

# 潮湿沥青路面抗滑性能数值模拟

杨 军<sup>1</sup>,王昊鹏<sup>1</sup>,吴 琦<sup>2</sup>

(1. 东南大学 交通学院,江苏 南京 210096; 2. 广东省交通规划设计研究院股份有限公司,广东 广州 510000)

**摘 要:**为了模拟评价不同条件下潮湿沥青路面的抗滑性能,利用分形理论中的 IFS 插值方法在 MATLAB 中编程生成三维沥青路表,将其导入有限元软件 ABAQUS 中,生成与实际相符的三维路表,并建立轮胎-路面接触模型;将计算流体动力学软件 FLUENT 计算得到的水膜对轮胎作用力结果导入 ABAQUS 软件中以表征水膜影响,最终建立轮胎在潮湿路面上的高速行驶模型;以附着系数为抗滑指标,分析沥青路面在车、路、环境综合作用下的抗滑性能。研究表明:轮胎与路面间的附着系数随车速提高而下降,随轮胎荷载增加而增加,随轮胎胎压的减小而增加;附着系数随水膜厚度的增加而降低,且水膜厚度较小时,附着系数随车速变化较明显;在速度较小时,水膜厚度对附着系数的影响较大;附着系数随构造深度的增加而增加,但当构造深度增加到一定程度时,继续增加构造深度不能显著地改善沥青路面抗滑性能,还会带来负面影响。

**关键词:**道路工程;沥青路面;抗滑性能;附着系数;有限元模拟

**中图分类号:**U414

**文献标志码:**A

## Numerical simulation on skid resistance property of wet asphalt pavement

YANG Jun<sup>1</sup>, WANG Hao-peng<sup>1</sup>, WU Qi<sup>2</sup>

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China; 2. Guangdong Province Communications Planning and Designing Insititute Co. Ltd., Guangzhou 510000, Guangdong, China)

**Abstract:** In order to simulate and evaluate the skid resistance property of wet asphalt pavement, IFS interpolation method was used to build a 3D asphalt pavement surface texture model in MATLAB. The 3D asphalt pavement surface model was then imported into FEM software (ABAQUS). The contact model between the tire and pavement surface was constructed thereafter. The results on the acting force of water film on the tire from FLUENT were also imported into ABAQUS to characterize the influence of the water film. Based on the above efforts, the final model, which simulates high speed tire upon wet pavement surface, was established. The adhesion coefficient was set as anti-skid index to evaluate skid resistance property of asphalt pavement under synthetic action among vehicles, roads and environment. The results show that the adhesion coefficient between tires and pavement surface decreases with the increase of driving speed, while it increases with the increase of traffic loading and the decrease of tire pressure, and decreases with the increase of water membrane thickness. Adhesion coefficient changes rapidly with vehicle speed when water membranethickness is relatively thin. Thickness of water membrane affects the adhesion coefficient substantially in a low driving speed, and

adhesion coefficient increases with the increase of texture depth. However, when the texture depth reaches a critical value, additional texture depth will bring negative impact instead of enhancing the anti-skid performance. 14 figs, 20 refs.

**Key words:** road engineering; asphalt pavement; anti-skid property; adhesion coefficient; finite element simulation

## 0 引言

汽车在潮湿路面上行驶时,由于水膜的润滑作用,轮胎与路面间的附着系数降低,轮胎容易打滑,汽车操作稳定性降低,严重影响交通安全<sup>[1-5]</sup>。德国研究学者调查表明,当高速公路路表侧向力系数的平均值从 0.43 下降到 0.23 时,雨天事故发生概率将从 0.027 提高到 0.14,增加了 5 倍<sup>[6]</sup>。因此雨天的行车安全是不容忽视的问题,研究潮湿路面的抗滑性能具有重要的意义。

潮湿路面抗滑性能分析涉及到流固耦合问题,以往对其分析多采用物理试验方法,成本高、难度大,而且具有破坏性<sup>[7-9]</sup>。随着计算机科学技术和数值计算技术的发展,20 世纪 90 年代后期不少学者开始对潮湿路面抗滑性能进行数值解析研究。Mcgee 等在轮胎滑水现象数值模拟方面做了一些前期研究工作<sup>[10]</sup>;随后,日本学者 Nakajima 等利用 MSC. Dytran 有限元分析软件,采用 FEM 和 FVM 相结合的方法研究花纹建模中建模方法对轮胎滑水的影响<sup>[11]</sup>;韩国学者 Cho 等对带有复杂花纹轮胎的滑水现象进行仿真,研究了流体升力随时间的变化关系,第一次考虑了轮胎的复杂花纹,与实际更接近<sup>[4,12]</sup>。中国学者朱林培基于 Ls-dyna 软件模拟了楔形水膜逐渐被挤入轮胎花纹沟槽并沿花纹沟槽排出时的情形以及轮胎滑水产生的过程<sup>[5,13]</sup>;王国林等基于 ABAQUS 软件建立了能够进行滑水仿真的有限元模型,模拟了轮胎滑水的产生过程,计算得到了不同水膜厚度下流过花纹沟的水流速度,从水流速度的角度解释了滑水产生机理,并计算了单个花纹空腔的排水量<sup>[14]</sup>。现有研究往往只关注于某一因素影响下的路面抗滑性能,较少关注车、路、环境(降水)综合作用下,路面抗滑性能的变化规律。

