第 36 卷　第 4 期　　石家庄铁道大学学报(自然科学版)　　Vol. 36　No. 4
2023 年 12 月　Journal of Shijiazhuang Tiedao University(Natural Science Edition)　Dec. 2023

空气幕在 U 型竞技场地中防风效果的数值模拟研究

柳方园[1]，　刘　衎[1,2,3]，　王泽远[1]，　崔会敏[2,3,4]，　刘庆宽[1,2,3]

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院，河北 石家庄　050043；
2. 石家庄铁道大学 省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室，河北 石家庄　050043；
3. 河北省风工程和风能利用工程技术创新中心，河北 石家庄　050043；
4. 石家庄铁道大学 数理系，河北 石家庄　050043)

摘要：在冬奥会一些比赛项目中，运动员完成动作时跳跃高度大，空中动作多，滞空时间长，受风速的影响较大。在风速较高情况下，运动员的动作容易变形，可能影响最终的比赛成绩甚至导致运动员受伤，并且赛场也可能出现被大风损坏的情况。应用 CFD 数值模拟方法，以冬奥会 U 型竞技场地以及周围一定区域内流场特性为研究对象，研究了挡风墙与空气幕对墙后流场特性的影响以及不同墙高和不同空气幕射流角度下对墙后流场特性的影响。模拟结果表明，挡风墙和空气幕组合使用可以为 U 型场地提供一个较大的低风速区域，当空气幕射流角度一定时，墙高越大，U 型场地上方剪切侧层高度越大，墙后庇护距离越远。当墙高一定时，空气幕射流角度在 50°～60°之间对风速的折减效果最好。同时采用空气幕作为防风措施，可以把防风网高度从 15 m 左右显著减少到 2 m。

关键词：U 型竞技场地；流场特性；数值模拟；挡风墙；空气幕

中图分类号：TU318　**文献标志码**：A　**文章编号**：2095-0373(2023)04-0014-07

0　引言

为了给赛场提供一个低速且稳定的风环境，在 2022 年北京冬奥会中负责设计及现场指导安装 U 型场地及空中技巧比赛防风网，该防风网可以防范每秒十几米的大风，保障运动员安全和比赛顺利进行。这项技术不仅打破了国外垄断，还得到了国际雪联等专家的一致认可和高度评价[1]。FU et al[2]研究了在高山滑雪中心使用不同高度的防风围栏进行防风，获得了在其他条件不变情况下最佳的防风围栏高度。该类防风网高度较大，对景观以及转播造成了一定影响。

为解决上述问题，使用空气幕与挡风墙的组合形式来降低冬奥比赛场地的风速。李家乐等[3]研究了不同高度挡风墙在不同来流风速下的防风效果，证明挡风墙的设置可有效削减近地表风速，明显改善了近地表风场。杨伟超等[4]将不同形态下高铁挡风墙的气动性能做了对比，得出了防风效果较好的挡风墙形态。空气幕目前在商场、厂房、冷库等建筑中应用尤其广泛[5]。刘荣华等[6]对空气幕不同出口角度下工作面气流流场及空气幕两侧呼吸性粉尘浓度分布进行数值模拟，分析空气幕出口角度对其隔尘效果的影响，找到了隔尘空气幕工作效率较高的角度范围。空气幕用于工业中的除尘降噪[7-9]等应用证明了空气幕广泛的适用性以及可用性。也有学者证明了使用空气幕可以在室外的场地中对一定目标区域的流场起到干预[10]，其区域内风速可能会有较大的改变。研究拟建立空气幕与 U 型竞技场地精细化物理模型及网格模型，采用 CFD 数值仿真方法，通过研究挡风墙高度、空气幕射流角度与 U 型竞技场地流场特性的关系，最终得出最佳的空气幕及挡风墙设计方案。

