

仿生耦合功能表面应力-应变本构关系

钱志辉,任露泉,田丽梅,孙少明

(吉林大学 地面机械仿生技术教育部重点实验室,长春 130022)

摘要:采用试验优化设计方法对相同试验条件下凹坑形仿生光滑试样以及具有仿生耦合表面的非光滑试样进行了干摩擦磨损试验对比研究。在相同试验条件下,凹坑形仿生非光滑试样磨损率小于光滑试样,即前者耐磨性较高。在此基础上,作者进行了受压状态下试样表面应力的试验测试和 ANSYS 有限元计算分析,探讨了非光滑凹坑对试样表面应力-应变分布的影响。结果表明:在受力状态下,仿生非光滑凹坑改善了试样表面的应力分布,使非光滑试样表面凹坑间的区域局部应力明显小于光滑试样表面的应力,即产生了局部低应力区。本文初步提出了非光滑结构的力矩效应和应力缓释效应。

关键词:工程仿生学;耦合;非光滑;试验优化设计;有限元计算;凹坑;应力

中图分类号:TB17 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5497(2008)05-1105-05

Stress-strain constitutive relationship for bionic coupling functional surface

QIAN Zhi-hui, REN Lu-quan, TIAN Li-mei, SUN Shao-ming

(Key Laboratory for Terrain-Machine Bionics Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: The comparative experiments on the abrasion under unlubricated friction condition between the samples with smooth and coupling non-smooth surfaces were performed by help of the experimental optimum design. It was found that the wear rate of the samples with the concave non-smooth surface is less than those with the smooth surface under the other same experimental conditions, i. e. the wearing resistance of the former is better than the latter. In order to discuss the effect of the non-smooth concave on the stress-strain distributions on the sample surface, the sample stresses in the samples were measured at the compression condition, and analyzed by the finite element method using the software ANSYS. The results show that the concave structure ameliorates the surface stress distribution of the non-smooth sample, makes the local stress between concaves less apparently than that of the smooth sample, that means the local low stress areas are formed on the non-smooth surface. Moreover, the torque effect and low stress release effect of the non-smooth structure were proposed preliminarily.

Key words: engineering bionics; coupling; non-smoothness; experimental optimum design; finite element analysis; concave; stress

收稿日期:2007-08-20.

基金项目:国家自然科学基金重点项目(50635030).

作者简介:钱志辉(1981-),男,博士研究生.研究方向:仿生科学与工程. E-mail: zhihui.qian@163.com

通信作者:任露泉(1944-),男,教授,博士生导师,中国科学院院士.研究方向:仿生科学与工程.

E-mail: lqren@jlu.edu.cn

生物经过亿万年的进化,形成了许多卓有成效的导航、识别、计算、合成与分解和能量转换等近乎完美的生命体系^[1]。仿生学正是要学习和模仿生物的优良特性和功能,为工程界解决技术难题提供新思路和新方法^[2-3]。吉林大学地面机械仿生技术教育部重点实验室在多年系统研究蛻螂、蚯蚓、穿山甲等大量土壤动物脱附减阻机理的基础上,进一步发现这些动物虽然长期穿梭和出入于砂石或土壤中,但体表却不发生损伤^[4],据此提出了生物非光滑耐磨效应。该实验室的研究人员结合工程实际需求,发明了仿生非光滑耐磨技术。本文即是在实验室前期研究的基础上,设计了 4 种凹坑形仿生非光滑试样,在干摩擦条件下与光滑试样进行了耐磨性对比分析。同时,用模型试验结合计算机有限元模拟的方法探讨了该试样受力状态下凹坑对其表面应力分布的影响。

1 耐磨性比较试验

1.1 试验条件

试验设备采用吉林大学机电设备研究所研发的 JF150D-II 型定速式摩擦试验机。该试验机摩擦盘半径为 150 mm,材质为 HT250,硬度为 HB180-320 珠光体组织,转速为 450~550 r/min。试样材料为铝合金,型号为 LY12,尺寸为 25 mm×25 mm×12 mm,凹坑深 5 mm。经过预试验,确定摩擦试验机的加载载荷为 375 N,摩擦盘转数选择 500 转,温度为 25 ℃,整个摩擦试验过程无润滑。

1.2 模型试验

选取了光滑和非光滑两类试样进行对比分析。根据课题组前期研究^[5-7],非光滑试样的表面通过机械加工出凹坑形非光滑形态,考虑凹坑直径、行间距两因素及其交互作用,分别以 A、B、A×B 表示。A、B 分别取两水平进行正交试验设计,如表 1 所示。

