

DOI:10.19344/j. cnki. issn1671-5276.2024.05.001

高速列车转向架区域积雪问题的数值研究

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:当高速列车在高寒雨雪地区行驶时,转向架区域容易形成积雪,对高速列车的安全行驶造成威胁。在积雪轨道上行驶的高速列车,其转向架区域积雪中雪粒来源于地面积雪,因此基于壁面切应力,建立风致积雪雪粒运动模型,研究地面积雪中雪粒在列车风作用下的运动情况。采用欧拉-拉格朗日方法,基于雪粒沉积准则,建立转向架区域雪粒沉积边界模型,研究风致雪粒运动情况下转向架区域积雪分布。研究结果表明:高速气流在转向架正下方区域出现高速上扬的现象;转向架区域的车体板件、构架和轴箱等为主的积雪部位;转向架区域雪粒沉积数量与转向架的位置、雪粒的密度和直径及壁面条件有关。

关键词:高速列车;转向架区域;积雪;壁面切应力;风致雪运动

中图分类号:U292.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2024)05-0001-07

Numerical Simulation of Snow Formation in Bogie Area of High-speed Train

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: When high-speed train runs in cold rain and snow area, its bogie area is easy to form snow, whose particles rising upward from the ground threaten the train safety. Therefore, a wind-induced snow particle motion model based on wall shear stress was built for the study of snow particle motion in the ground snow under the effect of train wind. The Euler-Lagrange method was adopted to establish a snow deposition boundary model based on snow deposition criteria, and the research on the bogie area snow distribution under wind-induced snow particle motion condition was conducted. The results show that the high-speed airflow rises upward at high speed in the area right below the bogie, of which the plate, frame and axle box are the main snow-covered parts, and the amount of snow deposition in the bogie area is related to the location of the bogie, the density and diameter of snow particles and the wall conditions.

Keywords: high-speed train; bogie area; snow accumulation; wall shear stress; wind-induced snow motion

0 引言

行驶中的高速列车周围会形成列车风,列车下方的列车风流速可达到 50 m/s ^[1]。对风致雪运动而言,当风速达到 10.7 m/s 以上时,地面积雪表面的雪粒会在黏性气体的剪切作用下进入空气流场^[2]。因此,在高寒雨雪地区,高速列车行驶过程中,会在其周围形成雪烟。雪烟中的部分雪粒会随着空气进入转向架区域。进入转向架区域的空气会在转向架各部件间的狭小缝隙中发生减速。当转向架某处的空气流速低于雪粒漂移速度时,雪粒在黏性作用下会在转向架各部件形成堆积。当转向架区域出现积雪结冰问题时,会引起

列车行驶安全问题。如空气弹簧的减震效果会受到空气弹簧座上积雪问题的影响^[3];转向架撒砂装置出现严重积雪问题时会降低轮轨黏着性,威胁列车行驶安全^[4];在列车制动装置上的积雪结冰也会阻碍或减缓刹车效应,对列车的行驶安全产生严重危害^[5-6]。

对于高速列车转向架区域积雪问题,KLOOW等^[7]给出了详细描述和防治措施;韩运动等^[8]对高速列车转向架区域的流场进行研究,发现气流主要从转向架的下方进入转向架区域,同时还根据研究内容预测出转向架区域雪粒可能堆积的部位;谢菲等^[9]采用数值方法对转向架积雪问题进行数值模拟并进行风洞实验研究;姜振^[10]基于雪

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

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。

粒运动相似准则,通过数值模拟的方法对转向架区域制动盘甩水问题和积雪结冰问题进行研究;PAULUKUHN 等^[11]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;LATORRE 等^[12]对高速列车行驶时的转向架区域流场进行研究,发现进入转向架的气流,在转向架复杂结构的作用下,在各部位之间形成紊流;XIE 等^[13]简化了列车模型,对单一转向架区域积雪问题进行研究;丁叁叁、李超辉等^[14-15]通过对转向架区域的空气流动情况分析,研究转向架各部件积雪情况;蔡华闽^[16]基于欧拉-拉格朗日模型对简化转向架模型的积雪问题进行研究;ANDERSSON^[17]对动车组转向架区域积雪结冰问题进行数值研究,发现积雪容易发生在电机等发热部件上;高峰等^[18]简化列车模型,在转向架区域安装导流板,用于减少转向架区域进雪量,其研究结果实现转向架 1 积雪量降低 96%,转向架 2 积雪量降低 94%。

