	白天		夜间	
11月24日~次年4月5日	8:00~17:00		17:00~8:00	

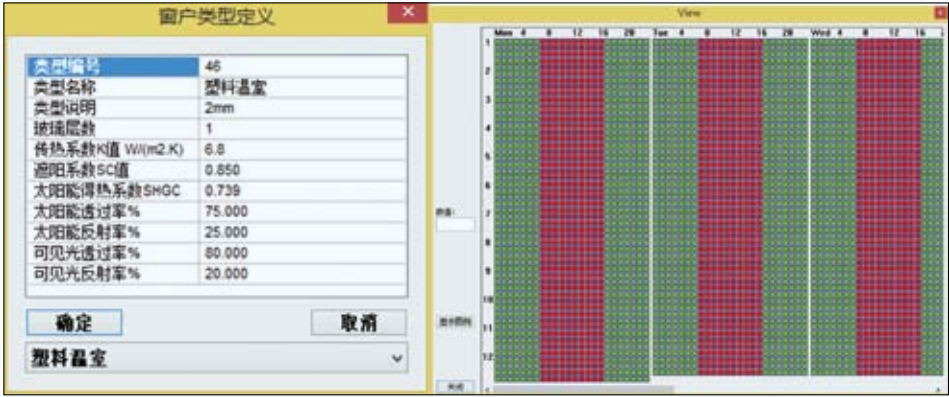


图3 温室DeST模型围护结构参数（左）和通风换气次数（右）

温室最常用的供暖方式包括热水集中式供暖和热风分散式供暖^[5]。不同的供暖方式加热效果不同,如热水供暖可以达到较高的稳定性和均匀性,常用于温室面积较大的温室群供暖。热风供暖由于空气热惰性小,加温时室内温度上升速度快,常用于小面积单栋温室供暖。不同的供暖方式加热效率不同,所对应的温室能耗也不同,本文针对温室常用的热水供暖和热风供暖系统计算其全年耗气量。

根据植物生理学原理,不同作物,不同品种,不同生长阶段对环境温度的要求不同,如黄瓜白天适宜生长温度为23℃~28℃,夜间适宜温度为10℃~15℃。所以本文根据上海地区的温室种类情况,选取典型的单层塑料薄膜温室,温室规格及模型设置参数见表1。利用能耗模拟软件DeST计算作物在白天和夜间不同的适宜生长温度下的温室全年累计热负荷 Q_L ,然后根据公式(4)和公式(5)分别计算热水供暖和热风供暖下的温室全年耗气量。

$$L_{g1} = \frac{Q_L}{\eta_1 \eta_2 H_1} \quad (4)$$

式中: L_{g1} ——温室热水供暖时单位面积的全年耗气量(m^3 天然气/ m^2 温室·a);

Q_L ——温室全年累计热负荷($\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{y}$, $*3.6\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{y}$);

H_1 ——天然气的低热值(MJ/m^3),此处取34;

η_1 ——天然气热水锅炉热效率,一般取0.92;

η_2 ——温室室外管道输送效率,一般取0.9。

$$L_{g2} = \frac{Q_L}{\eta_3 H_1} \quad (5)$$

式中: L_{g2} ——温室热风供暖时单位面积的全年耗气量(m^3 天然气/ m^2 温室·a);

η_3 ——天然气热风炉热效率,一般取0.95。

公式(4)和公式(5)中的热效率仅考虑热源侧设备热效率和管道输送热效率,并没有区别两种加热方式对作物生长效果的影响,计算结果如表2所示。

表2依据常见的温室瓜果类作物适宜的生长温度范围^[6](白天18~30℃,夜间11~23℃),分别计算了上海地区单层塑料薄膜温室在采用热水供暖和热风供暖情况下的全年累计耗气量。只要确定了温室种植作物的种类,从文献^[6]中查取其适宜的生长温度,然后依据表2就可查出上海地区该塑料薄膜温室在两种不同供暖方式下的全年累计耗气量。但考虑到温室在实际使用过程中会采取各种保温措施,如使用保温幕,覆盖双层膜等来减少散热损失,温室的实际能耗比上述结果偏小,结合上海地区加温温室能耗走访调研以及软件模拟仿真结果基本可以确定上海地区塑料温室在种植常见作物(白天20℃左右,夜间14℃左右)时

