

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2024.06.038

风雪环境高速列车转向架区域积雪问题研究与优化

聂建¹, 于培师¹, 赵军华¹, 赵凡²

(1. 江南大学 机械工程学院, 江苏 无锡 214122; 2. 中国空气动力研究与发展中心, 四川 绵阳 621050)

摘要: 基于 Realizable k-epsilon 湍流模型和离散相模型, 对 100 m/s (高铁速度 360 km/h) 运行车速条件下, 高速列车转向架区域空气流场变化、积雪问题和防积雪优化进行数值计算和分析。研究表明: 转向架区域内存在大量低速涡流, 这些低速涡流周围各部件上容易形成积雪; 通过设计并加装导流板和扰流板, 能够抑制转向架下方气流的上扬和回流趋势, 显著减少转向架积雪量; 通过改进结构参数, 发现导流板下斜距离为 30 mm 时, 防雪性能最好, 其可使转向架积雪量减少 95.50%。

关键词: 风雪流; 转向架; 临界捕获角度; 临界剪切速度; 导流板

中图分类号: U292.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2024)06-0190-06

Research and Optimization of Snowpack in High-speed Bogie Area in Snowstorm Environment

NIE Jian¹, YU Peishi¹, ZHAO Junhua¹, ZHAO Fan²

(1. College of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

2. China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621050, China)

Abstract: Based on Realizable k-epsilon turbulence model and discrete phase model, numerical calculation and analysis of air flow field variation, snow accumulation and snow protection optimization in the bogie area of high-speed train at 100 m/s (high-speed rail at 360 km/h) were carried out. The results show that there are a lot of low-speed eddies in the bogie area, and the snow is easy to form on the parts around these low-speed eddies. By designing and installing the deflector and spoiler, the up-flow and back-flow trend of the air flow under the bogie is inhibited, and the snow accumulation of the bogie is reduced significantly. With the improved structure parameters, it is found that the deflector with a downslope distance of 30 mm has the best snow protection performance, which can reduce the snow amount of the bogie by 95.50%.

Keywords: snow drift; bogie; critical capture angle; critical shear speed; deflector

0 引言

我国幅员辽阔, 南北横跨多个纬度, 高纬度地区如东北三省和新疆北部地区, 其气温可低至 -40°C , 积雪厚度可达 20 cm 以上。在高寒地区, 轨道和地面上的积雪会严重威胁高速列车的安全行驶, 如轨道上的积雪会使转向架轮对出现打滑现象, 减小转向架轮对和轨道之间的摩擦力, 降低列车行驶速度, 威胁列车安全行驶; 高速铁路道岔上的积雪容易致使高速列车发生挤岔或出轨^[1]。同时积雪中的雪粒容易在高速列车周围列车风的作用下脱离积雪表面, 进入空气流场, 并在高速列车转向架上形成积雪。转向架积雪会引起一系列列车行驶安全问题, 如转向架制动装置出现严重积雪时, 会增加高速列车制动时间和制动距离, 危害到

高速列车的安全行驶^[2]; 空气弹簧等的运动会受到积雪的阻碍, 其减震效果因此受到影响^[3]; 高速列车行驶过程中, 转向架的积雪容易脱落, 损坏地面设施和车下设备^[4]。转向架区域积雪问题已经成为高铁设计和生产过程中重点关注问题之一。

对于高速列车转向架区域防积雪研究, 赵晨乐^[5]设计了两种防积雪方案——在转向架区域前端安装前置导流板和转向架区域中间位置安装中置导流板, 其研究结果发现 45° 中置导流板的防积雪效果最好。丁叁叁等^[6]通过在转向架前端板上安装下斜橡胶板对转向架区域防积雪设计进行研究, 发现橡胶板下斜距离越大, 防积雪效果越好。蔡华闽^[7]研究不同列车底面外形下的防积雪效果, 结果发现三角形列车底面防积雪效果比圆形列车地面好。ANDERSSON 等^[8]通过对转向架