为此,本文在分析轮胎-路面接触机理的基础上,运用 ABAQUS 有限元软件建立轮胎-沥青路面模型;并将 FLUENT 软件计算得到的动水压力结果导入 ABAQUS 以考虑水膜影响,从而建立轮胎在潮湿路面上的行驶模型;并以附着系数作为抗滑性能评价指标,评价不同条件下潮湿沥青路面的抗

滑性能。

## 1 轮胎-路面模型的建立

### 1.1 轮胎模型

研究表明:由于小轿车行驶速度较高且本身质量较轻,相对于货车或客车更容易发生滑水现象<sup>[15]</sup>,故本文选用小轿车 175/65R14 型子午线轮胎作为研究对象。轮胎是一个由多种材料组成的复杂部件,主要由橡胶、帘线-橡胶复合材料、轮辋等构成。橡胶材料为不可压缩超弹性材料,选用超弹性 NeoHookean 模型;帘线-橡胶复合材料属于正交各向异性材料,选用 ABAQUS 软件中的 Rebar 单元模拟;轮辋为刚性材料。首先在 ABAQUS 有限元软件中建立 1/2 轮胎的二维断面模型,然后利用 ABAQUS 程序提供的 SYMMETRIC MODEL GENERATION 功能,将二维模型绕圆周旋转 360°得到 1/2 轮胎三维模型,最后将 1/2 轮胎三维模型轴对称转化便可建立完整的三维轮胎模型,如下页图 1 所示。

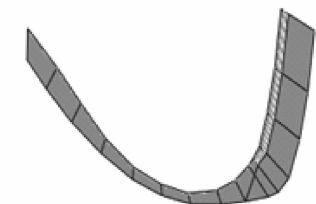
### 1.2 轮胎模型验证

通过对轮胎进行静力学分析,建立轮胎和路面的接触,以验证模型的精确性。轮胎静力学分析主要包括 3 个步骤:①装配轮胎并进行标准气压充气;②建立轮辋和轮胎及轮胎和路面间的接触;③对轮胎加载静态载荷<sup>[16]</sup>。下页图 2 为轮胎胎压为 220 kPa、轮胎上施加的荷载为 3.3 kN 时轮胎的竖向变形以及接触压力分布。

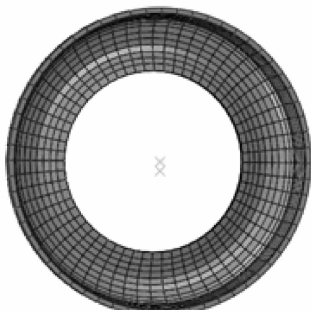
假定轮胎胎压为 220 kPa,将不同荷载作用下的轮胎竖向变形模拟值和经验公式进行对比以验证轮胎模型的可靠性,结果见下页图 3。可以看出,模拟结果与经验公式计算结果相差较小,且相关性较高,所以建立的轮胎模型可靠。

### 1.3 路面模型

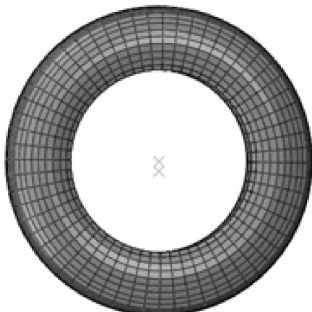
沥青路表形貌具有明显的随机性和复杂性,传统的断面类量测仪器很难全面地反映沥青路表的特征。本文借助分形理论中的 IFS 插值方法在 MATLAB 中编程生成三维沥青路表。以 10 cm×10 cm 矩形路面时间为例,X、Y 方向上分别间隔 0.5 cm



