

DOI:10.11918/202305001

# 风沙地区铁路路堑挡沙墙设计参数优化与防护效果

刘 畅<sup>1</sup>, 王海龙<sup>1,2</sup>, 孙 婧<sup>2</sup>

(1. 石家庄铁道大学 交通运输学院, 石家庄 050043; 2. 河北省土木工程诊断、改造与抗灾重点实验室(河北建筑工程学院), 河北 张家口 075132)

**摘 要:** 为探究风沙地区铁路路堑流场中的湍流-沙颗粒运动特性, 针对性地优化设计防护措施的结构参数, 对某铁路路堑流场进行了数值模拟分析。基于欧拉-拉格朗日框架建立了 LES-DPM 三维湍流流场模型, 研究路堑在风沙地貌下的风沙流特性及沙颗粒运动规律, 并根据其风沙运动特点设计单排挡沙墙和双排挡沙墙两种类型的风沙防护措施, 同时通过对不同距离、不同排列方式的流场特征和防沙效果进行对比获取最优的风沙防护措施设计参数。研究表明: 路堑结构因下凹结构导致堑内出现大量小尺度马蹄涡, 钢轨附近多为破碎的低速涡团, 湍流结构复杂; 钢轨附近风速均小于 3.6 m/s, 移动沙粒易受逆压梯度影响及紊流作用向路堑内沉降; 由于路堑流场的沙埋风险大大增加, 对比发现, 将高度 2 m 的挡沙墙布置在迎风侧距路堑 20 m 可获得最佳的防护效果, 大部分颗粒被阻隔在挡沙墙前, 越过挡沙墙的颗粒大多沉降在其后回流区内, 且粒径均小于 0.125 mm; 同时发现, 当采用前低后高的双排挡沙墙(2 m/3 m)可以进一步增加低速回流区范围并减少运动至路堑内的颗粒数量, 提高防护效果。

**关键词:** 铁路工程; 风沙流场; 数值模拟; 离散相模型; 挡沙墙

中图分类号: U216.413

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2023)11-0099-08

## Design parameters optimization and protection effect of the retaining wall for railway cutting in wind-blown sand region

LIU Chang<sup>1</sup>, WANG Hailong<sup>1,2</sup>, SUN Jing<sup>2</sup>

(1. School of Traffic and Transportation, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. Hebei Key Laboratory of Diagnosis, Reconstruction and Anti-disaster of Civil Engineering

(Hebei University of Architecture), Zhangjiakou 075132, Hebei, China)

**Abstract:** To investigate the turbulence-sand particle movement characteristics of the flow fields of a railway cutting in wind-blown sand areas and to optimize structural parameters for the protective measures, the numerical simulation analysis of the flow field with a railway cutting was carried out. Based on the Euler-Lagrange framework, the three-dimensional turbulent flow model of LES-DPM was established, and the characteristics of wind-sand flow and the movement of sand particles in the aeolian landform were studied. Two types of the protective measures were designed according to the characteristics of wind-sand movement, At the same time, the optimal design parameters of sand protection measures are obtained by comparing the flow field characteristics and sand prevention effects at different distances and different arrangements. The results show that a large number of small-scale horseshoe vortices appear in the cutting due to the concave structure, and most of the low broken velocity vortices near the rail, the turbulence structure is complex. The wind-velocity near the rail is less than 3.6 m/s, the moving particles is easily affected by the reverse pressure gradient and turbulence to settle into the cutting. The risk of sand burial is significantly increased. Therefore, it has been determined that the most effective protection can be achieved by placing a 2 m high retaining wall on the windward side at a distance of 20 m from the cutting. Most of the particles are trapped in front of the retaining wall, while those that manage to pass through settle in the backflow area behind it, with a particle size less than 0.125 mm. It has been observed that the utilization of a double-row sand retaining wall (2 m/3 m) can further expand the range of low-velocity reflux area and decrease the number of particles entering into the excavation, thereby enhancing its protective efficacy.

**Keywords:** railway engineering; wind-sand flow field; numerical simulation; discrete phase model; retaining wall

收稿日期: 2023-05-01; 录用日期: 2023-07-04; 网络首发日期: 2023-10-25

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20231025.1340.002>

基金项目: 河北省重点研发计划(20373802D)

作者简介: 刘 畅(1992—), 女, 博士研究生; 王海龙(1965—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 王海龙, [liuchang1122@163.com](mailto:liuchang1122@163.com)

风沙地区的铁路线路受到风沙灾害影响,会造成如钢轨磨蚀、沙埋、列车侧翻等诸多问题。目前防沙措施主要采用植物治沙、机械治沙、化学治沙等方法,因不同区域的风力、风向、地形和线路条件的特殊性,往往需要因地制宜的设计防沙措施。具有建设周期短、见效快特点的机械治沙,成为恶劣环境中的首选防护措施<sup>[1]</sup>。关于机械措施的相关研究主要围绕设计参数、防护效果等方面。文献[2]通过研究风场风切变速度变化从而优化防风沙障设计参数。文献[3]根据欧拉双流体模型得到土堤式挡沙墙和柱板式挡沙墙的流场分布特点和路基积沙的形态,进而评价防风效果。文献[4]设计 HDPE 材料提出新型功能沙障,并通过风洞试验得到其有效防护距离和防护效果。文献[5]采取数值模拟手段,针对西北荒漠地区最为常见的两种工程措施——防风挡沙墙与草方格沙障进行深入研究,对其设计参数提出相应改进措施。文献[6]通过 Fluent 对兰新高铁沿线风沙流场数值模拟得出,设置挡沙墙使得线路两侧防风效果较好,有效保障高铁的运营安全。值得注意的是,目前工程问题普遍采用雷诺平均方法(Reynolds averaged Navier-Stokes equations, RANS)设计防护措施的结构参数,通过模拟单相流场或采用欧拉双流体方法获得风沙流场特征,其中,欧拉双流体将颗粒相视为连续相进行模拟计算<sup>[7]</sup>。而实际的风沙流场属于非定常流动,在非定常流动下沙粒的运动分布是不均匀的,且在不同的风条件下输沙率表现为“锯齿型现象”<sup>[8]</sup>。因此本文采用大涡模拟(large eddy simulation, LES)获得风沙流场的非定常脉动特性<sup>[9-10]</sup>,并结合在欧拉-拉格朗日框架下的离散相模型(discrete phase model, DPM)模拟沙颗粒。LES 大多被用来研究建筑风压分布和气动荷载的模拟、污染扩散以及山地风场的模拟等<sup>[11-12]</sup>,而关于风沙跃移及防风固沙措施的研究较少。真实环境中沙尘(颗粒相)的体积分数小于 10%,且颗粒会随涡流运动聚集而并不是均匀分布<sup>[13]</sup>,所以采用 LES-DPM 更适用于表现风沙流场特性。