基金项目: 国家自然科学基金项目(11972171); 中国博士后科学基金项目(2018M630513); 国家数值风洞工程(NNW)

第一作者简介: 聂建(1997—), 男, 河南信阳人, 硕士研究生, 研究方向为风雪两相流, 3161350090@qq.com。

部件进行结构优化来实现防积雪目的。王枫等^[9]通过在转向架区域前后端板位置安装导流板,来实现防积雪目的,同时运用协同原理,降低导流板对列车阻力变化的影响。倪英瀚、蔡路、何德华等^[10-12]通过在转向架前方安装扰流板、改变扰流板的结构来实现转向架区域防积雪效果。高峰等^[13]通过在转向架区域前端、中间和后端位置各安装一个导流板,对城际列车转向架区域积雪问题进行改善。LEIF 等^[14]建议在高速列车行驶过程中对转向架区域喷射混合液,以减少转向架区域积雪量。

上述研究均未对转向架区域内雪粒沉积条件进行研究,本文采用 Realizable k-epsilon 湍流模型和离散相模型,对风雪流条件下转向架区域流场和转向架区域雪粒运动特性进行研究;并基于流场结果和雪粒运动特性对转向架区域积雪形成过程和防积雪结构进行研究。

1 数值模拟理论

1.1 湍流模型

湍流流动复杂,其物理参数变化无规律可言。在数值研究中选取 Realizable k-epsilon 两方程模型进行研究,其理论公式^[15]如下:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k V_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + S_k \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon V_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + S_\varepsilon \quad (2)$$

式中: k 为湍动能; ε 为动能耗散率; ρ 为流体相密度; V_j 为流体速度在 j 方向上的分量; μ 是流体黏度; μ_t 为湍流黏性系数; σ_k 和 σ_ε 分别是 k 和 ε 的湍流 Prandtl 数; S_k 和 S_ε 是源项。

1.2 动量方程

动量方程又被称为 Navier-Stokes 方程,其矢量形式^[16]如下:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{V}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \mathbf{V}) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{V} + \mathbf{S} \quad (3)$$

式中: $\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{V})$ 表示非稳态项; $\nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \mathbf{V})$ 表示对流项; $-\nabla p$ 表示压力项; $\mu \nabla^2 \mathbf{V}$ 表示扩散项; \mathbf{S} 表示源项。

1.3 雪粒力平衡方程

风雪流中雪粒的运动受到自身重力和气流之间的相互作用力,其受力平衡公式如下:

$$\frac{d^2 \mathbf{L}}{dt^2} = \frac{F_g}{m_p} + \frac{F_d}{m_p} + \frac{F}{m_p} \quad (4)$$

式中: \mathbf{L} 表示雪粒的位移; m_p 表示雪粒质量; F_g 表示雪粒所受重力; F_d 表示雪粒所受阻力,其具体公式见 GOSMAN^[17]的研究; F 表示雪粒所受额外力,如电磁力、虚拟质量力等,本文不考虑额外力情况。

2 计算模型

2.1 研究对象

1) 导流结构

对高速列车而言,转向架下方的高速气流存在上扬趋势和回流现象^[18]。当高速列车在积雪地区行驶时,上扬和回流的气流会携带雪粒进入转向架。为改善转向架下方高速气流的上扬和回流趋势,从而改善转向架积雪情况,在转向架前后端板上安装导流板或扰流板以研究不同结构的防积雪效果,进而对转向架区域积雪问题进行优化。设置导流板、直角扰流板和钝角扰流板一共 3 种防积雪结构,如图 1 所示,研究导流板、直角扰流板和钝角扰流板的防积雪效果。根据转向架和列车的宽度,设置导流板、直角扰流板和钝角扰流板的长度为 2 000 mm;导流板的下斜距离和扰流板的垂直距离有 20 mm、25 mm 和 30 mm,以研究下导流板的下斜距离和扰流板的垂直距离变化对转向架积雪量的影响。

