DOI: 10.3901/JME.2019.01.106

表面润湿性对橡胶滑动接触界面摩擦特性的影响*

焦云龙 叶家鑫 刘小君 刘焜
(合肥工业大学摩擦学研究所 合肥 230009)

摘要: 针对橡胶滑动接触界面,利用自主研发开发的光学原位观测线性往复摩擦试验机,通过控制蒸馏水与添加剂的配比,对不同润湿性液体润滑条件下的橡胶滑动摩擦过程进行了试验性探究,在此基础上建立了固-液接触角与橡胶滑动摩擦因数之间的关联性,以期从微观界面润湿的角度解释湿滑条件下橡胶滑动摩擦因数变化的原因。研究表明:当润滑液进入橡胶滑动接触界面时,橡胶的黏滞效应大幅度降低,导致摩擦因数出现断崖式下跌,稳态摩擦因数减小;随着添加剂配比的降低,固-液接触角逐渐增大,润滑液在固体表面上的铺展与润湿性变差,润滑作用减弱,稳态摩擦因数逐渐增大。另外试验结果表明,固-液接触角与稳态滑动摩擦因数具有一定的线性相关性($R^2 \approx 0.92$),摩擦因数随着接触角的增大而增大。

关键词: 橡胶摩擦; 接触界面; 表面润湿性; 黏滞效应

中图分类号: TH117

Influence of Surface Wettability on the Sliding Frictional Property of NBR Rubber

JIAO Yunlong YE Jiaxin LIU Xiaojun LIU Kun
(Institute of Tribology, Hefei University of Technology, Hefei 230009)

Abstract: Based on the independently developed optical in situ linear reciprocation tribotester, sliding tests of NBR rubber are performed under different lubrication conditions. The lubricants have different wettability which is controlled by the additive ratio. The higher additive ratio means the lubricants with better spreading and wetting behavior on the solid substrates. A new theoretical model of rubber sliding friction is constructed under wet conditions, and we try to explain the decrease of sliding friction coefficient during the transition process (the contact interface changes from dry to wet) from interface wettability perspective. In addition, the influence of surface wettability on the friction property is studied and the relationship between the contact angle and friction coefficient is constructed. Results show that the viscosity effect of rubber sharply decreases when the lubricant flows into the contact interface in a short time; with the decrease of additive ratio, the contact angle of lubricant on the solid surface gradually decreases and the static friction coefficient increases. It is concluded that the contact angle of lubricant is linear with static friction coefficient ($R^2 \approx 0.92$), the experimental results have a great coherence with the theoretical model.

Key words: rubber friction; contact interface; wettability; viscosity effect

0 前言

橡胶是工程生产过程中非常重要的原材料,由于具有黏弹性强、摩擦因数高的特点,所以广泛应用于汽车轮胎、雨刷器以及橡胶密封圈等领域^[1-2]。而橡胶的摩擦与磨损是传统摩擦学研究的主要内容之一,针对不同的研究对象,橡胶在接触界面的摩擦特性直接关系到橡胶产品的使用性

能和寿命。尤其在胎-路系统中,胎面胶在接触面上的摩擦与抗湿滑特性对车辆雨天行驶安全性显得极其重要。已有的研究表明:当汽车行驶在潮湿或积水路面时,橡胶-路面间的摩擦力大幅度减小,一旦行驶速度过快,水膜产生的弹性流体动压力对胎面胶有向上抬升的作用,导致轮胎产生滑水,极易引发事故^[3-5]。

为了提高胎面橡胶接触界面的抗湿滑特性,常用的方法主要有改造橡胶材料的组成成分^[6](改变材料的固有摩擦性能)、增大路面粗糙度^[7](刺破水膜)以及在轮胎上增加花纹^[8-9](排水)。国内外研究学者对此进行了大量的理论与试验性研究。PERRSON

* 国家自然科学基金(51375132, 11472096, 51505117)和安徽省自然科学基金(1608085QE98)资助项目。20180211 收到初稿,20180708 收到修改稿