选用正交表 $L_4(2^3)$ ^[8],进行试验。磨损率或比磨损率是目前国内外应用较广泛的计算磨损的方法,因为它综合考虑了载荷和磨程等因素的影

表 1 试验因素水平表

Table 1 Factor-level table of orthogonal test

水平	因素	
	A:凹坑直径/mm	B:凹坑行间距/mm
1	2	5
2	3	6

响^[9]。因此,作者通过比较试样的磨损率来评定每一类试样的耐磨性,即选取计算单位转数的磨损量来进行比较,应用失重法测定试样的磨损量。称重所用电子天平为上海天平仪器厂生产的 FA2004 型电子天平,精度等级可达到 10^{-4} g。每次称重前均将试样放入 KQ-100E 医用超声波清洗机中清洗 30 min,以除去油污及碎屑,取出干燥,再进行称量,每个试样称量 3 次,取其平均值以减小测量误差。

1.3 试验结果分析与讨论

表 2 为正交试验方案及试验结果极差分析。由表 2 可知, A_1B_1 组合为最优搭配,其磨损量最小;对试验指标影响的主次因素排序为 A, $A \times B$, B,即凹坑直径影响最大,凹坑行间距影响最小,两者的交互作用影响居中。

图 1 为各类模型的试验磨损率对比图,磨损

表 2 正交试验方案及试验结果极差分析

Table 2 Scheme and extremum difference results analysis of orthogonal test

试验号	因素			y_i (g)
	1(A)	2(B)	3(A×B)	
1	1	1	1	0.0010
2	1	2	2	0.0014
3	2	1	2	0.0035
4	2	2	1	0.0032
Y_{j1}	0.0024	0.0045	0.0042	$\sum_{i=1}^4 y_i = 0.0091$
Y_{j2}	0.0067	0.0046	0.0049	
\bar{Y}_{j1}	0.0012	0.00225	0.0021	
\bar{Y}_{j2}	0.00335	0.0023	0.00245	
R_j	0.00215	0.00005	0.00035	
优水平	A_1	B_1		
主次因素	A, $A \times B$, B			
最优搭配	A_1B_1			

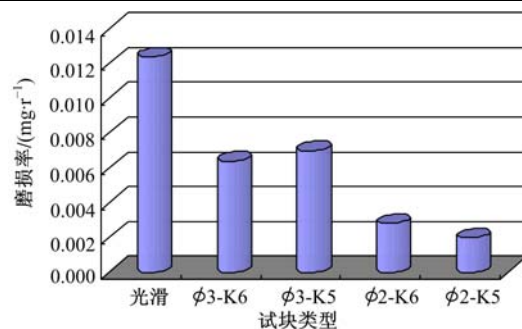


图 1 模型磨损率对比图

Fig. 1 Correlation diagram for wear rate

率越小说明其耐磨性越好。图中 \varnothing 表示凹坑直径, K 表示凹坑行间距。如 $\varnothing 3-K6$ 表示所加工的凹坑直径为 3 mm,各行间距为 6 mm。

从试验结果分析可以看出,在试验范围内,非光滑试样与光滑试样相比,磨损率低,其耐磨性有所提高,提高的程度取决于非光滑形态参数与布置方式等。张宏涛^[7]、许小侠^[10]提出,该非光滑结构单元可收集磨屑;摩擦接触面积小于平板,微凸体接触时系统克服摩擦阻力做功减小,因此有益于减轻其磨损。作者认为,摩擦磨损过程产生的较大磨屑颗粒在工作面上滑动,产生犁切作用,严重划伤工作表面。当表面有凹坑存在时,较大磨屑滑动至凹坑处与凹坑边缘 O 点发生接触(如图 2 所示),该点产生的力与磨屑其他点所受力共同对该磨屑产生力矩的作用效果,打破了其原有运动状态,由原来的滑动犁切运动转化为间歇的滚削运动,从而能够减轻对工作表面的划、擦作用,减小了磨损,这种作用被称为非光滑结构的力矩效应。鉴于在摩擦磨损过程中,如果承受摩擦的试件表面某一接触区域的应力明显增大,试样表层被切削和撕裂形成相对较大的磨屑的机率就会增加^[11],进而加剧其磨损,因此仿生非光滑表面的凹坑对摩擦表面上承受的局部较大应力在一定程度上有缓释作用,改善了表面应力状态,从而工作表面磨损程度有所减小。

