

冷凝水冷却玻璃幕墙构建及其对室内环境的影响分析

郭玉润,刘俊红*,张文科 (山东建筑大学热能工程学院,山东 济南 250101)

摘要: 为利用空调冷凝水的冷量同时解决单层玻璃幕墙夏季高温的问题,将冷凝水用于冷却单层玻璃幕墙,并对其进行了水量、造价及能耗分析.通过 Ecotect、CFD 模拟、对比了冷凝水冷却玻璃幕墙与普通玻璃幕墙在夏季的光环境和热环境.结果表明:冷凝水冷却玻璃幕墙应用规模与建筑冷凝水产量有关,其应用会减少夏季日照辐射,减少幅度在 30.1%~41.8%.加装了冷凝水冷却玻璃幕墙的房间温度较普通房间降温幅度为 6.64%,白天降温幅度在 6.64%~12.73%.综合分析,冷凝水冷却单层幕墙能够较为有效地调节室内环境,同时也是一种新的建筑幕墙改良途径和冷凝水利用方式.

关键词: 空调冷凝水; 冷凝水冷却玻璃幕墙; 光环境; 热环境; 数值模拟

中图分类号: X799.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2020)07-3143-07

Construction and influence analysis on indoor environment of condensate water cooling glass façade. GUO Yu-run, LIU Jun-hong*, ZHANG Wen-ke (School of Thermal Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China). *China Environmental Science*, 2020,40(7): 3143~3149

Abstract: Air conditioning condensate water was combined with glass facade in order to utilize the cold of condensate water and decrease the high temperature of glass facade. The condensate water quantity, cost and energy consumption of the condensate water cooling glass facade were analyzed. At the same time, room's light and thermal environment with condensate water cooling glass facade and ordinary glass facade were compared by using Ecotect, CFD simulation in summer. The results showed that the area of condensate water cooling glass facade was related to the condensate water quantity in buildings. The application of condensate water cooling glass facade can reduce the sunshine radiation from 30.1%~41.8%. Its indoor air temperature can reduce 6.64% compared with the ordinary room, the daytime cooling range is 6.64% ~ 12.73%. In summary, condensate water cooling single glass facade can improve the indoor environment effectively and reduce the temperature of the glass facade, and it is a new way of unitization of air conditioning condensate water.

Key words: air conditioning condensate water; condensate water cooling glass façade; light environment; thermal environment; numerical simulation

据统计 2018 年我国水资源总量 27462.5 亿 m^3 ^[1]和 2018 年末中国人口总数 13.95 亿计算^[2],我国年人均水资源量不足 2000 m^3 ,不到世界年人均水资源量的 1/4.当前不少国家正研究包括大汽水、矿井水等非常规水资源,以期在再生处理后能一定程度上替代常规水资源,从而缓解目前水资源短缺的现状.

空调冷凝水属于非常规水资源中的大气水资源,是夏季空调在运行过程时空气中的水蒸气会在蒸发器表面凝结产生的.如今空调冷凝水一般直接排放至室外而未得到合理的利用.目前关于空调冷凝水研究显示,冷凝水可用于饮用水^[3]、冷却塔补水^[4],或用于降低压缩机排气温度、预冷却高温制冷剂、冷却空调系统冷凝器^[5-7].

现代设计中过多地加入玻璃幕墙元素,使得建筑物光污染较为严重^[8].同时能源问题的日益凸显使得公共建筑中的玻璃幕墙设计越来越多地考虑

建筑节能^[9].新的玻璃幕墙材料(如 low-E 玻璃)能够减少眩光,吸收热量,从而减少夏季空调冷负荷和冬季热量损失^[10].而水幕墙作为一种常见的建筑物装潢设计,上海世博会阿尔萨斯馆已经将双层幕墙、水幕技术融合,推出独特的太阳能水幕墙体系,这在世博会期间也得到了验证^[11];张甫仁等^[12]在双层玻璃幕墙中通入流动的水,以此带走建筑表面得热,降低建筑能耗;赵方冉等^[13]提出在航站楼构建水幕墙解决大面积玻璃幕墙给航站楼带来的建筑能耗高的问题.张忠相等^[14]也设计了水循环玻璃幕墙,并通过计算、模拟等方法对其温度场和热工性能进行了的定量分析.国外也有研究认为水幕墙应用于建筑外表能够有助于缓解城市热岛效应^[15].

