

新疆岩蜥三元耦合耐冲蚀磨损特性及其仿生试验

高峰, 黄河, 任露泉

(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:选取新疆岩蜥为典型动物,以形态、结构、材料作为因素设计仿生耦合试样,通过喷砂试验检验耦合试样表面的冲蚀磨损特性。喷砂试验选用粒径为 $1000\ \mu\text{m}$ 的 Al_2O_3 颗粒为磨料,对 LY12 硬铝合金与 45# 钢为基底的仿生耦合试样进行试验。结果表明,在冲蚀时间为 180 s,入射角为 30° ,入射距离为 200 mm,空气压力为 0.4 MPa 条件下,耦合试样耐冲蚀磨损性能较对照试样提高 18.7%。耦合试样特征因子最优组合为以 LY12 硬铝合金为基底材料,非光滑单元形态的形状为圆形凹坑、直径为 3 mm,单元间距为 6 mm 的规则分布,表面涂层 ($\text{Al}_2\text{O}_3 + 13\% \text{TiO}_2$) 厚度为 $100\ \mu\text{m}$ 。

关键词:仿生学;仿生耦合;新疆岩蜥;冲蚀磨损;正交试验设计

中图分类号: TB17 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-5497(2008)03-0586-05

Erosive wear resistance of *Laudakin stoliczkana's* ternary coupling and bionic experiments

Gao Feng, Huang He, Ren Lu-quan

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

Abstract: Taking *Landakin stoliczkana* as the reference animal, ternary bionic coupling samples were designed according to the orthogonal design of experiment involving the morphology, the surface structure, and the material as test factors. The samples were made on the substrate of the hard aluminum alloy LY12 or the steel 45# with wear-resistant coating. The erosive wear resistances of the samples were investigated by the sand blast test using the Al_2O_3 sand with partial size of $1000\ \mu\text{m}$ as the erodent. The results indicated that the erosive wear resistance of the coupling sample with pitting structure is 18.7% higher than that of the sample without pits under the following test conditions: erosive time duration 180 s, sand impact angle 30° , impact distance 200 mm, blast air pressure 0.4 MPa. The optimal combination of the coupling sample characteristic factors are: hard aluminium alloy LY12 as the substrate, the morphology of the non-smooth units is the regularly distributed rotundity pit with diameter 3 mm and spacing 6 mm, the coating is $\text{Al}_2\text{O}_3 + 13\% \text{TiO}_2$ with thickness of $100\ \mu\text{m}$.

Key words: bionics; bionic coupling; *Laudakin stoliczkana*; erosive wear; orthogonal design of experiment

收稿日期: 2007-07-09.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50635030).

作者简介: 高峰(1976-),男,博士研究生. 研究方向: 工程仿生学. E-mail: gfyylcn@yahoo.com.cn

通讯联系人: 任露泉(1944-),男,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

冲蚀磨损是造成机器及零部件失效的重要原因之一。严重的冲蚀磨损能使设备的寿命缩短66%~90%,产生严重的事故隐患。目前提高机械部件耐冲蚀磨损的方法主要有:烧结金属氧化物和铝粉增强材料;表面磨加工的电化学柔性制造技术;激光熔覆纳米材料表面改性等^[1-4]。以上方法均以提高零件表面硬度为目标,并未考虑零件表面的微结构与微形态以及多种因素的耦合作用对其耐冲蚀磨损性能的影响。

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^[4-9]。如自然界中有着优异的耐磨性能的沙漠蜥蜴为适应风沙环境,其体表进化出了多层结构的皮肤,紧密嵌合并呈覆瓦状排列的鳞片及鳞片表面的微结构,显著提高了其体表的耐风沙冲蚀性能。生物体这种两个或者两个以上的不同体系(系统/特征等),通过相互作用联合起来形成独特的功能,称为生物耦合作用。作者选取新疆岩蜥(*Laudakin stoliczkana*)为研究对象,将生物耦合思想应用到提高材料表面的抗冲蚀磨损性能的研究,通过对仿生耦合试样的喷砂试验,分析多因素耦合作用对试样冲蚀磨损的影响,试图找到提高零件抗冲蚀磨损性能的方法。

