

缀铝箔聚苯板空心墙体保温性能理论研究

白义奎¹, 王铁良¹, 李天来², 刘文合¹

(1. 沈阳农业大学水利学院, 沈阳 110161; 2. 沈阳农业大学园艺学院, 沈阳 110161)

摘要: 缀铝箔聚苯板空心墙体是一种新型的保温墙体, 其采用的铝箔绝热与容积绝热相比具有较好的保温绝热性能。当空气夹层在 20~100mm 时, 空气夹层内表面温度在 10~30℃, 空气夹层两侧温差在 2~10℃ 时, 空气夹层的平均热绝缘系数在 0.6~0.7 m²·W 之间, 相当于 490mm 砖墙 (热绝缘系数 0.605 m²·W)。厚度为 610mm 的缀铝箔聚苯板空心墙体与相同厚度的砖墙相比, 传热系数由 1.098 W/(m²·℃) 降到 0.218 W/(m²·℃), 降低了约 80%; 缀铝箔聚苯板空心墙体与相同厚度的夹心墙相比, 传热系数降低了约 13%。铝箔绝热与容积绝热比较, 还具有质量小; 隔汽防潮性能好; 造价低, 施工方便等优点。

关键词: 日光温室; 铝箔绝热; 热绝缘系数; 建筑节能; 空心墙体

中图分类号: S625.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2003)03-0190-06

1 引言

光照是节能日光温室获取能量的最主要来源, 保温设计是保证日光温室在冬季正常生产的关键环节。提高温室的保温性能, 降低能耗, 是提高温室生产效益的最直接手段。节能日光温室主要由围护墙体、后屋面和前屋面三部分组成, 前屋面是温室的全部采光面, 一般情况下, 应尽量加大前屋面采光面面积和采取合理的采光角度, 以期获得最大的太阳辐射; 在夜间一般采用保温被覆盖, 或在内部设置二道幕加强温室的保温^[1]。受日光温室采光面的限制, 前屋面改变的空间很小, 因而在日光温室保温设计上, 在加强温室前屋面的保温设计的基础上, 加强和改进围护墙体的保温性能至关重要。同时, 围护结构又是一个大的蓄热体, 白天吸收大量太阳能, 夜间释放出热量, 在温室中起着积极作用。对几种常用单一材料墙体及复合墙体的保温性能进行分析, 结果表明, 多层异质复合墙体具有热阻大、蓄热、隔热、保温性能好的优点^[2,3], 在实际生产中得到了广泛的应用, 但作为容积绝热存在自重大、造价高、受周围环境尤其是湿度的影响较大等缺点。本文在对铝箔绝热热工性能分析的基础上, 提出了一种缀铝箔聚苯板空心墙体的设计^[4-6], 理论分析结果表明, 缀铝箔聚苯板空心墙体具有较好的保温隔热性能。

2 缀铝箔聚苯板空心墙体保温隔热性能

缀铝箔聚苯板空心墙体做法如图 1 所示。

缀铝箔聚苯板空心墙体的传热系数 K 见下式:

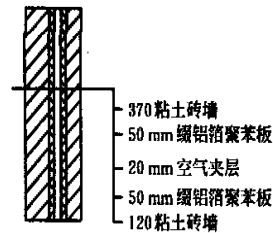


图 1 缀铝箔聚苯板空心墙体做法

Fig. 1 Construction of the hollow wall with polyphony board covered aluminum foil

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{\delta_i}{\lambda} + \frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\alpha_o}} \quad (1)$$

式中 α_i ——围护结构内表面换热系数, W/(m²·℃), $\alpha_i = 8.7$ W/(m²·℃); α_o ——围护结构外表面换热系数, W/(m²·℃), $\alpha_o = 23.3$ W/(m²·℃); α ——缀铝箔聚苯板空心墙体空气夹层的总传热系数^[7], W/(m²·℃); δ_i ——围护结构各层材料的厚度, m; λ ——围护结构各层材料的导热系数, W/(m·℃)。

