

沙漠用仿驼蹄橡胶轮胎的设计与试验研究*

李 杰 庄继德 魏 东

(吉林工业大学)

摘 要 研制沙漠轮胎是开发沙漠车辆的关键技术之一。根据仿生学原理,建立仿驼蹄轮胎原理模型并首次研制了仿驼蹄橡胶轮胎模型。进行仿驼蹄橡胶轮胎的参数设计,并在室内沙槽模拟台对仿驼蹄橡胶轮胎模型进行了试验研究。研究结果表明,仿驼蹄橡胶轮胎模型具有较高的沙地通过性。

关键词 沙漠 仿生 轮胎 仿驼蹄轮胎 设计 试验

素有“沙漠之舟”美称的骆驼,不仅有适应沙漠环境的体态和运动步伐,而且具有高通过能力的驼蹄及其与沙地相互作用的优异方式,使其在沙漠上行走自如。为此,本文根据仿生学原理,设计了沙漠用仿驼蹄橡胶轮胎,并对其进行了试验研究。

1 仿驼蹄橡胶轮胎的设计

1.1 设计依据

通过对骆驼在沙地上行走时的运动特性、驼蹄下的应力变化及驼蹄与沙的相互作用特性的研究可知^[1~3],驼蹄具有较厚的皮下层,可以起到弹性缓冲作用,且驼蹄的指枕受压力后,可向周围扩展,从而增大了足与沙的作用面积。另外,骆驼行走时,其足与沙的作用较独特:驼蹄平行沙面入沙,垂直于沙面出沙,对沙形成的扰动较小。驼蹄盘面以一定倾斜角度对沙面作用。简言之,驼蹄具有下述特点:弹性缓冲作用、对沙土扰动小、增面作用、一定限流固沙作用、倾斜蹬沙作用。这些作用方式使驼足产生较大的向前推力。因此,应用于沙漠中的仿驼蹄轮胎,必将获得较好的通过性。

1.2 仿驼蹄橡胶轮胎原理模型

根据仿生学原理,设计了如图1所示的仿驼蹄橡胶轮胎原理模型。在径向,有直角三角楔形块,见图1a,胎冠两侧有成对的“八”字形弹性块,见图1b。楔形块能有效地改变轮胎下法向应力(垂直于轮廓表面)分布,使得法向应力在车轮前进方向上的水平分量增大。普通轮胎在下死点以前的区域内,各点的法向应力的水平分量都与运动方向相反,对车轮起阻碍作用;只有在下死点以后的区域内,各点的法向应力才有向前的水平分量,对车轮起推进作用。与普通轮胎相比,仿驼蹄橡胶轮胎原理模型,在下死点以前的区域内,法向应力向后的水平分量减少,而在下死点以后的区域内,法向应力向前的水平分量增大,因此对车轮的推进作用较大。

从图1a还可以看出,外圆上A点的切线斜率大于楔形块上相应点B的切线斜率,因此楔形块在入沙时,对沙的扰动小;而楔形块C点的切线斜率大于外圆上相应点D的切线斜率,因

收稿日期: 1998-03-16 1998-08-20 修订

* 国家自然科学基金项目(59235090)和国家教委博士点基金项目(9518506)

李杰, 博士, 副教授, 长春市人民大街142号 吉林工业大学汽车工程系, 130025

此, 出沙时, 对沙的扰动也小。

胎冠两侧成对的“八”字形弹性块和径向楔形块构成内凹形结构, 如图 1 c, 在一定程度上限制了其下面沙的纵向和横向流动, 提高了沙的承载能力。另外, 当受沙土反力作用时, 弹性块向两侧张开, 可以增大接地面积。

