

轮面曲率半径对沙地刚性轮沉陷性能影响研究

张锐¹ 吉巧丽¹ 张四华² 刘芳³ 李建桥¹

(1. 吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130022; 2. 中国电子科技集团第二十八研究所, 南京 210007;
3. 青岛征和工业有限公司, 青岛 266705)

摘要: 轮面曲率半径对沙地刚性轮的沉陷性能影响至关重要。通过轮面承压试验、轮壤台架动态试验和离散元数值模拟分别对6种不同轮面曲率半径的平面、凹面和凸面沙地刚性轮在3种不同颗粒形状及粒径大小沙土上的沉陷性能进行分析。在轮面承压试验中, 相比其他轮面曲率半径的车轮, 平面轮在细径石英砂和粉尘状火山灰上的抗沉陷性能均最好。与其他沙土介质相比, 粗径石英砂上所有轮面车轮的沉陷量最小。轮面承压模拟结果表明, 平面轮下沙土颗粒的力场分布均匀, 轮下颗粒溢出量小, 有效说明平面轮沉陷量最小的原理。在细径石英砂轮壤台架动态试验中, 凹面R80车轮在行驶初期(位移小于50 cm)沉陷量最小, 行驶到稳定状态后(位移大于70 cm), 凹面R60车轮的动态沉陷量最小; 在粉尘状火山灰轮壤台架动态试验中, 凹面R60车轮在整个运动范围内的沉陷量最小。因此, 在细径石英砂和粉尘状火山灰上行驶过程中, 轮面曲率半径较大的凹面轮的抗沉陷性能较好。此外, 由车轮行驶在细径石英砂离散元模拟可知, 凹面轮的受力区域集中在轮面两侧, 轮面内凹结构可有效防止沙土侧向流动并减小对沙土的扰动。本文研究不仅为承压和行驶条件下不同曲率半径轮面的车轮在沙土介质上的沉陷性能判断提供参考依据, 而且为沙漠或者深空探测车辆轮/胎的轮面结构设计提供重要理论依据。

关键词: 轮面曲率半径; 沙地刚性轮; 沉陷性能; 承压与台架试验; 数值模拟

中图分类号: V476.3; V461.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)11-0341-09

Effect of Wheel Surface Curvature Radius on Sinkage Performance of Sand Rigid Wheel

Zhang Rui¹ Ji Qiaoli¹ Zhang Sihua² Liu Fang³ Li Jianqiao¹

(1. Key Laboratory of Bionic Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130022, China

2. The 28th Research Institute, China Electronics Technology Group, Nanjing 210007, China

3. Qingdao Choho Industrial Co., Ltd., Qingdao 266705, China)

Abstract: It is important that wheel surface curvature radius has an influence on the sinkage performance of rigid wheel in sandy environment. Based on wheel surface pressure-sinkage experiment, dynamic experiment of soil bin bench and discrete element numerical simulation, the sinkage performance of rigid wheel moving on sand of flat, concave (wheel surface curvature radius was 80 mm, 120 mm, and 60 mm) and convex (wheel surface curvature radius was 80 mm and 120 mm) surface of six different wheel surface curvature radii in three different shape and size sand particles (coarse diameter quartz sand, fine diameter quartz sand and dust volcanic ash) were analyzed. The pressure-sinkage experiment showed that compared with other rigid wheel of different wheel surface curvature radius, the sinkage of rigid wheel with flat surface was the smallest on fine diameter quartz and dust volcanic ash. Compared with other sand medium, the sinkage of all wheels with flat, concave and convex surface were the smallest of all on coarse diameter quartz sand. Numerical simulation of wheel surface pressure-sinkage showed that the force field distribution of sand particle under flat surface wheel was homogeneous and overflowed particles

收稿日期: 2016-03-27 修回日期: 2016-05-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(51275199)和吉林省科技发展计划项目(20140101074JC)

作者简介: 张锐(1975—),男,教授,博士,主要从事松软地面仿生行走理论与技术研究, E-mail: zhangrui@jlu.edu.cn

were small. Dynamic experiment of soil bin bench showed that the sinkage of concave R80 wheel was the smallest at the beginning of travelling period (the displacements were less than 50 cm), then the sinkage of concave R60 wheel was the smallest at the travelling steady state (the displacements were larger than 70 cm). On the dust volcanic ash, within the scope of the whole movement, the sinkage of concave R60 wheel was the smallest of all. Therefore, on the fine diameter quartz and dust volcanic ash, the larger wheel surface curvature radius of concave surface wheel, the better anti-subsidence performance. In addition, dynamic discrete element simulation on fine diameter quartz sand demonstrated that stress area of concave wheel was focused on both sides of the wheel and concave structure could have an effective effect on preventing sand in lateral flowing and reducing the disturbance of sand. This research not only provided the reference frame for estimating the sinkage performance of wheels with different wheel surface curvature radius on different sand media, but also provided the vital theoretical basis for the design of wheel/tire wheel surface structure of desert or deep space exploration vehicle.

Key words: wheel surface curvature radius; rigid wheel moving on sand; sinkage characteristics; pressure-sinkage and bench experiment; numerical simulation

引言

沙漠沙土的颗粒细小而均匀,颗粒尺寸分布在较小的范围内,长期的流动使沙粒棱角被磨损而近似呈球形,易发生流动,因而承载能力低^[1-3]。普通车辆车轮在沙土行驶过程中易产生滑转下陷,车轮滚动失去稳定,严重影响通过性,甚至无法通过^[4-5]。此外,人类对火星进行探测时^[6-7],出现例如美国“勇气”号和“机遇”号火星车因受到火星表面独特松软路面环境影响而出现的严重沉陷问题,以致探测车无法工作^[8-10]。因此,研究人员已经高度重视外星球松软表面特殊路面环境下巡视探测车辆的通过性能。

