

文章编号: 1671-6612 (2023) 03-393-05

# 热风地板蓄放热特性数值模拟研究

叶林柯 雷波 余涛

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

**【摘要】** 针对川西高原地区某学生宿舍太阳能热风地板供暖系统, 采用 CFD 数值模拟方法建立了热风地板的计算模型, 计算了在不同风量和风道面积比下的地板蓄和放热量。结果表明, 蓄热量与有效放热量随风道面积比的增大先增大后减小, 随风量的增大而增大; 蓄热系数和有效放热系数均随风道面积比和风量的增大而减少, 蓄热系数变化范围为 0.52~0.59, 有效放热系数变化范围为 0.26~0.31, 有效放热量大约为蓄热量的 51%。

**【关键词】** 太阳能; 热风地板; 蓄放热特性; 数值模拟

中图分类号 TU832 文献标识码 A

## Numerical Study on Heat Storage and Release Characteristics of Warm Air Ventilated Floor

Ye Linke Lei Bo Yu Tao

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

**【Abstract】** In this paper, aiming at the solar hot air floor heating system of a student dormitory in western Sichuan Plateau area, CFD numerical simulation method was used to establish the calculation model of hot-air floor, and the heat storage and heat release of floor under different air volume and air duct area ratio were calculated. The results show that the heat storage and effective heat discharge first increase and then decrease with the increase of air duct area ratio, and then increase with the increase of air volume. Both the heat storage coefficient and the effective heat release coefficient decrease with the increase of the air duct area ratio and air volume. The heat storage coefficient varies from 0.52 to 0.59, and the effective heat release coefficient varies from 0.26 to 0.31. The effective heat release coefficient is about 51% of the heat storage.

**【Keywords】** solar energy; warm air ventilated floor; heat storage and release characteristics; numerical simulation

## 0 引言

阿坝州若尔盖地区地处川西高原, 属高原寒带气候, 常年无夏, 全年平均气温大都在 10℃ 以下, 冬季极端温度低至 -30℃。同时冬季受冷高压影响, 日照丰富以晴天为主。所以能否因地制宜充分利用太阳能, 解决当地的供暖问题, 是极具研究价值的课题<sup>[1]</sup>。

目前, 太阳能供暖主要以水为介质, 该系统应用于高海拔高寒地区时, 存在运维成本高, 管线冻

裂的问题。而以空气为介质的供暖系统在该地区具有更好的适用性。有学者开展了太阳能热风与围护结构结合的研究。刘伯万<sup>[2]</sup>、赵江东<sup>[3]</sup>、周吉日<sup>[4]</sup>等提出将太阳能空气集热器与空心通风内墙结合的供暖方式, 并研究了该系统的热过程和蓄放热特性。刘希臣等<sup>[5]</sup>等提出太阳能热风地板蓄热系统与阶跃传热南向外窗结合的被动式供暖技术。Ekrami 等<sup>[6]</sup>等计算了空心通风地板在不同风速下的出口温度以及每种风速下的能量损失率。王闯等<sup>[7]</sup>证明

基金项目: 四川省自然科学基金青年科学基金项目 (2022NSFSC1944)

作者简介: 叶林柯 (1998.03-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: yconlin@163.com

通讯作者: 余涛 (1987.08-), 男, 博士, 副教授, E-mail: yutao073@swjtu.edu.cn

收稿日期: 2023-02-19

了混凝土地板蓄热作用能有效抑制室温波动。

目前对于热风地板供暖系统的研究较少，主要集中在工程应用和适应性分析方面<sup>[8,9]</sup>，缺乏对系统蓄放热特性及设计参数等方面的深入研究。

本文针对四川阿坝州某小学宿舍太阳能热风地板供暖系统，采用 CFD 数值计算方法，研究埋管数和风量对地板蓄放热特性的影响。

### 1 建筑概况与热过程分析

#### 1.1 建筑概况

本文以位于四川省阿坝州某小学宿舍的太阳能热风地板为研究对象，建筑主体高度 12m，共三层，每层南向布置九间宿舍，每间宿舍宽 3.3m，进深 6.0m。太阳能热风地板供暖系统构成如图 1<sup>[5]</sup>所示。

