

# 覆冰条件下轮轨黏着特性研究

刘子璇<sup>1</sup>, 田春<sup>1\*</sup>, 金碧筠<sup>2</sup>

<sup>1</sup>同济大学交通学院, 上海

<sup>2</sup>上海申通地铁集团有限公司技术中心, 上海

收稿日期: 2026年1月15日; 录用日期: 2026年2月25日; 发布日期: 2026年3月6日

## 摘要

在开放环境中服役的轮轨系统接触界面有时会受到冻雨、冰等污染, 极大地影响轮轨间的黏着水平, 造成列车车轮制动滑行和牵引空转, 严重影响列车的运营安全。针对这一问题, 利用首创的绕行式轮轨黏着特性模拟试验台及其配套的高低温箱, 进行了模拟冻雨天气下覆冰时, 不同速度、轴重、喷水量和轨面温度下的轮轨黏着特性测试试验, 进而研究覆冰条件下轮轨黏着特性。试验结果表明: 在模拟冻雨形成的覆冰条件下, 速度、轴重、喷水量和温度会影响黏着系数。同时, 速度与喷水量影响着覆冰厚度, 覆冰厚度到达一定阈值(1 μm左右)也会显著影响黏着系数, 在速度较低, 喷水量较大时, 黏着系数会降低至0.05左右。

## 关键词

轮轨关系, 轮轨接触, 覆冰, 黏着系数

# Research of Wheel-Rail Adhesion Characteristics under Rail Icing Caused by Low-Temperature Precipitation

Zixuan Liu<sup>1</sup>, Chun Tian<sup>1\*</sup>, Biyun Jin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>College of Transportation, Tongji University, Shanghai

<sup>2</sup>Technical Center of Shanghai Shentong Metro Group Co., Ltd., Shanghai

Received: January 21, 2026; accepted: February 25, 2026; published: March 6, 2026

## Abstract

In open operating environments, the wheel-rail contact interface of railway systems can occasionally be contaminated by freezing rain and ice, which greatly reduces the adhesion level between the

\*通讯作者。

文章引用: 刘子璇, 田春, 金碧筠. 覆冰条件下轮轨黏着特性研究[J]. 交通技术, 2026, 15(2): 214-225.

DOI: 10.12677/ojtt.2026.152020

wheel and rail, leading to braking wheel slide and traction wheel slip and thus seriously compromising operational safety. To address this problem, a series of adhesion tests were conducted under simulated icing conditions induced by freezing rain using a newly developed bypass-type wheel-rail adhesion characteristic simulation test rig and a supporting high/low-temperature chamber. Tests were performed at different speeds, axle loads, spray-water flow rates, and rail-surface temperatures to investigate wheel-rail adhesion characteristics under ice-covered conditions. The results indicate that, under ice formed by simulated freezing rain, speed, axle load, spray-water flow rate, and temperature all affect the adhesion coefficient. In addition, speed and spray-water flow rate influence the ice thickness; when the ice thickness reaches a threshold (approximately 1  $\mu\text{m}$ ), it also significantly affects the adhesion coefficient. At relatively low speed and high spray-water flow rate, the adhesion coefficient can decrease to around 0.05.

## Keywords

Wheel-Rail Interaction, Wheel-Rail Contact, Icing, Adhesion Coefficient

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

轮轨黏着是轮轨型轨道交通工具独有的轮轨接触状态，这种接触状态决定了列车牵引力、制动力以及导向力的潜在水平。黏着状态下轮轨间切向摩擦力的最大值称为黏着力，把它与轮轨间的法向作用力（其大小与该处车轮压在钢轨上的力相等）之比称为黏着系数，常用黏着系数表征轮轨之间的黏着水平。轮轨界面第三体介质在轮轨低黏着形成的过程中发挥重要作用，是导致列车低黏着打滑的“元凶”。常见的轮轨界面第三体介质主要有水、油、树叶和铁的氧化物等。而作为我国常见的气象灾害——冻雨天气下，在轮轨表面形成的冰可能导致黏着系数的显著下降，增加列车运行中车轮打滑的风险，延长制动距离，极大影响列车运行安全。

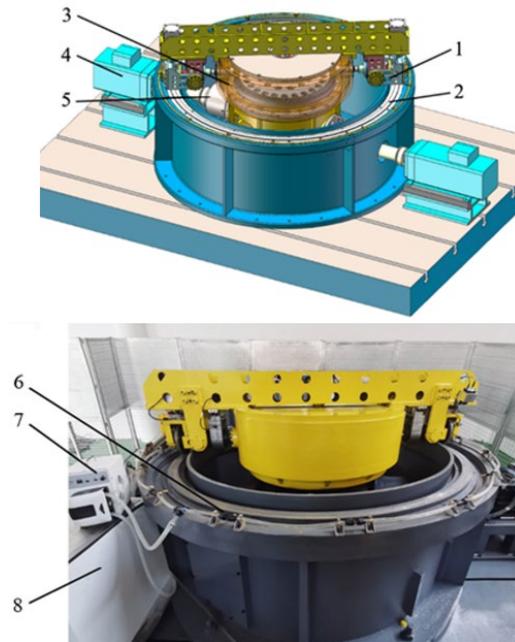
已有许多关于相关试验台与实车试验揭示了水作为第三介质条件下的轮轨黏着特性：大雨可以冲洗钢轨表面的其他污染物，对提高黏着有利[1]，但是细雨或冷凝作用等少量水介质出现在钢轨表面时会极大的降低轮轨间黏着特性。经实车试验测量，水介质存在时轨面黏着系数通常在 0.1~0.25 范围内分布[2]-[7]，有研究显示水介质条件下黏着系数随最高温度降低而减小[8]-[11]，也有在低温 + 雪条件下的水相变及轮轨黏着特性研究[12]，但囿于试验设备与试验条件的限制，少有能同时控制低温及轨面状态的试验，也就鲜有对 0℃ 以下的可能存在覆冰条件的轮轨黏着特性研究。

