中国科学: 物理学 力学 天文学 2024 年 第 54 卷 第 6 期: 264502
SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica physcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
评 述 软体驱控中的力学问题专题

智能软材料多场耦合本构理论及其在软体机器中的应用

肖锐[1,2*], 钱劲[1,2], 曲绍兴[1,2]

1. 浣江实验室, 诸暨 311800;
2. 浙江大学工程力学系, 浙江省软体机器人与智能器件研究重点实验室, 杭州 310027
*联系人, E-mail: rxiao@zju.edu.cn

收稿日期: 2023-09-22; 接受日期: 2023-11-17; 网络出版日期: 2024-05-29
国家自然科学基金(编号: 12321002, 112272341)、浙江省自然科学基金(编号: LD22A020001)和浣江实验室专项资助项目

摘要 智能软材料能在外场作用下产生激励效应, 且其智能响应行为与大变形深度耦合, 这对建立其力学本构理论提出了重要挑战. 本文以形状记忆聚合物、液晶弹性体、介电弹性体、磁敏弹性体、智能水凝胶为代表性智能软材料, 介绍了上述材料的发展概况以及在相关多场耦合本构理论领域的进展. 智能软材料在软体机器人领域也有着广泛的应用前景, 因此, 本文也将探讨基于软材料多场耦合理论模型来设计软体机器人的现状以及不足之处, 以期为后续该领域的发展提供借鉴.

关键词 软材料, 软体机器人, 多场耦合

PACS: 46.05.+b, 64.70.Pf, 66.30.Dn

1 引言

智能软材料近年来得到了广泛的关注, 目前的研究主要包括形状记忆聚合物、液晶弹性体、介电弹性体、磁敏弹性体、智能水凝胶等. 其中, 形状记忆聚合物能在外界激励下从其临时形状恢复到永久形状. 当前国内外学者已经发展了多种复杂刺激响应方式的形状记忆聚合物, 包括热、光、湿度等[1–6]. 液晶弹性体可以在光、热等刺激下通过液晶基元的转动实现形状的可逆变化, 具有大应变驱动的优势[7–10]. 介电弹性体是一种电活性聚合物, 在电场作用下可实现快速可逆变形[11–14]. 磁敏弹性体通常指将磁性颗粒分散在软基体中, 这类复合材料可以在外磁场调控下实现连续、快速、可逆的形状改变[15,16]. 智能水凝胶, 如温敏水凝胶、离子凝胶等, 在温度、pH等外场条件改变下, 其溶胀行为发生改变, 进而产生激励响应行为[17–19]. 智能软材料多场耦合作用下的响应特性使其在软体机器人领域具有广泛的应用前景.

近年来, 相关学者也建立了一系列多场耦合本构模型来描述软材料在外场激励下的大变形响应行为, 包括热驱动形状记忆聚合物力-热耦合模型[20,21]、溶剂驱动形状记忆聚合物力-热-化耦合模型[22]、液晶弹

引用格式: 肖锐, 钱劲, 曲绍兴. 智能软材料多场耦合本构理论及其在软体机器中的应用. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2024, 54: 264502
Xiao R, Qian J, Qu S X. Multifield coupling constitutive theory of soft materials and its applications in soft robotics (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2024, 54: 264502, doi: 10.1360/SSPMA-2023-0350

© 2024 《中国科学》杂志社

性体力-热-序耦合模型和力-光-序耦合模型[23–25]、介电弹性体力-电耦合模型[26,27]、磁敏弹性体力-磁耦合模型[28]、温敏凝胶的力-热-化耦合模型[29,30]、离子凝胶的力-电-化耦合模型[31]. 上述模型既有助于揭示软材料智能响应的微观机理, 又能为基于智能软材料的复杂结构和系统的设计提供理论和计算的支撑.

由于对智能软材料广泛的研究兴趣, 已有相关学者对部分智能软材料的理论方面做了相关综述介绍[32–36]. 例如, Zhao等人[32]详细介绍了近年来形状记忆聚合物及其复合材料的本构理论的主要进展. Lu等人[34]总结了介电弹性体的力电耦合本构模型, 并结合理论分析了介电弹性体智能结构的变形行为和力电耦合失稳行为. Liu等人[35]介绍了各类水凝胶材料的多场耦合本构理论以及基于上述理论的凝胶结构有限元设计等. 本文旨在总结当前各类智能软材料多场耦合本构理论方面所采用的常用方法, 同时也将介绍上述多场耦合模型在软体机器人设计方面的应用情况. 基于上述情况, 本文也希望能指出现有智能软材料多场耦合理论发展及其应用的不足之处, 为该方向的后续发展提供借鉴.

2 形状记忆聚合物

形状记忆聚合物可以在外界激励下从一个临时形状恢复其永久形状. 常用的外界激励为热激励, 即聚合物材料在高温形成临时形状, 降温实现形状固定, 再升温实现形状恢复. 部分学者也通过磁场或电场产生的焦耳热作为热源来实现形状恢复, 其优势在于可实现远程驱动[2,3]. 另一类被广泛研究的驱动方式, 是溶剂或湿度, 在溶液环境或者高湿度环境, 水分子或其他有机溶剂分子, 进入聚合物基体, 降低玻璃化转变温度, 进而实现形状恢复[5]. Chen等人[37]实验结果显示亲水性的形状记忆聚合物能在高湿度环境下实现形状恢复, 且其恢复行为同时依赖于温度和相对湿度. 部分学者也发展了光驱动或pH驱动等形状记忆聚合物[6,38]. 形状记忆聚合物当前主要的应用领域是生物医疗器件和航空航天领域[1,39,40]. 例如, 德州农工大学Maitland团队[1]发展了一系列具有优异生物相容性的形状记忆泡沫, 用于治疗血管瘤. 哈尔滨工业大学的冷劲松团队[40]基于形状记忆聚合物智能结构在天问一号着陆器上完成了中国国旗在火星上的可控动态展开.

传统的形状记忆聚合物并不适用于软体机器人, 主要的原因是其形状记忆行为是单向的. 部分学者基于不同的材料体系也发展了双向的形状记忆聚合物. 早期的双向形状记忆效应需在外力作用下才能实现两个形状的可逆变化, Behl等人[41,42]实现了在无应力情况下两个形状之间变化的形状记忆聚合物. 上述材料体系主要为具有宽广的结晶区间或多个结晶区间的半结晶聚合物, 聚合物材料先在高温变形并降至低温, 选择一个介于高温和低温之间的温度作为中间温度, 在低温和该中间温度之间循环, 由于晶相融化导致的收缩和由于结晶所导致的伸长会使得聚合物在两个形状之间往复变化. 由于上述特性, 双向形状记忆效应可应用于驱动器等, 如图1所示的抓手.

相关学者已经建立了多个本构模型, 用来预测聚合物的形状记忆效应[20–22,43,44]. 基于不同的材料体系, 目前的理论模型主要基于玻璃化转变或者相变行为. 基于玻璃化转变模型的核心在于能够描述热力学性质随着温度产生急剧变化, 从高温的软橡胶态转化为低温的硬玻璃态, 在这个过程中无论模量还是松弛时间都能发生多个数量级的改变, 因此, 相关的理论模型在基于经典的流变学模型基础上, 将模量或松弛时间设置为温度的函数. 相变理论认为聚合物是由软相(活跃相)和硬相(冻结相)组成, 其应力σ和应变ε由两相共同贡献(公式(1a)和(1b)), 随着温度降低, 软相逐渐转变为硬相, 这类模型还需分别确定软相和硬相的本构关系, 以及各相体积分数ϕ随着温度的变化关系(公式(1c))[20].

$$\sigma = \phi_f \sigma_f + (1-\phi_f)\sigma_a, \tag{1a}$$

$$\varepsilon = \phi_f \varepsilon_f + (1-\phi_f)\varepsilon_a, \tag{1b}$$

$$\phi_f = 1 - \frac{1}{1+c_f(T_h - T)^n}, \tag{1c}$$

在公式(1)中, 下标a表示活跃相, 下标f表示冻结相, T代

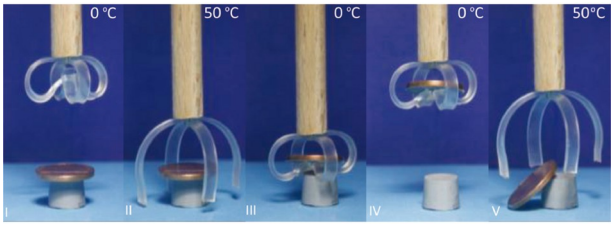


图 1 (网络版彩图)基于双向形状聚合物的抓手设计[42]

Figure 1 (Color online) The design of grippers based on two-way shape-memory polymers [42].

