

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0072

MA Lei, LIU Jian, RAN Wuping, et al. Wind tunnel experimental study on shed tunnels to prevent and control blowing snow on highways[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(2):726-734. [马磊, 刘健, 冉武平, 等. 公路风吹雪防治棚洞的风洞实验研究[J]. 冰川冻土, 2022, 44(2):726-734.]

公路风吹雪防治棚洞的风洞实验研究

马磊^{1,2}, 刘健¹, 冉武平², 胡智轩¹, 李在蓝¹, 俞祥祥³

(1. 新疆交通科学研究院 干旱荒漠区公路工程交通运输行业重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830000; 2. 新疆大学 建筑工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047; 3. 中国科学院 新疆生态与地理研究所, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘 要: 针对强风条件下风吹雪灾害难以彻底根治问题, 提出采用棚洞工程治理的方案, 并对其进行了风洞模拟实验研究。按1:60缩尺比3D打印模型, 采用细砂、精盐、锯末3种介质模拟分析了全封闭、上挑式、透风式3种棚洞结构在90°风向夹角条件下的吹雪防治效果。依据实验结果, 结合新疆玛依塔斯区域风吹雪灾害实际, 单独针对30°风向夹角的封闭式棚洞进行流场测定。研究表明: 在采用其他介质代替吹雪开展风洞风吹雪堆积模拟实验时, 一定湿度的锯末具有较高的相似度, 且上挑式和封闭式棚洞均具有较好的风吹雪防治效果。介质模拟实验表明, 挡雪板对途经棚洞洞口的吹雪具有较好的阻拦作用; 流场实验表明, 挡雪板对棚洞外部和内部流场均有影响, 洞外起到降低风速的作用, 洞内起到抑制弱风区的功能。研究证实, 采用适宜的挡雪板布设方案进行洞口防护的棚洞工程是治理风吹雪灾害的有效手段。

关键词: 防雪棚洞; 风洞模拟实验; 公路风吹雪; 模拟介质

中图分类号: U418.5+6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2022)02-0726-09

0 引言

中国有风吹雪区域的面积占陆地国土面积的55.2%, 主要分布在青藏高原及周边山区、北疆和天山、内蒙古与东北地区。风吹雪对自然环境和社会经济影响较大, 直接给经济建设与人们的生命财产造成严重损失^[1]。受公路风吹雪影响, 新疆地区G3015线铁厂沟至额敏段2014—2018年期间冬季交通中断时间平均占比为41.2%, S201线铁厂沟至额敏段冬季交通中断时间平均占比为30.8%^[2]。当前风吹雪的研究较为成熟, 国际上美国学者Tabler^[3]、日本学者竹内政夫^[4]编制了防雪栅栏设计手册, 在风吹雪运动机理和防雪栅栏实践方面进行了较为系统的研究。在理论研究方面, 国内学者吕晓辉等^[5-6]利用自然降雪进行了风洞实验, 提出风吹雪过程中雪粒径与高度的关系; 王正师^[7]通过大涡模拟控制方程的改进研究了复杂地形的风吹雪分布特征; 席建锋等^[8]采用力学分析手段, 初步实现了对风吹雪

积雪深度的定量化描述; 时光磊^[9]通过研究风吹雪综合运动模型, 总结了风吹雪过程中悬移和跃移运动的有关特征。在工程实践方面, 国内学者王中隆^[1]系统总结了我国风雪流的特征, 提出风吹雪区划; 刘健等^[2]、马磊等^[10]结合新疆地区典型公路风吹雪灾害实际, 提出综合防治措施和计算体系; 张家平^[11]提出黑龙江省风吹雪灾害时空分布及其防治措施。总的来看, 国内外对风吹雪防治工程的研究大多集中在防雪栅栏、路基断面方面, 相关措施对路面风积雪有一定改善作用, 但随着风速和移雪量不断增大, 二者均难以彻底根治风吹雪问题。针对于此, 本文结合新疆玛依塔斯风区S201线风吹雪灾害特点, 提出采用棚洞工程进行风吹雪防治的思路并就有关方案进行了风洞模拟实验研究。

1 实验方法

1.1 风洞设备

风洞设备采用中国科学院新疆生态与地理研究

收稿日期: 2021-06-21; 修订日期: 2022-04-19

基金项目: 交通运输部应用基础研究项目(2014319797050)资助

作者简介: 马磊, 助理研究员, 硕士研究生, 主要从事公路雪害防治研究和咨询工作. E-mail: 569594849@qq.com

所莫索湾多功能环境风洞。风洞实验段长 8 m, 水平宽 1.3 m, 高 1 m。本次实验的边界层厚度约为 22 cm, 湍流度约为 1%, 采用皮托管测定风速(图 1)。

