

文章编号: 1671-6612 (2019) 05-556-06

# 利用 CFD 模拟通风小室壁面结露分布的规律

王 威 姜建中 王 戎 吕 芳

(军事科学院国防工程研究院 北京 100850)

**【摘 要】** 提出了一种在含有湿热源的情况下, 通风对室内温湿度分布和壁面结露分布影响的三维非稳态数学模型。利用 CFD 对该模型进行数值计算, 分析了通风强度对空间及墙体壁面湿度和温度分布的影响; 模拟了不同通风方式下, 室内壁面结露面积的动态发展过程。模拟结果表明, 通风方式对室内空间及壁面的温度、湿度分布和结露形成的影响显著。

**【关键词】** CFD 模拟; 通风; 壁面结露; 温湿度分布  
中图分类号 TU834.2 文献标识码 A

## Using the CFD simulation of the ventilation chamber wall condensation distribution rule

Wang Wei Jiang Jianzhong Wang Rong Lv Fang

(Research Institute for National Defense Engineering of Academy of Military Science PLA China, Beijing, 100850)

**【Abstract】** Under the condition of containing damp and hot source, presents a three-dimensional unsteady mathematical model described with effects of ventilation on distribution of indoor temperature and humidity and surface condensation on walls. Using the CFD software to numerical calculation, this paper researches on effects of the intensity of ventilation on distribution of temperature and humidity in space and on the surface of walls, and simulates the dynamic development process of condensation area of surface on walls under different ways of ventilation. The simulation indicates that the way of ventilation has a big influence on distribution of temperature and humidity in space and on walls surface, as well as the development process of condensation.

**【Keywords】** CFD simulation; Ventilation; Surface condensation; Temperature and humidity distribution

## 0 研究背景

湿度是评价室内空气品质的重要参数, 不仅影响人体的热舒适性, 而且严重制约建筑物的功能发挥<sup>[1,2]</sup>。就人居环境的舒适性而言, 高湿度环境会促使霉菌繁殖、病原体滋生, 继而诱发人体出现哮喘和过敏等症状, 严重威胁居住者的健康; 低湿度环境则引发人体皮肤干燥、眼睛干涩和呼吸道不适, 甚至导致静电的产生, 造成安全隐患<sup>[3,4]</sup>。对一些特殊的建筑而言, 例如手术室、重病房、游泳馆和植物大棚等, 温度和湿度标准的控制至关重要。此外, 墙体、地面及屋顶结露也是建筑所面临的一个严重的问题, 当墙体附近空气的含湿量超出墙体温度相应的饱和含湿量时, 引起墙体壁面结露, 继而导致墙体表面剥落、

发霉、造成围护结构腐蚀, 降低建筑物寿命<sup>[5]</sup>。因此, 研究室内温湿度环境以及墙体结露分布规律具有现实意义。本文着重研究在室内潮湿的环境中, 通风方式对温湿度分布和墙壁结露的影响。

## 1 模型建立

### 1.1 几何模型

模型空间围护结构为中空双层钢化玻璃幕墙, 可忽略壁面的吸湿能力, 方便实验过程中观测壁面结露的情况, 地板和顶棚均设有保温材料, 顶棚开设风口, 与进风口相接的风管上装有变频轴流风机, 通过调节风机频率来模拟不同的通风强度; 模型置于恒温为 20℃ 的实验室内, 可通过模型地板

中央的蒸发式加湿器来调节和模拟加湿工况; 中心截面处布置 12 个温湿度探测元件对空间和壁面进行温度和湿度分布的测定。

实验工况见表 1, 实验模型测点及概要见图 1。

表 1 实验工况

Table 1 Measurement conditions

工况 编号	送风参数		通风强度 (m/s)
	温度 (°C)	湿度 (%)	
1	25.0	72	2.5
2	25.0	72	3.5
3	25.0	72	4.5