冷凝水冷却玻璃幕墙是一种以空调冷凝水作

收稿日期: 2019-12-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51708336)

* 责任作者, 副教授, liujhruby@sdjz.edu.cn

为水幕墙的水源,依附于建筑空调系统的夏季建筑围护辅助降温系统.由于冷凝水的温度一般在 $10^{\circ}\text{C}\sim 15^{\circ}\text{C}$,所以当空调冷凝水水幕流淌于玻璃幕墙表面时可对围护结构进行降温,同时水幕可阻隔部分太阳辐射,带走部分传入室内的室外冷负荷,减轻室内空调设备的负荷.从而达到夏季建筑节能的效果.

本文构建了冷凝水冷却玻璃幕墙模型,讨论了冷凝水冷却玻璃幕墙的水量与空调冷凝水产量的匹配问题、系统造价与能耗综合分析问题.并通过 Ecotect 和 Fluent16.0 软件模拟分析加装冷凝水冷却玻璃幕墙房间的光环境和热环境.本研究综合利用了空调冷凝水的水量和其中潜在的冷量资源,改善玻璃幕墙对室外冷负荷传递过程中的缺点,使之成为一种利用大气水资源的新途径和空调冷凝水利用与改善建筑环境相结合的新思路.

1 材料与方法

1.1 冷凝水冷却玻璃幕墙构建

如图 1 所示,当蓄水箱内收集的冷凝水量足够后,即通过水幕发生器形成稳定的水幕.水帘上排布有点状凸起减缓了水流下落速度,从而使水幕在玻璃幕墙表面均匀稳定流动.集水分配器将水幕流下来的水进行分配.冷凝水将通过提升水泵进入下一个循环中.冷凝提升水泵为微型水泵(如静音水泵),由光伏发电板提供能量.

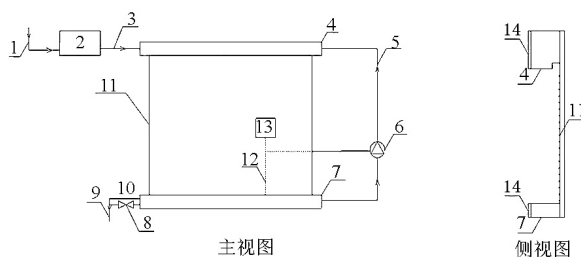


图1 冷凝水冷却玻璃幕墙系统

Fig.1 System of condensate cooling glass façade

1 空调冷凝水管;2 集水箱;3 进水管;4 水幕发生器;5 回水管;6 提升水泵;7 冷凝水下水槽;8 阀门;9 排水管;10 溢水管;11、水帘;12 电线;13 控制器;14 光伏发电板

系统工作过程中可以在集水箱中定期投放如二氧化氯、次氯酸钙或表面活性剂杀菌剂等药物避免苔藓、微生物等滋长^[16].系统可在不工作的时间段定期对集水分配器清淤排污.为了便于在建筑的

围护结构进行大面积工作,冷凝水冷却玻璃幕墙系统可以做成单位模块,并进行串联或并联的模块化安装.

1.2 冷凝水冷却玻璃幕墙可行性分析

1.2.1 水量分析 空调冷凝水量是决定冷凝水冷却玻璃幕墙规模的必要条件.本计算对象选取济南市某门诊医技楼.总面积为 85380m^2 ,建筑高度 15.26m ,层高 3.5m .室外参数为济南夏季室外计算温度 34.7°C ,相对湿度 70% ;室内设计室温 26°C ,相对湿度 60% .房间空气调节方式采用集中式空调系统和多联机.空调总冷负荷为 7965kW ,由 GB50736-2016《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》^[17],按 1kW 冷负荷产生 0.6kg 冷凝水,推算此建筑每 1h 可产冷凝水约 4778kg .

为了确定冷凝水冷却玻璃幕墙的流量公式,通过类比与其相似的溢流堰体与孔口出流公式^[16],结合冷凝水在玻璃幕墙的流动状态,冷凝水冷却玻璃幕墙的水量式为:

$$V = \mu \eta m b H^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

式中: V 为瀑布每米宽度的水体体积, L/s ; b 为堰体宽度, m .本文中根据幕墙结构,取水幕发生器周边长度; m 为堰体流量系数,由文献[18], $m=1420$; H 为堰顶水深, m .本文中根据幕墙结构, $H=3\text{mm}$; V 为冷凝水水幕流量, L/s ; μ 为孔口流量系数,取 $0.60\sim 0.61$ ^[18].

η 为水量系数,实际工程中水幕衬底减缓了水流速度,系数取值范围为 $1/2\sim 1/4$ ^[16],本例中水帘表面时有凸起物质对水流产生了较大阻力,可取 $1/4$.

同时蒸发量计算公式为^[18]:

$$E = \alpha A e \quad (2)$$

式中: α 为蒸发量不均匀系数,可取值 $1.4\sim 1.46$,本例取 1.46 ; A 为水幕面积, m^2 ; e 为平均年平均日蒸发量与降雨量差值,查济南气象参数, $e=4.74\text{mm/d}$,则 8h 内 $e'=0.59\text{mm}$.

