

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2016.05.002

内置遮阳百叶外循环双层通风幕墙 传热与流动特性研究

王志勇^{1,2}, 杨顺富¹

(1. 湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007; 2. 中南大学 能源科学与工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 基于内置遮阳百叶的外循环双层通风幕墙三维物理模型, 利用 WINDOW 软件计算出内外幕墙的材料属性, 然后采用 FLUENT 软件, 使用太阳加载模型模拟双层通风幕墙热通道内的温度场和速度场, 得到热通道内的温度和流动特性, 并且计算出热通道的动态隔热效率。研究表明, 热通道内的速度场和温度场以耦合的方式影响双层通风幕墙的热工性能。

关键词: 双层通风幕墙; 热工性能; 太阳加载模型

中图分类号: TU111.4

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2016)05-0006-06

Research on Heat Transfer and Flow Properties of External DSF with Built-in Shading Shutters

WANG Zhiyong^{1,2}, YANG Shunfu¹

(1. School of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;

2. School of Energy Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Based on 3D physical models of the external double skin facade (DSF) with built-in shading shutters, the material properties of the interior and exterior skin facades can be worked out by using WINDOW software. The simulation of solar loading model of the temperature field and velocity field, which can be found in the hot channel of double skin facades, can be achieved by using FLUENT software, thus obtaining the temperature and flow properties and the dynamic insulation efficiency of the hot channel. The study shows that the temperature and velocity distribution in hot channels, both working in a coupled manner, affect the the insulation performance of double skin facades.

Keywords: double skin facade (DSF); thermal performance; solar loading model

0 引言

双层通风幕墙 (double skin facade, DSF) 是一种既能满足建筑美学又可节约建筑运行能耗的新型幕墙系统。DSF 有内、外两层玻璃, 内层和外层幕墙之间有一定间距, 中间是空气流通的热通道, 热通道内

装有遮阳百叶阻挡太阳辐射。根据通风方式的不同, DSF 可分为外循环式和内循环式。外循环式幕墙的内层幕墙封闭, 外层幕墙的上下方设有进出风口, 热通道内的空气与室外空气相通, 通过循环可以将热通道内的热量带出到室外, 此构造是目前广

收稿日期: 2016-07-28

基金项目: 湖南省教育厅科学研究基金资助重点项目 (13A001), 湖南省研究生科研创新基金资助项目 (CX2015B570)

作者简介: 王志勇 (1978-), 男, 山东济宁人, 湖南工业大学副教授, 中南大学博士生, 硕士生导师, 主要研究方向为建筑节能技术, E-mail: zywang668@126.com

泛采用的幕墙形式。DSF自20世纪90年代引入中国以来,已经在建筑领域中广泛应用,但是其节能性一直没有达到预期的效果。DSF的热通道内存在复杂的耦合传热过程,室内外环境参数以及DSF的结构参数都会对DSF的热工性能产生显著影响,进而影响其节能效果。目前,国内外学者多采用数值模拟方法进行DSF的热工性能研究,其中以计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)方法最为普遍。Gan G. H.^[1]采用CFD模拟预测DSF的对流传热特性、热阻及传热系数。H. Manz等^[2]利用光谱光学模型与CFD模型耦合的方法,进行DSF的物性分析和优化设计。H. El-Sadi等^[3]运用CFD模拟,指出DSF热通道内的气流组织存在非常复杂的涡流,而且进口处的热流量和气流速度对热通道内的气流速率存在显著影响。A. Guardo-Zabaleta等^[4]通过CFD模拟了不同结构参数和运行参数对DSF节能性的影响,指出对DSF的太阳辐射得热量影响最大的因素是玻璃的光学性能,同时,增大热通道的长宽比可以减少太阳辐射得热量。刘猛等^[5]利用CFD方法建立箱体式“呼吸”单元物理模型,研究了夏季工况不同太阳辐射强度、通风腔宽度以及遮阳装置在不同位置时的DSF综合传热系数。王汉青等^[6]采用窗户系统模拟程序WIS和CFD相结合的方法,对机械辅助DSF的热工性能进行模拟分析,提出了降低机械辅助DSF的太阳能得热因子的方案。曾臻等^[7]提出适用于热压与风压共同作用的DSF的CFD模拟方法,并实验验证了该模拟方法的准确性。