(a) 1/4轮胎模型



(b) 1/2轮胎三维模型



(c) 完整轮胎三维模型

图 1 轮胎建模步骤  
Fig. 1 Stages of tire modeling

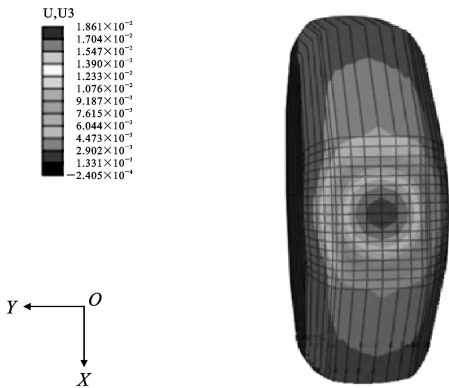


图 2 轮胎静力学分析  
Fig. 2 Statics analysis of tire

有 1 个测量点,共有  $21 \times 21$  个原始数据,原始图形和分形插值后图形如图 4 所示。

本文假定沥青路表水平,未考虑路面横坡和纵

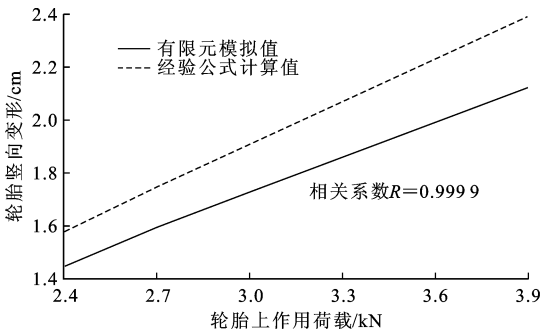
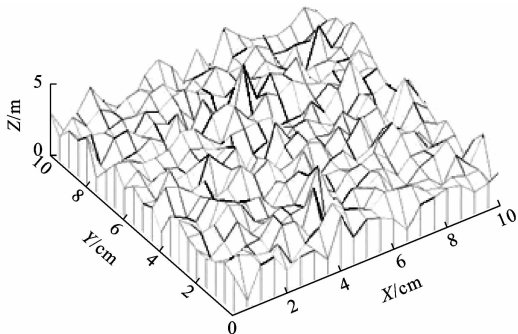
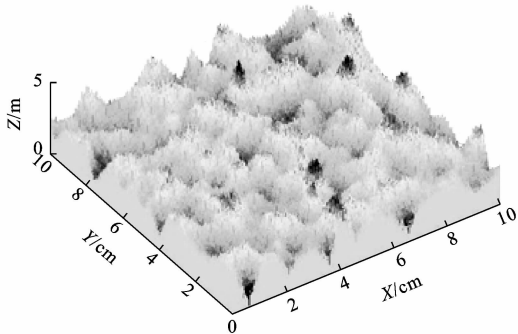


图 3 轮胎竖向位移对比  
Fig. 3 Comparison of vertical displacements of tires



(a) 原始数据点路面曲面



(b) IFS插值后的路面模拟曲面

图 4 分形插值曲面

Fig. 4 Curved surface of fractal interpolation

坡。根据已有二维研究数据结果  $X_i$  与  $Z_i$ <sup>[17]</sup>,令  $X_i=Y_i$ ,得到三维初始插值数据。路面宏观构造和微观构造均对路面抗滑性能有重要影响,但由于实测数据有限,且微观构造深度的引入会使路面模型更加复杂,难以实现数值模拟。运用上述 IFS 方法,在 MATLAB 中生成三维沥青路表后,导出各数据点三维坐标,通过 ABAQUS 中的 ELGEN 命令对数据进行转换。由于数据点非常多,在 ABAQUS 的 CAE 界面下操作比较困难,而在 INP 文件中可以方便地处理路表数据,因此本文选择通过 INP 文件来模拟沥青路表。沥青路面假定为刚体,选用 R3D4 单元,路面节点在平移和旋转的各个方向上都是固定的。假定路表面为主平面,胎面为附属面,

轮胎只有定轴转动,没有平动,路面模型向后平动,轮胎所受荷载施加在轮辋中心。路面与胎面单元之间的接触用库仑摩擦定律表示,完整模型如图 5 所示。

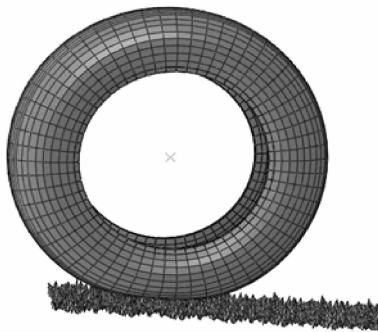


图 5 轮胎与沥青路面接触模型

Fig. 5 Contact model of tire and asphalt pavement

1.4 水膜的影响

水膜对沥青路面抗滑性能有很大影响,路面在降雨情况下事故发生概率大大增加。本文通过调整模型中轮胎与路面之间的摩擦因数,来实现水膜对摩擦阻力的影响分析。通过 FLUENT 软件计算水膜对轮胎的动水压力大小,FLUENT 软件中模型建立过程如下所述。

1.4.1 简化轮胎模型

为节约计算时间,根据轮胎竖向位移以及接地面积相同的原则,依照有限元计算结果对轮胎进行简化。接触面向上截取 40 mm 厚的滑片作为轮胎模型,按图 6 计算,轮胎下表面为 204.92 mm×143.63 mm,上表面为 350.60 mm×175.00 mm。

