

地下住宅推挽式 NVD 系统理论实验研究^{*}

冉茂宇^① 陈启高^② 温永玲^②

(① 华侨大学建筑系, 泉州 362011; ② 重庆建筑大学建筑系, 重庆 400045)

摘要 就地下住宅推挽式自然通风除湿系统, 建立其传热过程的物理数学模型, 并进行理论分析和实验研究; 考察各种因素对其通风除湿性能的影响, 并提出可能的改进措施。

关键词 自然通风, 除湿, 热湿环境

分类号 TU 96

地面住宅的热湿通风已为众多文献涉及^[1]。地下住宅作为地下空间利用的重要形式, 有着地面住宅难以比拟的若干优点, 尤以节能和“冬暖夏凉”为人们所重视。然而, 地下潮湿、通风不良却是全球范围共同面临的一道难题, 如不解决势必阻碍地下住宅的应用和发展。我国黄土高原的窑洞住宅以其分布最广、规模最大、构造独特等而为世人所瞩目, 并为地下住宅的研究提供了宝贵的经验, 因而且有一定的参考价值。文献[2]以窑洞住宅为模式, 提出了一种改善其热湿通风环境的推挽式自然通风除湿系统(Natural Ventilation and Dehumidification System, 简称 NVD 系统)。本文建立 NVD 系统的物理数学模型, 并就其热湿通风性能进行理论分析和实验验证。同时, 考察各种因素对系统通风除湿性能的影响, 提出可能的改进措施。

1 推挽式自然通风除湿系统

推挽式自然通风除湿系统原理如图 1 所示。由于洞壁温度相对洞外空气温度变化很小,

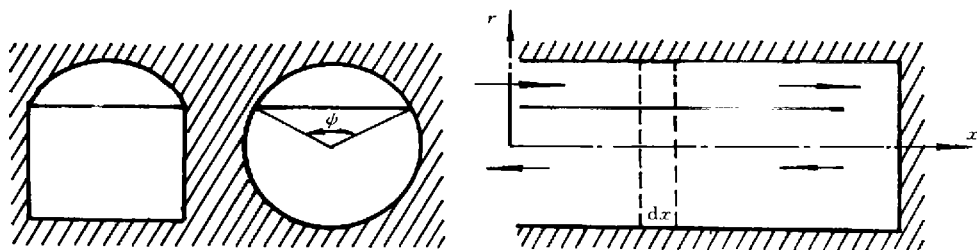


图 1 推挽式自然通风除湿系统

在夏季, 洞壁的冷却作用使洞外高温高湿空气从隔板上部通道流入, 而从下部通道流出。在这一过程中, 上部空气受到上洞壁和下部流出空气的冷却, 温度下降。若它的露点温度高于洞壁温度, 则空气从上部进入后, 到达一定位置便产生凝结。凝结水可由隔板两侧分排而自然除

湿;同时由于下部空气流出受热而温度回升,使空气相对湿度减小.因此空气在上部通道受到冷却而除湿,在下部通道又使相对湿度减小;若下部为住宅,其热湿环境势必得到改善.在冬季,气流流向相反,上部流出空气仍要加热隔板而加热下部的冷空气,有利于冬季采暖;另外,由于隔板的导风性,使空气流动到整个空间,使室内既有足够的新风,又避免了传统窑洞新风难以到达深处而出现不流动的“死角”和不卫生的区域.该系统构造简单,便于现有传统窑洞的改造;若在其后部采用除湿机或吸湿剂进行再除湿处理,会大大减小设备负荷;若自然通风不足,则可在上部通道的前后部方便地安置通风机械.

2 推挽式自然通风除湿系统的理论分析

2.1 数学模型

若洞穴深度相比于其宽度足够大,则可视作地下柱穴;由文[6]可知,其壁体中同一断面温度分布可近视为一组同心圆.基于此,视洞体为一等效断面的柱穴(图1),并作假设:(1)通过后壁传热较上下壁面传热很小,可忽去,即在后部气流转弯处,上下通道中空气温度相等;(2)上下通道断面中,空气温度分布均匀,且只沿进深方向变化.