本文利用绕行式轮轨黏着特性模拟试验台及其相关设备，研究了覆冰条件下轮轨黏着特性，探究了多种条件耦合时的轮轨黏着系数水平，为提高复杂天气下列车运行的安全性和经济性提供理论支持。

## 2. 试验设备及设计

### 2.1. 试验设备介绍

为探究覆冰条件下轮轨黏着特性，本文利用一种新型轮轨黏着测试试验台——绕行式轮轨黏着模拟试验台，如图 1 所示。该试验台的车轮为 210 mm，相对于真实车轮进行了 1:4 缩比，转臂回转直径为 2 m。采用 Hertz (赫兹) 接触等效原则构造了缩比试验台的轮轨接触副，所模拟最高线速度为 160 km/h，等效轴重最大为 25 t，最大滑移在低速工况可达到 100%，试验台需要达到的技术指标，汇总于表 1。



1-车轮; 2-轨道; 3-齿轮箱; 4-电机; 5-离合器;  
6-喷洒装置; 7-蠕动泵; 8-温控水箱

**Figure 1.** Structural schematic of the bypass-type wheel-rail adhesion simulation test rig  
**图 1.** 绕行式轮轨黏着模拟试验台结构图

**Table 1.** Technical specifications of the test rig  
**表 1.** 试验台技术指标

序号	技术指标	范围
1	试验台模拟比例	1:4
2	车轮滚动圆直径	210 mm
3	试验台回转直径	2000 mm
4	车速	0~160 km/h
5	滑移率	0%~100%
6	模拟轴重	11~17 t, 25 t
7	设计黏着系数	0~0.6
8	车速控制误差	<0.5%
9	滑移率控制误差	<1%
10	控制响应时间	<0.1 s

试验台采用滑差双减速器齿轮结构, 所安装的两个电机分别控制转臂速度(模拟车速)和车轮滚动速度。其中车速电机带动转臂在水平面旋转, 以模拟列车在轨道上的前进运动(转臂公转); 而轮速电机控制车轮在轨道垂直面的自转速度, 以模拟在轨面的滚动速度(车轮自转), 两者的速度差值产生滑移率。若车速与轮速相等, 则此时车轮在轨道上纯滚动, 若车速与轮速不等, 则出于车轮处于制动滑行状态。值得一提的是, 由于轮/环型式的试验台在运转过程中车轮绕轨道几何中心旋转, 所产生的离心力会对轮轨间垂向力的加载产生影响。如果不加以研究和优化设计, 离心力产生的摩擦力会对垂向力有较大的减载, 从而影响黏着系

数的测试精度。试验台采用的曲柄式车轮定位机构，能将车轮垂向定位处的平动摩擦转化为较点滚动轴承处的转动摩擦，由摩擦力造成的轴重减载降低了一个数量级，大大提高了垂向力加载精度。

绕行式轮轨黏着试验台其机械结构主要由机架、箱盖、转臂、车轮、轨道、流体喷洒装置、电机、试验平台以及机架内部的传动装置组成。试验台的最大特征是创新性地采用轨道固定、转臂带动车轮回转的轮/环型机械结构，这样就能使得各种第三介质完全粘附在静止不动的轨道表面，相比于轮/轮形式的试验台更加真实地还原了列车与钢轨在现实中的动静状态。此外，试验台外部装有高低温箱，其保温温度范围为 $-25^{\circ}\text{C}\sim 50^{\circ}\text{C}$ ，可满足轮轨黏着试验的各种需求。

