文章编号:1674-2974(2024)02-0121-11 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024151

# 高速列车转向架结冰特性风洞实验研究

赵长龙[1,3],王田天[1,2],冯永华[3],周果[2†],薛源[3],王钰[1],施方成[2],姜琛[1]
(1. 中南大学 交通运输工程学院,湖南 长沙 410075;
2. 湖南大学 机械与运载工程学院,湖南 长沙 410082;
3. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司,山东 青岛 266111)

**摘 要**:风雪严寒环境导致转向架区域冰雪大量堆积,严重威胁高速列车行驶安全.为分析风雪严寒天气下转向架的结冰特性,采用包含简化车体和动力转向架的缩比模型,在中南大学轨道车辆积雪结冰风洞开展了高速列车转向架结冰实验研究.采用喷水系统模拟制动夹钳周围融水产生的喷水现象,以再现轮对甩水致转向架结冰过程.研究转向架区域动态结冰过程和整体结冰分布特性、各关键区域的结冰质量占比权重以及转向架结冰速率模型.研究结果表明:轮对甩出的水滴受紊乱流场作用扩散至转向架各个区域,在低温下结冰并随时间迅速发展,直至整个转向架区域被冰层覆盖;对于转向架舱,其后端板结冰严重,结冰质量占转向架舱结冰总质量的28%;对于转向架,构架和制动夹钳区域结冰分布最多,分别占转向架结冰总质量的34%和22%,空气弹簧、横梁和纵梁结冰分布较少,转向架呈现出底部结冰量大、结冰形状复杂的特性.随着结冰时间增加,各区域结冰速率不同,转向架舱、转向架的结冰总质量与结冰时间呈一次函数关系.研究获得的转向架结冰特性和结冰速率模型,可对一定运行时间内转向架结冰质量快速预测提供参考依据,对风雪环境下高速列车安全运行和转向架防除冰具有重要指导意义.

**关键词**:高速列车;转向架;结冰特性;结冰速率模型;风洞实验
**中图分类号**:U238 **文献标志码**:A

# Wind Tunnel Experimental Investigations on Icing Characteristics of Bogies of High-speed Trains

ZHAO Changlong[1,3], WANG Tiantian[1,2], FENG Yonghua[3], ZHOU Guo[2†], XUE Yuan[3], WANG Yu[1], SHI Fangcheng[2], JIANG Chen[1]
(1. School of Traffic & Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410075, China;
2. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
3. CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao 266111, China)

**Abstract**: The alpine and snowy environment causes massive snow accumulation in the bogie regions, which

* **收稿日期**:2023-05-17
**基金项目**:国家重点研发计划资助项目(2020YFA0710904-02), National Key Research and Development Program of China (2020YFA0710904-02); 中国国家铁路集团有限公司系统性重大项目(P2021J036), Major Projects of China National Railway Group Limited (P2021J036).
**作者简介**:赵长龙(1978—),男,山东青岛人,中南大学博士研究生
† 通信联系人,E-mail: GuoZhou@hnu.edu.cn

seriously endangers the running safety of high-speed trains. To analyze the icing characteristics of bogies under the alpine and snowy weather, an experimental investigation on the icing of high-speed train bogies is conducted in the Icing-snowing Wind Tunnel (ISWT) of Central South University (CSU), using a scaled model containing a simplified train body and a motor bogie. A water-spray system is used to simulate the water-spraying phenomenon generated by the melt water around the brake calipers to reproduce the process of bogie icing due to water spraying from the wheels. The dynamic icing process and the overall icing distribution characteristics of the bogie regions, the ice mass weighting of each key region of the bogie and the icing rate model of the bogie are studied. The results show that the droplets thrown out by the wheels are spread to all regions of the bogie under the effect of the turbulent flow field, which generated icing at low temperatures and developed rapidly with time until the whole bogie region is covered with ice. For the bogie cabin, its rear end panel is seriously iced, and the icing mass accounts for 28% of the total icing mass of the bogie cabin; for the bogie, the frame and brake caliper regions have the highest ice distribution, accounting for 34% and 22% of the total icing mass of the bogie, respectively, while the ice distribution in the air spring, cross beam, and longitudinal beam is less. The bogie presents the characteristics of a large icing mass and a complex icing shape at the bottom. With the increase of icing time, the icing rate of each region is different, and the overall icing mass of the bogie cabin and bogie is a linear function of icing time. The bogie icing distribution characteristics and icing rate model obtained from the study can provide a reference basis for the rapid prediction of bogie icing mass within a certain operation time, which is of great significance to the safe operation of high-speed trains in alpine and snowy environments and bogie anti-icing/deicing.

**Key words**: high-speed train; bogies; icing characteristics; icing rate model; wind tunnel experiment

高速列车在风雪严寒环境运行时,道床上的积雪易被转向架与地面之间的强剪切流动卷入转向架区域,雪粒经历跟随、粘附和沉积等复杂过程,在转向架表面堆积[1-2].在转向架发热部件(如制动夹钳、电机等)的作用下,部分积雪融化成水滴,并滴落在旋转的轮对和制动盘上,扩散至转向架各个区域,形成甩水现象[3].四处飞溅的液滴致使转向架表面湿度增加,雪粒更容易粘附到转向架表面,加剧转向架积雪结冰.转向架结冰不仅增加列车轴重,严重时甚至引起制动系统失效,威胁列车运行安全[4-5].

针对转向架积雪结冰问题,国内外学者开展了大量研究.Shishido 等[6]研究发现转向架区域的积雪主要来自于列车底部或侧面,且认为轮对旋转对转向架区域的积雪分布具有重要影响.Xie 等[7]基于离散相模型,预测了高速列车转向架区域雪粒的运动轨迹,揭示了雪粒在转向架上的分布情况.Wang 等[8]分析了雪粒进入转向架区域的运动过程和机理,探明了轮对旋转效应对风雪运动的影响.Bae 等[9]通过建立雪粒起跳的跃移模型,模拟了多车编组列车转向架区域的积雪,总结出积雪在第三节车厢后保持稳定的规律.Wang 等[10]采用滑移网格技术,再现了列车通过积雪道床的场景,并分析了列车风卷雪机理.冯永华等[11]研究了高寒列车转向架区域空气流场特性,总结了形成积雪的可能原因,为转向架防积雪的优化工作提供依据和基础.何德华等[12]和王东屏等[13]通过设计流线型扰流板的防冰雪方案,成功减少了转向架区域的雪粒黏附数量,提升了转向架防结冰能力.

