

DOI:10.11918/202103069

铁路路堑区域风吹雪防雪栅效果研究

李鹏翔¹, 白明洲^{1,2}, 邱树茂¹, 李景贤³

(1.北京交通大学 土木与建筑工程学院,北京 100044;2.北京市轨道工程重点实验室(北京交通大学),北京 100044;

3.新疆铁道勘察设计院 地质路基设计分处,乌鲁木齐 830011)

摘要: 为了减小风吹雪作用所致的积雪沉积对铁路线路的影响,并研究防雪栅发挥最大防护效应的结构形式与布置距离,建立了基于欧拉多相流方程的风吹雪数值分析模型,根据工程实例验证了数值模型的适用性;研究了不同孔隙率和高度的防雪栅,以及不同防雪栅布置距离下铁路路堑内外和栅两侧的雪量变化特征,并通过 L16(4⁵)的正交试验得到影响路堑内外积雪量的主要因素。研究表明:所建立的数值模型在路堑内外和防雪栅两侧积雪分布形态与现场试验段保持了较好的一致性;防雪栅结构形式主要影响路堑外的沉积雪量,而路堑内雪量主要受防雪栅与路基间的作用距离影响;防雪栅上风侧沉积长度约为 20 m,下风侧雪量沉积长度通常是防雪栅高度的 10~12 倍;正交试验中不同防雪栅结构与作用距离的组合下路基顶面风吹雪所致的雪量最多减少了 26.17%。根据防雪栅与路堑之间的作用距离,可以通过调整防雪栅孔隙率和高度改变积雪沉积量和沉积位置来增加防雪栅的作用效果。

关键词: 风吹雪;铁路路堑;防雪栅;数值模拟;正交试验;沉积雪量

中图分类号: U216.4

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2022)03-0122-09

Effect of snow fence in railway cutting area under action of snow-drifting

LI Pengxiang¹, BAI Mingzhou^{1,2}, QIU Shumao¹, LI Jingxian³

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Beijing Key Laboratory of Track Engineering(Beijing Jiaotong University), Beijing 100044, China;

3. Geological Subgrade Design Branch, Xinjiang Railway Survey and Design Institute, Urumqi 830011, China)

Abstract: To reduce the effect of snow deposition on railway lines caused by snow-drifting and study the structure and layout of snow fences that can have maximum protection effect, a numerical analysis model of snow-drifting based on Euler multiphase flow model was established, and the applicability of the numerical model was verified by an engineering example. The variation characteristics of snow amount inside and outside the railway cutting area and on both sides of the snow fence were investigated under the conditions of different porosities, heights, and layout distances of snow fences. Through L16 (4⁵) orthogonal test, the main factors affecting the volume of snow deposition inside and outside the railway cutting area were obtained. Results show that the snow distribution patterns of the proposed numerical model inside and outside the cutting area and on both sides of the snow fence were consistent with those in the field test section. The structure of snow fences mainly affected the snow volume deposited outside the cutting area, while the main factor affecting the amount of snow inside railway cutting area was the distance between snow fence and roadbed. The distance of snow deposition on the windward side of the snow fence was about 20 m, and that on the leeward side of the snow fence was generally 10 - 12 times of the height of the snow fence. In the orthogonal test, the optimal combination of snow fence structure and layout distance could decrease the snow volume on the top of roadbed caused by snow-drifting by at most 26.17%. According to the distance between snow fence and cutting area, the snow deposition amount and position could be changed by adjusting the snow fence porosity and height to increase the effect of the snow fence.

Keywords: snow-drifting; railway cutting; snow fence; numerical simulation; orthogonal test; deposited snow amount

风吹雪是雪粒在气流的作用下发生蠕移、跃移

及悬移等运动的一种自然现象^[1]。随着寒区铁路网的日益完善,风吹雪现象带来的积雪灾害对铁路运营安全的影响成为亟待解决的问题。现场监测是获取风吹雪特征最直接有效的方法,但交通线路延伸长,风吹雪灾害往往出现在高寒边疆地区,难以长时间全面进行实地的风吹雪观测,且风吹雪灾害具

收稿日期: 2021-03-18

基金项目: 中央高校基本科研业务费(2021YJS119);

国家自然科学基金(41672339)

作者简介: 李鹏翔(1995—),男,博士研究生;

白明洲(1967—),男,教授,博士生导师

通信作者: 白明洲, mzhbai@bjtu.edu.cn

有明显的区域特征,而现场监测难以控制风雪场条件,所得结果也具有随机性^[2]。

通过数值计算是获取积雪分布信息的有效方法之一,根据天气条件、地理特征等多因素总结各种不易积雪的公路路基断面型式和不同防护措施,提取不同断面流场的风速变化情况^[3],从流场变化的角度分析积雪的变化特征^[4];陈凤箴^[5]考虑防雪栅对公路风吹雪灾害的防治作用,总结了公路风吹雪灾害防治的防雪栅类型,吴鹏等^[6]通过改变路堤高度及边坡坡率等参数,对不同路基结构形式下的防雪栅作用进行了研究,并总结了防雪栅栏、挡雪墙、导风板和防雪林等4种目前用于新疆公路风吹雪的防治措施的相关设置参数^[7]。

目前风吹雪灾害的防治一般通过改变风雪场流向以达到目的,其中主要包括应用防雪栅(墙)、防雪林及防雪走廊等,实践表明防雪林在风吹雪易发区域种植条件要求较高且难以维护^[8],防雪走廊入口处易产生积雪^[9],采用防雪栅来减轻积雪对道路的影响是相对简便有效的方法^[10]。怀俄明公路自设置防雪栅以来,栅栏防护区域事故率减少了75%,每年减少近9 d因积雪封闭道路的时间^[11],国内近年来已将防雪栅较多地应用在滨绥线、图佳线、两伊线等风雪灾害易发区域,但由于早期工程建设的忽视,往往是出现灾害后才考虑采取防治措施,所采用的方法与布置形式也较多基于经验选择。