等^[10-11]基于橡胶密封效应,对潮湿路面下轮胎摩擦因数的降低进行了理论分析,同时利用残差分子动力学方法给出了橡胶在随机粗糙硬表面上滑动时的摩擦力大小与接触面积变化规律,分析了滑动速度以及接触压力对真实接触面积的作用规律。DO 等^[12]研究了路面微观形貌和水膜厚度对橡胶摩擦特性的综合影响,提出临界水膜厚度,在该水膜厚度下轮胎行驶时摩擦因数急剧下降,润滑状态从边界润滑转为混合润滑状态,车辆行驶安全性大幅度降低。DELEAU 等^[13]研究了润湿条件下橡胶-玻璃间的滑动摩擦特性,试验结果发现随着滑移速度的增大,橡胶/玻璃界面依次经历边界润滑、混合润滑以及流体动力润滑三种润滑机制,尤其在薄层水膜条件下,湿摩擦因数的变化对滑移速度非常敏感。DONG^[14]利用 BPST 摆式摩擦因数测定仪研究了不同润滑条件下,不同种类的橡胶聚合物在水泥混凝土路面的滑动摩擦特性。LORENZ 等^[15]通过理论和试验相结合的方法,研究了滑动速度较低条件下,胎面胶在路面上的摩擦学特性。国内王元霞等^[6]从试验出发探索了炭黑和白炭黑等不同种类填料补强胶料的抗湿滑性能机理,并从理论上研究了动态黏弹性能对轮胎抗湿滑性能的影响。

以上研究主要针对水膜已经在界面稳态形成后的橡胶-路面摩擦系统,而大量的试验和经验表明^[12,16],轮胎在刚下过雨的潮湿路面(薄水膜)行驶或制动时更容易打滑,这个短暂的过渡过程是轮胎-路面系统由干到湿的过程。当水膜由薄变厚逐渐进入胎-路界面时,路面所提供的黏着摩擦因数大幅度降低,而下雨初期路面积水较薄,不容易引起驾驶员的警惕,反而更容易发生滑溜性交通事故^[16]。因此本研究拟从湿滑状态下的橡胶滑动摩擦模型入手,基于理论模型分析黏着摩擦因数的组成与影响因素,再对不同润湿性液体润滑条件下的橡胶滑动摩擦过程进行了试验性探究,尝试从界面润湿的角度解释轮胎打滑的原因并建立表面润湿性与摩擦因数之间的关联性。研究结果为提高车辆的雨天行驶安全性以及轮胎抗湿滑性能机理研究奠定了一定的理论基础。

1 理论模型

汽车行驶在路面上的摩擦力主要来源于三个部分^[17-19]:胎面胶的弹性变形滞后,胎路间的黏着摩擦以及路面微凸体的剪切作用。通常弹性变形滞后摩擦力与胶料本身的黏弹性特性相关;胎路间的黏着摩擦力主要来源于橡胶分子与路面分子之间黏着

作用,轮胎和路面材料的性能、实际接触面积以及路面介质等都会影响黏着摩擦力的大小。由于胎面橡胶与路面之间存在相对滑动,当水膜进入胎路界面时,黏着摩擦因数变得尤为复杂,雨后短暂时间内车辆打滑的原因就与黏着摩擦因数的变化密切相关。因此本文基于 MAZZOLA 等^[20]的工作,建立如图 1 所示的橡胶滑动摩擦模型,从理论模型出发分析了湿滑条件下橡胶黏着摩擦因数的组成与影响因素。

图 1 湿滑状态下橡胶滑动摩擦模型

橡胶球在载荷 P 作用下以一定的速度沿附有水膜的固体表面滑动(图 1a),考虑到橡胶本身的黏弹性特性,因此接触类型为面接触(赫兹接触面积较大)。通过放大接触区域可以发现,由于实际路面存在一定的宏观粗糙度(图 1b),橡胶与路面的接触区主要可分为两个部分:实体接触区以及三体接触区。实体接触区域为橡胶与路面微凸体的尖峰直接接触,与干燥路面类似,所提供的摩擦因数为 μ_{ad}^{dry} ;三体接触区为橡胶-水-路面微凸体之间的复合接触(图 1c),所提供的摩擦因数为 μ_{ad}^{wet} 。因此,滑动黏着摩擦因数可以表示为

