

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.123



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



路堑防雪栅垂向防雪效果风洞试验研究

汪斌, 康雍毅, 郝升然

(西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031)

摘要:路堑是典型的交通基础形式之一,其下凹特征导致其内部风速低于周边区域。在雪天,落于路堑内的积雪不易被风侵蚀,且周边积雪更容易往路堑内部漂移,形成路堑积雪,造成交通中断。以路堑结构为研究对象,选用聚乙烯颗粒作为雪颗粒模拟介质,设计路堑风吹雪风洞试验模型,明确试验风速,探究防雪栅孔隙率及安装距离对路堑内垂向积雪防治效果的影响。结果表明:无防雪栅时,较深初始积雪下路堑外积雪被均匀侵蚀,较浅初始积雪下路堑外两侧积雪基本被风裹挟带走;低孔隙率防雪栅对上风侧地表的积雪有储存作用,随着孔隙率增大,储存效果减小且逐渐接近无防雪栅;在防雪栅下游局部风场及路堑内部漩涡的共同影响下,防治效果随孔隙率没有明显的单调变化规律;防雪栅安装距离对路堑内积雪的防治效果存在一个防治最优“平台”,防治效果即防雪栅降低路堑积雪深度达到25%。

关键词:路堑;风吹雪;防雪栅;风洞试验

中图分类号:U418.5 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(XXXX)XX-0001-09

Wind tunnel study on perpendicular snow control effectiveness of cutting snow fences

WANG Bin, KANG Yongyi, HAO Shengran

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China)

Abstract: Road cutting is one of the typical transportation infrastructure forms. Its sunken feature results in lower wind speeds inside compared to the surrounding areas. On snowy days, snow accumulated within the cutting is less susceptible to wind erosion, and snow from the surrounding areas tends to drift into the cutting, leading to snow accumulation that disrupts transportation. This paper focuses on the cutting structure, using polyethylene particles as a simulation medium for snow particles, and designing a wind tunnel test model for snowdrift in cuttings. The test wind speed is specified, and the effects of snow fence porosity and installation distance on the perpendicular prevention of snow accumulation in cuttings are investigated. The research results indicate that in the absence of a snow fence, the snow outside the cutting is uniformly eroded under deeper initial snow conditions, while under shallower initial snow conditions, the snow on both sides outside the cutting is largely carried away by the wind. A low-porosity snow fence helps store snow on the windward side of the surface; as porosity increases, this storage effect diminishes and gradually approaches the scenario without a snow fence. Under the combined influence of the local wind field downstream of the snow fence and the vortices

收稿日期:2025-08-29

基金项目:国家自然科学基金(U21A20154)

作者简介:汪斌(1983-),男,博士,教授,主要从事桥梁动力学与防灾减灾研究,E-mail:wangbinwvb@swjtu.edu.cn。

Received: 2025-08-29

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. U21A20154)

Author brief: WANG Bin (1983-), PhD, professor, main research interests: bridge dynamics, disaster prevention and mitigation, E-mail: wangbinwvb@swjtu.edu.cn.

inside the cutting, the prevention effect does not exhibit a clear monotonic relationship with porosity. Regarding the installation distance of the snow fence, there exists an optimal “platform” for prevention effectiveness, achieving a 25% improvement in snow accumulation control or the snow depth reduction.

Keywords: embankment excavation; snow drifting; snow fence; wind tunnel test

路堑结构是交通线路最典型的路基布设形式之一。路堑下凹,内部风速明显低于周边环境风速,积雪不易被风自然吹蚀。更为严重的是,上风区域积雪在风的裹挟下因路堑内部风速较低而发生沉积,形成较为严重的路堑积雪。在暴风雪天气下,路堑积雪尤其显著,加重了交通灾害发生的可能性。因此,深入探讨路堑积雪现象及防治措施具有较为重要的现实意义。

路堑积雪研究主要依赖于风洞试验、数值模拟和现场实测3种方法。现场实测能够直接获取真实可靠的积雪特征,但高昂的时间、人力和资源成本,以及不可控的环境条件限制了其广泛应用。多位学者针对路堑结构风吹雪及防雪栅布设开展了风洞试验与数值模拟研究。Takeuchi等^[1]通过风洞试验研究风向对防雪栅控制积雪漂移效果的影响,结果表明,收集型防雪栅的积雪控制效果随防雪栅与风向的夹角增加而减弱,吹散型防雪栅的吹散效果随防雪栅与风向的夹角增加而增强。李鹏翔等^[2]通过欧拉多相流方程数值建模,研究不同防雪栅孔隙率、高度及安装距离下路堑内外和防雪栅两侧的积雪变化特征,并通过正交试验发现影响路堑内外积雪量的主要因素。李鹏翔等^[3]通过可移动风洞设备的现场原状雪试验和室内风洞的模拟材料试验,获得了铁路路堑区域的积雪分布,并与实际的积雪分布进行了对比。刘庆宽等^[4]采用数值模拟与现场实测相结合的方法研究防雪栅孔隙率和积雪形态对周边流场的影响,结果表明,随着防雪栅孔隙率的增加,雪颗粒堆积的速度变慢。马文勇等^[5]采用风洞试验和数值模拟研究路堑边坡坡度对积雪分布的影响,结果表明,采用陡上风坡、缓下风坡的路堑断面形式可提高路堑自身抵御风吹雪灾害能力。丁录胜等^[6]基于铁路全线的风吹雪现象调查,采用欧拉多相流模型对不同铁路路堑形式的风雪场分布特征进行分析。Lei等^[7]采用单因素试验和正交试验研究了阿尔泰—准东铁路路基积雪分布特征及不同防雪栅防护效果,总结了防雪栅高度、安装距离和孔隙率对防护效果的影响规律,并确定了该段铁路防雪栅的最适参数。数值模拟成本效益高、时间效率高、灵活性强,但由于风雪两相流的复杂性,需要制定较为合适的数值方案。风洞试验能够有效控制风速、风向、雪量等参数,还原雪颗粒的受