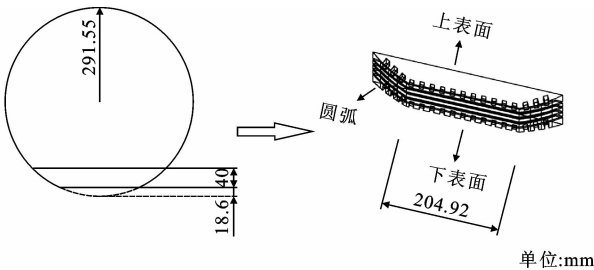


图 6 轮胎简化计算

Fig. 6 Simplified calculation of tire

1.4.2 流体模型

由于 FLUENT 软件只能计算有限尺寸下流体的力学响应,因此需要截取有效的流体计算区域,依据垂直应力及接地尺寸特性,经过反复试算,本文确定的流体计算区域为: X 方向即轮胎前进方向为 1 000 mm, Z 方向即轮胎宽度方向为 500 mm, Y 方向即流体深度为 40 mm,空气厚度随水膜厚度而改变。

FLUENT 软件中提供的紊流模型包括标准  $k-\epsilon$

模型与 RNG  $k-\epsilon$  模型。与标准  $k-\epsilon$  模型相比, RNG  $k-\epsilon$  模型能更为广泛地适用于紊流流动,特别是弯曲壁面流动或弯曲流线流动等,并且有着更高的精度和可信度<sup>[18]</sup>。由于轮胎属于弯曲壁面,故本文选取 RNG  $k-\epsilon$  模型模拟高速行驶轮胎下的流体进行计算。模拟中既有水流又有空气流,即涉及到两相流动问题,采用欧拉多相流-VOF 模型,这是一种在固定的欧拉网格下的表面追踪方法,能够有效地模拟水流流动趋势。

1.4.3 边界条件

边界条件以及初始条件应尽量贴近现实,且边界条件的不同会影响迭代次数以及计算结果的收敛性,计算中设定轮胎不动,空气和水以恒定速度相对于轮胎运动,因此将流体前端设定为空气和水的速度入口,后端及上面设为压力出口,左右两端设为没有摩擦的墙体,下面设为移动的墙体,最终模型见图 7。

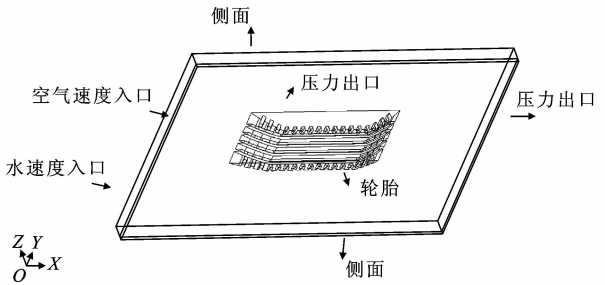


图 7 完整模型

Fig. 7 Integrated model

在 FLUENT 软件中利用上述模型计算不同工况下轮胎所受动水压力大小,并通过 ABAQUS 子程序将模拟得到的动水压力施加到与水膜接触的胎面单元上,以考虑水膜的影响。

2 抗滑性能评价指标

根据轮胎-路面摩擦形成机理<sup>[19]</sup>,轮胎与路面的接触区域可分为两部分:粘着区域与滑动区域,受力状态如下页图 8 所示。作用在粘着区域  $l_n$  的力有法向反力  $P_n$  与静摩擦力  $F_{sn}$ ;作用在滑动区域  $l_b$  的力有法向反力  $P_b$  与滑动摩擦力  $F_{sb}$ ,法向荷载由路面法向反力承担,路面对轮胎的附着力使得轮胎向前运动。

定义附着系数为作用在整个接触面上的水平反力和法向荷载之比

$$\varphi_x = F_x / P \tag{1}$$

式中:  $\varphi_x$  为附着系数;  $F_x$  为整个接触面上水平反力;  $P$  为路面法向荷载。

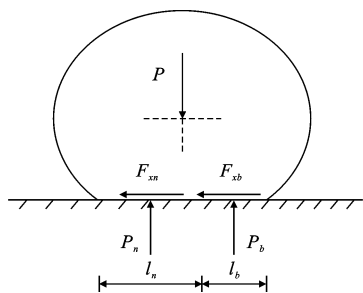


图 8 驱动轮弹性滑转

Fig. 8 Elastic slip of driving wheel

由于轮胎与路面接触区域由粘着区域和滑动区域两部分组成,因此,附着系数不同于摩擦因数,包括静摩擦因数和滑动摩擦因数 2 个因素。只有胎面滑移面积或滑转面积扩大到整个接触面积时,附着系数与摩擦因数在某种意义上才是相当的,即附着力等于摩擦力。本文运用附着系数作为沥青路面抗滑性能评价指标。

### 3 结果分析与讨论

#### 3.1 不同车速对附着系数的影响

汽车行驶速度对轮胎与沥青路面间的附着系数有一定影响。假定轮胎胎压为 220 kPa,荷载为 3.3 kN,以不同速度在干燥或 4 mm 水膜厚度的路面上滚动,计算不同车速下轮胎与沥青路面间的附着系数,计算结果见图 9。

