

# 镶嵌式仿生耦合功能表面流体介质控制机制研究\*

田丽梅<sup>1</sup> 王银慈<sup>1</sup> 高栳桦<sup>1</sup> 商震<sup>2</sup> 任露泉<sup>1</sup>

(1. 吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130025; 2. 吉林大学汽车工程学院, 长春 130025)

**摘要:** 模拟海豚镶嵌式皮肤结构, 设计一种仿生耦合功能表面。利用 ANSYS-Workbench 软件对镶嵌式仿生耦合功能表面进行双向流固耦合计算, 流体计算采用 CFX 下的标准  $k-\epsilon$  湍流模型, 固体计算采用 Transient structural。模拟结果表明, 耦合功能表面湍动能、表面速度明显降低, 表面柔性材料产生位移变形。模拟结果表明, 表面柔性材料通过变形与基底刚性材料耦合, 通过对流体介质的顺应实现对流体介质的控制; 通过表面材料的弹性变形吸收部分能量, 有效降低了流体介质的湍动能, 避免了流固交界面能量过分交换而带来的能量损失。

**关键词:** 仿生耦合功能表面 镶嵌式 流体介质控制机制

**中图分类号:** TB17 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)06-0324-05

## 引言

海豚快速游泳之谜吸引了众多学者的广泛研究, 有些学者认为其完美的流线型身体是其快速游泳的一个原因<sup>[1-2]</sup>, 也有学者认为其特殊的皮肤结构是其快速游动的主要原因<sup>[3-5]</sup>。Matsumura<sup>[6]</sup>等以湍流脉动变形壁模型来模拟海豚皮肤, 计算结果表明, 壁体变形有助于降低粘性剪切应力和雷诺剪切应力而实现减阻; Takahide 等<sup>[7]</sup>利用板-弹簧模型代替柔顺壁, 采用直接数值模拟(DNS)方法进行模拟, 结果表明, 柔性壁在压力波动的作用下, 通过被动变形实现减阻功能。上述研究, 只考虑到了柔性壁表面的弹性变形, 而海豚的皮肤由具有一定弹性的表皮以及其基底具有一定硬度的真皮组成, 呈现出特殊的镶嵌状结构, 随着流体介质流过其体表压力的变化, 两者耦合形成动态的 ridges, 也是其实现减阻的一个重要原因<sup>[1,8-9]</sup>。自然界中, 这种通过表面弹性与结构的耦合而呈现出某种功能的现象, 称之为生物耦合<sup>[10]</sup>, 参与耦合的单位称之为耦元<sup>[11-12]</sup>。类似地, 利用仿生学原理, 利用不同的耦元构建具有某些特定功能, 并可随外界环境变化的表面称之为耦合功能表面。田丽梅等根据海豚特殊皮肤构造形成的仿生耦合功能表面进行了工程上的应用研究, 将这种仿生耦合功能表面应用到农业机械的离心式水泵, 并对其增效节能效果进行了大量的研究, 研究结果表明, 其水泵工作效率提高 5% 及以上, 扬程提高了 9%<sup>[13-17]</sup>。但对这种具有特殊构

造的仿生耦合功能表面对流体的控制机制却没能进行细致有效的研究。本文设计一种镶嵌式仿生耦合功能表面, 采用 ANSYS-Workbench 软件, 以 ANSYS-Transient structural 计算仿生耦合功能表面固体场, 采用 CFX 计算流体场, 对这种镶嵌式仿生耦合功能表面流场进行双向流固耦合计算来说明其对流体介质的控制机制。

## 1 流固耦合数值模拟

### 1.1 物理模型

根据仿生学相似原理, 基于海豚特殊的皮肤结构(图 1), 简化设计的镶嵌式仿生耦合功能表面如图 2 所示, 其刚性基底选用 ANSYS-Workbench 材料库中默认的钢材料, 力学性能参数已知; 表面采用硬度较小的柔性材料镶嵌而成, 本模拟表面柔性材料由实验室自行制备, 加工 10 个直径为 12 mm, 高为 25 mm 的试样, 采用 MD-200 型电子密度天平测得表面材料密度并取其均值; 利用日本岛津 AG10TA 型自动控制电子万能试验机加恒定载荷, 利用 XJ-26 型静态电阻应变仪测出试样纵向和横向应变, 根据  $\sigma = E\varepsilon$ , 求得弹性模量, 其中  $\sigma$  为恒定载荷,  $\varepsilon$  为应变, 计算出 10 个试样的  $E$  值并取其均值; 而泊松比  $\mu = \left| \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \right|$ ,  $\varepsilon_1$  和  $\varepsilon_2$  分别为纵向及横向应变, 由电阻应变仪测得; 材料的拉伸屈服极限及拉伸强度极限采用万能拉伸试验机测得, 上述各力学性能参数均取 10 个试样的均值, 见表 1。

