聚合物捻卷型人工肌肉及其在软体机器人领域应用的研究现状

张亚坤[†], 张宇[†], 李博^{*}, 陈贵敏

西安交通大学机械工程学院, 陕西省智能机器人重点实验室, 机械制造系统工程国家重点实验室, 西安 710049

[†] 同等贡献

^{*} E-mail: liboxjtu@xjtu.edu.cn

收稿日期: 2020-02-10; 接受日期: 2020-04-21; 网络版发表日期: 2020-07-23

国家自然科学基金(批准号: 91748124)、国家重点研发计划(编号: 2019YFB1311600)和陕西省重点研发专项(编号: 2020ZDLGY06-11)资助项目

摘要 人工肌肉是一种新型的仿生柔性驱动器, 具有显著柔顺性和柔软度, 能够安全地与人体及其他生物环境进行交互。鉴于现有的人工肌肉存在负载程度低、迟滞效应大、寿命短等局限, 一种基于尼龙等聚合物纤维进行加捻卷绕制作的人工肌肉(twisted and coiled polymer fiber, TCPF)应运而生。这种人工肌肉可产生超过40%的变形量, 承受载荷的能力达到同等重量和长度人体肌肉的100倍之多, 并且具有高达5.3 kW/kg的能量密度, 迅速成为当前学术研究的热点问题。本文综述TCPF人工肌肉的发展历程和研究现状, 着重围绕TCPF人工肌肉的制备工艺和驱动原理、新材料和结构、驱动方式的改进以及在软体机器人领域的应用等方面进行介绍, 分析了现有研究中存在的不足和瓶颈问题, 并对未来的发展趋势进行了展望。

关键词 聚合物捻卷型人工肌肉, 柔性驱动, 软体机器人, 热-力-电耦合

1 引言

人工肌肉是一种以柔性材料为主体的驱动器, 能够在电流^[1~3]、压力^[4]、温度^[5]等外界刺激下发生可逆的机械变形^[6~8]。以生物的肌肉功能为设计灵感, 人工肌肉能进行伸缩、扩张和旋转变形, 产生类似于生物动作的动力输出, 并承受较大的变形和外界载荷。与电机等传统刚性的驱动器相比, 人工肌肉能够安全地与人类以及生物环境进行交互, 因此具有更好的共融机器人特征^[9~12]。这些特点使得人工肌肉类柔性驱动

器越来越广泛地被应用于工业、医疗、教育等众多领域。

目前研究较多的人工肌肉类柔性驱动器主要有形状记忆合金(shape memory alloys, SMA)、介电弹性体驱动器(dielectric elastomer actuator, DEA)、气动人工肌肉、离子聚合物-金属复合材料(ionic polymer-metal composites, IPMC)驱动器等。其中采用热驱动的形状记忆合金具有较快的变形速度和较大输出力, 但是只能进行小范围的收缩变形(一般为4%~5%), 并且迟滞效应较大; 介电弹性体驱动器工作频率在500 Hz之内,

引用格式: 张亚坤, 张宇, 李博, 等. 聚合物捻卷型人工肌肉及其在软体机器人领域应用的研究现状. 中国科学: 技术科学, 2021, 51: 119–136
Zhang Y K, Zhang Y, Li B, et al. Progress of twisted and coiled polymer fiber artificial muscles and its application in soft robots (in Chinese). Sci Sin Tech, 2021, 51: 119–136, doi: 10.1360/SST-2020-0033

但是它产生的驱动力较小, 并且需要额外的设备提供数千伏以上的高电压; 气动人工肌肉是一种由压缩空气源驱动的弹性主体, 它能够产生较大较快的变形和驱动力, 但是对于泵、阀和管道这些额外装置的需求使得整个系统体积大且笨重, 在很多场合使用受限制; 离子聚合物-金属复合材料的质量轻、柔性大、功耗低, 但是其需要保持湿润的工作状态, 对应用环境有要求. 这些类型的人工肌肉各有特点, 但总的来说无法同时满足输出力大、变形大、迟滞小、体积小、成本低、使用寿命长、能量密度高、易于驱动等要求^[13-19]. 对高性能的人工肌肉驱动器的需求迫在眉睫. 2014年, 美国德克萨斯大学达拉斯分校的Haines等人^[20]开发了一种由聚合物纤维加捻卷绕而成的人工肌肉, 并将其定义为聚合物捻卷型人工肌肉(*twisted and coiled polymer fiber, TCPF*)^[20]. 图1为尼龙6,6单丝纤维制作的TCPF人工肌肉的结构. 单根人工肌肉可以由尼龙6,6单丝直接加捻螺旋而成. 也可以将多根人工肌肉进行编织缠绕, 形成多层复合结构, 应用于纺织物等穿戴式设备上. 这种人工肌肉在温度变化下发生收缩或伸长, 最高可以产生49%的变形量, 承受载荷的能力能够达到同等重量和长度人体肌肉的100倍之多, 并且具有很高的能量密度(5.3 kW/kg). 另外, 它的迟滞效应也较小, 每120万次循环周期下的蠕变小于2%. 这些优异性能被*Science*报道后, 引起了国际学术界的注意, 并引领了该人工肌肉研究的热潮.

图1 尼龙单丝纤维制备的人工肌肉^[20]. (a) 直径为0.3 mm的尼龙6,6单丝纤维; (b) 单丝纤维加捻后卷绕而成的弹簧线圈结构; (c) 两根人工肌肉组成的双层人工肌肉; (d) 32根人工肌肉组成的编织结构; (e) 单丝纤维加捻后在芯棒上卷绕而成的弹簧线圈结构

Figure 1 Artificial muscle made of nylon monofilament fiber ^[20]. (a) Nylon 6,6 fiber with a diameter of 0.3 mm; (b) spring structure formed by coiling the fiber after twisting; (c) double layer composed of two artificial muscles; (d) a braided structure composed of 32 artificial muscles; (e) a spring coil structure formed by winding a single filament fiber around a mandrel.

这种人工肌肉具有随着环境温度变化而发生变形的特点, 一方面可通过外部设备进行加热和冷却, 改进其驱动方式; 另一方面, 受到环境温度变化驱动的特点可以让其成为一种收集能量的装置, 开发自供能系统. 另外, 不同的材料和捻卷方式制备的聚合物捻卷型人工肌肉具有不同的驱动性能. 正是这些多样的特点和丰富的功能吸引了越来越多的国内外学者投入到这种新型的人工肌肉的研究之中. 因此本文将对这种人工肌肉材料的特点和发展过程进行综述介绍. 为了强调这种人工肌肉是使用聚合物作为材料进行加捻卷绕制作的, 我们在下文中将其统一简称为TCPF人工肌肉.

材料、结构和驱动方式是影响TCPF人工肌肉性能的三大要素, 材料科学、设计方法和机电工程的发展促进了TCPF人工肌肉能更好地应用于更多的领域. 图2综合了从2014年开始, TCPF人工肌肉在材料、结构、驱动方式和应用方面的代表性成果^[21-29]. 按照时间发展历程, 2014年Haines等人^[20]开创了聚合物捻卷型人工肌肉的先河. 使用尼龙纤维进行制作和电热枪进行加热驱动制备了第一代TCPF人工肌肉. 后来者在他们的基础上进行不断改进; 随后, 英属哥伦比亚大学的Mirvakili等人^[27]对尼龙人工肌肉进行表面镀银, 成功地引入了电加热的驱动机制, 形成了TCPF人工肌肉目前使用最广泛的驱动方式; 2015年, 德克萨斯大学达拉斯分校的Tadesse团队^[25]使用热水驱动型尼龙人工肌肉制作了一款仿生机械手, 这一款机械手极大程度贴近了人类的手掌, 推动了TCPF与机器人结合的发展; 2018年, 韩国成均馆大学的Choi团队^[24]将尼龙纤维与氨纶纤维两种聚合材料结合在一起, 制作成一种双螺旋结构的人工肌肉, 继承了尼龙和氨纶两种材料制备的人工肌肉的优点, 大大提升了TCPF人工肌肉的驱动能力. 从上述研究中可以看到, 虽然TCPF人工肌肉的诞生才6年时间, 但由于其涉及多学科的知识交叉, 各个领域内的专家各展所长, 获得了众多新颖的成果. 因此, 本文将从制备工艺和驱动原理、新材料和结构、驱动方式以及应用等4个方面来详细介绍聚合物捻卷型人工肌肉的发展现状.

