

文章编号:1007-9629(2024)11-1004-07

冰雪天气沥青路面抗滑性能的衰变及预测

李浩嘉¹, 左伟平², 郭忠印¹, 宋灿灿^{3,*}

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 中国铁路设计集团有限公司公路事业部, 天津 300308; 3. 上海师范大学 建筑工程学院, 上海 201418)

摘要:为了定量表征冰雪天气沥青路面的抗滑性能,在气候实验室内模拟了结冰路面、积雪路面和积雪消融路面的状态,用摆式仪和 T2GO 摩擦系数测试仪分别测试了摆值(BPN)和摩擦系数,用维萨拉移动检测器检测了冰层、雪层和水膜的厚度;对于不同的冬季路面状态,基于引起抗滑性能衰变的主要因素提出了摩擦系数预测方法.结果表明:结冰路面的抗滑性能主要受冰层厚度的影响;积雪路面的抗滑性能受雪层内部层间滑动的影响;积雪消融过程中,雪层表面形成的薄冰层会使路面抗滑性能显著降低;结冰路面的摆值与摩擦系数存在较好的线性关系.

关键词:道路工程;行车安全;恶劣天气;摆值;摩擦系数

中图分类号:U414

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2024.11.005

Attenuation and Prediction of Skid Resistance Performance of Asphalt Pavement in Ice and Snow Weather

LI Haojia¹, ZUO Weiping², GUO Zhongyin¹, SONG Cancan^{3,*}

(1. The Key Laboratory of Road and Traffic Engineering, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Department of Highway Business, China Railway Design Co., Ltd. Tianjin 300308, China; 3. School of Civil Engineering, Shanghai Normal University, Shanghai 201418, China)

Abstract: In order to quantitatively characterize the skid resistance performance of asphalt pavement in ice and snow weather, icy pavement, snow-covered pavement and snow-melting pavement were simulated in the climate laboratory. Pendulum friction tester and T2GO friction tester were used to obtain British pendulum number(BPN) and friction coefficient separately, and the Vaisala mobile detector was applied to detect the thickness of ice layer, snow layer and water film. For various pavement surface condition, the prediction methods of friction coefficient were proposed based on the main factors which causing the attenuation of skid resistance. The results show that the skid resistance performance of icy pavement is mainly affected by the ice layer thickness. The skid resistance performance of snow-covered pavement is affected by the interlayer sliding within the snow layer. During the snow-melting process, a thin ice layer, formed on the snow layer surface, causes a significant decrease in the skid resistance performance of the road surface. The BPN of icy pavement has a good linear relationship with friction coefficient.

Key words: road engineering; driving safety; inclement weather; British pendulum number(BPN); friction coefficient

路面的抗滑性能对行车安全具有十分重要的影响^[1].在冬季恶劣天气条件下,路面被积雪或者冰层

覆盖,会使其抗滑性能显著降低^[2-3].路面抗滑性能与事故率存在显著的统计关系^[4],降雪会使事故率和受

收稿日期:2023-10-17; 修订日期:2024-03-19

基金项目:上海市科委项目(21DZ1201200)

第一作者:李浩嘉(1993—),男,甘肃庆阳人,同济大学博士生. E-mail: haojia_li@tongji.edu.cn

通讯作者:宋灿灿(1988—),女,山东济南人,上海师范大学讲师,硕士生导师,博士. E-mail: songcancan@shnu.edu.cn

伤率分别上升84%和75%^[5]。在路面积雪或结冰时,中国的高速公路经常采用封站的管理策略,造成交通运行风险转移、路网服务能力降低、通行收益损失和用户满意度降低。虽然通过提升路面的材料属性可以增强其融冰除雪的能力^[6-7],但并不会使路面实现积雪或结冰的零覆盖。因此,在国家和地方政府“准全天候通行”的政策指引下,实时评估冰雪天气沥青路面的抗滑性能,并基于路面摩擦特征实行智能风险管控势在必行^[8]。

直接测试路面摩擦系数的设备可以分为连续测试设备(轮胎与路表面接触)和单点测试设备(橡胶滑块与路表面接触)^[9]。Bhoopalram等^[10-11]对轮胎和冰面的相互作用进行了系统研究,考虑了荷载、胎压、轮胎花纹、温度以及冰面类型的影响。Dan等^[2]使用摆式仪(BPT)测试了各类冬季路面的抗滑性能,分析了路面温度、冰层厚度和水膜厚度的影响,最后提出了路面抗滑性能的经验评价模型。Tan等^[12-13]还使用动态摩擦系数测试仪(DFT)系统地研究了橡胶滑块在结冰路面的抗滑性能。对于积雪路面,学者们尝试使用BPT或DFT测试其抗滑性能^[2,12],但滑块不能模拟轮胎的滚动特征,Salimi等^[14]使用同步牵引车在封闭路段测试了结冰和积雪路面的横向力系数。

