

透风率及积雪形态对防雪栅防护效果的影响*

刘庆宽^{1,2,3}, 李海飞³, 贾娅娅^{1,2,3}, 孙元春⁴, 高岭⁵

(1. 石家庄铁道大学省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室 石家庄, 050043)

(2. 河北省风工程和风能利用工程技术创新中心 石家庄, 050043)

(3. 石家庄铁道大学土木工程学院 石家庄, 050043)

(4. 中国铁路设计集团有限公司 天津, 300251)

(5. 河北省交通规划设计院 石家庄, 050011)

摘要 针对道路风吹雪灾害的工程防雪措施,采用数值模拟与现场实测相结合的方法,系统研究防雪栅透风率和不同阶段积雪形态对防雪栅周边流场的影响特性,分析不同阶段积雪的形成机理,得到防雪栅周边积雪的演化规律。结果表明:随着防雪栅透风率的增加,防雪栅背风侧低速区以及旋涡范围逐渐缩小,雪颗粒堆积的速度变慢,对于不同透风率的防雪栅,积雪均最先在其背风侧 $5H\sim 9H$ 范围内发生沉积(H 为防雪栅高度),并逐渐向两侧延伸;防雪栅底部间隙使得气流在防雪栅底部被加速,雪颗粒不易沉积,有效延长了防雪栅被积雪掩埋的时间;防雪栅两侧 $-2.5H\sim 18H$ 范围雪颗粒均会发生沉积,随着积雪厚度的不断增加,积雪的增长速率逐渐趋缓。

关键词 防雪栅;风吹雪灾害;现场实测;积雪形态;透风率

中图分类号 U418.5;U212.34

引言

风吹雪又称风雪流,是地面积雪或降雪在风的作用下随风而行,并在障碍物附近发生沉积的一种自然现象。风雪流在经过道路等障碍物时,地形局部变化使得贴地气层产生分离,形成涡旋阻力,使风速急剧减小,雪颗粒大量堆积,引发道路风吹雪灾害。风吹雪灾害不仅会导致视程障碍,还会引起严重的道路积雪^[1]。防雪栅作为一种常见的工程防雪措施,可以通过改变其参数及布置方式以适应不同的环境,被广泛应用于道路风吹雪灾害的防治中。

防雪栅防雪效果的研究可分为风洞试验、数值模拟和现场实测 3 种方法。文献[2-5]采用风洞试验方法研究了防雪栅附近的积雪分布形态,考虑了不同参数的防雪栅以及不同相似参数对试验结果的影响,对防雪栅背风侧的积雪分布形态进行了定量分析。文献[6-7]运用单相流数值的方法,研究了不同参数防雪栅对路基附近流场分布的影响,并根据风速减弱区以及旋涡分布等情况定性分析了积雪分布形态。文献[8-10]在输运方程中同时考虑了跃移

和悬移 2 种雪颗粒运动形式,采用数值模拟方法对防雪栅或导风板等周边的流场和积雪分布进行了研究,模拟了单/双排栅栏周边的积雪演化过程以及流场变化。Liu 等^[11]模拟了不同参数防雪栅周边的流场分布,采用 2 种不同的准则评估了防雪栅前后的侵蚀和堆积现象。苏国平等^[12]研究了挡雪墙高度、风速对挡雪墙背风侧风雪两相流的运动特性及积雪分布形态的影响。文献[13-14]提出了能够描述障碍物背风侧积雪分布形式和高度的方程。文献[15-16]进行了有关防雪栅的现场实测,研究了防雪栅周边积雪的形成机制、流场变化以及阻雪能力,定量分析了防雪栅前后的平衡积雪分布与防雪栅参数的关系。

上述研究主要对不同参数防雪栅周边流场和积雪分布进行了定性或定量分析,评估了防雪栅的阻雪能力,但缺少对积雪形成过程和各个阶段堆积机理的研究。针对此问题,笔者采用基于计算流体力学(computational fluid dynamics,简称 CFD)数值模拟的方法,根据不同透风率防雪栅周边流场的流场分布分析积雪分布形式,并结合实测得到的防雪栅积雪演化过程,对不同阶段的积雪形成机理进行

* 国家自然科学基金资助项目(51778381);河北省自然科学基金资助项目(E2018210044, E2021210110);河北省高层次人才资助项目(冀办[2019]63号);河北省研究生创新资助项目(CXZZSS2020065);石家庄铁道大学研究生创新资助项目(YC2020016)

