

粘土空心砖结构优化的数值模拟

李临平 吴志根 李增耀 何雅玲 陶文铨

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘 要 本文采用有限容积法对 50 种具有不同孔数及排列方式的 $240 \times 115 \times 90$ 粘土空心砖进行了当量导热系数的三维数值模拟研究。模拟中考虑了粘土空心砖的孔内表面辐射、孔数及排列方式以及室内外温差对其当量导热系数的影响。模拟结果表明: 孔内表面辐射对当量导热系数有不可忽略的作用, 孔数及排列方式直接影响当量导热系数的值, 存在具有最低当量导热系数的粘土空心砖结构。在该结构下空心砖的当量导热系数几乎不随室内外温差的变化而变。模拟结果对粘土空心砖的结构选型、工程设计及建筑节能具有重要的意义。

关键词 粘土空心砖; 数值模拟; 复合传热

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2008)05-0845-04

NUMERICAL SIMULATION OF OPTIMIZING CONFIGURATION OF HOLLOW CLAY BRICKS

LI Lin-Ping WU Zhi-Gen LI Zeng-Yao HE Ya-Ling TAO Wen-Quan

(The State Key Lab. of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract The equivalent thermal conductivities of 50 kinds of hollow clay bricks with the size of $240 \times 115 \times 90$ (in mm) and different hole number and arrangement have been predicted numerically by the finite volume method. The influences of the hole surface radiation and the indoor-outdoor temperature difference are also considered. The results reveal that the hole surface radiation can not be neglected. The hole number and arrangement have significant effects on the equivalent thermal conductivity. There is an optimal configuration for which the equivalent thermal conductivity is the lowest. For this optimum configuration its equivalent thermal conductivity does not vary with the indoor-outdoor temperature difference. The simulation results provide valuable data for the hollow brick design in the building engineering.

Key words hollow clay bricks; numerical simulation; multimode of heat transfer

0 前 言

粘土空心砖因保温性能好, 重量轻, 是目前广泛采用的围护结构建筑材料之一。其保温性能可由当量导热系数来决定, 主要取决于开孔率、孔数、及排列方式。因其内部发生的传热过程是由导热、对流、和表面辐射同时作用的复杂的传热过程, 文献中对这种发生在空心砖内部的复杂的热交换过程的数值研究相对较少。Zhao 与 Tao^[1] 等采用有限容积法对单孔和双孔结构的粘土空心砖进行了二维数值模拟, 指出孔内表面的辐射换热是不可忽略的, 且边界条件对总的热交换量也有较大的影响。Lorente^[2,3] 等采用二维简化的分析模型在给定壁面温度的边界

条件下对具有单个竖向孔洞的空心砖的热流及热阻进行了数值计算, 并研究了室外温度变化对热阻的影响。del Coz Díaz^[4,5] 采用有限元法对三种轻质混凝土空心砖进行了三维数值模拟的热分析。以上计算都没有研究绝热性能最好的结构问题。

本文目的是通过对精心挑选的 50 种 $240 \times 115 \times 90$ 粘土空心砖的当量导热系数进行三维数值模拟计算, 研究粘土空心砖的孔数与排列方式对当量导热系数的影响, 寻找具有最低当量导热系数的粘土空心砖的最佳结构。另外, 对室内外温差对当量导热系数的影响也进行了数值研究。研究结果对建筑节能具有重要的意义。

