

冰场热湿传递数值模拟及气流组织优化研究

井艳敏¹ 邱金友¹ 彭吴忻¹ 李钰冰¹ 何华明² 郭改英²

1. 福建理工大学 生态环境与城市建设学院, 中国·福建 福州 350000

2. 澳蓝实业有限公司, 中国·福建 福州 350001

摘要: 本文以面积 2442 m², 高度 12 m 室内冰场为研究对象, 对冰场内气流组织分布和热湿传递过程进行数值模拟。冰面借助 UDF 动态模拟吸湿和散湿过程, 研究不同气流组织分布下冰面热湿传递规律, 同时优化冰场流场避免近冰面附近起雾。对比实验结果, 偏差在 15% 以内, 数值模型对冰场内的温湿度传递过程模拟较好, 可为冰场设计和优化提供基础。模拟发现, 冰场温湿度呈垂直分布且温度和湿度有明显分层现象, 靠近冰面温度低相对湿度高; 送风流速存在临界送风速度 U_c , 使得冰面表面换热系数最小; 当送风流速高于 U_c , 冰面不易起雾; 对冰场内气流组织研究发现, 射流送风与置换送风相结合的送风方式可减小起雾风险。

关键词: 室内冰场; 传热传质; 湿量平衡; 数值模拟

Numerical Simulation of Heat and Moisture Transfer and Air Distribution Optimization in Indoor Ice Rinks

Jing Yanmin¹, Qiu Jinyou¹, Peng Wuxin¹, Li Yubing¹, He Huaming², Guo Gaiying²

1. School of Ecological Environment and Urban Construction, Fujian University of Technology, China Fujian Fuzhou 350000

2. Aolan Industrial Co., Ltd., China Fujian Fuzhou 350001

Abstract: Taking an indoor ice rink with a floor area of 2442 m² and a height of 12 m as the research object, this paper conducts numerical simulation on the air distribution and heat-moisture transfer process inside the ice rink. The dynamic moisture absorption and desorption processes of the ice surface are simulated by means of User Defined Function (UDF). The laws of heat and moisture transfer on the ice surface under different air distribution modes are investigated, and the flow field of the ice rink is optimized to avoid fogging near the ice surface. Comparative experimental results show that the deviation is within 15%, indicating that the numerical model can well simulate the temperature and humidity transfer process in the ice rink, which can provide a theoretical basis for the design and optimization of indoor ice rinks. The simulation results reveal that the temperature and humidity inside the ice rink present a vertical distribution with obvious stratification characteristics; low temperature and high relative humidity occur near the ice surface. There exists a critical air supply velocity U_c that minimizes the surface heat transfer coefficient of the ice surface. When the air supply velocity is higher than U_c , fogging on the ice surface can be effectively inhibited. The research on air distribution shows that the combined air supply mode of jet air supply and displacement air supply can reduce the risk of fog formation in the indoor ice rink.

Keywords: Indoor ice rink; Heat and mass transfer; Moisture balance; Numerical simulation

0 引言

截至目前, 中国已有 650 多座室内冰场, 其中新建的不少于 500 座, 并且在 2025 年我国冰雪产业的总规模达到 10000 亿元^[1]。研究室内冰场中温湿(热质)传递规律, 对未来冰场设计调控有重要指导意义, 同时必将有力推动冰场运动场馆的高质量发展。

国外学者对室内冰场做了大量研究, 国内的研究则起步较国外晚, 近五年, 尤其北京冬奥会前后, 学者们开始关注冰场发展。郭冰茹^[2]指出送回风口双侧布置时的气流

组织更能避免起雾现象的发生, Lin^[3]与 H. Euijungbu 等^[4]对 2022 年中国北京冬奥会以及 2018 年韩国平昌冬奥会比赛场馆的通风方式进行研究, 置换通风与射流通风在一定程度上提高了通风效率。A. Stobiecka^[5]与对冰场内的气流组织进行模拟, 得出采用分区设计的气流组织方式可以满足比赛区与观众区所需的不同热湿环境。从以上的研究可以发现, 为获得符合冰场不同区域温湿度要求, 主要通过改变冰场内气流组织以及送风口温度和湿度大小, 送风参数是决定低温送风气流组织分布的主要因素之一。