收稿日期: 2013-07-16 修回日期: 2013-09-06

\* 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51105168, 51205160)、国土资源部公益性行业科研专项经费资助项目(201011082-06-2)、吉林省高技术产业化示范(推进)资助项目(jfjgj20111084)和长春市重大科技攻关专项资助项目(13KG33)

作者简介: 田丽梅, 副教授, 博士, 主要从事机械仿生科学与工程研究, E-mail: limeitian@jlu.edu.cn



图 1 海豚皮肤结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of dolphin skin structure

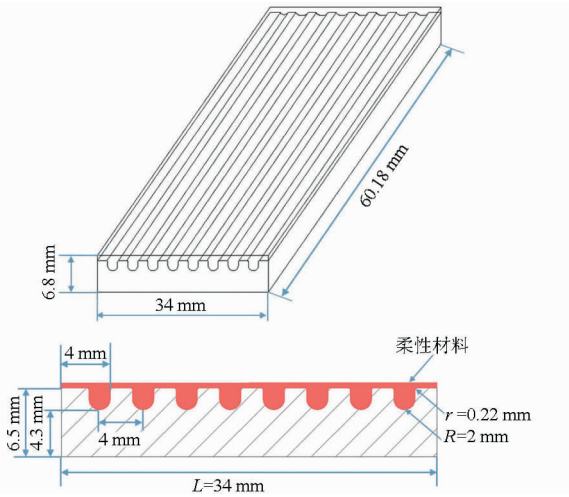


图 2 镶嵌式仿生耦合仿生功能表面的三维模型示意图

Fig.2 Three-dimensional model of mosaic bionic coupling functional surface

表 1 模型材料的力学性能参数

Tab.1 Mechanical properties of model material

模型	密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性 模量 $E$ / Pa	泊松 比 $\nu$	拉伸屈 服极限 $\sigma_s/\text{Pa}$	拉伸极 限强度 $\sigma_b/\text{Pa}$
刚性基底	7 850	$2.0 \times 10^{11}$	0.30	$2.5 \times 10^8$	$4.6 \times 10^8$
柔性高分子材料	1 300	$2.8 \times 10^4$	0.48	$2.2 \times 10^5$	$4.2 \times 10^5$

### 1.2 湍流模型

为了更好地满足计算所需的精度,而且能够节约计算时间,本文所要模拟模型采用标准  $k-\varepsilon$  模型<sup>[18-19]</sup>。标准  $k-\varepsilon$  模型的方程如下:

湍流动能方程为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \rho(P_k - \varepsilon) \quad (1)$$

湍流耗散方程为

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho \frac{\varepsilon}{k} (C_1 P_k - C_2 \varepsilon) \quad (2)$$

$$\text{其中} \quad \mu_t = C_\mu \frac{\rho k^2}{\varepsilon} \quad (3)$$

$$\varepsilon = \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial u_i'}{\partial x_k} \frac{\partial u_i'}{\partial x_k} \quad (4)$$

$$P_k = \frac{\mu_t}{\rho} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (5)$$

式中  $\mu_t$ ——湍动黏性系数

$C_\mu$ —— $k-\varepsilon$  湍流模型常数

$k$ ——湍流动能  $\varepsilon$ ——湍流耗散率

$\rho$ ——流体密度  $P_k$ ——湍动能生成项

该模型常数的取值为:  $C_\mu = 0.09, C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3$ 。

### 1.3 计算域的选择

计算域选为耦合功能表面沿流向的一段三维空间。为了尽可能地模拟真实情况的流动情况,同时为了避免上下流场的干扰,应当将计算模型的高取足够大,因为固体域整体高度尺寸为 6.8 mm,所以计算模型的尺寸定为 20 mm,这样既能得到准确的仿真结果又能减小计算量。本模拟计算中, $X$  向为流体流动方向,三维空间计算域示意图如图 3 所示,模型长  $\times$  宽  $\times$  高为 284 mm  $\times$  60.18 mm  $\times$  20 mm。