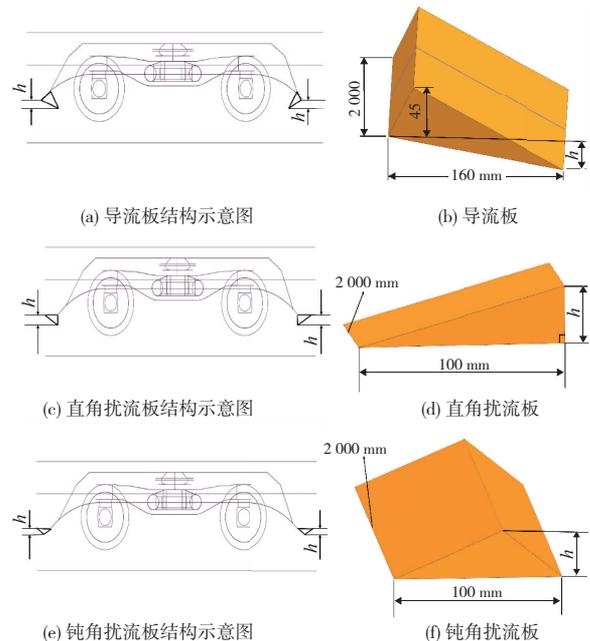


图 1 防积雪结构示意图

2) 流体域

流体域如图 2 所示。其中流体域长约 230 m,

宽度为 103 m,高度为 54 m。沿头车向尾车的方向,将转向架排序为转向架 1—转向架 6,同时在列车底部的区域上设置 10 个人射器,沿头车向尾车的方向排序为入射器 1—入射器 10。

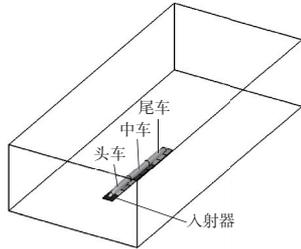


图 2 流体域和入射器模型

3) 流体域网格划分

对流体进行网格,流体域最大体网格为 5 000 mm;车体最大面网格为 64 mm,局部加密面网格为 16 mm;转向架最大面网格为 16 mm,局部加密面网格为 8 mm,其表面网格如图 3 所示,车体和转向架表面设置 6 层附面层,底层附面层厚度为 0.39 mm,附面层厚度增长率为 1.2。

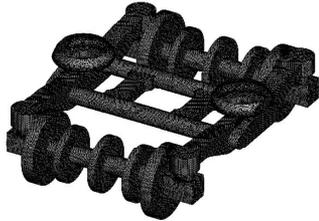


图 3 转向架面网格

2.2 雪粒沉积条件

如图 4 所示,根据雪粒撞击壁面的撞击角度和壁面处的临界剪切速度^[19]来判断,雪粒在撞击壁面后是反弹、剪切或粘附。当雪粒撞击角度大于雪粒临界沉积角度时,雪粒将被反弹;当雪粒撞击角度小于临界沉积角度时,雪粒发生沉积,而沉积的雪粒会受到气流的剪切作用,当气流的剪切作用大于雪粒临界剪切速度时,沉积的雪粒会再次进入空气流场^[20-21]。该边界条件称为 Trenker 准则边界^[22]。

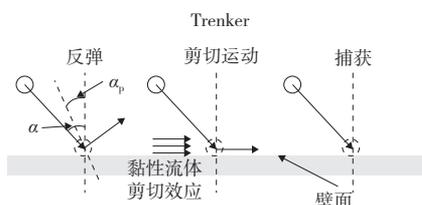


图 4 Trenker 边界条件

2.3 边界条件的设置

选取 Realizable k-epsilon 两方程模型对空气流场进行研究,空气相的速度为 $V=100\text{ m/s}$,密度为 1.453 kg/m^3 ,黏度为 $1.57\times 10^{-5}\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。先对高速列车周围的空气流场进行稳态计算,流场结果收敛后再进行雪粒运动的非稳态计算;雪粒的密度为 250 kg/m^3 ^[23],粒径为 0.2 mm ^[24];连续相和离散相的非稳态计算时间长均采用 10^{-4} s ,计算步数为 20 000 步。仿真的边界条件如表 1 所示。

