

DOI: 10.20271/j.cnki.1673-9833.2026.2001

# 建筑表面应用冷却涂料的数值模拟

马程鹏, 赵福云, 赵尚仙, 刘 创

(湖南工业大学 土木与环境工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** 为了深入探究高反射冷却涂料在建筑外部围护结构上的应用对建筑街区风热环境的影响, 采用计算流体动力学(CFD)方法, 对建筑围护结构应用涂料的4种不同涂覆方式进行了数值模拟研究。研究表明: 建筑表面温度受冷却涂料的影响显著, 当壁面吸收率从0.85降至0.10时, 直接受太阳照射的壁面温度最多可降低15℃, 而对于未直接受太阳照射的遮蔽区域, 温度反而升高了1.0~1.5℃。不同的涂覆方式对环境的影响也有所不同, 应用屋顶涂料时, 行人层高度的温度上升约0.2℃, 同时平均空气龄相比无涂料时增加了2s; 应用墙面涂料时, 行人层高度的最高温度降幅为0.5~2.0℃, 同时行人层高度的气流速度减缓了5%~10%, 特别是在背风墙面受热的情况下, 行人层高度的平均空气龄约增加了4s。

**关键词:** 建筑通风; 冷却涂料; 风热环境; 数值模拟; 空气龄

中图分类号: TU831.8

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2026)02-0001-08

**引文格式:** 马程鹏, 赵福云, 赵尚仙, 等. 建筑表面应用冷却涂料的数值模拟[J]. 湖南工业大学学报, 2026, 40(2): 1-8.

## Numerical Simulation of Cooling Coatings Applied to Architectural Surfaces

MA Chengpeng, ZHAO Fuyun, ZHAO Shangxian, LIU Chuang

(School of Civil and Environmental Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** In view of a further inquiry into the impact of the applied high reflective cooling coatings on the external envelope of buildings on the wind and thermal environment of architectural blocks, a numerical simulation has thus been made of four different coating methods of building envelope applied coatings by adopting computational fluid dynamics (CFD) method. The research results indicate that the surface temperature of the building is under a significant effect of the cooling coatings. When the wall absorption rate decreases from 0.85 to 0.10, the wall temperature directly exposed to sunlight can be reduced by up to 15℃. However, for shaded areas not directly exposed to the sun, the temperature actually increases by 1.0~1.5℃. There is a variation of the impact of different coating methods on the environment as well. With roof coatings applied, the temperature of the pedestrian layer rises by about 0.2℃, and the average air age increases by 2 seconds compared to that under a no-coating condition; with the wall paint applied, the maximum temperature drops at pedestrian layer height is between 0.5 and 2.0℃, with the airflow velocity of the pedestrian layer height slowing down by 5%~10%, especially when the leeward wall is heated, the average air age of the pedestrian layer height increases by 4 seconds.

**Keywords:** architectural ventilation; cooling coating; wind and thermal environment; numerical simulation; air age

收稿日期: 2024-12-10

基金项目: 湖南省重点研发计划基金资助项目(2024AQ2011)

作者简介: 马程鹏, 男, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为城市通风和计算流体力学, E-mail: 3570798132@qq.com

通信作者: 赵福云, 男, 湖南工业大学教授, 主要研究方向为建筑通风及计算流体力学, E-mail: 1065093523@qq.com

## 0 引言

随着全球城市化的快速发展,城市热岛效应(urban heat island, UHI)已成为城市规划和环境科学领域关注的焦点,UHI现象指的是城市中心区域的气温较周边郊区显著升高,这不仅加剧了城市的热应激,还对能源消耗、人类健康和生态系统产生了负面影响。在炎热的季节,建筑物的围护结构作为城市表面的重要组成部分,其吸热和储热特性对城市热岛效应有着显著的贡献。因此,提高建筑壁面的热反射能力、降低其热容量,是缓解热岛问题的有效途径之一<sup>[1]</sup>。传统的壁面材料,例如沥青和混凝土,因其较高的太阳能吸收率,会吸收大量太阳能并将其转换为热能,这不仅加剧了建筑内部的热负荷,也增加了空调系统的能耗,相对而言,反射涂料通过增强太阳辐射的反射能力,能显著降低热量的吸收与积累,从而有效减少建筑的能源消耗<sup>[2-4]</sup>。此外,这种反射性壁面的应用还对减轻城市热岛效应、降低温室气体排放量等具有积极作用,有助于在更广泛的层面上应对全球气候变化的挑战。

已有国内外学者关于建筑物围护结构的研究主要可分为3类:1)利用现场测量评价壁面热现象的研究<sup>[5-6]</sup>;2)基于数值模拟的研究<sup>[7-8]</sup>;3)基于遥感数据的研究<sup>[9]</sup>。由于现场实验成本较高,研究通常只关注单个建筑的凉爽壁面效果,相比之下,数值模拟成本较低,能对城市建筑的冷涂层进行定量分析。

尽管反射涂料的好处被普遍认可,但其在不同气候下的实际效果仍需进一步研究。计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)能够在不通过实际建造的情况下,评估反射涂料对建筑热环境和能源效率的影响。因此,本研究拟通过CFD探讨冷却涂料在屋顶和墙面上的应用对建筑表面温度和街道峡谷内空气温度的影响,并分析不同光照条件下的温度调节效果。同时,通过与风洞实验数据进行比较以验证模型的准确性,此外,拟对街道峡谷内的风速分布进行定量分析。文章将先介绍模拟方法的模型设置,接着展示模拟结果及其对建筑设计和城市规划的影响,在总结发现的基础上提出未来的研究方向。以期深化对反射涂料应用的理解,促进其在节能减排和城市可持续发展中的应用,并揭示冷却涂料在城市微气候调节中的作用,为城市规划和建筑设计提供理论支持。

