

石鳖抗冲蚀磨损三维数值模拟*

田喜梅¹ 李宏伟² 田丽梅¹

(1. 吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130025; 2. 吉林大学计算机科学与技术学院, 长春 130012)

摘要: 利用 ANSYS/LS-DYNA 显式动力分析软件, 对仿石鳖壳板的构形单元仿生模型和构形-凹槽形态及构形-凸包形态二元耦合仿生模型的动态冲蚀磨损过程进行了三维数值模拟, 对比分析了不同耦合对靶材抗冲蚀性能的影响规律。3 种模型在整体水平上抗冲蚀性顺序依次为凸包弧形板、凹槽弧形板和光滑弧形板。在弧形板峰部, 凹槽的应力分散效应即抗冲蚀性能明显优于凸包; 而在翼区, 凸包的抗冲蚀性能显著优于凹槽, 说明石鳖壳板在进化过程中优化出了最佳的形态组合, 即壳板峰部分布有粗大的纵肋(肋间相对形成凹槽), 而翼区则分布有大量的凸包, 从而可以有效抵抗强烈的海砂冲蚀。

关键词: 石鳖 抗冲蚀 耦合仿生 数值模拟 ANSYS/LS-DYNA

中图分类号: TB17 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)S0-0319-06

引言

冲蚀磨损是引起材料破坏或设备失效的重要原因, 严重地影响着工业生产和发展^[1-2]; 且冲蚀磨损是工程应用中造成经济损失最多的磨损类型之一, 因而相关研究受到国内外高度重视。新兴诞生的仿生摩擦学^[3]为抗冲蚀磨损研究提供了新的参考, 以仿生摩擦学为研究手段, 从耦合角度研究具有抗冲蚀特性生物的冲蚀磨损机理, 从而制定抗磨对策, 减少磨损耗材, 对提高机械设备和零件的安全寿命将产生极大的社会和经济效益^[4-9]。

石鳖作为一种原始贝类, 典型的多板纲代表, 具有特殊的生物习性和典型的体表形貌, 其外套膜与贝壳的软硬结合, 无机物与有机质的强韧结合, 贝壳刚性 with 壳间柔性结合等赋予石鳖以优良的抗冲蚀磨损特性。本试验选取典型潮间带贝类红条毛肤石鳖 *Acanthochiton rubrolineatus* 为研究对象, 运用仿生耦合理念, 探索其实现抗冲蚀功能所采取的耦合方式, 揭示其抗冲蚀磨损的耦合机制与规律。

1 原理

1.1 生物模型

本模拟选择红条毛肤石鳖(图1)为生物模型。石鳖属于多板纲原始贝类, 体呈椭圆形, 有呈覆瓦状排列的石灰质壳板 8 块, 在中间壳板峰部分布有

3 条粗大的纵肋, 在翼区则广泛分布有大量低平粒状突起。壳板周围为外套膜, 形成较宽的环带, 与壳片紧密结合。石鳖生活时以宽大的足部和环带牢固地附着在附着物上, 因此即使在受激浪冲击的岩石上也有分布, 表现出良好的抗冲蚀磨损性能。

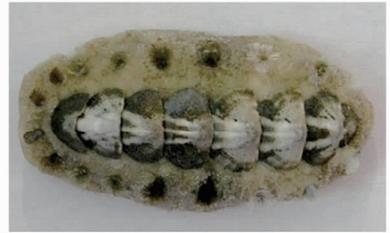


图1 红条毛肤石鳖

Fig.1 Biological model of *Acanthochiton rubrolineatus*

已有研究表明, ANSYS/LS-DYNA 有限元模拟结果与冲蚀磨损试验具有较好的吻合性, 说明利用该有限元模拟来研究冲蚀磨损和指导工程应用具有可行性和可靠性^[10-15]。本文以红条毛肤石鳖中间壳板为生物原型, 利用 Pro/E 与 ANSYS 软件联合建立了 3 种几何仿生模型; 采用 LS-DYNA 进行显示求解, 分别研究了三维多粒子对单元仿生模型与二元耦合仿生模型的冲蚀磨损过程; 利用 ANSYS 后处理观察模拟结果, 基于最大拉应力即第一主应力 (First principal stress) 和米塞斯应力 (Von mises stress), 对不同模型表面的抗冲蚀磨损性能进行对比分析。