收稿日期：2023-09-01　**责任编辑**：车轩玉　DOI：10.13319/j.cnki.sjztddxxbzrb.20230225

基金项目：河北省自然科学基金创新研究群体项目(E2022210078)；中央引导地方科技发展资金项目(236Z5410G)；河北省高端人才项目(冀办[2019]63 号)；河北省自然科学基金(A2022210025)；石家庄铁道大学研究生创新资助项目(YC2023057)

作者简介：柳方园(1998—)，男，硕士研究生，研究方向为气幕防风。E-mail：1202101229@student.stdu.edu.cn

柳方园，刘衎，王泽远，等. 空气幕在 U 型竞技场地中防风效果的数值模拟研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版)，2023，36(4)：14-19，27.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

1　物理模型及数值方法

1.1　物理模型

研究对象为 U 型竞技场地与空气幕、挡风墙多体系统。考虑到赛场来流风为单向以及流场特性的复杂,挡风墙采用单侧布置。U 型竞技场地剖面长为 20.00 m,深度 6.70 m,U 型竞技场地底部由 2 个半径为 6.70 m 的 1/4 圆以及 1 条长 6.60 m 的平坦直线构成。距离 U 型竞技场地左侧 3.50 m 处设置一堵挡风墙,墙高为 h,墙上中央位置放置空气幕,空气幕射流速率为 v,射流角度为 α,来流速率为 $U=10.0$ m/s。二维物理模型如图 1 所示。三维模型可看作通过二维模型在 Z 方向拉伸得到,拉伸长度为 6 m,模型平面尺寸与二维一致。

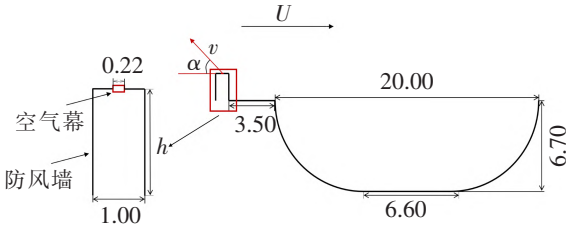


图 1　二维物理模型(单位:m)

1.2　计算方法

数值计算采用计算流体力学(CFD)软件 FLUENT,二维情况下的湍流模型采用 SST k-ω 湍流模型。k-ω 模型在近壁面采用 k-ω 方程计算,在湍流充分发展处采用 k-ε 方程[11],由于本次数值模拟要研究 U 型竞技场地周围一定区域内流场稳定下的风速,后续也会对场地近壁面处的流场特性进行研究,综合考虑,最终选用 k-ω 的衍生模型 SST k-ω 湍流模型。三维情况下采用 LES 模型。湍动能与比耗散率均采用二阶迎风格式,动量方程采用有限中心差分,速度与压力耦合方式采用二阶有限隐式方法。计算采用 SIMPLEC 格式求解压力速度耦合方程组。

1.3　边界条件及工况设置

1.3.1　边界条件

模拟风吹过挡风墙和空气幕组合的流体计算流域,为保证湍流风的充分发展,依据经验选取二维流域尺寸为 400 m×1 200 m。边界条件设置情况如图 2 所示:(1)流域入口以及空气幕设置为速度进口,速度分别为 U 和 v,对于湍流边界条件,采用湍动能 k 和比耗散率 w 参数组合。(2)因为出口接近湍流充分发展情况,故出口边界采用压力出口。(3)流域上侧设置为对称边界条件。(4)地面,挡风墙空气幕组合以及 U 型竞技场地采用无滑移边界条件。三维情况下除前后面为周期性边界条件之外,其余设置与二维情况下一致,如图 3 所示。

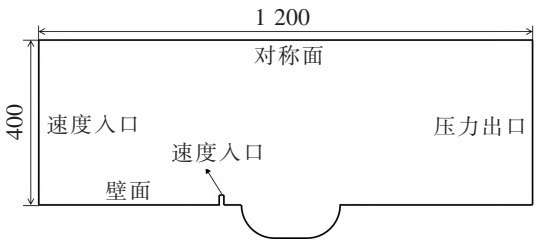


图 2　二维边界条件(单位:m)