DSF的传热过程复杂,影响因素多,是一种典型的非线性问题。目前DSF的研究主要还是针对某些特定因素,且通常采用过分简化的假设条件,如忽略辐射效应,将太阳辐射量以恒定负荷的形式加入到模型当中,难以获得比较满意的预测结果。本文建立了内置遮阳百叶的外循环DSF的三维模型,采用六面体网格以提高计算精度。同时,采用WINDOW7.2和FLUENT软件相结合的方法对DSF热通道内的温度场和速度场进行模拟分析。

1 物理模型及边界条件

1.1 物理模型

室内、外环境时刻影响DSF的换热,进出风口的挡雨装置也会改变气流的方向,增加气流运动过程中的阻力。为了准确计算出热通道内的非稳态热特性,尽可能真实地反应热通道内的气流状况,本文建立三维物理模型,并且在进出风口设置铝制挡

雨百叶,叶片向外倾斜 45° ,如图1所示。

优化模拟计算域,确保模拟过程中进、出风口的 airflow 能够充分发展,并且在不影响模拟结果的前提下减少计算量。对于外循环DSF,热通道与室内环境无气流交换,建模时可以忽略室内区域,对内侧玻璃幕墙设置合理的边界条件即可,选取热通道和部分室外大气区域作为计算域,如图2所示。

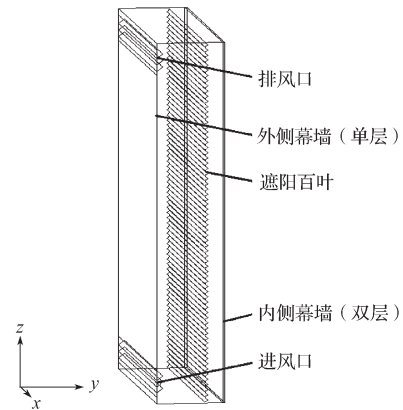


图1 DSF三维物理模型

Fig. 1 3D physical model of double skin facades

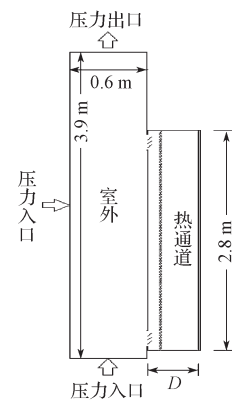


图2 模拟计算域

Fig. 2 Numerical computational domain

物理模型朝向为南向,整体高度为2 800 mm,宽1 800 mm,2层幕墙之间的距离为400 mm,进出风口高度均为200 mm,遮阳百叶距外侧幕墙100 mm,叶片倾角为 45° 。外侧幕墙采用8 mm厚单层浮法玻璃,内侧幕墙采用6+12+6 mm双层中空Low-E玻璃,内、外幕墙的表面温度恒等于各自对应的空气温度。

采用WINDOW7.2软件计算出内、外幕墙的物性参数,遮阳百叶与挡雨百叶采用铝制材料,墙体为保温隔热材料,其具体参数见表1。本文假设空气为不可压缩牛顿流体,其密度变化满足 Boussinesq 假设。

表1 双层通风幕墙材料的物性参数

Table 1 Physical parameters of double skin facade

材料名称	厚度 / mm	密度 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	定压比热 / ($\text{J} / (\text{kg} \cdot \text{K})$)	导热系数 / ($\text{W} / (\text{m} \cdot \text{K})$)	折射率	漫射分数	发射率
单层玻璃	8.0	2 500	810	1.000 0	1.50	0.05	0.84
双层玻璃	6.0+12.0+6.0	2 000	670	0.065 2	1.50	0.05	0.81
遮阳百叶	0.2	2 700	920	203.000 0	1.44	0.50	0.80
墙体	100.0	80	1 220	0.050 0	1.53	0.90	0.63

1.2 边界条件

本研究选取湖南省株洲市为研究地, 该地属于夏热冬冷地区, 模拟时间段选在 2015 年 9 月 10 日的上午 7 时到晚上 19 时。DSF 的传热及气流组织是一种非稳态现象, 进行数值模拟时需要时刻更新环境参数, 计算量大并且对计算机硬件要求较高。本文对实际情况进行简化, 将模拟时间段等分成 13 个不同时刻, 各时刻的室外空气温度通过温度传感器实测获得, 室内空气温度借助空调维持在 $26\text{ }^{\circ}\text{C}$, 具体温度值如表 2 所示。

表 2 7—19 时各时刻室内外空气温度值

Table 2 Indoor and outdoor temperature values from 7 a.m. to 19 p.m.