## 1 数值计算模型

### 1.1 物理模型

本研究所采用的全尺寸三维(3D)街道峡谷模

型如图1所示,其由5座长方体建筑和4条街道峡谷组成,建筑物长度设置为 $L=120\text{ m}$ ,建筑物的高度和宽度、峡谷的宽度均设置为 $24\text{ m}$ ( $H=B=W=24\text{ m}$ )。计算域左侧设置为速度入口边界(velocity inlet),与建筑群距离设置为 $5H$ ,即 $120\text{ m}$ ,计算域右侧设置为压力出口(pressure outlet),与建筑群距离为 $10H$ ,即 $240\text{ m}$ ,计算域顶部和两侧边界都设置为对称边界(symmetry),计算域顶部边界与地面的距离为 $8H$ ,即 $192\text{ m}$ ,计算域两侧与建筑群距离为 $5H$ ,即 $120\text{ m}$ ,所有建筑壁面和计算域地面均设定为无滑移的刚性壁面。

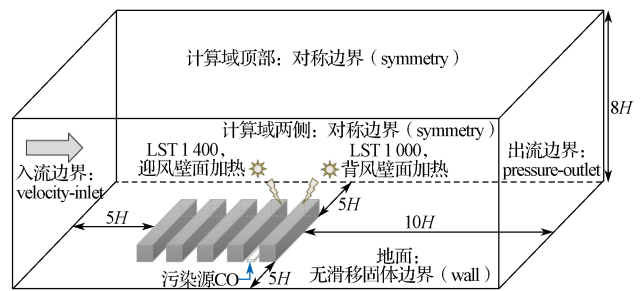


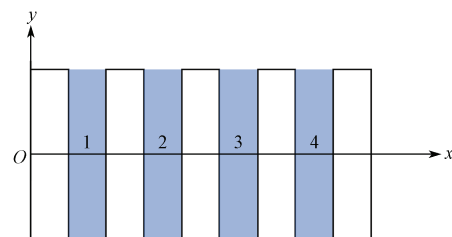
图1 街道峡谷模型计算域示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the computational domain for the street canyon model

通过输入特定时间数据和位置,ANSYS Fluent中的太阳计算器可以计算出太阳的准确位置,其光线追踪模型可提供这些暴露表面上的入射辐射<sup>[10]</sup>。此外,应用离散坐标(DO)辐射模型评估表面间辐射热通量,因为它适用于高精度地解释复杂几何系统中的光学问题<sup>[11]</sup>。本研究中,模拟时间为2024年9月22日。地理位置设定为 $112.98^\circ\text{ E}$ (中国长沙的经度), $0^\circ\text{ N}$ , $+8\text{ GMT}$ 。计算选用一氧化碳CO代表污染物。如图1所示,均匀的体积源(宽度 $W_p=2W/3$ 和长度 $L_p=L$ )指定在靠近地面的地方,深度为 $H/48$ ,以模拟道路和距离建筑物墙壁 $4\text{ m}$ 处的交通排放,污染物释放速率设为 $1.0 \times 10^{-5}\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

物理模型的计算域如图1所示,通过模拟分析探究冷却涂料应用于建筑不同立面(包括屋顶和墙面)对建筑表面及空气温度空间分布的影响。

图2所示为三维街谷模型的剖面图和俯视图,以便进一步阐释本研究的复杂性,展示街区细节。



a) 剖面图

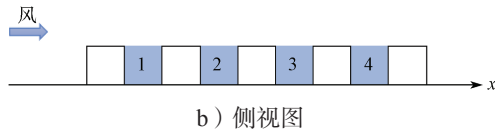


图2 街区建筑剖面图和侧视图

Fig. 2 Section and side view of the architectural block

使用的乳胶漆为白色涂料, 其物理特性详细列于表1中<sup>[12]</sup>。通过结合不同的当地太阳时和涂料应用方式, 本研究共设计了8种模拟工况, 具体见表2。

表1 材料规格设置

Table 1 Material specification settings

材料	吸收率		密度 / (kg·m <sup>-3</sup> )	比热 / (J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	导热系数 / (W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )
	可见光	红外光			
无涂层					
混凝土材料	0.85	0.85	1 400	900	1.7
冷却涂料	0.1	0.1			
地面材料	0.85	0.85	1 150	650	1.5

表2 所有工况参数设置

Table 2 Parameter settings under all operating conditions

工况	加热	屋顶	墙面	工况	加热	屋顶	墙面
	壁面	涂料	涂料		壁面	涂料	涂料
1	背风壁面	未涂料	未涂料	5	迎风壁面	未涂料	未涂料
2	背风壁面	有涂料	未涂料	6	迎风壁面	有涂料	未涂料
3	背风壁面	未涂料	有涂料	7	迎风壁面	未涂料	有涂料
4	背风壁面	有涂料	有涂料	8	迎风壁面	有涂料	有涂料

## 1.2 数学模型

本研究中, 假定设定的8种模拟工况下的流体均为不可压缩且处于等温状态。研究采用FLUENT (2021) 软件平台, 并选择Standard  $k-\varepsilon$  湍流模型进行模型验证, 求解三维稳态条件下的温度场和风环境。这一选择基于该模型在处理建筑环境流体动力学问题时的准确性和可靠性。为确保模拟结果的精确性, 采用以下控制方程描述流体行为: 连续性方程, 确保质量守恒; 动量方程, 用于计算流体速度场; 能量方程, 用于确定温度分布。本研究考虑了热浮力对研究区域内气流和污染物扩散的影响<sup>[13-14]</sup>。因此, 采用Boussinesq近似处理由热浮力引起的空气密度变化<sup>[15]</sup>。此外, 用湍流动能 $k$ 和耗散率 $\varepsilon$ 的方程捕捉湍流特性。