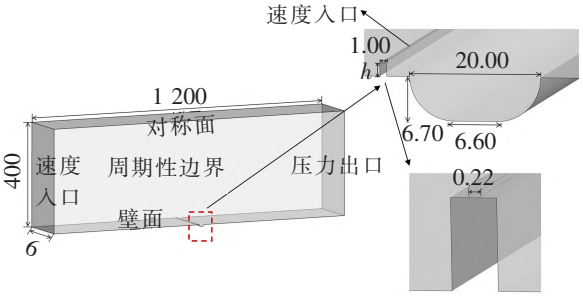


图 3　三维物理模型(单位:m)

1.3.2　工况设置

(1)$v=4U$, $\alpha=30°$,挡风墙高 h 为 0、0.5H、0.75H、H、1.5H ($H=2$ m)。

(2)$h=H$,$v=4U$,射流角度 α 为 20°、30°、40°、50°、60°、70°。

1.4　模型验证

1.4.1　网格无关性验证

重点关注 U 型竞技场地内及其上空的风速,风向等,目标降风区域如图 4 所示。采用 ICEM 进行网格划分,二维及三维网格划分

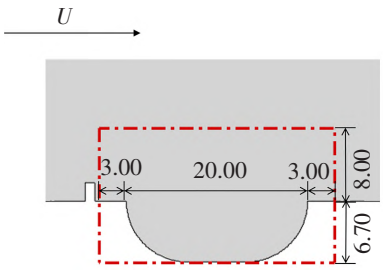
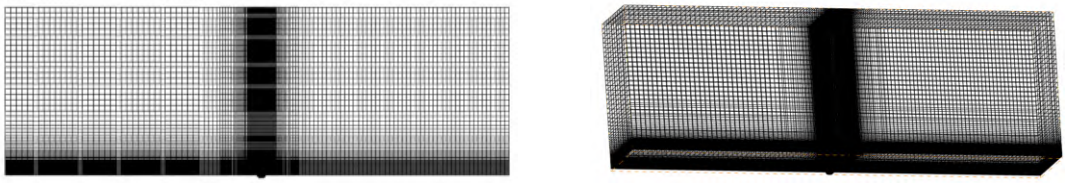


图 4　目标降风区域(单位:m)

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

如图5所示。为了保证精度以及提高计算速度,对此区域内进行了网格加密处理。



(a)二维网格 (b)三维网格

图5 二维及三维网格

二维模型网格量为 1.2×10^5 左右,三维模型网格量为 1.54×10^6 左右。选取 3×10^4、1.2×10^5、4.6×10^5 这3种网格量来进行网格无关性验证,以图6中1、2、3点第500 s时的瞬时速率作为评判标准。从表1可以看出,发现当网格量从 3×10^4 增加到 1.2×10^5 时P1速率变化幅度较大,当网格量由 1.2×10^5 增加到 4.6×10^5 时,3点的速率增幅均在5%以下,考虑计算时长以及计算结果的准确性,选择 1.2×10^5 网格量的网格进行计算。

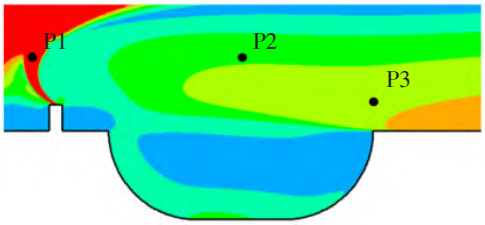


图6 监测点位置

表1 网格无关性验证

网格量	监测点					
	P1		P2		P3	
	速度/(m·s^{-1})	相差百分比/%	速度/(m·s^{-1})	相差百分比/%	速度/(m·s^{-1})	相差百分比/%
3.0×10^4	15.73	—	2.30	—	2.68	—
1.2×10^5	17.77	12.97	2.37	3.04	2.69	0.37
4.6×10^5	16.90	4.90	2.46	3.80	2.80	4.09