时刻	7	8	9	10	11	12	13
室外空气温度 / $^{\circ}\text{C}$	26.5	28.8	30.9	32.5	33.7	34.5	35.3
室内空气温度 / $^{\circ}\text{C}$	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0
时刻	14	15	16	17	18	19	
室外空气温度 / $^{\circ}\text{C}$	34.5	36.2	33.3	32.2	31.0	30.2	
室内空气温度 / $^{\circ}\text{C}$	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	

将室外区域的来流边界和下边界面定义为压力入口边界, 上边界面定义为压力出口边界, 内、外幕墙采用固定温度的固体壁面边界条件, 热通道上下和左右壁面设置成绝热壁面。

2 数学模型

2.1 湍流模型

DSF 的热通道空间狭小, 内遮阳百叶将热通道分成内外 2 部分。受到风压和热压的作用时, 通道内气流会受到极大地扰动, 流动呈不稳定状态, 同时存在层流和湍流, 流动特性变化复杂。本次模拟采用重正化群 (RNG $k-\varepsilon$) 模型, 它能够顺利地应对高应变率和流线弯曲程度较大的流动。该模型的 k 方程和 ε 方程与标准 $k-\varepsilon$ 模型非常相似。

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + \rho \varepsilon, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] +$$

$$\frac{C_{1\varepsilon}^* \varepsilon}{k} G_k + C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}. \quad (2)$$

另外

$$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t, \quad (3)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (4)$$

$$C_{1\varepsilon}^* = C_{1\varepsilon} - \frac{\eta(1-\eta/\eta_0)}{1+\beta\eta^3}, \quad (5)$$

$$\eta = (2E_{ij} \cdot E_{ij})^{1/2} \frac{k}{\varepsilon}, \quad (6)$$

$$E_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right). \quad (7)$$

式中 (1) ~ (7) 中: ρ 为密度;

u 为流速, u_i , u_j 为 u 的分量 (i, j 代表坐标方向);

x 为坐标参数, x_i , x_j 为 x 的分量 (i, j 代表坐标方向);

t 为时间;

G_k 为因平均速度梯度产生的湍动能 k 的产生项;

$C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, C_μ 为经验常数;

α_k , α_ε 分别为湍动能 k 和耗散率 ε 对应的 Prandtl 数;

μ 为动力黏性系数, μ_t 为湍动黏性系数, μ_{eff} 为湍流有效黏性系数;

η 为动力黏度;

E_{ij} 为时均应变率。

本研究中, 相关参数的取值为: $C_\mu=0.084 5$, $\alpha_k=1.39$, $C_{1\varepsilon}=1.42$, $C_{2\varepsilon}=1.68$, $\eta_0=4.377$, $\beta=0.012$ 。

值得注意的是, RNG $k-\varepsilon$ 模型只是针对充分发展的湍流流动, DSF 热通道的间距和高度有限, 部分湍流并未充分发展, 所以模拟过程中将 RNG $k-\varepsilon$ 模型与壁面函数法配合使用, 以准确地模拟热通道内气流组织状态。

2.2 辐射模型

DSF 具有内外 2 层玻璃幕墙, 涉及到半透明介质内的辐射, 所以选用离散坐标辐射模型 (discrete-ordinates radiation model, DO 模型)。该模型对于任何光学厚度都适用, 考虑了散射的影响, 而且允许出现镜面反射和半透明介质内的辐射, 还可以使用灰