目前对于转向架区域积雪问题的研究,有些学者仅从流场的角度考虑,而忽略了主相和离散相之间的相互作用。还有些学者从主相和离散相耦合角度进行研究,但均未考虑转向架区域雪粒的沉积条件和积雪中雪粒的释放数量研究,这都会引起对转向架区域积雪成因分析存在偏差^[19-20]。

针对地面卷雪条件下的转向架区域积雪问题,采用 Realizable k-epsilon 模型和离散相模型进行研究。为了考虑地面存在积雪时雪层表面雪粒释放情况和转向架区域各部件的雪粒沉积情况,基于风致雪运动理论^[21-22]对雪层表面雪粒释放情况进行研究,并通过改变雪粒的沉积速度和沉积角度来调整转向架区域各部件的雪粒沉积条件,以接近真实的转向架区域雪粒沉积情况,同时本文设置不同的工况来研究雪粒密度、雪粒直径和雪粒沉积条件对转向架区域雪粒沉积问题的影响。本文的研究结果可为实际的工程应用问题和转向架区域防积雪研究提供数值依据。

1 CFD 数值模拟理论

1.1 雪粒的运动方程

由离散相模型可知,颗粒的力平衡公式如下:

$$m_p \frac{du_p}{dt} = m_p \frac{u-u_p}{\tau_r} + m_p \frac{g(\rho_p-\rho)}{\rho_p} + F \quad (1)$$

式中: m_p 是颗粒质量; ρ 是主相的密度; u 是主相

速度; ρ_p 是颗粒的密度; u_p 是颗粒速度; $m_p \frac{g(\rho_p-\rho)}{\rho_p}$ 是颗粒运动时所受到的重力; F 是额外力,其有虚拟质量力、参考系作用力、热泳力、Magnus 效应等,额外力均在特定情况下才需考虑,本文并未涉及额外力的发生情况,在此不做额外力的公式说明; $m_p \frac{u-u_p}{\tau_r}$ 是颗粒运动时所受到的阻力; τ_r 是颗粒松弛时间; τ_r 的计算公式如下:

$$\tau_r = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu_q} \cdot \frac{24}{c_d Re} \quad (2)$$

式中: μ_q 是流体摩尔黏度; d_p 是颗粒直径; Re 是雷诺数,定义为

$$Re = \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\mu} \quad (3)$$

1.2 雪粒起动方式

雪粒脱离积雪表面有两种方式,分别是流体起动和碰撞起动^[23]。

1) 流体起动

流体起动是指雪粒在风对雪层表面雪粒的直接作用下,引起雪粒脱离雪层表面进入流场中运动的起动方式。该起动方式不考虑雪粒碰撞。单位时间、单位面积内由于风力引起跃移运动的雪颗粒数目 N_a 根据 SHAO 等^[24]给定的计算公式求取:

$$N_a = \zeta \cdot u_* \left(1 - \frac{u_{*t}^2}{u_*^2} \right) d_p^{-3} \quad (4)$$

式中: ζ 是经验系数,取值为 1.7×10^{-3} ; u_{*t} 表示阈值摩擦速度; u_* 为壁面剪切速度,其计算为

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

式中: τ 为壁面切应力; ρ 为空气密度。

雪粒的起动速度受到风速、粒径和温度等因素的影响。本文为研究风雪流运动,假定由风作用引起的起动雪粒全部为垂直起跳,其起动速度 u_0 计算公式为

$$u_0 = \sqrt{2gd_p} \quad (6)$$

2) 碰撞起动

在来流中的粒子碰撞壁面可能会引起壁面处颗粒的蠕移或起跳。在这种情况下,壁面颗粒的起动主要是气流中运动雪粒对雪层表面处于静止状态颗粒的冲击所致,这种起动方式也被称为碰撞起动^[25]。由于 DPM 模型不考虑雪粒体积,雪层中雪粒的黏性作用较大,对于落在雪层表面的雪粒,一般不容易激起雪层表面的雪粒进入雪粒

