

制动工况下虚拟轨道列车轮胎-道路接触应力研究

张济民¹, 王金杰¹, 王承萍¹, 周和超¹, 孙丽霞²

(1. 同济大学 铁道与城市轨道交通研究院, 上海 201804; 2. 中国铁道科学研究院集团有限公司, 北京 100081)

摘要: 为解决虚拟轨道列车试运行过程中车站及十字路口处路面损伤严重的问题, 考虑车辆-轮胎-路面的相互作用, 通过构建虚拟轨道列车动力学模型获取动态轮胎力, 采用 Abaqus 有限元软件建立了花纹轮胎和黏弹性沥青路面模型, 根据任意拉格朗日-欧拉(ALE)法分析比较了匀速、制动工况下轮胎与路面的接触应力特征, 并研究了滑移率和载荷对制动工况接触应力的影响。结果表明: 制动时的纵向应力是造成道路破坏的主要原因, 滑移率和载荷对制动时的接触应力有显著的影响。制动工况下最大纵向应力比匀速工况增大约 979 kPa; 当滑移率从 0.02 增大到 0.06 时, 最大纵向应力增大约 99.8%; 当载荷从 40 kN 增大到 50 kN 时, 轮胎边缘最大纵向应力增大约 98.8%。因此, 在列车运行时应尽量避免制动, 同时列车载荷应处于合理的区间内。

关键词: 虚拟轨道列车; 车辆动力学; 轮胎-道路接触模型; 接触应力; 有限元分析

中图分类号: U271

文献标志码: A

Tire-Road Contact Stress in Virtual Rail Trains Under Braking Conditions

ZHANG Jimin¹, WANG Jinjie¹, WANG Chengping¹,
ZHOU Hechao¹, SUN Lixia²

(1. Institute of Rail Transit, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. China Academy of Railway Sciences Co., Ltd., Beijing 100081, China)

Abstract: To address the problem of serious road damage at stations and intersections during the trial run of virtual rail trains, the vehicle-tire-road interaction is considered, and the dynamic tire forces are obtained by constructing a virtual rail train dynamics model with Abaqus finite element software to develop a tread tire and viscoelastic asphalt pavement model, and the tire-road contact stresses at uniform speed and under braking conditions are analyzed and compared based on the arbitrary Lagrange-Euler (ALE) method. The contact

stress characteristics of tire and pavement at uniform speed and under braking conditions are analyzed and compared based on the ALE method, and the effects of slip rate and load on the contact stress of braking conditions were studied. The results show that the longitudinal stress during braking is the main cause of road damage, and the slip rate and load have a significant effect on the contact stress during braking. The maximum longitudinal stress under braking conditions increases by approximately 979 kPa compared to uniform speed conditions. When the slip rate increases from 0.02 to 0.06, the maximum longitudinal stress increases by approximately 99.8%. When the load increases from 40 kN to 50 kN, the maximum longitudinal stress at the edge of the tire increases by approximately 98.8%. Therefore, braking should be avoided as much as possible when the train is running, and at the same time the train load should be in a reasonable range.

Key word: virtual track train; vehicle dynamics; tire-road contact model; contact stress; finite element analysis

虚拟轨道列车是以地面虚拟轨道为导向运行的公路胶轮列车, 车辆与路面的相互作用是通过轮胎传递的。大量调研发现, 在虚拟轨道列车开通试运行过程中, 由于列车反复调试导致列车载荷不断加载到路面, 使得车站及十字路口的道路破坏十分严重, 同时列车制动时的加速度明显大于牵引时的加速度, 因而制动时纵向力也明显大于牵引和匀速状态下的相应值, 因此有必要着重关注虚拟轨道列车在制动工况下轮胎与路面的接触应力分布, 以揭示车辆对道路的破坏效应。

对于接触应力的研究, 通常是根据轮胎、路面的几何参数、力学性能等建立轮胎-路面接触模型, 分析在不同工况下的接触应力的分布与变化。例如,

收稿日期: 2023-06-28

基金项目: 中国铁道科学研究院集团有限公司院基金课题(2022YJ303)

第一作者: 张济民, 教授, 工学博士, 主要研究方向为车辆动力学、机电一体化、道路工程。

E-mail: zjm2011@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

HE等^[1]通过构建轮胎-路面相互作用模型,模拟静态和各种滚动工况(自由滚动、加速和制动)下的接触应力,结果表明,不同运行工况下的接触应力有显著差异。刘庆纲等^[2]针对11.00R20全钢载重子午线轮胎,通过设置耦合轮胎的垂直载荷、工况和侧倾角3个变量,模拟研究不同状况下轮胎-路面接触应力的变化情况。杨轸等^[3]采用Abaqus有限元仿真软件,建立P215/70R15型子午线轮胎与刚性路面的接触作用模型进行仿真分析。结果表明:轮胎接地面中心点和平均面竖向接触应力与充气压力、轮载呈正相关非线性变化。蒋余静等^[4]选取我国常用的半刚性沥青路面结构,通过建立有限元模型并施加移动三向非均布接触应力,分析了路面结构内部应力分布。王承萍等^[5]采用解耦的方式将轮胎与刚性路面相互作用模型的三向接触力提取并施加到黏弹性沥青有限元模型,针对虚拟轨道列车轮胎在匀速、完全制动及转弯3种行驶工况下沥青路面的动力学响应及永久变形进行分析研究。目前针对轮胎与路面接触应力的研究方法,主要包括实验法和分析法。而采用压力传感器、压电传感器阵列、超声波、压敏膜^[6-7]等实验仪器直接测量接触应力,价格昂贵且效率低,采用有限元法等分析方法操作简单高效。许多研究者基于有限元法,建立了轮胎和路面的有限元模型,来分析轮胎和路面的三向接触应力分布,并研究了轮胎类型、车辆运行工况、车辆载荷、路面类型、温度等因素对轮胎和路面间接触应力的影响^[8-9]。