2 制备方法和驱动原理

2.1 制备方法

TCPF人工肌肉的制备方法决定了其驱动原理和

图 2 (网络版彩图) TCPF 人工肌肉的发展成果。材料的发展包含尼龙纤维、镀银聚对苯二甲酸乙二醇酯(polyethylene terephthalate, PET)^[21]、氨纶纤维^[22]等; 结构的发展包含中空芯轴型^[20]、圆锥螺旋弹簧型^[23]、双螺旋型^[24]等; 驱动方式的发展包含热水流驱动^[25]、与电热丝元件组合驱动^[26]、表面镀银电热驱动^[27]等; 应用的发展包含仿生机械臂及关节^[25]、软体机器人^[28]、新型传感器^[29]等

Figure 2 (Color online) Development results of TCPF artificial muscle. Material development includes: nylon fiber, silver-plated PET [21], spandex fiber [22], etc.; structural development includes: hollow mandrel type [20], conical coil spring type [23], double helix type [24], etc.; development of driving methods includes: hot water flow driving [25], combination with electric heating wire components [26], surface silver-plated electric heating driving [27], etc.; application development includes: bionic mechanical arms and joints [25], soft robots [28], new sensors [29], etc.

性能。单一聚合物纤维捻卷型人工肌肉的制作流程如图3所示, 可分为加捻阶段(图3(a)~(b))、卷曲阶段(图3(c)~(e))、退火阶段(图3(f))。在竖直制备平台上轴向布置一个固定的旋转电机和一个滑块, 初始状态下聚合物纤维的一端固定于电机输出轴末端, 另一端固定在滑块上, 且滑块上悬挂一个固定质量的砝码作为预载荷以施加预拉力。启动电机, 纤维开始扭转, 同时其长度开始缩短, 纤维的末端牵引着滑块和砝码向上运动。扭转至一定程度后, 若电机继续转动, 则扭转的纤维将开始自然卷绕, 最终形成完整的螺旋线圈结构。固定该螺旋线圈结构并对其进行热处理, 热处理完成

后该结构被完全定型(图3(g)), 此时可以获得一个人工肌肉样品^[18]。一个典型的TCPF人工肌肉的样品如图4所示。

TCPF人工肌肉在制备中的工艺参数与其性能直接相关。首先, 在加捻过程中, 悬挂砝码的重量(预载荷)非常重要, 不仅决定了制备成功与否, 也决定了TCPF人工肌肉的性能。若预载荷过轻会导致纤维的形状取向不一致, 无法成型; 而预载荷过重又会导致加捻时纤维断裂; 其次, 在退火处理时, 也需要考虑悬挂砝码的重量(被定义为训练载荷)。根据实验经验, 训练载荷要大于预载荷。这是因为如果在加捻完成后, 两个相

图 3 (网络版彩图)制备工艺图. (a) 把原始纤维上下两端固定在电机和砝码上; (b) 电机开始旋转加捻; (c) 加捻到达卷曲的临界点; (d) 开始卷曲; (e) 卷曲完成; (f) 退火处理; (g) 制备完成

Figure 3 (Color online) Manufacture process. (a) Fix the upper and lower ends of the original fiber on the motor and the weight; (b) the motor starts rotating and twisting; (c) the twisting reaches the critical point of coiling; (d) the coiling starts; (e) the coiling is completed; (f) annealing treatment; (g) preparation completed.

邻线圈之间没有间隙, 则相邻线圈无法互相运动, TCPF没有驱动行程. 因此, 为了增大驱动行程, 需选择偏重些的悬挂重量, 以增大间隙. 但也要注意若训练载荷过大会导致TCPF人工肌肉断裂, 或者在非断裂的情况下也可能导致无法弹性回复的塑性变形^[30,31]. 最后, 退火处理时需要关注加热时间和温度, 不同的时间和温度会导致最终的驱动性能的不同. 表1以直径0.4 mm的透明尼龙鱼线为例总结了工艺参数的影响.

2.2 驱动原理

以典型的TCPF人工肌肉为例, 其由1根聚合物纤维加捻卷绕后形成^[20], 如图4所示. 在初始状态下, 整根纤维取向一致且与中性轴平行, 黑笔记号标记了纤维的初始取向, 当纤维发生扭转后其纤维取向相对于中轴产生了偏转, 此时的纤维取向角记为 α . 扭转的圈数越多, 纤维取向角 α 也越大. 将加捻后的纤维进行卷曲便形成了最终的螺旋线圈结构, 线圈的螺旋角记为 β . 其中加捻和卷曲的方向是一致的^[32].

TCPF人工肌肉在温度变化时产生长度变化是由于扭转的聚合物纤维在高温下发生解螺旋导致的. 如

图5所示, 在常温下将一段聚合物纤维沿着一个方向进行扭转, 平行向的纤维将被拉长并倾斜, 扭转后的纤维截面将产生螺旋结构. 从微观上来说, 聚合物纤维是由沿纤维轴高度取向的分子链构成的, 存在结晶区和非结晶区两个成分. 纤维在受热时由于负膨胀特性, 产生了轴向收缩, 导致熵的改变^[20]. 以尼龙6为例, 它的负热膨胀系数约为4%. 在高温下, 具有负热膨胀系数的聚合物纤维会发生轴向收缩, 此时处于扭转状态下的聚合物纤维将发生收缩, 进而在纤维截面上发生解旋, 产生解旋力矩^[32].

纤维的解螺旋直接驱动整个人工肌肉螺旋线圈产生长度变化. 取整个螺旋线圈中的一圈为分析对象. 如果整根纤维的加捻方向为顺时针方向, 在螺旋线圈的中性面上其右侧纤维截面中纤维呈顺时针螺旋. 在高温下纤维发生解螺旋时, 该固定截面以下的半个螺旋线圈其纤维将发生顺时针方向的解螺旋, 驱动着半个线圈以固定截面为轴向上转动. 固定截面之上的半个螺旋线圈其纤维将发生逆时针方向的解螺旋, 该层线圈的高度将缩短, 驱动着半个线圈以固定截面为轴向下转动. 这样在整个螺旋线圈上, 圈与圈之间的间隙变小, TCPF人工

表 1 TCPF人工肌肉制备参数参考范围表

Table 1 TCPF artificial muscle preparation parameters

序号	参数	影响
1	预载荷	小于11.7 MPa导致纤维成型凌乱; 大于31.2 MPa导致纤维断裂
2	训练载荷	小于31.2 MPa导致TCPF人工肌肉线圈间隙太小, 无明显收缩空间; 53.8~63.2 MPa导致TCPF人工肌肉局部被拉直且无法恢复线圈状; 大于63.2 MPa会导致纤维断裂
3	热处理温度及时间	温度低于90℃, 热处理程度过弱导致TCPF人工肌肉无法定型; 温度高于150℃, 热处理程度过强导致TCPF人工肌肉完全固结, 无收缩功能. 注意, 热处理的时间和温度会同时影响TCPF性能, 以上温度范围皆是热处理时长为30 min时所测结果

图 4 (网络版彩图)尼龙6纤维实际制备图. (a) 原始纤维; (b) 加捻; (c) 卷曲; (d) 热处理后的完备样品(由本课题组制备)

Figure 4 (Color online) The actual preparation of nylon 6 fiber. (a) Original fiber; (b) twisted; (c) coiled; (d) a complete sample after heat treatment (prepared by our research group).

肌肉发生收缩变形. 在降温时, TCPF的收缩力消失, 在外部负载的作用下被拉伸延长, 然后等待下次升温实现重复变形. 由于材料在制备中处于弹性变形阶段, 未发生塑性变形, 因此驱动过程是可逆的.

从制备工艺的过程可以得知, TCPF人工肌肉的收缩程度和材料、工艺参数、温度变化有关, 因此需要对多个参数进行协同优化, 方可达到所需要的驱动性能.

3 新材料与结构

3.1 不同材料之间的性能影响

制备聚合物捻卷型人工肌肉的材料有多种选择,

根据驱动原理可知, 材料选择需要满足以下条件.

(1) 纤维具有一定的柔性. 可以进行捻卷、编织等操作.

(2) 加捻后无裂痕. 根据本课题组的制备经验, 使用长度为300 mm的尼龙6纤维(直径0.4 mm), 悬挂250 g的砝码进行制备, 需要加捻约220圈. 这需要材料在加捻卷曲的过程中, 不应有表面裂痕, 更不能断裂. 即使某材质的纤维可以进行加捻卷绕, 也需注意其直径范围(常见的是0.2~0.8 mm), 越大的直径越会导致其在捻卷时断裂. 同时也不应过小, 过小会导致能量密度偏低, 因为离圆心越近时加捻程度越小, 在温度改变时产生的加捻变化越不明显.