力及运动状态。

笔者以路堑结构作为研究对象,通过风洞试验研究防雪栅孔隙率、安装距离这两个关键性因素对路堑垂向积雪防治效果所产生的影响。为了确保研究的科学性和准确性,先分析了风吹雪风洞试验模拟的相似性准则,并选择可靠的雪颗粒模拟介质;然后以实际工程为原型,严格按照相似准则建立试验模型,并确定模型初始参数设置;分别考虑防雪栅的孔隙率及安装距离两种因素的影响,对比分析路堑积雪防治效果。

1 路堑风吹雪风洞试验

1.1 风吹雪相似性模拟

原型雪颗粒采集难度较大,且在搬运过程中不可避免地受到各种扰动及环境温湿度变化的影响。在风洞实验室环境中难以维持原状雪状态,常采用物理化学性质比较稳定的模拟介质颗粒替代原型雪颗粒。理论上,模拟介质颗粒与原型雪颗粒只有满足几何相似、运动相似、动力相似等准则,才能确保风吹雪风洞试验与原型在受力状态、起动条件、运动规律、堆积形态等方面保持高度一致。

雪颗粒粒径较小,与大尺寸路堑结构同比缩尺后的粒径过小,模拟介质易发生布朗运动而不能反映雪颗粒的运动状态。Kind^[8]研究发现,忽略雪颗粒的几何相似对试验结果影响不大。在运动相似模拟中,雪颗粒弗劳德数与雷诺数不能同时得到满足。针对该矛盾,Kind等^[9]使用高密度模拟介质得到了较好的模拟效果,给出了模拟介质与空气密度比值应大于600的建议。雪颗粒在路堑的沉积形状是试验的关键,要求模拟介质休止角与雪颗粒休止角一致^[10]。

雪颗粒沿路堑及上下游地面运动,受到路堑及地面边界层流动的影响。在风洞试验中,原路堑结构经过几何缩尺得到实验模型,模型表面气流相比原型更趋向于光滑壁面流动。边界层流动模拟差异较大,导致雪颗粒运动模拟准确性受限。为了保证边界层内雪颗粒运动模拟的准确性,Kind^[8]建议

$$\frac{(u_{*})_{\text{M}}^3}{2g\nu_{\text{t}}} \geq 30 \quad (1)$$

式中:\$(u_{*})_{\text{M}}\$为雪颗粒模拟介质的阈值摩擦速度;\$g\$为重力加速度;\$\nu_{\text{t}}\$为空气运动黏度。

Kind 等^[9-10]强调,模拟介质必须与雪颗粒保持相似的起动条件。起动条件相似通常表示为颗粒的壁面摩擦速度与壁面阈值摩擦速度的比值,但由于壁面摩擦速度获取困难且其是关于风速的函数,故可转化为风速分布的比值

$$\frac{u(H_M)}{(u_{*t})_M}=\frac{u(H_P)}{(u_{*t})_P}$$

(2)

式中:下标 M 和 P 分别表示模型和原型; $u(H_M)$ 为模型高度 H_M 处的风速; $u(H_P)$ 为原型高度 H_P 处的风速; H_M 与 H_P 应满足几何缩尺比; $(u_{*t})_P$ 为原型雪颗粒的阈值摩擦速度。

1.2 雪颗粒模拟介质

雪颗粒形状和结构多样,其物理性质会随着环境的变化而有所不同。已有研究表明,雪颗粒粒径 0.15~0.2 mm^[11-12]、密度 150~940 kg/m³^[13-14]、休止角 40°~60°^[15-16]、阈值摩擦速度 0.15~0.4 m/s^[17]。碳酸氢钠^[18]、细玻璃珠^[19]、粗石英砂^[20]和细石英砂^[21]等颗粒材料常作为模拟介质,各材料的物理性质如表 1 所示。然而,这些模拟介质密度相对较大、阈值摩擦速度较高。路堑具有内凹外形,内部风速较低,较难达到模拟介质的起动风速,易导致路堑内积雪起动与漂移模拟准确性较差。此外,这些模拟介质休止角较小,对沉积形状相似要求存在差距。

Hao 等^[22]选择聚乙烯颗粒作为模拟介质,其颗粒粒径 0.2 mm、阈值摩擦速度 0.206~0.217 m/s、密度 913.8 kg/m³、休止角 44.3°。与其他模拟介质相比,聚乙烯颗粒具有更小的密度和更低的阈值摩擦速度,更加适用于路堑内部低风速区模拟。此外,聚乙烯颗粒还具有较高的休止角,正好位于原型雪颗粒的休止角范围内,这一特性使其更接近于自然状态下雪颗粒的行为模式,从而更好地满足沉积形状相似要求。聚乙烯颗粒的风吹雪模拟相似性参数如表 2 所示,可更好地模拟路堑内的雪颗粒启动与沉积。

表 1 常用模拟介质物理性质

Table 1 Physical properties of commonly used model media

模拟介质	粒径/mm	密度/(kg/m ³)	休止角/(°)	阈值摩擦速度/(m/s)
碳酸氢钠	0.1	2 160	30	0.23
细玻璃珠	0.64	2 740	23	0.45
粗石英砂	0.3	2 550	32	0.26
细石英砂	0.2	2 570	31	0.25