精伊霍铁路是中国首次大规模在铁路工程设计时考虑了风吹雪灾害的防护,并选用了包括防雪墙和防雪栅在内的组合设施,十余年来发挥了显著的防雪作用,但由于两种防雪设施距离较近,防雪墙作用效果没有充分发挥,同时因为防雪栅栏距离路基结构过近,也未能充分发挥防雪栅效果^[12];在新建克塔铁路则主要从铁路选线设计原则和路基结构形式(包括设计积雪平台和对不同边坡坡率)方面对风吹雪灾害进行了重点防护,对所设置的防雪栅效果则需要进一步进行观察^[13]。

综上所述,目前交通领域风吹雪灾害防治成果主要以公路工程为代表,但铁路路基形式与公路路基有较大不同,而且铁路线路难以像公路可以灵活绕避雪害区域,铁路沿线风吹雪灾害呈现“点多面广危害大”的特点,但目前关于铁路路堑结构形式的积雪量以及防雪栅作用下两侧堆积雪量和对路堑内外雪量的影响尚无统一论定。因此,本文以新建铁路工程背景为建模基础,采用实际所测风雪场参数为计算条件,定量分析风吹雪作用下铁路路堑内外和不同形式防雪栅两侧的积雪分布。

1 数值模型的建立

基于 ANSYS 中 Fluent 计算模块,并采用 user-defined-function 自定义加载运动模型和边界条件,建立三维多相流风吹雪分析模型。

1.1 风雪场运动模型

采用欧拉多相流模型来描述雪粒在空气中的运动,其中空气的运动受雷诺时均方程(RANS)支配,并采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型使 RANS 方程封闭后求解,其中 k 为湍流动能, ε 为湍流耗散率^[14]。在多相流计算中认为雪粒为连续流体,运动方程^[15]为

$$\frac{\partial \rho_s f}{\partial t} + \frac{\partial \rho_s f u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{v_i}{S_c} \left(\frac{\partial \rho_s f}{\partial x_j} \right) \right] - \frac{\partial \rho_s f w}{\partial x_\varepsilon} \quad (1)$$

式中: ρ_s 为雪的密度; f 为雪的体积分数(ρ_s 与 f 的乘积表示雪粒体积浓度); S_c 为施密特数,取值为 1^[16]; w 为雪粒降落速度。

驱使雪粒运动的最小摩擦速度称为“阈值速度 u_{*t} ”,当雪粒表面受到的摩擦速度 u_* 大于自身运动的阈值速度 u_{*t} 时便产生运动,雪粒表面的摩擦速度 u_* 由其剪切力计算得出,如式(2)所示。雪表面的堆积和侵蚀运动取决于摩擦速度 u_* ^[17],当 u_* 大于 u_{*t} 时,雪粒开始运动并发生雪量减少的侵蚀作用,侵蚀减少雪量为 q_{ero} ; u_* 小于 u_{*t} 时雪粒无法运动产生堆积,堆积增加雪量为 q_{ero} ,如式(3)~(4)所示,并根据式(5)计算某一点处的总雪量变化。

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho_s}} \quad (2)$$

$$q_{dep} = \rho_s f w \frac{u_{*t}^2 - u_*^2}{u_{*t}^2} \quad (3)$$

$$q_{ero} = A_{ero} (u_*^2 - u_{*t}^2) \quad (4)$$

$$q_{total} = q_{dep} + q_{ero} \quad (5)$$

式中: τ 为雪粒受到的剪切力; q_{dep} 为雪粒堆积量; q_{ero} 为雪粒侵蚀量; q_{total} 表示雪粒总流量; A_{ero} 为雪粒间黏结强度,取值为 7×10^{-4} 。

在上述运动方程和堆积-侵蚀模型中,雪粒密度 139 kg/m^3 来源于线路区域降雪后连续 3 d 实测的平均值;风吹雪灾害现场测得 3 m 高处的雪粒宏观起动风速为 6 m/s,根据近地层风场对数率剖面模型算得阈值速度 u_{*t} 为 0.15 m/s,雪粒降落速度 w 为 0.1 m/s,雪粒粒径为 $200 \mu\text{m}$ ^[18]。

1.2 计算域参数

基于现场风吹雪灾害防治试验段路基形式,并根据 TB 10098—2017《铁路线路设计规范》要求^[19],建立路基面宽度为 8 m、路基边坡坡度为 1:1.75、路基两侧均有宽度为 5 m 积雪平台的单线

铁路路基,计算中来流风向垂直于线路方向。

计算域如图 1 所示,其中为保证来流风速与出流风速的充分发展,并且减小计算域壁面对积雪分布的影响,流场方向长度为所有计算工况中防雪栅

到铁路路基上风侧边坡顶部的最大距离的 10 倍,高度为所有计算工况中最高模型高度的 10 倍,线路方向则尽可能地延长,最终计算域为 800 m(流场方向)×600 m(线路方向)×50 m(高度)。

