

干挂石材幕墙传热性能的三维数值研究

王晓璐¹, 杨建林², 吴恩¹, 康於鑫¹, 殷敏豪¹

(1. 金陵科技学院机电工程学院, 江苏 南京 211169; 2. 南京航空航天大学航空宇航学院, 江苏 南京 210016)

摘要:背栓式干挂石材幕墙传热在国内高层建筑中应用日益广泛,但其尺寸庞大、结构复杂的特点使得此类墙体的稳态热工性能实验数据难以测得,国家规范图集中也未列出。在结构复杂的空间内采用源项协同和网格映射方法生成了计算网格;分析发现了幕墙石材由于空气夹层较厚且内部存在多个形状复杂的零件,内部空气在夹层两侧温差较大时处于紊流状态,计算结果表明辐射因素必须考虑;揭示了幕墙空气层的温度及速度分布特点。

关键词:干挂石材幕墙;热工参数;场协同;热辐射

中图分类号: TU55; TU111

文献标识码: A

文章编号: 1672-755X(2019)03-0045-06

Three-dimensional Numerical Study on Heat Transfer Performance of Dry-hung Stone Curtain Wall

WANG Xiao-lu¹, YANG Jian-lin², WU En¹, KANG Yu-xin¹, YIN Min-hao¹

(1. Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China;

2. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The heat transfer of the back bolt dry-hung stone curtain wall is increasingly widely used in the high buildings in China, but its large size and complex structure make it difficult to measure the steady thermal performance and collect the test data of this kind of wall which has not been listed in the national standard chart. In this paper, in the complex space, the source term synergy and grid mapping method are used to generate the grid. Through comparison and analysis, it is found that the air layer in the curtain wall is different from the air layer in the common hollow brick by the numerical analysis. The internal air is in a turbulent state because the temperature difference between the two sides of the interlayer and there is a large number of complex parts inside. The calculation results show that the radiation factor must be considered in the case. This paper reveals the characteristics of the temperature and velocity distribution of the air layer of the curtain wall.

Key words: dry-hung stone curtain wall; thermal parameters; field synergy; thermal radiation

在国家经济腾飞和强大制造实力的支撑下,越来越多的高档城市公共建筑外墙构造采用外保温干挂石材系统,这种外墙结构具有外面装饰美感效果好、结构坚固、保温性能强、可进行工业化生产等优点,并被逐渐推广。背栓式干挂石材幕墙是吸收了国外新技术后形成的较好的干挂石材幕墙技术,填补了我国

收稿日期: 2019-07-04

基金项目: 江苏省自然科学基金面上研究项目(BK20151099)

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

传统石材幕墙设计中的空白,具有较好的安全性、可更换性及耐久性。但由于其体系庞大、结构复杂,在现有的防护热箱测量装置 $1.5\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ 的测量空间中,无法构建出石材幕墙、内部的钢支架系统、内部的砖墙以及外部的保温材料等构造复杂的外墙系统;将其砌筑成四周封闭的待测墙体养护 15 d,再吊装到防护热箱中也是很困难的,测出其热工参数更是难以做到。在现有标准及规范中^[1],均未列出此类墙体结构的热阻等基础热工性能,这种状态已经不能与干挂石材幕墙的应用现状相适应。在目前国内外文献中^[2-3],也极少有此类墙体结构热工性能研究的相关报道,已有的文献计算时并未将幕墙石材实际装配用的零件考虑在内建成三维计算模型,也未计入辐射的影响^[2]。为了填补这方面空白,本文利用三维数值传热的方法^[4-5],计算了干挂石材幕墙内温度热流分布,得出了墙体的基础热工参数。