收稿日期: 2014-06-28 修回日期: 2014-08-06

* 国家自然科学基金资助项目(51105168)

作者简介: 田喜梅, 博士生, 主要从事工程仿生研究, E-mail: txm@jlu.edu.cn

通讯作者: 田丽梅, 副教授, 主要从事工程仿生研究, E-mail: lmtian@jlu.edu.cn

1.2 理论基础

根据研究经验选择线性黏弹性模型作为靶材的本构模型,将冲击粒子定义为刚性体模型。当确定了所选择的材料模型后,就可以定义所有相关的材料特性。线性黏弹性模型表达式为

$$\sigma_{ij} = 2 \int_0^t \Phi(t-\tau) \frac{\partial \varepsilon'_{ij}(\tau)}{\partial \tau} d\tau \quad (1)$$

式中 σ_{ij} ——应力张量 ε_{ij} ——应变张量
 t ——当前时间 τ ——松弛时间
 剪切松弛模量为

$$\Phi(t) = G_{\infty} + (G_0 - G_{\infty}) e^{-\beta t} \quad (2)$$

式中 G_{∞} ——长期弹性剪切模量
 G_0 ——短期弹性剪切模量
 β ——材料扩展指数因子

由体积 V 计算增量积分压力时,需预先进行弹性体积假设,即 $V/p = K$ (弹性体积模量), p 为压力。对于该材料选项,需定义弹性剪切模量、弹性体积模量和密度等参数。

为减少显式分析计算时间,本模拟中,冲蚀粒子被定义为刚体。刚体内单元之间不需要用连接性网格连接,故在模型中定义了多个刚体类型用以表示多个独立的刚性体。刚性体模型在显示动力学分析中具有重要意义,需定义的参数包括:弹性模量、泊松比、密度、平移约束参数和转动约束参数。在定义刚性体之后,可以指定其惯性特性、质量和初始速度矢量。

2 模型建立

2.1 构形单元仿生模型的建立

由于 ANSYS 自带建模功能有限,因此选择应用三维设计软件 Pro/E 对分析目标建立三维实体模型。根据红条毛肤石鳖中间板即第 4 壳板(图 2a)的构形建立简化的光滑弧形板模型(图 2b),即构形单元仿生模型。基体主要特征尺寸为:长 50 mm,宽 50 mm,高 5 mm,圆弧半径为 48.14 mm。

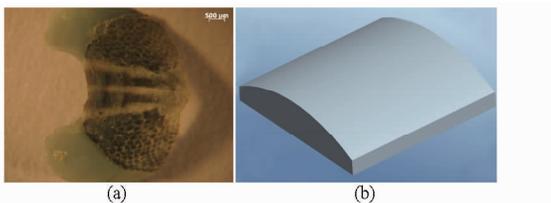


图 2 生物原型及几何模型

Fig. 2 Biological prototype and geometrical model

(a) 红条毛肤石鳖中间壳板 (b) 光滑弧形板几何模型

2.2 二元耦合仿生模型的建立

根据石鳖中间板表面分布有棱纹与凸包等非光滑形态,在构形单元仿生模型的基础上欲进一步建

立构形-棱纹形态及构形-凸包形态二元耦合仿生模型。由于棱纹和凹槽结构特征具有相对性,且凹槽模型易建立且计算量相对较小,因此在这里将构形-棱纹形态仿生模型修正为构形-凹槽形态仿生模型。

