

# 轮胎/路表间水膜受力和排出特征及其 受刻槽参数的影响分析

孙振浩<sup>1,2</sup>, 陈俊<sup>2\*</sup>

(1.山东省交通规划设计院集团有限公司, 山东 济南 250101; 2.河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:**为研究轮胎作用下水泥混凝土路表水膜受力特征及其受刻槽的影响,采用SolidWorks和Ansys WorkBench,构建了轮胎-水膜-路表有限元模型,基于CFD控制方程和流固耦合理论,分析轮胎作用下路表水膜流动规律以及水膜厚度、行车速度、刻槽宽度、间距和方向对轮胎所受动水升力的影响。结果表明:轮胎迎水面所受动水升力随水膜厚度的增加而增大;当水膜厚度超过轮胎花纹深度后,动水升力增幅明显变大;增加路面刻槽宽度或减小刻槽间距,能够有效地降低轮胎所受的动水升力;在相同的刻槽参数下,路面横向刻槽的排水性能和对动水升力的降低幅度要优于纵向刻槽。

**关键词:**轮胎;水膜;路表;动水升力;刻槽

**中图分类号:**U416.2

**文献标志码:**A

## Analysis of Stress and Drainage Characteristics of Water Film between Tire and Road Surface and Influence of Groove Parameters

SUN Zhenhao<sup>1,2</sup>, CHEN Jun<sup>2\*</sup>

(1.Shandong Provincial Communications Planning and Design Institute Group Co., Ltd., Jinan, Shandong 250101, China;

2.College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

**Abstract:** In order to study the stress characteristics of water film on cement concrete road surface under the action of the tire and the influence of grooves, the finite element model of tire-water film-road surface was constructed using SolidWorks and Ansys Workbench. Based on computational fluid dynamics (CFD) control equation and fluid-structure coupling theory, the flow law of water film on road surface under the action of the tire and the influence of water film thickness, driving speed, groove width, groove spacing, and groove direction on the hydrodynamic lift of tire were analyzed. The results show that the hydrodynamic lift of the tire increases with the increasing water film thickness. The hydrodynamic lift increases obviously as the water film thickness exceeds the tread depth of the tire. The hydrodynamic lift of the tire can be reduced effectively by increasing the groove width and decreasing the groove spacing. The drainage performance of transverse pavement grooves is better than that of longitudinal pavement grooves under the same groove parameters, and the effect of the former in reducing the hydrodynamic lift is better.

**Keywords:** tire; water film; road surface; hydrodynamic lift; groove

## 0 引言

近年来,随着中国交通运输行业迅猛发展,道路交通量日益增大,交通事故也逐渐增多,尤其是雨季

湿滑公路上交通事故居高不下<sup>[1-5]</sup>。究其原因,汽车轮胎与公路表面间的水膜,对高速滚动的轮胎具有动水升力,降低了胎/路附着系数<sup>[6-10]</sup>。在此背景下,准确把握湿滑条件下轮胎-水膜-路表相互作用机

收稿时间:2022-02-21

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(编号:52144567);江苏省自然科学基金资助项目(编号:BK20191300);长沙理工大学公路养护技术国家工程实验室开放基金资助项目(编号:kfj180107);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(编号:B210202036)

**作者简介:**孙振浩,男,硕士研究生.E-mail:szh8358@163.com

**\*通信作者:**陈俊,男,博士,副教授.E-mail:chen\_jun2728@163.com

制,提出雨天提升胎/路附着能力的技术措施是近年来道路工作者研究的热点。

围绕车辆移动时轮胎与路表水膜相互作用,董斌等<sup>[11]</sup>构建了195/60 R14型轮胎有限元模型,并利用Ansys仿真软件,分析了路表水膜厚度及轮胎花纹深度对轮胎所受动水升力的影响;黄晓明等<sup>[12]</sup>建立了175/10 R15型轮胎三维充气有限元模型,采用Abaqus分析了动水升力与水膜厚度的关系;Jeong等<sup>[13]</sup>基于LS-DYNA模拟,研究了轮胎作用下厚度小于5 mm的水膜流动痕迹和力学特性;Cheng等<sup>[14]</sup>研究了行车速度对轮胎与路面之间接触系数的影响,并推导了临界滑水速度计算公式;刘修宇等<sup>[15]</sup>在沥青路表真实纹理下,分析了轮胎内压和花纹构造对雨天行车安全的影响。总结上述研究现状,轮胎-水膜-路表相互作用的已有研究,主要集中在水膜厚度、轮胎构造等对轮胎动水升力和临界滑水速度的影响,而路表状态尤其是水泥路表刻槽参数、方向等对动水升力的影响并不明确,导致目前难以从路表刻槽角度,提出减缓雨季交通事故的技术措施。