当车辆行驶在沙地环境中时,车轮受到压实阻力、推土阻力、滑转阻力以及粘着阻力。这些阻力构成了车辆行驶的外阻力,即运动过程中车轮与沙地相互作用主要消耗于土壤变形而存在的阻力^[11-12]。在一般沙土环境中行驶的车辆,影响车轮阻力的主要因素是车轮对沙土压实,即压实阻力可近似于车轮外阻力。车轮阻力是决定车轮行驶性能中最重要的参数之一,车轮轮面承压沉陷试验可以很好反映刚性车轮对沙土的压实阻力,进而判断车轮下陷以及预测车轮的通过性能^[13-18]。为提高车轮在沙地上的行驶通过性,已有研究大多集中在设法降低车轮与沙地接触面间的比压、减小车轮滑转下陷,增加车轮轮刺等方面,从而导致沙漠车轮结构过大,而对不同轮面曲率半径下沙土的破坏规律及约束沙土流动、提高其承载能力的研究尚存不足,所以并未从根本上解决车轮的沙地通过性问题^[19-26]。

本研究主要考虑轮面曲率半径对沙地刚性轮沉陷特性的影响,通过对不同轮面曲率半径的刚

性车轮,以相同的速度,在不同性能的土壤中进行加载。观察下陷过程中沙流的变化,以及对比在相同试验条件下因轮面曲率半径改变而导致下陷量的变化。以车轮动态的试验形式,剖析轮壤界面机理,探求具有良好抗沉陷特性的轮面曲率半径的刚性车轮。

1 材料方法

1.1 车轮轮面设计

为了揭示轮面因素对车轮通过性的影响,采用只改变轮面曲率半径的设计法则,设计了6种不同轮面曲率半径的车轮,分别是平面、凸面 R80(曲率半径为 80 mm 的凸面轮)、凸面 R120(曲率半径为 120 mm 的凸面轮)、凹面 R80(曲率半径为 80 mm 的凹面轮)、凹面 R120(曲率半径为 120 mm 的凹面轮)、凹面 R60(曲率半径为 60 mm 的凹面轮)。被试车轮设计采用补偿法原则,以保证车轮体积大体一致,这样可相对公平均衡地对比不同轮面因素在车轮运行过程中优越性,具体如图 1 所示。除轮面曲率半径不同,被试车轮其他结构因素都相同,轮宽为 100 mm。考虑到被试车轮本身结构的质量,采用轻质材料尼龙棒(PA66)制造加工。采用数控车削方法加工出被试车轮如图 2 所示。

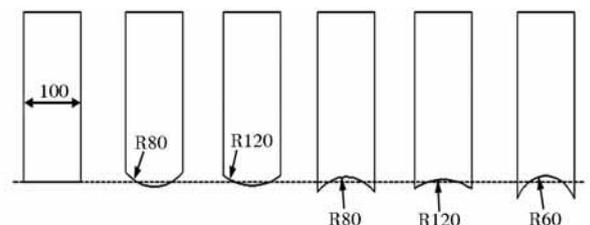


图 1 补偿法原则设计图

Fig. 1 Design principle diagram of compensation method



图 2 被试车轮

Fig. 2 Testing wheel

1.2 轮面承压试验设计

车轮轮面承压试验所用设备为 WDW-20J 型电子万能试验机。同时,考虑到轮面曲率半径对车轮沉陷性能的影响与轮下沙土土壤有很大的关系,为了充分反映轮面曲率半径因素在车轮通过性中的作用,选择 3 种具有典型性能的沙土土壤,分别是具有多棱角粗径石英砂(图 3a)、类似于沙漠表层土的光滑细径石英砂(图 3b)及研磨后粉尘状火山灰(图 3c)。3 种土壤粒径分布从粗到细,自然状态也是从颗粒状到粉尘状。粗径石英砂多棱角、颗粒大,因而流动性较小;细径石英砂因颗粒表面光滑细小,所以流动性较大;粉尘状火山灰的颗粒极细且较易飞扬,所以可压实性较大。



(a) 粗径石英砂

(b) 细径石英砂

(c) 粉尘状火山灰

图 3 试验土壤

Fig. 3 Testing soil

车轮轮面承压试验主要是为了反映车轮在土壤中下陷情况以及沙流变化。将被试车轮通过夹具固定在万能试验机的移动横梁上,以 15 mm/min 的速度自动向下移动压入装满松散试验土壤的小型土槽中,如图 4 所示。随着压入的深度不断增大,轮上负载也逐渐增加,设定轮上负载达到 3 200 N 时停止。自动加载过程中,自动记录车轮轮上负载以及车轮下陷深度,在试验机控制软件界面上自动描绘出车轮负荷与下陷量的曲线关系。当达到预加载停止后,数据以 TXT 文件格式自动保存在指定目录下,即完成一组试验。为了使试验数据真实地反映客观情况,同一轮型重复 5 次试验,每一次试验土槽里的土壤都通过铁铲翻松,并通过土壤硬度计进行测量,直到达到初始状态。

1.3 轮壤台架试验

轮辙是轮面结构与土壤相互作用形成的“信息



图 4 车轮轮面承压沉陷试验过程

Fig. 4 Test process of wheel static sinkage

表”,可以很好地反映不同轮面结构给车辆运行带来的影响。利用如图 5 所示的轮壤土槽试验系统分别对 3 种不同轮面曲率半径的车轮(平面、凹面 R80、凸面 R80)进行动态测试,从车轮驶过沙面形成的轮辙以及车轮沉陷量来判断各种轮面曲率半径车轮的动态沉陷性能。在细径石英砂和粉尘状火山灰表面进行试验时车轮转速均设置为 $24^\circ/\text{s}$,轮上载荷均为 90 N。

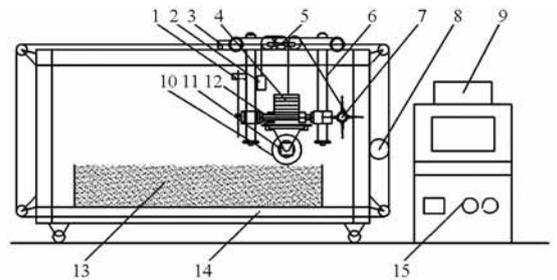


图 5 轮壤土槽试验系统结构示意图

Fig. 5 Structure diagram of wheel-soil bin testing system

1. 垂直位移传感器 2. 配重 3. 水平位移传感器 4. 砝码
5. 水平阻力传感器 6. 行车台架 7. 升降装置 8. 牵引阻力控制机构 9. EDC 控制器 10. 被试轮 11. 驱动电动机 12. 压力传感器 13. 土槽 14. 主支撑框架 15. 工控箱