表温度, c_f, T_h和n是相应的模型参数.

对于热驱动的形状记忆效应, 由于热传导时间较快, 通常不需要模拟热传导过程. 作为对比, 溶剂扩散速度一定程度上决定了聚合物在溶剂中的形状恢复行为, 因此, 在溶剂驱动形状记忆的本构模型中需充分考虑溶剂扩散问题. 针对这一问题, Xiao等人[22]建立了热-力-化耦合的本构模型, 该模型通过Adam-Gibbs模型建立松弛时间τ_R与结构熵S_c的联系, 结构熵包括聚合物的结构熵以及引入溶剂后结构熵的改变, 结构熵是温度和溶剂含量的函数(公式(2)), 随着溶剂浓度的增加, 结构熵增加, 而松弛时间降低, 所以该模型能模拟溶剂引起的塑化效应. 该模型采用Fick扩散模型来模拟溶剂在聚合物基体中的扩散. 通过开展有限元分析, 该模型能够预测不同温度条件下非晶态聚合物的临时形状在水中的恢复行为(图2).

$$\tau_R = A\exp\left(\frac{B}{TS_c}\right), \tag{2a}$$

$$S_c(N,T) = S_c(0,T) + \Delta S_c(N), \tag{2b}$$

在公式(2)中, A和B是相应的模型参数, N是溶剂分子的数量, 公式(2b)的右边第一项是聚合物体系原有的结构熵, 第二项是引入溶剂后结构熵的改变.

当前形状记忆聚合物领域的理论模型主要集中于预测单向形状记忆效应, 较少关注双向形状记忆效应. Scalet等人[43]建立了一维唯象模型来描述半结晶聚合物在应力作用下的双向形状记忆效应, 该模型是基于相变模型, 并且引入了由于结晶形成所产生的应变变化. Yan等人[44]建立了三维有限变形下的相变本构模型, 该模型能够预测半结晶聚合物的双向形状记忆效应(图3). 但是, 上述理论仍有很多不足之处. 上述理论模型主要用于模拟具有外力作用下的双向形状记忆效应, 且是通过简单的单轴实验结果进行验证, 模型的数值计算方面也较为复杂等. 上述因素限制了这些模型用于设计基于双向形状记忆聚合物的软体机器人.

3 液晶弹性体

液晶弹性体由液晶分子和弹性交联网络组成, 既包含了液晶分子有序结构, 又具有弹性网络的可变形特性. 当液晶分子排列有序且一致时, 可获得单畴液晶弹性体, 在低温时, 弹性体处于向列相, 而在高温时

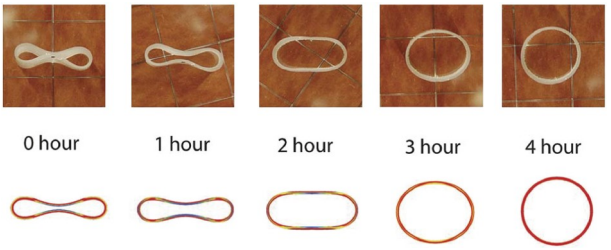


图 2 (网络版彩图)模型预测和实验观察的形状记忆聚合物在水中的恢复行为对比[22]

Figure 2 (Color online) Comparison between measured and predicted shape recovery of polymers in water [22].

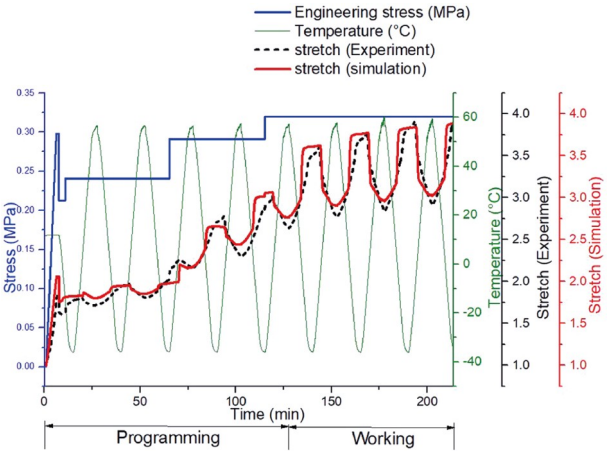


图 3 (网络版彩图)模型预测和实验观察的双向形状记忆行为[44]

Figure 3 (Color online) Comparison between measured and predicted two-way shape-memory behaviors [44].

处于各向同性相. 随着温度改变, 发生向列相-各向同性相改变, 进而改变形状. 与之不同, 多畴的液晶弹性体中的液晶分子排列复杂且无序, 随着温度改变其形状并不发生明显改变. 但在外力作用下, 低温时, 液晶基元会沿着受力方向进行排布, 而在高温时, 无序的熵弹性仍占主导地位. 因此, 在外力作用下多畴液晶弹性体随着温度改变也能发生明显的形状改变, 上述行为可参考图4[7]. 值得注意的是, 单畴液晶弹性体是一个典型的双向形状记忆材料.

液晶弹性体在人工肌肉、软体机器人领域具有广泛的应用. He等人[8]采用静电纺丝技术, 制备了多畴液晶弹性体纤维, 并应用于驱动器, 实现了可回复、大驱动应力应变、高功率密度特性, 更为显著的是该驱动器在百万次加卸载后, 驱动应变不衰减. Liu等人[45]采

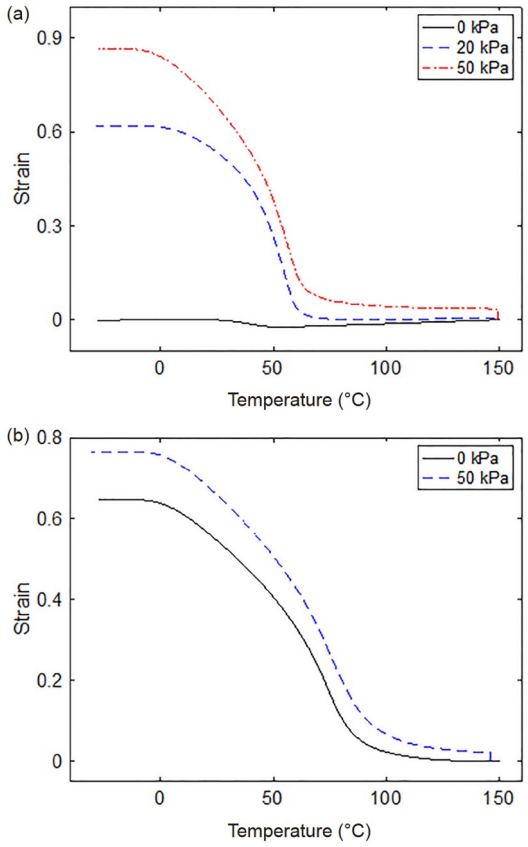


图 4 (网络版彩图)多畴(a)和单畴(b)液晶弹性体随着温度改变的变形行为[7]

Figure 4 (Color online) The shape change of polydomain (a) and monodomain (b) LCEs with temperature [7].