1.3 路堑与防雪栅模型

试验在 XNJD-2 风洞进行,该风洞为直流吹式风洞,试验段断面宽 1.34 m、高 1.54 m,风速范围为 0.5~20.0 m/s。试验基于理想均匀来流条件开展,

表 2 聚乙烯与雪颗粒模拟相似性

Table 2 Similarity between polyethylene and snow particle

相似准则	相似参数	雪颗粒	聚乙烯颗粒
起动条件相似	$\frac{(u_{*t})_M^3}{2g\nu_f} \geq 30$	12~224	30~36
	$\frac{u(H)}{u_{*t}}$	23~30	20~40
	$\frac{\rho_p}{\rho_f} \geq 600$	122~767	746
沉积形状相似	α_r	40~60	44.3

注: ρ_p 为颗粒密度,单位为 kg/m³; ρ_f 为空气密度,取 1.225 kg/m³; α_r 为休止角,单位为(°)。

紊流强度 1.1%。路堑模型几何缩尺比采用 1:40,底面宽度 0.283 m,深度 0.038 m,边坡坡度 1:1,并设置有 2% 的排水横坡。试验整体模型如图 1 所示,包括路堑结构、上下风侧地表、支撑侧壁、底部稳定板及地表过渡曲面。模型总长 2.8 m,上风侧地表长 1.538 m,下风侧地表长 0.905 m。10 m/s 风速下,上风侧地表沿流程雷诺数达到 10⁶,参照文献[23]平板边界层特征,来流得到充分发展。地表过渡曲面采用光敏树脂材料进行 3D 打印制作,其余部分均由松木加工。支撑侧壁将模拟地表抬高以便勾勒路堑地形,且起到引流作用减小端部效应,避开风洞底面边界层的影响。底部稳定板横向连接支撑侧壁,起到加固稳定试验模型作用。上风侧地表、支撑侧壁在来流进风端部易出现流动分离,从而扰动流场干扰路堑流速分布。支撑侧壁端部进行斜角过渡处理,地表端部设置过渡曲面引导来流风光滑平顺通过,上风侧地表过渡曲面线形采用 Huang 等^[24]基于 Witoszynski 风洞压缩曲线提出的一种流线型过渡曲线

$$y=0.9623\left[1-\frac{(1-0.36x^2)^2}{(1+18x^2)^3}\right]$$

(3)

式中:y为端部断面高度方向;x为端部断面往外延伸方向。

防雪栅原型为长圆孔式,严格按照原型与模型的孔径与壁厚比值一致的原则进行缩尺设计。防雪栅模型高 0.065 m,底部间隙 0.010 m,如图 2 所示。孔径 4.8 mm,是聚乙烯颗粒的 24 倍,不会阻碍颗粒的通过。调整孔隙的数量控制孔隙率。文献[25]建议公路防雪栅采用 20%~60% 的孔隙率。设计 5 组防雪栅,孔隙率分别是 20%、30%、40%、50% 和 60%,以对比孔隙率的影响。采用 1 mm 厚 PVC 塑料板并应用激光雕刻技术加工以保证孔隙率的精准性。

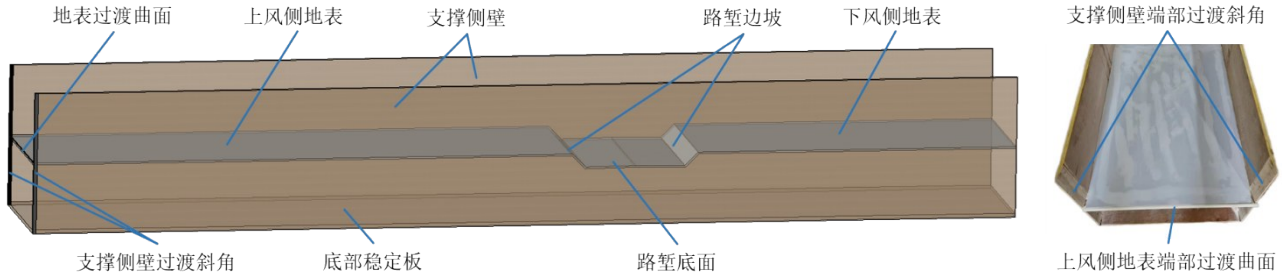


图1 路堑风吹雪试验模型

Fig.1 Experimental model of snow drifting of road cutting

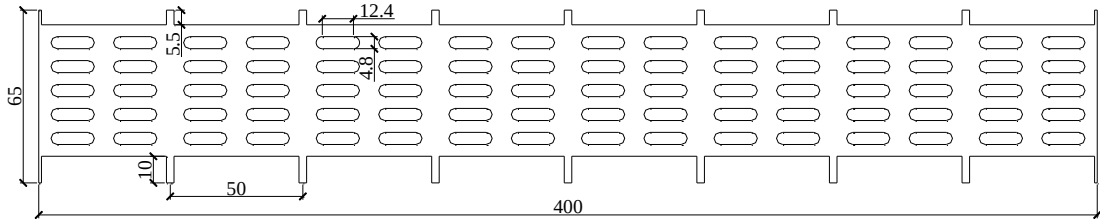


图2 防雪栅模型设计(单位:mm)

Fig.2 Design of snow fence model (unit: mm)

2 风洞试验设置

2.1 初始积雪深度

按基本雪压 1.0 kN/m^2 开展试验,干燥雪颗粒的重度约为 1.5 kN/m^3 ,换算得到基本积雪深度 0.67 m 。按照几何缩尺比,模拟介质铺设深度为 17 mm 。为考虑初始积雪深度的影响,试验时设置了 8.5 mm 、 17 mm 两种深度。试验前,模型全长均匀铺设模拟介质,如图3所示。