1.4 三维数值模拟

针对沙漠沙土松散无粘性、可压缩性小、流动性大等特性^[26],利用 PFC3D 建立三维轮壤模拟系统进行轮面承压与动态行驶数值模拟。本文选用塔克拉玛干沙漠为试验样本原型^[27](具体力学物理参数如表 1 所示),在 PFC3D 中创建模拟土槽模型如图 6,模型具体参数如表 2 所示。土槽内球状颗粒代替沙土,颗粒间各种参数性能与沙漠沙土一致。轮面承压三维数值模拟试验中分别将不同轮面曲率半径的车轮(平面、凹面 R80、凸面 R80)置于土槽仿真系统中并施加负荷,从细微观角度观测轮下颗粒力场与速度场之间的变化,对比不同轮型之间沉陷量,分析沙地刚性轮轮壤界面特性以及静态下陷机理。动态模拟试验中分别给 3 种不同轮面曲率半径的车轮施加一定负载,并在模拟土槽中匀速前进,记录模拟试验数据。可从细微角度更加直观地观测轮

表1 塔克拉玛干沙漠沙土特性参数

Tab.1 Sand properties of Taklamakan desert

土壤参数	测试值
密度 $\rho / (\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	1.5
内摩擦角 $\Phi / (^\circ)$	29
摩擦模量 $K_\phi / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-n-2})$	2540
粘聚力模量 $K_c / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-n-1})$	0
变形指数 n	0.96
剪切变形模量 K/cm	42
比重 G_s	2.677
相对密度 D_r	0.609
不均匀系数 C_u	1.75
孔隙比 e	0.676

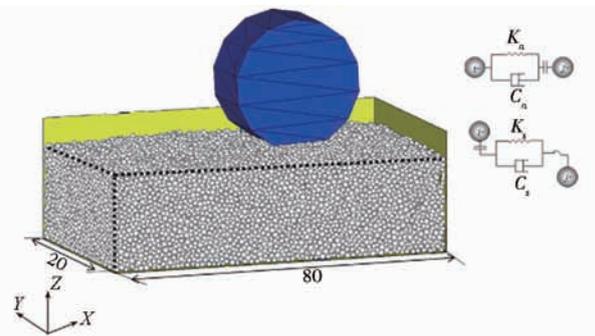


图6 轮壤关系数值计算模型

Fig.6 Numerical calculation model of wheel - soil interaction

表2 模拟土槽中设置参数

Tab.2 Parameters of simulated soil bin

模拟沙土参数	设置值
颗粒密度 $(\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	1.58
刚度 $(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	1×10^7
颗粒比重	2.6
颗粒摩擦因数	0.7
颗粒半径 r/mm	1.25 ~ 1.8
摩擦因数	0.65
重力 $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	9.8
切向临界阻尼比	0.62
法向临界阻尼比	0.84
时间步/s	1.5×10^{-4}
初始孔隙率 e	0.7

下土壤颗粒变化情况,分析不同轮面的下陷机理。从轮下沙土的速度场与力场,可判断出哪一种轮面结构对轮下沙土具有约束流动的效果。同时,可对比不同轮面曲率半径的车轮在相同负载和相同速度下的沉陷量差异。

2 沉陷性能分析

2.1 轮面承压沉陷

轮面承压试验可有效反映车轮在土壤中的下陷及沙土流动情况。图7为6种不同轮面曲率半径的车轮分别在粗径石英砂、细径石英砂和粉尘状火山灰上负载与沉陷量的关系曲线。

由图7a可知,粗径石英砂上不同轮面曲率半径的车轮负载-沉陷量曲线出现锯齿状,这是因粗径石英砂具有明显棱角,流动性差而引起的。其次,对比不同轮面曲率半径的车轮在粗径石英砂中负载与沉陷量关系发现,平面轮的沉陷量相对较小。当负载在0~500N范围内变化时,平面轮的抗沉陷性能最强,凹面R60的沉陷量最大,抗沉陷性能最差。当负载在500~3000N范围内变化时,凹面R60、凹面R80和平面的沉陷量相差较小,抗沉陷性能较好,而凸面R80的沉陷量最大,抗沉陷性能最差。

由图7b可知,细径石英砂上不同轮面曲率半径的车轮负载与沉陷量的关系曲线比粗径石英砂上的平滑且平缓,这不仅说明细径石英砂的流动性比粗径石英砂好,还表明在相同负载下,细径石英砂上同一曲率半径的车轮更易下陷。对比细径石英砂上不同轮面曲率半径的车轮负载与沉陷量关系曲线发现,当负载在0~260N范围内变化时,凸面R120的沉陷量最小,平面轮次之,凹面R60、凹面R80、凹面R120和凸面R80轮面的车轮沉陷量相差较小,抗沉陷性能最差;当负载在260~3000N范围内变化时,平面轮的沉陷量最小,凸面R120次之,凸面R80最大。在流动性好的细径石英砂上,对于同一曲率半径R120的凹凸轮面,凸面车轮的抗沉陷性能要比凹面车轮好,但是对于同一曲率半径R80的凹凸轮

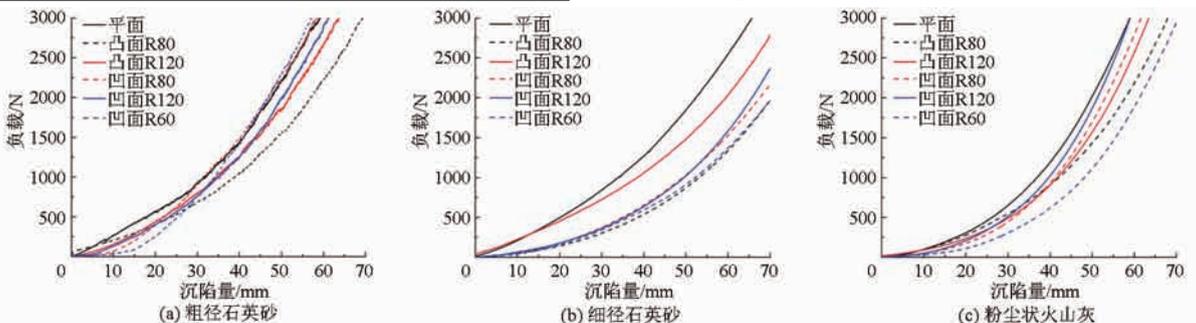


图7 轮面承压试验下载与沉陷量的关系曲线

Fig.7 Relationship curves between load and sinkage of wheel bearing load experiment