1.2.2 造价及能耗综合分析 与普通水幕墙工程相似,冷凝水冷却玻璃幕墙在辅助制冷的同时也兼顾着改善建筑立面景观的任务,幕墙安装高度宜安装在 10m 以下,故无论是普通公共建筑或高层建筑,此高度处采用的玻璃类型可按普通玻璃幕墙进行选择.

本文冷凝水冷却玻璃幕墙工程是基于普通玻璃幕墙工程展开的,根据设计院提供的资料,普通玻

璃幕墙总面积 3507.42m²,综合单位造价为 1100 元/m².其中玻璃幕墙为 450 元/m²,铝材 17 元/kg,硅酮结构胶,五金配件及其他附件等分别占总造价的 5.7%,4.3%,加人工费总造价 501.56 万元.

冷凝水冷却玻璃幕墙部件造价及制作安装所需造价确定后,将与能耗分析软件 DeST 模拟的此门诊医技楼能耗模拟结果进行综合分析,以此讨论冷凝水冷却玻璃幕墙的工程可行性.

1.3 室内光环境模拟

在玻璃幕墙建筑中,太阳辐射是导致室内过热最直接的原因.减少太阳辐射得热是降低室内温度的有效方法之一.传统的玻璃幕墙遮阳会在一定程度上破坏了玻璃幕墙建筑设计的立面造型,本文提出的冷凝水冷却玻璃幕墙将提供一种新的阻挡太阳幅度的方法.

本文选择 Ecotect Analysis 软件建立一间房间模型,模型尺寸为 7.5m×5.5m×2.8m,南向安装的玻璃幕墙尺寸为 7.2m×2.5m.并导入济南的气象数据,假设室外无遮挡且为晴天.模型如图 2 所示. 冷凝水冷却玻璃幕墙构造见图 3.

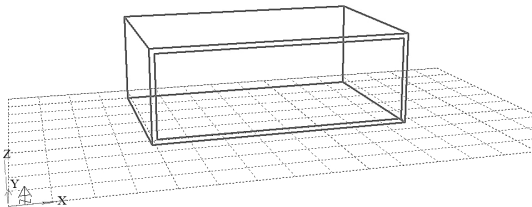


图2 Ecotect 中的房间模型
Fig.2 Room model in Ecotect

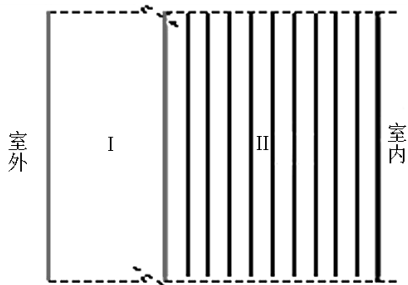


图3 冷凝水冷却玻璃幕墙结构
Fig.3 Structure of condensate water cooling glass facade

冷凝水冷却玻璃幕墙各组件参数见表 1.

本次模拟是模拟冷凝水冷却玻璃幕墙在全年气温最高日的性能情况.在计算通过围护结构传至室内的热量时,通常将室外空气计算温度作为计算

用数据.通过查阅气象数据后确定本文模拟日期为 7 月 1 日.

表 1 冷凝水冷却玻璃幕墙各组件参数

Table 1 Component parameters of condensate water cooling glass facade

名称	I(冷凝水)	II(普通玻璃)
厚度 d (mm)	4	6
密度 ρ (kg/m ³)	1000	2500
定压比热 C_p [J/(kg·K)]	4187	840
导热系数 λ [W/(m·K)]	0.62	0.72
透射率	0.8	0.30
反射率	0.1	0.30
吸收率	0.1	0.50

1.4 室内热环境模拟

1.4.1 室内数值模型及模拟边界条件 本文借助 Ansys Fluent16.0 软件,对比分析在相同的室外温度和太阳辐射强度下普通幕墙和冷凝水冷却玻璃幕墙对房间热环境的影响.本文依然选择 1.3 节房间.房间模型及幕墙如图 4 所示.冷凝水冷却玻璃幕墙材料与 1.3 节相同.冷凝水冷却玻璃幕墙表面为普通幕墙表面与水幕组合而成,具体设置参数如表 2 所示.为了较为直观,有代表性地对分析冷凝水却单层幕墙对房间热环境的影响,选取 $y=a/2$ 为观察截面,记为 1-1 截面.