本文基于SolidWorks和Ansys WorkBench仿真平台,构建轮胎-水膜-光滑/刻槽路表的三维模型,依据CFD控制方程和流固耦合理论,模拟轮胎滚动时胎面受水膜的动态冲击作用,分析行车速度、水膜厚度、刻槽深度、间距及方向等对轮胎所受动水升力的影响规律,提出降低轮胎动水升力的路表合理刻槽参数。

## 1 轮胎-水膜-路表有限元模型建立

### 1.1 轮胎基本参数的确定

利用SolidWorks软件,建立小轿车常用的205/55 R16 91V子午线轮胎模型,模型尺寸如表1所示。由于胎面细小的横向花纹沟主要用于提升轮胎抓地力、降低胎/路噪声,排水作用弱于纵向沟槽,同时考虑到横向沟纹因尺寸较小,大幅降低了后续模拟效率,因此本文所建轮胎模型不考虑横向花纹沟,仅包括胎面、胎侧、胎肩、轮辋和纵向花纹沟等结构,如图1所示。本文将轮胎接地形状简化为矩形,根据轮胎接地面积与轮胎变形量之间的关系<sup>[16]</sup>,算得轮胎有限元模型在3 900 N荷载作用下的接地面积为378.57 cm<sup>2</sup>。

表1 轮胎模型参数

断面宽度/ mm	轮辋直径/ mm	外直径/ mm	纵向花纹沟深度/ mm
205.0	406.4	631.9	7.0

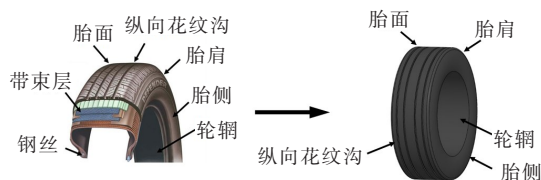
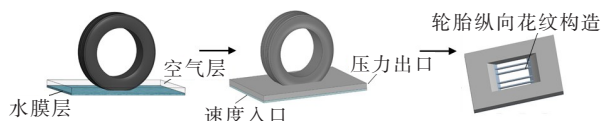


图1 子午线轮胎结构

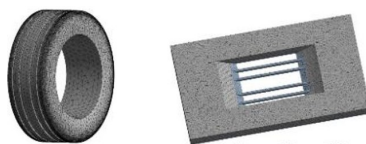
Figure 1 Structure of radial tire

### 1.2 三维有限元模型的建立

在Ansys WorkBench仿真平台导入所建立的轮胎模型,将其作用于路面实体之上,在路表之上构建尺寸为400 mm×600 mm的水膜层区域,并在水膜区域上方定义厚度为20 mm的散射空间,用于模拟水流的飞溅。由此建立的轮胎-水膜-路表三维模型如图2(a)所示,其中整个流体域分为水膜层和空气层,模型底部条纹是轮胎与路表接触后的纵向花纹构造内的流体域。利用Ansys WorkBench中的Mesh板块进行网格划分,将模型切分成若干四面体网格进行仿真模拟,轮胎与流体域的网格模型如图2(b)所示。



(a) 轮胎-水膜-路表模型示意图



(b) 模型有限元网格图

图2 轮胎-水膜-路表三维模型

Figure 2 3D model of tire-water film-road surface

在图2(a)中,水膜层区域在模拟开始前无水,模拟时将水以一定速度从入口进入(模拟水冲击轮胎胎面,相当于高速移动轮胎作用于水膜),水膜区域的上表面及后侧面为水的压力出口,轮胎-水膜-路表三维模型的侧面为无滑移壁面,流体域底面为与流体同速度同方向的滑动壁面。在上述模拟中,选