采取 Pro/E 与 ANSYS 联合建模方法,将 Pro/E 所建立的光滑弧形板模型导入 ANSYS 中,使用布尔运算减命令得到凹槽弧形板仿生耦合模型(图 3a)。对于凸包弧形板模型,则使用布尔运算的加命令在弧形板表面建立若干小的凸包(图 3b)。具体模型参数如下:凹槽-弧形板耦合仿生模型主要特征尺寸:基体长、宽为 50 mm;高为 5 mm;圆弧半径为 48.14 mm;凹槽半径为 5 mm;间距为 7.5 mm。凸包-弧形板耦合仿生模型主要特征尺寸:基体长、宽为 50 mm;高为 5 mm;圆弧半径为 48.14 mm;凸包半径为 1.5 mm;间距为 6 mm。

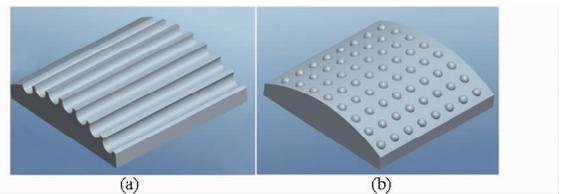


图 3 构形-形态耦合三维实体几何模型

Fig. 3 Configuration-morphology dual-bionic coupled models

(a) 凹槽-弧形板耦合仿生模型 (b) 凸包-弧形板耦合仿生模型

2.3 有限元模型的建立

通过 Pro/E 和 ANSYS 之间的接口程序,将 3 种模型导入 ANSYS 软件。在前处理过程中,磨料颗粒被简化为球形粒子,直径为 3 mm,采用刚性体材料模型;靶材简化为弧形板,采用线性黏弹性材料模型。在定义单元类型和材料特性后,进行智能网格划分。粒子与光滑弧形板、凹槽弧形板和凸包弧形板的有限元模型如图 4 所示。

3 冲蚀磨损边界条件与加载设置

(1) 材料参数设置

由于在生物原型中,位于壳板最外层的角质层较薄,由硬蛋白构成,主要起隔离外部有害物质即保护贝壳的作用,强度和断裂韧性则相对较低;而棱柱层与珍珠层在壳板中占据主体部分,由有机物和无机物 CaCO_3 复合而成,决定了贝壳具有优良的强度和断裂韧性。因此,在本模拟中,靶材选择与 CaCO_3 接近的陶瓷材料 SiC;而冲蚀粒子选择与砂砾具有相似成分的 SiO_2 。靶板 SiC 材料模型参数:剪切模量 G 为 197 GPa,体积模量 K 为 208 GPa,材料密度 ρ 为 $3.1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。粒子 SiO_2 材料模型参数:弹性

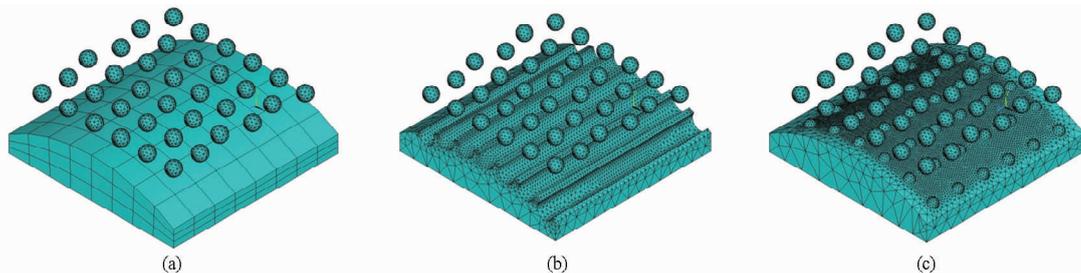


图4 仿生耦合有限元模型

Fig.4 Bionic coupling finite element models

(a) 光滑弧形板 (b) 凹槽-弧形板 (c) 凸包-弧形板

模量 E 为 302 GPa, 材料密度 ρ 为 $2.32 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 泊松比 ν 为 0.35。