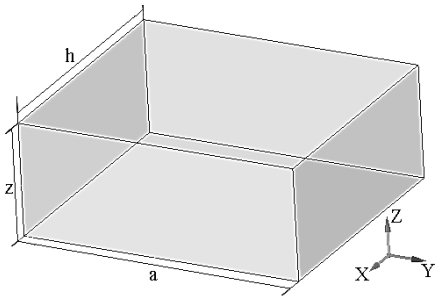


图4 房间模型
Fig.4 Room model

1.4.2 控制方程 运用 CFD 软件求解的核心就是建立数学模型.根据室内空气的连续性方程、动量守恒方程、能量守恒方程、以及湍流方程联立求解.并在方程基础上进行离散化处理和数值解析.方程组如式(3)~(8) [19].

1)连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

式中: ρ 为空气的密度, kg/m^3 ; u_x, u_y, u_z 为 x, y, z 方向速度矢量, m/s .

表2 边界条件设置

Table 2 Boundary conditions settings

指标	取值
模拟时间	7月1日12:00
太阳辐射吸收系数	0.75
太阳辐射强度(W/m^2)	879.3
室外综合温度($^{\circ}\text{C}$)	36.8
室内气温($^{\circ}\text{C}$)	26
冷凝水水幕温度($^{\circ}\text{C}$)	18
冷凝水水幕厚度(mm)	4
墙壁面设置	绝热面
玻璃幕墙设置	对流面,材质见表1
湍流模型	RNG 双方程模型
辐射模型	DO 模型

2) 动量方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j}) + F_i \quad (4)$$

式中: F_i 为作用于微元体作用力; u_i, u_j 为速度在 i, j 方向的分量, m/s ; μ 为空气运动粘度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$.

3) 能量方程:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \text{div}(\rho u T) = \alpha \cdot \text{div}(\text{grad} T) \quad (5)$$

式中: T 为流体温度, K ; u 为速度矢量, m/s ; α 为热扩散率, m^2/s ; $\text{grad} T$ 为温度梯度.

4) RNG k- ε 模型:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + \rho \varepsilon \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\varepsilon} \varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (7)$$

式中: k, ε 分别为湍动能, 湍动能耗散率, m^2/s^3 ; $\alpha_k, \alpha_\varepsilon$ 为 k, ε 的逆有效普朗特数. $\alpha_k = \alpha_\varepsilon = 1.39$; u_i, u_j 分别为 x_i, x_j 方向上的速度; μ, μ_t 分别为动力粘性系数, 湍流粘性系数; μ_{eff} 为有效粘性系数, $\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$; G_k 为由于平均速度梯度引起的湍流动能; $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}$ 为常数, 其中 $C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92$; $\sigma_k, \sigma_\varepsilon$ 为湍流数. $\sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3$.

在模拟中, 太阳辐射是透过冷凝水玻璃幕墙进入室内并对室内热环境产生影响, 冷凝水冷却玻璃幕墙作为半透明物体是边界条件设置的重要部分. 在 Fluent 中半透明介质与镜面边界以及非灰体辐射问题, DO 模型将顺着 $\vec{s}'$ 方向传播的辐射方程视为

某个场方程, 作为辐射模型求解效果较好. 其控制方程为^[19]:

$$\frac{dI(\vec{r}, \vec{s})}{ds} + (I(\vec{r}, \vec{s})\vec{s}) + (a + \sigma_s)I(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}) \phi(\vec{s}, \vec{s}') d\Omega' \quad (8)$$

式中: $\vec{r}, \vec{s}, \vec{s}'$ 分别表示位置、方向和散射方向向量; a, n, σ_s 分别表示吸收系数、折射系数和散射系数; T 为当地温度, K ; I 为辐射强度, W/m^2 ; ϕ 为相位函数; Ω' 为辐射立体角.

在 DO 模型中, 其主要参数均使用 Fluent 默认值. 如太阳辐射量、太阳的方位角、高度角等, 本章使用 Fluent 软件中的太阳辐射计算器进行关于太阳辐射强度的计算.

2 结果与讨论

2.1 可行性分析

2.1.1 水量分析 对于单位面积(长 $\times$ 高为 $1.0\text{m} \times 1.0\text{m}$), 水幕厚度为 4mm 的冷凝水冷却玻璃幕墙, 由(1)式算得水幕墙流量约为 $240\text{kg}/\text{h}$. 故在冷凝水仅流过幕墙一次的情况下, 该建筑每小时冷凝水产量可供给约 20m^2 的冷凝水冷却玻璃幕墙的正常使用. 而由(2)式算得每天工作的 8h 内蒸发量为 0.061m^3 , 故在计算中可不考虑蒸发量的影响.