实验中模型高度低于边界层厚度, 袁鑫鑫等^[12]在该风洞开展了阻沙网实验, 谭凤翥等^[13]开展了怪柳灌丛沙堆流场实验, 均表明该风洞满足相似条件。

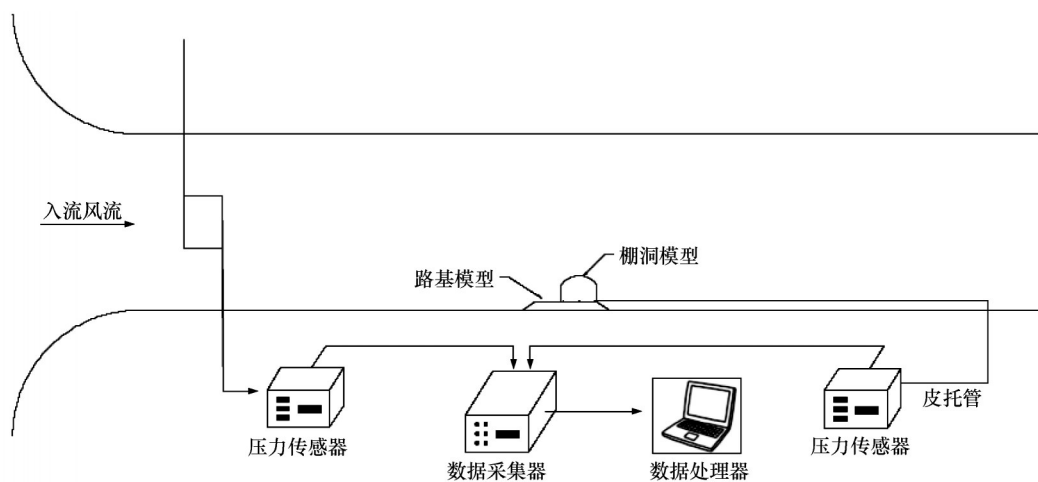


图 1 风洞实验示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the wind tunnel experiment

1.2 实验模型

本次实验根据 S201 线拟实施的工程实际尺寸缩小一定比例制作了实验模型, 模型缩尺比为 1:60, 所有实验模型均照此比例制作。

(1) 棚洞模型

棚洞模型在 3Dmax 建模后, 采用 PLA 材质以熔融堆积的方式 3D 打印成型。依据实验需求, 共制

作三种棚洞模型: 第一种是利用洞侧孔隙抑制吹雪且顶部封闭的透风式棚洞, 洞侧透风率分别为 25%、35%、45% [图 2(a)]; 第二种是利用弧形引导气流原理的上挑式棚洞 [图 2(b)]; 第三种是常规全封闭式棚洞 [图 2(a)]。棚洞模型内侧宽 21.7 cm, 侧墙高 9.2 cm, 洞顶弧面高 14.0 cm。为表述方便, 下文中用 H 代替棚洞弧顶高度。

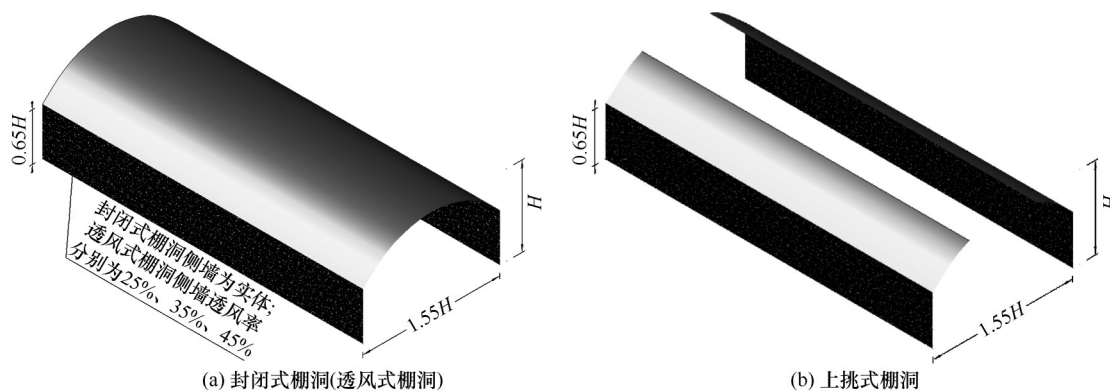


图 2 3D 打印棚洞的模型结构

Fig. 2 Model structure of the 3D printing shed tunnel: fully enclosed (ventilated) shed tunnel (a) and overhanging shed tunnel (b)

(2) 挡雪板模型

挡雪板模型依据对应缩尺比, 采用细木条制作, 模型高 10 cm, 透风率为 25%, 实验中将挡雪板高度设计为 $0.73H$ 。路基模型依据对应缩尺比采用木板切割制作, 高 2.5 cm, 长 100 cm, 坡率为 1:3。

1.3 实验材料

实验中采用的精盐为日常食用盐, 细砂为干砂。采用的锯末粒径在 1~3 mm 之间, 多为片状, 实验前用 2 mm 筛孔进行筛分, 控制实验锯末最大粒径不大于 2 mm, 湿度介于 15%~20%。

实验风洞设备在温度低于 10 °C 时无法保证湍

流度,因此无法直接利用雪为介质进行吹雪低温实验,故本次实验采用锯末、盐、细砂作为介质模拟吹雪堆积。为保证实验的有效性,选用多种相似要素判定模拟介质与雪之间的相似性。由于介质堆积实验主要用于验证棚洞洞口可能的吹雪堆积和挡雪板的吹雪阻拦功能,因此堆积形态相似度是最重要的要素。堆积形态相似性判定,主要以挡雪板模型前后的介质堆积情况与玛依塔斯区域已经实施的挡雪板前后吹雪堆积形态为参照对象进行对比。实验过程中,先将介质平铺在风洞实验区上游,入流风速缓慢均匀提升至介质起动风速后保持,至介质无明显移动后结束。实验完成后测量典型介质堆积断面,再放大 60 倍后与参照对象进行量化对比,并按照相似度在 0~1 中间取值。考虑到介质本身物理性质与雪的相似性,实验还选取介质密度和粒径作为补充要素进行相似性判定(表 1)。经专家打分求算术平均后,密度权重为 0.25,介质粒径权重为 0.25,堆积形态权重为 0.50。