用液晶弹性体作为主动层，构建了主动层和被动层复合结构，并采用电流来控制产热，实现局部变形的独立控制，实现三维曲面可控变化的软体机器人. Wu等人[46]受毛毛虫的启发，基于液晶弹性体制备了多种爬行模式的软体机器人，该机器人采用柔性加热器来实现对于液晶弹性体的可编程加热，控制变形曲率，导致机器人前后端摩擦力发生变化，进而实现双向运动模式(图5). Zhao等人[47]研究了液晶弹性体指环在热台上的运动行为，受传热的影响，不同部分变形不一致，产生屈曲等复杂模态, 并能实现突跳等运动行为.

在本构模型方面, Landau-de Gennes理论被广泛用来描述液晶弹性体相变行为. Bladon等人[48]在高斯分布的统计模型基础上引入步长张量**g**，建立了各向异性的高斯链模型，即neo-classical模型，该模型可以描述液晶弹性体的软弹性(公式(3)). Jin等人[49]结合Land-

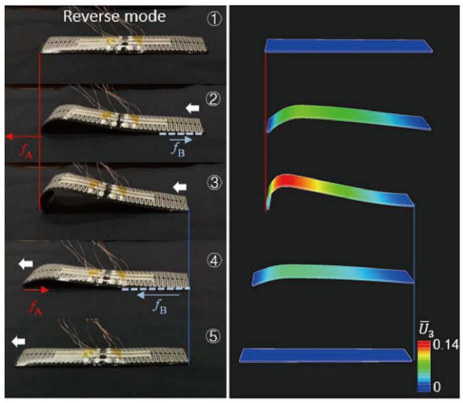


图 5 (网络版彩图)基于液晶弹性体软体机器的双向运动模式[45]

Figure 5 (Color online) The LCE-based soft robot in reserve mode [45].

au-de Gennes理论和neo-classical模型建立了液晶弹性体力-热-序耦合理论模型，可以预测在应力作用下液晶基元的转动行为. 近期，相关学者建立了液晶弹性体黏弹性本构模型[50,51]，这些模型充分考虑了液晶基元率相关的转动行为和液晶基体率效应，能够预测单畴液晶弹性体不同加载速率下的应力响应. 相对而言，当前文献上很少有相关工作致力于建立多畴液晶弹性体的本构模型, 在这方面目前的主要进展可参见Lee等人[52]近期的相关工作.

$$\psi = \frac{\mu}{2}\left[\mathrm{Tr}\left(\mathbf{g}^{-1}\mathbf{F}\mathbf{g}_0\mathbf{F}^{\mathrm{T}}\right)\right], \tag{3}$$

在公式(3)中, μ是剪切模量, **F**是变形梯度张量, $\mathbf{g}_0$是初始步长张量.

液晶弹性体的力-热-序耦合模型，有望预测液晶弹性体结构的变形和运动行为，然而，考虑液晶基元转动的本构模型有限元植入较为复杂，且在收敛性方面也有多方面的问题. 因此，部分学者在模拟液晶弹性体结构时，忽略了液晶基元的转动效应，仅考虑序参数是温度的函数. 例如, Chen等人[53]采用neo-classical模型作为液晶弹性体的自由能(公式(3))，其中三维步长张量**g**依赖于温度. 如果假定液晶基元的主方向为**n**, 步长张量的形式如公式(4)所示, 为了描述温度依赖的变形行为，将步长张量沿着液晶方向分布和垂直于液晶方向分布的特征值($g_{\parallel}$, $g_{\perp}$)设置为温度的函数, 其具体的函数形式可根据实验所获得的液晶弹性体长度随着温度的改变拟合获得. 该模型可以预测复杂液晶弹性体结构的变形行为.

$$\mathbf{g} = g_{\perp}\left[\mathbf{I} + \left(\frac{g_{\parallel}}{g_{\perp}} - 1\right)\mathbf{n} \otimes \mathbf{n}\right]. \tag{4}$$

当不考虑液晶基元的转动时, 上述模型的模拟效果一定程度上与采用热膨胀模型类似, 因此部分工作也采用各向异性的热膨胀系数来模拟液晶弹性体随着温度的形状改变. 例如, Ahn等人[9]研究了液晶弹性体-碳纳米管软体机器人, 在光照下, 由于热效应, 线性的材料可以弯曲成圆弧形, 并积蓄能量, 在达到临界时, 该软体机器人可以发生跳跃, 其跳跃高度能达到其自身长度的五倍. 如图6所示, 通过采用热应变来模拟液晶弹性体在光照情况下的局部变形行为, 成功再现了主要实验结果, 也揭示了上述软体机器人的工作原理.

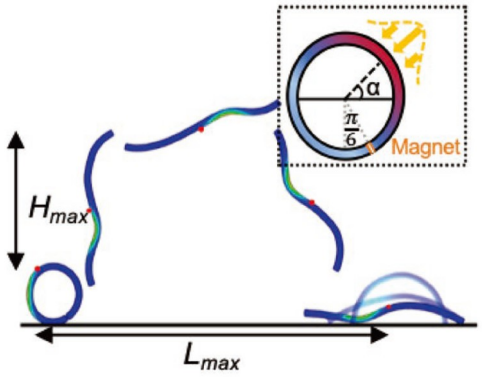


图 6 (网络版彩图)基于液晶弹性体软体机器人的跳跃行为的有限元模拟[9]

Figure 6 (Color online) Simulation results on the jump behaviors of LCE-based soft robots [9].

4 介电弹性体

介电弹性体薄膜可以在外界电场下改变其厚度, 增加其面积, 并且在外界电场撤去后, 恢复其原来形状. 这一独特的性质导致介电弹性体广泛地应用于软体机器人的驱动装置[11–14,54,55]. Shian等人[13]通过介电弹性体薄膜和纤维的复合, 实现了不同抓取方向的微抓手. Cao等人[14]报道了基于介电弹性体驱动器的无束缚软体机器人, 受蚯蚓运动的启发, 该软体机器人通过可变形机构体的交替扩张/收缩和纸质脚的附着/分离实现运动. Li等人[54]发展了基于介电弹性体驱动器的透明软体机器, 实现了与自然界生物类似的伪装策略, 并在后续工作中进一步设计了透明的仿水母软体机器. 浙江大学李铁风团队[11]采用介电弹性体作为驱动器, 并采用仿生结构, 实现了在万米深海的软体机器鱼自主游动(图7).

当前研究和应用最为广泛的液晶弹性体是丙烯酸类材料(例如, 3M公司开发的双面粘接胶带VHB 4910), 然而, 这类材料在工程应用中通常需高电压才能产生明显的变形行为, 此外, 该介电弹性体易出现力-电失稳行为. 在室温条件下, 这类材料的黏弹性效应显著, 在电驱动过程中易产生迟滞行为等. 针对上述问题, 近年来相关学者发展了具有低电压驱动的介电弹性体, Borayek等人[56]设计了具有低电压驱动的介电弹性体, 1 mm厚的材料在低电压700 V左右能产生6.5%的面积应变, 并且能在10000个循环周期, 变形行为仍保持稳定. Shi等人[57]采用链长显著不同的两类交

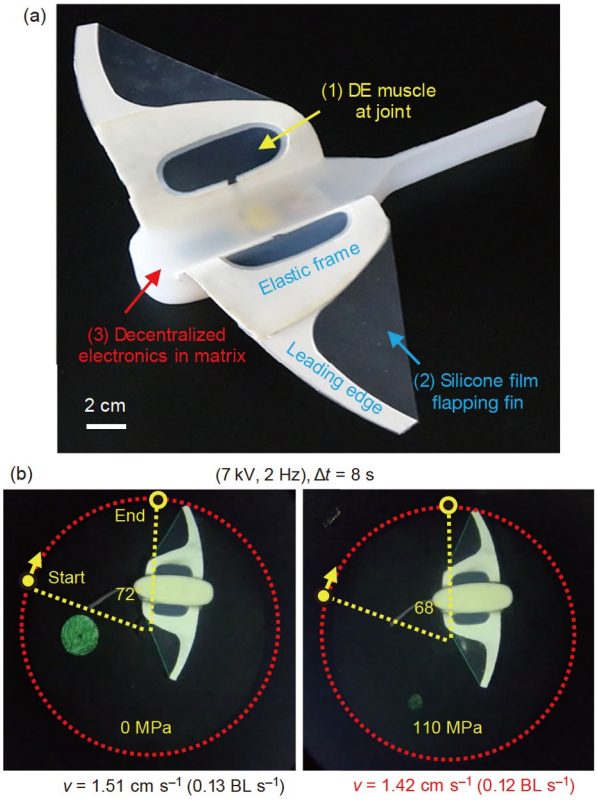


图 7 (网络版彩图) (a) 基于介电弹性体仿深海软体机器的设计; (b) 软体机器人在不同静水压下的运动行为[11]

Figure 7 (Color online) (a) Design of soft robots based on dielectric elastomers; (b) the movement of soft robot under different pressures [11].

