

科学科学是一门科学，它是一门科学，是一门科学，是一门科学

Soft 机器人

自我修复的软气动机器人

Seppie Terryn,^{1,2} Joost Brancart,² Dirk Lefeber,¹ Guy Van Assche,² Bram Vanderborght^{1*}

版权所有©2017 The Authors, 保留部分权利;美国科学促进会独家授权。没有要求原创的美国政府作品

受到许多生物体中发现的顺应性的启发，软体机器人几乎完全由柔性、柔软的材料制成，这使得它们适用于不确定的动态任务环境中的应用，包括安全的人-机器人交互。它们内在的顺应性可以吸收冲击，保护它们免受机械冲击。然而，用于建造它们的软材料非常容易受到损坏，例如在它们工作的不受控制和不可预测的环境中存在的尖锐物体造成的割伤和穿孔。在这项研究中，我们建议完全用自愈弹性体来构建软机器人。基于在自然界中发现的自愈能力，这些聚合物被赋予了修复微观和宏观损伤的能力。Diels-Alder 聚合物作为热可逆共价网络，被用于开发自修复软气动执行器的三种应用(软钳、软手和人造肌肉)。软气动执行器在操作过程中通常会由于压力过大或磨损而出现穿孔和泄漏。所有三个原型都使用有限元建模和机械特性进行了设计。执行器的制造方法利用了材料的自愈行为，可以回收利用。现实的宏观损伤可以通过温和的热处理完全愈合。在疤痕的位置，没有产生薄弱点，愈合后执行器的全部性能几乎完全恢复。

介绍

随着即将到来的新型合成材料以及下一代机器人减轻重量和尺寸的大趋势，软机器人(I-4)这一子领域将机器人的顺应性发挥到了极致。这些软机器人几乎完全由非常柔软、灵活、可变形的材料(5)组成，通常是弹性体聚合物，如 Ecoflex (Smooth-On Inc.)，其模量为 10^5 至 10^6 Pa⁶。使用这些软材料，产生了固有的顺应性，可与天然生物体的生物顺应性相媲美(模量为 10^5 至 10^6 Pa⁹)(2,3)。这种顺应性匹配是在不确定和动态任务环境(包括人类)中安全交互的关键。此外，软机器人可用于穿越崎岖的地形(6,7)或通过微小的横截面进入空间(8)。当与另一个物体接触时，软致动器可以调整其形状，使其成为必须处理软物体(如水果或蔬菜)的抓手的良好候选者(9-13)。

由于其固有的柔软性，软机器人对机械冲击具有弹性(6,14)。然而，柔软是有代价的:执行器容易受到尖锐物体的切割、剪切和穿刺，而且很大一部分软机器人是气动驱动的，因此超压是造成损坏的常见原因。在这项研究中，我们建议通过使用合成自修复(SH)软材料(15)构建软机器人来解决这一弱点，这种材料允许修复微观和宏观损伤。SH 材料是一种相对较新的技术这个术语最早出现在 2001 年(16,17)。此后，依靠不同的物理和化学原理，开发了种类繁多的 SH 材料(18-21)。近年来出现了一些(商业)应用，包括用于汽车和手机外壳的 SH 涂层(22)，可以修复划痕。SH 沥青和 SH 混凝土即将实现商业突破(23)。已经用于 SH 靶材的穿孔/SH 聚合物在航空航天应用方面前景广阔(24)，人造可拉伸 SH 薄膜正在开发中，在人造皮肤应用方面具有很高的潜力(25,26)。然而，迄今为止，SH 材料

技术几乎没有进入机器人领域，在这个领域，SH 只在软件层面为人所知(27)。

从初步研究(15)开始，我们证明了通过热可逆 Diels-Alder (DA)反应交联的 SH 聚合物网络(28)可用于开发软气动执行器，使尖锐物体或过载造成的现实宏观损伤得以愈合。所使用的 DA 聚合物(29)本质上是非自主的 SH 材料，因为需要一个触发器来激活键形成过程的可逆性。宏观损伤可以在几个小时内修复，使用温和的加热作为触发(>70°C)。需要一个触发点，比如加热，会在一定程度上使愈合过程复杂化。然而，它确实提供了对这一过程的改进控制和潜在的无限愈合能力。当然，这些非自主 SH 聚合物可以通过与提供触发的系统(在这种情况下是加热装置)相结合，变成自主 SH 机制。机器人是集成这种 SH 机构的理想演示器，因为它们包含触发系统所需的电源和控制选项。其他 SH 聚合物方法，如光诱导 SH 聚合物(30)和超分子 SH 聚合物(31)，当然也有软机器人的潜力，但这些在这里不会进一步阐述。

在本研究中，我们在软气动机器人的三种应用中介绍了 SH 能力。SH 软手(图 1、A 和 D)是为需要安全人机交互的应用开发的，例如在社交机器人(32)、家用机器人和手部康复设备(33)中。在非预编程的动态环境中活动，它们很可能会遇到尖锐的物体，如金属边缘、破碎的玻璃、锋利的塑料，或者只是一张纸的边缘。原型机的手指(图 1、A 和 D)基于现有的弯曲致动器设计(34,35)，完全由柔性 SH 聚合物制成。其次，使用相同的材料构建了一个 SH 软气动夹持器(图 1B)。由于弯曲致动器的灵活性，该夹持器可以处理各种软物体，而无需进行广泛的控制，并且具有在诸如水果和蔬菜行业的分拣和包装线中使用的潜力(36)。像断裂的小树枝这样尖锐的物体会在分拣时钻进分拣线，损坏夹持器。

¹机器人和多体力学(R&MM)，布鲁塞尔自由大学(VUB)，和弗兰德斯制造，Pleinlaan 2, B-1050 布鲁塞尔，比利时 ²物理化学和聚合物科学(FYSC)，VUB, Pleinlaan 2, B-1050 布鲁塞尔，比利时。

*通讯作者。电子邮件:bram.vanderborght@vub.ac.be

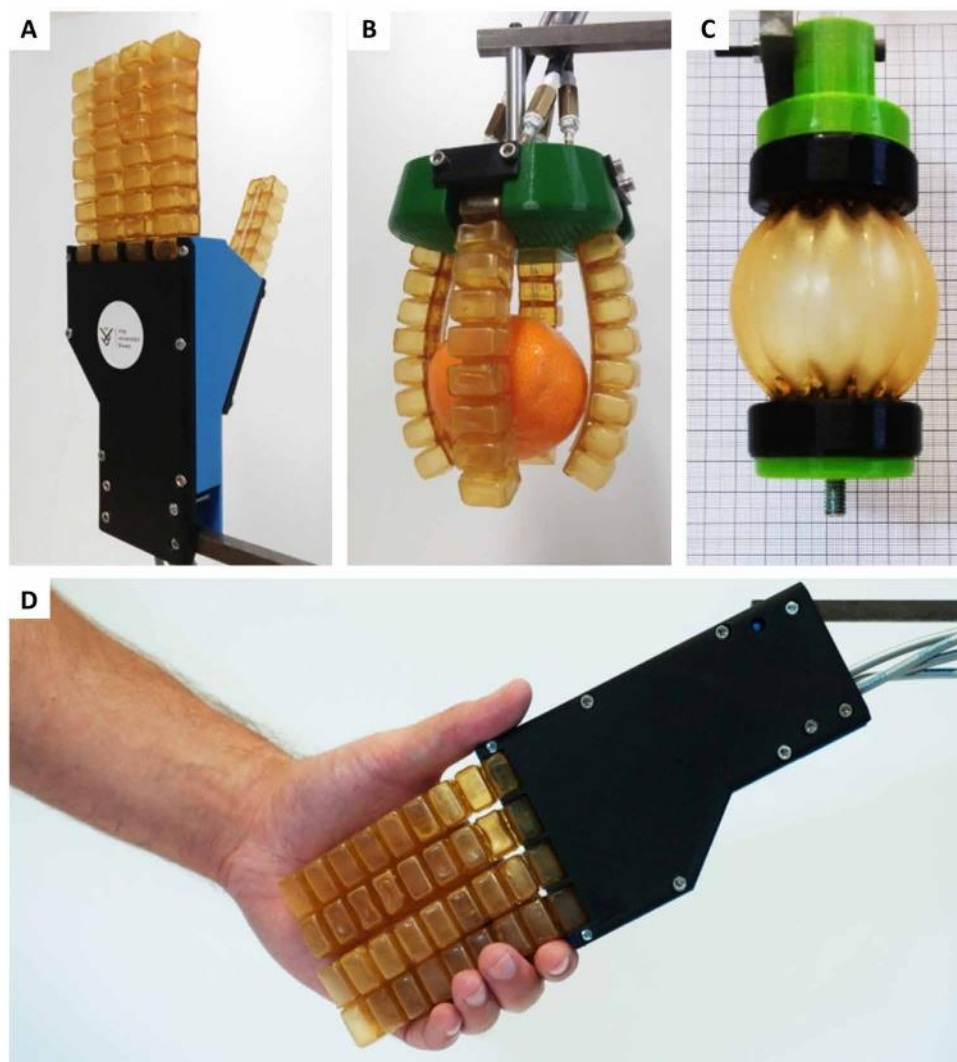


图 1 所示。SH 软气动执行器。(A、D) SH 软气动手。(B) SH 软气动夹持器。(C) sh ppam。

第三种应用是收缩式气动人造肌肉(37)，通常用于对抗装置，以整合机器人系统的顺应性(38)。它们可以在低至中速下产生高水平的力，不需要(重型)齿轮箱。然而，要产生高的力，就需要高的超压，这会导致磨损增加，形成穿孔和泄漏，限制了肌肉的生命周期。为了解决这个问题，我们制造了两个 SH 褶皱气动人造肌肉(PPAMs)(图 1C)(37)。在所有三种应用中，实际损伤可以使用需要温和加热(80° C)的 SH 程序完全愈合。在疤痕的位置不会产生薄弱点，并且在每个愈合周期后执行器的性能几乎完全恢复。