控制方程的表达式如下:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu_0 \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \beta g \rho \Delta T \delta_{ij}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i T)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \Gamma_T \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \frac{Q_T}{c_p} + \frac{1}{c_p} \left( \frac{\partial q_{ri}}{\partial x_i} \right). \quad (3)$$

式(1)~(3)中:  $u_i$ 、 $u_j$ 为 $i$ 、 $j$ 方向的速度分量;  $x_i$ 、 $x_j$ 为 $i$ 、 $j$ 方向的空间坐标分量;  $p$ 、 $\rho$ 为流体压力和密度;  $\beta$ 为热膨胀系数;  $g$ 为重力加速度;  $\Delta T$ 为温度差;  $\delta_{ij}$ 为Kronecker函数;  $\mu_0 = \mu + \mu_t$ , 其中 $\mu$ 为动力学黏度,  $\mu_t$ 为湍流涡流黏度;  $\Gamma_T$ 为有效热扩散系数;  $Q_T$ 和 $q_r$ 分别为产热率和辐射热流密度;  $q_{ri}$ 为辐射通量矢量的第 $i$ 个分量;  $c_p$ 为比热, 空气的比热为 $1\,006.43\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , 墙体的比热为 $900\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 。

湍流动能 $k$ 和耗散率 $\varepsilon$ 的方程式如下:

$$\frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon; \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_b) - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}. \quad (5)$$

式(4)~(5)中:  $G_k$ 为边界层中由于速度梯度产生的湍流生成项;  $G_b$ 为浮力驱动的湍流产生项;  $\sigma_k$ 为湍流动能的普朗特数, 取1.0;  $\sigma_\varepsilon$ 为湍流耗散率的普朗特数, 取1.3;  $C_{\varepsilon 1}$ 、 $C_{\varepsilon 2}$ 为经验常数, 且 $C_{\varepsilon 1}=1.44$ ,  $C_{\varepsilon 2}=1.92$ 。

本研究中使用气态污染物CO模拟交通尾气的排放, 其输运方程表示如下:

$$u_i \frac{\partial C}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ (D + D_t) \frac{\partial C}{\partial x_i} \right] = S. \quad (6)$$

式中:  $C$ 为污染物CO的时间平均浓度,  $\text{g}/\text{m}^3$ ;  $D$ 、 $D_t$ 分别为污染物的分子扩散系数和湍流扩散系数, 且 $D_t = \nu_t / Sc_t$ , 其中 $\nu_t$ 为湍流运动黏度,  $Sc_t$ 为湍流施密特数( $Sc_t=0.7$ );  $S$ 为污染物CO源项, 其排放率设定为 $1 \times 10^{-5}\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

## 1.3 计算域与边界条件

对于速度入口边界条件的设定, 本文采用入流边界的指数风廓线速度 $U(z)$ 、湍流动能 $k(z)$ 和湍流耗散率 $\varepsilon(z)$ , 其表达式<sup>[9]</sup>如下:

$$U(z) = U_{\text{ref}} (z/z_{\text{ref}})^\alpha, \quad (7)$$

$$k(z) = (U(z) \times I_{\text{in}})^2, \quad (8)$$

$$\varepsilon(z) = C_\mu^{3/4} k(z)^{3/2} / (\kappa z). \quad (9)$$

式中:  $z_{\text{ref}}$ 为参考高度, 取值24 m;  $U_{\text{ref}}$ 为参考风速, 取值3 m/s;  $\alpha$ 为幂律指数, 取值0.16;  $I_{\text{in}}$ 为湍流强度, 取值0.1;  $C_\mu$ 为模型常数, 取值0.09;  $\kappa$ 为冯卡门常数, 取值0.41。

本研究中, 针对街道峡谷模型进行了3种不同网格密度测试, 以评估网格分辨率对模拟精度的影响。图3展示了在街道峡谷垂直中心平面内的中心垂直

线上不同网格系统所得比较分析结果,特别关注了无量纲平均速度 ( $U/U_{ref}$ ,  $U=(u^2+v^2+w^2)^{0.5}$ ) 和温度 ( $T$ ) 的分布。通过观察对比曲线,可知精细网格和基础网格在沿中心线的速度和温度分布上几乎一致,这表明两者都能较准确地捕捉到气体流动和热传递特征。然而,当将粗网格的结果与基本网格进行比较时,发现在某些区域存在一些偏差,这可能意味着粗网格在这些区域的分辨率不足以精确描述物理现象。因此,为了保证计算的准确性,同时兼顾计算效率,本文在后续模拟中采用基础网格进行计算。