(3) 轴向和径向各向异性. 在加热时轴向收缩, 径向扩张, 即轴向有负的热膨胀系数.

根据文献报道, 可以选用的材料有尼龙6鱼线、尼龙6,6缝纫线、聚乙烯鱼线、PET缝纫线、PVDF鱼线、Kevlar缝纫线^[20]、氨纶^[22]等. 这些材料都具备负的热膨胀系数, 此系数是捻卷人工肌肉能够致动的根本因素, 其直接影响解旋力矩的大小和人工肌肉的收缩程度. 在不考虑其他因素时, 材料的负热膨胀系数越大越好. 除此之外还要考虑材料的柔韧程度、耐热程度等. 在以上几种材料中, 尼龙6,6的表现最为优越, 因为其受热驱动温度范围最高可达230℃. 在此温度下, 原始纤维有4%的轴向收缩率, 制成的TCPF人工肌肉可以达到35%的收缩率^[20], 如图6所示. 此外, 尼龙6,6还具备高韧性、耐磨、能量密度高等优点, 因此是制备TCPF人工肌肉的最佳材料. 表2给出了常用的几

图 5 (网络版彩图)驱动原理图. (a) 未加热的TCPF人工肌肉舒展, 线圈间隙大; (b) 加热的TCPF人工肌肉收缩, 线圈间隙缩小; (c) 为(a)的局部放大图(角度调整为垂直), 在制备时顺时针方向加捻; (d) 为(b)的局部放大图(角度调整为垂直), 发生逆时针方向的解旋; (e) 25℃时的TCPF; (f) 加热到100℃时的TCPF; (g) 冷却到25℃时的TCPF

Figure 5 (Color online) Actuation principle. (a) The unheated TCPF artificial muscle stretches and the coil gap is large; (b) the heated TCPF artificial muscle contracts and the coil gap shrinks; (c) a partially enlarged view of (a) (the angle is adjusted to vertical), which is rotated clockwise during preparation; (d) a partially enlarged view of (b) (angle adjusted to vertical), counterclockwise untwisting; (e) TCPF at 25℃; (f) TCPF at 100℃; (g) TCPF at 25℃.

图 6 (网络版彩图)各纤维材料及人工肌肉的受热特性对比图^[20]. (a) 原始纤维的受热收缩率; (b) 人工肌肉的受热收缩率
Figure 6 (Color online) Comparison of heating characteristics of various fiber materials and artificial muscles ^[20]. (a) Heat shrinkage rate of original fiber; (b) heat shrinkage rate of artificial muscle.

表 2 常用聚合物纤维及驱动指标

Table 2 Commonly used polymer fibers and actuation indicators

材料	驱动负载 (N)	最大变形 (%)
尼龙6鱼线(直径0.43 mm) ^[20]	0.6	26
尼龙6,6缝纫线(直径0.3 mm) ^[20]	0.6	35
镀银尼龙6,6缝纫线(直径0.43 mm) ^[20]	0.5	24
聚乙烯鱼线(直径0.44 mm) ^[20]	1	16
氨纶(8股840 denier) ^[22]	0.8	45

种材料及其输出性能参数^[18,20]. 值得注意的是, 驱动性能会受材料选型、制备工艺、负载和驱动方式等因素的综合影响, 在不同条件下其输出参数会发生变化.

3.2 TCPF人工肌肉的结构设计

TCPF人工肌肉有多种结构, 下面分单尺度螺旋结构和多尺度螺旋结构进行总结.

3.2.1 单尺度螺旋结构

单根的聚合物捻卷型人工肌肉可以分为同手性、异手性、中空芯轴型^[20]及圆锥螺旋弹簧型^[23].

同手性的聚合物捻卷型人工肌肉是在加捻和卷曲的过程中用同一种旋转方向, 这样制备出来的人工肌肉受热会收缩变形, 如图7(a)所示. 此类型的聚合物捻卷型人工肌肉是最基础的类型, 其他类型都是在此基础上进行的改进.

异手性的聚合物捻卷型人工肌肉则是在加捻的时候采用一种旋向, 而卷曲的时候用另一种旋向, 这样制

备出来的人工肌肉受热会扩张变形, 如图7(a)所示. 和同手性相比其缺点在于, 制备过程更复杂, 在加捻完成后需要进行初次热定型, 以此来防止反向加旋时发生解旋; 在实际使用中需要额外的辅助支撑结构以弥补自身刚度的不足. 因此在实际运用中绝大多数皆采用同手性结构.

中空芯轴型是加捻后即将卷曲时, 利用一个大直径的芯轴把人工肌肉做成中空结构, 如图7(b)所示^[20]. 这种结构在制作时要注意解旋的问题, 即在加捻完成后必须进行初次热定型, 然后再绕在芯轴上作再次热定型. 其优点是: 因为结构中存在更大的线圈间隙, 为收缩提供了更大的运动空间, 使收缩率大大提高. 同手性的收缩率约为15%, 异手性的收缩率可达到50%. 但是负载能力明显降低, 仅为同手性的5%.

圆锥螺旋弹簧型人工肌肉如图7(c)所示^[23], 其制作工艺如下: 首先按照基本流程制备同手性人工肌肉, 然后再把人工肌肉放置在提前做好的螺旋形模具里进行热处理定型. 显而易见, 这种类型人工肌肉的优点更明显, 其比中空芯轴型具备更大的变形量. 得益于相邻线圈的直径大小不一, 相互之间影响更小, 有更多的运动空间. 此外, 这种类型的人工肌肉可双向变形, 当温度低时往一个方向运动, 温度高时往另一个方向运动.

如果使用高弹性和高强度的氨纶纤维作为材料制备TCPF人工肌肉时, 需要对纤维束进行两次卷绕^[22]. 因为氨纶纤维的延展性和高弹性, 一次卷绕后的纤维束无法进行驱动. 如图7(d)所示, 经过第二次卷绕, 氨纶纤维束形成弹簧式的线圈结构, 并拥有足够的强度进行伸缩驱动.

图 7 (网络版彩图)单尺度螺旋结构. (a) 同手和异手性人工肌肉图(A: 同手性; B: 异手性)^[20]; (b) 中空芯轴型人工肌肉^[20]; (c) 圆锥螺旋弹簧型人工肌肉^[23]; (d) 氨纶纤维制作TCPF人工肌肉的过程^[22]. 从左至右依次为: 未加捻的八束氨纶纤维, 加捻后的氨纶纤维, 一次卷绕氨纶纤维, 二次卷绕氨纶纤维, 经过热处理后的二次卷绕氨纶纤维. 下面两个局部放大图依次为: 未加载时的氨纶纤维人工肌肉和加载时的氨纶纤维人工肌肉

Figure 7 (Color online) Single-scale spiral structure. (a) The chiral and alien artificial muscle diagrams (A: chiral type; B: alien type) ^[20]; (b) hollow mandrel-shaped artificial muscles ^[20]; (c) conical spiral spring-type artificial muscles ^[23]; (d) the process of making spandex fibers to make TCPF artificial muscles (from left to right) ^[22]: untwisted spandex fiber, twisted spandex fiber, primary winding spandex fiber, secondary roll winding spandex fiber, secondary winding spandex fiber after heat treatment. The following two enlarged are spandex fiber artificial muscle without loading and spandex fiber artificial muscle when loading.

3.2.2 多尺度螺旋结构

TCPF人工肌肉具备可编织的特性, 因此可以通过科学设计产生不同的组合结构形式, 如图8所示^[20]. 如果两股TCPF人工肌肉在制备时用相反的旋向, 然后再相互缠绕在一起, 则形成图8(a)所示的结构, 可以抵消单股人工肌肉所产生的扭矩, 仅提供轴向伸缩力. 图8(b)所示为把多股人工肌肉进行预设计的编织, 提供较大的输出力^[23,33,34]. 图8(c)为把不同的材料编织在一起, 一部分纤维用来导电产生热量使另一部分收缩, 实现互相的耦合驱动, 在编织中增加其他功能纤维或传感纤维, 赋予编织物多种功能的一体化集成.

