

气动软体驱动器设计与建模

Design and modeling of a soft pneumatic actuator

孙沂琳¹ 张秋菊^{1,2} 陈宵燕¹

SUN Yi-lin¹ ZHANG Qiu-ju^{1,2} CHEN Xiao-yan¹

(1. 江南大学机械工程学院, 江苏 无锡 214122; 2. 江苏省食品先进制造装备与技术重点实验室, 江苏 无锡 214122)

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

摘要:设计了一种用于软体机器人的气动软体驱动器,并详细阐述了驱动器的制作流程,基于 Yeoh 模型与虚功原理,推导了驱动器驱动气压与弯曲形变的非线性关系,利用 Abaqus 软件建立了软体驱动器的有限元模型,制作了软体驱动器的样机并进行了实验验证。结果表明:理论计算与有限元分析结果的均方根误差为 2.91%,理论计算与样机试验结果的均方根误差为 4.48%,该理论模型可以很好地推导驱动气压与驱动器弯曲角度的非线性关系。

关键词:软体驱动器;多腔体;气动驱动;数学模型;有限元分析

Abstract: A soft pneumatic actuator for soft robots was designed in this study. Based on the Yeoh model and the principle of virtual work, the nonlinear relationship between the drive pressure and bending deformation was deduced. The finite element model and prototype were used to verify its validity, and this results provided the basis for the parameterized design and optimization of the soft actuator.

Keywords: soft actuator; multi-chamber; pneumatic actuation; mathematical; finite element analysis

先进的食品加工和包装机械是食品工业发展的重要物质和技术支撑,作为传统的劳动密集行业,在人口红利逐渐消失、市场竞争日趋激烈的今天,应用机器人技术提高生产自动化水平是必然的选择^[1]。食品行业面对的操作对象很广泛,存在表面质地柔软(面包、蛋糕),表面易损(鸡蛋、水蜜桃),形状不规则(粽子、麻花)和尺寸不一等特点,传统的夹爪、吸盘等执行器难以满足要求。研究者^[2-3]通过模仿章鱼的触手、大象的鼻子等,研制出了多种软体机器人,此类机器

人本体多采用软材料制作而成,具有很高的柔性、安全性以及环境自适应性,可实现较大幅度的伸长、收缩、扭转、弯曲等复杂运动,在食品加工领域有很好的应用前景,是近年来智能机器人领域的研究热点之一^[4]。

软体机器人理论上有无穷多个自由度^[5],以电机驱动为代表的具有较高刚性的驱动方式明显不再适应,因此,软体驱动器多采用形状记忆合金(Shape Memory Alloy, SMA)、电活性聚合物(Electroactive Polymers, EAP)、离子交换聚合金属材料(Ion-exchange Polymer Metal Composite, IPMC)、形状记忆聚合物(Shape Memory Polymers, SMP)、液压及气动驱动,其中,气动驱动具有反应速度快、驱动力大的优点,技术也比较成熟,是目前使用最广泛的一种。Filip 等^[2]提出了一种多腔体的“Pneu-Net”气动网络结构,利用上下层的伸长率不同,实现驱动器的弯曲;Panagiotis 等^[6]提出了一种单腔体气动软体驱动器,通过纤维丝及保持层的组合使用,驱动器可产生多种形变方式;郝雨飞等^[7]设计了一种多腔体的软体驱动器并制作了软体抓手,通过试验研究分析了驱动器的弯曲性能及对不同形状物体的抓取性能;张进华等^[8]分别对纤维增强型软体驱动器的伸长与弯曲变形进行了力学建模与有限元分析并实现了驱动器仿人手指的弯曲。目前,气动软体驱动器主要有单腔体与多腔体 2 种结构形式,研究者^[9-10]针对纤维增强的单腔体驱动器开展了大量的工作,得出的理论模型对驱动器的设计有很好的指导意义,由于多腔体驱动器结构复杂的特性,研究者^[6-7]多采取试验研究的方法,缺少理论模型的指导。目前气动软体驱动器的建模研究^[11-12]多针对单腔体驱动器,尚无适用于多腔体软体驱动器的建模研究报道。本试验基于 Yeoh 模型与虚功原理分别建立了硅橡胶材料的本构模型与驱动器的数学模型,对多腔体软体驱动器的设计与控制具有很好的指导作用。