冰雪天气路面的冰层和雪层是逐渐累积的,已有的研究探讨了多种因素对冬季路面抗滑性能的影响,

但受野外环境的限制,测试只能在结冰或者降雪完成之后进行,因此无法对路面抗滑性能的衰变进行完整的预测。此外,摆式仪对冰雪覆盖路面的适用性也缺乏深入研究。本文在气候试验室内模拟了结冰路面、积雪路面和积雪消融路面的状态,并对路面冰雪覆盖物的特征进行监测,使用T2GO摩擦系数测试仪和摆式仪分别测试了路面的抗滑性能,最后针对不同的冬季路面状态建立了摩擦系数预测模型,为高速公路的智能管控提供帮助。

1 试验

1.1 试验场地及设备

本试验在先进的气候实验室内开展,可以控制环境温度,并模拟降雨和降雪,使雪花的细观特征与自然降雪非常接近。气候实验室的高度达5 m,喷淋的出口位于实验室顶部,但由于人造雪花是通过强风从喷淋出口喷出,因此试验路面不同位置的雪层厚度并不能做到完全均匀。测量结果表明,在一次降雪中,雪层厚度的最大偏差为5 mm。试验所用的测试路面由10块车辙板拼接而成,每块车辙板的长度和宽度均为30 cm,高度为5 cm,路面总长度为3 m。采用SMA-13的沥青混合料,沥青质量分数为6%,含气量(体积分数)为3.6%,其级配如表1所示。

表1 沥青混合料的级配
Table1 Aggregate gradation of asphalt mixture

Sieve size/mm	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
Passing ratio(by mass)/%	100.0	92.5	62.5	27.2	19.5	16.5	14.3	12.2	11.5	10.3

用MD30维萨拉移动路面检测器,对路面的冰层、水膜和雪层的厚度(δ)进行检测,检测点固定在试验路的中间位置。该设备带有1个红外发射器对准道路表面选定位置,发射光从被测地点反射进入接收器进行整合。检测器能够区分路面水或冰引起的特定波长的反射,也可以探测到雪或霜。它通常安装在自然驾驶车上,用于检测车辆轮迹带范围内的路面状态,检测精度为0.01 mm。

由于在环境舱内大型的测试设备难以使用,为了测试路面的抗滑性能,使用摆式仪和T2GO便携式连续摩擦系数测定仪分别进行测试。T2GO摩擦系数测定仪包含了2个测试轮,可以连续采集路面的摩擦系数(μ),每0.1 m获取1个测试结果,每个摩擦系数的结果是21个数据点的平均值。T2GO摩擦系数测定仪可将轮胎的滑移率控制在20%以内,能够有效模拟车轮刹车时的滚动特征,这对测试积雪路面的摩擦系数是非常有益的。与此同时,使用摆式仪测试路面的摆值

(BPN),在正常路况使用摆式仪时需要洒水使路面处于湿润状态,但在本试验中由于路面已经覆盖冰层或者雪层,因此测试时将滑块直接作用于路面。

1.2 试验方法

在测试过程中,首先通过喷洒水雾、降雪或升温等手段,模拟冰雪覆盖物的累积和消融,然后进行相关测试。

1.2.1 路面冰层累积模拟

在冬季,可能因为除雪后道路表面湿润积水导致结冰,也可能因为冻雾、冻毛毛雨或冻雨形成暗冰,给车辆的行驶安全带来不良影响。为了模拟这些结冰现象,先在室温下对路面降水使其完全湿润,然后快速降低环境温度,使路面形成冰层,并完成相关测试;紧接着,将路面温度控制在 $-6\sim-5\text{ }^{\circ}\text{C}$,使用喷壶对路面喷洒水雾,每次喷洒完成后等待5 min,然后完成相关测试;最后,使用环境舱的覆冰功能在 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 进行低温降水,直到冰层完全覆盖路面宏观纹理,形成厚冰