1.4.2 时间步长无关性验证

选取0.01、0.004、0.001 s 3个时间步长来进行时间步长无关性验证,同样以1、2、3点第500 s时的瞬时速率作为评判标准。从表2可以看出,当时间步长由0.01 s减小到0.004 s时,P1点速率增幅较大,当时间步长由0.004 s减小到0.001 s时,3点速率增幅均在5%以下,选择0.004 s的时间步长进行计算。

表2 时间步长无关性验证

时间步长/s	监测点					
	P1		P2		P3	
	速度/(m·s^{-1})	相差百分比/%	速度/(m·s^{-1})	相差百分比/%	速度/(m·s^{-1})	相差百分比/%
0.010	15.76	—	2.38	—	2.72	—
0.004	17.77	12.75	2.37	0.42	2.69	1.10
0.001	17.98	1.18	2.36	0.42	2.70	0.37

针对二维模型,监控了1、2、3点的瞬时速率,当计算到500 s时,3点的瞬时速率均已基本稳定,证明此时计算已经收敛,认为500 s为最终的发展演化状态。

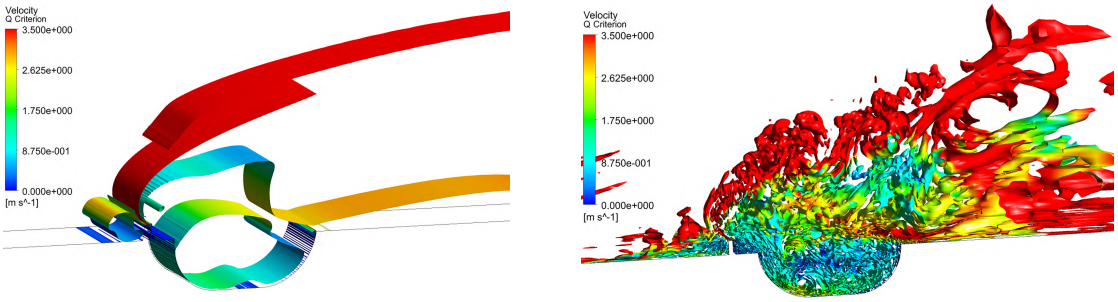
2 结果分析

2.1 二维与三维情况对比

首先进行URANS湍流模型和LES湍流模型的比较,2种方法下由Q准则表示的漩涡结构如图7所示,可以看出,使用URANS湍流模型发现在轴向上没有明显的涡分离现象,而LES湍流模型可以捕捉

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

到更多的涡结构，所以三维情况采用 LES 湍流模型进行。



(a)URANS 模型　　(b)LES 模型

图 7　URANS 模型以及 LES 模型由 Q 准则表示的漩涡结构

采用 LES 湍流模型进行了三维情况下的计算，$v=4U$，$h=H$，$\alpha=30°$。比较 $s=0.5H$、$s=1.5H$、$s=2.5H$ 这 3 个截面与二维情况下在 $y/H=1$ 高度上的风速比，并将这 3 组风速比取平均值，与二维情况下在 $y/H=1$ 高度上的风速比进行对比，如图 8 所示，发现 2 组数据相差很小，所以本模型的 3D 效应并不是很明显，接下来主要针对二维模型进行研究。