1 试验材料与方法

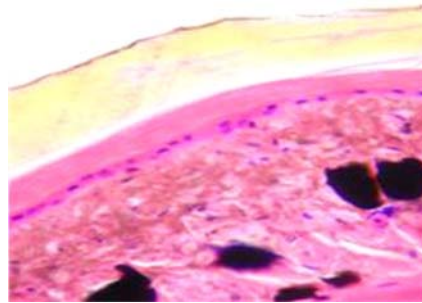
1.1 试验仪器和材料

试验动物为新疆岩蜥(*Laudakin stoliczkana*),采集于新疆乌鲁木齐。喷砂试验机动力空气压力范围为0.4~0.8 MPa,磨料采用莫氏硬度为9的棱角棕刚玉颗粒,平均粒径为1000 μm 。等离子喷涂设备为Praxair Tafa 3710(Praxair Surface Technologies, Tafa),等离子喷涂原料为 Al_2O_3 (13% TiO_2),粒度为45~75 μm 。耦合试样材料分别为LY12硬铝合金与45#钢。称量设备选用GB204型电子分析天平(瑞士Mettler Toledo公司),感量为0.0001 g。采用Stereo Discovery V12(德国Carl Zeiss)体式显微镜和日本电子株式会社(JEOL)JXA-840型扫描电子显微镜进行图像采集。

1.2 仿生耦合试样的设计

新疆岩蜥其背部表皮结构染色见图1(a),由外至内分别为角皮层、 β -角质层、中层、 α -角质层、中间层和基底层,形成了由硬及软的多层复合材料结构;其背部鳞片通过排列形成了一定的宏观

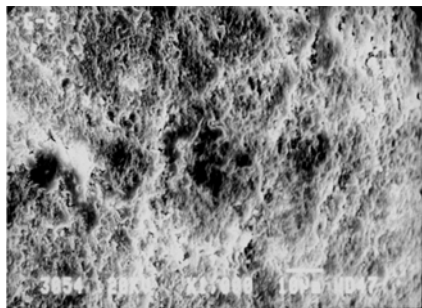
非光滑结构,表现为垂直于行进方向的凹槽形态,如图1(b)所示;扫描电子显微镜照片显示新疆岩蜥背部鳞片上还存在微米级的孔洞结构,如图1(c)所示。综上所述,新疆岩蜥其体表的耐冲蚀磨损特性是由其皮肤的多层结构,鳞片上微米级孔洞形态和鳞片间形成的非光滑凹槽形态与多层梯度材料的耦合结果,有效减少了沙粒对体表的冲蚀磨损^[10,11]。



(a) HE染色切片



(b)背部体式显微镜照片



(c)背部鳞片SEM照片

图1 新疆岩蜥背部鳞片的表面形态及多层皮肤结构

Fig. 1 The surface configuration and the skin structure of *Laudakin stoliczkana*

仿生耦合试样(图2)直径 $\varnothing=35$ mm,高度 $H=10$ mm,抛光后在PU-6400型雕刻机上加工凹坑型非光滑结构。因为新疆岩蜥体表的非光滑形态存在方向性,即垂直于行进方向的凹槽,这种结构可以进行去方向性简化,简化为规则排列的