流场,所以本文暂不考虑碰撞起动。

2 计算模型

2.1 研究对象

采用三车组整车模型作为研究对象,如图 1 所示。其中列车的总长度为 80.369 m,宽度为 3.4 m,高度为 4.1 m。计算域的总长为 230.70 m,宽度为 103.35 m,高度为 54.37 m。为了节约计算成本,对列车的转向架结构进行简化,对一些转向架上细小的装置部件不做显示。最终头车和尾车转向架模型包括制动盘、轴箱、轮对、构架、空气弹簧安装座和加强筋,其具体结构如图 1(c) 所示。不同的是中车转向架模型没有制动盘,而是多出了电机和齿轮减速箱,其具体结构如图 1(d) 所示。图 1(a) 为列车模型,为了方便说明,本文将转向架沿头车向尾车方向编号 1—6,并将列车下方地面划分作入射器使用,同时沿头车向尾车方向给入射器编号 1—10,具体如图 1(b) 所示。

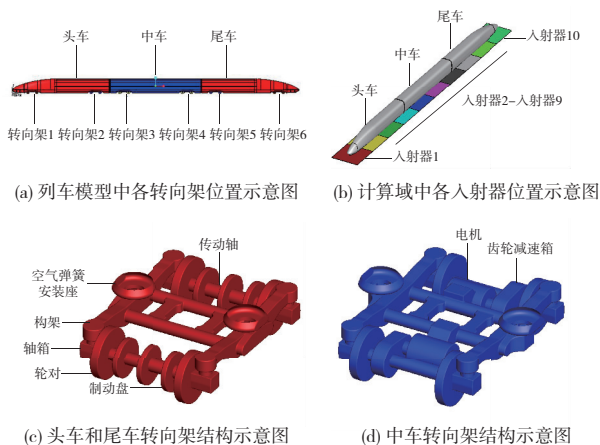


图 1 列车模型和转向架模型示意图

2.2 边界条件设置

边界条件是流体控制方程有确定解的前提。边界条件是否符合实际工程设置,决定了数值计算的真实性及数值计算结果的准确性。本文的边界条件设置如表 1 所示。其中,计算域的出入口颗粒相边界条件为逃逸,当雪粒接触入口或出口边界时,就会从计算域中离开;车体等边界的颗粒相边界条件为反弹,当雪粒撞击到这些边界表面时,会获得相应反射角度和反射速度,重新进入计算域内;而当雪粒接触到捕获边界时,雪粒的运动停止但不会离开计算域,如图 2(a) 所示;根据文献[26–28]的雪粒沉积准则建立雪粒沉积边界条件模型,边界条件模型需要设置雪粒的临界沉积

角度和临界沉积速度,当雪粒撞击壁面角度小于临界沉积角度时,雪粒发生沉积,沉积后的雪粒会受到壁面剪切速度的影响,当壁面剪切速度低于临界沉积速度时,雪粒才能发生稳定沉积,称该边界条件为 Trenker 准则边界条件,具体如图 2(b) 所示。

表 1 连续相和离散相边界条件

边界区域	空气相边界条件	离散相边界条件
入口	速度入口 $v = 100 \text{ m/s}$	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 $v = 100 \text{ m/s}$	反弹
构架	旋转壁面: 旋转 $\omega = 232.56 \text{ rad/s}$	反弹
转向架	无滑移壁面	Trenker/捕获
车体	无滑移壁面	反弹

