

## 仿生涂层磨损及其与表面形貌的关联性研究

徐中<sup>1</sup>, 王健<sup>1</sup>, 李颖<sup>2</sup>

(1. 大连理工大学 机械工程学院, 大连 116024; 2. 中国兵器工业第五九研究所, 重庆 400039)

**[摘 要]** 为了研究仿生涂层表面形貌与磨损之间的关系,对仿生耐磨涂层磨损前后的表面形貌进行了图像采集,并利用 Matlab 软件对得到的灰度图像进行二值化处理,进而提取出表征涂层表面形貌的特征参数——凹坑分布率,分别研究了不同载荷工况下涂层磨损量和凹坑分布率的变化规律,并分析了磨损过程中涂层磨损量与表面凹坑分布率之间的对应关系。结果表明:存在一个最佳的凹坑分布率范围,可使得涂层具有较好的耐磨性。

**[关键词]** 仿生涂层; 磨损; 表面形貌; 凹坑分布率

**[中图分类号]** TG174.46; TG115.5

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1001-3660(2013)04-0009-03

## Research of Abrasion of Bionic Coatings and Its Relevance with Surface Morphology

XU Zhong<sup>1</sup>, WANG Jian<sup>1</sup>, LI Ying<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. No. 59 Institute of China Ordnance Industry, Chongqing 400039, China)

**[Abstract]** In order to study the relationship between surface morphology of bionic coatings and abrasion, the images of surface morphology of the coatings before and after friction and wear were acquired. The gray-scale images were binarized by Matlab software, and then the pits distribution rate used for characterizing the surface morphology was extracted. Meanwhile, the changes of the abrasion loss and the pits distribution rate were studied separately. The relationship between abrasion loss and pits distribution rate of the coatings in the process of friction and wear was analyzed. The results show that there exists an optimum pits distribution rate that makes the coatings has a better wear resistance.

**[Key words]** bionic coatings; abrasion; surface morphology; pits distribution rate

摩擦磨损是导致机械零部件损耗的主要原因,因此研究摩擦磨损与耐磨技术对于延长机械零件的使用寿命非常重要。生物体在亿万年演化和进化过程中,形成了独特的体表结构,具有特殊的性能。早在 20 世纪 80 年代,吉林大学任露泉等人就开始研究蛭螂、蛄、蚯蚓等土壤动物体表不被粘附的问题。经研究发现,土壤中的生物体表具有诸如凹坑形、鳞片形、凸包形、沟槽形等非光滑形态,这些非光滑表面形态都具有较好的耐磨性<sup>[1-2]</sup>。基于仿生学原理分析研究特定生物体表的非光滑形态,对工程仿生设计及制造具有指导作用。如国内外学者根据穿山甲鳞片的表面形态,研制出了仿生耐磨轧辊<sup>[3]</sup>;根据蚯蚓体表的微观耐磨通孔结构,研制出了仿生耐磨活塞缸套<sup>[4-5]</sup>;根据贝壳表面的形态,研制出了仿生耐磨汽车制动鼓<sup>[6]</sup>。除了仿生结构设计以外,涂覆耐磨涂层<sup>[7-8]</sup>也是提高零部

件耐磨性的重要手段。

目前,国内外学者仅分别对仿生结构和耐磨涂层的摩擦性能进行了研究,而对两者耦合作用及其磨损过程的研究却鲜有提及。文中在仿生学理论研究的基础上,将仿生结构设计 with 涂层制备技术有机地结合起来,制备出了仿生耐磨涂层,并研究了涂层的磨损规律,利用图像处理技术探究了磨损与表面凹坑分布率之间的关系,为仿生涂层磨损的动态监测提供了一定的指导。

## 1 实验

### 1.1 摩擦试样的制备

实验中制备的仿生耐磨涂层主要由树脂、助剂和填料三大部分组成,使用时需配合专用的固化剂。由于 SiC 颗粒具有优良的力学性能和耐磨性能,因此选

**[收稿日期]** 2013-02-24; **[修回日期]** 2013-03-23

**[基金项目]** 国家自然科学基金资助项目(51075052)

**[作者简介]** 徐中(1963—),男,辽宁人,博士,副教授,主要研究方向为表面工程与特种加工。

择 SiC 颗粒作为填料。

所用基材为玻璃基板,依次经超纯水和无水异丙醇超声清洗后,再喷涂仿生涂层。喷涂距离控制在 120 ~ 180 mm 范围内,涂层自然固化成膜,厚度控制在  $(300 \pm 10) \mu\text{m}$ 。