2.1 空气夹层的辐射传热

热辐射的大小主要与物体表面的温度及性质和状况有关。

降低物体表面的发射率, 是减小辐射传热的一种重要方法。辐射传热近似的随发射率的降低成比例的减小。一般而言, 高电导率的纯金属发射率低, 良导体也是好的反射体。而且发射率的大小与表面的状况密切相关。

两物体之间的辐射传热通量与物体的吸收和发射的能力有关, 在室温条件下, 非金属的发射率变化不大, 不论其表面的颜色和粗糙度变化多大, 其发射率基本都介于 0.85~0.99 之间。纯金属的特性是发射率低, 反射率高。以常见的材料为例, 红砖的平均发射率为 0.93, 铝箔的平均发射率为 0.09。在实际计算中, 一般采用灰体假设, 则两物体之间的辐射传热通量为

$$Q_{1-2} = \sigma F (T_2^4 - T_1^4) \quad (2)$$

式中 σ ——Stefan-Boltzmann 常数, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$

收稿日期: 2002-10-10 修订日期: 2003-04-14

基金项目: “十五”国家科技攻关计划“工厂化农业关键技术与示范”项目: 日光温室节能关键技术与产业化(2001BA503B); 辽宁省“十五”科技攻关项目: 工厂化高效农业关键技术与示范(2001215001)

作者简介: 白义奎(1968-), 男, 蒙古族, 副教授, 从事农业建筑与环境工程研究。沈阳 沈阳农业大学水利学院, 110161。Email: baiyiku@21cn.com

($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$); A_1 ——辐射体的表面积, m^2 ; T_2 , T_1 ——辐射体的表面温度, K; $F = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right)}$,

其中 ϵ_1 和 ϵ_2 分别是上述两物体的发射率, 若上述两物体的发射率相同, 即 $\epsilon = \epsilon_1 = \epsilon_2$; 两壁平行, 即 $A_1 = A_2$, 则计算公式可简化为 $F = \frac{1}{(2/\epsilon) - 1}$

利用温度浮动的中间屏可以减小辐射传热。如果在两物体之间插入几个中间屏, 则当各屏的发射率与两物体的相同时, 可以认为两物体之间的辐射传热大约减少到未加屏前的 $1/(n+1)^{[7]}$ 。

2.2 空气夹层的对流传热

封闭空间内流体的自然对流传热受到周围边界的影响, 情况比大空间自然对流更为复杂。对于竖直夹层, 当 $GrPr^{[8]}$ 低于 10^3 时流体基本是静止的, 传热主要依靠流体的热传导; 当 $GrPr$ 超过 10^3 时, 逐渐出现层流对流, 传热量增大; 当 $GrPr$ 超过 10^7 时, 出现湍流自然对流。为计算方便, 引入当量导热系数, 用傅立叶热传导公式的形式计算自然对流

$$Q = F \lambda \frac{t_1 - t_2}{\delta} \quad (3)$$

式中 Q ——通过夹层的热流量, W; F ——夹层横截面积, m^2 ; λ ——当量导热系数, $W/(m \cdot ^\circ C)$; t_1, t_2 ——夹层两侧面的温度, $^\circ C$; δ ——夹层厚度, m。

竖直平壁夹层当量导热系数与流体静止导热系数之比的计算公式如下

$GrPr < 2000$, 恒定壁温

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} = 1 \quad (4)$$

$6 \times 10^3 \sim 2 \times 10^5$, 恒定壁温

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} = 0.197 (GrPr)^{1/4} \left(\frac{\delta}{h}\right)^{1/9} \quad (5)$$

$2 \times 10^5 \sim 1.1 \times 10^7$, 恒定壁温

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} = 0.073 (GrPr)^{1/3} \left(\frac{\delta}{h}\right)^{1/9} \quad (6)$$