收稿日期:2020-11-25;修回日期:2021-11-17

分析,得到防雪栅周边的积雪演化规律,为实际工程中防雪栅的设置提供参考。

1 模型及参数设置

1.1 数值计算方法

为了研究透风率变化对防雪栅周边流场的影响,计算模型选取 0%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80% 这 8 种透风率的二维横板式防雪栅模型。防雪栅及其防雪范围如图 1 所示,其中红色圈内为防雪栅所在位置,由于现场测试选取防雪栅缩尺模型,为了对数值计算结果与实测结果进行更好的对比分析,数值计算模型尺寸与现场实测模型一致,防雪栅高度 $H=150\text{ mm}$ 。为了防止防雪栅被积雪掩埋,防雪栅底部间隙设置约为防雪栅高度的 10%~15%^[3],本模型取为 15 mm。计算域与边界条件如图 2 所示,采用结构网格进行划分。为了使防雪栅周边及地面附近的结果更加准确,对地面及防雪栅附近的网格进行加密,防雪栅的局部网格如图 3 所示。

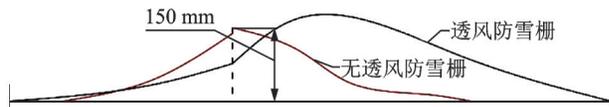


图 1 防雪栅及防雪范围示意图

Fig.1 Schematic of snow-fence and range of snow-proof

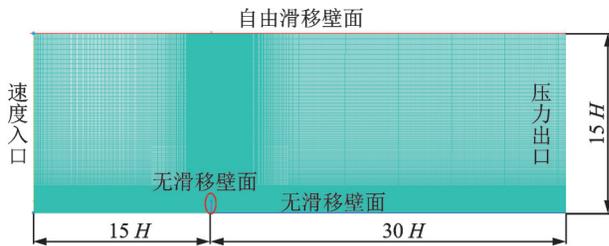


图 2 网格及边界条件示意图

Fig.2 Schematic of mesh and boundary condition

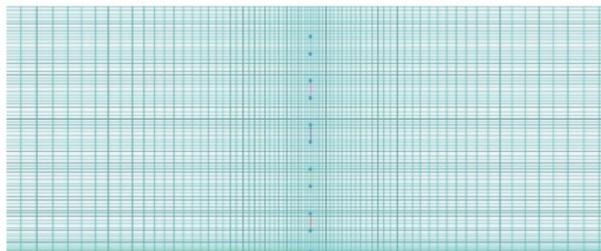


图 3 防雪栅局部网格

Fig.3 Local mesh of snow-fence

数值计算采用 Fluent 软件,根据风雪流参数特征,选择标准 $k-\epsilon$ 湍流模型^[5]。选择 SIMPLEC 算法进行求

解,为了保证计算的精度,残差设置为 10^{-6} 。计算域边界条件见图 1,入口边界条件为速度入口,风速剖面、湍动能以及湍流耗散率采用自定义函数(user defined function,简称 UDF)输入,风剖面采用的指数率为

$$U_z = U_2(z/2)^{0.15} \quad (1)$$

其中: U_z 为高度 z 处的风速; U_2 为 2 m 高度处风速,通过现场实测得到其大小为 10 m/s;0.15 表示 B 类地貌的地面粗糙度指数。

入口的湍动能和湍动能耗散率公式分别为

$$k(z) = \frac{3}{2} [U_z I_u(z)]^2 \quad (2)$$

$$\epsilon(z) = C_u^{3/4} \frac{k(z)^{3/2}}{Kz} \quad (3)$$

其中: $k(z)$ 为高度 z 处的湍动能; $\epsilon(z)$ 为高度 z 处的湍动能耗散率; C_u 为模型常数,大小为 0.09; K 为冯卡门常数,大小为 0.42; $I_u(z)$ 为高度 z 处的湍流度。

$I_u(z)$ 表达式为

$$I_u(z) = I_{10} \left(\frac{z}{10/15} \right)^{-\alpha} \quad (4)$$

其中:B 类地貌下的 I_{10} 值为 0.14; α 为 0.15。

出口边界条件为压力出口,由于大气边界层流场内存在剪应力作用,上部边界采用自由滑移壁面^[17],下边界及模型表面采用无滑移壁面。

为了研究不同阶段积雪堆积形态对下一阶段积雪特性的影响,选取阻雪效果相对较好的透风率为 60% 的防雪栅模型进行研究。根据实测得到的不同时刻的积雪堆积形态,将前一阶段积雪堆积形态作为模型的一部分研究其流场分布。计算域及模型尺寸见图 4,由于模型中包括积雪,计算域尺寸大于上述单防雪栅工况,边界条件与单防雪栅工况一致。

