

# 仿生凹坑与纳米碳化硅/镍基复合镀层 耦合表面的磨损性能

郭蕴纹<sup>1,2</sup>,任露泉<sup>1</sup>,刘先黎<sup>1</sup>,张广城<sup>2</sup>,张志辉<sup>1</sup>

(1. 吉林大学 工程仿生教育部重点实验室,长春 130022; 2. 长春工程技术学院,长春 130117)

**摘要:**为了探讨凹坑形态与纳米碳化硅/镍基复合镀层耦合表面的磨损性能,采用激光技术和电沉积技术制备了由凹坑形态和纳米碳化硅/镍基复合镀层构成的仿生耦合表面,并进行了摩擦和磨损试验。结果表明,仿生耦合表面的磨损性能高于单纯复合镀层的磨损性能;随着磨损载荷的增加和磨损时间的延长,试样表面磨损机制由以塑性磨损为主逐渐转变成以粘着磨损、磨粒磨损为主的磨损机制。

**关键词:**工程仿生学;仿生耦合;激光;纳米电沉积;复合镀层;磨损性能

**中图分类号:**TB17    **文献标志码:**A    **文章编号:**1671-5497(2012)01-0074-05

## Abrasion properties of coupling surface of bionic concave pits and nano-sized SiC/Ni composite coatings

GUO Yun-wen<sup>1,2</sup>, REN Lu-quan<sup>1</sup>, LIU Xian-li<sup>1</sup>, ZHANG Guang-cheng<sup>2</sup>, ZHANG Zhi-hui<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Bionic Engineering of Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130022, China;  
2. Changchun Institute of Engineering, Changchun 130117, China)

**Abstract:** Laser and electric deposition technologies were used to fabricate bionic coupling surfaces with concave pits morphology and nickel matrix nano-sized SiC/Ni composite coatings. The tribological properties of the bionic coupling surface were investigated by friction and abrasion experiments. Experimental results show that the wear resistance of the bionic coupling surfaces is better than the surface with composite coating only. As the wear load and time increase, the tribological mechanism of the samples transforms from plastic dominance to adhere abrasion and grain abrasion dominance.

**Key words:** engineering bionics; biological coupling; laser; nano-sized electric deposition; composite coating; wear property

土壤动物蝼蛄、蜣螂、穿山甲,潮间带贝类以及生活在沙漠地区的沙漠蜥蜴等体表对磨损具有与生俱来的耐磨能力。研究发现这些生物体表是

由非光滑形态和具有不同化学成分、组织结构的材料复合而成<sup>[1-5]</sup>。依据生物非光滑耐磨理论而进行的试验研究显示凹坑有利于提高材料表面耐

**收稿日期:**2011-04-27.

**基金项目:**国家潜在油气资源(油页岩勘探开发利用)产学研用合作创新项目;吉林省重大科技攻关项目(09ZDGG001).

**作者简介:**郭蕴纹(1975-),女,博士研究生,讲师. 研究方向:仿生科学与工程. E-mail:guoyunwen 115@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:工程仿生学.

E-mail:lqren@jlu.edu.cn

磨性能,而激光技术已被普遍用于制备凹坑形仿生非光滑表面<sup>[6]</sup>。

目前,仿生耐磨试验通常只考虑非光滑形态或改变材料表层成分、结构而对两者耦合后的耐磨性关注不足。激光加工制备非光滑凹坑单元体主要是利用激光束在材料表面的熔蚀效应,导致加工部位形状是中间为凹坑,四周为微凸肩<sup>[7]</sup>。如果试样表面单独采用激光加工技术制备按一定规律排列的非光滑凹坑单元体,则首先磨损的是非光滑凹坑单元体的凸肩部位,被剥落的凸肩不利于耐磨性的提高。另一方面研究结果显示,电沉积纳米碳化硅/镍基复合镀层具有良好的耐磨性,这是由于弥散分布到金属基镀层里的纳米碳化硅颗粒能够阻碍位错运动并形成位错环,导致复合镀层有较高的承载能力和耐磨性<sup>[8]</sup>。因此,本文把利用激光技术在材料表面制备的凹坑形仿生非光滑表面和电沉积纳米碳化硅/镍基复合镀层进行耦合,制备仿生耦合表面并研究其耐磨性能,为制备新型高耐磨表面提供新思路。