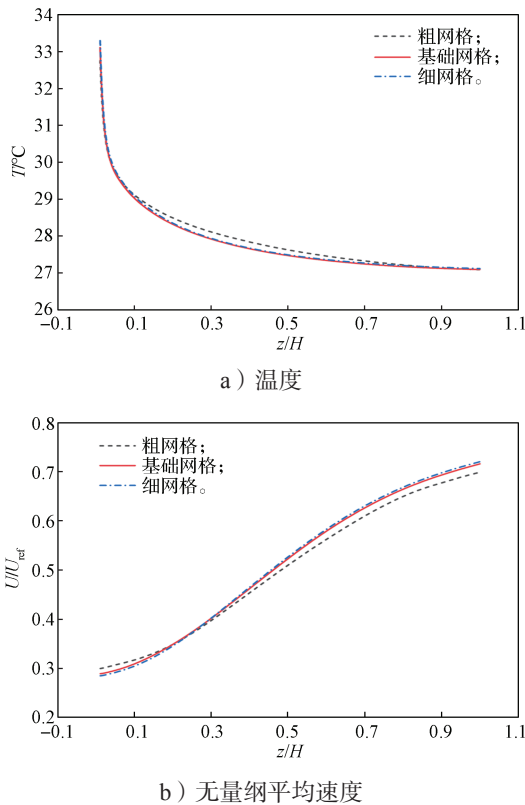


图3 不同网格数量的测试结果比较

Fig. 3 Comparison of test results with different grid numbers

## 2 结果与讨论

### 2.1 模型验证

采用湍流模型的CFD模拟,并通过S. Fellini等<sup>[16]</sup>进行的风洞实验进行了验证。该风洞实验与CFD模拟案例研究之间,在街道峡谷的高宽比 $H/W$ 上保持了一致性。此外,风洞实验中街道的轴线也是垂直于流动方向的,这与模拟设置相同。在验证研究过程中,CFD模拟边界条件的设置与风洞实验的设置相同。首先,计算采用风洞实验提供的平均水平速度的垂直对数剖面 $u(y)=u^*/\kappa \ln((y-d)/y_0)$ 模拟域入口边界条件。其中 $u^*$ 为摩擦速度,取0.22 m/s;  $d$ 为位移高度,取57 mm;  $y_0$ 为粗糙度高度,取0.1 mm。采用式(8)

(9)的入口湍流分布。选择背风立面加热街道峡谷( $\Delta T=240^\circ\text{C}$ )进行风洞实验验证。

图4给出了在背风壁面加热下,无量纲垂直速度( $v/u^*$ )和湍流动能( $TKE/u^{*2}$ )的实验和数值模拟结果分布。可以看到,湍流模型能够较好地预测街谷内的速度和湍流动能分布。通过这种细致的设置和比较,CFD模拟能够确保其预测结果的准确性和可靠性,从而为深入理解城市街道峡谷中的气体流动和热传递特性提供了坚实基础。

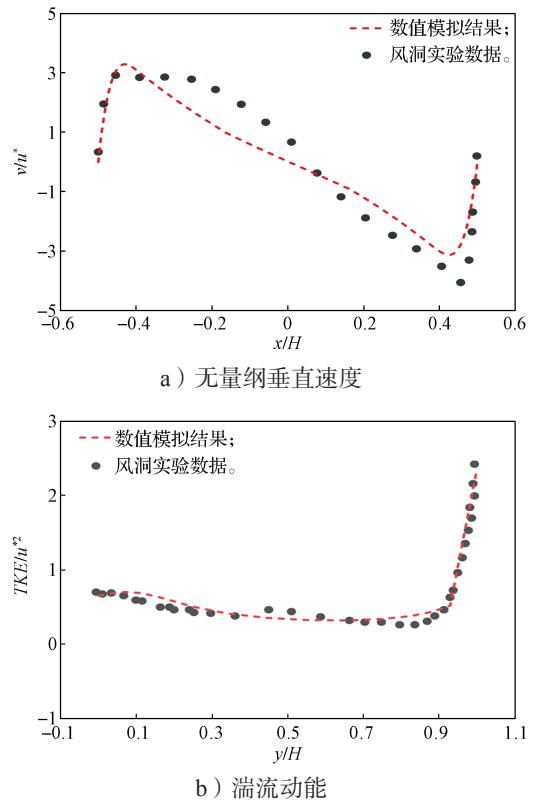
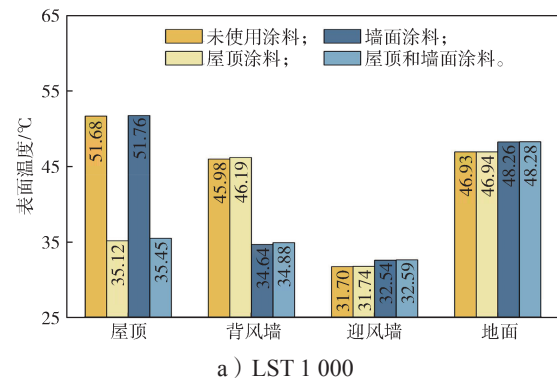


图4 无量纲垂直速度和湍流动能的风洞实验数据与数值模拟结果

Fig. 4 Wind tunnel data and numerical simulation results for dimensionless vertical velocity and turbulent kinetic energy

### 2.2 不同涂料方式对建筑表面温度的影响

图5清晰地描绘了在不同冷却涂料配置下建筑表面温度的变化结果。



a) LST 1000

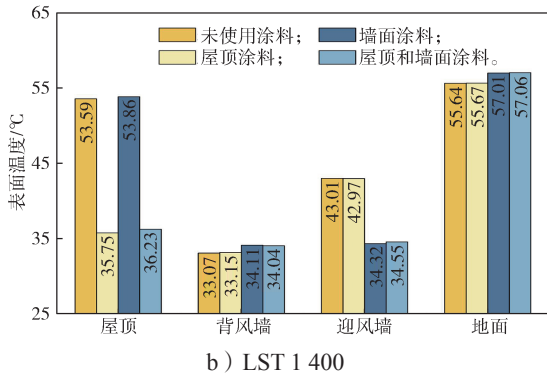


图 5 不同时间和涂料方式下的建筑表面平均温度

Fig. 5 Average temperature of the architectural surface at different times with coating methods