车轮轴上设置扭矩传感器进行车轮转速测量(车轮速度)和轮轨切向力，车速电机输出轴处编码器能够换算出当前车速(转臂速度)，实现车速和轮速的采集；转臂端部设有气缸，气缸下设有压力传感器，通过为转臂端部的气缸冲入压缩空气实现轴重模拟，压缩空气通过集流环和管路由空压机供给。由此试验台实现了车速 $v_v$ ，轮速 $v_w$ ，轮轨法向力 $N$ (轴重)，轮轨切向力 $F$ (黏着力)的采集，能够计算出试验过程中轮轨间的黏着系数 $\mu$ 及滑移率 $s$ 。

$$\mu = \frac{F}{N} \quad (1)$$

$$s = \frac{v_v - v_w}{v_v} \quad (2)$$

根据上述方程式绘制完整的轮轨黏着系数 - 滑移率曲线。

## 2.2. 试验设计

由于冰硬度本身不高，基本在 15 Mpa 左右，因此轮轨接触可以轻松破坏冰面，因此在轨道车辆驶过前轨面覆冰实际对车辆的运行影响主要体现在第一个轮对上，对后续轮对影响不大，因此对整车黏着影响也不是很大。而在实际轮轨服役环境中会出现因冻雨等天气出现轨面在车辆行驶时，轨面反复出现覆冰 - 破坏 - 覆冰的情况，可能对轮轨黏着影响更显著。

由于试验台运行时水在轮子两次碾过同一位置的时间间隔中才能结冰，因此直接测量这个冰厚度十分困难。而冰在轨面上形成的厚度随时间变化在一定时间内是线性的[13]，且与降雨率也呈线性关系。因此本试验对不同条件下冰厚度随时间变化曲线进行拟合，用以计算短时间间隔下的冰厚度。同时，利用蠕动泵控制喷水量以模拟不同降雨率，以研究不同降雨率的冻雨对列车实际运行的影响。覆冰厚度测量现场如图 2 所示。试验现场如图 3 所示。



Figure 2. Photo of icing  
图 2. 覆冰照片

由上述分析，基于绕行式轮轨黏着模拟试验台特性，对由冻雨等产生的覆冰条件开展轮轨黏着特性试验，试验流程如下：

- 1) 首先开启高低温箱并将温度设置为目标温度保温，直至轨面温度降至目标温度。
- 2) 设置当前试验工况所需的轴重；
- 3) 开启蠕动泵，并将蠕动泵流量设置为目标流量。
- 4) 牵引车速和轮速到指定速度，设定车轮滑移模式，使车轮与钢轨之间产生滑动，模拟轮轨制动工况，并记录此过程中的速度、扭矩数据；
- 5) 重复试验；
- 6) 在该条件下，分别在一定时间间隔时测量所结的冰厚度并记录。
- 7) 更改不同的轨面温度、轴重、蠕动泵流量及车速，再进行上述步骤。
- 8) 结束试验。

通过以上试验，能够得到不同降雨率、不同覆冰时间、不同轨面温度下的覆冰厚度规律，可计算得出不同条件的黏着试验时轨面覆冰厚度，进而得到在覆冰条件下的黏着系数-滑移率特性。



Figure 3. Photo of the test site  
图 3. 试验现场照片

### 3. 试验结果与分析

#### 3.1. 覆冰厚度测量

在本试验中，能改变覆冰厚度随时间变化关系的主要有喷水量和轨面温度。因此首先进行了不同喷水量和不同轨面温度下的覆冰厚度随时间变化关系试验，试验结果如表 2 所示。

Table 2. Experimental results of ice thickness  
表 2. 覆冰厚度试验结果

序号	轨面温度/°C	喷水量/L·min <sup>-1</sup>	覆冰时间/s	覆冰厚度/mm
1	-3°C	2 L/min	300	0.19
			600	0.42
			900	0.60
			1200	0.85

续表

2	-3℃	3 L/min	300	0.31
			600	0.66
			900	0.88
			1200	1.23
3	-3℃	4 L/min	300	0.44
			600	0.85
			900	1.20
			1200	1.73
4	-6℃	2 L/min	300	0.18
			600	0.44
			900	0.61
			1200	0.83
5	-9℃	2 L/min	300	0.19
			600	0.40
			900	0.62
			1200	0.78

试验结果分析如图 4-6 所示。

由上述试验结果分析可知，覆冰厚度与喷水量和覆冰时间成正比，但与覆冰时的轨面温度基本无关。因此，可以根据一定喷水量下的覆冰厚度与覆冰时间的关系来推算不同速度下进行试验时的覆冰厚度。由表 1 可知，试验台直径为 2 m，以此计算轮碾过轨道上同一点的时间间隔作为覆冰时间，计算结果如表 3 所示。

