

仿生条纹结构表面推沙板构建及磨损性能研究

郑明军¹, 苗佳峰¹, 吴文江², 王再宙³

(1. 石家庄铁道大学 机械工程学院, 河北 石家庄 050043; 2. 石家庄铁道大学 教务处, 河北 石家庄 050043;
3. 河北师范大学 职业技术学院, 河北 石家庄 050024)

摘要:为了降低轨道除沙车推沙装置在推沙过程中的磨损量,运用仿生学,以穿山甲体表鳞片的纹路为设计基础,建立仿生条纹几何结构推沙板。利用离散元素法分析仿生推沙板与沙粒的相互作用,从定性和定量 2 个方面分析推沙板的磨损情况。研究表明,相同条件下推沙角度越小,仿生推沙板的耐磨机理越明显,耐磨性能越优于普通推沙板。分析推沙板的表面磨损因素发现条纹高度为 4 mm 和 6 mm,条纹间距为 24 mm 时,耐磨性最优。在平面推沙板的基础上添加条纹结构对提高轨道除沙车推沙装置的耐磨性有一定的指导意义。

关键词:除沙车;推沙板;仿生结构设计;磨损分析;离散元

中图分类号:TH164 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2022)02-0081-06

0 引言

随着中国铁路不断向西部推进,铁路维护的成本逐渐增加,而中国西北地区沙害情况比较严重,这些风沙地区铺设的铁道线路经常受到风沙的影响,会对铁路运输、旅客安全造成一定的影响。通常情况下,清理轨道上积沙的方式靠人工清理,这种方式弊端明显,除沙效率低。为解决沙害对铁路的危害,郑明军等^[1-2]研制出一台灵活性较好的轨道除沙车,很好地解决了这一问题。随着轨道除沙车的不断改进,新一代除沙车灵活、机动性强,性能更加优越。其中,新一代轨道除沙车的推沙装置,主要清理轨道两侧的集沙,推沙板作为推沙装置的核心部件,长时间与沙粒接触摩擦,势必造成推沙板有一定的磨损,所以推沙板还需要进一步提高耐磨性。

近年来,越来越多的学者投入到仿生学领域,仿生学在机械领域发挥的作用越来越大,例如将仿生学应用在机械结构上,并且有大量的研究成果应用到实际生产当中。李建桥等^[3]根据臭蜥蜴头部唇基表面的凸起设计出一款仿生犁壁,试验表明仿生犁壁减阻率为 6.6%~12.7%;Gorb et al^[4]利用动物爪趾脚垫钢毛分割与地面的家畜面积来提高附着力,设计并研制出一款高附着性能的仿生装置;马云海等^[5]研究穿山甲的鳞片纹路,并进行磨料磨损试验,结果发现磨料平行于鳞片表面运动时耐磨性更好。还有许多学者将扇贝、动物鳞片^[6-7]作为仿生对象,设计出具有耐磨性的机械结构^[8-9],这些仿生结构具有重要的实践意义。本次研究将借鉴某些动物优秀自身结构,设计出仿生耐磨型推沙板,通过离散元分析来验证仿生推沙板的耐磨性能^[10]。

1 建立仿生推沙板模型

1.1 仿生对象选取

自然界中,很多生物拥有适应其生活环境的一些特性。像扇贝、穿山甲鳞片、沙蜥鳞片和蜥蜴的头部唇基表面等,如图 1 所示,这些表面几何结构的耐磨性经过进化后有了显著提高,所以观察这些表面几何

收稿日期:2022-03-15 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.20220048

基金项目:河北省自然科学基金(E2017210166);河北省教育厅科研项目(ZD2020320)

作者简介:郑明军(1971—),男,教授,研究方向为机械设计研究。E-mail: lqy080513@163.com

郑明军,苗佳峰,吴文江,等. 仿生条纹结构表面推沙板构建及磨损性能研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版),2022,35(2):81-86.