用 t_1, t_2 分别表示上下通道中空气温度,则其相对于壁中无限远处温度(可视为年平均温度) t^* 的剩余温度 θ_1, θ_2 , 可分别表示为 $\theta_1 = \theta_{1a} + \sum \theta_{1k} e^{ik\omega\tau}$ 和 $\theta_2 = \theta_{2a} + \sum \theta_{2k} e^{ik\omega\tau}$, 其中 θ_{1a}, θ_{2a} 为上、下通道空气平均温度的剩余温度,而 θ_{1k}, θ_{2k} 为上下通道中空气的 k 阶剩余温度振幅, ω 为温度变化频率, τ 为时间变量.采用图1所示坐标,取微元 dx 进行传热分析.其中上部空气与上洞壁传热^[8,5]为

$$dQ_1 = \psi \lambda \theta_{1a} dx / \Phi + \psi r dx \sum S_k \overline{i} \theta_{1k} e^{ik\omega\tau}; \quad (1)$$

下部空气与下洞壁传热为

$$dQ_2 = (2\pi - \psi) \lambda \theta_{2a} dx / \Phi + (2\pi - \psi) r dx \sum S_k \overline{i} \theta_{2k} e^{ik\omega\tau}; \quad (2)$$

上部空气与下部空气传热为

$$dQ_{12} = KB(\theta_{1a} - \theta_{2a}) dx + KB dx \sum (\theta_{1k} - \theta_{2k}) e^{ik\omega\tau}; \quad (3)$$

上下部空气能量变化分别为

$$dQ^1 = GC_p d\theta_{1a} + GC_p \sum e^{ik\omega\tau} d\theta_{1k}; \quad (4)$$

$$dQ^2 = GC_p d\theta_{2a} + GC_p \sum e^{ik\omega\tau} d\theta_{2k}. \quad (5)$$

上述各式中, ψ 为隔板对应的张角, λ 为壁体导热系数, Φ 为洞壁热阻修正系数, r 为柱穴断面半径, S_k 为 k 阶洞壁表面蓄热系数, K 为隔板总传热系数, B 为隔板宽度, G 为上下通道中空气流量, C_p 为空气定压比热.根据能量平衡,对上下部空气分别有

$$dQ^1 + dQ_{12} + dQ^1 = 0, \quad dQ^2 - dQ_{12} - dQ^2 = 0. \quad (6)$$

把式(1)~(5)代入式(6),整理并分离时间项,得微分方程组为

$$-GC_p d\theta_{1a}/dx = \psi \lambda \theta_{1a} / \Phi + KB(\theta_{1a} - \theta_{2a}), \quad (7)$$

$$GC_p d\theta_{2a}/dx = (2\pi - \psi) \lambda \theta_{2a} / \Phi - KB(\theta_{1a} - \theta_{2a}), \quad (8)$$

边界条件为

$$x = 0, \theta_{1a} = \theta_{1in}, \quad x = L, \theta_{1a} = \theta_{2a}, \quad (9)$$

$$-GC_p d\theta_{1k}/dx = \psi r S_k \overline{i} \theta_{1k} + KB(\theta_{1k} - \theta_{2k}), \quad (10)$$

$$GC_p d\Theta_{2k}/dx = (2\pi - \Psi)rS_k - i\Theta_{2k} + KB(\Theta_{1k} - \Theta_{2k}), \quad (11)$$

边界条件为

$$x = 0, \Theta_{1k} = \Theta_{kin}; \quad x = L, \Theta_k = \Theta_{2k}. \quad (12)$$

2.2 理论分析

上述两组方程组在形式上完全一样, 故而其求解方法完全相同. 由式(8)得

$$\Theta_{1a} = [1 + \frac{(2\pi - \Psi)\lambda}{KB\Phi}] \Theta_a - \frac{GC_p}{KB} \frac{d\Theta_a}{dx}. \quad (13)$$

将式(13)代入式(7), 整理可得二阶齐次方程为

$$\frac{d^2\Theta_a}{dx^2} + p d\Theta_a/dx + q\Theta_a = 0, \quad (14)$$

$$\text{其中 } p = -\frac{2(\pi - \Psi)\lambda}{GC_p\Phi}, q = -\frac{2(\pi - \Psi)\Psi\lambda}{(GC_p\Phi)^2} - \frac{2\pi\lambda KB}{(GC_p)^2\Phi^2}$$

解式(13), (14) 可得 Θ_a, Θ_{2a} 分别为

$$\Theta_{1a} = C_1 \exp(r_1 x) + C_2 \exp(r_2 x), \quad \Theta_a = C_3 \exp(r_1 x) + C_4 \exp(r_2 x). \quad (15)$$

同理, 可得 Θ_{1k}, Θ_{2k} 的形式解为

$$\Theta_{1k} = C_5 \exp(r_3 x) + C_6 \exp(r_4 x), \quad \Theta_{2k} = C_7 \exp(r_3 x) + C_8 \exp(r_4 x). \quad (16)$$

加入时间项后, 式(16) 变为

$$\Theta_{1k} = C_5 \exp(r_3 x + ik\omega t) + C_6 \exp(r_4 x + ik\omega t), \quad (17)$$

$$\Theta_{2k} = C_7 \exp(r_3 x + ik\omega t) + C_8 \exp(r_4 x + ik\omega t). \quad (18)$$

由齐次方程可解出各常数 r_i , 由边界条件可定出各个常数 C_i , 因其表达式冗长复杂, 此处从略. 各种因素对解的影响均包含于 C_i 和 r_i 中.