表2 单层塑料膜温室全年累计热负荷、耗气量

白天				夜间			
室内温度 t_i (℃)	全年累计 热负荷 Q_L (kWh/m^2)	年耗气量 L_{g1} ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{y}$)	年耗气量 L_{g2} ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{y}$)	室内温度 t_i (℃)	全年累计 热负荷 Q_L (kWh/m^2)	年耗气量 L_{g1} ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{y}$)	年耗气量 L_{g2} ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{y}$)
18	33.11	4.23	3.69	11	11.00	1.41	1.23
19	38.65	4.94	4.31	12	14.76	1.89	1.65
20	44.62	5.71	4.97	13	19.14	2.45	2.13
21	50.96	6.52	5.68	14	24.18	3.09	2.69
22	57.42	7.34	6.40	15	29.96	3.83	3.34
23	64.12	8.20	7.15	16	36.43	4.66	4.06
24	71.10	9.09	7.92	17	43.65	5.58	4.87
25	78.11	9.99	8.71	18	51.60	6.60	5.75
26	85.26	10.90	9.50	19	60.26	7.71	6.72
27	93.38	11.94	10.41	20	69.57	8.90	7.75
28	101.66	13.00	11.33	21	79.51	10.17	8.86
29	110.01	14.07	12.26	22	89.98	11.51	10.03
30	126.22	16.14	14.07	23	100.96	12.91	11.25

全年供暖耗气量为 $5\text{m}^3\sim 7\text{m}^3$ 天然气/ m^2 温室 $\cdot \text{a}$ 。

目前,上海地区加温温室约 466.94hm^2 ,若均采用天然气供暖,则年耗气量约为 $0.23\text{亿m}^3\sim 0.33\text{亿m}^3$ 。所以,在天然气气源充足的上海地区,燃气公司在拓展下游市场时,应格外重视天然气在温室中的应用市场。

5 结论

温室的能耗预测不仅是评价和优化温室结构与环境调控的重要指标,也是燃气公司拓展下游市场的重要依据。本文通过分析温室的热工过程得出影响温室能耗的主要因素包括温室的太阳辐射模型、贯流放热量、通风换气放热量、室内土壤的地中导热量、室外气象、室内温度和作物的蒸腾作用等。对于每一种影响因素,DeST里均有相应的模型求解,本文通过设置温室模型的主要参数,基本实现了准确计算上海地区塑料温室的全年累计耗气量。

不同地区、不同室内温度、不同供暖方式所对应的温室全年耗气量不同,本文通过能耗模拟计算,

给出了上海地区塑料薄膜温室种植常见瓜果类作物时的全年累计耗气量表,结合实际调研可知,上海地区在种植常见瓜果类(番茄、黄瓜等)作物时塑料薄膜温室的全年累计耗气量约为 $5\text{m}^3\sim 7\text{m}^3$ 天然气/ m^2 温室 $\cdot \text{a}$,天然气在温室中的应用市场潜力巨大。

参考文献

- 1 上海温室行业的现状与发展. “十二五”发展规划
- 2 吴飞青. 温室冬季热环境数值分析与实验研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2010
- 3 李宏益, 吴素萍等. 基于冬季能耗的连栋温室经济效益预测系统[J]. 农机化研究, 2010; 11: 232
- 4 刘雪美. 温室升温系统理论与设计[D]. 泰安: 山东农业大学, 2004
- 5 张天柱. 温室工程规划、设计与建设. 中国轻工业出版社, 2010
- 6 温室加热系统设计规范 JB/T 10297 - 2001

工程信息

宁夏将建成全球内陆最大天然气液化工厂

2016年8月26日,哈纳斯集团与吴忠市人民政府签署战略合作框架协议,拟在吴忠规划建设500万t液化天然气一体化基地,新建风力发电50万kW、太阳能光伏发电50万kW。以上项目总投资200亿元,实现产值300亿元。

哈纳斯宁夏500万t液化天然气一体化基地是宁夏自治区“十三五”规划重大项目,是推进全国首个新能源综合示范区建设、将宁夏打造成为全国大型综合能源加工转化基地的重要举措。项目规划总投资150亿元,主要建设500万t液化天然气工厂,上游配套建设天然气输气管线,引进鄂尔多斯盆地气田气,供应500万t液化天然气工厂原

料,并实现宁夏民生双气源保障;下游实施全区“美丽乡村”煤改气计划,新建50座气化站和入户管网,年供气规模超过6亿 m^3 。

项目还在宁夏建设LNG加气站80座,为1万多辆LNG汽车提供服务,并通过哈纳斯液化天然气销售团队在周边省区扩大交通领域燃油替代规模。基地全部建成后,将形成服务1 000km范围内LNG汽车、民用的大型清洁能源基地,使宁夏天然气消费总量翻番,相当于建成一座800万t炼油厂,有效促进区域节能减排,提高天然气消费比重,改善大气环境质量,助力“美丽宁夏”建设。

(本刊通讯员供稿)