在寻找软机器人的替代制造技术时，作为 DA 聚合物 SH 能力基础的可逆网络形成可能是有益的。DA 组件的两个分离的表面可以愈合在一起，正如用于构建所有原型的“通过折叠和自我修复来塑造”(15)方法所示。这允许将 DA 片材制造成具有更复杂结构的单个 SH 部件：致动器原型。

类型。此外，我们还说明了具有完全不同机械性能的 DA 部件也可以愈合在一起以形成单个部件。由 DA 聚合物制造还有一个额外的优势：SH 部件是可回收的，因此是完全可回收的，这将在本文中得到证明。很快，软机器人将离开实验室，进入工业和我们的日常环境。我们认为，重要的是，这项新兴技术从一开始就具有可持续性。总的来说，使用自修复/可修复聚合物可以为环保软机器人的发展做出贡献。它可以对各种机器人部件的寿命产生有益的影响，并减少它们的过度尺寸(39)，降低它们的生态足迹。此外，一旦机器人达到其使用寿命的终点，其 SH 组件可以完全回收再利用。

本文给出了在 DA 聚合物样品上的愈合实验，来说明和描述 SH 的能力。测量了合成的 DA 聚合物的粘弹性和力学性能，并评估了其在软机器人应用中的潜力。对于每个 SH 致动器应用，使用有限元建模设计原型，并使用利用材料自修复能力的成型方法制造原型。对原型机的机械性能进行了测量，并与文献中的软机器人进行了比较。

它们的愈合能力被评估为对膜的实际损伤

致动器。验证了多次 SH 循环后 SH 聚合物性能的恢复和软致动器的性能。

结果

基于可逆 Diels-Alder 键的自我修复

软致动器的自愈能力基于二烯(呋喃)和亲二烯(马来酰亚胺)(图 2A)(29)之间的 DA 反应，它们在聚合物网络中形成热可逆交联(图 2B)。放热 DA 反应是一种平衡反应，其反应的平衡程度是温度的温和函数。SH 过程可分为五个阶段(如图 3 所示)，以及不同阶段 DA 聚合物样品的显微图像(电影 S1)。(i)损伤：首先，聚合物被损坏，例如，用尖锐物体切割或通过施加过大的超压穿孔。在受损的位置，DA 键会机械断裂，因为这是网络中最薄弱的部分。(ii)加热：通过热刺激的方式激活愈合合作用(对于我们的系统来说，80° C 就足够了)。通过增加温度，

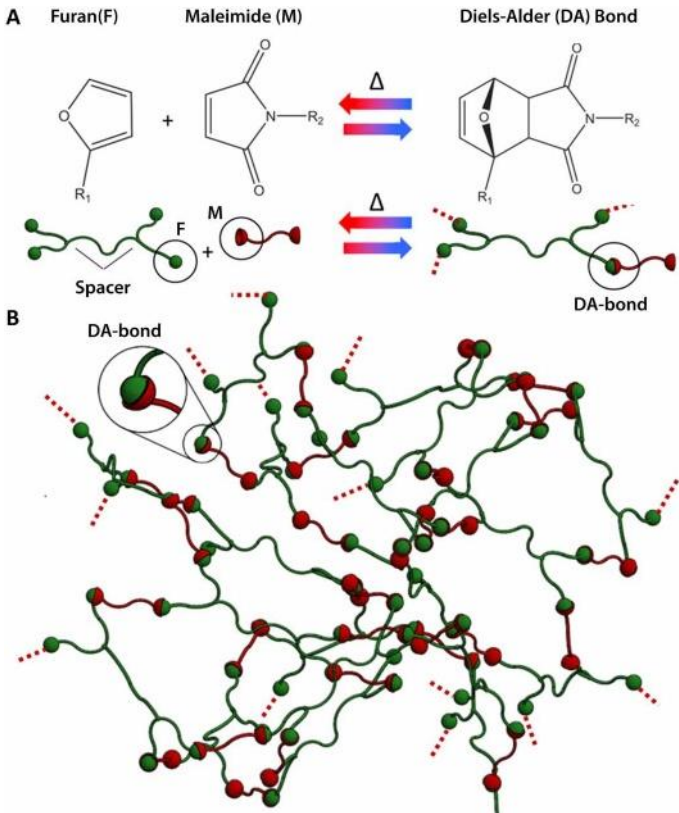


图 2所示。DA 交联形成的热可逆网络。(A)平衡 DA 反应:在低温下, 由于向 DA 键的高转化率而形成网络。在高温下, 这些 DA 键断裂, 聚合物链的迁移率增加。(B)可逆 DA 键交联形成的热可逆弹性体网络。

平衡从形成 DA 键的主要部分转向这些键的断裂和呋喃和马来酰亚胺官能团的形成。因此, 网络中聚合物链的迁移率将会提高。(iii)等温阶段:保持在这些温度下, 随着反应进展到新的平衡, 将通过破坏交联进一步提高迁移率, 直到聚合物具有足够的迁移率和足够的时间来密封间隙/切割(通常为 20 至 40 分钟)。(iv)可控冷却:当损坏处被密封后, 温度可以降低。冷却后, 平衡的转移被逆转, 导致网络中的交联逐渐重整(图 2B), 这是恢复这些 DA 聚合物性能的基础。在低冷却梯度下进行这一过程很重要, 因为这增强了初始机械性能的恢复, 并减少了 SH 过程的总持续时间。(v)环境温度下的恢复:在室温下, 初始机械性能必须完全恢复。缓慢冷却, 然后在环境温度下等待足够长的时间, 在减速动力学和形成键的不断加热的热力学驱动力之间提供了一个很好的折衷。根据模拟, 使用 2 K min^{-1} 的冷却速率, 这最后一步大约需要 22 小时(图 S3)。愈合的完整温度分布可以在图 S4 中找到。

表 1. 使用不同的 Jeffamine/ x 间隔剂合成的 DA 材料的热性能和力学性能。

Properties		J4000	J2000	J400
Glass (g) and gel transition temperatures				
DMA: Tg	°C	-48.5 ± 0.4	-43.6 ± 2.4	74.7 ± 1.7
Rheology: Tgel	°C	98 ± 1	119 ± 1	
DMA properties: 25°C, 1 Hz, 0.5 % (J4000), 0.5% (J2000), 0.1% (J400)				
Storage modulus	MPa	12.9 ± 1.3	107.4 ± 26.0	1602.5 ± 431.5
Loss modulus	MPa	1.79 ± 0.14	19.3 ± 2.9	79.6 ± 21.7
Tan(δ)		0.139 ± 0.004	0.183 ± 0.021	0.055 ± 0.026
Stress strain curve: 25°C, 65 %/min (J4000 and J2000) 0.1 %/min (J400)				
Fracture strain	%	356 ± 19	353 ± 31	1.58 ± 0.07
Fracture stress	MPa	1.88 ± 0,07	6.85 ± 0.29	20.9 ± 1.8
Young modulus	MPa	5.0 ± 0.1	66.3 ± 5.5	1755 ± 78
Density	g/ml	1.05 ± 0.03	1.13 ± 0.02	1.19 ± 0.01

Diels-Alder 材料的热性能和机械性能在环境温度下和愈合过程中的机械性能可以在 DA 聚合物的合成过程中调整(图 S1)。在这项工作中, 用于合成呋喃功能化构建块(图 2A)的 Jeffamine 间隔物的长度是不同的 (15,29,40)。对于较短的间隔剂长度(400 g mol^{-1}), 产生具有较高交联密度的聚合物网络(J400)(图 2B), 从而产生具有 1.6 GPa 存储模量和仅 1.6%断裂应变的玻璃状材料。当间隔剂长度较长(2000 g mol^{-1} 和 4000 g mol^{-1})时, 分别得到基于 J2000 和 J4000 的聚合物网络。J4000 的结果是该系列中最灵活的材料, 其存储模量为 13 MPa, 断裂应变为 360%。表 1 总结了三种基本 DA 聚合物的热性能和力学性能(实验结果见图)。S5 至 S8)。对于提供 SD 的性质, 测量了四个样品。在合成过程中可以产生许多其他变化。通过结合不同链长的 Jeffamines, 可以合成最灵活的 J4000 网络和最脆的 J400 网络之间的整个机械性能范围。这样就可以对 DA 聚合物进行调整, 以适应不同的机器人应用。在之前的工作中, 基于 J400 的脆性热固性材料被用于构建可以保护机器人执行器的自修复机械保险丝(39)。柔性的 J4000 弹性体在本文中被用于构建软机器人(图 1)。