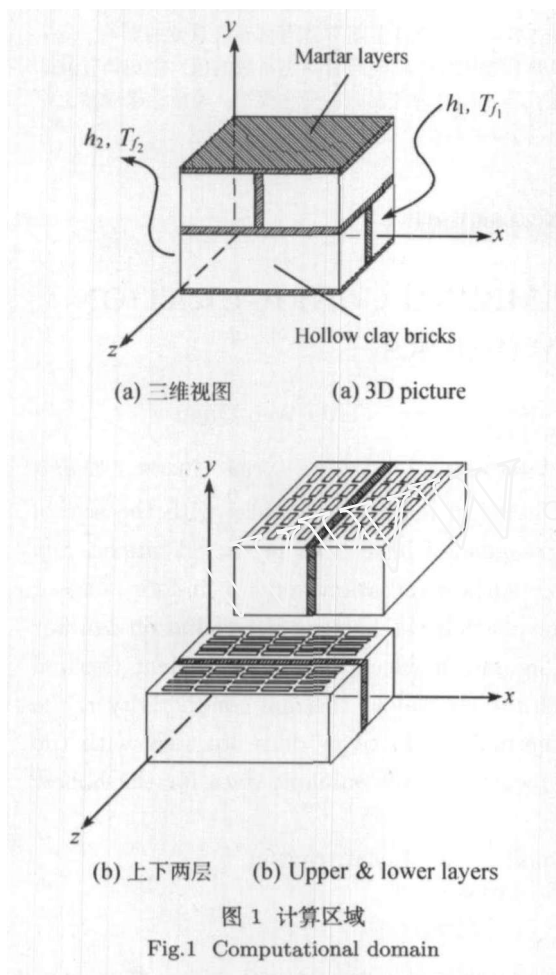
收稿日期: 2008-01-27; **修订日期:** 2008-03-31

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目 (973)(No.2007CB206902); 国家自然科学基金重点项目 (No.50636050)

作者简介: 李临平 (1957-), 女, 山西人, 副教授, 博士研究生, 从事传热强化及数值计算方面的研究。

1 物理问题和数学模型

计算区域如图 1 所示, 它由完全相同的 4 块 $240 \times 115 \times 90$ 粘土空心砖被水泥砂浆粘合而成, 其上下与前后被认为是周期性重复的. 图中所示的是一种在长度方向 5 个孔, 在宽度方向 4 个孔, 高度方向 1 个孔的空心砖.



为了获得优化结构, 选取了 50 种 $240 \times 115 \times 90$ 粘土空心砖, 其长度方向的孔从 1~12 孔, 宽度方向的孔从 1~5 孔, 高度方向仅有 1 个从底到顶的孔. 所有孔洞沿长度、宽度方向均匀分布. 粘土空心砖在给定的孔数及排列方式下采用最大的开孔率 (指空心砖内空气孔的体积除以空心砖总体积的百分数), 每种空心砖满足边壁厚 10 mm, 分隔内壁 7.5~10 mm 的条件. 为简单起见, 使用符号 $L_n \times W_n \times H_{n_y}$ 表示粘土空心砖在长度方向有 n_x 孔, 宽度方向有 n_z 孔, 高度方向有 n_y 孔, 所选 50 种空心砖的符号及开孔率列入表 1 中.

在数值模拟中采用以下假定: (1) 粘土和空气的热物性为常数; (2) 孔内空气的流动是不可压缩、稳态、层流流动; (3) Boussinesq 假设适用; (4) 室

内外表面采用对流换热边界条件, 计算区域的其它表面采用绝热边界条件.

描述该物理问题的控制方程为三维稳态常物性的 N-S 方程, 重力作用在 y 轴的反方向上, 为简便起见, 控制方程不再列出, 可参见文献 [6].

模拟中用到的条件与热物性为:

$$T_{f1} = 293 \text{ K}, T_{f2} = 253 \text{ K}, Pr = 0.707,$$

$$h_1 = 8.72 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}), h_2 = 23.26 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}),$$

$$c_{pf} = 1005 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K}), \lambda_f = 0.0244 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$$

$$\eta = 17.2 \times 10^{-6} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s}), \rho_f = 1.293 \text{ kg}/\text{m}^3,$$

$$\lambda_s = 0.755 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K}), \varepsilon = 0.85$$

其中, 下标 f 表示空气, s 表示粘土. h_1 、 h_2 分别为室内、外表面的对流换热系数, T_{f1} 、 T_{f2} 分别为室内、外的环境温度.