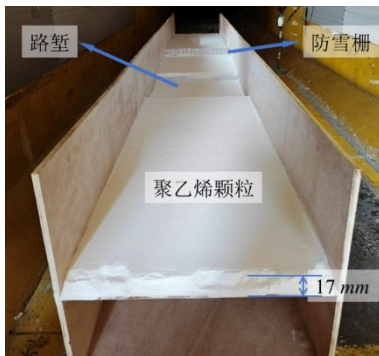


图3 初始模拟介质均匀铺设

Fig.3 Initial uniform model medium

2.2 试验风速确定

在防雪栅与支撑侧壁连接部位,风流经时形成急速气流剧烈侵蚀附近雪颗粒。当风速大及防雪栅孔隙率低时,侵蚀作用尤其显著,进而影响防雪栅两端雪面测试结果的准确性。为获得可靠的试验结果,风吹雪稳定后,防雪栅前后积雪分布在横风向中部保证 $2/3$ 长度范围不受端部侵蚀影响。以不透风防雪栅(孔隙率为0)为对象,采集不同风速

下防雪栅周围积雪测试结果以分析确定合适的试验风速。试验中,来流风垂直垂向防雪栅。

部分学者^[3,5]用模拟介质做风吹雪试验时,模拟介质的起动风速均在 5 m/s 以上,笔者尝试风速直接从 6 m/s 开始,间隔 2 m/s 逐步增加到 12 m/s 。为了描述积雪分布,定义无量纲积雪系数

$$C = \frac{D_f}{D_i} \quad (4)$$

式中: D_f 为风吹雪稳定后的积雪深度; D_i 为初始积雪深度。

不同风速下防雪栅积雪系数测试结果如图4所示,横坐标为离防雪栅的距离 x 与防雪栅高度 H 的比值。从图中可以看到,来流风均使得雪颗粒在防雪栅前后堆积,堆积总体情况差距不大, 10 m/s 以上风速上风侧地表的积雪侵蚀较为明显。 10 m/s 和 12 m/s 风速下防雪栅附近积雪状态如图5所示。 6 m/s 和 8 m/s 结果与 10 m/s 的结果基本相似。两幅图对比可以发现,随着来流风速的提升,支撑侧壁边界层发展及引发的侵蚀作用效应增强,导致靠近支撑侧壁局部区域结果表现出一定的风速依赖性。 10 m/s 风速下,对称轴附近的积雪较为均匀; 12 m/s 风速下,模型边壁直角效应的侵蚀作用扩展到模型对称轴的 $2/3$ 区域内。总体上,4种风速下防雪栅周围积雪分布情况差异不太明显,风速为 12 m/s 时,模型边壁侵蚀效应影响显著。为了得到较为明显的积雪重分布现象且尽量避免边壁效应,综合考虑选择 10 m/s 作为试验风速。

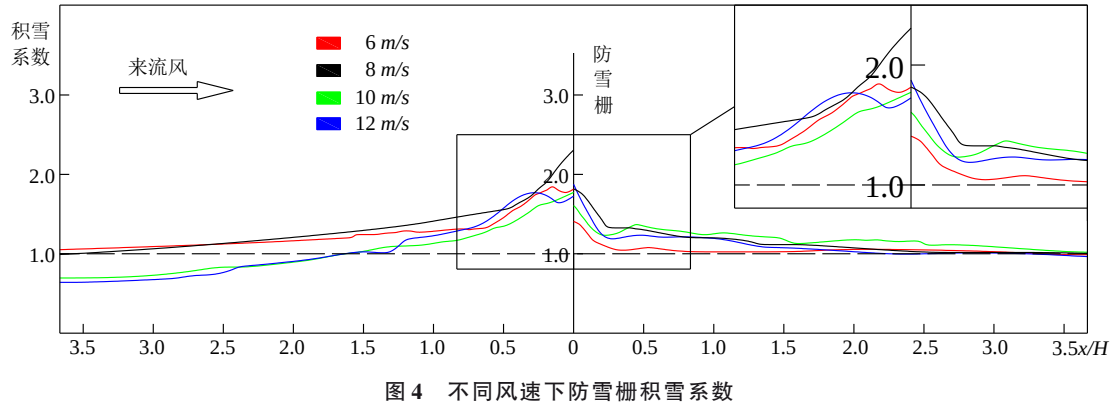


图4 不同风速下防雪栅积雪系数

Fig.4 Snow accumulation coefficient around snow fence under different wind speeds



(a) 10 m/s 风速



(b) 12 m/s 风速

图5 不同风速下防雪栅附近积雪形态

Fig.5 The snow accumulation morphology near snow fence under different wind speeds

3 试验结果与讨论

3.1 孔隙率影响

防雪栅孔隙率的差异会改变防雪栅附近的风场,从而影响通过与越过防雪栅的风雪流特性。具体来说,较低的孔隙率导致更多雪颗粒直接越过防雪栅顶部,而较高的孔隙率则促使雪颗粒更多直接穿过防雪栅孔隙。

考虑 17、8.5 mm 两种初始积雪深度,测试 20%、30%、40%、50% 和 60% 五种孔隙率下路堑及附近的积雪分布。积雪系数曲线及与无防雪栅状态的比较如图 6 所示,横坐标为距离 x 与路堑底宽 B 的比值。防雪栅安装位置距路堑上风侧边缘 0.3 m,为 $1.59B$ 。为保证视觉效果,图中横坐标 x/B 进行了 0.5 倍缩小,纵坐标积雪系数 C 进行了 2 倍放大。无防雪栅时,17 mm 初始深度下路堑外积雪被均匀侵蚀;而在 8.5 mm 初始深度下,路堑外两侧积雪基本被风裹挟带走,且路堑上风侧侵蚀范围远大于路堑下风侧。两种初始积雪深度下,路堑内均形成积雪堆积。低孔隙率防雪栅下,路堑的上风侧地表有积雪堆积,下风侧地表存在积雪侵蚀。随着孔隙率增加,防雪栅与路堑之间的积雪被侵蚀的现象