弯曲式软气动执行器的设计

为了展示 DA 聚合物在现有软机器人中的潜力, 我们决定构建一个 pneunet 致动器(41)。它们由一系列由弹性体构成的通道和腔室组成, 弹性体通常是一种超弹性材料, 如 Ecoflex 0030(杨氏模量为 67 kPa)。当这些腔室被加压时, 它们就会膨胀, 并产生运动。使用不同的 pneunet 设计(7,8,34,41)创建各种运动, 但主要用于软夹持器/手应用(36)的是弯曲软气动执行器(BSPA)(35,42)。在这些应用中, 超柔性的 BSPA 很容易被各种尖锐物体损坏, 这使得它成为在软气动机器人中引入 SH DA 弹性体的理想演示。BSPA 原型几乎完全由 DA 聚合物设计和构建(图 4、A 和 B, 以及图 S10)。

BSPA 致动器是一个长方体, 其中嵌入了一系列 9 个可充气的空气室(细胞)。底层集成了一根柔性管, 将所有 9 个单元连接在一起

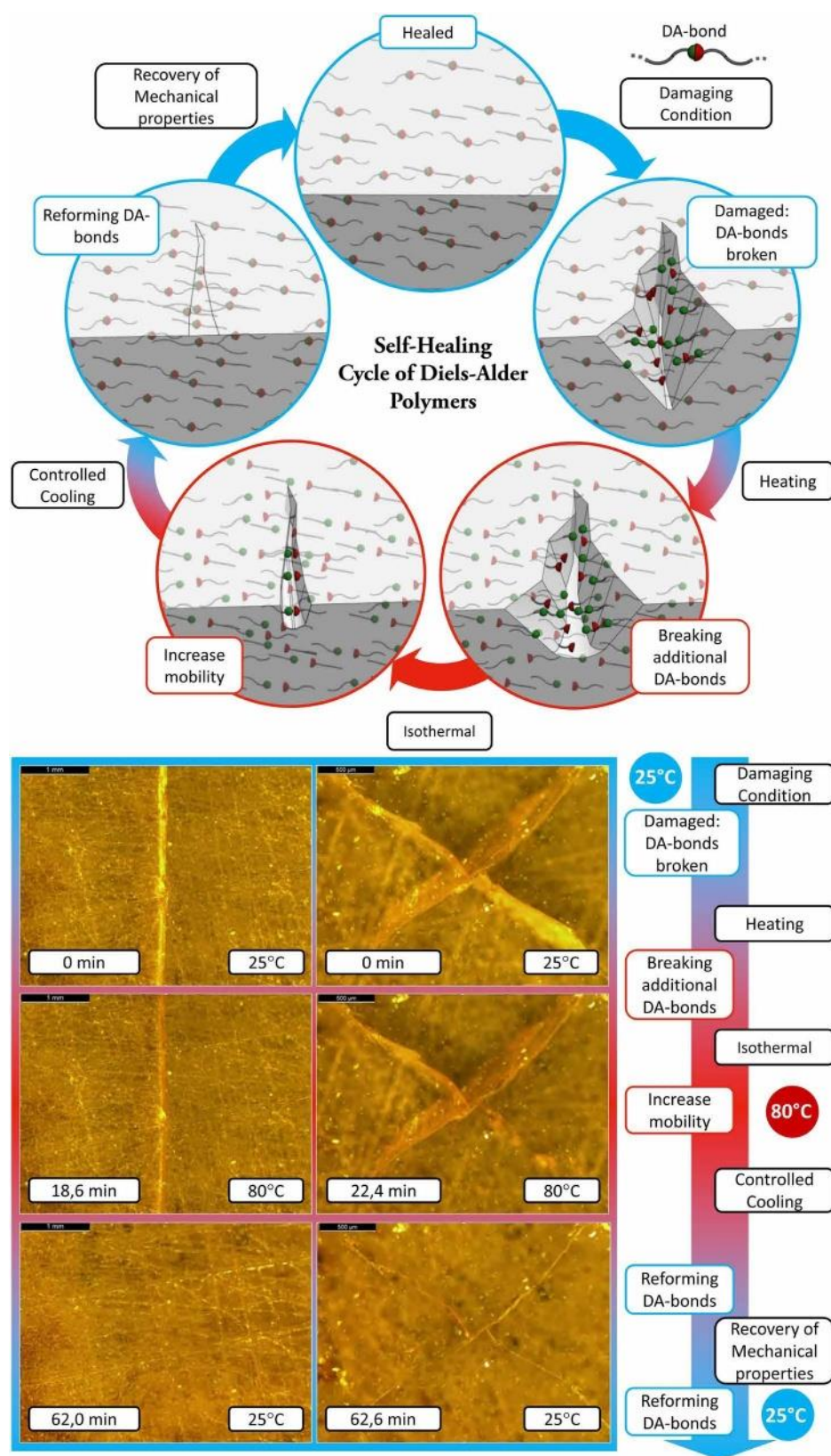


图 3所示。DA 聚合物的 SH 循环示意图。SH 过程包含五个步骤:破坏、加热步骤、等温步骤、控制冷却和室温下的回收。图片展示了受损的 DA 聚合物样品(DPBM-FGE-J4000)在不同阶段的自我修复过程(影片 S1)。

压力源, 这样所有的都可以同时加压。整个致动器是由最灵活的自愈性 DA 聚合物, 1,1'-(亚甲基-二-1,4-苯基)双马来酰亚胺 (DPBM)-糠醛缩水甘油醚(FGE)-j4000 构成的, 除了由 Tygon R3603 制成的柔性管。连接所有腔室并包含柔性管的底层更厚, 允许的平面应变非常小。因此, 空气室的加压在顶部和侧面表面产生膨胀, 而底部表面的应变基本保持为零。当膨胀的细胞外壁开始接触时, 产生弯曲运动(图 4,a 和 B), 其中执行器两端之间的距离随着曲率的增加而减小。同样的原理也导致了致动器的发展, 这些致动器对压力的反应是各种各样的运动:弯曲、伸展、收缩、扭曲等。

通过使用 Abaqus 中的静态弹性模型模拟大变形, 对设计进行了微调(图 4C、图 S9 和影片 S2)。使用 DA 材料(基于 j4000, 5.0 MPa)和柔性管(1.1 MPa)的杨氏模量对弹性变形响应进行建模。由于相对较小的应变(小于 30%)和有限的加压时间(通常为几分钟), 因此无需考虑聚合物的粘弹性响应效应。考虑了重力(密度:J4000, 1.05 g/ml 和 tube, 1.00 g/ml)。数值模拟表明, 在保持足够刚性的底板的同时, 略微降低细胞的壁厚会导致 BSPA 的曲率增加。为了在实践中评估这一点, bspa 的壁厚分别为 0.75 (BSPAs 1 和 2)和 0.60 mm (BSPAs 3 和 4)(图 S10)。

利用自愈能力塑造软机器人 DA 聚合物的 SH 能力可以为(自愈)软机器人的制造提供巨大的好处。我们开发了一种塑形方法, 通过结合折叠和愈合步骤, 从 2D 的 SH 聚合物片开始生产三维(3D)多边形结构。我们将这一过程命名为“通过折叠和自愈成形”(15), 该过程被用于制造所有 SH 原型(图 1), 并将通过 BSPA 的成形过程进行说明(图 4E)。总的来说, 需要四个修复步骤来开发原型。

构建块合成后,将DA材料溶剂铸造成薄片(图2)。S1和S12)。为了构建SPA的细胞,我们从基于j4000的薄片上切下一个加号。加号形状的几何形状被折叠成一个开放的矩形长方体形状。利用SH能力,将长方体在烤箱中进行热处理(78°C 下加热2小时,在 $\pm 0.5\text{ K min}^{-1}$ 下冷却),将长方体的侧面密封并密封。通过使用j4000基薄板上稍大的方形来封闭盒子,形成单个电池。通过将接头局部加热到 110°C ,仅持续几秒钟(使用焊接工具),电池就会变得气密。为了完成致动器,将九个电池串联放置,并使用第三种SH程序(在 78°C 下30分钟,在 $\pm 0.5\text{ K min}^{-1}$ 下冷却)将其固定在含有柔性管的底部J4000基板上。使用额外的局部加热来确保底部两侧完全密封。

