DOI: 10.3901/JME.2019.11.083

堆栈式 DE 作动器的流延工艺及其性能研究*

李卓远¹ 董鹏飞¹ 陈花玲^{1,2} 盛美萍³ 王敏庆³

(1. 西安交通大学机械工程学院 西安 710049;

2. 西安交通大学机械强度与振动国家重点实验室 西安 710049;

3. 西北工业大学航海学院 西安 710072)

摘要: 随着机器人技术的发展,能与自然交互、自主适应复杂动态环境并协同作业的共融机器人在高端制造、医疗康复、国防安全等领域将会发挥巨大的作用。在共融机器人运动执行机构的研究中,基于介电弹性体(DE)的作动器表现出很好的环境适应性和机电性能。为了进一步研究介电弹性体作动器,将弹性体电极引入介电弹性体作动器中,通过流延工艺逐层堆积电极层和作动器层,实现了多层 DE 作动器的一体化制造。在光学显微镜下观察到,基于该工艺制备而成的堆栈式 DE 作动器各层的厚度一致性好,且与设计尺寸间的误差较小。作动器在静态电压及动态扫频电压下的响应结果显示,该工艺制备而成的作动器具有较好的变形性能,且变形性能一致性较好。经过一年的使用后,作动器的性能衰减不明显,该作动器的这一特点适用于机器人等需要长期服役装备的使用需求。

关键词: 流延工艺; 堆栈式作动器; 介电弹性体

中图分类号: TG156

Casting Process and Performance Test for Stack Dielectric Elastomer Actuators

LI Zhuoyuan¹ DONG Pengfei¹ CHEN Hualing^{1,2} SHENG Meiping³ WANG Mingqing³

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049;

2. State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures,
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049;

3. School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

Abstract: With the development of robot technology, robots can adapt to the complex environment which will play a great role in high-end manufacturing, medical rehabilitation, defence and security, and other fields. In the study of robots' movement mechanism, actuators based on dielectric elastomers material showed a good environmental adaptability and good electromechanical properties. A novel fabrication process of stacked dielectric elastomer actuator (SDEA) is developed based on casting process and elastomeric electrode. The casting process ensures the consistency of every layers' thickness in SDEA. The static and dynamic test results indicates that so-fabricated SDEA benefits the advantages of homogenous properties as well as little performance degradation after one-year use.

Key words: casting process; stack actuator; dielectric elastomer

0 前言

传统的工业机器人一般将刚性模块通过运动副连接构成,每个运动副提供特定数量的平动自由度或者转动自由度,这种机器人具备运动精确的优点,但由于结构的刚性使其环境适应性较差,在狭

窄空间内的运动受到限制,更无法通过尺度小于机器人自身尺寸或形状复杂的通道。在与人进行交互时,其结构较大的刚性将大大增加互动时人体受到其伤害的可能。

共融机器人是一类能够与作业环境、人和其他机器人自然交互、自主适应复杂动态环境并协同作业的机器人,因而在高端制造、医疗康复、国防安全等领域对共融机器人具有巨大的需求。因此,开展共融机器人结构、感知与控制的基础理论与关键

* 国家自然科学基金资助项目(91648110)。20180702 收到初稿,20181213 收到修改稿

技术研究, 将为我国机器人技术和产业取得源头创新成果提供科学支撑。作为以柔性为主要特征之一的共融机器人, 常常使用柔性材料作为执行机构的主要组成部分, 它将有助于提高机器人结构的柔性, 增强其在复杂环境中的适应性, 提高人机交互过程中的安全性。

介电弹性体材料(Dielectric elastomer, DE)是一种具有较大应用潜力的新型智能柔性材料。具有柔性好, 变形大, 响应迅速, 无噪声, 机械效率高, 能量密度高等特点^[1-9]。在 DE 薄膜的上下表面分别涂敷柔性电极并施加电压后, DE 薄膜会在厚度方向上收缩, 同时在面内方向上扩张^[10-12], 如图 1 所示。因此, DE 材料是一种性能良好的电致变形材料。