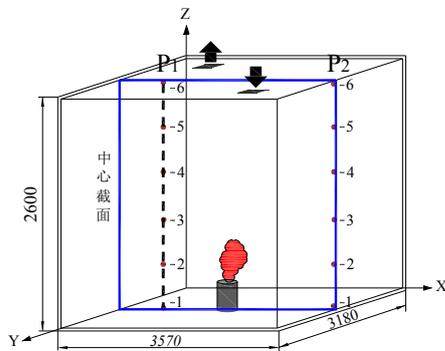


图 1 模型概要与测点布置

Fig.1 Schematic of the model and distribution of the measured points

表 2 模型的边界条件设定结果

Table 2 Boundary condition of the model

边界名称	参数设定
送风口	风速设定 2.5/3.5/4.5m/s, 温度 25°C, 相对湿度 72%, 湿度 0.014kg/kg'
排风口	采用自由出流(Outflow)
壁面	绝湿, 墙壁传热系数 1.86W/m <sup>2</sup> ·K, 顶棚与地面绝热, 室外环境温度 20°C,
湿源入口	产湿量 0.6g/s, 蒸汽温度 90°C

### 1.2 模型假设

建立数学模型前, 需对模型作五点简化假设<sup>[6]</sup>。

(1) 忽略重力场对空气和水蒸气的影响;

(2) 空气和水蒸气均视为不可压缩流体, 密度为恒定值;

(3) 水蒸气从水面蒸发时, 只进行潜热交换, 不考虑显热交换;

(4) 水蒸气在壁面凝结时, 忽略相变过程的放热量;

(5) 壁面结露过程中, 不考虑壁面的吸湿能力。

### 1.3 数学模型

采用 FLUENT 14.0 湍流模块 (Standard  $k-\epsilon$ ) 分析流场特性, 组分输运模块 (Species Transport) 和多相流模块 (Multiphase) 模拟水蒸气在空气中的传质相变过程。其控制方程如下<sup>[7]</sup>:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho u\phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad} \phi) + s$$

式中:  $\phi$  是通用变量,  $\Gamma$  是广义扩散系数,  $s$  是广义源项。

### 1.4 壁面结露的判据

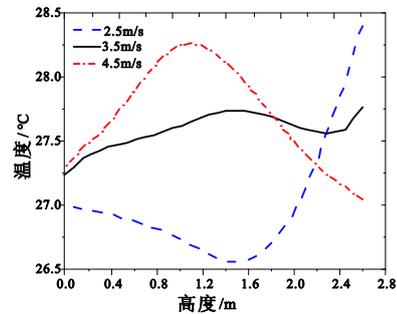
壁面结露的条件: 壁面周围的空气节点绝对湿度  $D_{air}$  大于壁面温度对应的饱和绝对湿度  $D_{wall}$  时, 即认为壁面开始结露;

壁面不结露的条件: 任意  $\tau$  时刻, 壁面周围的空气节点绝对湿度  $D_{air}$  均小于壁面温度对应的饱和绝对湿度  $D_{wall}$  时, 认为壁面不结露<sup>[8]</sup>, 即:

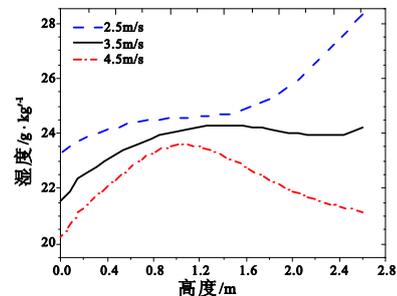
$$\max\{D_{wall}(\tau)\} < D_{air}$$

## 2 仿真与实验结果

### 2.1 温度和湿度分布的仿真结果



(a) 室内温度分布



(b) 室内湿度分布

图 2 不同工况下室内温度和湿度分布曲线

Fig.2 Temperature and humidity distribution of space interior in different cases

图 2 (a) 所示, 通风强度的改变对空间温度的分布规律影响显著, 风速在 2.5m/s 的工况下, 温度随高度的增加呈现出先平缓降低, 后迅速上升的趋势; 风速在 3.5m/s 的工况下, 温度变化相对缓和, 整体呈现出小范围波动的规律; 风速在 4.5m/s 的工况下, 温度分布与工况 1 成截然相反规律, 即温度随高度的增加先升高后降低。

图 2 (b) 所示, 相比壁面湿度变化规律而言, 通风强度的变化则会改变空间内部的湿度分布规律, 即三种通风工况下, 距离地板到空间中央位置附近的区域范围内, 湿度均呈现逐渐增加的趋势; 距离中央位置附近到顶棚的区域范围内, 湿度则开始呈现出不同的变化趋势, 其表现为: 风速为 2.5m/s 时, 湿度随高度的增加而增大; 风速为 3.5m/s 时, 湿度变化趋于平稳; 风速为 4.5m/s 时, 湿度随高度的增加而降低。