表 1 仿真边界条件设置

边界区域	空气相边界条件	雪粒相边界条件
入口	速度入口:100 m/s	逃逸
出口	压力出口	逃逸
流体域侧面、顶面	对称	—
地面	移动壁面:平移 100 m/s	反弹
轮对	旋转壁面:旋转 $\omega = 232.56\text{ rad/s}$	反弹
转向架	无滑移壁面	Trenker
车体	无滑移壁面	反弹

3 仿真结果

3.1 列车阻力特性分析

为验证数值计算结果的可靠性,采用 Realizable k-epsilon 湍流模型,对文献[25]中列车阻力特性进行研究,计算结果如表 2 所示。

表 2 列车阻力系数分析

列车	数值计算	风洞实验
头车	0.152	0.145
尾车	0.158	0.160

对比数值计算结果和风洞实验结果可知,头车和尾车阻力系数相对误差分别为 4.83%、1.25%,满足计算精度要求。

3.2 转向架区域流场变化

图 5 所示分别为 $y=0\text{ m}$ 截面上在 25 mm 导流板、直角扰流板和钝角扰流板影响下转向架 1 区域流场的变化。由图 5(a)可知,转向架下方的高速气流存在上扬和回流趋势,上扬和回流的气流在转向架区域形成涡流,涡流主要集中在转向架构架、前后端板和车体板件附近,这些部件附近的雪粒容易发生堆积,形成积雪;图 5(b)—图 5(d)显出导流板和扰流板能够抑制高速气流的回流和

上扬趋势,上扬气流形成的涡流被限制在转向架构架下方,转向架区域的进气量减少。随着气流进入转向架区域的雪粒减少,积雪发生的可能性降低,积雪量减少。

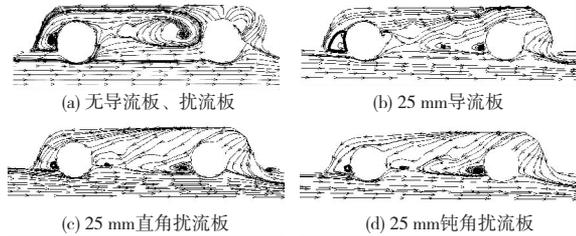


图5 转向架区域流线分布图

3.3 转向架表面压力分布变化

图6为转向架1区域压力分布图。由图6可知,转向架制动盘和轮对的迎风侧承受较高的正压,而背风侧承受负压;转向架后轮对和后端板之间的区域内压力高于转向架前后轮对之间区域内的压力,说明后轮对和后端板之间的区域存在回流现象;导流板和扰流板可降低转向架各部件迎风侧的正压,减小转向架区域内压力值,降低后轮对前后区域的压力差,抑制回流现象。

