

凹坑形非光滑表面微观摩擦磨损 试验回归分析

韩志武¹, 许小侠², 任露泉¹

(1. 吉林大学 地面机械仿生技术教育部重点实验室, 吉林 长春 130025;
2. 长春工业大学 工业设计系, 吉林 长春 130021)

摘要: 采用试验优化设计理论, 利用 $L_{16}(2^{15})$ 二水平正交表设计试验, 对具有凹坑形非光滑表面形态的试件进行微观摩擦磨损试验研究, 运用多元线性回归正交设计处理试验数据, 得到具有凹坑形非光滑表面形态试件的体积磨损率和摩擦系数与各试验因素关系(如非光滑单元体大小、距离、速度和载荷)的回归方程。结果表明: 试验因素对体积磨损率的影响程度由大到小依次为载荷、速度、单元体大小和距离; 体积磨损率随着距离、速度及载荷的增加而增大, 随着非光滑单元体尺寸的增加而减小, 但距离和速度的交互影响很小; 试验因素对摩擦系数的影响程度由大到小依次为载荷、速度、距离和单元体大小; 摩擦系数随着距离、速度及载荷的增加而减小, 随着非光滑单元体尺寸的增加而增大, 但距离、速度及载荷的交互作用也很小。

关键词: 非光滑; 摩擦磨损性能; 试验优化设计; 多元线性回归

中图分类号: TG115; TH117.3

文献标识码: A

文章编号: 1004-0595(2005)06-0578-05

表面磨损是机械零件失效的主要形式之一, 不仅浪费大量能源和金属资源, 降低设备运转效率和作用质量, 而且加速设备报废, 导致部件更换或维修频繁, 造成极大的直接或间接经济损失, 对国民经济的发展影响极大。研究磨损是国际普遍关注、急需解决的重大课题, 是一项永远需要探索的问题^[1-4]。

在传统的摩擦学理念中, 改善零部件接触表面的耐磨性能一般都注重改善零件材料的成分和热处理强化效果, 而忽视了其表面几何形态对耐磨性的影响^[5-7]。随着科学技术的进步, 仿生学显示出巨大的威力, 愈来愈被人们所重视。仿生学研究发现, 为了适应外界环境, 许多土壤动物具有减粘脱附和降阻功能, 这是土壤动物经过亿万年进化优化的结果。通过对穿山甲鳞片和蜣螂体表形态进行生态观察和测试分析表明, 这些土壤动物的减粘脱附和降阻功能与其体表的非光滑形态密切相关。根据生物体表几何非光滑结构单元的基本特征, 可将其分为凸包形、凹坑形、波纹形和鳞片形等^[8]。我们的前期研究表明^[9], 很多土壤动物长期穿梭于土壤和砾石之间, 但是其体表却毫不损伤, 说明这些土壤动物体表具有很好的耐磨

性, 而且不同的非光滑表面形态对耐磨性有不同程度的影响。非光滑表面形态单元尺寸在微米范围。因此, 深入研究在微米尺寸范围内不同形态、结构和分布规律的非光滑表面耐磨性具有重要的实际应用价值。

本文以凹坑形非光滑表面形态作为研究对象, 进行微观摩擦磨损试验, 研究不同仿生非光滑表面形态的耐磨性。

1 实验部分

试验选定 4 个试验因素: A 为非光滑单元体直径(简称大小), 指形成试件不光滑表面的凹坑直径; B 为两相邻非光滑单元体行边距(简称距离), 指形成试件不光滑表面的凹坑中心距; C 为微观摩擦磨损试验机转速(简称速度); D 为试验所加载荷(简称载荷)。凹坑形非光滑单元体在 JHM-1GY-100B 型激光数控加工机上完成。大小因素选取 2 个水平 300 μm 和 200 μm 及零点重复试验时的中间水平 250 μm , 距离因素 3 个水平为 550 μm 、450 μm 和 350 μm ; 速度因素 3 个水平为 140 r/m in、110 r/m in、80 r/m in; 载荷因素 3 个水平为 13 N、10 N 和 7 N。

基金项目: 科技部 863 计划资助项目(2002AA 331180); 教育部跨世纪优秀人才培养计划资助项目(20030720); 吉林省杰出青年基金资助项目(20040104); 吉林省科技发展计划资助项目(2002628-2)。

