

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.069

# 环文蛤贝壳角质层摩擦学特性研究\*

闫志峰 柴兴旺 沈生龙 陈东辉 王智芹 马云海

(吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130025)

**【摘要】** 采用激光扫描共焦显微镜和 UMT-2 型微观摩擦磨损试验机分别对环文蛤贝壳角质层的表面粗糙程度和摩擦学特性进行分析研究。结果表明:环文蛤不同部位角质层的粗糙度程度由大到小依次为:背部、后部、腹部、前部;环文蛤前部和腹部角质层表面的横向摩擦因数大于纵向摩擦因数,而环文蛤后部和背部角质层表面的横向摩擦因数却小于纵向摩擦因数,这说明环文蛤角质层表面的摩擦特性具有横向和纵向异性的特征;相比于无水测试条件,在水润滑测试条件下,环文蛤前部角质层表面的横向和纵向摩擦因数均提高,环文蛤后部和背部角质层表面的横向和纵向摩擦因数均降低,而环文蛤腹部角质层表面的横向摩擦因数降低,纵向摩擦因数却升高。

**关键词:** 环文蛤 角质层 摩擦学性能

**中图分类号:** TB17 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)S0-0339-05

## Tribological Properties of *Cyclina sinensis* Shell Cuticle

Yan Zhifeng Chai Xingwang Shen Shenglong Chen Donghui Wang Zhiqin Ma Yunhai

(Key Laboratory of Bionic Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130025, China)

### Abstract

The surface roughness and tribological properties of *Cyclina sinensis* shell cuticle were studied by using confocal laser scanning microscopy (CSLM) and UMT-2 micro-friction and wear testing machine respectively. The results showed that the descending order of the roughness of different parts of *Cyclina sinensis* shell cuticle was as follows: dorsal *Cyclina sinensis* shell, posterior part of *Cyclina sinensis* shell, abdominal *Cyclina sinensis* shell and anterior part of *Cyclina sinensis* shell. The transverse friction coefficient (TFC) was greater than the longitudinal friction coefficient (LFC) of the cuticle surface in the front and abdomen of *Cyclina sinensis* shell. However, TFC was less than LFC of that of posterior and back of *Cyclina sinensis* shell. This suggested that the tribological properties of *Cyclina sinensis* shell cuticle transverse and longitudinal had heterosexual characteristics. Comparing to the anhydrous test conditions, under the water lubrication conditions, TFC and LFC of the cuticle surface of the front of *Cyclina sinensis* shell both increased, TFC and LFC of the cuticle surface of the back of *Cyclina sinensis* shell both decreased, and TFC of the surface of the cuticle of the abdomen of *Cyclina sinensis* shell decreased, but LFC increased.

**Key words** *Cyclina sinensis*, Cuticle, Tribological properties

### 引言

自然界在长期的进化演变过程中,形成了具有

完美结构组织形态和独特优异性能的生物材料,这些天然生物材料具有适应环境的生物系统和生存本领<sup>[1]</sup>,形成了独特的结构以及优异的性能,这是传

收稿日期:2012-06-01 修回日期:2012-07-06

\* 国家自然科学基金资助项目(51075177)、吉林省留学人员科技创新创业项目、新世纪优秀人才支持计划资助项目、国家产学研用合作创新资助项目(OSR-04-06)、吉林大学“国家985项目”和长春市科技支撑计划资助项目(11KZ43)