在前期对青海省新建地方铁路鱼卡(红柳)至一里坪线路的考察中发现<sup>[14]</sup>,路堑的下凹结构更容易导致堑底线路积沙严重,成为铁路产生沙害的主要原因。目前常见的风沙防护措施模拟方法多在平坦床面设计,因此,为分析在风沙环境下路堑工况下湍流与沙粒的相互作用规律,保护铁路工程免受风沙灾害,本文采用欧拉-拉格朗日法针对该工况进

行模拟分析,研究湍流结构与颗粒运动的内在关系,并提出相应的防护结构,通过对比研究流场及积沙分布情况,可为铁路路堑在工程应用中的风沙灾害治理提供理论基础。

## 1 风沙流场数值模型的建立

### 1.1 数值模型的建立

真实环境中,风场具有非定常脉动特性、不同沙颗粒的运动轨迹也并不相同。LES 对大于滤波尺度的涡流可进行直接求解,获得更多的湍流信息;DPM 则可以求解每个颗粒的运动方程,获得如速度、位置、路径等信息,更易于表现沙颗粒的离散型和随机性。因此采用 LES 结合 DPM 更加适合于风沙运动的模拟。

故利用 ANSYS Fluent 仿真软件,并采用用户自定义函数(UDF)对边界条件及颗粒设置进行修正,建立三维风沙流场模型,并对铁路路堑流场进行分析。

### 1.2 计算区域与网格划分

选择某一单线铁路路堑结构作为流场模型。其中,路基面宽度为 8.6 m、边坡坡率为 1:1.5,路基两侧设置高度为 1 m 的侧沟,并在侧沟外侧设置 2 m 宽的平台,路基面为有砟轨道单线直线轨道(对某些细部结构进行简化),计算域的具体尺寸如图 1 所示。流场整体计算域尺寸为 429.6 m × 100 m × 60 m,来流风向垂直于线路方向。为满足大涡模拟的网格要求,准确捕捉计算模型周围流场的复杂湍流特性,对周围网格需进行加密处理。网格增长率为 1.1,通过网格无关性验证,最终该计算域的总网格数为 336.46 万。

### 1.3 边界条件及求解算法设定

边界条件如图 1 所示,将流场入口设置为速度入口,并将 NSRFG<sup>[15]</sup>作为 LES 模拟计算的入流边界条件,生成湍流场所需的脉动风速信息,参考高度(10 m)的风速设置为 10 m/s,采用 UDF 将其加载至速度入口的网格之中。路堑表面及平坦地面设置为无滑移壁面,流场顶面及两侧设置为对称边界,出口为压力出口。速度压力耦合方程采用 SIMPLE 法进行求解,非线性对流项为二阶迎风格式离散,动量方程采用有界中心差分格式,时间离散为二阶隐式格式,亚格子模型为壁面自适应局部涡粘模型(WALE)。收敛标准设置为  $10^{-5}$ 。模型计算时对入口边界选取某一参考点进行监测,可得到 NSRFG 所生成的脉动风速时程曲线(图 2)。