越来越明显,且路堑内积雪堆积程度变高。

取路堑中心的积雪系数及路堑内积雪系数平均值,得到表 3。无防雪栅下,8.5 mm 初始深度的积雪系数大于 17 mm 初始深度。17 mm 初始深度下,路堑内积雪系数随着防雪栅孔隙率增大呈现先增后减再增的趋势,在孔隙率为 40% 时达到最大值 1.532,在 60% 孔隙率时接近于无防雪栅状态。8.5 mm 初始深度下,积雪系数也呈现相同规律,在 40% 孔隙率时达到极值 1.829,在 60% 孔隙率时达到最大值 1.835。

定义防雪栅对路堑内积雪的防治效果 E 为

$$E = \frac{C_{100} - C_i}{C_{100}} \times 100\% \quad (5)$$

式中: E 为防治效果; C_{100} 为无防雪栅下路堑内的积雪系数平均值; C_i 为各孔隙率防雪栅下路堑内的积雪系数平均值;下角标 i 为孔隙率。当 $E=100\%$ 时,代表初始积雪被侵蚀完毕,防雪栅的防治效果达到最优;当 $E=0$ 时,代表当下积雪深度与无防雪栅下相当,即防雪栅无防治效果;当 $E<0$ 时,代表当下积雪深度高于无防雪栅,防雪栅的存在加重了路堑内的积雪堆积情况,即防雪效果为负增益。将表 3 积雪系数整理得到各孔隙率防雪栅对路堑内积雪

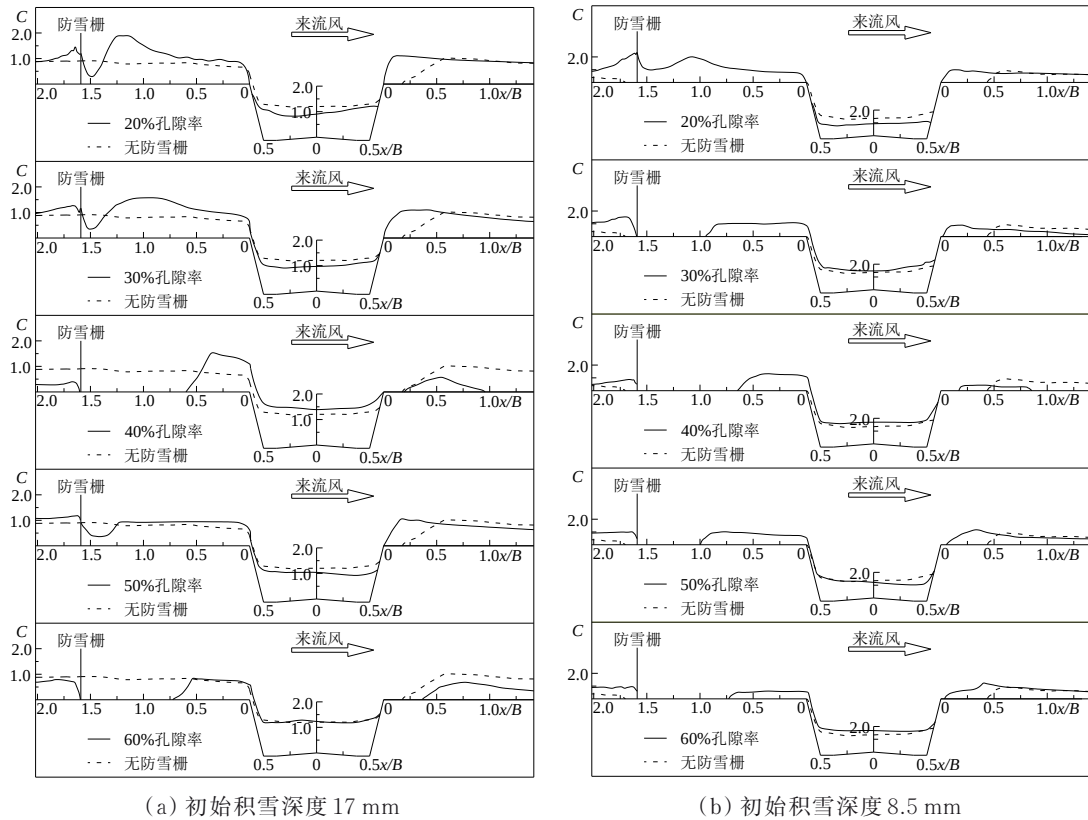


图6 不同孔隙率防雪栅下路堑积雪系数分布

Fig.6 Distribution of snow accumulation coefficients around road cutting under snow fences with different porosities

的防治效果,如图7所示。

表3 不同孔隙率防雪栅下路堑内积雪系数

Table 3 Snow accumulation coefficient in the road cutting under snow fences with different porosities

孔隙率/%	初始积雪深度 17 mm		初始积雪深度 8.5 mm	
	路堑中心值	路堑内平均值	路堑中心值	路堑内平均值
20	0.904	1.046	0.937	1.077
30	0.967	1.066	1.476	1.792
40	1.388	1.532	1.692	1.829
50	1.041	1.091	1.223	1.382
60	1.233	1.296	1.679	1.835
100	1.203	1.299	1.344	1.568