3 自然通风除湿系统的实验研究

为了探讨该系统的自然通风除湿性能, 我们建造了图2所示的地下试验用房, 并用6支热电偶(布置见图2)测量上部通道空气温度随时间的变化; 用丹麦室内气候分析仪记录上部通道

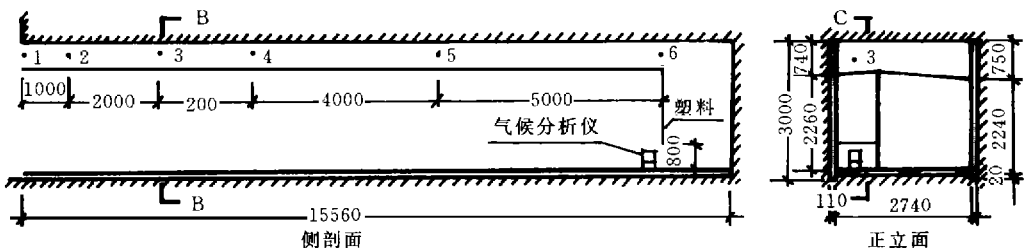


图2 试验用房和测点布置

空气流量随时间的变化. 将8月19~20日所测得的上部通道各点处空气温度用三阶傅氏级数进行回归, 并将温度平均值和各阶温度振幅随洞深变化表示于图3中. 从图3可知, 平均温度和各阶振幅随洞深的增加而下降. 由于洞口西向偏南, 入口部分(3 m 以内)受到太阳辐射及日温度波的影响, 冷却作用明显下降, 温度变化平缓. 由此, 出现了平均温度和各阶振幅随洞深不连续下降的情况.

为了对比理论分析与实验测试所得结果,在公式(15)中算取相应的参数 $\psi = 120^\circ$, $r = 1.7 \text{ m}$, $B = 2.8 \text{ m}$, $\lambda = 1.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, $K = 3.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, $\Phi = 1.35$, $GC_p = 175 \text{ W} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$. 对上通道空气平均温度进行计算,结果示于图3中(虚线). 从图可知,理论计算与实测吻合得较好,这为考察各因素对该系统性能的影响提供了极大方便. 由于上部空气所受到的冷却程度对该系统的通风除湿性能有着重大影响,所以冷却越强烈,则温度降低越快,凝结除湿就越多,且室内外温差增大也使热压作用下的自然通风加强. 因此,考察各因素对上通道空气温度降低的影响,对于了解和改进该系统通风除湿性能无疑十分必要.

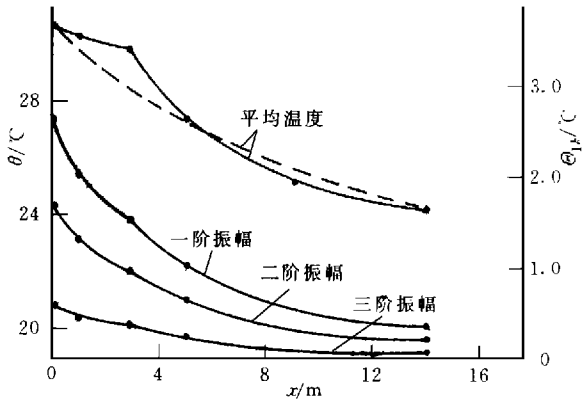


图3 平均温度和各阶振幅随位置的变化

4 各种因素对通风除湿性能的影响和改进措施

在式(15)中,影响温度变化的主要因素有 ψ , B , λ , K , G . 显然,要直接从解表达式来讨论各种因素对通风除湿性能的影响是比较困难的. 为此,首先取一基准工况, $\theta_{\text{air}} = 40^\circ$, $\psi = 60^\circ$, $\lambda = 1.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, $K = 2.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, $GC_p = 88.25 \text{ W} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$. 然后,让各参数在其它参数不变的情况分别增加1~2倍,以考察各参数单独对上下通道空气温度的影响. 计算结果示于图4. 其中图4(a)是 λ 和 K 对上下空气平均温度的影响,图4(b)是 ψ 和 G 对上下空气平均温度的影响.

