

特约来稿

制动工况下不同滑移率轮胎胎面的磨耗行为研究

王洁¹, 李钊^{1,2}, 李子然¹

(1. 中国科学院材料力学行为和设计重点实验室 中国科学技术大学近代力学系, 安徽 合肥 230027; 2. 武汉第二船舶设计研究所, 湖北 武汉 430205)

摘要:以185/75R14电动汽车半钢子午线轮胎为研究对象, 分别建立含纵沟花纹和含复杂花纹轮胎的有限元模型。利用磨耗后处理法的数值求解策略, 研究在制动工况下滑移率对轮胎胎面磨耗行为的影响。结果表明, 在相同的行驶速度下, 制动轮胎胎面的磨耗速率随着滑移率的增大而剧烈增大, 含复杂花纹轮胎胎面出现了纵向和侧向的不均匀磨耗, 其胎面的磨耗速率明显大于含纵沟花纹轮胎胎面。

关键词:电动汽车轮胎; 胎面; 磨耗行为; 制动工况; 滑移率; 花纹; 有限元模型

中图分类号: TQ336.1; TB115

文献标志码: A

文章编号: 1000-890X(2021)08-0563-06

DOI: 10.12136/j.issn.1000-890X.2021.08.0563



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

轮胎作为汽车结构中唯一与路面接触的部件, 与路面之间的复杂物理和化学作用会导致胎面胶中橡胶分子链断裂破坏, 橡胶磨屑会在行驶过程中脱落, 使得胎面花纹沟变浅, 轮胎刚度发生变化, 严重影响车辆的操纵性能和轮胎的抓着、排水以及噪声等性能^[1-3]。

对于滚动轮胎胎面磨耗, 早期只能通过车辆道路磨耗试验^[4]进行研究, 但该方法存在成本高、耗时长、且环境和人为等多种因素影响导致测试结果的离散性较大。随着计算机技术的发展, 研究者们开始尝试利用有限元分析方法对轮胎胎面的磨耗行为进行研究^[5-7]。吴健等^[8]计算了载重子午线轮胎在不同工况下的摩擦功, 发现制动工况对胎面磨耗程度的影响较大, 但其建立的轮胎模型胎面花纹仅包含纵沟, 忽略了横向花纹对于胎面磨耗的影响, 且磨耗分析仅针对胎面摩

擦功及其分布, 不够全面; J. R. CHO等^[9]建立了带复杂花纹的轮胎有限元模型, 对轮胎胎面的接触压力和摩擦能分布进行了研究, 建立了摩擦能与磨耗速率之间的关系, 指出制动工况下胎面接地区前端的摩擦能密度较大, 但未考虑磨耗过程中胎面轮廓变化对于磨耗的影响; C. JIN等^[10]针对含复杂花纹轮胎, 引入磨耗深度和磨损质量来量化胎面的磨耗, 并在仿真过程中通过增量迭代考虑了胎面轮廓变化对磨耗的影响, 得出制动工况下胎面的磨耗程度远大于自由滚动工况下, 但其采用的Archard磨耗模型参数是按照经验选取的, 同时磨耗计算采用的是均分步长, 求解过程中容易产生不稳定的接触压力分布而引起计算结果变化的问题; Z. LI等^[11-12]仿真了不同工况下含纵沟和含复杂花纹轮胎胎面的磨耗, 计算过程中采用了非均分步长, 计算发现制动工况下含纵沟花

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11902229); 中国科学院战略性先导科技专项(C类)(XDC06030200)

作者简介: 王洁(1997—), 女, 安徽合肥人, 中国科学技术大学硕士研究生, 主要从事计算结构力学研究。

E-mail: wj9@mail.ustc.edu.cn

引用本文: 王洁, 李钊, 李子然. 制动工况下不同滑移率轮胎胎面的磨耗行为研究[J]. 橡胶工业, 2021, 68(8): 563-568.

Citation: WANG Jie, LI Zhao, LI Ziran. Research on tread wear behavior of tires with different slip rates under braking condition[J]. China Rubber Industry, 2021, 68(8): 563-568.

