

缅甸蟒蛇腹鳞表面的摩擦机理 及摩擦各向异性研究

张占立^{1,2}, 丁建宁¹, 杨继昌¹, 范 真¹, 胡友耀¹

(1. 江苏大学 微纳米科学技术研究中心, 江苏 镇江 212013;

2. 河南科技大学 机电工程学院, 河南 洛阳 471003)

摘要: 采用原子力显微镜观察缅甸蟒蛇腹鳞表面的微观结构, 采用 UMT-2 型摩擦磨损试验机研究不同载荷及运动方向的腹鳞表面的宏观摩擦各向异性, 建立了摩擦运动的接触模型, 分析了腹鳞表面的磨损机理. 结果表明: 腹鳞表面的微观结构由指状微突体和板结构部分周期排列而成, 其结构可用 9 个特征参数定量描述; 腹鳞表面摩擦力由分子作用力、表面微突体的犁沟力、楔形作用力以及材料弹性滞后共同引起; 腹鳞表面的摩擦系数在 0.07 左右并与运动方向有关, 摩擦系数随载荷增加而减小; 后向运动及左、右侧向运动时摩擦系数基本相等, 比前向运动时高 33% 左右; 腹鳞表面微突体不同方向上倾斜角度的差异是引起摩擦各向异性的主要原因. 研究结果对仿生制造摩擦各向异性表面提供实验依据.

关键词: 缅甸蟒蛇; 腹鳞; 微观结构; 摩擦系数; 磨损机理; 各向异性

中图分类号: TH117.3

文献标识码: A

文章编号: 1004-0595 (2007) 04-0362-05

非轮式蛇形机器人依靠腹部表皮与地面间的摩擦力实现蛇类的蜿蜒运动和直线运动, 这种表皮需要具备特殊的摩擦特性, 即在机器人向前运动方向与地面间保持较小的摩擦力, 以减少摩擦磨损和能耗, 在侧向及后向运动方向保持较高的摩擦力, 以提供驱动力. 腹部表皮的摩擦性能对机器人的运动控制及其稳定性具有重要作用, 已成为蛇形机器人研究中的关键技术之一^[1].

通过仿生研究解决摩擦学问题是行之有效的方法^[2,3]. 蛇类腹部表皮为柔性微观非光滑结构, Gray 等^[4]用拉动蛇体移动的方法研究了草蛇腹部表皮的摩擦性能, 胡友耀等^[5]用南京航空航天大学自行研制的试验设备研究了蝮蛇腹部表皮的摩擦性能, 发现在蛇的向前、向后运动方向上腹部表皮具有摩擦各向异性, 摩擦系数在 0.2~0.55 之间, 但 2 种方法均是对腹部连续多个鳞片摩擦性能进行测试, 其结果包含蛇体肌肉变形及鳞片自由活动边缘对摩擦力的影响, 特别是后者对结果的影响较大. Hazel 等^[6]利用原子力显微镜 (AFM) 研究了蛇类腹鳞表面纳米摩擦特性, 但没有进行腹鳞表面微观形貌对

宏观摩擦特性影响的实验研究. 本文利用 AFM 观察缅甸蟒蛇腹鳞表面的微观结构, 并用特征参数进行定量描述; 用 UMT-2 型摩擦磨损试验机研究不同载荷及运动方向时单个腹鳞表面与不锈钢球摩擦副的摩擦特性, 在考虑表面力的前提下建立了腹鳞表面摩擦运动的接触模型并分析腹鳞表面的磨损机理, 为非轮式蛇形机器人腹部表皮表面设计提供实验依据.

1 实验部分

1.1 样品制备

所用蟒蛇表皮来自安徽黄山. 用生理盐水清洗蛇皮表面并冲洗干净; 用镊子将腹鳞从蛇皮上取下, 在鳞片上做出方向性标记, 以便识别鳞片的正、反面和前、后方向. 在上海科导超声仪器有限公司产 SK1200H 型超声清洗器中用等离子水清洗 2 次, 各 10 min, 在空气中晾干. 用浙江黄岩光华胶粘剂厂产 801 强力胶将晾干的样品均匀粘贴在尺寸 $\phi 12\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 的 45[#] 钢圆片上, 两端面在平面磨床上精磨. 应注意涂胶层薄且均匀, 样品粘贴平整, 无气泡、

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目 (20040299001).