4 驱动方式

根据TCPF人工肌肉驱动原理, 温度的改变是TCPF人工肌肉驱动力的基本来源. 最原始的尼龙鱼线人工肌肉采用的是电热枪直接加热驱动, 显然存在驱

图 8 (网络版彩图)TCPF人工肌肉的编织结构^[20]. (a) 两股旋向不同的人工肌肉加捻; (b) 多股进行编织; (c) 多种材料进行编织

Figure 8 (Color online) The knit structure of TCPF artificial muscles ^[20]. (a) Two artificial muscles twisted in different directions; (b) knitted by multiple strands; (c) knitted by multiple materials.

动源获取不便捷, 加热存在时间滞后以及容易受环境干扰的问题. 因此, 近年来国内外研究者基于TCPF人工肌肉的驱动原理, 对其驱动方式进行不断改进和优

化. 主要有以下4种^[35]: (1) 使用冷/热空气来冷却/加热人工肌肉; (2) 将人工肌肉放置在柔性管道中, 并在管道中通入热或冷水流; (3) 在聚合物纤维表面进行表面处理, 镀上导电材料, 利用焦耳热进行加热; (4) 将聚合物纤维与电热丝(如合金丝)进行编织组合, 通过电热丝进行加热. 这4种方法都是目前使用比较多的方法. 其中, 方法(1)和(2)可以归类为直接加热式驱动; 方法(3)和(4)可以归类为间接加热式驱动. 与水流加热驱动相比, 电加热驱动不需要泵、阀、水管等额外的部件. 因此拥有简单、轻便、灵活的特点, 可以更好地应用于仿生机器人领域.

考虑到方法(1)是TCPF人工肌肉相关研究中最基础的驱动方式^[20,22,24,36,37]: 需要升温时使用热枪加热, 降温时自然冷却或风扇强制冷却. 其技术相对简单, 但是应用条件苛刻. 而其余3种皆为此方式的改进. 因此, 本节将重点介绍其余3种驱动方式.

4.1 冷热水流驱动

德克萨斯大学达拉斯分校的Tadesse团队^[25]研制了一种利用热水来传递热量进行驱动的人工肌肉. 如图9(a)所示, 驱动系统主要由一个内含有弹簧和尼龙纤维捻卷型人工肌肉的柔性硅胶管组成. 弹簧的作用是给予人工肌肉一定的预应变, 同时也不影响硅胶管的柔性. 硅胶管空腔的两端各有一个注水口和一个出水口, 形成流体的通道. 驱动过程如图9(b)所示, 当空腔内通99℃的热水时, TCPF人工肌肉的温度上升, 在负载200 g的重物下完成22%的收缩运动; 当空腔内注入21℃的冷水时, TCPF人工肌肉温度降低, 并恢复原状. 交替注入热水和冷水可以驱使人工肌肉往复运动.

由于人工肌肉在空腔内可以与水流完全接触, 因此驱动过程非常迅速, 只需要1.5 s就可以完成完全收缩.

4.2 表面镀层电热驱动

英属哥伦比亚大学的Mirvakili等人^[27]提出一种在表面具有镀银层的尼龙纤维捻卷型人工肌肉, 如图10(a)所示. 由于镀银层具有良好的导电性, 这种人工肌肉不需要外部加热设备, 只需要将其接入电路, 就可以通过焦耳热对纤维材料进行加热, 进而驱动整个TCPF人工肌肉发生收缩运动. 另外, 镀银层也提高了TCPF人工肌肉与环境之间的热交换效率, 使其能够在断电时较快地散热冷却. 这种人工肌肉的制作方法是在尼龙纤维加捻后即将卷绕时, 在纤维表面镀银. 待镀银层晾干之后再进行卷绕. 这种制作工艺步骤简单、成本低廉, 通过改变镀银层的厚度可以调节其电阻值, 进而调整加热的能量输入, 控制人工肌肉的收缩率. 但是镀层引入新的表面结构, 会在伸缩运动时发生局部断裂或者镀层分布不均匀导致过热熔断, 亦会降低人工肌肉的寿命.

与Mirvakili等人^[27]研制的导电人工肌肉不同的是, 韩国成均馆大学的Choi团队^[38]直接使用镀银尼龙纤维进行TCPF人工肌肉的制备, 简化了制备步骤. 研究发现, 在制备过程中, 这种尼龙纤维所加载荷和加捻次数决定了驱动性能, 因此需要进行仔细的实验研究.

除了尼龙纤维之外, PET纤维由于表面富有羟基和羧基的活性区, 也可以很好地进行表面金属涂镀. 韩国成均馆大学的Nam团队^[21]对PET纤维进行表面金属化镀银(图10(b)), 并以此材料来制作捻卷型人工肌肉. 在镀银前, PET人工肌肉在外部热源(160℃

图9 (网络版彩图)冷热水流驱动^[25]. (a) 以热水驱动的人工肌肉结构图; (b) 通冷热水的驱动效果图

Figure 9 (Color online) Cold and hot water flow drive ^[25]. (a) Structure diagram of artificial muscle driven by hot water; (b) effect diagram of driving cold and hot water.

图 10 (网络版彩图)表面镀层电热驱动. (a) 镀银人工肌肉的结构尺寸图和成像图^[27]; (b) 原始PET纤维表面和镀银PET纤维表面的电子显微镜图像^[31]

Figure 10 (Color online) Electric heating of surface coating. (a) Structural dimensions and imaging of silver-plated artificial muscles^[27]; (b) SEM of the surface of original PET fibers and silver-plated PET fibers^[31].

~180℃)的加热作用下可以发生最多8.9%的线性形变。但是经过表面处理, 镀银层在PET纤维表面形成导电层, 使得PET人工肌肉能够使用电加热, 同时增加了PET纤维的表面硬度。由于能量密度的增加, 此人工肌肉的最大伸长率提高到12.1%(6 V电压下)。镀银PET人工肌肉在电加热驱动下拥有良好的控制和驱动性能, 在仿生机器人和工业机器人领域具有很好的发展前景。

4.3 与电热丝组合驱动

日本松下公司的Hiraoka等人^[26]利用加捻卷绕的聚合物纤维与电阻加热丝编织缠绕进行加热驱动的人工肌肉(图11(a)), 其所使用的聚合物纤维是经过高度拉伸后具有较大硬度的线性低密度聚乙烯纤维(linear low-density polyethylene, LLDPE)^[26]。这种TCPF人工肌肉可以在低至60℃的驱动温度下产生较大的压力和应变, 因此可以在不降温的情况下与布料或者纺织物相结合, 很好地应用到可穿戴设备领域。

韩国成均馆大学的Choi团队^[24]对镀银尼龙纤维和氨纶纤维两种材料同时进行加捻卷绕, 制成了一种具有双螺旋结构(double helix)的人工肌肉^[24]。其结合了镀银尼龙纤维和氨纶纤维各自的优点, 即拥有较强的力学伸缩性和韧性, 又能够利用尼龙镀银层的导电性进行电加热。值得一提的是, 如图11(b)所示, 绝缘的氨

图 11 (网络版彩图)与电热丝组合驱动. (a) 两束捻卷型LLDPE纤维与一束加热电阻丝编织而成的人工肌肉^[26]; (b) 双螺旋人工肌肉^[24]; (c) 其他材料构成的双螺旋结构方式的人工肌肉; (d) SMA-鱼线人工肌肉结构图^[39]

Figure 11 (Color online) Combined with electric heating wire drive. (a) Artificial muscles woven from two bundles of twisted LLDPE fibers and a bundle of heating resistance wires^[26]; (b) double-helix artificial muscles^[24]; (c) double-helix artificial structure made of other materials muscle; (d) SMA-fish line artificial muscle^[39].