以往的研究多数将轮胎和路面的接触应力作为静态考虑,并在轮胎-路面接触模型中强加了滑移率、侧滑角等要求,以简化典型运行工况下的真实轮胎力。此外,路面模型通常被认为是刚性或线弹性模型,而很少考虑沥青路面的黏弹性。本文综合了

轮胎和路面间的动态相互作用力,应用任意拉格朗日-欧拉(arbitrary Lagrange-Euler, ALE)法建立了轮胎-黏弹性沥青路面接触模型,研究匀速和制动工况下轮胎与层状沥青路面间的接触应力特征,并分析滑移率和载荷对制动工况接触应力的影响。研究结果将为分析虚拟轨道列车在匀速和制动工况下的轮胎-路面接触应力分布机制、解决虚拟轨道列车在车站、十字路口车辆位置处道路破坏严重的问题提供有价值的参考与借鉴。

1 轮胎-路面接触有限元模型

1.1 轮胎有限元模型

根据中国国家标准GB/T 2977—2016^[10],虚拟轨道列车采用规格为385/65 R22.5的子午线轮胎,该轮胎主要由橡胶材料和钢丝帘线组成,橡胶材料包括胎面胶、胎侧胶、胎体层胶,钢丝帘线主要包括胎体钢丝、零度带束层钢丝、1号/2号/3号带束层钢丝、钢丝圈。

橡胶材料具有超弹性和黏弹性,其应力-应变关系表现出较强的非线性,采用Yeoh材料模型来模拟橡胶材料特性,能够较好地反映橡胶大变形的能力,其应变能函数表达式为

$$U = \sum_{i=1}^3 C_{i0} (I_1 - 3)^i + \sum_{i=1}^3 (J - 1)^{2i} / D_i \quad (1)$$

式中: U 为橡胶的应变能函数; J 为弹性体积比; C_{ij} 和 D_i 均为材料常数(D_i 的值接近于零); I_1 为第一应变不变量,它的表达式为

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (2)$$

式中: λ_1 、 λ_2 、 λ_3 为初级伸长率。

各橡胶材料的Yeoh模型参数如表1所示,它由Kasaik轮胎公司提供。钢丝帘线选用线弹性模型,钢丝帘线镶嵌于对应的橡胶材料中,在分析时选用rebar单元,其参数如表2所示。

表1 Yeoh模型橡胶参数
Tab. 1 Yeoh model parameters of rubber

橡胶名称	Yeoh模型			
	$C_{10}/10^5\text{Pa}$	$C_{20}/10^4\text{Pa}$	$C_{30}/10^4\text{Pa}$	$D_i (i=1,2,3)$
胎面橡胶	7	-6.71	9.55	≈ 0
胎侧橡胶	9.35	-1.90	18.4	≈ 0
胎圈橡胶	9.26	-8.60	8.29	≈ 0

在Abaqus软件建立纵向花纹轮胎有限元模型,由于轮胎具有明显的对称性,可以通过二维模型旋转到三维模型,如图1所示。

二维模型的元素类型为CGAX4H、CGAX3H和

SFMGAX1,三维模型的元素类型为C3D8H、C3D6H和SFM3D4R,整个轮胎有限元模型单元数为104828。

表 2 钢丝绳线参数

Tab. 2 Parameters of steel cord

结构	弹性模量 /MPa	泊松比	截面积 /mm ²	间距 /mm	密度 /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	夹角 /($^{\circ}$)
0°带束层	19 025	0.3	1.50	2.22	7 800	90
第1带束层	19 025	0.3	2.06	2.08	7 800	66
第2带束层	19 025	0.3	2.06	2.08	7 800	105
第3带束层	19 025	0.3	1.02	2.50	7 800	75
钢丝圈	19 025	0.3	1.50	1.65	7 800	90
胎体钢丝	19 025	0.3	2.06	2.08	7 800	0

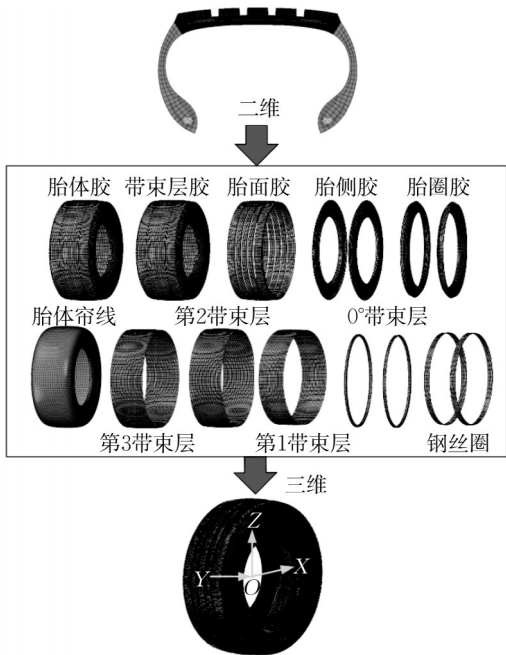


图 1 轮胎有限元模型

Fig. 1 Finite element model of tire

1.2 路面有限元模型

路面采用黏弹性沥青路面,由上面层(改性 SMA-13)、中面层(改性 AC-20)、下面层(AC-25)、基层(水泥稳定碎石)、底基层(石灰土)和土基组成。

表 4 沥青面层材料的Prony级数(参考温度 20 ℃)

Tab. 4 Prony series of asphalt surface material (reference temperature 20 ℃)

τ_i	g_i		
	改性SMA—13	改性AC—20	AC—25
0.000 1	0.065 05	0.051 952	0.028 045
0.001	0.272 09	0.222 824	0.162 232
0.01	0.272 77	0.271 189	0.258 214
0.1	0.193 23	0.216 740	0.265 024
1	0.106 49	0.127 760	0.177 240
10	0.049 89	0.061 263	0.074 611
100	0.018 39	0.021 408	0.021 880
1 000	0.007 89	0.009 682	0.004 920
10 000	0.013 93	0.016 890	0.007 655
100 000	0.000 26	0.000 291	0.000 178