纹轮胎的胎面磨耗程度远大于自由滚动工况下,但未提及制动工况下含复杂花纹轮胎胎面的磨耗情况。

在轮胎行驶中,制动是磨耗较为剧烈的工况^[13-14]。对于目前的电动汽车,依靠电池组和电动机动力输出的原理与传统燃油汽车依靠内燃机和变速箱动力输出有着较大差异,可以瞬间达到最大扭矩,所以电动汽车起步以及制动时加速度远高于燃油汽车,即起步及制动时轮胎的滑移率也较大。因此了解制动工况下不同滑移率轮胎胎面的磨耗行为,考察滑移率对胎面磨耗的影响规律有助于进行电动汽车轮胎的耐磨耗设计。

本工作以185/75R14电动汽车半钢子午线轮胎为研究对象,在有限元分析软件Abaqus中分别建立含纵沟花纹轮胎的隐式动力学模型和含复杂花纹轮胎的显式动力学模型,采用基于磨耗后处理法的数值求解策略,研究制动工况下滑移率对胎面磨耗,包括胎面磨耗速率以及胎面磨耗分布的影响。

1 轮胎有限元模型的建立

1.1 含纵沟花纹轮胎的隐式动力学模型

建立含纵沟花纹轮胎的二维轴对称有限元模型,如图1所示。

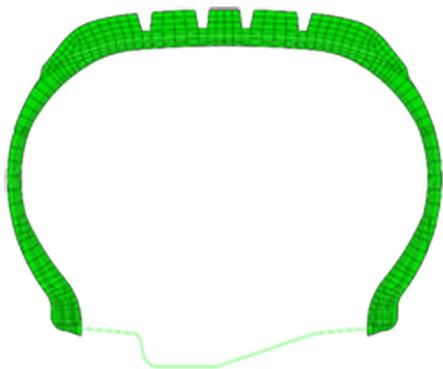


图1 含纵沟花纹轮胎的二维有限元模型
Fig. 1 Two-dimensional finite element model of tire with longitudinal groove patterns

将该二维模型沿着轮辋中心轴旋转360°形成三维轮胎模型。三维模型的节点数为48 714,单元数为43 210,橡胶材料采用不可压缩的超弹Yeoh模型表征^[15],材料参数通过自动网格法^[16-17]获得;骨架材料采用线弹性模型表征,并通过赋予加强筋(rebar)相关参数来模拟加强作用。轮辋和路面均定义为解析刚体。轮胎与轮辋之间的接触设为恒定摩擦,摩擦因数为0.5;轮胎与路面之间的相互作用采用速度与压力相关的摩擦模型^[12]描述(模型参数取自于磨粒直径为0.25 mm的刚玉盘上胎面胶摩擦因数的测试结果)。

含纵沟花纹轮胎的三维有限元模型如图2所示。轮胎静力学问题(包括轮胎装配、充气以及加载)^[18-19]采用基于拉格朗日描述的隐式算法求解,而轮胎的稳态滚动问题采用基于拉格朗日/欧拉混合描述的隐式算法求解。

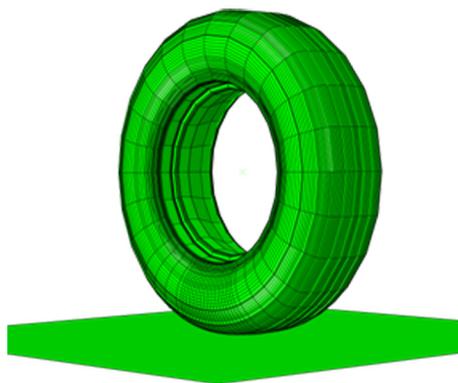


图2 含纵沟花纹轮胎的三维有限元模型
Fig. 2 Three-dimensional finite element model of tire with longitudinal groove patterns

1.2 含复杂花纹轮胎的显式动力学模型

建立含复杂花纹轮胎模型时,横向花纹的排列不像纵向花纹具有对称性,建模时并不能通过简单的旋转来实现,需要对轮胎基体和胎面花纹分别建模,然后使用组合模型技术^[18]将胎面花纹网格和旋转生成的光面轮胎基体模型约束在一起,得到含复杂花纹的轮胎有限元模型,如图3所示。