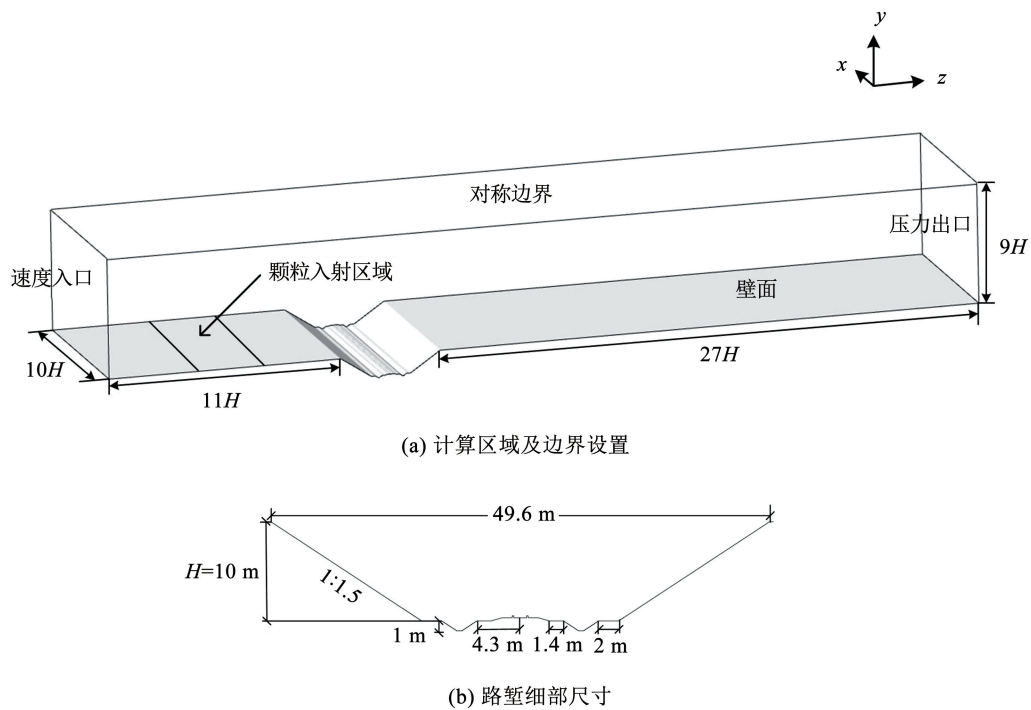


图 1 计算域及边界条件

Fig. 1 Computational domain and boundary conditions

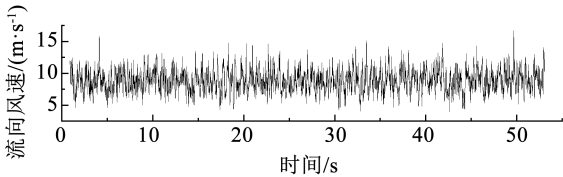


图 2 某一监测点 (35,7.5,0) 流向风速时程

Fig. 2 Time history of flow wind speed at a monitoring point (35,7.5,0)

为构建风沙两相流运动,需在路堑前  $z = 50 \sim 80$  m 地面以较小速度  $0.1$  m/s 向流场注入颗粒 (图 1),模拟地面积沙,同时在  $y = 2$  m 高度以  $0.1$  m/s 向空中注入颗粒,模拟远处的风携沙。颗粒的边界条件中,除了地面为反弹 (reflect) 外,其余壁面均为逃逸 (escape)。计算时颗粒假定为球体,注入颗粒的粒径需服从对数正态分布,根据实测数据,将计算中的沙粒平均粒径取  $2.5 \times 10^{-4}$  m,标准差为  $0.7 \times 10^{-4}$ 。根据 Box-Muller 算法,通过 UDF 编译可将 DPM 中的注入颗粒设定为满足对数正态分布的随机粒径。

由于拉格朗日离散模型中颗粒运动轨迹强烈依赖湍流流场的流动特征,同时保证计算结果的有效性,需先对纯流场进行 LES 瞬态计算。其中,时间步长取为  $0.05$  s,计算时长  $40$  s,当得到充满不同尺度湍流的计算域后,向湍流流场内开始注入颗粒,此阶段的时间步长为  $0.02$  s。继续模拟  $40$  s 后,颗粒在流场内充分运动,并得到相应的流场信息。

## 2 平衡态湍流风场的验证

### 2.1 风洞试验简介

风洞试验结果是参考在石家庄铁道大学风工程研究中心 STU-1 风洞实验室进行的风洞试验。低速实验段长  $24$  m,宽  $4.4$  m,高  $3$  m,低速实验段的可调最大风速为  $30$  m/s。由于处于风沙灾害的铁路工程大多在沙漠或荒漠地区,因此地貌粗糙度为 A 类。参考风速设置约为  $10$  m/s。试验中风场测试系统采用 TFI 眼镜蛇三维脉动风速测量仪,精度为  $0.5$  m/s,采样频率及时间分别为  $330$  Hz 和  $100$  s。

### 2.2 验证平衡态湍流风场

向流场内注入的颗粒的运动轨迹会强烈依赖所在流场的湍流结构,所以需要先保证流场满足大气边界层风场特性,即对大气边界层空流域进行模拟验证。图 3 为采用 NSRFG 方法模拟得到的风场平均风速和湍流强度剖面与风洞实验及《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)<sup>[16]</sup> 的对比结果。其中,  $Z_g$  为梯度高度,  $U_g$  为梯度高度风速,  $I_u$  为顺风向湍流强度,  $\alpha$  为风剖面指数。图 3 中模拟得到的平均风速与目标风速剖面基本保持一致,而流场中湍流强度剖面相较于规范值与风洞试验值有一定的衰减。但总体而言,入口采用 NSRFG 方法生成的湍流流场基本满足大气边界层目标湍流风场特性的要求,所构建的湍流流场可以准确模拟大气边界层的湍流特性。



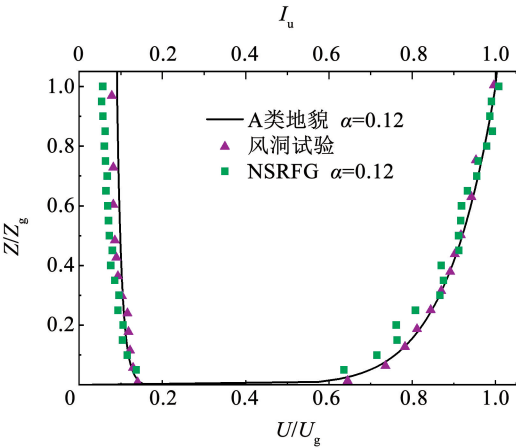


图 3 平均风速和湍流强度剖面对比

Fig. 3 Comparison of average wind velocity and turbulence intensity profiles

3 风沙流场特征分析

3.1 涡结构特性及流场特征分析

在风沙环境下, 铁路工程选择路堤作为铁路路基时, 对铁路及列车的防护手段多采用“阻隔远处风携沙, 降低路基面风速”的思路。图 4 为采用  $Q$  准则<sup>[17]</sup>作为判定方法所得到的路堑与路堤两种路基形式下风沙流场的瞬时涡型图对比, 显而易见, 路基周围的涡团结构大不相同。图 4(a) 中路堑内多为复杂密实的涡旋结构, 路堑上半部存在马蹄涡, 而钢轨附近多为破碎低速涡团。而图 4(b) 在路基面上多为附着在钢轨附近的锥形涡, 马蹄涡则聚集在路堤后遮蔽区内。马蹄涡所在区域会导致气流流动方向反向(即形成回流), 这些回流涡旋会增加钢轨附近的积沙量并影响列车的正常运营及增加清沙维护成本。可见在风沙流场中, 路堑结构的沙埋风险远远大于路堤结构, 因此无法采用路堤结构所考虑的导沙、输沙思路。