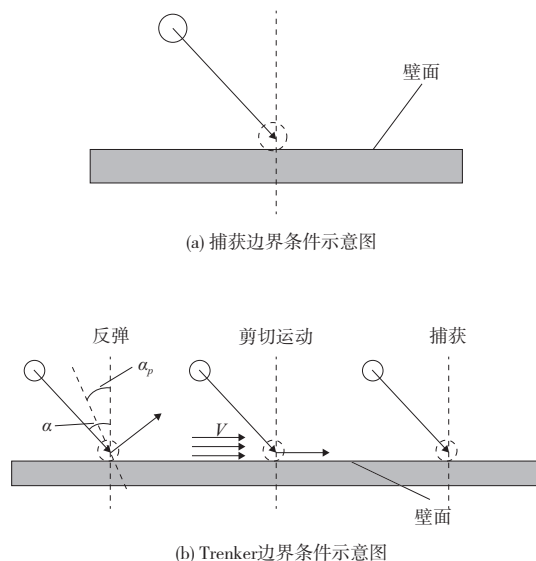


图 2 转向架壁面雪粒沉积边界条件

仿真的求解采用 SIMPLE 算法,其中压力项、对流项和扩散项都采用二阶离散格式,而湍动能和湍流耗散率采用一阶离散格式。

3 列车周围流场分析

3.1 数值结果与风洞实验对比

表 2 为数值计算和风洞实验^[29]的阻力系数对比结果表。为验证数值模型的可靠性,本文基于现有风洞实验数据和相同条件下的数值模拟数据进行比较,发现其相对误差为 0.84%,该误差值

满足工程计算精度要求。

表 2 数值计算和风洞实验的阻力系数对比

阻力系数测量位置	数值计算	风洞实验	相对误差/%
整车	0.360	0.357	0.84

3.2 整车压力分析

对于高速稳态运行的列车组,迎风车车头的最前端是空气压力作用最大的地方,气流速度几乎为 0。列车压力分布云图如图 3 所示。由列车周围流场数值模拟结果可知,列车表面压力系数最大值为 0.987。

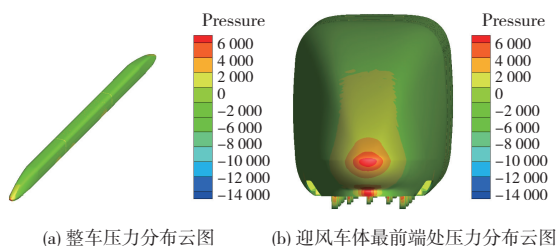
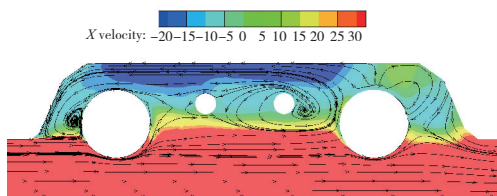


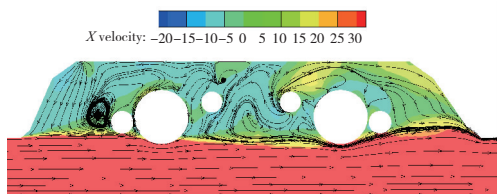
图 3 列车压力分布云图

3.3 转向架区域场分析

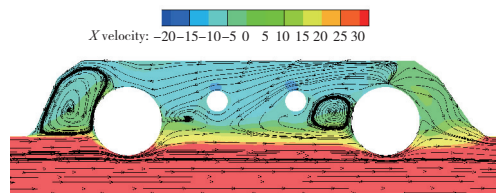
图 4 为转向架 1、3、5 区域在 $y=0$ mm 截面上的流线图。由图分析可知,各转向架区域流速呈现上小下大和进强出弱的趋势。根据图中流线分布,可知空气是从转向架正下方进入转向架区域,气流进入转向架区域后会在转向架前方和上方空间内减速并形成回流漩涡。由流场分析可初步得知,转向架构架、轴箱、电机的上表面以及转向架舱前后端板的表面容易形成积雪。



(a) 转向架1区域的流线图



(b) 转向架3区域的流线图



(c) 转向架5区域的流线图

图 4 转向架区域流线图

4 转向架积雪数值模拟与分析

4.1 入射粒子量计算

将列车下方地面划分成 11 个区域,其中高速列车正下方的 10 个区域作为入射器使用,具体如图 1(b)所示。根据式(4)和式(5)编写 UDF,计算地面卷雪条件下入射器的入射粒子量。由式(4)可知,入射器释放粒子数是临界剪切速度 u_{*t} 和壁面剪切速度 u_* 的函数,当临界壁面剪切速度 u_{*t} 一定时,随着壁面剪切速度 u_* 的增加,入射器粒子数增加。由数值模拟结果可知,入射粒子质量最大值发生在入射器 2 上,这是因为入射器 2 上的流场区域内流速大,在相同黏度条件下,入射器 2 表面的壁面剪切速度要大于其他入射器表面的壁面剪切速度,也导致入射器 2 的入射粒子量大于其他入射器的入射粒子量。图 5 为入射器单位时间内入射粒子质量图。

