

斜插板式沙障插板倾角影响下风沙流特征的数值模拟

丁泊淞, 高丽, 程建军, 陈柏羽

(石河子大学水利建筑工程学院, 新疆石河子 832003)

摘要: [目的] 优化既有沙障的结构形式, 以发挥最大挡沙功效, 揭示铁路沿线斜插板式沙障的风沙流特征和规律, 为风沙灾害防治提供相关的设计参考和科学依据。[方法] 基于欧拉双流体非定常模型对具有不同插板倾角(15°, 30°, 45°和 60°)但孔隙率均为 30%的斜插板式沙障进行数值模拟。[结果] ①随插板倾角逐渐增大, 沙障迎风侧减速区范围无明显变化, 上方加速区和背风侧涡流区范围逐渐增大, 迎风侧气流向下弯曲运动的趋势逐渐增强, 背风侧向上运动的气流与水平风向夹角逐渐增大。②不同风速下, 4 种斜插板式沙障周围风速均呈“U”型分布, 对同一风速而言, 背风侧涡流区内风速极小值与插板倾角呈负相关。[结论] 随插板倾角逐渐增大, 沙障迎风侧积沙量逐渐增多, 背风侧整体积沙量逐渐减少但背风侧 1 H 范围内积沙量逐渐增多, 背风侧主要积沙分布范围与沙障之间的距离逐渐增大。

关键词: 斜插板式沙障; 插板倾角; 风沙流场; 数值模拟

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2021)01-0132-06

中图分类号: U216.41⁺3

文献参数: 丁泊淞, 高丽, 程建军, 等. 斜插板式沙障插板倾角影响下风沙流特征的数值模拟[J]. 水土保持通报, 2021, 41(1): 132-137. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2021.01.019; Ding Bosong, Gao Li, Cheng Jianjun, et al. Numerical simulation of wind-sand flow characteristics of inclined inserting-type sand fence under influence of inserting plate angle [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(1): 132-137.

Numerical Simulation of Wind-Sand Flow Characteristics of Inclined Inserting-Type Sand Fence Under Influence of Inserting Plate Angle

Ding Bosong, Gao Li, Cheng Jianjun, Chen Boyu

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China)

Abstract: [Objective] The structure form of existing sand barriers was optimized to maximize the sand retention effect, the characteristics of wind and sand flow of inclined inserting-type sand fences along a railway were studied in order to provide a relevant design reference and scientific basis for the prevention and control of wind and sand disasters. [Methods] Based on the Eulerian two-fluid unsteady model, numerical simulations were conducted on inclined inserting-type sand fences with different inclination angles of the insert plate (15°, 30°, 45°, and 60°) but the same porosity (30%). [Results] ① The inclination angle of the insert plate gradually increased, the range of the windward side deceleration zone did not change significantly, and the range of the upper acceleration zone and the leeward side vortex zone gradually increased. The tendency of the windward side airflow to bend downward gradually increased, and the angle between the airflow moving upward on the leeward side and the horizontal wind direction gradually increased. ② Under different wind speeds, the wind speeds around the inclined inserting-type sand fence were U-shaped curves. For the same wind speed, the minimum wind speed in the leeward vortex area was negatively correlated with the inclination angle of the plate. [Conclusion] As the inclination angle of the inserting plate increased gradually, the sand on the windward side gradually increased, and the sand on the leeward side gradually decreased. However, the sand in the 1 H range on the leeward side gradually increased. The distance between the main

收稿日期: 2020-09-28

修回日期: 2020-11-04

资助项目: 新疆生产建设兵团中青年科技创新领军人才计划项目“风沙防治基础理论与工程技术方法”(2019CB023); 新疆生产建设兵团重大科技计划项目“新疆陆地交通智慧建养成套技术与装备研究”(2020AA002)。

第一作者: 丁泊淞(1998—), 男(汉族), 河南省周口市人, 硕士研究生, 研究方向为沙漠砂材料性能及铁路防沙工程应用。Email: 906894026@qq.com。

通讯作者: 程建军(1979—), 男(汉族), 河北省衡水市人, 博士, 教授, 博士生导师, 从事工程地质与道路风沙灾害防治研究。Email: chengdesign@126.com。

sand distribution on the leeward side and the sand barrier gradually increased.