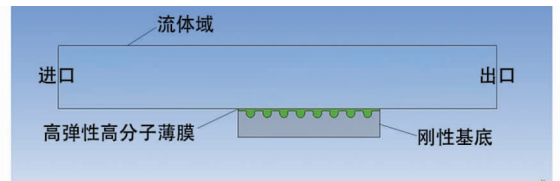


图 3 计算域示意图

Fig.3 Schematic diagram of computational domain

### 1.4 网格的生成

通过 Workbench 自带的流体及固体网格划分模块 Mesh,分别对流体域和固体域划分网格,流体域采用规则的六面体单元,为了能够比较真实地模拟镶嵌式耦合功能表面的微观流场,针对其特殊结构,对固体域采用四面体和六面体混合单元进行网格划分并利用定义尺寸函数的方法使得在固体域上的网格密集,最终获得流体域网格单元为 81 600,固体域网格单元为 206 280,网格在流体域部分较稀疏且规则,在固体域上较稠密,且网格总数不超过 30 万,这既可提高计算精度又可节省计算资源。图 4 为固体域的网格局部放大图。

### 1.5 求解条件设定

流体计算模型采用 Navier-Stokes 方程,湍流模型采用标准  $k-\varepsilon$  两方程模型,求解数值方法为 Reynolds 时均方程加湍流模拟(RANS),进流面设置为速度进口(2 m/s + 5% 湍动强度),出流面选用开口边界条件(Opening + 5% 湍动强度),流体域顶部和两侧均采用无滑移的壁面条件,采用 Scable Wall

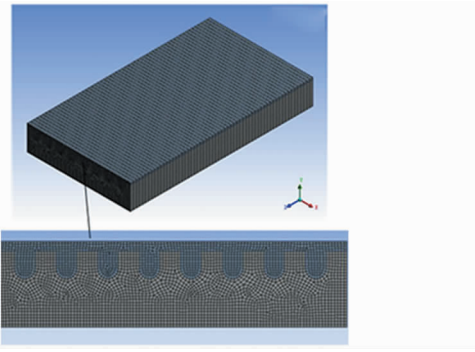


图4 镶嵌式仿生耦合功能表面网格示意图

Fig. 4 Grid of mosaic bionic coupling functional surface

Function 壁面函数法对  $k-\varepsilon$  两方程模型在近壁区的流动进行修正。固体计算采用 Transient structural。

因为进行双向流固耦合计算,一定要建立流固耦合面<sup>[19]</sup>,所以定义结构与水的交界面定义为流固耦合面,添加耦合标签 FSI,流固耦合面设置成功,流体通过力的传递,固体通过位移载荷的传递,在耦合面上相互作用并进行计算。

## 2 模拟结果及分析

图5是流体域上下壁面湍动能分布图,其中上、下壁面分别为普通表面和仿生耦合功能表面。仿生耦合功能表面与普通表面湍动能在数值和影响范围上存在明显区别,它不仅影响了表面本身所在流体域的湍动能,如图5位置2所示,而且对其上下流体区域的湍动能也有较大影响,如图5位置1及位置3所示,耦合功能表面的来流及尾迹区域,湍动能与普通表面的同类位置相比明显降低。

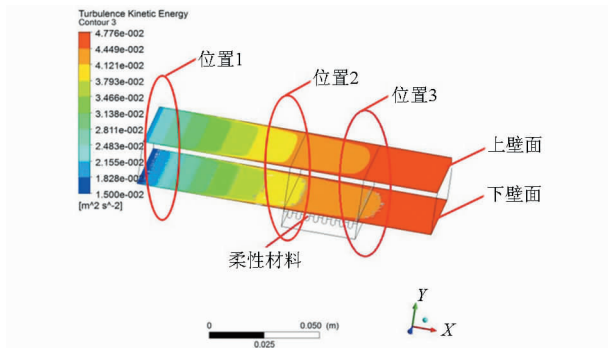


图5 流体域上下壁面湍动能分布图

Fig. 5 Turbulence energy of top and bottom walls of fluid domain

图6是流固耦合交界面处的形变示意图,与上壁面即普通表面相对比,可看到耦合功能表面处的位移发生了明显变化,尤其是在来流刚接触到仿生耦合功能表面时,位移形变最大,并且沿着仿生耦合功能表面顺流向位移变形逐渐趋缓。出现这种情况是由于来流刚接触仿生耦合功能表面时,速度较高、

