

矩形孔节能页岩多孔砖墙体传热性能的 三维数值计算研究

王晓璐, 徐 雷, 李鸿秋, 康於鑫, 樊佳琳

(金陵科技学院机电工程学院, 江苏 南京 211169)

摘 要:依据江苏省工程建设标准及墙体实际构造,建立了完善的矩形孔型节能页岩空心砖墙体三维数值计算模型,解决了三维计算中网格协同生成及网格优化等关键技术。对三种不同孔型砖墙体进行计算并获得了满意结果,在此基础上分析了墙体中三维传热过程及特点,对比了不同孔型时传热性能的差异,确定了墙体保温材料的适宜厚度。

关键词:页岩多孔砖;三维计算模型;热工性能分析;墙体

中图分类号: TU522.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-755X(2018)01-0045-05

Three-dimensional Numerical Calculation of Heat Transfer Performance of Shale Brick Wall with Rectangular Holes

WANG Xiao-lu, XU Lei, LI Hong-qiu, KANG Yu-xin, FAN Jia-lin

(Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China)

Abstract: On the basis of engineering construction standard and actual wall structure in Jiangsu province, a more perfect three-dimensional numerical calculation model of rectangular groove energy-saving shale porous brick wall is established and the key technology in the calculation including the three-dimensional grid synergy generation and grid optimization is solved. Three different groove brick walls are calculated and satisfactory results are obtained. Based on the results, we analyze the three-dimensional heat transfer process in the wall and its characteristics. The differences in heat transfer performance between different pore types are compared and the suitable thickness of wall insulation material is determined.

Key words: shale porous brick; three-dimensional numerical calculation; mode analysis on thermal performance; wall

由于页岩多孔砖具有强度高、外观规则、施工方便等优点,除用于多层建筑外,在城市高层建筑、小高层建筑中也被广泛用作外墙砌筑墙体。从现有使用情况看,矩形孔型节能页岩多孔砖是应用最广泛的品种。由于我国地域辽阔、生产厂家较多,生产企业从生产实际出发,开发了一些不同于现有国标的矩形孔型多孔砖,这使得节能墙体建材品种更加丰富,但也使实际热工情况与原有建筑标准设计出现差异,急需加强此领域的研究。

数值计算方法具有计算精度高、计算结果可靠、能节约大量实验成本的特点,此种方法也在矩形孔型

收稿日期: 2018-01-19

基金项目: 江苏省自然科学基金面上研究项目(BK20151099);江苏省高校品牌专业建设工程资助项目(PPZY20151219)

作者简介: 王晓璐(1959—),女,浙江宁波人,教授,学士,主要从事建筑节能研究。

节能页岩多孔砖墙体热工性能研究中有所应用,郑云等^[1]采用基于有限容积法的 Fluent 软件,对 190 mm×240 mm×115 mm 烧结页岩空心砖进行了当量导热系数的三维数值模拟和计算,模拟中主要考虑砖体中孔型、孔的长宽比、孔的排列数、孔洞率等因素。刘建龙等^[2]对 10 种具有不同孔洞数、孔洞率以及孔的排列方式的烧结页岩多孔砖的当量导热系数进行三维数值模拟计算,得出了一种最佳结构设计的页岩多孔砖设计方案。毛伟等^[3]综合应用有限容积法和有限元法,计算了无机复合烧结页岩空心砖(复合砖)的三维传热和力学性能,分析了孔内辐射、孔排数、保温浆料及页岩导热系数的变化对复合砖当量导热系数的影响。上述研究主要集中在单块砖几何因素对传热性能的影响及优化途径,分析较为详细,但很少有将保温层、砌筑灰缝统筹考虑的三维立体模型。另外现有研究中未见有按照江苏省工程建设标准设计,对于结构尺寸不同于国标产品的页岩多孔砖外保温系统传热性能数值计算的研究报告。

针对目前研究的不足,作者以江苏省工程建设标准设计规定的墙体构造为基准,结合南京市新建的各小区节能住宅的墙体转型结构情况,开发了三维计算时网格协同生成及网格优化等关键技术,分析了页岩多孔砖墙体中三维传热过程及特点,对比不同孔型时传热性能的差异,确定了墙体保温材料的适宜厚度。

