

# 基于 Fluent 的公路挡雪墙作用机制与设置方式研究

罗 冰

武汉市汉阳市政建设集团有限公司 湖北武汉 430050

**摘要:** 挡雪墙是应对公路风吹雪灾害的主要防治设施,采用 ANSYA Fluent 软件数值模拟的方法,研究风雪流经过路堑时流场变化规律,以及挡雪墙与路堑设置间距对路堑周围流场的影响规律,从而分析挡雪墙的作用机制与最优设置方式。结果表明:路堑对风雪流起减速效果,路堑内部形成局部漩涡流,易出现积雪;挡雪墙背风侧风速出现分层,在近地面形成的漩涡减速区内部与上部风速差值达 22.5m/s,有利于雪粒的沉积;挡雪墙与路堑设置间距为 15 倍墙高时防雪效果最好;路堑的两侧坡脚最易出现积雪。

**关键词:** 公路工程;挡雪墙;数值模拟;流场变化规律;最优设置方式

## Research on the action mechanism and setting mode of highway snow retaining wall based on Fluent

Bing Luo

WUHAN HANYANG MUNICIPAL CONSTRUCTION GROUP CO.LTD., Wuhan 430050, Hubei, China

**Abstract:** Snow barriers are the main protective facilities against highway snow drifting disasters. Using ANSYA Fluent software for numerical simulation, this study investigates the flow field variation of wind and snow passing through road cuttings, as well as the influence of the distance between snow barriers and road cuttings on the surrounding flow field. The aim is to analyze the mechanism and optimal placement of snow barriers. The results show that road cuttings have a decelerating effect on wind and snow flow, forming local vortex flow and leading to snow accumulation within the cuttings. On the leeward side of the snow barrier, wind speeds are stratified, with a velocity difference of up to 22.5 m/s between the lower vortex deceleration zone and the upper region, which favors the deposition of snow particles. The best snow protection effect is achieved when the distance between the snow barrier and the road cutting is 15 times the height of the barrier. Snow accumulation is most likely to occur at the foot of the slopes on both sides of the road cuttings.

**Keywords:** Highway engineering; snow wall; Numerical simulation; Change law of flow field; Optimal setting mode

### 引言

风雪流是一种非典型的气-固两相流,在风雪流的吹蚀作用下,积雪深度一般为自然雪的 3~8 倍。当风雪流的运动状态由欠饱和转变为过饱和时,便会开始形成积雪,风积雪发生时会产生视程障碍和道路雪阻,对行人的生命财产安全和交通的正常运输造成严重威胁。因此,解决道路雪阻问题刻不容缓。

### 一、研究概况

#### 1.1 模拟参数设计和工况

应成亮通过野外观测和风洞试验,研究结果表明:不透风式单层挡雪墙高以 2.0m~4m 为宜。挡雪墙高度越高,其挡雪效果越好,但是随着挡雪墙高度的增加,修建挡雪墙所需要的材料费用、运输费用、土方工作量也随之增加,所以此次模拟挡雪墙高度  $h$  取 2.0m。根据《公路路基设计规范》(JTGD30—2015)中相关规定,本次模拟路基宽度  $s=8m$ ,路堑深度  $H=4m$ <sup>[1]</sup>。由李鹏翔等研究表明,采用小

坡度的路基对控制路基表面风吹雪灾害有显著作用,建议路基边坡坡度  $i$  设计取 1:1.5。故而本次模拟路堑边坡坡度  $i=1:1.5$ ,路堑深度为 4m,路面宽度为 8m。具体工况参数见表 1 所示。

表 1 模拟工况参数

工况	来流风速 $v/(m/s)$	路堑深度 $H/m$	挡雪墙设置距离 $L/m$	路基宽度 $s/m$	边坡坡度 $i$
1	12	4	15/20/25/ 30/35	8	1:1.5
2	8/12/18/25	4	30	8	1:1.5