压力较大,因此仿生耦合功能表面的形变就偏大,随着表面弹性材料的变形,降低了来流速度,使得表面弹性材料的变形趋缓,耦合功能表面的位移随着水流的流动性呈顺应性变化这一趋势与很多研究结果相吻合<sup>[6-7]</sup>。

图7是耦合功能表面上的位移云图以及曲线图。从图中可看出,耦合功能表面位移变化规律与其基底镶嵌式非光滑结构有很大关系,在镶嵌结构处位移变化程度明显较大。图7c是线2上节点位

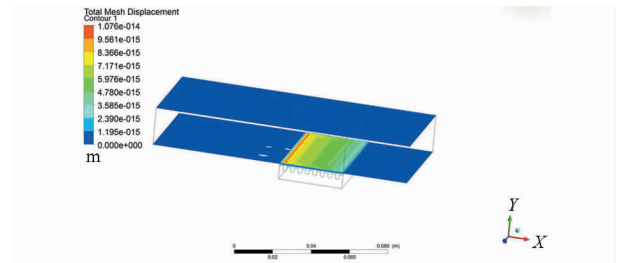


图6 交界面的形变示意图

Fig. 6 Schematic diagram of interfacial total deformation

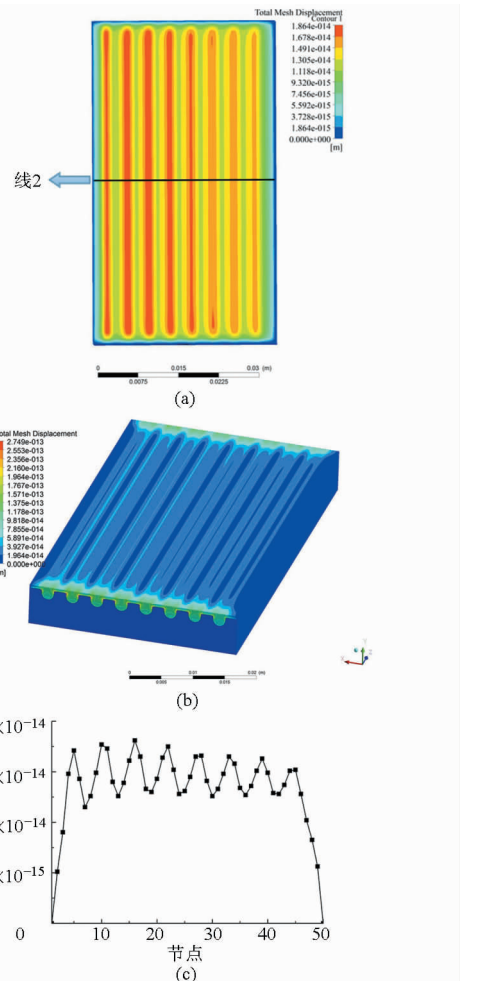


图7 耦合功能表面上的位移示意图

Fig. 7 Displacement of mosaic bionic coupling functional surface

(a) 流固交界面处位移云图 (b) 耦合功能表面位移云图  
(c) 流固交界面上线2节点位移

移变化曲线,从其曲线图可看出,其位移呈波浪形变化,而且在靠近尾部区域,变形趋势趋缓,是一种动态的耦合过程,而这种动态的耦合过程是通过表面材料的柔性变形来实现的,通过两者的动态耦合,使流体的一部分能量转换为柔性材料的弹性变形能,由材料的弹性变形而储存了这部分能量,从而减少了能量损失。

为了更好地说明耦合功能表面上速度场的变化情况,在流固耦合交界面上建立3条直线,如图8a所示,通过直线上节点速度变化曲线来说明耦合功能表面上的速度变化情况。进口处来流速度为2 m/s,由图中可看出,当通过耦合功能表面处时,表面速度有所降低,当节点小于10时,速度开始呈激增状态,当速度达一个最大值时,开始减弱;当节点大于10小于40时速度减弱到一个最小值,随后呈上升趋势,最终趋于平稳。这是由于耦合功能表面通过稳定流过其表面的紊流,降低了流固交界面的流体速度,避免了能量损失,从而实现对流体介质的控制。