综上,现阶段国内外的研究主要是冰场中速度、温度和湿度,使其物理量符合设计规范,但对冰面附近传热传质规律的研究少,尤其缺少量化近冰面温湿度变化的研究,并未给出传热传质的传递机理。因此本文将借助数值方法,改变不同冰场送风速度,量化冰面附近的传热传质过程,并优化冰场内气流组织,降低冰场内起雾风险。

1 物理模型与数学模型

1.1 物理模型

本文研究对象为波兰格利维策某室内冰场,由于该冰场为对称结构,取一半模型为计算区域,冰场的建筑结构见图 1,并建立如图所示坐标轴,场馆尺寸为长 66 m,宽 37 m,最高处为 12 m,场馆中央是标准冰面,大小为 30 m×60 m,周围设有厚 0.5 m、高 1 m 的海绵防撞垫。送风气流由送风口向冰场上方喷射,最后由回风口离开冰场。

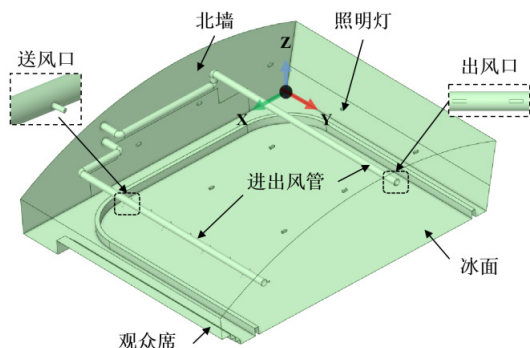


图1 一半冰场物理模型

1.2 数学模型

在数值模拟过程中,冰场内的气流视为不可压缩气体;不考虑冰面升华或者结霜。本文所采用的数学模型如下:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\text{div}(\rho u) = \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} - \frac{\partial p}{\partial x} + S_x \quad (2)$$

$$\text{div}(\rho v) = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} - \frac{\partial p}{\partial y} + S_y \quad (3)$$

$$\text{div}(\rho w) = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} - \frac{\partial p}{\partial z} + S_z \quad (4)$$

$$\text{div}(\rho u T) = \text{div} \left(\frac{k}{c_p} \text{grad} T \right) + S_T \quad (5)$$

其中,式(1)中 u 、 v 、 w 分别为 x 、 y 、 z 方向上的速度分量; t 为时间; ρ 为密度;式(2)~(4)中 p 为作用压力,为 S_x 、 S_y 、 S_z 为体积力, τ_{ij} 为粘性应力分量;式(5)中 S_T 为辐射源, c_p 为比热容, T 为温度。引入组分守恒方程:

$$\text{div}(\rho u c_s) = \text{div}(D_s \text{grad}(\rho c_s)) \quad (6)$$

其中式(6)中 c_s 为某成分的体积浓度、 c_s 为质量浓度、 D_s 为扩散系数。

根据实测情况以及分析,边界条件见表1,其中冰面边界条件复杂,将利用公式(7)编写UDF进行计算:

$$\phi = K \cdot A(c_a - c_i) \quad (7)$$

式中, ϕ 为湿通量,kg/s; K 为质量传递系数,值为0.00023 kg/s·m²; A 为冰场面积; c_a 、 c_i 分别为空气含湿量与冰面温度下饱和空气含湿量。