1 3 仿驼蹄橡胶轮胎模型

根据上述原理模型, 设计了如下形式的仿驼蹄橡胶轮胎模型。如图 2 所示, 其结构可分为“基胎”和“附加装置”两部分。

基胎为常用的普通橡胶轮胎, 通过调节气压, 使其有较大的接触面积。附加装置用橡胶制成, 它由楔块和底带组成。楔块的楔形角前后不同, 使轮胎滚动过程中能产生较大的“后踏”作用, 出沙时又不致引起更多的跳沙作用。两楔形块间有足够大的空间, 使其具有一定的固沙作用。环状的底带的内径比基胎未充气时的外环略小, 靠橡胶的弹性变形安装在基胎的外缘, 安装后, 再将“基胎”充气, “基胎”的膨胀使两者接合更紧固。另外, 从图 2“附加装置”展开平面图中可知, “底带”宽 D 大于“楔块”宽 d , “楔块”宽与“基胎”宽相同, 即“底带”宽于“基胎”。这样, 在两侧上的孔中可各穿一条弹性带, 用以进一步将附加装置固紧于基胎。

“基胎—附加装置”的结构形式使仿驼蹄橡胶轮胎具有使用双重性, 将附加装置取下可在公路上使用, 装上附加装置可在沙漠中应用。

1 4 参数确定

模型的“基胎”为 5 00- 16 轮胎。未充气时半径 249. 00 mm、宽度 117. 00 mm、断面高 92. 64 mm 充气至 295 kPa 时半径 253. 69 mm、宽度 128. 50 mm、断面高 127. 70 mm。

模型“附加装置”的参数, 主要指环“底带”尺寸和“楔型块”尺寸。环

“底带”尺寸为: 内径 $R = 247$ mm, 厚 5 mm, 宽 $D = 230$ mm; “楔型块”厚 $h = 30$ mm, 宽 $d = 117$ mm。其它参数经研究为: “楔块”数 N 一般取 6 ~ 24, 周期圆心角 $\theta_r = 360^\circ / N = 15^\circ \sim 60^\circ$; 两“楔块”间的“间隔圆心角 $\theta_0 = \theta_r / 6$, 即 $2.5^\circ \sim 10^\circ$; “模型块”后角 β 取为 $37^\circ \sim 85^\circ$; “楔型块”前角 α 取 $\alpha = 0^\circ \sim 15^\circ$ 。根据上述分析结果, 选取了表 1 所示三组参数, 制作了仿驼蹄橡胶轮胎, 用以对比研究。