以上文献研究了雪粒在转向架区域的运动轨迹和分布,但是没有涉及结冰相变过程.近年来,关于高速列车轮对甩水致转向架结冰的研究才被报道.Liu 等[3]采用欧拉-拉格朗日耦合数值模拟方法研究了轮对甩水对高速列车转向架区域结冰的影响,发现水滴聚集在制动夹钳处,易导致大量结冰.娄振等[14]采用液膜模型研究制动盘甩出的水滴在转向架表面及转向架舱的沉积,总结了水滴在转向架各区域的分布特性.除了数值模拟,风洞实验也被用于开展转向架积雪结冰领域的研究.Allain 等[15]在法国气候风洞开展了列车车底积雪实验研究,采用 1∶2 的列车缩比模型,探究了风速、气流温度和雪粒特性等

不同参数对积雪结冰增长和分布的影响.Shon 等[16]和 Ji 等[17]在维也纳的小型气候风洞开展了比例为2:3的转向架积雪实验,并以此验证了数值模拟方法的正确性.Liu 等[18]在风洞中模拟了转向架周围粒子运输过程,评估了转向架底部不同防护方案的效果.Wang 等[19]和 Zhang 等[20]在中南大学开展了列车转向架积雪结冰实验,提出防结冰设计,并通过对比实验讨论了其效果;然而,这仅是为检验所设计方案的性能,并没有进行足够的研究来定量分析转向架的结冰特性.

综上所述,仅有少数学者开展了转向架结冰实验研究,高速列车转向架区域的结冰分布特性有待进一步探究,列车长时间运行条件下转向架的结冰速率尚不明确.因此,本文将开展高速列车轮对甩水致转向架结冰风洞实验,分析转向架区域的动态结冰过程,探明转向架区域结冰分布特性,建立转向架结冰速率公式,为转向架结冰质量快速预测提供参考依据.

## 1　转向架轮对甩水致结冰风洞实验

### 1.1　积雪结冰实验风洞系统

本研究在中南大学轨道车辆积雪结冰风洞开展[1].如图 1 所示,该风洞是专门为轨道车辆转向架积雪结冰实验所设计的闭路风洞,包括制冷系统、动力段、整流段和实验段.制冷系统可以将空气温度下降至 0 ℃以下,并由动力段的风扇高速旋转将冷空气输送到实验段.本次实验在实验段进行,实验段的喷口尺寸为 4 m×1 m,最大风速可达 100 km/h.在制冷系统的作用下,整个风洞的最低温度可达-20 ℃.实验前对风洞实验段进行了流场标定,并评价了风洞流场品质,达到了《低速风洞和高速风洞流场品质要求》(GJB 1179A—2012)中规定的要求[21].因此,该风洞系统可再现转向架区域的流场特性,满足本次研究的要求.

### 1.2　实验模型

本研究采用缩比尺寸为 1:3 的某高速列车动力转向架,其基本结构如图 2(a)所示,除了部分线路、管路被简化外,转向架的主要结构均被保留,以准确再现转向架区域流场.此类转向架包含电机和齿轮箱等动力装置.列车在风雪环境下运行时,这些关键

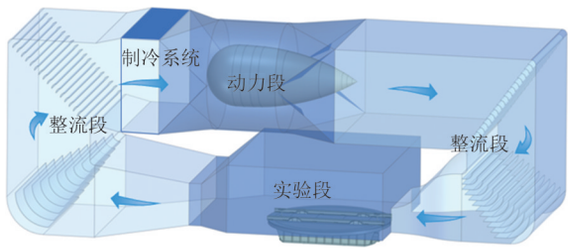
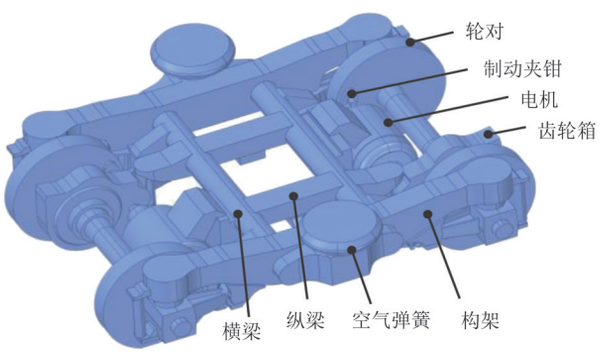


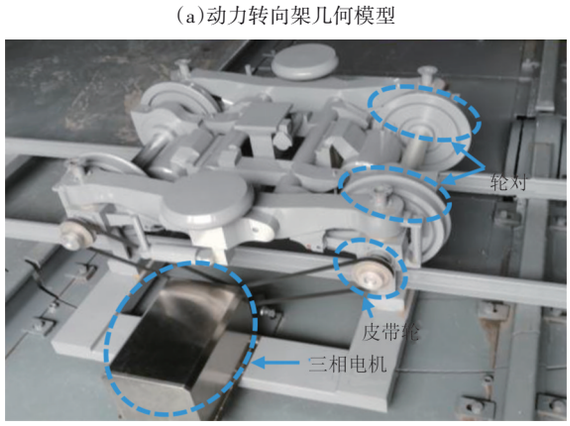

图 1　风洞系统组成

Fig.1　Wind tunnel system components

零部件区域容易受到风雪侵扰并产生结冰.为实现转向架轮对的旋转,采用三相变频电机作为动力源,通过皮带轮带动转向架的轮对转动,动力装置如图 2(b)所示.




(a)动力转向架几何模型




(b)转向架动力装置

图 2　动力转向架模型

Fig. 2　Motor bogie model

为了模拟列车运行时转向架周围车体边界,制作了车体模型,如图 3 所示.本次实验主要对转向架以及车体底部(转向架舱)的结冰特性进行研究,车体的上部被适当简化[19-20],但是保留了车体底部以及前、后端板等主要部分,以准确模拟转向架区域的真实流场特性.此外,根据实际轨道参数,还制作了相应的轨道模型.考虑到风洞实验的地面效应,将实验地板进行了一定程度的抬高.



图3 车体模型

Fig. 3 Train body model

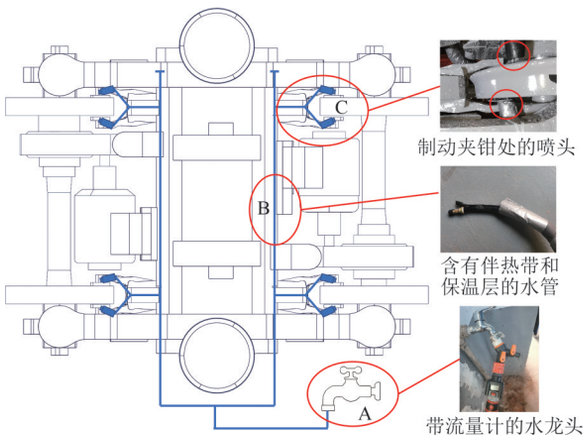



图4 喷水系统布局示意图

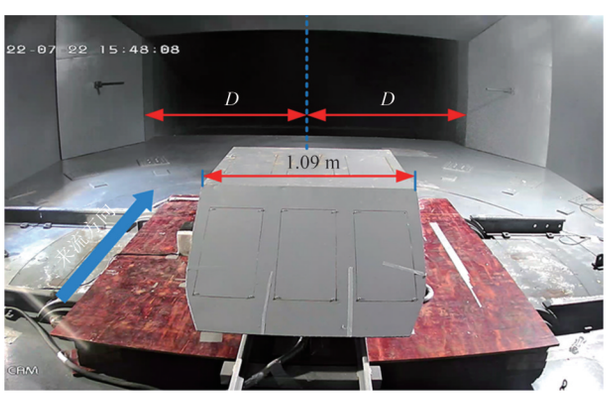
Fig. 4 Water-spray system layout schematic

