

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.S0.051

毛蚶壳形态/材料耦合仿生表面耐冲蚀性能试验*

张成春¹ 李雪丽¹ 张春艳¹ 章甘¹ 王现宝¹ 王晶^{1,2}

(1. 吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130025; 2. 吉林大学农学部公共教学中心, 长春 130062)

摘要: 基于毛蚶壳的表面形态特征、软硬相间的硬度分布特征, 设计了形态/材料二元耦合仿生模型, 试验研究了影响耦合仿生表面耐冲蚀磨损性能的主次因素和最优组合。试验磨料选用 80~140 目的石英砂与水的混合物, 磨损时间为 30 h, 倾斜角度为 30°, 试样转速为 1 400 r/min。试验结果表明, 经激光合金化、激光相变硬化处理的光滑试样、单元形态仿生试样和形态/材料耦合仿生试样的耐冲蚀磨损性能与光滑试样相比均有提高, 形态/材料耦合仿生试样的耐磨性最好。影响耦合仿生表面耐冲蚀磨损性能的主次因素依次为激光表面强化技术、振幅、周期和条纹方向, 耦合试样经激光合金化处理、振幅为 3 mm、周期为 10 mm、条纹方向为法向时具有最优的耐冲蚀磨损性能。

关键词: 工程仿生学 仿生耦合 冲蚀 正交试验设计

中图分类号: TB17 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)S0-0314-05

引言

冲蚀磨损是造成含固体粒子多相流工作介质装备失效的主要原因之一^[1-4]。国内外学者从改进设计、选用耐冲蚀磨损的材料、应用表面强化技术^[5-8], 在一定程度上提高了工作部件的耐冲蚀性能。但是, 流场变化剧烈的部位仍不可避免地受到固体颗粒的连续冲刷, 造成了金属材料表面严重损坏。

近年来, 仿生学耐冲蚀磨损的研究作为一种解决冲蚀磨损的新方法被众多研究者重视^[9-10]。仿生学研究表明, 生物对其生存环境的适应性是通过其自身多个因素的耦合实现的^[11-12]。生活在泥沙环境中的贝类, 在长期经受海水潮汐冲蚀的过程中, 进化了适合其生存环境的特殊表面。本文进行毛蚶壳的仿生研究, 建立形态/材料二元耦合仿生模型, 并通过试验研究其耐冲蚀性能, 确定影响耦合仿生表面耐冲蚀磨损性能的主次因素和最优组合。

1 形态/材料二元耦合仿生模型

1.1 毛蚶壳表面特征曲线提取

采集活体毛蚶样本, 取壳并清洗掉表面杂质, 置于盛有丙酮的烧杯中, 静置 20 min 取出, 用软毛刷顺着棱纹方向将绒毛去掉, 再用清水洗净、晾干, 用 dpt-5 显影剂对毛蚶表面进行着色处理。

应用柯尼卡美能达 VIVID910 型三维激光扫描

仪, 获取贝壳表面三维点云数据, 应用 Geomagic studio 对点云数据进行曲面重构。图 1 所示为贝壳表面三维点云数据。观察发现, 贝壳表面棱纹从两片贝壳结合处向前端辐射, 棱纹尺寸从小至大过渡时曲面光滑。因此, 研究曲面特征曲线时, 可取典型位置作为研究样本。本文取贝壳偏前端位置(图 2)表面轮廓线进行曲线拟合, 得方程

