面一定的距离以及在离开滞止点的较远下游处,流动的各向异性逐渐减弱. 作者认为这是由于在 $C_{\epsilon 1}$ 中引入了非线性附加项的结果,这也是基于流动各项同性假设的标准 $k-\epsilon$ 模型所无法预测到的 [4].

4 结 论

- (1) 新版的 RNG $k-\varepsilon$ 模型通过模型系数的修正并在 $C_{\varepsilon 1}$ 中引入非线性附加项,可以显著提高对冲击射流的数值预测效果. 最近的研究 $^{[7,8]}$ 也表明, 基于 RNG的两方程模型在某些流动的预测中取得了成功. 这说明 RNG $k-\varepsilon$ 模型在湍流研究中是一种非常有前量的湍流模型.
- (2) 冲击射流场的数值预测结果对 RNG k- ϵ 模型中系数 C_{e1} 和 C_{e2} 的取值以及非线性附加项的取舍非常敏感.

参考文献

- 1 Yakhot V, Orszag SA. Renormalised group analysis of turbulence: I. Basic theory. J Sci Comput, 1986,
 1: 3~51
- 2 Yakhot V, Smith LM. The renormalization group, the ε expansion and derivation of turbulence models. J Sci Comput, 1992, 7: 35~68
- 3 Yakhot V, et al. Development of turbulence model for shear flows by a double expansion technique. Phys Fluids A, 1992, 4(7): 1510~1520
- 4 Ashforth-Frost S, Jambunathan K. Numerical prediction of semi-confined jet impingement and comparison with experimental data. Int J Numer Methods Fluids, 1996, 23: 295~306
- 5 Thangam S, Speziale CG. Turbulent flow past a backward-facing step: A critical evaluation of twoequation models. AIAA J, 1992, 30(5): 1314~1320
- 6 Speziale CG. Analytical methods for the develop-

- ment of Reynolds stress closures in turbulence. Ann Rev Fluid Mech, 1991, 23: 107~157
- 7 Wang X, Cheng L. Three-dimensional simulation of a side discharge into a cross channel flow. Computers & Fluids, 2000, 29: 415~433
- 8 Tutar M, Hold AE. Computational modeling of flow around a circular cylinder in sub-critical flow regime with turbulence models. Int J Numer Methods Fluids, 2001, 35: 763~784

APPLICATION OF RNG TURBULENCE MODELS ON NUMERICAL COMPUTATIONS OF AN IMPINGING JET FLOW

CHEN Qingguang XU Zhong
(Department of Fluid Engineering, Xi'an Jiaotong
University, Xi'an 710049, China)

ZHANG Yongjian

(School of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, Tai'an 271019, China)

Abstract Three versions of RNG based k- ε turbulence models have been applied to an axisymmetric turbulent impinging jet flow. By comparison with the experimental data, the effects of modifications of model coefficients and the introduction of non-linear additional term on numerical results are examined, and the numerical predictive abilities of the three models on impinging jet flow are also assessed.

Key words RNG k- ε turbulence model, impinging jet, non-linear additional term

一类生物材料界面的结构及其裂纹阻力1)

宋 凡 白以龙

(中国科学院力学研究所 LNM, 北京 100080)

摘要 通过对天然珍珠母材料有机基质界面的微结构 及其力学性能的研究, 简要地分析了珍珠母有机界面 的弹性模量以及裂纹阻力与其微结构的联系, 由此说 明在珍珠母所表现出来的优异力学性能中微结构所起 的重要作用.

关键词 珍珠母, 微结构, 有机基质界面, 矿物桥

本文于 2002-07-23 收到.

¹⁾ 国家自然科学基金项目 (10072067) 资助.

1 引 言

天然贝壳中的珍珠母是一种以蛋白质和多糖组成的有机基质为基体、由文石晶片形成增强相的两相层状复合材料。尽管珍珠母是由原始的、低强度的天然陶瓷和有机基质组成,但由于有生命系统参与合成,其特殊的组装方式、界面配合以及由此产生的优异的材料力学性能,特别是其微结构对研制仿生材料的指导性,近年来在对其结构以及力学特征的研究方面受到了极大的关注^[1~4].研究珍珠母的微结构以及对其力学行为的影响,可为材料的优化和仿生设计提供概念性指导已成为广泛的共识.

本文以珍珠母有机基质界面中存在矿物桥结构为 基础,通过对珍珠母中有机基质界面的力学分析,阐 明这种微结构对珍珠母有机基质界面的弹性模量以及 裂纹阻力的重要影响.