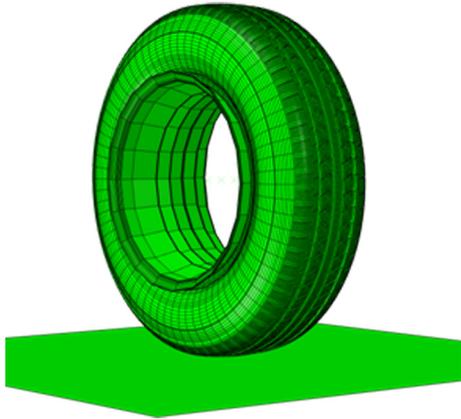


图3 含复杂花纹轮胎的三维有限元模型

Fig. 3 Three-dimensional finite element model of tire with complex patterns

该轮胎模型沿周向均匀等分为72份。三维模型中节点数为226 945,单元数为167 976,模型中的橡胶材料采用不可压缩的超弹性Yeoh模型表征^[15, 17-18],泊松比为0.75;胎圈钢丝采用线弹性材料模型,其他骨架材料采用反正切函数模型^[14]表征,并通过赋予rebar的相关参数来模拟骨架结构的加强作用。

针对含复杂花纹轮胎胎面的磨损行为求解,采用的是“先隐式后显式”的求解策略^[20],即首先使用隐式模块完成轮胎的装配、充气、加载直至自由滚动的计算过程,然后将隐式的计算结果作为初始条件,导入显式模块进行轮胎制动工况的模拟计算。

2 轮胎胎面的磨损数值求解策略

2.1 含纵沟花纹轮胎胎面的磨损数值求解策略

在建立含纵沟花纹轮胎隐式动力学模型后,采用磨损后处理法^[21]进行胎面的磨损数值求解(即通过计算轮胎滚动一周后胎面节点的磨损深度而得到一定行驶里程的胎面磨损深度^[14]),胎面节点的磨损速率由节点的摩擦功率密度^[11-12]决定,节点的磨损速率与当前的行驶时间相乘得出磨损深度。当节点磨损深度达到网格更新判据(取为

表层单元网格厚度的一半^[14])时,利用修正的边界位移法更新网格,获取新的轮胎胎面轮廓以重新进行计算,当累积的行驶里程达到指定行驶里程时停止计算。整个磨损后处理流程采用Abaqus python脚本语言来实现。在利用边界位移法更新胎面轮廓时,胎面节点的磨损方向取为沿接触面的内法向^[21-22],胎面节点*i*的磨损方向 n_i 为 n_i^1 和 n_i^2 的均值向量,如图4所示(r_i^1 和 r_i^2 为节点*i*指向其位于边界上2个相邻节点的向量)。

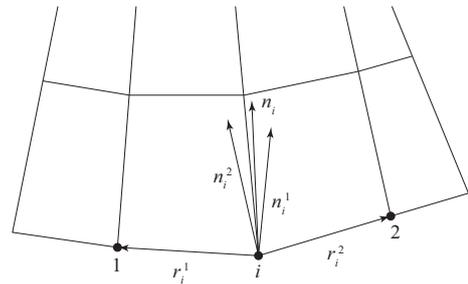


图4 二维单元的磨损方向

Fig. 4 Wear direction of two-dimensional element

2.2 含复杂花纹轮胎胎面的磨损数值求解策略

同样采用磨损后处理法对轮胎胎面的磨损行为进行模拟,当磨损深度达到网格更新判据(仍取为表层单元网格厚度的一半)后,更新网格,获取新的胎面轮廓以重新进行计算,直至达到规定的行驶里程。单个花纹节从开始进入接地地区到离开接地地区,胎面节点在当前时间增量(n)内的磨损深度(Δh_n)为:

$$\Delta h_n = \Delta m_n / (\rho A) = a(fv/A)^b \Delta t / \rho \quad (1)$$

式中, Δm_n 为当前时间增量内的节点磨损质量, ρ 为橡胶密度, A 为节点控制的接触面积, a 和 b 为计算采用的幂函数磨损模型^[23]的参数, f 为节点摩擦力, v 为滑动速度, Δt 为稳定时间增量。在 n 结束后,当前节点累积磨损深度 h_n 可由前一个时间增量的磨损深度(h_{n-1})和 Δh_n 计算得到,即