$$y = 0.26\sin(0.299x + 0.699) + 0.254\sin(1.77x - 0.75) \quad (1)$$

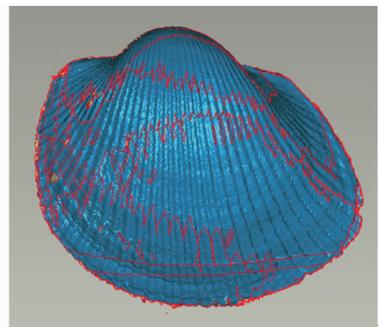


图 1 贝壳表面三维点云数据

Fig. 1 Three-dimensional point cloud of subcrenata shell

1.2 毛蚶壳表面硬度特征

用 IsoMet 4000 型精密切割机将毛蚶壳按图 3 所示的不同位置分割成小样, 测量毛蚶壳棱纹及沟槽内部的硬度。测量结果如图 4 所示。

从图 4 中可以看出, 毛蚶壳表面呈棱纹和沟槽交替软硬相间的结构, 棱纹处显微硬度均值显著大

收稿日期: 2014-06-28 修回日期: 2014-08-18

* 国家自然科学基金资助项目(U1134109, 51106062, 51206058)

作者简介: 张成春, 副教授, 主要从事仿生流动控制方法与技术研究, E-mail: jluzcc@jlu.edu.cn

通讯作者: 王晶, 副教授, 主要从事仿生流场控制技术, E-mail: ccwang@foxmail.com

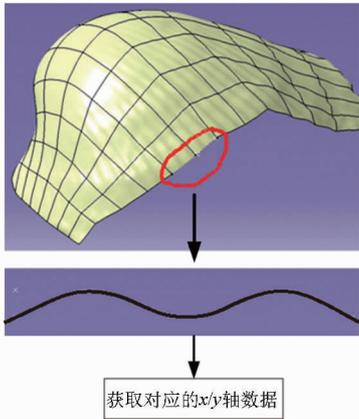


图2 贝壳表面截面曲线
Fig.2 Shell surface section curves

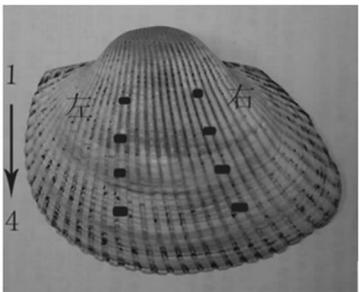


图3 毛蚶壳硬度测量区域

Fig.3 Hardness measurement area on subrenata shell

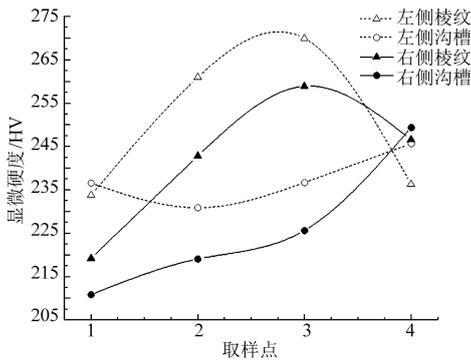


图4 贝壳表面显微硬度分布

Fig.4 Hardness distribution of subrenata shell surface

于沟槽处显微硬度均值。

2 仿生模型耐冲蚀性能试验优化

2.1 磨损试验设备

图5所示为试验所用的冲蚀磨损试验台。试验台的工作原理为：料浆箱中加入水和80~140目的石英砂，电动机启动后，带动旋转轴旋转，固定在旋转轴上的试样也开始随旋转轴一同旋转，旋转的试样表面撞击泥水中的砂粒，使砂粒具有一定的旋转速度。试样在旋转过程中撞击不同的固体粒子，造成冲蚀磨损。

2.2 试验方法

应用 $L_9(2^1 \times 3^3)$ 混合正交试验，分析耦合仿生

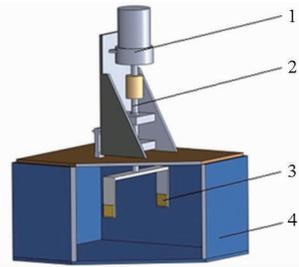


图5 磨损试验台

Fig.5 Equipment of erosion test

1. 电动机 2. 旋转轴 3. 试样 4. 料浆箱

表面处理方式对其耐冲蚀磨损性能的影响。试验因素分别为条纹方向、振幅、周期、表面处理方式。条纹方向定义如下：平行于试验样品转速的切线方向为切向，垂直于试验样品转速的切线方向为法向。各因素水平的确定还考虑了贝壳表面轮廓曲线方程，以及试验样品的尺寸和机械加工所能达到的精度，以及形态/材料二元耦合仿生表面的实现方式。表1所示是冲蚀磨损试验方案。