沥青面层材料具有黏弹性,采用广义 Maxwell 模型来描述,其表达式如下:

$$E(t)=E_e+\sum_{i=1}^m E_i e^{-\left(\frac{t}{P_i}\right)} \tag{3}$$

$$G(t)=E(t)/(2(1+\mu)) \tag{4}$$

$$g(t)=1-\sum_{i=1}^N g_i(1-e^{-t/\tau_i}) \tag{5}$$

式中: $E(t)$ 为松弛模量; E_e 为平衡模量; E_i 为松弛强度; P_i 为松弛时间; $G(t)$ 为剪切模量; μ 为泊松比; $g(t)$ 由瞬态剪切模量 $G(t)$ 归一化得到; g_i 为常数; τ_i 为延迟时间; N 为 Prony 级数的个数。

路面的面层材料为黏弹性,基层、底基层和土基均为线弹性,路面结构各层参数如表 3 所示。

表 3 路面结构参数^[11]

Tab. 3 Parameter of pavement structure^[11]

结构层	材料	厚度/ mm	动态模量/ MPa	泊松比	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
上面层	改性 SMA—13	4	黏弹性	0.3	2 300
下面层	改性 AC—20	6	黏弹性	0.3	2 300
中面层	AC—25	8	黏弹性	0.3	2 300
基层	水泥稳定碎石	40	1500	0.2	2 300
底基层	石灰土	20	0.45	0.3	2 100
土基	土		0.045	0.4	1 850

根据标准 JTG E20—2011^[12],对各面层材料进行动态模量试验以得到黏弹性参数^[13],获取不同温度(4.4 ℃、15 ℃、20 ℃、40 ℃、54.5 ℃)和不同加载频率(0.1、0.5、1、5、10、20 Hz)下的动态模量和相位角,采用数值转换的方式将动态模量转换为松弛模量,利用时温等效原理,对松弛模量进行 Prony 级数的转换。表 4 给出了面层材料的 Prony 级数(参考温度 20 ℃)。

沥青路面的长度、宽度、深度分别为3、2、2 m,其中x轴为轮胎行驶方向(纵向),y轴为路面宽度方向(横向),z轴为路面深度方向(纵向)。沥青路面在底部被完全约束,在横向和纵向上被对称约束,沥青路面层间接触完全连续,单元类型为C3D8R,单元数为146 899。

1.3 轮胎-路面接触关系

根据轮胎与路面的实际接触情况,其接触状态设置为面-面接触,接触面之间的相互作用主要分为法向相互作用和切向相互作用两个部分。在轮胎-路面接触模型中采用“硬接触”来定义法向相互作用。两个接触面之间的距离为间隙,当间隙为零时认为两个面之间发生了接触。“硬接触”意味着当两个接触面之间的间隙为零时,接触压力变为零或负值时,相应节点上的接触约束被解除;当接触面之间的间隙不为零时,两个表面产生接触,进而产生接触压力,接触压力的大小没有任何限制,并在相应的节点上施加接触约束。通常采用罚函数来描述法向相互作用力,其表达式为

$$f_n = \begin{cases} K_n C & C \leq 0 \\ 0 & C > 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: f_n 为法向相互作用力; K_n 为法向接触刚度; C 为接触节点相对于目标表面的间隙值。

切向相互作用在轮胎-路面接触模型中采用小滑移中“SURFACE TO SURFACE”算法来定义,该算法不仅考虑了胎面与路面之间微小的滑动状态,还提高了计算结果的精度。两个接触面之间的相互摩擦模型采用库伦摩擦模型,其表达式为

$$f_s = \begin{cases} K_t \eta^e, & \text{粘着接触} \\ \mu f_n, & \text{滑动接触} \end{cases} \quad (7)$$

式中: f_s 为切向相互作用力; K_t 为切向刚度; η^e 为接触节点相对于目标表面的弹性变形; μ 为滑动摩擦系数。根据建立的轮胎和路面有限元模型,采用ALE方法建立轮胎-路面接触模型,如图2所示。

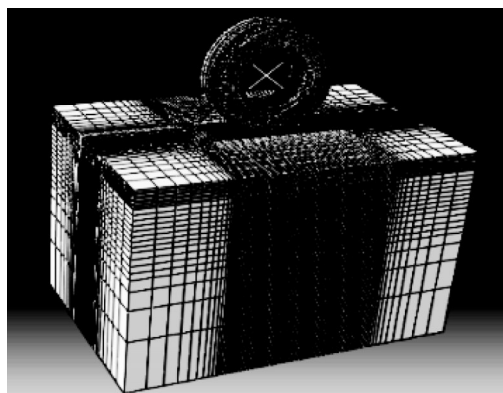


图2 轮胎-路面接触模型

Fig. 2 Tire-road contact model

在ALE方法中,轮胎稳态滚动接触被分解为轮胎的刚体运动和轮胎、路面的材料变形,其中轮胎的刚体运动采用Eulerian方法描述,轮胎与路面的材料变形采用Lagrange公式方法^[14]。

1.4 模型验证

为验证本文所构建的轮胎-路面接触模型的准确性,根据文献[15]模型进行了验证。对比分析两个模型静态接触时的垂向接触应力分布,结果如图3所示。两个模型的最大接触应力相差 1.34×10^5 Pa,误差在10%以内,且整个接触区域内的应力分布基本一致,均呈现中间较高,边缘较低的现象。因而本文所构建的轮胎-路面接触模型准确,可用于后续分析计算。