$$h_n = h_{n-1} + \Delta h_n \quad (2)$$

进而能得出轮胎滚动一周的胎面节点磨损深度(h_c)以及磨损速率。轮胎滚动时间 t 后,节点磨

耗深度为

$$h = \Omega th_c \quad (3)$$

式中, Ω 为轮胎滚动角速度。

同时,胎面节点的磨损方向取为沿接触面的内法向^[19-20],如图5所示。

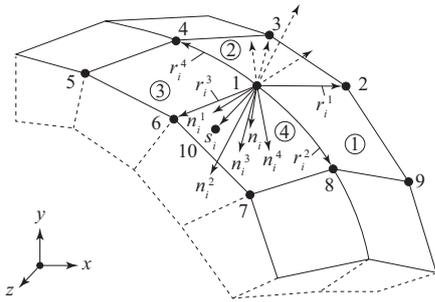


图5 三维单元的磨损方向

Fig.5 Wear direction of three-dimensional element

对于三维单元, r_i^1, r_i^2, r_i^3 和 r_i^4 为节点 i 指向其位于边界上4相邻节点的向量, n_i^1, n_i^2, n_i^3 和 n_i^4 分别为 r_i^1, r_i^2, r_i^3 和 r_i^4 与其相邻单元面的法向量, S_i 为节点 i 指向与其相邻内部节点的向量。节点 i 的法向量 n_i 为:

$$n_i = \frac{1}{\|n_i^1 + n_i^2 + n_i^3 + n_i^4\|} (n_i^1 + n_i^2 + n_i^3 + n_i^4) \quad (4)$$

3 不同滑移率下制动轮胎胎面的磨损分析

普通燃油汽车从速度为0到100 km · h⁻¹的加速时间一般为10 s,加速度约为0.28 g,而电动汽车从速度为0到100 km · h⁻¹的加速时间为6 s,其加速度可达0.46 g。同时电动汽车由于电池组存在,其质量大于同类燃油汽车,相应的轮胎充气压力也稍有提高。利用建立的轮胎有限元模型模拟了轮胎在充气压力为0.28 MPa、负荷为3 920 N下以80 km · h⁻¹的速度制动,当制动的滑移率分别为1%,2%,3%和4%时,轮胎所受的纵向力分别为407,913,1 234和1 811 N。当轮胎以4%的滑移率制动时,其纵向力达到了1 811 N,加速度为0.45 g,与电动汽车从速度为0到100 km · h⁻¹的加速度基本一致。因此在仿真计算中,选用这4种滑移率进行制动工况的模拟比较合适。

不同滑移率下含纵沟和含复杂花纹轮胎胎面的磨损质量仿真结果分别如表1和2所示。从表1和2可以看出:对于两种轮胎模型,在同一行驶速度下,随着轮胎制动时滑移率的增大,胎面的磨损速率也相应增大;同样滑移率下,含复杂花纹轮胎的胎面磨损速率大于含纵沟花纹轮胎。

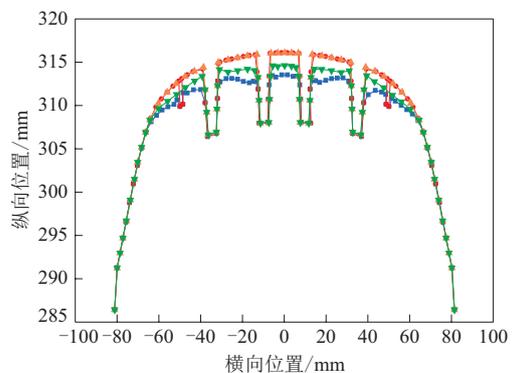
图6所示为含纵沟和含复杂花纹轮胎以4%滑移率制动40 km的胎面磨损轮廓对比。从图6可以看出:在制动工况下,轮胎胎面的磨损整体左右对称;同样的行驶距离下,含复杂花纹轮胎胎面的磨

表1 不同滑移率下含纵沟花纹轮胎胎面的磨损质量
Tab.1 Tread wear masses of tires with longitudinal groove patterns under different slip rates

滑移率/%	行驶距离/km	磨损质量/mg	磨损速率/(mg · km ⁻¹)
1	2 000	6.97 × 10 ⁵	348
2	600	6.92 × 10 ⁵	1 153
3	250	7.38 × 10 ⁸	2 952
4	100	7.52 × 10 ⁸	7 522

表2 不同滑移率下含复杂花纹轮胎胎面的磨损质量
Tab.2 Tread wear masses of tires with complex patterns under different slip rates

滑移率/%	行驶距离/km	磨损质量/mg	磨损速率/(mg · km ⁻¹)
1	500	3.86 × 10 ⁵	772
2	200	4.01 × 10 ⁵	2 005
3	80	4.26 × 10 ⁵	5 325
4	40	4.59 × 10 ⁵	11 475