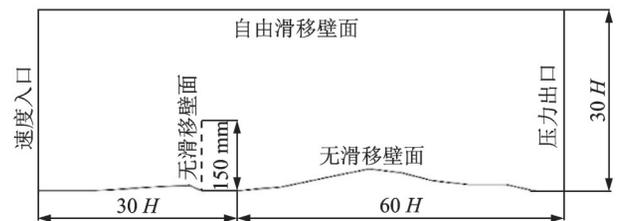


图 4 计算域及模型尺寸示意图

Fig.4 Schematic of size of computational domain and snow-fence model

1.2 现场实测方法

为了获得不同阶段的积雪形态,为数值计算提供初始数据,同时验证数值计算结果的准确性,进行

了防雪栅积雪形态的现场实测研究。实测的场地平坦开阔(B类地貌),雪源风力充足,能够形成较为稳定的风雪流,满足开展风吹雪试验的条件。现场模型安装如图 5 所示,模型高为 150 mm,透风率为 60%,总长度为 3 m。防雪栅试验模型采用工程塑料板制作,为了提高模型的稳定性,采用 L 型钢将模型固定在木板上。为了减弱端部效应对试验结果的影响,模型的两端设置补偿模型,其中试验段长度为 1 m,测量防雪栅中轴线上的积雪分布。试验过程中,间隔一定的时间对积雪进行拍照,积雪厚度通过安装在木板上的钢钎读出。试验场地的风速通过风速风向仪采集记录,现场风速风向仪安装如图 6 所示。

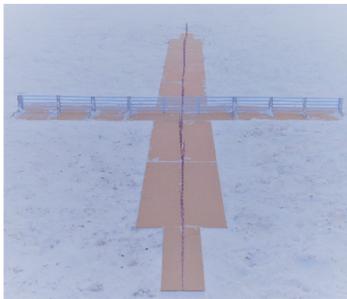


图 5 现场模型安装图

Fig.5 The installation of model in the field



图 6 现场风速风向仪安装

Fig.6 The installation of anemometer in the field

2 计算结果分析

2.1 透风率对防雪栅周边流场的影响

数值计算得到透风率分别为 0%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60, 70% 及 80% 时,防雪栅周边风场分布如图 7 所示,图中右上角为防雪栅横板处的局部云图。为了便于分析,将 x, y 分别除以 H 进行无量纲化,其中: x 为沿水平方向的坐标; y 为沿竖直方向