结构,可以设计出满足研究需求的几何结构。

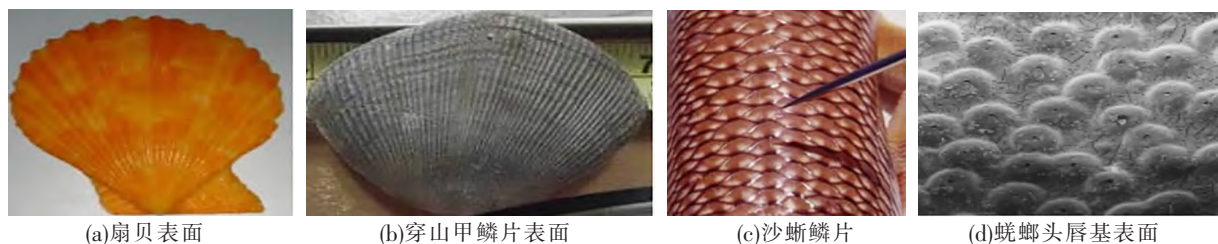


图 1 具有耐磨性的几何结构

1.2 仿生推沙板建模

以穿山甲鳞片的纹路为主,利用逆向工程^[11-12]提取鳞片纹路的几何结构,在相似原理基础上,仿生对象的鳞片纹路与函数 $y=3\sin(\pi x/12)$ 十分吻合,结合推沙板整个触沙面和推沙要求,考虑加工效率、经济效益等方面,将仿生推沙板条纹曲线的波谷进行填充拉伸,只保留波峰部分如图 2(a)所示,最终仿生推沙板结构设计为:单体条纹长度为 350 mm、宽为 24 mm、高为 6 mm。条纹方向与沙粒运动方向相互垂直,每个条纹间距为 24 mm,共分布 5 个条纹。依据平面推沙板结构如图 2(b)所示,考虑到仿真时间和对称原理,将仿真推沙板模型宽度 B 减半为 350 mm,高度 H 为 400 mm,厚度 T 为 12 mm,板尖角度 α 为 36.5° ,建立耐磨推沙板模型和普通推沙板三维模型如图 2(c)、图 2(d)所示。

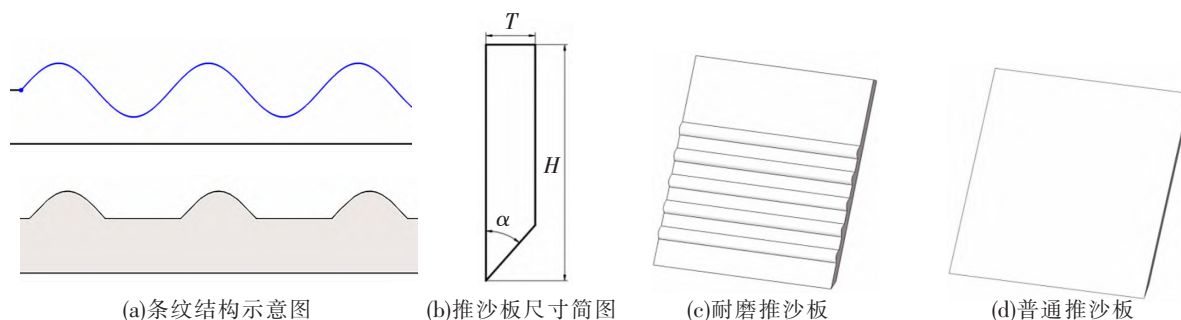


图 2 2 种推沙板模型

2 颗粒接触模型

基于 Hertz-Mindlin (No Slip) 接触模型,添加 Hertz-Mindlin with Archard Wear 和 Record Relative Wear 接触模型,这就是离散元仿真中的磨损接触模型。其中 Archard Wear 接触模型是定量分析部件磨损深度,而 Relative Wear 接触模型是定性分析部件接收的能量。

2.1 Hertz-Mindlin with Archard Wear 接触模型

此接触模型基于 Archard^[13] 的磨损理论而来的,Archard Wear 接触模型是对 h_m 接触模型进行了一个扩展,可以近似给出部件在磨料磨损下的深度。Hertz-Mindlin with Archard Wear 接触模型的磨损表达式

$$Q = W F_n d_t \quad (1)$$

式中, Q 为部件被磨料磨损的体积; W 为部件与磨料间的磨损常数; F_n 为部件受到的切向力; d_t 为磨料在部件表面做的切向距离。

$$W = K/H \quad (2)$$

式中, K 为无量纲磨损系数; H 为部件的硬度,在离散元仿真中设置的磨损系数为 5.049×10^{-13} 。

2.2 Hertz-Mindlin Record Relative Wear 接触模型

Relative Wear 接触模型的理论基础是磨料与部件表面之间的相对速度和作用力,它能准确分析出部件受到磨损的部位,但分析不出磨损速率的确切值。在离散元仿真中,法向接触能量、切向接触能量、法向接触力和切向接触力是衡量部件的磨损程度标准。