通过算例可知, 冷凝水冷却玻璃幕墙适用于建筑规模较大、人员较为密集的公共场所, 这样的建筑在夏季往往冷负荷较大, 能够为冷凝水冷却单层玻璃幕墙提供较为充足的水量. 同时我国冷凝水呈现出东多西少、南多北少的地域不均衡性^[20], 根据 DeST 软件模拟各地区空调季时间(如表 3)来看, 南方地区由于其气候湿热且高温持续时间较长, 对于上海、广州和海口这三个城市入秋后仍使用空调, 且随着城市所在纬度的减小, 空调季时间逐渐扩大, 将三个城市气象参数代入(1)式, 对于相同建筑, 在冷凝水仅流过幕墙一次情况下, 冷凝水冷却玻璃幕墙使用面积分别为 32m^2 、 45m^2 、 56m^2 . 这说明冷凝水冷却玻璃幕墙在南方地区使用规模将会继续扩大.

2.1.2 造价及能耗综合分析 冷凝水冷却玻璃幕墙建立在原有玻璃幕墙基础上, 故多出的费用来自于冷凝水储存、运输及分布上. 以 2.1 节水量计算结果作为冷凝水冷却玻璃幕墙系统尺寸规格选型依

据.水幕发生器、下水槽等采用铝制,铝材共 7.2m²,约 61.7kg 左右,以普通铝合金价格 20 元/kg,人工费以 40 元/m²计,共 1522.3 元;集水箱采用玻璃钢材料,根据水量计算容积后可在建材市场直接选型,本系统中共采用 1 个集水箱,共 350 元;管道为 PVC 管,管径 DN25,长度共 32m,市场单价 5 元/m,共 160 元;阀门费用共 230 元;微型泵价格 186 元;光伏板采用 300W 单晶,共 1450 元;另计辅助费用 30 元/m²,合计该冷凝水冷却玻璃幕墙工程共 4498.3 元.幕墙管理费用可并入普通玻璃幕墙管理费用中,不必单列.

表 3 不同城市空调季持续时间

Table 3 Air conditioning season duration in different cities					
城市	空调季时间 (d)	城市	空调季时间 (d)	城市	空调季时间 (d)
海口	240	合肥	120	西安	105
南宁	200	上海	120	太原	90
广州	200	南京	120	贵阳	80
福州	160	郑州	115	沈阳	80
武汉	150	天津	110	银川	70
南昌	140	北京	110	呼和浩特	50
重庆	135	石家庄	110	长春	60
长沙	150	济南	110	哈尔滨	50
杭州	125	成都	105	昆明	30

当采用 DeST 软件对全楼进行能耗模拟后,得出当采用普通玻璃幕墙作为全楼围护结构时,整个空调季耗能约 80251kW·h,当在普通玻璃幕墙中划分出 20m² 加装冷凝水冷却玻璃幕墙系统后,整个空调季可节省约 4.57%的能耗,以电价 0.85 元/(kW·h)计,冷凝水冷却玻璃幕墙工程在一个空调季中亦节省电费 3117 元.若在建筑建造初始时增设冷凝水冷却玻璃幕墙系统又可节省初投资 2091 元,故综合来看,加装冷凝水冷却玻璃幕墙系统最多 4498.3/3117≈1.4a 收回成本.对于不同城市,若以相同的材料、人工费计算,可得出不同结果.以上海、广州和海口为例,收回成本时间分别为 1.0a、0.7a 和 0.5a.故对于南方城市,冷凝水冷却玻璃幕墙在扩大其使用规模的同时,亦能够较快回收成本并节省能耗开支.结合 2.1.1 节,冷凝水冷却玻璃幕墙具有工程可行性.

2.3 室内光环境模拟结果分析

在 Ecotect 中设置模拟条件后进行房间辐射得热模拟,其结果如图 5 所示.可以看到,普通幕墙房间在一天中的日照辐射总量为 11698W,冷凝水冷却玻

璃幕墙房间为 7007W,日照辐射减少了 40.1%.则逐时日照减少幅度在 30.1%~41.8%之间.故冷凝水冷却玻璃幕墙较普通玻璃幕墙房间能有效的阻挡室外日光辐射.