1 驱动器设计

基于 3D 打印技术制作模具,以软体硅橡胶为原料,设计制作了气动多腔体型软体驱动器,结构如图 1 所示。驱动器

基金项目:国家自然科学基金(编号:51575236);江苏省研究生科研与实践创新计划(编号:KYCX18_1840)

作者简介:孙沂琳,男,江南大学在读博士研究生。

通信作者:张秋菊(1963—),女,江南大学教授,博士。

E-mail: zhangqiuji@jiangnan.edu.cn

收稿日期:2018-07-08

整体可分为两部分,上半部分含有腔体网络,下部分为实体层,通入压力气体时,腔体膨胀导致上部分在 x 方向的尺寸增加,下部分尺寸无明显增加,上、下部分的尺寸差使驱动器在 $x-z$ 平面内产生弯曲变形,这种包含多腔体空腔网络的双层结构参考了 Bobak 等^[13]设计的 PneuNet 结构。

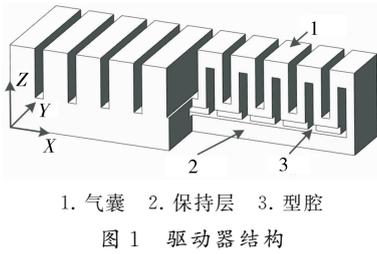


Figure 1 Structure of the actuator

该软体驱动器结构简单、反应速度快、功率密度高且具有很好的自适应性,经过多次仿真与试验,结合软体驱动器的性能要求,软体驱动器的结构尺寸如图 2 所示。

2 驱动器制作

2.1 材料选取

多腔体型软体驱动器主要依靠腔体的形变实现驱动器的弯曲变形,因此材料的性能以及腔体的壁厚对驱动器性能影响较明显。对比不同种类聚氨酯与硅橡胶材料的伸长率、弹性模量与撕裂强度等性能,选取美国 Smooth-On9 公司的 Ecoflex 0030 与 Dragon Skin 30 硅橡胶材料,按质量 1 : 1 混合作为驱动器的本体材料,驱动器的详细尺寸见表 1。

表 1 驱动器尺寸参数

Table 1 Parameters of the actuator

驱动器总长 L	驱动器总宽 S	驱动器总高 H	x 方向气囊壁厚 l_1, l_3	y 方向气囊壁厚 S_1, S_3	z 方向气囊壁厚 h_1, h_3	腔体长度 l_2	腔体宽度 s_2	腔体高度 h_2
85	26	20	$l_1=l_3=2$	$S_1=S_3=4$	$h_1=h_3=4$	2	18	12

统的铸造方法具有成本低、效率高等优点,因此本研究采用铸造的方法。由于软体材料具有很好的伸长率,驱动器内部的模具较易取出,软体驱动器可以采用整体铸造的方法,也可以上下两部分单独铸造,最后粘合成型,由于前者模具结构较复杂,模具的尺寸精度对驱动器性能的影响很大,因此采用后者。

2.3 制作流程

- (1) 前期准备:铸造用模具、硅橡胶、搅拌棒、粘合剂、电子秤等。
- (2) 配置硅橡胶:按照质量比 1 : 1 : 1 : 1 的比例将 Ecoflex 0030 A/B 与 Dragon Skin 30 A/B 4 种硅橡胶材料分别倒入容器中,搅拌均匀后静置 5 min。
- (3) 浇铸:将硅橡胶分别倒入各模具,待硅橡胶充满模具后静置,直至硅橡胶固化。
- (4) 粘合:取出模具内的硅橡胶,分别在驱动器上、下需要粘合的部分均匀地涂一层粘合剂,将上下部分粘合在一起,静置直至粘牢。