1 建模理论与方法

1.1 矩形多孔砖构造及墙体计算单元选取

图 1 为 2012—2016 年南京江宁区骋望骊都、招商方山里等住宅小区的小高层使用的多孔砖,图 2 为中国矿业大学与徐州权台矿务局合作研制的煤矸石烧结多孔砖,图 3 为 2010—2013 年南京江宁区天正天御溪岸等住宅小区的高层建筑中使用的多孔砖。

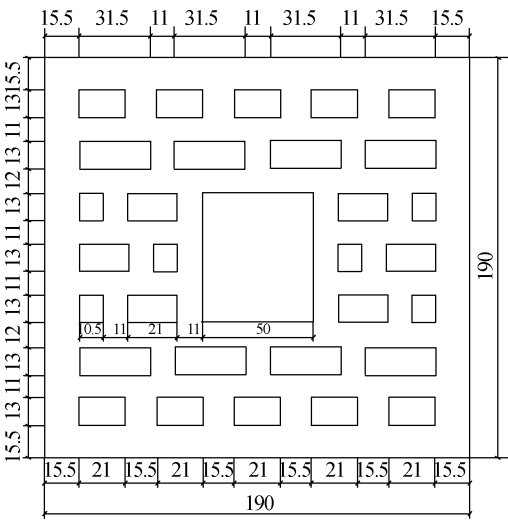


图 1 31 孔矩形孔页岩多孔砖平面图

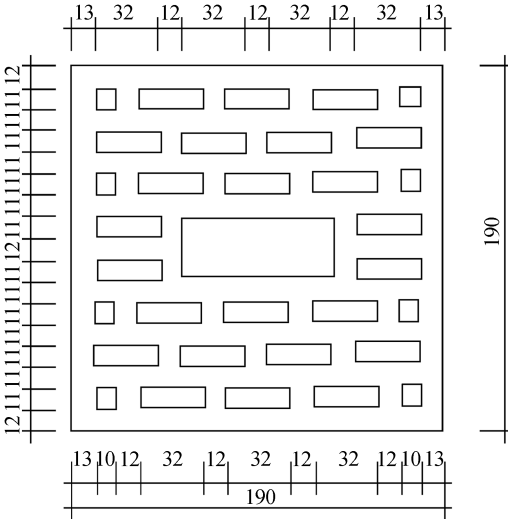


图 2 33 孔矩形孔煤矸石烧结多孔砖平面图

多孔砖外形尺寸为 190 mm(长)×190 mm(墙厚方向)×90 mm(高),砖的孔洞率为 23%~33%,为方便施工砌筑,砖中部均设手抓孔。砖体砌筑时每块砖上面和下底均有厚 10 mm 的水泥灰缝,左右两面均有厚 10 mm 的垂直水泥灰缝,在建立三维计算模型时均将其考虑在内。因在江苏省工程建设标准设计中墙体以外保温为主,故计算过程是按外保温计算,建立包括内外墙的抹灰面层、砖块上下左右 4 个水平和侧立灰浆缝、一定厚度保温层在内的立体三维计算单元,计算单元的轴测图如图 4 所示。