### 1.3 实验设置

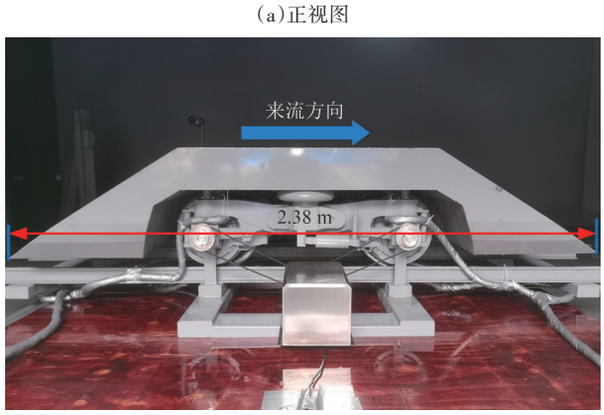
本次实验需在低温环境下开展。根据冬季东北地区高速列车运行条件,实验初始阶段通过制冷系统将整个风洞温度调整为-15 ℃左右,再由动力段风扇驱动系统高速旋转,产生持续恒定的低温气流.在冬季运行时,根据停站的需要,列车存在不同的运行工况,包括加速、匀速、制动、停止等阶段,共同组成一个运行周期.为探究转向架结冰分布特性,该实验对列车运行工况进行适当简化,在整个实验期间,列车轮对的转速保持恒定.风洞实验段喷口风速设置为 27.78 m/s,对应 100 km/h.调节电机频率值为 83 Hz,使轮对旋转速度与风速相匹配.

为模拟列车制动时制动夹钳周围融水产生的喷水现象以及轮对高速旋转时液滴四处飞溅的情况,设计了如图4所示的喷水系统.该喷水系统共包含8个喷头,分别安装在4个制动夹钳的两侧.喷水总流量由一端的总阀控制,并通过电子流量计显示读数.根据Wang等[19]和Zhang等[20]喷水流量的选取依据,考虑到本文采用的是缩比模型,喷水总流量设计为1.3 L/min.为防止低温环境下喷水管道和喷头结冰导致的喷水流量下降,采用电加热带和保温材料包裹水管,并在整个实验阶段都开启加热功能.在冬季风雪环境下,列车匀速行驶阶段会采取间歇制动以保持制动能力[19],因此,喷水系统在整个实验过程中都保持工作.

实验准备阶段,将转向架及车体模型安装在风洞实验段中间位置,以确保来流能够均匀地流过实验模型,整体布置如图5所示.实验温度和实验风速达到实验条件时开始实验,设置电机参数,带动转向架轮对以特定速度旋转,同时启动喷水系统.实验设定运行时间结束后,收集整理实验结果.




(a)正视图




(b)侧视图

图5 实验模型布置

Fig. 5 Experimental model layout

### 1.4 实验数据处理

实验结果分为定性结果和定量结果两部分.定性实验结果包括实验过程中转向架舱和转向架表面动态结冰过程和最终结冰分布,定量实验结果包括转向架舱和转向架表面各区域的结冰质量和结冰速

率.为了获得定性实验数据,实验时将两台分辨率为1 920×1 080的防雾高清摄像机布置在转向架两侧,从转向架左右侧面进行录像,确保可靠捕捉到转向架表面完整的结冰过程.每次实验结束后,通过相机拍照来记录转向架区域的结冰分布情况.为准确表征转向架表面的结冰分布特性,分别根据不同部位和不同部件[20],将转向架舱和转向架表面分别划分为不同区域,统计每个区域结冰质量,如图6所示.根据转向架各区域的结冰质量,可判断风雪环境运行时转向架结冰的严重程度,为防结冰方案的设计提供参考.

## 2　重复性实验

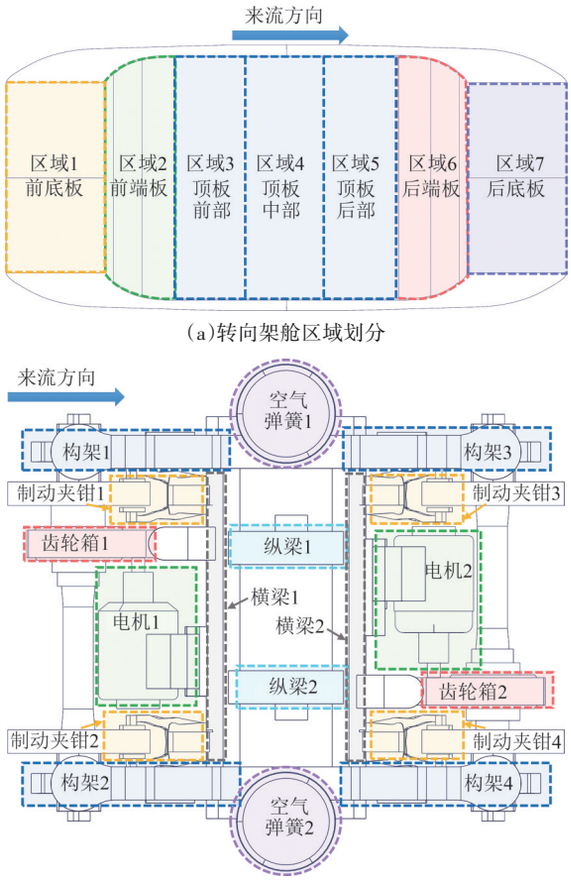
为验证实验的可靠性,进行三次重复性实验,每次实验结冰时间设定为40 min.实验结束后,根据图6划分的区域分别收集并测量转向架舱表面和转向架表面的结冰质量,并进行数据分析.

转向架舱及转向架各个区域的结冰质量及总质量结果如表1和表2所示.引入相对实验误差[19],其计算公式如下:

$$D = \left| M - M_a \right| / M_a \times 100\% \tag{1}$$

式中,$D$表示实验误差,$M$表示每次实验的结冰质量,$M_a$表示3次实验结冰质量的平均值.