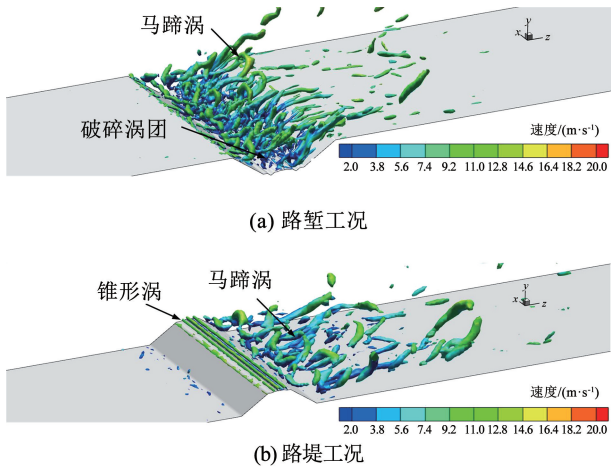


图 4 基于  $Q$  准则的瞬时涡结构对比 ( $Q > 3$ )

Fig. 4 Comparison of instantaneous vortex contours based on  $Q$  Criterion ( $Q > 3$ )

考虑到大涡模拟会反映湍流脉动的流场特征, 图 5 是某  $y-z$  截面的瞬时风速云图。在参考高度风速为 10 m/s 的前提下, 可以发现在路堑内部风速值基本不超过 11 m/s, 左边坡附近风速均小于 5.6 m/s; 路堑的下凹形式对路基面形成天然阻风效果, 导致距路基面一定高度内风速均小于 3.6 m/s, 形成低速区。

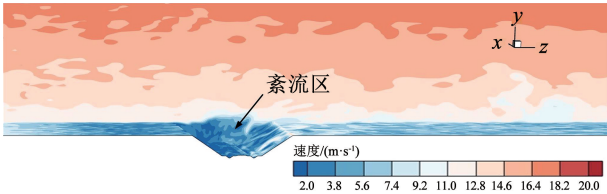


图 5  $x = 35$  m 的  $y-z$  截面风速云图

Fig. 5  $y-z$  section wind velocity contour with  $x = 35$  m

3.2 流场颗粒分布规律

为直观得到流场内运动颗粒的分布规律, 将来流方向( $z$  向)不同位置颗粒水平速度与颗粒粒径分布进行统计得到图 6。由图 6 可见, 整个流场内分布不同速度的运动颗粒。研究发现最易跃移的沙粒粒径为 0.10 ~ 0.25 mm<sup>[18]</sup>, 在路堑前流场(即  $z = 100 \sim 116$  m)分布的大部分小粒径颗粒( $d \leq 0.267$  mm)均保持低速运动, 速度为 0 ~ 4.70 m/s, 而大粒径颗粒运动距离基本保持在 25 ~ 41 m 之间。小粒径颗粒运动至路堑内后, 流向速度迅速增加, 速度达到 -7.31 ~ 14.90 m/s, 说明颗粒会在路堑内开始反向运动并出现速度较大的反向运动颗粒。图 7 中的蓝色流线表示气流的运动轨迹, 可发现路堑内部的气流流动方向交错复杂, 并且出现不同于流向方向的反向回流, 即产生“窝风”现象; 同时颗粒会因为紊流而“窝”在下凹结构内而很难再次输导到路堑外, 最终沉降在铁路线路周围。

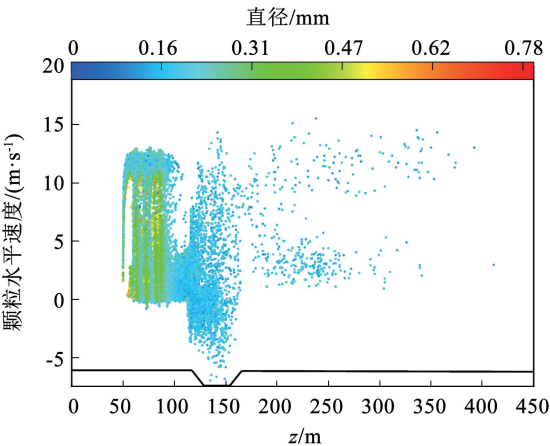


图 6 颗粒速度与粒径统计

Fig. 6 Statistics of particle velocity and size



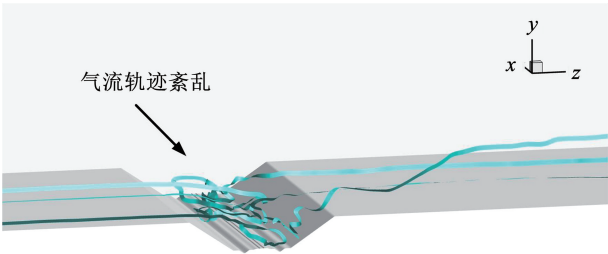


图 7 流场内部分三维流线

Fig. 7 A diagram of parts of 3D streamline at flow field

另外,很多风沙灾害地区的瞬时风速可达到每秒几十米,会导致更多沙粒进入路堑内后难以输导出去,钢轨的掩埋风险更大。

4 防护措施设计参数优化

由 3.1 节分析可知,针对存在路堑结构的风沙流场,防风固沙措施的设计应该着重在路面阻沙,防止来流风沙进入路堑内,对铁路工程造成风蚀、沙埋等风沙危害。

4.1 单排挡沙墙防护效果分析

根据前期在青海红一线的防护研究,挡沙墙可以改变流场分布,并在其后形成一定范围的低速遮蔽区。遮蔽区有利于沙颗粒的沉降,防止沙颗粒再次起动。当挡沙墙布置较远时,铁路路基未处在低速遮蔽区的保护范围内,路基附近的地表流沙易被再次扬起。同时,风沙地区 90% 的移动沙颗粒集中在地表高度 30 cm 以下,选择 2 m 高的挡沙墙即可达到良好的防风阻沙效果。因此考虑颗粒起动条件、挡沙墙遮蔽区距离,探究挡沙墙布设位置对含路堑流场湍流结构分布的影响,将 2 m 高的挡沙墙分别设置在距离路堑 0、10、20 m 的不同位置处(图 8),作为工况 1、工况 2、工况 3 对比分析。