表1 冰场的边界条件

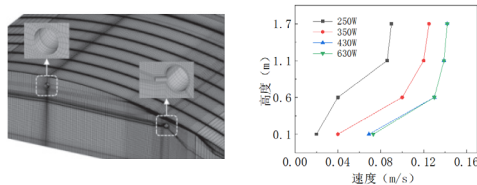
名称	参数设定值
外界空气温度	11.2 ℃
送风温度	12.5 ℃
送风含湿量	0.004 kg/kg
送风质量(送风速度)	4.8 kg/s(10 m/s)
冰面温度	-4.45 ℃
冰面发射率	0.96
北墙温度	5.9 ℃
地面对流换热系数	0.203 W/m ² ·K

1.3 数值方法

本文采用三维稳态模型计算,选择 k - SST 湍流模型和 DO 辐射模型。采用二阶迎风的 $SIMPLE$ 算法求解。设置湍流动能 k 、湍流耗散率 ϵ 以及连续性方程的残差小于 10^{-3} ,能量方程、质量分数的残差小于 10^{-6} 。

2 网格划分

本文采用非结构化网格方法划分冰场模型,如图2(a)所示,送风入口、送风出口以及冰面上方进行局部加密。采用4种网格数量进行无关性验证,验证结果如图2(b)所示。可以看出当网格数量为470万和640万时计算得到的速度场差异较小,两条曲线几乎重合,故采用网格470万计算。



(a)冰场网格划分 (b)网格无关性验证

图2 冰场网格划分网格和无关性验证

3 结果与分析

3.1 数值模拟验证与基本工况

如图3所示,本研究对冰场内部平均速度、温度及相对湿度的分布特性进行了数值模拟与实验测量的对比分析。实验条件包括:送风速率为10 m/s,空气含湿量为4 g/kg。结果显示,模拟得到的速度分布形态与实际测量结果基本

吻合,但在不同高度区间的最大偏差达到约 15%。这一偏差主要源于冰场环境密封性不足引发的气流泄露效应,进而对数值计算精度产生了一定影响。

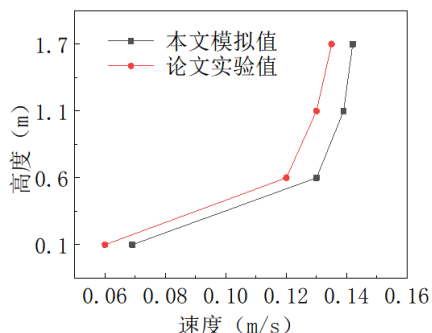
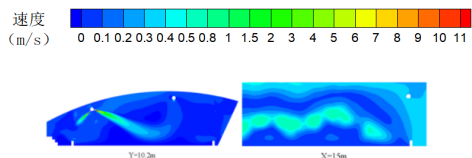


图3 平均速度模拟值与实验值对比结果

本研究选取 $Y=10.2\text{ m}$ 、 $X=15\text{ m}$ 平面作为分析对象,通过构建速度分布云图来揭示冰面物理场变化的内在规律。实验结果显示,送风区域的气流呈现出明显的非均匀流速特性。在长细型高速流动体系与静止介质接触时,通常会出现显著的速度跃变现象,并伴随 Kelvin-Helmholtz 不稳定性效应,从而形成涡旋结构。由于近壁湍流边界层黏滞力的作用,这些涡旋接近表面后逐渐弱化,导致局部区域的流场速度出现下降趋势。

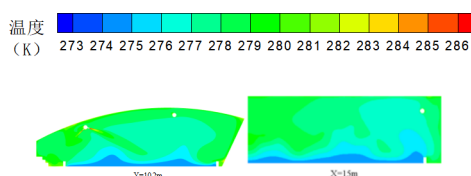
当送风温度显著高于冰面温度时,进入冰场的气流将产生动量与能量的复杂交互作用。根据图 5 (a) 和图 5 (b) 的分析,冰场内部呈现出显著的分层结构:靠近冰面区域的空气温度低于 275 K ,而上部区域因较高温度(约 $278\sim 279\text{ K}$)表现出较强的热传导特性。受入射气流流量影响,冰面附近出现一定程度的湍流现象,其温度分布主要集中在 $274\sim 275\text{ K}$ 范围内。这种多维度的温度梯度反映了气流在冰场内复杂的热力学行为。