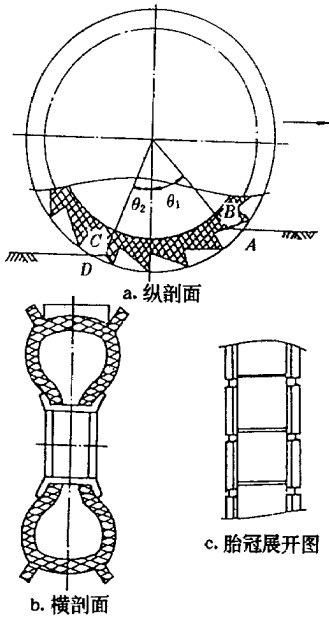


图 1 仿驼蹄橡胶轮胎原理模型

Fig 1 Principle model of the bionic camel foot tire

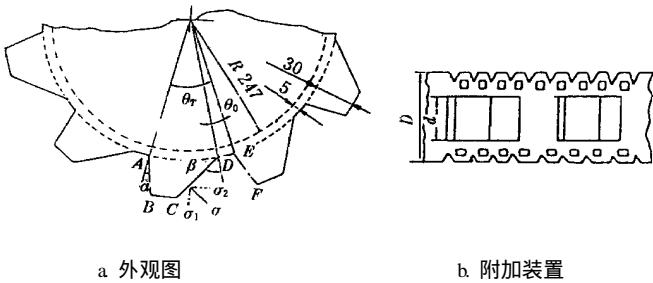


图 2 仿驼蹄橡胶轮胎模型结构图

Fig 2 Structure of the rubber model of the bionic camel foot tire

表 1 仿驼蹄橡胶轮胎模型参数

Tab 1 Parameters of the bionic camel foot tire

| | $\theta_r / (^\circ)$ | $\theta_0 / (^\circ)$ | $\alpha / (^\circ)$ | $\beta / (^\circ)$ | h / mm |
|--------|-----------------------|-----------------------|---------------------|--------------------|-----------------|
| 方案 I | 25. 71 | 4. 29 | 10 | 65 | 30 |
| 方案 II | 18 | 0 | 0 | 81 | 30 |
| 方案 III | 25. 71 | 4. 29 | 10 | 65 | 30 |

2 仿驼蹄橡胶轮胎的性能试验

2.1 试验用沙及试验设备

试验在室内沙槽模拟台上进行。试验所用沙取自新疆塔克拉玛干沙漠,其物理性能指标见表 2。

表 2 新疆沙物理性能指标

Tab 2 Physical property indexes of desert sand in Xinjiang

| 不均匀系数 | 曲率系数 | 颗粒比重 | 干密度/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ | | | 含水率 | 孔隙比 | | | 密实度 |
|-------|-------|-------|--------------------------------------|------------|------------|-------------|-------|------------|------------|-------|
| C_u | C_c | G_s | d | d_{\max} | d_{\min} | $\omega/\%$ | e | e_{\max} | e_{\min} | D_r |
| 1.75 | 0.96 | 2.677 | 15.65 | 16.572 | 14.398 | 0.3 | 0.676 | 0.822 | 0.583 | 0.609 |

试验装置原理图如图 3 所示。轮胎所受垂直载荷 W ,由砝码 4 提供。挂钩牵引力、轮轴下陷量及垂直加速度分别由拉压力传感器 6、位移传感器 3 及加速度传感器 8 测出。轮胎驱动力矩由贴在轮轴上的应变片测得。

2.2 性能评价指标

沙漠用仿驼蹄橡胶轮胎属于特殊用途轮胎的一种,故采用下列评价指标进行评价:

轮胎牵引系数 μ_{tr}

$$\mu_{tr} = D_p / W \tag{1}$$

式中 D_p ——轮轴上挂钩牵引力; W ——轮胎上所
受重力。

轮胎牵引效率系数 η_{tp}

$$\eta_{tp} = D_p \cdot r_a \cdot (1 - s) / M \tag{2}$$

式中 M ——车轮扭矩; r_a ——车轮有效滚动半径; s ——车轮滑转率,其表达式为:

$$s = (\omega r_a - v) / (\omega r_a) \tag{3}$$

式中 v ——沙槽移动速度; ω ——车轮转速。

轮胎垂直振动指数 I_a

$$I_a = A_u / g \tag{4}$$

式中 A_u ——轮胎平均统计垂直加速度; g ——地面垂直加速度。

沙压实指数 I_c

$$I_c = (k_c / b + k_\phi) z^{n+1} / (n + 1) \tag{5}$$

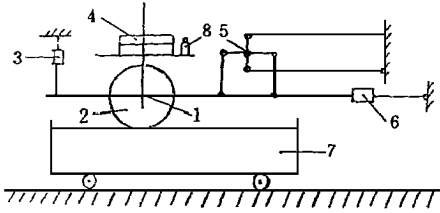
式中 k_c, k_ϕ, n ——沙承压特性参数; z ——车轮下陷量; b ——轮胎宽度。

轮胎与沙表面的剪切指数 I_s

$$I_s = L / L_{crit} \tag{6}$$

式中 L ——轮胎与沙表面的实际剪切长度; L_{crit} ——轮胎与沙表面的临界剪切长度。

试验时,调节轮胎转速和沙槽移动速度,以形成不同的滑转率,分别测得上述五项指标。然后再改变载荷、轮胎气压及更换轮胎类型,重复上述过程,便可得到各种工况下的试验指标数值。