#### 1.2 数值模拟参数设定

##### 1.2.1 计算域的确定

由于风吹雪中雪粒子所受的作用力基本上都在同一平面内,因此在建模时可以采用二维模型简化处理。在利用 Fluent 软件进行数值模拟时,计算域的尺寸会极大地影响到模拟的结果精度和计算效率。计算域尺寸过小,湍流不能充分发展,会对模拟的可信度产生影响;计算域过大,

会加大计算量, 浪费计算资源, 从而导致计算效率低下。通过对计算域模型的试算, 确定二维计算域的入口边界距路基 20m, 出口边界距路基 80m, 计算域高度取 30m, 此时既能在确保计算精度的要求下拥有较高的计算效率<sup>[2]</sup>。计算域尺寸如图 1 所示。

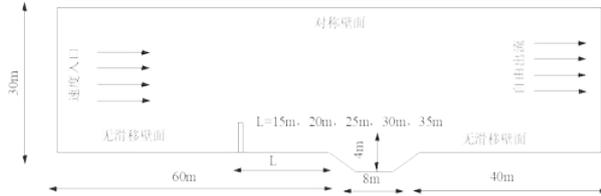


图 1 计算域示意图

### 1.2.2 网格划分

采用 Icem 软件建立流场计算域和挡雪墙二维模型。

由于本文所建的模型为不规则的几何形状, 所以选用 Pave 法将模型所在区域划分为非结构性网格, 网格划分采用四边形网格形式。考虑到负载的近地面以及挡雪墙附近的流场变化, 因此需要加密处理此区域的网格; 而在计算域的进口、出口以及上侧区域其流场变化不大, 对数值计算的结果影响较小, 为增加计算效率, 可对这部分区域的网格划分得稀疏一些。

### 1.2.3 参数设置及求解模型设定

风雪流中雪粒子运动形式有蠕移、跃移、悬移这三种, 由于作悬移运动的较大粒径的雪粒子主要集中在地表运动, 所以在对风雪流进行数值模拟时一般只计算跃移和悬移的雪粒子。模拟的雪粒子粒径  $D$  取 0.2mm, 雪粒子密度  $\rho_s$  取  $910\text{kg}/\text{m}^3$ ; 在风雪流中雪为稀相, 体积分数  $\varphi_s$  取 0.05; 空气密度  $\rho_a$  取  $1.22\text{kg}/\text{m}^3$ , 空气运动粘性系数  $\mu$  取  $1.5 \times 10^{-5} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ 。

本文模拟的风雪流入射速度小于 40m/s, 可不考虑空气压缩性对气体流动特性的影响, 故可以视为不可压缩流体。在进行数值模拟时计算模型采用欧拉双流体模型, 通过 Fluent 模拟风雪流经过公路挡雪墙时的流场变化。风雪流会在流经挡雪墙和路堑处产生湍流, Standard  $k-\varepsilon$  湍流模型具有稳定性、经济性、和较高的计算精度等优点, 是常用的湍流计算模型, 所以本文选用 Standard  $k-\varepsilon$  湍流模型。SIMPLEC 算法计算速度快和容易收敛, 所以流场求解采用 SIMPLEC 算法, 计算过程中残差设置为  $10^{-5}$ <sup>[3]</sup>。

### 1.2.4 控制方程

本文数值模拟采用的是欧拉双流体模型, 根据计算流体力学基本理论可知: 流体的流动需要满足质量守恒方程和动量守恒方程。分别表示如下:

质量守恒方程

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m) = 0 \quad (5)$$

$$\vec{v}_m = \frac{\varphi_a \rho_a \vec{v}_a + \varphi_s \rho_s \vec{v}_s}{\rho_m} \quad (6)$$

$$\rho_m = \varphi_a \rho_a + \varphi_s \rho_s \quad (7)$$

式中:  $\rho_m$ 、 $\vec{v}_m$  - 气固混合相密度、混合相速度;  $\varphi_a$ 、 $\varphi_s$  - 分别为气、固相体积分,  $\varphi_a + \varphi_s = 1$ ;  $\rho_a$ 、 $\rho_s$  - 分别为气、固相密度;  $\vec{v}_a$ 、 $\vec{v}_s$  - 分别为气、固相速度;  $t$  - 时间。