从表1和表2可以看出,3次实验中转向架舱和转向架各个区域的结冰质量呈现出一致的分布趋势.且由于3次实验中总的喷水量相同,3次实验所收集的结冰总质量十分接近,转向架舱、转向架的结冰总质量最大误差分别为1.42%和2.88%.实验结果说明该实验重复性良好,满足本次实验的要求,同时表明了该实验系统可靠且实验设计等各方面具有合理性和可行性.




(a)转向架舱区域划分

(b)转向架区域划分

图6　转向架和转向架舱结冰收集分区示意图

Fig. 6　Schematic of ice collection regions for bogie and cabin

## 3　转向架结冰特性

### 3.1　转向架区域动态结冰过程

本次实验在一定程度上还原了高速列车转向架

表1　转向架舱各个区域结冰质量重复性结果

Tab.1　Repeatability results for icing mass in each region of the bogie cabin

| 实验次数/区域 | 区域1/kg | 区域2/kg | 区域3/kg | 区域4/kg | 区域5/kg | 区域6/kg | 区域7/kg | 总质量/kg | 总质量实验误差/% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 第一次实验 | 0.00 | 0.83 | 0.61 | 0.69 | 0.90 | 1.34 | 1.06 | 5.43 | 0.80 |
| 第二次实验 | 0.00 | 1.06 | 0.49 | 0.62 | 0.77 | 1.60 | 0.88 | 5.42 | 0.62 |
| 第三次实验 | 0.00 | 1.09 | 0.49 | 0.54 | 0.80 | 1.50 | 0.89 | 5.31 | 1.42 |

表2　转向架各个区域结冰质量重复性结果

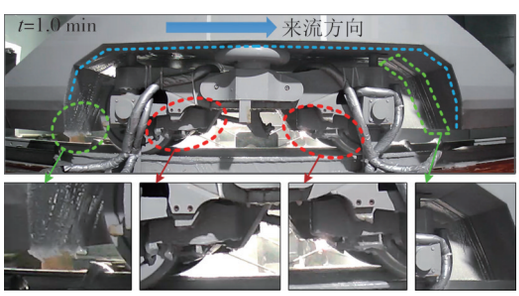
Tab.2　Repeatability results of icing mass for each region of the bogie

| 实验次数/区域 | 构架/kg | 制动夹钳/kg | 空气弹簧/kg | 电机/kg | 齿轮箱/kg | 横梁/kg | 纵梁/kg | 总质量/kg | 总质量实验误差/% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 第一次实验 | 1.79 | 1.02 | 0.30 | 0.57 | 0.94 | 0.37 | 0.30 | 5.29 | 2.88 |
| 第二次实验 | 1.90 | 1.22 | 0.42 | 0.50 | 0.83 | 0.42 | 0.24 | 5.53 | 1.53 |
| 第三次实验 | 1.91 | 1.34 | 0.38 | 0.44 | 0.79 | 0.37 | 0.29 | 5.52 | 1.35 |

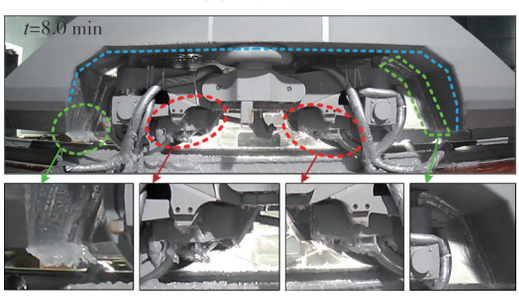
的真实动态结冰过程.图7为结冰时间40 min工况下,每间隔8 min转向架区域的结冰特性.整体上,转向架区域的结冰和冰柱随结冰时间增加而迅速发展,不同部位的冰块展现出不同的形状、大小,直至整个转向架区域都被冰层覆盖.

对于转向架舱,在前、后端板处能够清晰观察到形成的块状冰和条带状冰,并且随时间增加结冰形态变得更加明显,如图7绿色虚线区域所示.前者是由于前轮对甩出的水滴沿着前端板流出,在前方来流作用下形成,后者则是后端板处直接受到后轮对甩出水滴的冲击而形成,这与Wang等[19]和Zhang等[20]的研究结果一致.随着结冰时间的增加,紧贴车体底部的冰层逐渐变厚,如图7蓝色轮廓线所示.以上分析表明列车运行时,轮对高速旋转甩出的水滴在紊乱流场作用下四处飞溅,导致车体底部大量结冰.

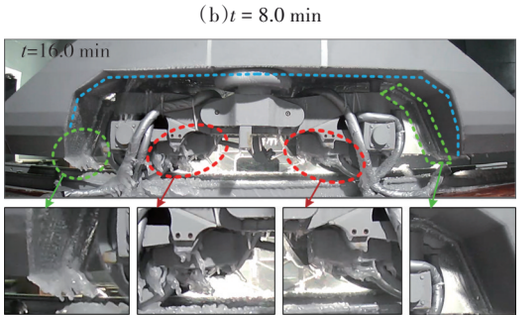
对于转向架局部区域,随结冰时间的增加,转向架的构架、轴箱、旋转臂表面覆有层冰.在第24 min以后,空气弹簧表面的结冰量基本不再改变,水滴开始沿着其表面滴落,在低温作用下形成细小的冰柱.如图7红色虚线区域所示,由于制动夹钳靠近轮对,其结冰情况更为严重,造成大量不规则结冰堆积.



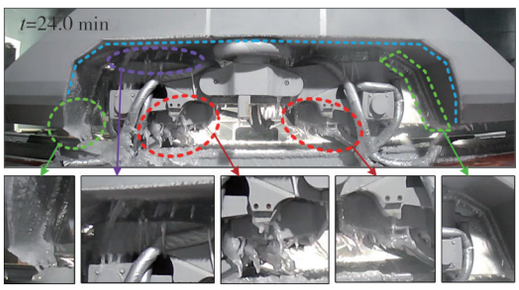
(a)$t$ = 1.0 min



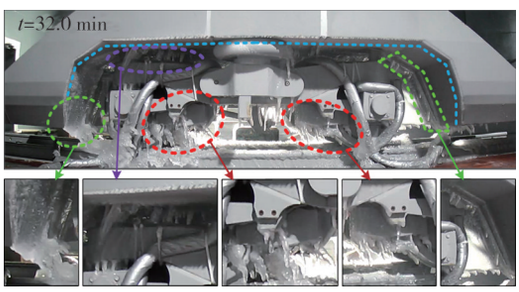
(b)$t$ = 8.0 min



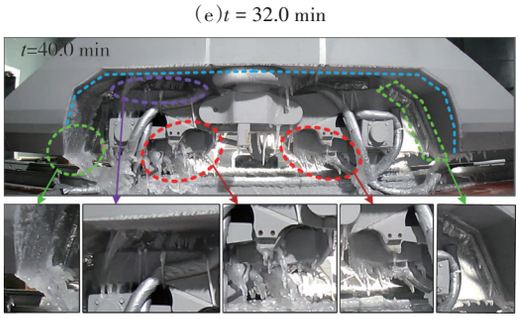
(c)$t$ = 16.0 min



(d)$t$ = 24.0 min



(e)$t$ = 32.0 min



(f)$t$ = 40.0 min

图7 转向架区域的动态结冰过程

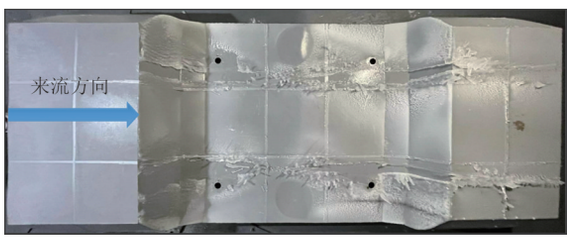
Fig.7 Dynamic icing process in the bogie region