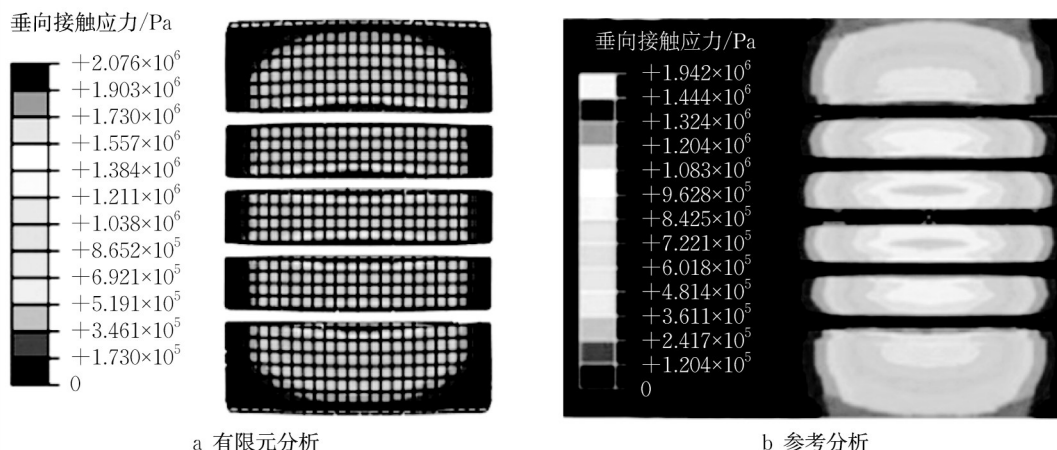


图3 模型验证结果

Fig. 3 Verification result of model

2 轮胎动载荷模型

2.1 轨道列车动力学模型

为获得虚拟轨道列车机动过程中的轮胎力,建立了考虑车辆与道路相互作用的虚拟轨道列车动力学模型^[16],该模型由三辆车组成,三辆车之间通过一个具有刚度和阻尼的耦合器连接,每辆车都通过具有刚度和阻尼的独立悬挂装置与相应的车轮相连,采用魔术公式模型来描述橡胶车轮的动力响应。

2.2 设定轮胎工况

为了充分反映轮胎—路面相互作用对接触应力的影响,根据建立的虚拟轨道列车动力学模型计算了匀速和制动工况下的动态轮胎力。在分析轮胎—路面接触应力特征时,大部分研究普遍以静轮胎力作为外轮胎力进行计算,而车辆在行驶过程中,由于路面不平度使得车辆随机振动,此时的轮胎力是动态变化的,与静轮胎力之间存在显著差异。为了得到精准的接触应力特征,综合考虑运动过程中的动态轮胎力,对列车在各个典型运行工况下的轮胎力进行评估。

轮胎垂向轮胎力定义为

$$F_{VDL} = F_{vs} + \sigma_{F_{vd}} \quad (8)$$

轮胎水平向轮胎力定义为

$$F_{HDL} = F_{hs} \pm \sigma_{F_{hd}} \quad (9)$$

式(8)—(9)中: F_{VDL} 、 F_{HDL} 分别表示各轮胎垂直、水平轮胎力; F_{vs} 、 F_{hs} 分别表示各轮胎垂直静轮胎力和水平静轮胎力; $\sigma_{F_{vd}}$ 、 $\sigma_{F_{hd}}$ 分别表示各轮胎垂直动轮胎

力、水平动轮胎力的均方根值。

匀速工况时,运行条件设定如下:①车辆载荷为 30 kN;②轮胎胎压为 900 kPa;③路面等级为 b;④运行速度为 $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。计算后得到垂向轮胎力为 36.2 kN,纵向轮胎力为 0.734 kN。

制动工况时,运行条件设定如下:①车辆载荷为 30 kN;②轮胎胎压为 900 kPa;③路面等级为 b;④初速度为 $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,制动时的加速度为 -1 、 -2 、 -3 、 $-4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。计算后的到垂向轮胎力和纵向轮胎力如表 5。

表 5 制动工况下的轮胎力

Tab. 5 Tire force under braking conditions

	kN			
	加速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$			
	-1	-2	-3	-4
垂向	42.4	43.2	46.1	48.5
纵向	3.5	7.1	10.6	14.2

在制动工况下,在轮胎和地面之间都会发生相对运动,在车轮运动中滑动成分所占的比例称为滑移率,用 s 表示。其定义如下:

$$s = \frac{v - \omega r}{v} \times 100 \% \quad (10)$$

式中: v 为车速; ω 表示车轮滚动角速度; r 表示车轮半径; ωr 表示车轮速度。

图 4 给出了轮胎在额定压强为 900 kPa 下,承受 30 kN 的载荷以 $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 滚动时轮胎中心所受的力与滑移率之间的关系。随着滑移率的增大,滚动角速度逐渐增大,轮胎由制动状态转变为牵引状态,滑移率为 0 时视为自由滚动(匀速工况)。

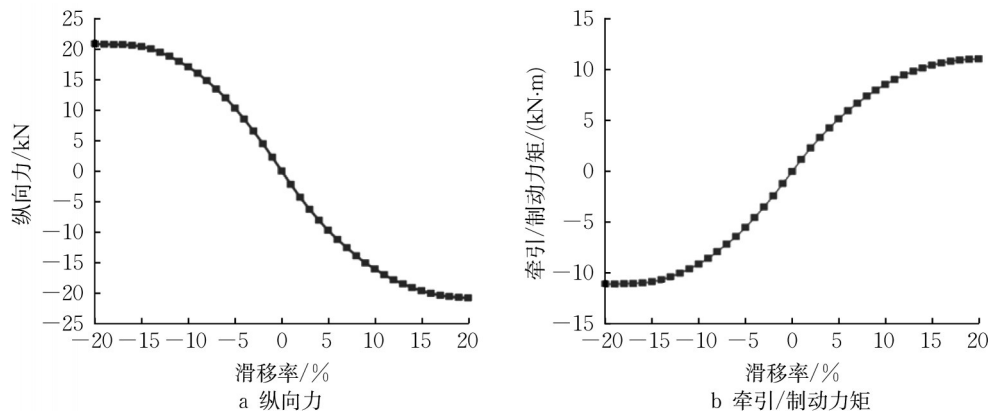


图 4 轮胎中心受力情况

Fig. 4 Center force of tire

3 结果与分析

虚拟轨道列车在沥青路面上运行时,轮胎与路面之间的接触应力特征对于分析交通安全、路面损坏程度起着关键性作用。对接触应力的主要影响因素与虚拟轨道列车的运行工况密切相关,即与轮胎力密切相关。在本节内容中,将以轮胎与路面之间的接触应力为研究对象,接触情况如图5所示,截取轮胎与路面接触的区域,命名为花纹1-5,以轮胎圆周方向为接触长度方向,以轮胎厚度方向为接触宽度方向,分析匀速和制动运行工况下的接触应力特征及滑移率和载荷对制动工况接触应力的影响因素。由于这些因素对匀速工况和制动工况下的横向接触应力影响均非常小,因此本文只研究垂向接触应力和纵向接触应力。