路面用于测试结冰路面抗滑性能的最小值。

1.2.2 路面雪层累积模拟

在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下对干燥路面先后进行3次人工降雪,每次降雪的浮雪厚度为 $5\sim 8\text{ mm}$ 。降雪完成后先测试浮雪或浮雪-压实雪混合路面的抗滑性能,然后利用T2GO摩擦系数测定仪的测试轮对浮雪来回碾压5次形成压实雪路面,再对压实状态的积雪路面进行测试。为研究温度变化对积雪路面抗滑性能的影响,在第3次降雪完成测试后,逐级升高环境温度至 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$,测试不同温度条件下积雪路面的摩擦系数。

1.2.3 路面积雪消融模拟

路面压实的积雪因环境温度上升、车辆尾气加热或者汽车轮胎碾压等原因会出现消融状态。积雪路面的摩擦系数测试完成后,将环境温度升至 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$,当路面温度上升至 $-1\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,检测路面覆盖物的

厚度并测试其抗滑性能,将该时间点作为积雪路面消融测试的起点(0 min),每隔 10 min 进行1次测试。

2 结果与分析

2.1 结冰路面抗滑性能

结冰路面的表面形态如图1所示。由图1(a)可见:初始的薄冰路面通过对湿润路面逐渐降温的方式在路表形成冰层;粗集料表面的水由于重力作用向粗集料间隙流动,水膜达到结冰温度时粗集料表面基本处于干燥状态,因此降温之后冰层仅出现在粗集料的间隙,在其表面没有形成冰层。此外,由于路面具有横向排水的能力,粗集料间隙形成的冰层厚度很薄,路面的摩擦系数和摆值经测定均没有明显的变化。在路表排水正常的情况下,湿润路面降温结冰对路面的抗滑性能影响很小。

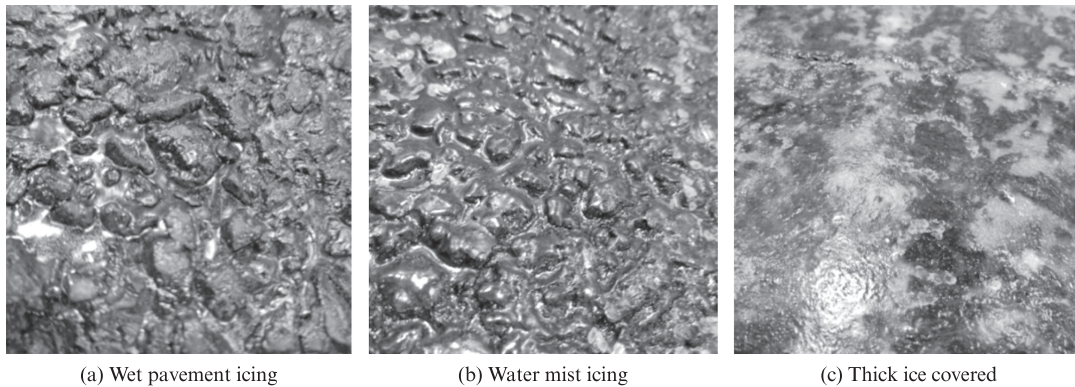


图1 结冰路面的表面形态

Fig. 1 Surface morphology of icy pavement

由图1(b)、(c)可见:喷洒水雾时路表温度在 $-5\sim -6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,相当于冷壁面,并且集料具有亲水特征,因此水滴与粗集料表面接触之后并没有汇聚和流动,而是迅速凝结形成冰层,使路面的冰层覆盖不断增加。