用这 2 种接触模型进行仿真分析,从定性和定量 2 方面研究推沙板的磨损情况。

3 离散元仿真结果分析

3.1 推沙板的网格划分

若直接将模型导入 EDEM 中,则结果会出现如图 3 所示的情况,这是由于 EDEM 自动画的网格过于粗糙,所以还需要重新划分网格。利用 EDEM 自身的修改网格功能对推沙板模型进行重新划分网格,划分的网格尺寸为 2 mm,结果如图 4 所示。重新划分网格后推沙板的吸收能量局部分布图如 5 所示,从图 5 可以看出重新划分网格后的磨损分布更加精细准确。初步预测推沙板 2 个板尖处的磨损最为严重,然后向板内逐渐扩散。

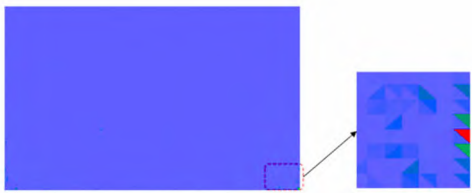
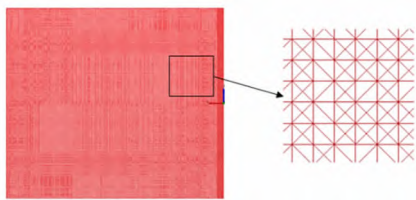
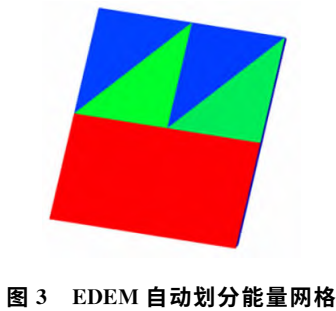


图 4 修改后的网格划分

图 5 重新划分网格后的能量网格

3.2 仿生推沙板与平面推沙板的仿真结果对比

仿真过程中,推沙板与沙粒筒的能量接触是以推沙板上单元的相对位移与接触力确定的,这些接触能量分为 2 部分,分别为累积法向接触能量和累积切向接触能量,推沙板的磨损主要是这 2 种能量共同造成的。此外还有推沙板的磨损深度也进一步反映出其磨损情况。

平面推沙板的推沙仿真过程如图 6 所示。同样的方法来仿真耐磨型仿生推沙板,在两者的推沙角度均为 90°时,仿真结果如表 1 所示。

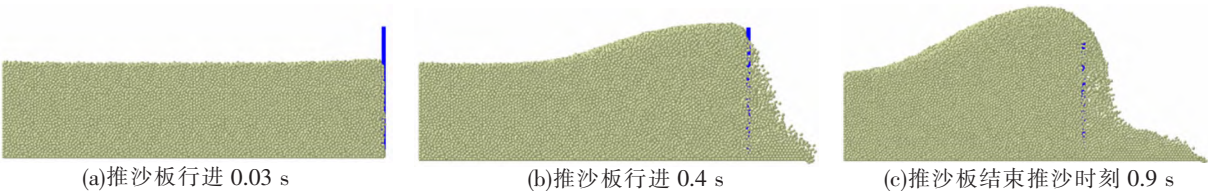


图 6 平面推沙板的推沙过程

表 1 推沙角度为 90°的仿真结果

推沙板类型	磨损深度/mm	法向累计能量/J	切向累计能量/J
仿生推沙板	$7.412\ 3\times10^{-4}$	0.085 93	0.922 6
平面推沙板	$7.415\ 7\times10^{-4}$	0.086 07	0.932 8

从表 1 中可看出,在推沙角度为 90°时,2 种推沙板的磨损深度和累计接触能量无明显差别,这是由于当推沙角度为 90°时,2 种推沙板磨损机理基本一样,但改变推沙角度分别为 75°、60°和 45°,2 种推沙板的磨损评判标准结果分别如表 2、表 3、表 4 所示。

表 2 不同推沙角度情况下的磨损深度

推沙板类型	磨损深度/mm		
	75°	60°	45°
仿生推沙板	$1.246\ 2\times10^{-4}$	$6.291\ 7\times10^{-5}$	$7.146\ 7\times10^{-6}$
平面推沙板	$1.147\ 3\times10^{-4}$	$1.099\ 9\times10^{-4}$	$2.456\ 2\times10^{-5}$

表 3 不同推沙角度情况下的法向累计接触能量

推沙板类型	法向累计接触能量/J		
	75°	60°	45°
仿生推沙板	0.0132 0	0.006 614 8	0.001 578 3
平面推沙板	0.0145 3	0.009 835 0	0.015 493 0