作者简介:闫志峰,硕士生,主要从事摩擦材料及其摩擦学研究,E-mail: yanzhifengyzf@yeah.net

通讯作者:马云海,教授,主要从事仿生材料及其摩擦学研究,E-mail: myh@jlu.edu.cn

统的人工合成材料所无法比拟的。贝类一般由外壳和软体部位组成<sup>[2]</sup>,作为大多数软体动物的保护壳,贝壳具有优良的力学特性,其力学性能与微纳米结构之间的关系备受关注<sup>[3]</sup>,其微结构是其具有优良力学性能的重要原因之一<sup>[4]</sup>。贝壳的主要成分为碳酸钙,约占95%,其次是铁、镁、磷酸钙和硅酸盐等无机物,还有少量的贝壳素等有机物。贝壳主要由3部分构成,最外层为黑褐色的角质层,中层为棱柱层,最内层为珍珠层<sup>[5]</sup>。角质层随着动物的生长逐渐变大,其主要由外套膜边缘分泌的贝壳素构成,防止碳酸侵蚀,主要起保护外壳的作用,角质层薄而透明,具有光泽;棱柱层主要是由外套膜背面分泌的棱柱状的方解石构成,较厚,棱柱层占据贝壳的大部分空间,而且随着动物体的生长,该层最明显的特征是只增长面积不增加厚度;珍珠层属天然复合材料,其中95%(体积分数)是片状文石,其余5%是蛋白质-多糖基体<sup>[6]</sup>。贝壳内部的微结构、组装方式使贝壳体材料具有最佳的强韧性<sup>[7-8]</sup>。针对贝壳角质层优良的防腐耐磨特性,采用激光扫描共焦显微镜和微观摩擦磨损实验机对环文蛤贝壳角质层的表面粗糙度和摩擦学性能进行研究,以了解其防腐耐磨机理,为仿生防腐耐磨蚀涂层的研究提供技术依据。

## 1 贝壳角质层表面粗糙度

材料表面粗糙度是固体表面的一个重要特征,

表面粗糙度的评定参数很多,通常用二维表面粗糙度参数 $R_a$ 和 $R_q$ 表示。采样长度范围内轮廓偏距绝对值的算术平均值定义为二维轮廓的算术平均偏差 $R_a$ ,即

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (1)$$

式中  $y_i$ ——基于中线表面的轮廓高度

采样长度范围内的轮廓偏距均方根值定义为二维轮廓的均方根偏差 $R_q$ ,即

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2} \quad (2)$$

本试验使用奥林巴斯(OLYMPUS)OLS3000型激光扫描共焦显微镜,对环文蛤角质层表面进行粗糙度测量和形貌观察,得到 $R_a$ 、 $R_q$ 、 $S_a$ (表面的三维算术平均偏差)、 $S_q$ (表面的三维均方根偏差)。用激光扫描共焦显微镜扫描试样表面时,得到的是层层叠叠的二维灰度图像,对采集到的这些断层图像进行图像平滑、图像增强等预处理。图像平滑的目的是除掉掺杂在图像中的各种噪声,图像增强的目的是加强图像中的有效信息,以获得高质量的三维表面形貌。

本文分别测量环文蛤前部、后部、背部、腹部的角质层表面粗糙度,每个部位试样均做5次重复试验,取其平均值作为衡量标准。试验中用10倍光学倍镜观测。测量数据结果见表1,环文蛤贝壳角质层表面三维形貌如图1所示。

表1 环文蛤贝壳角质层表面粗糙度

Tab. 1 Roughness of *Cyclina sinensis* shell cuticle surface

部位	$R_a$	$S_a$	$R_q$	$S_q$	$\mu\text{m}$
前部	1.823 3 ± 0.458 4	2.648 1 ± 0.172 5	2.498 2 ± 0.776 9	3.937 8 ± 0.934 1	
后部	4.421 6 ± 0.806 3	5.430 0 ± 0.511 2	5.530 2 ± 0.702 9	6.575 1 ± 0.623 8	
背部	5.168 5 ± 0.406 9	7.387 4 ± 0.542 6	6.363 5 ± 0.459 9	8.577 9 ± 0.853 4	
腹部	2.824 4 ± 0.198 3	2.996 7 ± 0.077 2	3.865 5 ± 0.732 5	3.977 1 ± 0.521 9	

图1所示是在同样的显微镜放大倍数下,观察到的环文蛤角质层表面形貌。环文蛤前部角质层表面粗糙度最小,它的90%表面相对来说比较光滑,只是个别微小部位存在自然形成的严重划痕,但是影响不大。环文蛤腹部、后部、背部表面粗糙度逐渐依次增大,这时环文蛤角质层表面的沟槽面积也越来越大,且沟槽的深度和宽度也有所增加,表面更加粗糙。当环文蛤角质层表面粗糙度最大时,也就是环文蛤背部表面存在很明显的沟槽,沟槽的宽度和深度相对较大,几乎布满整个扫描表面。