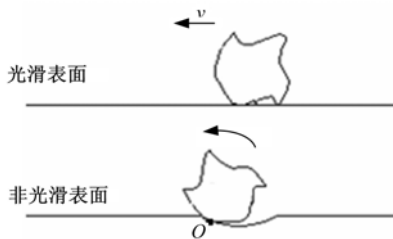


图 2 磨屑运动简图
Fig. 2 Kinematic sketch of grinding chip

2 电测试验与有限元模拟

2.1 电测试验条件

试验加载设备采用岛津 AG-A 系列电子万能试验机,精度在 5%以内,测试仪器为 YJ-26 型静态电阻应变仪,标定灵敏系数为 2.12;应变片为黄岩市测试仪器厂生产的具有低蠕变、自补偿、高精度等显著特点的 BHF120-3AA 箔式电阻应变计,灵敏系数为 2.12;测试电桥为半桥单臂测量,考虑温度补偿。试验材料为铝合金,型号为

LY12,鉴于试验台测试尺寸,将试样尺寸选为 44 mm×20 mm×12 mm,凹坑加工参数如 1.2 节所述。经过预试验,在材料的弹性范围内确定试验载荷分别为 5、10、15、20、25 kN。

2.2 试验结果

对 1.2 节中的光滑与非光滑模型分别进行了受力状态下表面应变测试,加载方向及测点位置如图 3 所示,得到了相应模型的载荷-应变关系,见图 4。图 4 表明,在同等受力条件下,各非光滑试样测点 1、2 处的应力均明显小于光滑试样测点应力,其中测点 1 处应力更小些。凹坑直径为 2 mm 的试样测点 1、2 处的应力明显小于凹坑直径

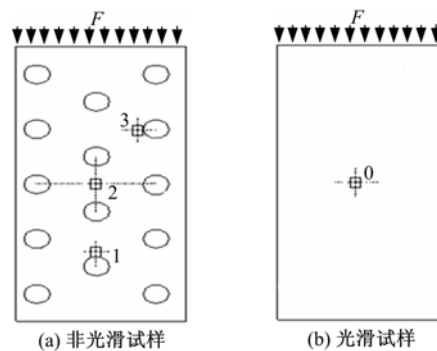
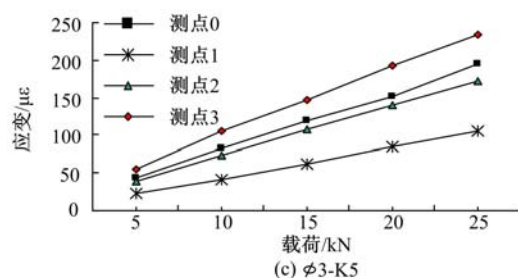
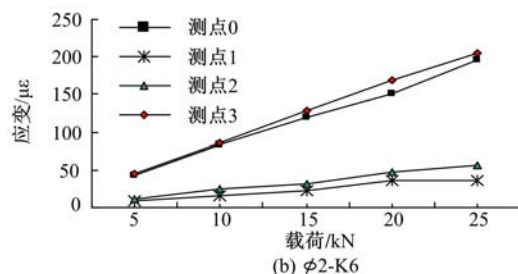
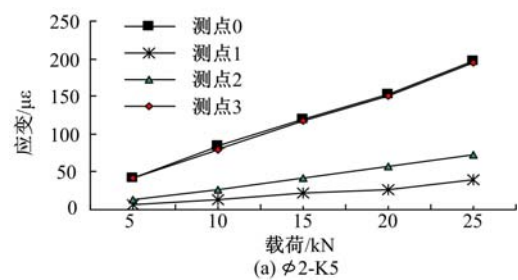


图 3 加载及测点位置简图

Fig. 3 Sketch map of load and test point position



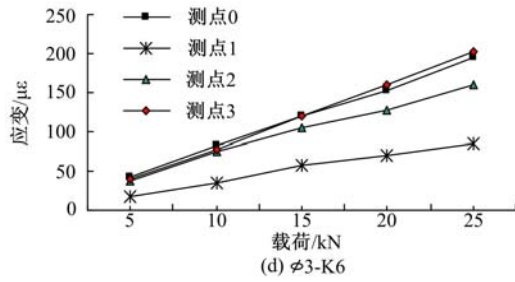


图 4 模型载荷-应变关系对比图

Fig. 4 Correlation diagram for variations of strain with load

为 3 mm 的试样相应测点; $\phi 2$ -K5 型试样测点 3 处应力与光滑试样相应位置测点处应力比较接近, 而 $\phi 2$ -K6、 $\phi 3$ -K6 型试样测点 3 处应力要稍大于光滑试样测点, $\phi 3$ -K5 型试样测点 3 处应力则明显大于光滑试样测点。为了进一步分析表面上其他区域应力分布状况, 作者对此问题进行了有限元模拟。