2 界面的微结构

本文所研究的珍珠母均取自鲍鱼 (haliotis iris) 的壳、它是由一些小平板状结构的文石晶片单元平行 累积而成、这些小平板板面平行于贝壳壳面、就像建 筑物墙壁的砖块一样相互堆砌镶嵌、成层排列、形成 整个珍珠层,每层晶片厚度约 $0.37 \, \mu \text{m} \sim 0.4 \, \mu \text{m}$, 其 横截面上每片晶片的平均宽度约为 $4.0 \, \mu m$; 文石晶 片之间为指导矿化的有机物、缸层有机基质界面厚约 25 nm~32 nm^[5]. 齿此可算出,有机基质与文石晶片 的体积分数分别近似为 5% 和 95%. 在有机基质界面 中含有垂直于上下两层晶片的一种纳米圆柱形结构、 在生物矿化领域中被称为矿物桥, 每根矿物桥与有机 基质层厚相同、其出现的位置在有机基质界面中是随 机的. 矿物桥由平均直径约 46 nm 的文石柱状晶体构 成、在有机基质层间的密度大约为 91 μm~116 μm. 如图 1 所示. 现已确认 [5,6], 珍珠母的微结构不是传 统上认为的"砖墙"式结构, 而应是"砖-桥-泥"式 结构. 另外, 随着有机基质的水分含量的不同, 珍珠母

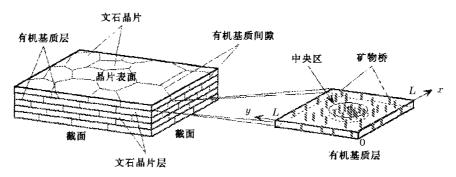


图 1 珍珠母结构形貌及有机基质层中的微结构示意图

的力学性能将发生变化^[4]. 在普通温度下,珍珠母的水含量达到饱和状态时,大约为其重量的 0.2%.

在每一晶片所对应的有机基质中, 矿物桥满足分布率 ^[6]

 $n(x,y)\mathrm{d}x\mathrm{d}y =$

$$\frac{N}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2 + (y-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] dxdy \qquad (1)$$

其中, N=1600 是在每一晶片上的矿物桥总数, $\mu=2\mu\mathrm{m}$ 和 $\sigma=0.67\mu\mathrm{m}$ 为分布的平均值和标准差, x 和 y ($0 \le x, y \le 4$) 是局部坐标。由式 (1) 可知,在每一晶片上,存在一个矿物桥相对密集的中央区。在中央区内,矿物桥数为整个晶片上矿物桥数的 46%,但中央区的面积仅为整个晶片面积的 1/9。 中央区在局部坐标系中的任一坐标轴上的坐标为 (1.33,2.67) (图 1) [5,6].

3 界面的裂纹阻力

为研究珍珠母有机基质界面的力学行为,取一珍珠母中任意两相邻文石晶片间的有机基质层片,如图 1 所示,将其近似考虑为一个以有机机质为基体、矿物桥为纤维的纤维增强复合材料.为方便起见,假设这片有机基质为正方形,其边长为在珍珠母横截面上的晶片平均边长 $L=4.0\mu\mathrm{m}$.这样,该有机基质片的面积与真实晶片的面积完全一致 $^{[6]}$.定义沿x方向,有机基质层片中的矿物桥体积分数为

$$V_b|_{l_1}^{l_2} = \frac{\pi D^2}{4L(l_2 - l_1)} \int_{l_1}^{l_2} \left(\int_0^L n(x, y) dy \right) dx$$
 (2)

其中, (l_1, l_2) 表示所研究的有机基质层片在 x 方向上的任意区间,并满足 $L \geq l_2 - l_1 \geq \mathrm{d} x \geq D$,这里 $D = 46\,\mathrm{nm}$ 是矿物桥的平均直径. 于是,这个复合材料基体的体积分数为 $V_o|_{l_1}^{l_2} = 1 - V_b|_{l_2}^{l_2}$. 由方

程 (2), 这个有机基质层片中, 纤维的平均体积分数为 $V_6|_0^L=0.17$; 在其中央区中, 矿物桥的平均体积分数为 $V_6|_{1.93}^{2.97}=0.35$.