动量守恒方程

$$\frac{\partial (\varphi_a \rho_a \vec{v}_a)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varphi_a \rho_a \vec{v}_a \vec{v}_a) = -\varphi_a \nabla p + \nabla \tau_a + \varphi_a \rho_a \vec{g} + f_{as} \quad (8)$$

$$\frac{\partial (\varphi_s \rho_s \vec{v}_s)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varphi_s \rho_s \vec{v}_s \vec{v}_s) = -\varphi_s \nabla p + \nabla \tau_s + \varphi_s \rho_s \vec{g} + f_{as} - \nabla p_s \quad (9)$$

式中:  $\vec{g}$  - 重力加速度;  $p$  - 作用在流体微元体上的压强;  $\tau_a$ 、 $\tau_s$  - 分别为气相粘性应力分量、固相粘性应力分量;  $p_s$  - 固相应力;  $f_{as}$  - 气固两相之间的相互作用力。

## 二、数值模拟结果分析

### 2.1 路堑流场分布特征

由于影响道路积雪分布情况的主要因素是路堑周围的流场分布规律, 所以我们着重分析数值模拟结果中路堑周围的流场变化规律。为更加清晰地展现出风雪流在经过路堑时风速的变化规律, 定义风速波动指数  $I$  为测点风速/入射风速, 通过  $I$  值的变化, 可以直观地分析风速的分布特征。不设置挡雪墙时, 距地表 0.2m 高度处路堑周围风速波动曲线呈“U”形分布, 风雪流在流经路堑时, 风速波动指数呈现先减小然后增大的趋势。受路堑的扰动作用后路堑周围的风速波动指数均小于 1, 说明路堑对风雪流起减速作用; 路面处的风速波动指数均小于 0, 由此可见在路堑内部出现了回流现象, 产生了漩涡流, 雪粒容易在此沉积。分析上述现象的原因可知, 由于风雪流在经过路堑时, 沿着上风侧坡顶向下运动过程中, 过流断面逐渐增大, 气流速度减小, 相应的风速波动指数减小, 并且在下风侧坡脚附近达到极小值; 气流由路面向下风侧坡顶爬升

过程中,由于不断减小的过流断面,使得气流的速度不断加快,从而逐渐恢复到入射风速大小。

## 2.2 风雪流对挡雪墙响应规律

挡雪墙防雪机制是利用挡雪墙对风雪流的阻挡作用,使大部分的雪粒子沉积在挡雪墙附近,降低到达线路的风雪流雪粒浓度,使其为欠饱和状态,不易在路面沉积。设置挡雪墙与路堑的距离  $L=30\text{m}$ ,风雪流的入射速度  $v=12\text{m/s}$ ,进行数值模拟,分析挡雪墙背风侧的风速变化规律。

(1) 挡雪墙背风侧不同水平间距下风速垂直轮廓线呈倒“S”形分布,在距地面  $0\text{m}\sim 0.5\text{m}$  高度范围内,风速的绝对值由  $0$  增大至  $4.6\text{m/s}$ ,风速方向与入射风速相反,说明此区域出现了漩涡,形成低速紊流区。在距地面  $3\text{m}$  左右风速方向恢复到与入射风速相同,然后在  $3\text{m}\sim 6\text{m}$  高度范围内,风速均出现突增,增大至极值风速为  $17.5\text{m/s}$ ,和入射风速相比增幅达  $46\%$ 。此后随着距地面的高度增大风速基本保持稳定。导致以上结果的原因是风雪流接近挡雪墙时,在挡雪墙的阻挡作用下产生明显的气流分层现象,近地面的气流速度大幅降低,在更低的位置甚至产生了漩涡流;当气流越过挡雪墙的顶端向上运动时,由于挡雪墙对气流的压缩作用,气流速度会增大,形成局部的加速区域。漩涡流可以使风雪流贴地向下流动,产生向下的剪切力,使雪粒子在此沉积而不会到达路面,可以起到防雪的效果。