纶纤维在制备后包裹住镀银尼龙纤维, 可以避免人工肌肉漏电。由于氨纶纤维的高弹性(超过500%), 这种人工肌肉具有柔性好、重量轻, 又拥有足够的驱动性能(最大应变可达40%)的特点, 是未来发展方向之一。

西安交通大学李博制备了这种双螺旋结构方式(图11(c), 本课题组的实验室成果, 尚未发表), 其主材料选用直径0.4 mm的透明尼龙鱼线, 电阻导热丝选用直径0.1 mm的银线或铜线, 发现多材料组合对性能提升有明显的效果。

东北大学的郝丽娜团队^[39]将形状记忆合金(SMA)和尼龙鱼线结合, 并进行加捻卷绕, 形成了一种“SMA-鱼线人工肌肉”。这种人工肌肉继承了SMA能够导电的特性, 因此可以通过电加热进行驱动。这种人工肌肉改善了尼龙鱼线人工肌肉需要外部热源加热、输出

力较小、SMA应变小、存在迟滞效应的缺点,一定程度上综合了两种材料的优点。如图11(d)是这种人工肌肉的结构图。在人工肌肉的构成中,SMA合金丝缠绕在鱼线上,类似于电热丝伴随缠绕型人工肌肉。

5 在软体机器人领域中的应用

聚合物捻卷型人工肌肉具有良好的驱动性能,其伸缩应变大、驱动速度快、负载能力强、寿命长,很适合作为驱动器对机械系统进行动力输出。再加上其轻便、灵活,可以代替传统的电机驱动,有效缩减整个机械系统的体积。TCPF人工肌肉作为柔性驱动器的代表,具有极高的柔性。材料本身的柔软度和驱动的可控制性保证了人机交互的友好性和安全性,可以很好地应用在软体机器人领域。TCPF人工肌肉随着环境温度进行被动驱动的特点,可以俘获其他能量输入便可自驱动的机构,这便实现了热能到机械能的能量转化,如果再与电路系统进行组合,可以进一步输出电能,实现热能的回收利用。如今,越来越多的学者对TCPF人工肌肉的应用进行研究,这些研究内容大致可以分为4种情况:(1)仿生机械手与关节;(2)软体机器人;(3)自

驱动系统;(4)新型柔性传感器。本节将对这4个方面的具体应用分别进行介绍。

5.1 仿生机械手与关节

德克萨斯大学达拉斯分校的Tadesse团队^[25]使用热水驱动型尼龙人工肌肉制作了一款仿生机械手。如图12(a)所示,整只机械手有5根手指和1个用来实现紧握手掌的额外关节。每一根手指有3个关节,并通过类似于人体肌腱的机构来驱动。机构中弹簧的一端连接手指指尖,另一端连接人工肌肉。当人工肌肉驱动收缩时,每一个指节都会绕相应关节进行转动。由于热水驱动型人工肌肉驱动速度快,并拥有最高可达22%的收缩率,机械手指的指尖可以在2 s内弯曲 41° 。这一款机械手极大程度贴近了人类的手掌,推动了机器人柔性化的发展。

韩国成均馆大学的Choi团队^[36]使用镀银尼龙纤维人工肌肉研制了一种单指机械手。如图12(b)所示,镀银人工肌肉被安置在机械手指的内部。每一根手指具有多个指节,且指尖与人工肌肉相连。当通电时,人工肌肉收缩驱动指节转动,整根手指弯曲。这种机械手指可以演示弯曲和放松,并能够抓取物体。整个机械手系

图12 (网络版彩图)仿生机械手与关节。(a)热水驱动型仿生机械手三维模型,实物图以及机构示意图^[25];(b)镀银尼龙纤维人工肌肉仿生机械手实物图,功能演示图^[36];(c)TCPF人工肌肉锁紧机构以及带有锁紧机构的仿生机械手^[40];(d)助力手套^[26];(e)仿生肌肉骨骼系统^[45];(f)骨骼肌人工肌肉模块结构图以及仿生机械臂运动效果图^[48]

Figure 12 (Color online) Bionic manipulator and joints. (a) Three-dimensional model of hot water-driven bionic manipulator ^[25]; (b) silver-plated nylon fiber artificial muscle bionic manipulator physical diagram, functional demonstration diagram ^[36]; (c) TCPF artificial muscle locking mechanism and bionic manipulator with locking mechanism ^[40]; (d) booster gloves ^[26]; (e) bionic musculoskeletal system ^[45]; (f) skeletal muscle artificial muscle module structure diagram and bionic robot arm movement ^[48].

统结构简单, 非常灵活、轻便. 后期再进行快速冷却系统和温度负反馈系统的研究, 可以对机械手进行更加快速、准确的控制.

美国德克萨斯大学达拉斯分校的Tadesse团队^[40]设计了一款带有锁紧机构的机械手. 机械手的部分依然是用TCPF人工肌肉的伸缩性能来驱动手指、手肘等关节部分. 除此之外, TCPF人工肌肉同样被用于设计了一种锁紧机构, 可以在机械手握紧物体并停顿在特定位置时进行锁紧, 起到固定锁型的作用. 图12(c)是锁紧机构的示意图和带有锁紧机构的仿生机械手的设计图. 图中共有3束人工肌肉, 其中TCP I和TCP III是用来驱动关节的, 而TCP II起到锁紧的作用. 当TCP II放松时, 图中的锥形块与外壳相接触, 与关节相连的肌腱被锁紧; 当TCP II受热收缩时, 锥形块与外壳分开, 机构处于解锁状态. 这样的锁紧机构可以被广泛地用于各种机器人的锁紧控制.

日本松下公司的Hiraoka等人^[26]将捻卷型LLDPE纤维与加热电阻丝编织而成的人工肌肉应用于可穿戴设备领域. 如图12(d)所示, 将这种人工肌肉放置在布料手套上, 通过人工肌肉的驱动, 可以起到助力的作用. 由于驱动力有限, 目前这种人工肌肉的驱动能力还无法应用于实际的人体医疗康复设备上. 除此之外, 还有很多TCPF人工肌肉在机械手方面的应用^[41-43], 它们的基本原理就是利用人工肌肉驱动手部各关节, 实现整个机械手的位姿变化.

除了仿生机械手之外, 还可以使用镀银尼龙纤维人工肌肉制作一系列仿生肌肉骨骼系统^[44-47], 其结构如图12(e)所示. 四根人工肌肉分布在肌肉骨骼系统的四面, 通过人工肌肉不同伸缩程度, 可以驱动球窝关节扭转至任意角度.

韩国成均馆大学的Choi团队^[48]研发了一套人工外骨骼模块(artificial musculoskeletal actuation module, AMAM). 通过将两束使用氨纶材料制备的捻卷型人工肌肉与双凸轮机构相组合, 可以制作AMAM系统(如图12(f)所示), 不仅能够实现双向驱动, 还可以避免由传统拮抗结构的单向驱动人工肌肉造成的效率低下的不足. 基于AMAM系统制作而成的仿生机械臂具有轻便和廉价的特点, 而且在受热的情况下还可以进行充分的二头肌卷曲和三头肌反冲动作. 但是这种机械臂的控制精度低, 需要额外热源进行加热. 后期通过增加反馈系统, 与电加热材料进行编织有望解决这些

问题.

5.2 软体机器人运动驱动

除了应用于操作式仿生机械手中的机械驱动, 使用TCPF人工肌肉的变形能力可以制造各种移动式软体机器人. 由于生物结构具有多变性和柔顺性, 在自然界中软体动物面对环境的变化能够展现极强的适应能力^[49-51]. 将人工肌肉和一些材质柔软的材料进行组合, 模仿这些软体动物进行机器人的构造, 可以制作出适应性强、柔顺性好、安全性高的软体机器人. 不同结构的软体机器人可以进行不同形式的运动模式^[52], 包括爬行、滚动、行走、弹跳等^[53-57].

美国德克萨斯大学达拉斯分校的Tadesse团队^[58]将聚合物捻卷型人工肌肉嵌入硅弹性体中, 制造了一种可以变形的柔性人造皮肤. 所使用的人工肌肉材料是镀银导电尼龙纤维, 因此可以通过电加热来驱动人工肌肉, 进而改变硅弹性体的外形. 通过改变驱动电压和人工肌肉在硅弹性体中嵌入的位置, 可以进行自定义的结构变形. 如图13(a)所示, 这种柔性人造皮肤可以模仿生物体的柔性运动, 比如象鼻卷曲、无脊椎动物的起伏运动, 再加上其制作简单、成本低、轻便灵活的特点, 非常适合应用于软体机器人的开发. 图13(b)是人造皮肤驱动示意图.

哈尔滨工业大学唐心田等人^[59]研发了一种通过单根TCPF人工肌肉驱动的软体爬行机器人. 如图13(c)所示, 通过加热和冷却使得人工肌肉收缩或伸长时, 软体机器人发生弯曲变形, 利用两只驱动足与接触面之间摩擦力的差异驱动整个机器人爬行运动. 一个加热、冷却过程可以产生一个步长的运动距离. 实验结果表明, 这种爬行软体机器人在适合的控制信号下的爬行速度达到了1.2 mm/s, 如图13(d)所示. 后期通过与多根TCPF人工肌肉和多关节结合, 能够实现软体机器人在多方向的运动.