2 数值模拟方法

控制方程用有限容积法离散 [6], 对流项的离散格式采用 SGS [7], 压力-速度耦合关系处理用 SIMPLE 算法. 离散的代数方程组用 TDMA+ADI 进行整场求解 [6], 孔内表面辐射作为与内表面相邻的控制容积的附加源项处理 [6], 自编程序用来进行数值模拟计算.

迭代收敛的判据为

$$Rs_{\max}/G < 10^{-6}$$

$$|Q_{\text{inwall}} - Q_{\text{outwall}}| / \min(Q_{\text{inwall}}, Q_{\text{outwall}}) < 10^{-2}$$

$$\left| \frac{\bar{\lambda}^{k+300} - \bar{\lambda}^k}{\bar{\lambda}^{k+300}} \right| \leq 10^{-6}$$

式中, Rs_{\max} 为计算区域中控制容积的最大的质量残差, G 为空气孔横断面的质量流量, Q_{inwall} , Q_{outwall} 分别表示通过计算区域内、外表面的热量.

网格独立性考核对结构最复杂的 L12W5H1 进行. 取 4 套网格: $102 \times 82 \times 102$, $202 \times 82 \times 102$, $202 \times 82 \times 202$ 和 $202 \times 162 \times 202$, 在考虑导热、对流和孔内表面辐射的同时作用下, 计算结果表明, 当网格数从 85×10^4 增加到 661×10^4 时, 当量导热系数计算偏差不超过 2%, 为节省时间, 采用第一套网格 $102 \times 82 \times 102$, 此时可保证最小的空气孔内有 720 个控制容积.

3 结果分析

3.1 孔数及布置方式对当量导热系数的影响

模拟首先在只考虑导热、对流换热, 室内外温差为 40°C 的条件下进行. 图 2 表示对 50 种粘土空心

砖当量导热系数(用符号 λ_{nat} 表示)的模拟结果。从图 2 中看到,当宽度方向的孔数给定时,长度方向的孔从 1 孔变到 2 孔时 λ_{nat} 迅速下降,再增加长度方向的孔数,下降趋势变缓,大约在 4~5 孔达最低值,然后,随着长度方向孔数的增加, λ_{nat} 呈现上升的趋势,宽度方向的孔越多,上升的趋势越明显。这主要是因为孔数增加时,孔的尺寸变小,孔内自然对流换热减弱,但由于粘土分隔壁的增加,使得导热热量增加。当自然对流换热减弱的程度大于导热热量增加的程度时, λ_{nat} 降低,反之,则增加。所以存在具有最低的 λ_{nat} 的空心砖结构。

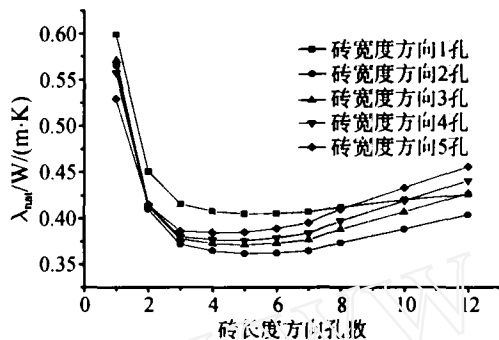


图 2 不考虑辐射的计算结果

Fig.2 Simulation results without radiation

根据模拟结果,当不考虑孔内表面辐射换热时, L05W2H1 具有最低的 λ_{nat} , 为 0.362 W/(m·K)。

3.2 孔内表面辐射对当量导热系数的影响

考虑导热、对流、和孔内表面辐射的综合作用,仍在室内外温差为 40°C 的条件下,对 50 种 240×115×90 粘土空心砖的当量导热系数(用符号 λ_{rad} 表示)进行模拟计算,结果表示在图 3 中。从图 3 可以看出,尽管当宽度方向的孔数给定时, λ_{rad} 随长度方向的孔数增加的变化趋势与图 2 中的 λ_{nat} 的变化趋势很相似,但由于孔内表面辐射的作用,使得粘土空心砖的当量导热系数有不同程度的增大,增大的幅度详见表 1。由此可见,孔内表面辐射具有不可忽略的作用。