## 1.2 表面凹坑分布率的提取

材料的表面形貌对其力学特性、机械特性、物理特性和化学特性等均会产生重要影响。实验室制备的仿生涂层具有随机的非光滑表面形貌,为了研究其与涂层磨损之间的关系,文中选取凹坑分布率作为表征涂层表面形貌的特征参数。随着光学仪器的发展,对表面形貌的研究可以转变为对表面形貌图像数据的研究,从而使得将图像处理技术应用于表面形貌的表征成为可能。相关研究表明,在等强度像素光源照射的条件下对物体的表面形貌进行图像采集,其形貌高度的分布将会映射为图像灰度强度的分布,表面凹坑区域对应的灰度值较低,表面凸起部分对应的灰度值则较高。因此,通过选取合适的阈值对采集到的表面形貌灰度图像进行二值化处理<sup>[9]</sup>,统计所得二值化图像中灰度值为零的像素的个数,就可以得到表面的凹坑分布率。记凹坑分布率为  $T$ ,二值化图像中像素的总个数为  $N$ ,二值化图像中灰度值为零的像素的个数为  $\sum N_i$ ,则凹坑分布率计算公式为:

$$T = \frac{\sum N_i}{N} \times 100\%$$

本实验中利用 ArtCamMI900 数字显微镜对仿生涂层在摩擦磨损过程中的表面形貌进行图像采集,并通过上述图像处理手段提取出仿生涂层表面的凹坑分布率  $T$ 。

## 1.3 摩擦磨损实验

仿生涂层摩擦磨损实验所用设备为 QMX 型涂层耐磨性试验机,其恒定转速为 60 r/min,负载大小可调。实验在大气及干摩擦条件下进行,采用旋转摩擦橡胶轮法,耦合摩擦橡胶轮尺寸为  $\phi 50 \text{ mm} \times 12.7 \text{ mm}$ ,国际橡胶硬度为 50IRHD,通过在加压臂上增加砝码来调节涂层所受的负载。

考虑到摩擦磨损实验的类型以及实验材料本身的特性,决定通过失重法,即利用摩擦磨损前后涂层的质量差来表征涂层的耐磨性能。在不同载荷下的实验过程中,用 FA2104N 精密分析天平(精度为 0.1 mg)测定摩擦磨损前、后涂层的质量,计算出涂层此时的磨损量  $\Delta m$  以及涂层的累计总磨损量  $m$ ,同时利用数字显微镜对涂层的表面形貌进行图像采集,并对采集到的图像信息进行相应处理,以得到涂层表面此时的凹坑分布率。

## 2 结果与讨论

### 2.1 仿生涂层的表面形貌

仿生涂层初始表面形貌如图 1 所示,可见涂层表面较为粗糙,由许多随机分布的不规则凹坑和突起结构构成,算得凹坑分布率为 46.75%。

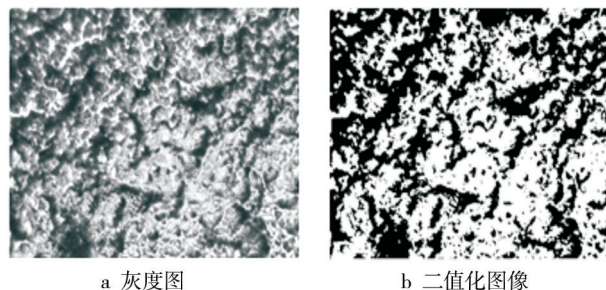


图 1 初始表面形貌图( $\times 600$ )

Fig. 1 Initial surface morphology ( $\times 600$ )