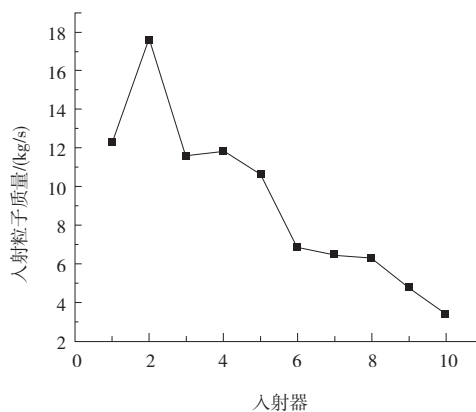


图 5 入射器单位时间内入射粒子质量图

4.2 工况设置

有文献说明我国降雪的雪粒密度在 $50 \sim 400 \text{ kg/m}^3$ 之间^[30-31],粒径在 1.5 mm 以内^[32]。为研究雪粒密度、直径以及转向架区域壁面捕获条件对积雪问题的影响,设置 11 个工况,具体如表 3 所示。

表3 工况设置

工况	雪粒密度/(kg/m ³)	雪粒直径/mm	壁面条件
1	250	0.2	捕获
2	200	0.2	Trenker
3	250	0.2	Trenker
4	300	0.2	Trenker
5	350	0.2	Trenker
6	400	0.2	Trenker
7	250	0.4	Trenker
8	250	0.6	Trenker
9	250	0.8	Trenker
10	250	1.0	Trenker
11	250	1.2	Trenker

4.3 壁面条件对转向架区域雪粒沉积的影响

根据数值模拟结果,分析壁面条件对转向架区域积雪情况的影响,发现 Trenker 边界条件下转向架区域捕获雪粒总数相比于捕获条件下减少 36.38%,其中电机表面雪粒沉积数减少 90.37%,轴箱表面雪粒沉积数减少 88.00%,构架表面雪粒沉积数减少 30.87%,转向架舱上方车体板件表面雪粒沉积数仅捕获条件下减少 2.61%,而空气弹簧安装座表面雪粒沉积数则增加 44.44%。其数量变化是因为 Trenker 边界条件考虑了临界沉积角度和临界沉积速度的作用。当雪粒撞击角度大于临界沉积角度时,雪粒被反弹,同时转向架区域内空气流速呈现由下往上逐渐减小的趋势,转向架区域内车体板件和空气弹簧安装座周围空间内空气流速低,壁面剪切速度小,雪粒更容易稳定沉积,电机和轴箱表面空气流速高,沉积的雪粒容易在气流的剪切作用下脱离电机和轴箱表面。Trenker 准则边界条件和捕获边界条件相比,考虑雪粒撞击后可能出现的反弹、沉积和剪切现象,而捕获边界条件仅考虑沉积现象,与实际问题不符,因此以下的研究均采用 Trenker 准则边界条件。

如图 6 所示(本刊黑白印刷,相关疑问咨询作者),在地面存在积雪时,高速列车行驶过程中转向架 1 区域内未发生积雪问题,这是因为在风致雪运动理论中假设雪粒脱离雪层表面时,仅有垂直方向的运动速度,该速度值为 10^{-2} 的量级,和流场速度相差较大,当雪粒在水平方向运动至转向架 1 区域下方时,其垂直方向运动高度低于转向架 1 区域和地面之间高度。