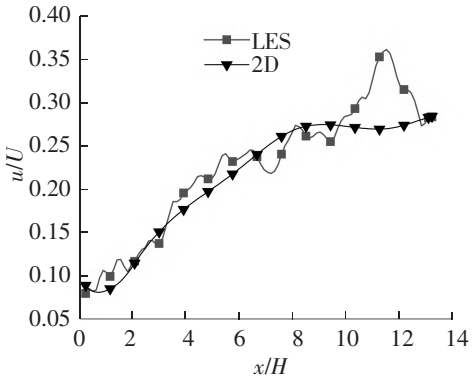
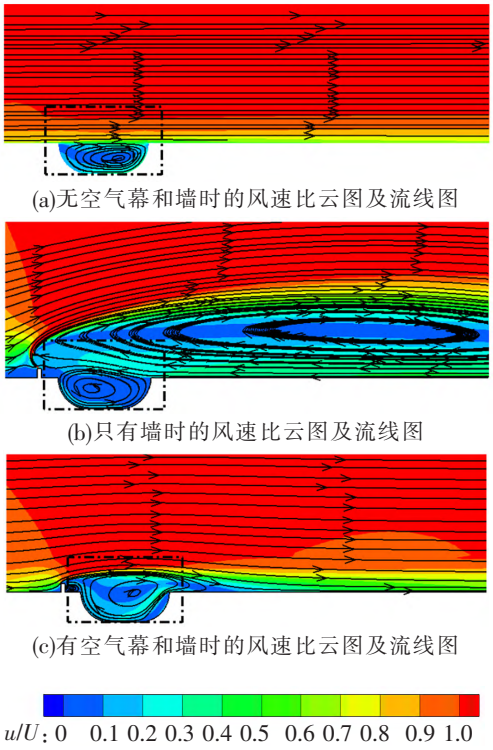


图 8　二维和三维情况下 $y/H=1$ 处风速比

2.2　空气幕及墙的组合对流场特性的影响

如图 9(a)可以看出，在来流风的作用下，流域上侧的速度梯度很小，其风速大致与未受到挡风墙干扰的来流风速相同，此区域为外部流动层。U 型竞技场地内形成了一个天然的庇护区，庇护区内的风速较小，大部分在 $0.35U$ 之下，同时由于负压还引起了一个顺时针方向的回流漩涡。但由于 U 型场地两侧上方的风速较大，所以必须采取一定的措施来降低此区域内的风速。如图 9(b)所示，在 U 型场地前方设置一堵 2 m 高的挡风墙，在流域上侧仍然存在外部流动层，来流风在墙顶向上抬升形成上部绕流，与上方速度梯度较小的来流风相互作用，导致风速增大。在墙背处形成了负压回流区，从图 9 可看到明显漩涡。随着距离的增加，剪切层逐渐降低，由于上部高风速和下部低风速的逐渐汇合，尾流层不断扩张，最终墙后风速脱离墙的影响，恢复至墙前未受扰动的初始状态。目标降风处内仍然存在风速较大的区域，并未达到防风目标。如图 9(c)所示，放置空气幕于墙体之上，给予其一定的射流角度以及射流速度，来流风受墙体的阻挡以及空气幕射流的影响向上抬升，形成绕流并且风速增加，由于空气幕的存在，剪切层的高度得到提升，低风速区域变大，并且 U 型场地上方形成了一个较大的回流漩涡。随着墙后距离的增加，尾流层同样不断扩张，最终墙后风速脱离墙的影响，恢复至墙前未受扰动的初始状态。但是，相比较墙上未安装空气幕的情况，需要更远的距离才能恢复至初始状态，也就是放置了空气幕之后，对流场的影响范围变得更大。



(a)无空气幕和墙时的风速比云图及流线图

(b)只有墙时的风速比云图及流线图

(c)有空气幕和墙时的风速比云图及流线图

图 9　不同情况下的风速比云图及流线图

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2.3 不同墙高对场地的影响

为了更好地评价场地的防风效果,定义图 10 所示的风环境影响系数来量化空气幕挡风性能,在比赛中,当运动员滞空时,很容易受到风的影响失去平衡,所以重点关注运动员滞空时,也就是 A、B 处的风环境系数。公式如下