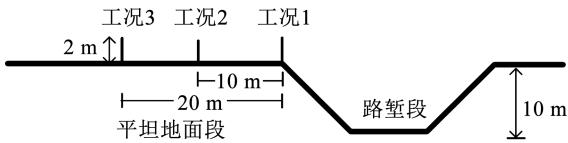


图 8 挡沙墙与路堑布置间距示意图

Fig. 8 Layout spacing diagram of retaining wall and road cutting

4.1.1 流场特征分析

图 9 为 3 种工况流场某  $y-z$  截面的瞬时风速云图( $x=50\text{ m}$ )。可直观看出,3 种工况都会将气流抬升一定高度,在路堑内形成更大范围的低速区;同时,工况 2、3 还会在挡沙墙后平坦区域形成低速区。随着布设距离的增加,工况 1 中的气流紊乱区(图 9(a)区域 I)会逐渐扩散至整个堑内,湍流结构也变得复杂。

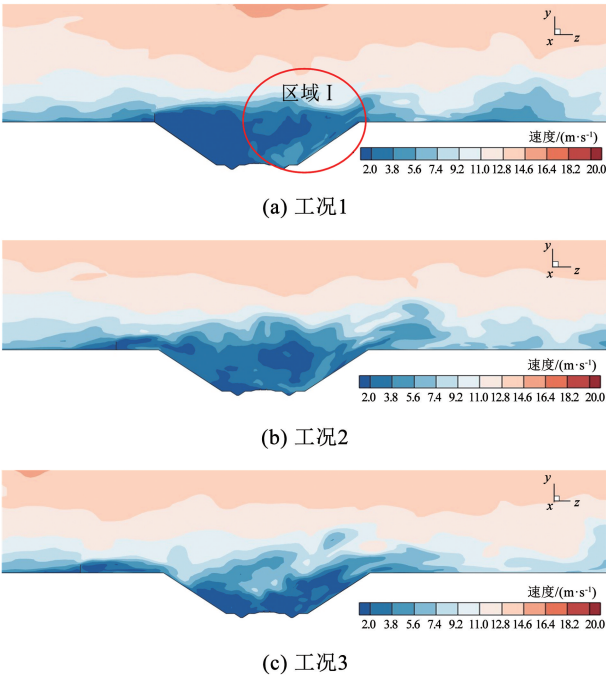
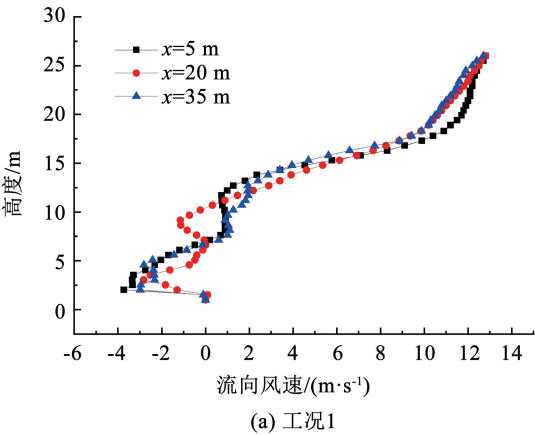


图 9 3 种工况下  $y-z$  截面风速云图( $x=50\text{ m}$ )

Fig. 9 Wind velocity contour of  $y-z$  section under three working conditions

为进一步研究路堑内的湍流变化,将 3 种工况的路堑中心位置的垂直风速廓线进行对比得到图 10。路堑内出现的“S”型曲线表示此处存在紊流,沙粒在紊流作用下更易沉降堆积。由图 10 可知,工况 1 中路堑内均为低速涡流,且低速区高度在 11.7~12.7 m 之间。工况 2 相对工况 1,在相同高度下流向风速增大,紊流变化范围也增大。工况 3 中流向速度变化范围更大。这都表明,受挡沙墙抬升的气流在路堑内开始下沉,并且随着挡沙墙与路堑距离的增加,抬升气流下沉位置会不断提前。但是另一方面,结合图 9 可见,当挡沙墙与路堑存在一定间距后,其后形成的遮蔽区会让一部分越过挡沙墙的沙粒在遮蔽区沉降,减少了沙粒向路堑内移动的比重。因此还需探讨 3 种工况下的颗粒运动分布规律。



(a) 工况 1

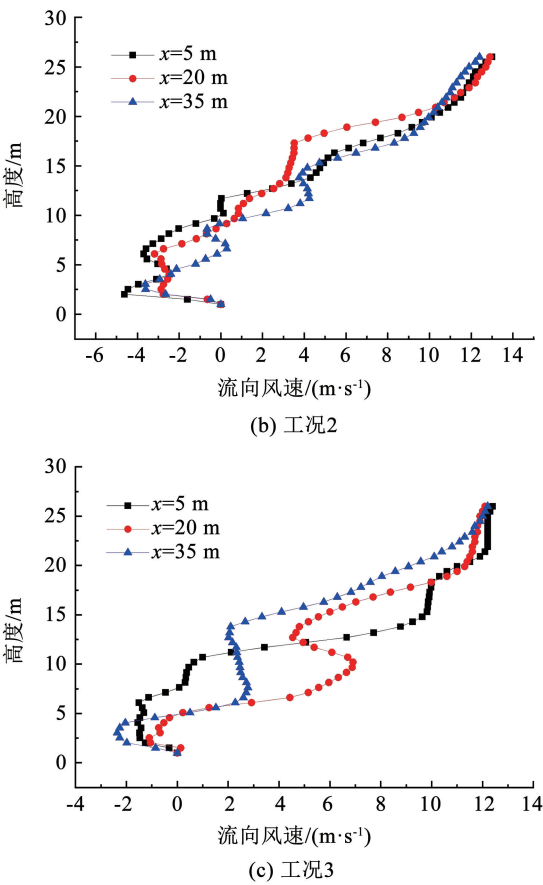


图 10 钢轨内垂直风速廓线  
Fig. 10 Vertical wind profile in rail

4.1.2 防沙效果分析

图 11 是计算 40 s 后的 3 种工况所在流场运动颗粒分布。工况 1 中堑内的颗粒数较多,并且已有部分颗粒沉降在钢轨附近及侧沟内。而工况 2、3 颗粒分布的一个明显特点为:在区域一平坦路面上存在一定量的沉降颗粒,并且大部分聚集在靠近挡沙墙一侧。

