



# 常用硅胶材料软体气动夹爪夹持性能的仿真研究

谢业平, 李红军

(浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018)

**摘要:** 硅胶作为气动夹爪的软体材料, 其对夹爪的夹持性能有直接影响。采用有限元数值仿真方法对 4 种常用硅胶材料的气动夹爪进行夹持性能分析, 探究 Ecoflex 00-30、Ecoflex 00-50、Dragon skin 10 和 Dragon skin 30 材料的影响。通过单轴拉伸试验测定硅胶材料的变形特性; 采用不同的本构模型对材料参数进行拟合, 判断每种材料最适合的本构模型, 并采用拉伸仿真实验验证数值模型的准确性, 得到 4 种硅胶材料的最适本构模型; 通过仿真分析, 得到充气压力与夹爪弯曲角度和指尖力之间的关系。仿真结果表明: 夹爪随着充气压力增加, 弯曲角度和指尖力也逐渐变大的关系; 在相同气压作用下, Ecoflex 00-30 产生的弯曲最大, 具有最大的指尖力, 而 Dragon skin 30 弯曲的角度最小, 具有最小的指尖力。由此得到了不同力学性能的硅胶材料对软体气动夹爪夹持性能的影响, 为后续材料选择提供依据。

**关键词:** 软体气动夹爪; 夹持性能; 单轴拉伸; 本构模型; 仿真

**中图分类号:** TH47

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-3851 (2021) 05-0328-07

## The simulation of the clamping performance of soft pneumatic grippers made of common silicone materials

XIE Yeping, LI Hongjun

(Faculty of Mechanical Engineering & Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** As a kind of soft materials for pneumatic gripper, silicone has a direct impact on the clamping performance of the gripper. The finite element numerical simulation method is used to analyze the clamping performance of pneumatic grippers made of 4 kinds of common silicone materials, and the influence of Ecoflex 00-30, Ecoflex 00-50, Dragon skin 10 and Dragon skin 30 is explored. The characteristics of silicone materials are measured by a uniaxial tensile test, and different constitutive models are used to fit the material parameters. The most suitable constitutive model for each material is judged, and the accuracy of the numerical model is verified through a tensile simulation experiment. The most suitable constitutive models for 4 kinds of silicone materials are obtained. Through a simulation analysis, the relationship between inflation pressure, bending angle and fingertip force of the gripper is derived. The simulation results show that the relationship between the bending angle and fingertip force of the gripper gradually increases as the inflation pressure increases. Under the same air pressure, Ecoflex 00-30 has the largest bending angle and fingertip force, while Dragon skin 30 has the smallest bending angle and fingertip force. Thus, the effect of silicone materials with different mechanical properties on the clamping performance of soft pneumatic grippers is obtained, which provides a basis for subsequent selection of materials.

**Key words:** soft pneumatic gripper; clamping performance; uniaxial tension; constitutive model; simulation

## 0 引言

软体气动夹爪是一种仿生类夹爪,具有无限自由度,能够适应不同物体表面,轻松抓取不规则的物体。软体气动夹爪采用柔性材料制作,柔性材料不易对物体产生损伤,能够满足易碎玻璃制品<sup>[1]</sup>、瓷器<sup>[2]</sup>以及水果食物<sup>[3-5]</sup>等的夹持。软体气动夹爪的出现,克服了以往刚性夹爪灵活性差、液压驱动设备昂贵的缺点。它采用便于控制的气压驱动,可以通过快速充放气来实现更快频率的夹持动作,也能通过控制流速的大小改变夹持与松开的速度。

气动夹爪相较于其他类型的夹爪,具有更简易的制作工艺、更快的反应速度和更低的制造成本,因此众多研究者将它用于仿生、医疗康复和工业机器人领域。Ilievsk 等<sup>[6]</sup>分别采用 Polydimethylsiloxane 和 coflex 00-30 材料,制作了一种多气室气体驱动六芒星爪仿生软体机构,它能够实现与海洋生物相同的包裹式抓取模式。Mosadegh 等<sup>[7]</sup>采用 Elastosil M4601 和 coflex 30,分别制作的快速型软体气动夹爪,该类型夹爪在消耗同等气体量的情况下,能产生更大弯曲角度和指尖力,且在相同的流速下有更大的启动速度。Yap 等<sup>[8]</sup>采用硅胶材料,制作的软体气动执行器和普通手套结合,形成的可穿戴手套,该手套与磁共振功能成像共同使用,可用于检测康复过程中大脑的运动表现。De Falco 等<sup>[9]</sup>采用 Ecoflex 0050 硅胶材料,研发了一款用于微创手术的软体多功能手,该设备能够按照要求完成不同方向的弯曲和延长动作,协助末端手术设备实现手术操作。Chen 等<sup>[10]</sup>采用硅胶和布料,制作了三爪多气腔夹爪,通过尺寸识别技术来实现不同大小物体的抓取。硅胶材料为软体气动夹爪带来柔顺性和灵巧性的同时,也存在气体驱动的软体夹爪达不到液压或线驱动类夹爪夹持力的问题,这限制了夹爪的使用范围。因此,在不同的使用范围和夹持条件下,需要不同类型的硅胶材料,以获取更好的夹持效果。