凹坑,再使用等离子喷涂的方法在加工好的非光滑结构的试样表面喷涂 $Al_2O_3-TiO_2$ 复合材料,由此构建出具有梯度复合材料结构的非光滑仿生耦合试样。

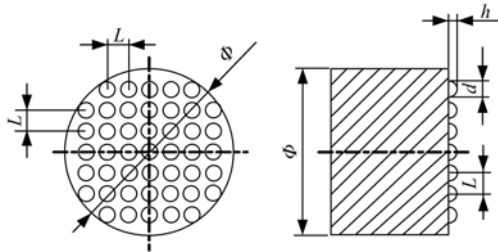


图 2 仿生耦合试样加工图

Fig. 2 bionics coupling tester design picture

1.3 试验方法

常温下,采用压缩空气携带磨料颗粒对试样表面进行冲蚀磨损,空气压力为 0.4 MPa,喷口距试样表面为 200 mm,冲蚀时间为 180 s。冲蚀磨损结果以重量法表示,试验结果表示为磨损量(A),测试指标 M_1, M_2 分别为磨损前与磨损后的试样质量。

$$A = M_1 - M_2$$

为了分析不同因素对冲蚀磨损的影响,找到最优组合,试验确定 Al_2O_3 复合涂层厚度,凹坑直径,凹坑间距与基底材料为试验因素,选用 $L_9(3^4)$ 正交表。对 9 个耦合试样(S_1, S_2, \dots, S_9)和一个光滑试样(S_0)分别进行 3 次试验,因素水平表如表 1。

表 1 模型试验因素水平表

Table 1 Factor-level table of orthogonal test design

水平	因素			
	A 涂层厚度	B 凹坑直径	C 凹坑间距	D 基底材料
	/μm	/mm	/mm	
1	50	2	4	LY12
2	100	3	5	45#钢
3	150	4	6	LY12

2 试验结果

2.1 试样的冲蚀磨损结果

耦合试样磨损量对比如图 3 所示,基底为 LY12 铝合金、凹坑型形态和等离子涂层的耦合试样的耐冲蚀磨损性能显著优于其他耦合试样,试样 S_5 (LY12 铝合金、凹坑型、厚度 $100\mu m$)的减磨率达到 54.2%,试样 S_7 (45#钢、凹坑型、厚度 $150\mu m$)减磨率达到 18.7%,其他试样也实现了

不同程度的减磨。相对于光滑试样 S_0 ,试样 S_6 的磨损率增加了 44.3%,试样 S_1, S_2, S_3, S_9 的磨损率增加幅度在 14.8%~25.1%之间。

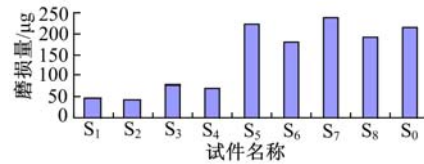


图 3 耦合试样磨损量对比

Fig. 3 Comparison of wear

2.2 正交试验结果分析

正交试验结果见表 2,试验结果显示:凹坑直径为影响仿生耦合试样冲蚀磨损性能的主要因素,凹坑直径为 3 mm 的试样耐冲蚀磨损性能最佳;次要因素为等离子涂层厚度,厚度为 $100\mu m$ 时最优;第三影响因素为耦合试样的基底材料,基底为 LY12 铝合金的耦合试样的耐冲蚀性能较佳;最后为凹坑间距,最优水平为 6 mm。试验的最优组合为 $A_2 B_2 C_3 D_3$,即当耦合试样的基底为 LY12 铝合金,非光滑单元形态为凹坑形,非光滑单元直径为 3 mm,非光滑结构间距为 6 mm,且表面涂层厚度为 $100\mu m$ 时,耦合试样具有最优的耐冲蚀磨损性能。