收稿日期: 2004-12-05; 修回日期: 2005-04-05/联系人韩志武, e-mail: zwhan@jlu.edu.cn

作者简介: 韩志武, 男, 1969 年生, 博士, 教授, 博导, 目前主要从事生物表面仿生技术研究

每个试验因素均匀 2 个非零水平, 考虑各因素间一级交互作用, 中间水平通过计算得到, 选用 $L_{16}(2^{15})$ 二水平正交表安排试验方案(如表 1), 可以减少试验样件数, 试验结果不变 变换正交表中 2 - 1, 将主要

表 1 凹坑形非光滑试件微观摩擦磨损试验方案及其结果
Table 1 Experimental schedule and results for convex sample

Experiment No.	A Size/ μm	B Distance/ μm	C $v/r \cdot \text{m} \cdot \text{in}^{-1}$	D p/N	d Wear width/ μm	Y_1 Wear rate/ $\mu\text{m}^3(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{in})^{-1}$	Y_2 Friction coefficient
1	1(300)	1(550)	1(140)	1(13)	1324	1710861	0.0764
2	1(300)	1(550)	1(140)	- 1(7)	955	1172421	0.2689
3	1(300)	1(550)	- 1(80)	1(13)	1131	1056266	0.1658
4	1(300)	1(550)	- 1(80)	- 1(7)	733	526287	0.4045
5	1(300)	- 1(350)	1(140)	1(13)	1222	1338038	0.1150
6	1(300)	- 1(350)	1(140)	- 1(7)	859	850308	0.3577
7	1(300)	- 1(350)	- 1(80)	1(13)	1065	879389	0.1993
8	1(300)	- 1(350)	- 1(80)	- 1(7)	607	297901	0.4475
9	- 1(200)	1(550)	1(140)	1(13)	1359	1853732	0.0595
10	- 1(200)	1(550)	1(140)	- 1(7)	989	1303846	0.2543
11	- 1(200)	1(550)	- 1(80)	1(13)	1170	1171451	0.1325
12	- 1(200)	1(550)	- 1(80)	- 1(7)	772	615537	0.3878
13	- 1(200)	- 1(350)	1(140)	1(13)	1268	1498378	0.0998
14	- 1(200)	- 1(350)	1(140)	- 1(7)	897	969479	0.3405
15	- 1(200)	- 1(350)	- 1(80)	1(13)	1093	951730	0.1817
16	- 1(200)	- 1(350)	- 1(80)	- 1(7)	681	421443	0.4218
17	0(250)	0(450)	0(110)	0(10)	1018	996500	0.2453
18	0(250)	0(450)	0(110)	0(10)	1010	972879	0.2476
19	0(250)	0(450)	0(110)	0(10)	990	915500	0.2351
20	0(250)	0(450)	0(110)	0(10)	992	921131	0.2331

因素安排于基本列, 即列名为单个字母的列, 试验因素大小、距离、速度和载荷即 X_1 、 X_2 、 X_3 和 X_4 分别排在 $L_{16}(2^{15})$ 中的第 1、2、4 和 8 列, 交互作用列即为因素列名的乘积列, 多余的为空列^[10]. 选取零点重复试验 $M_0 = 4$ 次, 则总试验次数为 20 次

试件为调质处理 45# 钢, 线切割为尺寸 34 mm × 21 mm × 11 mm. 试验之前, 采用无水乙醇超声清洗 20 min, 然后在清水中超声清洗 10 min, 用吹风机吹干, 将其固定在美国产 UMT-2 型微观摩擦磨损试验机上. 对磨件为洛氏硬度 63HRC、直径 4 mm 的 GCr15 钢球. 试验时间 90 min, 取 2 次试验平均值, 摩擦系数由微观摩擦磨损试验机实时记录, 磨痕宽度由体视显微镜测量, 分辨精度为 270 pixel. 耐磨性由单位载荷、单位时间内的体积磨损量表示:

$$\Delta V = a \left[r^2 \arcsin \frac{d}{2r} - \frac{d}{2} \sqrt{r^2 - \left(\frac{d}{2} \right)^2} \right] \quad (1)$$

$$\omega = \frac{\Delta V}{t \times L} \quad (2)$$

式中: a 为往复滑动距离, 设定为 20 mm; 磨痕宽度 d 由 XTJ-30 型体视显微镜测得, 每个磨痕为 5 个不同位置测量值的平均值; r 为对磨钢球半径; L 为所加