本文采用常用的 4 种硅胶,即 Ecoflex 00-30、Ecoflex 00-50、Dragon skin 10 和 Dragon skin 30 (美国 Smooth-On 公司),分别制作同种类型的软体气动夹爪,探究不同材料对软体气动夹爪弯曲和夹持性能的影响。首先,对不同材料试样进行单轴拉伸试验,测定力学拉伸性能参数,并对拉伸试样进行仿真分析,验证拉伸试验数据;然后,将拉伸试验数据处理,得到不同材料的最适本构模型,并将本构模

型用于夹爪仿真实验,得出不同材料在气压作用下弯曲角度和指尖力的大小;最后,根据仿真实验数据,得到了不同材料力学性能和夹爪夹持性能之间的关系。

## 1 研究方法

### 1.1 硅胶拉伸试验

硅胶材料实验方案参考 *Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers-Tension* (ASTM /D 412-16) 标准。拉伸试样如图 1 所示,硅胶材料样品为哑铃状,总长度为 115 mm,厚度 2.5 mm,拉伸部位长度为 33 mm,宽度为 6 mm,过渡部分的半径分别是 14 mm 和 25 mm。试样模具由 3D 打印机打印而成,制作前先将硅胶材料按照 1:1 混合并搅拌均匀,再放入 -1 mPa 的真空脱泡机中脱泡 10 min。脱泡后将硅胶溶液缓慢倒入模具中,清除超出模具的多余硅胶溶液,检查是否出现气泡,然后将无气泡的模具放置在 50 °C 的恒温下 2 h 后拿出。对制作好的试样置于光照处检查,去除有小气泡、杂质等缺陷的试样。同一种材料共三个试样,分别在不同的时间段制作,以避免不同温度和湿度等环境因素的影响,最终选取处于中间的数据作为硅胶拉伸数据。

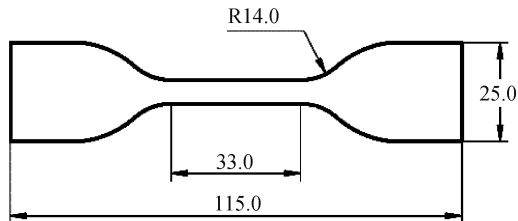


图 1 拉伸试样的规格(单位:mm)

橡胶拉伸试验仪器为 QWL-5E 微机型电子拉力试验机(厦门群隆仪器有限公司),硅胶单轴拉伸试验照片如图 2 所示。本文对试样进行单轴拉伸试验,探究试样变形位移和拉伸力的数据关系。拉伸前应该保证拉伸试样两端与夹具平齐,并检测试样是否被夹紧。调节拉伸机夹持端的位置,使得试样处于放松状态,且与夹具位于同一竖直线上。将引伸计长度调节为 33 mm 并夹持住硅胶试样拉伸部分,设置拉伸机拉伸力和位移为 0。拉伸机的拉伸速度设置为 500 mm/min,传感器所能承受的最大拉力为 50 N。对单个材料进行多次重复拉伸试验,选择在相同拉力作用下发生最大变形量的一组作为拉伸试验的结果。

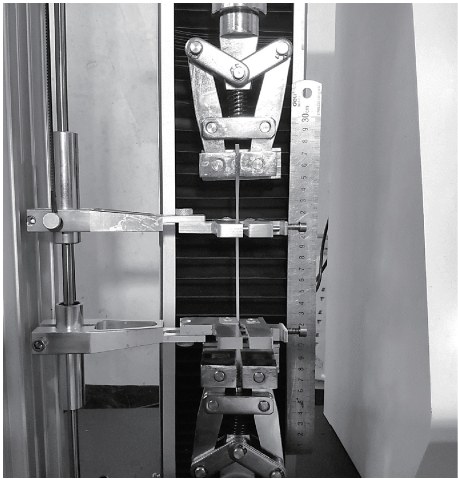


图2 硅胶单轴拉伸试验照片

1.2 数值仿真方法

1.2.1 硅胶材料本构模型

本文考虑到软体气动夹爪在实际应用中应变在中小变形范围内,使用不同类型的超弹性应变能函数对硅胶材料进行拟合,并从中得到最合适的本构模型。假设拉伸实验中使用的硅胶材料发生各向同性且均匀的大变形,气动夹爪主要发生弯曲运动,将硅胶看成是不可压缩材料。因此,将应变能势能 $W$ 表示为变形张量不变量的应变能密度函数,或者主伸长比表示的函数, $W$ 可用式(1)表示:

$$W=W(I_1,I_2)=W(\lambda_1,\lambda_2,\lambda_3) \tag{1}$$

其中: $I_1$ 、 $I_2$  为变形张量不变量, $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\lambda_3$  为主伸长比。变形张量不变量与主伸长比的关系为:

$$I_1=\sum_{i=1}^3\lambda_i^2X \tag{2}$$

$$I_2=\sum_{i,j=1}^3\lambda_i^2\lambda_j^2,i\neq j \tag{3}$$

主伸长比定义为:

$$\lambda=\frac{L}{L_0}=\frac{\Delta L+L_0}{L_0} \tag{4}$$

其中: $L_0$  表示拉伸部分原长, $L$  表示拉伸后长度, $\Delta L$  表示拉伸的长度。

硅胶材料的应变能函数可用多项式函数、约化多项式函数和 Ogden 函数表示<sup>[11]</sup>。硅胶材料的多项式应变能函数表示式为:

$$W=\sum_{i+j=1}^NC_{ij}(I_1-3)^i(I_2-3)^j+\frac{1}{D_1}(J-1)^2 \tag{5}$$

其中: $N$ 、 $D_1$  和  $C_{ij}$  为材料常数,由实验确定; $J$  表示硅胶材料弹性体积比,对于不可压缩材料, $J=1$ 。

当  $N=1$  时, $W$  表示 Mooney-Rivlin 本构模型,

式(5)可简化为:

$$W=C_{10}(I_1-3)+C_{01}(I_2-3) \tag{6}$$

硅胶材料的约化多项式应变能函数表达式为:

$$W=\sum_{i=1}^NC_{i0}(I_1-3)^i+\sum_{i=1}^N\frac{1}{D_i}(J-1)^{2i} \tag{7}$$

当  $N=1$  时, $W$  表示 Neo-Hookean 本构模型,式(7)可简化为:

$$W=C_{10}(I_1-3) \tag{8}$$

当  $N=3$  时, $W$  表示 Yeoh 本构模型,式(7)可简化为:

$$W=C_{10}(I_1-3)+C_{20}(I_1-3)+C_{30}(I_1-3) \tag{9}$$

除了多项式和约化多项式本构模型,还有 Ogden 模型,它能够较好地拟合较大的变形,硅胶材料的 Ogden 函数式可表示为:

$$W=\sum_{i=1}^N\frac{u_i}{a_i^2}(\lambda_1^{a_i}+\lambda_2^{a_i}+\lambda_3^{a_i}-3)+\sum_{i=1}^N\frac{1}{D_i}(J-1)^{2i} \tag{10}$$

其中: $u_i$  和  $a_i$  为材料的剪切特性。由于  $J=1$ ,式(10)可简化为:

$$W=\sum_{i=1}^N\frac{u_i}{a_i^2}(\lambda_1^{a_i}+\lambda_2^{a_i}+\lambda_3^{a_i}-3) \tag{11}$$

1.2.2 拉伸仿真

为避免仪器产生较大的实验误差,对拉伸试验数据进行拉伸仿真分析,验证数据的准确性。拉伸的模型与拉伸试验试样具有相同的尺寸,并采用与实验相类似的载荷和边界条件。本文对 4 种不同材料 Ecoflex 00-30、Ecoflex 00-50、Dragon skin 10 和 Dragon skin 30 材料仿真数据分别采用 Ogden ( $N=3$ )、Ogden ( $N=2$ )、Yeoh 和 Ogden ( $N=2$ ) 的本构模型。

在 ABAQUS 有限元分析软件中对硅胶拉伸仿真,采用静力学模型对拉伸机的拉伸过程进行模拟。将拉伸试验数据用于拟合硅胶材料的仿真材料参数。硅胶属于超弹性材料,材料应力与应变具有几何非线性关系。在拉伸试验时,夹具夹紧两端,设置硅胶试样边界条件为:一端完全固定,另一端保留拉伸方向的自由度,其余方向自由度设置为 0。拉伸载荷方向为拉伸自由度不为 0 的方向,施加过程与拉伸机拉伸过程相似,采用非均布载荷且载荷大小是不均匀增加的。将 30 N 的力施加在保留自由一端的参考点上,参考点与该端耦合,保证集中力施加在整个夹持部分。如图 3 所示,硅胶试样采用网