带模型进行非灰体辐射计算。

照射到DSF上的太阳辐射由DO模型中的太阳计算器计算得出,只要确定地点和时间,再输入网格的三维方向和日照因子,就可以计算出当地的太阳直射辐射、垂直和水平面的太阳散射辐射以及太阳位置。表3中列出了模拟时段内株洲地区的太阳辐射强度和太阳位置参数。

表3 株洲地区的太阳辐射参数

Table 3 Solar radiation parameters in Zhuzhou City

时刻	太阳直射辐射 / ($W \cdot m^{-2}$)	太阳散射辐射 / ($W \cdot m^{-2}$)		太阳高度 角 / ($^{\circ}$)	太阳方位 角 / ($^{\circ}$)
		垂直面	水平面		
7	398.9	52.5	40.9	10.4	-90.6
8	712.1	88.7	73.1	23.6	-83.1
9	830.9	94.1	85.3	36.1	-74.9
10	887.6	88.6	91.1	48.8	-63.8
11	915.9	79.9	94.0	59.7	-45.8
12	927.7	73.5	95.2	66.7	-16.1
13	926.6	74.3	95.1	65.8	21.5
14	912.2	81.4	93.6	58.0	48.8
15	879.9	90.0	90.3	47.0	65.7
16	815.6	94.3	83.7	34.2	76.0
17	676.7	85.5	69.4	21.1	84.5
18	288.7	38.2	29.6	8.0	91.7
19	0	0	0	-	98.7

注:表中“-”表示该时刻太阳已经落到水平线以下。根据太阳方位角的定义,正南向的太阳方位角为 0° ,正东向的太阳方位角为 -90° ,正西向的太阳方位角为 90° 。

2.3 网格划分

网格质量对CFD计算的准确性影响较大,直接关系到计算结果的精度和收敛的难易程度。为了得到较精确的计算结果,采用分区处理的方法对模型划分为六面体网格。首先将遮阳百叶和进、出口区域分离出来,遮阳百叶的叶片宽度为25 mm,间距仅有20 mm,划分网格时在y方向和z方向划分4个等间距网格。进、出风口处的挡雨百叶叶片宽度和间距均为50 mm,在y方向和z方向分别划分5个和10个等间距网格。对于室外区域,按1.05倍的比例,从外侧幕墙向室外由密到疏划分为等比例网格,如图3所示。

DSF的非稳态热特性主要表现在y方向和z方向上,x方向上各固体层存在少量传热,气流组织之间也会相互影响,但这些并不是影响热特性的主要因素。所以在x方向上对整个计算域均划分为20个等间距网格,与y,z方向网格间距的比值小于20,在不至于引起计算发散的情况下^[5]还能减少网格数量,缩短计算时间。

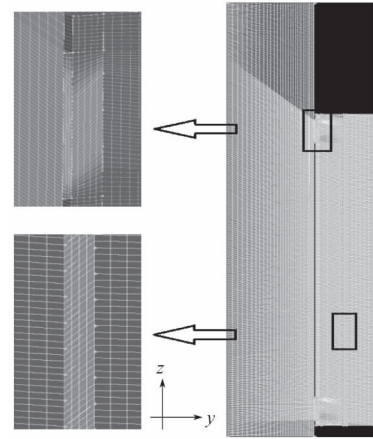


图3 网格划分

Fig. 3 Mesh grid

3 模拟结果与分析

3.1 热通道内温度分布

图4和图5分别是在太阳辐射强度较强烈的时段(10—15时),沿内、外热通道高度方向的温度变化情况。

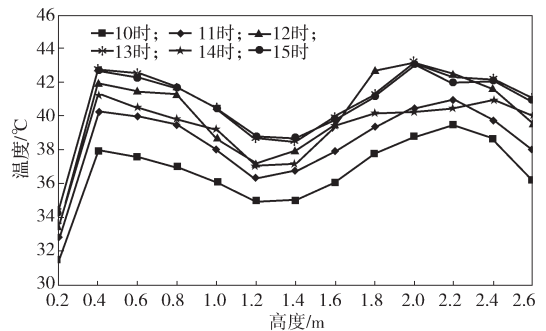


图4 10—15时外侧热通道中心不同高度的温度分布

Fig. 4 Temperature distribution at the different heights of the lateral hot channel center from 10 a.m. to 15 p.m.