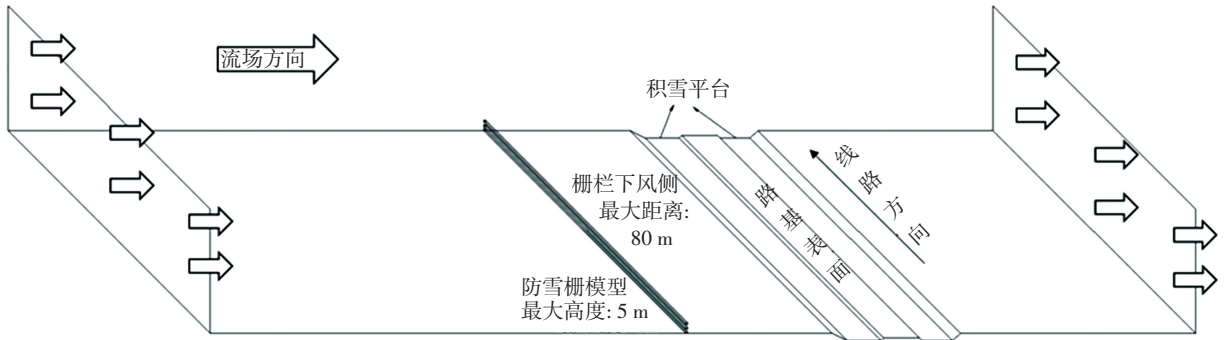


图 1 计算域整体示意图

Fig.1 Schematic diagram of overall computing domain

计算域边界条件中入流面设置为速度入口 (velocity-inlet),以监测数据建立近地层风场对数率剖面模型^[20],其中 3 m 高处来流风速为 6 m/s,地面粗糙度为 2×10^{-4} m;出流面设置为自由流出口 (outflow),该边界不定义任何参数;计算域顶面与两侧面设置为对称边界,该边界上的剪应力为 0,各物理量的梯度为 0,不影响区域内计算;地面、防雪栅和路基模型表面设置为流体不可穿过的 wall 边界。

1.3 求解器参数

计算采用非定常流,初始设置雪颗粒体积分数 v_s 为 0.01,与雪量变化相关的参数 α 和输出结果 r 分别用式 (6) 和式 (7) 表示。计算步长设置为 0.01 s,总计算时长为 1 800 s(30 min)。

$$\alpha = \frac{r - r_0}{r_0 - 1} \quad (6)$$

$$r = \frac{v_f}{v_s} \quad (7)$$

式中: r_0 为无防雪栅时计算前后的雪粒体积分数比值, r 为有雪防雪栅时计算前后的雪粒体积分数比值; $r_0 - 1$ 为无防雪栅作用下雪粒体积分数的变化量; α 为雪量变化率,表示防雪栅作用下雪量的变化程度,正值表示雪量减少,负值表示雪量增加; v_f 为计算结束时的测点雪粒体积分数,数值越大,表示雪量越多。

2 模型验证

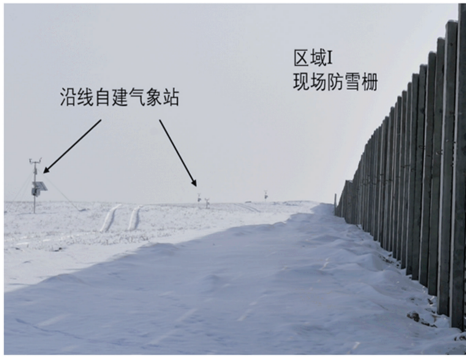
为验证数值模拟结果的合理性,在新建铁路试验段设置气象站和防雪栅,在降雪后对试验段进行雪深测量,并与数值模拟计算结果进行比较。

2.1 工程背景

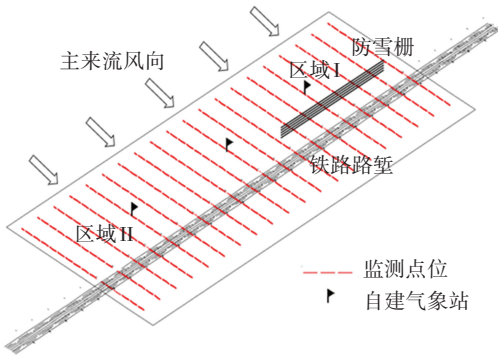
本段以新建阿勒泰—富蕴铁路为研究对象,线路全长 154.5 km,所经区域地势平坦开阔,沿线植被主要为低矮杂草,山坡相对平缓,有发达的丘陵平原。该地区气候干燥,区域内历史最大瞬时风速达到 22.1 m/s,最大雪深 940 mm,是新疆雪灾较严重的地区之一。根据全线调查和前期自建气象站的风场监测数据,选择某来流风向垂直于线路,并出现风吹雪现象的区域作为试验段,试验段全长 400 m,分成两段长度相等的区域 I 和区域 II,其中区域 I 线路外预设防雪栅,防雪栅孔隙率 20%,高度 3 m,与路堑距离 40 m;区域 II 无防雪栅。试验段沿线路堑深度在 0.8~1.2 m 之间,路基两侧积雪平台宽度为 5 m。试验段防雪栅与雪深测量点位如图 2 所示。

2.2 现场雪深分布

2018 年 12 月 16 日至 17 日自然降雪后,2018 年 12 月 18 日使用精度为 1 mm 的钢尺对试验段内积雪分布进行测量。图 3 为试验段内雪深测量结果等高线图。由图 3 可以看出区域 I 雪粒在栅两侧形成堆积,栅两侧雪深最大值为 430 mm,在远离防雪栅区域雪深逐渐减小;区域 II 路堑外雪深波动较小,整体分布较为平均。试验段区域自然降雪深度为 135 mm,区域 I 路堑外平均雪深为 215 mm,区域 II 路堑外平均雪深为 193 mm,即防雪栅作用下路堑外平均雪深较无防雪栅区域增加了 37.93%;路堑内雪深与路堑外的雪深呈相反的趋势。区域 I 路基顶面平均雪深为 218 mm,区域 II 平均雪深为 231 mm,即防雪栅作用下路基顶面平均雪深较无防雪栅区域减少约 13.61%。



(a) 试验段防雪栅现场照片



(b) 测量点位布置

图2 试验段防雪栅与测量点位示意图

Fig.2 Locations of snow fence and measurement points in test section

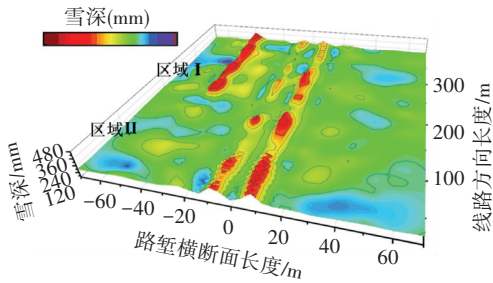


图3 试验段实际测量雪深等高线图

Fig.3 Contour map of measured snow depths in test section

2.3 数值模型验证

本文以无人机航测获得的地形图数据为基础,建立地形分辨率为5 m的模型。计算采用的多相流模型、堆积-侵蚀条件与边界条件均与第1节保持一致。

图4为对试验段铁路路堑内外进行风吹雪数值计算得到的雪粒体积分数等高线图。由图4可以看出,区域I雪粒体积分数平均值为1.032,比区域II高69.96%。路基顶面雪粒体积分数为1.109,防雪栅对路基顶面的雪量减少率为25.93%,计算得到的雪量变化趋势与现场实测结果有较好的一致性。