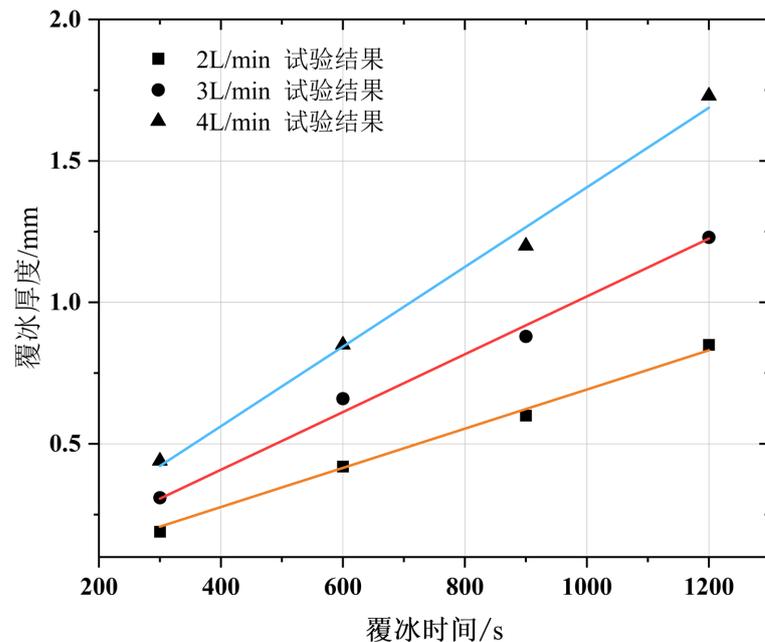


Figure 4. Influence of ice accumulation time on ice thickness  
图 4. 覆冰时间对覆冰厚度影响结果

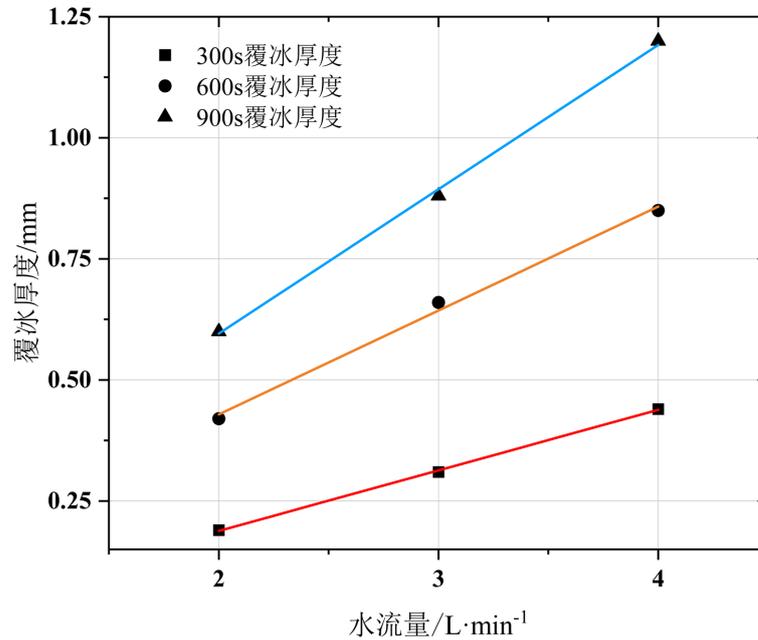


Figure 5. Influence of varied water spray rates on ice accumulation thickness  
图 5. 不同喷水量对覆冰厚度影响结果

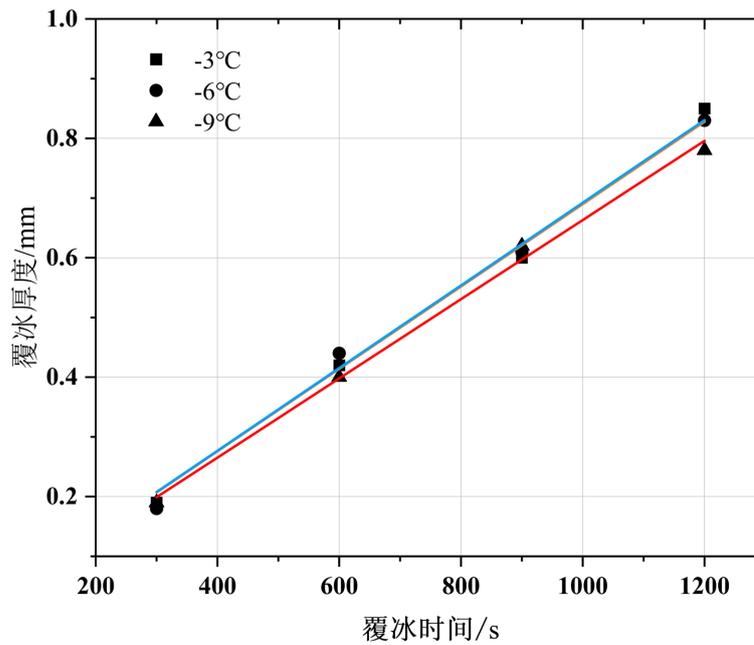


Figure 6. Influence of varied rail surface temperatures on ice accumulation thickness  
图 6. 不同轨面温度对覆冰厚度影响结果

Table 3. Icing thickness calculation outcomes for wheel-rail adhesion experiments

表 3. 黏着试验覆冰厚度计算结果

序号	喷水量/L·min <sup>-1</sup>	试验台速度/km·h <sup>-1</sup>	覆冰时长/s	轨面温度/°C	覆冰厚度/μm
1	2	10	2.26	-3	1.564
2		20	1.23	-3	0.782

续表

3		30	0.75	-3	0.477
4		40	0.62	-3	0.391
5	3	30	0.75	-3	0.716
6	4	30	0.75	-3	0.954