## 1 试样制备与试验方法

### 1.1 仿生凹坑形态的制备

采用 CT-200 II 数控激光雕刻机在尺寸为 40 mm×30 mm×20 mm 的 C1008(AISI)钢材表面制备类贝壳生物体表的凹坑形态。激光工艺参数为:光栅直径 2.0 μm;电流 180 mA;脉宽 1.20 ms;频率 3 Hz;填充间距 2 mm;x 方向和 z 方向的移动速度、快进速度、加速时间分别为 2.4 mm/s 和 5 mm/s、10 mm/s、0.1 s。用 XQ-2B 型金相试样抛光机对试样表面进行抛光处理,使用 1500# 金刚石砂纸表面抛光后再用 0.5 μm 的金刚石抛光膏抛光。抛光后试样分别在 KQ-100DB 型号数控超声波清洗机里用丙酮和去离子水进行超声处理 10 min。

### 1.2 纳米碳化硅/镍基复合电沉积镀层的制备

将 4 g/L 的纳米碳化硅(SiC)颗粒用少量去离子水润湿并用超声波搅拌 10 min 后加入表面活性剂(0.1 g/L 十二烷基硫酸钠+0.05 g/L 聚乙二醇辛基苯基醚)并用超声波分散 30 min,再将纳米微粒混合液加入到由 300 g/L 硫酸镍(NiSO<sub>4</sub>)、40 g/L 氯化镍(NiCl)和 35 g/L 硼酸(H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>)组成的澄清水溶液中继续用超声波搅拌 1 h。溶液的 pH 值为 4.0。电沉积工艺参数为:阴极电流密度为 3 A/dm<sup>2</sup>;搅拌速度为 350 r/min;沉积温度为 30 ℃。阳极材料为电解镍板。

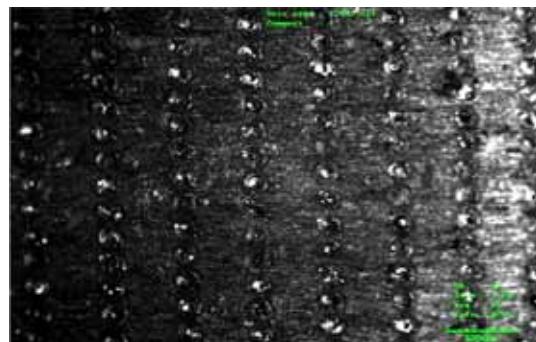
### 1.3 组织结构表征与性能测试

采用日本理学 D/max 2500PC 型 X 射线衍射仪(XRD)(Cu Ka)对试样表面进行物相分析和晶粒尺寸测定,其扫描速度为 4°/min;使用奥林巴斯 OLS3000 型激光共聚焦显微镜(LSCM)对凹坑直径、凹坑之间的横向与纵向间距进行测定;使用日本电子株式会社 JEOL200-CX 型透射电子显微镜(TEM)对 SiC 颗粒尺寸进行测定;采用 MG-2000 型高温高速磨损试验机对试样表面进行干摩擦磨损试验。对磨材料选用硬度为 55 HRC 的 GCr15 钢;通过日本电子 JSM-5500LV 型扫描电镜(SEM),对试样磨损表面的微观形貌进行观察和分析;使用 EDAX-Falcon 能谱仪(EDS)对镀层表面成分进行测定。