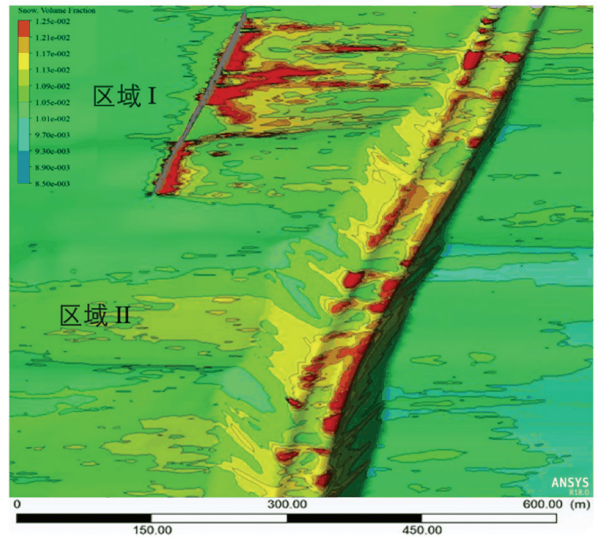


图4 试验段雪粒体积分数等高线图

Fig.4 Contour map of snow volume fraction in test section

3 不同防雪栅结构与布置形式

通常高度过低(小于2 m)的防雪栅难以发挥阻雪作用,高度过大(大于6 m)的防雪栅在大风条件下稳定性存在问题并且造价较高^[10]。结合孔隙率为0的防雪墙和存在孔隙结构的防雪栅,并考虑防雪栅与路堑间的不同布置距离,本文对防雪栅不同结构形式和布置距离对路基内外积雪分布变化的影响进行了分析,计算变量和工况见表1。

表1 计算变量和工况

Tab.1 Calculation variables and cases

工况	孔隙率/%	高度/m	作用距离/m
1	0,25,50,75	5	80
2	50	2,3,4,5	80
3	50	5	20,40,60,80

对各工况的不变量,防雪栅的高度和距离分别选择5 m和80 m,使栅两侧尽可能多地积雪,孔隙率选择中间值50%。试验同时进行了无防雪栅工况的计算。

3.1 孔隙率

图5为不同孔隙率作用下路堑内外沉积雪量。由图5可见,不同孔隙率防雪栅的栅前与栅后积雪分布形态明显不同,也导致了路堑内的雪量差异。孔隙率为0时(无孔隙挡雪墙),栅两侧雪粒体积分数比值最大分别为1.208,出现在栅前;孔隙率为25%、50%、75%时,栅两侧雪粒体积分数比值最大分别为1.173、1.168、1.126,且75%孔隙率时该值出现在栅后,即孔隙率从0增至75%的过程中栅两侧积雪峰值逐渐减小,积雪堆积趋势从栅前向栅后转移。

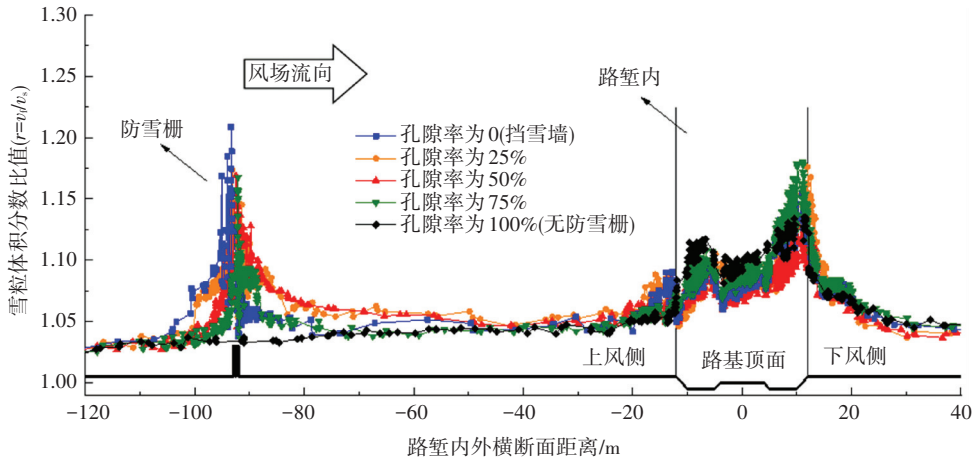


图 5 不同孔隙率作用下路堑内外沉积雪量

Fig.5 Deposited snow amounts inside and outside the cutting under different porosities

利用曲线拟合多项式方程,得到不同工况下路堑外栅前、栅后和栅两侧影响长度内的雪粒体积分数比值的变化的情况。防雪栅孔隙率为 50% 时的计算公式如式(8)~(12)所示,其中防雪栅栅前影响长度按 20 m 计算,多项式方程的曲线拟合度均在 0.9 以上。

$$r_{f50} = 28.316 + 7.65 \times 10^{-2}x + 7.15 \times 10^{-3}x^2 + 2.228 \times 10^{-5}x^3 \quad (8)$$

$$r_{b50} = 0.99 - 5.28 \times 10^{-3}x - 1.32 \times 10^{-4}x^2 - 9.935 \times 10^{-7}x^3 \quad (9)$$

$$\bar{r}_{f50} = \frac{\int r_{f50}}{l_f} = 1.041 \quad (10)$$

$$\bar{r}_{b50} = \frac{\int r_{b50}}{l_b} = 1.053 \quad (11)$$

$$\bar{r}_{50} = \frac{\int r_{f50} + \int r_{b50}}{l_f + l_b} = 1.048 \quad (12)$$