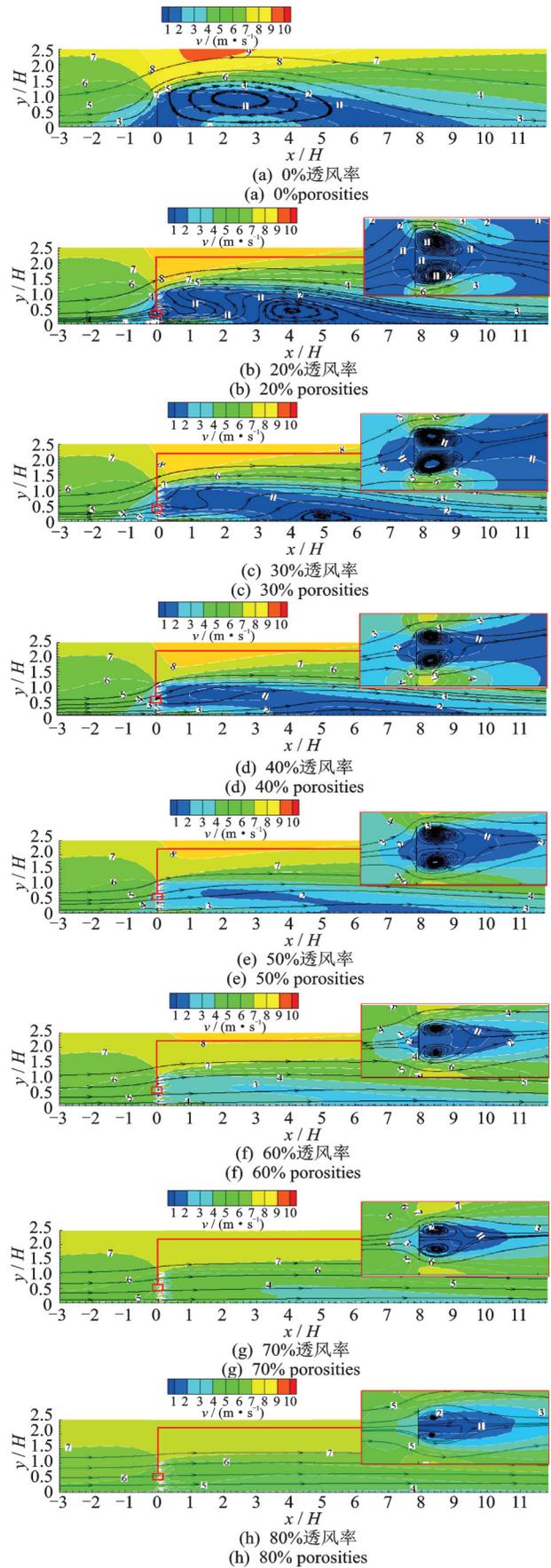


图 7 不同透风率防雪栅周边风场分布

Fig.7 The distribution of wind field around snow-fence in different porosities

的坐标; H 为防雪栅高度。由图7可得:随着透风率的增加,防雪栅背风侧风速小于 3 m/s 的减速区范围呈逐渐减小的趋势,其中透风率 0% 、 20% 和 30% 变化较小, $40\%\sim 80\%$ 变化较为明显;在迎风侧,随着透风率的增加,减速区的变化规律与背风侧相似;整体的流场随透风率的增大趋于平缓,使得雪颗粒堆积的速度变慢,这是由于随着透风率的增加,防雪栅对气流的干扰作用减小,且气流在经过防雪栅横板间隙时受到加速作用,使得气流处于较大风速值,特别是对于 70% 和 80% 透风率工况,其流场受到的干扰最小,流线较为平缓,不利于风雪流中雪颗粒沉积。

对于透风率为 0% 、 20% 和 30% 的防雪栅,其背风侧均存在明显的旋涡,且旋涡为顺时针方向,因此雪颗粒最先在旋涡前侧发生堆积。其中:透风率为 0% 的防雪栅,其背风侧贴近地面处风速向下游呈先增大后减小再增大的趋势,存在较大的旋涡,并且在旋涡的两侧存在风速极小值,对气流的减弱作用最为明显;与透风率为 0% 的防雪栅相比,透风率为 20% 和 30% 的防雪栅背风侧旋涡范围减小,且出现的位置逐渐靠后;当防雪栅透风率为 $40\%\sim 80\%$ 时,背风侧没有明显的旋涡,流线较为平缓。此外,由于底部间隙的存在,使得气流在防雪栅底部被加速,因此在靠近防雪栅背风侧处雪颗粒不易发生堆积。随着透风率的增加,防雪栅附近的低速区域逐渐减小,使雪颗粒最先在下游一定范围内发生沉积。从图中可以看出,几种透风率防雪栅在背风侧 $5H\sim 9H$ 之间风速存在极小值,因此雪颗粒可能最先在此处发生沉积,并逐渐向积雪两侧延伸。

由防雪栅横板附近局部云图可得,横板后风速的减弱较为明显,有旋涡形成。随着透风率的增加,其旋涡区域逐渐减小,风速小于 3 m/s 的区域逐渐收缩,脱离风雪流的雪颗粒将逐渐减少。当防雪栅透风率较小时,横板的宽度较大,其尾流区较大,尾流效应更加明显,使得风雪流在流经横板时,雪颗粒由于速度降低脱离风雪流,由于间隙对气流的加速作用,会被吹到下游低速区域中率先沉积,形成积雪。

阈值壁面摩擦风速 u_* 为判断雪颗粒是否发生运动的特征量,当壁面摩擦风速 u_* 大于壁面阈值摩擦风速时,雪颗粒开始运动,反之则不发生运动。为了进一步判断雪颗粒的沉积位置,提取地面处的壁面摩擦风速 u_* 进行分析。 u_* 计算公式为

$$u_* = \sqrt{\tau/\rho} \quad (5)$$

其中: τ 为壁面剪切力; ρ 为空气密度,取 1.225 kg/m^3 。

根据Kind^[18]的研究: -2.5°C 下的新鲜疏松的干燥雪,阈值壁面摩擦风速 $u_* = 0.15\text{ m/s}$; 0°C 的自然降雪,阈值壁面摩擦风速 $u_* = 0.25\text{ m/s}$; 0°C 下降落几小时的雪,阈值壁面摩擦风速 $u_* = 0.40\text{ m/s}$ 。