格类型是 C3D10H, 网格大小为 1.0 mm, 共有结点数 60724 个, 单元总数 38215 个。

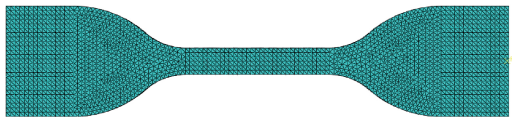


图 3 拉伸试样网格

### 1.2.3 气动夹爪仿真

采用有限元仿真方法能够降低试验误差所带来的干扰, 得到不受环境、材料稳定因素下夹爪气压和弯曲角度、指尖力的关系。仿真过程尽可能还原真实的实验场景, 考虑重力加速度的影响, 大小为  $9.7936 \text{ m/s}^2$ 。

在 ABAQUS 有限元分析软件中对软体气动夹爪进行弯曲角度仿真分析, 采用静力学模型。不同硅胶材料 Ecoflex 00-30、Ecoflex 00-50、Dragon skin 10、Dragon skin 30 的材料密度分别为:  $1.07$ 、 $1.07$ 、 $1.07 \text{ g/cm}^3$  和  $1.08 \text{ g/cm}^3$ , 分别采用 Ogden ( $N=3$ )、Ogden ( $N=3$ )、Yeoh 和 Ogden ( $N=2$ ) 模型。将软体气动夹爪一端完全固定, 固定端为气压口输入端。在夹爪内部施加一定大小的气压, 通过改变气压的大小探究弯曲角度和气压的关系。夹爪气腔在气压作用下会发生接触, 设置为无摩擦的接触属性。软体气动夹爪网格如图 4 所示, 整个夹爪模型采用 C3D10H 网格类型, 网格大小为 1.0 mm, 网格节点总数为 194899。

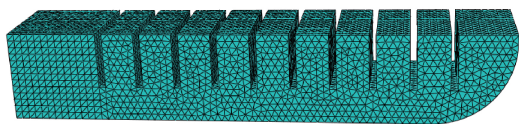
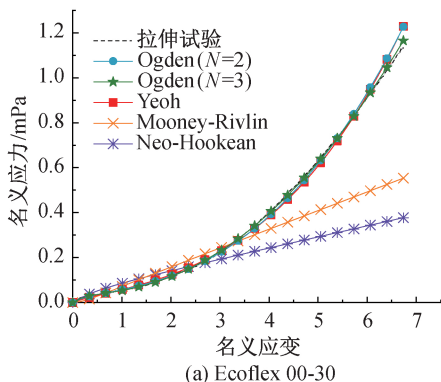


图 4 软体气动夹爪网格

为了探究气压和指尖力的关系, 软体气动夹爪采用与弯曲仿真相同的材料设置和边界条件, 也采用静力学模型。在软体气动夹爪底部设置了一个离散刚性二维平面并设置参考点, 用来输出夹爪指尖



力。在不同大小气压的作用下, 指尖与平面发生无摩擦的平面接触。设置平面为主面, 软体气动夹爪指尖面为从面, 指尖力的大小与接触力的大小相等。平面的网格类型为 C3D10H, 网格大小为 1.5 mm, 共有网格节点 102953, 单元总数 63477。

## 2 结果与讨论

### 2.1 拉伸试验与仿真结果对比

拉伸仿真的应力云图如图 5 所示, 应力主要集中在中间拉伸部分, 且各部分分布均匀。根据拉伸实验数据, 得到了同种材料的不同本构模型拟合曲线, 并分别采用 Mooney-Rivlin、Neo-Hookean、Ogden 和 Yeoh 本构模型对实验的应力应变数据拟合, 如图 6 所示。在 ABAQUS 中选择对应的应变范围, 评估不同材料的本构模型参数。将得到的本构模型用于拟合应力应变曲线, 并通过相关系数  $R^2$  来判定拟合曲线数据和实验数据的相关程度。相关系数  $R$  可用式(12)表示为:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_e - y_m)^2}{\sum_{i=1}^n (y_e - y_a)^2} \quad (12)$$