表 1 实验测定的模拟介质参数
Table 1 Parameters of simulation medium measured by experiments

| 模拟介质 | 密度/(g·cm ⁻³) | 粒径/mm | 堆积形态相似度 |
|------|--------------------------|-------|---------|
| 新雪 | 0.068 | 0.105 | 1.00 |
| 精盐 | 1.219 | 0.100 | 0.10 |
| 锯末 | 0.259 | 0.180 | 0.85 |
| 细砂 | 1.475 | 0.075 | 0.60 |

相似性判定采用加权欧氏距离的计算方法^[14]。当*i*、*j*坐标分别为(*x*_{1*i*},*x*_{2*i*},*x*_{3*i*})、(*x*_{1*j*},*x*_{2*j*},*x*_{3*j*})时,令*a*₁>*a*₂>*a*₃,且*a*₁+*a*₂+*a*₃=1,则有

$$d_{ij} = \left[a_1(x_{1i} - x_{1j})^2 + a_2(x_{2i} - x_{2j})^2 + a_3(x_{3i} - x_{3j})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中:*d*_{*ij*}为*i*、*j*间的加权欧氏距离;*a*₁、*a*₂、*a*₃为权重。本例中,堆积形态权重为*a*₁,密度权重为*a*₂,介质粒径权重为*a*₃,将每种模拟介质的不同要素加权后计算与吹雪的欧氏距离(表 2)。

Setoguchi^[15]在风吹雪介质模拟实验中采用白

表 2 模拟介质与吹雪的加权欧氏距离
Table 2 Weighted Euclidean distance between simulation medium and blowing snow

| 模拟介质 | 加权欧式距离 <i>d</i> |
|------|-----------------|
| 精盐 | 0.930 |
| 锯末 | 0.159 |
| 细砂 | 1.014 |

土模拟雪,采用自然坍塌底角的相似性来证实白土与吹雪的相似度。在上述风吹雪模拟介质相似性论证的基础上,经分析实验影像数据,锯末在筛分过程中自然坍塌底角约为 49°,而雪的坍塌角度在 45°~50°之间。

加权欧式距离和坍塌底角法均表明,当前湿度条件下的锯末与雪具有极高的相似度,可以采用锯末替代积雪进行风洞模拟实验。

1.4 三类棚洞堆积定性实验方案

堆积定性实验主要通过模拟风吹雪中的吹雪沉积情况,来判定具有较好效果棚洞的型式。实验过程中棚洞迎风侧洞口不设挡雪板,参照玛依塔斯区域风向与路向夹角,将路基和棚洞组合模型与风向成 90°布置,实验过程与介质相关性实验基本相同,实验结束后测定各类棚洞迎风侧、洞内、背风侧介质堆积的体积。

1.5 封闭式棚洞有无挡雪板堆积定量对比实验方案

对堆积定性实验中的封闭式棚洞进行有无挡雪板的对照组实验,通过对比堆积实验中无挡雪板工况下的介质堆积情况与有挡雪板工况下的情况,来验证挡雪板的洞口吹雪防治效果。实验中,棚洞与风向的角度按照拟实施棚洞工程的玛依塔斯区域 S201 线 K34~K35 段实际情况设置为 30°。挡雪板平面布置与流场实验相同(图 3)。

1.6 封闭式棚洞流场实验方案

(1)洞外流场实验

洞外流场实验采用对比有无挡雪板的方法来进行研究。棚洞、挡雪板布设方案等与堆积实验相同。实验入流风速为 8 m·s⁻¹、10 m·s⁻¹和 12 m·s⁻¹,流场实验每条风持续 3 min,采用每组数据的平均值作为实验值。实验测点分别位于棚洞两端 0*H*~5*H* 距离,测点高度为 0.07*H*~3.57*H*。本实验中由于棚洞为 30°放置,因此棚洞截面宽度为 3.1*H*,绘图时以迎风侧棚洞 0*H* 处为坐标原点,实验测点垂直布设 9 层,沿棚洞上下风向位置水平布设 8 层(表 3、图 4)。实验过程中先测定无挡雪板时三种风速流场的分布,再测定有挡雪板时的三种风速流场。

(2)洞内流场实验

洞内流场实验与洞外流场实验方案基本一致,只是在测点布设方面不同。洞内流场实验均在洞内布设测点,实验共测定了 5 组断面,分别在两侧洞口、洞身 1/4、1/2、3/4 位置(表 4、图 5)。

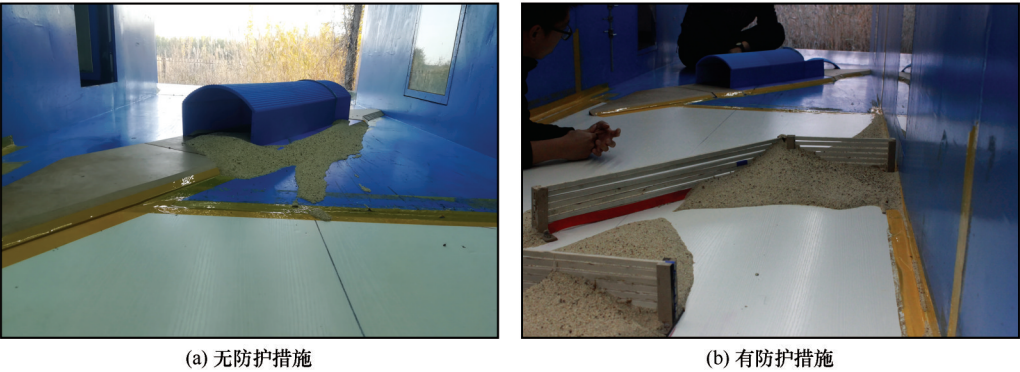


图3 洞口无防护措施(a)与有防护措施(b)的对比堆积实验

Fig. 3 Comparative stacking experiment without (a) and with (b) protective measures at the entrance