表1 冲蚀磨损试验方案

Tab.1 Experimental scheme of erosion wear

试验 序号	因素			
	条纹方向 A	振幅 B/mm	周期 C/mm	表面处理方式 D
1	1(切)	1(1)	1(10)	1(激光合金化)
2	1	2(2)	2(12)	2(激光相变硬化)
3	1	3(3)	3(14)	3(无激光处理)
4	1	1	2	3
5	1	2	3	1
6	1	3	1	2
7	2(法)	1	3	2
8	2	2	1	3
9	2	3	2	1

2.3 试验样件的制备

试样材料选取45号钢，试样尺寸(长×宽×高)为60 mm×40 mm×10 mm。根据毛蚶壳表面轮廓曲线模型，采用线切割方法在试样上制备出形态仿生试样，如图6所示。

应用激光表面强化技术^[13-15]制备形态/材料耦合仿生表面，在形态仿生试样上实现试样表面具有贝壳表面硬度分布特征。加工设备选用JHM-1GY-300B型激光器加工机，激光表面强化各参数依经验选取为最大功率1.2 kW，脉宽10.0 ms，工作频率5.0 Hz，预设单点能量6.00 J。

考察了激光相变硬化技术和激光合金化技术2种方式。激光相变硬化技术仅在形态仿生试样上应用激光束迅速加热棱纹表面，达到或超过相变温度时移开激光束，材料表面迅速冷却，使材料表面硬化，从而实现激光相变硬化过程。激光合金化处理

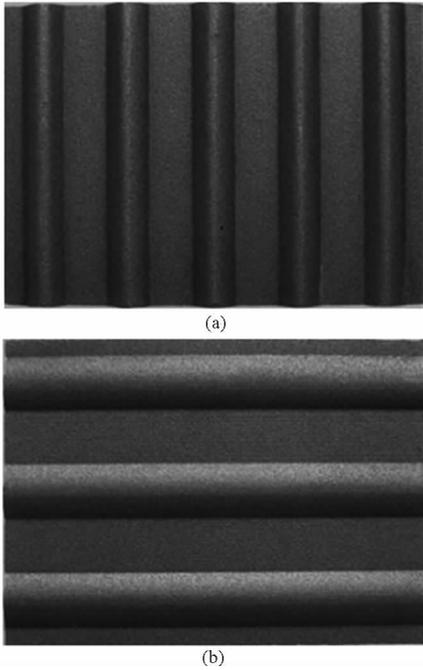


图6 形态仿生模型试样

Fig.6 Samples of bionic model inspired by morphology

(a) 棱纹与粒子流向平行 (b) 棱纹与粒子流向垂直

是在激光加工之前在形态仿生试样棱纹表面涂覆金属锰涂层。具体操作:将环氧树脂与固定剂按一定比例混合,加入金属锰粉,搅拌均匀呈膏状,用毛刷均匀的涂覆在棱纹表面,并将其放入60℃的干燥箱中静置2h后取出。然后利用激光器系统产生的高能激光束使涂层中的锰材料与基体材料相互熔凝,形成具有较高硬度的合金层。