### 3 结论

(1) 镶嵌式仿生耦合功能表面通过面层材料的柔性变形与基底非光滑材料的动态耦合对流体介质进行了控制,两者耦合的变形吸收部分能量,避免了流固界面能量的过分交换而带来的能量损失,进

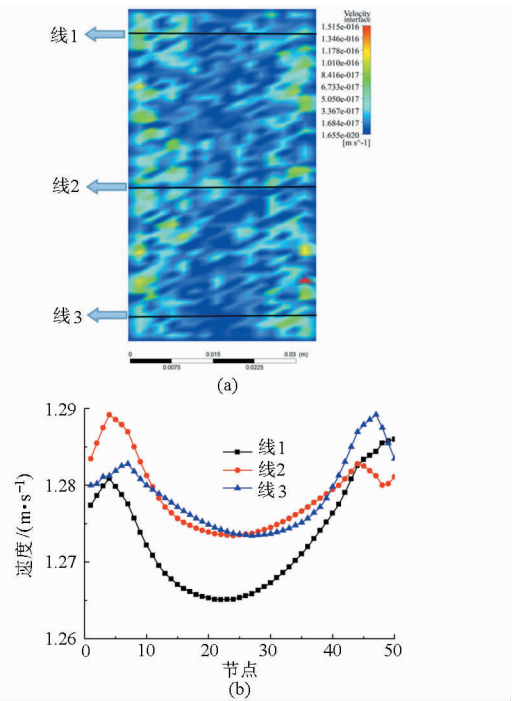


图8 耦合功能表面上的速度示意图

Fig. 8 Velocity of mosaic bionic coupling functional surface  
(a) 流固交界面处速度云图 (b) 流固交界面上直线节点速度曲线

而使表面摩擦阻力减小。

(2) 镶嵌式仿生耦合功能表面通过表面材料与基底非光滑结构的耦合所产生的位移实现对流体介质的顺应,通过稳定流过其表面的紊流,降低了流固交界面的流体速度,从而实现对流体介质的控制。

### 参 考 文 献

- 1 Fish F E. The myth and reality of Gray's paradox: implication of dolphin drag reduction for technology [J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2006, 1(2): R17 - 25.
- 2 Zhang Hui, Yoshuyake N, Hagiwara Y. Changes in drags acting on an angled wavy silicon-rubber plate as a model of the skin folds of a swimming dolphin[M] // Naomi Kato, Shinji Kamimura. *Bio-mechanisms of swimming and flying*, Tokyo: Springer Verlag, 2008: 91 - 102.
- 3 Zhang Hui, Yoshuyake N, Hagiwara Y. Attenuation of turbulent flow separation in wavy wall by compliant surface [J]. *Advances in Turbulence*, 2007, 9(4): 597 - 599.
- 4 Yamahata K, Hanaoka T, Hagiwara Y, et al. Turbulence modification in the flow over a silicon rubber wall as a model of dolphin skin [C] // *Proceedings of 2nd International Symposium on Seawater Drag Reduction*, 2005: 535 - 544.
- 5 Takashima K, Koyama S and Hagiwara Y. Direct numerical simulation on turbulent flow around a regularly deforming film [J]. *Advances in Turbulence*, 2007, 117(15): 662 - 664.
- 6 Matsumura R, Koyama S, Hagiwara Y. Turbulent drag reduction by wall deformation synchronized with flow acceleration [J]. *IUTAM Symposium on Computational Physics and New Perspectives in Turbulence*, 2008, 4(2): 385 - 390.
- 7 Takahide E, Ryutaro H. Direct numerical simulation of turbulent flow over a compliant surface [J]. *Journal of Turbulence*, 2002, 4(3): 7 - 11.
- 8 Suzuki Y, Kasagit N. Turbulent drag reduction mechanism above a riblet surface [J]. *AIAA Journal*, 1994, 32(9): 1781 - 1790.
- 9 Ren Luquan. Progress in the bionic study on anti-adhesion and resistance reduction of terrain machines [J]. *Science China Technological Sciences*, 2009, 52(2): 273 - 284.
- 10 任露泉. 地面机械脱附减阻仿生研究进展 [J]. *中国科学: E 辑*, 2008, 38(9): 1353 - 1364.
- 11 任露泉, 梁云虹. 生物耦合及其分类学与特征规律研究 [J]. *中国科学: E 辑*, 2010, 40(1): 5 - 13.
- 12 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)
- 13 任露泉, 彭宗尧, 陈庆海, 等. 离心式水泵仿生非光滑增效的试验研究 [J]. *吉林大学学报: 工学版*, 2007, 37(3): 101 - 103.