转向架区域的结冰形态在一定程度上反映了车体底部的流场特性。如图7(d)~图7(f)紫色虚线区域所示,冰柱向前倾斜,表明该区域形成一个回流,气流方向与来流方向相反.对于转向架底部以及前、后端板,冰柱向后倾斜,说明转向架底部的气流直接从前往后流动.这导致轮对甩出的水滴跟随气流流动,大部分聚集在转向架后部和转向架舱的后端板处.

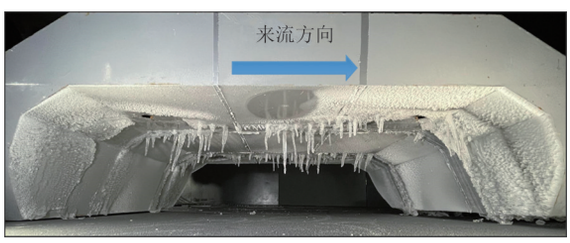
### 3.2 转向架结冰分布特性

该小节对转向架区域的最终结冰分布特性,包括转向架舱、转向架各个区域的结冰分布和结冰质量进行详细分析.图8给出了实验时间为40 min时,转向架舱的最终结冰分布.从图8(a)可以看出,由于

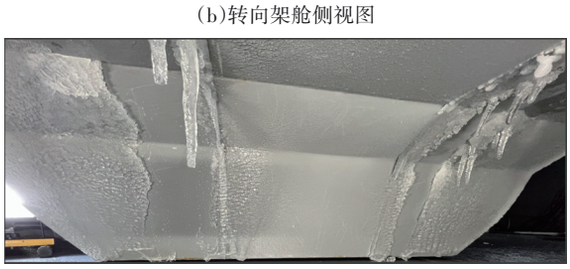
来流的作用,转向架舱前底板没有发生结冰,结冰主要集中在前底板以后的区域.图8(b)展示了整个转向架舱有大量结冰产生.图8(c)、图8(d)显示前、后端板的结冰以块状为主,且后端板的结冰量大于前端板.转向架舱顶板表面呈水平方向,其结冰以柱状为主,水滴沿着来流方向在轮对正对位置两侧形成多个长短不一的冰柱.



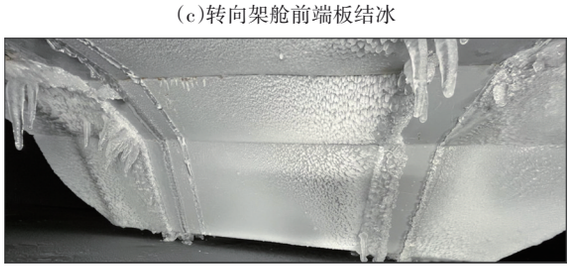

(a)转向架舱仰视图




(b)转向架舱侧视图



(c)转向架舱前端板结冰

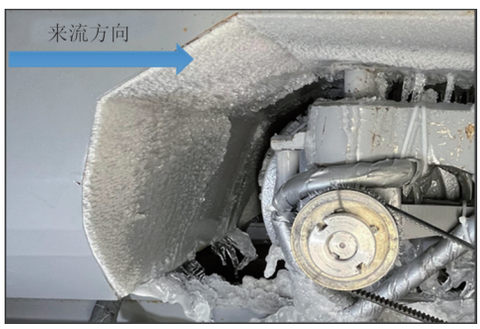


(d)转向架舱后端板结冰

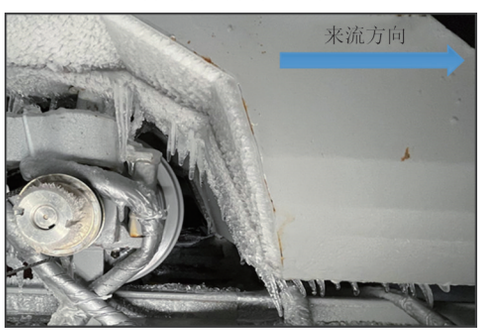
图8　转向架舱整体结冰分布特性

Fig. 8　Overall icing distribution characteristics of the bogie cabin

图9展示了转向架舱前、后端板的结冰特性.由于正面轮对前、后端板形成了较厚的结冰.在来向气流的作用下,从轮对甩出的水滴沿着端板流出,在前端板底部形成体积较大的冰块,而后端板的水滴则流向后底板,形成多个向后倾斜的冰柱.列车在实际运行过程中,聚集在车底的结冰会逐渐增加,并且靠近轮对.这不仅增加了列车的重量,掉落的冰块还会威胁到车下设备,对列车运行环境造成不利影响[22].




(a)转向架舱前端板结冰特性




(b)转向架舱后端板结冰特性

图9　转向架舱前、后端板结冰特性

Fig. 9　Icing characteristics of the front and rear end panels of the bogie cabin

图10显示了转向架整体以及部分区域的结冰分布特性.构架、制动夹钳和空气弹簧是结冰较为严重的区域.由于构架靠近转向架舱顶板,从顶板流下的水滴不断形成冰柱,并填满构架与顶板之间的间隙,如图10绿色线框区域所示.制动夹钳靠近电机、齿轮箱和横梁等部件,空间相对狭窄,水滴更容易粘附在其表面并迅速积聚,结冰几乎覆盖了整个制动夹钳,在其底部更是悬挂了多个向后倾斜的冰柱.部分水滴来不及结冰,沿着已经凝结的冰柱不断生长,甚至接触到地面,如图10红色线框区域所示.当制动夹钳结冰时,其制动效率降低,导致制动失效,直接威胁列车的运行安全.空气弹簧表面覆盖了结冰以及悬挂的冰柱.值得注意的是,在空气弹簧下部及周边均有结冰,如图10蓝色线框区域所示,这无疑会阻碍空气弹簧的有效行程.除此之外,在齿轮箱和电机的迎风面也观察到大量结冰.