择VOF计算模型,利用PISO算法进行求解,并将流体域底面设置为与流体同速度同方向的滑动壁面。

### 1.3 有限元模型正确性验证

对表1所列参数的轮胎,采用基于NASA“轮胎滑水”理论的经验公式<sup>[17]</sup>,如式(1),计算得到在水膜厚度7 mm、轮胎所受荷载3 900 N(390 kg)、轮胎充气内压255 kPa时,轮胎的临界滑水速度为113.5 km/h,即轮胎速度为113.5 km/h时,此时轮胎与路表即将分离。

$$V^* = V + 12 \frac{D}{W} + 60e^{-3[W-(3+D/T)]} \quad (1)$$

式中: $V$ 为轮胎滑水临界速度(km/h), $V = 6.36\sqrt{P}$ <sup>[18]</sup>; $P$ 为轮胎充气内压(kPa); $V^*$ 为轮胎滑水速度经验值; $D$ 为轮胎胎面花纹构造深度(mm); $T$ 为轮胎横截面宽度(mm); $W$ 为水膜厚度(mm)。

根据上述临界滑水速度,对图2所建轮胎-水膜-路表模型中水膜区域设置115 km/h的进水速度,模拟得到不同时刻下轮胎所受竖向动水升力如图3所示。

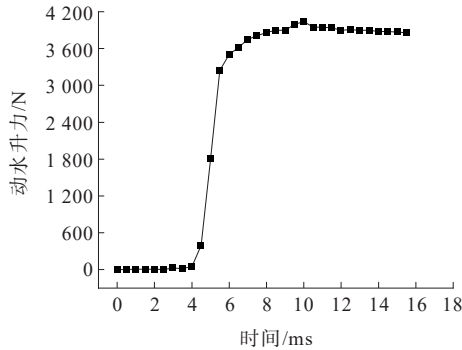


图3 行车速度为115 km/h时的动水升力

Figure 3 Hydrodynamic lift at driving speed of 115 km/h

由图3可见:在5 ms之前由于轮胎未与水接触,此时轮胎未受到动水升力;在5 ms左右,水膜区域的水开始与轮胎接触,轮胎所受动水升力快速增大到4 000 N左右;5 ms之后,由于胎面与水膜冲击稳定,此时动水升力保持在4 000 N左右。即轮胎以115 km/h速度作用在7 mm厚度水膜上,将受到4 000 N左右的动水升力,考虑到轮胎所受荷载为3 900 N,此时已经发生滑水。这与经验公式计算结果比较接近,说明本文有限元模拟的正确性。

## 2 光滑路表对水膜受力和流动的影响

### 2.1 轮胎周围流场及动水压强分析

水膜厚度8 mm,轮胎速度120 km/h时,采用

Ansys有限元模拟水膜冲击胎面,采用后处理软件CFD-Post跟踪水膜区域内水流运动轨迹,图4为移动轮胎与水膜冲击后的水流流线分布。

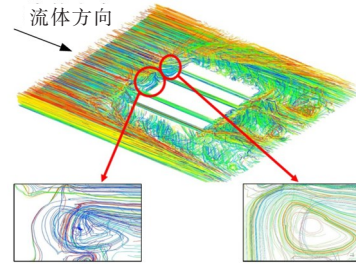


图4 水流流线分布

Figure 4 Distribution of water flow

由图4可以看出:在轮胎迎水胎面前方,水流成规则的“直线”形垂直作用于胎面,而与胎面接触的水膜,部分呈现漩涡状分布;轮胎与路面接触部分的胎面4条纵向沟槽内,有明显的水分流动,表明其具有排水作用;在两侧胎壁和背水面,水流有明显的喷射与飞溅。

图5为轮胎以120 km/h速度行驶在8 mm厚度水膜中,在2 mm、4 mm、6 mm和8 mm高度处水平截取的竖向动水压强分布图。

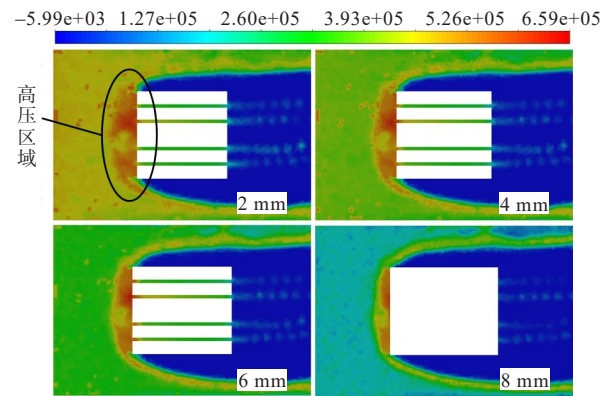


图5 不同高度的水膜层动水压强(单位:Pa)