式中 Gr ——Grashof Number 数, $Gr = \frac{l^3 g \beta \Delta t}{\nu^2}$,

其中 g 为重力加速度, $m \cdot s^{-2}$; β 为流体的体胀系数, K^{-1} , $\beta = \frac{1}{\nu} \left(\frac{\partial \nu}{\partial T}\right)$, 若为理想气体, $P = \rho R T$, 故 $\beta = \frac{1}{T}$; ν 为流体的运动粘度, m^2/s , 见表 1; Δt 为壁面温度与流体温度之差, K; l 为特征长度, m; Pr ——Prandtl Number 数, 见表 1, $Pr = \frac{\eta c_p}{\lambda} = \frac{\nu}{a}$, 其中 c_p 为流体定压比热; a 为对流传热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; λ 为流体的导热系数, $W/(m \cdot ^\circ C)$; η 为流体的动力粘度, $Pa \cdot s$; δ ——空气夹层厚度, m; λ ——夹层中流体的导热系数, $W/(m \cdot ^\circ C)$ 。

气体的导热系数可以根据 Vargaftik 分析

$$\lambda = \lambda_0 \left(\frac{T}{T_0}\right)^n \quad (7)$$

式中 T ——气体的温度, K, $T_0 = 273.15K$; λ_0 —— $T_0 = 273.15K$ 时的导热系数, 对于空气 $\lambda_0 = 244.2 \times 10^{-4} W/(m \cdot ^\circ C)$; n ——常数, 对于空气 $n = 0.82$ 。

表 1 标准大气压下, 空气的性质

温度 $T/^\circ C$	流体的运动粘度 $\nu/m^2 \cdot s^{-1}$	Pr
-23	0.949×10^{-5}	0.722
27	1.568×10^{-5}	0.708
77	2.079×10^{-5}	0.697