由表1可知环文蛤角质层表面粗糙度虽然表征

参数不同,但是每个参数所表征的环文蛤角质层的表面粗糙度的特性是一致的,即环文蛤角质层不同部位粗糙度程度由大到小依次为:背部、后部、腹部、前部。

## 2 贝壳角质层摩擦学性能

通常情况下,能在表面上浸润的液体,其水蒸气均会在表面孔隙、裂缝中凝聚液珠,在接触区域,这些液珠会形成环状的毛细管凝结体。这种凝聚而形成的弯月面行为是相互贴紧的表面凝结液体具有的亲和力,这种液膜或表面覆盖的液膜将会明显提

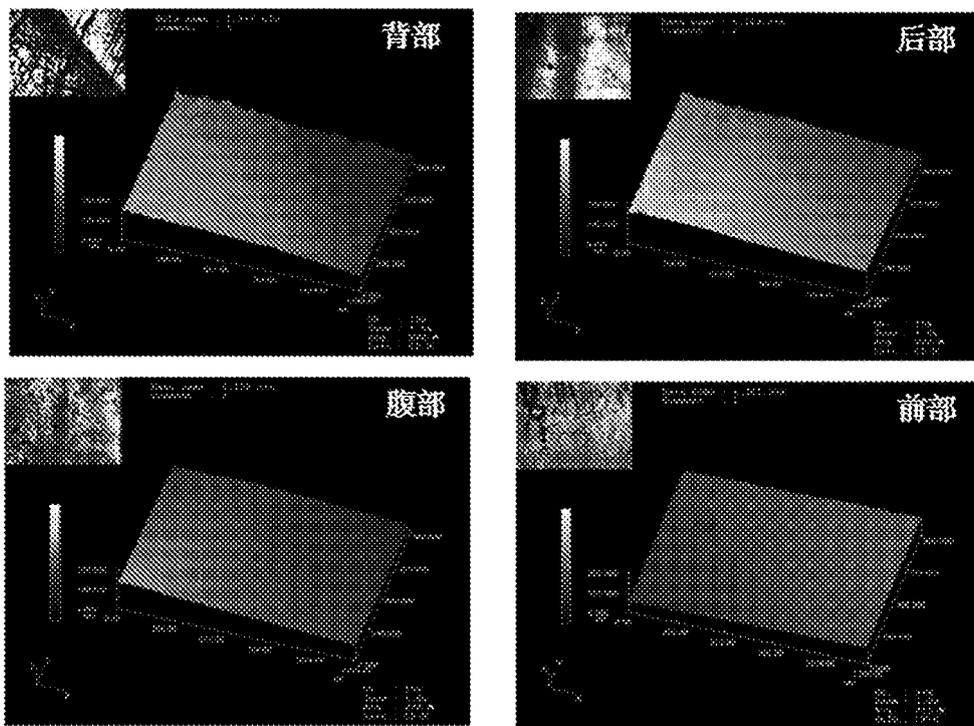


图1 环文蛤角质层表面三维形貌图

Fig.1 3-D surface topography of *Cyclina sinensis* shell cuticle surface

高固体界面的粘着力<sup>[9]</sup>。

一个光滑表面与粗糙表面的粘着情况是和两表面之间的液体含量有关的。平面和粗糙表面之间不同液体含量的接触模型可分为4种：顶浸渍形式、碉堡形式、淹没形式和浸没形式，如图2所示。前3种形式中的弯月面是由弯月面力作用形成的，而第4种浸没形式中，界面上没有形成弯月面，因此弯月面力不存在，只有液体的粘性力。

### 2.1 试验仪器与试验方法

采用美国 CERT 公司生产的 UMT-2 型微观摩擦磨损实验机对文蛤贝壳角质层的摩擦学性能进行研究。采用对比试验法，对文蛤贝壳角质层在有无水润滑情况下的摩擦学性能进行研究，本试验选择摩擦球作为对磨件。

试验前使用无水乙醇将摩擦球清洗干净，自然风干备用。每个部位分别在有水和无水状态下做10次重复试验。试验参数为：摩擦球材料 GCr15，摩擦球洛氏硬度 HRC59，摩擦球直径 4 mm，传感器量程 500 g，加载载荷 100 g，下工作台转速 1 r/min。