联剂, 合成了具有双峰分布的新型介电弹性体, 该介电弹性体在无需预拉伸情况下就能达到190%的最大面

积应变, 并且在高频率下, 其应变仍能保持在100%以上, 基于该材料, 该团队进一步设计了蜘蛛型致动器和多功能管状致动器. 上述研究对于介电弹性体的进一步广泛应用具有重要意义.

基于微观力学机理, 相关学者也建立了介电弹性体力-电耦合理论模型. 哈佛大学锁志刚团队[26]从热力学出发建立了介电弹性体的非线性力-电耦合本构模型. 以介电弹性体薄膜为例, 假定在力场和电场作用下其沿着长、宽、高三个方向伸长率分别为λ_1, λ_2, λ_3, 则其Helmholtz自由能可表示为

$$\psi=\frac{\mu}{2}\left[\lambda_3^{\,2}+\frac{2}{\lambda_3}-3\right]+\frac{\lambda_3^{\,2}\tilde{D}_3^{\,2}}{2\varepsilon_0}, \tag{5}$$

式中第一项是由变形引起的自由能变化, 第二项则是基于平行板电容器推导的电场能(ε_0是介电常数, $\tilde{D}_3$是名义电位移). 上述自由能形式未考虑大变形导致的应变强化效应, 可采用Gent模型或者八链模型来描述上述效应. Zhao等人[58]将上述模型应用于模拟双层介电弹性体薄膜在电场作用下的弯曲变形行为, 可以应用于微抓手设计, 这个模拟工作与Kofod等人[59]实验结果一致(图8).

该理论模型也被广泛应用于分析具有不同预变形和构型的介电弹性体的变形和失稳行为[36]. Henann等人[60]建立了热力学自洽的介电弹性体本构模型, 并将模型植入到有限元软件中, 该模型被进一步用来设计介电弹性体驱动器(电能转化为机械能)和能量收集器(机械能转化为电能). 部分学者也在理论框架中引入了黏弹性机制, 例如, Park等人[61]分析了黏弹性对于力电耦合失稳行为的影响, 在有限元植入过程中, 考虑了惯性力影响, 这增强了模型的鲁棒性. Chen等人[62]建立了考虑黏弹性效应的力-电耦合模型, 并分析了在循环电载荷作用下介电弹性体变形的棘轮效应. Xiao[63]在黏弹性模型的基础上考虑温度效应, 建立介电弹性体的力-热-电耦合模型, 在高温时, 介电弹性体处于超弹性, 施加一定电压可以使得介电弹性体变形, 降低温度, 黏性效应占主导, 介电弹性体逐渐进入玻璃态, 这时去除电压, 变形后的形状无法回复, 形成临时形状, 升高温度, 在熵弹性的主导下, 临时形状又恢复到其永久形状, 上述效应结合了聚合物的形状记忆效应和电致变形行为, 理论预测结果与相关文献实验结果一致[64].

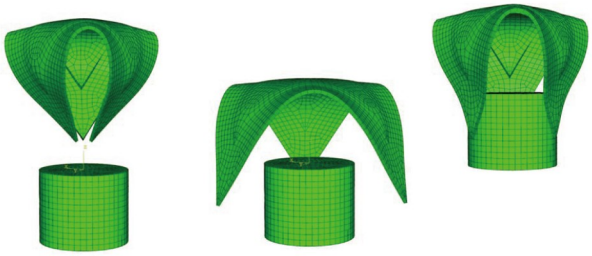


图 8 (网络版彩图)基于介电弹性体的微抓手的模拟[58]

Figure 8 (Color online) Simulation result of the grippers based on dielectric elastomers [58].

值得注意的是, 当前介电弹性体相关的理论模型主要还是基于商业化的VHB4910材料来进行验证, 这些模型是否适用于新型介电弹性体[56,57], 仍需开展相关工作进行验证.

5 磁敏弹性体

磁敏弹性体由弹性体基体和分散在基体中的微小磁性颗粒组成. 根据磁性颗粒的不同, 可以分为软磁颗粒填充弹性体和硬磁颗粒填充弹性体. 软磁颗粒, 主要包括羰基铁粉, 其主要特征是具有高磁导率和低磁滞损耗, 在外界磁场下能快速磁化和去磁化. 软磁颗粒填充的弹性体通常能在外界磁场下实现其力学性质的改变, 例如模量、黏性等. 硬磁颗粒, 如钕铁硼等, 具有高矫顽力和高剩余磁感应强度, 即在去除外加磁场后仍能保持较高的剩余磁感应强度. 在外界磁场作用下, 由于磁性粒子之间的相互排斥和影响, 硬磁颗粒填充弹性体能发生明显的形状改变, 这使得这类软材料在软体机器人领域有着广泛的应用前景[15,28,65–67].

麻省理工学院赵选贺团队[65]采用3D打印方法控制复杂磁畴的分布, 设计了一系列具有任意复杂结构和任意磁畴分布的软机器(一维到三维), 编程好的磁畴会根据外加磁场旋转, 使整个软机器做出快速复杂的形变. 在后续工作中, 该团队演示在外界磁场控制下, 铁磁软体导丝机器人可以快速准确地穿越一系列密集排布的小尺寸孔洞, 有望应用于生物医疗领域[66]. Wang等人[67]在软体机器体内嵌入微小的磁体, 实现了对磁场快速响应, 这类软体机器人可高速完成行走、游泳、漂浮和捕捉活体苍蝇等运动(图9). 西安交通大学唐敬达团队[68]结合软磁颗粒和硬磁颗粒, 实现了磁

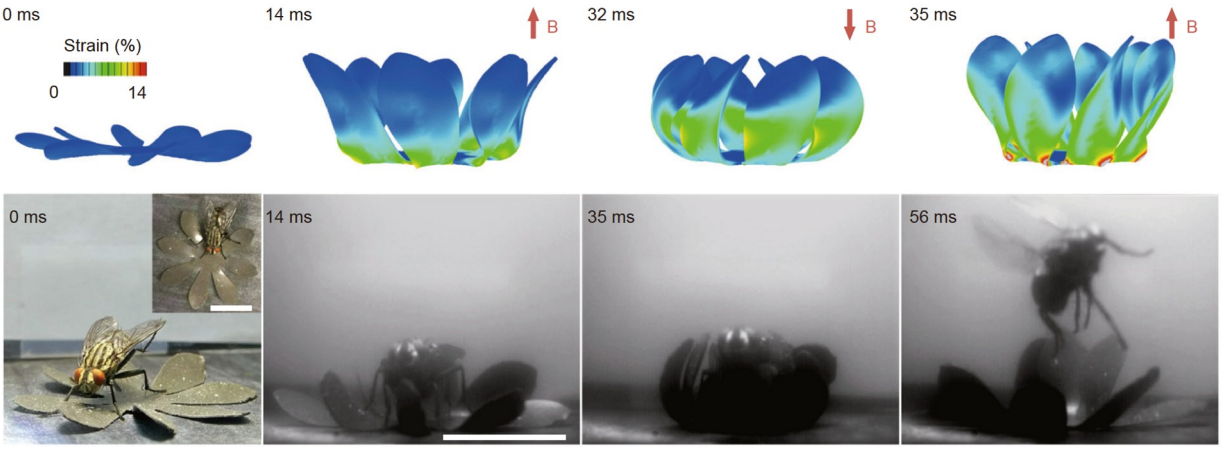


图 9 (网络版彩图)快速磁响应软体机器的运动行为的实验和模拟对比(图例尺寸1 cm)[66]

Figure 9 (Color online) Simulated and experimental results of magnetic soft robot with fast actuation (scale bar, 1 cm) [66].