(5) 密封性检测:向驱动器内通入压力气体,检验驱动器是否漏气,如漏气则对漏气部位修补,如不漏气则粘接气管接头。

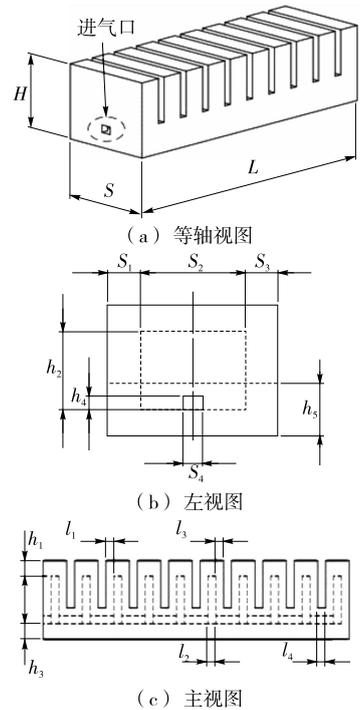


图 2 驱动器尺寸

Figure 2 Size of the actuator

2.2 制作方法选取

目前软体驱动器的制作方法有很多种,例如:形状沉积制造、熔融沉积成型、激光消融、失蜡铸造、多材料 3D 打印^[14]等。3D 打印技术的发展,使模具制作变的非常方便,传

3 驱动器建模

由于硅橡胶为非线性材料,且软体驱动器变形量较大,不能直接采用刚体力学的方法进行分析。本设计通过建立驱动器基于弹性力学的数学模型与有限元模型 2 种方法,分析软体驱动器受力变形时的非线性力学行为,建立驱动气压与驱动器形变的关系。

3.1 数学模型

硅橡胶是典型的高分子非线性超弹性材料,目前,研究者多通过建立其应变能函数模型分析材料的力学特性。应变能密度方程一般通过 Green 法^[15]建立,各向同性超弹材料的应变能密度 W 可表示为右 Piola-Kirchhoff 张量 C 的 3 个不变量 (I_C, II_C, III_C) 的函数:

$$W_P = W(I_C, II_C, III_C), \quad (1)$$

其中:

$$\begin{cases} I_C = trC = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2; \\ II_C = \frac{1}{2} [(trC)^2 - trC^2] = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2; \\ III_C = detC = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2, \end{cases} \quad (2)$$

式中:

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ ——分别为 3 个方向(x, y, z)的主伸长比。

Rivlin 将应变能密度函数简化成 I_C 和 II_C 的级数展开式:

$$W_R = \sum_{i,j=0}^{\infty} C_{ij} (I_C - 3)^i (II_C - 3)^j, C_{00} = 0, \quad (3)$$

式中:

C_{ij} ——材料常数,可通过拉伸试验确定^[16-17]。

该多项式模型可以精确地表达超弹材料的力学特性,但是当阶数较高时,多项式常数项增多,确定起来较困难。研究者对该模型进行简化,得出了多个较实用的模型,例如:Neo-Hookean 模型^[15]只保留了式(3)的第一项,即

$$W_N = C_{10} (I_C - 3). \quad (4)$$

Mooney-Rivlin 模型^[15]保留了式(3)的前两项,即

$$W_M = C_{10} (I_C - 3) + C_{01} (II_C - 3). \quad (5)$$

该模型适用于几乎所有橡胶材料的中、小变形。

Yeoh 模型^[16-17]舍弃了含 II_C 的项后,保留了式(3)的前三项,即

$$W_Y = C_{10} (I_C - 3) + C_{20} (I_C - 3)^2 + C_{30} (I_C - 3)^3. \quad (6)$$

该模型适用于橡胶材料的大变形行为。

由于本设计采用的硅橡胶材料形变量相对较大,因此选用 Yeoh 模型并对其进行简化,保留前两项,可得应变能函数 W 为:

$$W = C_{10} (I_C - 3) + C_{20} (I_C - 3)^2. \quad (7)$$

本设计的软体驱动器可视作多个相同的气囊单元串联结构,假设每个气囊的形变相同,且该硅橡胶材料不可压缩,因此针对单个气囊单元进行建模分析,其变形形式以及受力情况如图 3 所示。

因此气囊腔体的体积 V_K 为:

$$V_K = l_2 s_2 h_2. \quad (8)$$

x, y 方向两侧外壁硅橡胶的体积 V_x, V_y 分别为:

$$V_x = (l_1 + l_3) h_6 s_2, \quad (9)$$

$$V_y = (l_1 + l_2 + l_3) h_2 (s_1 + s_2), \quad (10)$$

式中:

$h_6 = h_2 + h_3 - h_5$, 通入压力气体后,假设气囊上下两侧外壁无形变,针对 x 方向两侧外壁的 3 个方向主伸长比为:

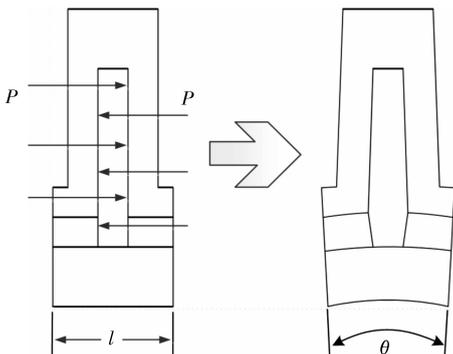


图 3 受力及变形

Figure 3 Stress and deformation

$$\begin{cases} \lambda_{x1} = \left\{ \left[\frac{(h_3 + h_5) \theta}{2h_6} \right]^2 + 1 \right\}^{\frac{1}{2}}; \\ \lambda_{x2} = \lambda_{x1}^{-\frac{1}{2}} = \left\{ \left[\frac{(h_3 + h_5) \theta}{2h_6} \right]^2 + 1 \right\}^{-\frac{1}{4}}; \\ \lambda_{x3} = \lambda_{x1}^{-\frac{1}{2}} = \left\{ \left[\frac{(h_3 + h_5) \theta}{2h_6} \right]^2 + 1 \right\}^{-\frac{1}{4}}, \end{cases} \quad (11)$$

式中:

λ_{x1} —— x 方向气囊外壁在 z 方向的主伸长比, %;

λ_{x2} —— x 方向气囊外壁在 x 方向的主伸长比, %;

λ_{x3} —— x 方向气囊外壁在 y 方向的主伸长比, %;

h_5 ——气囊与气囊之间部分驱动器的高度, mm;

θ ——气囊的弯曲角度, rad。

针对 y 方向两侧外壁的 3 个方向主伸长比为:

$$\begin{cases} \lambda_{y1} = 1 + \frac{(h_3 + h_5) \theta}{2l}; \\ \lambda_{y2} = \lambda_{y1}^{-\frac{1}{2}} = \left[1 + \frac{(h_3 + h_5) \theta}{2l} \right]^{-\frac{1}{2}}; \\ \lambda_{y3} = \lambda_{y1}^{-\frac{1}{2}} = \left[1 + \frac{(h_3 + h_5) \theta}{2l} \right]^{-\frac{1}{2}}, \end{cases} \quad (12)$$

式中:

λ_{y1} —— y 方向气囊外壁在 x 方向的主伸长比, %;

λ_{y2} —— y 方向气囊外壁在 y 方向的主伸长比, %;

λ_{y3} —— y 方向气囊外壁在 z 方向的主伸长比, %;

l ——气囊的宽度, mm。

x 方向两侧外壁的主伸长比对 θ 求导可得:

$$\begin{cases} \frac{d\lambda_{x1}}{d\theta} = \frac{(h_3 + h_5) \theta}{2h_6} \left\{ \left[\frac{(h_3 + h_5) \theta}{2h_6} \right]^2 + 1 \right\}^{-\frac{1}{2}}; \\ \frac{d\lambda_{x2}}{d\theta} = -\frac{(h_3 + h_5) \theta}{4h_6} \left\{ \left[\frac{(h_3 + h_5) \theta}{2h_6} \right]^2 + 1 \right\}^{-\frac{5}{4}}; \\ \frac{d\lambda_{x3}}{d\theta} = -\frac{(h_3 + h_5) \theta}{4h_6} \left\{ \left[\frac{(h_3 + h_5) \theta}{2h_6} \right]^2 + 1 \right\}^{-\frac{5}{4}}. \end{cases} \quad (13)$$

y 方向两侧外壁的主伸长比对 θ 求导可得:

$$\begin{cases} \frac{d\lambda_{y1}}{d\theta} = \frac{h_3 + h_5}{2l}; \\ \frac{d\lambda_{y2}}{d\theta} = -\frac{h_3 + h_5}{4l} \left[1 + \frac{(h_3 + h_5) \theta}{2l} \right]^{-\frac{3}{2}}; \\ \frac{d\lambda_{y3}}{d\theta} = -\frac{h_3 + h_5}{4l} \left[1 + \frac{(h_3 + h_5) \theta}{2l} \right]^{-\frac{3}{2}}. \end{cases} \quad (14)$$

气囊腔体的体积 V_K 对 θ 求导可得:

$$\frac{dV_K}{d\theta} = s_2 h_2 \frac{dl_2}{d\theta} = s_2 h_2 (h_2 + h_5). \quad (15)$$