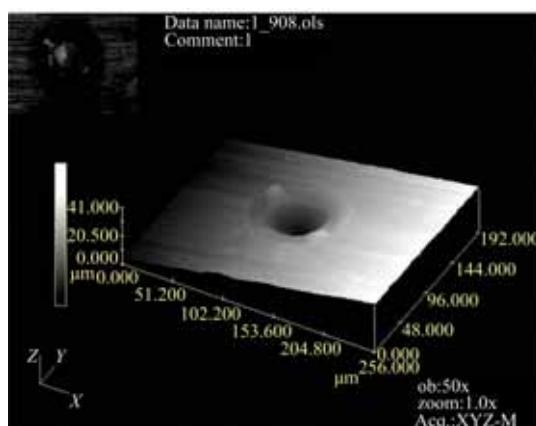
## 2 试验结果与分析

### 2.1 表面凹坑尺度确定和微观组织表征

图 1 为采用激光加工技术在光滑 C1008 钢表面制备的凹坑的激光共聚焦显微镜扫描照片。



(a)凹坑二维照片



(b)单个凹坑三维照片

图 1 凹坑的激光共聚焦显微镜扫描照片

Fig. 1 CLSM micrograph

由图可以确定,凹坑直径大约为  $50 \mu\text{m}$ 。通过测定可知:凹坑之间横向间距大约为  $320 \mu\text{m}$ ,纵向间距大约为  $160 \mu\text{m}$ 。

图 2 为纳米 SiC 颗粒透射电子显微镜照片,由图可以测定纳米 SiC 颗粒平均尺寸为  $50 \text{ nm}$ 。图 3 为电沉积纳米 SiC/Ni 基复合镀层表面 X 射线图谱,可以清楚看出, Ni 的(111)和(200)衍射峰和 SiC 的(002)、(101)和(110)衍射峰。与 Ni 的衍射峰强度相比,SiC 的衍射峰强度非常低,这是由于纳米 SiC 颗粒被金属 Ni 包裹和 SiC 颗粒不带电荷而不易被吸附所导致的。从 XRD 图谱上无法确定复合镀层的成分含量。图 4 显示镀层中  $\omega(\text{Ni})=98.57\%$ (原子百分比为 97.06%) 和  $\omega(\text{Si})=1.43\%$ (原子百分比为 2.94%)。

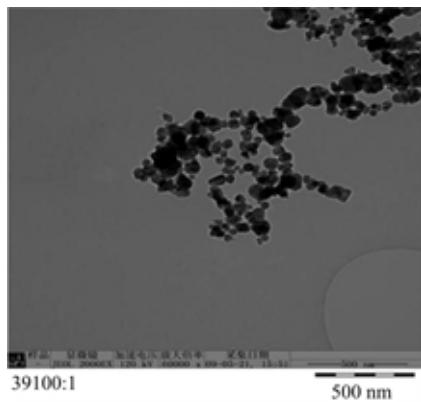


图 2 纳米 SiC 颗粒透射电子显微镜照片

Fig. 2 TEM microstructure of nano-sized SiC particles

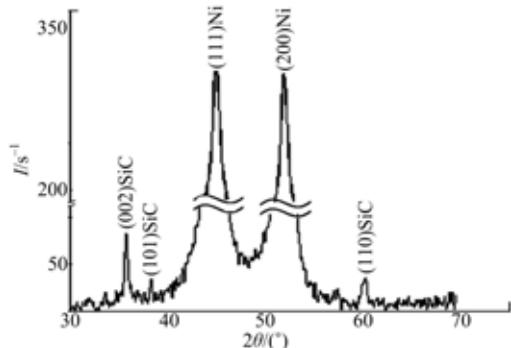


图 3 纳米 SiC/Ni 基复合电沉积镀层的 XRD 图谱

Fig. 3 XRD analysis of nano SiC/Ni matrix composite electrodeposition coating

在电场力作用下,均匀分散在镀液里的纳米颗粒能够与金属离子共同沉积到阴极表面形成复合镀层<sup>[9]</sup>。根据 SEM(图 6~图 8 镀层区)和 XRD,可知纳米 SiC/Ni 基复合电沉积镀层表面是由平均尺寸为  $25 \mu\text{m}$  的 Ni 团聚体包裹 SiC 颗