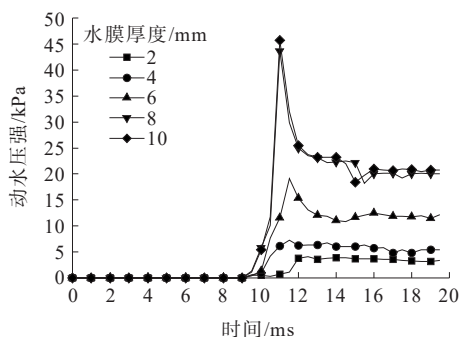
Figure 5 Hydrodynamic pressure of water film at different heights(unit:Pa)

由图5可以看出:动水压强整体分布与图4流线分布类似,呈“匚”分布,表现为轮胎迎水胎面前端的压强显著高于其他部位的动水压强;高动水压强分布范围排序为深度2 mm>4 mm>6 mm>8 mm,表明在一定厚度水膜内部,移动轮胎对越深处水膜的压强越大,亦即轮胎受到的竖向动水升力压强,在越深处越大。

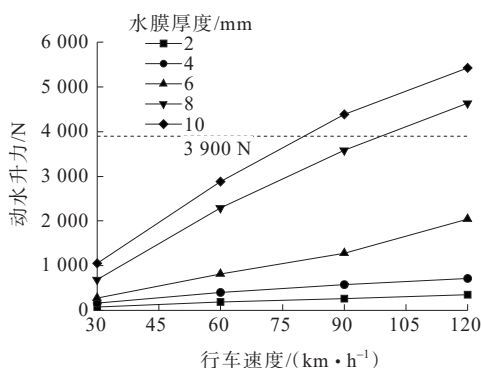


## 2.2 行车速度和水膜厚度对动水升力的影响

图 6(a) 为车辆以 60 km/h 的速度行驶在水膜上轮胎所受压强随时间的变化曲线。图 6(b) 为行车速度分别为 30 km/h、60 km/h、90 km/h 和 120 km/h 时,不同厚度水膜对 3 900 N 竖向荷载轮胎的竖向动水升力。



(a) 不同时间的动水压强 (行车速度: 60 km/h)



(b) 不同行车速度下的动水升力

图 6 不同水膜厚度下的动水压强和动水升力

Figure 6 Hydrodynamic pressure and hydrodynamic lift with different water film thickness

由图 6(a) 可以看出: 当水膜未与胎面接触时 (10 ms 以内), 胎面没有动水压强作用; 当 10 ms 时水膜冲击胎面时, 冲击作用产生的动水压强快速增长, 水膜厚度越大, 动水压强的增长幅度越高; 急速增长后, 动水压强快速下降并保持整体稳定, 水膜越厚, 其下降幅度越大, 尽管如此, 厚水膜的动水压强仍然高于薄水膜的动水压强。

从图 6(b) 可以明显看出: ① 在同一水膜厚度下, 随着车速增加, 轮胎受到的动水升力不断增加; 且随着水膜的增厚, 车速对动水升力影响幅度越来越大。可见, 厚水膜、高车速将引起高动水升力, 是诱发轮胎滑水的重要因素; ② 对于竖向荷载为 3 900 N 的轮胎, 当行驶在积水 8 mm 路面时, 为了避免滑水风险,

车速应当低于 100 km/h, 当行驶在积水 10 mm 路面时, 车速以低于 80 km/h 为宜。

## 3 刻槽宽度及间距对轮胎所受动水升力的影响

参考中国的现行规范以及国内外路面刻槽参数<sup>[19-21]</sup>, 本文在刻槽宽度 2~10 mm、刻槽间距 10~25 mm 之间, 拟定 9 组具有排水能力的路面刻槽, 选用四面体网格进行网格划分并分别进行胎-水动力模拟。在刻槽深度 2 mm 且刻槽间距 20 mm 条件下, 分别取刻槽宽度为 2 mm、4 mm、6 mm、8 mm、10 mm; 在刻槽深度 2 mm 且刻槽宽度 4 mm 条件下, 分别取刻槽间距为 10 mm、15 mm、20 mm 和 25 mm。图 7 为槽深 2 mm, 刻槽间距 20 mm 条件下, 不同刻槽宽度、水膜厚度和轮胎速度下轮胎所受竖向动水升力。

由图 7 可知: 在水膜厚度、刻槽宽度一定时, 随着车速的提高, 胎面动水升力逐渐增大, 这与无刻槽路表规律相同。在水膜厚度、轮胎速度一定时, 路表刻槽的宽度越大, 路表水膜对胎面的动水升力越小; 动水升力随刻槽宽度降低而下降的幅度, 随着水膜厚度的增大和行车速度的提高而增大。由此说明, 增大刻槽的宽度可以有效降低动水升力, 降低滑水风险, 尤其在水膜较厚、车速较快的路段, 刻槽宽度对动水升力的影响效果更加明显。