$$\lambda=\frac{U_{es}}{U} \tag{1}$$

式中,U 为来流风速;U_{es} 为等效风速;具体定义如下

$$U_{es}^2=\frac{1}{Z_c}\int_0^{Z_c}u^2(Z)\mathrm{d}z \tag{2}$$

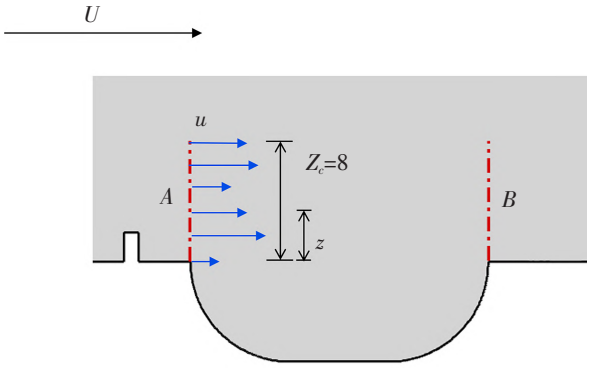


图 10 风环境系数物理量示意图(单位:m)

挡风效率定义为

$$\eta=1-\lambda \tag{3}$$

挡风墙高设置为 0、0.5H、0.75H、H、1.5H,此时 $v=4U$, $\alpha=30°$。对比不同墙高下的风速比云图,如图 11 所示。$h=0$ 时在 U 型场地右侧运动员即将腾空时出现了高风速区域,而当挡风墙存在时,此区域内的高风速区域消失,并且此时 U 型场地内部风速更小,低风速区域面积占比更大。随着墙高的增加,U 型场地内部的低风速区域也就越大,同时 U 型场地右侧的高风速区域也有向右移动的趋势。同时,由图 12 可以看出,墙高从 0.5H 增加到 1.5H 的过程中,A、B 处的挡风效率越来越高。所以墙高为 1.5H 时对风的折减效果最好,但是考虑到赛场的美观以及比赛转播的问题,挡风墙的高度不宜过高,选择墙高为 H。

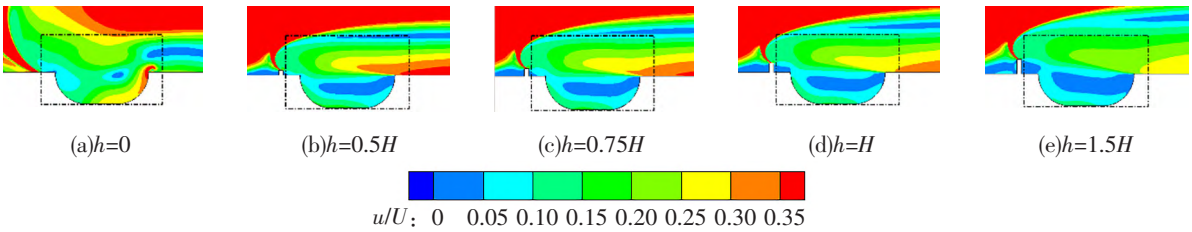


图 11 不同墙高下的风速比云图

2.4 不同射流角度对场地的影响

设置 $h=H$,$v=4U$,射流角度 α 设置为 20°、30°、40°、50°、60°、70°来研究当射流角度不同时场地的流场特性。由图 13 可以看出,当 $\alpha=20°$时,U 型场地上方剪切层的高度较低,低风速区域的面积较小。随着空气幕射流角度的增加,当 α 从 30°增加到 60°的过程中,可以看出 U 型场地上方低风速区域面积越来越大,而当 α 继续增加到 70°时,上方剪切层高度又有降低的趋势。U 型场地右侧运动员即将腾空处存在风速在 0.3U~0.35U 的区域,随着 α 由 20°增加到 50°的过程中,此区域向右移动,当 α 继续增加到 70°的过程中,此区域出现向左移动的趋势。同时根据图 14 可以看出,随着 α 的增加,挡风效率也有逐渐降低的过程,所以空气幕的射流角度不宜过大,在 50°~60°之间最适宜。