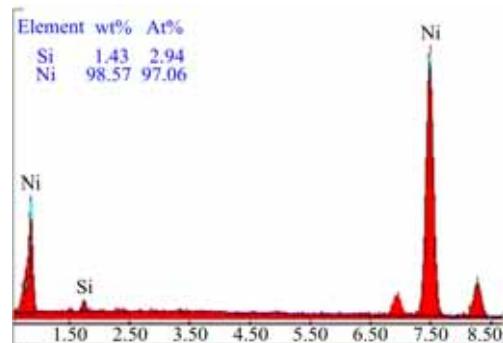


图 4 纳米 SiC/Ni 基复合电沉积镀层表面的能谱图

Fig. 4 EDX micrograph of nano SiC/Ni matrix composite electrodeposition coating

粒而组成的,并且在 SEM 上没有发现凹坑形态,这说明了复合电沉积镀层已经完全覆盖了激光加工所形成的凹坑。

## 2.2 表面磨损性能

图 5 为对磨轮转速  $200 \text{ r/min}$  和试验载荷分别为  $20$ 、 $30$ 、 $40 \text{ N}$  条件下,试样表面磨损量与磨损时间的关系曲线。曲线变化趋势显示:随着磨损载荷的增加,磨损量逐渐增加;随着磨损时间的延长,磨损量并不是呈现简单的线形变化。当磨损时间低于  $2 \text{ min}$  时,试样表面磨损量随磨损时间延长而增加;当磨损时间超过  $2 \text{ min}$  时,单位时间磨损量( $\text{g}$ )低于前  $2 \text{ min}$  内单位时间磨损量;在不同磨损载荷作用下,随磨损时间改变的磨损量曲线的变化趋势相同。曲线上不同的单位时间磨损量变化可能是由于磨损初期主要以纳米 SiC/Ni 基复合电沉积镀层磨损为主和凹坑磨损为辅的耦合磨损导致的;而磨损  $2 \text{ min}$  以后的磨损可能是以凹坑磨损为主和复合镀层磨损为辅的耦合磨损导致的。在  $20$ 、 $30$ 、 $40 \text{ N}$  载荷作用下,磨损的前  $2 \text{ min}$  的平均单位时间磨损量比磨损  $2 \text{ min}$  后的平

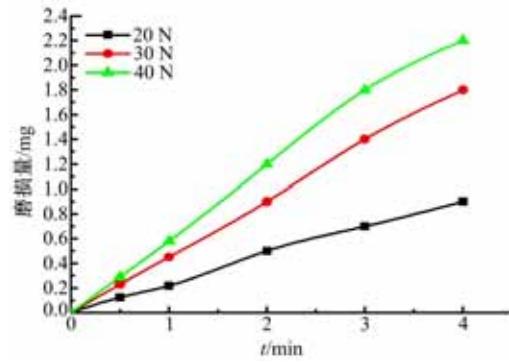
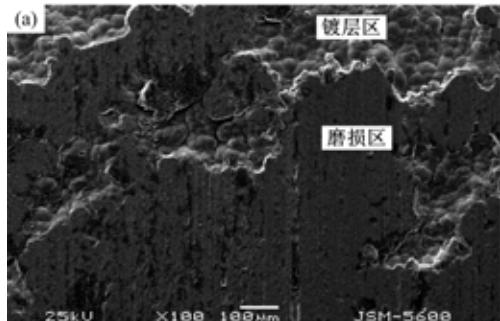


图 5 试样表面磨损量与磨损时间的关系曲线

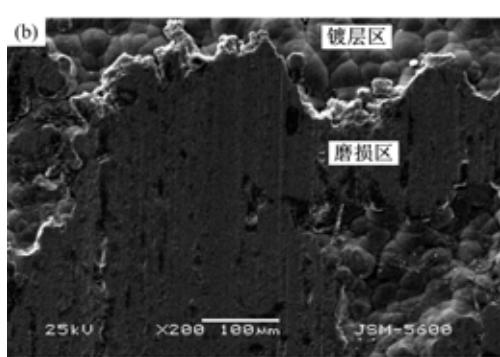
Fig. 5 Relationship between wear weight loss and wear time