(2) 定义接触

将冲击粒子与靶板定义为 2 个组件 (PART1, PART2) 后, 将两者之间接触类型定义为面-面接触 (STS) 和侵蚀接触 (ESTS), 并将粒子和靶板分别定义为接触面 (Contact surface) 和目标面 (Target surface)。

(3) 施加载荷与约束边界条件

陶瓷材料在低攻角冲蚀下所受到的冲蚀损伤最小, 正向冲蚀角下冲蚀率最大。因此, 本文主要对粒子垂直冲击弧形板进行模拟研究。在定义边界条件时, 约束掉粒子除 z 轴方向自由度外的所有自由度, 且约束了靶板底面所有方向的自由度。根据海浪的移动速度将粒子的冲击速度设定为 -2.63 m/s 。

(4) 模型求解

在求解设置过程中将结果文件输出步长 EDNST 和时间历程文件输出步长 EDHTIME 都设置为 20, 终止时间设置为 80 ms。

4 冲蚀磨损模拟结果分析

根据磨粒与靶板的材料参数, 不考虑应力累积, 可计算出靶材的冲蚀磨损临界速度 v_{pc} 为

$$v_{pc} = \frac{\pi^2}{2\sqrt{10}} \sigma^{5/2} \rho_p \left(\frac{1 - \nu_p^2}{E_p} + \frac{1 - \nu_t^2}{E_t} \right)^2 \quad (3)$$

$$\text{其中} \quad \sigma \approx (1.59 \sim 3.2) \sigma_b \quad (4)$$

式中 ρ_p —— 磨粒密度 ν_p —— 磨粒泊松比

ν_t —— 靶材泊松比

E_p —— 磨粒弹性模量

E_t —— 靶材弹性模量

σ —— 靶材弹性载荷极限

σ_b —— 材料抗弯强度

经计算, 得到靶材临界载荷为 (559.68 ~ 1126.4) MPa, 相应的冲蚀磨损临界速度为 0.03 ~ 0.17 m/s。本模拟冲击速度 2.63 m/s 远大于该理论临界速度, 因而, 可以判断在本模拟过程中磨粒必

将对靶板产生冲蚀磨损。

根据材料力学强度理论, 固体域的最大接触应力反映了模型屈服破坏的程度。对于冲蚀磨损模拟分析, 通常选择米塞斯应力 (等效应力) 作为分析结果的判据, 等效应力峰值越大表明材料屈服破坏越严重, 即材料表面所受到的冲蚀磨损就越严重。对于脆性材料, 也可以选择最大拉应力即第一主应力作为分析的对象。利用 ANSYS 通用后处理器 POST1, 分别给出 3 种模型冲蚀磨损过程的第一主应力云图和等效应力云图 (图 5) 并进行分析。

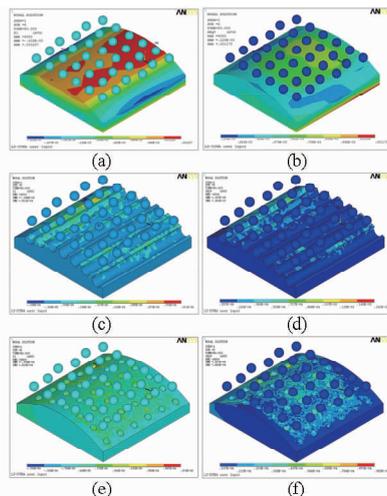


图5 模型冲蚀磨损应力云图

Fig.5 Stress nephogram of three models under erosion

(a) 光滑弧形板第一主应力 (b) 光滑弧形板等效应力

(c) 凹槽-弧形板第一主应力 (d) 凹槽-弧形板等效应力

(e) 凸包-弧形板第一主应力 (f) 凸包-弧形板等效应力

由光滑弧形板模型第一主应力云图 (图 5a) 可知, 其峰部为应力集中区, 受到较强的拉应力, 峰部不同区域的应力没有明显差别, 且应力从峰部向翼区依次呈条状递减。根据等效应力云图 (图 5b), 峰部同样出现应力集中现象, 但不同区域的等效应力差别明显, 呈现 3 个应力梯度。

