

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.09.028

尼龙在人工肌肉中的应用研究进展

夏学莲¹, 陈华义², 刘依萍¹, 冯巧¹, 李联峰², 谢县委², 杨拯³, 颜艺斐¹

(1. 河南城建学院材料与化工学院, 河南平顶山 467036; 2. 河南神马华威塑胶股份有限公司, 河南平顶山 467000;

3. 平顶山纤美达材料科技有限公司, 河南平顶山 467232)

摘要: 本文介绍了尼龙材料在气动、电热及其他物理场驱动人工肌肉中的研究进展。在气动驱动方面, 概述了尼龙作为限制层或增强材料, 通过定向约束弹性体变形以实现可控弯曲、伸缩等运动的结构设计与性能特点; 回顾了从基础约束结构到高性能、高集成度气动系统的发展路径。在电热驱动方面, 介绍了基于表面金属化、涂覆导电层及与金属线复合等策略构建的尼龙基电热肌肉, 分析了其通过螺旋等几何结构将尼龙负热膨胀效应放大为宏观驱动的机制; 指出通过多材料复合与结构创新实现驱动、感知、热管理一体化是明确的发展趋势。在其他物理场驱动方面, 概述了尼龙在微波、光、电化学驱动方式下的响应机制与应用潜力。尼龙基人工肌肉的研究正从单一性能提升向多功能集成、从实验室演示向真实环境应用、从开环驱动向智能闭环系统发展, 其关键在于深化多物理场耦合机理理解, 突破异质材料界面稳定性与系统集成工艺等瓶颈。

关键词: 尼龙; 人工肌肉; 电热驱动; 气动驱动; 物理场驱动

中图分类号: TQ322.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)09-0248-07

A review on nylon-based materials for artificial muscles

XIA Xuelian¹, CHEN Huayi², LIU Yiping¹, FENG Qiao¹, LI Lianfeng², XIE Xianwei², YANG Zheng³, YAN Yifei¹

(1. School of Materials and Chemical Engineering, Henan University of Urban Construction, Pingdingshan 467036, China; 2. Henan Shenma Huawei Plastic Co., Ltd., Pingdingshan 467000, China; 3. Pingdingshan Xianmeida Material Technology Co., Ltd., Pingdingshan 467232, China)

Abstract: This paper reviews the research progress of nylon-based materials in artificial muscles actuated by pneumatic, electrothermal, and other physical fields. In pneumatic actuation, the structural design and performance characteristics of nylon as a constraint or reinforcement layer are summarized, where directional confinement of elastomer deformation enables controllable motions such as bending and extension. The development pathway from basic constrained structures to high-performance and highly integrated pneumatic systems is also traced. In electrothermal actuation, nylon-based electrothermal muscles fabricated through strategies such as surface metallization, conductive coating, and hybridization with metal wires are introduced. The mechanism by which it amplifies the negative thermal expansion effect of nylon into macroscopic actuation through geometric structures such as spirals is analyzed. It is emphasized that achieving integrated actuation, sensing, and thermal management through multi-material design and structural innovation represents a clear research trend. Regarding other physical field actuation (e.g., microwave, optical, electrochemical), the response mechanisms and application potential of nylon are outlined. Research on nylon-based artificial muscles is advancing from single-performance enhancement toward multifunctional integration, from laboratory demonstration to real-world application, and from open-loop actuation to intelligent closed-loop systems. Key challenges include deepening the understanding of multi-physical field coupling mechanisms and overcoming bottlenecks such as heterogeneous material interfacial stability and system integration processes.

Keywords: nylon; artificial muscles; electrothermal actuation; pneumatic actuation; physical field actuation

基金项目: 河南省科技研发计划联合基金项目(252103810115), 河南省科技研发联合基金项目(20250105), 河南省高等学校大学生创新训练项目(202611765045)

通信作者: 夏学莲, 博士, 副教授, 主要从事尼龙合成、改性及应用研究

收稿日期: 2026-06-18

引用格式: 夏学莲, 陈华义, 刘依萍, 等. 尼龙在人工肌肉中的应用研究进展[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(9): 248-254.

XIA Xuelian, CHEN Huayi, LIU Yiping, et al. A review on nylon-based materials for artificial muscles[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(9): 248-254.

人工肌肉是一类在刺激下可产生可逆形变的智能材料,广泛应用于软体机器人^[1]、康复医疗、可穿戴系统和仿生装置等。根据材料属性分为形状记忆聚合物、介电弹性体^[2]、离子聚合物-金属复合材料^[3]、液晶弹性体^[4-5]、纤维缠绕人工肌肉^[6]等。人工肌肉用于仿生驱动系统时应具备自适应响应、多单元协同特性,以实现复杂环境下的自然步态、缓冲着陆^[7]、高效鲁棒运动^[8]。然而,现有驱动器在应变与力平衡、响应频率、滞后、自感知精度及疲劳寿命等方面仍面临挑战,在智能控制^[9]、嵌入式能源等系统层面尚需突破。