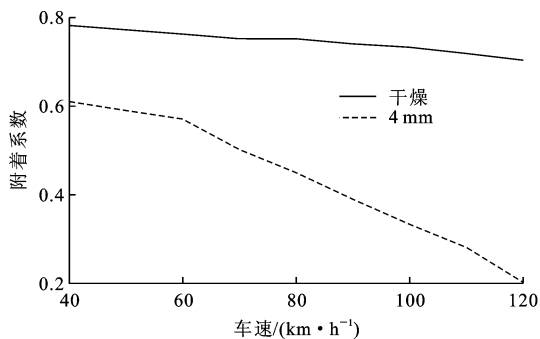


图 9 附着系数随车速变化曲线

Fig. 9 Curves of adhesion coefficient versus vehicle speed

由图 9 可见,路面干燥时,轮胎与路面间的附着系数随车速的增加而缓慢下降,下降幅度不大,且车速越高越趋于稳定。这可能是因为轮胎离心惯性力会使胎冠沿径向向外移动,车速增大时轮胎离心惯性力增大,轮胎与路面间接触面积会有小量减小。路面潮湿时,轮胎与路面间的附着系数随车速增加而显著降低,从图 9 曲线变化趋势可以看出,在速度为 40~60 km/h 区间内相对较为平缓;当速度高于 60 km/h 时,下降趋势较为急剧。路面潮湿时,轮胎

不仅受离心惯性力作用,还受到水膜对它的动水压力作用,且动水压力作用更明显,车速增大,动水压力增大,动水压力将轮胎抬升,轮胎与路面接触面积减小,这可能是导致附着系数随车速增加而降低的主要原因。

#### 3.2 不同轮胎荷载对附着系数的影响

轮胎上施加的荷载会影响汽车的行驶性能。假定轮胎胎压为 220 kPa,以不同速度在 4 mm 水膜厚度的路面上滚动,改变轮胎荷载(2.8、3.3、3.8 kN),计算不同荷载作用下轮胎与沥青路面间的附着系数,计算结果如图 10 所示。

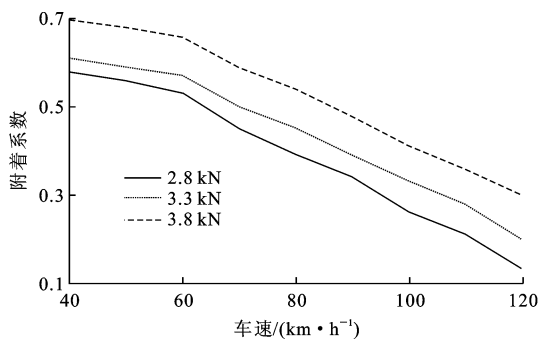


图 10 附着系数随轮胎荷载变化曲线

Fig. 10 Curves of adhesion coefficient versus tire load

从图 10 可以看出,附着系数随轮胎荷载增大而变大。在胎压不变的情况下,轮胎荷载增加,轮胎的接地面积必然增加,因此附着系数也可能随之增大。

#### 3.3 不同轮胎胎压对附着系数的影响

轮胎胎压对汽车行驶性能有较大影响。充气压力较小时,轮胎变形较大,其滚动阻力也将增大,汽车用于克服滚动阻力的燃料消耗变大;充气压力较大时,车辆操控性能及乘坐舒适性低。假定轮胎荷载为 3.3 kN,以不同速度在 4 mm 水膜厚度的路面上滚动,改变轮胎荷载(180、220、260 kPa),计算不同胎压下轮胎与沥青路面间的附着系数,计算结果见下页图 11。

从图 11 可以看出,附着系数随轮胎胎压的减小而变大。在荷载不变的情况下,轮胎胎压减小,轮胎的接地面积增加,附着系数也随之增大。

#### 3.4 不同水膜厚度对附着系数的影响

假定轮胎胎压为 220 kPa,荷载为 3.3 kN,以不同速度在不同水膜厚度的路面上滚动,计算不同水膜厚度时轮胎与沥青路面间的附着系数。根据推导出的水膜厚度计算公式(详细推导过程见文献[20])确定水膜厚度分别为 2、4、6、8、10 mm,计算结果见下页图 12。