收稿日期: 2006-10-18; 修回日期: 2006-12-31 联系人丁建宁, e-mail: dingjn@ujs.deu.cn

作者简介: 丁建宁, 男, 1966 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 目前主要从事摩擦学及微纳米机械学等方面的研究.

皱褶等缺陷。

1.2 腹鳞表面微观结构观察

采用美国 D I 公司产 MultiMode 原子力显微镜在接触模式下观察样品的微观结构形貌。为了防止划伤样品表面, 选用弹性系数为 0.12 N/m 且相对较软的 Si_3N_4 探针, 扫描速度为 1 Hz ($10 \mu\text{m/s}$), 法向载荷 10 nN , 温度 $25 \pm 2^\circ\text{C}$, 相对湿度 $RH = 50\%$ 。

1.3 腹鳞样品摩擦性能评价

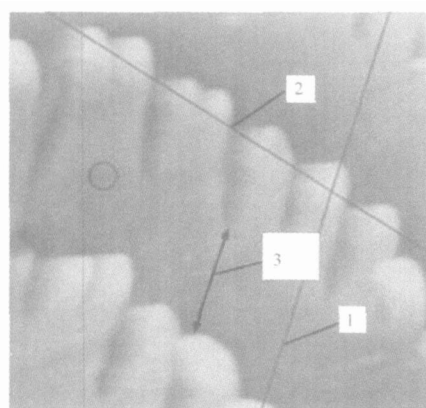
采用美国 CETR 公司产 UMT-II 型多功能摩擦磨损试验机评价不同载荷及运动方向时, 腹鳞样品与 $\phi 4 \text{ mm}$ 的 GCr15 钢球摩擦副的摩擦性能。试验

中, 用双面胶将贴有样品的金属载物片粘贴于试验机的工作台上, 作为下试样随工作台做往复直线运动, 往复运动频率为每分钟 30 次, 行程 3 mm 。施加载荷为 $60 \sim 100 \text{ mN}$, 增量 20 mN , 选用 5 N 的传感器。摩擦运动方向分别仿照蛇向前、向后以及侧向运动的方向进行。试验条件: 大气环境, 温度 $28 \pm 2^\circ\text{C}$, 相对湿度 $RH = 62\%$ 。

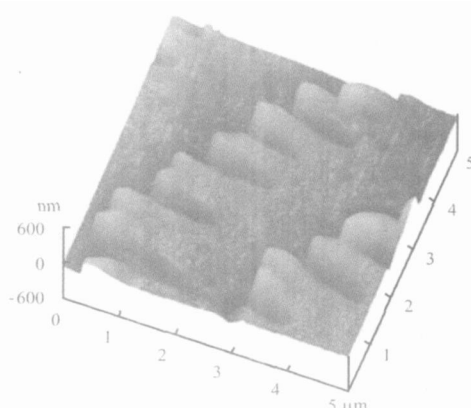
2 结果与讨论

2.1 蟒蛇腹鳞表面的微观结构

图 1(a 和 b) 分别示出了采用 AFM 获取的样品



(a) 2 D topography



(b) 3 D topography

Fig 1 Microstructure of the ventral scale surface

图 1 腹鳞表面的微观结构形貌图像

表面二维以及三维微观结构形貌图像, 扫描尺寸为 $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$, Z 向范围为 600 nm , 图中亮度越亮, 表明高度越高。由图 1 可见, 蟒蛇腹鳞表面的微观结构由指状微突体和板结构部分周期排列而成, 微突体末端指向蛇尾方向, 板结构部分见图 1(a) 较粗的黑色线段 3 所示区域, 其中随机分布着大小不等的微孔 [见图 1(b) 圆形标记处所示]。

图 2 分别示出了图 1(a) 中标号为 1、2 的两条直线所在位置的剖面轮廓图, 由 AFM 配套的 Nanoscope 5.30 分析软件在形貌图中所示位置剖切得到。图 2(a) 示出了单个微突体纵向剖切的表面轮廓, 2 个箭头标记的高度差表示微突体高度。图 2(b) 为多个微突体横向剖切时的表面轮廓, 2 个箭头分别位于 2 个微突体的上部。从图 2(a) 可以看出, 微突体在长度方向上呈非对称的山峰状, 从顶端向前和向后的表面倾斜角度差异较大。从图 2(b) 可见, 微突体宽度方向上部窄、底部宽, 左右两侧的倾斜角度基本相等。