■—制动的含复杂花纹轮胎; ●—初始的含复杂花纹轮胎;
▼—制动的含纵沟花纹轮胎; ▲—初始的含纵沟花纹轮胎。

图6 在制动工况下滑移率为4%的轮胎胎面的磨损轮廓
Fig.6 Tread wear profiles of tires with slip rate of 4% under braking condition

耗深度大于含纵沟花纹轮胎胎面。

含复杂花纹轮胎以4%滑移率制动40 km的单个花纹节胎面磨损深度云图如图7所示。从图7可以看出,含复杂花纹轮胎的花纹块出现了侧向和纵向的不均匀磨损现象。

不同滑移率下轮胎胎面的磨损速率对比如图8所示。从图8可以看出:在同一行驶速度下,随着轮胎制动时滑移率的增大,胎面的磨损速率剧烈增大;同一滑移率下,含复杂花纹轮胎胎面的磨损速率显著高于含纵沟花纹轮胎胎面,两者之间的磨损速率差值随着滑移率的增大而增大,造成差异的原因可能是含复杂花纹轮胎胎面存在横向花纹,胎面的刚度降低,出现了纵向和侧向的不均匀磨损现象。

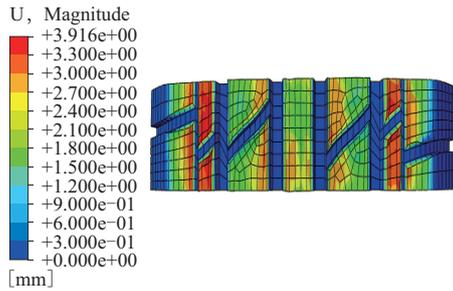


图7 制动工况下滑移率为4%的含复杂花纹轮胎胎面的磨损深度云图

Fig. 7 Nephograms of tread wear depth of tire with complex patterns and slip rate of 4% under braking condition

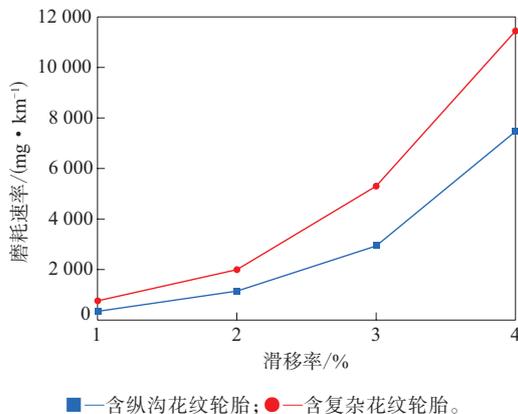


图8 制动工况下不同滑移率轮胎胎面的磨损速率
Fig.8 Tread wear rates of tires with different slip rates under braking condition

4 结论

本工作建立了185/75R14电动汽车半钢子午线轮胎的含纵沟花纹隐式动力学模型和含复杂花纹显式动力学模型,模拟了轮胎在不同滑移率下制动的胎面磨损行为。轮胎制动时胎面磨损最大处发生在胎肩区域,随着滑移率的增大,胎面的磨损速率剧烈增大,且含复杂花纹轮胎胎面的磨损速率大于含纵沟花纹轮胎胎面,两者之间的磨损速率差值随着滑移率的增大而增大。含复杂花纹轮胎胎面存在横向花纹,由此造成胎面的刚度降低,导致花纹块出现侧向和纵向不均匀磨损现象。

参考文献:

[1] GENT A N, WALTER J D. The pneumatic tire[M]. USA: U. S Department of Transportation, Nation Highway Traffic Satefy Administration, 2006.

[2] 王梦蛟. 填料-弹性体相互作用对填充硫化胶滞后损失、湿摩擦性能和磨损性能的影响[J]. 轮胎工业, 2007, 27(10): 579-584.

WANG M J. Effect of filler-elastomer interaction on hysteresis, wet friction and abrasion of filled vulcanizates[J]. Tire Industry, 2007, 27(10): 579-584.

[3] 陈燕, 尹海山, 王子玥. 橡胶磨损量与摩擦能的相关性研究[J]. 轮胎工业, 2017, 37(9): 567-569.

CHEN Y, YIN H S, WANG Z Y. Study on correlation between abrasion and friction energy of rubber[J]. Tire Industry, 2017, 37(9): 567-569.

[4] SOUTHERN E. Rapid tire wear measurements using a two-wheeled trailer[J]. Tire Science and Technology, 1973, 1(1): 3-16.

[5] SMITH K R, KENNEDY R H, KNISLEY S B. Prediction of tire profile wear by steady-state FEM[J]. Tire Science and Technology, 2008, 36(4): 290-303.