应变能函数 W 对 θ 求导可得:

$$\frac{dW}{d\theta} = 2(\lambda_1 \frac{d\lambda_1}{d\theta} + \lambda_2 \frac{d\lambda_2}{d\theta} + \lambda_3 \frac{d\lambda_3}{d\theta}) [C_{10} + 2C_{20} (\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3)], \quad (16)$$

式中:

C_{10}, C_{20} ——材料常数。

假设驱动气体做的功全部转化为驱动器形变的势能,则根据虚功原理:

$$P dV_K + V_s dW = 0, \quad (17)$$

式中:

V_s ——硅橡胶体积, mm^3 。

式(17)可整理为:

$$P \frac{dV_K}{d\theta} + V_x \frac{dW_x}{d\theta} + V_y \frac{dW_y}{d\theta} = 0. \quad (18)$$

联立式(9)~(10)、(13)~(17)可得驱动气压 P 与弯曲角度 θ 的关系式,式中只含 P 与 θ 两个未知数,因此在已知驱动气压 P 的情况下即可确认单个气囊的弯曲角度 θ ,乘以驱动器气囊的个数即可获得驱动器整体的弯曲角度,驱动器末端的坐标。

3.2 有限元模型

本设计选用 Abaqus 软件对软体驱动器进行建模与受力分析。

软体驱动器的本构材料是一种超弹性的硅橡胶材料,选用 Yeoh 模型定义驱动器的材料特性。首先,按照驱动器的尺寸建立其三维模型,设置材料的属性为 Hyperelastic,对应参数为 $C_1 = 0.045$, $C_2 = -0.003$;建立初始步,驱动器的进气口端设为固定,内部全部腔体载荷为 0 MPa;建立分析步,向驱动器的气道及各腔体内部表面施加相应负载;划分网格并提交分析,所得驱动器有限元模型的分析结果如图 4 所示(负载为 15 kPa)。

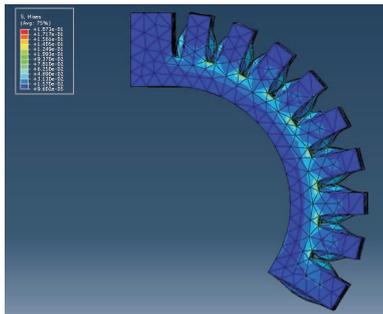


图 4 有限元分析结果

Figure 4 The result of finite element analysis

4 实验验证

本实验在室温下进行,实验装置包括软体驱动器、气泵、电磁阀、精密减压阀、电源、测力计和橡胶管等。在确认驱动器的整体尺寸精确与气密性良好的情况下,将驱动器安装在底座上,分别向驱动器通入 0, 5, 10, 15, 20 kPa 的气压,记录驱动器整体的弯曲程度及其末端位置。驱动器弯曲变化如图 5 所示,弯曲角度的试验数据、仿真数据及理论数据如图 6 所示。

根据均方差公式:

$$e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left[\frac{(\theta_i - \theta'_i)}{\theta_i} \right]^2}{n}}, \quad (19)$$

式中:

e ——驱动器弯曲角度的均方根误差, %;

θ_i ——理论模型中驱动器的弯曲角度, rad;

θ'_i ——有限元分析或试验测得驱动器弯曲角度, rad;

n ——试验组数。

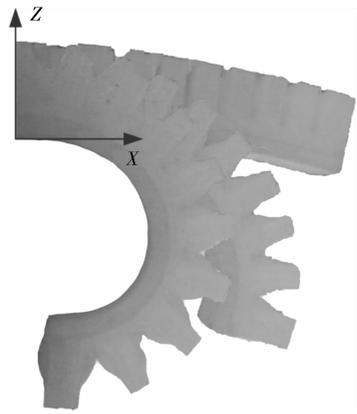
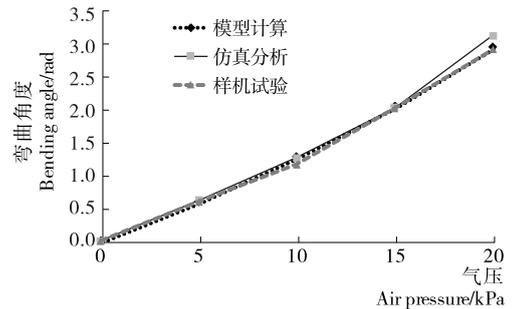
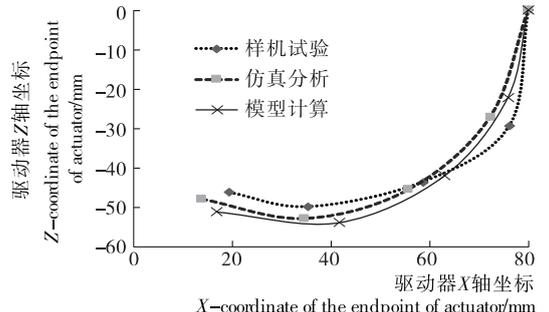