凹槽-弧形板模型的第一主应力 (图 5c) 和等效应力 (图 5d) 的分布模式具有相似性, 其峰部分布的凹槽具有显著的应力分散效应, 从而避免了冲蚀磨

损过程中峰部出现应力集中现象。从第一主应力云图可知,峰部拉应力为负值,即峰部受到压应力而非拉应力;由于陶瓷材料的磨损裂纹是在拉应力作用下产生的,且只有在拉应力区,裂纹得以扩展,而进入压应力区后,裂纹扩展即停止^[16],从而间接说明靶板峰部受到的冲蚀磨损较小。但在靶板的两侧翼区,应力则相对较大,特别是左侧翼区出现应力集中现象。

对于凸包-弧形板耦合仿生模型,其第一主应力(图5e)和等效应力(图5f)的分布模式同样具有一致性。广泛分布的凸包具有良好的应力分散效应,避免了冲蚀过程中靶板出现大面积的应力集中现象。对于第一主应力,在大多区域都表现为压应力而非拉应力。除了在靶板左侧翼区部分凸包区域发生应力集中现象外,靶板整体特别是右侧翼区应力都相对较小。

5 单元仿生与二元耦合仿生模型抗冲蚀性能对比

从3种模型第一主应力峰值对比曲线(图6)可知,在整个冲蚀磨损过程中,光滑弧形板在每个时间步长的应力峰值都远高于其他2种耦合仿生模型,即抗冲蚀性能最差。相对于光滑弧形板,凹槽弧形板和凸包弧形板都具有相对较低的应力峰值,其中凸包弧形板整体表现出最优的抗冲蚀特性。

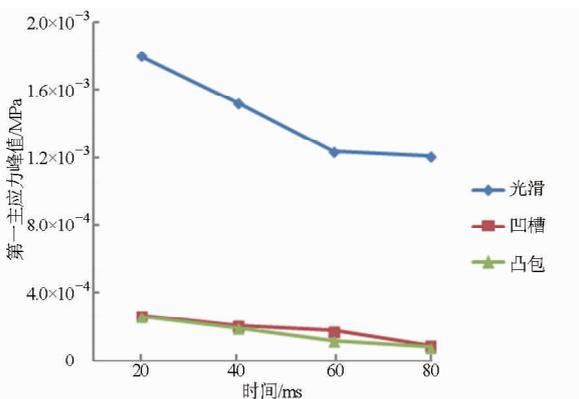


图6 3种模型第一主应力峰值对比曲线

Fig. 6 Comparison of first principal stress of three bionic models

根据3种模型米塞斯等效应力峰值对比曲线(图7)可知,在整个冲蚀磨损过程中,光滑弧形板在每个时间步长的等效应力峰值同样都高于其他2种耦合仿生模型。凹槽弧形板和凸包弧形板都具有相对较低的等效应力峰值,其中凸包弧形板的应力峰值最低,整体表现出最优的抗冲蚀特性。

由以上2组对比曲线可知,3种模型第一主应力和米塞斯等效应力峰值分布具有一致性,即在整

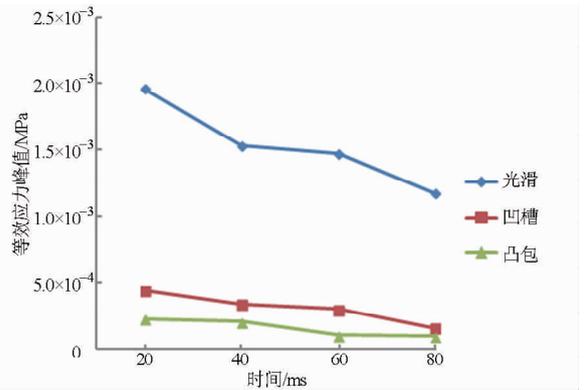


图7 3种模型米塞斯等效应力峰值对比曲线

Fig. 7 Comparison of von Mises stress of three bionic models

体水平上抗冲蚀性顺序依次为凸包弧形板、凹槽弧形板和光滑弧形板。此外,在粒子冲蚀弧形板过程中,在初始接触碰撞时,靶板表现出最大的应力峰值,而随着载荷的持续,靶材吸收了部分冲击能量,应力逐渐降低,后应力维持在稳定状态。