1 模型结构与计算方法

1.1 幕墙结构及计算单元的选取

图 1 表示了背栓式干挂石材幕墙总体结构和节点情况。图 1(a)为干挂石材幕墙布置结构图。由于外墙是整体连续的,其中单块石材是 $600\text{ mm} \times 950\text{ mm} \times 25\text{ mm}$,背后有四个栓孔。幕墙外面采用天然石材花岗岩。花岗岩因不含碳酸盐、吸水率小、抗风化能力强,具有很高的抗压强度、耐磨性和耐久性。方形立柱截面尺寸是 $140\text{ mm} \times 60\text{ mm}$,厚度是 4 mm ;横梁角钢 $50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$,采用的钢材材质均为国产优质 Q235-B,采用热浸镀锌防腐处理^[2]。在角钢横梁上按指定间距焊接小角钢,用于挂钩卡紧定位。挂钩采用铝合金材料,表面经氧化处理,每块石板背后有 4 个背栓,采用优质不锈钢材料生产,常用规格 M6、M8。由图 1(b)所示,石板背栓螺栓与铝合金挂钩拧紧,依靠挂钩将石板悬挂在横梁的小角钢,石板间隙 8 mm 填入橡胶密封胶条后打耐候硅酮密封胶。石材幕墙基体墙是 60 mm 挤塑聚苯板加 240 mm 烧结页岩多孔砖及内外抹灰层,花岗石板与页岩砖墙外保温层之间形成空气夹层,上述立柱、横梁角钢、小角钢、铝合金挂件均在该空气夹层中。

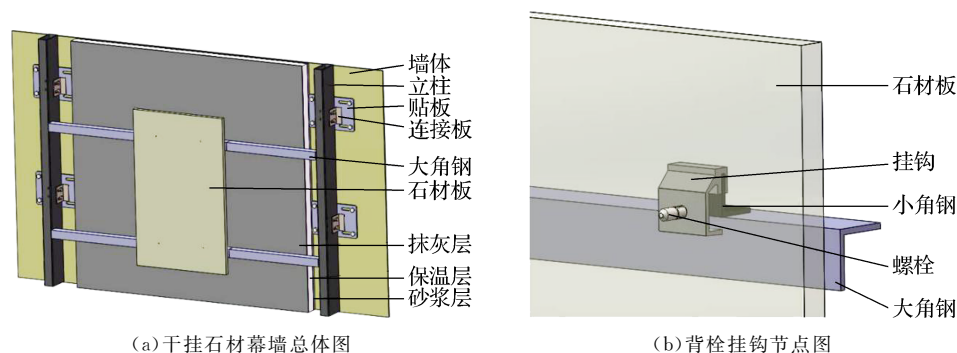


图 1 背栓式干挂石材幕墙结构图

为了使计算方便,计算单元正面取一块石材面积的二分之一,尺寸是 $300\text{ mm} \times 950\text{ mm}$,计算单元侧面的石板、空气间层总厚度是 125 mm ,背后的页岩砖基体墙部分的厚度是 345 mm 。

1.2 计算方程与边界条件

计算单元中,石材、金属等固体应满足固体导热微分方程。夹层中空气满足质量守恒、动量守恒与能量守恒方程如下^[6]:

空气夹层两侧的花岗石内表面与抹灰层外表面之间存在辐射换热,计算模型中需考虑辐射换热。

参照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通用的实验条件,分别取两侧空气温度差 $\Delta t = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$,计算模型两侧均为第三类边界条件。花岗石外侧空气温度取 $t = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$,表面传热系数 $h_o = 25\text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$ 。墙体内侧空气温度分别取 $t = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$,表面传热系数 $h_i = 8.7\text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$ ^[7]。

1.3 求解方法的确定

由于空气夹层厚度较大,需对其进行流态的校核。在墙体两侧空气温度差 $\Delta t = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,先假定空气

流态是紊流,经数值计算后得到空气夹层两侧温度差 $312.1 - 308.7 = 3.4(^{\circ}\text{C})$,空气层厚度为 100 mm 。此时夹层中格拉晓夫准则数:

$$Gr = \frac{g\beta\Delta t L^3}{\nu^2} = 3.85 \times 10^5$$

可见空气夹层中已经形成紊流,前述假定正确。按照此方法分别检验温差 $\Delta t = 30^{\circ}\text{C}$ 、 20°C 、 10°C 时夹层中的格拉晓夫准则数,得其流态分别为紊流、层流和层流。