由图 5 可知, 太阳辐射对直接暴露在阳光下的建筑表面温度有着显著的提升效果。在 LST 1 000 时刻的背风墙面以及在 LST 1 400 时刻的迎风墙面都直接受到阳光照射, 使得这些墙面的温度比周围被建筑物遮挡的区域高出 10 °C。当屋顶涂覆高反射率涂料时, 无论是在 LST 1 000 还是 LST 1 400 时刻, 屋顶表面

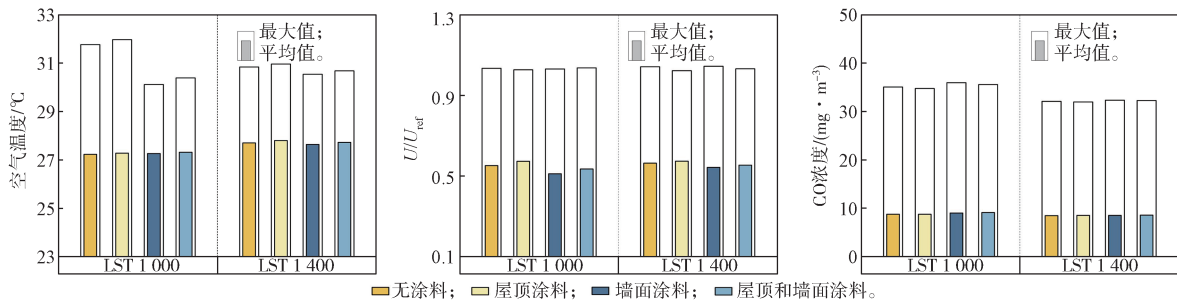


图 6 不同时间和涂料方式下行人层高度的温度、风速和 CO 浓度分布

Fig. 6 Distribution of pedestrian layer height temperature, wind speed, and CO concentration at different times with coating methods

从图 6 中可明显观察到不同冷却涂料配置对行人层高度空气温度的影响。具体来说, 与不使用涂料的情况相比, 仅在屋顶应用涂料会略微提升行人层的最高温度和平均温度, 约增加了 0.2 °C。而墙面涂料的使用则带来了显著的冷却效果, 使得行人层高度的最高温度降低了 0.5~2.0 °C。屋顶和墙面同时涂覆冷却涂料时, 虽然行人层的最高温度有所下降, 但平均温度的变化并不显著。在风速方面, 单独使用屋顶涂料时, 行人层的气流速度会略微增加。相反, 单独使用墙面涂料, 尤其是在背风墙面受热的情况下, 会明显减缓行人层高度的气流速度。造成这一现象的主要原因是, 在未涂覆涂料的情况下, 背风墙面直接受到太阳加热, 产生的浮力增强了背风墙面附近气流向上流动, 从而加快了涡旋速度。而涂料的使用减少了这种效应, 导致风速降低, 并可能引起污染物积累。当屋顶和墙面同时涂覆涂料时,

温度都显著降低, 平均温度降幅最高可达 15 °C, 但对墙面和地面温度的影响相对较小。

将涂料应用于墙面时, 可以显著降低受太阳直接照射的墙面温度, 例如在 LST 1 000 时刻的背风墙面和 LST 1 400 时刻的迎风墙面。然而, 这种涂料的应用可能会导致遮蔽区域的墙面和地面温度相对未使用涂料区域的有所升高。造成这一现象的主要原因, 是高反射率涂料将部分太阳辐射反射回街谷内, 例如在 LST 1 000 时刻影响迎风墙面和地面, 以及在 LST 1 400 时刻影响背风墙面和地面。

当涂料同时应用于屋顶和墙面时, 建筑表面温度显示出了叠加的冷却效果。对于直接受太阳照射的墙面, 这种配置提供了良好的降温效果, 但也可能引起遮蔽区域的建筑表面温度上升。

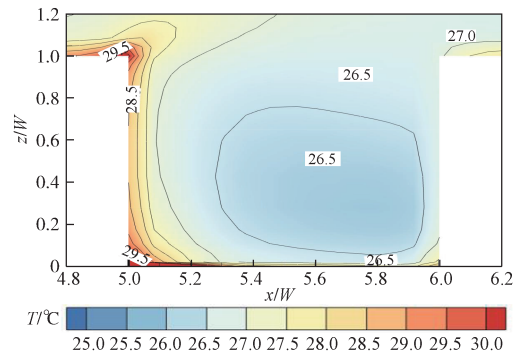
### 2.3 不同涂料方式对行人层温度和风速的影响

对图 2 中俯视图所展示 4 街谷进行细致分析, 通过对模拟计算结果的处理, 得到行人层高度 ( $z=2\text{ m}$ ) 处温度、风速和污染物浓度数据, 如图 6 所示。