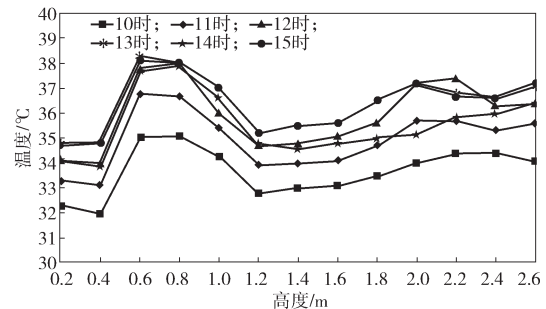


图5 10—15时内侧热通道中心不同高度的温度分布

Fig. 5 Temperature distribution at the different heights of the internal hot channel center from 10 a.m. to 15 p.m.

由图4~5可以看出:在不同时刻,内、外热通道中心不同高度的温度变化趋势相似。

外侧热通道内的空气从进风口处往上,温度先升高再降低,这是因为从进风口以上到1.2 m高度处,

贴着外侧幕墙产生了向下的回流,使遮阳百叶周围出现局部高温。在出风口处,内、外热通道的气体集聚并混合,最后经出风口排出,所以温度有所下降。由于局部高温的影响,内侧热通道下部区域的温度分布与外侧相似,上部区域的空气温度呈增长趋势。

在13时,热通道内温度相对较高,此时内、外热通道能够达到的最高空气温度分别为38℃和43℃。在10时,热通道内的温度相对较低,此时内、外热通道的最高空气温度分别能达到35℃和39℃。热通道顶部与底部之间存在明显的温升,外侧热通道在12时到15时时间段内的温升可以达到6.5℃。内侧热通道相比于外侧有所减小,最大温升为2.5℃,出现在下午15时。

可见,无论是空气温度还是温升,外侧热通道都高于内侧。这是由于内置遮阳百叶对太阳辐射的阻挡作用,百叶叶片将大部分太阳辐射反射回外侧热通道,自身也吸收了一些辐射转换成内部得热,只剩下一小部分太阳辐射透过叶片间隙进入到内侧热通道。在12时,外侧热通道内的太阳辐射强度可以达到1128 W/m²的峰值,而此时内侧热通道的太阳辐射强度仅为400 W/m²左右。

3.2 热通道内速度分布

不同时刻热通道内的速度分布相似,以下午13时的模拟结果为例进行分析。图6为热通道内的速度矢量图。



图6 热通道内速度矢量图

Fig. 6 Velocity vector chart in the hot channel

室外气流从进风口进入,直接通过遮阳百叶叶片的间隙进入到内侧热通道,靠近进风口处的空气在进风口气流的卷吸作用下,产生了指向进风口的速度,因此在热通道中下部和底部产生明显的涡流区。热通道上部受热浮升力影响,气流向上运动,最

终由出风口流出热通道。

在2m以下的热通道区域内,空气处于紊流区,风速大小变化比较复杂,靠近内侧幕墙的风速可以达到1 m/s,而涡流区内的风速基本为0。热通道上部气流逐渐稳定风速大小相对一致,基本保持在0.4 m/s。

3.3 热通道的动态隔热效率

夏季,DSF在满足室内采光的同时,更重要的是阻隔室外的热量进入室内,以避免增加额外的制冷能耗。DSF的隔热性能优劣可以通过动态隔热效率 ε ^[8]来衡量,其计算公式为

$$\varepsilon = \frac{Q_r}{Q_{out}}, \quad (8)$$

$$Q_r = Q_{out} - Q_{in}. \quad (9)$$

式(8)~(9)中: Q_r 表示热通道排出的热量,W;

Q_{out} 表示进入外侧幕墙的总热量,W;

Q_{in} 表示进入室内的总热量,W。

进入室内的总热量可以用进入内侧幕墙的热量来近似代替,根据进入内、外幕墙的总热量就可以计算出各时刻的动态隔热效率,计算结果见表4。

表4 各时刻的DSF动态隔热效率

Table 4 Dynamic insulation efficiency of double skin facades

时刻	动态隔热效率	时刻	动态隔热效率
7	0.02	14	0.91
8	0.41	15	0.92
9	0.69	16	0.76
10	0.83	17	0.59
11	0.91	18	0.89
12	0.94	19	-
13	0.95		