表 4 不同推沙角度情况下的切向累计接触能量

推沙板类型	切向累计接触能量/J		
	75°	60°	45°
仿生推沙板	0.151 67	0.066 842	0.007 543
平面推沙板	0.160 45	0.085 240	0.017 821

从表 2~表 4 可以看出,推沙板推沙角度越小,2 种推沙板的磨损深度、法向累计能量和切向累计能量也越小,耐磨性提高,并且仿生耐磨性推沙板的耐磨优势体现的越加明显,从推沙板的磨损深度就可以很直观地看出来。但有一点需要注意的是,无论推沙板的推沙角度如何变化,不管是仿生推沙板还是平面推沙板,其切向累计接触能量都要大于法向累计接触能量,这说明推沙板在推沙过程中,沙粒对推沙板的滑移摩擦力最大。

3.3 仿生推沙板的耐磨机理

这种添加条纹后的推沙板耐磨机理是:推沙板向前推沙过程中,沙粒冲向推沙板表面,当一些沙粒以某一角度运动到 A 点时(见图 7),沙粒会以同样的角度反弹出去,反弹的沙粒会与后续沙粒在 B 点发生干涉,动能会损失一部分,碰撞后颗粒的运动方向为两者碰撞后的速度合方向,落向条纹后端,动能损失会降低对推沙板的磨损。当在 2 个条纹间有沙粒发生干涉时,沙粒运动到 C 点反弹,与后继来的颗粒发生和 B 点相同的干涉,沙粒在 D 点反弹后与后继来的颗粒发生干涉,而后续的颗粒动能要大于沙粒在 D 点反弹后的动能,所以沙粒在 E 点发生的碰撞最终落点会以合矢量方向落到磨损表面后面,不会对表面发生二次磨损,这也是推沙板上条纹的前端磨损较为严重的原因。

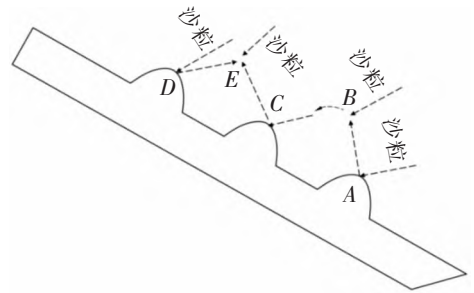


图 7 沙粒在仿生推沙板表面的运动矢量简图

4 仿生推沙板的磨损因素分析

4.1 条纹高度不同对推沙板的磨损影响

改变拟合方程振幅来改变推沙板条纹高度,取条纹高度分别为 4、5、6、7、8 mm 这 5 种,在推沙角度为 60°、推沙深度为 240 mm、推沙速度为 0.5 m/s 进行仿真,磨损深度、法向累计接触能量和切向累计接触能量的仿真结果如图 8 所示。

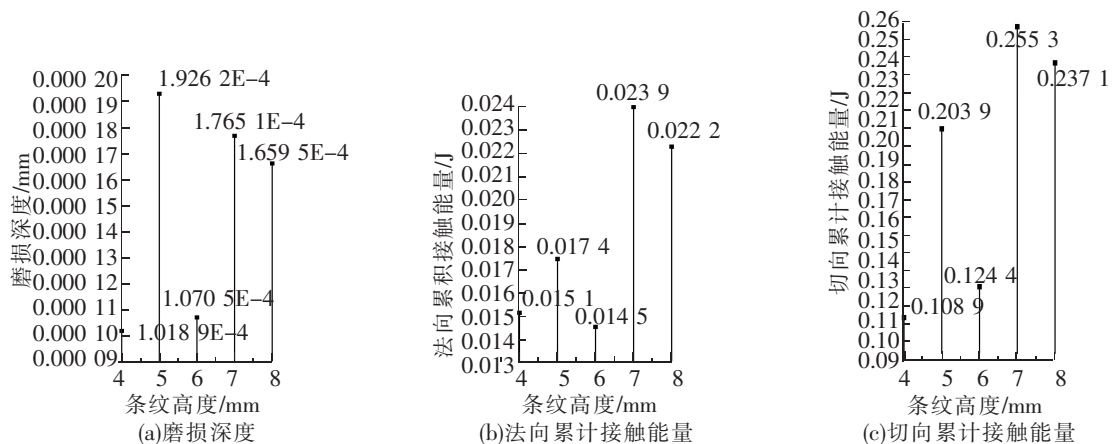


图 8 不同条纹高度推沙板的磨损情况柱状图

从图 8 可看出,条纹高度过高时,推沙板的磨损情况不如条纹高度低的,但条纹高度为 5 mm 时,推沙板的磨损深度是这 5 种条纹高度中最大的。综合考虑,条纹高度为 4 mm 或 6 mm,推沙板的磨损情况最