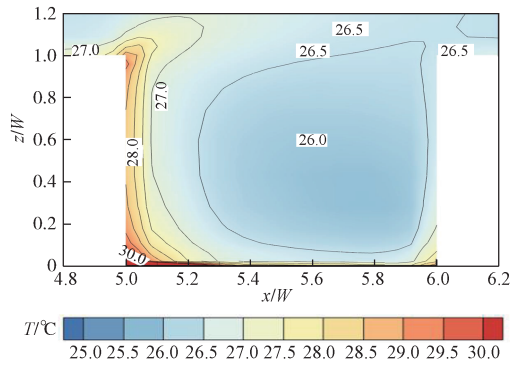
墙面涂料对气流的影响更显著, 导致风速进一步减小, 污染物浓度也相应增加。

### 2.4 不同涂料方式对街谷垂直剖面温度和风速的影响

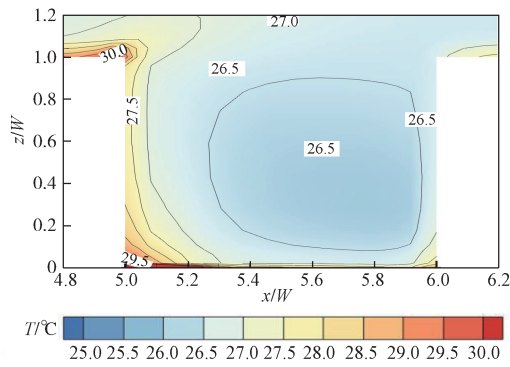
在对图 2 中剖面 4 ( $y=20\text{ m}$ ) 在 LST 1 000 时刻的模拟结果进行深入分析时, 得到了垂直剖面的温度和风速分布云图, 如图 7 和 8 所示。



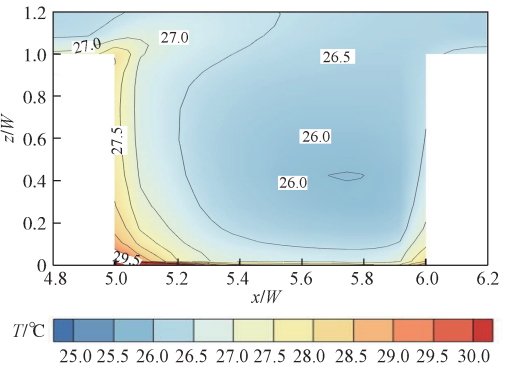
a) 无涂料



b) 冷却屋顶



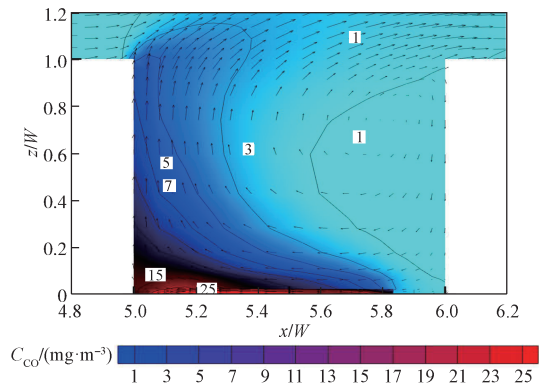
c) 冷却墙面



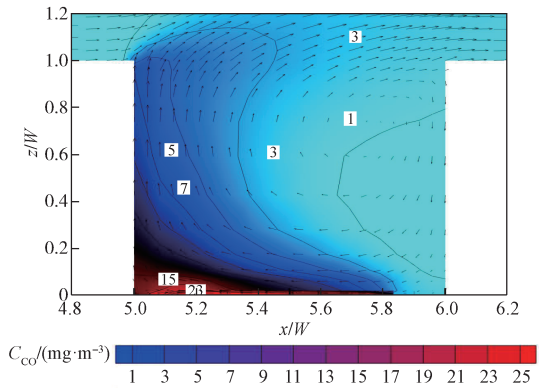
d) 冷却屋顶和冷却墙面

图7 LST 1 000 时, 不同涂料方式下的街谷垂直剖面温度分布云图 (y=20 m)

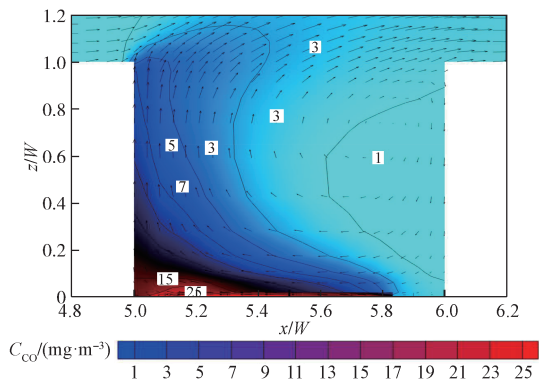
Fig. 7 Temperature distribution contours of the vertical profile of the street valley under different coating methods at LST 1 000 (y=20 m)



b) 冷却屋顶



c) 冷却墙面

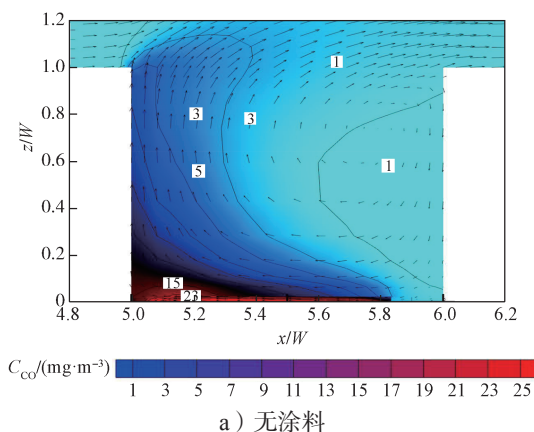


d) 冷却屋顶和冷却墙面

图8 LST 1 000 时不同的涂料方式下的街谷垂直剖面CO 浓度分布云图 (y=20 m)

Fig. 8 Contours of CO concentration distribution in vertical section of street valley under different coating methods at LST 1 000 (y=20 m)