香港科技大学的王煜团队^[28]仿照毛毛虫的结构, 设计了一款移动式软体机器人. 如图13(e)所示, 这种爬行软体机器人是由超卷绕型聚合物人工肌肉(supercoiled polymer artificial muscle, SCPAM)进行驱动的. 这种人工肌肉的制作材料是低成本的导电尼龙纤维, 因此整个机器人的造价低廉. 爬行软体机器人的移动依赖于底部结构的各向异性的摩擦系数和人工肌肉的伸缩. 实验表明, 这种软体机器人可以在0.16 W/cm的

图 13 (网络版彩图)软体机器人。(a) 自然界中的柔性结构和人造皮肤模仿的柔性结构^[58]; (b) 人造皮肤驱动示意图^[58]; (c) 爬行机器人驱动原理示意图^[59]; (d) 爬行机器人运动效果图^[59]; (e) 仿毛虫软体爬行机器人结构图^[59]; (f) 仿毛虫软体爬行机器人运动效果图^[28]; (g) 通用软体机器人模块驱动原理图^[60]; (h) 通过模块组合成不同的软体机器人^[60]; (i) 两指柔性机械臂实验效果图^[60]

Figure 13 (Color online) Soft robot. (a) Flexible structure in natural world and flexible structure imitated by artificial skin ^[58]; (b) schematic diagram of artificial skin driving ^[58]; (c) schematic diagram of driving principle of crawling robot ^[59]; (d) movement of crawling robot ^[59]; (e) structure of caterpillar-like crawler robot ^[59]; (f) motion of caterpillar-like crawler robot ^[28]; (g) a general soft robot driving module ^[60]; (h) combining modules to form different soft robots ^[60]; (i) experimental results of two-finger flexible manipulator ^[60].

功率输入下, 在木质地板上完成速度为0.245 mm/s的移动。图13(f)是仿毛虫软体爬行机器人运动效果图。但是目前这种软体机器人的人工肌肉通过空气进行冷却, 导致驱动速度偏低。在今后的研究中, 可以通过增加冷却装置和提高输入功率来提升爬行速度, 增加温度传感器来实现闭环控制, 添加转向器来实现变向移动, 使得整个仿毛虫爬行机器人系统更加完善。

TCPF人工肌肉还可以用于设计一种通用软体机器人模块^[60]。如图13(g)所示, 将3根TCPF人工肌肉环绕放置在软体机器人的躯体上, 通过控制不同的人工肌肉驱动, 可以实现软体机器人多自由度运动。这便是一个通用软体机器人模块。如图13(h)所示, 通过不同数量和排列方式可以得到不同的软体机器人。通过将两个软体机器人模块平行安置在基座上, 组成了一个两指柔性机械臂。图13(i)是柔性机械臂的实验效果图。这种通用软体机器人模块因为其体积小、组装灵

活、价格低廉的特点, 可以模块化的组合形成各种类型的软体机器人, 以适应不同的应用场合。

5.3 自驱动能量回收系统

TCPF人工肌肉的一个重要特点就是能够随着环境温度的改变发生变形驱动。因此不仅可以用于驱动还可以进行能量回收。

韩国汉阳大学的Kim等人^[61]利用聚合物捻卷型人工肌肉随着环境温度变化发生被动驱动的特点, 将环境(空气、水等)中被废弃的热量收集起来, 驱动发电机转子最终实现了电能的转化。这其中涉及热能-机械能-电能之间的转化。如图14(a)所示, 循环热水(95℃)和冷水(25℃)驱动聚乙烯人工肌肉分别发生收缩和伸长, 进而驱动电动机转动并产生电能。这样收集能源的方式, 既可以应用在大温差场合, 提高能量利用率, 也可以用来辅助开发物联网系统中常用的自供能传感

图 14 (网络版彩图)利用环境热能的自驱动系统. (a) 利用伸缩驱动来产生电能^[60](最下部的重物提供了肌肉的张紧力); (b) 新型人工肌肉驱动恒温调节器^[62]

Figure 14 (Color online) Self-power system using environmental heat. (a) Use telescopic drive to generate electrical energy ^[60] (the lowermost weight provides muscle tension); (b) new artificial muscle thermostatic regulator ^[62].

器. 不过, 这项应用目前的能量转化率还有待提高, 其中减轻系统整体质量、优化人工肌肉与电机之间的配

合方式都是需要研究的问题.

利用尼龙鱼线TCPF人工肌肉还可以实现一款新型恒温调节器^[62]. 如图14(d)所示, 这款恒温调节器主要由4根人工肌肉和1根弹簧并联排布构成. 使用时, 将其放在水中. 在不同的水温下, 人工肌肉会产生不同的形变, 并改变阀门开启或者闭合的程度, 对水温进行加热或冷却, 进而形成一种闭环恒温控制.

5.4 柔性传感器

美国科罗拉多州立大学的赵建国等人^[29]使用廉价的镀银导电尼龙材料制作了一款柔性传感器. 这种传感器的结构类似于捻卷型人工肌肉, 其制作方法简单, 只需加捻卷绕和热处理定形两个步骤. 由于导电材料的电阻随着长度和横截面积变化(分别成正比和反比关系), 当柔性传感器受力伸长时, 相邻线圈之间的接触状态随之改变, 整个弹簧线圈结构长度增加, 平均横截面积减小, 传感器电阻值上升. 通过实验, 对传感器电阻值与其长度的变化关系进行标定. 如图15(a)所示, 将柔性传感器应用于柔性机械臂弯曲程度的测定. 传感器布置在机械臂的一侧, 当机械臂发生弯曲时, 传感器长度发生变化, 测出电阻的变化值, 就可以计算得到长度的变化值(图15(b)), 再根据图15(c)所示

图 15 (网络版彩图)新型传感器. (a) 针对柔性机械臂设计的弯曲测量系统^[29]; (b) 柔性传感器电阻值随着柔性机械臂位移发生变化^[29]; (c) 柔性机械臂曲率测量示意图^[29]; (d) 使用柔性传感器测量机械臂弯曲度^[63]; (e) 可导电型聚合物纤维制作的TCPF^[63]; (f) 电阻变化率随着柔性机械臂弯曲角度发生改变^[63]

Figure 15 (Color online) New sensors. (a) A bending measurement system designed for a flexible manipulator ^[29]; (b) the resistance value of the flexible sensor changes with the displacement of the flexible manipulator ^[29]; (c) schematic diagram of measuring the curvature of the flexible manipulator ^[29]; (d) using a flexible sensor to measure the bending degree of the manipulator ^[63]; (e) TCPF made of conductive polymer fibers ^[63]; (f) the resistance change rate changes with the bending angle of the flexible manipulator ^[63].

几何关系计算出机械臂的弯曲程度。与传统的传感器相比,这种柔性传感器成本低廉,制作简便,在改进之后还可以作为驱动元件使用,因此在机器人闭环控制系统中有很好的发展前景。

除此之外,基于可导电型聚合物纤维(conductive polymer fibers, CPFs)也可以设计柔性传感器^[63]。这种柔性传感器结构和制备工艺都与赵建国等人制作的传感器类似,但在制作材料和工作原理上两者有所不同。如图15(e)所示,这种传感器直接使用CPF材料进行制作,尼龙材料中加入了石墨粉,本身就具有导电性,不需要再进行镀银。受力变形伸长时,CPF材料加捻程度增加,纤维受到拉伸,传感器的电阻值也随之增加。如图15(d)所示,这样的传感原理同样可以应用于柔性机械臂弯曲程度的测量。将柔性传感器布置在机械臂的内部,当机械臂弯曲时,传感器长度改变,电阻值也相应改变。如图15(f)就是通过实验测量并进行拟合得到的电阻变化率与柔性机械臂弯曲角度关系图。前一种传感器的电阻值由相邻线圈之间的接触状态决定,量程较小,而这种传感器的长度变化范围更大,量程也较大,依靠CPF柔性传感器建立的闭环系统能够适应各种输入信号,还具有寿命长、性能稳定的优点。

最近西安交通大学赵鹏飞等人^[64]将TCPF与光子晶体结合,制备了一种具有变色自传感人工肌肉。这种人工肌肉在变形时会通过颜色实时反映其变形和应变量。同时,该人造肌肉通过100 mA以下的电流即可成功驱动,对于实现驱动传感一体化的仿生器件具有重要的启示作用,如图16所示。

6 总结与展望

聚合物捻卷型人工肌肉具有制作简单、成本低廉、驱动性能优越、应用领域广泛的优点,也是学术界研究的热点。各国学者随即对这种新型人工肌肉进行研究,对人工肌肉的驱动原理进行分析,并在2014年最初的单一尼龙纤维人工肌肉的基础上进行不断改进,制备出性能更加卓越的TCPF人工肌肉。本文对TCPF人工肌肉的发展历程进行了介绍,讨论了TCPF人工肌肉的驱动原理和制备工艺,随后又从新材料和结构、驱动方式两大方面介绍了TCPF人工肌肉的改进与发展,最后又列举了TCPF人工肌肉在多领域的广泛应用。

图16 (网络版彩图)变色自传感TCPF人工肌肉。(a) 人工肌肉的自传感机理; (b) 实际驱动和自传感过程^[64]

Figure 16 (Color online) Color-changing self-sensing TCPF artificial muscle. (a) Self-sensing mechanism of artificial muscle; (b) actual driving and self-sensing process ^[64].