由于不同的DA聚合物的热可逆性源于相同的可逆DA交联,因此具有完全不同机械性能的聚合物可以融合在一起形成a

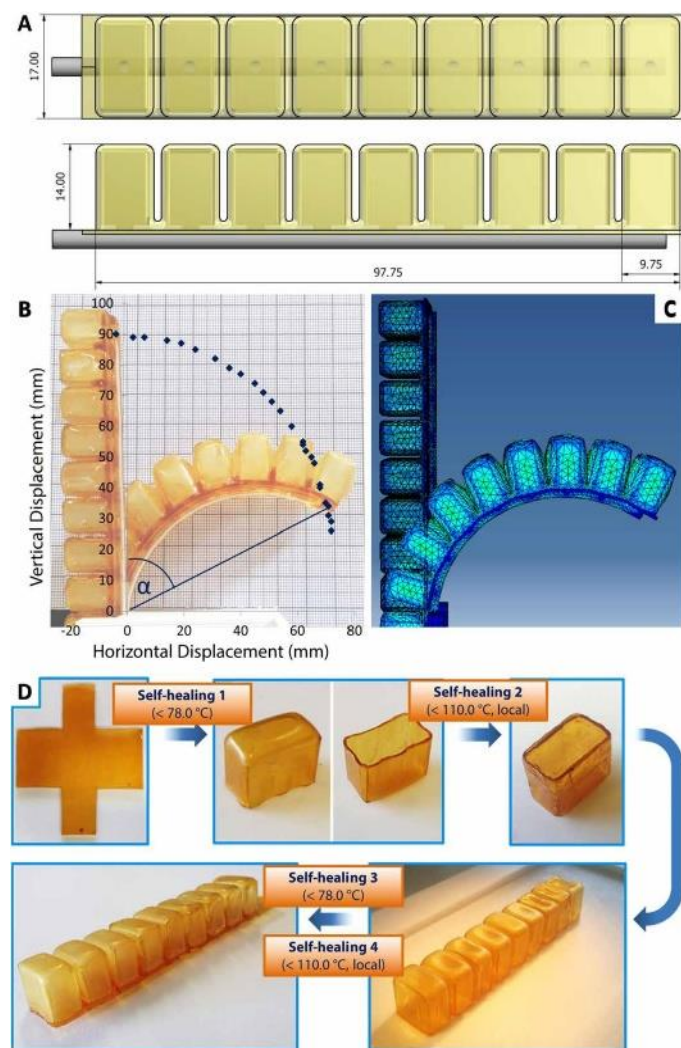


图4所示。SH BSPA的设计与制造。(A)尺寸(以毫米为单位)(详细数据表见图S10)。(B)气室中由超压引起的弯曲运动示意图。(C)30 kPa下变形的Abaqus模拟(图S9和电影S2)。(D)构建BSPA:通过折叠和自修复程序(全局 $<78^{\circ}\text{C}$,局部 $<110^{\circ}\text{C}$),在不同部件之间建立连接,并且执行器是气密的(图S12)。

单个部分,利用它们的SH能力,而连接变得和材料本身一样牢固。图5显示了在愈合过程中融合在一起的基于j4000和基于j2000的薄片边缘的光学显微镜图像(电影S3)。两片薄片顶部的初始间隙(0.3 mm)被完全密封。两边的表面也被磨平了,因为微观的划痕也被愈合了。结合不同的DA聚合物是完全可行的,这一事实极大地增加了软机器人在设计阶段的自由度,因为可以创建单个部件,由具有不同性能的材料组成。

软气动执行器的机械性能

使用包含压力控制系统的专用测试装置构建了四个BSPA原型并进行了表征(图2)。S14和S15)。四种bspa的特性可以在图6(A至C)中找到。SPAs 1和2以及SPAs 3和4之间的行为变化是由于细胞薄片厚度的差异,分别为0.75和0.60 mm(图S10)。致动器的变形为

用数码相机捕捉到的各种超压(图4B)。四个弯曲致动器遵循几乎相同的曲率轨迹(图6A),这对于需要良好控制运动的软手和软抓取器应用是必要的。

图4B中定义的弯曲角 α 作为图6B中气室超压的函数表示。BSPAs 1和2具有

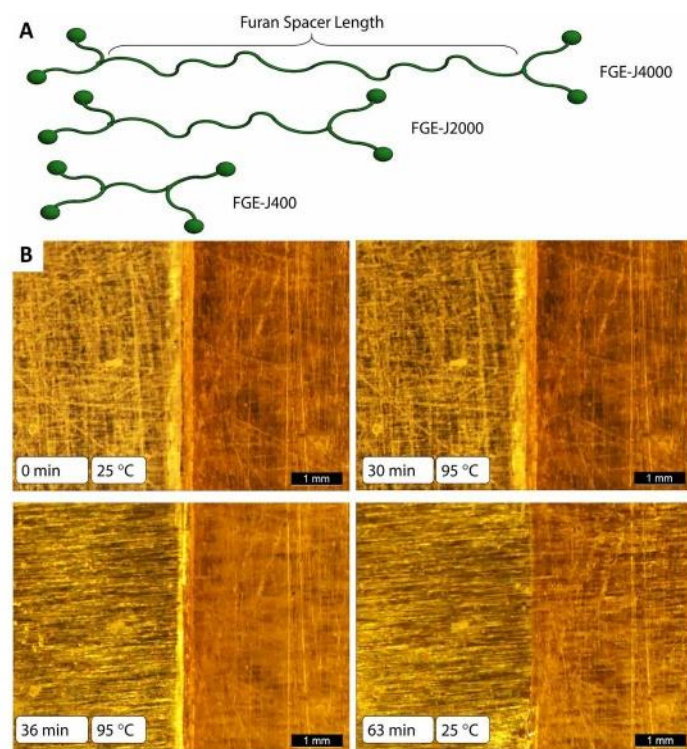


图5所示。机械性能完全不同的DA片材可以无缝地愈合在一起。(A)使用不同的Jeffamines (J400, J2000和J4000),可以合成具有不同间隔长度的呋喃功能化构建块(FGE-Jx)。(B)由于J4000和J2000 DA聚合物仅在呋喃间隔剂长度上有所不同,因此材料可以使用最高温度为 95°C 的SH程序(电影S3)自愈合在一起。片材之间的初始间隙为0.3 mm。



图 6 所示。四种 bspa 的机械特性及其在软爪和软手中的功能。实验测量结果与在 Abaqus 中使用静态弹性模型进行的数值模拟结果进行了比较。(A)不同超压下致动器尖端的垂直和水平位移。(B)作为超压函数的弯曲角。(C)BSPA 尖端施加的力。(D)在一个柔软的气动夹具中操作四个 bspa。执行器中的超压可以单独调节。这样就可以同时用每个致动器对物体施加相同的力,从而产生平滑、可控的抓取运动。柔软物体,比如一个橙子(92.8 g),可以被抓住、拿起和移动(电影 S4)。(E)四个 bspa 也被集成为一个柔软的气动手的手指,连同一个充当拇指的六单元原型。所有的执行器都是单独控制的(电影 S5)。

这表明, 通过折叠和自我修复进行塑形, 可以以可靠的方式生产弯曲致动器。对于 25.0 kPa 左右的超压, 可以实现高达 70° 的弯曲角度, 并且减少壁厚会导致更灵活, 更柔软的执行器。在不同的超压下, 测量了弯曲致动器尖端对表面施加的力(图 6C)。在 25.0 kPa 时, 记录了约 0.25 和 0.32 N 的力。材料的低模量(5.0 MPa)是握把柔软的主要因素。为了验证 Abaqus 中的静态弹性有限元模型(fem)(图 S9)和聚合物

表征, 我们模拟了 BSPA 的变形和力作为不同超压的函数, 并将其与实验结果进行了比较(图 6,A 至 C)。对于两种 BSPA 设计, 实验结果与模拟结果非常吻合。

SH 软气动执行器在应用中

为了验证 **sh - bs**pa 的功能，我们在夹持器应用中使用了四个(图 1B)，在柔软的手上使用了五个(图 1A 和 D)。为了控制这两个应用中的执行器运动，我们建立了一个设置，其中

5个超压可以使用5个控制系统单独调节(图2)。S14和S15)。软气动夹具是通过将四个弯曲致动器放置在3D打印部件中开发的(图6D)。构建的夹持器进行了夹持不同软物品的测试,包括橘子、橡皮鸭和圣女果(图6D)。使用控制装置,执行器中的超压可以单独调节,这样四个执行器对软物体施加的力在任何时候几乎都是相同的。一个平滑的,可控的抓取运动,允许捡起不同的软物体,如重92.8克的橘子(电影S4)所示。这些测试表明,sh-bspa,更具体地说,使用的DA弹性体具有足够的灵活性和机械稳定性,可用于软夹持器应用。

在另一种应用中, 将四个 9 单元的 *bspa* 与一个 6 单元的原型放在一起, 作为一个拇指, 在 3D 打印部件上形成一个柔软的气动手 (图 6E 和电影 S5)。由于执行器可以单独控制, 因此社交机器人可以使用柔软的手来做出手势和抓取柔软的物体。软致动器将确保在动态任务环境中安全的人机交互。本文进一步验证了 *BSPA* 的 *SH* 能力。

气动人造肌肉的设计

不同类型的气动人造肌肉已经被开发出来,其中最著名的是 McKibben 肌肉(43)。它包含一层弹性内膜,通过膜的弹性应变,在充气时会膨胀,而编织套管则传递张力。膜的膨胀和收缩表现出滞后性,从而导致效率的降低。为了寻求更高的效率,我们开发了 PPAMs(37,44),其工作原理与 McKibben 肌(43)等其他组织不同。PPAM 的膜具有折叠结构。在褶皱之间,排列着传递张力的电缆。当受到压力时,肌肉会随着褶皱的展开而扩张和收缩。因为 PPAMs 中的弹性变形是有限的,所以提高了它们的效率。

由于气动肌肉通常由柔性膜构成,磨损、穿刺或超压都会损伤肌肉并产生泄漏。在这项研究中,我们通过使用柔性 DA 聚合物构建 PPAM 膜来开发自我修复肌肉,这样可以使用温和的热处理来修复损伤。两个原型(图 7A 和电影 S6), PPAM 1 和 PPAM 2,在 DPBM-FGE-J4000 中进行了阐述,并且在褶皱的深度上有所不同。膜的厚度为 0.75 mm;PPAM 1 和 PPAM 2 的长度(不包括管件)分别为 55 和 65 mm;肌肉的宽度为 36 和 33 毫米(具体尺寸见图 S11)。为了传递张力,我们在褶皱之间放置了尼龙电缆。所使用的制造过程再次基于通过折叠和自修复技术进行塑形(图 S13)。