响应软体机器人的可重构行为, 为实现复杂的磁响应行为提供了新方案.

早期对于磁响应弹性体的理论建模主要集中于研究软磁颗粒填充弹性体的变形响应行为[69,70], 主要研究磁颗粒的存在对于弹性体超弹性和黏弹性力学行为的影响, 以及由磁颗粒排布所导致的各向异性行为等. 由于硬磁颗粒填充弹性体在软体机器人领域广泛应用, 相关学者也逐步建立了相应的本构理论. Zhao等人[28]建立了硬磁颗粒填充弹性体的理论模型, 模型假设硬磁颗粒的本构关系中磁通密度与施加的激励磁场呈线性关系, 且材料具有残余磁通密度, 采用公式(6)的自由能形式, 有效描述了有限变形和磁场的耦合, 该模型能够模拟具有不同硬磁颗粒取向结构在磁场下的变形行为(图10).

$$\widetilde{W}=\frac{\mu}{2}(I_1-3)+\frac{K}{2}(J-1)^2-\frac{1}{\mu_0}\mathbf{F}\mathbf{B}^r\mathbf{B}^{\text{applied}}, \tag{6}$$

在公式(6)中, K是体积模量, I_1是柯西-格林张量的第一不变量, J是变形梯度张量$\mathbf{F}$的秩, $\mathbf{B}^r$是残余磁通密度矢量, $\mathbf{B}^{\text{applied}}$是施加的磁通密度矢量.

上述理论模型被进一步扩展用以预测磁软体机器的变形和运动行为[71–73]. 例如, Wang等人[72]采用该模型和遗传算法实现了对于软体机器人驱动行为的优化. Yang等人[74]建立了杆模型来预测细长硬磁性弹性体的空间变形, 如伸展、弯曲和扭转等, 该简化模型与三维模型相比, 仍具有较高的模型精度, 可以用来指导硬磁弹性杆的可编程结构设计. Moreno-Mateos等人[75]建立了多物理场耦合的理论模型来研究同时含软磁颗粒和硬磁颗粒的弹性体材料, 理论模型表明了软磁颗粒可以放大磁化程度以及硬磁颗粒能增加扭转行为, 这为磁响应软材料的设计提供了有力的理论工具.

6 智能水凝胶

水凝胶是由交联的聚合物网络和水组成的混合体系. 中性凝胶是最为简单的水凝胶体系, 其溶胀行为不受溶液中离子浓度或者pH的影响. 作为对比, 聚电解质凝胶是由带电聚合物网络形成的凝胶, 由于带电聚合物和自由离子之间的相互作用, 聚电解质凝胶的溶胀行为受到外界激励的影响, 比如离子浓度、pH以及外界电场等[19]. 温敏凝胶是另一类得到了广泛关注的智能凝胶体系, 以聚(N-异丙烯丙烯酰胺)(pNIPAM)水凝胶作为主要代表, 在温度低于低临界溶液温度时, 水凝胶处于高溶胀的亲水状态, 而当温度高于低临界溶液温度时, 水凝胶处于低溶胀的疏水状态[18].

水凝胶的激励响应行为使其在可折叠张开结构领域得到了广泛的应用. 例如, Breger等人[18]基于温敏凝胶设计了微米尺寸的双向微抓手. Yang等人[76]采用3D打印制备了水凝胶和弹性体的强韧粘接的双层结构, 可以形成花朵、章鱼等复杂结构. 近年来, 智能凝胶在软体机器人领域也取得了一些突破. Han等人[19]基于3D打印方法制备了聚电解质水凝胶, 在外界交替电场

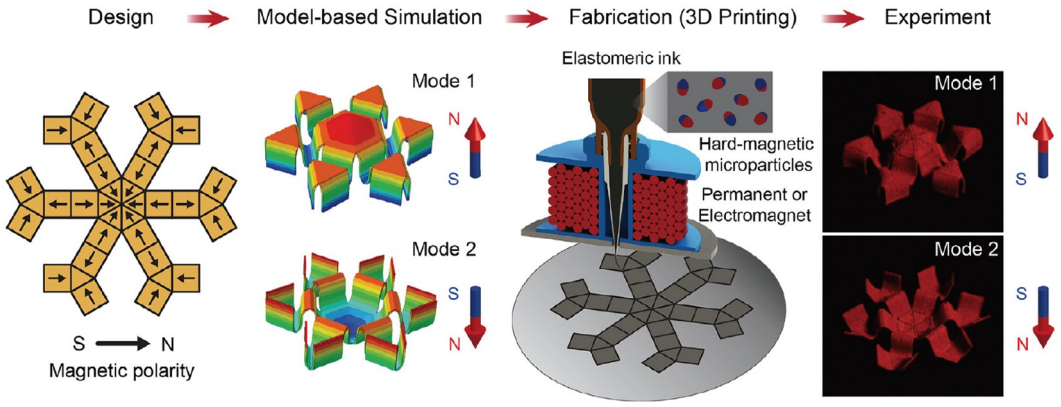


图 10 (网络版彩图)基于模型指导的3D打印磁敏软体机器人多模态变形设计[28]

Figure 10 (Color online) Model-guided 3D printed magnetic responsive soft robots with multiple actuation mode [28].

下, 软体机器人可以发生连续移动(图11). Gao等人[77]发展了双层温敏凝胶双层结构, 随着温度的变化, 凝胶结构发生变化, 由于凝胶结构和基体表面的黏附, 变形的弹性能可储存, 并在达到临界时释放, 最终实现软结构的跳跃. 值得注意的是, 由于凝胶的溶胀/收缩行为受溶剂扩散速度的影响, 基于智能凝胶的软体机器人驱动效率仍较低.

早期针对水凝胶的本构模型主要是基于两相变形理论, 将水和凝胶视为不同的相组成, 分别采用相应的运动方程. 当前, 将水凝胶视为单相的连续介质本构模型逐渐成为水凝胶多场耦合建模的主流选择. Hong等人[78]建立了水凝胶溶胀和变形的连续介质本构模型, 在模型中, 采用Gaussian链模型作为高分子网络变形自由能, 采用Flory-Huggins模型表示水和高分子网络混合的自由能(公式(7)), 采用Fick扩散定律来描述水分子的扩散行为.

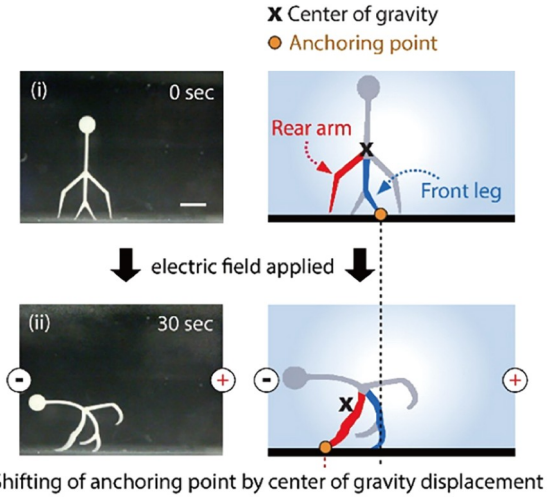


图 11 (网络版彩图)离子凝胶软体结构在电场下的运动行为[19]

Figure 11 (Color online) The movement of ionic gel upon the electric field [19].

$$W_{mix}=-\frac{kT}{v}\left[vC\log\left(1+\frac{1}{vC}\right)+\frac{\chi}{1+vC}\right], \tag{7}$$

在上式中, k是玻尔兹曼常数, v是单个溶剂分子的体积大小, C是溶剂分子的数量, χ是Flory-Huggins参数.