为理想。

4.2 条纹间距不同对推沙板的磨损影响

以推沙板条纹间距 16、20、24 mm 分别进行离散元仿真分析,其他设置不变,得出磨损深度、法向累计接触能量和切向累计接触能量的仿真结果如图 9 所示。

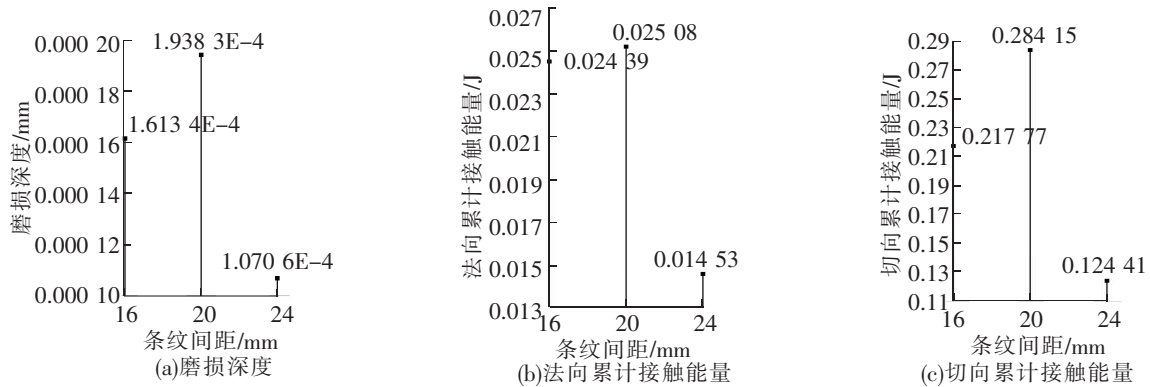


图9 不同条纹间距推沙板的磨损情况

从图 9 可看出,当条纹间距由 16 mm 改为 20 mm 时,推沙板的 3 种评判磨损情况的指标均增加,从 20 mm 增加至 24 mm 时,3 种评判指标均下降。推沙板条纹间距为 24 mm 时,推沙板的耐磨性最优,也可做为耐磨推沙板的指导方案。

4.3 推沙速度不同对推沙板的磨损影响

将推沙速度分别设置为 0.5、0.7、0.9 m/s,其他推沙设置均不改变,进行离散元仿真分析,推沙板的磨损深度、法向累计接触能量和切向累计接触能量结果如图 10 所示。

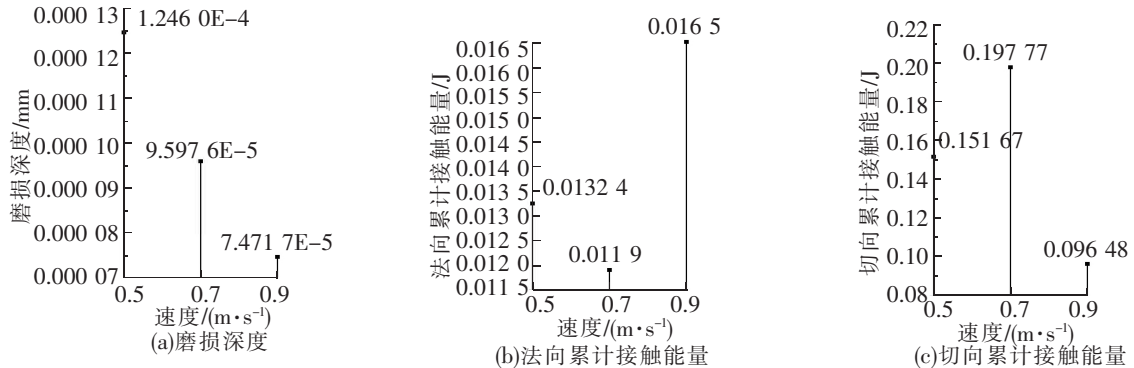


图10 不同推沙速度推沙板的磨损情况

从图 10 可看出,随着推沙速度的变化,推沙板受沙粒作用下推沙板表面磨损衡量标准的变化趋势差异较大。速度增加,推沙板的磨损深度呈递减趋势,推沙板的法向累积接触能量先降低再上升,推沙板的切向累积接触能量先上升再降低。