为了定量分析转向架区域的结冰分布特性,收集了转向架舱和转向架各个区域的冰块并测量其质量.转向架舱各区域结冰质量如图11所示.可以看

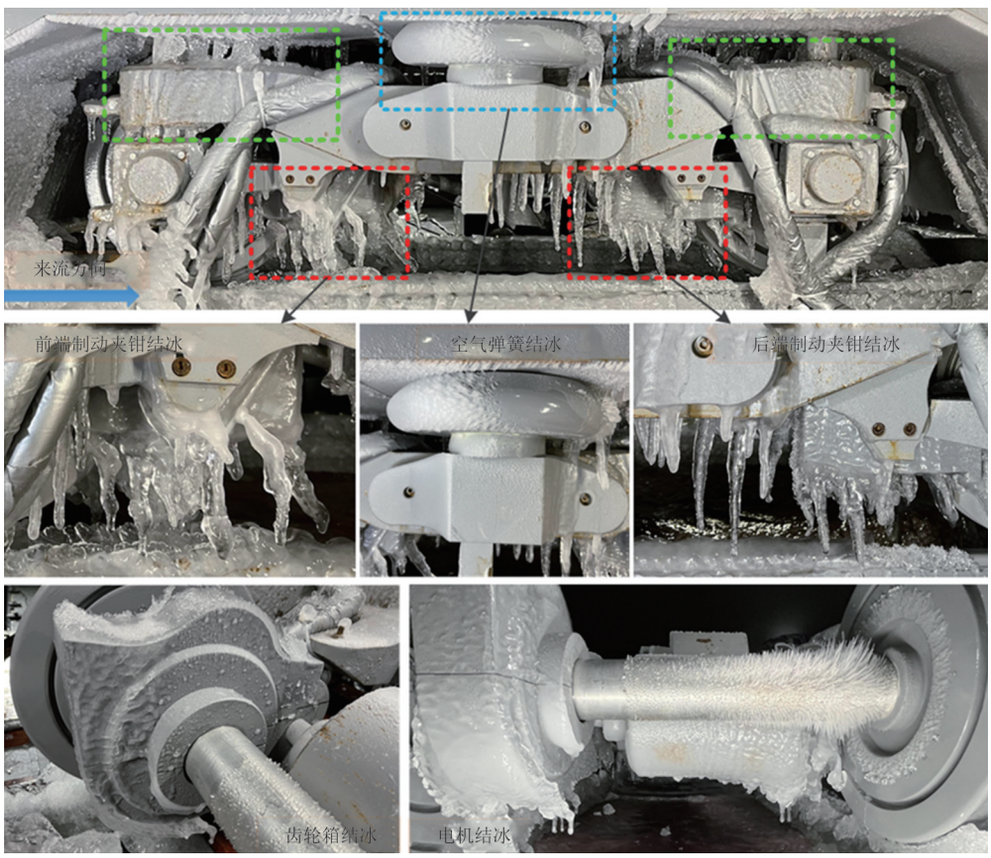
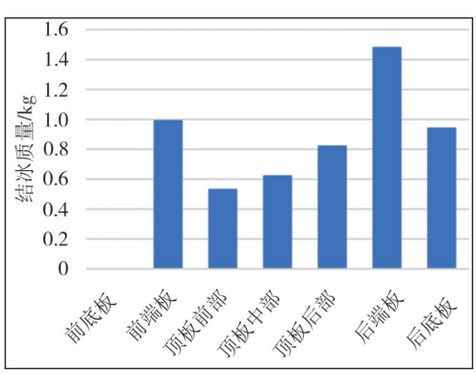



图 10 转向架整体及部分区域结冰特性

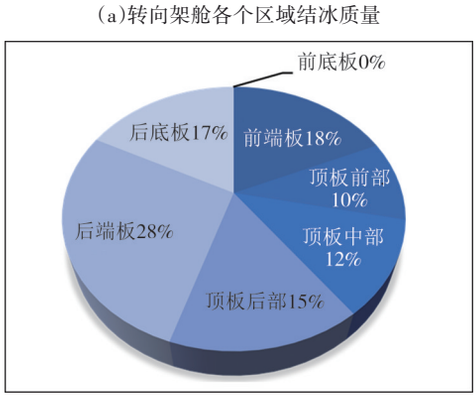
Fig. 10 Icing characteristics of the whole bogie and some regions

出:整个转向架舱中,后端板的结冰质量较大,占结冰总质量的28%,这与之前的分析较为符合.其次是前端板的结冰质量,占结冰总质量的18%.转向架舱顶板的结冰质量之和占结冰总质量的37%,这是由于顶板所覆盖的面积最大,从轮对甩出的水滴和跟随流场运动的水滴易粘附到该区域.在顶板区域,顶板后部的结冰质量仍要大于顶板前部,这与转向架舱整体的结冰分布特性一致.

图12给出了转向架各个区域的结冰质量.结果显示:构架和制动夹钳区域的结冰质量最大,分别占转向架结冰总质量的34%和22%.一方面,构架的表面积占比大,容易粘附更多的水滴.另一方面,构架表面存在凹陷处,水滴易在这些区域聚集并不断形成冰块,从而导致构架结冰严重.对于制动夹钳,其正面轮对,从轮对甩出的水滴是其结冰的主要原因.齿轮箱和电机的结冰也较为严重,分别占结冰总质量16%和9%.由于空气弹簧、横梁和纵梁分布在转向架上半部分,水滴难以在这些区域聚集,结冰量相对于其它区域较少.转向架的整体结冰分布特性揭