表 2 正交试验方案及结果分析

Table 2 Orthogonal test scheme and results analysis

试验号	因素				磨损量 /g
	A/μm	B/mm	C/mm	D	
S_1	1(50)	1(2)	1(4)	1(LY12)	0.0241
S_2	1(50)	2(3)	2(5)	2(45#钢)	0.0251
S_3	1(50)	3(4)	3(6)	3(LY12)	0.0254
S_4	2(100)	1(2)	2(5)	3(LY12)	0.0110
S_5	2(100)	2(3)	3(6)	1(LY12)	0.0093
S_6	2(100)	3(4)	1(4)	2(45#钢)	0.0293
S_7	3(150)	1(2)	3(6)	2(45#钢)	0.0165
S_8	3(150)	2(3)	1(4)	3(LY12)	0.0152
S_9	3(150)	3(4)	2(5)	1(LY12)	0.0233
y_{j1}	0.0746	0.0516	0.0686	0.0567	
y_{j2}	0.0496	0.0496	0.0594	0.0709	
y_{j3}	0.0550	0.0780	0.0512	0.0516	
\bar{y}_{j1}	0.0249	0.0172	0.0229	0.0189	
\bar{y}_{j2}	0.0165	0.0165	0.0198	0.0236	
\bar{y}_{j3}	0.0183	0.0260	0.0171	0.0176	
R_j	0.0084	0.0095	0.0058	0.0060	
优水平	A_2	B_2	C_3	D_3	
主次因素	$B > A > D > C$				
最优组合	$A_2 B_2 C_3 D_3$				

3 结果分析及讨论

由表2及图3可知,不同形态、结构、材料的仿生耦合试样的耐冲蚀磨损性能有显著差异,其原因应从耦合试样的材料、形态、结构等的耦合作用进行分析,耦合试件冲蚀磨损后表面体式显微照片(90×)见图4。

(1) 材料与结构的耦合

在具有非光滑结构的试样表面喷涂 Al_2O_3 (13% TiO_2) 陶瓷,喷涂过程中, TiO_2 熔化后并渗入 Al_2O_3 晶格产生固溶,提高了耦合试样涂层的韧性;另一方面,部分 TiO_2 粘结在 Al_2O_3 涂层颗粒间,提高了涂层的致密度和粘结强度,有利于进一步提高耐磨性。喷涂后,涂层的主相由稳定相 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 转变为亚稳相 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 和过渡相 $\delta\text{-Al}_2\text{O}_3$ 、 $\eta\text{-Al}_2\text{O}_3$ 共存以及金红石 TiO_2 相,同时软质的 TiO_2 又使得喷涂表面具有一定的韧性,在试样表面的等离子涂层上可见黑白相间的结构,其中的白色区域为富含 TiO_2 区域,黑色区域为

富含 Al_2O_3 区域,并且富含 Al_2O_3 和 TiO_2 的区域之间存在着成分的扩散,见图4(i)。

冲蚀磨损过程中,单个磨粒对试样表面的作用力可分解为垂直于表面的法向力与平行于表面的切向力。在法向力的作用下,有锋利棱角的磨粒将刺入材料的表面使材料产生变形,这种变形将在垂直和水平两个方向上传递,基底材料 45# 钢的膨胀系数 ($11.59 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$) 小于 LY12 铝合金 ($22.7 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)^[12],吸收形变的能力较差,一旦形变超出表面的承受极限,表面材料就将发生断裂。

(2) 材料与形态的耦合

等离子喷涂过程中, Al_2O_3 与 TiO_2 将熔化,熔化后的涂料在载气携带下高速撞击基材,发生展开、平铺、凝固等一系列现象。最终因涂料凝固时间的不同,在基材表面形成了较规则的微凸包形态表面,如图4(a)、(f)。 TiO_2 先于 Al_2O_3 熔化,凝固前会填满由 Al_2O_3 凸包形成的孔隙,并与 Al_2O_3 发生粘结与成分的扩散,将邻近的不同