采用有限容积法对上述方程进行数值计算,采取源项协同和网格映射方法生成计算网格。四种温差情况下,经格拉晓夫准则数验证后, 40°C 与 30°C 温差情况应用紊流 $k-\epsilon$ 两方程模型, 20°C 与 10°C 温差情况下应用层流 Laminar 模型,速度压力耦合选用 SIMPLEC 算法,压力离散项采用 PRESTO! 格式,采用 S2S 辐射换热模型,动量、能量、紊流动能、紊流扩散率等物理量的离散均选取二阶迎风格式。为保证精度,迭代过程的能量松弛因子设为 0.9 。

图2进行了网格无关性验证。可见单元总数约为248万时努赛尔数已经收敛,仿真结果具有高可信度。

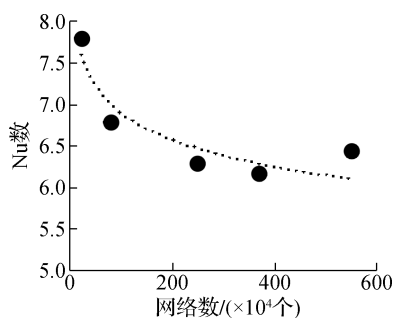


图2 网格无关性检验

2 计算结果分析

2.1 热工参数

石材幕墙空气夹层的热阻及当量导热系数,与墙体两侧温度差、辐射传热量以及墙体内部空气夹层的厚度等因素密切相关,所以不同情况下它们并非定值。图3表示计入辐射和不考虑辐射两种情况下,墙体两侧取不同温差时的热流值;图4则表示辐射热流占总热流的百分比。从图3和图4可以看出,不同温差下,幕墙计入内部辐射时的热流均明显大于不计内部辐射时的热流,且辐射换热的热流占总热流的比例为 $17\% \sim 24\%$ 。因此该类型墙体在进行传热仿真时必须考虑辐射。

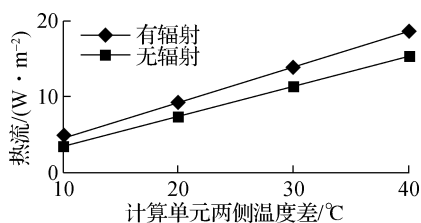


图3 幕墙两侧不同温差下的热流比较

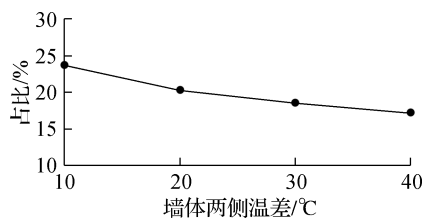


图4 辐射热流占总热流百分比

由计算结果得知墙体两侧表面平均的热流密度 $q = 18.06\text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 传热系数:

$$K = \frac{18.06}{40} = 0.452\text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$$

优于不加外保温层的同类墙体^[7], 传热总热阻是 $2.215\text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$, 根据相关手册查得该幕墙基体墙各种材料的参数, 计算得基体墙总导热热阻是 $1.903\text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$, 扣除整体幕墙内外两侧表面对流换热热阻、基体墙热阻^[8-9]、石材热阻后, 该石材幕墙空气夹层的当量导热热阻是:

$$2.215 - \frac{1}{8.7} - \frac{1}{25} - 1.903 - \frac{0.025}{2.91} = 0.148 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$$

空气层的当量导热系数:

$$\lambda_e = \frac{0.1}{0.148} = 0.674 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$$

由此可见,在空气间层尺寸增大时,空气层热阻变化不大^[10],但受紊流和辐射的共同作用,空气夹层内的对流换热得到强化,空气层的当量导热系数高于夹层厚度较小情况下的规范数值^[11]。另外在不计空气夹层辐射情况下,空气夹层的当量导热热阻 $0.593 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$,空气层的当量导热系数 $0.169 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$,导热热阻略大于文献中双面铝箔 60 mm 厚度时空气间层的热阻^[11]。