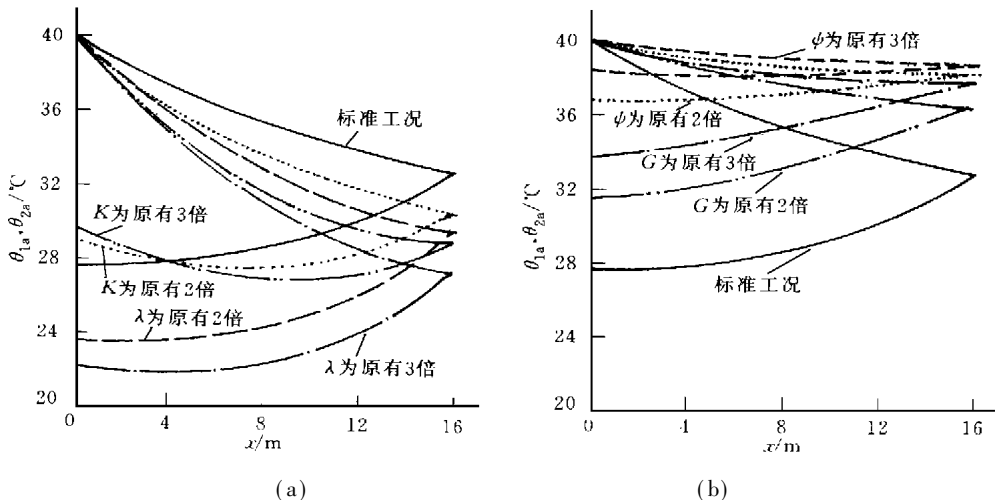


图4 各种因素对上下空气温度的影响

从图4(a)可知,增加洞壁导热系数 λ 可以使上下部空气温度显著下降,且上部下降较下部剧烈,这有利于空气在上部通道产生凝结除湿,而下部温度的继续下降则不利于相对湿度减小. K 的增加使上部空气温度下降有利于除湿,使下部空气温度在前部回升,且温度最低点向

后移动, 这有利于降低下部空气的相对湿度. 从图 4(b) 可知, 无论增加通风量(G) 还是隔板张角(ψ), 都会使上、下空气温度增加. 这是因为流量的增加意味着流速的增加而使气流与壁面换热时间短, 温度变化小; ψ 的增加, 一方面意味着上通道壁表面增加促进上部空气冷却, 另一方面又意味着下部壁体表面减小, 使下部空气温度提高. 下部空气温度提高不利于上部空气冷却, 故而总体效果是使上下部空气温度升高. 另外, 从解的表达式还可以看出, 隔板宽度 B 的影响与 K 具有相同的效果, 而深度 L 的增加可进一步降低气流转弯处空气温度, 有利于除湿, 但温度降低速率会逐渐变小.

由上述分析可知, 要改善该系统的通风除湿性能, 可单独或同时采取下列措施: (1) 增加上洞壁导热系数或把住宅建在导热系数较大的地壁中, 同时使地板架空或绝热; (2) 增加隔板有效传热系数 K 或宽度 B (如采用波纹状), 但不能用增加流量、张角来提高 K 和 B ; (3) 增加洞深有助于促进水分凝结, 但不是越深越好.

5 结论

(1) 本文建立的理论模型对分析该系统的热工性能是行之有效的, 理论计算与实测有着极好的相同趋势.

(2) 经研究, 找到了改善该系统热湿通风性能的几种可能措施.

参 考 文 献

- 1 刘钦庆. 南方湿热地区住宅通风降温问题的探讨. 华侨大学学报(自然科学版), 1992, 13(1): 100~109
- 2 冉茂宇. 地下住宅热湿通风性能研究: [博士学位论文]. 重庆: 重庆建筑大学建筑系, 1995. 36~59
- 3 黄福其. 地下工程热工计算方法. 北京: 中国建筑工业出版社, 1981. 5~20
- 4 陈启高. 建筑热物理基础. 西安: 西安交通大学出版社, 1981. 211~215
- 5 冯 雅. 利用浅地层蓄能改善室内热环境研究: [博士学位论文]. 重庆: 重庆建筑工程学院建筑系, 1994. 32~41

Theoretical and Experimental Study of Push-Pull and Natural Ventilating Dehumidifying System for Underground Residence

Ran Maoyu^① Chen Qigao^② Wen Yongling^②

(^① Dept. of Arch., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou;

^② Dept. of Arch., Chongqing Arch. Univ., 400045, Chongqing)

Abstract With regard to moisture and poor ventilation of cave shape underground residence, the authors put forward a push-pull and natural ventilating dehumidification system; and set up a physical and mathematical model of the process of its heat transfer; and carry on theoretical analysis and experimental study; and investigate the effects of various factors on its ventilating and dehumidifying performances; and put forward possible measures for its improvement.

Keywords natural ventilating, dehumidification, thermal and moisture environment