面,凹面车轮的抗沉陷性能比凸面轮好。

由图 7c 可知,粉尘状火山灰上不同轮面曲率半径的车轮负载与沉陷量关系曲线比粗径石英砂和细径石英砂的都光滑,这与粉尘状火山灰颗粒粒径极小、可压实性大且流动性小的特性密切相关。对比粉尘状火山灰上不同轮面曲率半径的车轮负载与沉陷量关系曲线发现,当负载在 0 ~ 3 000 N 范围内变化时,平面轮的沉陷量最小,凹面 R60 的沉陷量最大,抗沉陷性能最差。

图 8 为凸面 R80 车轮在轮面承压试验中连续加载时的土壤状态图,图 8a 所示为凸面 R80 车轮在粉尘状火山灰上下陷状态图,发现车轮四周出现明显的裂纹及凹坑。图 8b 所示为凸面 R80 车轮在细径石英砂上下陷状态图,显然与粉尘状火山灰上的情况有所不同,其车轮四周出现小砂堆,即拥土现象。这种现象说明砂状颗粒土壤与粉尘状土壤上的车轮下陷方式不一样,因砂状颗粒的内聚力极小,除了初始砂土孔隙被压实后,车轮下陷均由砂状颗粒从轮下向外流出而形成;粉尘状土壤则不一样,车轮下陷主要是轮上负载对土壤挤压压实引起的。从这种现象可以看出,不同性质的土壤有不同车轮下陷机理,刚性车轮沉陷性能因土壤性质的变化而变化,所以探究不同轮壤界面机理,寻求一种合适轮壤接触界面是提高软松地面上车轮通过性的有效途径。

图 9 为同一轮面曲率半径的车轮分别在粗径石英砂、细径石英砂和粉尘状火山灰上车轮的负载与沉陷量关系曲线,结果表明 6 种不同轮面曲率半径



图 8 凸面 R80 车轮下陷状态图

Fig. 8 Sinkage state of convex surface R80

的车轮均在粗径石英砂上的沉陷较小,抗沉陷性能明显最好,除平面与凸面 R120 轮面车轮外,凹面 R60、凹面 R80、凹面 R120 和凸面 R80 车轮均在粉尘状火山灰上沉陷量最大,抗沉陷性能最差。对于平面车轮,当负载在 0 ~ 1 500 N 范围内变化时,车轮在细径石英砂上的沉陷量小于粉尘状火山灰上的沉陷,表明车轮在细径石英砂上抗沉陷性能优于在粉尘状火山灰上;但当负载继续增大,在 1 500 ~ 3 000 N 范围内变化时,车轮在粉尘状火山灰上的沉陷量小于细径石英砂上的沉陷,表明车轮在细径石英砂上抗沉陷性能比在粉尘状火山灰上差,由此可见,车轮沉陷量的变化不仅与土壤介质本身的性质有关,还与轮上加载情况有关。

2.2 车轮轮面承压数值模拟结果分析

图 10 为车轮模拟状态图,通过横向与纵向力场切片图可以清楚观察不同轮面曲率半径车轮轮下受力情况与沙场的破坏形式及流向。平轮面车轮受力相对比较均匀,负载力在轮下圆弧面均衡分布,同时对车轮两侧的沙场进行剪切破坏,车轮前后的沙场产生挤压破坏。凸轮面车轮受力分布以凸顶点向周

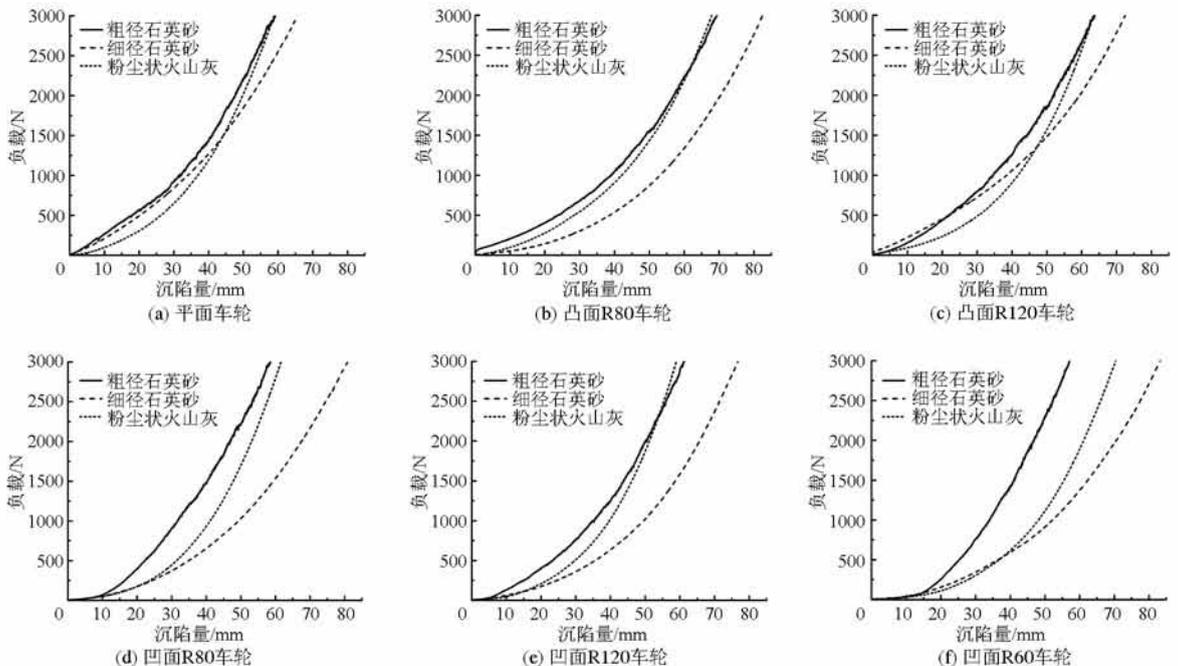


图 9 负载与沉陷量的关系曲线

Fig. 9 Relationship curves between load and sinkage

围逐渐递减,受力最大处为凸顶点,轮下沙场主要产生挤压破坏,颗粒逐渐向车轮四周溢出,两侧面溢出量较大。凹面轮车轮受力主要集中在两凸缘点至中心处;轮下沙场两侧产生剪切破坏,前后产生挤压破坏,大量颗粒从车轮前后溢出。图11为凸面轮与凹面轮的轮下颗粒速度场分布情况,可见在垂直载荷下,由于凸面轮中凸部分先触沙,在中凸部分的挤压下,颗粒逐渐往两侧扩散,进而从轮侧溢出(如