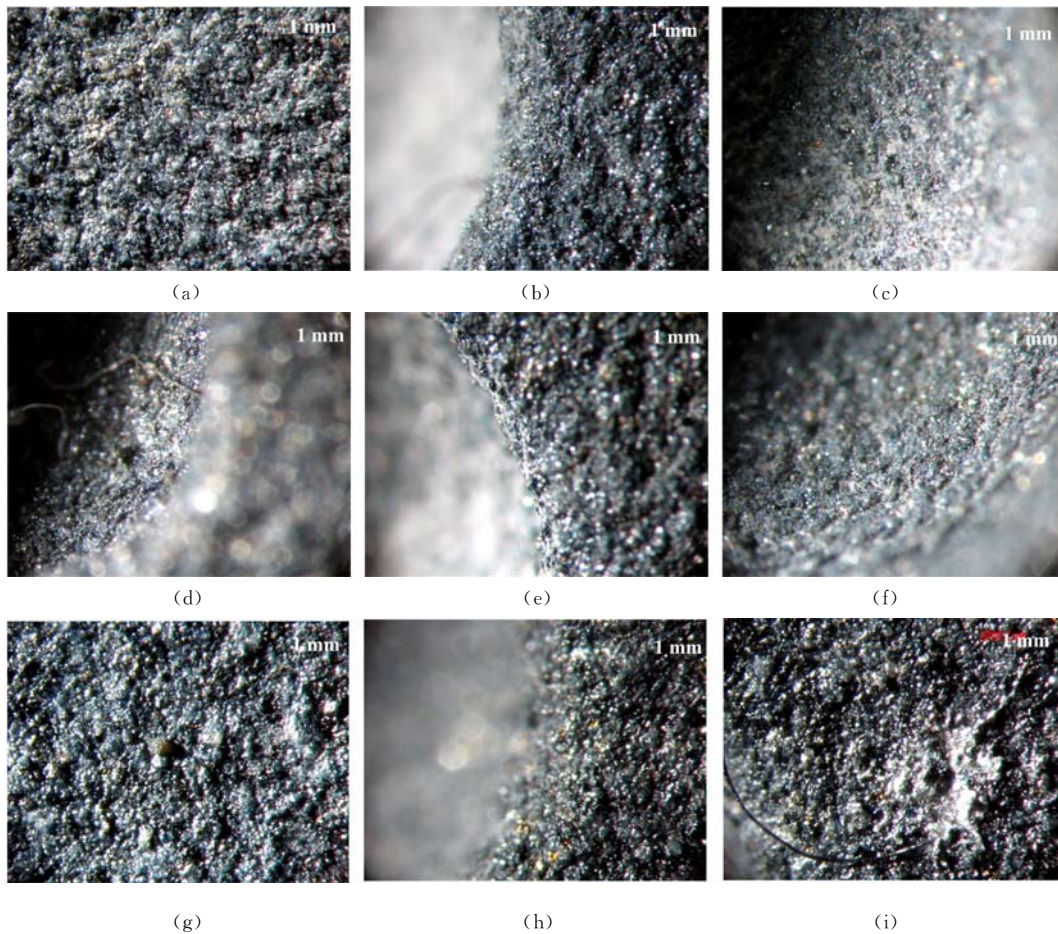


图4 耦合试件冲蚀磨损后表面体式显微照片
Fig. 4 The pictures of erosive wear-out samples

凸包连接起来。通过以上的作用,形成了由喷涂而形成的微观凸包与机械加工得到的凹坑形成了不同层次的耦合系统,如图 4(f)。同时处于相连凸包之间孔隙中的 TiO_2 的硬度只有 Al_2O_3 的一半,成为涂层中不同硬质层之间的软质过渡连接相,有助于冲击应力在微凸包间的传递和分散,吸收残余应力。

(3) 形态与结构的耦合

涂层与基材间形成了一种由硬到软的梯度复合结构。此外,涂层内部还呈现一定的层状结构,并存在由试样表面到涂层表面的微孔隙结构。这样,涂层与基材间的梯度复合结构,试样表面的微凸包、微孔隙,试样表面的凹坑共同形成了结构与形态的耦合。

在冲蚀过程中,根据颗粒碰撞动力学模型和颗粒几何碰撞率模型,由于耦合仿生试样宏观和微观的非光滑表面形态的存在,使得冲蚀颗粒与试样表面发生碰撞时颗粒的动能和湍动能在三个坐标方向上发生再分配效应,使颗粒的动能和湍动能在三个坐标方向趋于相同,颗粒-颗粒、颗粒-流体微团之间的速度关联的破坏,造成颗粒湍动能及两相速度脉动关联的降低,导致冲击粒子传递给耦合试样的动能降低,从而耦合仿生试样的磨损进一步降低,而一旦冲击能量超过涂层所能承受的极限,则将在试样表面曲率发生变化的区域首先产生微裂纹并逐步扩散并最终断裂,如图 4(d),(e)所示。