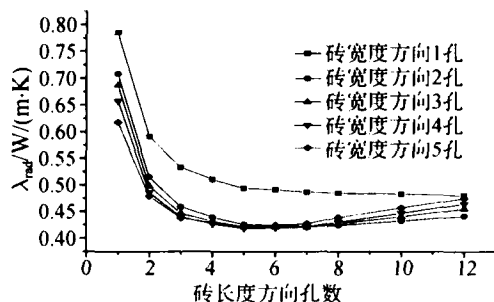


图 3 考虑辐射的计算结果

Fig. 3 Simulation results with radiation

表 1 50 种粘土空心砖的 λ_{rad} 与 λ_{nat} 的比较Table 1 Comparisons of λ_{rad} and λ_{nat}

种类	孔洞数	开孔率 %	λ_{nat} W/(m·K)	λ_{rad} W/(m·K)
L01W1H1	1	75.7	0.599	0.785
L02W1H1	2	72.0	0.451	0.591
L03W1H1	3	68.8	0.416	0.533
L04W1H1	4	65.0	0.408	0.511
L05W1H1	5	63.7	0.405	0.494
L06W1H1	6	62.0	0.406	0.491
L07W1H1	7	60.2	0.407	0.486
L08W1H1	8	56.8	0.412	0.485
L10W1H1	10	51.6	0.420	0.483
L12W1H1	12	46.5	0.426	0.480
L01W2H1	2	67.8	0.566	0.708
L02W2H1	4	64.7	0.410	0.515
L03W2H1	6	61.6	0.372	0.459
L04W2H1	8	58.5	0.365	0.439
L05W2H1	10	57.0	0.362	0.426
L06W2H1	12	55.4	0.363	0.424
L07W2H1	14	53.9	0.365	0.421
L08W2H1	16	50.8	0.374	0.425
L10W2H1	20	46.2	0.388	0.432
L12W2H1	24	41.6	0.404	0.441
L01W3H1	3	59.8	0.571	0.687
L02W3H1	6	57.0	0.414	0.498
L03W3H1	9	54.3	0.378	0.446
L04W3H1	12	51.6	0.373	0.431
L05W3H1	15	50.3	0.372	0.421
L06W3H1	18	48.9	0.373	0.421
L07W3H1	21	47.6	0.377	0.420
L08W3H1	24	44.8	0.389	0.427
L10W3H1	30	40.8	0.407	0.440
L12W3H1	36	36.7	0.427	0.455
L01W4H1	4	55.8	0.557	0.657
L02W4H1	8	53.3	0.414	0.486
L03W4H1	12	50.7	0.380	0.439
L04W4H1	16	48.2	0.377	0.427
L05W4H1	20	46.9	0.376	0.419
L06W4H1	24	45.7	0.379	0.419
L07W4H1	28	44.4	0.384	0.421
L08W4H1	32	41.8	0.398	0.430
L10W4H1	40	38.0	0.419	0.446
L12W4H1	48	34.2	0.441	0.464
L01W5H1	5	51.8	0.529	0.618
L02W5H1	10	49.5	0.415	0.479
L03W5H1	15	47.1	0.386	0.438
L04W5H1	20	44.7	0.385	0.428
L05W5H1	25	43.6	0.385	0.422
L06W5H1	30	42.4	0.389	0.424
L07W5H1	35	41.2	0.395	0.427
L08W5H1	40	38.9	0.410	0.439
L10W5H1	50	35.3	0.433	0.457
L12W5H1	60	31.8	0.456	0.474

根据模拟结果,考虑孔内表面辐射时, 240×115×90 粘土空心砖的最佳结构为 L05W4H1,

具有最低当量导热系数 $0.419 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。不过, 从图 3 中还可以看到当长度方向的孔数为 4~8 孔, 宽度方向的孔数为 2~5 孔时, λ_{rad} 偏离最低值很小。