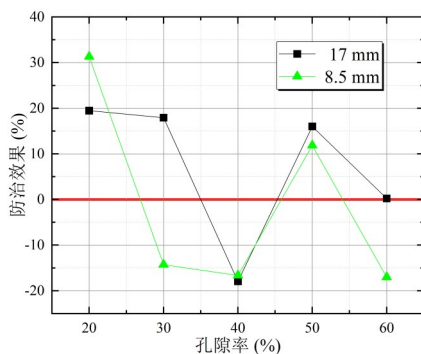


图7 不同孔隙率防雪栅对路堑积雪的防治效果

Fig.7 Prevention effects of snow fence to road cutting under different porosities

从图7可以看到,随着防雪栅孔隙率的变化,路堑内积雪的防治效果表现出较大的波动特性,且这种波动性与初始积雪深度无关。在孔隙率为20%和50%时,两种初始积雪深度下防雪栅均发挥了防治作用,防治效果最大达到31.3%,最小为11.9%。在孔隙率为40%时,两种初始积雪深度下防雪栅均表现出加重路堑内的积雪堆积,加重程度分别为17.9%和16.6%。在孔隙率为30%和60%时,防雪栅的防治效果在积雪深度的变化下表现不一。从机理来看,较低的孔隙率导致大量空气从防雪栅顶部绕流,在防雪栅下游形成局部低风速区。雪颗粒在此沉积,使得到达路堑的空气含雪量降低而减弱路堑积雪,表现为较高的防治效果。随着孔隙率的增大,防雪栅下游局部低风速区弱化,大量颗粒直接穿过防雪栅,在防雪栅下游局部形成侵蚀,使得空气含雪量加大而提高路堑积雪量。从图6判断,在50%透风率下,路堑内部漩涡得到加强,积雪能力变弱。在防雪栅下游局部风场及路堑内部漩涡的共同影响下,防治效果随孔隙率没有明显的单调变化规律。

3.2 安装距离影响

防雪栅影响其附近一定范围内的风速场,存在低风速区。随着安装距离的变化,防雪栅附近形成的低风速区相应移动。防雪栅孔隙率影响试验结

果表明,低孔隙率防雪栅在上风侧有储存雪颗粒的作用,可以削弱到达路堑的雪颗粒数量。以30%孔隙率防雪栅为对象进行安装距离试验研究。17 mm初始积雪深度隐藏了路堑大部分特征,以初始积雪深度8.5 mm开展研究。从路堑上风侧边缘开始,间隔0.075 m(为0.27B,B为路堑底宽)设置一个工况,从0 m(0B)至0.825 m(2.92B)共考虑12个安装距离。

不同安装距离下,路堑积雪系数分布如图8所示。不同安装距离下积雪堆积的特征极为相似,均是在防雪栅后部有小范围的积雪消除现象,路堑内

并没有出现比较明显的积雪清除效果。但相较于无防雪栅工况,防雪栅的存在能储存上风侧地表的大部分原始积雪。安装距离在0B~1.59B,防雪栅对路堑内的积雪堆积情况改变不明显。在1.86B~2.92B的安装距离下,防雪栅使得路堑内的积雪堆积少于无防雪栅的情况。从机理上,安装防雪栅后改变了路堑上游风速,形成低风速边界层,使得雪颗粒侵蚀变弱,从而减少到达路堑的颗粒数量,路堑积雪能力变弱。从图8判断,在1.86B~2.92B的安装距离下,路堑内部形成较强的漩涡,路堑积雪能力变弱,具有较好的防治效果。