表 1 列出了定量描述腹鳞表面微观结构特征的

9 个特征参数, 数值由 Nanoscope 5.30 软件在形貌图中测得, 取 20 个数据的平均值, 其中突体高度指微突体端部的高度, 如图 2(a) 中 2 个箭头符号所示高度; 突体宽度指微突体上部宽度; 突体前向角度和后向角度的含义分别见图 3 中 α_1 和 α_2 , 图中三角形表示 1 个微突体; 突体间距指 2 个相邻突体的中心距。由表 1 可以看出, 排间距和突体长度均在 $1 \mu\text{m}$ 以上, 由于排间距为突体长度约 2 倍, 表面出现了板结构部分; 突体后向角度为前向角度的 11.6 倍, 而侧向角度较接近后向角度。

2.2 摩擦性能

图 4 所示为法向载荷 100 mN , 样品在前后运动时摩擦系数随时间变化的关系曲线, 其中摩擦力、侧向力和时间等均由摩擦试验机自动记录。由图 4 可见, 试验开始后摩擦系数很快稳定且较一致, 其他载荷及滑动方向的摩擦系数曲线与此相似。将图 4 曲线局部放大并同时显示侧向力数据后见图 5(a), 其中细实线为侧向力, 粗实线为摩擦系数, 侧向力曲线的正、负表明样品的 2 个运动方向, 正值表示后向运

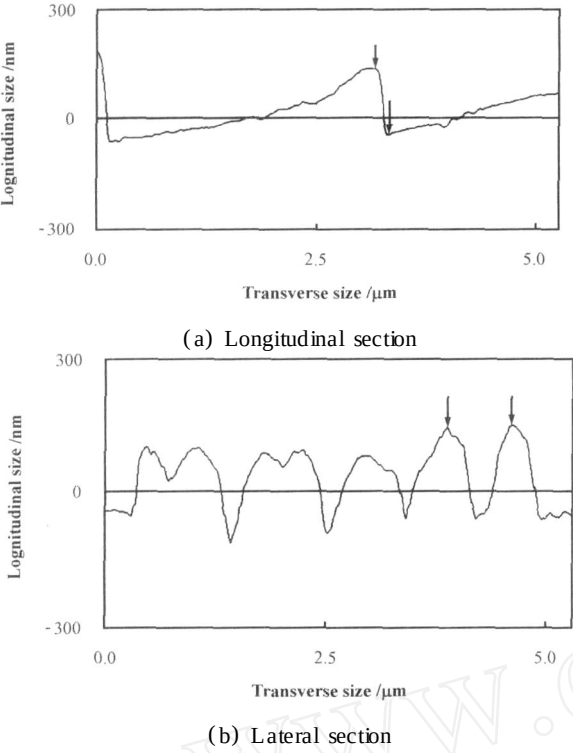


Fig 2 Section of the micro-convex
图 2 微突体剖面轮廓图

表 1 蟒蛇腹鳞表面微观结构特征参数值

Table 1 Feature parameter value of the python ventral scale surface's ultra-structure

Feature parameter	Average
Periodicity of terraces/ μm	2.87 ± 0.18
Distance between the micro-convex/ nm	750 ± 86.24
Length of the micro-convex/ μm	1.35 ± 0.22
Height of the micro-convex/ nm	196.76 ± 24.35
Diameter of the micro-hole/ nm	178.2 ± 35.88
Depth of the micro-hole/ nm	26.32 ± 4.31
Forward angle of the micro-convex/ $(^\circ)$	4.49 ± 0.75
Backward angle of the micro-convex/ $(^\circ)$	52.19 ± 9.25
Lateral angle of the micro-convex/ $(^\circ)$	40.13 ± 7.53

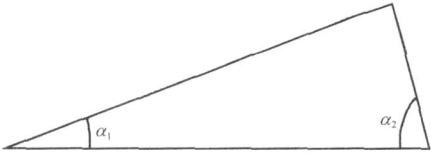


Fig 3 Angle of the micro-convex
图 3 微突体角度示意图

动,负值表示前向运动.由图 5(a)可以看出,样品前向运动时的平均摩擦系数 μ_F 明显低于后向运动时的平均摩擦系数 μ_B .法向载荷为 100 mN、样品左、右侧向运动时的侧向力与摩擦系数曲线见图 5(b).