从这些研究成果来看, TCPF人工肌肉的发展日趋成熟,性能也不断得到提升,并更加接近于实际应用。但是,目前TCPF人工肌肉依然有一些可以进行发展与改进的方向。

(1) 与新型功能材料的组合。TCPF人工肌肉本身拥有伸缩性能好和柔顺性强的特点,将其与其他柔性的功能材料相结合,可以开发一些新型功能^[65]。

(2) 多材料的制备工艺。目前单根聚合物捻卷型人工肌肉的简单制备已经相对成熟。但是不同的材料组合以及不同的捻卷制备方式会造成不同的驱动性能,因此在材料选择和制备工艺上尚有研究空间。同时将其其他柔性功能材料(如传感材料等)与聚合物纤维结合到一起卷绕制成的TCPF人工肌肉其整体功能也将发生变化,这其中工艺与复合后性能机理及分析方法也值得深入研究。

(3) 驱动精度的提升。目前的TCPF人工肌肉具有驱动力大、行程大、寿命长等优点。但是由于其细小的几何直径和自身的柔性,它的传感和控制问题依然没有解决,其控制精度还无法得到保证,这对控制技术提出了挑战^[66]。除此之外, TCPF人工肌肉存在疲劳

效应, 如何实现高效的往复驱动性能也是有待解决的问题之一。

(4) 冷却技术的集成一体化. TCPF人工肌肉依靠冷却和受热实现收缩和舒张动作, 由于聚合物纤维材料本身的导热率偏低, 无法实现快速的升温降温, 这就限制了TCPF人工肌肉的动作频率, 导致驱动机器人的运动速度不够快. 使用额外的冷却设备虽然可以改善升降温情况, 但使整个结构变的庞大臃肿. 因此如何引入高效的冷却技术, 提升驱动频率也是一个值得

研究的问题。

(5) 应用领域的拓宽. TCPF的诸多特点使其具有广阔的应用前景, 除了点位驱动外, 在以下场合尤其适合其应用: 在大温差场合可以基于环境温度的变化产生自适应运动, 利用其基于温度变化的驱动方式, 可以节约大量能源, 开发自供能的系统; 由于TCPF可以编织, 同其他材料组合编织在一起, 获得具有复杂功能化的穿戴式设备, 如可以设计孔隙可变的纺织物, 通过控制TCPF, 实现一种温度或透气程度可调的智能织物。

参考文献

- Baughman R H. Conducting polymer artificial muscles. *Synth Met*, 1996, 78: 339–353
- Lima M D, Li N, de Andrade M J, et al. Electrically, chemically, and photonically powered torsional and tensile actuation of hybrid carbon nanotube yarn muscles. *Science*, 2012, 338: 928–932
- Shahinpoor M, Bar-Cohen Y, Simpson J O, et al. Ionic polymer-metal composites (IPMCs) as biomimetic sensors, actuators and artificial muscles—A review. *Smart Mater Struct*, 1998, 7: R15–R30
- Verrelst B, Daerden F, Lefeber D, et al. Pleated pneumatic artificial muscles: Actuators for automation and robotics. In: IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). Como, 2001. 738–743
- Leng J, Lan X, Liu Y, et al. Shape-memory polymers and their composites: Stimulus methods and applications. *Prog Mater Sci*, 2011, 56: 1077–1135
- Sharafi S, Li G. A multiscale approach for modeling actuation response of polymeric artificial muscles. *Soft Matter*, 2015, 11: 3833–3843
- Yang Q, Li G. A top-down multi-scale modeling for actuation response of polymeric artificial muscles. *J Mech Phys Solids*, 2016, 92: 237–259
- Zhang J, Sheng J, O'Neill C T, et al. Robotic artificial muscles: Current progress and future perspectives. *IEEE Trans Robot*, 2019, 35: 761–781
- Ding H, Yang X, Zheng N, et al. Tri-Co Robot: A Chinese robotic research initiative for enhanced robot interaction capabilities. *Natl Sci Rev*, 2018, 5: 799–801
- Kim S, Laschi C, Trimmer B. Soft robotics: A bioinspired evolution in robotics. *Trends Biotech*, 2013, 31: 287–294
- Majidi C. Soft robotics: A perspective—Current trends and prospects for the future. *Soft Robot*, 2014, 1: 5–11
- Gu G Y, Zhu J, Zhu L M, et al. A survey on dielectric elastomer actuators for soft robots. *Bioinspir Biomim*, 2017, 12: 011003
- Chen F J, Dirven S, Xu W L, et al. Soft actuator mimicking human esophageal peristalsis for a swallowing robot. *IEEE/ASME Trans Mechatron*, 2014, 19: 1300–1308
- Cui J, Chu Y S, Famodu O O, et al. Combinatorial search of thermoelastic shape-memory alloys with extremely small hysteresis width. *Nat Mater*, 2006, 5: 286–290
- Pelrine R, Kornbluh R D, Pei Q, et al. Dielectric elastomer artificial muscle actuators: Toward biomimetic motion. In: Proceedings of the SPIE 4695, Smart Structures and Materials 2002: Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD). San Diego, 2002. 126–137
- Brochu P, Pei Q. Advances in dielectric elastomers for actuators and artificial muscles. *Macromol Rapid Commun*, 2010, 31: 10–36
- Kovacs G, Düring L, Michel S, et al. Stacked dielectric elastomer actuator for tensile force transmission. *Sens Actuat A-Phys*, 2009, 155: 299–307
- Tawfik S, Tang Y. Stronger artificial muscles with a twist. *Science*, 2019, 365: 125–126
- Swartz A M, Ruiz D R H, Feigenbaum H P, et al. Experimental characterization and model predictions for twisted polymer actuators in free torsion. *Smart Mater Struct*, 2018, 27: 114002
- Haines C S, Lima M D, Li N, et al. Artificial muscles from fishing line and sewing thread. *Science*, 2014, 343: 868–872
- Park J, Yoo J W, Seo H W, et al. Electrically controllable twisted-coiled artificial muscle actuators using surface-modified polyester fibers. *Smart Mater Struct*, 2017, 26: 035048