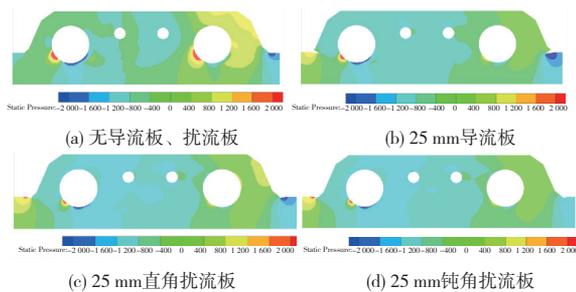


图6 转向架区域压力分布

4 转向架雪粒沉积情况分析

4.1 入射器粒子释放数计算

入射器雪粒释放数由风雪流理论^[26]计算结果确定。由风雪流理论公式可知,入射器雪粒释放数取决于入射器表面切应力和雪粒临界剪切速

度。当雪粒临界剪切速度一定时,入射器表面切应力越大,单位面积单位时间内入射器雪粒释放数越多。单位时间内各入射器雪粒释放数计算结果如图7所示。

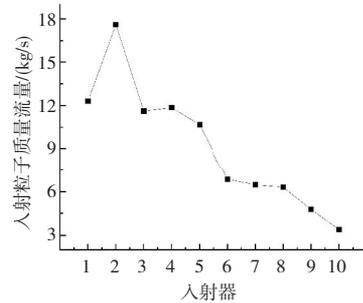


图7 入射器雪粒释放数分布图

4.2 转向架区域的积雪量变化

1) 导流板作用下转向架区域积雪量变化

图8为导流板影响下转向架区域积雪量变化图。由图8可知,无导流板时,雪粒沉积数最多的转向架区域是转向架5区域,其雪粒沉积数占各转向架区域雪粒沉积数之和的42.99%;雪粒沉积数最少的是转向架1区域,其并未发生雪粒沉积情况,这是因为入射器的位置在列车正下方,具体如图1(a)所示。因研究的是列车风起动雪粒在转向架区域的堆积问题,由列车风起动的雪粒、初始速度(0.062 6 m/s)仅在垂直方向且初始速度小,和空气相速度相差4个量级,当雪粒随空气水平方向运动到转向架1区域的正下方时,雪粒垂直方向运动高度低于转向架1区域高度,雪粒并未进入转向架1区域,因此转向架1区域内不存在雪粒沉积问题。下斜距离20 mm、25 mm和30 mm的导流板后,可使转向架区域雪粒沉积总数分别减少72.16%、89.93%和95.50%,说明导流板下斜距离越大,其防积雪效果越好。图8中也显示出转向架区域的车体板件仍然是转向架区域积雪最严重的部位,其上积雪量分别占对应工况积雪总数的63.75%、62.34%和58.78%。