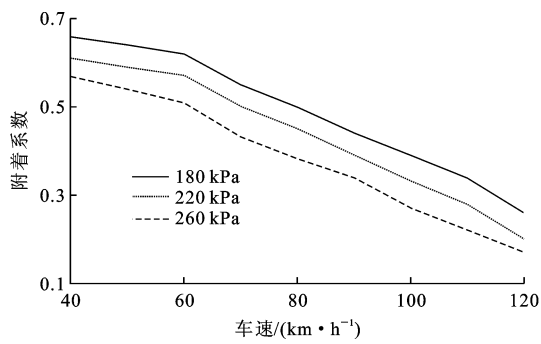


图 11 附着系数随轮胎胎压变化曲线

Fig. 11 Curves of adhesion coefficient versus tire pressure

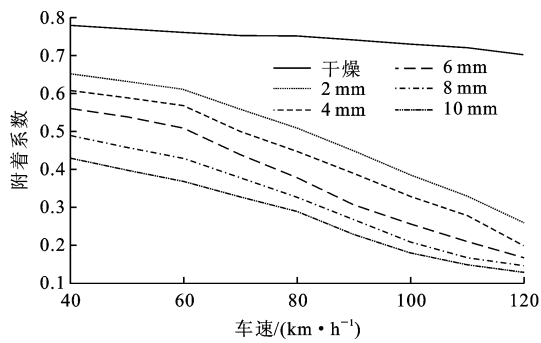


图 12 不同速度下附着系数随水膜厚度变化曲线

Fig. 12 Curves of adhesion coefficient versus water film thickness under different vehicle speed

从图 12 可以看出,水膜厚度增加,轮胎与路面间的附着系数随之降低。从 5 条曲线发展趋势看,水膜厚度较小时,附着系数随车速变化较明显;水膜厚度较大时,附着系数随厚度变化则相对平缓;在速度较小时,水膜厚度对附着系数的影响较大;随着速度的增加,水膜厚度变化对附着系数的影响逐渐减小。水膜的存在一方面产生较高的动水压力,导致轮胎与路面部分甚至完全脱离;另一方面水膜充当了轮胎与路面之间的润滑膜,降低了轮胎与路面之间的摩擦阻力。这 2 个方面的综合作用使得沥青路面的附着系数下降,降低其抗滑性能。

3.5 不同构造深度对附着系数的影响

本文采用平均断面深度(mean profile depth, MPD)作为控制标准,再根据 MPD 与构造深度的关系来实现对构造深度的分析。MPD 是目前检测沥青路面宏观纹理的常用参数,其物理意义如图 13 所示。取 100 mm 长度的路面样本,将样本分为两部分,分别测得每部分的峰值,得到峰值  $h_1$  和峰值  $h_2$ ,2 个峰值的平均值减去断面的平均值(即图 13 所示中线  $h$ ),即可得到 MPD

$$I_{MPD} = \frac{h_1 + h_2}{2} - h \tag{2}$$

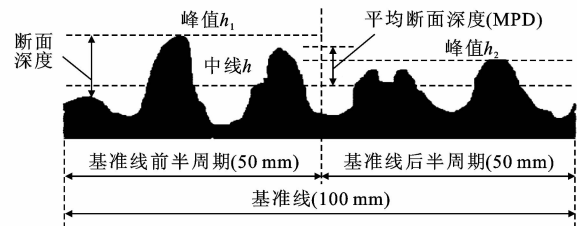


图 13 沥青路面平均断面深度

Fig. 13 Mean profile depth of asphalt pavement

将 MPD 转化为等量的铺砂法构造深度(ETD)

$$I_{ETD} = 0.8 I_{MPD} + 0.2 \tag{3}$$

式中: $I_{MPD}$  为 MPD 的计算参数; $I_{ETD}$  为 ETD 的计算参数。

沥青路表数据中  $Z_i$  值的变化会引起路表颗粒纵向高度的变化,构造深度也随之改变,故在分形插值过程中,只需对  $Z_i$  值的大小进行改变,便可以得到构造深度不同的沥青路面。本文在实测平均断面深度(1.228 mm)的基础上,以 0.2 mm 为单位进行递增(递减),分别模拟平均断面深度为 0.628、0.828、1.028、1.428、1.628、1.828 mm 时,沥青路面的抗滑性能,行车速度为 60 km/h。针对干燥和潮湿路面(水膜厚度为 4 mm)2 种工况下的模拟结果如图 14 所示。

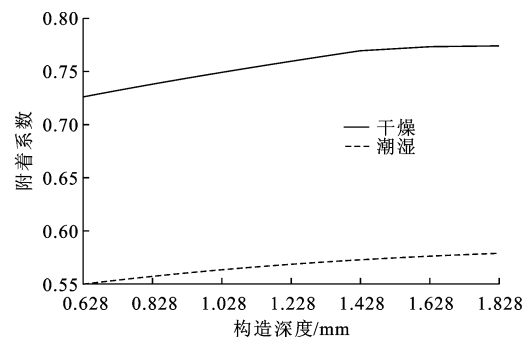


图 14 沥青路面的附着系数随构造深度的变化曲线

Fig. 14 Curves of adhesion coefficient versus texture depth

3.5.1 干燥路面

车辆在干燥沥青路面上行驶时,沥青路面构造深度对干燥沥青路面抗滑性能的影响主要体现在 2 个方面:一是宏观构造引起胎面橡胶变形产生的弹性变形摩擦力;二是弹性变形滞后引起的能量损失。从图 14 可以看出,干燥沥青路面的附着系数随构造深度的增大而增大;但当构造深度增大到一定程度时,其对附着系数的影响变小,当构造深度继续增大时,附着系数几乎没有改变。轮胎胎面橡胶在载荷作用下会产生变形,能够包容沥青路面宏观构造凸出体。凸出体高度方向尺寸为 0.5~20.0 mm。当