对于这两种设计, 通过 Abaqus 中的静态弹性模型模拟肌肉过压引起的变形(图 7A, 图 S9 和电影 S2)。至于 BSPA, 模拟仅限于弹性变形响应, 使用基于 j4000 的 DA 聚合物(5.0 MPa)和尼龙电缆(100 MPa)的杨氏模量进行建模。考虑了重力(密度:J4000, 1.05 g/ml, 尼龙电缆, 1.15 g/ml)。使用数码相机捕捉了施加超压导致膜展开的过程(图 7A 和电影 S6)。

气动人造肌肉的机械性能 肌肉中的压力通过为软爪和软手开发的控制系统进行调节(图 7)。S14和 S15)。

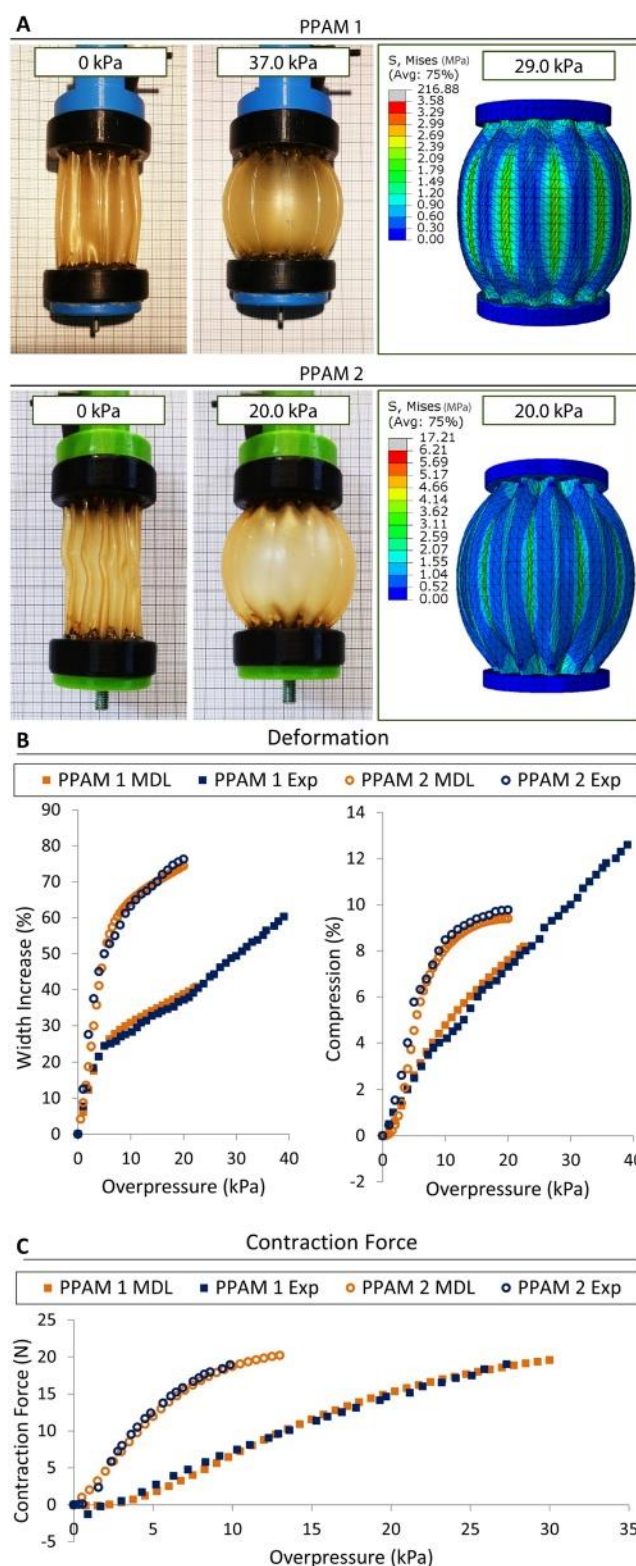


图 7 所示。两种 PPAM 设计的实验变形和收缩力。(A) PPAM 在环境压力和接近最大超压测试下的形状(电影 S6)。实验(Exp)与在 Abaqus 中使用静态弹性模型(MDL)进行数值模拟的结果(电影 S2)进行了比较。(B)相对宽度的增加和收缩作为超压的函数。(C)收缩力作为超压的函数。

测量了膜的相对宽度的增加和肌肉的相对收缩作为超压的函数。变形响应由两个阶段组成。即使在低压下,膜也开始展开,肌肉的宽度和收缩量迅速增加。在更高的压力下,膜完全展开,通过膜的弹性拉伸,宽度缓慢增加,收缩增大。由于 PPAM 2 的褶皱深度更大,因此对于类似的超压,第一阶段会导致更大的变形。PPAM 1 在非常低的压力下产生的小而负的力是由于尼龙电缆没有完全拧紧,这个问题将在第一个愈合周期后得到解决。

收缩力使用称重传感器(Futek LSB200, 15 lb)测量, 如图 7C 所示为超压的函数。当压力低至 10.0 kPa 时, 可记录到高达 20 牛的力。与其他气动肌肉(如 McKibben)相比, PPAM 的另一个优点是, 响应不显示功能所需的阈值压力(37,44,45)。这使得它们对低压应用具有吸引力。至于 bspa, 使用静态弹性 Abaqus 模型模拟了 PPAM 设计的变形和(收缩)力(图 7B)。同样, 实验结果与两种设计的模拟结果相吻合。两种原型 PPAMs 的操作特性表明, DA 柔性自修复聚合物可用于开发具有足够低压应用性能的工作气动肌肉。

致动器的自修复

软抓取器、软手和两个肌肉原型表明, 柔性 DA 聚合物具有适合软机器人的机械性能(表 1)。为了评估 SH 能力, 我们使用厚度为 0.39 mm 的手术刀刀片在致动器的柔软部分进行了切割(图 8.a 和 B)。在致动器在非预编程的动态环境中的未来应用中, 它们在加压时更容易损坏。这种情况不仅适用于由于高超压或磨损而造成的穿刺和穿孔, 也适用于尖锐物品造成的损坏。充气后, 尖头物体可以更容易地刺穿薄膜。因此, 所有的切割都是在执行器充气时进行的。当执行器充气并发生切割或穿孔时, 它会放气, 压力会下降。这样, 通过检查控制某一位置所需的压力, 就可以监测执行器的健康状况。如果损坏是有限的, 那么 bspa 和 PPAMs 在被刺穿后, 在一定程度上还会继续工作, 使它们在使用中更加坚固。然而, 致动器产生的变形和(收缩)力取决于压力。由于泄漏, 最大压力会降低, 从而降低变形、受力和收缩性能。将消耗更多的空气质量来补偿泄漏, 从而增加能量消耗, 从而降低机器人的效率。此外, 压力的积累会变慢, 动态性能也会降低。因此, 自愈能力是恢复性能的重要特征。

由于非自主愈合过程需要加热，因此可以在期望的时间进行。例如，损坏的致动器可以在有限的时间内以较低的效率仍然处于活动状态，之后可以在设置离线时(例如在夜间)进行修复。为了启动修复过程，可以通过控制系统将超压降低到零，并且执行器可以完全放气。在非充气状态下，软气动致动器具有

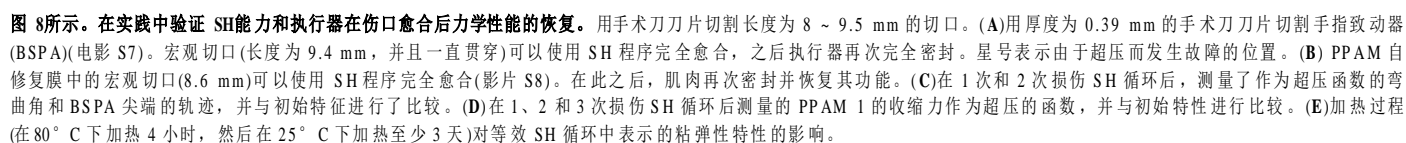
自密封能力:形成的切割或断裂表面将自然地再次压在一起,为愈合过程提供接触。只要骨折面重新接触,愈合是可能的;然而,如果材料缺失,这可能不再可行。

为了确认柔软气动手指的 SH 能力, 我们使用手术刀刀片在膨胀的细胞壁上进行了 8 至 9.5 毫米长的切割(图 8A 和电影 S7)。施加损伤后, 将致动器放气, 并自动密封宏观切口。随后, 致动器在烤箱中进行加热程序(最高温度 80°C; 详细温度分布见图 S4)。经过 SH 处理后, 损伤完全愈合, 执行器再次密封。这次事件唯一留下的是细胞壁表面由于断裂表面的微观错位而留下的小疤痕。两个 PPAM 原型也遵循了类似的程序。同样, 用手术刀刀片在软膜上切割 8 至 9.5 毫米(图 8B 和电影 S8)。这些伤口可以通过将肌肉放入烤箱来愈合, 烤箱遵循相同的温度曲线(图 S4)。至于 bspa, 所有的伤口都可以完全愈合, 只留下小的表面疤痕。