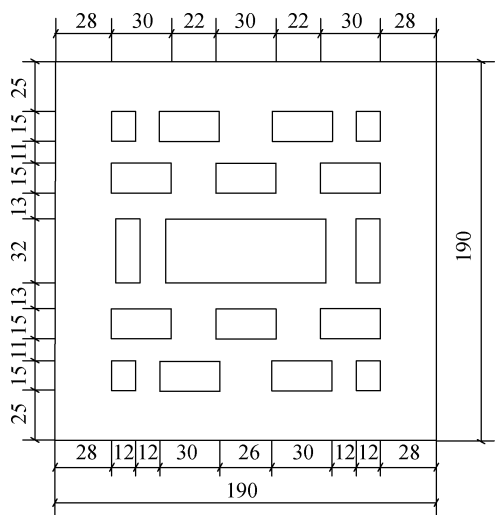


图 3 17 孔矩形孔页岩多孔砖平面图

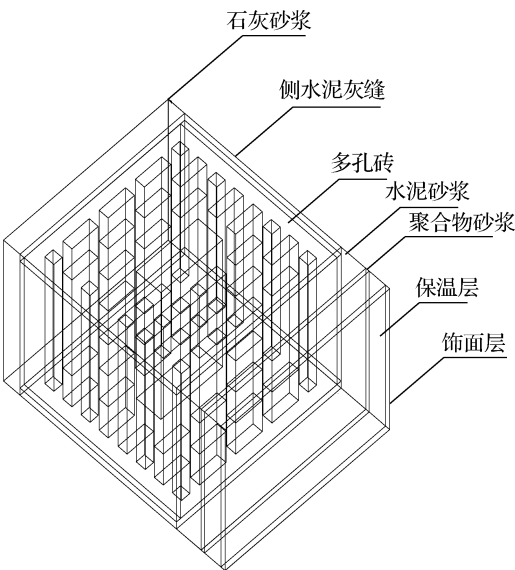


图 4 矩形孔节能页岩多孔砖墙体立体图

1.2 三维计算的理论公式及边界条件

多孔砖传热过程是自然对流换热与导热耦合的三维复杂传热过程。在计算单元中,固体材料占主要体积,应满足固体导热微分方程,同时多孔砖孔洞中空气满足质量守恒、动量守恒与能量守恒方程^[4]。

砖体顶底面均是含有多个闭合回路的多连通区域,故此部分面网格为非结构化四边形网格,划分网格时必须先保证砖体顶底面上网格绝对协同一致,再采用源项协同方法生成体积网格,体积网格均为非结构化六面体网格。依靠砖体与其它各均质材料层连接面上的网格映射,在各均质材料层内生成正六面体网格。以墙体中 X 方向为传热主导方向,对网格配置进行优化,实现了计算速度的较快收敛。经过网格无关性验证,计算模型生成单元总数为 68 万~78 万是合理的,生成网格整体质量优良。

用有限容积法对上述方程进行数值计算,速度压力方程求解选用 SIMPLE 算法,对流扩散项采用二阶迎风格式。为保证精度,迭代过程的能量松弛因子设为 0.9。墙体两侧均为第三类边界条件,墙体室内侧空气温度取 $t=0\text{ }^{\circ}\text{C}$,表面传热系数 $h_1=8.7\text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$,墙体室外侧空气温度取 $t=40\text{ }^{\circ}\text{C}$,表面传热系数 $h_0=18.7\text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$ ^[5]。砌体固体材料的密度是 $\rho=1\text{ }700\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, $C_p=750\text{ J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$,导热系数 $\lambda=1.02\text{ W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$ 。上述边界条件中未考虑孔的冷热壁面相互的辐射效应。

2 计算结果与分析

2.1 数值计算验证

数值计算中残差是检验计算质量的重要指标,本计算的残差均小于规定误差限,31 孔矩形孔多孔砖结果见表 1。

表 1 31 孔矩形孔多孔砖外保温 50 mm 聚苯板计算迭代残差

项目	质量	x 方向速度	y 方向速度	z 方向速度	能量
迭代残差上限	1.1×10^{-4}	1.2×10^{-6}	1.2×10^{-6}	1×10^{-6}	1.2×10^{-8}

国内各省市建筑质量监督检测部门测量墙体稳态热工参数时均采用防护热箱法,实验时取试件两侧空气温度差为 35~40 ℃,参照通用的实验条件,取两侧空气温度差 $\Delta t=40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

计算示例 1:图 1 所示砖型,外保温层厚度 40 mm 聚苯乙烯板的内外抹灰的砌体。

计算结果是模型条面平均的热流密度 $q=27.136\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,传热系数是 $27.136/40=0.68\text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$,对比《全国民用建筑工程设计技术措施:暖通空调·动力》中 DM190 粘土多孔砖聚苯乙烯板系统^[6],外保温层厚度是 40 mm 聚苯乙烯板时,传热系数 $K=0.69\text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$,相对误差为 $|(0.68-0.69)|/0.69$

=1.4%,数值计算结果与规范参数符合度较高,误差较小。

计算示例 2:徐州煤矸石烧结多孔砖砌体。

此砌体两侧无抹灰层、无保温层时,计算得出模型条面平均热流密度 $q=59.438\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,传热系数是 $59.438/40=1.486\text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$ 。徐州市建设检测中心站采用热流法对徐州煤矸石烧结 33 孔多孔砖砌体进行试验,实验装置是 JTRG-1 型建筑围护结构保温性能检测装置,试验热室控制温度为 $35\text{ }^{\circ}\text{C}\pm0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,冷室控制温度为 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}\pm0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,得到传热系数 $K=1.592\text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$ [7]。相对误差为 $(1.592-1.486)/1.592=6.67\%$ 。与作者 2010 年对徐州煤矸石烧结多孔砖砌体三维计算工作 [8] 相比,建立完善的三维立体计算模型后,计算相对误差从 8.47% 下降到 6.67%,精度提高约 25%。