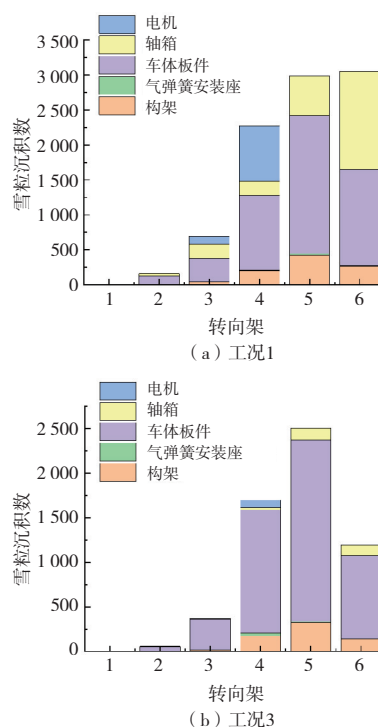


图6 壁面条件对各转向架区域雪粒沉积数影响

4.4 雪粒密度对转向架区域雪粒沉积的影响

当雪粒密度增加时,雪粒数量减少,进入转向架区域内的雪粒数量减少,转向架区域内雪粒沉积数量也减少。根据图 6(b)和图 7(a)—图 7(d)可知,不同密度工况下,积雪最严重的区域都是转向架 5 区域,该区域内雪粒沉积数量分别占其工况内各转向架区域捕获雪粒总数的 44.09%、42.99%(工况 3)、51.50%、39.95%和 47.34%;不同密度工况下,积雪最严重的部件是转向架舱上方的车体板件,其雪粒沉积数占比分别为 79.80%、81.41%(工况 3)、83.22%、84.26%和 86.56%,其随着密度增加而增加,而其雪粒沉积数分别为 4 898、4 744、3 844、3 305 和 2 648。其随着密度增加而减少,如图 7(e)、图 7(f)所示。

4.5 雪粒直径对转向架区域雪粒沉积的影响

随着雪粒直径的增加,转向架区域积雪数量呈现先降后增的变化趋势。此时雪粒运动由图 8(a)—图 8(e)可知,不同工况内转向架舱上方车体板件雪粒沉积数分别占雪粒沉积总数的 81.41%(工况 3)、86.85%、88.55%、86.62%、77.85%以及 74.42%。随着粒径增加呈现先增后减的趋势,但车体板件雪粒沉积数分别为 4 744、1 743、1 338、1 017、1 065 和 1 385,呈现先降后增的变化趋势,和转向架区域雪粒沉积总数变化趋势一致,如图 8(f)、图 8(g)所示。