| 表3 测点设置 | | |
|--|-------------|---------|
| Table 3 Setting of the measured points | | |
| 高度/ H | 距离/ H | |
| | 上风向 | 下风向 |
| 0.07 | -5,-2,-1,-0 | 0,1,2,5 |
| 0.14 | -5,-2,-1,-0 | 0,1,2,5 |
| 0.21 | -5,-2,-1,-0 | 0,1,2,5 |
| 0.36 | -5,-2,-1,-0 | 0,1,2,5 |
| 0.50 | -5,-2,-1,-0 | 0,1,2,5 |
| 0.71 | -5,-2,-1,-0 | 0,1,2,5 |
| 1.07 | -5,-2,-1,-0 | 0,1,2,5 |
| 2.14 | -5,-2,-1,-0 | 0,1,2,5 |
| 3.57 | -5,-2,-1,-0 | 0,1,2,5 |

2 实验结果

2.1 三类棚洞堆积定性实验

堆积实验过程中由于不同棚洞阻滞效应的差

异,部分介质会被直接吹出风洞,因此堆积总量不一定与源介质总量相同。实验结束后通过分析迎风侧、洞内、背风侧介质堆积体积得出有关结论(图6)。

(1)封闭式棚洞

洞身迎风侧堆积为源介质体积的50%,洞内堆积为源介质体积的0.1%,洞身背风侧堆积为0。

(2)透风式棚洞

不同透风率堆积情况不同,以45%透风率的棚洞为例,迎风侧堆积质量为源介质体积的23%,洞内堆积质量为源介质体积的4%,洞身背风侧堆积体积为源介质质量的16%。在洞侧透风率从45%向25%降低过程中,相应指标存在规律性变化:洞内介质堆积质量随透风率降低而降低,背风侧介质堆积质量随透风率降低而降低。

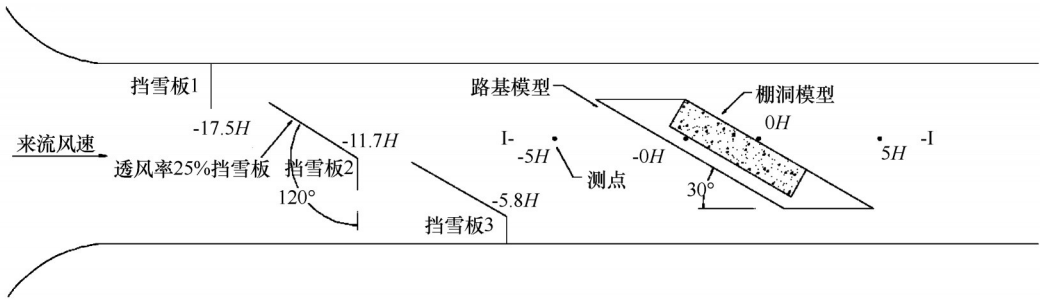


图4 风洞内模型布置方案(I-I为流场观测断面)

Fig. 4 Model layout scheme in the wind tunnel (I-I is the flow field observation section)

| 表4 棚洞洞内实验断面测点设置 | |
|--|----------------|
| Table 4 Setting of measuring points of experimental section in shed tunnel | |
| 高度/ H | 距离/ H |
| 0.14 | 0.04,0.77,1.49 |
| 0.36 | 0.04,0.77,1.49 |
| 0.71 | 0.04,0.77,1.49 |

(3)上挑式棚洞

洞身迎风侧堆积体积为源介质质量的48%,洞内堆积介质为源介质体积的0.1%,洞身背风侧为0。从阻雪性能上来讲,上挑式棚洞洞体阻雪性能与封闭式相当,洞内产生的堆积极少。

2.2 封闭式棚洞有无挡雪板堆积定量对比实验

在堆积实验中,未设置挡雪板的棚洞洞口有较

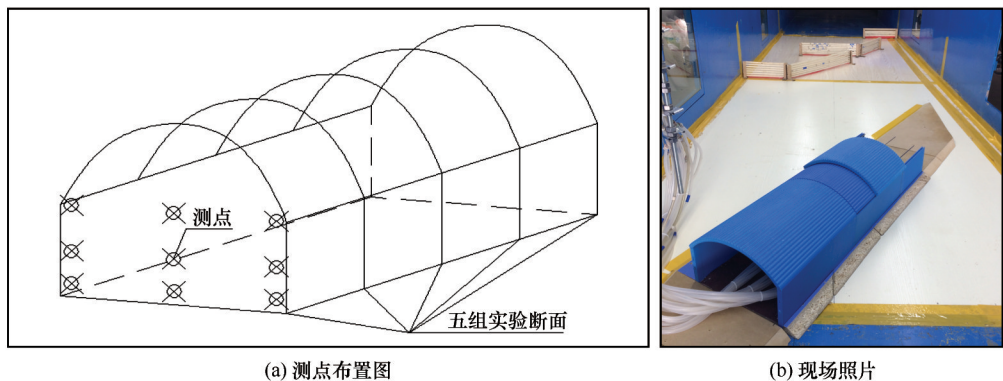


图5 棚洞洞内实验断面测点布置图(a)和现场照片(b)