- 1. 框架 2. 轮胎 3. 位移传感器
- 4. 砝码 5. 双平行四杆机构
- 6. 拉压力传感器 7. 可动沙槽
- 8. 加速度传感器

图 3 试验装置原理简图

Fig 3 Sketch of test bin

2 3 试验结果

表 3 列出了三种不同结构参数的仿驼蹄轮胎橡胶和普通橡胶轮胎在不同工况下, 所取得的试验结果。

表 3 不同工况下五种指标的极限值

Tab 3 Maximum values of five indexes at different cases

| 轮胎类型 | 载荷/kg | 气压/kPa | 滑转率/% | μ_{tr} | η_{lp} | I_{amax} | $I_{amax}/N \cdot m^{-1}$ | I_{smax} |
|--------|-------|--------|------------|------------|-------------|------------|---------------------------|------------|
| 方案 I | 10 | 100 | 26 1~ 44 3 | 0 682 | 0 155 | 0 0045 | 0 394 | 5 981 |
| | | 150 | 40 3~ 51 1 | 0 828 | 0 169 | 0 0073 | 0 592 | 7 026 |
| | | 200 | 40 9 | 0 504 | 0 126 | 0 004 | 0 341 | 6 340 |
| | 30 | 100 | 48 2~ 49 5 | 0 32 | 0 145 | 0 009 | 0 535 | 7 920 |
| | | 150 | 53 1 | 0 283 | 0 12 | 0 0097 | 0 819 | 7 567 |
| | | 200 | 40 2~ 45 4 | 0 249 | 0 153 | 0 008 | 0 594 | 6 356 |
| | 50 | 100 | 33 3~ 43 | 0 165 | 0 125 | 0 008 | 0 676 | 7 203 |
| | | 150 | 42~ 47 7 | 0 155 | 0 115 | 0 009 | 0 607 | 6 917 |
| | | 200 | 51 8 | 0 181 | 0 114 | 0 009 | 0 633 | 9 324 |
| 方案 II | 10 | 100 | 34~ 48 | 0 699 | 0 136 | 0 006 | 0 658 | 5 90 |
| | | 150 | 37~ 48 | 0 811 | 0 158 | 0 007 | 0 208 | 6 24 |
| | | 200 | 33~ 38 | 0 593 | 0 166 | 0 006 | 0 173 | 5 605 |
| | 30 | 100 | 15~ 47 | 0 311 | 0 148 | 0 016 | 0 265 | 7 873 |
| | | 150 | 47 | 0 195 | 0 104 | 0 01 | 0 745 | 6 392 |
| | | 200 | 36~ 50 | 0 357 | 0 159 | 0 01 | 0 430 | 6 625 |
| | 50 | 100 | 37 4~ 42 7 | 0 234 | 0 171 | 0 0073 | 0 331 | 5 658 |
| | | 150 | 50 8 | 0 27 | 0 166 | 0 0064 | 0 538 | 8 636 |
| | | 200 | 40 7~ 46 2 | 0 18 | 0 129 | 0 0096 | 0 568 | 6 468 |
| 方案 III | 10 | 100 | 36 5~ 48 4 | 0 726 | 0 149 | 0 006 | 0 302 | 6 897 |
| | | 150 | 39 4~ 47 7 | 0 655 | 0 135 | 0 008 | 0 387 | 6 201 |
| | | 200 | 49 4 | 0 777 | 0 143 | 0 005 | 0 401 | 7 781 |
| | 30 | 100 | 22 7~ 47 9 | 0 259 | 0 130 | 0 008 | 0 380 | 7 904 |
| | | 150 | 41 4 | 0 222 | 0 136 | 0 005 | 0 446 | 6 003 |
| | | 200 | 38 9~ 42 6 | 0 194 | 0 111 | 0 01 | 0 416 | 5 538 |
| | 50 | 100 | 45 4 | 0 152 | 0 114 | 0 009 | 0 819 | 6 129 |
| | | 150 | 31 3~ 38 1 | 0 085 | 0 074 | 0 01 | 0 355 | 5 429 |
| | | 200 | 31 2~ 39 1 | 0 078 | 0 067 | 0 0098 | 0 605 | 5 572 |
| 普通胎 | 10 | 100 | 43 2 | 0 41 | 0 114 | 0 008 | 0 259 | 5 616 |
| | | 150 | 42~ 48 5 | 0 36 | 0 088 | 0 007 | 0 299 | 6 426 |
| | | 200 | 28 4~ 49 7 | 0 38 | 0 089 | 0 005 | 0 219 | 6 958 |
| | 30 | 100 | 22 7~ 33 3 | 0 103 | 0 084 | 0 006 | 0 341 | 4 579 |
| | | 150 | 46 7 | 0 107 | 0 064 | 0 008 | 0 338 | 7 005 |
| | | 200 | 38 7 | 0 073 | 0 055 | 0 01 | 0 312 | 5 612 |
| | 50 | 100 | 32 5 | 0 057 | 0 062 | 0 004 | 0 250 | 4 631 |
| | | 150 | 49 7 | 0 047 | 0 039 | 0 009 | 0 507 | 7 704 |
| | | 200 | 30 4 | 0 05 | 0 058 | 0 004 | 0 419 | 4 408 |