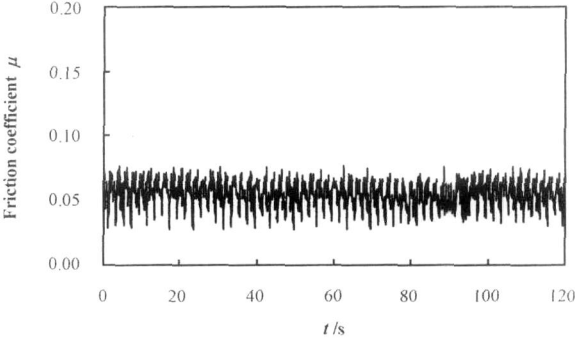
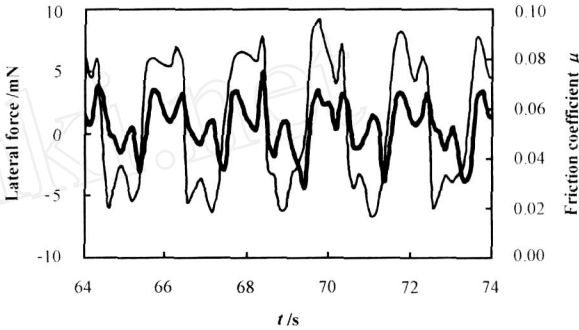
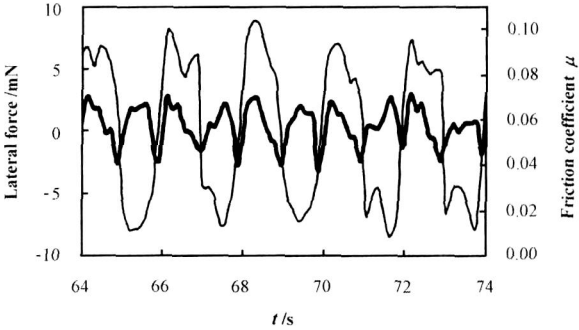


Fig 4 Relationship between friction coefficient and time at 100 mN
图 4 载荷为 100 mN 时摩擦系数与时间的关系曲线



(a) Forward and backward locomotion



(b) Left and right lateral locomotion

Fig 5 Relationship between lateral force and friction coefficient

图 5 侧向力与摩擦系数的关系曲线

由图 5(b)可见,样品左侧向运动的平均摩擦系数 μ_L 与右侧向运动的平均摩擦系数 μ_R 相差较小.

将不同载荷及运动方向时腹鳞摩擦系数的平均值列于表 2,表中数据是利用摩擦磨损试验机的 UMT Test Viewer 分析软件从摩擦系数曲线中连续读取相同运动方向的 10 个时间段内摩擦系数平均值.可见,样品表面的摩擦系数较低,在 0.05~0.08 范围内;随着载荷的增加,腹鳞在不同运动方向的摩擦系数下降.当相同载荷时,不同方向的摩擦系数的

表 2 不同情形时腹鳞表面摩擦系数平均值
Table 2 Friction coefficient average value of the ventral scale surface under different conditions

Locomotion direction	Load/mN		
	60	80	100
Forward	0.056	0.055	0.048
backward	0.078	0.073	0.063
Left	0.070	0.065	0.060
Right	0.071	0.066	0.056

关系为 $\mu_F < \mu_L = \mu_R < \mu_B$. 当载荷为 60 mN、80 mN 和 100 mN 时, μ_B / μ_F 值分别为 1.36、1.33 和 1.31 倍, μ_B / μ_L 值分别为 1.11、1.12 和 1.05, 表明缅甸蟒蛇腹鳞表面的摩擦系数与运动方向密切相关, 向后及侧向运动的摩擦系数基本相等, 比向前运动的摩擦系数高 33% 左右.

2.3 磨损机理分析

用纳米硬度仪对试验样品进行压入测试得出样品的平均硬度为 70 MPa, 表面硬度为 104 MPa, 与塑料的硬度基本相同^[7], 远小于钢的 6 GPa^[8]. 同时还可见, 压入过程中样品有明显的蠕变现象, 说明腹鳞材料具有粘弹性.