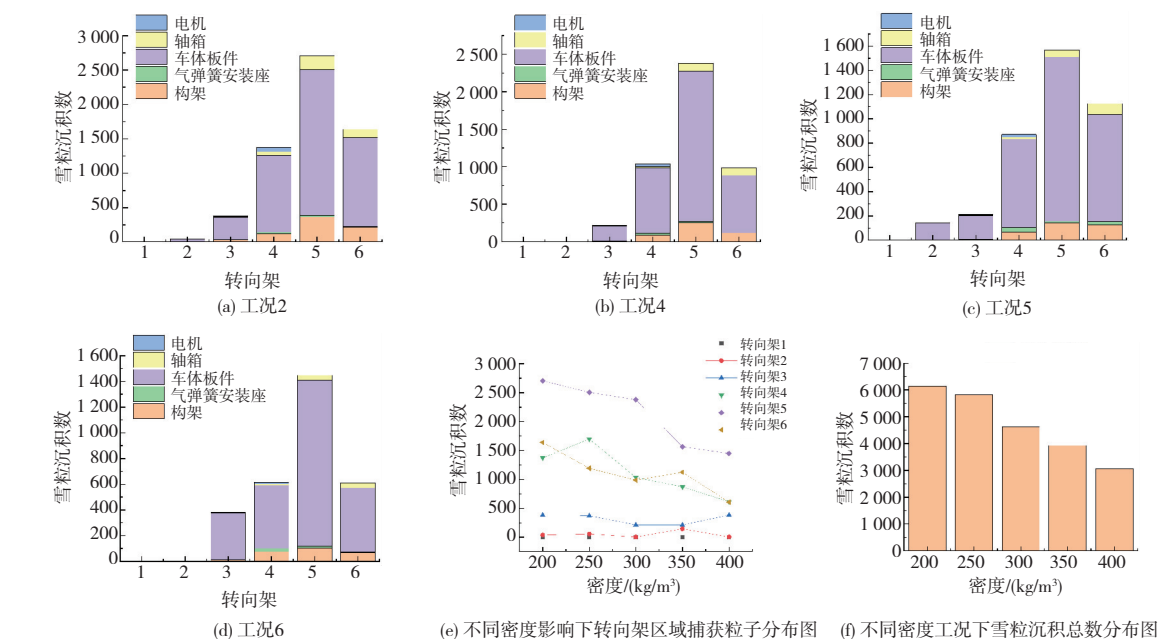


图7 不同密度影响下转向架区域雪粒沉积情况分布图

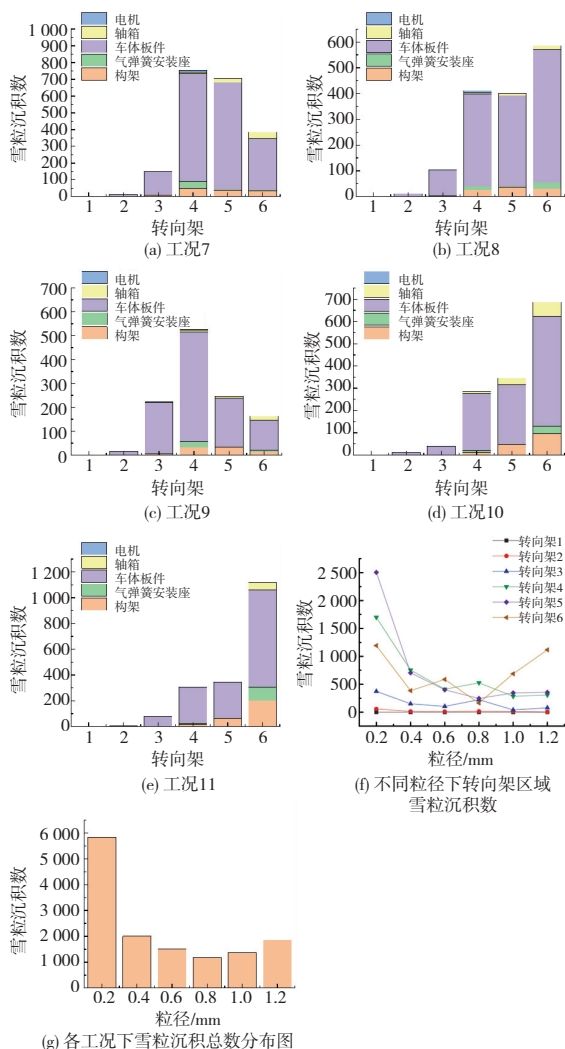


图8 不同直径影响下转向架区域雪粒沉积情况分布图

5 结语

本文基于欧拉-拉格朗日方法,对地面积雪条件下高速列车转向架区域积雪问题进行数值模拟,同时本文也通过设置不同的工况来研究雪粒密度、雪粒直径和壁面条件对转向架区域雪粒沉积数量的影响,得出以下结论。

1) 由于转向架结构的复杂性,进入转向架区域的空气会在转向架的各部件之间形成大小不一的涡流,转向架区域内空气流速呈现上小下大和进强出弱的趋势。

2) 随着雪粒密度的增加,转向架区域雪粒沉积总数逐渐减少;随着雪粒粒径的增加,转向架区域雪粒沉积总数呈现先减少后增加的趋势;雪粒密度增加时,转向架舱中车体板件上雪粒沉积数量逐渐减少,雪粒直径增加时,其呈现先降后增的趋势,即车体板件上雪粒沉积数量和转向架区域雪粒沉积总数的变化趋势一致。

3) 无论工况如何变化,转向架区域雪粒沉积最严重的部位均是转向架舱上方的车体板件;头车转向架区域积雪现象均发生在转向架2区域内,中车和后车各转向架区域积雪问题严重,这也为本文的后续研究提供了数值依据。

参考文献:

- [1] 韩运动,陈大伟,刘韶庆,等. 不同风速风向条件下的列车风特性[J]. 中国铁道科学, 2018, 39(6): 104-111.