图11a)。而凹面轮中间的直径较小,侧向形成内凹状,可以约束颗粒从侧面流出。但是中低侧凸结构导致轮下颗粒受力不均匀,大量颗粒易从纵向流出(如图11b)。总之,平轮面结构的车轮由于轮下颗粒受力相对均匀,从而轮下颗粒溢出也相对小。从颗粒走向可以看出,颗粒沿轮滚动方向流出量明显大于侧向。这一点可以得出沙地轮使用适当的轮刺不仅可以提高牵引力,而且可以加大抗沉陷性。

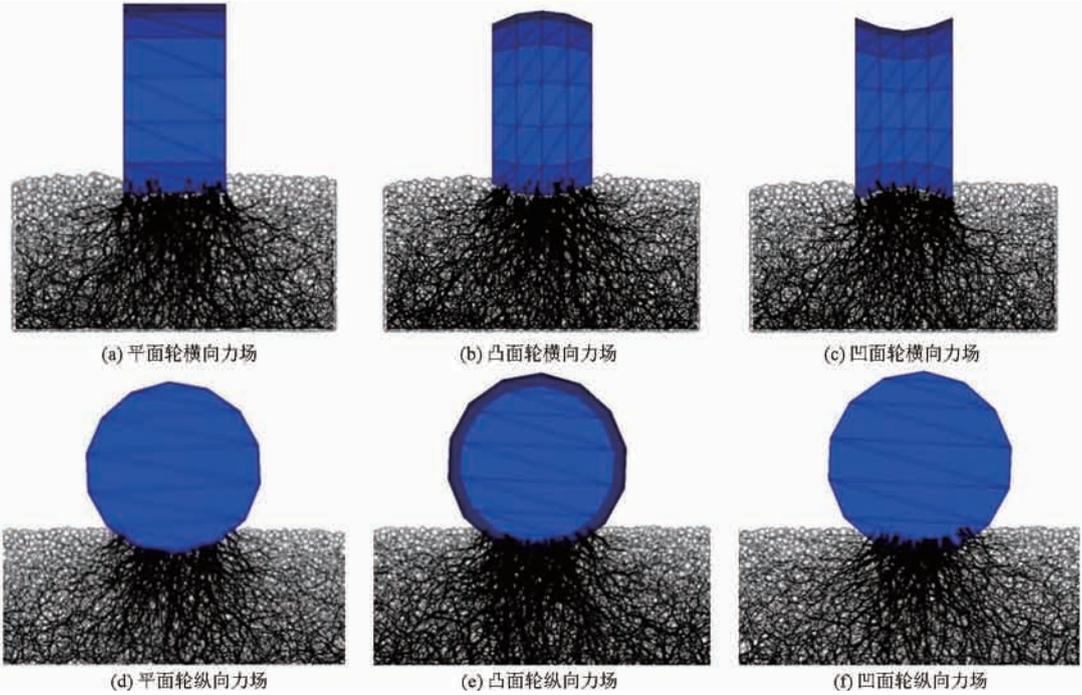


图10 车轮模拟状态图

Fig. 10 Simulation status of wheels

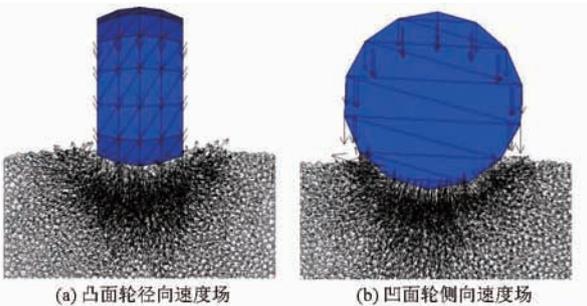


图11 轮下颗粒速度场

Fig. 11 Particle velocity field under wheel

图12为不同轮面结构车轮静态承压仿真的负载与沉陷量关系曲线,可知3种轮面车轮随着负载的增大沉陷量逐渐增加。从仿真曲线可看出,对比不同车轮结构,轮面结构为平面的车轮不论是轻负载还是重负载沉陷量都要小于凹面轮和凸面轮。凹、凸面轮车轮相同负载下沉陷量都相近。试验(如图7b)与仿真结果对比发现,平面轮的负载与沉陷量关系曲线比较接近,在相同负载下,仿真的凹面轮和凸面轮沉陷量比试验要小,这可能是由于仿真中颗粒的参数与实际存在误差造成的。沉陷性能与

车轮的受力方式及沙场流动规律直接相关。由于平轮面车轮受力较为均匀,颗粒流动与溢出量均较小,导致了平面结构车轮在静态沉陷性能方面要优于凹面轮和凸面轮。

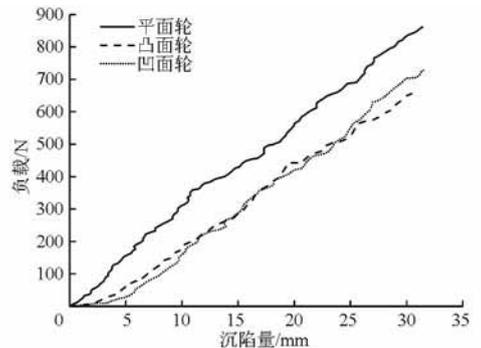


图12 负载与沉陷量关系仿真曲线

Fig. 12 Relationship simulation curves between load and sinkage

2.3 轮辙及沉陷与行走位移关系

从车轮驶过沙面形成不同轮辙以及车轮沉陷量与行走位移的关系来判断各种轮面曲率半径车轮的动态性能。图13为不同轮面曲率半径的车轮分别

在细径石英砂和粉尘状火山灰上的轮辙,可以看出:平轮面车轮驶过沙面对表层沙土破坏性较小,形成的轮辙面积也最小,平稳地驶过沙槽;凹轮面车轮边缘形成锋边对车轮两侧沙土表层接触强度进行破坏,使轮下沙土流动性大,内凹形状使沙土沿行驶方向从轮下流出;凸轮面车轮外凸形状使轮下沙土向外排开,沙土形成凹坑,形成较大的轮辙面积。车轮沉陷量与行走位移的关系曲线如图 14 所示,可知在细径石英砂上行驶时,凹面 R80 车轮在行驶初期