φ4 mm 的不锈钢球表面可以简化为一系列具有相同曲率半径、高度不等的半球形微突体随机分布的表面, 腹鳞表面由一定规律排列的指状微突体构成. 因此, 不锈钢球和腹鳞表面的接触可以看作两表面微突体的接触. 腹鳞与金属的硬度相差悬殊, 两者接触时的变形可以看作只在腹鳞表面发生. 2 种微突体的接触模型见图 6, 三角形代表腹鳞表面的 1

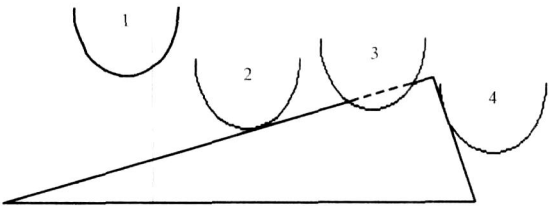


Fig 6 Contacting model for two types of micro-convex
图 6 两表面微突体的接触模型

个微突体, 半圆弧代表钢球表面微突体, 其中突体 3 已压入腹鳞微突体, 并使腹鳞表面产生变形. 2 种突体的紧密接触使接触界面发生键结合而产生分子作用力, 从而产生粘着. 当样品前向运动 (三角形突体从右向左方向) 时, 突体 2、3 在逐渐压入腹鳞突体的过程中, 除了需要克服粘着力引起的阻力外, 还需要克服腹鳞突体表面的楔形作用力、犁沟力以及腹

鳞材料引起的弹性滞后阻力. 因此, 摩擦阻力 F 可以表示为:

$$F = F_a + F_p + F_c + F_l \tag{1}$$

式中, F_a 为分子间粘着阻力, F_p 为犁沟力, F_c 为楔形作用力, F_l 为弹性阻力.

根据 $W = A_s s$ ^[9], 其中 W 为载荷, A 为真实接触面积, s 为软材料的屈服极限. 一定载荷下接触表面具有相等的真实接触面积 A , 而分子间粘着力与 A 成正比, 所以无论腹鳞向哪个方向运动, F_a 均不变. 腹鳞和不锈钢球的摩擦与塑料和不锈钢的摩擦相似, 根据聚合物的摩擦理论^[10], 通常认为摩擦过程中的弹性阻力 F_l 很小, 可以忽略不计.

样品表面微突体的前向倾斜角度为 4.5°, 后向倾斜角是 52.2°, 两者相差较大, 不同方向上堆积在不锈钢球微突体周围的腹鳞材料高度存在差异, 如图 6 中微突体 3 所示. 当腹鳞前向运动时, 不锈钢球微突体前向的腹鳞材料增加速率小于后向运动时的增加速率, 造成前向运动时的犁沟力小于后向运动时的犁沟力. 突体表面楔形作用引起的阻力 F_c 可以表示为:

$$F_c = kW \tan \alpha \tag{2}$$

式中: k 为与材料有关的常数, W 为载荷, α 为斜面的角度. 可见 F_c 随表面倾斜角度增加而增大.

分析式 (1) 可知, 在相同载荷下摩擦力 F 与样品表面微突体的倾斜角度有关, 并随表面倾斜角度增加而增大. 腹鳞表面微突体的前向倾斜角度小于后向倾斜角度, 前向运动时的摩擦阻力小于后向运动时的摩擦阻力, 即 $\mu_F < \mu_B$; 微突体左、右两侧基本对称, 侧面倾斜角度为 40°, 左、右侧向运动时的摩擦系数基本相同, 即 $\mu_L = \mu_R$, 并接近后向摩擦系数. 另外, 对于腹鳞表面微突体来说, $\tan \alpha_2 / \tan \alpha_1 = 16$, 而 μ_B 比 μ_F 大 33% 左右, 说明式 (1) 中 F_a 为腹鳞材料摩擦力的主要部分.

3 结论

a 缅甸蟒蛇腹鳞表面由指状微突体和板结构部分周期排列而成, 其微观结构可由 9 个特征参数定量描述.

b 腹鳞表面与不锈钢球对摩的摩擦系数与运动方向有关, 并随载荷增加而减小. 左、右和侧向运动时的摩擦系数基本相等, 后向运动时的摩擦系数略高于侧向运动, 并比前向运动时高 33% 左右.

c 腹鳞表面的摩擦力由分子间粘着力、犁沟力、微突体的楔形作用力和弹性阻力组成, 其中分子

间粘着力占主要部分;腹鳞表面微突体的不同倾斜角度是造成宏观摩擦各向异性的原因.