Keywords: inclined inserting-type sand fence; angle of inserting plate; wind-sand flow fields; numerical simulation

兰新高铁是一条横贯中国甘肃、青海和新疆 3 省区的铁路大动脉,作为亚欧大陆桥铁路通道的重要组成部分,对促进边疆地区民族团结及加快西北地区经济建设具有重要意义^[1]。然而,兰新铁路新疆段需穿越四大戈壁风区,风区内自然条件极其恶劣,普遍存在风速高、风期长、起动风速快等特点,铁路安全正常运营受到严重威胁^[2-5]。

为抵御戈壁大风区极端的风沙灾害,多种机械防沙措施应用在兰新高铁沿线,取得了一定效果^[6-11]。斜插板式沙障是由中铁西北科学研究院有限公司提出的一种新型透风式沙障,具有抗风能力强、结构可靠、耐久性好等优点,已应用于兰新铁路沿线的风沙灾害防治^[12-13]。斜插板式沙障主体结构由数块横截面为平行四边形的混凝土插板构成,插板之间相互平行且与主导风向呈一定夹角,彼此保持一定距离以形成特定孔隙率(见图 1)。关于斜插板式沙障的防风阻沙效果,已有学者进行了相关调查及研究:石龙等^[12]对不同设计参数的斜插板式沙障进行了研究,结果表明沙障孔隙率宜为 25%~40%,高度宜为 1.5~2 m;李凯崇等^[13]对斜插板式沙障进行了现场观测,发现其消减风能效果优异,并且风沙流经过墙体后沙粒的细组分含量明显增加;Cheng 等^[14]通过风洞试验及现场调查发现,斜插板式沙障具有独特的筛分沙粒作用。

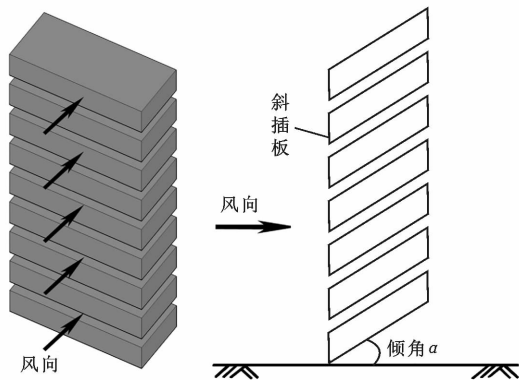


图 1 斜插板式沙障示意图

斜插板式沙障的孔隙结构为狭长的斜导孔,特殊的孔隙形式能够迫使风沙流受沙障阻碍后,沿斜导孔向上爬升,克服重力做功,从而达到消减风沙流运动风能的作用,所以,插板与风向的夹角通常小于 90°,兰新铁路沿线使用的斜插板式沙障正是这一类型^[13-15]。然而,目前关于斜插板式沙障插板倾角($<90^\circ$)影响下的风沙流特征规律的研究较少,不足以揭示插板倾角变化对风沙流的作用规律。

为优化既有沙障的结构形式,以发挥最大挡沙功效,本文基于 CFD 数值模拟方法,对具有不同插板倾角(15°, 30°, 45°和 60°)但孔隙率均为 30%的斜插板式沙障进行风沙流数值模拟,以期进一步揭示插板倾角影响下的风沙流特征规律,为铁路沿线斜插板式沙障的优化设计提供理论依据。

1 数值模拟方法

1.1 几何建模及网格划分

运用 AutoCAD 对 4 种具有不同插板倾角($\alpha = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$)但孔隙率均为 30%的斜插板式沙障进行几何建模。由于斜插板式沙障在结构上呈几何对称,因此,可将其简化为二维模型计算。计算域长度为 150 m,高度为 30 m,沙障高度为 2 m($H = 200$ cm),放置在距入口 50 m 处。计算域模型及边界条件见图 2。

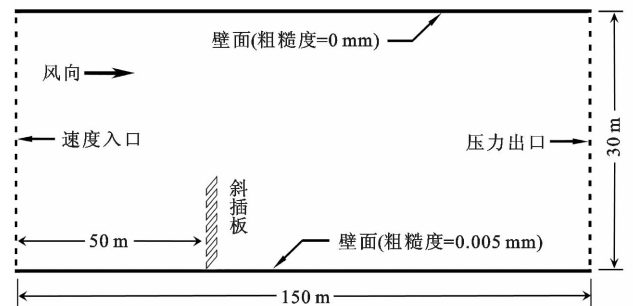


图 2 计算域模型及边界条件示意图

计算域模型网格划分类型采用三角形网格(triangles),并对地面及沙障附近的网格进行加密,网格尺寸增长率为 1.1,网格质量平均值约为 0.95,计算域模型网格数量约为 4.00×10^4 个,网格质量优良。计算域网格划分结果见图 3。