除了密封损伤外,重要的是在愈合过程后恢复执行器的机械性能。BSPA 3 通过用手术刀刀片切割尖端细胞而反复受损(如图 8A;切口长度从 8 到 9.5 毫米不等),并使用上述程序愈合(图 S4)。在每次损伤愈合过程之后,通过测量作为细胞中超压的函数的弯曲变形,再次对致动器进行表征。这种损伤-愈合-测量循环重复两次。图 8C 绘制了愈合前、一次 SH 循环后和两次 SH 循环后超压的弯曲角函数。我们注意到,使用加热程序反复修复损伤不会影响致动器的轨迹:结果非常相似,并且,考虑到致动器在测试设置中的位置变化最小,可以得出结论,每次 SH 循环后,弯曲致动器的机械性能都得到了恢复。

在第一个损伤-愈合-测量循环之后, 通过逐渐增加超压, BSPA 3 被推到了极限。致动器在 24.2 kPa 处失效, 但在疤痕位置没有失效。其中一个细胞的侧面出现穿孔(在图 8A 中用星号表示)。此外, 使用 SH 程序密封和密封该穿孔。在第二次损伤-愈合-测量循环后加压直至失效 BSPA 在 25.0 kPa 时失效, 在第三个位置, 在另一个单元的一侧。从这些测试中, 我们得出结论, 在疤痕和愈合穿孔的位置没有产生薄弱点

为了验证自愈人工肌肉性能的恢复,我们用手术刀刀片(图 8B)在膜上一路切割,反复损伤 PPAM 1(图 8B),总共愈合了三次。在每次愈合过程之后,将等距收缩力作为肌肉中超压的函数进行测量(图 8D),并与未受损 PPAM 的表征曲线进行比较。在第一个损伤-愈合周期后,表征曲线略微向下移动。这是由于膜的轻微变形,因为肌肉是水平制造的,但在烤箱中垂直愈合。因为这是垂直完成的,尼龙电缆被收紧,这可以在没有负阈值压力的情况下看到,如初始曲线所示。在第一次、第二次和第三次循环之间,曲线上只有轻微的变化。由于下一节将解释的材料属性的微小变化,曲线会随着每个伤害-治疗周期略微向上移动。



自我修复的效率

考察了加热工艺对 DA 聚合物力学性能和重复回收率的影响。为此，为两个不同批次的 J4000 基 DA 聚合物制备了 6 个系列，每 4 个样品。除参考系列外，所有样品都进行了加热程序(在 80° C 下加热 4 小时，然后在 25° C 下加热至少 3 天)，这可以认为相当于基于等温步骤(图 3)的 6 个 SH 程序，持续时间为 40 分钟(图 S4)。对于一个系列，该加热程序执行一次，下一个两次，第三个三次，等等，给出等效的 0.6,12,18,24 和 30 个 SH 循环。对于每个系列，使用动态力学分析(DMA)来测量存储模量，损耗模量， $\tan(\delta)$ 和玻璃化转变温度(图 8E)。

在 80° C 下每 4 小时，相当于 6 个 SH 循环，存储模量、损耗模量和 $\tan(\delta)$ 降低一点，而玻璃化转变温度大致保持不变(图 8E)。第 1 批和第 2 批结果的相似性表明了所观察到的降低趋势的可重复性。小的下降可能表明交联密度的有限下降是由于网络中通过两个副反应形成不可逆键造成的:Michael 将胺杂质添加到马来酰亚胺基团和双马来酰亚胺的均聚，两者都发生在较高的温度下(图 S16)。这些副反应意味着一些咪唑官能团不能再形成 DA 键，导致愈合后交联密度和模量逐渐降低。在一个 4 小时的加热循环中，恢复效率的定义为 $(E'_{\text{initial}} - E'_{\text{xsh 循环}})/(E'_{\text{initial}})$ ，平均为 93.4%(图 8E)。将其投射到 1 小时的 SH 循环上，可达到 98 - 99% 的高回收率。柔韧性的小幅增加导致 PPAM 执行器在第二次和第三次 SH 循环中观察到的收缩力小幅增加(图 8E)。我们认为 Michael 加成的影响最大，因为与均聚反应相比，该反应发生在较低的温度下。通过使用纯度更高的双马来酰亚胺，避免未反应胺的存在，减少 Michael 加成，可以提高回收效率。

自愈材料的回收利用

为了说明 DA 聚合物的可回收性，我们将可用于 BSPA 的细胞(如图 4D 所示)切割成块，随后将其溶解在 CHCl_3 中(图 S17)。膨胀和进一步稀释会降低 DA 加合物的浓度，逐渐将平衡转移到未结合状态。为了加速溶解步骤，我们将温度提高到 65° C。得到的溶液可以再次用溶剂铸造成薄片。与 SH 过程类似，回收过程包括溶剂铸造过程中的加热步骤。因此，与初始性能($E' = 12.9 \text{ MPa}$)相比，显示存储模量($E' = 10.5 \text{ MPa}$)略有下降，导致回收率达到 81%(更多细节见图 S18)。如果以更高的纯度使用双马来酰亚胺，则可以降低这种性能变化。回收的薄片(图 S17)被用来制造六单元 BSPA 的部分部件，即柔软的手的拇指。这证明了 SH 软机器人零件是可以回收利用的。

讨论

柔性材料在机器人技术中的应用开辟了新的机遇:软机器人可以在不确定的动态环境中执行任务，而不需要广泛的控制系统。它们固有的柔软性使它们非常适合与包括人在内的周围环境进行安全互动。然而，柔软和灵活也意味着

在这些机器人将发挥作用的不确定环境中，对各种尖锐物体和边缘的脆弱性增加，事实上，这对软体生物也是有效的。然而，如果生物体的损伤是有限的，并且给予一定的时间，它们可以从损伤中恢复过来。这项工作已经成功地在软机器人中引入了类似的愈合能力，更具体地说，是在软气动执行器中。合成了由热可逆性共价网络组成的柔性 SH DA 聚合物，并用于制造三种不同的自修复软机器人应用的原型:软抓取器、软手和人造肌肉。

这些 DA 聚合物的愈合作用可以通过温和的热刺激来激活。DA 片材中的宏观损伤，例如用手术刀刀片一路切割出毫米长的切口，可以通过将零件加热到 80° C 40 分钟，然后慢慢冷却到 25° C (-2 K min^{-1})来成功愈合。在 25° C 下加热 24 小时后，其初始性能几乎完全恢复。在合成阶段，可以对机械性能进行调整，以适应不同机器人应用所需的各种性能。在这项工作中，合成了一系列在间隔长度和由此产生的机械性能上不同的三种聚合物。然而，许多其他的变化是可行的。由于它们的 SH 能力是基于其网络结构中相同的可逆 DA 交联，因此具有完全不同机械性能的片材或部件可以无缝地愈合在一起，这在软机器人制造过程中是有益的。柔性 DA 聚合物的机械特性显示出足以用于软机器人应用的性能。

DA 系列中最灵活的聚合物 DPBM-FGE-J4000 已用于我们目前的 SH 软机器人应用。对于所有三种软气动系统-软夹具，软手和人造肌肉-设计是通过在 Abaqus 中使用静态弹性 FEM 模拟大变形来支持的。为了构建原型，我们开发了一种涉及折叠和自修复的制造工艺，该工艺利用了 DA 聚合物的 SH 能力。首先将柔性 DA 片材折叠成 3D 多边形结构。通过对零件进行温和的加热程序(全局 $<80^\circ \text{C}$ ，局部 $<110^\circ \text{C}$)，可以使折痕成为永久性的，并且接头密封。使用这种技术，软致动器，如柔软的手的手指，可以作为一个单一的部分，几乎完全由 SH 材料制成。

使用包含压力调节系统、数码相机以及力和压力传感器的专用测试台，对 SH 原型的性能进行了实验验证。测量的性能、变形和由加压膜产生的力足以用于软机器人应用，并与 FEM 模拟的结果相吻合。通过修复应用于膜上的真实宏观损伤，验证了原型的 SH 能力。使用手术刀刀片，在加压致动器的膜上进行了相对较大的切割。由于气动执行器在非充气条件下具有自密封能力，因此切割表面会自然地压在一起。当进行 SH 程序(最高温度 80° C)时，所有切口都愈合了，只留下一个小疤痕(由于微观错位)。在疤痕的位置，膜再次密不透风，没有产生薄弱点。

至关重要，在愈合手术后，执行器的性能得到恢复。为此，对执行器进行了反复的损坏、修复和测试，结果表明，执行器的性能几乎完全恢复。PPAM 致动器只有非常小的变化，这是由于 DA 弹性体在每次修复周期后的柔韧性略有增加。柔性 DA 聚合物的存储模量

回收率为 98% ~ 99%。由于缓慢的副反应被认为是在原点, 在这种情况下是马来酰亚胺的均聚, 所以通过在合成中使用纯度更高的双马来酰亚胺, 避免催化均聚的叔胺, 可能会提高这种回收效率。

DA 聚合物的另一个优点是它们是可回收的, 可以通过重塑它们或将它们溶解在合适的溶剂中。将 DA 聚合物的 3D 多边形废弃结构切割成小块, 随后溶解。通过溶剂铸造, 可以制造出可回收的薄片, 其存储模量的回收效率为 81%, 通过使用纯度更高的双马来酰亚胺减少副反应的发生, 可以再次提高效率。回收的薄片被用来制造柔软的手的拇指。因此, DA 聚合物有潜力支持从实验室环境到工业规模 and 我们的日常环境的生态转移。