按照图 11 将 3 种工况下流场内不同区域的运动颗粒进行统计得到图 12,其中,由于工况 1 中挡沙墙设置在路堑左边坡顶,因此挡沙墙后平坦地面上无颗粒沉降,即颗粒数为 0 个。由图 12 可见,随着挡沙墙与路堑间距增加,在相同时刻下,区域一颗粒数量逐渐增加,区域二的颗粒数逐渐降低。工况 2、工况 3 中,挡沙墙后的回流区导致沉降的颗粒占越过挡沙墙的总颗粒数的 45.8%、76.0%。

因此,通过综合对比挡沙墙在不同布置间距下的流场特征及防沙效果后发现,在距路堑段一定距离内布置挡沙墙,通过挡沙墙对流场整体进行调节,在挡沙墙阻挡大部分颗粒的基础上,利用其后的低速回流区,可使一部分通过抬升气流而越过挡沙墙的颗粒随涡旋运动并逐渐沉降在挡沙墙回流区的平坦地面上。而工况 3 在相同计算参数下,挡沙墙后

沉积更多的颗粒,所以高度为 2 m 的挡沙墙布置在距路堑 20 m 时,相比于另外两中工况,可产生良好的阻沙效果。

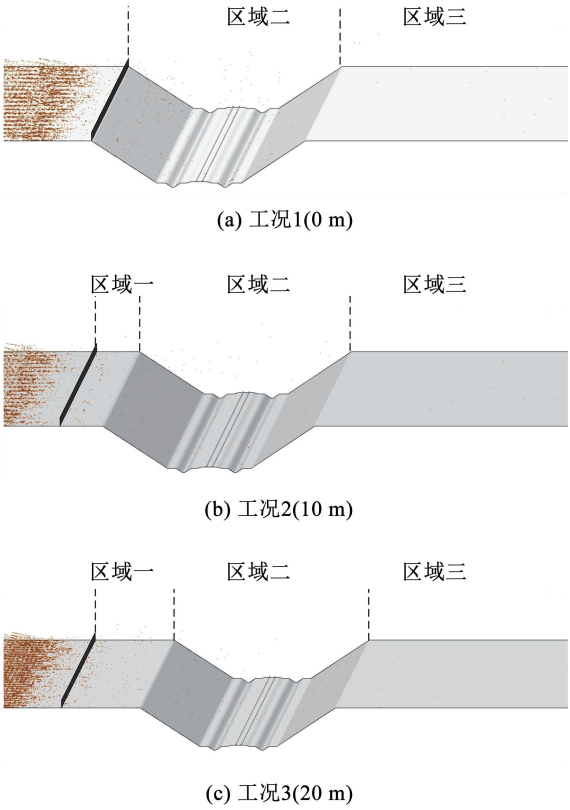


图 11 近地表积沙分布  
Fig. 11 Near-surface sediment distribution

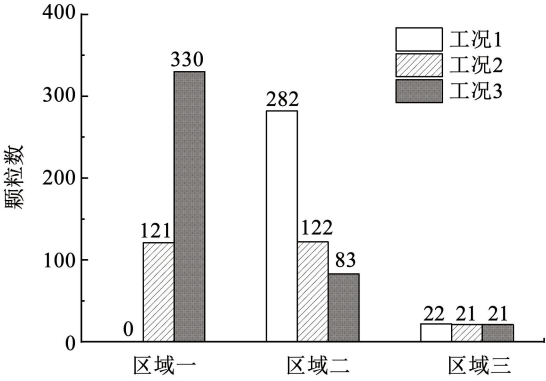


图 12 3 种工况下不同位置颗粒统计  
Fig. 12 Particle statistics at different positions under three working conditions

4.2 双排挡沙墙防护效果分析

为进一步阻挡挡沙墙后遮蔽区内的空中悬移颗粒向路堑段移动,针对工况 1、3 中颗粒运动分布特点,在路堑左边坡顶边缘加设一排挡沙墙,可进一步增强挡沙墙的阻沙能力(图 13)。本节选择两种工况进行对比分析,分别为工况 2-2:挡沙墙 1 高度为 2 m,挡沙墙 2 高度为 2 m;工况 2-3:挡沙墙 1

高度为 2 m,挡沙墙 2 高度为 3 m,计算模型中其他计算参数均与 4.1 节相同。

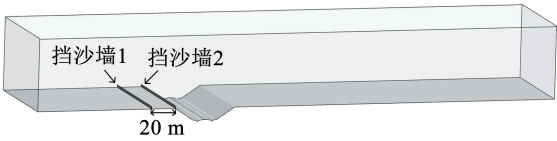
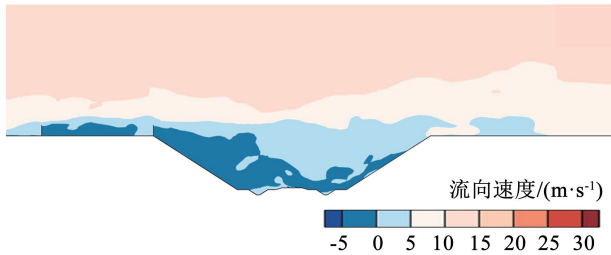