图 2 为仿生涂层在载荷 14.7 N 条件下,分别摩擦 300 r、600 r 和 900 r 时的表面形貌。从图 2 可以看出,

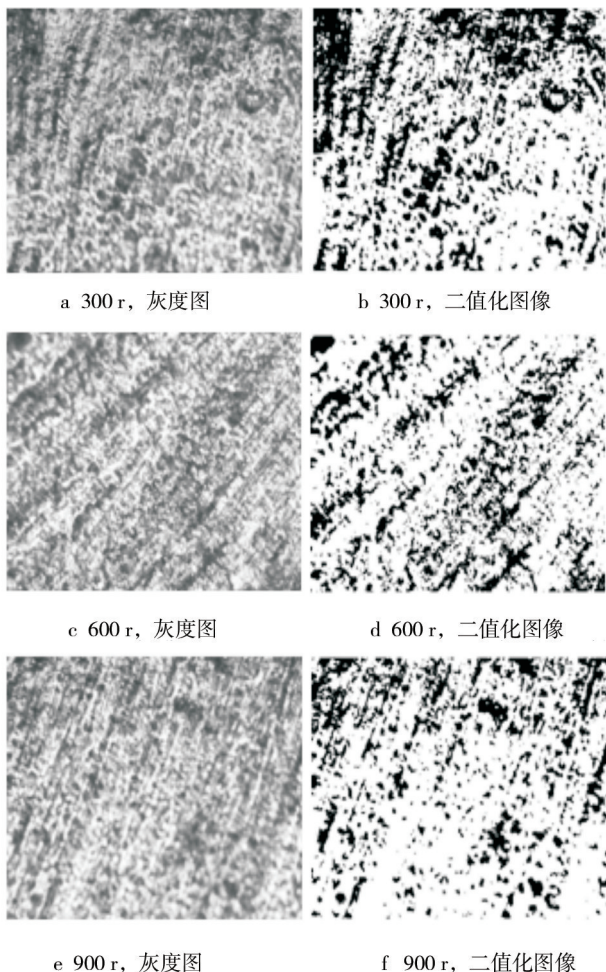


图 2 仿生涂层摩擦磨损后的表面形貌( $\times 600$ )

Fig. 2 Surface morphology of bionic coatings after friction and wear ( $\times 600$ )



经过一定次数的摩擦磨损以后,涂层表面形貌发生了很大的变化:凹坑周围的突起结构逐渐消失,涂层表面存在明显的磨痕。算得摩擦磨损后的凹坑分布率依次为 33.66%、26.04% 和 22.73%。

## 2.2 仿生涂层的磨损特性

图 3 为仿生涂层分别在载荷 9.8、14.7、19.6 N 的条件下进行摩擦磨损,其磨损量  $\Delta m$ 、总磨损量  $m$  以及表面凹坑分布率  $T$  等特征参数在摩擦磨损实验过程中的变化曲线。

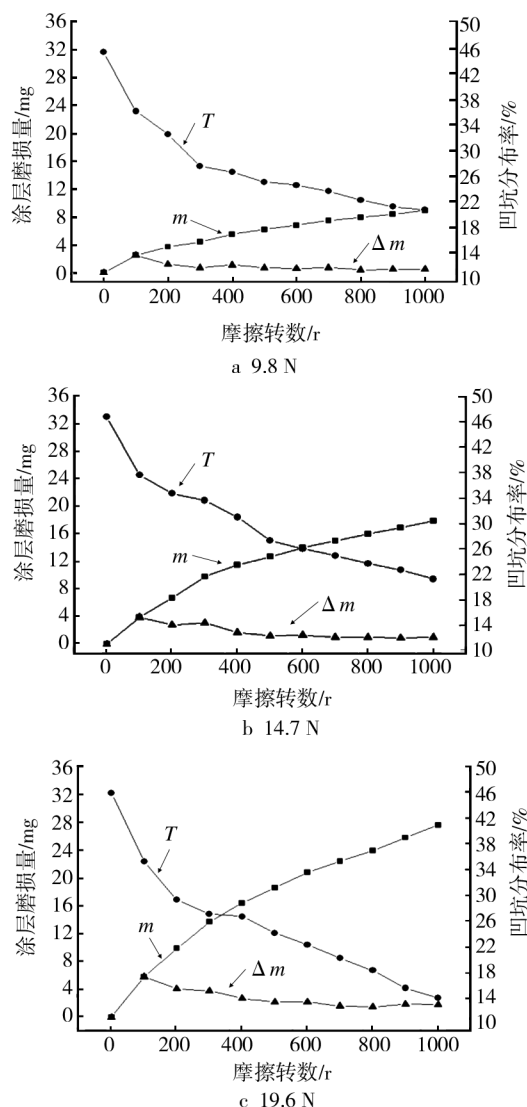


图 3 不同载荷条件下仿生涂层的特征参数变化情况  
Fig. 3 Changes of characteristic parameters of bionic coatings under the condition of different loads