$$\mu_{ad} = \mu_{ad}^{dry} + \mu_{ad}^{wet} \quad (1)$$

已有的研究大多忽略了橡胶-水-路面微凸体之间的复合接触,仅仅考虑位于水膜上方的微凸体尖峰与橡胶的实体接触。然而 MAZZOLA 等的研究工作表明三体接触区的复合摩擦因数对整体黏着摩擦因数的确有一定的贡献,该部分摩擦因数 μ_{ad}^{wet} 与水在橡胶表面的接触角以及胶料自身的表面能具有一定的线性相关性,具体可以表示为

$$\mu_{ad}^{wet} \propto \frac{W_{ad}^{ad} A_{wet} \eta}{F_N} \quad (2)$$

$$W_{123}^{ad} = 4\gamma_2 + \gamma_2 (\cos \theta_{12} + \cos \theta_{32})$$

结合图 1c 可知,橡胶-水、水-路面微凸体之间的黏附功以及水分子之间的内聚功(W_{123}^{ad})是 μ_{ad}^{wet} 的重要组成部分,水的表面张力以及水在橡胶和路面的接触角直接决定了该部分摩擦因数的大小。

2 试验部分

为了验证理论模型的有效性,基于图 2 所示的线性往复摩擦试验台,对湿滑条件下的橡胶滑动摩擦过程进行了试验性探究。如图 2 所示,试验机的主体由显微观察系统、运动系统以及传感器测量系统三个部分组成。伺服电动机通过联轴器和丝杠带动橡胶球在对偶件上完成线性往复运动,位移传感器和力传感器分别测量橡胶球的位移、垂向载荷以及摩擦力大小。该试验台在位移和力的控制方面具有很高的精度,这对于研究表面润湿性对界面摩擦因数的影响具有重要的意义,试验机的主要参数如表 1 所示。

图 2 原位观测线性往复摩擦试验台

1. 显微镜头 2. 伺服电动机 3. 联轴器 4. 丝杠 5. 位移传感器
6. 水平滑台 7. 橡胶球 8. 对偶件 9. 力传感器 10. xyz 轴位移台

表 1 试验机主要参数

主要参数	测量范围	精度
法向载荷/N	0~20	0.1%FS
水平载荷/N	0~10	0.1%FS
行程/mm	0~15	0.05%
滑动速度/(mm/s)	≤15	0.1
电动机加速度/(mm/s ²)	≤1 000	0.1

试验材料为 10 mm 的丁腈橡胶球(NBR)和 6061 铝合金板,橡胶球初始粗糙度 $R_a 7.5 \mu\text{m}$,铝板表面近似光滑(在研磨机上经过 2 000#砂纸预磨后,初始粗糙度 $R_a 0.4 \mu\text{m}$),因此试验过程中的摩擦力主要来源于滑动黏着摩擦力。为了降低液体本身物理和化学性质对试验结果的影响,我们以纯蒸馏水作为基液,通过改变蒸馏水与添加剂(纯水基切削液)的配比,得到具有不同固-液接触角的润滑液,在每一次独立试验过程中,保证其他各项参数相同,仅在每次试验中途添加不同配比的润滑液,观察稳态摩擦因数的变化规律。具体的试验参数如表 2 所示,为了减少试验环境以及试验仪器带来的测量误差,每

种润滑条件下的滑动摩擦试验独立重复三次,稳态摩擦因数取平均值作为最终的试验结果。另外,试验过程中的固-液接触角在 SL200KS 界面张力仪上测量,同样取三次稳定试验结果(平衡接触角)的均值作为润滑液在固体基面上的本征接触角。

表 2 试验参数

载荷/N	速度/(mm/s)	蒸馏水与添加剂的比例	运动行程/mm	循环周期
2	10	1:20	6	5 000
2	10	1:30	6	5 000
2	10	1:40	6	5 000
2	10	1:50	6	5 000
2	10	1:200	6	5 000
2	10	0(纯水)	6	5 000