Ren Luquan, Peng Zongyao, Chen Qinghai, et al. Experimental study on efficiency enhancement of centrifugal water pump by bionic non-smooth technique[J]. Journal of Jilin University:Engineering and Technology Edition,2007,37(3): 101-103. (in Chinese)

- 14 田丽梅,任露泉,彭宗尧. 仿生非光滑离心式水泵增效节能特性数值模拟[C]//中国农业机械学会2008年学术年会论文集,2008:341-345.
- 15 任露泉,田丽梅,陈庆海,等. 一种离心式仿生耦合泵:中国,101984258A[P]. 2011-03-09.
- 16 任志安,张栋栋,孙治谦. 仿生耦合技术在流体机械领域的应用[J]. 石油和化工设备,2012,3(3):12.
- 17 张德胜,施卫东,张华,等. 轴流泵叶轮端壁区流动特性数值模拟[J]. 农业机械学报,2012,43(3):73-77.
- Zhang Desheng, Shi Weidong, Zhang Hua, et al. Numerical simulation of flow field characteristics in tip clearance region of axial-flow impeller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(3):73-77. (in Chinese)
- 18 Launder B E, Spalding D B. Lectures in mathematical models of turbulence[M]. London:Academic Press, 1972.
- 19 Per-Anders H, Gran S. Dynamic finite element analysis of fluid-filled pipes[J]. Computer Method in Applied Mechanic and Engineering,2008,190(24): 3111-3120.

## Fluid Control Mechanism of Mosaic Bionic Coupling Functional Surface

Tian Limei<sup>1</sup> Wang Yinci<sup>1</sup> Gao Zhihua<sup>1</sup> Shang Zhen<sup>2</sup> Ren Luquan<sup>1</sup>

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

2. College of Automotive Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

**Abstract:** Dolphin's special mosaic skin structure has characteristic of drag reduction. Imitating this special structures, a kind of bionic coupling functional surface was designed. Two-way fluid-solid coupling simulation was carried out on the mosaic bionic coupling functional surface using ANSYS-Workbench software, while the fluid calculation used the standard turbulence model, and the solid calculation used transient structural. The simulation result showed that the turbulent kinetic energy and the surface speed of the coupling functional surface were significantly reduced, and the flexible material produced displacement deformation. The above simulation result indicated, that the flexible material of surface coupled with non-smooth structures of substrate through conforming fluid medium to achieve the control purpose. The elastic deformation of surface material absorbed part of energy, and effectively reduced the turbulent kinetic energy of the fluid medium, to avoid the energy loss caused by excessive exchange between the fluid-solid interface.

**Key words:** Bionic coupling functional surface Mosaic Fluid control mechanism

(上接第 241 页)

## Purification of 6-gingerol from Oleoresin with Macroporous Resin

Liu Wei<sup>1</sup> Zhou Chunli<sup>1,2</sup> Zhao Jing<sup>1</sup> Chen Dong<sup>1</sup> Li Quanhong<sup>1</sup>

(1. College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. School of Life Science, Jiangxi Science and Technology Normal University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** In order to separate and purify 6-gingerol from oleoresin by macroporous resin, 6 kinds of macroporous resins were chosen to carry out static and dynamic adsorption-desorption experiments. Qualitative and quantitative analysis of purification results were analyzed by HPLC-UV and GC-MS. The results showed that D101 was the optimal macroporous resin for separating and purifying 6-gingerol, the best technology parameters were as follows: sample concentration of 2 mg/mL, distilled water of 3 BV, 80% ethanol for elution velocity of 2 mL/min, elution volume of 4BV. Under these conditions, the purity of 6-gingerol enhanced from 1.54% to 71.32%.

**Key words:** 6-gingerol Macroporous Purification