图8为不同透风率工况下地面处的壁面摩擦风速,其中3条黑色横线为文献[18]中的3个阈值壁面摩擦风速。由图可以看出,透风率为 0% 、 20% 和 30% 时,其防雪栅背风侧壁面摩擦风速为先减小后增大再减小的倒“U”型曲线,且位置与前述云图中旋涡出现的位置相一致,壁面摩擦风速在旋涡的两侧存在极小值,导致雪颗粒在旋涡前后两侧发生沉积。对于 0% 、 20% 和 30% 透风率的防雪栅,壁面摩擦风速第1个极小值分别在防雪栅底部、 $3H$ 和 $4H$ 附近,第2个极小值在背风侧 $6H\sim 7H$ 附近。结合图7(b,c)旋涡的方向,雪颗粒最先在旋涡前侧极小值处发生沉积。对于 $40\%\sim 80\%$ 透风率的防雪栅,由于防雪栅背风侧无明显的旋涡存在,其壁面摩擦风速曲线较为平缓,呈现出先减小后增大的趋势,极小值出现在 $5H\sim 9H$ 之间。

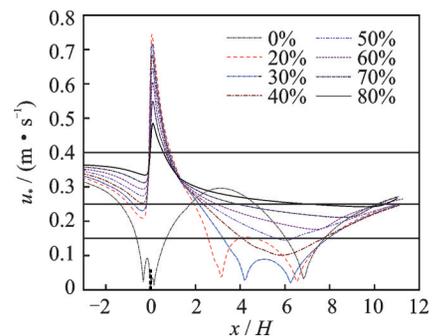


图8 不同透风率壁面摩擦速度
Fig.8 Wall friction velocity in different porosity

随着透风率的增加,防雪栅背风侧 $1H$ 后壁面摩擦风速逐渐增加,壁面摩擦风速极小值的位置向下游移动,与前述云图中对应的低速区位置以及背风侧风速随透风率的变化趋势基本相同,积雪将最先在壁面摩擦风速极小值出现的位置发生堆积。对于 -2.5°C 下的新鲜疏松的干燥雪,阈值壁面摩擦风速 $u_* = 0.15\text{ m/s}$,雪颗粒仅在透风率小于 50% 的防雪栅背风侧 $3H\sim 8H$ 范围内发生沉积;对于 0°C 的自然降雪,阈值壁面摩擦风速 $u_* = 0.25\text{ m/s}$,除 80% 透风率防雪栅工况外,其余透风率防雪栅背风侧均会发生雪颗粒沉积; 0°C 下降落几小时的雪,阈值壁面摩擦风速取 $u_* = 0.40\text{ m/s}$,雪颗粒在各个透风率工况下防雪栅两侧均会发生沉积。

综上所述,随着透风率的增加,背风侧的旋涡范围逐渐减小直至消失,风速小于3 m/s的区域逐渐减小,积雪堆积的速率逐渐变慢,雪颗粒最先在防雪栅背风侧5H~9H之间堆积,并逐渐向积雪的两侧延伸。

2.2 防雪栅积雪演化过程

为了进一步研究防雪栅附近积雪的堆积过程,分析不同时刻积雪的堆积机理,将现场实测得到的积雪形态加入数值计算模型,选取防雪效果较好的60%透风率防雪栅进行分析。图9为不同时刻防雪栅周边的风场和积雪分布,其中风速云图为前一时间刻,积雪堆积形态为后一时间刻,将两者结合起来分析积雪的形成过程。

如图9(a)所示,在初始时刻,防雪栅周边无积雪,根据图7(f)和图8中风速云图及壁面摩擦阻风速值,雪颗粒首先在低速区5H~6H附近开始堆积,并逐渐向积雪左右两侧延伸,与30 min积雪形态图相符,其积雪厚度最大值出现在5H处,向两侧逐渐减小,且由于底部间隙的存在,靠近防雪栅底部附近无积雪。对于防雪栅迎风侧,由于透风率较大且风速较高,积雪沉积较少。