其中:  $y_e$  为拉伸实验应力值,  $y_a$  为拉伸实验应力平均值,  $y_m$  为本构模型拟合应力值。

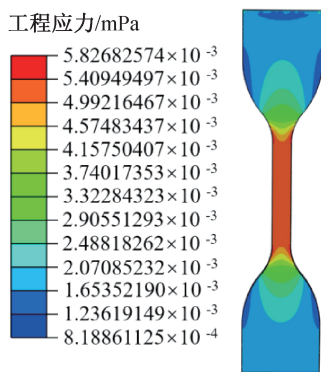
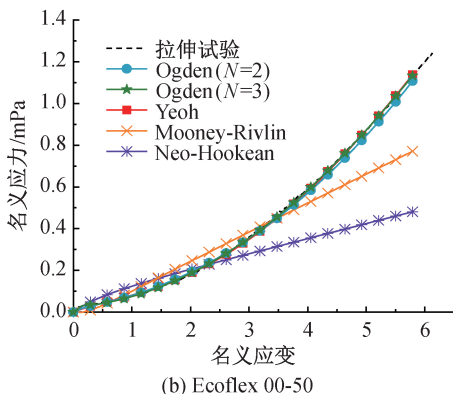


图 5 硅胶试样拉伸应力云图





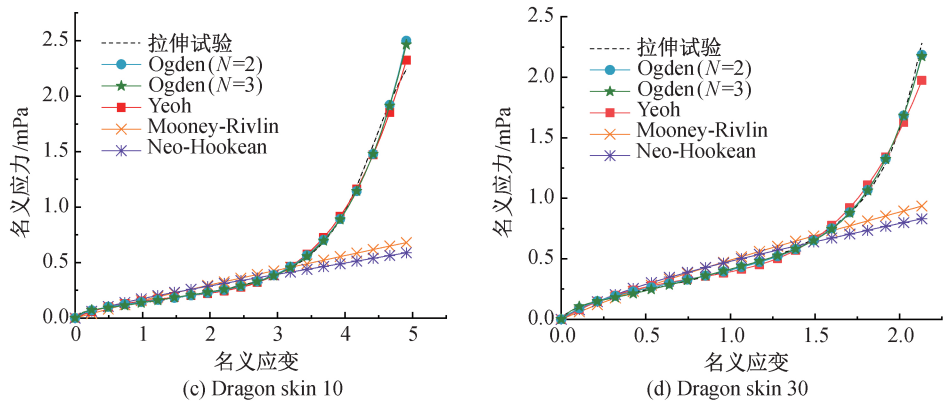


图6 不同材料的名义应力-应变曲线

不同材料本构模型及其参数见表1,  $D_i$  表示硅胶是否可压缩, 本文硅胶为不可压缩材料, 所有  $D_i$  为0。根据表1可得, 4种不同的硅胶材料均可采用 Ogden 和 Yeoh 本构模型, 相关系数达到0.99以上, 具有较高的拟合度, 能够拟合整个拉伸试验中的名义应力和应变关系。在硅胶的整个拉伸过程中, 能够采用 Mooney-Rivlin 和 Neo-Hookean 模型来拟合中小变形的过程。相比与 Ogden 和 Yeoh 模型, Mooney-Rivlin 和 Neo-Hookean 模型参数更少, 在进行数值运算时能够节约运算成本。