(位移小于 50 cm) 沉陷量最小;行驶到稳定状态后(位移大于 70 cm),凹面 R60 车轮的动态沉陷量最小,平面轮在整个行走位移过程中沉陷量最大,并且运行较短距离就出现无法前进的现象,而凸面 R120 车轮在行驶初期沉陷量很小,并出现不能继续前进的现象,这与凸面 R120 车轮的轮面曲率半径即轮面的弯曲程度相关;在粉尘状火山灰上行驶时,在整个运动范围内,凹面 R60 车轮的沉陷量最小,其次为凹面 R120 车轮,沉陷量最大的为凸面 R80 车轮。

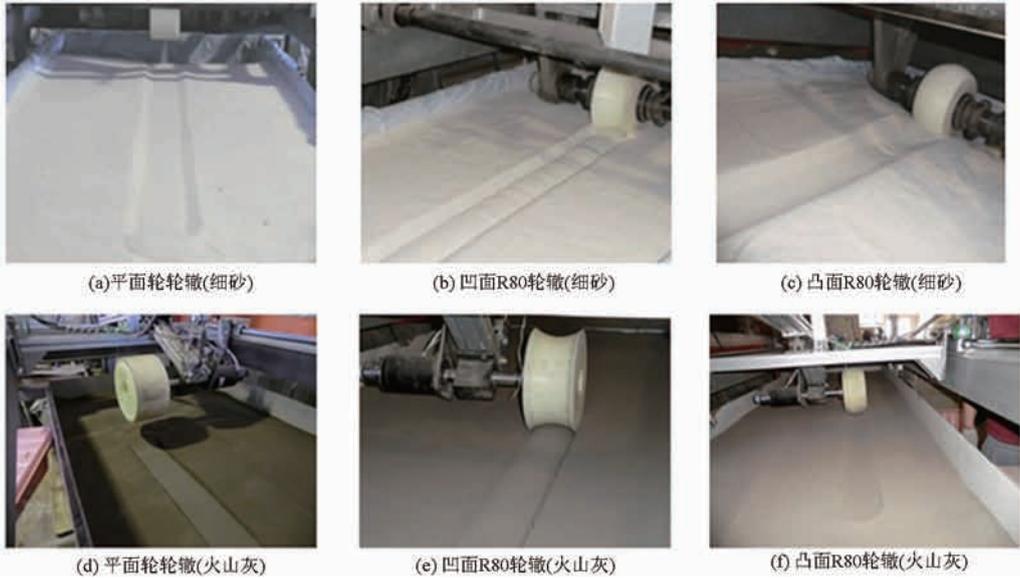


图 13 不同轮面曲率半径的车轮在细径石英砂和粉尘状火山灰上的轮辙图

Fig. 13 Wheel tracks of different surface wheels in fine sand and volcanic ash

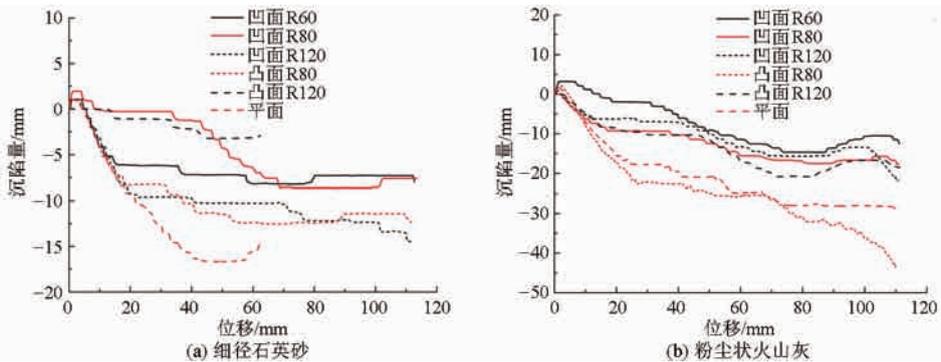


图 14 沉陷量与行走位移关系曲线

Fig. 14 Relationship curves between sinkage and distance

2.4 动态行驶轮下沙土颗粒力场分析

通过 PFC 数值模拟,可从细微角度更加直观地观测轮下土壤颗粒变化情况,分析不同轮面的下陷机理。通过切片的方式,得到不同车轮轮下的横向力场和纵向力场分布情况,如图 15、16 所示。由图 16 可知,车轮在前进过程中,车轮轮下受力部位不是车轮的正下方,而是车轮从正下方到偏前进方向的一个区域,这是由车轮以滑转方式前进时给车轮下方土壤颗粒带来挤压推力造成的。轮面为平轮面车轮时(如图 16a)纵向受力位置从沉

陷最深点到偏前进方向与土壤水平面交叉点为止,均匀受力,结合横向力场(图 15a)可以发现,轮面为平面车轮时在松软地面运行轮下为一个四方平面均匀受力,而受力面积的大小随下陷的深度增加而增大。结合图 15b 与图 16b 发现轮面为凸面的车轮受力位置主要集中在凸起部分,从轮下正下方位置到凸弧面与土壤水平面交叉处这一区域,受力最大处为一条弧线——轮面凸顶弧,从顶弧向两侧依次减小。而相对平面轮与凸面轮,凹面轮(图 15c 与图 16c)受力主要集中在轮缘处,