2.2 壁面结露的仿真结果与实验对比

图 3 所示为工况 2 时, 试验测量与模拟计算的壁面湿度动态变化比较, 实验时间与模拟时间均为 20 分钟。图示, 实验数据与模拟结果的变化规律是基本一致的, 随着时间的推移, 壁面、顶棚(测点 P<sub>1-6</sub>、P<sub>2-6</sub>)和地板(测点 P<sub>1-1</sub>、P<sub>2-1</sub>)各测点的湿度逐渐趋于平稳, 当测点的湿度等于饱和和绝对湿度值时, 表明开始结露; 当测点湿度超出饱和和绝对湿度值, 表明结露量增加。例如, 测点 P<sub>1-6</sub>、P<sub>2-6</sub>、P<sub>2-5</sub>、P<sub>2-4</sub> 的湿度随着时间的推移不断增大, 当其湿度值分别大于各自的绝对饱和湿度(图中★表示)时, 该点区域开始结露; 当湿度值超过绝对饱和湿度持续增大时, 则表明该点区域的结露量持续增加。测点 P<sub>1-1</sub>、P<sub>2-1</sub>、P<sub>2-2</sub>、P<sub>2-3</sub> 的湿度值虽然随时间推移最后趋于平稳, 但小于各自点的绝对饱和湿度值, 因此不发生结露。

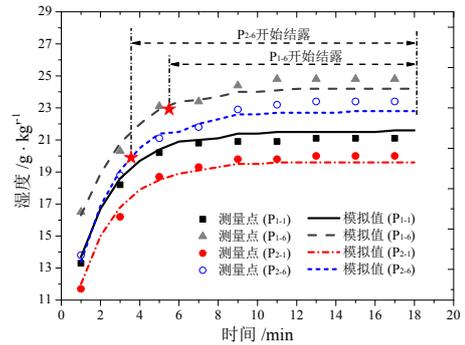
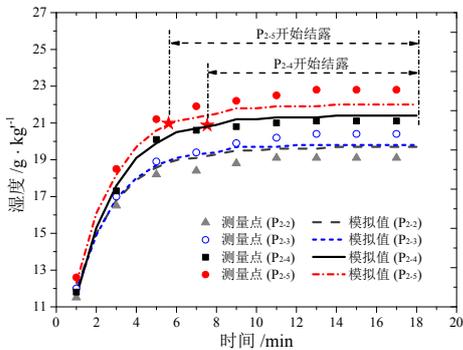
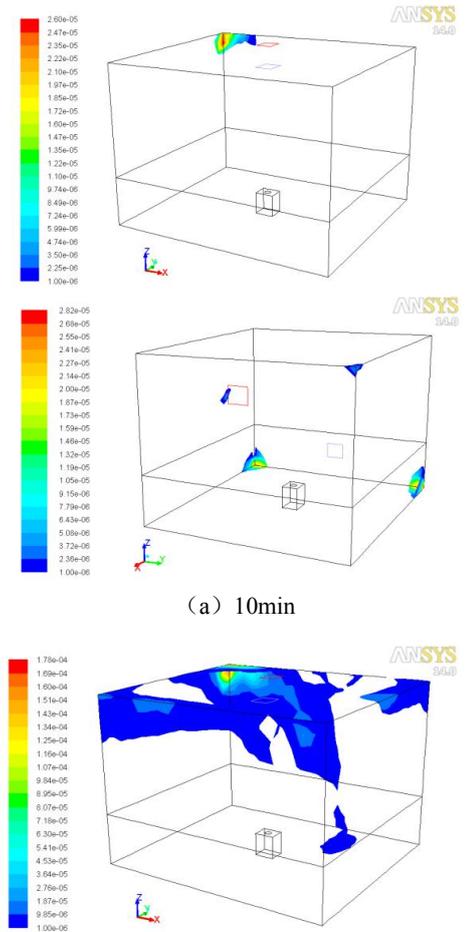


图3 模拟与实测的壁面湿度动态变化比较(工况2)

Fig.3 Comparison between simulated and measured humidity dynamic variations on walls