喷洒水雾过程中路面覆盖物的厚度见图2。由图2可见:在第3次喷洒水雾之后,路面检测器检测到了水膜,

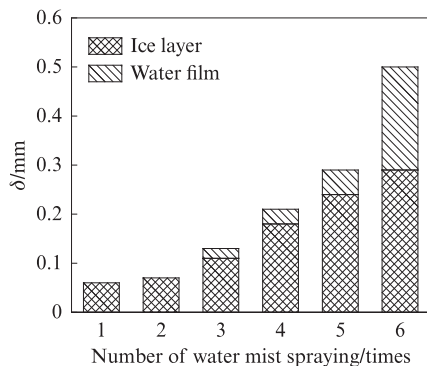


图2 喷洒水雾过程中路面覆盖物的厚度

Fig. 2 Thickness of road surface contamination during water mist spraying

说明路面粗集料的微观纹理已经完全被冰层覆盖,轮胎橡胶将只与冰层接触;而冰层的进一步增长开始向粗集料间隙发展,使轮胎橡胶嵌入路表的体积减小。

图3为结冰路面抗滑性能测试结果。由图3可知:随着喷洒次数的增加,轮胎-路面摩擦系数的均值和

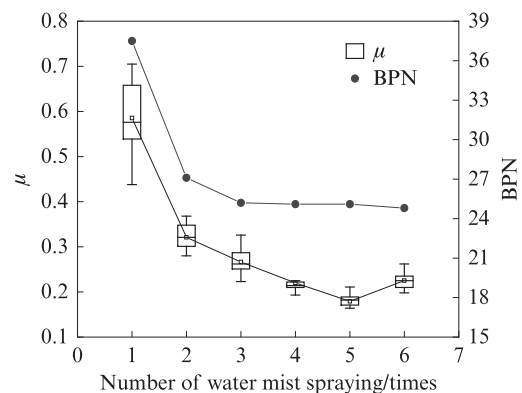


图3 结冰路面抗滑性能测试结果

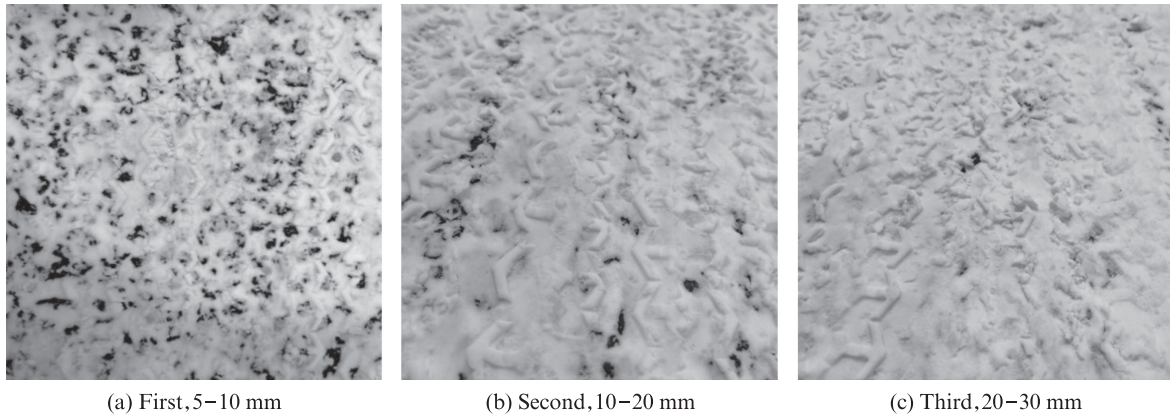
Fig. 3 Test results of skid resistance performance of icy pavement

BPN表现出相似的变化规律;路面抗滑性能的衰减主要集中在前3次的喷洒覆冰过程中,可见粗集料表面冰层的累积是导致路面抗滑性能下降的主要原因。

2.2 积雪路面抗滑性能

压实雪路面的表面特征如图4所示。由图4可

见:第1次降雪压实后,积雪填充了粗集料之间的空隙,但大部分粗集料顶部的棱角依然清晰可见;第2次降雪压实后,仅有少数粗集料的未被积雪完全覆盖,雪层留下了清晰的轮胎压痕;第3次降雪压实后,路面已完全被积雪覆盖。



(a) First, 5-10 mm

(b) Second, 10-20 mm

(c) Third, 20-30 mm

图4 压实雪路面的表面特征

Fig. 4 Surface feature of compacted snow pavement

与冰层相似,轮胎橡胶与雪层接触也会导致路面的抗滑性能下降;然而,由于雪层柔软、疏松的特性,轮胎橡胶与雪层下面路表宏观纹理的相互作用依然有效,并且轮胎橡胶嵌入雪层也具有提升摩擦力的作用,因此积雪路面抗滑性能的整体水平高于结冰路面。雪降落在路表时首先呈浮雪状态,经轮胎荷载碾压转变为压实状态。在交通量较大的情况下路面不会聚集太多的浮雪,而在交通量较小的情况下会出现底层积雪压实而表层积雪松散的混合状态。图5为积雪路面摩擦系数的测试结果。由图5可知:浮雪-压实雪混合状态的积雪路面,其摩擦系数随着底部压实雪层厚度的增加而下降,而经轮胎压实后摩擦系数得以恢复,即压实状态积雪路面的摩擦系数几乎没有受到雪层厚度增加的影响,其均值稳定在0.45左右;随着路表温度的升高,压实积雪路面的摩擦系数逐渐变小。