1.2 计算参数及控制方程

本文模拟工况下风沙流马赫数均小于 0.3,可认为是不可压缩流动,模型出口边界条件为压力出口(pressure-outlet),压力差为 0,模型入口边界条件设置为速度入口(velocity-inlet),入口为典型风速廓线流^[16-18]:

$$V(y) = \frac{V}{k} \ln \frac{y}{y_0} \quad (1)$$

式中: V 为摩阻风速; k 为卡门常数,取固定值 0.4, y 为高度; $V(y)$ 为 y 高度处的风速值; y_0 为地表粗糙度,取沙粒平均粒径的 $1/30$ ^[19]。

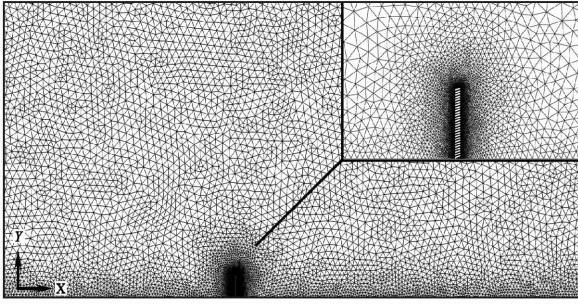


图 3 计算域网格划分示意图

风沙流沙粒粒径通常在 0.075~0.25 mm 之间, 本文数值模拟中沙粒粒径设定为 $d_s=0.15$ mm, 形状类型为颗粒(Granular), 沙粒密度 $\rho_s=2\ 650$ kg/m³, 黏度 $\mu_s=0.004\ 7$ Pa·s, 初始沙粒体积分率为 1%, 类型为 FLUID, 空气密度 $\rho_k=1.225$ kg/m³, 空气动力粘度 $\mu_k=1.789\times 10^{-5}$ Pa·s^[20-21]。模拟风速选取 10, 15, 20 m/s 3 种。

本文数值模拟中主要的控制方程有连续性方程、动量方程、和 $k-\epsilon$ 湍流方程等:

(1) 连续性方程^[22]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

式中: u 为速度矢量; u_x, u_y, u_z 分别为 3 个方向的速度矢量; ρ 为密度; t 为时间。

(2) 动量方程^[22]:

$$\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_x \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + \rho f_x \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho u_y)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_y \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + \rho f_y \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho u_z)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_z \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \quad (5)$$

式中: ∇ 为算符; p 为流体微元上的压力; f_x, f_y, f_z 分别表示 x, y, z 3 个方向的质量力; τ 为流体内应力张量的分量。

(3) $k-\epsilon$ 湍流方程^[23]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon}) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (7)$$

式中: G_k 表示平均速度梯度引起的湍动能; G_b 表示浮力引起的湍动能; Y_M 为可压缩湍流的耗散率比; $C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}, C_{3\epsilon}$ 为常数; $\sigma_k, \sigma_\epsilon$ 表示普朗特数。

方程组求解计算方法采用 SIMPLEC 算法, 该算法适用于不可压缩流动, 并且可以加快迭代过程的收敛, 各分量值收敛标准为物理收敛, 大小为 10^{-6} 量级。