2.3 两种通风方式模拟结果的对比分析

不改变送风参数的条件下, 利用 Fluent 软件模拟两种不同通风方式下室内壁面结露形成与发展的变化情形, 分析研究气流组织形式对于缓减、改善室内结露情形的作用。



(a) 10min

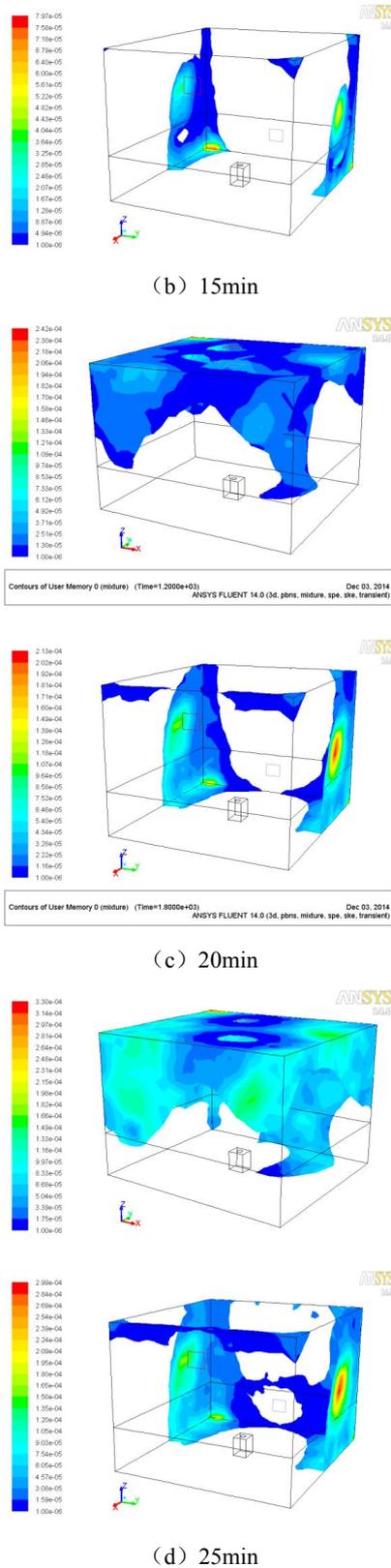


图4 不同通风方式下壁面结露的动态分布 (工况2)

Fig.4 Dynamic variations of condensation distribution on walls in different way of ventilation

图 4 所示为有内湿热源的空间, 工况 2 时两种不同通风方式下壁面结露分布的动态变化模拟图。对比图中 4 个时刻的壁面结露面积可知, 上送上回通风方式对应的结露面积大于上送下回的通风方式; 从壁面结露的分布区域分析, 上送上回的送风方式下, 结露位置开始于四周壁面的交接部位和墙角处, 随着水蒸气的不断产生, 结露面积沿各个壁面开始扩大, 最终布有风口的天花板结露面积最大, 四周墙壁的结露面积由高到低依次减小, 地板结露面积最小; 上送下回的通风方式下, 结露位置开始于布有回风口壁面与左右墙体的交线处, 且墙角地方结露情况严重, 随着水蒸气的不断产生, 结露面积逐渐向两侧墙壁蔓延, 回风口四周和送风口一侧的天花板顶部开始出现结露现象, 靠近回风口的墙角结露加重, 从整体结露分布来看, 布有送风口一侧的墙面基本没有发生结露, 地板结露面积很小。从减小结露风险的角度而言, 对于有内湿热源的房间采用上送下回的通风方式优于上送上回的通风方式。

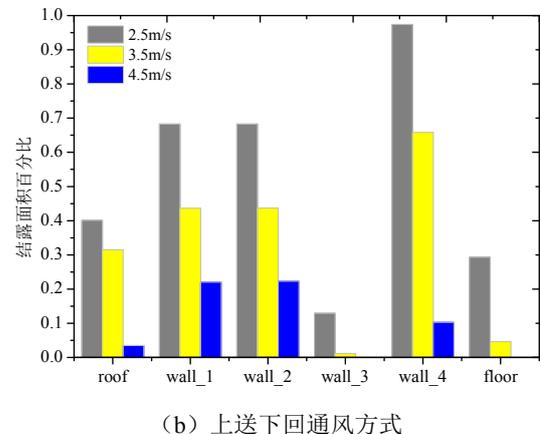
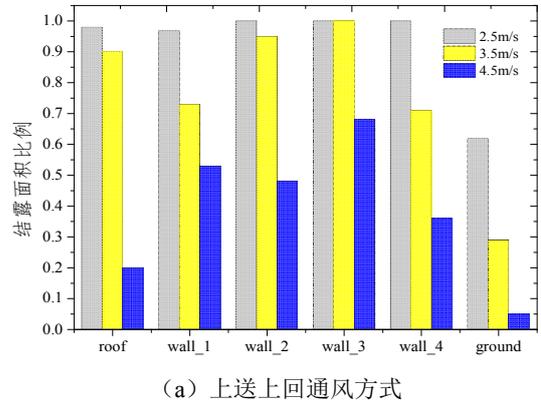