图 6 呈现了室内冰场环境的相对湿度分布特征,其总体格局与图 5 中的温度场分布具有显著一致性,表现出明显的分层变化规律。在接近冰面的位置,空气湿度达到饱和状态,数值为 100% ;随着高度增加,相对湿度逐渐降低,在送风口附近降至约 45% 。由于喷嘴区域温度较低,导致该区域内相对湿度较高,这可能引发局部起雾的风险,并对相关设施造成潜在影响。



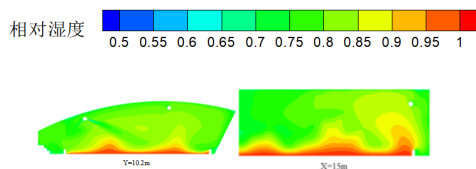
(a) $Y=10.2\text{ m}$ (b) $X=15\text{ m}$

图4 冰场速度云图



(a) $Y=10.2\text{ m}$ (b) $X=15\text{ m}$

图5 冰场温度云图



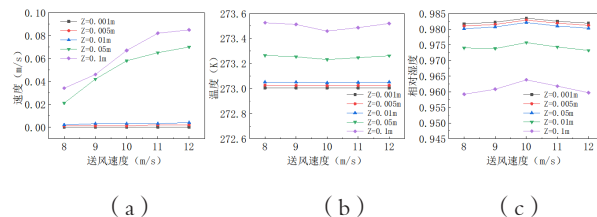
(a) $Y=10.2\text{ m}$ (b) $X=15\text{ m}$

图6 冰场相对湿度云图

3.2 送风速度对热湿传递影响

冰面工程的核心技术难点在于合理调控气流分布形态,以此提升热传导与质传递效率,确保环境参数达到设计要求。在冰场内部区域,风速需维持在 0.25 m/s 以内以保证舒适性。鉴于气流组织对传热及传质过程具有重要影响,本研究通过数值模拟分析了五种不同送风速度 (8 m/s 、 9 m/s 、 10 m/s 、 11 m/s 和 12 m/s) 下温度场和湿度场的变化特征,并构建了完整的热湿耦合传递数学模型(详见图 7)。系统探究了上述风速条件对冰场空气动力学特性、温度均匀性以及相对湿度分布规律的作用机制及其优化路径。

图 7 (a) 揭示,距冰面 0.1 m 以内区域的流速分布变化较为平缓;超出该范围后,随着高度增加,流速逐渐呈上升趋势。基于图 7 (b) 与图 7 (c) 的数据分析表明,在风速不超过 10 m/s 的情况下,提高供风速率将导致温度降低和相对湿度升高。当垂直高度小于 0.01 m 时,冰层上方的速度场、温度场及湿度场的变化幅度较小;而当高度大于 0.01 m 时,上述参数的主要波动集中在挡板附近区域,由于局部扰动效应的影响,形成涡旋结构,从而显著改变了冰面附近的热质传递特征。相对湿度随高度的增加表现出与温度相反的趋势变化规律。



(a) (b) (c)

图7 不同高度下,送风速度的影响

3.3 传热传质能力变化

利用公式 (8) 与公式 (9) 计算 Nu 。

$$Nu = \frac{-\frac{\partial t}{\partial z}|_{\text{冰面}z=0}}{\Delta t} l \quad (8)$$

$$Sh = \frac{-\frac{\partial c}{\partial z}|_{\text{冰面}z=0}}{\Delta c} l \quad (9)$$