3 结果与讨论

3.1 湿滑条件下的橡胶滑动摩擦过程分析

图 3 给出了在蒸馏水作为润滑液的条件下,一个试验周期内橡胶滑动摩擦因数随时间的变化规律。很明显可以发现,当蒸馏水进入橡胶-铝滑动界面时,由于水润滑的作用,摩擦因数出现了大幅度下降,湿滑状态下的稳定摩擦因数相较于干摩擦大幅度降低。在接触界面由于干变湿的短暂时间内,摩擦因数呈现出这种变化趋势与橡胶滑动过程中的黏滞效应有关。如图 4 所示,橡胶在近似光滑、无杂质的固体表面上滑动时,摩擦力主要来源于橡胶分子与固体表面分子之间相互作用。由于胶料自身的黏弹特性,当橡胶球从 A 运动到 B 时(质心位移 S),最靠近固体表面的橡胶分子由于受到黏附力作用,接触点黏附不动(位移 $S' < S$);当橡胶球继续运动到 C 时,橡胶内部分子之间的作用力大于黏附力,接触点滑移。这种黏滑过程(stick-slip process)直接决定了橡胶在滑动摩擦过程中的黏滞效应和摩擦力大小。

图 3 摩擦因数随时间的变化规律

图4 橡胶滑动过程中的黏着-剪切机制

结合图4 橡胶滑动过程中的黏着-剪切机制, 对干/湿以及过渡状态下的橡胶黏性滞后大小进行理论分析。图5 分别给出了干摩擦、过渡期以及湿摩擦三种润滑状态下摩擦因数随位移的变化关系曲线(一个运动周期)。由图5 可知, 橡胶球在初始位置的摩擦因数为负值, 表明此时摩擦力的方向与运动方向相反, 摩擦因数在位移上具有滞后性。导致摩擦因数滞后最主要的原因就是橡胶的黏滞效应。当橡胶球结束上一个运动周期, 开始向正方向运动时(进入下一个运动周期), 由于最靠近固体表面的橡胶分子与固体分子之间存在黏附作用, 接地橡胶层的滑移速度并没有立刻降到0, 所以摩擦力没有改变方向, 摩擦因数仍为负值。为了比较三种润滑状态下橡胶的黏性滞后大小, 现将摩擦因数从初始负值(摩擦力与运动方向相反)直到变成正值(摩擦力与运动方向相同)这段时间内橡胶球的位移定义为摩擦因数在位移上的滞后。位移越大, 摩擦因数滞后性越大, 橡胶的黏滞效应就越明显。通过图5 可以发现, 当润滑液进入接触界面后, 摩擦因数在位移上的滞后逐渐减小($S_{1500} < S_{900} < S_{300}$), 表明橡胶的黏滞效应大幅度降低, 稳态摩擦因数也随之降低。尤其在干湿过渡阶段, 由于润滑液的介入, 导致橡胶与固体表面的实体接触区域面积减小(橡胶-固体), 复合接触区域面积增大(橡胶-润滑液-固体), 橡胶黏附滞后效应减弱, 因而稳态摩擦因数呈现大幅度下降的趋势。