法向载荷; t 为试验时间(如图 1). 表 1 列出了凹坑形

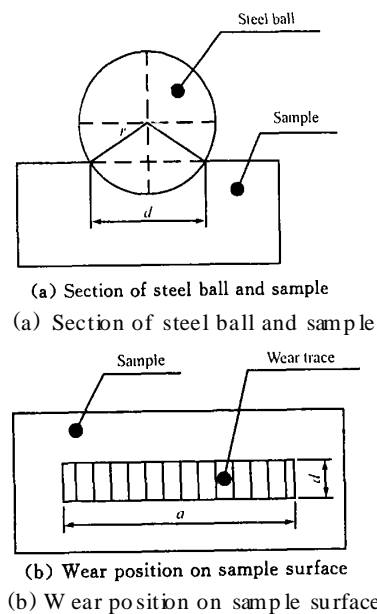


Fig 1 Sample, steel ball and wear surface of sample
图 1 试件与对磨钢球及试件磨损表面示意图

非光滑试件微观摩擦磨损试验方案及其结果 按照多

元线性回归正交设计原理和基本程序^[4,5]确定的因素 编码见表 2, 交互因素编码表见表 3, 回归系数如表 4

表 2 因素编码表
Table 2 Coding factors

$z_j(x_j)$	z_1 Size/ μm	z_2 Distance/ μm	z_3 $v/r \cdot \text{m} \cdot \text{min}^{-1}$	z_4 p/N
$z_{1j}(-1)$	200	350	80	7
$z_{2j}(+1)$	300	550	140	13
$z_{0j}(0)$	250	450	110	10
Δ_j	50	100	30	3
Coding equation	$x_1 = \frac{z_1 - 250}{50}$	$x_2 = \frac{z_2 - 450}{100}$	$x_3 = \frac{z_3 - 110}{30}$	$x_4 = \frac{z_4 - 10}{3}$

表 3 交互因素编码表
Table 3 Mutual coding factors

Exp. No	x_0	x_1x_2	x_1x_3	x_1x_4	x_2x_3	x_2x_4	x_3x_4
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	-1	1	-1	-1
3	1	1	-1	1	-1	1	-1
4	1	1	-1	-1	-1	-1	1
5	1	-1	1	1	-1	-1	1
6	1	-1	1	-1	-1	1	-1
7	1	-1	-1	1	1	-1	-1
8	1	-1	-1	-1	1	1	1
9	1	-1	-1	-1	-1	1	1
10	1	-1	-1	1	1	-1	-1
11	1	-1	1	-1	-1	1	-1
12	1	-1	1	1	-1	-1	1
13	1	1	-1	-1	-1	-1	1
14	1	1	-1	1	-1	1	-1
15	1	1	1	-1	1	-1	-1
16	1	1	1	1	1	1	1
17	1	0	0	0	0	0	0
18	1	0	0	0	0	0	0
19	1	0	0	0	0	0	0
20	1	0	0	0	0	0	0

和表 5

2 结果与讨论

体积磨损率和摩擦系数的试验结果是分散的, 只能说明每次体积磨损率和摩擦系数 通过对体积磨损率和摩擦系数的试验结果采用多元线性回归正交设计回归, 才能得到体积磨损率和摩擦系数与各试验因素关系的回归方程

2.1 体积磨损率与试验因素间的回归分析

计算表 4 和表 5 中回归系数 b_{ij} , 得到凹坑形非光滑试件体积磨损率与各试验因素关系的回归方程为:

$$\hat{y} = 1.0212 \times 10^{-6} - 5.9633 \times 10^4 x_1 + 1.3773 \times 10^5 x_2 + 2.9857 \times 10^5 x_3$$

$$+ 2.6891 \times 10^5 x_4 + 3.5349 \times 10^4 x_2 x_3 \quad (3)$$

通过显著性检验, 式(3)的显著性水平为 0.01, 即置信度为 99%; 失拟平方和由试验误差引起, 通过失拟检验回归方程不失拟, 即拟合得好。

将在编码空间中经过统计检验符合要求的回归方程变换成自然空间的回归方程, 才能满足试验要求 将表 3 中编码公式代入式(3), 整理得回归方程:

$$\hat{y} = -7.0829 \times 10^5 - 1.1927 \times 10^3 \times z_1 + 8.117 \times 10 \times z_2 + 4.65 \times 10^3 \times z_3 + 8.9637 \times 10^4 \times z_4 + 1.1783 \times 10 \times z_2 z_3 \quad (4)$$