### 2.2 试验结果与分析

环文蛤表面存在环形的生长线，当摩擦前进方向与环文蛤环形生长线相切时，规定所测的摩擦因数为环文蛤表面的纵向摩擦因数；当摩擦前进方向与环文蛤环形生长线相互垂直时，规定所测的摩擦因数为环文蛤表面的横向摩擦因数。

本试验测试了环文蛤不同部位角质层表面在有

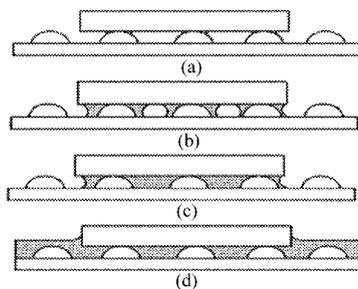


图2 平面与粗糙表面间不同液体含量的接触模型

Fig.2 Contact model of different liquid content between plane and rough surface

(a) 顶浸渍形式 (b) 碉堡形式 (c) 淹没形式 (d) 浸没形式

无水润滑状态下的横向、纵向摩擦因数，旨在探讨环文蛤角质层表面的摩擦特性是否具有横向、纵向异性，或横向、纵向同性的特征。其次，探讨水润滑条件对环文蛤角质层表面摩擦特性的影响。

由图3可知，环文蛤前部角质层表面的横向摩

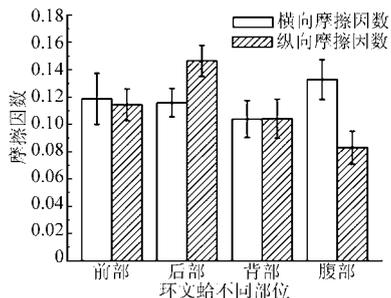


图3 环文蛤横向、纵向摩擦因数测量结果

Fig.3 Measurement results of transverse and longitudinal friction factor of *Cyclina sinensis* shell

擦因数大于纵向摩擦因数,但二者差别相当小。同样,环文蛤腹部角质层的横向摩擦因数也大于纵向摩擦因数,但是二者的差别相对于环文蛤前部角质层表面的横、纵向摩擦因数的差别来说比较大。相反地,环文蛤背部角质层表面的横向摩擦因数小于纵向摩擦因数,但二者差别很小。同样,环文蛤后部角质层表面的横向摩擦因数也小于纵向摩擦因数,但是二者的差别相对于环文蛤背部角质层表面的横、纵向摩擦因数的差别来说比较大。这表明,环文蛤角质层表面的摩擦特性具有横向、纵向异性的特征,这与环文蛤角质层表面形貌、粗糙度等相关。

接触界面存在液膜时,静摩擦因数、动摩擦因数与两个表面之间的液体容量有关。如果定义 $\delta$ 为界面的复合粗糙度, $h$ 为润滑膜的均匀厚度,那么摩擦力就是 $h/\delta$ 的函数<sup>[9]</sup>。当 $h/\delta$ 低于一定临界值时,大量液体只汇集在微凸体的凹谷里,无法形成完整的弯月面,此时,摩擦因数的数值较低,同样粘着力也较低。显然,当 $h/\delta$ 值较大时(高于临界值),表明有更多数量的微凸体被液膜润湿,就会形成更大的弯月面力,摩擦因数就会增大,有时还会迅速增大,相应地粘性力也会增大。当然,如果接触界面完全浸入液体中,那么发生摩擦时,就不存在弯月面力,而只是发生液膜的剪切,此时的摩擦因数就非常小<sup>[9]</sup>。

试验时将定量的蒸馏水滴入钢球和环文蛤角质层接触界面,进行摩擦试验。如图4所示,在水润滑条件下,环文蛤前部角质层表面的横向、纵向摩擦因数比没有水润滑状态下的摩擦因数均有所提高。只是水润滑条件对环文蛤前部角质层横向摩擦因数的影响更大。这表明对于环文蛤前部角质层表面来说, $h/\delta$ 值大于临界值,其中 $h$ 在本试验中是恒定的,而 $\delta$ 是变化的,所以环文蛤前部角质层表面在横向方向的 $\delta$ 小于在纵向方向的 $\delta$ 。