注: 1 atm 为 1 标准大气压, 1 atm = $1.01 \times 10^5 Pa$

3 缀铝箔聚苯板空心墙体空气夹层的总传热系数

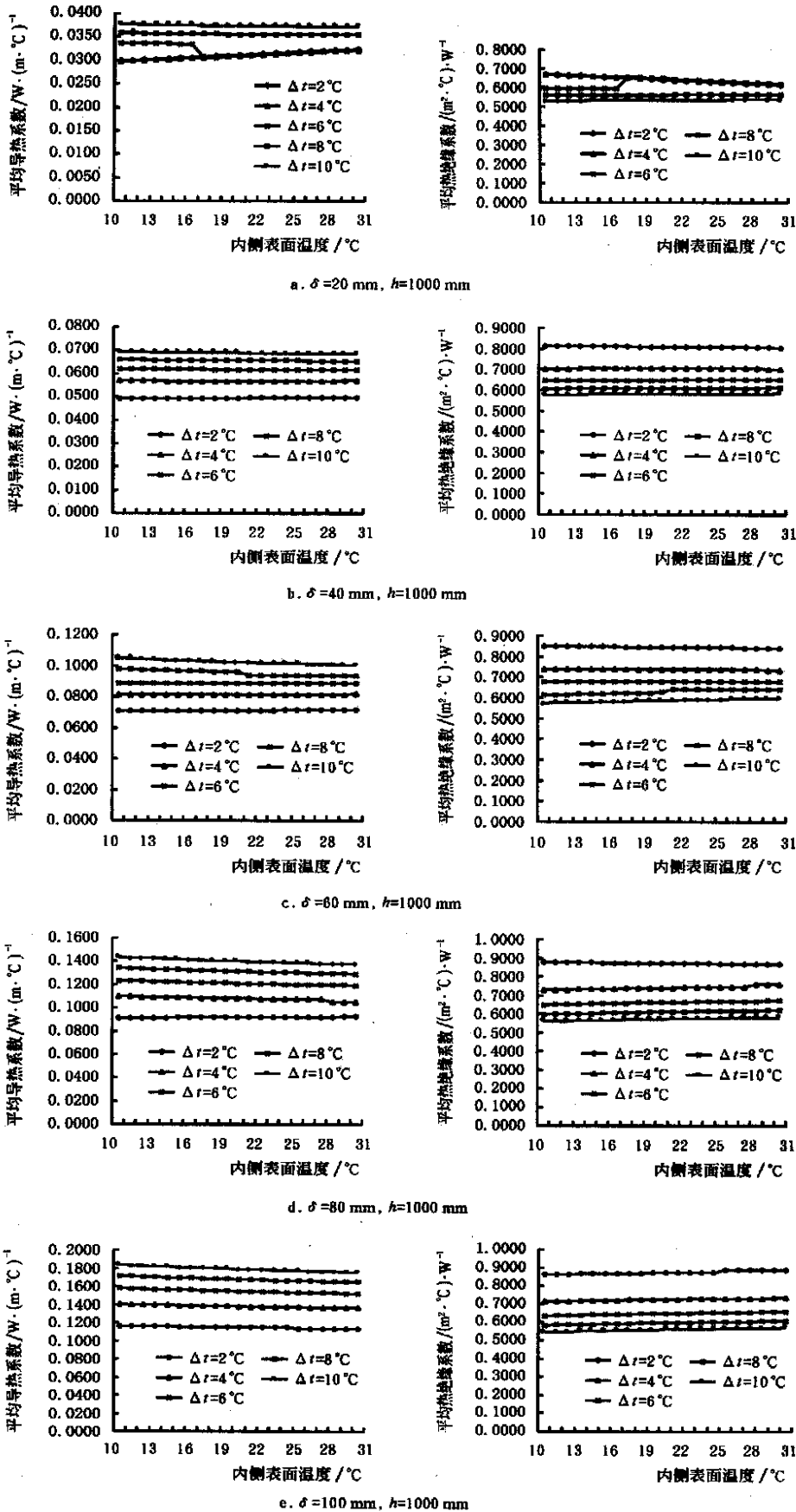
对于空气夹层的传热系数的计算是十分复杂的, 在此给出几种在不同的温度、温差及不同的空气夹层厚度情况下的计算结果, 见图 2。

当缀铝箔聚苯板空心墙体空气夹层分别为 10~100 mm 时, 空气夹层内表面温度在 $10 \sim 30^\circ C$, 空气夹层两侧温差在 $2 \sim 10^\circ C$ 时, 空气夹层的平均导热系数及热绝缘系数见表 2。

表 2 不同条件下空气夹层的平均传热系数及热绝缘系数

Table 2 Average heat transfer coefficient and heat insulating coefficient of air interlayer under different conditions

空气夹层厚度 /mm	平均导热系数 $W/(m \cdot ^\circ C)^{-1}$	平均热绝缘系数 $/(m^2 \cdot ^\circ C) \cdot W^{-1}$	空气夹层厚度 /mm	平均导热系数 $W/(m \cdot ^\circ C)^{-1}$	平均热绝缘系数 $/(m^2 \cdot ^\circ C) \cdot W^{-1}$
10	0.0283	0.3539	60	0.0877	0.6953
20	0.0334	0.6019	70	0.1028	0.6947
30	0.0465	0.6576	80	0.1185	0.6905
40	0.0605	0.6704	90	0.1344	0.6868
50	0.0737	0.6876	100	0.1508	0.6801



Δt ——空气夹层内侧、外侧表面的温差。

图2 空气夹层的平均导热系数及热绝缘系数

Fig 2 Heat transfer coefficient and heat insulating coefficient of air interlayer

由上表分析可知,当空气夹层在 20~ 100 mm 时,空气夹层的平均热绝缘系数基本在 0.6~ 0.7 之间变化,空气夹层厚度变化对其影响不明显。在此取空气夹层厚度为 20 mm (见图 1), 传热系数 $K =$

$$\frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_e}} = 0.218 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{°C})$$

若不设空气夹层, 则其传热系数 $K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_e}} = 0.251 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{°C})$ 。