式中: x 为路堑内外横断面距离,以路基顶面中心处为零点,对应图 5 横坐标; r_{f50} 为 50% 孔隙率防雪栅栅前雪粒体积分数比值; l_f 为栅前雪量影响长度,取

值为 20 m; r_{b50} 为 50% 孔隙率防雪栅栅后雪粒体积分数比值; l_b 为栅后雪量影响长度,取值为栅栏到路堑距离; \bar{r}_{f50} 为 50% 孔隙率防雪栅栅前各点位雪粒体积分数比值的平均值; \bar{r}_{b50} 为 50% 孔隙率防雪栅栅后各点位雪粒体积分数比值的平均值; \bar{r}_{50} 为 50% 孔隙率防雪栅两侧各点位雪粒体积分数比值的平均值。

图 6 为不同防雪栅孔隙率作用下不同位置的沉积雪量,其中折线图对应左纵轴,柱状图对应右纵轴。从图 6 中可以看出,栅前雪粒体积分数比值的平均值与孔隙率成反比,说明栅前雪量随着孔隙率的增加而减少,栅后雪粒体积分数比值的平均值先增大后减小,即随着孔隙率的增加栅后雪量先增多后减小。50% 孔隙率防雪栅作用下路堑外雪粒体积分数比值的平均值最大,为 1.049。与无防雪栅工况相比,孔隙率为 0、25%、50%、75% 时,路堑外雪粒体积分数比值的平均值分别增加了 51.45%、74.55%、92.95%、45.50%,即随着孔隙率从 0 增加到 75%,路堑外雪量先增大后减小。

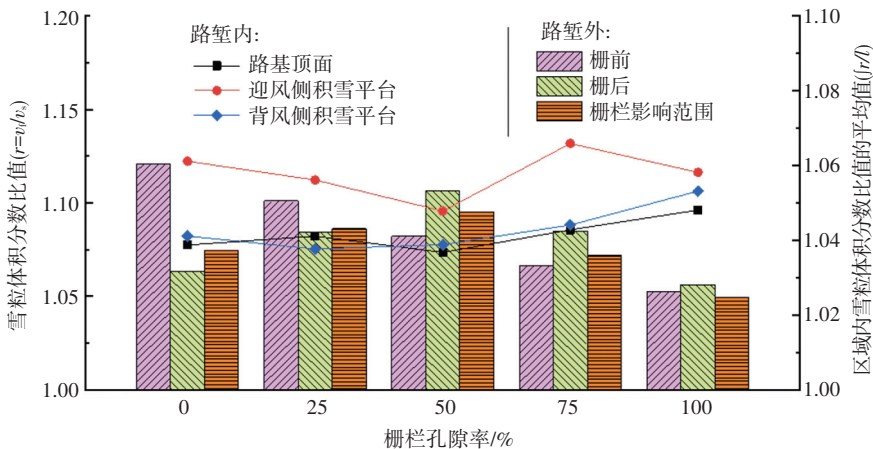


图 6 不同孔隙率作用下不同位置沉积雪量对比

Fig.6 Deposited snow amounts at different locations under different porosities

铁路路堑内积雪变化趋势与路堑外相反。无防雪栅时路基顶面测点的雪粒体积分数比值为 1.096,当孔隙率为 0、25%、50%、75%时,路基顶面雪粒体积分数比值分别为 1.077、1.082、1.073、1.085,雪量减少率分别为 19.44%、14.42%、23.52%、10.98%,即防雪栅孔隙率为 50%时路基顶面雪量最少,防雪栅对路基顶面的雪量减少作用最明显。

3.2 作用距离

防雪栅与路基距离除了影响防雪栅两侧流场和积雪分布外,也涉及占地规划问题,使得该因素成为

防雪栅设计乃至铁路工程初期设计重要的考虑因素之一。

图 7 为防雪栅与路基不同作用距离时沉积雪量。由图 7 可以看出,防雪栅与路基距离变化时栅后的积雪形态和路堑内雪量明显不同。随着防雪栅与路基距离的减小,靠近路堑区域的雪粒体积分数比值越来越大,栅两侧积雪峰值也逐渐增加。当防雪栅和路基相距 20 m 时,路基顶面雪粒体积分数比值沿风向逐渐减小,说明此时路基顶面处于栅后的积雪沉积区,路基顶面雪量甚至大于无防雪栅时的雪量。

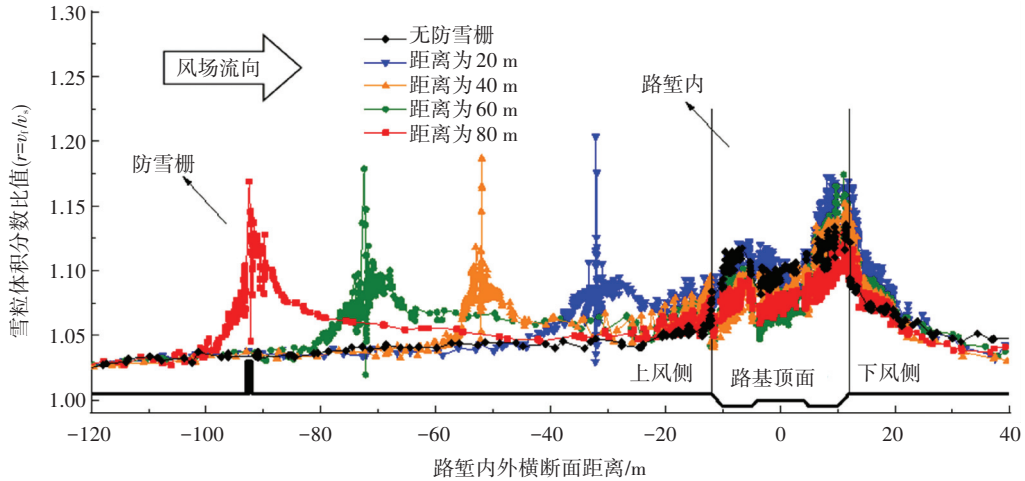


图 7 不同防雪栅作用距离时路堑内外沉积雪量

Fig.7 Deposited snow amounts inside and outside the cutting with different distances of snow fence