向中心依次减小,受力面积较小,因为内凹结构导致轮下大量土壤颗粒在车轮前进挤压作用下从车轮前进方向流出很难形成受力区域。从轮下颗粒运动的速度场可以发现,在土槽运行中车轮轮下

颗粒流向与轮面承压模拟时颗粒流向几乎一样。平轮面车轮轮下颗粒溢出较小;凸轮面车轮轮下大量颗粒从车轮两侧流出;而凹轮面车轮大量颗粒从车轮前后两向溢出。

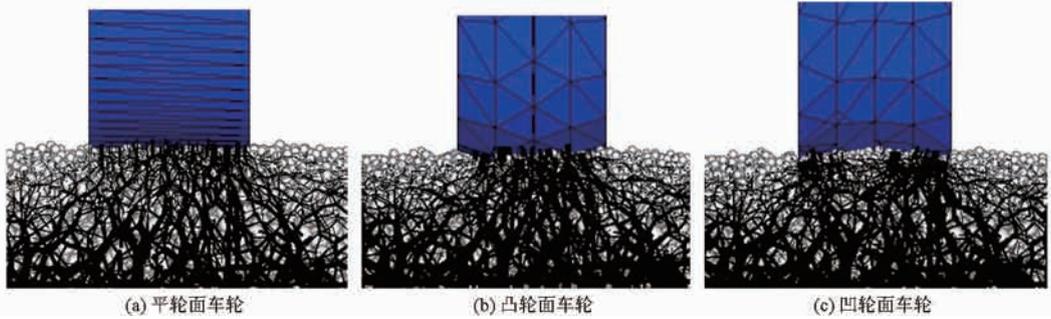


图 15 不同形状车轮横向力场

Fig. 15 Lateral force field of different shaped wheels

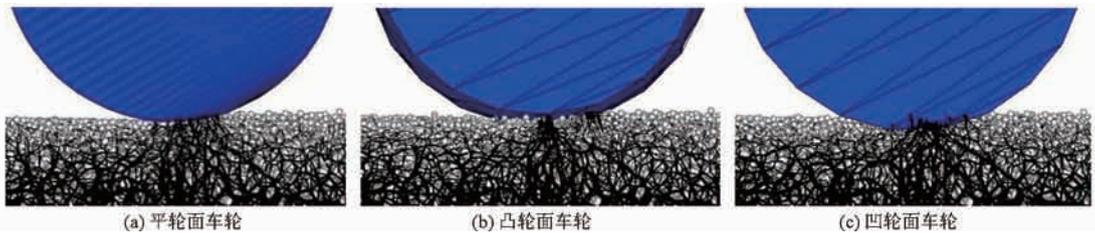


图 16 不同形状车轮纵向力场

Fig. 16 Longitudinal force field of different shaped wheels

3 结论

(1)通过改变轮面曲率半径单一因素,设计6种具有代表性的车轮轮面,分别是不同曲率半径的凹面、凸面和平面。对不同曲率半径的轮面在3种不同土壤上进行轮面承压试验、台架动态试验和离散元数值模拟。

(2)轮面承压试验结果表明,在粗径石英砂上,平面轮的沉陷量相对较小。在细径石英砂上,当负载在0~260 N范围内变化时,凸面R120的沉陷量最小,平面轮次之,当负载在260~3 000 N范围内变化时,平面轮的沉陷量最小,抗沉陷性能最好。在粉尘状火山灰上,平轮面车轮抗沉陷性要好于凹、凸轮面车轮。因此,在沙土介质承压试验中,尤其在细径石英砂和粉尘状火山灰上,平面轮的抗沉陷性能最好。与其他沙土介质相比,在粗径石英砂上所有轮面的车轮的沉陷量最小,凹面R60、凹面R80、凹面R120和凸面R80车轮均在粉尘状火山灰中沉陷量最大。轮面承压模拟结果表明,平面轮下沙土颗粒的力场分布均匀,轮下颗粒溢出量小,有效说明平面轮沉陷量最小的原理。

(3)台架试验结果表明,细径石英砂上行驶时,凹面R80车轮在行驶初期(位移小于50 cm)沉陷量

最小;行驶到稳定状态后(位移大于70 cm),凹面R60车轮的动态沉陷量最小,平面轮在整个行走位移过程中沉陷量最大,并且运行较短距离就出现不能继续前进的现象,而凸面R120车轮在行驶初期沉陷量很小且出现不能继续前进的现象;在粉尘状火山灰上行驶时,在整个运动范围内,凹面R60车轮的沉陷量最小,其次为凹面R120车轮,沉陷量最大的为凸面R80车轮。因此,在细径石英砂和粉尘状火山灰上行驶的过程中,轮面曲率半径较大的凹面轮的抗沉陷性能较好。此外,由细径石英砂动态离散元模拟可知,凹面轮的受力区域集中轮面两侧,轮面内凹结构可有效防止沙土侧向流动并减小了对沙土的扰动。上述研究结论为不同轮面曲率半径的车轮在不同土壤介质上的沉陷性能判断提供了参考依据。

(4)本文研究刚性轮曲率变化对其沉陷影响,基于当前深空探测车轮主要以刚性车轮为主,因此主要针对面向深空探测刚性轮面结构的优化。另外,沙漠轮胎通过适当降低轮胎充气压力产生弹性形变,使得土壤滚动阻力增大,轮胎下陷量减小,改变轮面曲率来增大接地面积,从而提高其抗沉陷和牵引性能,本文研究可为具有高通过性能沙漠轮胎轮面设计提供一定理论依据。