从  $\Delta m$  变化曲线中可以看出,不同载荷工况下,仿生涂层的磨损呈现出一致的变化趋势,即摩擦转数低于 200 r 时,仿生涂层磨损量较大;相同时间间隔内,  $\Delta m$  随着摩擦转数的增加而减少,并逐渐趋于稳定。这主要是在摩擦磨损初期,仿生涂层表面较为粗糙,摩擦副表面主要以粗糙峰接触为主,摩擦实际接触

区域内的真实接触面积较小,因而接触应力较大,涂层磨损较快;随着摩擦转数的增加,涂层表面的粗糙峰被逐渐磨平,摩擦副表面也逐渐由点接触过渡为面接触,接触应力变小,从而使得  $\Delta m$  变小。虽然仿生涂层在不同载荷条件下的磨损趋势大致相同,但是也呈现出了一定的差异。如图 3 所示,与载荷为 14.7 N 和 9.8 N 时相比,载荷为 19.6 N 时的磨损量更高。这是由于当载荷增大时,摩擦副表面之间的接触应力也相应增大,从而导致涂层更容易受到磨损。除此之外,当载荷为 19.6 N 时,经过 800 r 的摩擦磨损后,仿生涂层磨损量有增加的趋势。

如图 3 中的凹坑分布率曲线所示,在摩擦磨损实验前期,当所受载荷为 9.8、14.7、19.6 N 时,涂层表面凹坑分布率的变化均很剧烈。这是由于涂层表面凹凸不平,存在诸多不规则凸起结构,当摩擦面运动时,摩擦副与涂层表面之间相互犁削,使得涂层表面形貌变化很大。随着涂层表面的凸点逐渐被消除,凹坑结构逐渐凸显,表面凹坑分布率的变化逐渐趋于平缓。此外,随着摩擦转数的增加,涂层表面的实际接触面积逐渐增大,因而其表面凹坑分布率呈现出逐渐递减的趋势。

## 2.3 磨损与凹坑分布率关联性分析

在摩擦磨损实验过程中,涂层表面凹坑分布率与涂层磨损量均发生了相应的变化,这在一定程度上说明涂层表面凹坑分布率与其摩擦磨损性能之间存在着一定的联系。图 4 给出了分别在载荷 9.8、14.7、19.6 N 条件下,仿生涂层磨损量  $\Delta m$  与表面凹坑分布率  $T$  的对应关系。

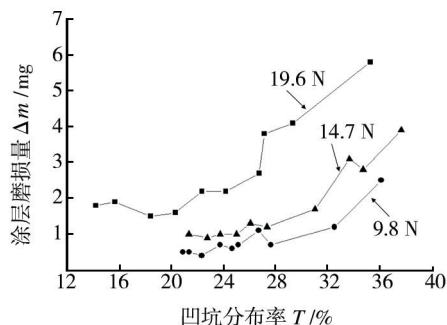


图 4 磨损量  $\Delta m$  与凹坑分布率  $T$  的关系曲线  
Fig. 4 Relationship curves between abrasion loss  $\Delta m$  and pits distribution rate  $T$

如图 4 所示,在摩擦磨损初期,当涂层表面凹坑分布率发生剧烈变化时,涂层磨损量的变化也较大。随着摩擦转数的增加,涂层表面逐渐趋于光滑,表面凹坑分布率的变化逐渐趋于稳定,此时涂层的磨损量最小。从曲线上还可以看出,当载荷为 9.8 N 和 14.7 N 时,

(下转第 114 页)