图 1 介电弹性体电致变形原理示意图

在实际应用中, 单层 DE 膜作动器在面内方向输出力小, 在厚度方向变形不足, 且无法承受较大的背压, 实用性较差。为此, 研究人员提出了一种将多个单层膜 DE 作动器在薄膜的厚度方向进行多次堆叠后得到的堆栈式 DE 作动器(图 2)。它在面内方向的变形与单层作动器基本一致, 但输出力却成倍提升, 而随着多个作动器的有序堆叠, 厚度方向的变形也得以成倍增加。

图 2 堆栈式 DE 作动器电致变形原理示意图

为了制作堆栈式 DE 作动器并研究其性能, 研究人员提出了多种制作工艺^[13-18]。这些工艺主要包括了两部分内容: 沉积 DE 材料层(作动层)和沉积电极材料层。其中, SCHLAACK^[13]采用匀胶机旋转涂敷液态硅橡胶(一种 DE 材料)的方法来沉积作动层, 并通过喷涂液态电极浆料的方法来得到电极层。该方法存在两方面的不确定性: ① 喷涂工艺一致性的影响因素较多(包括浆料浓度、喷涂距离、喷涂气压等), 精确控制较为复杂; ② 在喷涂完成的电极层上继续旋转涂敷下一层液态硅橡

胶层时, 硅橡胶材料的流动会“冲走”部分电极颗粒, 影响电极层与作动层的厚度及电极层的面积。TEPEL 和 MAAS^[14-15]采用商业化的 DE 薄膜产品来作为作动层, 既保证作动器层厚度一致, 又节省了制造时间。但在多层作动层进行堆叠时, 商品化的 DE 薄膜已完成了固化, 所以两层膜间几乎没有贴合力, 层间的气泡无法彻底排除, 而空气的击穿电压较低, 工作时存在于电极边缘的空气极易发生击穿, 从而引起 DE 材料的损坏。总体来看, 现有的堆栈式 DE 作动器制备工艺仍有优化改进的空间。

为此, 本文提出了一种基于流延增材制备工艺的堆栈式 DE 作动器的制作方法。制作过程中, 采用了弹性体材料作为电极材料, 并通过流延工艺来逐层堆积电极材料和作动层材料, 弹性体电极材料的引入为电极层的厚度可控提供了可能性, 而流延工艺则从技术上实现了其厚度的控制, 确保了层与层之间的有效结合。

1 基于流延增材工艺的堆栈式 DE 作动器制作工艺

1.1 材料准备

本文选择了 Ecoflex 0020 型铂催化硅橡胶作为作动层的材料。该型号的硅橡胶有 A、B 两种组分, 在成型前, 充分混合两种组分并进行脱泡处理。常温下这种硅橡胶在混合 30 min 内为液态, 之后交联程度增加逐渐变为固态。

本文选择的弹性体电极作为一种由导电碳膏和 Ecoflex 0020 型硅橡胶按一定比例混合而成的导电材料。其导电性好, 但几乎没有流动性, 不能直接流延, 且在受到外界载荷时, 极易向四周滑移, 无法保持固定的形状。因此单独作为电极材料时只适用于在厚度方向不需要承受背压的单层作动器中。另外, 由于其中的硅油无法限制碳颗粒的迁移, 在长时间使用的过程中碳颗粒可能渗入作动层材料从而使作动层厚度变薄进而发生电击穿破坏。为了使电极层材料具有一定的承载能力且削弱碳颗粒的迁移能力, 本文将导电碳膏与硅橡胶充分混合, 碳材料均匀分散在硅橡胶材料中保证了电极材料的导电性, 固化后的硅橡胶材料中的大分子网络结构在增加电极材料承载能力的同时可以包裹住碳颗粒以限制其迁移, 从而提高整个作动器的承载能力和使用寿命。在配制材料时, 先取一定量的导电碳膏, 在行星搅拌器中