雪层与粗集料表面之间的黏结力不及冰层牢固,因此除了橡胶-雪层界面摩擦力较低之外,雪层内部的相对滑动也会影响积雪路面的抗滑性能。对于浮雪-压实雪混合状态的积雪路面,在轮胎碾压的过程中浮雪与压实雪之间暂未形成有效黏结,如果此时浮雪受宏观纹理的约束不足,则会出现较大程度的雪层内相对滑动,导致摩擦力下降。因此,当底层压实雪厚度增加,填充粗集料间隙导致构造深度减小后,宏观纹理对浮雪的约束下降,路面的抗滑性能明显降低。

对于压实状态的雪层,部分积雪嵌入宏观纹理

内,同时雪层内部具有较强的黏结力,轮胎制动过程中不易发生层间相对滑动,因此雪层厚度增加没有明显影响压实状态积雪路面的抗滑性能。但是路表温度上升会使压实的雪层蓬松,降低雪层内的黏结力,导致摩擦系数减小。

2.3 积雪消融路面抗滑性能

图6为积雪消融路面的局部特征。由图6可见,随着消融时间的增加,路表出现了明显的冰层,路面状态从压实的积雪逐渐转变为雪-冰-水混合的状态,雪层的厚度不断下降,最终路面的原始纹理显露出来。

积雪消融过程中路表覆盖物厚度的变化及积雪消融路面的抗滑性能的分别见图7、8。由图7、8可知:(1)在0~30 min,尽管路面温度稳定在-1~0℃之间,但是由于吸收环境热量,雪层蓬松使其厚度出现增长,随后表面积雪消融形成的水膜向下渗透,被雪层吸收之后形成冰层,导致摩擦系数进一步降低。(2)在30~80 min,积雪表面的薄冰层继续融化,形成的水膜一部分渗入下部积雪,促使积雪变为冰层,另外一部分在冰层表面流动,因此冰层厚度和水膜厚度均增大;在该阶段冰雪覆盖物仍然完全遮盖路表的原始纹理,轮胎橡胶只与冰层接触,因此雪层厚度的减少未对摩擦系数产生影响。(3)在90~120 min,雪层厚度继续减小,冰层厚度达到最大值后开始减小,部分区域路表的原始纹理开始显露,路面抗滑性能得到恢复。

由图7、8还可以看出:(1)在消融初期,由于路表

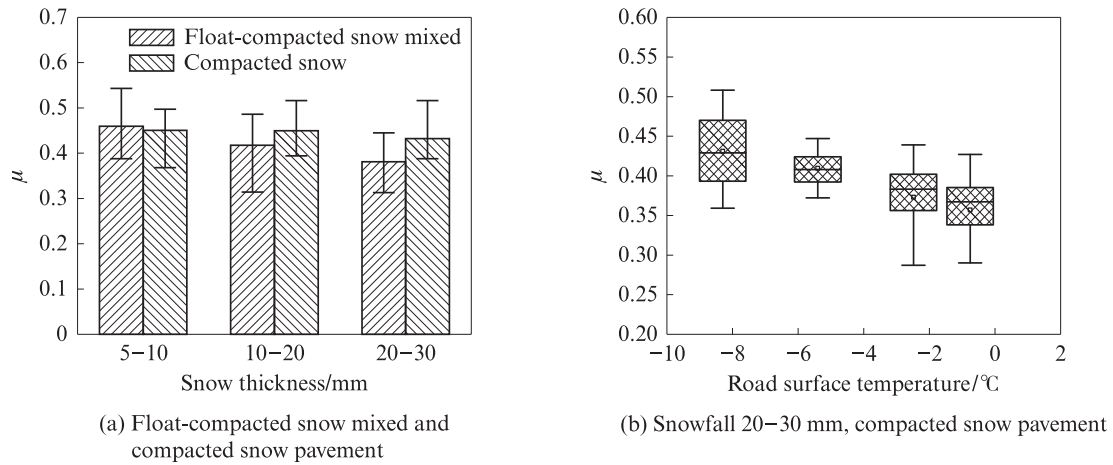


图5 积雪路面摩擦系数测试结果
Fig. 5 Test results of the friction coefficient for snow-covered pavement