上述模型被进一步扩展用来模拟温敏凝胶. Cai等人[29]假定Flory-Huggins参数是温度和溶剂浓度的函数, 该理论模型能够预测温敏凝胶的不连续相变行为. Chester等人[30]将Flory-Huggins参数设为温度的函数(公式(8)), 该模型适用于凝胶的溶胀比随温度变化较为平缓的情况, 在有限元计算方面也更为稳健. Yoon等人[79]基于Chester模型设计了一系列温敏凝胶自折叠结构. 近期, Pantula等人[80]基于上述热敏凝胶力-化耦合本构模型, 实现了无约束温敏凝胶软机器爬行(图12). 该结构采用非对称的两个双层结构(温敏凝胶-中性凝胶), 这两个双层结构用一个单层的温敏凝胶连接, 随着温度降低, 会导致双层结构弯曲, 进而导致中间部分的温敏凝胶与表面贴合, 起到锚点作用, 推动结构前行, 而升温过程中, 两个双层梁结构与地面贴合, 起到锚点作用, 由于不对称的摩擦力, 整个结构仍能继续前行. 在有限元模拟过程中, 考虑了温敏凝胶依赖于温度的溶胀行为, 同时也考虑了摩擦力的影响, 成功预

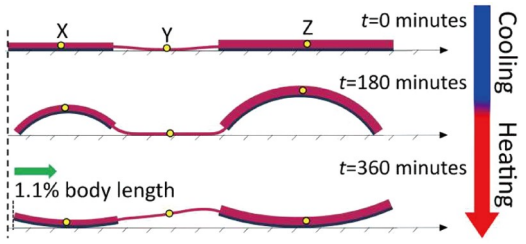


图 12 (网络版彩图)非对称温敏水凝胶结构在热循环过程中运动行为的有限元模拟[80]

Figure 12 (Color online) Finite element simulation of movement of the unsymmetric structures based on thermo-responsive hydrogels [80].

测了实验观察到的爬行行为, 并基于有限元开展了相关结构的优化设计.

$$\chi = \frac{1}{2}(\chi_L+\chi_H)-\frac{1}{2}(\chi_L-\chi_H)\tanh\left(\frac{T-T_h}{\Delta}\right), \tag{8}$$

在上式中χ_L, χ_H分别是低温和高温时的Flory-Huggins参数, T_h, Δ是模型参数, 控制着相变区的位置和温度宽度.

聚电解质凝胶的本构模型更为复杂, 不仅牵涉溶剂分子的扩散, 还包括自由离子的扩散, 且离子扩散受到外界电场的影响[31,81,82]. Narayan等人[31]建立了力-电-化全耦合的聚电解质凝胶本构模型, 模型假设聚电解质体系的自由能包括聚合物网络的变形能、溶剂和聚合物网络的混合能、离子和溶剂的混合能以及静电能. 采用Maxwell-Stefan定律来描述溶剂和离子的扩散行为. 在植入有限元过程中, 三个场分别采用动量守恒、高斯定律、质量守恒来实现. 上述理论体系成功地预测了不同盐浓度和pH情况下的聚电解质凝胶的溶胀变形行为(图13), 并被进一步用来模拟电场作用下的聚电解质凝胶的变形行为. 部分学者也发展了磁响应水凝胶的力-磁-化耦合的本构理论, 成功预测了这类智能凝胶在复杂场耦合下的激励响应行为[83,84].

7 总结和展望

智能软材料的力学本构理论近年来取得了显著进展, 现有模型能够预测多种复杂情况下软材料的变形响应行为, 部分模型也初步应用于软体机器人的设计. 但这一领域尚有多个问题值得进一步研究, 如下所述.

(1) 适用于软体机器人的形状记忆聚合物需具备双向形状记忆效应, 当前双向形状记忆聚合物本构理论仍未取得较大突破.

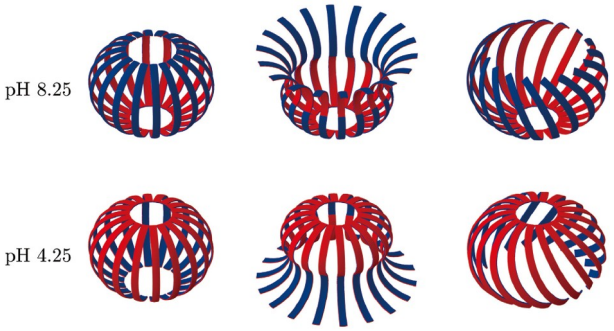


图 13 (网络版彩图)有限元模型预测的离子凝胶结构在不同pH条件下的变形行为[31]

Figure 13 (Color online) Finite element simulation of deformation behaviors of ionic gels at varied pH levels [31].

(2) 已有相关工作模拟液晶弹性体软体机器的动力学行为, 但这些工作通常采用热应变来近似描述液晶弹性体由于相变导致的变形行为, 这些模型通常只在液晶基元不转动的情况下适用.

(3) 现有的介电弹性体的本构模型聚焦于商业化的VHB胶带材料, 针对具有广泛应用前景的低电压介电弹性体和无力电耦合失稳行为介电弹性体的理论研究, 仍较为滞后.

(4) 为了实现磁致变形行为, 通常需要较大的磁场强度或低模量的弹性体基体, 这一定程度上限制了磁敏软材料的应用. 此外, 当前也亟需发展同时考虑软磁效应和硬磁效应的理论模型.

(5) 智能凝胶通常通过溶胀行为来实现变形和运动行为, 这类行为通常需要较长的时间, 从而限制了这类材料在软体机器人领域的应用.

(6) 当前绝大多数研究主要关注单一种类的智能响应行为. 多响应行为, 例如, 弹性体的电致/磁致变形和形状记忆效应的耦合[2]、软磁效应和温敏凝胶的结合[85]、磁响应和液晶弹性体的结合[86]等, 都能为软材料的设计提供更多的自由度.

本文介绍了典型的响应性软材料的多场耦合本构模型, 限于篇幅, 尚有不少响应性软材料未能介绍, 例如, 离子聚合物-金属复合物材料, 这类材料的相关进展可参见Zhao等人[87]综述论文和Narayan等人[88]理论论文; 关于低电压驱动的PVC凝胶, 其进展可参见相关论文[89].

参考文献

1 IV W S, Singhal P, Wilson S, et al. Biomedical applications of thermally activated shape memory polymers. J Mater Chem, 2010, 20: 3356–3366

2 Ze Q, Kuang X, Wu S, et al. Magnetic shape memory polymers with integrated multifunctional shape manipulation. Adv Mater, 2020, 32: 1906657, arXiv: 1909.13171

3 Lu H, Yao Y, Lin L. Carbon-based reinforcement in shape-memory polymer composite for electrical actuation. Pigment Resin Tech, 2014, 43: 26–34

4 Lendlein A. Fabrication of reprogrammable shape-memory polymer actuators for robotics. Sci Robot, 2018, 3: eaat9090

5 Xiao R, Guo J, Safranski D L, et al. Solvent-driven temperature memory and multiple shape memory effects. Soft Matter, 2015, 11: 3977–3985

6 Wang T J, Li L Y, Wang D, et al. Research status of light-responsive shape memory polymers (in Chinese). New Cheml Mater, 2023, 51: 235–240 [王天娇, 李丽英, 汪东, 等. 光响应形状记忆聚合物的研究进展. 化工新型材料, 2023, 51: 235–240]

7 Dai L, Wang L, Chen B, et al. Shape memory behaviors of 3D printed liquid crystal elastomers. Soft Sci, 2023, 3: 5

8 He Q, Wang Z, Wang Y, et al. Electrospun liquid crystal elastomer microfiber actuator. Sci Robot, 2021, 6: eabi9704

9 Ahn C, Liang X, Cai S. Bioinspired design of light-powered crawling, squeezing, and jumping untethered soft robot. Adv Mater Technol, 2019, 4: 1900185

10 Wang M, Yang J F. Liquid crystal elastomers based soft robots (in Chinese). Prog Chem, 2022, 34: 168–177 [王猛, 杨剑峰. 基于液晶弹性体的软体机器人. 化学进展, 2022, 34: 168–177]