挂钩、小角钢、角钢等金属构件在传热过程会起到热桥作用,为简化计算,在不计石材幕墙中辐射情况下观察其影响。整体幕墙两侧温差 40°C 时,由数值计算得出,墙体中平均热流密度是 $15.09 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,空气夹层两侧温度差 9.37°C 。而不计热桥作用,按导热、对流综合传热过程,用试差法求解,得出墙体中平均热流密度是 $14.52 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,空气夹层两侧温度差 9.7°C ,两者热流密度相差约 4%。如进一步考虑幕墙架构中的立柱、贴板、连接板等的热桥作用,以及在这些构件处保温层的间断情况,热流密度差别会更大。

2.2 温度分布

图 5 是幕墙夹层单元三维温度分布图,从总体上看,由于保温材料及多孔页岩砖的热阻和尺寸较大,故温度降低在这些材料区域内较明显,而石材及空气夹层中温降较小。由幕墙夹层有、无辐射两种情况下的三维温度分布图可以看出,在辐射的影响下,空气夹层两侧的温差明显小于无辐射情况。

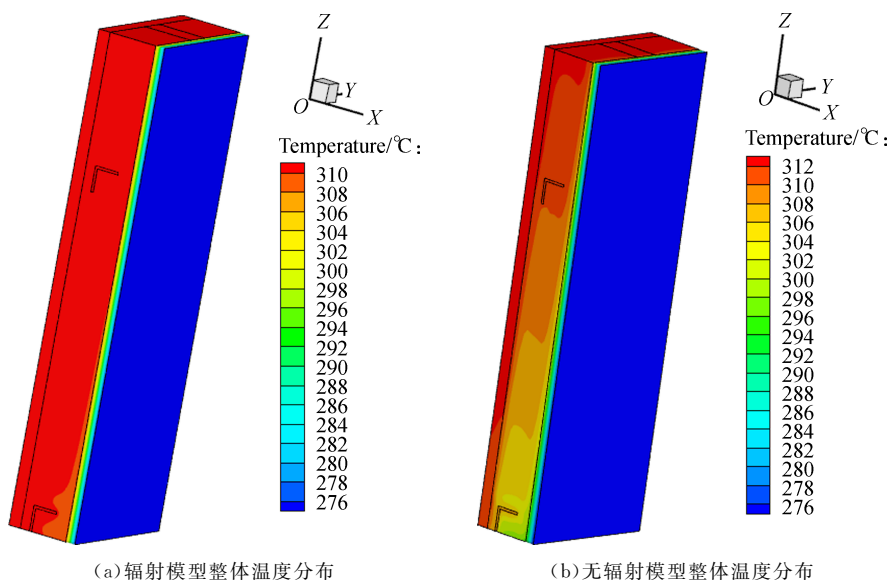
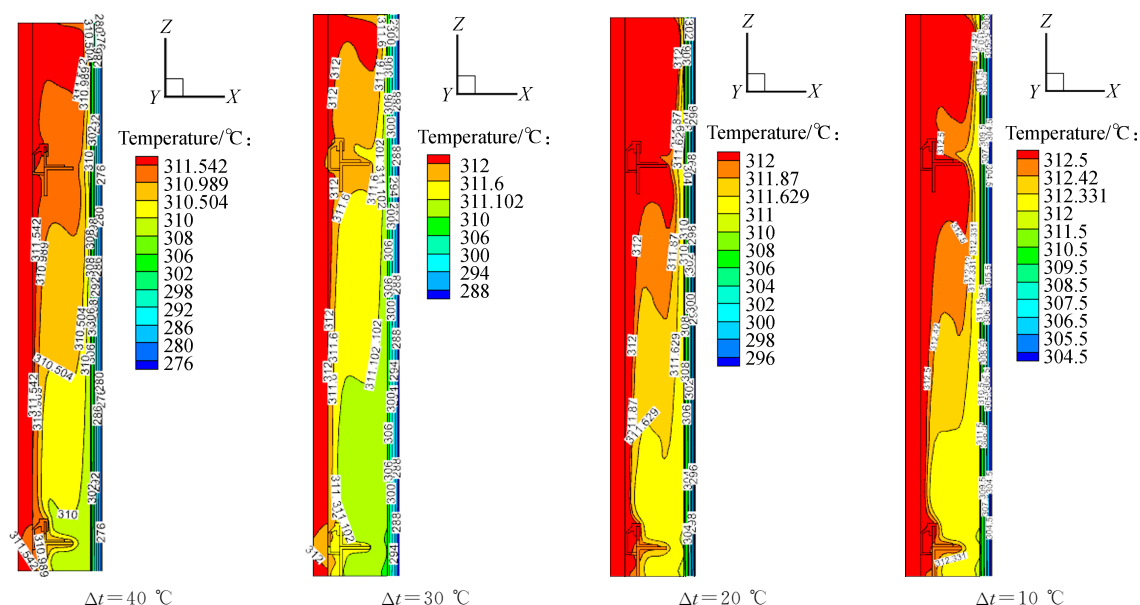