3.1 典型工况

在匀速工况下,速度设置为 $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,轮胎压力设置为 900 kPa ,轮胎载荷设置为 30 kN ,接触应力如图6所示。在匀速工况下,垂向应力沿长度方向

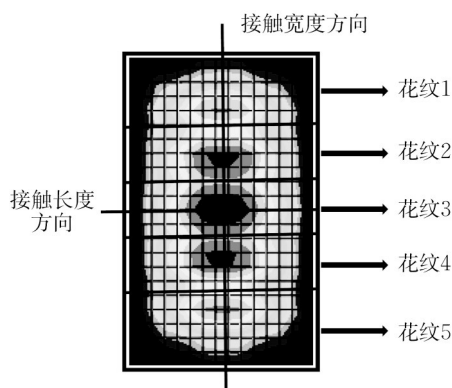


图5 接触示意图

Fig. 5 Contact diagram

由中间向两侧减小,沿宽度方向各胎纹两侧集中,纵向应力接近于0。

在制动工况下,将速度设置为 $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,轮胎压力设置为 900 kPa ,轮胎载荷设置为 30 kN ,由图4可知在滑移率达到0.1时,纵向力已接近饱和,因此将滑移率设置为0.1,接触应力如图7所示。

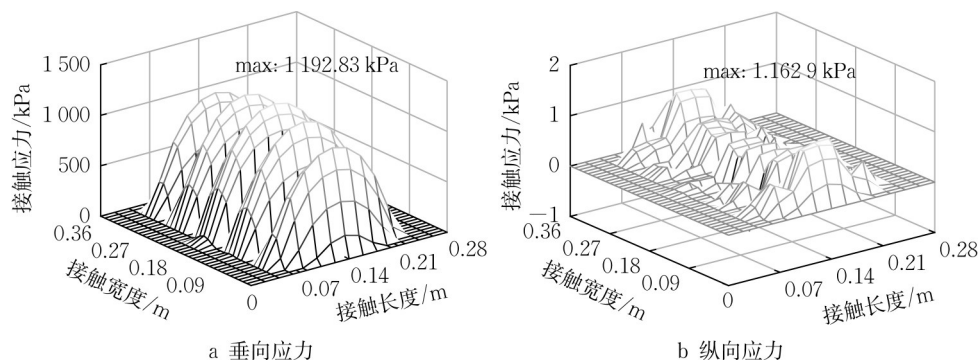


图6 匀速工况下的接触应力

Fig. 6 Contact stress under uniform speed working condition

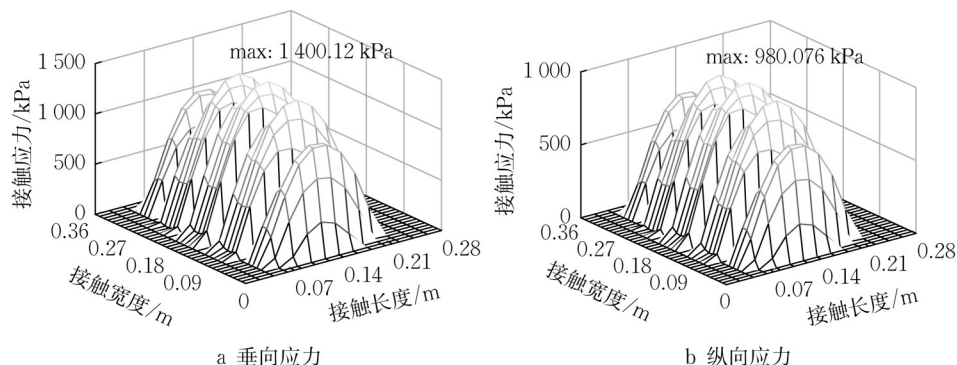


图7 制动工况下的接触应力

Fig. 7 Contact stress under braking conditions

在制动工况下,最大垂向应力和最大纵向应力均出现在花纹3处,并逐渐向两侧降低。由图6b和

图7b可以看出,制动工况的纵向接触应力远大于匀速工况的纵向接触应力,制动工况的最大纵向应力

比匀速工况大约 979 kPa。将匀速工况与制动工况的垂向应力在接触长度与接触宽度上进行对比,结果如图 8 所示。垂向应力大小在接触宽度方向上的花纹 1、花纹 5 与匀速工况基本一致,制动时花纹 2-5 的垂向应力峰值增幅较大,最大垂向接触应力比匀速工况增大约 17.4 %;在接触长度方向上,制动时的垂向应力峰值会沿速度方向向后偏移,并且应力

峰值增幅较大。

3.2 滑移率对制动工况的影响

为了分析滑移率对制动工况接触应力的影响,在速度为 $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,将载荷设置为 30 kN,胎压设置为 900 kPa,将滑移率分别设置为 0.02 和 0.06,接触应力如图 9、图 10 所示。