2.3 有限元模拟分析

本节用 Ansys 软件对两类试样表面上的应力分布进行了有限元分析, 并结合 2.1 节中的试验测试将光滑与非光滑两类模型模拟结果进行了对比分析。

2.3.1 单元类型、材料属性及单元实常数

选用八节点六面体 SOLID45 单元, 该单元类型便于施加载荷, 且计算精度较高, 常用于三维实体结构模型。单元有 8 个节点, 每个节点有 3 个自由度, 即 x 、 y 、 z 三个方向。该元素有塑性、蠕变、膨胀、应力强化、大变形和大应变能力。材料性质为 $E=74.2 \times 10^3$ MPa, $\mu=0.33$ 。模型尺寸为 $L=44$ mm, $W=20$ mm, $H=12$ mm。

2.3.2 建模、划分网格、施加边界条件及求解

模型的建立均在 Ansys 建模模块 modeling 中进行。选用四面体网格划分, 考虑到有凹坑的存在, 检查并加密了凹坑周围的网格(图 5 为其中两个试样的划分结果)。之后, 施加约束条件, 并加载, 求解计算。

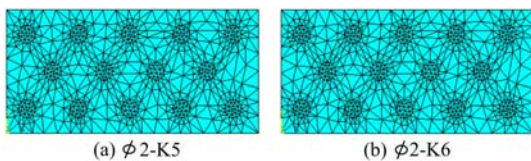
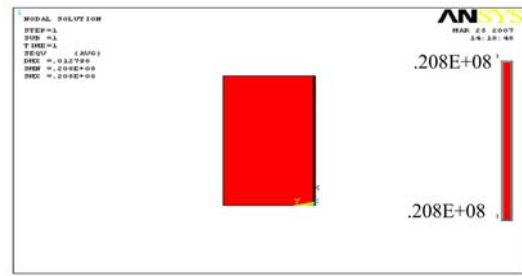


图 5 试样网格划分结果

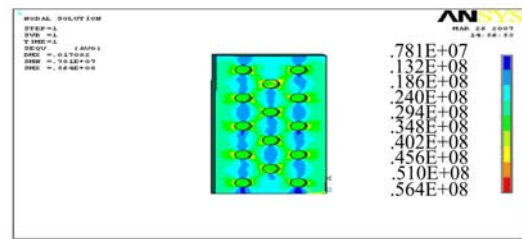
Fig. 5 Meshing results of samples

2.3.3 模拟结果分析

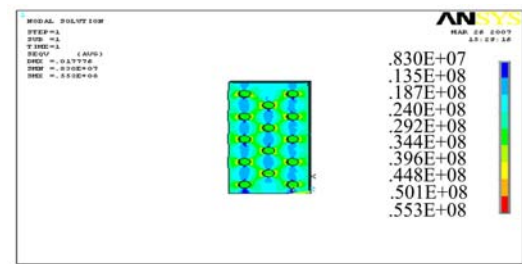
图 6 为施加载荷为 5 kN 时各模型表面等效



(a) 光滑模型



(b) $\phi 3$ -K5



(c) $\phi 3$ -K6

图 6 等效应力分布云图

Fig. 6 Distribution of equivalent stress

应力分布云图。可以看到, 光滑模型表面应力为 20.8 MPa, 而非光滑模型则随着所加工凹坑尺寸参数的不同, 其表面呈现不同的应力分布状况。非光滑表面凹坑间形成低应力带, 该区域应力明显低于光滑试样表面应力; 沿载荷方向, 非光滑表面无凹坑分布区域应力高于光滑表面应力, 尤其在凹坑边缘两端应力较大。结合图 5 可知, 模拟结果与 2.1 节中试验测试的趋势相符。由于其他各级载荷下的趋势与此相同, 故仅进行一级载荷分析。

作者取半个凹坑单元进行分析, 如图 7 所示。可以看到, 载荷施加后, 凹坑由初始状态的圆形变为椭圆状, 凹坑单元端到模型边界的长度由 D 变为 D' , 显然 A-B 截面承载面积最小, 因此该截面呈现较大应力。M 点变形至 M' , 若该单元无凹坑存在, 则各点变形主要取决于材料的刚度。加工了凹坑之后, 则各点的变形不单纯取决于材料的刚度, 还取决于结构的几何形状、边界条件及载荷施加方式。与光滑试样相比, 凹坑结构刚性降低, 受外力 F 作用后, 易于产生变形, 吸收能