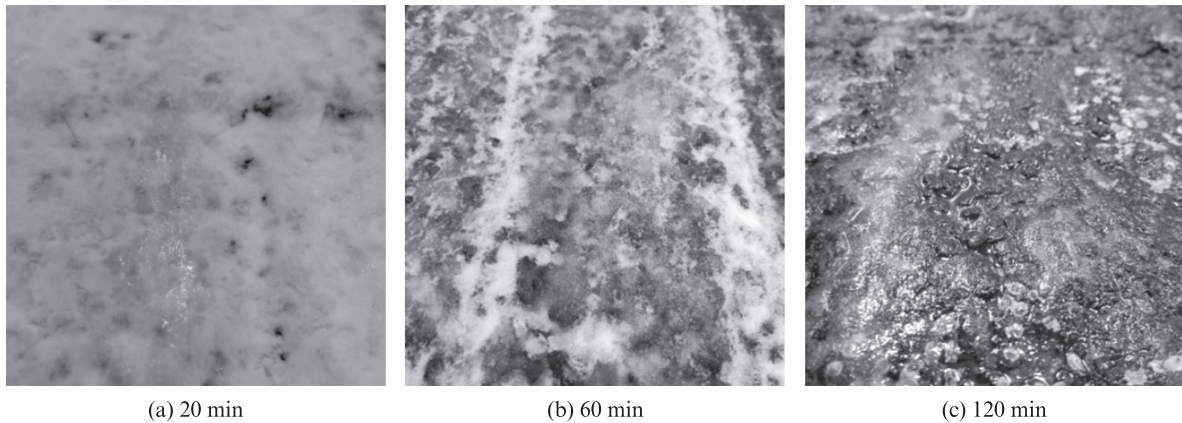


图6 积雪消融路面的局部特征
Fig. 6 Local features of the snow-melting pavement

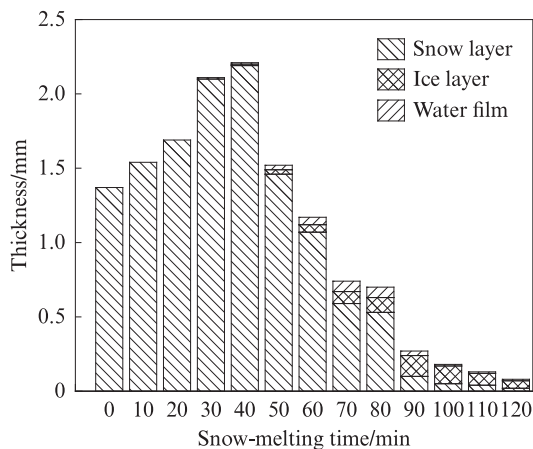


图7 积雪消融过程中路表覆盖物厚度的变化
Fig. 7 Thickness variation of road surface contamination in snow-melting process

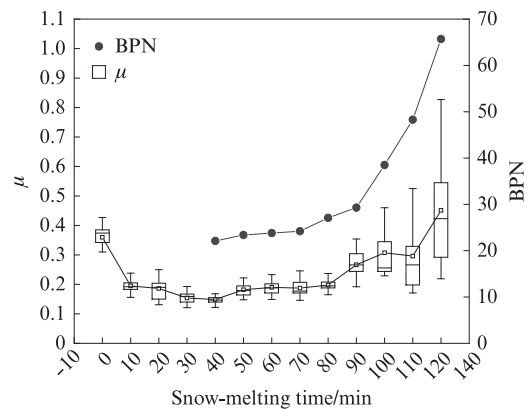


图8 积雪消融路面的抗滑性能
Fig. 8 Skid resistance performance for snow-melting pavement

还未形成明显的冰层,因此无法使用摆式仪进行测试;但在消融40 min后使用摆式仪测试了路表的抗滑性能。(2)虽然摆值表现出和摩擦系数类似的变化规律,但是其增长的速率明显更快,消融120 min后摆值已经恢复到一般湿润路面的水平。

2.4 摆式仪的适用性分析

摆式仪是一种常用的测试路面抗滑性能的设备,测试范围为12.60 mm×7.62 mm,仪器滑块对路面的正常静压力为(22.2±0.5) N,摆式仪的摆锤下落最大速率为10.2 km/h,摆式仪的测试对象一般为湿润的沥青路面。

对于积雪路面,一方面由于摆式仪在测试过程中无法压实路表的浮雪层;另一方面在摆锤摆动的过程中,滑块极易将压实的雪层清除破坏,造成无法对测试点完成重复试验,所以摆式仪对积雪路面并不适用.对于结冰路面和积雪消融路面,在测试过程中摆式仪滑块均与冰层接触,BPN与摩擦系数表现出相似的变化趋势.这两项指标之间存在较好的线性关系(如图9所示),在试验条件有限的情况下可以基于该公式将BPN换算为摩擦系数.