图 13 双排挡沙墙示意图

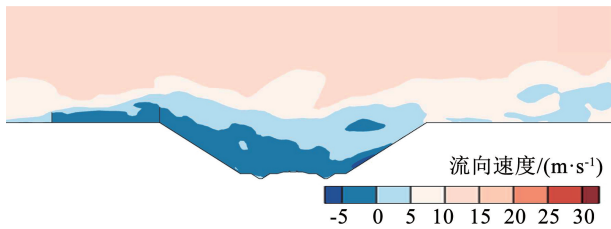
Fig. 13 Double-row retaining wall diagram

4.2.1 流场特征分析

图 14 为工况 2-2、2-3 在某  $y-z$  截面的流向风速云图。可以发现,处于路堑边缘处的挡沙墙可以进一步抬升上部挤压气流,工况 2-3 明显增大了回流区范围。通过挡沙墙 2 与路堑边坡的共同作用,使得在堑内路基面都存在一定范围的低速回流区,其流向风速小于 5 m/s。对比发现,工况 2-3 中挡沙墙 2 对路堑内的防护范围要大于工况 2-2,在路堑内有更大范围的低速回流区,可降低对钢轨及运营列车的风沙威胁。



(a) 工况2-2



(b) 工况2-3

图 14 两种工况  $y-z$  截面流向风速云图 ( $x=50\text{ m}$ )

Fig. 14 Wind velocity contour of  $y-z$  Section under two working conditions ( $x=50\text{ m}$ )

4.2.2 防沙效果分析

图 15 为进入流场内的颗粒运动 40 s 后颗粒的运动位置及其瞬时流向速度图。工况 2-2、2-3 的颗粒分布规律均表现为:挡沙墙 1 可阻挡大部分入射颗粒;其余一部分空中颗粒或接触壁面后的反弹颗粒会随抬升气流越过挡沙墙 1,并因低速回流区和逆压梯度影响而逐渐沉积在挡沙墙 1 和 2 之间;还有一部分颗粒在抬升气流中获得较大运动速度,未在挡沙墙 1 和 2 之间区域沉降,而是越过挡沙墙

2 后继续向路堑段运动。并且工况 2-3 中路堑段内的颗粒数小于工况 2-2。

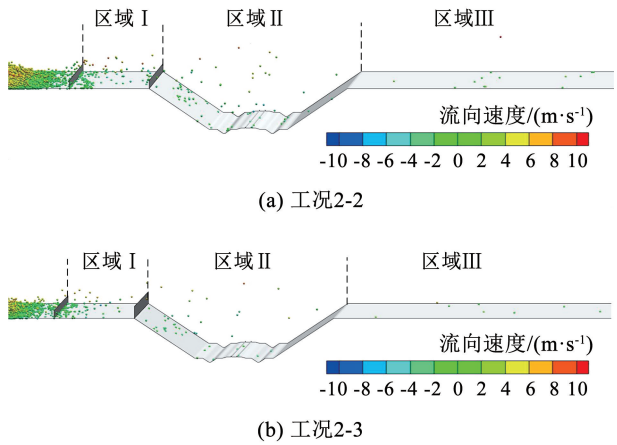


图 15 颗粒运动位置与流向速度分布云图

Fig. 15 Particle movement position and flow velocity distribution in different regions

将双排挡沙墙所在的路堑流场分为代表挡沙墙 1、2 之间的区域 I、代表路堑段内部的区域 II、代表路堑后的平坦地面的区域 III (图 15)。对工况 2-2、2-3 中颗粒所在位置进行统计,得到图 16。由图 16 可见,在相同颗粒入射时间内,区域 I 中工况 2-3 相较工况 2-2 颗粒数减少 29.8%、区域 II 中工况 2-3 相较工况 2-2 颗粒数减少 43.9%、区域 III 中工况 2-3 相较工况 2-2 颗粒数减少 10.5%。

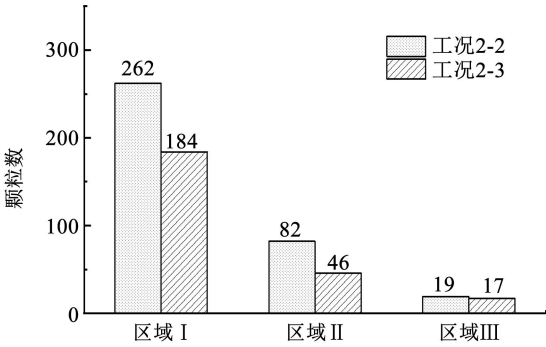


图 16 不同区域颗粒统计

Fig. 16 Statistics of particles in different regions

另外,将工况 2-2、2-3 与 4.1.2 节中的 3 种工况的颗粒数占比(即路堑内的颗粒数与入射进流场的总颗粒数的比值)进行对比,得到图 17。由图 17 可见,当采用不同高度的挡沙墙进行双层防护后,可进一步改善整体流场特征、减少路堑内的运动颗粒。工况 2-3 中较高的挡沙墙 2 可防止处于较高位置、较大速度的颗粒向路堑段移动,因此该工况中进入路堑内的颗粒数量占比最小。本节只模拟了颗粒入射后 40 s 的颗粒运动情况,当计算时间增加后,工况 2-2、2-3 在区域 II 内颗粒数量的差距还会更加明显。



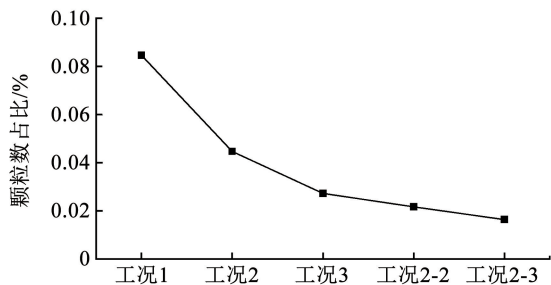


图17 进入路堑内的颗粒数占比

Fig. 17 Proportion of particles entering the cutting

## 5 结论

路堑的下凹结构形式会导致其所在的流场特征及颗粒运动轨迹与凸起的路堤结构有所不同。基于LES-DPM构建某单线铁路路堑风沙流场,对其流场分布和颗粒运动轨迹进行了研究,讨论了含路堑的流场的防护措施优化设计。主要结论如下:

1) 路堑内路堑内的紊流变化复杂,沙粒更易沉降、堆积在钢轨内,沙埋风险大大增加;路堑边坡对路基面形成天然阻风效果,路基面一定高度内风速均小于3.6 m/s,沉降沙粒不易输导出去。

2) 通过对颗粒运动轨迹及分布规律进行分析发现,小粒径颗粒会随涡旋气流在堑内运动,速度达到-7.31~14.90 m/s;而大粒径颗粒基本在平坦地面上蠕移。因此粒径越小越易在湍流场内持续获得动能继续运动。

3) 针对路堑特有的流场特征将高度为2 m的挡沙墙设置在距路堑20 m处可获得良好的防护效果。该工况下,挡沙墙可利用对流场的整体调节使部分颗粒沉积在平坦地面上,大大减少了沙粒向路堑内移动的比重,减少了铁路被沙埋的风险。

4) 在工程成本允许的前提下,可在路堑边缘加设一排挡沙墙加强防风固沙的效果。间隔20 m的双排挡沙墙利用高度差(2 m/3 m)可以增大回流区范围,阻挡较高区域的运动颗粒,相比于单排挡沙墙可有效减少来流风携沙运动至路堑内,降低对钢轨及运营列车的风沙威胁。

## 参考文献

[1] HORVAT M, BRUNO L, KHRIS S, et al. Aerodynamic shape optimization of barriers for windblown sand mitigation using CFD analysis [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2020, 197: 104058. DOI: 10.1016/j.jweia.2019.104058

[2] IZAEI A L, ERIC J R P, SHAO Y P, et al. CFD simulation of the wind field over a terrain with sand fences: critical spacing for the wind shear velocity [J]. Aeolian Research, 2020, 43: 100574. DOI: 10.1016/j.aeolia.2020.100574

[3] 李晓军, 马学宁. 戈壁铁路挡风墙背风侧流场特征与积沙形态研究[J]. 高速铁路技术, 2017, 8(1): 38

LI Xiaojun, MA Xuening. Study on the characteristics of wind break walls leeward side flow field and sand forms along railways in Gobi

Desert [J]. High Speed Railway Technology, 2017, 8(1): 38. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8247.2017.01.009

[4] 屈建军, 喻文波, 秦晓波. HDPE 功能性固沙障防风效应试验 [J]. 中国沙漠, 2014, 34(5): 1185

QU Jianjun, YU Wenbo, QIN Xiaobo. Wind-protecting efficiency of HDPE functional sand-fixing barriers [J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(5): 1185. DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2013.00446

[5] 徐彬. 机械沙障阻沙固沙机理的数值模拟研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2018

XU Bin. Numerical simulation study on the mechanism of mechanical sand barrier [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018

[6] 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

LI Kaichong, SHI Long, KONG Lingwei, et al. Protection effect of different kind of sand-barriers along Lanzhou-Xinjiang high-speed railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017, 34(3): 11. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2106.2017.03.003

[7] 李鹏翔, 白明洲, 邱树茂, 等. 铁路路堑区域风吹雪防雪栅效果研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54(3): 122

LI Pengxiang, BAI Mingzhou, QIU Shumao, et al. Effect of snow fence in railway cutting area under action of snow-drifting [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2022, 54(3): 122. DOI: 10.11918/202103069

[8] SPIES P J, MCEWAN I K, BUTTERFIELD G R. One-dimensional transitional behavior in saltation [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2000, 25(5): 505. DOI: 10.1002/(SICI)1096-9837(200005)25:5<505::AID-ESP78>3.0.CO;2-D

[9] GIANMARCO D A, ZVI H, CRISTIAN M, et al. Accuracy of bed-load transport models in eddy-resolving simulations [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2021, 141: 103676. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2021.103676

[10] HUANG N, HE P, ZHANG J. Large-eddy simulation of sand transport under unsteady wind [J]. Geomorphology, 2020, 358: 107105. DOI: 10.1016/j.geomorph.2020.107105

[11] YANG Q S, ZHOU T, YAN B W, et al. LES study of topographical effects of simplified 3D hills with different slopes on ABL flows considering terrain exposure conditions [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2021, 210: 104513. DOI: 10.1016/j.jweia.2020.104513

[12] THORDAL M S, BENNETSEN J C, KOSS H H H. Review for practical application of CFD for the determination of wind load on high-rise buildings [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2019, 186: 155. DOI: 10.1016/j.jweia.2018.12.019

[13] 靳婷. 近地表风沙流的壁模型大涡模拟 [D]. 兰州: 兰州大学, 2021

JIN Ting. Wall-modeled large-eddy simulation of near-surface wind-blown sand [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2021

[14] 孙婧, 李家园, 王海龙, 等. 红—线新建地方铁路联合沙障结构参数优化研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(1): 145

SUN Jing, LI Jiayuan, WANG Hailong, et al. Structural parameter optimization of combined sand barrier of new local railway for Hongyi line [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(1): 145

[15] YU Y, YANG Y, XIE Z. A new inflow turbulence generator for large eddy simulation evaluation of wind effects on a standard high-rise building [J]. Building and Environment, 2018, 138: 300. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.03.059

[16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Load code for the design of building structures: GB 50009—2012 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2012

[17] UNGAR J, HAFF P K. Steady state saltation in air [J]. Sedimentology, 1987, 34(2): 289. DOI: 10.1111/j.1365-3091.1987.tb00778.x

[18] 刘辉. 太中银铁路沙害特点及其防治措施研究 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2013

LIU Hui. Study on characteristic of blown-sand Hazards and preventive measurements along Taiyuan-Zhongwei-Yinchuan Railway [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2013