# 自我修复的软气动机器人

**介绍：**

大家好，今天我给大家介绍的论文名为Self-healing soft pneumatic robots，中文叫做自我修复的软气动机器人.(翻)

在我们日常生活中见到的大多数机器人都是由坚硬的材料制成，软机器人则是受到许多生物体中发现的顺应性的启发，几乎完全由柔性、 柔软的材料制成。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。在这篇论文中，作者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，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。

作者还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)。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。

**基于可逆Diels-Alder 键的自我修复**

然后我们来具体看一下作者的实验过程，首先是软致动器的自愈能力，这个能力基于二烯(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作用(对于我们的系统来说，80°C 就足够了)。通过增加温度，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增加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)。

**弯曲式软气动执行器的设计：**

接下来我们看看作者是如何使用DA聚合物来设计弯曲式软气动执行器，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。

**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，作者开发了 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，PPA M 在环 境压 力和 接近 最 大

超压 测试 下的 形状( 电影 S6)。

**致 动 器的自修复：**

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。

为了确认柔软气动手手指的 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℃;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。

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 。

总的来说，这篇论文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。