图 5 幕墙夹层单元三维温度分布图

图 6 是不同温差下主要切面 $y=150 \text{ mm}$ 处温度分布云图。可以看到,在空气的夹层内沿冷热壁面各自形成了自然对流边界层,温度差较小致使边界层狭窄,冷热边界层未相互接触。由于热空气集中于夹层的上部,冷空气集中于夹层的下侧,在空气流动微弱的中心区域,从下向上形成很小的温度梯度^[12-13]。

在长度较长的单元下部空气层区域,温度分布较简单,只是由于挂钩、小角钢的导热作用,横梁角钢的温度高于夹层内空气温度。在单元上部空气层区域,挂钩、角钢对温度升高影响较明显。由于挂钩的热桥作用,与上下挂钩相对应的石材温度均有一定的降低,与此两零件相对应的空气温度有一定升高。另外,由于挂钩、小角钢、角钢等金属构件的热桥作用,在贴近这些零件的石材处空气吸热对流效应较强。

图6 不同温差下主要切面 $y=150\text{ mm}$ 处温度分布云图

2.3 流速分布

沿 Y 坐标方向,取单元正中间切面得到不同温差情况下速度分布云图(图7),周期性设置的角钢并未完全阻断边界层,但也削弱了边界层的厚度。夹层计算高度内空气的流动基本是分成两个环流区域,各区域内环流方向分布明显。由于夹层内空气是自然对流速度均较低,速度最大值是 $0.14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,主要集中在两侧竖直壁面,夹层中心速度极小。另外,随着温差的减小,可以看到空气层内气体整体流速在减小。当温差从 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 到 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$,即流态从紊流转变为层流时,整体速度下降十分明显^[14-15]。