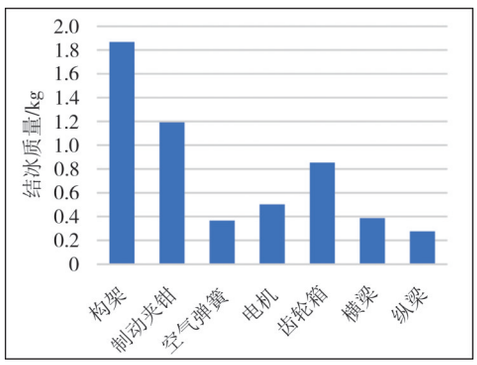

(a)转向架舱各个区域结冰质量



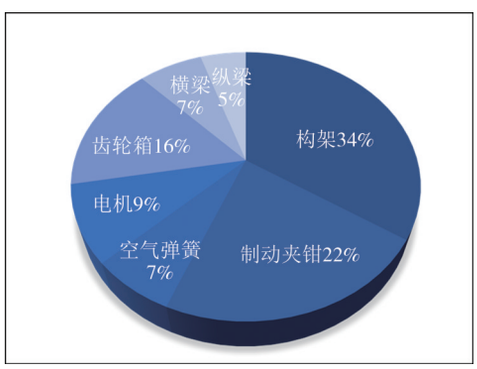

(b)转向架舱各个区域结冰质量百分比

图 11 转向架舱结冰质量分布

Fig. 11 Icing mass distribution in the bogie cabin




(a)转向架各个区域结冰质量




(b)转向架各个区域结冰质量百分比

图 12　转向架结冰质量分布

Fig. 12　Bogie icing mass distribution

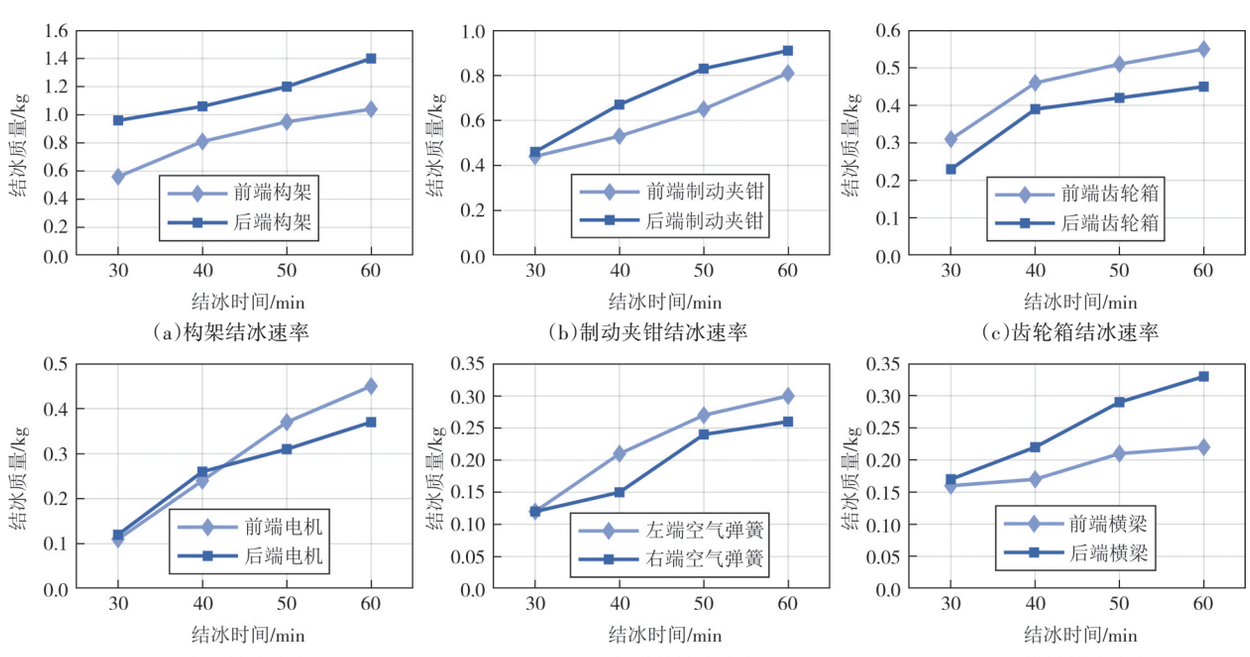
示了列车在运行过程中容易受到冰雪侵蚀的部位,为转向架有针对性防结冰和回库融冰提供了参考.

根据上述定性和定量分析得出如下结冰分布特性:转向架舱呈现出后部结冰大于前部的分布规律;对于转向架,由于水滴不断往底部流动聚集,在制动夹钳、电机和齿轮箱底部形成厚大的冰块和长短不一的冰柱,呈现出底部结冰量大、结冰形状复杂的特点.整个转向架区域的结冰呈现出底部多于上部,后部多于前部的分布特性.

### 3.3　转向架结冰速率模型

已有关于转向架结冰的实验研究主要集中在单一结冰时间下的结冰分布特性和防结冰装置设计[19-20],并未考虑结冰速率.列车长时间运行过程中,转向架表面结冰不断增加[22],可能引起结冰分布特性改变.因此,明确不同结冰时间下转向架表面结冰质量,提出结冰速率预测模型,可为列车转向架针对性防除冰提供参考依据.为此,除了开展结冰时间为 40 min 的实验外,还分别开展了结冰时间为 30 min、50 min 和 60 min 的甩水实验,以更好地评估转向架的结冰速率特性.

图 13 给出了转向架各区域的结冰速率.由图 13 可知,各个区域的结冰质量随结冰时间的增加而增加,但是结冰速率不同.构架、制动夹钳和横梁呈现出后端结冰质量大于前端结冰质量的特点.前、后端齿轮箱的结冰速率保持一致,且前端齿轮箱的结冰质量大于后端.随着结冰时间的增加,前、后端电机的结冰质量呈现出从基本相等到前端大于后端的规律.由于转向架结构的中心对称,左、右端空气弹簧的结冰质量和结冰速率并不相等.



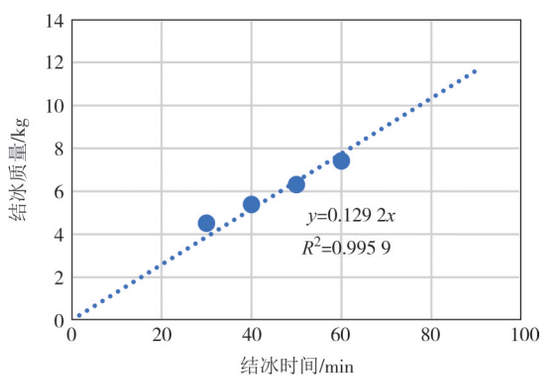

(a)构架结冰速率　(b)制动夹钳结冰速率　(c)齿轮箱结冰速率

(d)电机结冰速率　(e)空气弹簧结冰速率　(f)横梁结冰速率

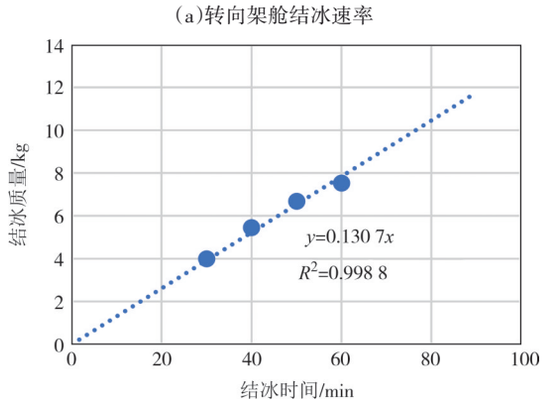
图 13　转向架各个区域结冰速率

Fig. 13　Icing rate of each area of the bogie

图 14 给出了转向架舱、转向架的整体结冰速率模型,并拟合得出了结冰速率公式.转向架舱结冰总质量 $y$ 与结冰时间 $x$ 之间的拟合公式为 $y$=0.129 2$x$,转向架结冰总质量 $y$ 与结冰时间 $x$ 之间的拟合公式为 $y$=0.130 7$x$.上述两个公式的决定系数 $R^2$ 分别为 0.995 9 和 0.998 8,表明该预测曲线的估计值与实验数据之间的拟合程度较高.以上拟合公式表明转向架舱、转向架的结冰质量随结冰时间呈现线性增加的趋势,在本实验结冰时间范围内结冰速率保持恒定.