图5 一个运动周期内摩擦因数随位移的变化规律

3.2 固-液接触角与滑动摩擦因数的关联性研究

上文已经分析到湿滑条件下由于液体的介入使

得橡胶与固体表面的实体接触区域面积减小, 橡胶的黏滞效应大幅度降低, 稳态滑动摩擦因数也随之减小。此时由于复合接触区域面积增大, 复合接触摩擦因数的作用就越加明显。而液体在接触界面间的铺展与润湿性以及固体表面能对复合接触摩擦因数有着重要的影响。表面润湿性是指液体在固体表面上的铺展能力以及倾向性, 通常用固-液接触角直接反映。接触角越小, 表面润湿性越好, 流体在固体表面的铺展能力就越强。从图6 中可以发现, 随着添加剂配比的降低, 固-液接触角逐渐增大, 这是由于试验过程中使用的添加剂含有大量的亲水有机物, 添加剂比例越小, 润滑液中亲水性有机物含量越低, 在固体表面上的铺展与润湿性越差。在相同的试验条件下, 由于在试验中途加入了不同配比的润滑液, 稳态摩擦因数发生了变化。由图6 可知, 随着添加剂配比的降低, 稳态滑动摩擦因数呈现增大的趋势。为了进一步建立接触角与摩擦因数的关联性, 对接触角和摩擦因数进行了线性回归, 如图7 所示, 接触角与摩擦因数之间具有很强的线性相关性($R^2 \approx 0.92$), 固-液接触角越大, 稳态滑动摩擦因数越大。而固-液接触角直接反映了表面润湿性的大小, 因此对于湿滑状态下的橡胶滑动界面来说, 液体在固体表面的铺展与润湿特性越差, 滑动摩擦因

图6 添加剂配比与稳态摩擦因数以及固-液接触角之间的变化关系图

图7 固-液接触角与稳态滑动摩擦因数之间的线性相关性

数越高。这与理论模型中的表达式(2)所反映的规律具有较好的一致性。

图8给出了稳定摩擦阶段不同润湿性液体润滑条件下的摩擦因数随位移的变化关系图。由图8可知,不同添加剂配比的润滑液在进入滑动界面后,由于各自在界面间的铺展与润湿特性不同,对橡胶黏滞效应的影响也不相同。对于蒸馏水来说,由于固-液接触角大,水膜对固体基面的倾向性差,在橡胶滑动过程中容易被挤压出接触区,相较于其他润湿性较好的液体,在稳定摩擦阶段橡胶的黏滞效应最大,稳定摩擦因数最高;而对于含有不同配比的添加剂润滑液,由于溶液含有亲水性有机物,固-液接触角小,铺展范围大,对固体表面的倾向性好,不容易被挤压出接触区,因而橡胶的黏滞效应整体大幅度下降,导致稳态摩擦因数降低。另外,接触区的载荷分布以及橡胶的滑移速度对液体在界面间的铺展与流动状态也有很大的影响,这直接关系到湿滑状态下橡胶-固体间真实接触区域以及黏滞效应的大小,这些问题都有待进一步的研究和探讨。

图8 稳定摩擦阶段不同润湿性液体润滑条件下摩擦因数随位移的变化规律(一个运动周期)

4 结论

(1) 当橡胶滑动界面有液体介入时,橡胶与固体表面的实体接触区域面积减小,橡胶的黏滞效应大幅度降低,短暂时间内摩擦因数出现大幅度下降;随着润滑液完全进入滑动界面,稳态滑动摩擦因数也随之减小。

(2) 湿滑条件下,液体在接触界面的铺展与润湿性以及固体表面能对界面摩擦因数有着重要的影响。润滑液中亲水有机物的比例越高,液体在界面的铺展与润湿性越好,稳态滑动摩擦因数越小。

(3) 固-液接触角是衡量表面润湿性的重要指标,它与稳态滑动摩擦因数具有一定的线性相关性($R^2 \approx 0.92$)。对于湿滑状态下的橡胶滑动界面来说,固-液接触角越大,稳态滑动摩擦因数越大。本文的研究结果为提高车辆的雨天行驶安全性以及轮胎抗湿滑性能机理研究奠定了一定的理论基础。