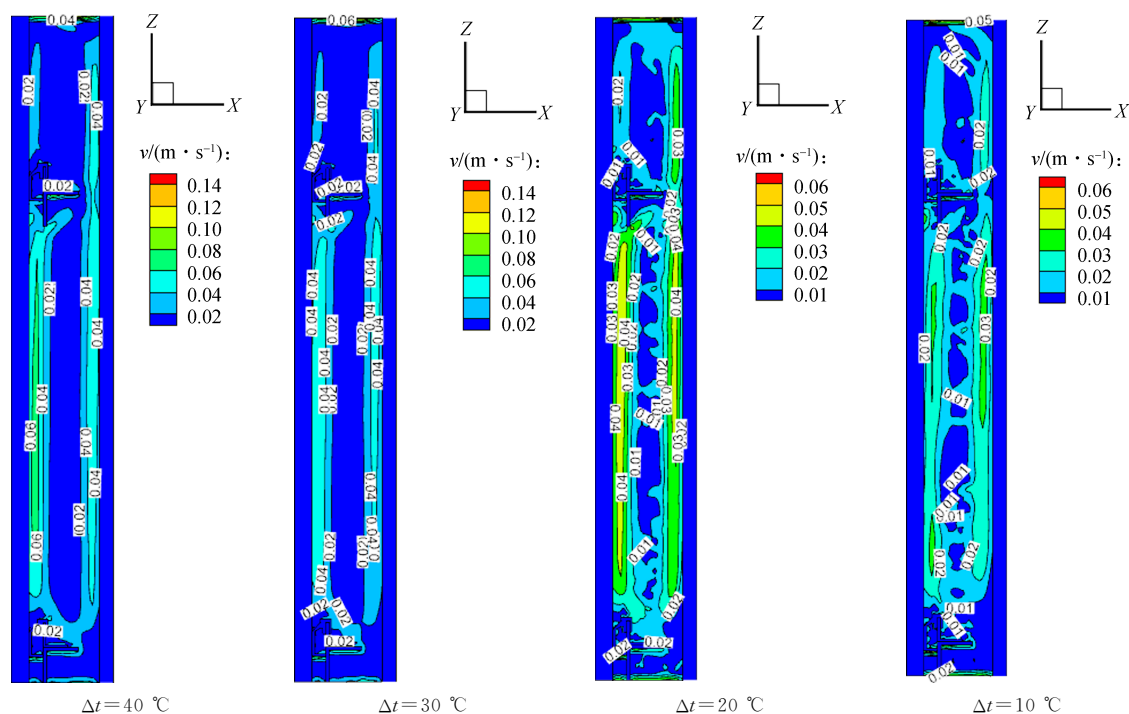


图7 不同温差下主要切面速度分布云图

3 结 语

对于具有干挂石材幕墙形式的带空气夹层的建筑结构,大型数值计算可很好地解决对流、导热和辐射三种热量传递方式综合作用时的耦合计算问题,具有很好的适应性和计算精度,能有效克服实验周期长、成本昂贵的问题。

干挂石材幕墙空气间层尺寸较大,其中空气流态存在层流和紊流两种状态。在墙体两侧温差较大情况下,紊流状态时会产生一定对流换热增强化的趋势。

干挂石材幕墙基体墙的热阻较大,即使在温差较小情况下,空气夹层中的辐射换热量也达到总换热量的20%左右,辐射换热不可忽略。可在空气夹层两侧表面设置铝箔层来削弱辐射传递过程。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ 133—2013:金属与石材幕墙工程技术规范[S]. 北京:中国标准出版社,2013
- [2] 何景林. 石材幕墙的设计及施工应用[J]. 广东建材,2009(12):91—94
- [3] PANAGIOTA G, CHRISTOPH R, DAVID H, et al. Estimation of temperature set points and heat transfer coefficients among residential buildings in Denmark based on smart meter data[J]. Building and Environment, 2018(7):125—133
- [4] MING J L, ZHOU W J, WEI J J, et al. 3D numerical simulation of heat and mass transfer of fin-and-tube heat exchanger under dehumidifying conditions[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 127(12):597—610
- [5] 王晓璐, 徐雷, 李鸿秋, 等. 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[J]. 金陵科技学院学报, 2018, 34(1):45—49
- [6] 陶文铨. 数值传热学[M]. 2版. 西安:西安交通大学出版社, 2002
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50019—2012:采暖通风与空气调节设计规范[S]. 北京:中国计划出版社, 2012:144—154
- [8] LONG J B, A Y G, SUN H F. Thermal insulation performance of a Trombe wall combined with collector and reflection layer in hot summer and cold winter zone[J]. Energy & Buildings, 2018, 171(14):144—154
- [9] KESTUTIS M, VIDMANTAS D, ANDRIUS B, et al. Influence of EPS, mineral wool and plaster layers on sound and thermal insulation of a wall: a case study[J]. Applied Acoustics, 2018, 137(9):62—68
- [10] 吴日辉. 建筑石材幕墙节能研究[J]. 现代装饰(理论), 2011(8):139—142
- [11] 中华人民共和国建设部. GB 50176—2016:民用建筑热工设计规范[S]. 北京:中国标准出版社, 2016
- [12] GAO Y, FAN R, ZHANG Q L. Building dynamic thermal simulation of low-order multi-dimensional heat transfer[J]. Journal of Central South University, 2014(1):293—302
- [13] DU C F, BIAN M L. Numerical simulation of fluid solid coupling heat transfer in tunnel[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2018, 12(9):117—125
- [14] CHEN H T, HSIEH Y L, CHEN P C, et al. Numerical simulation of natural convection heat transfer for annular elliptical finned tube heat exchanger with experimental data[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018(8):541—554
- [15] VIMAL K, SUNEET S, ATUL S. Investigation of convective heat transfer phenomena in differentially-heated vertical closed cavity: whole field experiments and numerical simulations[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2018, 99(12):71—84

(责任编辑:湛 江)