参 考 文 献

- 1 李发明, 张莹花, 贺访印, 等. 沙产业的发展历程和前景分析[J]. 中国沙漠, 2012, 32(6): 1765 - 1772.
LI Faming, ZHANG Yinghua, HE Fangyin, et al. Development process and prospect of deserticulture [J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(6): 1765 - 1772. (in Chinese)
- 2 刘聚德, 詹宏斌, 李仍, 等. 表层沙强度特性的试验研究[J]. 吉林大学学报: 工学版, 1991, 21(4): 34 - 40.
LIU Jvde, ZHAN Hongbin, LI Reng, et al. The test of surface sand strength characteristics [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 1991, 21(4): 34 - 40. (in Chinese)
- 3 樊慧文, 季学武, 赵六奇. 沙漠车在塔克拉玛干沙漠牵引通过性能的试验研究[J]. 汽车技术, 1997(8): 26 - 30.
FAN Huiwen, JI Xuewu, ZHAO Liuqi. The experimental study of the traction performance of desert vehicle on the taklamakan desert desert [J]. Automobile Technology, 1997(8): 26 - 30. (in Chinese)
- 4 陈崇. 开发重型沙漠车势在必行[J]. 重型汽车, 1996(3): 14 - 15.
CHEN S. The development of heavy desert car is imperative [J]. Heavy Vehicles, 1996(3): 14 - 15. (in Chinese)
- 5 赵志国. WTC5120TSM 型工程车辆沙漠通过能力的研究[J]. 拖拉机与农用运输车, 2007, 34(4): 25 - 28.
ZHAO Zhiguo. Study on trafficability of WTC5120TSM desert vehicle [J]. Tractor and Farm Transporter, 2007, 34(4): 25 - 28. (in Chinese)
- 6 叶培建, 彭兢. 深空探测与我国深空探测展望[J]. 中国工程科学, 2006, 8(10): 13 - 18.
YE Peijian, PENG Jing. Deep space exploration and its prospect in China [J]. Engineering Science, 2006, 8(10): 13 - 18. (in Chinese)
- 7 孙刚, 高峰, 李雯. 地面力学及其在行星探测研究中的应用[J]. 力学进展, 2007, 37(3): 453 - 464.
SUN Gang, GAO Feng, LI Wen. Terramechanics and its application in planetary exploration [J]. Advances in Mechanics, 2007, 37(3): 453 - 464. (in Chinese)
- 8 中国航天编辑部. 勇气号被改为静止科研平台[J]. 中国航天, 2010(3): 36.
- 9 刘声远. 别了, 勇气号[J]. 大自然探索, 2011(9): 20 - 31.
- 10 飞行器测控学报编辑部. “机遇”号漫游器陷入松软的火星土壤中[J]. 飞行器测控学报, 2009, 28(6): 42.
- 11 刘聚德. 车辆沙地行驶理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996: 7 - 13.
- 12 陈秉聪. 土壤-车辆系统力学[M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1981: 20 - 25.
- 13 陈秉聪. 拖拉机刚性轮在松软土壤上滚动时的滚动阻力和附着力(一)[J]. 长春汽车拖拉机学院院报, 1958(1): 115 - 129.
CHEN Bingcong. The rolling friction and adhesion of the steel-rim tractor wheel when it rolls on the soft soil [J]. Journal of Changchun Automobile and Tractor College, 1958(1): 115 - 129. (in Chinese)
- 14 李建桥, 黄晗, 王颖, 等. 松软地面机器系统研究进展[J]. 农业机械学报, 2015, 46(5): 130 - 145.
LI Jianqiao, HUANG Han, WANG Ying, et al. Development on research of soft terrain machine systems [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5): 130 - 145. (in Chinese)
- 15 付宜利, 徐贺, 王树国, 等. 沙地环境移动机器人驱动轮的发展概况综述[J]. 机器人技术与应用, 2004(4): 23 - 29.
- 16 金大玮, 李建桥, 党兆龙, 等. 滑转条件下月球车轮沉陷模型研究[J]. 航空学报, 2013, 34(5): 1215 - 1221.
JIN Dawei, LI Jianqiao, DANG Zhaolong, et al. Study on model for sinkage of lunar rover wheel under slip [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(5): 1215 - 1221. (in Chinese)
- 17 左艳蕊, 宗志坚, 刘忠途, 等. 基于多体接触碰撞的松软地面车轮沉陷仿真[J]. 农业机械学报, 2009, 40(10): 33 - 38, 23.
ZUO Yanrui, ZONG Zhijian, LIU Zhongtu, et al. Numerical simulation of wheel sinkage on soft terrain based on multibody contact problem [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(10): 33 - 38, 23. (in Chinese)
- 18 李建桥, 黄晗, 党兆龙, 等. 轻载荷条件下的筛网轮沉陷[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2015, 45(1): 167 - 173.
LI Jianqiao, HUANG Han, DANG Zhaolong, et al. Sinkage of wire mesh wheel under light load [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2015, 45(1): 167 - 173. (in Chinese)
- 19 ASNANI V, DELAP D, CREAGER C. The development of wheels for the Lunar roving vehicle [J]. Journal of Terramechanics, 2009, 46(3): 89 - 103.
- 20 JIDE Z, ZHIXING W, JUDE L. The ways to improve the trafficability of vehicles on sand [C] // ISTVS 5th European Conference, 1991: 121 - 126.
- 21 MURO T. Tractive performance of a driven rigid wheel on soft ground based on the analysis of soil-wheel interaction [J]. Journal of Terramechanics, 1993, 30(5): 351 - 369.
- 22 WONG J Y, REECE A R. Prediction of rigid wheel performance based on the analysis of soil-wheel stresses part I. Performance of driven rigid wheels [J]. Journal of Terramechanics, 1967, 4(1): 81 - 98.
- 23 陈雯. 沙地车轮牵引通过性分析[J]. 拖拉机与农用运输车, 2008, 35(3): 22 - 23, 25.
- 24 张锐, 罗刚, 薛书亮, 等. 沙地刚性轮构型仿生设计及牵引性能数值分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 122 - 128.
ZHANG Rui, LUO Gang, XUE Shuliang, et al. Bionic design of configuration of rigid wheel moving on sand and numerical analysis on its traction performance [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(3): 122 - 128. (in Chinese)
- 25 刘聚德. 车辆沙地通过性研究中几个关键问题的探讨[J]. 汽车工程, 1996, 18(2): 103 - 107, 76.
- 26 JUNYA Yamakawa, MASHASHI Akahane. 1118 development of a wheel to reduce sinkage on soft ground [C] // The Transportation and Logistics, Conference, The Japan Society of Mechanical Engineers, 2011: 101 - 104.
- 27 李杰, 季学武, 庄继德, 等. 新疆塔克拉玛干沙漠沙土基本力学特性的试验研究[J]. 汽车技术, 1996(9): 12 - 22.