### 3.2. 不同降雨率下

目标滑移率为正弦曲线, 从 0 到 0.3 变化, 周期为 12 s, 施加的轴重为 15 t。目标车速恒定为 30 km/h, 设置蠕动泵喷水量分别设置为 2 L/min、3 L/min、4 L/min 以表示不同降雨率, 轨面温度为 $-6^{\circ}\text{C}$ 。此时, 覆冰厚度分别为约为  $0.477\ \mu\text{m}$ 、 $0.716\ \mu\text{m}$ 、 $0.954\ \mu\text{m}$ 。测得不同喷水量下的轮轨黏滑曲线如图 7 所示。从图中可以看出, 黏滑曲线有两个峰值点。当滑移率从 0 逐渐上升至 0.1 的过程中, 出现第一个峰值点(A 点), 当滑移率继续增大至 0.3 时, 黏着系数呈现先减小再增大的趋势, 滑移率达到 0.3 时, 黏着系数最高, 这个点会高于 A 点。在滑移率下降过程中, 黏着系数高于上升过程中的黏着系数。同时, 喷水量越多, 覆冰厚度越厚, 此时黏着系数最高点与 A 点的差值越小, 黏着曲线越平缓。无论是 A 点还是滑移率为 0.3 时的黏着系数最高点, 都随着喷水量的增大而降低, 说明在实际天气中, 降雨率对黏着系数有着显著影响。

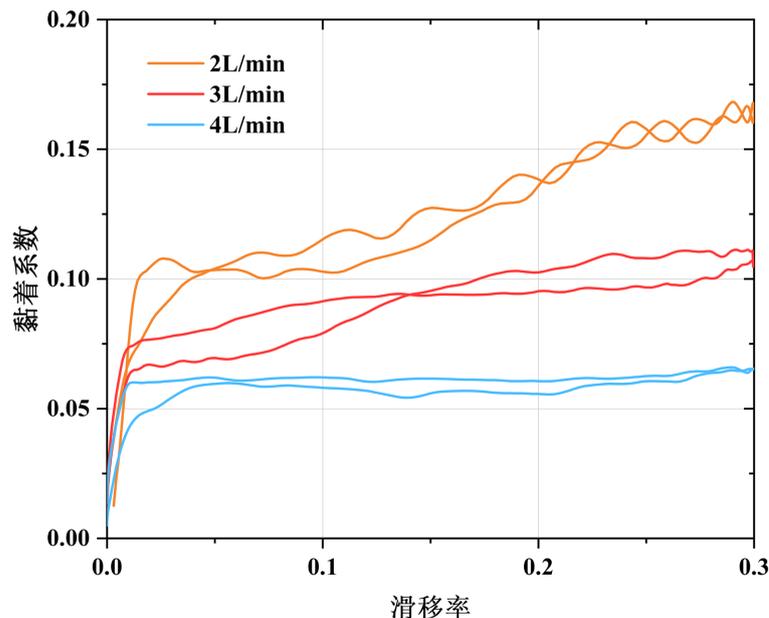


Figure 7. Experimental outcomes of wheel-rail adhesion under varied water spray rates

图 7. 不同喷水量下轮轨黏着试验结果

### 3.3. 不同速度下

目标滑移率为正弦曲线, 从 0 到 0.3 之间变化, 而目标车速恒定为 10 km/h、20 km/h、30 km/h 和 40 km/h, 此时覆冰厚度分别约为  $1.564\ \mu\text{m}$ 、 $0.782\ \mu\text{m}$ 、 $0.477\ \mu\text{m}$ 、 $0.391\ \mu\text{m}$ 。施加的轴重为 15 t, 喷水量为 2 L/min, 轨面温度为 $-6^{\circ}\text{C}$ 。测得不同速度下的轮轨黏滑曲线如图 8 所示。此时, 黏着曲线明显分为两组。一组为当车速在 20 km/h 及以上时, 黏滑曲线依然呈现双峰特性, 其中 A 点随速度的提升而下降, 滑移率为 0.3 时的黏着最高点随速度的升高而升高, 这与常温水质下黏滑曲线的结论相似。当车速为 10 km/h

时，黏着曲线较为平缓，黏着系数会始终处于较低水平。

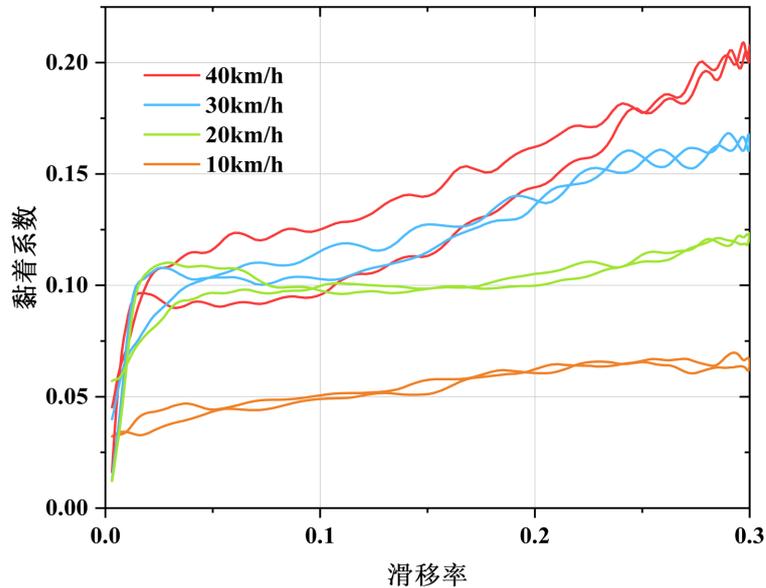


Figure 8. Experimental outcomes of wheel-rail adhesion under varied velocities  
图 8. 不同速度下轮轨黏着试验结果