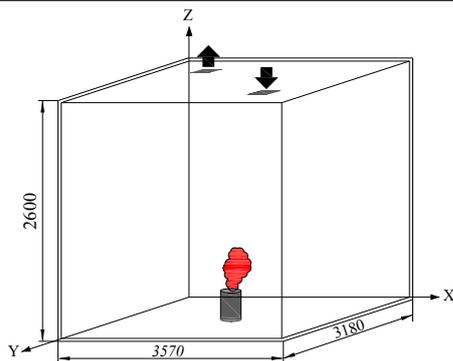
图5 各壁面结露面积所占比值

Fig.5 The percent of condensation area on each wall

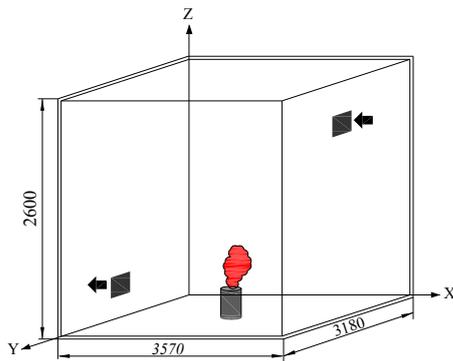
表2 壁面坐标位置

Table 2 The coordinate position of walls

roof	Z=2.6m
wall_1	Y=0
wall_2	Y=3.18m
wall_3	X=0
wall_4	X=3.57m
ground	Z=0



(a) 上送上回通风方式



(b) 上送下回通风方式

图6 通风方式示意图

Fig.6 The percent of condensation area on each wall

图 5 (a) 为上送上回通风方式中, 不同通风强度时各个壁面及屋顶、地板结露面积百分比柱形图。从图中可知, 在相同的通风强度下, 各壁面的结露情形并不完全相同, 随着通风强度的逐渐增加, 各壁面的结露面积都发生明显降低的趋势, 例如通风速度为 2.5m/s、3.5m/s、4.5m/s 时, 地板的结露面积分别为 60%、30%和 5%, 证实了通过改变通风强度可以有效地降低壁面结露的风险。图 5 (b) 为上送下回通风方式中, 不同通风强度时各个壁面及屋顶、地板结露面积百分比柱形图。从图中可知, 通风强度对各个壁面结露面积的大小起决定性作用, 同时各壁面的结露分布区域又有所不

同, 例如风速为 3.5m/s 时, 布有送风口壁面的结露面积最大, 而布有回风口的壁面结露面积最小。随着通风强度的逐渐增加, 各壁面的结露面积都明显降低, 例如通风强度为 2.5m/s、3.5m/s、4.5m/s 时, 送风口一侧壁面的结露面积分别为 96%、65%和 10%, 甚至在回风口一侧壁面的结露现象消失, 同样验证了改变通风强度可以有效地降低壁面结露的风险。

比较图 (a) 和图 (b) 可知, 以通风强度 3.5m/s 为例, 上送上回通风方式下, 顶棚结露面积为 90%, 壁面 1、4 的结露面积约为 70%, 壁面 2、3 结露面积约为 98%, 地板结露面积为 30%; 上送下回通风方式下, 顶棚结露面积为 30%, 壁面 1、2 的结露面积为 40%, 壁面 3 结露面积约为 3%, 壁面 4 的结露面积为 65%, 地板结露面积为 5%。由此可以看出, 相同的通风强度下, 改变通风方式(风口的布置位置)可引起壁面结露面积发生变化, 进而可以寻求最佳的通风方式来降低室内发生结露的风险。