(2) 挡雪墙背风侧不同高度下风速变化趋势基本上是呈“V”形。整体上,挡雪墙背风侧距地面  $0.3\text{m}\sim 1.8\text{m}$  高度范围内的风速为负值;在距挡雪墙  $0\text{m}\sim 16\text{m}$  范围内,风速的绝对值逐渐增大,风速方向与入射风速方向相反,出现了局部漩涡流;当与挡雪墙水平间距大于  $16\text{m}$  时,风速绝对值在减小,风速逐渐恢复到入射风速方向。当与挡雪墙水平间距相同时,随着离地高度的增加,风速绝对值在减小,即近地面形成的局部漩涡强度更大。

## 2.3 风速对挡雪墙背风侧流场影响

风是发生风吹雪时的动力条件,风速也是影响路堑积雪规律的重要因素,分析不同风速下距挡雪墙背风侧  $2\text{m}$  处的风速垂直变化曲线可知,在距地面  $0.3\text{m}$  范围内,风速均产生突增,方向与初始风速相反,表明近地面形成漩

涡流,并且初始风速越大增幅越大,当初始风速  $8\text{m/s}$  时风速绝对值增大至  $2.5\text{m/s}$ ,当初始风速  $25\text{m/s}$  时风速绝对值增大  $8.6\text{m/s}$ 。在距地面  $0.3\text{m}\sim 3.5\text{m}$ ,风速的绝对值逐渐减小至  $0$ ,说明风速方向渐渐朝着初始风速方向变化。在距地面  $3.5\text{m}\sim 7.0\text{m}$ ,风速逐渐增大,并且在距地面  $7.0\text{m}$  处风速达到最大,当初始风速为  $25\text{m/s}$  时,最大风速增幅达  $32\%$ 。

## 三、结语

(1) 风雪流在经过路堑时,路堑周围的风速波动指数曲线呈“U”形分布。路堑的扰动作用使其周围的风速显著降低,在路堑内部,风速波动指数小于  $0$ ,形成了局部漩涡流,漩涡使风雪流向下贴地运动,从而导致路堑内部容易积雪。

(2) 挡雪墙背风侧风速在垂直方向与水平方向均会产生分区,风速在垂直方向上呈倒“S”形分布,在距地面  $0\sim 0.5\text{m}$  形成紊流区,在距地面  $3\text{m}\sim 6\text{m}$  形成恢复区,并且恢复区最大风速相较于初始风速增幅达  $46\%$ 。风速在水平方向呈“V”形分布,受挡雪墙的阻挡作用,背风侧气流速度与初始速度方向相反,近地面在距挡雪墙  $16\text{m}$  区域形成大漩涡,使大量雪粒在此沉积。

(3) 在路堑迎风侧设置挡雪墙后,挡雪墙背风侧和路堑内部会形成风速减弱区,挡雪墙高度一定时,为使挡雪墙能够有效发挥阻雪功能,建议挡雪墙与路堑设置距离为  $15$  倍墙高。通过分析路堑关键位置的流场,其两个坡脚最易产生积雪,坡顶处由于风速大于雪粒起动风速所以不易积雪。

(4) 在不同初始风速条件下,挡雪墙背风侧水平距离  $2.0\text{m}$  处风速在垂直方向上均出现分层现象。距地面  $0.3\text{m}$  范围内形成漩涡区,在  $0.3\text{m}\sim 7.0\text{m}$  形成加速区,当初始风速为  $25\text{m/s}$  时,最大风速增幅达  $32\%$ 。

## 参考文献:

- [1] 王中隆,张志忠.中国风吹雪区划[J].山地学报,1999(04):312-317.
- [2] 吴鹏.防雪栅栏对路堤流场影响的数值模拟研究[J].路基工程,2020(05):137-142.
- [3] 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(02):38-43.