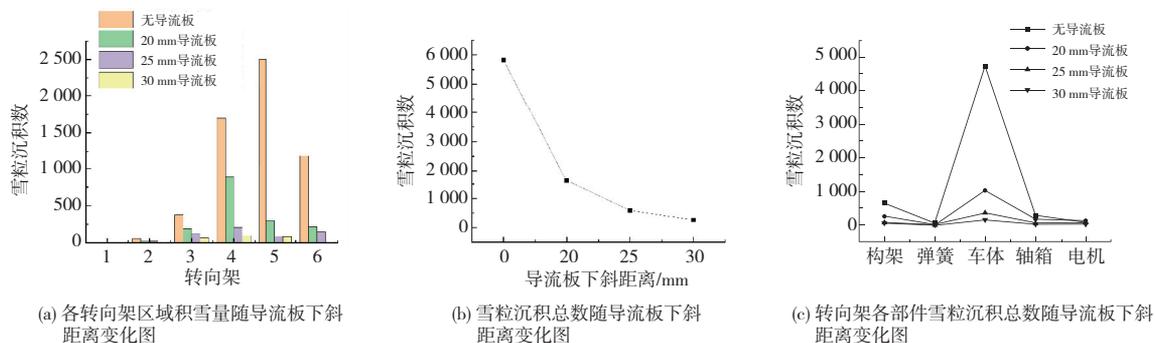


图8 导流板影响下转向架区域积雪量变化图

2) 直角扰流板作用下转向架区域积雪量变化
由图 9 可知,随着直角扰流板垂直距离的增加,转向架区域积雪量逐渐减少,其中 20 mm、

25 mm 和 30 mm 直角扰流板分别使转向架区域积雪量减少 73.07%、78.79% 和 71.56%。

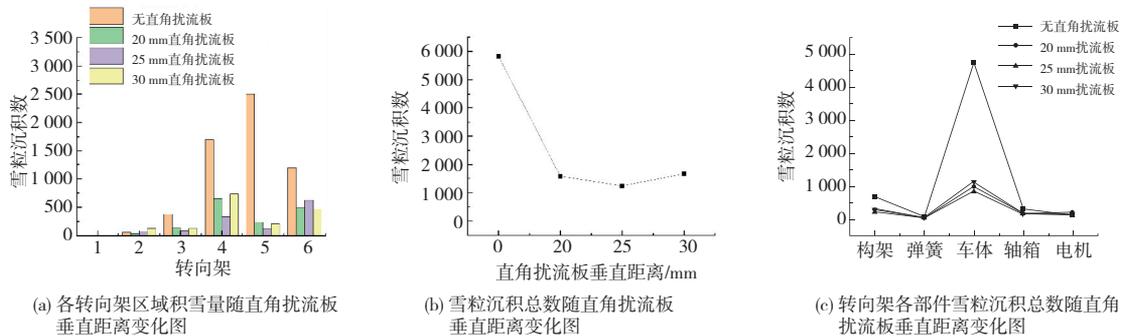


图 9 直角扰流板影响下转向架区域积雪量变化图

3) 钝角扰流板作用下转向架区域积雪量变化
图 10 为钝角扰流板作用下转向架区域积雪量变化图。由图 10(b) 看出,钝角扰流板的防积

雪效果受其垂直距离的影响较小,其中 20 mm、25 mm 和 30 mm 扰流板作用下,转向架区域积雪总量分别减少 73.91%、70.45% 和 77.50%。

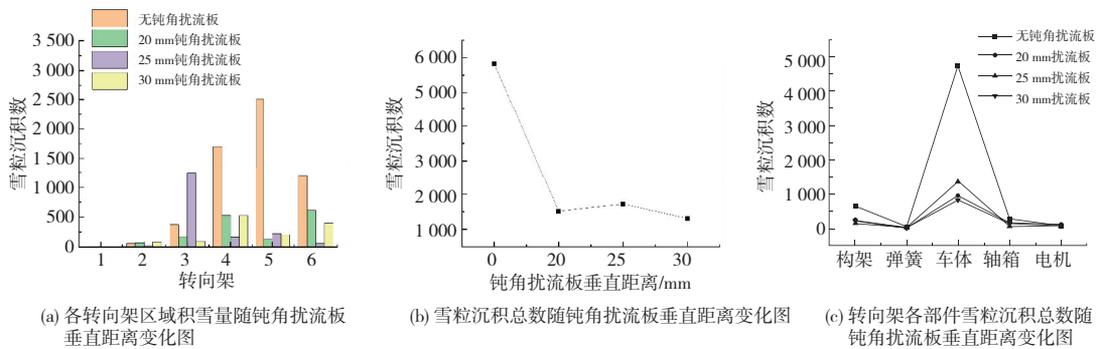


图 10 钝角扰流板影响下转向架区域积雪量变化图

5 结语

本文采用数值模拟方法,对风雪流条件下转向架区域的流场特性、雪粒的运动特性和转向架区域积雪问题进行研究,并通过在转向架前后端板上安装导流板,并研究导流板的防积雪效果。根据上述研究,本文得出如下结论。

1) 转向架和前端板之间、转向架前后轮对之间的高速气流存在上扬趋势;转向架和后端板之间的气流区域存在回流现象;上扬和回流的气流会携带雪粒进入转向架区域,在转向架区域内发生堆积。

2) 转向架构架、后端板和后轮对附近的雪粒分布最多;转向架区域积雪最严重的部位是车体板件,其积雪量占积雪总量的 81.41%;转向架 1 区域没有发生积雪问题,积雪量为 0。

3) 导流板和扰流板能抑制转向架下方高速气流的上扬趋势和后端板前方的回流趋势,减少进入转向架区域的气流量,进而减少进入转向架区域的雪粒;30 mm 直角扰流板的防积雪效果最好,其能使转向架区域积雪总量减少 95.50%。

参考文献:

[1] 谢正媛,夏栋,申碧涛. 冰雪灾害对高速铁路列车运输组织的影响及其对策[J]. 科教导刊,2012(3): 218-219.

[2] 陈多伟. 铁路行车安全事故分析及防范对策[J]. 工业技术创新,2016,3(5): 1056-1059.

[3] GIAPPINO S, ROCCHI D, SCHITO P, et al. Cross wind and rollover risk on lightweight railway vehicles [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2016, 153: 106-112.