参考文献

- [1] 张嗣伟. 橡胶磨损原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998.
ZHANG Siwei. Wear of elastome [M]. Beijing : Petroleum Industry Press, 1998.
- [2] 谭桂斌, 范清, 谭锋, 等. 重大装备橡塑密封系统摩擦学进展与发展趋势[J]. 摩擦学学报, 2016, 36(5): 659-666.
TAN Guibin, FAN Qing, TAN Feng, et al. Advances in tribology on elastomer sealing and its future trends for the huge machinery [J]. Tribology, 2016, 36(5): 659-666.
- [3] MOORE D F. The elastohydrodynamic transition speed for spheres sliding on lubricated rubber[J]. Wear, 1975, 35(1): 159-170.
- [4] ONG G P, FWA T F. Wet-pavement hydroplaning risk and skid resistance: Modeling[J]. Journal of Transportation Engineering, 2007, 134(5): 182-190.
- [5] 彭旭东, 谢友柏, 郭孔辉. 轮胎摩擦学的研究与发展[J]. 中国机械工程, 1999, 10(2): 215-219.
PENG Xudong, XIE Youbai, GUO Konghui. The investigation and development trends of tire tribology[J]. China Mechanical Engineering, 1999, 10(2): 215-219.
- [6] 王元霞. 轮胎胎面胶抗湿滑性能及其机理的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2011.
WANG Yuanxia. Study on the mechanism of wet skid resistance for tire tread[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2011.
- [7] 曹平. 表面形貌与污染物对沥青路面抗湿滑性能影响的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.
CAO Ping. Study on effects of texture and contaminants[D]. Wuhan : Wuhan University of Technology, 2009.
- [8] 周海超, 梁晨, 杨建, 等. 提升轮胎抗滑水性能的仿生方法[J]. 机械工程学报, 2015, 51(8): 125-130.
ZHOU Haichao, LIANG Chen, YANG Jian, et al. Bionic method for improving tire anti-hydroplaning performance[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(8): 125-130.
- [9] FWA T F, KUMAR S S, ANUPAM K, et al. Effectiveness of tire-tread patterns in reducing the risk of hydroplaning[J]. Transportation Research Record: Journal

- of the Transportation Research Board, 2009, 2094(1): 91-102.
- [10] PERSSON B N J, TARYAGLINO U, ALBOHR O, et al. Sealing is at the origin of rubber slipping on wet roads[J]. *Natural Materials*, 2004, 3(12): 882-885.
- [11] PERSSON B N J, TARYAGLINO U, ALBOHR O, et al. Rubber friction on wet and dry road surfaces: The sealing effect[J]. *Physical Review B: Condensed Matter*, 2005, 71(3): 035428.
- [12] DO M T, CEREZO V, BEAUTRU Y, et al. Modeling of the connection road surface microtexture/water depth/friction[J]. *Wear*, 2013, 302(1-2): 1426-1435.
- [13] DELEAU F, MAZUYER D, KOENEN A. Sliding friction at elastomer/glass contact: Influence of the wetting conditions and instability analysis[J]. *Tribology International*, 2009, 42(1): 149-159.
- [14] PAN X D. Wet sliding friction of elastomer compounds on a rough surface under varied lubrication conditions[J]. *Wear*, 2007, 262(5-6): 707-717.
- [15] LORENZ B, OH Y R, NAM S K, et al. Rubber friction on road surfaces: Experiment and theory for low sliding speeds[J]. *The Journal of Chemical Physics*, 2015, 142(19): 194701.
- [16] SABEY B, WILLIAMS T, LUPTON G. Factors affection the friction of tires on wet road[S]. *SAE Technical Paper* 700376, 1970, doi: 10.4271/700376.
- [17] 王野平. 论轮胎与路面间的摩擦[J]. *汽车技术*, 1999(2): 10-14.
- WANG Yeping. Discussion of the friction between tire and road[J]. *Automotive Engineering*, 1999(2): 10-14.
- [18] SAKAI H. Friction and wear of tire tread rubber[J]. *Tire Science and Technology*, 1996, 24(3): 252-275.
- [19] MOORE D F. The friction and lubrication of elastomers[J]. *Pergamon Press*, 1975: 108-115.
- [20] MAZZOLA L, GALDERISI A, FORTUNATO G, et al. Influence of surface energy and wettability on friction coefficient between tire and road surface in wet condition [J]. *Advances in Contact Angle, Wettability and Adhesion*, 2013, 1: 389-410.
-
- 作者简介: 焦云龙, 男, 1990 年出生, 博士研究生。主要研究方向为汽车摩擦学。
E-mail: jiaoyunlong0823@126.com
刘焜(通信作者), 男, 1962 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为表面摩擦学。
E-mail: liukun@hfut.edu.cn