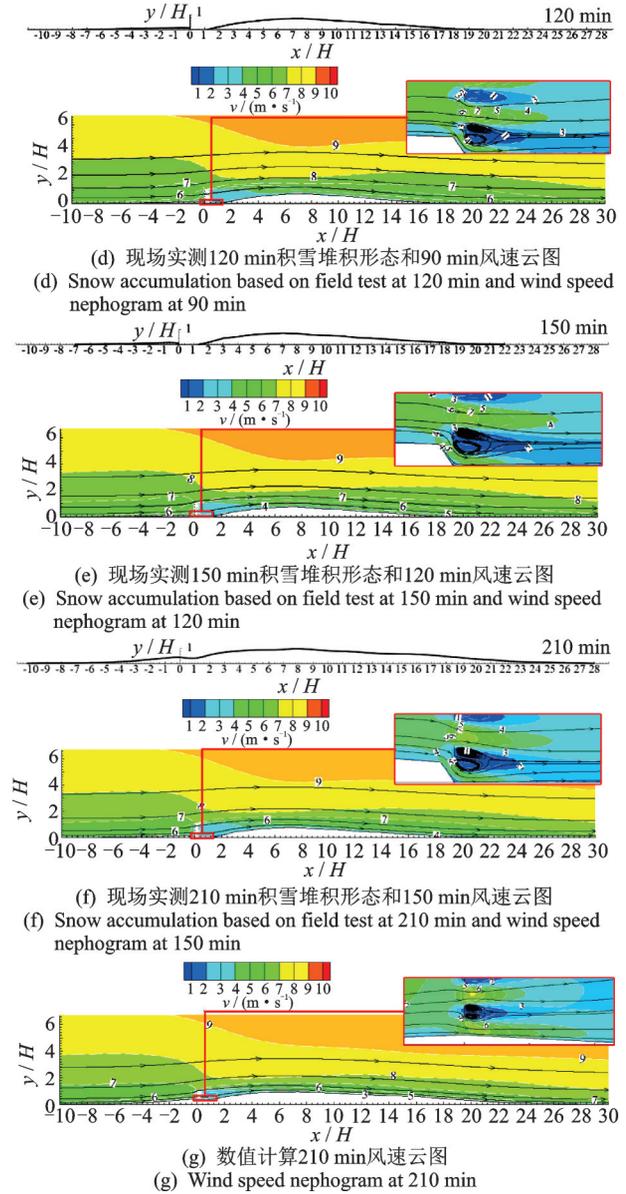
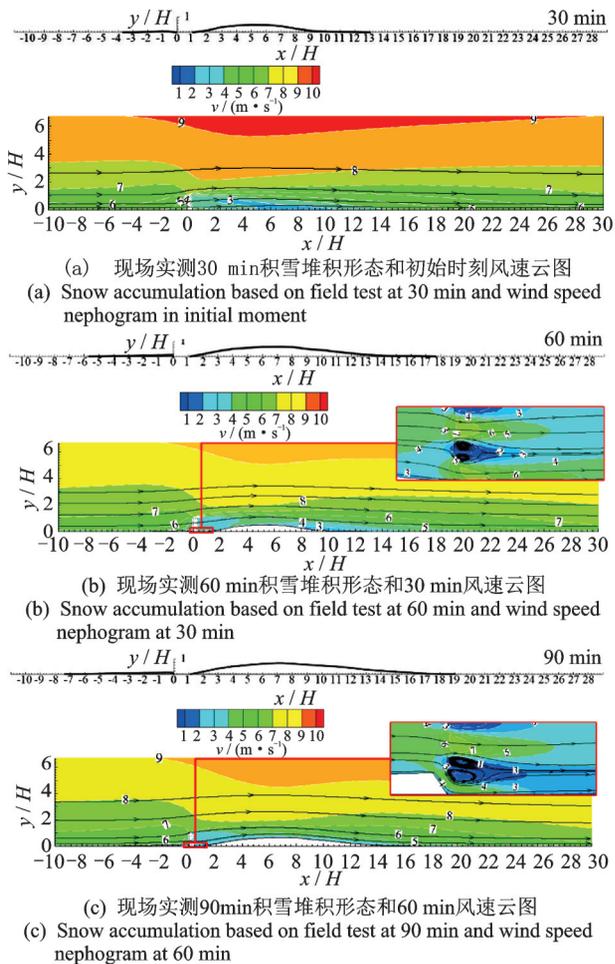


图9 不同时刻防雪栅周边风场及积雪分布

Fig.9 The distribution of wind field and snow cover around snow-fence in different time

图9(b)为数值计算30 min的风场分布与现场实测60 min积雪形态的对比,由于积雪对气流的阻碍作用,使得风速极小值出现在防雪栅背风侧积雪模型上、下游附近。相对于单防雪栅工况,其风速极小值的位置向积雪前后两侧发生移动,其中积雪模型上游附近由于底部间隙对风速的加速作用,风速减弱区的范围较小,积雪模型下游出现的风速减弱区范围较大。积雪在延伸过程中,积雪模型下游积雪的堆积速度较快,最大厚度出现在7H~8H附近,并在一段时间内(60~210 min)未发生改变;由于底部间隙的存在,积雪模型上游积雪向防雪栅底部的延伸速度较慢,使得防雪栅在一定时间内不被积雪