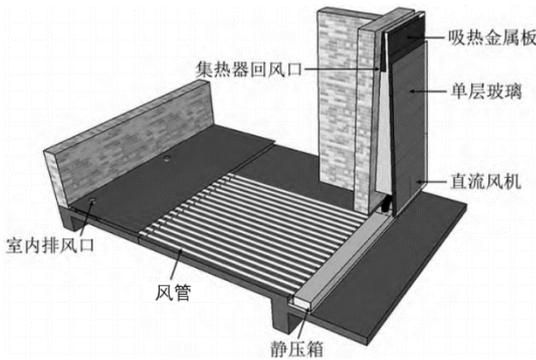


图 1 热风地板供暖系统构成<sup>[5]</sup>

Fig.1 Composition of warm air ventilated floor heating system

集热器吸收太阳能辐射用于加热循环空气，加热后的空气被风机驱动送入风管与地板换热，随后通过室内排风口进入房间加热室内空气，室内空气则由回风口回到集热器，至此完成循环。

宿舍房间楼板厚度为 180mm，每间宿舍楼板上方铺设 17 根地埋管，用 70mm 混凝土将其完全封闭，热风系统设计风量为 150m<sup>3</sup>/h，管内风速 2m/s。热风地板的材料物性、尺寸如表 1 所示。

表 1 热风地板材料物性参数

Table 1 Thermal properties of warm air floor materials

材料	尺寸 (mm)	导热系数 [W/(m·K)]	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	比热容 [J/(kg·°C)]
混凝土	70	0.93	1800	1050
风管	DN=40/50	0.14	1350	1100
楼板	180	0.22	700	1050

#### 1.2 地板传热过程分析

热风地板的传热过程如图 2 所示，主要分为地板内换热和室内换热两部分<sup>[10]</sup>，具体包括：热风与埋管的对流换热 (①)；管与地板间的导热 (②、③、④)，热量在传递至混凝土和楼板时，因为建筑材料的热惰性，不会立即释放至室内，有相当一部分被地板蓄存至夜间缓慢释放；地板加热后，表面与室内环境的辐射换热和对流换热 (⑤、⑥)。

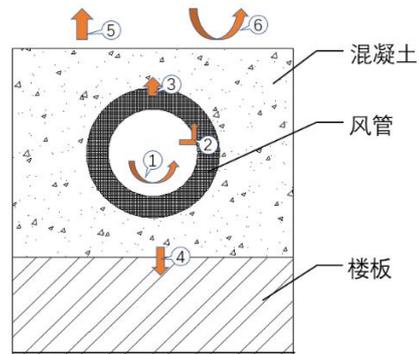


图 2 热风地板传热过程示意图

Fig.2 Heat transfer process diagram of warm air floor

#### 1.3 蓄放热性能评价参数

热风地板在动态运行工况下，蓄放热量关系如图 3 所示。

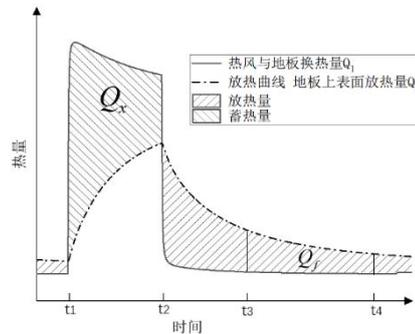


图 3 蓄放热量关系示意图

Fig.3 Schematic diagram of heat storage relationship

图 3 中， $Q_1$  为热风与地板的逐时换热量曲线， $Q_2$  为地板上表面的逐时放热量曲线， $t_1$  至  $t_2$  为地板加热段，蓄热量  $Q_x$  是该时间段热风与地板的换热量和地板向室内放热量的差值，即加热阶段真正储存到地板内的净得热量；而  $t_3$  至  $t_4$  则是人员在室使用时间，故定义该段时间的地板放热量为有效放热量  $Q_f$ 。为更直观评价热风地板蓄放热特性，本文引入蓄热系数、有效放热系数。

(1) 蓄热系数  $\epsilon_x$

将地板蓄热量  $Q_x$  与热风对地板换热量  $Q_{in}$  的比值定义为蓄热系数  $\varepsilon_x$ , 见式 (1)。 $\varepsilon_x$  值越大, 地板的蓄热能力越强。

$$\varepsilon_x = \frac{Q_x}{Q_{in}} \quad (1)$$

(2) 有效放热系数  $\varepsilon_f$

将有效放热量  $Q_f$  与热风对地板换热量  $Q_{in}$  的比值定义为有效放热系数, 见式 (2)。 $\varepsilon_f$  越大, 表明热风对地板加热量相同的条件下地板的有效放热量越大, 越有助于提高室内温度。

$$\varepsilon_f = \frac{Q_f}{Q_{in}} \quad (2)$$

## 2 数值计算模型和计算方法

### 2.1 边界条件与求解方法

根据当地气象条件, 加热时段设置为 11:00-17:00, 地板加热时长 6h, 其余时间风道停止送风, 由地板散热进行供暖。所在学校学生使用宿舍时间为晚 20:00 至次日早晨 7:00, 因此取该时间段地板放热量为有效放热量。