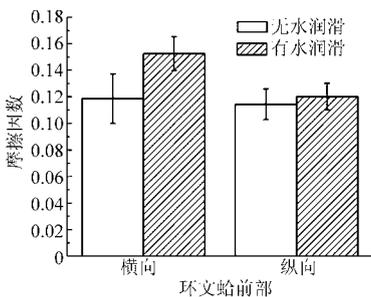


图4 环文蛤前部角质层摩擦因数测量结果  
Fig.4 Measurement results of friction factor of *Cyclina sinensis* shell anterior cuticle

如图5所示,在水润滑条件下,环文蛤后部角质层表面的横向、纵向摩擦因数比没有水润滑状态下

的摩擦因数均有所降低。只是水润滑条件对环文蛤后部角质层横向摩擦因数的影响相对较小。这表明对于环文蛤后部角质层表面来说, $h/\delta$ 值小于临界值,其中 $h$ 在本试验中是恒定的,而 $\delta$ 是变化的,所以环文蛤后部角质层表面在横向方向的 $\delta$ 大于在纵向方向的 $\delta$ 。

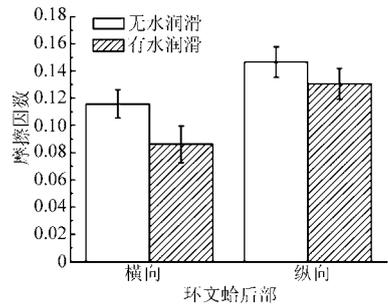


图5 环文蛤后部角质层摩擦因数测量结果  
Fig.5 Measurement results of friction factor of *Cyclina sinensis* shell posterior cuticle

如图6所示,在水润滑条件下,环文蛤背部角质层表面的横向、纵向摩擦因数比没有水润滑状态下的摩擦因数均有所降低。只是水润滑条件对环文蛤背部角质层纵向摩擦因数的影响较大,而对环文蛤背部角质层横向摩擦因数的影响相当小。这表明对于环文蛤背部角质层表面来说, $h/\delta$ 值小于临界值,其中 $h$ 在本试验中是恒定的,而 $\delta$ 是变化的,所以环文蛤背部角质层表面在横向方向的 $\delta$ 小于在纵向方向的 $\delta$ 。

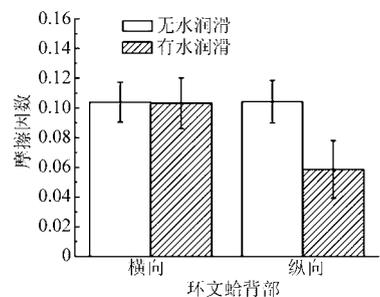


图6 环文蛤背部角质层摩擦因数测量结果  
Fig.6 Measurement results of friction factor of *Cyclina sinensis* shell dorsal cuticle

如图7所示,在水润滑条件下,环文蛤腹部角质层表面的横向摩擦因数比无水润滑状态下的横向摩擦因数有所降低,而环文蛤腹部角质层表面的纵向摩擦因数比无水润滑状态下的纵向摩擦因数有所升高,且水润滑条件对环文蛤腹部角质层的横向、纵向摩擦因数的影响都相当大。这表明对于环文蛤腹部角质层表面在横向方向上来说, $h/\delta$ 值小于临界值,而对于环文蛤腹部角质层表面在纵向方向上来说, $h/\delta$ 值大于临界值,其中 $h$ 在本试验中是恒定的,而 $\delta$ 是变化的,所以环文蛤腹部角质层表面在横向方向的 $\delta$ 大于在纵向方向的 $\delta$ 。

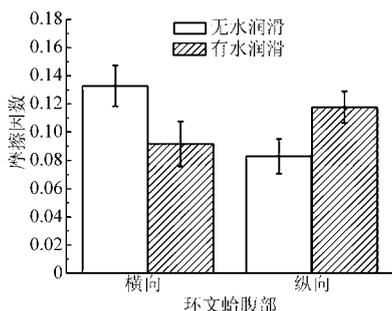


图7 环文蛤腹部角质层摩擦因数测量结果

Fig.7 Measurement results of friction factor of *Cyclyna sinensis* shell abdomen cuticle

另外,结合图4和图5,环文蛤前部角质层表面的 $h/\delta$ 值大于临界值,环文蛤后部角质层表面的 $h/\delta$ 值小于临界值,其中 $h$ 是恒定的,所以得出环文蛤前部角质层表面的复合粗糙度 $\delta$ 小于环文蛤后部角质层表面的复合粗糙度 $\delta$ ,这与上述的环文蛤后部角质层粗糙度大于环文蛤前部角质层粗糙度相符合。