掩埋,有效减缓了防雪栅被积雪掩埋的速度。

如图9(c)~(e)所示,随着积雪的进一步发展,防雪栅背风侧积雪向两侧延伸,但在接近防雪栅时,由于防雪栅底部的风速较大,使得积雪不易向防雪栅底部发生堆积,而积雪模型前端积雪的厚度增加较快,因此90~150 min背风侧积雪向防雪栅方向延伸缓慢,甚至出现减退的现象;积雪向下游的延伸速度较快,但在积雪模型后端其积雪厚度增加较慢。此外,防雪栅迎风侧积雪也在不断堆积,且逐渐向防雪栅发展,在靠近防雪栅处,其厚度达到底部间隙高度。

如图9(f)~(g)所示,随着时间的推移,由于防雪栅迎风侧与背风侧积雪逐渐向防雪栅靠近,积雪厚度不断增加,使得防雪栅底部处在两侧积雪的凹陷处,雪颗粒不断在此处发生沉积,最终将底部间隙掩埋。

为了进一步对雪颗粒的沉积位置进行分析,提取不同时刻壁面摩阻风速,如图10所示,其中曲线极值处是由于积雪轮廓折线交点导致的应力集中所致,不影响整体分析。由图可以看出:在初始时刻,壁面摩阻风速在背风侧 $7H$ 附近出现极小值,与单防雪栅工况中计算得到的初始时刻壁面摩阻风速极小值位置 $5H\sim 6H$ 较为接近;30 min时,极小值出现的位置后移,与积雪的发展趋势相符;在接下来的几个阶段,由于防雪栅下游附近积雪的影响,壁面摩阻风速极小值出现在靠近防雪栅处,位于积雪的首部位置。从整体上来看,防雪栅两侧 $-2.5H\sim 18H$ 范围内均有雪颗粒发生沉积,对于最后一个阶段,由于厚度较高,所对应的风速值相对较大,积雪的堆积速度逐渐变慢。

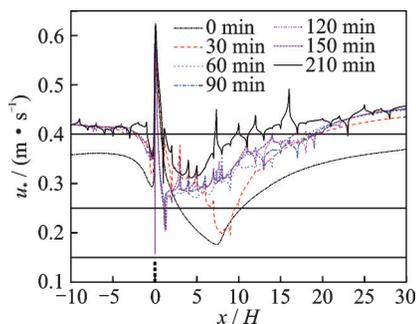


图10 不同时刻壁面摩阻风速

Fig.10 Wall friction velocity in different time

3 结论

1) 对于单防雪栅工况,随着防雪栅透风率的增加,防雪栅背风侧风速小于3 m/s减弱区的范围逐渐减小,背风侧风速值逐渐增大,使得雪颗粒堆积的

速度变慢。当防雪栅透风率小于30%时,其背风侧存在明显顺时针方向旋涡,雪颗粒最先在旋涡前侧发生堆积;当防雪栅透风率为40%~80%时,在背风侧没有明显的旋涡,流线较为平缓,特别是70%和80%这2种透风率,不利于雪颗粒的沉积。对于不同透风率的防雪栅,壁面摩阻风速基本均在背风侧 $5H\sim 9H$ 之间出现极小值,因此雪颗粒可能最先在此范围内发生沉积,并逐渐向积雪两侧延伸。

2) 防雪栅底部间隙使得气流在防雪栅底部被加速,因此在靠近防雪栅背风侧处雪颗粒不易发生堆积,而在下游一定范围内开始发生沉积,有效延长了防雪栅从开始阻雪到被积雪掩埋的时间。

3) 将现场实测得到的积雪形态加入数值计算模型,进一步得到了防雪栅附近积雪的堆积过程。积雪首先在防雪栅背风侧 $5H\sim 6H$ 范围内开始堆积,最大厚度出现在 $7H\sim 8H$ 范围内。由于积雪的存在,背风侧风速极小值出现在已有积雪的前端和后端,前端由于底部间隙的存在,向防雪栅延伸的速度较慢,但厚度增加较快;后端积雪向下游延伸较快,但厚度增加较慢。防雪栅两侧 $-2.5H\sim 18H$ 之间雪颗粒均会发生沉积,随着积雪厚度的不断增加,积雪的增长速率逐渐趋缓。随着时间的推移,积雪逐渐向防雪栅靠近,且厚度不断增加,使得雪颗粒在防雪栅底部发生沉积,最终防雪栅会被积雪掩埋。