### 3.4. 不同轴重下

目标滑移率为正弦曲线，从 0 到 0.3 变化，周期为 12 s，而施加的轴重为 11 t、13 t、15 t 和 17 t。目标车速恒定为 30 km/h，喷水量为 2 L/min，轨面温度为  $-6^{\circ}\text{C}$ ，此时覆冰厚度为  $0.477\ \mu\text{m}$ 。测得不同轴重下的轮轨黏滑曲线如图 9 所示。从图中可以看出，黏滑曲线同样出现了两个峰值点，及 A 点和 C 点，A 点随轴重增加而降低，C 点随轴重增加而增加，整体上而言，轴重对黏着系数影响幅度较小。

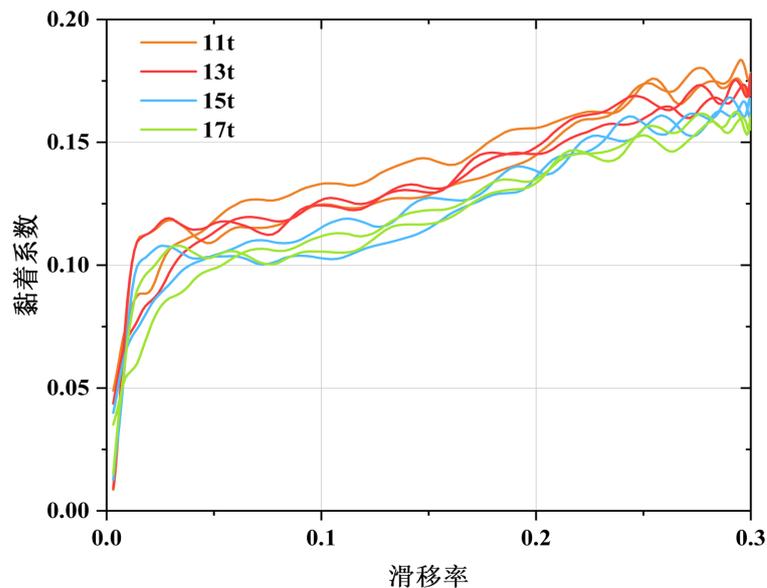


Figure 9. Experimental outcomes of wheel-rail adhesion with varied axle load conditions  
图 9. 不同轴重下轮轨黏着试验结果

### 3.5. 不同轨面温度下

目标滑移率为正弦曲线,从0到0.3变化,周期为12 s,施加的轴重为15 t,目标车速恒定为20 km/h,喷水量为2 L/min,轨面温度分别为 $-3^{\circ}\text{C}$ 、 $-6^{\circ}\text{C}$ 、 $-9^{\circ}\text{C}$ ,此时覆冰厚度均约为 $0.782\ \mu\text{m}$ 。测得不同轨面温度下的轮轨黏滑曲线如图10所示。从图中可以看出,在其他条件一定时,在低温时(轨面温度小于 $0^{\circ}\text{C}$ ),轨面温度对轮轨黏着特性影响较小,温度越低,黏着系数越小,由此也可以说明,温度对黏着系数的影响

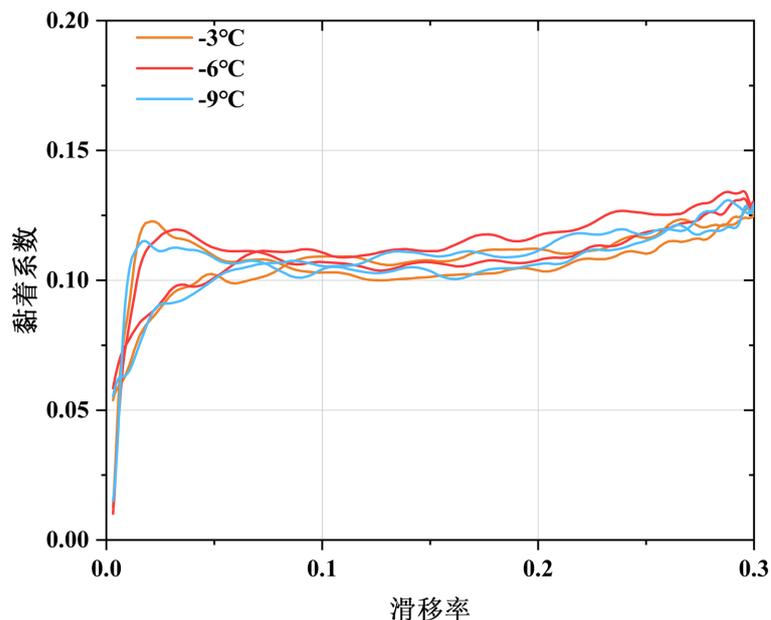


Figure 10. Experimental outcomes of wheel-rail adhesion with varied rail surface temperature conditions