本研究通过演示说明了自修复的 DA 弹性体可用于各种软机器人应用。由于赋予致动器 SH 容量, 可以使用温和的加热程序修复不同类型的膜损伤。这种 SH 原理增加了软机器人部件的寿命, 而以前用于承受损坏条件的过度尺寸可以减少。

材料和方法

试剂

FGE(96%)和 DPBM(95%)来自 Sigma-Aldrich(图 S1)。Jeffamine D 系列[聚(丙二醇)双(2-氨基丙基醚)]的平均聚合度为 n [由核磁共振(NMR)测定], 由 Huntsman 获得, 具有以下特征: J400: $n = 6.9$, $M_n = 477 \text{ g mol}^{-1}$; J2000: $n = 44.2$, $M_n = 2640 \text{ g mol}^{-1}$; J4000: $n = 71.1$, $M_n = 4200 \text{ g mol}^{-1}$ 。氯仿(stab./Amylene)(最低 99.9%)从 Biosolve Chimie 获得。所有化学药品均按交付方式使用。

DA 聚合物的合成

FGE 与化学计量的 Jeffamine J_x ($x = 400$ 、2000 或 4000)反应, 生成官能团为 4 的呋喃功能化化合物(FGE- J_x)。该反应在 60° C 下连续搅拌至少 7 天, 之后在 90° C 下完成 2 天的反应。经核磁共振检查, FGE- J_x 化合物的功能值为 4.0 ± 0.2 。为了生产 DA 聚合物(详见图 S1), 将呋喃功能化化合物(FGE- J_x)与 DPBM 按化学计量比($r = n$ 马来酰亚胺/ n 呋喃 = 1)混合, 并溶解在氯仿(20 重量%的溶液)中。为了确保 DPBM 在氯仿中完全溶解, 混合物在 25° C 下搅拌 24 小时。为了形成热可逆网络的薄片, 将溶液浇铸在特氟龙模具中, 并蒸发氯仿。通过在真空条件下将温度提高到 90° C 来蒸发氯仿。在氯仿完全蒸发后, 通过缓慢冷却薄片形成热可逆网络。

机械行为的测量

DA 聚合物网络 DPBM-FGE-J400、DPBM-fge-j2000 和 DPBM-fge-j4000 的粘弹性行为在 TA Instruments Q800 DMA 上对每种材料的 3 至 4 个样品进行了测量。矩形样品 0.2 ~ 0.7 mm 厚, 1.5 ~ 3.2 mm 宽, 3.6

Ternyn *et al.*, *Sci.Robot.*2, ean4268(2017) 2017 年 8 月 16 日

至 4.6 mm 长在张力模式下以 1 Hz 频率测量, 振荡应变为 0.1%, 力跟踪为 125%, 加热速率为 10 K min^{-1} (图 2)。S5)。玻璃化转变温度取损耗模量达到最大值时的温度。

采用应力-应变试验在 25° C 下测量 DA 系列不同聚合物的断裂应变和应力, 直至断裂(图 S6)。测量是在 TA Instruments Q800 DMA 上进行的, 在控制应变模式下, 矩形样品处于拉伸状态, 每种材料 4 个样品。对于玻璃状 j400 基材料, 使用 0.1% 的最小⁻¹速率, 而对于弹性体 J2000 和 j4000 基材料, 使用 65% 的最小⁻¹速率。样品的厚度为 0.2 至 0.7 mm, 宽度为 1.7 至 5.5 mm, 长度为 4.0 至 4.2 mm, 根据材料的机械行为进行调整。杨氏模量是从应力应变曲线中获得的, 对于 J2000 和 J4000 基⁻¹材料, 应变斜坡为 65% min, 对于 J400 为 0.1 min^{-1} , 在应变区间内使用线性回归(J4000: 0 至 5%; J2000: 0 ~ 2.5%; J400: 0 ~ 0.2%)(图 S7)。

SH 工艺的温度分布图

实践中用于修复致动器损伤的 SH 程序由四个阶段组成(图 S4): 将样品置于 80° C 的烤箱中, 在其中以约 10 K^{-1} 的温度加热至 80° C, 并保持等温约 35 分钟。随后, 将样品在约 2 K^{-1} 的温度下冷却至 25° C, 并保持约 24 小时以完全恢复机械性能。使用动力学模拟优化了温度分布(图 S3)。

压力控制系统

在设置中, 五个压力可以由五个并联控制系统调节(图 2)。S14 和 S15)。每个系统包含一个缓冲容积和两个电磁阀(Matrix 720 系列紧凑型), 一个连接到压力源, 另一个连接到大气压。这些使用脉宽调制(PWM)控制的功率场效应管开关(MOSFET 4 v04)在高频下切换。PWM 信号由 Arduino Mega ADK 板提供。压力信号使用霍尼韦尔差压传感器(15 psi, 10-V dc)测量, 并使用 Analog Devices 的仪表放大器 AD623ANZ 进行放大。对于力测量, 使用了两种不同的测压元件(FUTEK LSB200 2 lb 和 50 lb)。它们的信号使用 FUTEK 放大器模块 CSG110 进行放大。

补充材料

robotics.sciencemag.org/cgi/content/full/2/9/ean4268/DC1

图 S1. 热可逆共价网络的合成。

图 S2. 热可逆的 DA 反应。

图 S3. DA 系列的仿真: DPBM-FGE-J400、DPBM-FGE-J2000 和 DPBM-FGE-J4000。图 S4. SH 过程的温度分布图。

图 S5. 通过 DMA 测量的 DA 聚合物系列的温度依赖性粘弹性行为。

图 S6. DA 聚合物系列的应力-应变曲线。

图 S7. DPBM-FGE-Jx 的杨氏模量测定。

图 S8. 通过动态流变法测量凝胶温度 (T_{gel})。图 S9. 在 Abaqus 中使用静态弹性模型模拟 SH 软机器人演示器的不同设计。

图 S10. 两个 BSPA 设计的尺寸, 单位为毫米。

图 S11. 两个 PPAM 原型的尺寸, 单位为毫米。

图 S12. 通过折叠和自我修复来构建一个 BSPA。图向。通过折叠和自我修复来制造 PPAMs。图 S14 系列。压力控制系统方案。

图 S15. 压力控制系统图像。

图 S16. 双马来酰亚胺网络的不可逆交联。

图肌力。原型制造过程中产生的 DA 聚合物废料可以回收利用。S18 无花果。美国。回收程序后的材料性能恢复。电影 S1。利用光学显微镜可视化 DA 弹性体的 SH 过程。电影 S2。将不同机械性能的 DA 聚合物一起愈合;DPBM- FGE-J4000 和 DPBM- fge - j2000。

电影 S3。在 Abaqus 中使用静态弹性模型模拟大变形。电影 S4。柔软的气动夹持器，握着一个 92 克的橘子。电影 S5。柔软的气动手，所有的手指都是单独控制的。电影 S6。PPAM 的驱动。

S7 的电影。损坏软性气动手。

S8 的电影。破坏 ppam。

参考文献和注释

1. C. Laschi, B. Mazzolai, M. Cianchetti, 软机器人:推动机器人能力边界的技术和系统。《科学。机器人》。 **1,3690**(2016)。

2. S. Kim, C. Laschi, B. Trimmer, 软机器人:机器人技术的生物启发进化。《生物技术趋势》, **31,287-294**(2013)。

3.D. Rus, M. T. Tolley, 软体机器人的设计、制造与控制。《Nature》**521**, 467-475(2015)。

4. D. Trivedi, C. D. Rahn, W. M. Kier, I. D. Walker, 《软机器人:生物学灵感、技术现状和未来研究》。《达成。仿生学。生物医学》, **599**-117(2008)。

5. R. H. Ewoldt, 极其柔软:流变学复杂流体的设计。《软机器人》, **1,12**-20(2014)。

6. M. T. Tolley, R. F. Shepherd, B. Mosadegh, K. C. Galloway, M. Wehner, M. Karpelson, R. J. Wood, G. M. Whitesides, 一种弹性的无系带软机器人。《软机器人》, **1,213**-223(2014)。

7. S. A. Morin, R. F. Shepherd, S. W. Kwok, A. A. Stokes, A. Nemiroski, G. M. Whitesides, 软机器人的伪装与展示。《科学》 **337,828**-832(2012)。

8. R. F. Shepherd, F. Ilievski, W. Choi, S. A. Morin, A. A. Stokes, A. D. Mazzeo, X. Chen, M. Wang, G. M. Whitesides, 多步态软体机器人。《Proc. 国家的。学会科学。美国学报》, **108,20400**-20403(2011)。

9. R. Deimel, O. Brock, 一种用于灵巧抓取的新型柔性 and 欠驱动机械手。《Int. j. 机器人。Res.》**35**, 161-185(2015)。

10. E. Brown, N. Rodenberg, J. Amend, A. Mozeika, E. Steltz, M. R. Zakin, H. Lipson, H. M. Jaeger, 基于颗粒状材料堵塞的通用机器人抓取器。《Proc. 国家的。学会科学。美国》 **107,18809**-18814(2010)。