将其与硅橡胶的 A 组分充分混合后再与 B 组分充分混合后在真空锅中脱泡。

1.2 流延增材制造技术工艺路线

本文采用流延工艺分别沉积作动层和电极层, 通过调节流延机制膜器上刮刀与基底的间隙来控制每层材料的厚度, 经过多次流延沉积后, 最终得到了堆栈式 DE 作动器。

具体的工艺流程如图 3 所示, 详细过程如下。

图3 基于弹性体电极材料和流延工艺的堆栈式DE作动器制备工艺流程图

(1) 裁剪一块尺寸合适的流延基底并放置在流延基座上。本文选择PET薄膜作为流延基底, 尺寸与流延机的基座大小基本一致。流延基座具有吸附功能, 其上表面有许多小孔, 将基底放置在流延基座上之后, 打开与基座相连的真空泵, PET薄膜随即被紧紧吸附于流延基底的上表面。这一操作保证了流延过程中堆积起始点的位置一致性, 为后续的流延工艺奠定了基础。

(2) 流延堆栈作动器最下层的绝缘封装层。堆栈式DE作动器在使用过程中需要被施加较高的电

压, 因而作动器表面的绝缘封装层必不可少。本文选择流延一层350 μm 厚的硅橡胶层作为绝缘封装层。流延时, 将刚混合脱泡后的Ecoflex 0020材料倾倒在PET基底上, 同时设置流延机制膜器刮刀与基底间的距离为350 μm , 随后设置制膜器的运动速度为15 mm/s。随着制膜器在PET基底表面的滑动, 厚度均匀的硅橡胶绝缘封装层膜坯就可制作完成。

(3) 在流延下一层电极材料之前, 需要等绝缘封装层的硅橡胶材料完全固化。常温下这种硅橡胶的固化的时间为30 min左右, 如需要缩短固化时间, 可通过加热的方式来实现。通常情况下, 加热炉温度设置为70 $^{\circ}\text{C}$ 。

(4) 在得到的硅橡胶层上铺放电极掩模板。电极掩模板是用激光切割机切割完成的PET薄膜, 其上镂空图案的形状即是电极层的形状。每个电极包含了两部分区域: 电极引出区域和电极作动区域, 如图4所示。在每次铺放时, 将电极作动区域与上一层完全重合, 而电极引出区域所在的方位与上一层相反。

图4 电极形状示意图

(5) 流延电极层材料。将液态的电极材料倾倒在电极掩模板上, 设置制膜器刮刀距离基底PET膜的高度。电极层材料的厚度由两方面因素影响: 其一是制膜器刮刀的高度, 其二是电极掩模板的厚度。当刮刀的高度低于掩模板厚度时, 制膜器将无法从掩模板上表面顺利通过。为尽可能减少弹性体电极对DE材料变形的影响, 电极层的厚度应薄一些较好, 在本文中, 电极的厚度为150 μm 。由于电极材料流动性比单纯的液态硅橡胶差。为保证在流延时电极层材料有充分的时间流平并填充电极掩模板的镂空区域, 流延时制膜器的运行速率要低于流延硅橡胶时的速度, 本文中电极材料层的流延速度为10 mm/s。

(6) 电极层材料的固化。前已述及电极层材料的常温固化耗时较长, 为缩短制备时间, 电极层材料固化过程在加热炉中进行, 温度设置为70 $^{\circ}\text{C}$, 厚度150 μm 的电极层固化时间约为1 h。