图10. 不同轨面温度下轮轨黏着试验结果

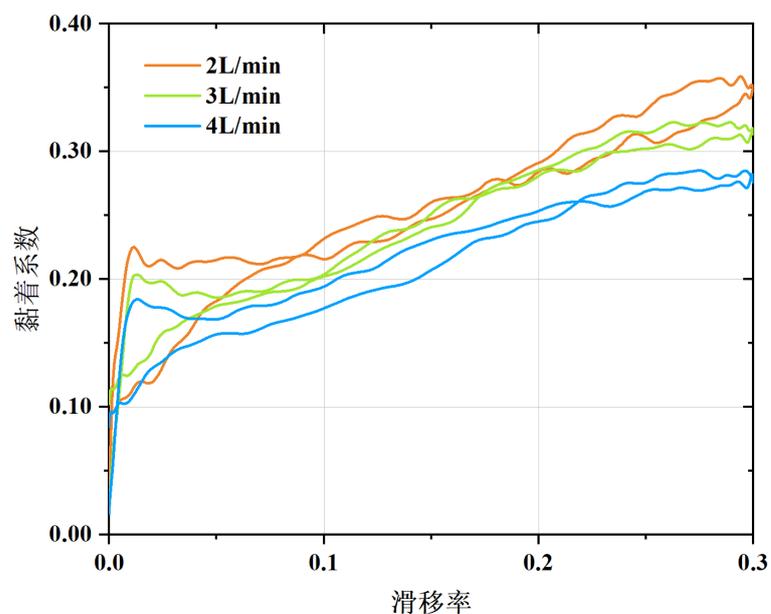


Figure 11. Experimental outcomes of wheel-rail adhesion with varied water spray rates under  $25^{\circ}\text{C}$  condition

图11.  $25^{\circ}\text{C}$ 不同喷水量下轮轨黏着试验结果

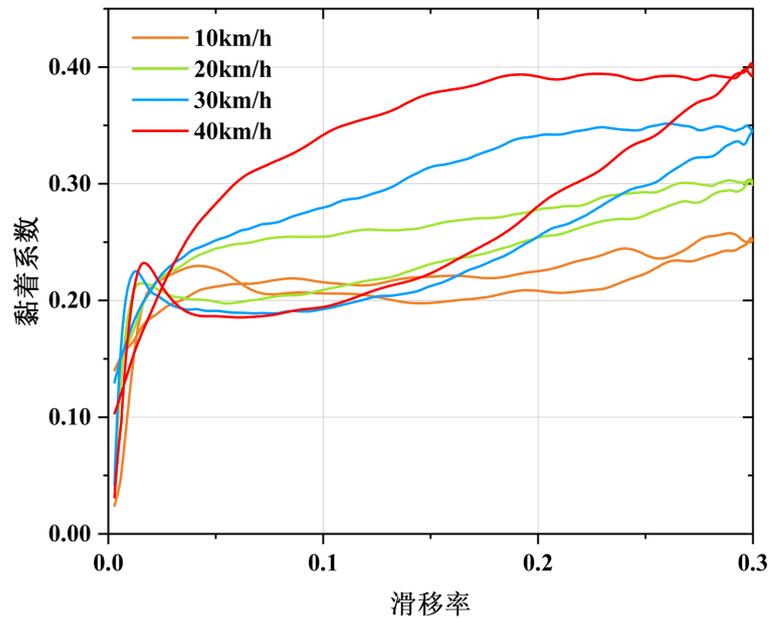


Figure 12. Experimental outcomes of wheel-rail adhesion with varied velocities under 25°C condition

图 12. 25°C 不同速度下轮轨黏着试验结果

并非通过覆冰厚度产生。

#### 4. 讨论

在 2.2 与 2.3 节进行的黏着试验中, 试验在改变喷水量与速度的同时, 实际也改变了覆冰厚度, 因此需讨论喷水量、速度与覆冰厚度耦合如何影响黏着特性。为此, 进行了与 2.2、2.3 节相同速度、轴重、喷水量设置的 25°C 室温试验, 试验结果如所示。

从图 11 中可以看出, 随着洒水流量的增大, 轨面初始水膜厚度增加, 对黏滑曲线的 A 点没有明显影响, 但对滑移率为 0.3 时的最大黏着系数有影响。洒水流量越大, 滑移率为 0.3 时的最大黏着系数越低。整体来看, 在室温下喷水量并不会使得黏着系数显著降低。可以认为, 在 2.2 节试验中, 使得不同喷水量下黏着系数有显著差别的原因是覆冰厚度。覆冰厚度越厚, 黏着系数越小。同样的, 从图 12 中可以看出, A 点不会随速度变化而明显变化, 因此 2.3 节试验中, 使得 10 km/h 黏着系数显著降低的原因也是覆冰厚度。