石鳖壳板表面的凸包、凹槽(纵肋)等表面形态之所以能够有效降低粒子对壁面的冲蚀,其最主要原因为非光滑表面形态对气流的涡旋作用,涡旋能够吸收碰撞壁面的粒子所携带的能量,从而减少粒子的冲击动能。此外,根据气-固两相流理论,通过改变靶面形态可以改变近壁区流场的条件,从而影响粒子的速度和轨迹,最终降低粒子对壁面的冲蚀磨损^[15]。由于凹槽和凸包形态不同,改变近壁区流场的条件也不同,因此,不同的形态表面对提高材料表面的抗冲蚀程度不同。

虽然凸包弧形板的总体应力峰值低于凹槽弧形板,然而从应力云图(图5)可知,在弧形板的峰部和翼区,2种模型的应力峰值分布趋势并不一致,即在抗冲蚀性能上各具优势。在凹槽弧形板峰部,绝大部分区域拉应力为负值(图5c),米塞斯等效应力为 2.57×10^{-7} MPa,而只有极小部分区域等效应力达到 1.81×10^{-5} MPa(图5d);而在凸包弧形板峰部,绝大部分区域拉应力为 1.76×10^{-5} MPa(图5e),米塞斯等效应力为 1.10×10^{-5} MPa,小部分区域等效应力甚至达到 4.37×10^{-5} MPa(图5f)。可见,在弧形板峰部凹槽的应力分散效应即抗冲蚀性能明显优于凸包。

而在弧形板翼区,由应力云图可见2种模型左右侧的应力状态都存在明显差别,即左侧翼区出现应力集中现象,而右侧翼区应力则较分散,这是由两侧翼区非光滑形态的分布模式不同造成的,这也从另一角度说明非光滑形态对提高靶板的抗冲蚀性能具有重要作用。对于这2种模型,凹槽弧形板左右