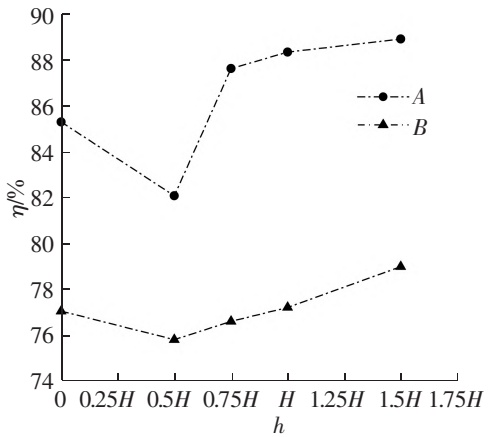


图 12 不同墙高下的挡风效率

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

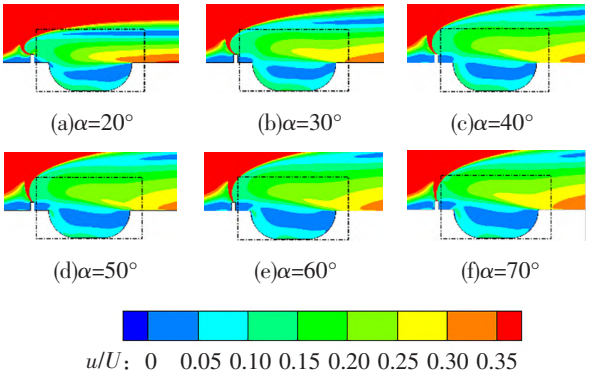


图 13　不同射流角度下的风速比云图

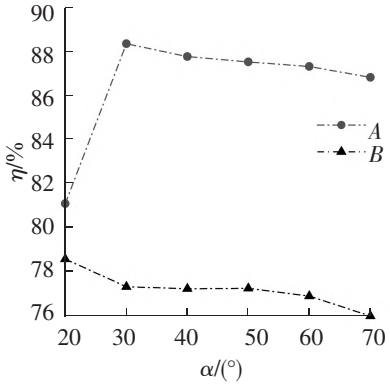


图 14　不同射流角度下的挡风效率

3　结论

通过 CFD 数值模拟的方法对 U 型竞技场地在不同挡风墙高，不同空气幕射流角度情况下的流场特性进行了研究，研究发现：

(1)用空气幕加挡风墙的组合可以为 U 型竞技场地提供满足比赛要求的风环境。当只有一堵挡风墙时，会在墙顶形成明显的边界层分离现象，能够提供一定的低风速区域，但是墙高较小时，U 型场地风速并不能达到比赛要求，而当使用空气幕后会对风速起到很好的折减作用，风速能够达到比赛要求。

(2)空气幕射流角度一定的情况下，选择挡风墙高度为 2 m。挡风墙和空气幕组合能对来流风起到阻挡和能量耗散的作用，在墙后形成剪切层，在空气幕射流角度一定的情况下，墙高越高，剪切层的高度越大，庇护距离也就越远。但考虑到实用性，最终选择墙高为 2 m。

(3)挡风墙高度为 2 m 时，选择空气幕射流角度为 50°～60°。当墙高一定时，剪切层高度随射流角度的增大呈先上升后降低的趋势，综合考虑挡风效率，空气幕射流角度为 50°～60°时的效果最佳。

参　考　文　献

[1]李如意. 与风共舞 云顶防风网科技感满满[N]. 北京日报，2022-01-16(4).

[2]FU Zhaokun，LI Qingwen. Study on wind-proof effect and stability of windbreak fence in alpine skiing center [J]. Sustainability，2023，15(4)：1-14.

[3]李家乐，赵文举，严正. 基于 CFD 的挡风墙防风效果仿真[J]. 排灌机械工程学报，2020，38(6)：620-625.

[4]杨伟超，赵文，邓锷，等. 高铁挡风墙端部 2 种缓冲结构的气动性能对比[J]. 中南大学学报(自然科学版)，2022，53(5)：1941-1954.

[5]韩悦，郭海丰，柴佳颖. 空气幕的研究现状与新型空气幕的展望 [J]. 建筑与预算，2020(8)：47-50.