由图 7 和 8 可知, 在未涂覆涂料的情况下, 街谷内的背风壁面和屋顶吸收了大量太阳辐射热, 导致这些区域的壁面温度明显高于其他区域, 进而使得背风壁面和屋顶附近的空气温度升高。应用屋顶涂料能显著降低屋顶附近的空气温度, 约 2~3 °C, 而墙面涂料则能将背风壁面及其附近空气温度降低约 1 °C。如图 7b 和 7d 所示, 在这两种情况下, 街谷内空气温度降低了 0.5~1.0 °C。这表明屋顶涂料的应用对街谷内空气具有一定的冷却效果, 而墙面涂料的影响则相



a) 无涂料

对较小。同时在屋顶和墙面使用冷却涂料, 不仅能降低壁面温度, 还能对街谷内空气产生冷却效果。

图 6b 显示, 应用屋顶涂料会降低街谷内的气流速度。图 8 则表明, 墙面涂料的应用更易导致污染物累积。这是因为当墙面涂有涂料时, 墙面温度降低, 导致墙面附近空气温度随之降低, 进而减小了气流速度, 使得污染物沿涡旋方向的扩散速度减缓。在同时使用屋顶和墙面涂料的情况下, 气流速度进一步减小, 污染物浓度相应增加。这种综合效应表明, 涂料的应用对街谷内微气候的影响是复杂且多维的, 需综合考虑其对温度、风速和污染物浓度的影响。

### 2.5 不同涂料方式对平均空气龄的影响

在城市街区室外环境引入空气龄<sup>[17]</sup>指标表征外界自然风流入城市区域状况。空气龄大小可表示外界自然新鲜空气进入流场中任意一点所需时间。空气龄越大, 外界气流到达某一点所需时间越长, 城市局部区域通风状况越差。城市区域内空气龄计算方法为

$$\tau_p = \bar{C} / S_p \quad (10)$$

式中:  $\bar{C}$  为目标区域的污染物浓度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $S_p$  为污染物的排放速率,  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

在 LST 1 000 和 LST 1 400 两个时刻, 不同涂料方式下的平均空气龄大小如图 9 所示。

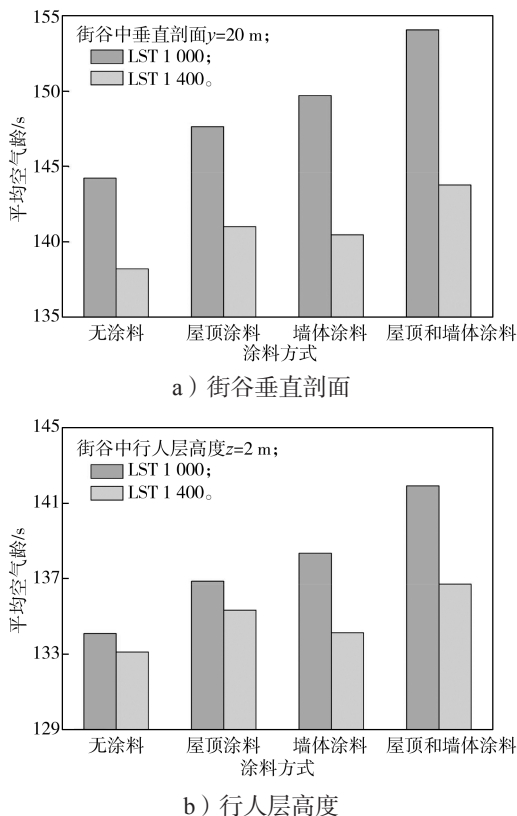


图 9 两种时刻不同涂料方式下的平均空气龄

Fig. 9 Average air age at different times with two different coating methods

由图 9 可知, 在 LST 1 000 时刻, 街谷垂直方向的平均空气龄, 无论是使用屋顶涂料还是墙面涂料, 单独使用时都能显著提高局部平均空气龄, 而当这两种涂料同时应用时, 平均空气龄升高约 10 s。特别是在背风墙面受热的情况下, 墙面涂料的应用减少了街谷背风壁面上的浮力效应, 减缓了向上的气流。在行人层高度, 空气龄同样显著增加, 当同时应用涂料时, 平均空气龄提高了约 8 s。

在 LST 1 400 时刻, 墙面涂料相较于屋顶涂料在促进污染物排除方面更有效。这是因为在未涂覆涂料的情况下, 迎风壁面受热产生向上的浮力会阻碍涡旋向下流动。而墙面涂料的使用, 降低了迎风壁面的温度, 减小了壁面附近的浮力效应, 从而促进了污染物的排除。当屋顶和墙面涂料同时应用时, 行人层高度的空气龄约增加了 6 s, 街谷垂直方向上的平均空气龄约增加了 5 s。这些结果表明, 涂料的应用对于改善街谷内的空气质量和微气候具有重要影响, 尤其是在不同时间段和不同涂料配置下, 其效果存在显著差异。

## 3 结论

采用数值模拟方法, 深入研究了冷却涂料对建筑壁面温度和街谷内风热环境方面的影响, 得出了以下主要结论:

1) 建筑表面温度受冷却涂料应用的影响显著。当墙面太阳能吸收率从 0.85 降低至 0.10 时, 直接暴露在阳光下的墙面温度可以显著降低, 最高降幅可达 15 °C。无论是屋顶涂料还是墙面涂料, 均显示出了类似的降温效果。然而, 对于那些未直接受到阳光照射的遮蔽区域, 温度并未降低, 反而可能会升高, 增幅约为 1.0~1.5 °C。

2) 当屋顶涂覆涂料时, 行人层高度的温度轻微上升, 约增加了 0.2 °C, 与此同时, 平均空气龄相比未使用涂料的情况增加了约 2 s。相较之下, 墙面涂料的应用会导致行人层高度的最高温度有所下降, 降幅为 0.5~2.0 °C, 同时行人层高度的气流速度减缓大约 5%~10%。特别是在背风墙面受热时, 平均空气龄约增加了 4 s, 这可能导致污染物更容易积聚。