(7) 流延作动层材料。这一层材料的具体操作与步骤(2)一致, 不再赘述。

之后多次重复步骤(3)至步骤(7)的工艺流程,经过多次重复后,可以得到具有多个作动单元的堆栈式 DE 作动器。

(8) 此后,仍需要流延上表面的绝缘封装层,具体与步骤(2)一致。

在完成了以上所有步骤后用刀片将数个堆栈式 DE 作动器从其中切割下来,切割后的堆栈式作动器如图 5 所示。至此,流延工艺的全部过程结束。

图 5 堆栈作动器实物图

1.3 堆栈作动器电极引出工艺

在完成堆栈作动器的制作后,因为同一侧的电极之间彼此仍是独立的,无法同时施加电压,因此,需要完成电极引出工艺后才能实现同时对多个作动器层施加控制电压。

本文采用了如图 6 所示的电极引出工艺。首先,用刀片将堆栈式 DE 作动器两侧面电极引出区域进行裁剪,使同一侧的电极引出区域边缘裸露。然后在两侧分别涂抹导电银浆,导电银浆的常温固化时间大约为 2 h,在其固化前,分别将两簇铜导线的一端浸没于其中,待完全固化时,弹性体电极、固化后的导电银浆与铜导线三者之间就形成了一个导电的整体。电极引出工艺完成后,对一个堆栈作动器的正负极引出端施加电压,其中并联的多个 DE 作动器就可以实现同步变形。

图 6 电极引出工艺流程图

2 堆栈式 DE 作动器各层材料厚度一致性测试

堆栈式 DE 作动器由多个 DE 作动单元组成,若在制备的过程中出现了作动层厚度差异较大,或作动层实际尺寸与设计尺寸差异较大,则会对作动器的使用安全造成致命的影响。特别对于并联结构,尺寸相差较大意味着整个作动器所能承受的最高电压由最薄的一层作动层厚度决定,一旦最薄的一层发生电击穿,随后因材料燃烧放出的热将会影响邻近的材料造成更多层发生电击穿,直至整个作动器失效。另一方面,弹性体电极对作动层有一定的约束力,若是电极层的厚度不均匀,则约束力也会有所不同,特别是当某一层电极材料比其余的更厚时,这层材料对作动层的变形约束将大于其他层,这样将会显著影响堆栈式 DE 作动器的变形。因此,本文提出采用弹性体材料作为电极材料并采用流延工艺以确保各层的厚度一致。

为了检验本文给出的流延工艺得到的各层厚度的一致性,本文在完成了堆栈式作动器制备之后,随机挑选了一组样品,对其进行了液氮环境下的淬断,并对断面进行了光学显微镜下的观察。

图 7a 所示为光学显微镜下作动器的截面影像,其中黑色的条形区域为弹性体材料电极,黄色偏亮的条形区域为硅橡胶作动层材料(显微镜置于实验室黄光区,故而本应呈现白色的作动层变成了黄色)。从图中可以看出,三个电极层的厚度分别为 $143.02\ \mu\text{m}$ 、 $150.61\ \mu\text{m}$ 、 $146.83\ \mu\text{m}$,三个尺寸较为接近,且与设计尺寸 $150\ \mu\text{m}$ 相差较小,最大的误差为 $6.98\ \mu\text{m}$ (约 4.6%)。

图 7b 所示为光学显微镜下作动器的截面影像,从图中可以看出,三个电极层的厚度分别为 $345.12\ \mu\text{m}$ 、 $337.41\ \mu\text{m}$ 、 $345.04\ \mu\text{m}$,三个尺寸较为接近,且与设计尺寸 $350\ \mu\text{m}$ 相差也较小,最大的误差为 $12.59\ \mu\text{m}$ (约 3.6%)。

(a) 电极层厚度测量

(b) 作动层厚度测量

图7 堆栈式DE作动器截面显微图

由此可以看出,基于弹性体材料的电极和流延工艺制作的堆栈式DE作动器在各层厚度尺寸上具有较好的一致性。

3 堆栈式DE作动器机电性能测试

3.1 静电响应测试

图8所示为堆栈式DE作动器位移测试试验台示意图。将作动器放置在水平台面上,在其上粘接一个质量为100 g的质量块。通过NI数采系统产生驱动电压信号,经过电压放大器放大后作用于堆栈式作动器,使其产生厚度方向的收缩,从而带动质量块产生竖直方向的位移。这一位移信号被其上部的激光位移传感器捕捉,并将位移信号发回数采系统进行显示与记录。