图 5 不同气压下手指形变

Figure 5 Deformation under different pressure



(a) 不同气压下驱动器弯曲弧度



(b) 不同气压下驱动器末端位置

图 6 不同驱动气压下驱动器弯曲性能

Figure 6 Bending angle of soft actuator under different air pressure

本设计对 5 种不同气压下的 5 组数据进行分析,理论计算与有限元分析所得的弯曲角度之间的均方根误差为 2.91%,理论计算与样机试验所得的弯曲角度之间的均方根误差为 4.48%,因此该理论模型可以很好地推导驱动气压与驱动器弯曲角度的非线性关系。驱动器的尺寸误差以及内部的气泡是导致上述误差的主要原因,对气囊变形方式的简化以及重力的影响也会产生一定的误差。

5 结论

本研究利用软体硅橡胶材料,通过参数化的设计与优化制作了一款气动多腔体驱动器,推导了驱动器驱动气压与弯曲变形的非线性关系,对多腔体型软体驱动器的优化设计与控制有很好的参考作用。利用简化的 Yeoh 模型建立了硅橡胶材料的能量密度函数,在保证精度的情况下,减少了常参数的数量,降低了驱动器的建模难度。多腔体驱动器结构种

类较多,本研究仅针对 x 方向横截面为矩形的体驱动器,截面为椭圆形或半圆形的驱动器需要根据其几何模型进行相应的建模研究。

参考文献

- [1] 肖艳. 机器人在包装自动化领域发展势头强劲[J]. 中国包装工业, 2014(13): 16-22.
- [2] FILIP I, AARON D M, GEORGE M W, et al. Soft robotics for chemists[J]. *Angewandte Chemie*, 2011, 123(8): 1 930-1 935.
- [3] 张润笙, 王贺升, 陈卫东. 仿章鱼软体机器人形状控制[J]. 机器人, 2016, 38(6): 754-759.
- [4] 王田苗, 郝雨飞, 杨兴帮, 等. 软体机器人: 结构、驱动、传感与控制[J]. 机械工程学报, 2017, 53(13): 1-13.
- [5] DANIELA R, MICHAEL T T. Design, fabrication and control of soft robots[J]. *Nature*, 2015, 521(7 553): 467-475.
- [6] PANAGIOTIS P, WANG Zheng, KEVIN C G, et al. Soft robotic glove for combined assistance and at-home rehabilitation[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2015, 73: 135-143.
- [7] HAO Yu-fei, WANG Tian-miao, WEN Li, et al. Universal soft pneumatic robotic gripper with variable effective length[C]// *Proceedings of the 35th Chinese Control Conference*. Piscataway: IEEE, 2016: 6 109-6 114.
- [8] ZHANG Jin-hua, WANG Hao, TANG Jia-qing, et al. Modeling and design of a soft pneumatic finger for hand rehabilitation[C]// *Proceeding of the 2015 IEEE International Conference on Infor-*