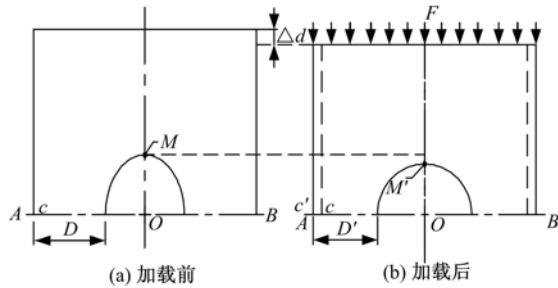


图7 凹坑单元加载前、后简图

Fig. 7 Sketch map of concave before and after loaded

量,同时还使非光滑试样沿 A-B 方向受到该外力分力作用,试样在该方向产生变形,如 cc' ,吸收能量的同时也增大了承载截面,该截面呈现较低应力。多个凹坑共同发挥作用,因此沿着载荷方向凹坑间低应力区扩大,形成了低应力带。

综上所述,在摩擦磨损过程中,仿生非光滑试样耦合表面凹坑结构对光滑试样而言,其刚度大大降低,在同样应力下非光滑试样整体产生的应变能大于光滑试样,若视系统能量守恒,则能够减少系统用于摩擦磨损的能量,也表现为减小或缓释试样工作表面应力强度,从而减小非光滑试样表面磨损,将这种作用称为非光滑结构的应力缓释效应。

3 结 论

(1) 在相同试验条件下,凹坑形仿生非光滑试样表面磨损率小于光滑表面,耐磨效果好。

(2) 凹坑的存在使摩擦副真实接触面积减小,因此,试样表面由于机械加工产生的粗糙微凸体参与摩擦机会减小,导致摩擦副对彼此的划、擦作用减弱,提高了工作表面的抗刮伤性,同时系统克服摩擦阻力做功减小,有益于减轻其磨损程度。磨损过程产生的较大磨屑在凹坑位置产生力矩效应,使其运动状态由滑动犁切运动转化为间歇的滚削,减小了其对工作表面的划伤作用。在受力状态下,仿生非光滑凹坑结构产生应力缓释效应,减小了系统用于摩擦磨损的能量,由此试样表面磨损减轻。

参考文献:

[1] Lu Y X. Significance and progress of bionics[J]. Journal of Bionic Engineering, 2004, 1(1): 1-3.
[2] Vincent J F V, Mann D L. Systematic technology transfer from biology to engineering[J]. Philosophi-

cal Transactions of the Royal Society A, 2002, 360 (1791): 159-173.

- [3] Vincent J F V. The material revolution[J]. Journal of Bionic Engineering, 2006, 3(4): 217-234.
[4] Ren L Q, Tong J, Li J Q, et al. Soil adhesion and biomimetics of soil-engaging components in anti-adhesion against soil: a review[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 2001, 79(3): 239-263.
[5] 邓宝清. 内燃机活塞缸套系统非光滑效应的仿生研究[D]. 长春: 吉林大学生物与农业工程学院, 2004.
Deng Bao-qing. Bionic study of non-smooth effect on engine piston-cylinder system[D]. Changchun: College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, 2004.
[6] 丛茜, 金敬福, 张宏涛, 等. 仿生非光滑表面在混合润滑状态下的摩擦性能[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2006, 36(3): 363-366.
Cong Qian, Jin Jing-fu, Zhang Hong-tao, et al. Friction performance of bionic non-smooth surfaces with mixing lubrication[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2006, 36(3): 363-366.
[7] 张宏涛. 活塞裙部仿生非光滑耐磨效应模型试验及有限元模拟[D]. 长春: 吉林大学生物与农业工程学院, 2006.
Zhang Hong-tao. Model experiment of bionic non-smooth wear resistance effect on piston skirt and finite element simulation[D]. Changchun: College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, 2004.
[8] 任露泉. 试验优化设计与分析[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2003.
[9] 刘家浚. 材料磨损原理及其耐磨性[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993.
[10] 许小侠. 基于逆向工程学的仿生非光滑齿轮表面耐磨性的研究[D]. 长春: 吉林大学生物与农业工程学院, 2004.
Xu Xiao-xia. Study on anti-wear ability of bionics non-smooth gear surface based on the reverse engineering[D]. Changchun: College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, 2004.
[11] 唐军, 何力, 伍玉娇, 等. 材料磨损过程中产生的电位变化行为初探[J]. 贵州工业大学学报: 自然科学版, 2000, 29(2): 40-44.
Tang Jun, He Li, Wu Yu-jiao, et al. A study of material electric potential changing during abrasion [J]. Journal of Guizhou University of Technology (Natural Science Edition), 2000, 29(2): 40-44.