图8 堆栈式DE作动器位移测试试验台示意图

图9所示为堆栈式DE作动器位移测试结果。试验中从同一批次的作动器中随机选取了三个进行静电响应测试,所施加的电压0.4~3.6 kV,每次增加0.4 kV。从试验结果可以看出,随着驱动电压的增大,作动器的位移呈现出非线性增大趋势,在3.6 kV时,作动器最大的位移超过0.9 mm。对比三个作动器的测试结果可以看出,低电压时相同电压下的变形差异较小,随着电压的升高,三个作动器变形的差异逐渐增大,但最大的差异不超过0.05 mm(与该电压下变形的平均值比值为5.6%)。这一结果说明本文所采取的堆栈式DE作动器的制作工艺具有较好的工艺一致性。

图9 堆栈式DE作动器静电响应测试结果

3.2 动态响应测试

图10所示为堆栈式DE作动器动态响应测试结果。试验中对作动器施加正弦扫频电压,正弦电压幅值1.5 kV,外加1.5 kV的直流偏置,电压频率为0.1~75.0 Hz。从扫频结果可以看出,整个结构的固有频率约为31 Hz,共振频率处的振幅约为0.6 mm。在低频范围内的变异性呈现出非线性变化,越过固有频率之后,位移变化幅值逐渐衰减。

图10 堆栈式DE作动器动态响应测试结果(时域)

对三个作动器结构的扫频结果进行FFT变换后得到如图11所示的频域图。从图中可以看出,三个作动器的扫频频域结果基本一致,只在低频的部分区域呈现出较小差异。这样的测试结果再次证明了本文所采取工艺的优势。

图11 堆栈式DE作动器动态响应测试结果(频域)

3.3 性能退化测试

为了观察采取本文工艺制备的堆栈式 DE 作动器的性能稳定性, 本文测试了堆栈式 DE 作动器工作一年前后的性能变化。

在这一年的使用过程中, 堆栈式 DE 作动器每星期工作 3、4 次, 每次的工作时间 4~6 h, 图 12 所示为一年前后作动器在正弦信号下的位移响应结果(正弦信号频率 1 Hz, 幅值 1.5 kV, 直流偏置 1.5 kV)。从结果中可以看出, 两个作动器一年前后的变形曲线基本重合, 性能退化不明显。说明基于本文工艺制作而成的作动器至少具有连续工作一年的能力, 因而具有一定的实用性。

图 12 堆栈式 DE 作动器性能退化测试

4 结论

为了提高堆栈式 DE 作动器的作动层与电极层厚度的一致性以及避免层与层之间剥离而出现的气泡现象, 本文提出了一种基于弹性体电极材料与流延增材制造技术的堆栈式 DE 作动器的制作工艺。该工艺通过逐层沉积特定厚度的作动材料与电极材料实现了 DE 作动器的增材制造, 为其后期的大规模自动化制造奠定了基础。

从基于该工艺制作的作动器厚度测量结果来看, 具有较好的尺寸一致性, 同时制作误差较小, 这是其变形性能一致性的前提。另外, 通过加电测试可以看出, 具有相同制作尺寸的作动器变形性能基本一致, 再次证明本文所设计的工艺的优越性。最后从性能退化测试试验结果看出, 基于该工艺的作动器在一年的使用后性能退化不明显, 这一特点为其后期的实际应用奠定了基础。