经过激光相变硬化处理和激光合金化技术处理后的模型如图7所示。

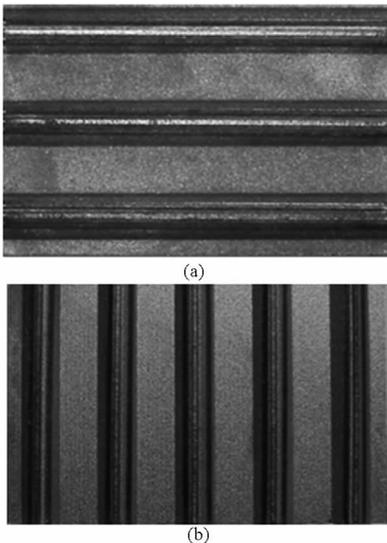


图7 形态/材料耦合仿生模型试样

Fig.7 Samples of bionic coupling model inspired

by morphology and material

(a) 激光相变硬化处理方式 (b) 激光合金化处理方式

将仿生试验样件、光滑样件、经激光合金化、激光相变硬化处理的光滑试样依次固定于试验台上,保证每次试验条件相同。每个试验样件冲蚀磨损时间为30h,倾斜角度为30°,试样转速为1400r/min。因为磨损时间较长,每隔4h检查电动机是否正常运转、磨料是否板结、试样边缘是否有磨料粘附等情况。

2.4 试验结果

在试验前将试样置于JP-010型超声波清洗机中清洗干净,吹干后放置于FA114型电子天平上称量,记录试验前试样的质量(g)。每组试验完成后,对试样进行清洗,首先用稀盐酸擦拭干净,随后放入无水乙醇中超声波清洗,吹干后称量,记录冲蚀磨损试验后试样的质量(g),即可得每个试样的质量损失 W_B ,与光滑试样质量损失 W_S 相比得到该试样的相对磨损率为

$$E_w = W_B / W_S$$

图8所示是不同试样的相对磨损率,其中,10号和11号试验,分别为经激光合金化、激光相变硬化处理的光滑试样的磨损试验。显然,各个仿生试验均起到了增加冲蚀磨损性能的作用。

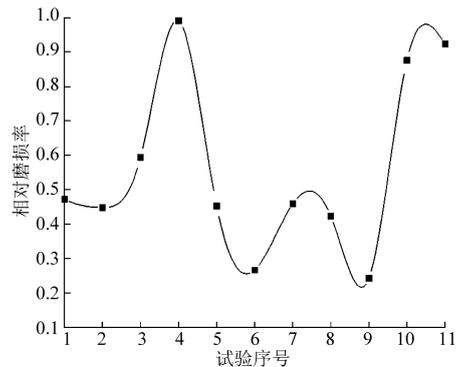


图8 不同仿生试样的相对冲蚀磨损率

Fig.8 Relative erosion wear rate of different bionic samples

表2所示是试验极差分析结果。表面处理方式是影响仿生耦合试样耐冲蚀磨损性能的主要因素,激光合金化处理的试样耐冲蚀磨损最佳;次要因素为振幅,振幅为3mm时最优;第3影响因素为周期,周期为10mm的耦合试样的耐冲蚀性能较佳;最主要因素为条纹方向,最优水平为法向方向。试验的最优组合为 $A_2B_3C_1D_1$,即当耦合试样条纹方向为法向,振幅为3mm、周期为10mm、激光表面强化技术为激光合金化处理技术耦合试样具有最优的耐冲蚀磨损性能。 $\bar{y}_{41} \approx \bar{y}_{42} < \bar{y}_{43}$,说明耦合仿生试样的相对磨损率小于单元形态仿生试样的相对磨损率。可知耦合仿生试样、单元形态仿生试样与光滑试样的耐冲蚀磨损性能依次减弱。条纹方向试验因素中 $\bar{y}_{11} > \bar{y}_{12}$,

表2 正交试验方案及数据处理

Tab.2 Orthogonal experiments and data processing

试验 序号	试验方案				E_w
	A	B	C	D	
1	1	1	1	1	0.472 6
2	1	2	2	2	0.448 5
3	1	3	3	3	0.594 4
4	1	1	2	3	0.991 8
5	1	2	3	1	0.453 5
6	1	3	1	2	0.267 3
7	2	1	3	2	0.459 3
8	2	2	1	3	0.422 9
9	2	3	2	1	0.243 4
\bar{y}_{j1}	0.538 0	0.641 2	0.387 6	0.389 8	主次因素:
\bar{y}_{j2}	0.377 2	0.441 6	0.561 2	0.391 7	D、B、C、A
\bar{y}_{j3}		0.368 4	0.502 4	0.669 7	最优组合:
R_j	0.160 8	0.272 8	0.173 6	0.279 9	$A_2B_3C_1D_1$