Fig. 5 Layout of measuring points of experimental section in shed tunnel (a) and site photos (b)

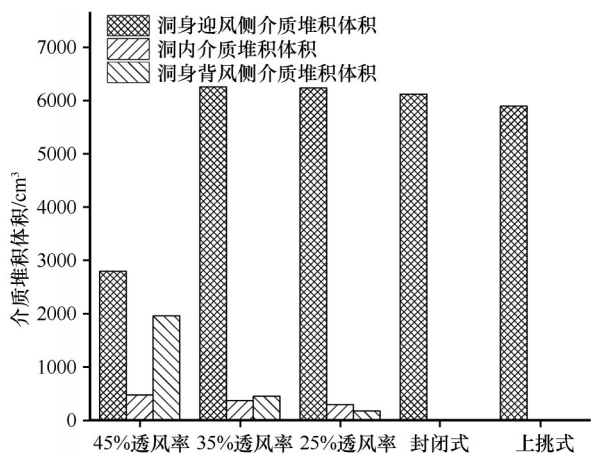


图6 各类棚洞堆积实验数据统计

Fig. 6 Statistics of various types of shed tunnel stacking experiments

多介质堆积,堆积宽度为棚洞宽度的3/4,宽度随深入洞内逐渐减小。设置挡雪板的棚洞洞口有少量介质堆积,堆积宽度为未设置挡雪板工况的1/3,堆积质量为未设置挡雪板的1/30。

2.3 封闭式棚洞流场实验

(1) 洞外流场实验

为简化表达不同层高的风速流场情况,将实验模型外轮廓以内的部分风速全部设置为0,并按照相应坐标加入人工处理参数。采用Origin软件,将软件中smoothing选项中的Total points increase factor 设为100,Smoothing Parameter 设为0.1,绘制了流场图(图7)。图中左侧一列三张流场图为未设置挡雪板的棚洞外部流场情况,从上到下入流风速分别为 $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;右侧一列三张流场图为设置三排挡雪板后的流场情况,入流风速与左侧同排相同。

以 $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 入流风速无挡雪板流场为例,风在通

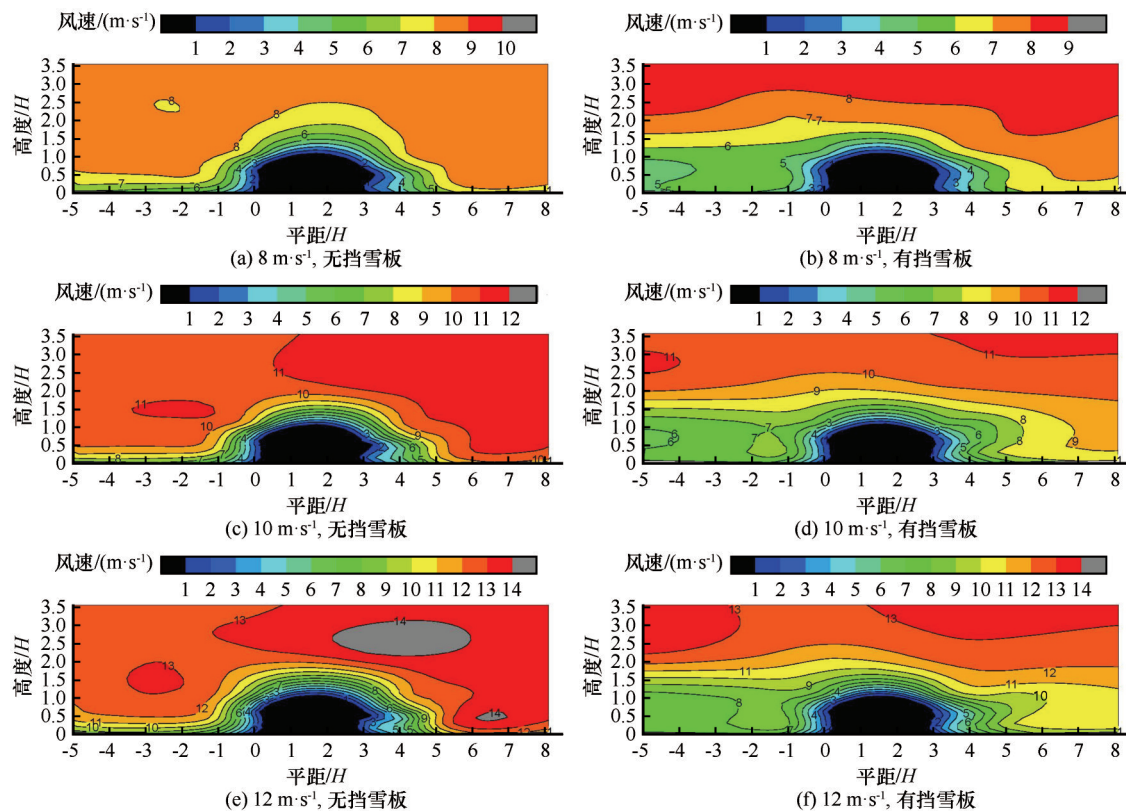
过棚洞的时候会围绕洞身环流,就形态上而言,入流方向风速变化相对较快,流场形态较尖锐,通过棚洞以后风速恢复较缓,流场形态较为平滑。从 $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 至 $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速变化过程中,流场形态无明显变化。以 $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 入流风速无挡雪板与有挡雪板流场对比来看,挡雪板对流场影响极大,尤其是 $1.25H$ 高度以下的风速较入流下降均在40%左右。在入流风速 $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 至 $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 变化过程中,随入流风速提升,风速下降呈增大趋势。在设置挡雪板的工况下, $-2.5H$ 至 $-1H$ 区间出现了流场扰动缩短的现象,并且随着风速不断提高,该现象有扩大的趋势。