均单位时间磨损量分别降低 25%、10% 和 18% 左右。这一方面说明了凹坑与复合镀层耦合的磨损性能要高于单纯复合镀层的磨损性能,另一方面也说明了仿生凹坑形态有助于提高材料表面的抗磨损性能。从图 5 可以看出,最大磨损量为 2.2 mg。

由图 6 可以观察到,在磨损载荷为 20 N 和磨损时间为 0.5 min、1.5 min 条件下,磨损初期没有发生粘着磨损现象,而是发生了剥落磨损现象。这可能是由于 Ni 包裹 SiC 颗粒团聚体发生塑性变形导致的,同时也说明了 Ni 与 SiC 颗粒之间具有较好的结合强度。因此,磨损初期属于塑性变形剥落磨损机制。



(a) 0.5 min

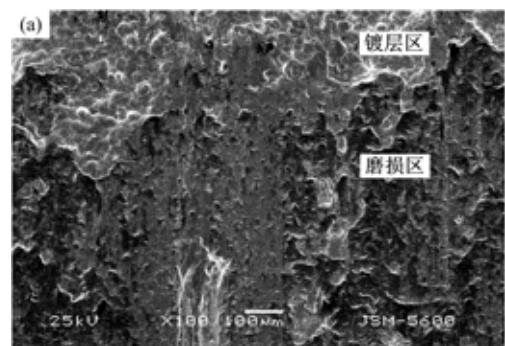


(b) 1.5 min

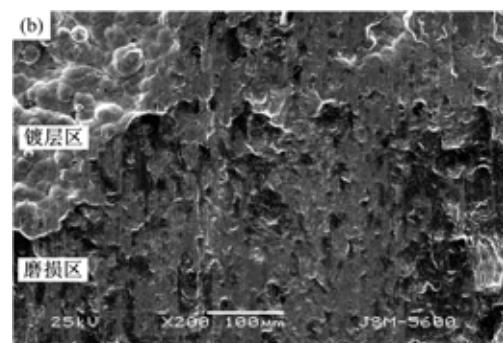
图 6 磨损载荷为 20 N 的磨损扫描电子照片

Fig. 6 SEM micrographs of wear in load 20 N

由图 7 可以观察到,在磨损载荷为 30 N 和磨损时间为 2.0 min、2.5 min 条件下,磨损区域出现了大量凸起,这可能是由于磨损载荷和磨损时间的增加导致 SiC 颗粒突出所形成的。同时也说明了复合镀层中纳米 SiC 颗粒没有以纳米颗粒形式分散在镀层中,而是以微团聚体形式分散在镀层中。因此,这个阶段出现了由于 SiC 颗粒团聚体与对磨材料之间相互作用而产生的粘着磨损现象,属于粘着磨损机制。由图 8 可知,在磨损载荷