参考文献:

- [1] 陈丽. 具有环境适应能力的蛇形机器人运动的研究 [D]. 沈阳:中国科学院沈阳自动化研究所, 2003.
Chen Li Study on locomotion of snake robot for adaptation to the environment[D]. Shenyang: Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, 2003.
- [2] 宋起飞, 周宏, 李跃, 等. 仿生非光滑表面铸铁材料的常温摩擦磨损性能 [J]. 摩擦学学报, 2006, 26(1): 24-27.
Song Q F, Zhou H, Li Y, et al Friction and wear properties of cast-iron material with bionic non-smooth surface under normal temperature[J]. Tribology, 2006, 26(1): 24-27.
- [3] Ren L Q, Han Z W, Li J Q, et al Experimental investigation of bionic rough curved soil cutting blade surface to reduce soil adhesion and friction[J]. Soil & Tillage Research, 2006, 85: 1-12.
- [4] Gray J, Lissmann H W. The kinetics of locomotion of the grass snakes[J]. Journal of Experimental Biology, 1950, 26: 354-367.
- [5] 胡友耀, 丁建宁, 杨继昌, 等. 蛇类表皮生物摩擦学性能研究 [J]. 润滑与密封, 2006, 11: 56-59.
Hu Y Y, Ding J N, Yang J C, et al Bio-friction properties of snake epidermis scales[J]. Lubrication Eng, 2006, 11: 56-59.
- [6] Hazel J, Stone M, Grace M S, et al Nanoscale design of snake skin for reptation locomotions via friction anisotropy[J]. Journal of Biomechanics, 1999, 32: 477-484.
- [7] 伞金福, 朱宝亮, 刘家俊, 等. 塑料表面改性对其摩擦学性能影响 [J]. 摩擦学学报, 2000, 20(3): 237-240.
San J F, Zhu B L, Liu J J, et al Effect of surface modification on tribological properties of plastics[J]. Tribology, 2000, 20(3): 237-240.
- [8] 华文深, 吴杏芳, 陆华, 等. TiC_x/NiAl 复合材料界面纳米硬度与弹性模量分布 [J]. 机械工程材料, 2003, 27(3): 8-11.
Hua W S, Wu X F, Lu H, et al Distributions of nanohardness and elastic modulus near the interface of TiC_x/NiAl composites [J]. Materials For Mechanical Engineering, 2003, 27(3): 8-11.
- [9] 温诗铸, 黄平. 摩擦学原理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [10] 王承鹤. 塑料摩擦学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.

Frictional Mechanism and Anisotropy of Burmese Python's Ventral Scale Surface

ZHANG Zhan-li^{1,2}, DING Jian-ning¹, YANG Ji-chang¹, FAN Zhen¹, HU You-yao¹

(1. Micro/Nano Science and Technology Center, School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

2. School of Mechatronics Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China)

Abstract: Microstructure of Burmese python's ventral scale Surface was observed with atomic force microscope (AFM). The frictional anisotropy of Burmese Python's ventral scale Surface under different loading and moving directions were investigated by UMT-2 universal micro materials tester. The contact model of friction was established, and the frictional mechanism of the ventral scale surface was analyzed. The results show that the microstructure of ventral scale for python was composed of micro-convex and plank structure that was periodically arranged, it was mensurable and could be described by 9 characteristic parameters. Its surface was different in their forward and backward lean angle. The frictional coefficient of the ventral scale had closely relationship with moving direction, it decreased with the increasing load. The value of the frictional coefficient was about 0.07. The frictional coefficient while python moved backward and laterally were equal, and that was 33% more than that moved ahead. The frictional force of the ventral scale surface was caused by mechanical tooth function of micro-convex, acting intermolecular force and material's elastic hysteresis. The difference of forward and behind bevel for micro-convex was the anisotropy reason of frictional force. The results provide theoretical proof for the manufacturing of friction anisotropy surface.

Key words: burmese python, ventral scale, microstructure, friction coefficient, wear mechanism, anisotropy

Author: DING Jian-ning, male, born in 1966, Ph.D., Professor, e-mail: dingjn@ujs.edu.cn