- [2] 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.
- [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] 王爽. 某型动车组转向架撒砂装置螺纹连接系统安全可靠研究[J]. *铁道学报*, 2019, 41(11): 36-41.
- [5] KOSINSKI P, HOFFMANN A C. An Eulerian - Lagrangian model for dense particle clouds [J]. *Computers & Fluids*, 2007, 36(4): 714-723.
- [6] 陈哲明, 梁丹丹, 张峻领. 高寒地区高速列车制动性能仿真研究[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2018, 37(9): 128-134.
- [7] KLOOW L, JENSTAV M. High-speed train operation in winter climate [J]. *Foreign Rolling Stock*, 2015, 52(1): 1-10.
- [8] 韩运动, 姚松, 陈大伟, 等. 高速列车转向架舱内流场实车测试与数值模拟[J]. *交通运输工程学报*, 2015, 15(6): 51-60.
- [9] 谢菲, 高广军, 何侃, 等. 基于 DPM 模型的高速列车转向架区域风雪流数值模拟[J]. *铁道科学与工程学报*, 2023, 20(8): 2814-2823.
- [10] 娄振. 高速列车转向架区域积雪结冰数值模拟研究[D]. 成都:西南交通大学, 2021.
- [11] PAULUKUHN L, WU X. The low temperatures technology concepts and operational experience in Russian high-speed train Velaro RUS [J]. *Foreign Rolling Stock*, 2012, 49(3): 16-19.
- [12] LATORRE IGLESIAS E, THOMPSON D J, SMITH M G. Component-based model for aerodynamic noise of high-speed trains [M]//Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015: 481-488.
- [13] XIE F, ZHANG J, GAO G, et al. Study of snow accumulation on a high-speed train's bogies based on the discrete phase model [J]. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 2017, 10(6): 1729-1745.
- [14] 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.
- [15] 李超辉, 何德华, 周新建, 等. 高寒动车组走行部防冰雪扰流的空气动力学性能研究[J]. *铁道机车车辆*, 2016, 36(4): 28-33, 37.
- [16] 蔡华闽. 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.
- [17] ANDERSSON E. Green train: concept proposal for a scandinavian high-speed train: final report, part B [M]. [S.l.:s.n.], 2012.
- [18] 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.
- [19] 蔡路, 李田, 张继业. 高速列车转向架雪粒沉积特性数值研究[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2020, 54(4): 804-815.
- [20] 王东屏, 尤明, 范军, 等. 高速动车组转向架积雪特性数值仿真及优化设计[J]. *铁道学报*, 2019, 41(4): 25-32.
- [21] 马高生, 黄宁. 风雪流临界起动风速的研究[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2006, 42(6): 130-134.
- [22] 时光磊. 风吹雪跃移和悬移运动的综合模型[D]. 兰州:兰州大学, 2018.
- [23] HEYWOOD H. The physics of blown sand and desert dunes [J]. *Nature*, 1941, 148: 480-481.
- [24] SHAO Y P, LI A. Numerical modelling of saltation in the atmospheric surface layer [J]. *Boundary - Layer Meteorology*, 1999, 91(2): 199-225.
- [25] SUGIURA K, MAENO N. Wind-tunnel measurements of restitution coefficients and ejection number of snow particles in drifting snow: determination of splash functions [J]. *Boundary - Layer Meteorology*, 2000, 95(1): 123-143.
- [26] 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.
- [27] WANG J, 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.
- [28] TRENNER M, PAYER W. Investigation of snow particle transportation and accretion on vehicles [C]//24th AIAA Applied Aerodynamics Conference. San Francisco, California. Reston, Virginia: AIAA, 2006: 3648.
- [29] 余以正, 滕万秀, 孙健, 等. 裙板对列车空气动力学阻力及转向架积雪结冰性能的综合影响[J]. *大连交通大学学报*, 2019, 40(2): 84-88.
- [30] 戴礼云, 车涛. 1999—2008 年中国地区雪密度的时空分布及其影响特征[J]. *冰川冻土*, 2010, 32(5): 861-866.
- [31] 黄慰军, 黄镇, 崔彩霞, 等. 新疆雪密度分布研究[J]. *中国农业气象*, 2007, 28(4): 383-385, 388.
- [32] 周石砾, 中尾正义, 桥本重将, 等. 湿雪的密实化与颗粒粗化过程研究[J]. *冰川冻土*, 2002, 24(3): 275-281.

收稿日期: 2023-04-06