总结以上分析,当条纹高度为 4 mm 或 6 mm、条纹间距为 24 mm 和推沙速度越高时,耐磨推沙板的耐磨性越好,对于提高除沙车推沙装置的耐磨性有一定的指导意义。

5 结论

(1)根据仿生学原理,某些生物结构具有耐磨性,将这些特殊的生物结构作为仿生对象,设计出的条纹型仿生推沙板具有可行性。

(2)通过对比条纹型仿生推沙板与平面推沙板的磨损深度、法向累计接触能量和切向累计接触能量,仿真结果表明,推沙角度越小,仿生推沙板的耐磨性越优于平面推沙板。

(3)分析出耐磨推沙板的条纹高度为 4 mm 和 6 mm,条纹间距为 24 mm 时,耐磨性较为优秀,随着沙板推沙速度的增加,推沙板的磨损深度呈下降趋势。

参 考 文 献

- [1] 郑明军, 杨摄, 吴文江, 等. 铁路轨道除沙车抛沙板参数优化[J]. 工程设计学报, 2020, 27(1): 87-93.
- [2] 郑明军, 胡庆江, 吴文江. 铁路轨道除沙车除沙装置的离散元仿真分析与试验[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2019, 32(4): 35-39.
- [3] 李建桥, 任露泉, 刘朝宗, 等. 减粘降阻仿生犁壁的研究[J]. 农业机械学报, 1996(2): 2-5.
- [4] Gorb S N, Peressadko A, Spolenak R, et al. Biological hairy attachment devices as a prototype for artificial adhesive systems[C]// First international industrial conference bionik. Düsseldorf: VDI Verlag, 2004: 237-242.
- [5] 马云海, 佟金, 周江, 等. 穿山甲鳞片表面的几何形态特征及其性能[J]. 电子显微学报, 2008, 27(4): 336-340.
- [6] Tong J, Ma Y, Chen D, et al. Effects of vascular fiber content on abrasive wear of bamboo[J]. Wear, 2005, 259(1): 78-83.
- [7] 佟金, 荣宝军, 马云海, 等. 仿生棱纹几何结构表面的土壤磨料磨损[J]. 摩擦学学报, 2008, 28(3): 193-197.
- [8] 佟金, 马云海, 任露泉. 天然生物材料及其摩擦学[J]. 摩擦学学报, 2001, 21(4): 315-320.
- [9] Tong Jin, Wang Hengkun, Ma Yunhai, et al. Two-body abrasive wear of the outside shell surfaces of mollusc lamprotula fibrosa heude, rapana venosa valenciennes and dosinia anus philippi[J]. Tribology Letters, 2005, 19(4): 331-338.
- [10] 曾智伟, 马旭, 曹秀龙, 等. 离散元法在农业工程研究中的应用现状和展望[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 1-20.
- [11] 吴钧. 逆向工程和 3D 打印技术在工业设计中的应用分析[J]. 中国设备工程, 2021(5): 217-218.
- [12] 金涛, 陈建良, 童水光. 逆向工程技术研究进展[J]. 中国机械工程, 2002(16): 86-92.
- [13] Archard J F. Contact and rubbing of flat surfaces[J]. Journal of Applied Physics, 1953, 24(8): 981-988.

Construction and Wear Performance of Bio-Mimetic Striped Structure of Surface Push Sand Plate

Zheng Mingjun¹, Miao Jiafeng¹, Wu Wenjiang², Wang Zaizhou³

(1. School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. Office of Academic Affairs, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

3. School of Vocational Technology, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China)

Abstract: In order to reduce the amount of wear of the sand removal truck sand pushing device in the process of sand pushing, biomimicry was used to establish a bionic stripe geometry sand pushing board based on the pattern of the pangolin body scales. Using the discrete element method to analyze the interaction between the bionic sand pushing board and the sand grain, and analyzing the wear of the sand pushing board from both qualitative and quantitative aspects, the study shows that the smaller the sand pushing angle under the same conditions, the more obvious the wear mechanism of the bionic sand push plate is reflected, and the wear resistance is better than that of the ordinary sand push board. The surface wear factors of the sand pushing board are analyzed and the wear resistance is optimal when the stripe height is 4 mm and 6 mm, and the stripe spacing is 24 mm. Adding a striped structure on the basis of a flat sand push board has certain guiding significance for improving the wear resistance of the sand removal truck sand pushing device of the track sand removal truck.

Key words: sand removal truck; push sand plate; bio-mimetic structure design; wear analysis; discrete element