[6]刘荣华，李夕兵，施式亮，等. 综采工作面隔尘空气幕出口角度对隔尘效果的影响[J]. 中国安全科学学报，2009，19(12)：128-134.

[7]LI X，JIANG Y，ZHU J，et al. Air curtain dust-collecting technology：Investigation of industrial application in tobacco factory of the air curtain dust-collecting system [J]. Process Safety and Environmental Protection，2021，149：676-683.

[8]NIE W，HUA Y，ZHOU W，et al. Design and application of a dust suppression technology of the forcing air curtain in fully mechanized rock tunnelling faces [J]. Environmental Science and Pollution Research，2022，29(23)：34943-34954.

[9]PENGFEI W，TAO F，RONGHUA L. Numerical simulation of dust distribution at a fully mechanized face under the isolation effect of an air curtain [J]. Mining Science and Technology (China)，2011，21(1)：65-69.

[10]CHAUVAT G，PEPLINSKI A，HENNINGSON D S，et al. Global linear analysis of a jet in cross-flow at low velocity ratios [J]. Journal of Fluid Mechanics，2020，889：1-21.

[11]陈廷国，马思明. 不同截面形式防风网流场的 3D 数值仿真[J]. 计算机仿真，2014，31(1)：258-263.

(下转第 27 页)

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

different width-height ratios at different wind attack angles was compared and analyzed. Then, the mechanism of the variation of the three-component force coefficients was preliminarily discussed by analyzing the distribution law of wind pressure. Finally, the vortex shedding characteristics of the double-sided box girder with different width-height ratios were revealed by comparing and analyzing the Fourier amplitude spectrum of the lift coefficient. The results show that the influence of the width-height ratio on the drag coefficient is mainly reflected in the large positive angle of attack, and the influence on the lift coefficient and torque coefficient is mainly reflected in the large negative angle of attack. The vortex shedding characteristics are closely related to the double-sided box girder's width-height ratio and wind attack angle.

Key words: double-sided box girder; aerodynamic characteristics; width-height ratio; wind tunnel force measurement test; wind tunnel pressure measurement test

(上接第 19 页)

Numerical Simulation Study on the Wind Protection Effect of Air Curtain in the Halfpipe Venue

Liu Fangyuan[1], **Liu Kan**[1,2,3], **Wang Zeyuan**[1], **Cui Huimin**[2,3,4], **Liu Qingkuan**[1,2,3]

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;
2. State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structures, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;
3. Innovation Center for Wind Engineering and Wind Energy Technology of Hebei Province, Shijiazhuang 050043, China;
4. Department of Mathematics and Physics, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: In certain Winter Olympic events, athletes often strive for high jumping heights, perform frequent aerial movements, and experience prolonged periods of suspension during their maneuvers, all of which might be significantly influenced by wind speed. In the presence of strong wind speed, athletes' movements are susceptible to deformation, potentially impacting their overall performance and even leading to athlete injuries. Additionally, the field itself may sustain damage as a result of the powerful winds. This article applied CFD numerical simulation method to study the flow field characteristics in the halfpipe venue and surrounding areas. The study examined the impact of windbreaks and air curtains on the flow field characteristics behind walls, and investigated the effects of varying wall heights as well as air curtain jet angles on the flow field characteristics behind the walls. The simulation results indicate that the combination of windbreaks and air curtains can provide a large low-wind-speed area near the halfpipe venue. It is also found that when the air curtain jet angle is constant, the higher the wall height is, the higher the shear layer height above the halfpipe venue, which will lead to a farther shelter distance behind the wall. Additionally, the air curtain jet angle between 50 ° and 60 ° has the best reduction effect on wind speed. Herein, the height of the windbreak with an air curtain can be reduced to about 2 m from 15 m height of a traditional windbreak.

Key words: the halfpipe venue; flow field characteristics; numerical simulation; windbreak; air curtain

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net