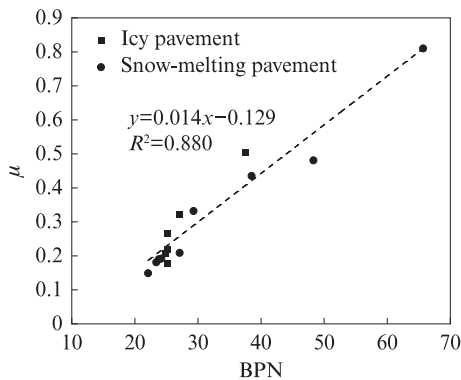


图9 结冰路面及积雪消融路面BPN与摩擦系数的关系
Fig. 9 Relationship between BPN and friction coefficient for icy pavement and snow-melting pavement

2.5 冰雪覆盖路面摩擦系数预测

为实时评估冰雪覆盖路面的摩擦系数,本文基于监测点所在车辙板的冰雪覆盖物厚度和摩擦系数的实测数据,采用非线性回归的方法建立了摩擦系数预测方程.图10为结冰路面和积雪消融路面摩擦系数的拟合曲线.

对于结冰路面,冰层通过覆盖粗集料表面的微观纹理以及粗集料间隙组成的宏观纹理降低路面的抗滑性能,因此冰层厚度对结冰路面的摩擦系数具有决定性的影响.由图10可见,冰层厚度与摩擦系数

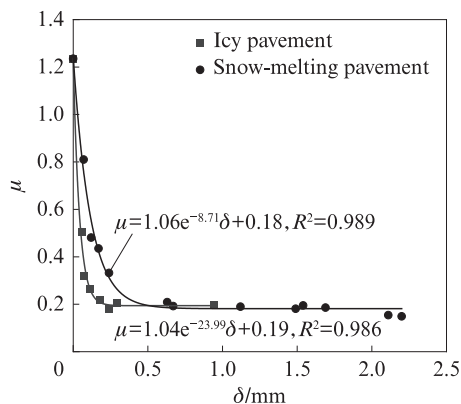


图10 结冰路面和积雪消融路面摩擦系数的拟合曲线
Fig. 10 Fitting curves of friction coefficient for icy and snow-melting pavement

之间存在较好的指数函数关系,拟合优度 R^2 为 0.986.

对于消融的积雪路面,表面的雪层会转变冰层,虽然制动过程中轮胎橡胶只与表面的薄冰层接触,但冰层下尚未消融的雪层也发挥着掩盖路表原始纹理的作用,因此冰层与雪层均对路面的抗滑性能产生负面影响.积雪消融路面的冰雪总厚度与摩擦系数之间存在较好的指数函数关系,拟合优度 R^2 为 0.989.

对比积雪消融路面和结冰路面的摩擦系数拟合曲线:当覆盖物厚度大于 0.5 mm 时,两条曲线基本重合;而当覆盖物厚度小于 0.5 mm 时,积雪消融路面拟合曲线的摩擦系数数值更大.这是因为在积雪消融时,粗集料顶面的纹理和棱角最先出露,残余的冰雪混合物位于粗集料的间隙,而间隙冰层对路表抗滑性能的影响相对较小,因此积雪消融路面的摩擦系数较大.雪层与粗集料表面之间的黏结力不及冰层牢固,因此雪层内部的相对滑动也是影响积雪路面抗滑性能的关键因素.

对于浮雪或者浮雪-压实雪状态的路面,雪层厚度是决定雪层内层间滑动的关键.对于压实状态的积雪,雪层内部的层间相对滑动主要受路面温度的影响,对路面温度和摩擦系数数据进行拟合,结果如图11所示.由图11可见,路面温度与摩擦系数之间存在较好的指数函数关系,拟合优度 R^2 为 0.989.