4 影响缀铝箔聚苯板空心墙保温隔热性能的因素

4.1 不同的空气夹层厚度对传热系数及热绝缘系数的影响

内表面温度相同, 均为 15 °C, $\Delta t = 5$ °C、 $\Delta t = 10$ °C 时, 在空气夹层高度 $h = 1.0 \text{ m}$ 时不同的空气夹层厚度情况下传热系数及热绝缘系数的计算结果见图 3。

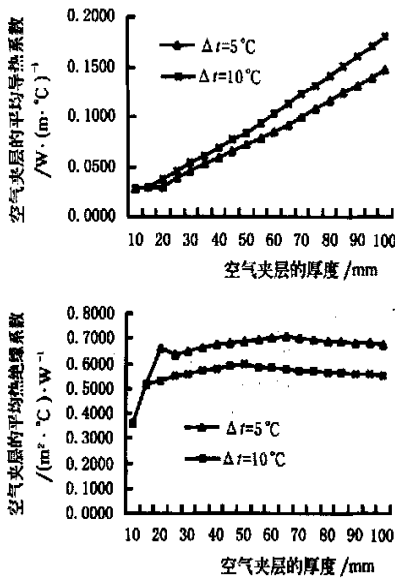


图 3 空气夹层高度 $h = 1.0 \text{ m}$ 时不同的空气夹层厚度情况下传热系数及热绝缘系数

Fig 3 Heat transfer coefficient and heat insulating coefficient under different thickness of air interlayer h (height of air interlayer) = 1.0 m

计算结果表明,空气夹层厚度越大,传热系数也越大;热绝缘系数存在一个最大值,上述条件下,当空气夹层厚度为 70mm 左右时,热绝缘系数最大,这也为空心墙体空气夹层厚度的选择提供了理论依据。另外,从图中还可以看出,温差越大,其传热系数也越大,热绝缘系数越小。

4.2 不同的空气夹层高度对传热系数及热绝缘系数的影响

内表面温度相同, 均为 15 °C, $h = 0.5 \text{ m}$ 、 $h = 1.0 \text{ m}$ 时, $\Delta t = 5$ °C 时不同的空气夹层厚度情况下传热系数及热绝缘系数的计算结果见图 4。

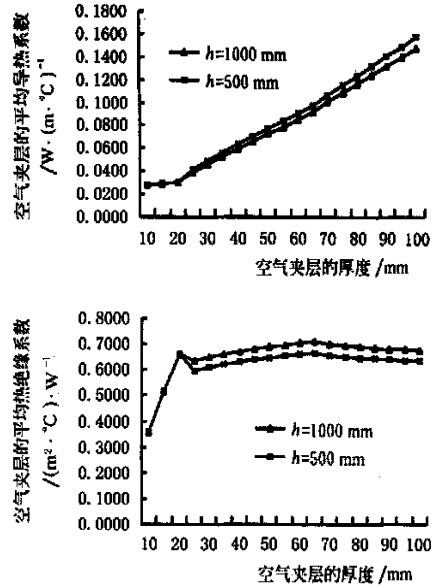


图 4 $\Delta t = 5$ °C 时, 在空气夹层高度 $h = 0.5 \text{ m}$ 、 $h = 1.0 \text{ m}$ 时不同的空气夹层厚度情况下传热系数及热绝缘系数

计算结果表明,空气夹层高度越大,传热系数也越小,热绝缘系数越大。

4.3 在空气夹层中间加入辐射屏对传热系数及热绝缘系数的影响

在空气夹层中间加入一道辐射屏,内表面温度相同,均为 15 °C, $\Delta t = 10$ °C 时(设加入的辐射屏不产生温度变化,且两个空气夹层的温差均为 $\Delta t = 5$ °C),在空气夹层高度 $h = 1.0 \text{ m}$ 时不同的空气夹层厚度(假设辐射屏的厚度忽略不计)情况下传热系数及热绝缘系数的计算结果见图 5。