11 Li G, Chen X, Zhou F, et al. Self-powered soft robot in the Mariana Trench. Nature, 2021, 591: 66–71

12 Gupta U, Qin L, Wang Y, et al. Soft robots based on dielectric elastomer actuators: A review. Smart Mater Struct, 2019, 28: 103002

13 Shian S, Bertoldi K, Clarke D. Dielectric elastomer based “grippers” for soft robotics. Adv Mater, 2015, 27: 6814–6819

14 Cao J, Qin L, Liu J, et al. Untethered soft robot capable of stable locomotion using soft electrostatic actuators. Extreme Mech Lett, 2018, 21: 9–16

15 Xiang H B, Li Y, Ba J C, et al. Motion characteristics of magnetic control micro-soft crawling robot (in Chinese). J Mech Eng, 2020, 56: 39–47 [向红标, 李岩, 巴简程, 等. 磁控微型软体爬行机器人运动特性. 机械工程学报, 2020, 56: 39–47]

16 Sun B, Jia R, Yang H, et al. Magnetic arthropod millirobots fabricated by 3D-printed hydrogels. Adv Intell Syst, 2022, 4: 2100139

17 Liu X, Gao M, Chen J, et al. Recent advances in stimuli-responsive shape-morphing hydrogels. Adv Funct Mater, 2022, 32: 2203323

18 Breger J, Yoon C, Xiao R, et al. Self-folding thermo-magnetically responsive soft microgrippers. ACS Appl Mater Interfaces, 2015, 7: 3398–3405

19 Han D, Farino C, Yang C, et al. Soft robotic manipulation and locomotion with a 3D printed electroactive hydrogel. ACS Appl Mater Interfaces, 2018, 10: 17512–17518

20 Liu Y, Gall K, Dunn M L, et al. Thermomechanics of shape memory polymers: Uniaxial experiments and constitutive modeling. Int J Plast, 2006, 22: 279–313

21 Xue Y, Lei J, Liu Z. A thermodynamic constitutive model for shape memory polymers based on phase transition. Polym, 2022, 243: 124623

22 Xiao R, Nguyen T D. Modeling the solvent-induced shape-memory behavior of glassy polymers. Soft Matter, 2013, 9: 9455–9464

23 Brighenti R, McMahan C G, Cosma M P, et al. A micromechanical-based model of stimulus responsive liquid crystal elastomers. Int J Solids Struct, 2021, 219-220: 92–105

24 Li K, Cai S. Modeling of light-driven bending vibration of a liquid crystal elastomer beam. J Appl Mech, 2016, 83: 031009

25 Xu C W, Lin Y, You Y, et al. Analysis on light induced bending behaviour of simple supported liquid crystalline elastomer plate (in Chinese). Chin Quart Mech, 2011, 32: 360–366 [许昌威, 林茵, 尤玥, 等. 四边简支液晶高弹体薄板光致弯曲行为分析. 力学季刊, 2011, 32: 360–366]

26 Suo Z, Zhao X, Greene W H. A nonlinear field theory of deformable dielectrics. J Mech Phys Solids, 2008, 56: 467–486

27 Kang G Z, Chen Y F, Huang W Y. Review on electro-mechanically coupled cyclic deformation and fatigue failure behavior of dielectric elastomers (in Chinese). Adv Mech, 2023, 53: 1–34 [康国政, 陈义甫, 黄伟洋. 介电高弹体的力-电耦合循环变形和疲劳失效行为研究综述. 力学进展, 2023, 53: 1–34]

28 Zhao R, Kim Y, Chester S A, et al. Mechanics of hard-magnetic soft materials. J Mech Phys Solids, 2019, 124: 244–263

29 Cai S, Suo Z. Mechanics and chemical thermodynamics of phase transition in temperature-sensitive hydrogels. J Mech Phys Solids, 2011, 59: 2259–2278

30 Chester S A, Anand L. A thermo-mechanically coupled theory for fluid permeation in elastomeric materials: Application to thermally responsive gels. J Mech Phys Solids, 2011, 59: 1978–2006

31 Narayan S, Anand L. A coupled electro-chemo-mechanical theory for polyelectrolyte gels with application to modeling their chemical stimuli-driven swelling response. J Mech Phys Solids, 2022, 159: 104734

32 Zhao W, Liu L, Lan X, et al. Thermomechanical constitutive models of shape memory polymers and their composites. Appl Mech Rev, 2023, 75: 020802

33 Yin S Y, Xu Y, Cen N, et al. System design and mechanical modeling of soft smart robots (in Chinese). Adv Mech, 2020, 50: 202006 [尹顺禹, 许艺, 岑诺, 等. 软体智能机器人的系统设计与力学建模. 力学进展, 2020, 50: 202006]

34 Lu T, Ma C, Wang T. Mechanics of dielectric elastomer structures: A review. Extreme Mech Lett, 2020, 38: 100752

35 Liu Z, Toh W, Ng T Y. Advances in mechanics of soft materials: A review of large deformation behavior of hydrogels. Int J Appl Mech, 2015, 7: 1530001

36 Yang S, Sharma P. A tutorial on the stability and bifurcation analysis of the electromechanical behaviour of soft materials. Appl Mech Rev, 2023, 75: 044801

37 Chen S, Hu J, Chen S. Studies of the moisture-sensitive shape memory effect of pyridine-containing polyurethanes. Polym Int, 2012, 61: 314–320

38 Lendlein A, Jiang H, Jünger O, et al. Light-induced shape-memory polymers. Nature, 2005, 434: 879–882

39 Li F F, Liu Y J, Leng J S. Progress of shape memory polymers and their composites in aerospace applications (in Chinese). J Astronaut, 2020, 41: 697–706 [李丰丰, 刘彦菊, 冷劲松. 形状记忆聚合物及其复合材料在航天领域的应用进展. 宇航学报, 2020, 41: 697–706]

40 Zhang D, Liu L, Xu P, et al. World's first application of a self-deployable mechanism based on shape memory polymer composites in Mars explorations: Ground-based validation and on-Mars qualification. Smart Mater Struct, 2022, 31: 115008

41 Behl M, Kratz K, Noechel U, et al. Temperature-memory polymer actuators. Proc Natl Acad Sci USA, 2013, 110: 12555–12559

42 Behl M, Kratz K, Zotzmann J, et al. Reversible bidirectional shape-memory polymers. Adv Mater, 2013, 25: 4466–4469

43 Scalet G, Pandini S, Messori M, et al. A one-dimensional phenomenological model for the two-way shape-memory effect in semi-crystalline networks. Polymer, 2018, 158: 130–148

44 Yan C, Yang Q, Li G. A phenomenological constitutive model for semicrystalline two-way shape memory polymers. Int J Mech Sci, 2020, 177: 105552

45 Liu K, Hacker F, Daraio C. Robotic surfaces with reversible, spatiotemporal control for shape morphing and object manipulation. Sci Robot, 2021, 6: eabf5116

46 Wu S, Hong Y, Zhao Y, et al. Caterpillar-inspired soft crawling robot with distributed programmable thermal actuation. Sci Adv, 2023, 9: eadf8014

47 Zhao Y, Hong Y, Qi F, et al. Self-sustained snapping drives autonomous dancing and motion in free-standing wavy rings. Adv Mater, 2023, 35: 2207372

48 Bladon P, Terentjev E M, Warner M. Transitions and instabilities in liquid crystal elastomers. Phys Rev E, 1993, 47: R3838–R3840

49 Jin L, Zeng Z, Huo Y. Thermomechanical modeling of the thermo-order-mechanical coupling behaviors in liquid crystal elastomers. J Mech Phys Solids, 2010, 58: 1907–1927

50 Wang Z, Chehade A, Govindjee S, et al. A nonlinear viscoelasticity theory for nematic liquid crystal elastomers. J Mech Phys Solids, 2022, 163: 104829

51 Zhang Y, Xuan C, Jiang Y, et al. Continuum mechanical modeling of liquid crystal elastomers as dissipative ordered solids. J Mech Phys Solids, 2019, 126: 285–303