(2) 洞内流场实验

实验数据以棚洞左侧为坐标原点,洞高方向为Y轴正方向,洞左至右为X轴正方向,建立数据坐标后采用Origin软件绘制图像。洞内流场实验也与上述流场条件相同,采用 $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 入流风速进行分析研究(图8)。

在洞口未设置挡雪板的工况下,洞口入流方向弱风区较为明显,尤其是 $0.1H$ 高度以下风速存在较为明显的下降,这一趋势在第五个断面依然存在。在此工况下,结合有关研究成果判定,可能对应吹入洞内的风吹雪滞留现象。

在洞口设置挡雪板的工况下,前两个断面基本与未设置挡雪板流场情况类似,但在第三个断面以后流场存在较大的差异。结合有关工程经验,若将 $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 及以下区域定为弱风区,那么设置挡雪板的棚洞在第三个断面弱风区占比为10.3%,第四断面和第五断面为0。同等条件下,未设置挡雪板的棚洞第三个断面弱风区占比为19.6%,第四个断面弱风区占比为17.4%,第五个断面弱风区占比为7.2%。经推算可得,设置挡雪板后,洞内弱风区长



注: 风由左侧吹向右侧, 分图题中 $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 为入流风速; 有挡雪板指洞外有挡雪板

图7 棚洞外侧的风速流场

Fig. 7 Wind flow field outside the shed tunnel

度减少了33%。

3 讨论

3.1 不同棚洞防雪效果对比

从堆积实验结果分析可知,封闭式棚洞阻雪性能较好,洞内产生的堆积极少,但也存在迎风侧介质堆积多,洞身受积雪侧压力大的弊端。透风式棚洞存在介质灌入洞内的风险,且与透风率增大成正比关系,防雪效果较差。上挑式棚洞防雪效果与封闭式棚洞相当,但迎风侧有大量的介质堆积,且非框架结构,雪压力抵御能力弱。总体而言,封闭式棚洞和上挑式棚洞防雪效果较好。

3.2 封闭式棚洞有无挡雪板流场分析

首先,从堆积定性实验分析,挡雪板作为拦截主体对介质产生了较为显著的拦截作用,因此挡雪板的设置是有益于棚洞防雪效果提升的。其次,从挡雪板洞外流场情况分析,挡雪板具有减弱洞口风力的功能,尤其在风吹雪运动的贴地气层,这一现象尤为突出。这也与堆积实验相互印证:受挡雪板对流场抑制作用,风力降低,介质在挡雪板后至棚洞入口前形成了堆积,这一现象随风速增大而缩

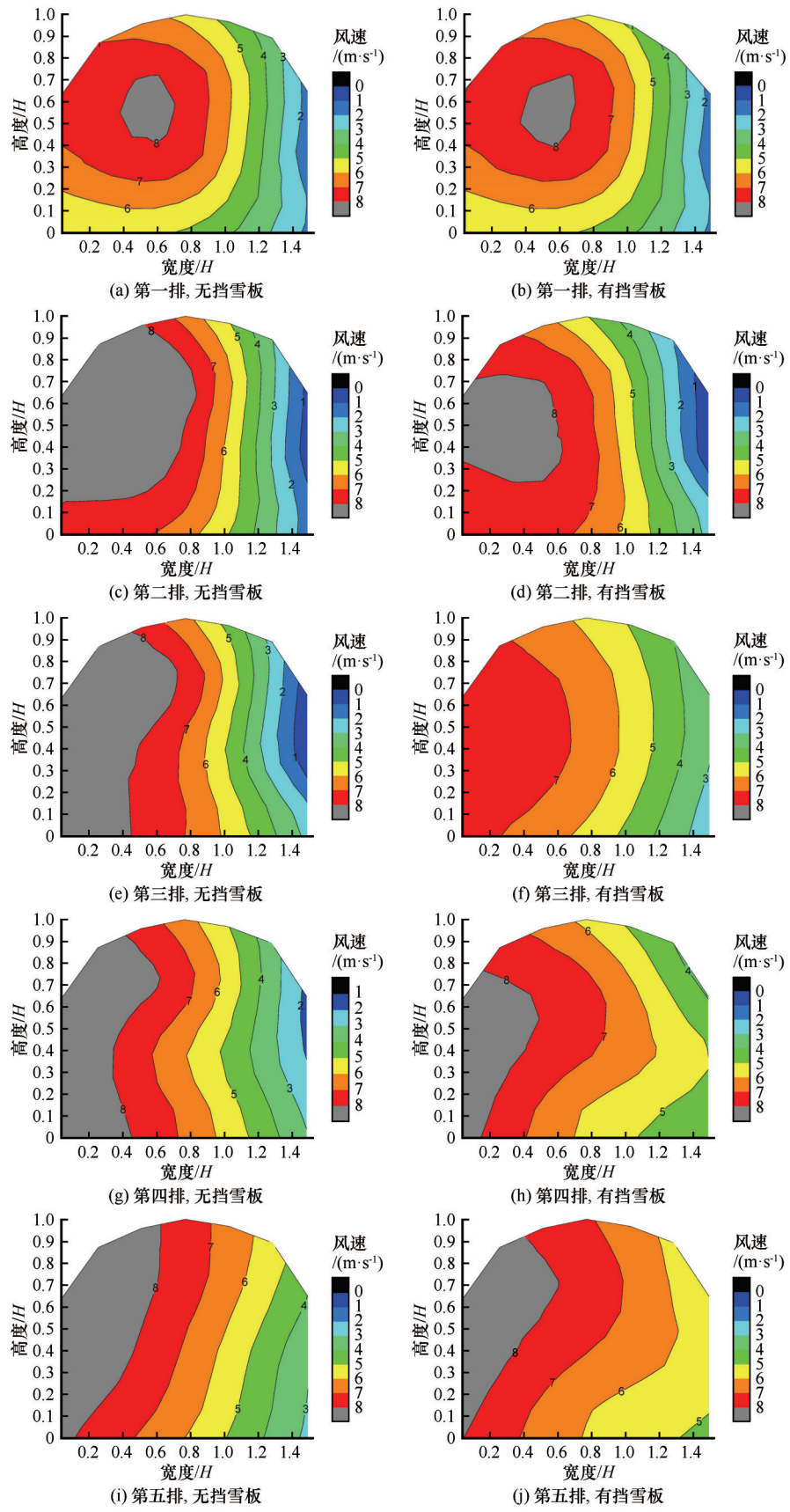
小。再次,从洞内流场的变化情况看,挡雪板降低了洞内弱风区域的范围,可以推断当入流风速进一步提升至风吹雪吹入洞内时,有挡雪板的棚洞对应的风积雪长度和范围是小于未设置挡雪板的。