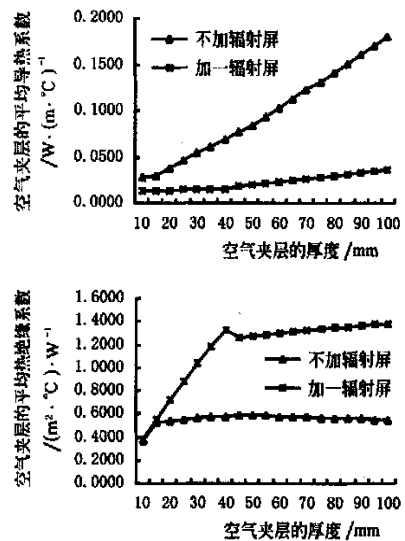


图 5 $\Delta t = 10$ °C 时, 在空气夹层高度 $h = 1.0 \text{ m}$ 时不同的空气夹层厚度情况下传热系数及热绝缘系数

Fig 5 Heat transfer coefficient and heat insulating coefficient under different thickness of air interlayer $\Delta t = 10$ °C, h (high of air interlayer) = 1.0 m

在空气夹层中间加入一道辐射屏,减小了空气夹层的厚度。

4.4 采用缀铝箔聚苯板和直接采用空气夹层时传热系数及热绝缘系数的影响

采用缀铝箔聚苯板和直接采用空气夹层(假设厚度相同)时,当内表面温度相同,均为 15°C , $\Delta t = 5^{\circ}\text{C}$ 时,在空气夹层高度 $h = 1.0\text{m}$ 时不同的空气夹层厚度情况下传热系数及热绝缘系数的计算结果见图6。

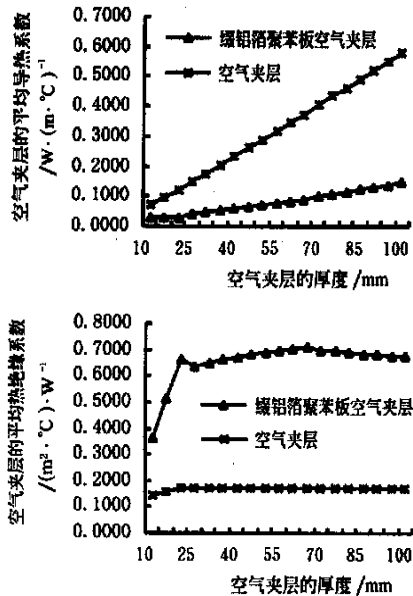


图6 $\Delta t = 5^{\circ}\text{C}$ 时,在空气夹层高度 $h = 1.0\text{m}$ 时不同的空气夹层厚度情况下传热系数及热绝缘系数
Fig. 6 Heat transfer coefficient and heat insulating coefficient under different thickness of air interlayer
 $\Delta t = 5^{\circ}\text{C}$, h (high of air interlayer) = 1.0m

降低物体表面的发射率,是减小辐射传热的一种重要方法。辐射传热近似的随发射率的降低成比例的减小。在空气夹层采用铝箔绝热效果十分明显。

5 结论

缀铝箔聚苯板空心墙体具有较好的保温绝热性能,当空气夹层在 $20\sim 100\text{mm}$ 时,空气夹层内表面温度在 $10\sim 30^{\circ}\text{C}$,空气夹层两侧温差在 $2\sim 10^{\circ}\text{C}$ 时,空气夹层的平均热绝缘系数在 $0.6\sim 0.7(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{W}$ 之间,相当于 490mm 砖墙(热绝缘系数 $0.605(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{W}$)。