值得注意的是, 覆冰厚度对黏着系数的影响是存在一定阈值的, 就本试验而言, 即当覆冰厚度很小时(小于 1 μm 左右), 几乎可以认为冰不会对轮轨黏着产生影响, 其黏着特性与水相似。当覆冰厚度大于 1 μm 左右时, 冰才会对黏着系数产生显著影响, 且覆冰厚度越厚, 黏着越小。

#### 5. 结论

本文基于绕行式轮轨黏着模拟试验台, 进行了覆冰条件下的轮轨黏着特性试验, 包含了速度、轴重、喷水量、轨面温度等多种工况, 总结了在模拟冻雨等自然条件下产生的轨面覆冰 - 破坏 - 覆冰情况时, 各因素对轮轨黏着的影响, 研究了不同因素对覆冰厚度的影响, 探究了不同因素耦合下的黏着规律, 主要结论如下:

1) 车速和喷水量(降雨率)由于对覆冰厚度产生明显影响, 是影响覆冰条件下轮轨黏着特性的最主要因素。当车速低于 10 km/h、喷水量大于 3 L/min 时, 覆冰厚度较大, 黏着系数显著降低。提示车辆在类

似天气下运营时在低速时更可能出现打滑现象。

2) 覆冰厚度影响黏着的阈值可能出现在  $1\ \mu\text{m}$  左右。当覆冰厚度小于  $1\ \mu\text{m}$  时, 冰对轮轨黏着的影响不显著, 黏着特性与低温水介质条件下的轮轨黏着特性类似; 当覆冰厚度大于  $1\ \mu\text{m}$  时, 冰对轮轨黏着的影响显著, 黏着系数处于较低水平。

3) 在本试验形成的低温环境中, 温度对黏着系数的影响相对较小, 温度越低, 黏着系数越小, 且温度对黏着系数的影响并非通过改变覆冰厚度实现。

## 致 谢

感谢申通集团对本文研究的支持。

## 基金项目

申通集团科研项目: 低黏着条件下列车制动防滑效率研究(编号: JS-KY24R014)。

## 参考文献

- [1] Ohno, K., Tsuchiya, J., Ogawa, Y., *et al.* (1983) Low Adhesion between Wheel and Rail Caused by Fallen Leaves and Its Remedy. *Railway Technical Research Institute Quarterly Reports*, **24**, 135-136.
- [2] 黄问盈. 铁道轮轨黏着系数[J]. 铁道机车车辆, 2010, 30(5): 17-25.
- [3] 王猷丕, 莫钧, 陈朝发. 我国铁路制动黏着系数的试验研究[J]. 中国铁道科学, 1991(2): 1-19.
- [4] 李培曙. 防滑器的防滑作用与黏着利用[J]. 铁道车辆, 1998, 36(3): 17-19.
- [5] Trummer, G., Buckley-Johnstone, L.E., Voltr, P., Meierhofer, A., Lewis, R. and Six, K. (2017) Wheel-Rail Creep Force Model for Predicting Water Induced Low Adhesion Phenomena. *Tribology International*, **109**, 409-415. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.12.056>
- [6] Buckley-Johnstone, L.E., Trummer, G., Voltr, P., Six, K. and Lewis, R. (2020) Full-Scale Testing of Low Adhesion Effects with Small Amounts of Water in the Wheel/Rail Interface. *Tribology International*, **141**, Article 105907. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.105907>
- [7] Buckley-Johnstone, L.E., Trummer, G., Voltr, P., Meierhofer, A., Six, K., Fletcher, D.I., *et al.* (2019) Assessing the Impact of Small Amounts of Water and Iron Oxides on Adhesion in the Wheel/Rail Interface Using High Pressure Torsion Testing. *Tribology International*, **135**, 55-64. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.02.024>
- [8] 常崇义, 陈波, 蔡园武, 等. 基于全尺寸试验台的水介质条件下高速轮轨黏着特性试验研究[J]. 中国铁道科学, 2019, 40(2): 25-32.
- [9] 常崇义, 陈波, 梁海啸, 等. 时速 400 km 速度级内轮轨间水介质条件下牵引黏着系数试验研究[J]. 中国铁道科学, 2021, 42(5): 132-137.
- [10] 常崇义, 陈波, 蔡园武, 等. 时速 400 km 轮轨制动大蠕滑黏着试验研究(四)——多种介质条件下极低黏着特性及黏着系数[J]. 中国铁道科学, 2025, 46(1): 149-156.
- [11] Chen, H., Ban, T., Ishida, M. and Nakahara, T. (2008) Experimental Investigation of Influential Factors on Adhesion between Wheel and Rail under Wet Conditions. *Wear*, **265**, 1504-1511. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.02.034>
- [12] 常崇义, 李兰, 蔡园武, 等. 高速轮轨低温+雪条件下黏着特性试验研究[J]. 中国铁道科学, 2025, 46(2): 172-179.
- [13] 刘驻. 基于 FENSAP 的翼型/机翼积冰数值模拟与验证[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2023.