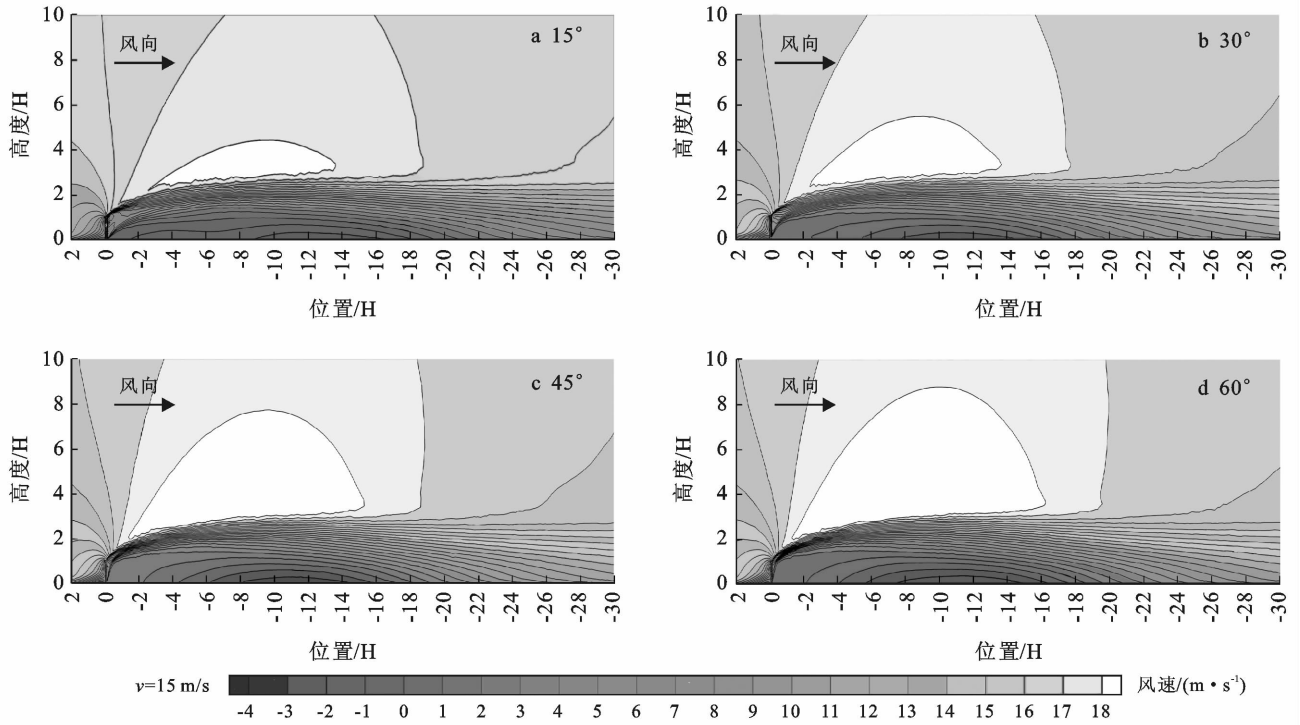
2 结果与分析

2.1 流场变化规律

气流受沙障阻碍时, 会产生分离而后重新汇聚, 在沙障周围形成明显的流场分区, 其特征可以反映沙障阻风效果。以 15 m/s 风速为例, 绘制 4 种斜插板式沙障周围风速等值线(见图 4)。可以看出, 4 种具有不同插板倾角的沙障周围均有迎风侧减速区、上方加速区和背风侧涡流区生成, 但受插板倾角变化影响, 流场分区变化趋势不尽相同: 对于迎风侧减速区而言, 其范围受插板倾角影响较小, 4 种沙障的减速区范围无明显差异; 对于上方加速区而言, 其范围存在随插板倾角增大而增大的变化规律; 对于背风侧涡流区而言, 随插板倾角逐渐增大, 涡流区范围逐渐增大, 涡流区内反向气流流速也相应提高。

流线图可以表示某一时刻气流的运动趋势, 流线上的箭头方向可以指示气流流向, 流线的疏密程度可以反映流速大小。以风速 15 m/s 为例, 绘制 4 种沙障周围流线图(见图 5)。可以看出, 4 种倾角的插板对气流作用规律相同: 迎风侧气流流经斜导孔时, 贴近地面的气流先向下运动再沿斜导孔向上运动, 而靠近沙障上端的气流则顺势向上通过斜导孔, 两部分气流经过斜导孔后在背风侧重新汇集, 而后受背风侧涡流区反向气流的作用, 流经斜导孔的气流与水平风向夹角进一步加大。但插板倾角不同, 沙障对迎风侧气流的影响程度明显不同: 插板倾角较小时, 迎风侧贴近地面的流线向下弯曲的程度较小, 气流向下弯曲运动的趋势较弱(见图 5a), 随着插板倾角逐渐增大, 贴近地面的流线向下弯曲的程度逐渐增大, 气流向下弯曲运动的趋势较强(见图 5d); 另外, 插板倾角对沙障背风侧气流也具有显著影响, 随插板倾角逐渐增大, 背风侧流线与水平风向的夹角逐渐增大, 气流聚集加速程度也逐渐增强。这一结论与 Cheng 等^[14] 人所做的斜插板式沙障风沙流场特征野外试验结果相吻合, 验证了数值模拟的准确性。