同样,结合图4和图6,环文蛤前部角质层表面的 $h/\delta$ 值大于临界值,环文蛤背部角质层表面的 $h/\delta$ 值小于临界值,其中 $h$ 是恒定的,所以得出环文蛤前部角质层表面的复合粗糙度 $\delta$ 小于环文蛤背部角质层表面的复合粗糙度 $\delta$ ,这与上述的环文蛤背部角

质层粗糙度大于环文蛤前部角质层粗糙度相符合。

### 3 结论

(1)使用激光扫描共焦显微镜对环文蛤前部、后部、背部、腹部角质层表面进行粗糙度的测量和形貌观察。得出环文蛤角质层不同部位粗糙度程度由大到小依次为:背部、后部、腹部、前部。

(2)使用微观摩擦磨损试验机测试环文蛤不同部位角质层表面在有无水润滑状态下的横向、纵向摩擦因数。得出在无水润滑的条件下,环文蛤前部和腹部角质层表面的横向摩擦因数大于纵向摩擦因数;相反地,环文蛤后部和背部角质层表面的横向摩擦因数小于纵向摩擦因数。环文蛤角质层表面的摩擦特性具有横向、纵向异性的特征。

(3)与无水的条件相比,在有水的条件下,环文蛤前部角质层表面的横向、纵向摩擦因数均有所提高;环文蛤后部和背部角质层表面的横向、纵向摩擦因数均有所降低;环文蛤腹部角质层表面的横向摩擦因数有所降低,而纵向摩擦因数有所升高。接触界面存在液膜时,摩擦因数与两个表面之间的液体容量和界面复合粗糙度有关。

### 参 考 文 献

- 佟金,马云海,任露泉.天然生物材料及其摩擦学[J].摩擦学学报,2001,21(4):315~320.  
Tong Jin, Ma Yunhai, Ren Luquan. Naturally biological materials and their tribology: a review[J]. Tribology, 2001, 21(4): 315~320. (in Chinese)
- 牟晨晓,丁晓非,林艾光,等.仿贝壳结构制备纤维增强的复合材料[J].大连海洋大学学报,2011,26(4):367~370.  
Mu Chenxiao, Ding Xiaofei, Lin Aiguang, et al. Preparation of fiber reinforced composite material by imitating shell structure [J]. Journal of Dalian Ocean University, 2011, 26(4):367~370. (in Chinese)
- 冯西桥,曹艳平,赵红平,等.生物材料力学研究新进展[J].医用生物力学,2011,26(5):395~401.  
Feng Xiqiao, Cao Yanping, Zhao Hongping, et al. Recent developments in mechanics of biological materials: a brief review [J]. Journal of Medical Biomechanics, 2011, 26(5):395~401. (in Chinese)
- Kenneth S V, Zhang Xing, Jennifer B M, et al. Conversion of bulk seashells to biocompatible hydroxyapatite for bone implants [J]. Acta Biomaterialia, 2007, 3(6):910~918.
- 谢忠东,丁晓非,黄光烨.贝壳——天然复合材料仿生学研究的发展状况[J].水产科学,2006,26(5):317~320.  
Xie Zhongdong, Ding Xiaofei, Huang Guangye. The conch—the progress of research of biomineral composite material[J]. Fisheries Science, 2011, 26(5):317~320. (in Chinese)
- 马云海,闫久林,佟金,等.天然生物材料结构特征及仿生材料的发展趋势[J].农机化研究,2009(8):6~10.  
Ma Yunhai, Yan Jiulin, Tong Jin, et al. Structural characteristics in natural biomaterials and developing trend of bionic material[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009(8):6~10. (in Chinese)
- Ballarini R, Heuer A H. Secrets in the shell[J]. American Scientist, 2007, 95(5):422~429.
- 冯庆玲.生物矿化与仿生材料的研究现状及展望[J].清华大学学报,2005,45(3):378~383.  
Feng Qingling. Review of current biomineralization and biomimetic materials [J]. Journal of Tsinghua University, 2005, 45(3):378~383. (in Chinese)
- Bharat Bhushan. Introduction to tribology[M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 2002.