凸出体高度较小时,轮胎胎面橡胶产生的变形能够完全包容凸出体,胎面橡胶在凸出体作用下产生的最大应力与凸出体高度成正比,沥青路面抗滑性能随凸出体高度的增加而提高。当凸出体高度较大时,轮胎胎面橡胶产生的变形只能部分包容凸出体,凸出体顶部承担轮胎荷载,此时凸出体高度增加对胎面橡胶的变形没有影响,路表抗滑性能也不会因此而改变。

### 3.5.2 潮湿路面

车辆在潮湿路面上行驶时,沥青路面构造深度的存在有利于将路面积水排除。从图14中可以看出,随着构造深度的增大,附着系数也随之增大。可以理解为构造深度变大时,轮胎与路面接触区的积水更容易排出,能够减小路面积水对沥青路面抗滑性能的影响。

在沥青路面设计时,应综合考虑构造深度对不同路面条件下抗滑性能的影响,从本文的分析结果可以看出,沥青路面抗滑性能随构造深度的增大而增大,但当构造深度增大到一定程度时(本文研究结果为1.428 mm),继续增大构造深度对于干燥路面抗滑性能没有多大的改善,对于降雨量不大的地区,构造深度已足以排除路面积水,增加构造深度对提高潮湿路表的抗滑能力没有显著作用。

## 4 结 语

(1)轮胎与路面间的附着系数随车速提高而下降,随着轮胎荷载增大而增大,随着轮胎胎压的减小而变大。

(2)轮胎与路面间的附着系数随着水膜厚度的增加而降低,且水膜厚度较小时,附着系数随车速变化较明显;水膜厚度较大时,附着系数随厚度变化则相对较平缓;在速度较小时,水膜厚度对附着系数的影响较大;随着速度的增加,水膜厚度变化对附着系数的影响逐渐减小。

(3)附着系数随构造深度的增大而增大,但当构造深度增大到一定程度时(本文研究结果为1.428 mm),继续增大构造深度不能很好地改善沥青路面抗滑性能,还会带来负面影响。

(4)本文在建立轮胎有限元模型的过程中,为简化模型的复杂程度而忽略了轮胎的斜向花纹,与实际情况有部分出入,且本文模拟的沥青路表为水平路表,未考虑路面横坡、纵坡以及路面微观纹理的影响,在今后的研究中可进一步深化。

### 参考文献:

### References:

[1] ASI I M. Evaluating skid resistance of different as-

phalt concrete mixes[J]. Building and Environment, 2007,42(1):325-329.

[2] FWA T F, CHOO Y S, LIU Y. Effect of aggregate spacing on skid resistance of asphalt pavement[J]. Journal of Transportation Engineering, 2003,129(4): 420-426.

[3] HADIWARDYO S P, SINAGA E S, FIKRI H. The influence of buton asphalt additive on skid resistance based on penetration index and temperature[J]. Construction and Building Materials, 2013,42:5-10.

[4] ARAUJO V M C, BESSA I S, BRANCO V T F C. Measuring skid resistance of hot mix asphalt using the aggregate image measurement system (AIMS) [J]. Construction and Building Materials, 2015, 98: 476-481.

[5] WANG D W, CHEN X H, YIN C E, et al. Influence of different polishing conditions on the skid resistance development of asphalt surface[J]. Wear, 2013, 308 (1/2):71-78.

[6] WANG D W, CHEN X H, OESER M, et al. Study of micro-texture and skid resistance change of granite slabs during the polishing with the Aachen polishing machine[J]. Wear, 2014, 318(1/2):1-11.

[7] SRIRANGAM S K, ANUPAM K, SCARPAS A, et al. Safety aspects of wet asphalt pavement surfaces through field and numerical modeling investigations [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2014(2446):37-51.

[8] REZAEI A, MASAD E. Experimental-based model for predicting the skid resistance of asphalt pavements[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2013,14(1):24-35.

[9] ZHANG X N, LIU T, LIU C L, et al. Research on skid resistance of asphalt pavement based on three-dimensional laser-scanning technology and pressure-sensitive film[J]. Construction and Building Materials, 2014, 69:49-59.

[10] MCGHEE K K, GILLESPIE J S. Value of pavement smoothness [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2007 (2040):48-54.

[11] SETA E, NAKAJIMA Y, KAMEGAWA T, et al. Hydroplaning analysis by FEM and FVM: Effect of tire rolling and tire pattern on hydroplaning[J]. Tire Science and Technology, 2000,28(3):140-156.

[12] CHO J R, LEE H W, SOHN J S, et al. Numerical investigation of hydroplaning characteristics of three-dimensional patterned tire[J]. European Journal of Mechanics-A/Solids, 2006,25(6):914-926.