表1 不同材料本构模型及其参数

材料	本构模型	参数	相关系数 $R^2$
Ecoflex 00-30	Ogden( $N=2$ )	$u_1 = 3.45527360 \times 10^{-3}$ ; $a_1 = 4.18291569$ ; $u_2 = 3.90140758 \times 10^{-2}$ ; $a_2 = -1.63092366$ ; $D_1=0$ ; $D_2=0$	0.99876767
	Ogden( $N=3$ )	$u_1 = -6.47024288 \times 10^{-1}$ ; $a_1 = 2.08247340$ ; $u_2 = 3.04493253 \times 10^{-1}$ ; $a_2 = 2.50581413$ ; $u_3 = 3.86350544 \times 10^{-1}$ ; $a_3 = 1.49034092$ ; $D_1=0$ ; $D_2=0$ ; $D_3=0$	0.99986494
	Yeoh	$C_{10} = 1.36346909 \times 10^{-2}$ ; $C_{20} = 1.89230150 \times 10^{-4}$ ; $C_{30} = 5.31761602 \times 10^{-6}$	0.99870922
	Mooney-Rivlin	$C_{10} = 2.87358498 \times 10^{-2}$ ; $C_{01} = -2.40327992 \times 10^{-2}$ ; $D_1=0$	0.63054124
	Neo-Hookean	$C_{10} = 1.95017564 \times 10^{-2}$ ; $C_{01}=0$ ; $D_1=0$	0.42528137
Ecoflex 00-50	Ogden( $N=2$ )	$u_1 = 2.25515985 \times 10^{-4}$ ; $a_1 = 4.33914269$ ; $u_2 = 5.73307319 \times 10^{-2}$ ; $a_2 = -6.21412512$ ; $D_1=0$ ; $D_2=0$	0.99991178
	Ogden( $N=3$ )	$u_1 = 2.55906372 \times 10^{-2}$ ; $a_1 = 3.23907163$ ; $u_2 = -1.61043168 \times 10^{-1}$ ; $a_2 = 6.69127012$ ; $u_3 = -1.33824273 \times 10^1$ ; $a_3 = -10.5994798$ ; $D_1=0$ ; $D_2=0$ ; $D_3=0$	0.99998432
	Yeoh	$C_{10} = 1.93116465 \times 10^{-2}$ ; $C_{20} = 1.00568450 \times 10^{-3}$ ; $C_{30} = -4.00876656 \times 10^{-6}$	0.9999753
	Mooney-Rivlin	$C_{10} = 6.86826488 \times 10^{-2}$ ; $C_{01} = -7.99205758 \times 10^{-2}$ ; $D_1=0$	0.84616308
	Neo-Hookean	$C_{10} = 3.55093010 \times 10^{-2}$ ; $C_{01}=0$ ; $D_1=0$	0.45703463
Dragon skin 10	Ogden( $N=2$ )	$u_1 = 1.72415825 \times 10^{-5}$ ; $a_1 = 8.39557665$ ; $u_2 = 1.48544216 \times 10^{-1}$ ; $a_2 = -3.90732364$ ; $D_1=0$ ; $D_2=0$	0.99556952
	Ogden( $N=3$ )	$u_1 = -1.66519883 \times 10^{-1}$ ; $a_1 = 4.49301836$ ; $u_2 = 1.10038356 \times 10^{-2}$ ; $a_2 = 5.61927590$ ; $u_3 = 4.16613398 \times 10^{-1}$ ; $a_3 = -8.18931114$ ; $D_1=0$ ; $D_2=0$ ; $D_3=0$	0.99662305
	Yeoh	$C_{10} = 4.93060579 \times 10^{-2}$ ; $C_{20} = -1.58212114 \times 10^{-3}$ ; $C_{30} = 8.022287661 \times 10^{-5}$	0.99948332
	Mooney-Rivlin	$C_{10} = 6.42650704 \times 10^{-2}$ ; $C_{01} = -3.76174914 \times 10^{-2}$ ; $D_1=0$	-1.3771902
	Neo-Hookean	$C_{10} = 5.00834924 \times 10^{-2}$ ; $C_{01}=0$ ; $D_1=0$	-1.3280958
Dragon skin 30	Ogden( $N=2$ )	$u_1 = 1.98935431 \times 10^{-5}$ ; $a_1 = 1.23978721 \times 10^1$ ; $u_2 = 3.65598858 \times 10^{-1}$ ; $a_2 = -6.21412512$ ; $D_1=0$ ; $D_2=0$	0.99915893
	Ogden( $N=3$ )	$u_1 = -3.23367367 \times 10^{-1}$ ; $a_1 = 6.01099345$ ; $u_2 = 2.10380643 \times 10^{-2}$ ; $a_2 = 7.77848182$ ; $u_3 = 8.83821283 \times 10^{-1}$ ; $a_3 = -1.05994798 \times 10^1$ ; $D_1=0$ ; $D_2=0$ ; $D_3=0$	0.99890951
	Yeoh	$C_{10} = 1.40842667 \times 10^{-1}$ ; $C_{20} = -1.43486525 \times 10^{-2}$ ; $C_{30} = 2.39834914 \times 10^{-3}$	0.99019840
	Mooney-Rivlin	$C_{10} = 1.80418975$ ; $C_{01} = -8.09544728 \times 10^{-2}$ ; $D_1=0$	-0.27188604
	Neo-Hookean	$C_{10} = 1.37102180$ ; $C_{01}=0$ ; $D_1=0$	-0.90357983

本文分别对 4 种硅胶材料进行拉伸仿真和拉伸试验,得到了不同硅胶材料的拉力与变形量曲线,如图 7 所示。随着拉力的增加,仿真分析得到的变形量与实验拉伸的变形量基本吻合,进一步表明本文采用的本构模型能够对拟合不同材料应力应变关系。硅胶材料在一定的拉力范围内产生较大的变形量,之后随着拉力的增加,变形量的变化率在逐渐降低。