本文对热风地板蓄放热特性研究基于 Fluent 软件进行, 湍流模型选用 Realizable  $k-\varepsilon$  两方程模型, 采用压力-速度耦合的 SIMPLE 算法进行求解, 并使用二阶迎风差分对方程进行离散以提高精度。热风入口定义为速度入口, 本文主要研究地板本身的蓄放热过程, 为简化模型, 入口温度设为集热器运行平均出口温度  $50^\circ\text{C}$ , 室内环境温度取  $16^\circ\text{C}$ , 出口定义为压力出口, 模型下表面及两侧壁面均设置为绝热边界, 地板上表面采用第三类边界条件, 综合对流换热系数取  $8.5\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。

### 2.2 模型设置及网格划分

为简化模型, 方便后续 CFD 模拟计算。对热风地板传热模型做以下假设:

地板中各层材料均为各向同性, 且材料物性参数不随温度变化; 地板下表面保温层视为绝热; 各管中热风均匀分配, 进风风速与温度均相同。

在上述假设基础上可以推断, 加热地板时, 各埋管附近温度场分布应是相同且呈对称分布。因此, 不用计算整个地板的传热过程, 可以将热风地板模型按埋管数量等分, 将等分出的部分称单元体, 单元体的左右两侧边界视作绝热边界, 只需计

算单个单元体的传热过程即可, 用于数值计算的单元体模型如图 4 所示。

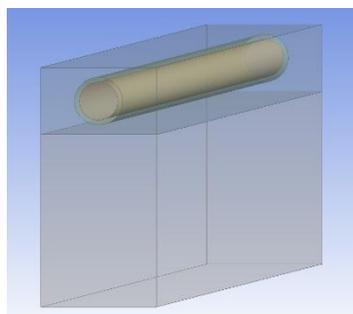


图 4 单元体示意图

Fig.4 Model of one unit

在房间地板面积不变时, 随埋管数量的增加, 单元体的宽度会变小。此时埋管占单元体的比例会增加, 意味着地板热阻降低, 将有更好的换热效率, 但同时地板的热容量也会减小; 而当埋管占比较小时, 地板换热效率会下降, 但也会使地板蓄热能力提高。换热能力和蓄热能力均是影响地板供暖性能的重要因素, 两者却相互制约此消彼长。为研究埋管占比对地板蓄放热特性的影响, 定义风道面积比  $k$ , 如式 (4) 所示:

$$k = \frac{A_1}{A_2} \times 100\% \quad (4)$$

式中:  $A_1$  表示埋管与风道截面面积,  $\text{m}^2$ ;  $A_2$  表示单元体混凝土填充层总截面面积,  $\text{m}^2$ 。

针对模型在  $z$  方向和换热边界层采用不同的网格密度设置来生成网格, 生成网格数量递增的 4 组计算模型用于网格无关性验证, 在相同边界条件下, 利用 Fluent 计算各模型迭代至稳态过程中地板热流密度变化如图 5 所示。

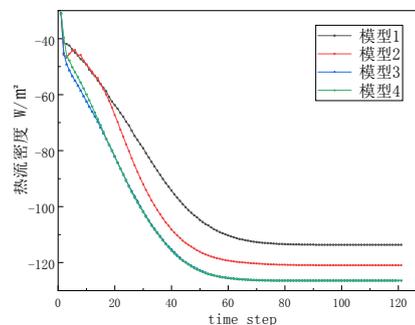


图 5 不同网格模型热流密度变化

Fig.5 Variation of heat flux in different mesh models

由图 5 可知, 1、2 号模型结果存在偏差, 而 3、4 号模型热流密度基本一致, 故在满足计算精度的

前提下, 本文选用模型 3 的网格绘制策略。

本模型选择采用 ICEM 进行网格划分, 各模型对应管数、风道面积比、管间距与网格数量如表 2 所示。

表 2 各模型尺寸参数及网格数量

Table 2 Each model size parameter and mesh number

管数	风道面积比 (%)	管间距 (mm)	网格数量 $1 \times 10^5$
10	13.8	204	10.43
17	23.4	120	7.62
20	27.5	102	7.38
25	34.2	82	6.99
30	41.2	68	6.32