通过耦合仿生理理论分析试验结果可知,在以 LY12 铝合金为基底的试样表面加工非光滑形态并进行表面处理后,能进一步降低试样的磨损,提高其抗冲蚀磨损性能。试验表明,将试样材料与非光滑单元结构和形态耦合,能提高试样的耐冲蚀磨损性能,具有比若干单一因素相加更好的抗磨损效果,显示了耦合仿生作用的效果。

4 结 论

为了考察仿生耦合试样对于抗冲蚀磨损的效果,采用喷砂试验机对 9 种仿生耦合试样进行了喷砂试验,通过分析试验结果,得出以下结论:

(1) 在试验条件下,采用 LY12 铝合金为基底材料的耦合仿生试样与 45# 钢试样相比,有着优异的抗冲蚀磨损性能。

(2) 零件表面的硬度只能作为衡量其冲蚀抗磨损性能的一个指标。通过试验证明,某些不具

备很高硬度的材料经过处理后具有优良的抗磨损性能。

(3) 耦合仿生试样的正交试验的优组合为:耦合试样的基底材料为 LY12 铝合金,非光滑单元形态为凹坑形,非光滑单元直径为 3 mm,非光滑结构间距为 6 mm,耦合试样表面涂层厚度为 100 μm 时,耦合试样具有最优的抗冲蚀磨损性能。

参考文献:

- [1] 王乙潜,黄丽萍,樊瑞新,等. 超高分子量聚乙烯的冲蚀磨损[J]. 材料研究学报,1998,12(5):507-511.
Wang Yi-qian, Huang Li-ping, Fan Rui-xin, et al. Erosive wear of ultra-high molecular weight polyethylene [J]. Chinese Journal of Material Research, 1998, 12(5):507-511.
- [2] Weikert M, Fohl C, Dausinger F. Surface structuring of metals with short and ultrashort laser pulses[C]// Proceedings of SPIE, 2003:208-213.
- [3] Hui Wen-hua, Liu Jia-jun, Dennis J K. A study of wear resistance of a new brush plated alloy Ni-Fe-W-P[J]. Wear, 1996, 192:165-169.
- [4] Persson B N J. On the mechanism of adhesion in biological systems[J]. Journal of Chemical Physics, 2003, 118(16):7151-7164.
- [5] Material P B. Witness: does nature know best[J]. Nature Materials, 2003(2):510.
- [6] Pierre Auger, Christophe Lett. Integrative biology: linking levels of organization[J]. C R Biologies, 2003, 326:517-522.
- [7] Ray Paton. Process, structure and context in relation to integrative biology[J]. Bio Systems, 2002, 64:63-72.
- [8] Edison T liu. Systems biology, integrative biology, commentary predictive biology[J]. Cell, 2005, 121, 505-506.
- [9] Wang Hai-ying, He Guo-wei, Xi Meng-fen, et al. Multi-scale coupling in complex mechanical systems[J]. Chemical Engineering Science, 2004, 59(6):1677-1686.
- [10] Ball P. Lifes lessons in design[J]. Nature, 2001, 409:413-416.
- [11] 任露泉,杨卓娟,韩志武. 生物非光滑耐磨表面仿生应用研究展望[J]. 农业机械学报, 2005, 36(7):144-147.
Ren Lu-quan, Yang Zhuo-juan, Han Zhi-wu. Non-smooth wearable surfaces of living creatures and their bionic application[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2005, 36(7):144-147.
- [12] 王祝堂,田荣璋. 铝合金及其加工手册[M]. 长沙:中南工业大学出版社,1989.