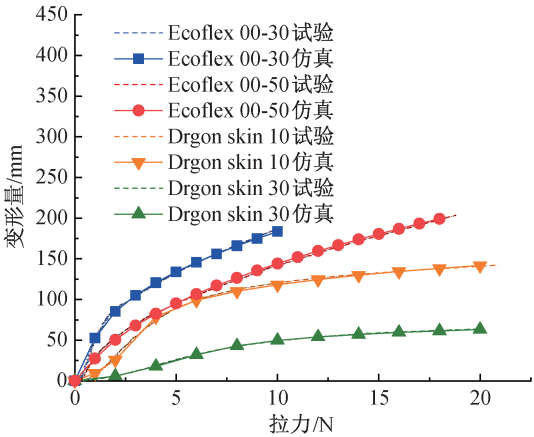
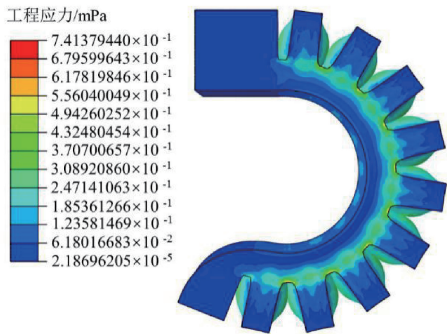


图 7 不同硅胶材料拉力-变形量曲线

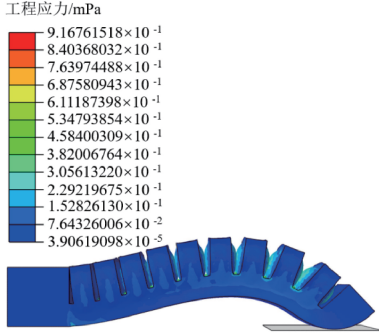
2.2 软体气动夹爪仿真结果

不同材料制作的气动夹爪弯曲角度随着气压变

化如图 8 所示,随着气压的增大,弯曲应力云图显示应力主要集中在气腔变形处和夹爪底部变形处,指尖力应力云图则显示应力集中在靠近指尖的变形气腔。图 9 显示弯曲对数应变集中在变形气腔处,指尖力对数应变集中在靠近指尖的气腔上。因此,软体气动夹爪顶部不受力时,各个气腔均匀受力;而顶部受力时,夹爪各处受力不均匀且顶部受力和变形更大。对不同材料仿真分析得到气压与弯曲角度、指尖力关系如图 10 所示。根据图 10(a)可得,所有材料制作的夹爪弯曲角度都会随着气压的增大而增加;Ecoflex 00-30 在相同气压作用下,产生的弯曲最大,而 Dragon skin 30 在相同气压下,弯曲的角度最小。如图 10(b)可知,不同材料夹爪指尖力会随着气压的增加而增大;Ecoflex 00-30 材料制作的夹爪在相同气压作用下具有最大的指尖力,而 Dragon skin 30 具有最小的指尖力。但是 Ecoflex00-30 材料制作的夹爪所能承受的最大气压不超过 10 kPa,超过最大气压一定范围可能导致夹爪损坏,而对于 Dragon skin 30 材料的夹爪可以承受 50 kPa 以上的气压,并产生最大 0.7 N 的指尖力。