两侧翼区的第一主应力峰值(图 8a)和米塞斯等效应力峰值始终高于凸包弧形板(图 8b),说明在弧形

板翼区,凸包的应力分散效应即抗冲蚀性能优于凹槽。

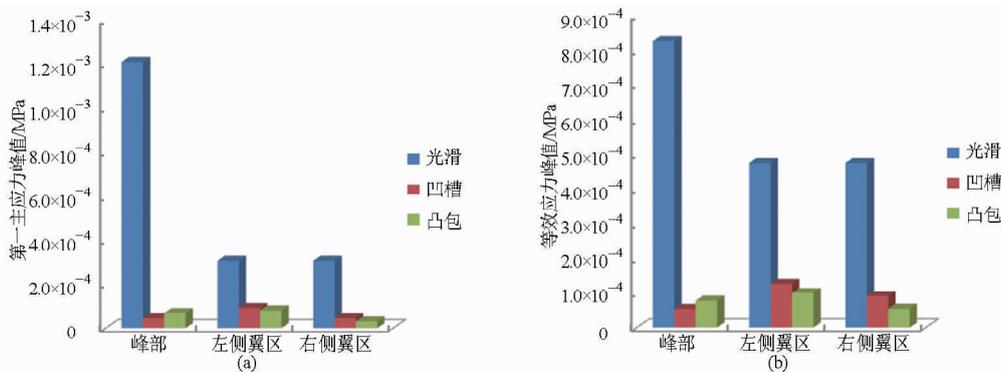


图 8 3 种模型不同区域应力峰值对比

Fig. 8 Comparison of peak stress in different areas of three models

综上,当弧形板表面光滑时,峰部应力比较集中,容易受到冲蚀损伤。若在峰部分布有凹槽非光滑形态,将具有应力分散效应,从而可以显著降低冲蚀磨损破坏;而在翼区分布有凸包非光滑形态,将具有更优的抗冲蚀性能。因此,本模拟研究表明,石鳖壳板在进化过程中优化出了最佳的形态组合,即壳板峰部分布有粗大的纵肋(肋间相对形成凹槽),而翼区则分布有大量的凸包,从而可以有效抵抗强烈的海砂冲蚀。

本文只是在正向冲击角下对仿石鳖壳板的模型进行了冲蚀磨损模拟研究,表明其表面具有最佳的形态组合。而在实际生活状态中,石鳖所受到的水砂冲击角往往小于 45°;且本模拟模型选择的是 SiC 陶瓷材料,而石鳖的壳板实际是由有机物和无机物组成的多梯度复合材料。因此,石鳖在生活状态时,其壳板将具有更加优良的抗冲蚀磨损性能。石鳖壳板的这种优势形态组合可应用于工程领域中,如各类农田排灌机械,包括水泵、水轮泵、喷灌设备和滴灌设备等。对于特定的具有弧形结构的迎冲蚀壁面,可采取类似的凹槽与凸包复合结构,即在峰部加

工凹槽,而在两翼分布凸包,从而可以达到最优的抗冲蚀性能。

6 结论

(1) 利用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件,对仿石鳖中间壳板的构形单元仿生模型和构形-凹槽形态及构形-凸包形态二元耦合仿生模型的动态冲蚀磨损过程进行了三维数值模拟,以第一主应力和米塞斯等效应力为评价指标,对比分析了不同非光滑形态对靶材抗冲蚀性能的影响规律。

(2) 本模拟条件下,3 种模型的第一主应力和米塞斯等效应力峰值分布具有一致性,在整体水平上抗冲蚀性顺序依次为凸包弧形板、凹槽弧形板和光滑弧形板。在弧形板峰部凹槽的应力分散效应即抗冲蚀性能明显优于凸包;而在翼区凸包的应力分散效应即抗冲蚀性能显著优于凹槽。

(3) 模拟结果表明,石鳖壳板在进化过程中优化出了最佳的形态组合,即壳板峰部分布有粗大的纵肋(肋间相对形成凹槽),而翼区则分布有大量的凸包,从而可以有效抵抗强烈的海砂冲蚀。

参 考 文 献

- Allen C, Ball A. A review of the performance of engineering materials under prevalent tribological and wear situations in South Africa industries [J]. Tribology International, 1996, 29(2):105-116.
- 董刚,张九渊. 固体粒子冲蚀磨损研究进展[J]. 材料科学与工程学报, 2003, 21(2):307-312.
Dong Gang, Zhang Jiuyuan. Developments of research on the solid particle erosion of materials [J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2003, 21(2):307-312. (in Chinese)
- 佟金,马云海,任露泉. 天然生物材料及其摩擦学[J]. 摩擦学报, 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)
- 高峰,黄河,任露泉. 新疆岩蜥三元耦合耐冲蚀磨损特性及其仿生试验[J]. 吉林大学学报:工学版, 2008, 38(3):586-590.
Gao Feng, Huang He, Ren Luquan. Erosive wear resistance of *Laudakin stoliczkan*'s ternary coupling and bionic experiments [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2008, 38(3):586-590. (in Chinese)
- 高峰,任露泉,黄河,等. 沙漠蜥蜴体表抗冲蚀磨损的生物耦合特性[J]. 农业机械学报, 2009, 40(1):180-183.
Gao Feng, Ren Luquan, Huang He, et al. Biology coupling characteristics of anti-erosive wear of desert lizard's skin [J].

- Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(1):180–183. (in Chinese)
- 6 Han Z W, Zhang J Q, Ge C, et al. Anti-erosion function in animals and its biomimetic application [J]. Journal of Bionic Engineering, 2010, 7(Supp. 1):50–58.
 - 7 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 in China Series E: Technological Sciences, 2010, 53(11):2905–2913.
 - 8 Huang H, Zhang Y, Ren L Q. Particle erosion resistance of bionic samples inspired from skin structure of desert lizard, *Laudakin stoliczkana* [J]. Journal of Bionic Engineering, 2012, 9(4):465–469.
 - 9 Han Z W, Zhang J Q, Ge C, et al. Erosion resistance of bionic functional surfaces inspired from desert scorpions [J]. Langmuir, 2012, 28(5):2914–2921.
 - 10 Shimizu K, Noguchi T, Seitoh H, et al. FEM analysis of the dependency on impact angle during erosive wear [J]. Wear, 1999, 233–235:157–159.
 - 11 Shimizu K, Noguchi T, Seitoh H, et al. FEM analysis of erosive wear [J]. Wear, 2001, 250(1):779–784.
 - 12 Aquaro D, Fontani E. Erosion of ductile and brittle materials [J]. Meccanica, 2001, 36(6):651–661.
 - 13 Wang Y F, Yang Z G. Finite element model of erosive wear on ductile and brittle materials [J]. Wear, 2008, 265(5):871–878.
 - 14 廉晓庆, 蒋明学, 白顶有. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的磨料冲击行为分析[J]. 硅酸盐通报, 2010, 29(2):409–412.
Lian Xiaoqing, Jiang Mingxue, Bai Dingyou. Analysis of impacting behavior of abrasive particles based on ANSYS/LS-DYNA[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2010, 29(2):409–412. (in Chinese)
 - 15 张俊秋. 耦合仿生抗冲蚀功能表面试验研究与数值模拟[D]. 长春: 吉林大学, 2011.
Zhang Junqiu. Experimental investigation and numerical simulation on coupling bionic functional surface of erosion resistance [D]. Changchun: Jilin University, 2011. (in Chinese)
 - 16 刘家浚, 李诗卓, 周平安, 等. 材料磨损原理及其耐磨性[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993:12–36.

Three Dimensional Numerical Simulation of Anti-erosion Characteristics of Chiton *Acanthochiton rubrolineatus*

Tian Ximei¹ Li Hongwei² Tian Limei¹

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

2. College of Computer Science and Technology, Jilin University, Changchun 130012, China)

Abstract: Molluscan shells lived in harmony with nature upon the combination of multiple factors, e. g. , surface morphologies, multilevel structures and component materials, and achieved an optimum adaptation to the surroundings based on such biological coupling functions. The Polyplacophora usually has complex surface topography and specific living behaviors which showed exceptional anti-erosion property. Thus, the chiton *Acanthochiton rubrolineatus* was selected to study its bionic anti-erosion mechanism. According to biological coupling and bionic anti-erosion property of chiton, the explicit dynamic software ANSYS/LS-DYNA was used to simulate the erosive process of uni-bionic model of configuration and configuration-groove/convex morphology dual-bionic coupled model imitating the shell surface of chiton. The mechanism of erosion of each model was comparatively analyzed. The overall erosion resistance of the three models was sorted as convex-curved plate, groove-curved plate and smooth-curved plate. However, in the peak of the curved plate, the stress dispersion effect of groove was much better than that of convex, whereas the stress dispersion effect of convex was better than that of groove at the pterion region. The simulation results indicated that the shell plate of chiton evolved an optimum combination of morphologies with thick riblets distributed in the peak (grooves were formed between the riblets) and convexes scattered around the pterion region, and thus the chiton was endowed with exceptional anti-erosion property. The current research result could be further used in the series of agricultural irrigation machinery, such as water pump, turbine pump, spray irrigation equipment and drip irrigation system.

Key words: Chiton Anti-erosion Bionic coupling Numerical simulation ANSYS/LS-DYNA