- line; Corrosion Potential Shift and Morphological Changes [J]. *Advanced Materials*, 1994, 6: 226—228.
- [2] SATHIYANARAYANAN S, KARPAKAM V, KAMARAJ K, et al. Sulphonate Doped Polyaniline Containing Coatings for Corrosion Protection of Iron [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2010, 204: 1426—1431.
- [3] KAMARAJ K, SATHIYANARAYANAN S, MUTHUKRISHNAN S, et al. Corrosion Protection of Iron by Benzoate Doped Polyaniline Containing Coatings [J]. *Progress in Organic Coatings*, 2009, 64: 460—465.
- [4] JOS'E IGNACIO Iribarren Lacoa, FRANCISCO Cadena Vilotab, FRANCISCO Liesa Mestres, et al. Corrosion Protection of Carbon Steel with Thermoplastic Coatings and Alkyd Resins Containing Polyaniline as Conductive Polymer [J]. *Progress in Organic Coatings*, 2005, 52: 151—160.
- [5] ELAINE Armelina, ROSA Pla, FRANCISCO Liesa, et al. Corrosion Protection with Polyaniline and Polypyrrole as Anticorrosive Additives for Epoxy Paint [J]. *Corrosion Science*, 2008, 346: 721—728.
- [6] 朱日龙, 李国希, 刘晓阳. 聚吡咯的电化学合成及其对不锈钢的保护作用[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2008, 2(1): 7—10.
- [7] 李倩倩, 黄健涵, 刘素琴, 等. 对甲苯磺酸掺杂聚吡咯的合成、表征及其对金属镁的防腐蚀性能研究[J]. *化学学报*, 2008, 66(5): 571—575.
- [8] 徐慧, 王新颖, 刘小育. 聚苯胺/聚吡咯复合薄膜的制备及其抗腐蚀性能研究[J]. *腐蚀科学与防护技术*, 2012, 3(2): 127—131.
- [9] YANG Ji-ping, WENG Bo. Inverse Emulsion Polymerization for High Molecular Weight and Electrically Conducting Polyanilines [J]. *Synthetic Metals*, 2009, 159: 2249—2252.
- [10] JING Sheng-yu, XING Shuang-xi. Synthesis and Characterization of Ag/Polypyrrole Nanocomposites Based on Silver Nanoparticles Colloid [J]. *Materials Letters*, 2007, 61: 4528—4530.
- [11] ZHANG Long, LIU Peng, WANG Ting-mei. Preparation of Superparamagnetic Polyaniline Hybrid Hollow Microspheres in Oil/Water Emulsion with Magnetic Nanoparticles as Cosurfactant [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2011, 171: 711—716.
- [12] XU P, HAN X J, WANG C. Morphology and Physico-electrochemical Properties of Poly(Aniline-co-pyrro) [J]. *Synthetic Metals*, 2009, 159: 430—434.
- [13] 曹旭. 聚吡咯/纳米复合材料的制备、表征及其性能研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2009.

(上接第 11 页)

经过一定转数的摩擦磨损以后, 涂层表面凹坑分布率变化较为平缓, 涂层磨损量趋于稳定值。当载荷为 19.6 N 时, 涂层经过 800 r 的摩擦磨损后, 表面凹坑分布率急剧变小, 涂层磨损量有增加的趋势, 这说明表面凹坑分布率的大小对涂层磨损产生了一定的影响, 凹坑分布率在一定范围内可以使涂层具有较好的耐磨性, 该范围的确定与载荷工况有很大的联系。

### 3 结论

1) 图像处理技术可以用来提取表征涂层表面形貌的特征参数——凹坑分布率, 以便研究其与摩擦磨损之间的关系, 从而为动态摩擦磨损的研究提供了思路和方法。

2) 仿生涂层表面凹坑分布率随摩擦次数的增加而逐渐减小, 磨损量则随摩擦次数的增加而呈非线性增大。在不同载荷工况下, 涂层表面的摩擦磨损特性略有不同, 当载荷增大时, 涂层更容易受到磨损, 磨损率增加。

3) 表面凹坑分布率的大小影响着涂层摩擦磨损性能, 存在一个使得涂层耐磨性能较好的凹坑分布率范围, 该范围的确定与载荷工况有关。

### [参 考 文 献]

- [1] 任露泉, 王再宙, 韩志武. 仿生非光滑表面滑动摩擦磨损试验研究[J]. *农业机械学报*, 2003, 34(2): 86—88, 92.
- [2] 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.
- [3] 杨卓娟. 凹坑形仿生非光滑轧辊耐磨性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2006.
- [4] 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, 2004.
- [5] 金敬福. 仿生结构在润滑条件下耐磨性能的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
- [6] 张志辉. 激光仿生耦合处理热作模具的热疲劳性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
- [7] MILMAN Yu V, CHUGUNOVA S, GONCHARUCK V, et al. Low and High Temperature Hardness of WC-6wt% Co Alloys [J]. *Int J of Refractory Metals & Hard Materials*, 1997, 15: 97—101.
- [8] 杨元政, 刘正义. 等离子喷涂  $\text{Al}_2\text{O}_3 + 13\% \text{TiO}_2$  陶瓷涂层的组织结构及其耐磨性[J]. *功能材料*, 2000, 31(4): 390—392.
- [9] 李平, 张延安, 汪秉宏, 等. 灰度阈值对图像分形特征参数提取的分析[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2006, 27(1): 57—60.