图 8 为刻槽间距 10 mm、15 mm、20 mm、25 mm 时, 不同水膜厚度、行车速度下胎面所受动水升力。

由图 8 可以看出: 当水膜厚度、行车速度一定时, 随着路表刻槽间距的减小, 胎面所受动水升力逐渐降低, 且这种降低幅度在车速较快时要比车速较慢时更为明显。由此表明: 降低刻槽间距是降低车速较快路段轮胎滑水风险的有效手段。

## 4 刻槽方向对水膜受力和流动的影响

### 4.1 刻槽方向对路面排水性能的影响

图 9 为车速 60 km/h、水膜厚度 6 mm、刻槽深度 2 mm 条件下, 不同刻槽方向的水膜单位时间内流出计算域 (400 mm × 600 mm × 2 mm 的水膜层区域) 的体积。

从图 9 可以看出: 在 0~9 ms 之间, 水膜从计算域进入, 尚未与胎面接触, 此阶段没有水流出计算域; 在 9 ms 时, 水膜开始冲击胎面, 水开始快速从计算域

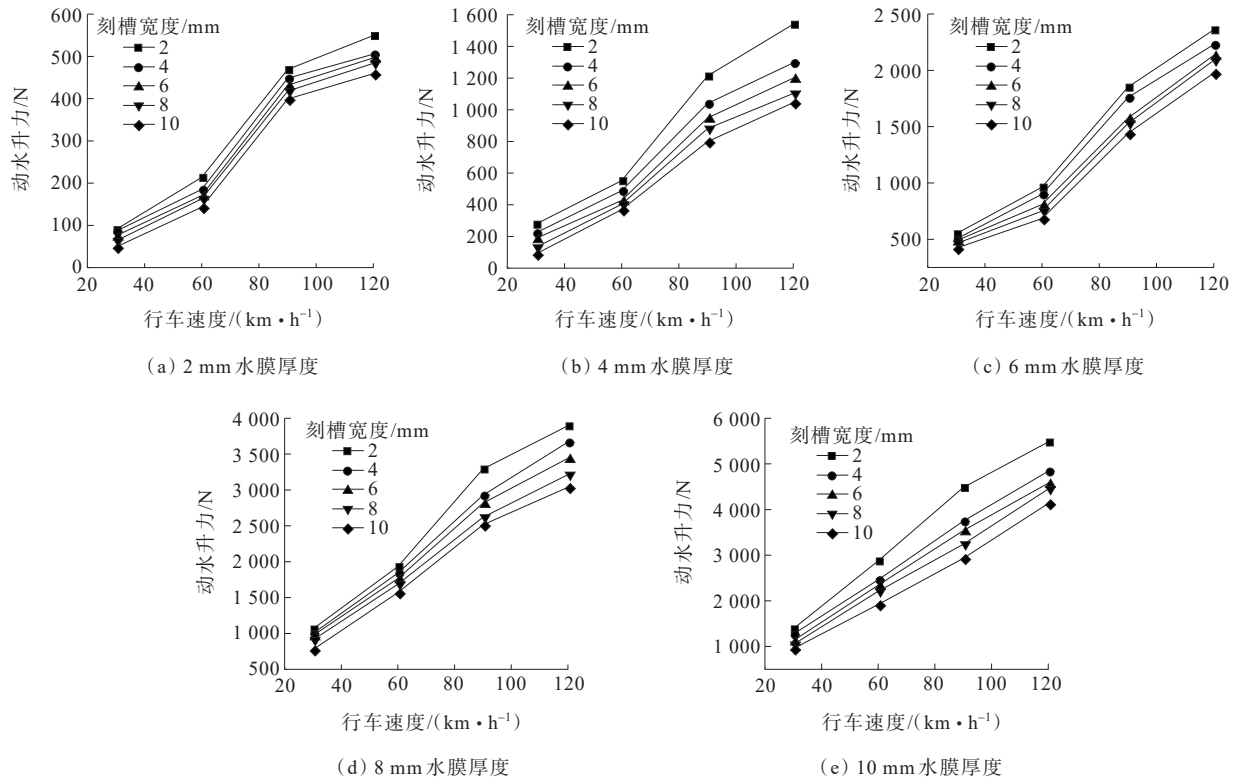