参 考 文 献

- [1] 陈晓光,李俊超,李长林,等. 风吹雪对公路交通的危害及其对策研讨[J]. 公路, 2001, 6(6): 113-118.
CHEN Xiaoguang, LI Junchao, LI Changlin, et al. Research on the harm of wind blowing snow to highway traffic and its countermeasures [J]. Highway, 2001, 6(6):113-118.(in Chinese)
- [2] ANNO Y. Requirements for modeling a snowdrift[J]. Cold Regions Science & Technology, 1984, 8(3): 241-252.
- [3] 赵国平,左合君,张洪江,等. 挡雪墙阻雪效果风洞模拟试验研究[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(4): 107-112.
ZHAO Guoping, ZUO Hejun, ZHANG Hongjiang, et al. Wind-tunnel simulation test on snow prevention effect of snow wall[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(4):107-112. (in Chinese)
- [4] YAN K Q, CHENG T, ZHANG Y. A new method in measuring the velocity profile surrounding a fence structure considering snow effects[J]. Measurement, 2018, 116(11):373-381.

- [5] 李鹏翔. 阿富准铁路风吹雪灾害形成机理与防治技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- [6] 应成亮, 李江, 张霞, 等. 防雪栅设计高度的数值仿真研究[J]. 长春理工大学学报, 2006, 29(3): 54-57.
YING Chengliang, LI Jiang, ZHANG Xia, et al. Numerical simulation of design height of snow-fence[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2006, 29(3): 54-57. (in Chinese)
- [7] 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, 2009, 32(2): 260-263.
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, 2009, 32(2): 260-263. (in Chinese)
- [8] SATO T, UEMATSU T, NAKATA T, et al. Three dimensional numerical simulation of snowdrift[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1993(46/47): 741-746.
- [9] SUNDSB P A. Numerical simulations of wind deflection fins to control snow accumulation in building steps[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998(74/75/76): 543-552.
- [10] ALHAJRAF S. Computational fluid dynamic modeling of drifting particles at porous fences[J]. Environmental Modelling & Software, 2004, 19(2): 163-170.
- [11] LIU D T, LI Y L, WANG B, et al. Mechanism and effects of snow accumulations and controls by lightweight snow fences[J]. Journal of Modern Transportation, 2016, 24(4): 261-269.
- [12] 苏国平, 蒋富强. 铁路路堑挡雪墙设计参数优化数值模拟[J]. 铁道标准设计, 2017, 61(2): 38-43.
SU Guoping, JIANG Fuqiang. Numerical simulation of design parameters of snow wall in railway cutting[J]. Railway Standard Design, 2017, 61(2): 38-43. (in Chinese)
- [13] OHARA N. An Eulerian equation for snow accumulation downstream of an object[J]. Water Resources Research, 2017, 53(2): 1525-1538.
- [14] KINAR N J. Modeling blowing snow accumulation downwind of an obstruction: the Ohara Eulerian particle distribution equation[J]. Water Resources Research, 2017, 53(5): 3557-3564.
- [15] TABLER R D. Geometry and density of drifts formed by snow fences[J]. Journal of Glaciology, 1980, 26(94): 405-419.
- [16] TAKEUCHI M. Snow-collection mechanisms and the capacities of snow fences[J]. Annals of Glaciology, 1989(13): 248-251.
- [17] 孙芳锦, 张大明, 殷志祥. 大跨度膜屋面风致雪压的数值模拟研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2010, 31(1): 44-47, 51.
SUN Jinfang, ZHANG Daming, YIN Zhixiang. Study on numerical simulation of wind-induced wind pressure on long-span membrane roofs[J]. Journal of Zhengzhou University(Engineering Science), 2010, 31(1): 44-47, 51. (in Chinese)
- [18] KIND R J. Mechanics of aeolian transport of snow and sand[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1990, 36: 855-866.



第一作者简介:刘庆宽,男,1971年1月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为桥梁与结构的风荷载、风致振动与控制等。曾发表《微椭圆截面斜拉索风致振动特性与机理》(《中国公路学报》2019年第32卷第10期)等论文。
E-mail: lqk@stdu.edu.cn

通信作者简介:贾娅娅,女,1987年9月生,博士、讲师。主要研究方向为建筑结构气动特性等。
E-mail: jia_jyy@126.com