如图1缀铝箔聚苯板空心墙体与相同厚度的砖墙相比,其传热系数由 $1.098\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 降到 $0.218\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$,降低了约80%;缀铝箔聚苯板空心墙体与相同厚度的夹心墙相比,传热系数降低了约13%。若在缀铝箔聚苯板空心墙体的空气夹层内增加一道辐射屏,则空气夹层的平均热绝缘系数增加一倍,约在 $1.3\sim 1.4(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{W}$ 之间,墙体的总传热系数为 $0.193\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$,与相同厚度的砖墙相比,其传热系数降低了约82.4%;与相同厚度的夹心墙相比,传热系数降低了约23%。

铝箔绝热与容积绝热比较,除具有上述绝热性能好,特别是隔绝辐射热的效果十分显著的特点外,还具有质量小,有利于结构的设计和施工,以上例若取得 $0.605(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{W}$ 的设计热绝缘系数,铝箔结构的质量仅为砖墙结构质量的万分之一、泡沫塑料结构质量的8%;隔汽防潮性能好,铝箔能有效的阻止水或汽通过,日光温室是一个高湿的环境,而对于一般的墙体材料及保温材料,其保温绝热性能受湿度的影响较大,铝箔绝热几乎不会受到湿度的影响;造价低,铝箔绝热成本比容积绝热低得多,仍以上例若取得 $0.605(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{W}$ 的设计热绝缘系数,铝箔结构的材料费仅为砖墙结构材料费的29%;铝箔绝热材料可制成各种预制件,施工方便等优点。

[参考文献]

- [1] 周长吉,程勤群. 缀铝箔保温幕保温性能测试分析[J]. 农业工程学报, 1999, 15(3): 191~195.
- [2] 白义奎,王铁良,姜传军,等. 外墙聚苯板复合墙体在日光温室中的应用[J]. 房材与应用, 2002, 1, 24~27.
- [3] 白义奎,王铁良,刘文合,等. 东北型节能日光温室——辽沈I型日光温室节能设计试验研究[J]. 节能技术, 2002, 1, 23~26.
- [4] 叶燕华,孙伟民,何嘉鹏,等. 混凝土空心砌块墙体热绝缘系数理论分析[J]. 新型建筑材料, 2002, 5, 27~29.
- [5] 金伟良,叶甲淳,严家焱,等. 新型墙体材料节能建筑热工性能测试与分析[J]. 新型建筑材料, 2002, 2, 16~18.
- [6] 郑其俊. 绝热材料的发展与应用[J]. 新型建筑材料, 2002, 6, 44~47.
- [7] 陆煜,程林. 传热原理与分析[M]. 北京: 科学出版社, 1997, 10, 312~340.
- [8] 马庆芳,周其成,丁中柱,等. 节能技术的热工理论基础[M]. 北京: 宇航出版社, 1989, 8, 118~157.

Theoretical research on heat preservation effect of hollow wall with polyphony board covered with aluminum foil

Bai Yikui¹, Wang Tieliang¹, Li Tianlai², Liu Wenhe¹

(1. College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China;

(2. College of Horticulture, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China)

Abstract: The polyphony board covered with aluminum foil of hollow wall is a new type of wall which heat insulation of aluminum foil has better heat preservation effect than cubage heat insulation. And inside temperature of air interlayer is in 10~30 °C when the thickness of air interlayer is in 20~100 mm. Calculation have indicated that average heat-insulating coefficient of air interlayer was in 0.6~0.7 (m²·°C)/W and equal to 490 mm brick wall (0.605 (m²·°C)/W) when difference temperature of air interlayer was in 2~10 °C. Compared with the same thickness brick wall, material cost of the hollow wall with polyphony board covered with aluminum foil (610 mm) has increased by 5%. Its heat transfer-coefficient has decreased to 0.218 W/(m²·°C) from 1.098 W/(m²·°C). Compared with the same thickness air interlayer wall, the heat transfer-coefficient has decreased by 13%. Heat insulation of aluminum foil has more advantage than cubage heat insulation, such as light mass, good effect of moisture-proofing and vapor-isolating, low price, convenience of construction.

Key words: solar greenhouse; heat insulation of aluminum foil; heat insulating coefficient; energy-saving of building; hollow wall