图7 刻槽宽度对动水升力影响

Figure 7 Effect of groove width on hydrodynamic lift

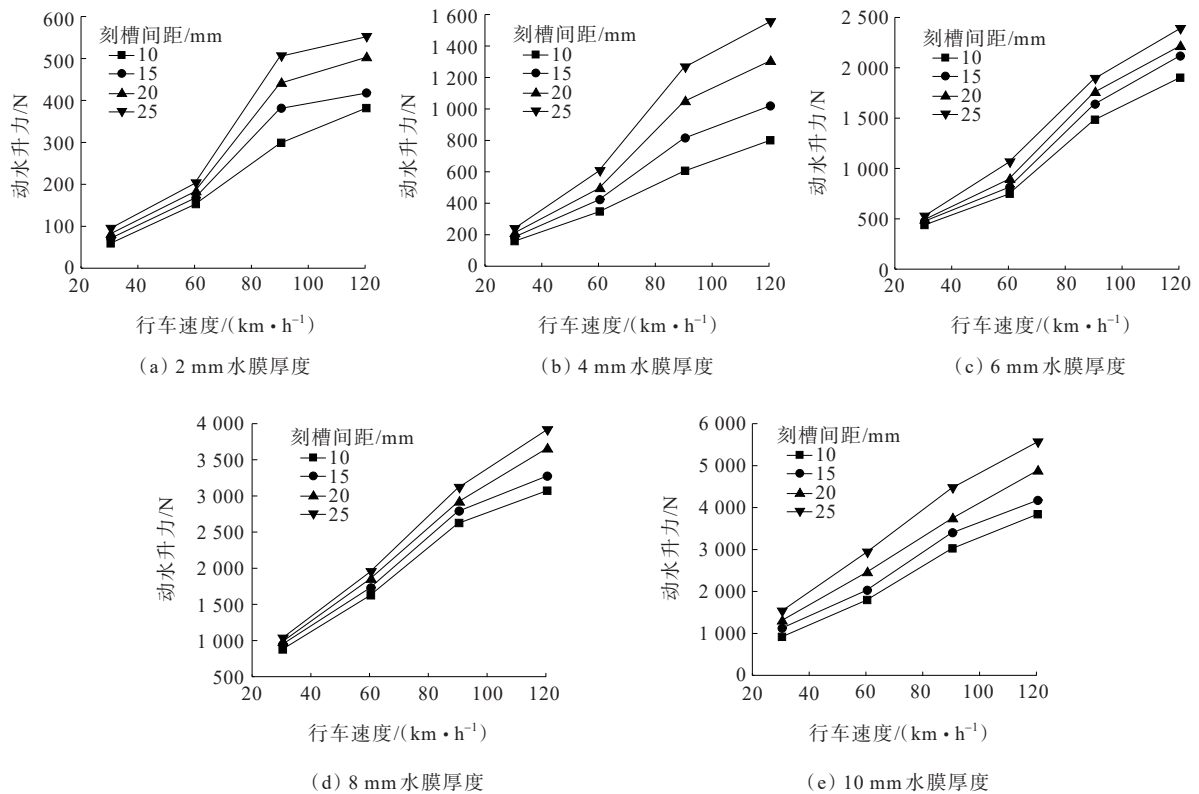


图8 刻槽间距对动水升力影响

Figure 8 Effect of groove spacing on hydrodynamic lift

流出;此后随着时间的延长,水膜内动水压强逐渐稳定,水流量也趋于稳定。此外,对比横向与纵向刻槽路面可知:横向刻槽路面水膜流出量要略高于纵向刻槽路面,说明在相同条件下,横向刻槽比纵向刻槽更利于胎-水-路体系中水的排出。

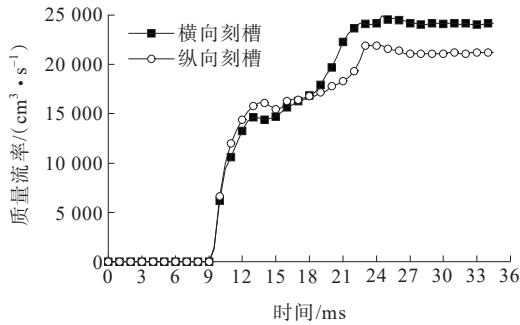


图9 不同刻槽方向的水膜质量流率  
Figure 9 Mass flow rate of water film in different groove directions