4 结论

风吹雪对新疆冬季交通安全有重大威胁,随着新疆经济社会的发展,对交通事业发展提出了更高要求,风吹雪的防治理念也从过去的“保通”逐渐向“保优”转变。结合这一背景,本文探讨了风吹雪治理棚洞型式选取和洞口防雪处置措施效果,并形成了以下结论:

(1)在非低温条件下采用风洞堆积实验研究风吹雪沉积状态时,从密度、粒径、堆积形态三个方面综合分析后发现锯末介质与风吹雪运动过程中的吹雪具有较好的相似性。在不具备低温环境的风洞实验时,采用锯末介质探究风吹雪沉积状态是一种可行的方案。

(2)在实验过程中透风式的棚洞中灌入了大量的介质,证实其防风雪性能不理想。相比较而言,封闭式棚洞、上挑式棚洞具有较好的风吹雪防



注：风由第一排吹向第五排；有挡雪板指洞外有挡雪板

图8 棚洞洞内的风速流场

Fig. 8 Wind flow field in the shed tunnel

治效果。

(3)挡雪板具有较好的洞口吹雪抑制功能。从堆积实验看,挡雪板能较为有效地阻拦风吹雪进入棚洞;从流场实验看,挡雪板能够明显降低棚洞外部风速,具有抑制棚洞内部形成弱风区的功能。

对于新疆公路交通而言,采用棚洞工程治理风吹雪灾害是一种可行的方案,在处理好棚洞洞口吹雪沉积问题后,低价且环境融合的棚洞工程型式和长距离棚洞的车辆运行安全保障措施是未来需要继续破解的难题。

参考文献(References):

- [1] Wang Zhonglong. Study on snowdrift and its treatment in China [M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 2001. [王中隆. 中国风雪流及其防治研究[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 2001.]
- [2] Liu Jian, Chen Xiaoguang, Fu Hang, et al. Research and application of key technology for emergency assurance of ice and snow disaster control on state and province trunk highway in Xinjiang [R]. Urumqi: Xinjiang Academy of Transportation Sciences, 2016. [刘健, 陈晓光, 傅航, 等. 新疆国省干线公路冰雪灾害防治与应急保障关键技术研究及应用[R]. 乌鲁木齐: 新疆交通科学研究院, 2016.]
- [3] Tabler R D. Controlling blowing and drifting snow with snow fences and road design [R]. Washington, D. C.: Transportation Research Board of the National Academies, 2003.
- [4] Takeuchi M. Snowstorm and countermeasures [J]. Snow and Ice, 2000, 62(1): 41-47. [竹内政夫. 吹雪とその対策[J]. 雪氷, 2000, 62(1): 41-47.]
- [5] Lü Xiaohui, Huang Ning, Guo Lei, et al. Wind tunnel study of vertical profile of drifting snow [J]. Mechanics in Engineering, 2013, 35(1): 20-25. [吕晓辉, 黄宁, 郭磊, 等. 风吹雪廓线的风洞实验研究[J]. 力学与实践, 2013, 35(1): 20-25.]
- [6] Lü Xiaohui. Some investigations into wind snow two phase flow in wind tunnel [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2012. [吕晓辉. 风雪两相流的风洞实验研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2012.]
- [7] Wang Zhengshi. Large eddy simulation of the distribution and evolution of snow over complex terrain [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2016. [王正师. 复杂地形积雪分布及其演化的大涡模拟研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2016.]
- [8] Xi Jianfeng, Li Jiang, Zhu Guangyao, et al. Hydromechanical mechanism of road snowdrift deposit and its depth model [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2016, 36(Suppl 2): 152-156. [席建锋, 李江, 朱光耀, 等. 公路风吹雪积雪力学原理与积雪深模型[J]. 吉林大学学报(工学版), 2016, 36(增刊2): 152-156.]
- [9] Shi Guanglei. A general model of blowing snow: saltation and suspension [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018. [时光磊. 风吹雪跃移和悬移运动的综合模型[D]. 兰州: 兰州大学, 2018.]
- [10] Ma Lei, Liu Jian, Hu Zhixuan, et al. Preliminary study on calculation of magnitude of highway blowing-snow prevention engineering [J]. Arid Land Geography, 2019, 32(5): 998-1002. [马磊, 刘健, 胡智轩, 等. 公路风吹雪防治工程设计量级计算初探[J]. 干旱区地理, 2019, 32(5): 998-1002.]
- [11] Zhang Jiaping. Research on the temporal & spatial distribution rules and prevention technology of snowdrift disaster of Heilongjiang province [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012. [张家平. 黑龙江省公路风吹雪灾害时空分布与防治技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.]
- [12] Yuan Xinxin, Wang Haifeng, Lei Jiaqiang, et al. Wind tunnel simulation of windbreak effect of double-row nylon net fence with different interval [J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(5): 1238-1246. [袁鑫鑫, 王海峰, 雷加强, 等. 不同间距双排尼龙阻沙网防风效应的风洞模拟[J]. 中国沙漠, 2016, 36(5): 1238-1246.]
- [13] Tan Fengzhu, Wang Xueqin, Wang Haifeng, et al. Wind tunnel simulation of the three-dimensional airflow patterns around *Tamarix ramosissima* Nebkhas under the change of background vegetation coverage [J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(1): 48-57. [谭凤翥, 王雪芹, 王海峰, 等. 柽柳灌丛沙堆三维流场随背景植被变化的风洞实验[J]. 中国沙漠, 2018, 38(1): 48-57.]
- [14] Liu Ruiyuan. Euclid distance with weight and its applications [J]. Application of Statistics and Management, 2002, 21(5): 17-19. [刘瑞元. 加权欧氏距离及其应用[J]. 数理统计与管理, 2002, 21(5): 17-19.]
- [15] Setoguchi T. Public square design with snow and wind simulations using wind tunnel [C]// Wind tunnels and experimental fluid dynamics research. Rijeka, Croatia: InTech, 2011: 463-478.