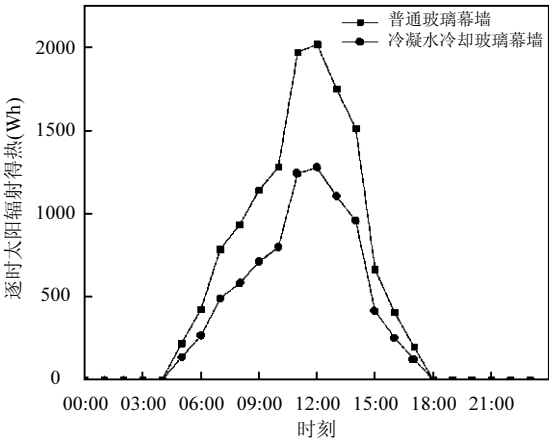


图 5 逐时日照辐射对比
Fig.5 Comparison of hourly sunshine radiation

冷凝水冷却玻璃幕墙的另一个比较关注的问题是对室内光环境的影响.采光系数值是评价自然采光是否达标的主要技术指标.根据 GB50003-2013 《建筑采光设计标准》^[21],对于办公室类建筑,自然采光系数不得低于 4%,对于公共类建筑,自然采光系数不得低于 3%.保持 Ecotect 中设置模拟条件、设置网格划分后进行房间日光模拟,模拟结果如图 6 所示.由模拟可知,此时的模拟采光系数在 4.8%~24.8%,平均值为 11.74%,而普通玻璃幕墙房间平均采光系数为 12.73%,加装冷凝水仅使房间光照系数下降了 4.85%.从结果来看冷凝水冷却玻璃幕墙并未对室内光环境造成较大的影响,也合乎建筑采光设计标准规定.而且对于公共建筑而言,其主要的照明手段更多地依赖人工照明,从而使室内光环境得到进一步保证.

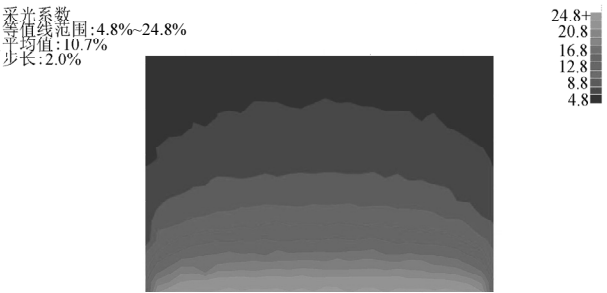


图 6 房间自然采光分布
Fig.6 Distribution of room natural lighting

2.3 室内热环境模拟结果分析

设置参数并进行模拟后,得到的结果如图 7 所示.

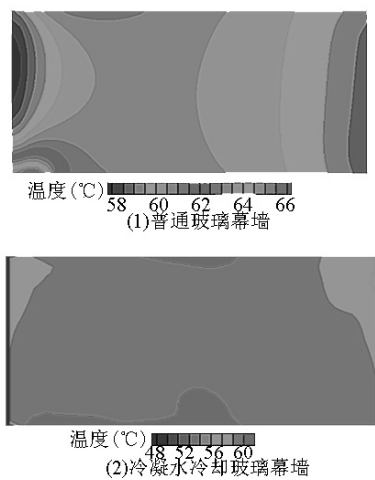


图 7 1-1 截面温度分布对比

Fig.7 Comparison 1-1Section temperature distribution

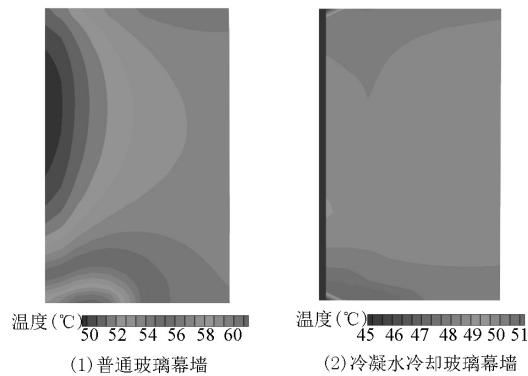


图 8 1-1 截面局部温度分布对比

Fig.8 Comparison 1-1Section local temperature distribution

本节模拟是在房间内部无空调设备和进排风口情况下模拟的自然室温,目的是对比冷凝水冷却玻璃幕墙与普通玻璃幕墙单独工作时的性能.通过图 7 可以发现:安装冷凝水冷却单层幕墙的房间温度较温度低.更为具体地,安装普通单层幕墙的房间平均温度 54.2℃,而安装冷凝水冷却单层幕墙的房间平均温度 50.6℃.温度降低了 6.64%.

由于房间没有通风及空调设备,所以房间温度整体偏高,且温度在到达稳态时呈现出较为均匀的态势.但在图 7 中发现距幕墙 1.5m 范围内出现了较大的温度梯度变化,所以在 1-1 截面靠近窗户 1.5m 处再次分割截面,得到如图 8 所示的局部温度分布图.可以发现靠近窗侧出现了较大的温度梯度,这是由于窗户不仅与外界通过对流、辐射等方式进行换热,也与房间内部空气进行了对流换热,同时房间亦

受到玻璃透射的太阳辐射,致使靠近幕墙侧空气温度变化较大.同时靠近幕墙下部由于设定为绝热边界,加之太阳辐射角度等因素导致热量集聚,出现了温度最大值.而冷凝水冷却玻璃幕墙不仅阻隔了部分太阳辐射,其流动的冷凝水也将幕墙中的热量及时带走,同时还与空气进行了对流换热,降低了气流温度,亦使空气温度梯度场趋向均匀.