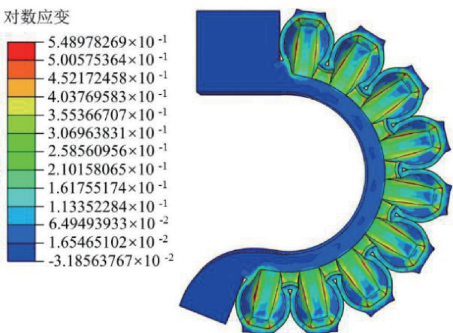


(a)弯曲仿真真应力云图

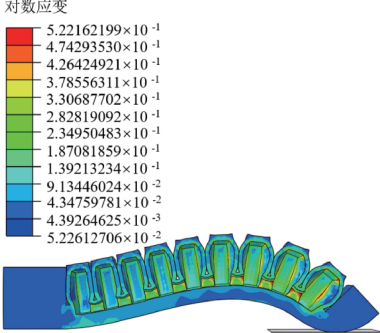


(b)弯曲仿真对数应变云图

图 8 软体气动夹爪仿真真应力云图



(a)指尖力仿真真应力云图



(b)指尖力仿真对数应变云图

图 9 软体气动夹爪仿真对数应变剖视云图

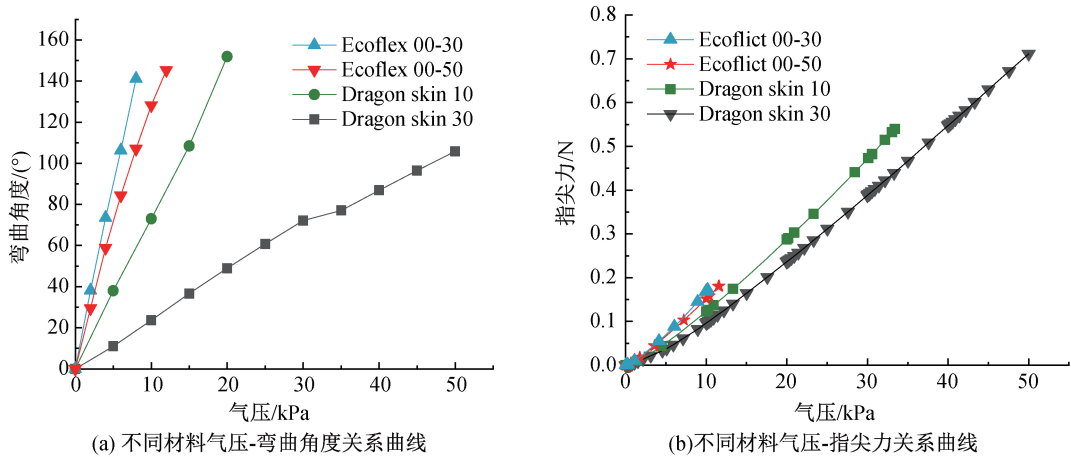


图 10 不同材料软体气动夹爪仿真分析结果

3 结 论

本文选用常用的硅胶材料 Ecoflex 00-30、Ecoflex 00-50、Dragon skin 10、Dragon skin 30 作为软体气动夹爪的制作原料,采用相同气压作用下弯曲角度的大小和指尖力的大小作为软体气动夹爪性能衡量的指标,通过拉伸试验获取材料应力应变数据,然后通过仿真分析得到了不同材料夹爪随气压的变化关系,得到以下结论:

- a) 4 种硅胶材料 Ecoflex 00-30、Ecoflex 00-50、Dragon skin 10 和 Dragon skin 30 最适合的本构模型分别是: Ogden ( $N=3$ )、Ogden ( $N=3$ )、Yeoh 和 Ogden ( $N=2$ )。
- b) 在相同拉伸试验条件下,Ecoflex 00-30 具有最大的变形量、最小的刚度和强度,而 Dragon skin 30 具有最小的变形量、最大的刚度和强度。
- c) 刚度最小的硅胶材料,制作的夹爪能够产生最大的弯曲角度和指尖力。
- d) 在相同气压作用下,Ecoflex 00-30、Ecoflex 00-50、Dragon skin 10、Dragon skin 30 的弯曲角度和指尖力依次减少。

参考文献:

[1] Shahid Z, Glatman A L, Ryu S C. Design of a soft composite finger with adjustable joint stiffness[J]. Soft Robotics, 2019, 6(6): 722-732.

[2] Glick P, Suresh S A, Ruffatto D, et al. A soft robotic gripper with gecko-inspired adhesive[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2018, 3(2): 903-910.

[3] 彭艳,刘勇敢,杨扬,等.软体机械手爪在果蔬采摘中的

应用研究进展[J].农业工程学报,2018,34(9):11-20.

[4] Wang Z K, Torigoe Y, Hirai S. A prestressed soft gripper: design, modeling, fabrication, and tests for food handling [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2017, 2(4):1909-1916.

[5] Wang Z, Or K, Hirai S. A dual-mode soft gripper for food packaging[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2020, 125: 103427.

[6] Ilievski F, Mazzeo A D, Shepherd R F, et al. Soft robotics for chemists[J]. Angewandte Chemie, 2011, 123(8): 1930-1935.

[7] Mosadegh B, Polygerinos P, Keplinger C, et al. Soft robotics: pneumatic networks for soft robotics that actuate rapidly [J]. Advanced Functional Materials, 2014, 24(15): 2163-2170.

[8] Yap H K, Lim J H, Nasrallah F, et al. MRC-glove: A fMRI compatible soft robotic glove for hand rehabilitation application[C]//2015 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR). IEEE, 2015: 735-740.

[9] De Falco I, Cianchetti M, Menciassi A. A soft multi-module manipulator with variable stiffness for minimally invasive surgery [J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2017, 12(5): 056008.

[10] Chen Y, Guo S F, Li C F, et al. Size recognition and adaptive grasping using an integration of actuating and sensing soft pneumatic gripper [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2018, 104: 14-24.

[11] Martins P A L S, Natal Jorge R M, Ferreira A J M. A comparative study of several material models for prediction of hyperelastic properties: Application to silicone-rubber and soft tissues[J]. Strain, 2006, 42 (3): 135-147.

(责任编辑:康 锋)