产生上述变化规律的原因在于不同倾角的插板对迎风侧气流的挤压程度不同, 存在随插板倾角增大而增强的变化规律, 二者呈正相关。插板倾角较大时, 插板对迎风侧气流的挤压作用较强, 近地面的气流需以较大的角度向下运动才能通过斜导孔, 同时, 较大的插板倾角也使得沙障对气流的阻滞作用较强, 导致背风侧涡流区范围较大, 在涡流区反向气流的附加作用下, 流经斜导孔的这一部分气流与水平风向的夹角进一步增大。



注:①图中“a,b,c,d”分别表示插板倾角 15°,30°,45°,60°;②纵横坐标单位 H 为沙障高度(H=200 cm),例如 $x=2$ 时,表示距离沙障 2 H(即 400 cm)处的位置, $y=2$ 时,表示距离地面 2 H(即 400 cm)处的高度,正值表示迎风侧,负值表示背风侧。下同。

图 4 风速 $v=15 \text{ m/s}$ 时不同倾角斜插板式沙障周围风速等值线特征

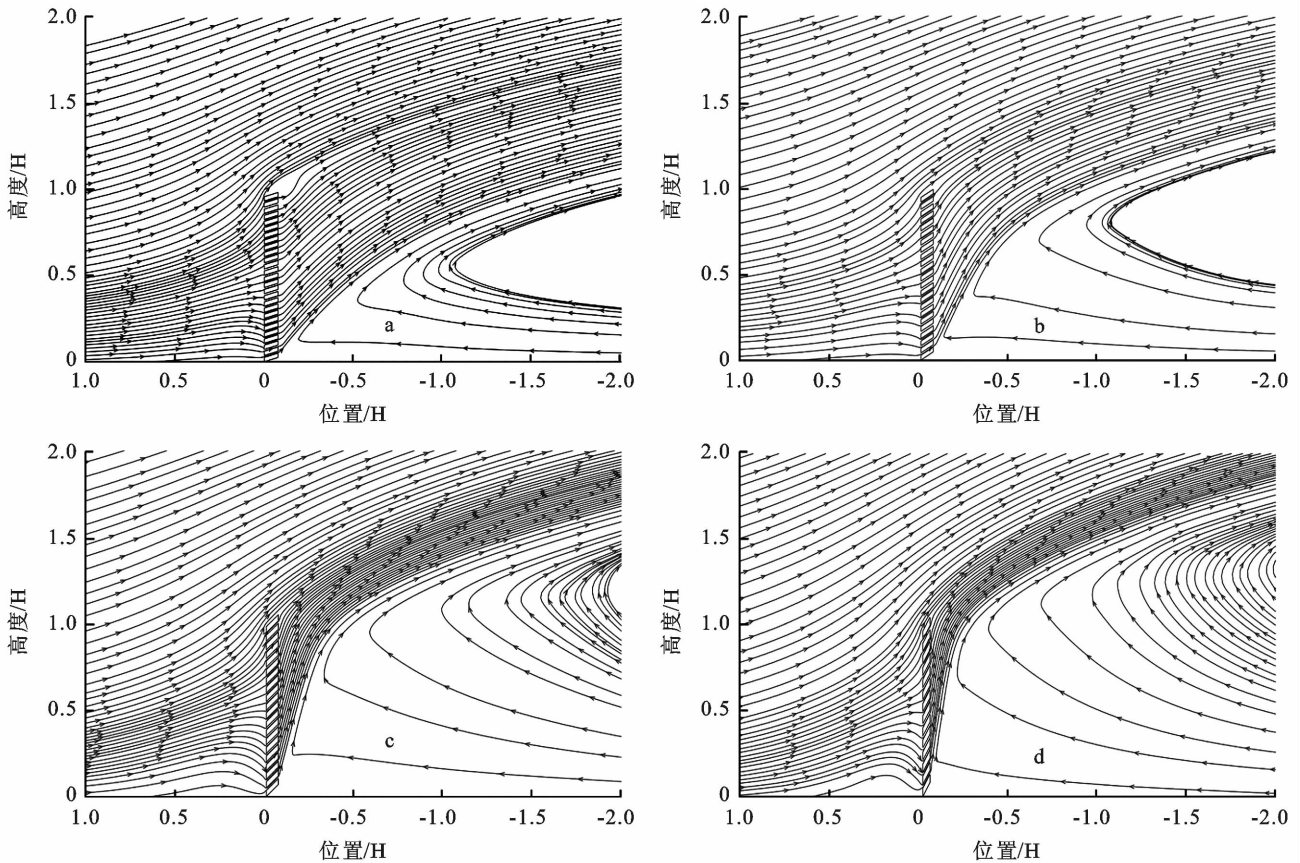
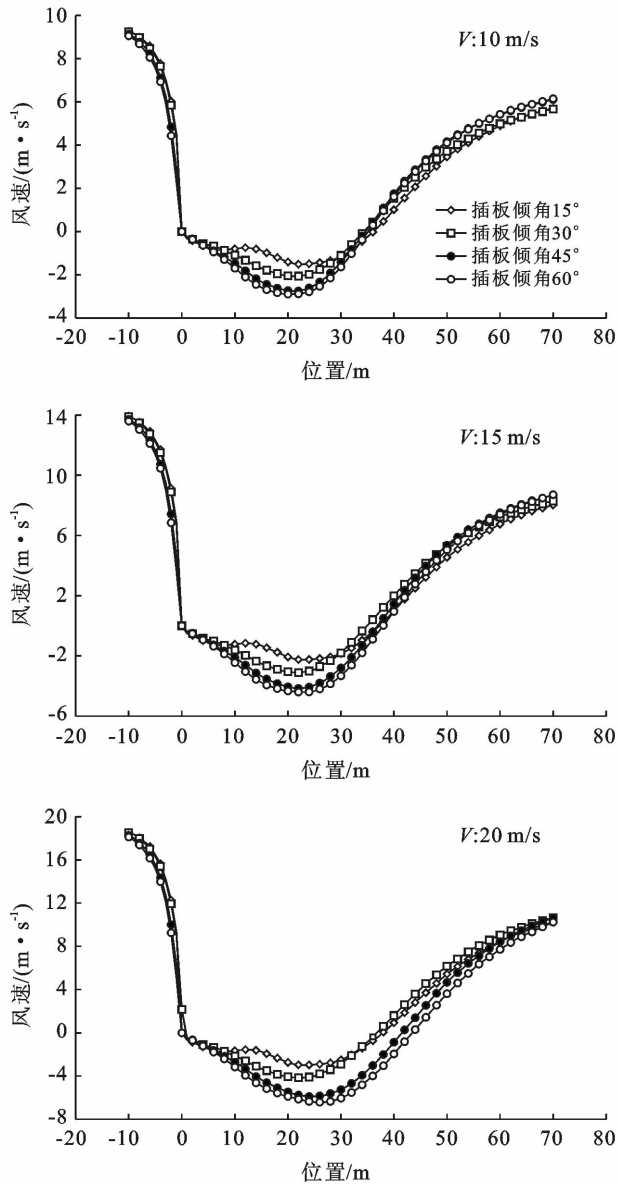