[4] 苗秀娟,何侃. 高速列车转向架区域积雪形成原因及防积雪研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018,

- 49(3):756-763.
- [5] 赵晨乐. 高速动车组转向架区域防积雪性能研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2021.
- [6] 丁叁叁,田爱琴,董天韵,等. 端面下斜导流板对高速列车转向架防积雪性能的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版),2016,47(4):1400-1405.
- [7] 蔡华闯. 高速列车转向架区域防积雪外形优化研究[D]. 成都:西南交通大学,2018.
- [8] ANDERSSON E. Green Train Concept proposal for a scandinavian high-speed train: final report, part B[J]. IAHS-AISH Publication,2012, 100(44): 12-02.
- [9] 王枫,高永杰,赵兴. 基于风雪两相流的高速列车转向架积雪特性分析与优化[J]. 机械与电子,2021, 39(6):7-13.
- [10] 倪英翰. 扰流板对动车组转向架积雪特性影响的模拟研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2022.
- [11] 蔡路. 高速列车底部风雪流特性及转向架区域防积雪研究[D]. 成都:西南交通大学,2021.
- [12] 何德华,王刚义,陈厚嫦,等. 基于风雪两相流的高寒动车组转向架防冰雪扰流技术研究[J]. 铁道机车车辆,2016,36(4):38-42.
- [13] 高峰,刘明杨,马冬莉,等. 城轨列车转向架积雪结冰原因分析及其防治[J]. 中南大学学报(自然科学版),2020,51(7):2039-2047.
- [14] LEIF P,吴新民. 俄罗斯高速列车 Velaro RUS 的低温技术方案及运营经验[J]. 国外铁道车辆,2012, 49(3):16-19.
- [15] 郁岚,杨小琨,李琳. 热工基础及流体力学[M]. 北京:中国电力出版社,2006.
- [16] MOUKALLED F, MANGANI L, DARWISH M. The finite volume method in computational fluid dynamics: an advanced introduction with OpenFOAM^R and Matlab[M]. Cham: Springer International Publishing, 2016.
- [17] GOSMAN A D, LOANNIDES E. Aspects of computer simulation of liquid-fueled combustors[J]. Journal of Energy,1983,7(6):482-490.
- [18] 李靓娟,张洁,刘堂红. 动车组车轮流场数值模拟分析[J]. 铁道科学与工程学报,2014,11(4):115-120.
- [19] CAO R Z, YU Z X, LIU Z X, et al. An investigation of snow drifting on low-sloped gable roofs: Wind-tunnel tests and CFD simulations[J]. Cold Regions Science and Technology,2021,183:103227.
- [20] WANG J B, ZHANG J, XIE F, et al. A study of snow accumulating on the bogie and the effects of deflectors on the de-icing performance in the bogie region of a high-speed train [J]. Cold Regions Science and Technology,2018,148:121-130.
- [21] GAO G J, ZHANG Y, XIE F, et al. Numerical study on the anti-snow performance of deflectors in the bogie region of a high-speed train using the discrete phase model[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2019,233(2):141-159.
- [22] TRENKER M, PAYER W. Investigation of snow particle transportation and accretion on vehicles [C]// Proceedings of the 24th AIAA Applied Aerodynamics Conference. San Francisco, California. Reston, Virginia: AIAA,2006:3648.
- [23] 陆恒,魏文寿,刘明哲,等. 天山季节性积雪稳定期雪密度与积累速率的观测分析[J]. 冰川冻土,2011, 33(2):374-380.
- [24] 魏亚瑞,郝晓华,王建,等. 基于 MODIS 数据的北疆积雪黑碳和雪粒径反演及时空变化分析[J]. 冰川冻土,2019,41(5):1192-1204.
- [25] 张在中,周丹. 不同头部外形高速列车气动性能风洞试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版),2013, 44(6):2603-2608.
- [26] 马高生,黄宁. 风雪流临界起动风速的研究[J]. 兰州大学学报,2006,42(6):130-134.

收稿日期:2023-04-25