注:19时,进入外侧幕墙的总热量 Q_{out} 为0,内侧幕墙开始向热通道散热,但是根据定义, Q_r 代表的热量是指从外侧幕墙进入热通道,并且可能会进入室内的那部分热量,所以式(8)、式(9)在该时刻并不适用。

由表4可知,在辐射强度较强烈的时段内,动态隔热效率基本能达到90%以上,这说明DSF在夏季具有较好的隔热效果,能够有效地降低室外高温对室内环境的热扰动。

4 结论

1) 内置遮阳百叶的外循环DSF能够有效阻挡夏季太阳辐射,具有较高的动态隔热效率。在辐射强度最强烈的时段,可以将2/3的辐射阻隔在外侧热通道。这对于夏热冬冷地区具有很好的适用性。

2) 热通道的下部区域气流扰动大,风速变化无明显规律。沿高度往上,气流逐渐稳定,风速维持

在 0.4 m/s, 并且伴随温升, 热通道内出现明显的烟囱效应。

3) 本文对模拟计算域和网格划分进行优化, 减少了网格数量和计算量, 通过 WINDOW7.2 软件计算 DSF 内、外幕墙的物性参数, 将计算结果作为 CFD 模拟的源项, 并且引入太阳加载模型来计算进入 DSF 热通道的太阳辐射, 为数值模拟提供了较准确的原始参数。该研究方法能够为后期 DSF 结构参数的优化提供支持。

参考文献:

- [1] GAN G H. Thermal Transmittance of Multiple Glazing: Computational Fluid Dynamics Prediction[J]. Applied Thermal Engineering, 2001, 21(15): 1583-1592.
- [2] MANZ H, FRANK T. Thermal Simulation of Buildings with Double-Skin Facades[J]. Energy and Building, 2005, 37(11): 1114-1121.
- [3] EL-SADI H, HAGHIGHAT F, FALLAHI A. CFD Analysis of Turbulent Natural Ventilation in Double-Skin Facade: Thermal Mass and Energy Efficiency[J]. Journal of Energy Engineering, 2010, 136(3): 68-75.
- [4] GUARDO-ZABALETA A, COUSSIRAT M, VALERO C, et al. CFD Assessment of the Performance of Lateral Ventilation in Double Glazed Facades in Mediterranean Climates[J]. Energy and Buildings, 2011, 43(9): 2539-2547.
- [5] 刘 猛, 龙惟定. 外循环式 DSF 综合传热系数的影响因素研究(I): 夏热冬冷地区夏季工况[J]. 太阳能学报, 2011, 32(5): 639-644
LIU Meng, LONG Weiding. Influence Factors Research on Comprehensive Coefficient of Heat Transfer of External Respiration Double-Skin Facade(I): Summer Working Condition in Summer Hot and Winter Cold Areas[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2011, 32(5): 639-644.
- [6] 王汉青, 王飒枫, 寇广孝, 等. 机械辅助通风外循环双层幕墙热工性能模拟研究[J]. 建筑热能通风空调, 2011, 30(3): 75-77.
WANG Hanqing, WANG Fengfeng, KOU Guangxiao, et al. Simulation Study on Thermal Performance of Mechanically Assisted Ventilated Double Skin Facades[J]. Building Energy & Environment, 2011, 30(3): 75-77.
- [7] 曾 臻, 李晓峰, 李 丞. 针对双层皮玻璃幕墙自然通风的 CFD 模拟计算方法的研究[J]. 太阳能学报, 2013, 34(12): 2095-2100.
ZENG Zhen, LI Xiaofeng, LI Cheng. CFD Modeling Method Study on Natural Ventilation Performance of Double Skin Facade [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2013, 34(12): 2095-2100.
- [8] FRANCESCO G, LORENZA B, MARCO P, et al. Energy Performance Assessment of and Advanced Integrated Facade Through Experimental Data Analysis[J]. Energy Procedia, 2014, 48: 1262-1271.

(责任编辑: 邓光辉)