- 22 Yang S Y, Cho K H, Kim Y, et al. High performance twisted and coiled soft actuator with Spandex fiber for artificial muscles. *Smart Mater Struct*, 2017, 26: 105025
- 23 Haines C S, Li N, Spinks G M, et al. New twist on artificial muscles. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2016, 113: 11709–11716
- 24 Kim K, Cho K H, Jung H S, et al. Double helix twisted and coiled soft actuator from spandex and nylon. *Adv Eng Mater*, 2018, 20: 1800536
- 25 Wu L, de Andrade M J, Rome R S, et al. Nylon-muscle-actuated robotic finger. In: *Proceedings of the SPIE 9431, Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems*. San Diego, 2015. 94310I
- 26 Hiraoka M, Nakamura K, Arase H, et al. Power-efficient low-temperature woven coiled fibre actuator for wearable applications. *Sci Rep*, 2016, 6: 36358
- 27 Mirvakili S M, Ravandi A R, Hunter I W, et al. Simple and strong: Twisted silver painted nylon artificial muscle actuated by Joule heating. In: *Proceedings of the SPIE 9056, The International Society for Optical Engineering: Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)*. San Diego, 2014. 90560I
- 28 Yang Y, Tse Y A, Zhang Y, et al. A low-cost inchworm-inspired soft robot driven by supercoiled polymer artificial muscle. In: *IEEE International Conference on Soft Robotics*. Seoul, 2019
- 29 Zhao J, Abbas A. A low-cost soft coiled sensor for soft robots. In: *Proceedings of the ASME 2016, Dynamic Systems and Control Conference (DSCC)*. Minneapolis, 2017. DSCC2016-9916, V002T26A006
- 30 Li T, Wang Y, Liu K, et al. Thermal actuation performance modification of coiled artificial muscle by controlling annealing stress. *J Polym Sci Part B-Polym Phys*, 2018, 56: 383–390
- 31 Di J, Fang S, Moura F A, et al. Strong, twist-stable carbon nanotube yarns and muscles by tension annealing at extreme temperatures. *Adv Mater*, 2016, 28: 6598–6605
- 32 Li K. Driving characteristics research and application of the twisted and coiled actuator (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018. 12–25 [李凯. 聚合物螺旋卷绕型人工肌肉的驱动特性研究及应用. 硕士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018. 12–25]
- 33 Simeonov A, Henderson T, Lan Z, et al. Bundled super-coiled polymer artificial muscles: Design, characterization, and modeling. *IEEE Robot Autom Lett*, 2018, 3: 1671–1678
- 34 Maziz A, Concas A, Khaldi A, et al. Knitting and weaving artificial muscles. *Sci Adv*, 2017, 3: e1600327
- 35 Folgheraiter M, Aubakir B, Varol H A, et al. Thermally-controlled coiled polymeric wire as a novel variable elastic element. In: *IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*. Munich, 2017. 466–471
- 36 Cho K H, Song M G, Yang S Y, et al. Super stretchable soft actuator made of twisted and coiled spandex fiber. In: *Proceedings of the SPIE 10163, Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)*. Portland, 2017. UNSP 101630W
- 37 Aziz S, Naficy S, Foroughi J, et al. Controlled and scalable torsional actuation of twisted nylon 6 fiber. *J Polym Sci Part B-Polym Phys*, 2016, 54: 1278–1286
- 38 Cho K H, Song M G, Jung H, et al. A robotic finger driven by twisted and coiled polymer actuator. In: *Proceedings of the SPIE 9798, Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)*. Vegas, 2016. 97981J
- 39 Xiang C, Yang H, Sun Z, et al. The design, hysteresis modeling and control of a novel SMA-fishing-line actuator. *Smart Mater Struct*, 2017, 26: 037004
- 40 Saharan L, Tadesse Y. Robotic hand with locking mechanism using TCP muscles for applications in prosthetic hand and humanoids. In: *Proceedings of the SPIE 9797, Bioinspiration, Biomimetics, and Bioreplication*. Vegas, 2016. UNSP 97970V
- 41 Yip M C, Niemeyer G. High-performance robotic muscles from conductive nylon sewing thread. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* 2015. Seattle, 2015. 2313–2318
- 42 Wu L, Jung de Andrade M, Saharan L K, et al. Compact and low-cost humanoid hand powered by nylon artificial muscles. *Bioinspir Biomim*, 2017, 12: 026004
- 43 Yip M C, Niemeyer G. On the control and properties of supercoiled polymer artificial muscles. *IEEE Trans Robot*, 2017, 33: 689–699
- 44 Hamidi A, Almubarak Y, Tadesse Y. Multidirectional 3D-printed functionally graded modular joint actuated by TCPFL muscles for soft robots. *Bio-des Manuf*, 2019, 2: 256–268
- 45 Tadesse Y, Wu L, Saharan L K. Musculoskeletal system for bio-inspired robotic systems. *Mech Eng*, 2016, 138: S11–S16
- 46 Wu L, Tadesse Y. Musculoskeletal system for bio-inspired robotic systems based on ball and socket joints. In: *Proceedings of the ASME 2016,*

- International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE). Phoenix, 2016. V04AT05A020
- 47 Wu L, Chauhan I, Tadesse Y. A novel soft actuator for the musculoskeletal system. *Adv Mater Technol*, 2018, 3: 1700359
- 48 Cho K H, Kim Y, Yang S Y, et al. Artificial musculoskeletal actuation module driven by twisted and coiled soft actuators. *Smart Mater Struct*, 2019, 28: 125010
- 49 Rus D, Tolley M T. Design, fabrication and control of soft robots. *Nature*, 2015, 521: 467–475
- 50 Egan P, Sinko R, LeDuc P R, et al. The role of mechanics in biological and bio-inspired systems. *Nat Commun*, 2015, 6: 7418
- 51 McEvoy M A, Correll N. Materials that couple sensing, actuation, computation, and communication. *Science*, 2015, 347: 1261689
- 52 Calisti M, Picardi G, Laschi C. Fundamentals of soft robot locomotion. *J R Soc Interface*, 2017, 14: 20170101
- 53 Seok S, Onal C D, Cho K J, et al. Meshworm: A peristaltic soft robot with antagonistic nickel titanium coil actuators. *IEEE/ASME Trans Mechatron*, 2013, 18: 1485–1497
- 54 Lin H T, Leisk G G, Trimmer B. GoQBot: A caterpillar-inspired soft-bodied rolling robot. *Bioinspir Biomim*, 2011, 6: 026007
- 55 Shepherd R F, Ilievski F, Choi W, et al. Multigait soft robot. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2011, 108: 20400–20403
- 56 Bartlett N W, Tolley M T, Overvelde J T B, et al. A 3D-printed, functionally graded soft robot powered by combustion. *Science*, 2015, 349: 161–165
- 57 Marchese A D, Onal C D, Rus D. Autonomous soft robotic fish capable of escape maneuvers using fluidic elastomer actuators. *Soft Robot*, 2014, 1: 75–87
- 58 Almubarak Y, Tadesse Y. Twisted and coiled polymer (TCP) muscles embedded in silicone elastomer for use in soft robot. *Int J Intell Robot Appl*, 2017, 1: 352–368
- 59 Tang X, Li K, Liu Y, et al. A soft crawling robot driven by single twisted and coiled actuator. *Sens Actuat A-Phys*, 2019, 291: 80–86
- 60 Tang X, Li K, Liu Y, et al. A general soft robot module driven by twisted and coiled actuators. *Smart Mater Struct*, 2019, 28: 035019
- 61 Kim S H, Lima M D, Kozlov M E, et al. Harvesting temperature fluctuations as electrical energy using torsional and tensile polymer muscles. *Energy Environ Sci*, 2015, 8: 3336–3344
- 62 Saharan L, Tadesse Y. A novel design of thermostat based on fishing line muscles. In: Proceedings of the ASME 2016, International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE). Phoenix, 2016. V014T07A019
- 63 Tang X, Li K, Liu Y, et al. Coiled conductive polymer fiber used in soft manipulator as sensor. *IEEE Sens J*, 2018, 18: 6123–6129
- 64 Zhao P, Xu B, Zhang Y, et al. Study on the twisted and coiled polymer actuator with strain self-sensing ability. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2020, 12: 15716–15725
- 65 Zhang P, Li G. Healing-on-demand composites based on polymer artificial muscle. *Polymer*, 2015, 64: 29–38
- 66 Tahara K, Hayashi R, Masuya K, et al. Rotational angle control of a twisted polymeric fiber actuator by an estimated temperature feedback. *IEEE Robot Autom Lett*, 2019, 4: 2447–2454

Progress of twisted and coiled polymer fiber artificial muscles and its application in soft robots

ZHANG YaKun, ZHANG Yu, LI Bo & CHEN GuiMin

State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Shaanxi Province Key Laboratory for Intelligent Robots, School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

Artificial muscle is a bio-inspired soft actuator that generates large output force and displacement with flexibility and compliance and can interact with humans and biological environments. Due to low load capacity, high hysteresis, and short life cycle of existing artificial muscles, a new kind of twisted and coiled artificial muscles based on polymer fibers, such as nylon, has been developed and called twisted and coiled polymer fiber (TCPF). This artificial muscle is capable of straining more than 40%, which has a load capacity of up to 100 times higher than that of a human muscle, has energy density of up to 5.3 kW/kg, and it is a hot topic in current research. This study reviews the development of state-of-the-art TCPF, focusing on fabrication and actuation mechanism, new materials and structures, improvements on actuation strategy, and applications in soft robotics. Current states are summarized and discussed for future development directions.

twisted and coiled polymer fiber artificial muscle, soft actuators, soft robots, thermal-mechanical-electrical coupling

doi: [10.1360/SST-2020-0033](https://doi.org/10.1360/SST-2020-0033)