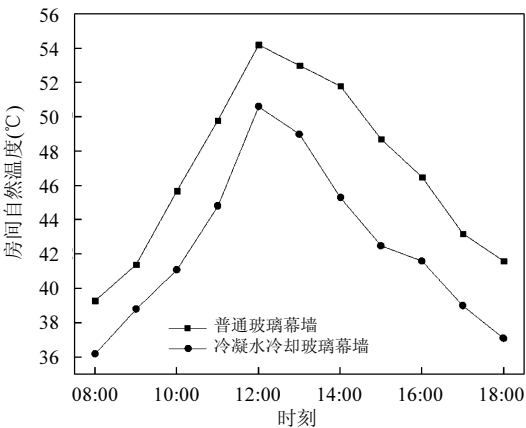


图 9 房间自然温度对比

Fig.9 Comparison of room's natural temperature

表 4 不同时刻自然温度减少率

Table 4 Natural temperature reduction rate in different times

时刻	减少率(%)	时刻	减少率(%)
08:00	6.94	14:00	12.55
09:00	6.97	15:00	12.73
10:00	9.67	16:00	10.54
11:00	10.04	17:00	9.72
12:00	6.64	18:00	10.82
13:00	7.55		

在 Fluent 对所建立的房间进行房间自然室温非稳态模拟,得到如图 9 所示的逐时房间自然温度对比.在房间从 08:00 开启空调并产生冷凝水,至 18:00 关闭空调期间内,安装冷凝水冷却玻璃幕墙的房间自然室温一直较安装普通玻璃幕墙房间温度低.值得注意的是温度降低幅度并非一成不变,而是随着时间变化而变化.如表 4 所示,温度降低幅度为 6.64%~12.73%.具体为在上午降低幅度总体呈降低态势,在中午 12:00 降低幅度最小为 6.64%,而下午逐渐上升,至 15:00 出现最大值 12.73%.其后一直保持在 9%以上.

如前所述,冷凝水冷却玻璃幕墙是依靠空调冷凝水实现对建筑围护结构的降温,当外界温度高出其调节范围后,其作用能力将下降.此时可使用其他

水源对该系统进行补水,使其维持一定的调节能力。而由济南市气象条件知,该类型天气在夏季较为少见,故多数情况下,冷凝水冷却玻璃幕墙能够达到较好地辅助空调系统对建筑进行降温。

综合来看,冷凝水冷却单层玻璃幕墙系统能够在一定程度上阻隔室外传入室内的热量,降低房间温度,从而体现了冷凝水冷却单层玻璃幕墙的优势。

3 结论

3.1 在济南市某门诊楼工程算例中,冷凝水在仅使用一次的情况下可供 20m^2 冷凝水冷却玻璃幕墙使用。通过造价及能耗分析得出可在约 1.4a 可回收成本。

3.2 南方湿热环境会使冷凝水冷却玻璃幕墙的使用规模越大。

3.3 冷凝水冷却玻璃幕墙的日照辐射减少率在 30.1%~41.8%之间,同时对房间的自然采光影响不大。

3.4 加装了冷凝水冷却玻璃幕墙的房间全天自然温度较普通房间温度的降低了 6.64%~12.73%。

3.5 冷凝水冷却玻璃将空调冷凝水与玻璃幕墙结合,既能够合理地利用冷凝水的水量与冷量资源,又能一定程度缓解玻璃幕墙建筑在夏季的室内温度较高的问题。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国水利部.2018 年中国水资源公报 [R]. 北京,水利部水利信息中心, 2018.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. China Water Resources Bulletin 2018 [R]. Beijing, Water Resources Information Center, 2018.
- [2] 中华人民共和国国家统计局.中国统计年鉴 [M]. 北京:中国统计出版社, 2019.
National bureau of statistics of the People's Republic of China. China statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2019.
- [3] Al-Farayedhiaa, Ibrahim, Gandhidasanp. Condensate as a water source from vapor compression systems in hot and humid regions [J]. Desalination, 2014,349:60-67.
- [4] Liu N L, Li Z.The Feasibility on the case that the air conditioning condensate water is used as the make-up water of cooling tower [J]. procedia engineering, 2017,205:3557-3562.
- [5] 陈 鹏,卢 军,张惠民,等.分体空调冷凝水回收利用实验研究 [J]. 土木建筑与环境工程, 2012,34(S2):169-172.
Chen P, Lu J, Zhang H M, et al. Experimental study on recovery and utilization of split air conditioning condensate [J] Journal of civil architectural and environmental engineering, 2012,34(S2):169-172.
- [6] 王赞社,王 芳,刘丰榕,等.湿热地区家用空调冷凝水回收研究 [J]. 暖通空调 HV&AC, 2015,45(12):53-56.
Wang Z S, Wang F, Liu F R, et al. Research on condensate recovery of household air conditioning in hot and humid area [J]. Journal of HV&AC, 2015,45(12):53-56.
- [7] 丁 勇,史丽莎.分体式空调冷凝水回用节能潜力分析 [J]. 建筑节能

能, 2013,39(29):97-101.