表明切向条纹仿生试样的相对磨损率大于法向条纹仿生试样的相对磨损率,即当条纹方向与粒子冲击

方向垂直时试样的耐磨性能较好。

3 结论

(1)毛蚶壳表条纹截面特征曲线符合三角函数关系,呈现棱纹和沟槽交替软硬相间分布特征。

(2)经激光合金化、激光相变硬化处理的光滑试样、单元形态仿生试样和形态/材料耦合仿生试样的耐磨性能与光滑试样相比均有提高,其中形态/材料耦合仿生试样的耐冲蚀性能最佳。

(3)法向条纹仿生试样、切向条纹仿生试样和光滑表面试样的耐磨性能依次减弱,即当条纹方向与粒子冲击方向垂直时试样的耐磨性能较好。影响耦合仿生表面耐冲蚀磨损性能的主次因素依次为激光表面强化技术、振幅、周期和条纹方向,耦合试样经激光合金化处理、振幅为3 mm、周期为10 mm、条纹方向为法向时具有最优的耐冲蚀磨损性能。

参 考 文 献

- 1 许洪元,卢达熔,罗先武,等.离心式渣浆泵叶轮磨损规律研究[J].摩擦学学报,1998,18(3):248-253.
Xu Hongyuan, Lu Darong, Luo Xianwu, et al. Study on abrasive wear rule of impeller of centrifugal slurry pump[J]. Tribology, 1998, 18(3): 248-253. (in Chinese)
- 2 刘小兵,张礼达.含沙水流对水轮机导叶部件磨损的数值模拟[J].水力发电学报,1995,51(4):56-66.
Liu Xiaobing, Zhang Lida. Numerical prediction of wear of hydraulic turbine gate vane by sandy water[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 1995, 51(4): 56-66. (in Chinese)
- 3 Walker C I, Bodkin G C. Empirical wear relations hips for slurry pump part I side-liners[J]. Wear, 2000, 242(1-2): 140-146.
- 4 王志高.我国水机磨蚀的现状和防护措施的进展[C]//中国水力发电工程学会2002年国内外水轮机抗腐蚀涂层研讨会论文集,2002:13-18.
- 5 Razzak S A, Barghi S, Zhu J X. Application of electrical resistance tomography on liquid-solid two-phase flow characterization in an LSCFB riser[J]. Chemical Engineering Science, 2009, 64(12): 2851-2858.
- 6 Gandhi B K, Singh S N. Study of the parametric dependence of erosion wear for the parallel flow of solid-liquid mixtures [J]. Tribology International, 1999, 32(5): 275-282.
- 7 Gandhi B K, Borse S V. Nominal particle size of multi-sized particulate slurries for evaluation of erosion wear and effect of fine particles[J]. Wear, 2003, 257(1): 73-79.
- 8 Wen D C. Erosion and wear behavior of nitrocarburized DC53 tool steel[J]. Wear, 2009, 268(3): 629-636.
- 9 Baumgartner W, Saxe F, Weth A, et al. The sand fish's skin: morphology, chemistry and reconstruction[J]. Journal of Bionics Engineering, 2007, 4(1): 4-12.
- 10 Tian X M, Han Z W, Li X J, et al. Biological coupling anti-wear properties of three typical molluscan shells—*Scapharca subcrenata*, *Rapana venosa* and *Acanthochiton rubrolineatus*[J]. Science China Technological Sciences, 2010, 53(11): 2905-2913.
- 11 Ren L Q, Liang Y H. Biological couplings: classification and characteristic rules[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2009, 52(10): 2791-2800.
- 12 弯艳玲,丛茜,王晓俊,等.蜻蜓翅膀表面疏水性耦合机制[J].农业机械学报,2009,40(9):205-208.
Wan Yanling, Cong Qian, Wang Xiaojun, et al. Coupling mechanism of hydrophobicity of dragonfly wing surface [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(9): 205-208. (in Chinese)
- 13 左铁钊,施定远,陈铠.激光加工技术的优势及在工业生产中的应用[J].激光杂志,1999,26(4):8-9.
Zuo Tiechuan, Shi Dingyuan, Chen Kai. Advantage of the laser processing technology and the application in industry[J]. Laser Journal, 1999, 26(4): 8-9. (in Chinese)
- 14 Altus E, Konstantino E. Optimum laser surface treatment of fatigue damaged Ti-6Al-4V alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2001, 302(1): 100-105.