Wind tunnel experimental study on shed tunnels to prevent and control blowing snow on highways

MA Lei^{1,2}, LIU Jian¹, RAN Wuping², HU Zhixuan¹, LI Zailan¹, YU Xiangxiang³

(1. Key Laboratory of Highway Engineering Technology in Arid&Desert Region, Ministry of Transport, Xinjiang Academy of Transportation Sciences, Urumqi 830000, China; 2. School of Architecture and Civil Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China; 3. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China)

Abstract: There is a severe phenomenon of blowing snow by wind in winter in Mayitas area of Xinjiang. Road traffic interruptions and casualties caused by wind and snow disasters often occur. The existing engineering measures can alleviate the problems of low visibility and problems with accumulating snow on pavement caused by wind and snow to a certain extent, but cannot completely eliminate the impact. Aiming at the problem that the blowing snow disaster difficult to be completely cured under strong wind conditions, a shed tunnel engineering treatment scheme is proposed, and a wind tunnel simulation experiment is carried out on the shed tunnel form and snow prevention scheme at the entrance of the tunnel. The wind tunnel experimental section is 8 m long, 1.3 m horizontally wide and 1 m high. The shed tunnel model is made by 1:60 scale 3D printing method, the snow barrier model is made of wooden strips, and the simulation medium is made of fine sand, refined salt and sawdust. Firstly, three kinds of shed structures, including fully enclosed, overhanging and ventilated, were simulated under the condition of 90° wind direction, and compared with the form of blowing snow stacking. Three parameters for similarity were used: density, particle size and stacking shape. The similarity is determined by weighted Euclidean distance between simulation medium and blowing snow, the similarity of the slump angle of the predecessors is verified, and the most suitable medium for simulating blowing snow is deduced. According to the experimental results, combined with the actual situation of wind blowing and snow disasters in Mayitas, flow field of the closed shed tunnel by a wind direction angle of 30° has been separately conducted with or without protective measures. The results show that when the wind tunnel stacking experiment is used to study the deposition state of blowing snow under non-low temperature conditions, the sawdust has good similarity with the blowing snow in the process of wind and snow movement. A large amount of medium was poured into the ventilated shed during the experiment, which proved that its anti-wind and snow performance was not ideal. By contrast, the closed shed and the overhanging shed have better wind and snow prevention effects. The snow barrier has a good blowing snow inhibition function at the entrance. From the stacking experiment, in the comparison with and without snow barrier, volume of the medium in the shed is very different, which proves that the snow barrier can effectively prevent the blowing snow from entering the shed. Among them, the difference in wind speed inside and outside the shed is obvious, which proves that snow barrier can significantly reduce the wind speed outside the shed and has the function of inhibiting the formation of weak wind areas inside the shed. The study has confirmed that the shed tunnel project with suitable snow barrier layout plan for tunnel entrance protection is an effective means to control wind and snow disasters. For highway traffic in Xinjiang, it is a feasible solution to use shed tunnel engineering to control blowing snow disasters. After dealing with the snow deposition at the entrance of shed tunnel, the shed tunnel engineering form of low-cost environment integration and the vehicle operation safety guarantee measures of long-distance shed tunnel are the problems that need to be solved in the future.

Key words: snow-defence tunnel; wind tunnel simulation experiment; blowing snow on highways; simulation medium

(责任编辑: 牛富俊)