[6] ZHENG D. Prediction of tire tread wear with FEM steady state rolling contact simulation[J]. Tire Science and Technology, 2003, 31(3): 189-202.

[7] 王国林, 王晨, 张建, 等. 基于有限元分析的轮胎磨损性能优化[J]. 汽车工程, 2009, 31(9): 867-870.

WANG G L, WANG C, ZHANG J, et al. Tire wear performance optimization based on finite element analysis[J]. Automotive Engineering, 2009, 31(9): 867-870.

[8] 吴健, 王泽君, 王友善, 等. 基于摩擦功的全钢载重子午线轮胎的磨损性能研究[J]. 橡胶工业, 2013, 60(2): 80-84.

WU J, WANG Z J, WANG Y S, et al. Study on wear property of

- truck and bus radial tire based on friction power[J]. China Rubber Industry, 2013, 60(2): 80-84.
- [9] CHO J R, CHOI J H, KIM Y S. Abrasive wear amount estimate for 3D patterned tire utilizing frictional dynamic rolling analysis[J]. Tribology International, 2011, 44(7): 850-858.
- [10] JIN C, HOU C, JIN X. FE simulation of tire wear with complicated tread pattern[J]. Procedia Engineering, 2011, 15: 5015-5019.
- [11] LI Z, LI Z, WANG Y. An integrated approach for friction and wear simulation of tire tread rubber. Part I: Friction test, characterization and modeling[J]. Tire Science and Technology, 2020, 48(2): 123-145.
- [12] LI Z, LI Z, WANG Y. An integrated approach for friction and wear simulation of tire tread rubber. Part II: Wear test, characterization and modeling[J]. Tire Science and Technology, 2020, 48(2): 146-165.
- [13] 胡竞文. 计及复杂花纹的轮胎胎面磨损预测[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- [14] 李钊. 轮胎胎面磨损行为的实验研究与数值分析[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013.
- [15] YEOH O H. Some forms of the strain energy function for rubber[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1993, 66(5): 754-771.
- [16] 夏勇. 轮胎胶料在较大变形范围内准静态力学性能的研究——测试、表征以及细观数值本构模型[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2004.
- [17] 夏勇, 李炜, 夏春光, 等. 自动网格法在轮胎橡胶力学行为测试中的应用[J]. 实验力学, 2002, 17(4): 412-418.
- XIA Y, LI W, XIA C G, et al. Application of automated grid method in the mechanical-behavior testing of tire rubber[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2002, 17(4): 412-418.
- [18] 李兵. 计及复杂胎面花纹的子午线轮胎结构有限元分析[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2008.
- [19] 李炜. 子午线轮胎结构有限元分析和设计原理的若干问题研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2003.
- [20] 曾光. 计及胎面花纹影响的轮胎侧偏显式有限元分析[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009.
- [21] XIE L J, SCHMIDT J, SCHMIDT C, et al. 2D FEM estimate of tool wear in turning operation[J]. Wear, 2005, 258(10): 1479-1490.
- [22] HEGADEKATTE V, HUBER N, KRAFT O. Finite element based simulation of dry sliding wear[J]. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 2005, 13(1): 57.
- [23] LUPKER H, CHELI F, BRAGHIN F, et al. Numerical prediction of car tire wear[J]. Tire Science and Technology, 2004, 32(3): 164-186.

收稿日期: 2021-04-08

Research on Tread Wear Behavior of Tires with Different Slip Rates under Braking Condition

WANG Jie¹, LI Zhao^{1,2}, LI Ziran¹

(1. CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, Department of Modern Mechanics of University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China; 2. Wuhan Second Ship Design and Research Institute, Wuhan 430205, China)

Abstract: Taking the 185/75R14 electric vehicle steel-belted radial tires as the research object, the finite element models of the tire with longitudinal groove patterns and the tire with complex patterns were established respectively. Using the numerical solution strategy of the wear post-processing method, the influence of the slip rate on the tread wear behavior of the tire under braking condition was studied. The results showed that under the same driving speed, the tread wear rate of the braking tire increased drastically with the increase of the slip rate. The tread of the tire with complex patterns had uneven longitudinal and lateral wear, and its wear rate was significantly greater than that of the tire with longitudinal groove patterns.

Key words: electric vehicle tire; tread; wear behavior; braking condition; slip rate; pattern; finite element model