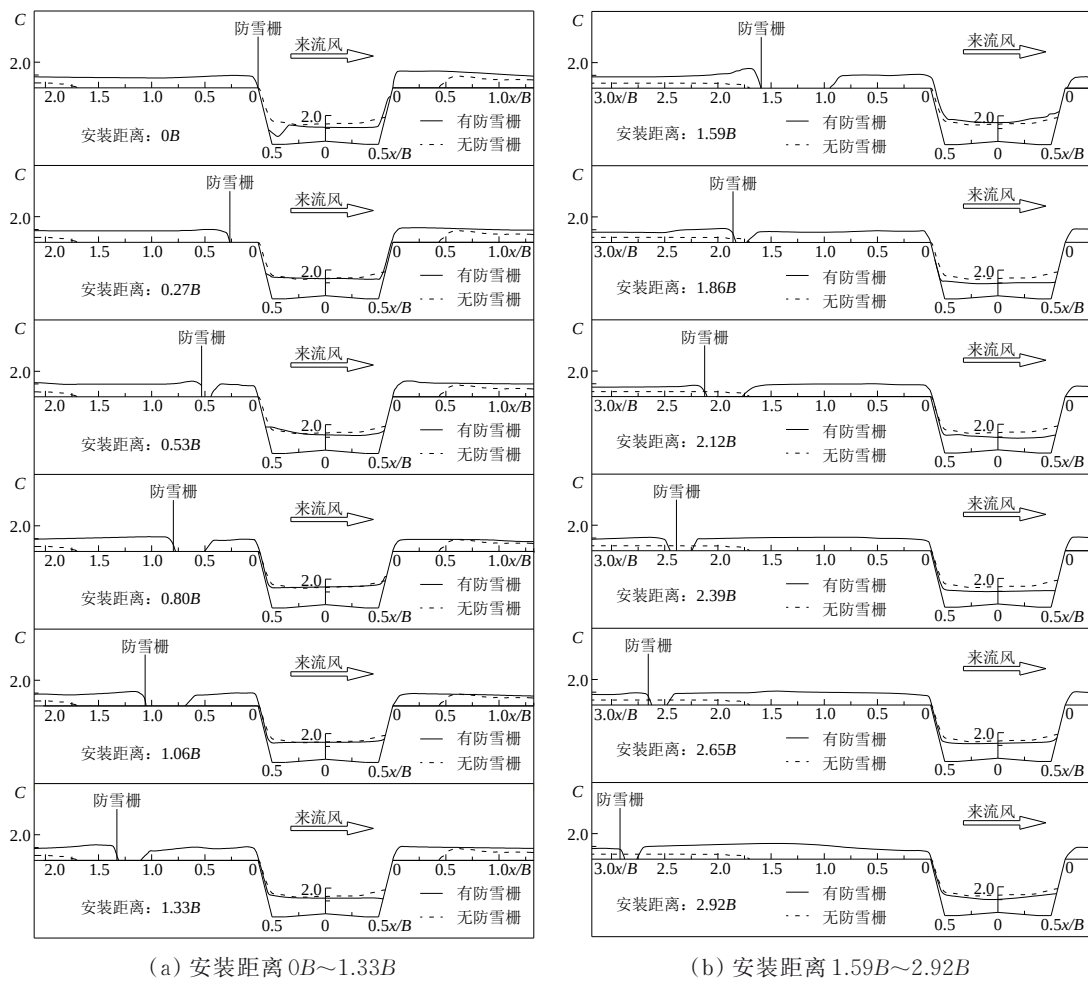


图8 不同安装距离防雪栅下路堑积雪系数分布

Fig.8 Distribution of snow accumulation coefficients in road cutting under different locations of snow fences

取路堑中心处积雪系数和路堑内积雪系数平均值,如表4所示。从表中可以找到4组工况,安装距离分别是0B、1.86B、2.12B和2.39B,路堑中心的积雪系数在1.0左右,路堑内积雪系数平均值在1.2以下,其积雪堆积深度与初始积雪深度相当。所以在这4个安装距离下,防雪栅能够对风致雪漂加重路堑内积雪堆积这一现象起到抑制作用。

根据式(5)计算不同安装距离下防雪栅对路堑内积雪的防治效果,得到图9。从图9可以看出,在

安装距离为0B时,防雪栅的防治效果表现不错,达到24.1%,但在安装距离变为0.27B时,防治效果急剧下降,下降到4.2%,并且随着安装距离的继续增大,防治效果变化不大,基本在5%附近波动。当安装距离增大到1.59B时,防治效果又迎来一次急剧的下跌,跌至-14.3%。而越过这个安装距离之后,防治效果迎来了一个“平台”,这个“平台”的安装距离范围为1.86B至2.39B,防治效果基本在25%,达到0B安装距离的效果,甚至略有超越。离

表4 不同安装距离防雪栅下路堑内积雪系数

Table 4 Snow accumulation coefficient in the road cutting under different locations of snow fences

安装距离	路堑中心 值	路堑内平 均值	安装距离	路堑中心 值	路堑内平 均值
0B	1.001	1.190	1.59B	1.476	1.792
0.27B	1.333	1.502	1.86B	0.968	1.162
0.53B	1.196	1.445	2.12B	0.970	1.175
0.80B	1.386	1.552	2.39B	0.978	1.168
1.06B	1.323	1.483	2.65B	1.162	1.340
1.33B	1.215	1.397	2.92B	1.016	1.325

开这个平台之后,防治效果在安装距离为2.65B时跌至14.5%。所以,当防雪栅的安装距离为0B或者处于1.86B~2.39B这一范围时,其对路堑内积雪表现出较好的防治效果。

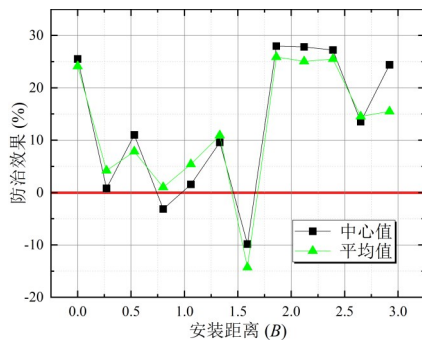


图9 不同安装距离下防雪栅对路堑积雪的防治效果

Fig.9 Prevention effects of snow fence to road cutting under different locations

4 结论

以路堑结构作为研究对象,选用具有较低密度和较低阈值摩擦速度的聚乙烯颗粒模拟介质,设计风洞试验模型并确定试验风速,深入探究了防雪栅的孔隙率及安装距离两因素对路堑内垂向风致积雪漂移的防治效果产生的影响,主要结论如下:

1)无防雪栅时,17 mm初始积雪深度下路堑外积雪被均匀侵蚀,8.5 mm初始积雪深度下路堑外两侧积雪基本被风裹挟带走。

2)低孔隙率防雪栅对上风侧地表的积雪有储存作用。随着孔隙率增大,储存效果减小且逐渐接近于无防雪栅。

3)在防雪栅下游局部风场及路堑内部漩涡的共同影响下,防治效果随孔隙率没有明显的单调变化规律。在孔隙率为20%和50%时,两种初始积雪深度下防雪栅均发挥了防治作用,防治效果最大达到31.3%,最小为11.9%。在孔隙率为40%时,两种初始积雪深度下的防雪栅均表现出加重路堑内的积雪堆积,加重程度分别为17.9%和16.6%。

4)当防雪栅的安装距离为0B(B为路堑底宽)或者处于1.86B~2.39B这一范围时,其对路堑内积雪有较好的防治效果。随着防雪栅安装距离的变化,防雪栅对路堑内积雪的防治效果存在一个防治最优“平台”,防治效果即防雪栅降低路堑积雪深度达到25%。