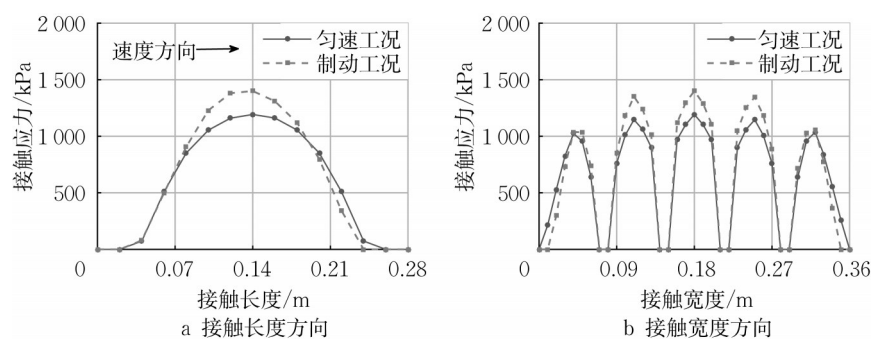


图 8 垂向应力的对比

Fig. 8 Comparison of vertical stresses

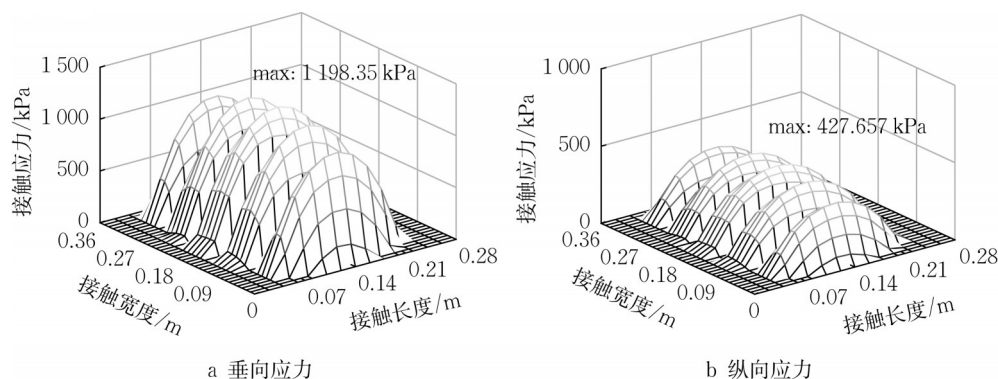


图 9 滑移率为 0.02 时的接触应力

Fig. 9 Contact stress at a slip rate of 0.02

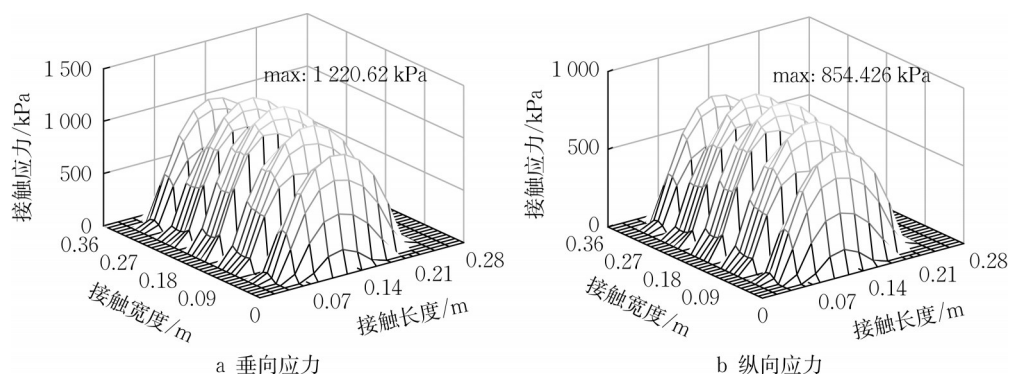


图 10 滑移率为 0.06 时的接触应力

Fig. 10 Contact stress at a slip rate of 0.06

将滑移率为 0.02、0.06 时的接触应力和制动工况的接触应力(图 7)在接触长度和接触宽度方向上进行对比,对比结果如图 11、图 12。可以看出滑移

率对垂向应力的影响较小,但对纵向应力的影响显著。当滑移率从 0.02 增大到 0.06 时,垂向应力变化非常小,但纵向应力增幅大,最大纵向应力增大

99.8 %;当滑移率从0.06增大到0.1时,垂向应力增幅较大,且主要增大在花纹2-4,最大垂向应力增大14.7 %,同时,纵向应力在花纹2-4上也增大,但增幅下降,最大纵向应力增大14.7 %。

3.3 载荷对制动工况的影响

为了分析载荷对制动工况接触应力的影响,在

速度为 $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时以0.1的滑移率制动,将载荷分别设置为40 kN和50 kN,胎压设置为900 kPa,接触应力如图13、图14所示。将制动工况的接触应力(图7)与载荷为40 kN和50 kN时的接触应力在接触长度方向和接触宽度方向上进行对比,结果如图15、图16所示。