11. S. Wakimoto, K. Ogura, K. Suzumori, Y. Nishioka, 带有卷曲橡胶气动执行器的微型软手, 2009 年国际机器人与自动化会议论文集(ICRA '09)(IEEE, 2009), pp. 556-561。

12. J. Hughes, U. Culha, F. Giardina, F. Guenther, A. Rosendo, F. Iida, 软操纵器和夹持器:综述。《前面。机器人。人工智能》, **3**, 10.3389/frobt.2016.00069(2016)。

13. J. Amend, H. Lipson, JamHand:最小驱动的灵巧操作。《软机器人》。 **4,70**- 80(2017)。

14. R. V. Martinez, A. C. Glavan, C. Keplinger, A. I. Oyetibo, G. M. Whitesides, 抗机械损伤的软致动器和机器人。《放置功能。物质学报》, **24,3003**-3010(2014)。

15. S. Terryn, G. Mathijssen, J. Brancart, D. Lefeber, G. V. Assche, B. Vanderborght, 一种自愈软气动执行器的开发:第一个概念。《Bioinspir. 生物医学学报》, **10,046007**(2015)。

16. S. R. White, N. R. Sottos, P. H. Geubelle, J. S. Moore, M. R. Kessler, S. R. Srimam, E. N. Brown, S. Viswanathan, 高分子复合材料的自主愈合。《自然》 **409** 期, 794-797(2001)。

17. 陈旭, M. A. Dam, K. Ono, A. Mal, H. Shen, S. R. Nutt, K. Sheran, F. Wudl, 一种热可修复交联聚合物材料。《科学》 **295,1698**-1702(2002)。

18. D. Y. Wu, S. Meure, D. Solomon, 自修复高分子材料:近期发展综述。《掠夺。变异较大。自然科学》 **33,479**-522(2008)。

19. B. J. Blaiszik, S. L. B. Kramer, S. C. Olugebefola, J. S. Moore, N. R. Sottos, S. R. White, 自修复聚合物与复合材料。《为基础。启板牙。Res.》**40**, 179-211(2010)。

20.S. D. Bergman, F. Wudl, 可修补聚合物。《j. 板牙。化学》, **18,41**-62(2008)。

21. M. D. Hager, P. Greil, C. Leyens, S. van der Zwaag, u.s.s Schubert, 自愈材料。《材料导刊》, **22,5424**-5430(2010)。

22. A. Lutz, O. van den Berg, J. van Damme, K. Verheyen, E. Bauters, I. De Graeve, F. E. Du Prez, H. Terryn, 一种用于金属表面腐蚀保护的形状恢复聚合物涂层。《ACS 达成。板牙。接口》**7,175**-183(2014)。

23. H. Jonkers, 自愈混凝土:一种生物学方法。《自愈材料》, **100,195**- 204(2008)。

24. K. L. Gordon, R. K. Penner, P. B. Bogert, W. T. Yost, E. J. Siochi, 用于航空航天的穿刺自愈聚合物。《Conf. NASA Am.;化学。Soc. 国家的。见面。Expo.》**242**, NF1676L-NF12452(2011)。

Ternyn et al., Sci. Robot. **2**, ean4268(2017) 2017 年 8 月 16 日

25. B. C. Tee, C. Wang, R. Allen, Z. Bao, 一种用于电子皮肤的具有压力和弯曲敏感特性的电气和机械自愈复合材料。 *高分子学报*, **7,825**-832(2012)。

26. 侯 c., 黄涛, 王慧, 于慧, 张强, 李毅, 一种具有自激活压力敏感性的强拉伸自愈膜, 用于潜在的人造皮肤应用。 *科学。众议院* **3,3138**(2013)。

27. M. Yim, W. Shen, B. Salemi, D. Rus, M. Moll, H. Lipson, E. Klavins, G. S. Chirikjian, 模块化自重构机器人系统[机器人技术的重大挑战]。 *IEEE 机器人。奥特曼。Mag.* **14**, 43-52(2007)。

28. 杨绍明。关铭刘,t.w. Chuo, 基于热可逆 Diels-Alder 化学的自修复聚合物。 *变异较大。化学*, **4,2194**(2013)。

29. B. Scheltjens, G. Diaz, M. M., B. Joost, V. Assche, G. Van Mele, 基于可逆共价键的自修复聚合物网络涂层的热评价。 *反应。功能。Polym.* **73**, 413(2013)。

30. B.高希, M. W.厄本, 自修复氧乙烷取代物。 *Science* **323**, 1458-1460(2009)。

31. P. Cordier, F. Toumilhac, C. souli<:l> -ziakovic, L. Leibler, 超分子组装的自愈和热可逆橡胶。 *Nature* **451**, 977-980(2008)。

32. J. Saldien, K. Goris, B. vandererborght, J. Vanderfaillie, D. Lefeber, 用社交机器人 probo 表达情感。 *Int. j. Soc. 机器人*, **2,377**-389(2010)。

33. P. Polygerinos S. Lyne, Z. Wang, L. Femando, N. B. Mosadegh, G. M. Whitesides, C. J. Walsh, 一种用于手部康复的柔软气动手套。 *IEEE/RSJ 智能机器人与系统(IROS)国际会议论文集*(IEEE, 2013), 第 1512-1517 页。

34. A. D. Marchese, R. K. Katschmann, D. Rus, 软流体弹性体机器人的配方。 *软机器人*, **2,7**-25(2015)。

35. B. Mosadegh, P. Polygerinos, C. Keplinger, S. Wennstedt, R. F. Shepherd, U. Gupta, J. Shim, C. J. W. Bertoldi, G. M. Whitesides, 快速驱动软机器人的气动网络。 *放置功能。物质*, **24,2163**-2170(2014)。

36. <http://softroboticsinc.com/>。

37. D. Villegas, M. Van Damme, B. Vanderborght, P. Beyl, D. Lefeber, 机器人应用的第三代褶皱气动人造肌肉:与 McKibben 肌肉的发展与比较。 *机器人学报*, **26,1205**-1227(2012)。

38. B. Vanderborght, R. Van Ham, B. Verelst, M. Van Damme, D. Lefeber, Lucy 项目概述:气动人造肌肉驱动的两足动物的动态稳定。 *ad. Robot.* **22**, 1027-1051(2008)。

39. S. Terryn, G. Mathijssen, J. Brancart, T. Verstraten, G. Van Assche, B. Vanderborght, 走向自我修复致动器:初步概念。 *IEEE 反式。机器人*, **32,736**-743(2016)。

40. S. Terryn, G. Mathijssen, J. Brancart, G. Van Assche, B. Vanderborght, D. Lefeber, 机器人的自修复顺应致动器研究, *IEEE 国际机器人自动化会议论文集(ICRA)*(IEEE, 2015), 第 258-263 页。

41. F. Ilievski, A. D. Mazzeo, R. F. Shepherd, X. Chen, G. M. Whitesides, 用于化学家的软机器人。 *Angew. 化学*, **123,1930**-1935(2011)。

42. 孙宇军, 宋宇成, J. Paik, 基于硅橡胶的软气动执行器的表征, *智能机器人与系统国际会议论文集(IROS)*(IEEE, 2013), pp. 4446-4453。

43. G. K. Klute, B. Hannaford, McKibben 人工肌肉执行器中弹性能量储存的核算。 *J. Dyn. system. 量。控制* **122,386**-388(2000)。

44. B. Verelst, R. Van Ham, 第二代褶皱气动人造肌肉及其机器人应用。 *机器人学报*, **20,783**-805(2006)。

45. F. Daerden, D. Lefeber, 褶皱气动人造肌肉的概念与设计。 *Int. [j]流体动力* **2,41**-50(2001)。

资助 本研究由欧盟委员会 ERC 启动资助“串联-并联弹性驱动机器人”(SPEAR) (no.:337596)。S.T.由佛兰德斯研究基金会(FWO)博士奖学金资助。**作者贡献**:S.T.设计并执行了所有实验。J.B.协助表征 DA 聚合物。所有作者都对论文的撰写做出了贡献。**利益竞争**:作者声明没有利益竞争。**数据和材料可获得性**所有支持结论的数据均可在补充材料中找到。有关材料和方法的更详细信息,请联系 S.T. (seterryn@vub.ac.be)。

2017 年 4 月 14 日提交接受
2017 年 7 月 20 日发布 2017
年 8 月 16 日
10.1126/scirobotics.aan4268

引用本文:S. Terryn, J. Brancart, D. Lefeber, G. Van Assche, B. Vanderborght, 自愈软气动机器人。 *科学。机器人*, **2**,aan4268(2017)。

自愈软气动机器人

Seppie Terry、Joost Brancart、Dirk Lefebvre、Guy Van Assche 和 Bram Vanderborght

科学。机器人。 , 2(9),
aan4268。DOI: 10.1126/
scirobotics.aan4268

在线查看文章

<https://www.science.org/doi/10.1126/scirobotics.aan4268>
权限

<https://www.science.org/help/reprints-and-permissions>

本文的使用受 [服务条款](#) 的约束

Science Robotics (ISSN 2470-9476)由美国科学促进会出版, 地址:1200 New York Avenue NW, Washington, DC 20005。标题 Science Robotics 为美国科学促进会(AAAS)注册商标。

版权所有©2017 The Authors, 保留部分权利;美国科学促进会独家授权。没有要求原创的美国政府作品