- 15 Ruschau J J, John R. Fatigue crack nucleation and growth rate behavior of laser shock peened titanium[J]. *International Journal of Fatigue*, 1999, 21 (Supp.) : 199 – 209.

Experiments on Erosion Resistance of Bionic Surface with Coupling Characteristics of Material and Morphology Inspired by Scapharca Shell

Zhang Chengchun¹ Li Xueli¹ Zhang Chunyan¹ Zhang Gan¹ Wang Xianbao¹ Wang Jing^{1,2}

(1. *Key Laboratory of Bionic Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130025, China*

2. *Teaching Center of Basic Course, Faculty of Agriculture, Jilin University, Changchun 130062, China*)

Abstract: Based on the characteristics of morphology and hardness distribution of scapharca shell surface, a bio-inspired model of the material coupled with pattern was proposed. The major and minor relationship and optimal combination of the main factors which affected the erosion resistance of the bio-inspired surface was obtained through experiments. Erosion resistant tests were carried out under the following test conditions: abrasive was the compound of silica sand of 80 ~ 140 mesh size and water; wear time was 30 h; and the rotating speed of 1 400 r/min. Compared with the smooth testing samples, the erosion resistance of the smooth testing sample of alloying with laser, the smooth one of laser hardening, the bio-inspired model with the non-smooth pattern and the bio-inspired model of the material coupled with pattern can improve the anti-erosion performance of the samples surface. The bio-inspired model of the material coupled with pattern was the best one among all the testing samples. The order of major and minor factors affecting the relative wear rate of samples was laser hardening, amplitude, periodic and the stripe direction. Results showed that the testing sample with optimal anti-erosion performance was the one with laser surface strengthening, amplitude of 3 mm, period of 10 mm and the direction of the stripes normal to the flow direction of particles.

Key words: Bionic engineering Bionic coupling Erosion Orthogonal experimental design

(上接第 313 页)

Application Research of Solar Forage Drying Air Collector Automatic Tracking System

Du Jianqiang¹ Zhang Junguo¹ Guo Zhiping² Shi Wenbin³

(1. *Huhhot Branch, Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Huhhot 010010, China*

2. *College of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Huhhot 010051, China*

3. *Inner Mongolia Power (Group) Co., Ltd., Huhhot 010020, China*)

Abstract: A sun-tracking system was developed in order to improve the collection efficiency of solar air collector and receive more solar energy. Several main tracking modes were briefly introduced. The passive-tracking mode was likely to be perplexed by weather condition and the active-tracking mode could not avoid the cumulative error. A single-axe automatic tracking mode which combined active-tracking mode and passive-tracking mode was presented. The proposed combined mode overcame the shortcomings of the two modes. Experiments showed that this system works with high precision, good stability and little loss of solar energy. Automatic tracking system could make the collector outlet temperature increased an average of 15°C, so that the collector efficiency was improved.

Key words: Solar Heat collector Sun-tracking Forage Dry