#### 4.2 刻槽方向对动水升力的影响

图10、11分别为车速60 km/h、水膜厚度6 mm、刻槽深度2 mm条件下,不同刻槽方向的动水升力对比。可以看出:当刻槽深度、宽度、间距一定时,车辆行驶在纵向刻槽上所受的动水升力比横向刻槽略大。如果轮胎受到竖向荷载一定时,纵向刻槽产生的高动水升力更易产生轮胎滑水,因此,无论从快速排水的角度,还是降低动水升力的角度,路表采取横向刻槽方案要优于纵向刻槽。

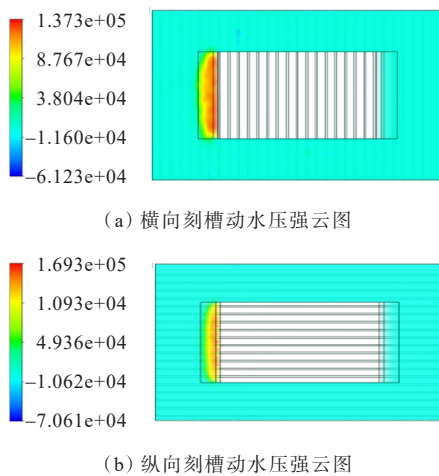


图10 横向刻槽和纵向刻槽路表水膜受力云图(单位:Pa)  
Figure 10 Stress cloud of water film on road surface in transverse groove and longitudinal groove (unit:Pa)

## 5 结论

(1) 移动轮胎与水膜作用时,迎水胎面前端的压

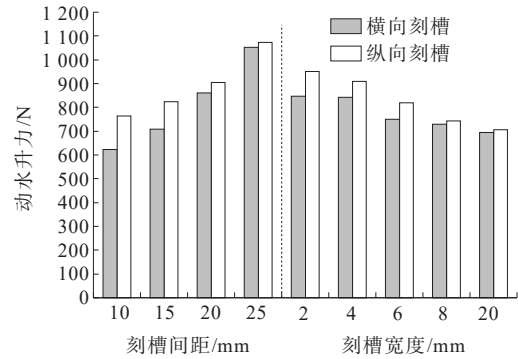


图11 不同刻槽参数下动水升力对比  
Figure 11 Comparison of hydrodynamic lift with different groove parameters

强显著高于其他部位的动水压强;当水膜厚度一定时,水膜越深处对胎面的竖向动水升力压强越大。

(2) 在同一水膜厚度下,随着车速增加,轮胎受到的动水升力不断增加;且随着水膜的增厚,车速对动水升力影响幅度越来越大。

(3) 路面刻槽宽度越小或刻槽间距越大,轮胎所受的动水升力越大,发生滑水的可能性越大;当刻槽深度、宽度、间距一定时,相比于纵向刻槽,横向刻槽路面对水膜的排出效率更高,水膜对轮胎的动水升力更小。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 邓国忠,曹帆,吴勇,等.互通式立交与隧道出口小间距路段事故影响因素分析[J].中外公路,2019,39(4):283-287.  
DENG Guozhong, CAO Fan, WU Yong, et al. Analysis on accidents influence factors of the small spacing section between intersection and tunnel exit[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2019, 39(4): 283-287.
- [2] YAN J, ZHANG H W, HUI B. Driving safety analysis using grid-based water-filled rut depth distribution[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2021, 2021(1): 1-13.
- [3] 张驰,王博,贺九平,等.基于行车动力学的高速公路积水路段行车风险分析[J].交通信息与安全,2019,37(5):9-17.  
ZHANG Chi, WANG Bo, HE Jiuping, et al. Traffic risk analysis of ponding sections on freeways based on driving dynamics[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2019, 37(5): 9-17.
- [4] 康彩燕.气象条件对我国道路交通事故影响研究[D].兰州:兰州大学,2017.  
KANG Caiyan. The impact of meteorological conditions