52 Lee V, Wihardja A, Bhattacharya K. A macroscopic constitutive relation for isotropic-genesis, polydomain liquid crystal elastomers. J Mech Phys Solids, 2023, 179: 105369, arXiv: 2303.14783

53 Chen Y, Kuenstler A S, Hayward R C, et al. Formation of rolls from liquid crystal elastomer bistrips. Soft Matter, 2022, 18: 4077–4089

54 Li P, Wang Y, Gupta U, et al. Transparent soft robots for effective camouflage. Adv Funct Mater, 2019, 29: 1901908

55 Wang Y, Zhang P, Huang H, et al. Bio-inspired transparent soft jellyfish robot. Soft Robot, 2023, 10: 590–600

56 Borayek R, Zhang P, Willy H, et al. Programmable, UV-printable dielectric elastomers actuate at low voltage without prestretch and supporting frames. ACS Appl Electron Mater, 2020, 2: 4042–4053

57 Shi Y, Askounis E, Plamthottam R, et al. A processable, high-performance dielectric elastomer and multilayering process. Science, 2022, 377:

228–232
58 Zhao X, Suo Z. Method to analyze programmable deformation of dielectric elastomer layers. Appl Phys Lett, 2008, 93: 251902
59 Kofod G, Wirges W, Paajanen M, et al. Energy minimization for self-organized structure formation and actuation. Appl Phys Lett, 2007, 90: 081916
60 Henann D L, Chester S A, Bertoldi K. Modeling of dielectric elastomers: Design of actuators and energy harvesting devices. J Mech Phys Solids, 2013, 61: 2047–2066
61 Park H S, Nguyen T D. Viscoelastic effects on electromechanical instabilities in dielectric elastomers. Soft Matter, 2013, 9: 1031–1042
62 Chen Y, Kang G, Yuan J, et al. An electro-mechanically coupled visco-hyperelastic-plastic constitutive model for cyclic deformation of dielectric elastomers. Mech Mater, 2020, 150: 103575
63 Xiao R. Modeling shape-memory behavior of dielectric elastomers. EPL, 2016, 114: 16002
64 Qiu Y, Zhang E, Plamthottam R, et al. Dielectric elastomer artificial muscle: Materials innovations and device explorations. Acc Chem Res, 2019, 52: 316–325
65 Kim Y, Yuk H, Zhao R, et al. Printing ferromagnetic domains for untethered fast-transforming soft materials. Nature, 2018, 558: 274–279
66 Kim Y, Parada G A, Liu S, et al. Ferromagnetic soft continuum robots. Sci Robot, 2019, 4: eaax7329
67 Wang X, Mao G, Ge J, et al. Untethered and ultrafast soft-bodied robots. Commun Mater, 2020, 1: 67
68 Tang J, Sun B. Reprogrammable shape transformation of magnetic soft robots enabled by magnetothermal effect. Appl Phys Lett, 2022, 120: 244101
69 Saxena P, Hossain M, Steinmann P. Nonlinear magneto-viscoelasticity of transversally isotropic magneto-active polymers. Proc R Soc A, 2014, 470: 20140082
70 Cantera M, Behrooz M, Gibson R, et al. Modeling of magneto-mechanical response of magnetorheological elastomers (MRE) and MRE-based systems: A review. Smart Mater Struct, 2017, 26: 023001
71 Wang L, Kim Y, Guo C F, et al. Hard-magnetic elastica. J Mech Phys Solids, 2020, 142: 104045
72 Wang L, Zheng D, Harker P, et al. Evolutionary design of magnetic soft continuum robots. Proc Natl Acad Sci USA, 2021, 118: e2021922118
73 Liu J, Yang Y, Li M, et al. A meshfree model of hard-magnetic soft materials. Int J Mech Sci, 2023, 258: 108566
74 Yang Y, Li M, Xu F. A 3D hard-magnetic rod model based on co-rotational formulations. Acta Mech Sin, 2022, 38: 222085
75 Moreno-Mateos M A, Hossain M, Steinmann P, et al. Hybrid magnetorheological elastomers enable versatile soft actuators. npj Comput Mater, 2022, 8: 162
76 Yang H, Li C, Yang M, et al. Printing hydrogels and elastomers in arbitrary sequence with strong adhesion. Adv Funct Mater, 2019, 29: 1901721
77 Gao G, Wang Z, Xu D, et al. Snap-buckling motivated controllable jumping of thermo-responsive hydrogel bilayers. ACS Appl Mater Interfaces, 2018, 10: 41724–41731
78 Hong W, Zhao X, Zhou J, et al. A theory of coupled diffusion and large deformation in polymeric gels. J Mech Phys Solids, 2008, 56: 1779–1793
79 Yoon C K, Xiao R, Park J H, et al. Functional stimuli responsive hydrogel devices by self-folding. Smart Mater Struct, 2014, 23: 094008
80 Pantula A, Datta B, Shi Y, et al. Untethered unidirectionally crawling gels driven by asymmetry in contact forces. Sci Robot, 2022, 7: eadd2903
81 Wang Z P, He B, Liu X H, et al. Development of soft manipulator based on ionogel (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 2637–2646 [王志鹏, 何斌, 刘新华, 等. 离子液凝胶软体机器人操作手. 科学通报, 2016, 61: 2637–2646]
82 Stewart E M, Narayan S, Anand L. An electro-chemo-mechanical theory for hydrogel ionotronics: Application to modeling a capacitive strain sensor and a dynamic large strain actuator. J Mech Phys Solids, 2023, 173: 105196
83 Liu Q, Li H, Lam K Y. Development of a multiphysics model to characterize the responsive behavior of magnetic-sensitive hydrogels with finite deformation. J Phys Chem B, 2017, 121: 5633–5646
84 Liu Q, Ye X, Chui E C, et al. Impact of interface stress on responsive deformation of magnetic hydrogel. Int J Mech Sci, 2023, 247: 108151
85 Tang J, Yin Q, Qiao Y, et al. Shape morphing of hydrogels in alternating magnetic field. ACS Appl Mater Interfaces, 2019, 11: 21194–21200
86 Sun Y, Wang L, Zhu Z, et al. A 3D-printed ferromagnetic liquid crystal elastomer with programmed dual-anisotropy and multi-responsiveness. Adv Mater, 2023, 35: 2302824
87 Zhao C, Wang Y, Tang G, et al. Ionic flexible sensors: Mechanisms, materials, structures, and applications. Adv Funct Mater, 2022, 32: 2110417
88 Narayan S, Stewart E M, Anand L. Coupled electro-chemo-elasticity: Application to modeling the actuation response of ionic polymer-metal

composites. J Mech Phys Solids, 2021, 152: 104394

89 Wang Z, Wang Y, Wang Z, et al. 3D printing of electrically responsive PVC gel actuators. ACS Appl Mater Interfaces, 2021, 13: 24164–24172

Multifield coupling constitutive theory of soft materials and its applications in soft robotics

XIAO Rui[1,2*], QIAN Jin[1,2] & QU ShaoXing[1,2]

[1] *Huanjiang Laboratory, Zhuji 311800, China;*
[2] *Key Laboratory of Soft Machines and Smart Devices of Zhejiang Province, Department of Engineering Mechanics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China*
**Corresponding author (email: rxiao@zju.edu.cn)*

Soft active materials exhibit response to external stimuli. The response behaviors are deeply coupled with large deformations, giving rise to challenges in developing constitutive theories. In this paper, we review the recent developments in the characterization and multifield modeling of typical soft active materials, including shape-memory polymers, liquid crystal elastomers, dielectric elastomers, magnetosensitive elastomers, and smart hydrogels. Additionally, we also discuss the current status and limitations of the application of multifield coupling theoretical models to soft robot design, with the objective of offering insights for the future development of smart soft materials and soft robotics.

soft materials, soft robotics, multi-field coupling models

PACS: 46.05.+b, 64.70.Pf, 66.30.Dn

doi: 10.1360/SSPMA-2023-0350