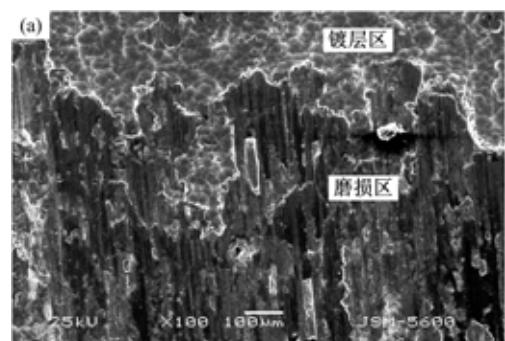
(a) 2.0 min



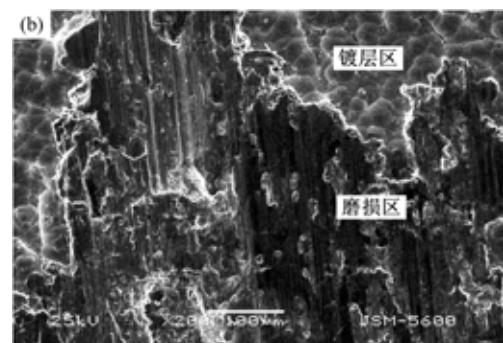
(b) 2.5 min

图 7 磨损载荷为 30 N 的磨损扫描电子照片

Fig. 7 SEM micrographs of wear in load 30 N



(a) 30 min



(b) 35 min

图 8 磨损载荷为 40 N 的磨损扫描电子照片

Fig. 8 SEM micrographs of wear in load 40 N

为40 N和磨损时间为3.0 min、3.5 min条件下,磨损区域出现了明显的犁沟,这可能是由于磨损载荷和磨损时间的进一步增加导致SiC颗粒团聚体脱落所形成的磨粒磨损导致的。

从所有磨损试样表面和磨屑表面没有发生颜色变化现象可知,磨损过程中没有发生氧化磨损。图6~图8分析结果可知,随着磨损载荷的增加和磨损时间的延长,试样表面被磨损的机制发生了变化,逐渐由以塑性磨损为主的磨损机制转变到以粘着磨损、磨粒磨损为主的磨损机制。

### 3 结 论

(1)利用激光技术和电沉积技术制备了具有凹坑形态与纳米碳化硅/镍基复合镀层构成的仿生耦合表面。

(2)试验结果显示:仿生凹坑与纳米碳化硅/镍基复合镀层耦合表面的磨损性能要高于单纯复合镀层或单纯凹坑表面的磨损性能。

(3)耦合表面磨损机理分析显示:磨损初期以塑性变形剥落磨损机制为主,然后逐渐转变为以磨粒磨损、粘着磨损为主的磨损机制。

### 参考文献:

- [1]任露泉,张成春,田丽梅.仿生非光滑用于旋成体减阻的试验研究[J].吉林大学学报:工学版,2005,35(4):431-436.  
Ren Lu-quan, Zhang Cheng-chun, Tian Li-mei. Experimental study of drag reduction for bodies of revolution using bionic non-smoothness[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2005, 35(4): 431-436.
- [2]Ren L Q. Progress in the bionic study on anti-adhesion and resistance reduction of terrain machines[J]. Sci China Ser E-Tech Sci, 2009, 52(2):273-284.
- [3]邓宝清,任露泉,苏岩,等.模拟活塞缸套摩擦副的仿生非光滑表面的摩擦学的研究[J].吉林大学学报:工学版,2004,34(1):78-82.  
Deng Bao-qing, Ren Lu-quan, Su Yan, et al. Tribological study on bionically unsmoothed surface modeling piston cylinder friction pair[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2004, 34 (1) : 78-82.
- [4]Liang Y H, Huang H, Li X J, et al. Fabrication and analysis of the multi-coupling bionic wear-resistant material[J]. Journal of Bionic Engineering, 2010 (Suppl.):24-29.
- [5]Lu Y X. Significance and progress of bionics[J]. J Bionic Eng, 2004,1(1):1-3.
- [6]任露泉,王再审,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.  
Ren L Q, Wang Z Z, Han Z W. Experimental research of sliding wear on bionic non-smooth surface [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2003,34(2):86-88.
- [7]杨卓娟,韩志武,任露泉.激光处理凹坑形仿生非光滑表面试件的高温摩擦磨损特性研究[J].摩擦学报,2005,25(4):374-378.  
Yang Z J, Han Z W, Ren L Q. Friction and wear behavior of bionic non-smooth surfaces at high temperature[J]. Tribology, 2005,25(4):374-378.
- [8]Gyftou P, Stroumbouli M, Pavlatou E A. Tribological study of Ni matrix composite coatings containing nano and micro SiC particles[J]. Electrochimica Acta, 2005,50:4544-4550.
- [9]Zimmerman A F, Clark D G, Aust K T, et al. Pulse electrodeposition of Ni-SiC nanocomposite[J]. Materials Letters, 2002,52:85-90.