图 5 来流风速为 15 m/s 时的斜插板式沙障周围流线特征

为进一步分析插板倾角对斜插板式沙障周围流场的影响,绘制不同风速下 4 种沙障前后距地面 0.5 m

高度处风速变化曲线(见图 6)。从图 6 可以看出,不同风速下,4 种沙障周围风速变化规律一致,均呈“U”

型分布。对于同一风速而言,背风侧涡流区内风速极小值存在随插板倾角增大而减小的变化规律,二者呈负相关,这也进一步表明,增大插板倾角可以增强沙障对气流的阻碍作用,背风侧涡流区内反向气流流速相应增大。



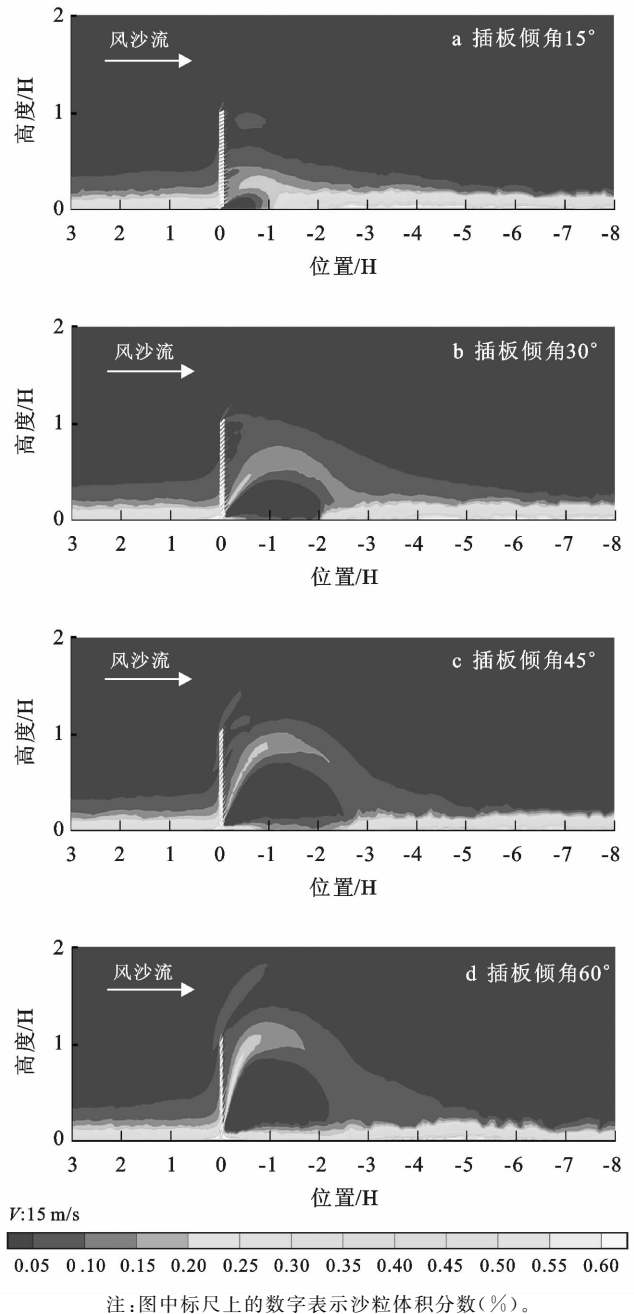
注:图中横坐标负值表示迎风侧,正值表示背风侧。

图 6 不同倾角斜插板式沙障前后 0.5 m 高度处风速变化曲线

2.2 积沙迁移规律

以 15 m/s 风速为例,绘制 4 种沙障周围积沙分布(见图 7)。由图 7 可以看出,4 种沙障周围积沙迁移规律相似,即迎风侧积沙量较少且紧贴沙障分布,主要积沙分布范围在背风侧且与沙障保持一定距离。随插板倾角逐渐增大,沙障迎风侧积沙量逐渐增多,而背风侧整体积沙量逐渐减少,背风侧主要积沙范围

与沙障之间的距离也逐渐增大,但对于背风侧 1 H 范围内而言,积沙量反而逐渐增多。



注:图中标尺上的数字表示沙粒体积分数(%)。

图 7 斜插板式沙障周围积沙分布特征

产生上述积沙迁移规律的主要原因是 4 种沙障所消减的风沙流运动风能不同:风沙流受沙障阻碍时,迎风侧风沙流流速有所降低,风沙流经过斜导孔时,具有一定倾角的插板会迫使气流向上运动,在此过程中,风沙流与斜导孔壁面相互作用,其运动风能逐渐减小,另外,风沙流向上运动的过程中,风沙流的部分动能转化为重力势能,气流携沙能力进一步降低。当插板倾角较小时,迎风侧风沙流流速降幅较小,风沙流经过斜导孔时损失的动能也较少,气流携沙能力降低幅度

较小,因此,迎风侧堆积的沙粒较少,更多的沙粒随气流运动至背风侧后逐渐堆积;而当插板倾角较大时,迎风侧风沙流流速降幅较大,风沙流经过斜导孔时损失的动能也较多,导致气流携沙能力降低幅度较大,因此,在重力主导作用下,沙粒更易沉积在沙障附近,而背风侧主要积沙范围内的积沙量较少。

3 结论及讨论

(1) 斜插板式沙障周围流场分区可分为迎风侧减速区、上方加速区和背风侧涡流区。受插板倾角变化影响,流场分区变化趋势不尽相同:随插板倾角逐渐增大,迎风侧减速区范围无明显变化,上方加速区和背风侧涡流区范围逐渐增大。

(2) 斜插板式沙障周围气流的运动趋势受插板倾角影响呈规律性变化,随插板倾角逐渐增大,迎风侧近地表处气流受到的挤压作用逐渐增强,气流向下弯曲运动的趋势逐渐增强,背风侧向上运动的气流与水平风向的夹角逐渐增大,气流聚集加速程度也逐渐增强。

(3) 不同风速下,4种斜插板式沙障周围风速均呈“U”型分布。对同一风速而言,背风侧涡流区内风速极小值存在随插板倾角增大而减小的变化规律,二者呈负相关。

(4) 4种斜插板式沙障迎风侧积沙较少且紧贴沙障分布,主要积沙分布范围集中在背风侧,且与沙障之间存在一定距离。随插板倾角逐渐增大,迎风侧积沙量逐渐增多,而背风侧整体积沙量逐渐减少,但背风侧1H范围内积沙逐渐增多,并且背风侧主要积沙分布范围与沙障之间的距离也逐渐增大。