### 3 结论

本文建立数学模型, 并利用 FLUENT 软件进行数值模拟, 研究了通风方式对室内温湿度和壁面结露分布的影响, 通过实验模型的验证和数值模拟计算, 得出以下结论:

(1) 提出的数学模型经 FLUENT 软件计算室内空气温湿度分布后, 与实验模型测量的数据具有一致的变化趋势, 且精度较为理想, 误差在可接受范围之内;

(2) 在通风方式不变的条件下, 改变通风强度可以有效改善室内除湿和结露问题, 通风强度增加, 室内整体湿度水平降低, 壁面的结露面积会相应减小;

(3) 在通风强度不变的条件下, 改变通风方式对于室内壁面结露的情形影响显著, 对于湿气较重的场所, 通过优化通风方式可以有效降低壁面的结露风险;

(4) 从通风角度而言, 通风强度决定壁面结露面积的大小, 通风方式则决定壁面结露的分布区域。

### 参考文献:

[1] 任建勋, 姬朝玥, 徐向华. 空间飞行器内结露的理论分析

- 及模拟实验[J]. 航天医学与医学工程,2000,13(5):355-359.
- [2] 吕琳,韩俊,杨洪兴. 湿热地区湿空气迁移导致大空间建筑屋顶结露的分析[J]. 暖通空调,2012,42(12):109-113.
- [3] 郭兴国,陈友明. 热湿气候地区墙体内部冷凝分析[J]. 土木建筑与环境工程,2011,33(5):121-124.
- [4] Franck Lucas, Laetitia Adelard, Francois Garde, et al. Study of moisture in buildings for hot humid climates[J]. Energy and Buildings, 2002,34:345-355.
- [5] Jing Liu, Yoshihiro Aizawab, Hiroshi Yoshino. Experimental and numerical study on indoor temperature and humidity with free water surface[J]. Energy and Buildings, 2005,37:383-388.
- [6] 于水,张旭. 围护结构内热湿耦合数值模拟分析[J]. 建筑节能,2010,7:68-71.
- [7] 吴玉林,刘树红. 粘性流体力学[M]. 北京:中国水利水电出版社,2007:168.
- [8] 马晓钧. 通风空调房间温湿度和污染物分布规律及其应用研究[D]. 北京:清华大学,2012:58-59.

### (上接第526页)

由此可知,当采用全热回收方式回收排风能量,减少新风负荷,在全年运行的模式下,可显著地减少空调系统的能耗,提高节能效益。

### 3 结论

三集一体机相对于传统的冷却减湿处理设备,采用冷凝热回收解决了空气再热问题,起到一定的节能效果,但是排风能量浪费,设备负荷较高。本文结合泳池负荷的特点,在泳池空调系统中引进全热交换装置,采用全热回收方式回收排风能量,减少新风负荷,进而减少空调系统的装机容量和能耗,实现能量的回收利用,在全年运行的模式下,可显著地减少空调系统的能耗,提高节能效益。

### 参考文献:

- [1] 马最良,姚杨. 民用建筑空调设计(第3版)[M]. 北京:化学工业出版社,2015.
- [2] CECS 14-1989,游泳池给水排水设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,1989.
- [3] JGJ 31-2003,体育建筑设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [4] CJJ 122-2008,游泳池给水排水工程技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [5] 欧志刚. 三集一体热泵空调在某工程中的设计应用[J]. 制冷空调与电力机械,2009,30(4):36-38.
- [6] 鲍梁,撒世忠. 三集一体热泵空调在室内游泳池中的应用[J]. 制冷与空调,2011,25(3):309-311.
- [7] 李乐. “三集一体”热泵在某游泳池中的应用[J]. 建筑热能通风空调,2011,30(3):60-63.
- [8] 唐艺丹,沈逸赓,李堃. 除湿热泵在娱乐性游泳馆中的适用性分析[J]. 暖通空调,2017,47(6):62-67.
- [9] 杨宝军. 三集一体空调热泵机组在泳池热水系统中的应用研究[J]. 浙江建筑,2013,30(6):54-57.
- [10] DGJ32J96-2010,江苏省公共建筑节能设计标准[S]. 江苏:江苏省工程建设标准站,2010:25.
- [11] 陈灿,张少凡,张建忠. 排风热回收技术在夏热冬冷地区居住建筑中的应用研究[J]. 暖通空调,2012,42(3):55-59.