式(4)中的回归系数反映了试验因素对体积磨损率的影响程度, 各因素对体积磨损率的影响由大到小依次为 z_4, z_3, z_1 和 z_2 , 即载荷、速度、大小和距离 体

表 4 回归系数表

Table 4 Regression coefficients

Exp. No	x_0	$x_1(z_1)$	$x_2(z_2)$	$x_3(z_3)$	$x_4(z_4)$	x_{1x2}
D_{1j}	20	16	16	16	16	16
B_{1j}	2.0423×10^7	-9.5413×10^5	2.2037×10^6	4.7771×10^6	4.3026×10^6	-3336.72
b_{1j}	1.0212×10^6	-5.9633×10^4	1.3773×10^5	2.9857×10^5	2.6891×10^5	-208.54
S_{1j}	2.08551×10^{13}	5.68973×10^{10}	3.03528×10^{11}	1.42627×10^{12}	1.15704×10^{12}	6.95856×10^5
F_{1j}	-	36.31	193.73	910.31	738.48	0.00044
α_{1j}	-	0.01	0.01	0.01	0.01	-
D_{2j}	20	16	16	16	16	16
B_{2j}	4.8741	0.1572	-0.4136	-0.7688	-1.853	0.0058
b_{2j}	0.243705	0.009825	-0.02585	-0.04805	-0.115813	0.000363
S_{2j}	1.18784	1.544×10^{-3}	1.069×10^{-2}	3.694×10^{-2}	0.2146	2.103×10^{-6}
F_{2j}	-	29.48	204.08	705.11	4096.21	0.04
α_{2j}	-	0.05	0.01	0.01	0.01	-

表 5 回归系数表

Table 5 Regression coefficients

Exp. No	x_{1x3}	x_{1x4}	x_{2x3}	x_{2x4}	x_{3x4}
D_{1j}	16	16	16	16	16
B_{1j}	-1.5349×10^5	-27349	5.6558×10^5	45812	-92712
b_{1j}	-9593.08	-1709.32	35349	2863.26	-5794.5
S_{1j}	1.47243×10^9	4.67484×10^7	1.99925×10^{10}	1.31172×10^8	5.37222×10^8
F_{1j}	0.94	0.030	12.76	0.08	0.34
α_{1j}	-	-	0.05	-	-
D_{2j}	16	16	16	16	16
B_{2j}	-0.0294	0.0088	-0.0942	0.0904	0.1116
b_{2j}	-0.001838	0.000550	-0.005888	0.005650	0.006975
S_{2j}	5.402×10^{-5}	4.840×10^{-6}	5.546×10^{-4}	5.108×10^{-4}	7.784×10^{-4}
F_{2j}	1.03	0.09	10.59	9.75	14.86
α_{2j}	-	-	0.05	0.10	0.05

积磨损率随着距离、速度、载荷的增加而增大; 随着非光滑单元体尺寸的增加而减小。 z_2z_3 项表示距离和速度的交互作用, 因其系数比其它各项小得多, 可以忽略。

2.2 摩擦系数与试验因素间的回归分析

计算表 4 和表 5 中回归系数 b_{2j} , 得到影响凹坑形非光滑试件摩擦系数与各试验因素关系的回归方程为:

$$\hat{y} = 0.243705 + 9.825 \times 10^{-3}x_1 - 2.585 \times 10^{-2}x_2 - 4.805 \times 10^{-2}x_3 - 0.115813x_4 - 5.888 \times 10^{-3}x_{2x3} + 5.65 \times 10^{-3}x_{2x4} + 6.975 \times 10^{-3}x_{3x4} \quad (5)$$

通过显著性检验和失拟检验, 式(5)的显著性水平为 0.01; 失拟平方和基本上是由试验误差引起的, 回归方程不失拟。

将表 3 因素编码表中的编码公式代入式(5)中并

整理, 得自然空间的回归方程:

$$\hat{y} = 0.946 + 1.965 \times 10^{-4}x_{z_1} - 6.076 \times 10^{-4}x_{z_2} - 1.494 \times 10^{-3}x_{z_3} - 7.265 \times 10^{-2}x_{z_4} - 1.963 \times 10^{-6}x_{z_2z_3} + 1.883 \times 10^{-5}x_{z_2z_4} + 7.750 \times 10^{-5}x_{z_3z_4} \quad (6)$$