参考文献

- [1] TAKEUCHI Y, KOBAYASHI S, SATO T, et al. The effect of wind direction on drift control by snow fences [J]. Annals of Glaciology, 2001, 32: 159-162.
- [2] 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): 122-130.
LI P X, BAI M Z, QIU S M, 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): 122-130. (in Chinese)
- [3] 李鹏翔, 白明洲, 丁录胜, 等. 基于室内外风洞试验的铁路风吹雪特性研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(8): 3245-3258.
LI P X, BAI M Z, DING L S, et al. Study on characteristics of snow-drifting in railway area based on indoor and outdoor wind tunnel tests [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(8): 3245-3258. (in Chinese)
- [4] 刘庆宽, 李海飞, 贾娅娅, 等. 透风率及积雪形态对防雪栅防护效果的影响[J]. 振动. 测试与诊断, 2023, 43(2): 390-396, 416.
LIU Q K, LI H F, JIA Y Y, et al. Influence of porosity and snow form on protective effect of snow fence [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2023, 43(2): 390-396, 416. (in Chinese)
- [5] 马文勇, 李江龙, 孙元春, 等. 风致路堑积雪演化过程试验与模拟研究[J]. 振动与冲击, 2023, 42(9): 284-292.
MA W Y, LI J L, SUN Y C, et al. Tests and simulation for evolution process of wind-induced cutting snow accumulation [J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(9): 284-292. (in Chinese)
- [6] 丁录胜, 白明洲, 李鹏翔. 风吹雪积雪分布特征和铁路路基形式相关性研究[J]. 北京交通大学学报, 2023, 47(1): 54-64, 154.
DING L S, BAI M Z, LI P X. Correlation analysis of snow distribution characteristics and railway subgrade form under snowdrift conditions [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2023, 47(1): 54-64, 154. (in Chinese)
- [7] LEI J, CHENG J J, GAO L, et al. Characteristics of snow cover distribution along railway subgrade and the protective effect of snow fences [J]. Journal of Arid

- Land, 2023, 15(8): 901-919.
- [8] KIND R J. A critical examination of the requirements for model simulation of wind-induced erosion/deposition phenomena such as snow drifting [J]. *Atmospheric Environment*, 1976, 10(3): 219-227.
- [9] KIND R J, MURRAY S B. Saltation flow measurements relating to modeling of snowdrifting [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1982, 10(1): 89-102.
- [10] KIND R J. Snowdrifting: A review of modelling methods [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 1986, 12(3): 217-228.
- [11] BUDD W F, DINGLE W R J, RADOK U. The Byrd snow drift project: Outline and basic results [M]// Rubin M J. *Studies in Antarctic Meteorology*. Washington, D. C.: American Geophysical Union, 1966: 71-134.
- [12] SCHMIDT R A. Properties of blowing snow [J]. *Reviews of Geophysics*, 1982, 20(1): 39-44.
- [13] LIANG S Y, MA X X, WANG X Y. Observation test on the physical properties of accumulated snow in constructing embankment [J]. *Advanced Materials Research*, 2010, 108-111: 380-385.
- [14] BORMANN K J, EVANS J P, MCCABE M F. Constraining snowmelt in a temperature-index model using simulated snow densities [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 517: 652-667.
- [15] KUROIWA D, MIZUNO Y, TAKEUCHI M. Micromeritical properties of snow [C]//*Physics of Snow and Ice: Proceedings*, 1967, 1(2): 751—772.
- [16] EIDEVÅG T, THOMSON E S, KALLIN D, et al. Angle of repose of snow: An experimental study on cohesive properties [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2022, 194: 103470.
- [17] KIND R J. Mechanics of aeolian transport of snow and sand [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1990, 36: 855-866.
- [18] KIM D H, KWOK K C S, ROHDE H F. Wind tunnel model study of Antarctic snowdrifting [C]//*Proceedings of 10th Australasian Fluid Mechanics Conference*, University of Melbourne, 1989: 35-38.
- [19] HAEHNEL R B, WILKINSON J H, LEVER J H. Snowdrift modeling in the CRREL wind tunnel [C]//*Proceedings of 61st Eastern Snow Conference*, Quebec City, 1993: 8-10.
- [20] SCHAEELIN A, ILG L, BENESCH M. Snow deposition around mountain hut-design optimization by CFD and scaled water channel model and realization of solutions [C]//*Proceedings of the Fifth International Conference on Snow Engineering*, Davos, 2004: 147.
- [21] 张国龙, 张清文, 莫华美, 等. 基于规范对比的女儿墙屋面雪荷载实测分析[J]. *建筑结构学报*, 2019, 40(6): 32-39.
- ZHANG G L, ZHANG Q W, MO H M, et al. Analysis of measured data of snow loads on roof with parapets based on comparison of foreign codes [J]. *Journal of Building Structures*, 2019, 40(6): 32-39. (in Chinese)
- [22] HAO S R, WANG B, KANG Y Y, et al. Analyzing wind-induced snow redistribution on box girder bridges using wind tunnel tests [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2024, 29(9): 04024070.
- [23] 陈懋章. 粘性流体力学基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- CHEN M Z. *Fundamentals of viscous fluid dynamics* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2002. (in Chinese)
- [24] HUANG G Q, CHENG X, PENG L L, et al. Aerodynamic shape of transition curve for truncated mountainous terrain model in wind field simulation [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2018, 178: 80-90.
- [25] 公路风吹雪雪害防治技术规程: DB15/T 435—2020 [S]. 呼和浩特: 内蒙古自治区市场监督管理局, 2020.
- Technical alregulation for control of blowing and drifting snowonto highways: DB15/T 435—2020 [S]. Hohhot: Inner Mongolia Autonomous Region Administration for Market Regulation, 2020. (in Chinese)

(编辑 XXX)