- on road traffic accidents in China[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017.
- [5] 马艳. 不利气候条件下高速公路行车安全保障系统的研究[D]. 西安: 长安大学, 2005.
- MA Yan. Study on freeway travel safety ensuring system under unfavorable weather condition[D]. Xi'an: Chang'an University, 2005.
- [6] 张彦鹏, 田国红, 韩忠浩, 等. 轮胎滑水的影响因素研究[J]. 汽车实用技术, 2019(17): 275-276.
- ZHANG Yanpeng, TIAN Guohong, HAN Zhonghao, et al. Study on the factors affecting the water skiing of tires[J]. Automobile Applied Technology, 2019(17): 275-276.
- [7] JUNG H C, JUNG M D, JEONG K M, et al. Verification of tire hydroplaning phenomenon using coupled FSI simulation by CFD and FEM[J]. Open Journal of Applied Sciences, 2020, 10(7): 417-431.
- [8] ZHENG B S, HUANG X M, ZHANG W G, et al. Adhesion characteristics of tire-asphalt pavement interface based on a proposed tire hydroplaning model[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2018, 2018: 1-12.
- [9] 季天剑, 高玉峰, 陈荣生. 轿车轮胎动力滑水分析[J]. 交通运输工程学报, 2010, 10(5): 57-60.
- JI Tianjian, GAO Yufeng, CHEN Rongsheng. Dynamic hydroplaning analysis of car tire[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(5): 57-60.
- [10] 郑彬双, 朱晟泽, 程永振, 等. 基于轮胎滑水模型的轮胎-沥青路面附着特性影响因素分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2018, 48(4): 719-725.
- ZHENG Binshuang, ZHU Shengze, CHENG Yongzhen, et al. Analysis on influence factors of adhesion characteristic of tire-asphalt pavement based on tire hydroplaning model[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2018, 48(4): 719-725.
- [11] 董斌, 唐伯明, 刘唐志, 等. 基于 Fluent 软件的雨天潮湿路面滑水现象研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2011, 35(4): 710-713.
- DONG Bin, TANG Boming, LIU Tangzhi, et al. Hydroplaning research of wet highway pavement based on fluent[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2011, 35(4): 710-713.
- [12] 黄晓明, 刘修宇, 曹青青, 等. 积水路面轮胎部分滑水数值模拟[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(9): 113-121.
- HUANG Xiaoming, LIU Xiuyu, CAO Qingqing, et al. Numerical simulation of tire partial hydroplaning on flooded pavement[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2018, 45(9): 113-121.
- [13] JEONG J Y, JEONG H Y. Hydroplaning simulation of a tire in thin water using fem and an estimation method and its application to skid number estimation[J]. International Journal of Automotive Technology, 2013, 14(2): 325-331.
- [14] CHENG G, ZHANG S H, ZHAO G Q, et al. Speed analysis of the radial tire on hydroplaning pavement[C]// Proceedings of the 3rd International Conference on Material, Mechanical and Manufacturing Engineering. Guangzhou, China. Paris, France: Atlantis Press, 2015.
- [15] 刘修宇, 曹青青, 朱晟泽, 等. 沥青混凝土路面轮胎临界滑水速度数值模拟[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2017, 47(5): 1020-1025.
- LIU Xiuyu, CAO Qingqing, ZHU Shengze, et al. Numerical simulation of tire critical hydroplaning speed on asphalt pavement[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2017, 47(5): 1020-1025.
- [16] 庄继德. 汽车轮胎学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996.
- ZHUANG Jide. Automobile tyre science[M]. Beijing: Beijing Insititute of Technology Press, 1996.
- [17] DUNLAP D, FANCHER P, SCOTT R, et al. Pavement skid-resistance requirements[J]. Transportation Research Record, 1976, 584: 15-21.
- [18] HORNE W B, DREHER R. Phenomena of pneumatic tire hydroplaning[J]. Skidding, 1963: 3-17.
- [19] 丛卓红, 陈恒达, 郑南翔, 等. 水泥混凝土路面纹理的研究进展[J]. 材料导报, 2020, 34(9): 9110-9116.
- CONG Zhuohong, CHEN Hengda, ZHENG Nanxiang, et al. Surface texture of cement concrete pavement: A review[J]. Materials Reports, 2020, 34(9): 9110-9116.
- [20] 王海亮, 梁鹏程, 李月光. 路面刻槽结构用于超高缓和段排水研究[J]. 中国水运(下半月), 2018, 18(3): 195-196.
- WANG Hailiang, LIANG Pengcheng, LI Yueguang. Study on pavement groove structure used for drainage of ultra-high transition section[J]. China Water Transport, 2018, 18(3): 195-196.
- [21] 胡石坚. 高速公路隧道水泥混凝土路面刻槽应用探究[J]. 中国公路, 2021(17): 170-171.
- HU Shijian. Exploration on the application of grooving in cement concrete pavement of expressway tunnel[J]. China Highway, 2021(17): 170-171.