由复合材料力学,它沿矿物桥方向在区间 (l_1, l_2) 中的弹性模量为

$$E_c|_{l_*}^{l_2} = (1 + 24V_b|_{l_*}^{l_2})E_o \tag{3}$$

其中 E_o 为有机基质的弹性模量,并且在方程(3)已使用了矿物桥的弹性模量,即文石的弹性模量(100 GPa). 若不考虑矿物桥的存在,由 $V_0|_{l_1}^{l_2}=0$,有 $E_c|_{l_1}^{l_2}=E_o$,方程(3)变为传统的珍珠母模型 [4]. 当考虑矿物桥时,这个有机基质层片中的平均弹性模量为 $E_c|_{l_0}^{l_0}=5E_o$;在其中央区中,平均弹性模量为 $E_c|_{l_0}^{l_1}=9.4E_o$ 。因此,对有机层材料来说,矿物桥对层片沿矿物桥方向的弹性模量的影响是显著的.

珍珠母最优异的力学性能之一是它的高韧性,与材料韧性联系最紧密的是断裂阻力,以下考虑裂纹在上述复合材料中传播时的断裂阻力问题。珍珠母中的文石晶片和有机基质界面在力学性能上存在着良好配制,使得在绝大多数情况下,裂纹只是在有机基质层中扩展 [3,4]. 当裂纹在该有机基质层片中从 l_1 扩展到 $l_2 = l_1 + dl$ 时,有机基质的断裂功增量为

$$dW_o = 2\gamma_o (1 - V_b|_{l_s}^{l_2}) L dl \tag{4}$$

这时, 矿物桥的断裂功增量为

$$dW_b = 2\gamma_b V_b \Big|_{l_1}^{l_2} L dl \tag{5}$$

而有机基质与矿物桥间的断裂功增量为

$$dW_{ob} = 2\gamma_o \frac{116V_b|_{l_1}^{l_2}}{46} Ldl \tag{6}$$

其中, γ_o 和 γ_b 分别为有机基质和矿物桥的断裂能。于是,复合材料中的断裂阻力为

$$R_c|_{l_1}^{l_2} = \frac{1}{Ldl}(dW_o + dW_b + dW_{ob})$$
 (7)

方程 (7) 中,注意到 γ_b/γ_o 是一个小量并省去,得到在 (l_1, l_2) 中裂纹阻力表达式为

$$R_c|_{l_1}^{l_2} \approx (1 + 1.5V_b|_{l_1}^{l_2})R_o$$
 (8)

这里, $R_o=2\gamma_o$ 为有机基质的断裂阻力.不考虑矿物桥的存在时,有 $R_c|_{l_1}^{l_2}=R_o$,方程 (8) 变为传统的珍珠母模型.当考虑矿物桥时,这个有机基质层片中的平均裂纹阻力为 $R_c|_0^L\approx 1.26R_o$,在其中央区的平均裂纹阻力为 $R_c|_{1.37}^{2.67}\approx 2.04R_o$,即有机基质层中有

矿物桥与无矿物桥时平均裂纹阻力相差 1.26 倍, 最大 处可达 2 倍以上.

从以上分析可知,有机基质层的特殊微结构可能 是构成珍珠母这种生物材料具有高韧性的主要原因之 一. 而这种韧化机制又与珍珠母的特殊组成结构密切 相关.

4 结束语

本文对珍珠母中有机基质层的微结构以及珍珠母的力学性能作了初步的讨论,通过对珍珠母有机基质层的弹性模量和裂纹阻力的简要研究,阐明了微结构在生物材料力学性能中的重要性,这为以后更加深入地研究有关材料性能提供了一个基本的信息.

参考文献

- 1 Addadi L, Weiner S. A pavement of pearl. *Nature*, 1997, 389: 912~915
- 2 Schaffer TE, et al. Does abalone nacre form by heteroepiaxial nucleation or by growth through mineral bridges. Chem Mater, 1997, 9: 1731~1740
- 3 Currey JD. Mechanical properties of mother of pearl in tension. *Proc R Soc Lond B*, 1977, 196: 443~463
- 4 Jackson AP, et al. The mechanical design of nacre.

 Proc R Soc Lond B, 1988, 234: 415~440
- 5 Song F, Zhang XH, Bai YL. Microstructure in a biointerface. J Mater Sci Lett, 2002, 21(8): 639~641
- 6 Song F, Zhang XH, Bai YL. Microstructure and characteristics of the organic matrix layers of nacre. J Mater Res, 2002, 17(7): 1568~1573

MINERAL BRIDGES VERSUS THE MECHANICAL PROPERTIES OF NACRE

SONG Fan BAI Yilong

(LNM, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract Based on the microstructure of the organic matrix layers in nacre, the effects of the mineral bridges on the Young's modulus and the crack resistance of the interfaces of organic matrix are studied. The importance of mineral bridges on the mechanical behaviors of nacre is emphasized.

Key words nacre, microstucture, the interfaces of organic matrix, mineral bridges