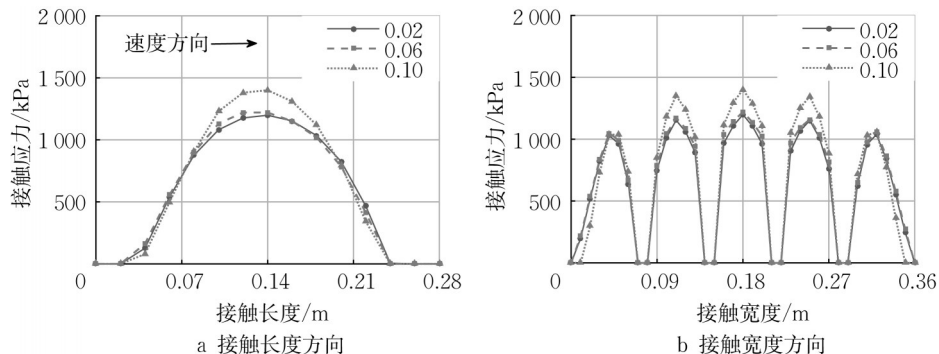


图11 不同滑移率下的垂向应力对比

Fig. 11 Comparison of vertical stresses at different slip rates

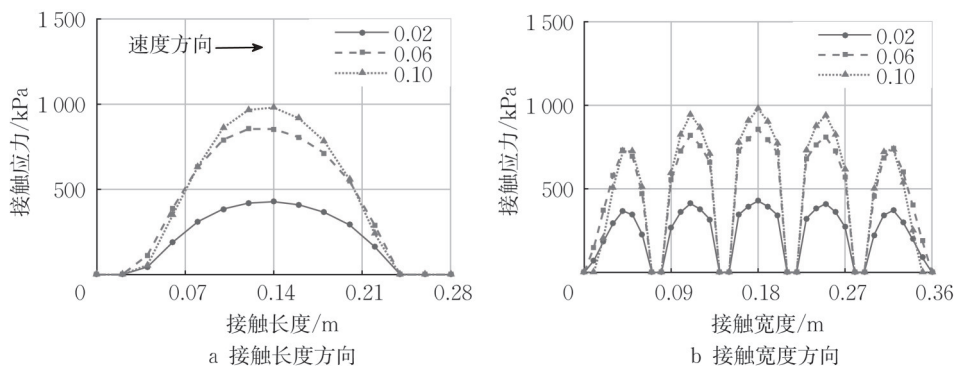


图12 不同滑移率下的纵向应力对比

Fig. 12 Comparison of longitudinal stresses at different slip rates

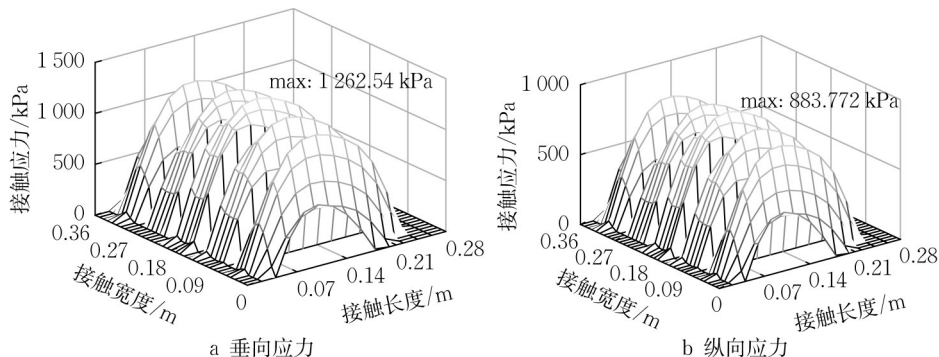


图13 载荷为40kN时的接触应力

Fig. 13 Contact stress at a load of 40 kN

当载荷从30 kN增大到40 kN时,由于轮胎载荷增大导致轮胎受压变形,轮胎边缘受力增大,最大垂向应力和最大纵向应力分别下降约9.9 %和9.8 %。当载荷从40 kN增大到50 kN时,最大垂向

应力和最大纵向应力出现在轮胎边缘,轮胎边缘的最大垂向应力和最大纵向应力分别增大14.7 %和14.7 %,此时轮胎变形严重,对轮胎和路面的损伤较大。

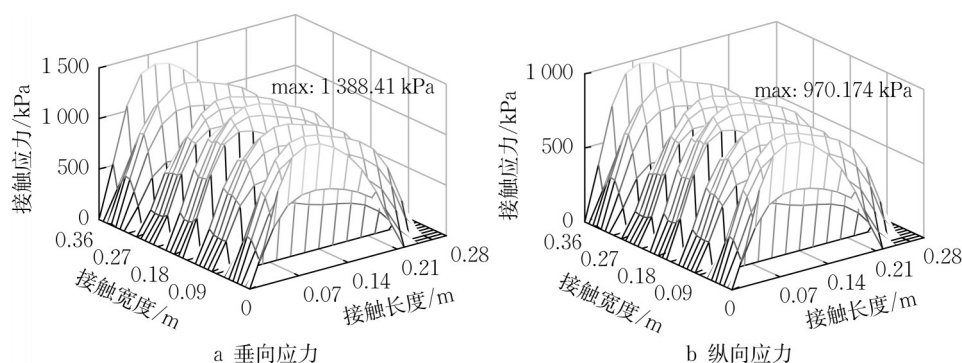


图 14 载荷为 50kN 时的接触应力

Fig. 14 Contact stress at a load of 50 kN

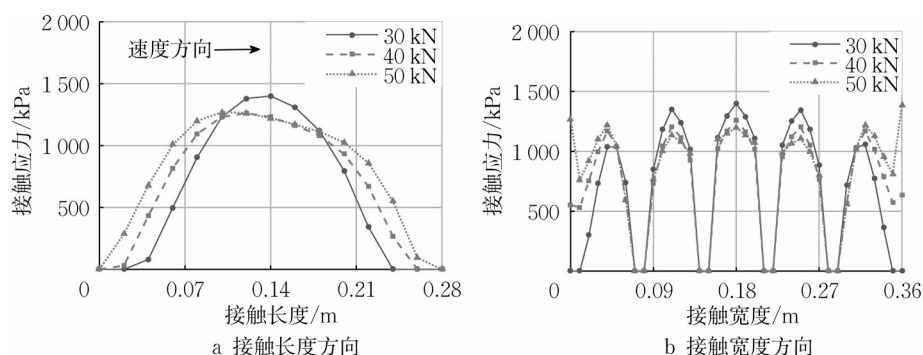


图 15 不同载荷下的垂向应力对比

Fig. 15 Comparison of vertical stress of braking under different loads

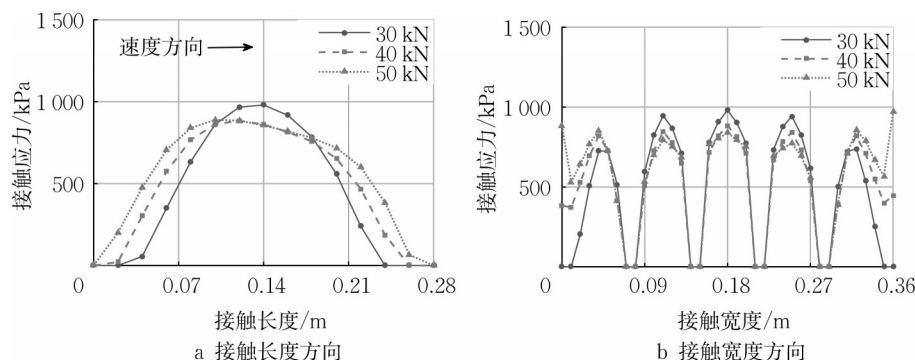


图 16 不同载荷下的纵向应力对比

Fig. 16 Comparison of longitudinal stresses under different loads

4 结论

为分析匀速、制动工况下轮胎与路面的接触应力,基于 ALE 法建立了轮胎-黏弹性沥青路面接触模型,将匀速工况与制动工况的接触应力进行对比,并分析了滑移率和载荷对制动工况接触应力的影响,主要结论如下:

(1)在匀速工况下,垂向应力沿长度方向由中间向两侧减小,沿宽度方向各胎纹两侧集中,纵向应力接近于 0。在制动工况下,最大纵向应力比匀速工况增大约

979 kPa,增幅约 841.7%,最大垂向应力比匀速工况增大约 17%。说明在制动工况下,路面损伤更严重。

(2)滑移率对制动工况下的接触应力有显著的影响,随着滑移率的增大,垂向应力和纵向应力都会增大。当滑移率从 0.02 增大到 0.06 时,最大垂向应力基本不变,最大纵向应力增大约 99.8%;当滑移率从 0.06 增大到 0.1 时,最大垂向应力增大约 14.7%,最大纵向应力增大约 14.7%。因而在行驶时应尽量避免制动,尤其是紧急制动。

(3)载荷对制动工况接触应力的影响主要体现在

轮胎边缘。当载荷由30 kN增大到40 kN时,由于轮胎边缘受力增大,各个花纹的接触应力趋于平均,此时较为理想;当载荷由40 kN增大到50 kN时,轮胎边缘的最大垂向应力和最大纵向应力分别增大约98.1%和98.8%,对轮胎和路面造成较大损伤。因此,列车载荷要在合理的区间内,以减小对道路的破坏。

作者贡献声明:

张济民:设定研究内容,指导论文撰写与修改。

王金杰:模型构建,分析计算,论文撰写与修改。

王承萍:方程推导,模型构建,论文撰写与修改。

周和超:设定研究内容,论文修改。

孙丽霞:文献综述,模型构建,论文修改。

参考文献:

- [1] HE H Q, LI R, YANG Q H, *et al.* Analysis of the tire-pavement contact stress characteristics during vehicle maneuvering[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2021, 25: 2451.
- [2] 刘庆纲, 魏旭明, 郭昊, 等. 轮胎-路面接触应力的多变量耦合分析[J]. 橡胶工业, 2023, 70(3): 225.
LIU Qinggang, WEI Xuming, GUO Hao, *et al.* Multivariate coupling analysis of tire-road contact stresses[J]. Rubber Industry, 2023, 70(3): 225.
- [3] 杨轸, 唐磊. 轮胎-刚性路面接触作用仿真分析[J]. 中国科技论文在线精品论文, 2021, 14(1): 93.
YANG Zhen, TANG Lei. Simulation analysis of contact action between tire and rigid pavement[J]. China Science and Technology Paper Online Excellence Paper, 2021, 14(1): 93.
- [4] 蒋余静, 张海军, 谢军. 移动三向非均匀布接触应力条件下沥青路面结构响应分析[J]. 公路, 2023, 68(2): 61.
JIANG Yujing, ZHANG Haijun, XIE Jun. Analysis of structural response of asphalt pavement under mobile three-way non-homogeneous contact stress conditions[J]. Highway, 2023, 68(2): 61.
- [5] 王承萍, 张济民, 周和超, 等. 虚拟轨道列车作用下黏弹性路面响应及变形分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, 49(1): 60.
WANG Chengping, ZHANG Jimin, ZHOU Hechao, *et al.* Dynamic response and permanent deformation analysis of asphalt pavement under the virtual rail train [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2021, 49(1): 60.
- [6] TIELKING J T, ABRAHAM M A. Measurement of truck tire footprint pressures[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 1994, 1435: 92.
- [7] CHEN B, ZHANG X N, YU J M, *et al.* Impact of contact stress distribution on skid resistance of asphalt pavements [J]. Construction and Building Materials, 2017, 133: 330.
- [8] WU C Y, WANG H, ZHAO J N, *et al.* Prediction of viscoelastic pavement responses under moving load and nonuniform tire contact stresses using 2.5-D finite element method [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020(2020): 1.
- [9] DONG Z J, MA X Y. Analytical solutions of asphalt pavement responses under moving loads with arbitrary non-uniform tire contact pressure and irregular tire imprint[J]. Road Materials and Pavement Design, 2018, 19(8): 1887.
- [10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 载重汽车轮胎规格、尺寸、气压与负荷: GB/T 2977—2016[S]. 北京: 中国质检出版社, 2016.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Truck tire specifications, size, air pressure and load: GB/T 2977—2016[S]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2016.
- [11] 廖公云, 黄晓明. ABAQUS有限元软件在道路工程中的应用[M]. 南京: 东南大学出版社, 2008.
LIAO Gongyun, HUANG Xiaoming. Application of ABAQUS finite element software in road engineering [M]. Nanjing: Southeast University Press, 2008.
- [12] 交通运输部公路科学研究院. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程: JTG E20—2011[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
Institute of Highway Science, Ministry of Transportation and Communications. Standard test methods of bitumen and bituminous mixtures for highway engineering: JTG E20—2011 [S]. Beijing: People's Transportation Press, 2011.
- [13] 尤远见. 沥青混合料动态模量的研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2017.
YOU Yanjian. Study of dynamic modulus of asphalt mixes[D]. Jinan: Shandong University of Construction, 2017.
- [14] ZREID I, BEHNKE R, KALISKE M. ALE formulation for thermomechanical inelastic material models applied to tire forming and curing simulations[J]. Computational Mechanics, 2021, 67: 1543.
- [15] YANG J, WANG G L, WAN Z J, *et al.* Non-natural equilibrium contour design for radial tire and its influence on tire performance [J]. International Journal of Automotive Technology, 2016, 17(4): 639.
- [16] 王承萍, 张济民, 周和超, 等. 全行驶状态下虚拟轨道列车的动载及道路友好特性[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2022, 50(6): 871.
WANG Chengping, ZHANG Jimin, ZHOU Hechao, *et al.* Dynamic load and road friendly characteristics of virtual track train in full running state [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2022, 50(6): 871.