3) 屋顶涂料的应用, 有效降低了街谷内的空气温度, 降幅为 0.5~1.0 °C, 同时减缓了街谷内垂直方向的气流速度, 导致平均空气龄增加了约 3 s。与此相比, 墙面涂料对温度的影响较小, 但在背风墙面受热时, 平均空气龄升高约 4 s。

综上所述, 冷却涂料的应用对建筑壁面温度和街

谷内的风热环境有着显著影响,既能有效降低受太阳直射区域的温度,也可能对遮蔽区域的温度产生不利影响。在评估和应用冷却涂料时,需要综合考虑其对建筑整体温度分布的影响,尤其是在那些可能受到间接热辐射影响的区域。同时,涂料的应用还会影响街谷内的气流速度和污染物的扩散速度。这种变化对于污染物的扩散和积聚具有一定的影响,需要在城市规划和建筑设计中予以重视。

#### 参考文献:

- [1] SANTAMOURIS M. Cooling the Cities: A Review of Reflective and Green Roof Mitigation Technologies to Fight Heat Island and Improve Comfort in Urban Environments[J]. *Solar Energy*, 2014, 103: 682-703.
- [2] TIAN D D, ZHANG J S, GAO Z. The Advancement of Research in Cool Roof: Super Cool Roof, Temperature-Adaptive Roof and Crucial Issues of Application in Cities[J]. *Energy and Buildings*, 2023, 291: 113131.
- [3] ZINZI M, AGNOLI S, ULPANI G, et al. On the Potential of Switching Cool Roofs to Optimize the Thermal Response of Residential Buildings in the Mediterranean Region[J]. *Energy and Buildings*, 2021, 233: 110698.
- [4] XU F S, ZHANG J S, GAO Z. A Case Study of the Effect of Building Surface Cool and Super Cool Materials on Residential Neighbourhood Energy Consumption in Nanjing[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2024, 189: 114027.
- [5] CHEN J H, LU L, GONG Q, et al. Techno-Economic and Environmental Performance Assessment of Radiative Sky Cooling-Based Super-Cool Roof Applications in China[J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 245: 114621.
- [6] HE Y, YU H, OZAKI A, et al. Thermal and Energy Performance of Green Roof and Cool Roof: A Comparison Study in Shanghai Area[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 267: 122205.
- [7] 高 茜, 文雅冰, 赵福云. 微尺度城市冠层模型下的通风与放射性核素扩散特性 [J]. *湖南工业大学学报*, 2024, 38(5): 10-17.  
GAO Han, WEN Yabing, ZHAO Fuyun. Analysis of Ventilation and Radionuclide Diffusion Features Under the Micro-Scale Urban Canopy Layer Model[J]. *Journal of Hunan University of Technology*, 2024, 38(5): 10-17.
- [8] 赵福云, 黄志荣, 文雅冰, 等. 不同形态下的建筑街区通风与污染物扩散研究 [J]. *建筑热能通风空调*, 2022, 41(8): 47-52.  
ZHAO Fuyun, HUANG Zhirong, WEN Yabing, et al. Study on Ventilation and Pollutant Diffusion of Different Types of Building Blocks[J]. *Building Energy & Environment*, 2022, 41(8): 47-52.
- [9] KHORAT S, DAS D, KHATUN R, et al. Cool Roof Strategies for Urban Thermal Resilience to Extreme Heatwaves in Tropical Cities[J]. *Energy and Buildings*, 2024, 302: 113751.
- [10] LI Z T, ZHANG H, JUAN Y H, et al. Effects of Building Setback on Thermal Comfort and Air Quality in the Street Canyon[J]. *Building and Environment*, 2022, 208: 108627.
- [11] QU Y F, MILLIEZ M, MUSSON-GENON L, et al. Numerical Study of the Thermal Effects of Buildings on Low-Speed Airflow Taking into Account 3D Atmospheric Radiation in Urban Canopy[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2012, 104: 474-483.
- [12] LU M R, ZENG L Y, LI Q M, et al. Quantifying Cooling Benefits of Cool Roofs and Walls Applied in Building Clusters by Scaled Outdoor Experiments[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2023, 97: 104741.
- [13] HUANG Z R, ZHANG Y J, WEN Y B, et al. Synoptic Wind Driven Ventilation and Far Field Radionuclides Dispersion Across Urban Block Regions: Effects of Street Aspect Ratios and Building Array Skylines[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 78: 103606.
- [14] TANG Y F, WEN Y B, CHEN H, et al. Airflow Mitigation and Pollutant Purification in an Idealized Urban Street Canyon with Wind Driven Natural Ventilation: Cooperating and Opposing Effects of Roadside Tree Plantings and Non-Uniform Building Heights[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2023, 92: 104483.
- [15] LI Q M, ZHANG X L, HANG J. Numerical Investigations of Cool Coatings on Building Envelopes for Urban Heat Mitigation with Various Street Aspect Ratios[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2024, 107: 105410.
- [16] FELLINI S, RIDOLFI L, SALIZZONI P. Street Canyon Ventilation: Combined Effect of Cross-Section Geometry and Wall Heating[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, 146: 2347-2367.
- [17] WANG X, WANG Y C, LIAO Y X, et al. 3D Numerical Simulation of Radionuclides Atmospheric Dispersion in Chinese Nuclear Safety Regulation[J]. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 2020, 15: e2492.

(责任编辑: 廖友媛)