### 3 数值计算结果与分析

本文将分别在  $75\text{m}^3/\text{h}$ 、 $150\text{m}^3/\text{h}$  和  $225\text{m}^3/\text{h}$  三组不同总风量下改变地板风道面积比, 计算各工况的蓄热量、放热量、 $\epsilon_x$ 、 $\epsilon_f$  等参数, 对地板蓄放热特性进行分析。

#### 3.1 地板蓄放热量变化分析

地板在不同风量下逐时蓄放热量变化如图 6 所示。由图 6 可知, 加热开始后地板换热量很快达到最大值, 此时地板蓄热效率达到最大, 随着加热继续, 地板整体温度升高, 向室内放热增加, 同时与热风的温差减小, 热风与地板换热量下降, 因此地板蓄热量快速下降。加热停止后, 地板失去热量来源, 此时地板向室内的换热完全由蓄热量提供, 随着地板温度的下降, 放热过程逐渐减缓。在不同风量下地板蓄放热量变化的基本规律一致, 但也可以看到随风量的增大, 蓄放热量也有所提高。

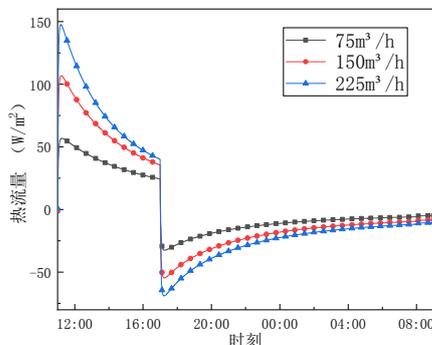


图 6 地板蓄放热量变化

Fig.6 Heat storage and release of the floor

#### 3.2 蓄热性能分析

在不同风量下改变风道面积比, 所得到的蓄热量与蓄热系数结果如图 7 和图 8 所示。

由图 7 可观察到, 在相同风量下, 地板蓄热量  $Q_x$  随风道面积比增大呈现先增大后减小的趋势。这是因为在曲线前半段, 热阻降低的影响更为明显, 此时蓄热量呈上升趋势; 而当风道面积比继续增大, 热容量下降的影响逐渐占据主要地位, 于是地板蓄热量达到最高点后开始降低。当风道面积比相同时, 风量越大, 地板蓄热量越多; 同时风量越大, 蓄热量随风道面积比的增大, 波动也越明显。因为随风量的提升, 热风与地板间的对流换热热阻降低, 因此相同时间进入地板的热量越多。蓄热量越大, 表明有越多的热量可用于改善夜间室内热环境, 由图 7 判断, 风道面积比在 26%至 30%拥有较好的蓄热能力。

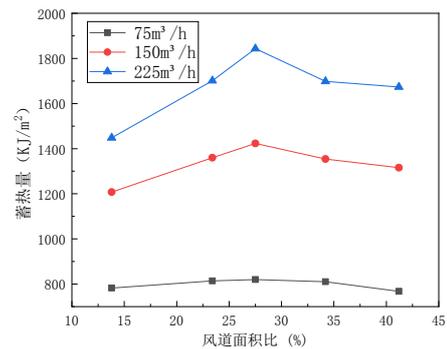


图 7 不同风道面积比下的蓄热量

Fig.7 Heat storage under different Air duct area ratio

由图 8 可知, 在相同风量时, 蓄热系数曲线呈线性变化, 证明地板换热量与蓄热量随风道面积比的改变, 变化趋势接近。而蓄热系数随风道面积比的增大而减小, 这是因为当风道面积比不断增大, 地板与管间热阻逐渐降低, 有助于提升换热量; 而风道面积比上升的同时地板热容量下降, 更多热量在加热阶段通过地板表面释放到室内, 蓄热量相对减少, 因此蓄热系数随风道面积比的增大而降低。风道面积比不变时, 蓄热系数随风量的增大而减小, 这是因为风量增大时地板换热更剧烈, 而地板本身热容量不变, 因此将有更多热量在加热阶段被释放至室内。蓄热系数随风道面积比和风量的变化较小, 在 0.52 至 0.59 范围内。