式(6)中的回归系数反映了各试验因素对摩擦系数的影响程度, 各因素对摩擦系数的影响由大到小依次为 z_4 、 z_3 、 z_2 和 z_1 , 即载荷、速度、距离和大小。摩擦系数随着距离、速度和载荷的增加而减小; 随着非光滑单元体尺寸的增加而增大; z_2z_3 、 z_2z_4 和 z_3z_4 表示距离、速度及载荷的交互作用, 这 3 项系数比其它各项小得多, 可以忽略。

3 结论

a 获得了凹坑形非光滑试件微观摩擦磨损的体积磨损率和摩擦系数以及各试验因素之间的回归

方程

b 试验因素对体积磨损率的影响程度由大到小依次为载荷、速度、大小和距离, 体积磨损率随着距离、速度及载荷的增加而增大, 随着非光滑单元体尺寸的增加而减小, 但距离和速度的交互影响很小

c 试验因素对摩擦系数的影响程度由大到小依次为载荷、速度、距离和大小, 摩擦系数随着距离、速度及载荷的增加而减小, 随着非光滑单元体尺寸的增加而增大, 但距离、速度及载荷的交互作用也很小

参考文献:

- [1] Zum Gahr K H, Blattner R R, Hwang D H, *et al* Micro- and macro-tribological properties of SiC ceramics in sliding contact [J]. *Wear*, 2001, 250: 299-310
- [2] Stachowiak G W, Podsiadko P. Surface characterization of wear particles[J]. *Wear*, 1999, 225-229: 1 171-1 185
- [3] Zhang X M, Man H C, Li H D. Wear and friction properties of laser surface hardened En31 steel[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1997, 69: 162-166
- [4] Pantelis D I, Bouyiouri E, Kouloumbi N, *et al* Wear and corrosion resistance of laser surface hardened structural steel[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2002, 298: 125-134
- [5] 张绪寿, 余来贵, 陈建敏. 表面工程摩擦学研究进展[J]. *摩擦学学报*, 2000, 20(2): 156-160
- Zhang X S, Yu L G, Chen J M. Development in tribology of surface engineering[J]. *Tribology*, 2000, 20(2): 156-160
- [6] 屈晓斌, 陈建敏, 周惠娣. 材料的磨损失效及其预防研究现状与发展趋势[J]. *摩擦学学报*, 1999, 19(2): 187-192
- Qu X B, Chen J M, Zhou H D. Current state and development trend of the research on material wear failure and failure prevention[J]. *Tribology*, 1999, 19(2): 187-192
- [7] Antler M. Sliding wear and friction of electroplated and clad connector contact materials: effect of surface roughness[J]. *Wear*, 1998, 214: 1-9
- [8] 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
- [9] 韩志武, 任露泉, 刘祖斌. 激光织构仿生非光滑表面抗磨性能研究[J]. *摩擦学学报*, 2004, 24(4): 289-293
- Han Z W, Ren L Q, Liu Z B. Investigation on antiwear ability of bionic non-smooth surfaces made by laser texturing[J]. *Tribology*, 2004, 24(4): 289-293
- [10] 任露泉. 试验优化设计与分析[M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 2001.

Regression Analysis of Micro-Friction and Wear on Concave Non-smooth Surface

HAN Zhi-wu¹, Xu Xiao-xia², REN Lu-quan¹

(1. Key Laboratory for Terrain Machine Bionics Engineering of Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130025, China;

2. Changchun University of Technology, Changchun 130021, China)

Abstract: Experiment optimum design theory was employed to design experiment scheme, and a two levels orthogonal table- $L_{16}(2^{15})$ was adopted in the experiments. Micro-friction and wear experiments of samples with concave non-smooth surface were conducted. Experiment data were processed through multiple element linear regression and orthogonal design. Regression equations between volume wear rate, friction coefficient and experimental factors (such as size, distance, velocity, and load) of samples with concave non-smooth surface were obtained. Experimental factors affecting wear rate in volume are, in a sequence of contribution, load, velocity, size and distance. The wear rate increased with distance, velocity and load increasing, but decreased with non-smooth unit size increasing, there is less mutual effect of distance and velocity. The experimental factors affecting friction coefficient are, in a sequence of contribution, load, velocity, distance and size, but friction coefficient decreased with distance, velocity and load increasing, there is less mutual effect of distance, velocity and load were.

Key words: non-smooth, friction and wear behavior, experiment optimum design, multiple elements linear regression

Author: HAN Zhi-wu, male, born in 1969, Ph.D., Professor, e-mail: zwhan@jlu.edu.cn