参 考 文 献

- [1] PELRINE R, KORNBLUH R, PEI Q, et al. High-speed electrically actuated elastomers with strain greater than 100%[J]. Science, 2000, 287(5454): 836.
- [2] CARPI F, BAUER S. Stretching dielectric elastomer performance[J]. Science, 2010, 330(6012): 1759-1761.
- [3] BROCHU P, PEI Q. Advances in dielectric elastomers for actuators and artificial muscles[J]. Macromolecular rapid communications, 2010, 31(1): 10-36.
- [4] SUO Z. Theory of dielectric elastomers[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2010, 23(6): 549-578.
- [5] ANDERSON I, GISBY T, MCKAY T, et al. Multi-functional dielectric elastomer artificial muscles for soft and smart machines[J]. Journal of Applied Physics, 2010, 112(4): 041101-041101-041120.
- [6] LIU Y, LIU L, ZHANG Z, et al. Dielectric elastomer film actuators: Characterization, experiment and analysis[J]. Smart Materials & Structures, 2009, 18(9): 95024-95010.
- [7] LIU Y, LIU L, ZHANG Z, et al. Electromechanical stability of electro-active silicone filled with high permittivity particles undergoing large deformation[J]. Smart Materials & Structures, 2010, 19(11): 115025.
- [8] LI B, LIU X, ZHANG J. Phase characterization of cucumber growth: A chemical gel model International[J]. Journal of Ploymer Science, 2016(4): 1-8.
- [9] LI B, CHEN H, LI D. Effect of solvent diffusion on reactive chromotropic polyelectrolyte gel[J]. International Journal of Applied Mechanics, 2016, 8(7): 4401-4412.
- [10] BRO P, PEI Q. Advances in dielectric elastomers for actuators and artificial muscles[J]. Macromolecular Rapid Communications, 2010, 31(1): 10-36.
- [11] MCKAY T, OBRIEN B, CALIUS E, et al. Soft generators using dielectric elastomers[J]. Applied Physics Letters, 2011, 98(14): 142903-142903-142903.
- [12] JUNG K, KOO J, LEE Y, et al. Artificial annelid robot driven by soft actuators[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2007, 2(2): S42.
- [13] SCHLAAK H, JUNGSMANN M, MATYSEK M, et al. Novel multilayer electrostatic solid state actuators with elastic dielectric[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5759: 121-133.
- [14] TEPEL D. Automated manufacturing process for DEAP stack-actuators[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9056: 905627.
- [15] MAAS J, TEPEL D, HOFFSTADT T. Actuator design and automated manufacturing process for DEAP-based multilayer stack-actuators[J]. Meccanica, 2015, 50(11): 2839-2854.
- [16] NGUYEN C, PHUNG H, NGUYEN T, et al. A small biomimetic quadruped robot driven by multistacked dielectric elastomer actuators[J]. Smart Materials and Structures, 2014, 23(6): 065005.
- [17] JUNG H, YANG S, CHO K, et al. Design and

fabrication of twisted monolithic dielectric elastomer actuator[J]. International Journal of Control Automation and Systems 2017, 5(1): 25-35.

- [18] ARAROMI O, CONN A, LING C, et al. Spray deposited multilayered dielectric elastomer actuators[J]. Sensors & Actuators A Physical, 2011, 167(2): 459-467.

作者简介：李卓远，男，1992 年出生，博士研究生。主要研究方向为智能材料与智能结构。

E-mail: lizhuoyuan289@outlook.com

陈花玲(通信作者)，女，1954 年出生，博士，教授，博士研究生导师。主要研究方向为振动噪声控制、智能材料与智能结构。

E-mail: hlchen@mail.xjtu.edu.cn

董鹏飞，男，1992 年出生，硕士研究生。主要研究方向为智能材料与智能结构。

E-mail: dong_todoit@163.com

盛美萍，女，1970 年出生，博士，教授，博士研究生导师。主要研究方向为振动与噪声控制、声学功能材料与结构。

E-mail: smp@nwpu.edu.cn

王敏庆，男，博士，教授，博士研究生导师。主要研究方向为结构振动与噪声控制、动力系统节能减排。

E-mail: mqwang@nwpu.edu.cn