4.3 室内外温差对粘土空心砖当量导热系数的影响

根据工程设计的需要, 对室内外温差对 λ_{rad} 的影响进行了数值研究。保持室内温度 20°C , 改变环境温度从 $-30\sim 0^\circ\text{C}$, 数值模拟结果表明具有不同孔数与排列方式的粘土空心砖其 λ_{rad} 随室内外温差变化的趋势不同, 有的随温差的减小而减小, 有的随温差的减小而增大。最大的偏差 -10.7% 发生在 L1W5H1, 不过, 大多数 λ_{rad} 偏差都不超过 5% 。非常有趣的是对于具有最佳结构的 L05W4H1, 其当量导热系数几乎不随室内外温差改变。而且, 砖的孔数与排列方式越接近最佳结构, 其当量导热系数随室内外温差的变化越小。

4 结 论

(1) 粘土空心砖孔内表面辐射使得其当量导热系数增大, 具有不可忽略的作用。一般说来, 孔数越少相对增加越多, 对 $240\times 115\times 90$ 粘土空心砖其当量导热系数的增量从 $23.7\%\sim 3.8\%$ 。

(2) 粘土空心砖的孔数及排列方式对当量导热系数有直接的影响。在长度方向仅有一孔或宽度方向仅有一孔的空心砖具有较大的当量导热系数, 其它孔数及排列方式的空心砖的当量导热系数相对较小。 $240\times 115\times 90$ 粘土空心砖具有最低当量导热系数的结构为 L05W4H1, 其值为 $0.419 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 开孔率为 46.9% 。不过, 当长度方向的孔数从 4 孔变到 8 孔, 宽度方向的孔数从 2 孔变到 5 孔时, 当量导热系数与最低的值相比变化很小, 这意味着粘土空心砖可采用较大的开孔率, 而对其保温性能影响甚小。

(3) 当室内外温差减小时, $240\times 115\times 90$ 粘土空

心砖的当量导热系数有的升高, 有的降低, 取决于空心砖的孔数和排列方式。不过, 大多数的变化值不超过 5% 。有趣的是, 具有最佳结构的粘土空心砖的当量导热系数几乎不随室内外温差而变。此外, 若空心砖的结构越接近最佳结构, 其当量导热系数随室内外温差的变化越小。因此, 当粘土空心砖的结构为最佳结构或接近最佳结构时, 其当量导热系数可作为常数。

参 考 文 献

- [1] Zhao C Y, Tao W Q. Natural Convections in Conjugated Single and Double Enclosures. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1995, 30: 175-182
- [2] Lorente S, Petit M, Javelas R. Simplified Analytical Model for Thermal Transfer in Vertical Hollow Brick. *Energy and Buildings*, 1996, 24: 95-103
- [3] Lorente S, Petit M, Javelas R. The Effects of Temperature Conditions on the Thermal Resistance of Walls Made with Different Shapes Vertical Hollow Bricks. *Energy and Buildings*, 1998, 28: 237-240
- [4] Del Coz Díaz J J, García Nieto P J, Martín A, et al. Non-linear Thermal Analysis of Light Concrete Hollow Brick Walls by the Finite Element Method and Experimental Validation. *Applied Thermal Engineering*, 2006, 26: 777-786
- [5] Del Coz Díaz J J, García Nieto P J, Betegón C, et al. Analysis and Optimization of the Heat-insulating Light Concrete Hollow Brick Walls Design by the Finite Element Method. *Applied Thermal Engineering*, 2007, 27: 1445-1456
- [6] 陶文铨. 数值传热学. 第 2 版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001
Tao W Q. Numerical Heat Transfer. 2nd edition. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001
- [7] Li Z Y, Tao W Q. A new Stability-guaranteed Second-order Difference Scheme. *Numerical Heat Transfer, Part B*, 2002, 42: 349-365
- [8] Incropera F P, DeWitt D P. Introduction to Heat Transfer. Fifth Edition. New York: John Wiley & Sons, 2003