图 8 为不同防雪栅与路基间距离作用下不同位置的雪量对比,其中折线图对应左纵轴,柱状图对应右纵轴。从图 8 可以看出,作用距离 60 m 时,路堑外雪粒体积分数比值的平均值达到最大,同时路基顶面测点的雪粒体积分数比值最小,这说明使用

5 m高、孔隙率为 50%的防雪栅对路基顶面的最优防护距离约在 60 m 左右;在作用距离从 80 m 减小到 20 m 过程中,路基顶面雪量减少率先从 23.52% 增大到 24.69%,后减小到 -9.57%,负值说明雪量相对无防雪栅时增加。

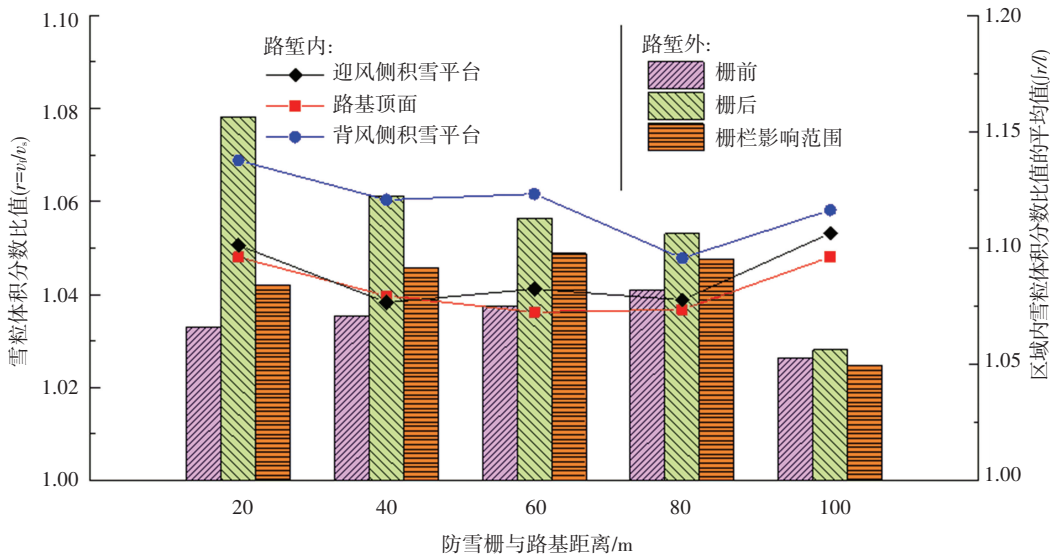


图 8 不同防雪栅作用距离时不同位置雪量对比

Fig.8 Deposited snow amounts at different locations with different distances of snow fence

防雪栅与路基距离较远时防雪栅下风侧积雪沉积区得到充分发展,路堑外雪量增加,但此时防雪栅与路堑距离过远,防雪栅对路堑内雪量影响较弱;随着作用距离的减小,防雪栅对路基顶面雪量的影响逐渐增加,而在过近时路基顶面会处于栅后积雪沉积区,使得路基顶面雪量相对无防雪栅时增大,此时雪量减少率为负值。

3.3 高度

选定防雪栅距离为 80 m,栅栏孔隙率为 50%,

图 9 为不同高度防雪栅作用下的沉积雪量对比。由图 9 可以看出,防雪栅高度为 2、3、4、5 m 时栅两侧的雪粒体积分数比值最大分别为 1.106、1.112、1.120、1.168,随栅高增大而增大,同时防雪栅两侧积雪沉积距离也增大。防雪栅高度为 2 m 时,栅后雪粒沉积长度为 15~20 m;防雪栅高度为 3、4、5 m 时,栅后雪粒沉积长度分别为 20~25 m、30~35 m、40~50 m,即栅后雪粒沉积长度约为防雪栅高度的 10~12 倍。

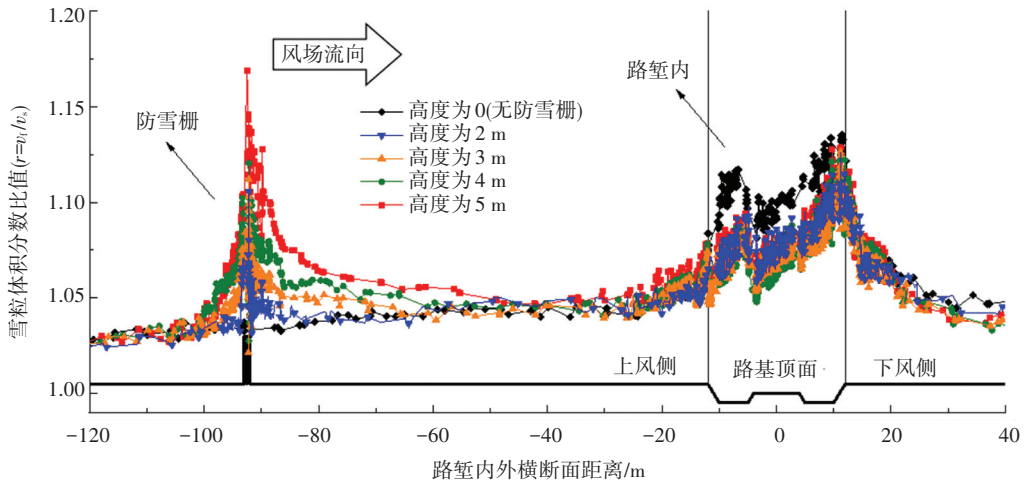


图 9 不同高度时路堑内外沉积雪量

Fig.9 Deposited snow amounts inside and outside the cutting with different heights