[13] 朱林培. 基于 Ls-dyna 的轮胎滑水特性研究[J]. 中国制造业信息化, 2009,38(11):72-74,77.

- ZHU Lin-pei. Simulation of tyre skidding based on Ls-dyna[J]. *Manufacture Information Engineering of China*, 2009, 38(11): 72-74, 77. (in Chinese)
- [14] 王国林, 陈海荣. 子午线轮胎滑水仿真分析[J]. *系统仿真学报*, 2012, 24(8): 1719-1722.
- WANG Guo-lin, CHEN Hai-rong. Simulation analysis of hydroplaning characteristics of radial tire[J]. *Journal of System Simulation*, 2012, 24(8): 1719-1722. (in Chinese)
- [15] 王建军, 王军锋, 毕明涛. 区域公路交通事故及高速公路交通事故特征[J]. *长安大学学报: 自然科学版*, 2005, 25(3): 66-69.
- WANG Jian-jun, WANG Jun-feng, BI Ming-tao. Characteristics of traffic accidents on highway and expressway[J]. *Journal of Chang'an University: Natural Science Edition*, 2005, 25(3): 66-69. (in Chinese)
- [16] WULLENS F, KROPP W. A three-dimensional contact model for tyre/road interaction in rolling conditions[J]. *Acta Acustica United with Acustica*, 2004, 90(4): 702-711.
- [17] 赵战利. 基于分形方法的沥青路面抗滑技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2005.
- ZHAO Zhan-li. Research on skid resistance technology of asphalt pavement based fractal method[D]. Xi'an: Chang'an University, 2005. (in Chinese)
- [18] KOKKALIS A G, TSOHOS G H, PANAGOULI O K. Consideration of fractals potential in pavement skid resistance evaluation[J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2002, 128(6): 591-595.
- [19] CHENG Y H. Mathematic characterization of road surface texture and its relation to laboratory friction measures[D]. Michigan: Michigan Technological University, 2002.
- [20] 吴琦. 沥青路面抗滑性能数值模拟研究[D]. 南京: 东南大学, 2014.
- WU Qi. Study on skid resistance property of asphalt pavement through numerical simulation technology[D]. Nanjing: Southeast University, 2014. (in Chinese)
- 
- (上接第 24 页)
- [10] CHAILLEUX E, RAMOND G, SUCH C, et al. A mathematical-based master-curve construction method applied to complex modulus of bituminous materials[J]. *Road Materials and Pavement Design*, 2006, 7(S1): 75-92.
- [11] BABADOPULOS L F A L, GUERN M L, CHAILLEUX E, et al. Low temperature specifications for asphalt binders: tests and simulation[J]. *Transportes*, 2011, 19(2): 7-15.
- [12] ZHAO M O, HESP S A M. Performance grading of the Lamont, Alberta C-SHRP pavement trial binders[J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2006, 7(3): 199-211.
- [13] ILIUTA S, HESP S A M, MARASTEANU M, et al. Field validation study of low-temperature performance grading tests for asphalt binders[J]. *Transportation Journal of the Transportation Research Board*, 2004, 1875(1): 14-21.
- [14] MARASTEANU M O, VELASQUEZ R, ZOFKA A, et al. Development of a simple test to determine the low temperature creep compliance of asphalt mixture[R]. Washington DC: IDEA Program Final Report NCHRP 133, 2009.
- [15] LI X J, MARASTEANU M O. Investigation of low temperature cracking in asphalt mixtures by acoustic emission[J]. *Road Materials and Pavement Design*, 2011, 7(4): 491-512.
- [16] KIM S S. Asphalt binder cracking device to reduce low temperature asphalt pavement cracking[J]. *Journal of Transportation Research Board*, 2010, 5(1): 19-28.
- [17] 曹丽萍, 谭忆秋, 董泽蛟. 应用玻璃化转变温度评价 SBS 改性沥青低温性能[J]. *中国公路学报*, 2006, 19(2): 1-6.
- CAO Li-ping, TAN Yi-qiu, DONG Ze-jiao. Evaluation for low temperature performance of SBS modified asphalt using glass transition temperature[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2006, 19(2): 1-6. (in Chinese)
- [18] TAN Y Q, ZHANG L, CHU H R. New index used to evaluate the high-temperature and low-temperature performance of asphalt[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2015, 27(8): 2-9.
- [19] WELLS A A. The application of fracture mechanics to yielding materials[J]. *Proceedings of the Royal Society A*, 1965, 285(1400): 34-45.
- [20] 苗张木. 厚钢板焊接接头韧度评定研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2005.
- MIAO Zhang-mu. Thick steel plate welded joint toughness evaluation research[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2005. (in Chinese)
- [21] XUE H, SHI Y W. CTOD design curve in consideration of material strain hardening[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 1998, 75(7): 567-573.