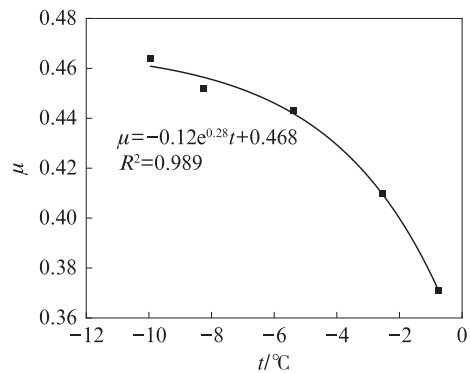


图11 压实状态积雪路面摩擦系数拟合曲线
Fig. 11 Fitting curves of friction coefficient for the compacted snow pavement

3 结论

(1) 冰层对路面纹理的覆盖阻碍了粗集料表面与轮胎橡胶接触,是导致结冰路面抗滑性能下降的主要原因.冰层厚度与路面的摩擦系数存在较好的相关性.

(2) 雪层内的层间滑动是影响积雪路面抗滑性能的关键因素.对于浮雪-压实雪混合状态的路面,

雪层厚度增加会降低路面对雪层的稳固作用,导致层间相对滑动加剧;对于压实状态的积雪路面,路面温度上升使雪层蓬松也会加剧层间相对滑动.积雪消融时路面会形成薄冰层,使路面的摩擦系数明显降低.冰雪总厚度与摩擦系数存在较好的相关性.

(3) 对于结冰路面,摆值与摩擦系数存在较好的线性关系.滑块的滑动与轮胎的滚动存在较大的差异,摆式仪无法对浮雪和压实的积雪路面进行抗滑性能测试.

(4) 结冰路面、积雪路面和积雪消融路面的摩擦系数随着路表覆盖物厚度的变化不断改变,导致每种路面状态的摩擦系数并不存在代表值,而是在较大的区间内变动.

参考文献:

- [1] HALL J W, SMITH K L, TITUS-GLOVER L, et al. Guide for pavement friction[R]. Washington D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 2009.
- [2] DAN H C, HE L H, XU B. Experimental investigation on skid resistance of asphalt pavement under various slippery conditions [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2017, 18(6): 485-499.
- [3] KLEIN-PASTE A. Airplane braking friction on dry snow, wet snow or slush contaminated runways[J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, 150:70-74.
- [4] KUTTESCH J S. Quantifying the relationship between skid resistance and wet weather accidents for Virginia data [D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2004.
- [5] QIU L, NIXON W A. Effects of adverse weather on traffic crashes: Systematic review and meta-analysis[J]. Transportation Research Record, 2008, 2055:139-146.
- [6] 孙大权, 孙国强, 刘富良. 导电超薄抗滑磨耗层长期性能试验研究[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(6):991-995.
- SUN Daquan, SUN Guoqiang, LIU Fuliang. Long-term performance of conductive ultra-thin anti-skidding wearing course [J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(6):991-995. (in Chinese)
- [7] 谭忆秋, 侯明昊, 单丽岩, 等. 蓄盐沥青路面缓释络合盐填料的研制[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(2):256-260.
- TAN Yiqiu, HOU Minghao, SHAN Liyan, et al. Development of sustained release complex salt filler for asphalt pavement included salt[J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(2): 256-260. (in Chinese)
- [8] 谭忆秋, 李济鲈, 徐慧宁. 冰雪路面摩擦特性与运营风险管控研究综述[J]. 中国公路学报, 2022, 35(7):1-17.
- TAN Yiqiu, LI Jilu, XU Huining. Review on friction characteristics and operation risk intelligent management of ice and snow pavement[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(7):1-17. (in Chinese)
- [9] KOGBARA R B, MASAD E A, KASSEM E, et al. A state-of-the-art review of parameters influencing measurement and modeling of skid resistance of asphalt pavements[J]. Construction and Building Materials, 2016, 114:602-617.
- [10] BHOOPALAM A K, SANDU C, TAHERI S. Experimental investigation of pneumatic tire performance on ice: Part 1—Indoor study[J]. Journal of Terramechanics, 2015, 60:43-54.
- [11] BHOOPALAM A K, SANDU C, TAHERI S. Experimental investigation of pneumatic tire performance on ice: Part 2—Outdoor study[J]. Journal of Terramechanics, 2015, 60:55-62.
- [12] TAN T, XING C, TAN Y Q, et al. Safety aspects on icy asphalt pavement in cold region through field investigations [J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, 161:21-31.
- [13] TAN T, XING C, TAN Y Q. Rubber friction on icy pavement: Experiments and modeling [J]. Cold Regions Science and Technology, 2020, 174:103022.
- [14] SALIMI S, NASSIRI S, BAYAT A, et al. Lateral coefficient of friction for characterizing winter road conditions[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2016, 43(1):73-83.