表 2 为用相同的多项式拟合方法得到的不同栅高下雪量对比结果。由表 2 可以看出 5 m 高时铁路路堑外雪粒体积分数比值最大达到 1.047,与无防雪栅工况相比,2、3、4、5 m 高度下铁路路堑外雪粒体积分数比值分别增加了 49.92%、70.90%、87.53%和 92.95%。路堑内积雪变化趋势与路堑外积雪变化趋势相反。栅高为 2、3、4、5 m 时,路基顶面的雪量减少率分别为 10.42%、13.54%、19.79%和 23.52%,即防雪栅高度为 5 m 时,路基顶面雪量最少,防雪栅对路基顶面的雪量减少作用最明显。

表 2 不同高度时各位置处雪量对比

Tab.2 Deposited snow amounts at different locations with different heights

位置	雪粒体积分数比值				
	无防雪栅	2 m	3 m	4 m	5 m
栅前	1.026	1.029	1.032	1.037	1.041
栅后	1.028	1.038	1.045	1.049	1.053
路堑外	1.024	1.037	1.042	1.045	1.047
上风侧积雪平台	1.106	1.095	1.090	1.083	1.077
路基顶面	1.096	1.086	1.083	1.077	1.073
下风侧积雪平台	1.116	1.108	1.106	1.100	1.096

4 雪量影响因素正交试验

4.1 正交试验设计

根据上节计算采用的防雪栅孔隙率、高度和布置距离,建立 L16(4³)的正交试验。计算采用的多相流模型、堆积-侵蚀条件与边界均与上节保持一致。计算工况与结果见表 3,路堑外栅栏的影响距离内为区域 1,其中栅前取值为 20 m,栅后取值为防雪栅到路堑的距离;路基顶面为区域 2。

本文采用极差分析方法对影响防雪栅两侧与路基顶面雪量的因素进行分析,孔隙率、高度和作用距离为极差分析的 3 项因素。在极差分析中, K_{jm} 为第 j 列因素第 m 水平所对应的试验目标的和, \bar{K}_{jm} 为 K_{jm} 的平均值,极差 R 如式(13)所示,即某列因素各水平下的目标值的最大值与最小值的差,极差 R 越大说明该因素对实验目标越敏感,影响越剧烈,根据极差 R 的大小,可以判断影响因素的主次。

$$R = \max(\bar{K}_{j1}, \bar{K}_{j2}, \dots, \bar{K}_{jm}) - \min(\bar{K}_{j1}, \bar{K}_{j2}, \dots, \bar{K}_{jm}) \tag{13}$$

表 3 计算条件与计算结果

Tab.3 Calculation conditions and obtained results

试验 编号	孔隙率/ %	高度/ m	作用距离/ m	雪粒体积分数比值	
				区域 1	区域 2
1	0	2	20	1.031 71	1.091 89
2	0	3	40	1.034 25	1.088 47
3	0	4	60	1.041 25	1.085 63
4	0	5	80	1.047 89	1.081 37
5	25	2	40	1.030 38	1.081 95
6	25	3	20	1.038 91	1.082 12
7	25	4	80	1.041 82	1.091 54
8	25	5	60	1.049 51	1.092 38
9	50	2	60	1.031 63	1.087 54
10	50	3	80	1.042 64	1.075 52
11	50	4	20	1.051 29	1.070 87
12	50	5	40	1.044 78	1.102 32
13	75	2	80	1.031 29	1.103 91
14	75	3	60	1.036 34	1.093 24
15	75	4	40	1.042 59	1.087 78
16	75	5	20	1.048 57	1.081 51

4.2 路堑外栅栏影响长度内雪量

表 4 为路堑外栅栏影响长度内(区域 1)雪粒体积分数比值的极差分析,由表 4 算得防雪栅孔隙率、高度和作用距离的极差 R 值分别为 3.81×10^{-3} 、 1.743×10^{-2} 和 3.047×10^{-3} ,即防雪栅高度是影响路堑外积雪沉降量的主要因素,防雪栅的孔隙率和作用距离主要影响防雪栅两侧积雪的分布形态和堆积位置,所以对路堑外整体的雪量影响较小。

表 4 区域 1 雪粒体积分数比值的极差分析

Tab.4 Range analysis of ratio of snow volume fraction in Region 1

水平指标	雪粒体积分数比值		
	孔隙率因素	高度因素	作用距离因素
\bar{K}_1	1.038 77	1.031 25	1.038 66
\bar{K}_2	1.040 15	1.038 03	1.041 58
\bar{K}_3	1.042 58	1.044 23	1.041 71
\bar{K}_4	1.040 69	1.048 68	1.040 25

注:不同因素下水平指标均按数值升序排列。

4.3 路基顶面雪量

表 5 为路基顶面(区域 2)雪粒体积分数比值的极差分析,由表 5 算得防雪栅孔隙率、高度和作用距离的极差 R 值分别为 7.55×10^{-3} 、 7.36×10^{-3} 和 1.36×10^{-3} ,即防雪栅的作用距离是影响路基顶面沉积雪量主要因素。当防雪栅与路基距离过近时,防雪栅对路基顶面的雪量减少率为负值,随着作用距离的

增加,雪量减少率逐渐增加,路基顶面雪量减少,因此作用距离会对路基顶面的雪量产生较明显的影响;栅高和孔隙率主要影响路堑外积雪分布和沉积雪量,并间接改变了路基顶面的雪量。

表 5 区域 2 雪粒体积分数比值的极差分析

Tab.5 Range analysis of ratio of snow volume fraction in Region 2

水平指标	雪粒体积分数比值		
	孔隙率因素	高度因素	作用距离因素
\bar{K}_1	1.086 84	1.091 32	1.094 74
\bar{K}_2	1.086 99	1.084 83	1.088 90
\bar{K}_3	1.084 06	1.083 95	1.081 15
\bar{K}_4	1.091 61	1.089 39	1.084 70

注:不同因素下水平指标均按数值升序排列。

5 结 论

1)铁路路堑外设置的防雪栅可以改变流场分布并影响雪粒运动,使雪粒沉积在防雪栅两侧;当路堑位于防雪栅下风侧时,路堑外沉积雪量增多,路堑内雪量较无防雪栅时减少,可达到风吹雪灾害防治的目的。