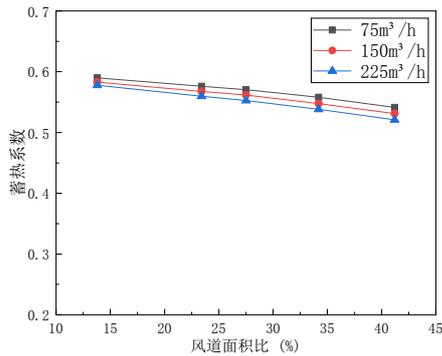


图 8 不同风道面积比下的  $\epsilon_x$

Fig.8  $\epsilon_x$  under different Air duct area ratio

### 3.3 放热性能分析

在不同风量下改变风道面积比, 所得到的有效放热量与有效放热系数结果如图 9 和图 10 所示。

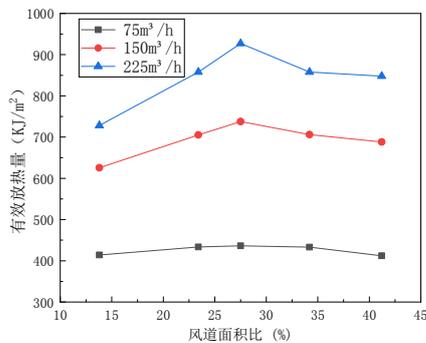


图 9 不同风道面积比下的  $Q_f$

Fig.9  $Q_f$  under different Air duct area ratio

由图 9 可知, 地板有效放热量变化趋势与蓄热量基本一致, 可以推测放热量的核心影响因素也是地板热阻与热容。有效放热量的大小, 直接反映了热风地板提高夜间室内温度、改善热环境的能力, 由图 8 判断, 地板同样在风道面积比在 26%至 30% 范围内有较好的放热性能。

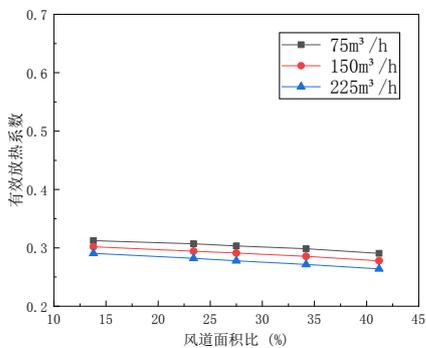


图 10 不同风道面积比下的  $\epsilon_f$

Fig.10  $\epsilon_f$  under different Air duct area ratio

由图 10 可知,  $\epsilon_f$  随风道面积比及风量的增大均呈现降低的趋势, 但该系数变化幅度较小, 在 0.26 至 0.31 之间, 可见风道面积比、风量两因素对  $\epsilon_f$  的影响不明显, 因此可认为夜间放热系数在常用设计工况下是一个较稳定的系数, 夜间有效放热量占地板换热量的比值基本在三成左右。

由图 8 和图 10 可以看出,  $\epsilon_f$  小于  $\epsilon_x$ , 因为蓄热量除却有效放热部分外, 还有部分热量在非使用时间释放。有效放热系数与蓄热系数之比  $\epsilon_f / \epsilon_x$  约为 51%, 它基本不随风道面积比和风量变化。因此当确定了房间所需有效放热量后, 以上系数可作为工程设计参考, 用于估算系统所需蓄热量、风量等参数。

## 4 结论

针对四川省阿坝州某小学宿舍热风地板供暖系统, 建立数值计算模型并分析了地板蓄放热特性, 可以得出结论如下:

(1) 地板蓄热量、有效放热量随风道面积比的增加先增大后减小, 随风量的增大而增大。风道面积比在 26%~30% 时地板蓄放热性能较好。

(2) 蓄热系数与有效放热系数均与风道面积比、风量成反比, 但变化较小, 蓄热系数变化范围在 0.52~0.59; 有效放热系数在 0.26~0.31; 有效放热量约占蓄热量的 51%, 说明热风地板具有良好的蓄放热能力。

(3) 太阳能热风地板在太阳能资源丰富地区具有较大的应用潜力, 除风道面积比外, 还可尝试在地板材料、送风方式等方面对该系统继续进行优化。

## 参考文献:

- [1] 钱方. 面对慷慨的错误——四川若尔盖暖巢项目设计思考[J]. 建筑学报 2021(5):62-69.
- [2] 刘伯万, 雷波, 余涛. 太阳能空气集热结合空心内墙蓄热采暖的室内温度与采暖负荷分析[J]. 制冷与空调, 2019, 33(3):310-314.
- [3] 赵江东. 太阳能空心通风内墙蓄放热过程实验与理论研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
- [4] 周吉日. 太阳能热风内墙供暖系统建筑热过程及优化研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021. (下转第 433 页)