- mation and Automation*. New York: IEEE, 2015: 2 460-2 465.
- [9] 王华, 康荣杰, 王兴坚, 等. 软体弯曲驱动器设计与建模[J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(5): 1 053-1 060.
- [10] PANAGIOTIS P, WANG Zheng, JOHANNES T B, et al. Modeling of soft fiber-reinforced bending actuators[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2015, 31(3): 778-789.
- [11] FIONNUALA C, CONOR J W, KATIA B. Automatic design of fiber-reinforced soft actuators for trajectory matching[J]. *PNAS*, 2017, 114(1): 51-56.
- [12] 魏树军, 王天宇, 谷国迎. 基于纤维增强型驱动器的气动软体抓手设计[J]. 机械工程学报, 2017, 53(13): 29-38.
- [13] BOBAK M, CONOR J W, GEORGE M W, et al. Pneumatic networks for soft robotics that actuate rapidly [J]. *Advanced Functional Materials*, 2014, 24(15): 2 163-2 170.
- [14] ALI Z, ABBAS Z K, SUI Y K, et al. Evolution of 3D printed soft actuators[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2016, 250: 258-272.
- [15] 李雪冰, 危银涛. 一种改进的 Yeoh 超弹性材料本构模型[J]. 工程力学, 2016, 33(12): 754-759.
- [16] CHRISTINE R, JEAN-MICHEL C, FENG Zhi-qiang, et al. The Yeoh model applied to the modeling of large deformation contact/impact problems[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36(5): 659-666.
- [17] MARCIN G, RADOŚLAW S, STANISŁAW J. Modelling of elastomeric bearings with application of Yeoh hyperelastic material model[J]. *Procedia Engineering*, 2015, 111: 220-227.

(上接第 78 页)

其中 L1 是桔青霉, M3 是杂色曲霉。针对大肠埃希氏菌进行抑菌活性试验发现, M3 等 7 株共生真菌代谢产物抑菌活性强, 具有良好的研究潜质。今后还将利用色谱技术分离和鉴定其化学组成和分子结构, 为开发新的抑菌活性物质提供新化合物。此外, 试验共分离获得 33 株海绵共生真菌, 菌株数量有限, 后续试验还可以通过增加分离培养基种类等方法, 进一步挖掘海绵共生真菌资源。

参考文献

- [1] 谢俊. 高通量组学方法在海绵共生微生物研究中的应用[D]. 上海: 上海交通大学, 2015: 10-15.
- [2] LI Zhi-yong, WANG Yue-zhu, LI Jin-long, et al. Metagenomic analysis of genes Encoding nutrient cycling pathways in the microbiota of deep-sea and shallow-water sponges[J]. *Marine Biotechnology*, 2016, 18(6): 659-671.
- [3] KIKUCHI S, OKADA K. Isolation and structure determination of lysiformine from bacteria associated with marine sponge *Halichondria okadai*[J]. *Tetrahedron*, 2018, 74(27): 3 742-3 747.
- [4] LIU Juan, LIU Yong-hong. Antimicrobial compounds from marine invertebrates-derived microorganisms[J]. *Current Medicinal Chemistry*, 2016, 23(25): 2 892-2 905.
- [5] 张连娟, 沙本才, 龙光强, 等. 药用植物与微生物互利共生关系的研究进展[J]. *世界科学技术-中医药现代化*, 2017, 19(10):

- 1 750-1 757.
- [6] 李媛, 李振宇. 天然抗癌药物—紫杉醇[J]. 中山大学研究生学刊: 自然科学、医学版, 2006(4): 58-62.
- [7] 汪福源, 顾觉奋, 高向东, 等. 动物内生真菌研究进展[J]. *国外医药: 抗生素分册*, 2017, 38(2): 58-61.
- [8] 蒲红宇, 张弼, 唐玲. 海绵的生物学特性及其在水产养殖中的应用前景[J]. *渔业科学进展*, 2009, 30(3): 135-138.
- [9] 孟庆鹏. 可培养海绵共附生微生物 PKS 和 SOD 功能基因的筛选[M]. 上海: 上海交通大学, 2007: 28-30.
- [10] 吴琦, 林文翰. 中国南海海绵共生真菌 *Emericella varicolor* XSA-07-2 活性聚酮类代谢产物的研究[C]// 中国药学会. 2014 年中国药学会大会暨第十四届中国药师周论文集. [出版地不详]: 中国药学会, 2014: 2.
- [11] SOU Kikuchi, KAYO Okada, YUKO Cho, et al. Isolation and structure determination of lysiformine from bacteria associated with marine sponge *Halichondria okadai* [J]. *Tetrahedron*, 2018, 74: 3 742-3 747.
- [12] WHO. Future directions for research on enterotoxigenic *Escherichia coli* vaccines for developing countries[J]. *Weekly Epidemiological Record*, 2006, 81(11): 97-104.
- [13] 湛江水产专科学校. 海洋饵料生物培养[M]. 北京: 农业出版社, 1980: 89-92.
- [14] 魏景超. 真菌鉴定手册[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1979: 198-200.