基于目前斜插板式沙障的研究现状,降低斜插板板材在生产过程中原材料获取及运输所产生的高昂成本将成为日后研究工作的重点,后续可以着重研究利用就地取材的方式生产板材,可考虑在控制成本的前提下添加纤维丝等材料以保证其强度达到使用要求,使斜插板式沙障在沙区铁路或公路工程风沙防治中达到“以沙治沙”的效果。

[参 考 文 献]

[1] 张春民,王玮强,李文添,等.基于面板数据的兰新高铁区域经济特性分析[J].铁道科学与工程学报,2017,14(1):12-18.

[2] 钱征宇.西北地区铁路大风灾害及其防治对策[J].中国铁路,2009(3):1-4.

[3] 孟祥连,李鲲,谢胜波,等.兰新高铁大风区风况特征及防风工程设计分区[J].中国沙漠,2018,38(5):972-977.

[4] 王学楷.兰新铁路挡风墙的设计与施工[J].路基工程,2012(5):180-182.

[5] 葛盛昌,蒋富强.兰新铁路强风地区风沙成因及挡风墙防风效果分析[J].铁道工程学报,2009,26(5):1-4.

[6] 葛春庚,石龙,李凯崇.兰新二线强风地区防沙措施效益评价[J].铁道标准设计,2015,59(9):37-40.

[7] 李凯崇,石龙,孔令伟,等.兰新高铁沿线不同挡沙墙防护效果评价[J].铁道工程学报,2017,34(3):11-14,21.

[8] 张乘波.兰新高速铁路风沙区段挡沙墙设计参数试验研究[J].铁道标准设计,2016,60(9):4-8.

[9] 辛文栋.风区高速铁路路基沙害防治研究与设计[J].铁道工程学报,2015,32(10):61-65,72.

[10] 郝晓杰,熊治文,蒋富强,等.青藏铁路不同防沙栅栏的布设位置研究[J].铁道标准设计,2012,56(4):16-20.

[11] 王国联,张道金.临策铁路天鹅湖至额济纳段线路及防沙工程方案研究[J].铁道标准设计,2011,55(4):1-5.

[12] 石龙,蒋富强.斜插板挡沙墙设计参数优化数值模拟[J].中国沙漠,2014,34(3):666-673.

[13] 李凯崇,刘贺业,蒋富强,等.斜插板挡沙墙风沙防治现场试验研究[J].中国铁道科学,2013,34(2):46-51.

[14] Cheng Jianjun, Lei Jiaqiang, Li Shengyu, et al. Disturbance of the inclined inserting-type sand fence to wind-sand flow fields and its sand control characteristics [J]. *Aeolian Research*, 2016,21:139-150.

[15] 蒋富强,李凯崇,薛春晓,等.斜插板式挡沙墙[P].甘肃:CN102505643A,2012-06-20.

[16] Tennekes H. The logarithmic wind profile [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1973,30(2):234-238.

[17] Bauer B O, Houser C A, Nickling W G. Analysis of velocity profile measurements from wind-tunnel experiments with saltation [J]. *Geomorphology*, 2004,59(1/2/3/4):81-98.

[18] Jiang Hong, Dun Hongchao, Tong Ding, et al. Sand transportation and reverse patterns over leeward face of sand dune [J]. *Geomorphology*, 2017,283:41-47.

[19] 丁国栋.地表粗糙度的含义本质[J].中国沙漠,1993,3(4):43-47.

[20] Huang Ning, Zheng Xiaojing, Zhou Youhe. A multi-objective optimization method for probability density function of lift-off speed of wind-blown sand movement [J]. *Advances in Engineering Software*, 2006,37(1):32-40.

[21] Cheng Jianjun, Xin Guowei, Zhi Lingyan, et al. Unloading characteristics of sand-drift in wind-shallow areas along railway and the effect of sand removal by force of wind [J]. *Scientific Reports*, 2017,7:41462.

[22] Anderson J D. *Governing equations of fluid dynamics [M]//Computational fluid dynamics*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1992:15-51.

[23] 熊莉芳,林源,李世武. $k-\epsilon$ 湍流模型及其在 FLUENT 软件中的应用[J].工业加热,2007(4):13-15.