其中, $\frac{\partial t}{\partial z}$ 为冰面上方近壁面温度梯度; Δt 为送风温度与冰面温度差; $\frac{\partial c}{\partial z}$ 为冰面上方近壁面湿度梯度; Δc 为送风含湿量与冰温下的饱和含湿量之差; l 为特征长度, Nu 中取 11 m, Sh 计算取 0.08 m。

图 8 给出了不同 Re 下冰面 Nu 数的变化情况。由图可知, 存在一个临界 Re 数, 当 $Re \leq 8.9 \times 10^4$ 时, Nu 随着 Re 的增大而减小, 拟合后 (图中红线所示) $Nu=4.78-1.6 Re$; $Re>8.9 \times 10^4$ 时, 随着 Re 增加, Nu 逐渐增加, 拟合表达式为 $Nu=0.09+1.1Re$ 。由图 9 可知, 随着 Re 数变化, Sh 为常数。当冰面上方速度低于 0.25 m/s 时送风速度对冰面的传质能力不影响。

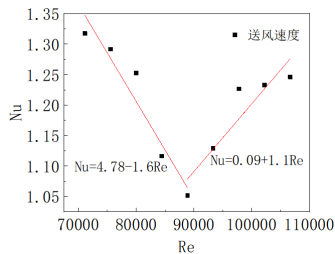


图8 Nu 随 Re 数变化情况

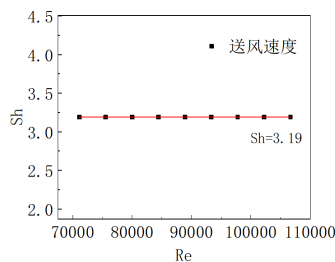


图9 不同送风速度下的 Re 与 Sh

4 结语

本文采用数值模拟方法研究某室内冰场速度场、温度场以及湿度场。冰面边界条件运用 UDF 自定义函数对湿量平衡进行了动态模拟, 分析室内冰场的热湿环境以及冰面与空间的传热传质过程, 并优化气流组织。得出以下

结论:

(1) 数值结果与实验结果吻合, 速度最大误差不超过 15%, 温度误差范围为 0.1-0.3℃, 最大误差小于 10%, 相对湿度最大误差小于 3%, 该模型可用于进一步研究;

(2) 冰面附近速度、温度和湿度出现明显分层现象, 随着距离冰面高度的增加, 平均速度和温度值增大, 但是湿度随高度减少, 越接近冰面越处于饱和状态;

(3) 冰场内存在冰面表面最小换热系数的临界送风速度 $U_c=10$ m/s, 当送风速度小于 U_c 时 Nu 随着 Re 的增大而减小, 当入流速度大于 U_c 时 Nu 随着 Re 的增大而增大。当送风流速高于 U_c , 冰面不易起雾; 而 Sh 基本不随 Re 数变化, 维持在 3.19 左右。

参考文献:

- [1] 《冰雪运动发展规划 (2016-2025 年) 》, 中华人民共和国国家发展改革委、国家体育总局、教育部、国家旅游局, 2016.11.25. (http://www.gov.cn/xinwen/2016-11/25/content_5137611.html).
- [2] 郭冰茹. 娱乐型室内人工冰场新风除湿系统节能设计的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [3] Lin W Y, Liu X H, Zhang T, Zhou Z Q. Investigation of displacement and jet ventilation systems applied in an ice rink[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 50: 104179.
- [4] Euijungbu H. A Study on Thermal Characteristics Affected by Air Distribution System Installed in Indoor Ice Rink Arena[J]. International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, 2019, 1950007.
- [5] Stobiecka A, Lipska B, Koper P. Comparison of air distribution systems in ice rink arena ventilation[J], Science — Future of Lithuania/Mokslas — Lietuvos Ateitis 2013, 5(4): 429-434.

基金项目: 福州市科技重大揭榜挂帅项目 (N500 225004)。

作者简介: 井艳敏 (1998.11-), 女, 汉族, 河南省商丘市, 硕士研究生, 研究方向: 人工环境安全。