2.2 矩形多孔砖计算单元内部温度及热流分布

由图 5 和图 6 可知,砖体计算单元中,肋壁内温度等值线分布均匀,因孔洞内空气是热的不良导体,故温度等值线向孔洞弯曲,即孔内有较大的温度梯度。各排孔洞作用叠加,有效削弱了通过砖体的热量传递。孔洞交错排列时,使砖中孔肋区域内温度线间距加大,温度梯度变小,显著减小了固体材料的导热热量。

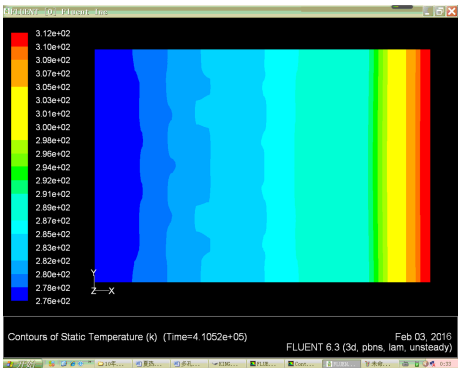


图 5 外保温 50 mm 聚苯板 33 孔矩形煤矸石
烧结多孔砖墙体温度切片

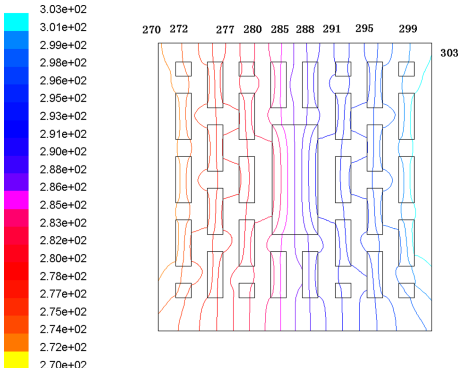


图 6 33 孔矩形煤矸石烧结多孔砖主体温度切片

从图 7 可知砖中空气孔使得温度等值面出现弯曲和波动,且砖上、下部温度分布差异较大,三维分布特征明显。

图 8 显示出在砖体中部的手抓孔位置处,由于孔内空气的环流,使得在砖顶和砖底的温度出现了相反的温度凹凸变化。

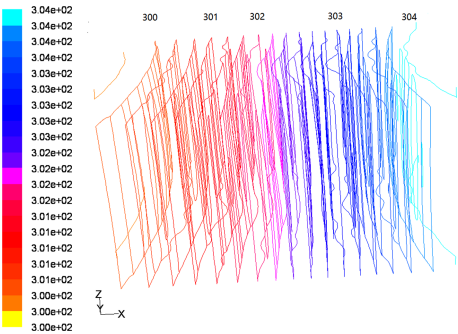


图 7 33 孔矩形煤矸石烧结多孔砖主体温度等值面

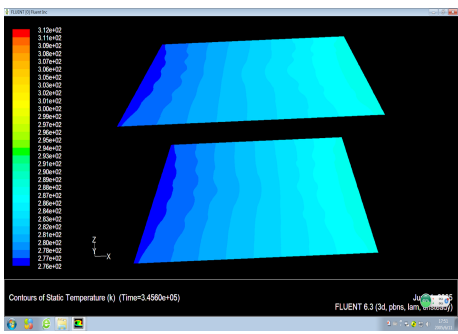


图 8 33 孔矩形煤矸石烧结多孔砖顶面、底面温度分布

在砖体对称中心取铅垂横截面,从图 9 和图 10 可看出由于手抓孔体积较大,内部形成了明显的空气环流,最大流速可达 $0.02\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。同时孔内温度等值线弯曲,孔的高温侧下部、低温侧上部温度线分布密集,表明空气与孔壁间的对流换热主要发生在这两个局部区域,孔的高温侧上部、低温侧下部空气与固体壁面的换热相对较弱,受此影响,固体材料中靠近这两个局部区域的温度等值线发生弯曲,表明固体中导向这两个局部位置的热流密度减少。从图 9 和图 10 中还可看出除手抓孔外的其它条状孔洞,无明显的