- Ding Y, Shi L S, Liu F R, et al. Analysis on energy saving potential of condensed water reuse in split type air conditioning [J]. Building Energy Efficiency, 2013,39(29):97-101.
- [8] 阎 冰,曲兴华,张福民.玻璃幕墙眩光污染模拟分析 [J]. 城市环境与城市生态, 2014,(1):28-31.
Yan B, Qu X H, Zhang F M. Simulation analysis of glare pollution of glass facade [J]. Urban Environment & Urban Ecology, 2014,(1):28-31.
- [9] Penić, Milja, Vatin, et al. Double skin facades in energy efficient design [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014,680:534-538.
- [10] Abed H, Abdelatif M, Nadège T, et al. Combined use of dynamic building simulation and metamodeling to optimize glass facades for thermal comfort [J]. Building and Environment, 2019,(157):47-63.
- [11] 洪芳鹏.上海世博会阿尔萨斯案例馆水幕太阳能的设计与施工 [J]. 建筑施工, 2012,(9):87-89.
Hong F P. Design and construction of water screen and solar energy system in Alsace Case Pavilion in Shanghai World Expo, Building Construction [J]. Building Construction, 2012,(9):87-89.
- [12] 张甫仁,刘 雪.水介质双层玻璃幕墙节能研究 [J]. 墙材革新与建筑节能, 2013,(3):55-57.
Zhang F R, Liu X. Study on energy saving of water medium double glass curtain wall. [J] Wall Materials Innovation & Energy Saving in Buildings, 2013,(3):55-57.
- [13] 赵方冉,张莎莎,蔡子良.航站楼围护结构水幕墙节能效果分析 [J]. 建筑节能, 2014,(5):50-54.
Zhao F R, Zhang S S, Cai Z L. Energy analysis of the water curtain wall in terminal envelope. [J]. Building Energy Efficiency, 2014,(5): 50-54.
- [14] 张忠相,李向阳,马 龙.水循环玻璃幕墙热工性能分析与计算 [J]. 绿色科技, 2015,(9):317-319.
Zhang Z X, Li X Y, Ma L. Analysis and calculation of thermal performance of water circulation glass façade. [J]. Journal of Green Science and Technology, 2015,(9):317-319.
- [15] Jiang H, Akira H. A numerical simulation method for analyzing the thermal improvement effect of super-hydrophilic photocatalyst-coated building surfaces with water film on the urban/built environment [J]. Energy & Buildings, 40(6):968-978.
- [16] 张雅君,朱娟娟,孙丽华,等.空调冷凝水作为水资源回收利用研究进展 [J]. 环境工程, 2017,35(6):142-145,150.
Zhang Y, Zhu J J, Sun L H, et al. Research progress of air conditioning condensate water recovery as water source [J]. Environmental Engineering, 2018,(10):76-78.
- [17] 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范 GB 50736-2016 [S].
GB 50736-2016, Code for design of heating, ventilation and air conditioning in civil buildings [S].
- [18] 金儒霖,张放春,邹光洁,等.人造水景设计营造与观赏 [M]. 中国建筑工业出版社, 2006:115-122.
Jin R L, Zhang A C, Zou G J, et al. Artificial waterscape design and viewing [M]. Architecture & Building Press, 2006:115-122.
- [19] 王福军.计算流体力学分析 [M]. 北京.清华大学出版社, 2004: 120-124.
Wang F J. Computational fluid dynamics analysis. [M] Beijing. Tsinghua university press, 2004:120-124.
- [20] 韩 培,刘志强,李洪飞,等.空调冷凝水收集潜力与价值研究 [J]. 给水排水, 2015,(41):141-143.
Han P, Liu Z Q, Li H F, et al. Study on condensate collection potential and value of air conditioning [J]. Water&Waster water Engineering, 2015,(41):141-143.
- [21] GB50033-2013 建筑采光设计标准 [S].
GB50033-2013 Architectural lighting design standards [S].

作者简介: 郭玉润(1995),男,山东东营人,硕士,从事冷凝水回收利用与建筑节能方向研究。