2)防雪栅孔隙率主要影响栅两侧积雪分布形态,随着孔隙率的增加,栅两侧的沉积雪量从小范围的剧烈变化向大范围的平缓分布转变,孔隙率为 50%时栅两侧的沉积雪量最大。

3)栅栏高度增加时,防雪栅两侧最大沉积雪量和防雪栅影响范围均增加;当孔隙率为 50%时,防雪栅下风侧积雪沉积区长度约为防雪栅高度的 10~12 倍。

4)影响路堑外沉积雪量的主要因素是防雪栅结构形式,影响路堑内沉积雪量的主要因素是防雪栅作用距离。16 组正交试验中,防雪栅所致路堑外雪量增加 17.14% ~ 79.80%,对路基顶面的雪量最大减少率为 26.17%。

参 考 文 献

[1] 施佳誉,徐冬英,夏才初,等.公路风吹雪阻分布规律及雪灾形成机理研究[J].公路,2020,65(1):257
SHI Jiayu, XU Dongying, XIA Caichu, et al. Research on the distribution law of snow blockage of snow drift on road and the formation mechanism of snow disaster[J]. Highway, 2020, 65(1): 257

[2] 李博.铁路工程风吹雪监测方法研究[J].现代交通技术,2019,16(4):77
LI Bo. Research on monitoring method of snow drifting disaster in railway engineering[J]. Modern Transportation Technology, 2019, 16(4): 77

[3] 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),2006,36(增刊2):152

- 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), 2006, 36(S2): 152
- [4] 郑黎黎, 席建锋, 丁同强, 等. 公路风吹雪流场测定及仿真分析[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2009, 32(2): 260
ZHENG Lili, XI Jianfeng, DING Tongqiang, et al. Flow field observation and simulation of road snow-drift[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2009, 32(2): 260
- [5] 陈凤箴. 防雪栅栏对公路风吹雪灾害的防治技术研究[J]. 内蒙古公路与运输, 2009(1): 1
CHEN Fengzhen. Study on the prevention and control technology of snow barrier to highway wind-blown snow disaster[J]. Highways Transportation in Inner Mongolia, 2009(1): 1
- [6] 吴鹏, 陈发明, 刘健, 等. 基于 Fluent 防雪栅栏数值仿真研究[J]. 交通科技与经济, 2016, 18(6): 57
WU Peng, CHEN Faming, LIU Jian, et al. Research on numerical simulation of snow fence based on Fluent[J]. Technology & Economy in Areas of Communications, 2016, 18(6): 57. DOI: 10.19348/j.cnki.issn1008-5696.2016.06.011
- [7] 吴鹏. 新疆公路风吹雪灾害防治措施的研究[J]. 西部交通科技, 2019(6): 54
WU Peng. Study on prevention measures of snowdrift disasters in Xinjiang highway[J]. Western China Communications Science & Technology, 2019(6): 54. DOI:10.13282/j.cnki.wccst.2019.06.016
- [8] MCCLURE S, KIM J J, LEE S J, et al. Shelter effects of porous multi-scale fractal fences[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2017, 163: 6. DOI:10.1016/j.jweia.2017.01.007
- [9] 杨旭. 玛依塔斯交通走廊风吹雪特点研究[J]. 铁道工程学报, 2018, 35(12): 1
YANG Xu. Research on the characteristics of drifting snow disaster in Xinjiang Mayitas traffic corridor[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018, 35(12): 1
- [10] SAÑUDO-FONTANEDA L A. Classification and comparison of snow fences for the protection of transport infrastructures[J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2011, 25(4): 162. DOI: 10.1061/(ASCE)CR.1943-5495.0000031
- [11] TABLER R, MEENA J. Effects of snow fences on crashes and road closures: a 34-year study on Wyoming Interstate-80[C]// 13th International Conference on Cold Regions Engineering. Orono; American Society of Civil Engineers, 2006. DOI: 10.1061/40836(210)74
- [12] 王廷亮. 铁路风吹雪灾害数值模拟及防治技术研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2009
WANG Tingliang. Study on numerical simulation and prevention measures of the drifting snow disaster along railway[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2009
- [13] 祁延录. 考虑风吹雪灾害的新疆克塔铁路选线研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(11): 2813
QI Yanlu. Strategies of railway alignment selection for Karamay-Tacheng railway in Xinjiang considering snow drifting disasters[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(11): 2813
- [14] 王晓晶, 沈志琦, 满国佳. 液压锥阀气穴现象两相流仿真及实验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(7): 144
WANG Xiaojing, SHEN Zhiqi, MAN Guojia. Simulation and experiment of cavitation phenomenon two-phase flow of hydraulic cone valve[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(7): 144
- [15] TOMINAGA Y, OKAZE T, MOCHIDA A. CFD modeling of snowdrift around a building: an overview of models and evaluation of a new approach[J]. Building & Environment, 2011, 46(4): 899
- [16] TOMINAGA Y, STATHOPOULOS T. Numerical simulation of dispersion around an isolated cubic building: model evaluation of RANS and LES[J]. Building Environmental, 2010, 45(10): 2231
- [17] ZHOU X, ZHANG Y, KANG L, et al. CFD simulation of snow redistribution on gable roofs: impact of roof slope[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2019, 185: 16
- [18] 桑嘉宾. 混合粒径风雪流运动的数值模拟[D]. 兰州: 兰州大学, 2012
SANG Jiabin. Numerical simulations of blowing snow with mixed diameter[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2012
- [19] 铁路线路设计规范: TB 10098—2017[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017
Code for railway line design: TB 10098—2017[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017
- [20] YAN K, CHENG T, ZHANG Y. A new method in measuring the velocity profile surrounding a fence structure considering snow effects[J]. Measurement, 2018, 116: 373. DOI:10.1016/j.measurement.2017.11.032

(编辑 魏希柱)