空气环流。

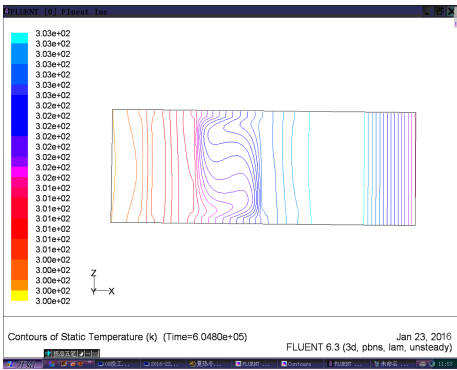


图 9 50 mm 聚苯板外保温 31 孔空心砖铅垂横截面温度分布线

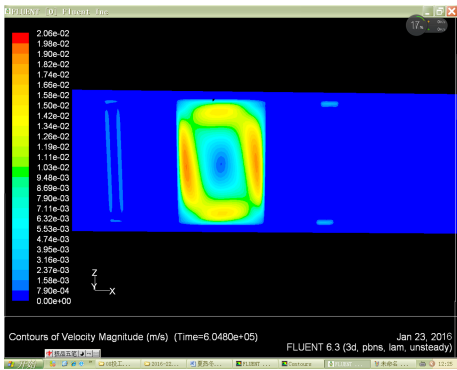


图 10 50 mm 聚苯板外保温 31 孔空心砖铅垂横截面速度分布云

冷空气侧的砖条面上,出现了温度等值线向材料内部的弯曲,这表明砖体中部主体区域温度较低,与冷空气的温度差明显减少,靠近砖顶、面处由于肋壁传热作用,温度较高,与冷空气的温度差较大,这说明墙体表面温度实际不均匀。

2.3 不同矩形孔型页岩多孔砖性能对比

手抓孔对矩形孔型页岩多孔砖传热性能有一定影响,孔中空气是热的不良导体,手抓孔形大时会相对增加传热热阻。虽然 31 孔 7 排多孔砖的孔排数比徐州煤矸石烧结砖少 1 排,但在保温层较薄时,传热系数相对较小。徐州煤矸石烧结砖的手抓孔设置有所改进,但手抓孔尺寸较小,因此对传热系数增加作用不明显。综合施工及使用过程中的维护,外保温层的厚度在 40~60 mm 为适宜。

3 结 论

1)对矩形孔多孔砖建筑节能墙体必须建立完善的三维立体模型,采用源项协同方法生成六面体体积网格,可使计算较为准确,计算收敛速度较快,精度提高约 25%。2)对三维立体模型计算时,需进行三维方向网格设置的优化,以在保证计算精度前提下加快收敛速度。3)矩形孔型页岩多孔砖传热性能随着孔洞率的增加而下降,但孔洞率在相同的水平,例如 32%左右时,孔洞的尺寸及合理布置将起到更关键的作用。合适的孔排数为 7~8 排。4)矩形孔型页岩多孔砖的手抓孔是为了方便施工而设置,但它同时存在削弱传热作用,相当于增加砖内孔排数。5)增加外保温层厚度时,产生的削弱传热作用在递减,同时综合施工的方便性及使用过程中的耐久性,外保温层适宜的厚度为 40~60 mm。

参考文献:

[1] 郑云,彭家惠,谢厚礼,等. Fluent 软件在页岩空心砖孔型结构优化中的运用[J]. 砖瓦,2010(11):34-36

[2] 刘建龙,谢洁南,刘鹏,等. 烧结页岩多孔砖孔型优化设计与数值模拟研究[J]. 建筑热能通风空调,2016(1):49-52

[3] 毛伟,周书兵,谢厚礼,等. 优化无机复合烧结页岩空心砖性能的分析[J]. 建筑材料学报,2015(10):912-918

[4] 陶文铨. 数值传热学[M]. 2 版. 西安:西安交通大学出版社,2002

[5] 中华人民共和国建设部. 采暖通风与空气调节设计规范:GB 50019—2003[S]. 北京:中国计划出版社,2003

[6] 中国建设部工程质量安全监督与行业发展司. 全国民用建筑工程设计技术措施:暖通空调·动力[M]. 北京:中国计划出版社,2009

[7] 刘莉君,于伟,王怡丹,等. 煤矿石制备烧结砖的方法和性能研究[J]. 煤炭技术,2017(10):279-281

[8] 王晓璐,黄大字. 节能多孔砖墙体热工性能的数值计算及应用分析[J]. 四川建筑科学研究,2010(4):275-280