考虑到沙漠车辆在沙漠地区使用工况, 选择了四种轮胎在载荷为 30 kg (近似于中等载荷)、气压为 150 kPa (近似于最佳气压) 的工况下, 五项指标值与滑转率关系曲线作为评价比较。比较结果如下:

- 1) 三种仿驼蹄橡胶轮胎的牵引系数和牵引效率均显著地大于普通轮胎的牵引系数和牵引效率。牵引系数以方案III最佳。而牵引效率最大者为方案 II, 方案III次之。
- 2) 比较轮胎垂直振动指数可知, 方案 I 的垂直振动指数与普通橡胶轮胎的值接近。而方

案III的振动指数略小于普通橡胶轮胎的振动指数。

3 结 论

- 1) 骆驼具有优越的越沙能力, 经过分析, 揭示其独特的越沙机理。根据仿生学原理, 将其应用于沙漠车辆行走机构上, 可以有效地提高车辆的越沙能力。
- 2) 以普通轮胎为基胎, 在基胎外缘装上具有仿驼蹄越沙机理的附加装置所构成的仿驼蹄橡胶轮胎, 为仿驼蹄轮胎实用化提供了依据。
- 3) 试验结果表明, 仿驼蹄橡胶轮胎的牵引性能显著地优于普通的常规橡胶轮胎。而且对车轮垂直振动特性也有些改善。

参 考 文 献

- 1 徐佩君 骆驼越沙行走机理研究及其在步行车辆上应用探讨: [博士学位论文] 长春: 吉林工业大学, 1992
- 2 李 杰 车辆行走机构与沙地相互作用及仿驼蹄轮胎力学模型的研究: [博士学位论文] 长春: 吉林工业大学, 1997
- 3 魏 东 仿驼蹄轮胎研制及其特性研究: [博士学位论文] 长春: 吉林工业大学, 1997

Design and Test of the Bionic Camel Foot Rubber Tire for Desert Vehicles

Li Jie Zhuang Jide Wei Dong

(Jilin University of Technology, Changchun, 130025)

Abstract Developing desert tire is one of the key technology for developing desert vehicles. Based on bionics principles, the principal model of the bionic camel foot tire was set up, and the rubber model of the bionic camel foot tire was developed. The design parameters of the bionic camel foot rubber tire were defined, and the performance tests of the bionic camel foot tire were done in the indoor sand tank. It was found that the bionic camel foot tire has higher trafficability.

Key words desert, bionics, tire, bionic camel foot tire, design, test