(a)转向架舱结冰速率




(b)转向架结冰速率

图 14 转向架结冰速率模型

Fig.14 Icing rate model for bogies

由于本文结冰质量预测模型是基于 60 min 内的结冰时间获得,该预测模型对于长运行时间下转向架结冰质量的预测,还存在不足.在后续的研究中,可以进一步开展更长时间下的转向架结冰风洞实验,拓宽本文结冰质量预测模型的适用范围.

## 4 结 论

本文基于中南大学轨道车辆积雪结冰风洞开展了高速列车轮对甩水实验,分析探明了转向架舱、转向架的结冰分布特性,并拟合了结冰速率曲线,得出如下结论:

1)轮对甩出的水滴在紊乱流场作用下扩散至转向架各个区域并产生结冰,转向架舱呈现出后端结冰质量多于前端的结冰特性,转向架呈现出底部结冰量大、结冰形状复杂的特性.

2)对于转向架舱,其后端板结冰严重,结冰质量占转向架舱结冰总质量的 28%;对于转向架,其结冰主要分布在构架、制动夹钳、齿轮箱和电机底部,空气弹簧、横梁和纵梁等区域结冰较少,其中构架和制动夹钳结冰质量占比权重最高,分别为转向架结冰总质量的 34% 和 22%.

3)建立了一定运行时间范围内转向架结冰质量快速预测模型,转向架舱、转向架的结冰总质量与结冰时间呈一次函数关系,其结冰质量随结冰时间线性增长,为转向架结冰质量预测提供了参考依据.

## 参考文献

[1] GAO G J, ZHANG Y, WANG J B. Numerical and experimental investigation on snow accumulation on bogies of high-speed trains [J]. Journal of Central South University, 2020, 27(4): 1039-1053.

[2] CAI L, LOU Z, LI T, et al. Numerical study of dry snow accretion characteristics on the bogie surfaces of a high-speed train based on the snow deposition model [J]. International Journal of Rail Transportation, 2022, 10(3): 393-411.

[3] LIU M Y, WANG J B, ZHU H F, et al. A numerical study on water spray from wheel of high-speed train [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2020, 197: 104086.

[4] 黄照伟,冯永华,高广军,等.高速列车制动夹钳积雪结冰数值仿真研究[J].铁道科学与工程学报, 2017, 14(12): 2516-2524.
HUANG Z W, FENG Y H, GAO G J, et al. Numerical research of the snow and ice accumulation on the brake calipers of the high-speed trains [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(12): 2516-2524.(in Chinses)

[5] LIU M X, LIU J J, LIU D D, et al. Experimental and numerical investigation of the performance of bogie chassis heater deicing systems[J]. Energy and Buildings, 2020, 226: 110383.

[6] SHISHIDO M, NAKADE K, IDO A, et al. Development of deflector to decrease snow-accretion to truck of a vehicle [J] Rtri Report, 2009, 23(3): 29-34.

[7] XIE F, ZHANG J, GAO G J, 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.

[8] WANG J B, GAO G J, LIU M Y, et al. Numerical study of snow

accumulation on the bogies of a high-speed train using URANS coupled with discrete phase model [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2018, 183: 295-314.

[9] BAE J, SHON S, KWON H, et al. Numerical investigation of snow accumulation on a high-speed train by snow saltation [J]. International Journal of Rail Transportation, 2023, 11 (4): 465-489.

[10] WANG Y, WANG T T, JIANG C, et al. Numerical study on slipstream-induced snow drifting and accumulation in the bogie region of a high-speed train passing the snowy ballast bed [J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2023, 232: 105269.

[11] 冯永华, 黄照伟, 张琰, 等. 高寒动车组转向架区域积雪结冰数值仿真研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(3): 437-444.
FENG Y H, HUANG Z W, ZHANG Y, et al. Research of numerical simulation of the snow icy phenomenon of the high-speed train bogie area [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(3): 437-444.(in Chinses)

[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.
HE D H, WANG G Y, CHEN H C, et al. Analysis on two-phase flowing anti-ice/snow of low-temperature EMU bogie [J]. Railway Locomotive & Car, 2016, 36(4): 38-42.(in Chinses)

[13] 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.
WANG D P, YOU M, FAN J, et al. Numerical simulation on snowpack characteristics of high-speed EMU bogie and optimization design [J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(4): 25-32.(in Chinses)

[14] 娄振,蔡路,李田,等.高速列车制动盘甩水的数值仿真研究[J].铁道科学与工程学报, 2020, 17(6): 1356-1365.
LOU Z, CAI L, LI T, et al. Numerical simulation research on water spray from brake discs of high-speed train [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(6): 1356-1365.(in Chinses)

[15] ALLAIN E, PARADOT N, RIBOURG M, et al. Experimental and numerical study of snow accumulation on a high-speed train [C]// 49th international symposium of applied aerodynamics. Lille, French, 2014.

[16] SHON S, JI W G, KIM B, et al. Evaluation of snow accumulation simulation on a train using experimental results [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2023, 232: 105275.

[17] JI W G, SHON S, SEO S H, et al. Experimental investigations on the characteristics of snow accretion using the EMU-320 model train [DB/OL]. 2022, 0802. http: doi. org/10.48550/arxiv. 2208. 01281.

[18] LIU Y S, LI G, ZHANG J. Wind tunnel studies on the prevention of particle accumulation onto the bogie of high-speed train [J]. Frontiers in Earth Science, 2022, 10: 829309.

[19] WANG T T, WANG Y, GAO G J, et al. Experimental investigations on the performance of anti-snow designs for urban rail train bogies [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2022, 221: 104913.

[20] ZHANG Y, WANG J B, JIANG C, et al. Investigation of ice and snow accumulations on the bogie areas of high-speed trains using ice wind tunnel experiments [J]. Cold Regions Science and Technology, 2022, 199: 103560.

[21] 低速风洞和高速风洞流场品质要求: GJB 1179A—2012[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2013: 2-4.
Requireement for flow quality of low and high speed wind tunnels: GJB 1179A—2012 [S]. Benjing: Army Standards Press of General Armament Department, 2013: 2-4.(in Chinses)

[22] 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.
MIAO X J, HE K. Cause analysis of snow packing in high-speed train's bogie regions and anti-snow packing design [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(3): 756-763.(in Chinese)