尼龙凭借卓越的力学性能、独特的热各向异性、纺织兼容性以及成本低廉的优势,已成为开发高性能、多功能人工肌肉的重要材料基元。尼龙具有独特的负热膨胀效应,升高温度,轴向收缩、径向膨胀,将热能转化为机械功^[10]。尼龙具备良好的表面特性,易与银、铜、碳纳米管等导电材料复合实现电热转换,且复合结构能在形变过程中产生电阻、电容等信号变化,赋予“自感知”能力,为构建具有闭环控制能力的智能驱动系统^[11]提供了理想材料平台,成为软体驱动领域的重要研究方向^[12]。本文系统综述尼龙基人工肌肉在气动、电热及其他物理场驱动下的结构设计、驱动机制与性能特征,重点分析尼龙负热膨胀效应的形变放大机理及导电复合策略在驱动-感知集成中的进展;归纳该领域从性能优化向多功能集成的发展脉络,探讨多物理场耦合、界面稳定性等关键挑战,为智能驱动材料设计提供参考。

1 气动驱动尼龙人工肌肉

气动驱动以其高功率密度、柔顺性好、易实现大变形、响应快等特点^[13],在软体机器人领域占重要地位^[14]。通常由弹性体构成可膨胀气腔,尼龙限制层与之结合,当向气腔内通入正、负压时,弹性体膨胀、收缩。尼龙因其不可拉伸性,置于气腔一侧,以特定的角度缠绕或编织成鞘层,定向限制弹性体膨胀^[15],使气压沿未约束或约束弱的方向释放,转化为机械运动。气动驱动尼龙人工肌肉结构多样,包括经典的McKibben肌肉、褶皱式肌肉(PAMs)、基于纤维缠绕或编织限制层,以及平面型或三维结构。

Luo等^[16]用激光精确切割尼龙纱布、弹性膜等,并将其逐层堆叠、黏合制成具有腔室和多层结构的气动驱动器。尼龙因其优异的力学性能,布置于特定层,用于限制气动腔室在充气时的变形方向,从而实现可控的伸长、弯曲或扭转等运动模式。当空气注入封闭腔室时,弹性材料膨胀,尼龙等不可拉伸限制层定向约束变形方向。通过调控限制层的角度和位置实现不同运动模式,多个自由度协同控制实现复杂连续动作,如抓取、爬行或传递物体。刘文栋^[17]在封端的半圆柱空腔弹性体表面双螺旋缠绕尼龙纤维,制备人工肌肉。该致动器无需大型气泵提供高压,实现了低压驱动,且结构简单,仅含单个空腔,尼龙纤维与应变限制层协同约束实现非对称变形,弯曲性能稳定,可用于辅助手指康复训练。

为实现更高性能指标,Feng等^[18]将涂有热塑性聚氨酯(TPU)的尼龙织物热封形成气密腔室,尼龙在其中作为柔性

织物基底,与TPU共同构成气密腔室,为驱动器提供结构支撑和柔韧性,并利用其梳状区域构成的X交叉机制,制备X-PAMs人工肌肉。当腔内正压膨胀时,沿驱动器轴线做线性收缩运动,突破了传统气动肌肉将径向膨胀转化为轴向收缩的原理限制;收缩率高达92.9%,每千克质量、每千帕压力下的输出力为207.9 N,应变率峰值1 603.0%/s,比功率5 700 W/kg,综合性能优于McKibben肌肉在内的多种现有气动驱动器。开发褶皱织物气动人工肌肉(pfPAM)可达到轻质、高性能的目的,Banyarani等^[19]结合McKibben型气动肌肉的高力重比与褶皱式高膨胀收缩率优势,以华达呢织物为外壳,尼龙内衬为防漏层,形成多层软体致动单元;低压收缩率40%,力重比为1 000,兼具柔性与高输出力优势,为下一代康复机器人与可穿戴辅助设备提供了新型软体驱动与集成方案。追求高性能的同时还需考虑低成本,El-sayed等^[20]以硅胶乳胶管为气动腔体,外部以高强度尼龙线按30°螺旋角缠绕作为增强层,尼龙通过螺旋几何约束有效限制腔体径向膨胀,并将内部气压转化为轴向收缩所需的驱动力,制备了气动人工肌肉。该人工肌肉在0.5 MPa气压下收缩率30%,输出力98.1 N,与商用气动肌肉相比,每个人工肌肉具有5 g超轻质、19.62 N/g较高的质量归一化力重比、2美元低成本等优势。

在可穿戴领域应用时需满足舒适要求,Lu等^[21]将聚氨酯气囊两侧热封于尼龙基膜上,尼龙基膜作为不可伸长的柔性约束层,限制气囊在该侧的径向扩张,从而引导充气形变偏向另一侧,并利用编织带穿过切口形成偏置缠绕结构,制备了全柔性非对称膨胀气囊人工肌肉,充气时产生非对称形变,抑制穿戴侧对人体的挤压;0.07 MPa低压驱动收缩率51.09%,收缩力243.94 N,质量归一化力重比为27 100 N/kg,穿戴侧挤压力小于10 N,比传统矩形气囊肌肉降低89.61%。研究还致力于提升系统集成度,Hong等^[22]将涂有聚氨酯的尼龙织物经激光切割、超声焊接制成人工肌肉,其中尼龙织物作为柔性基底提供结构支撑与抗拉强度,并与聚氨酯层协同构成气密结构;将其置于上肢、背部辅助举重动作,集成微型气泵、电磁阀与控制电路于腰带中,实现无缆操作;实验表明,扁平充气人工肌肉(FIAMs)在轴向与弯曲状态下均表现出稳定的力-应变关系,循环测试中最大力衰减仅为1.52%。

气动驱动器普遍具有结构简单、成本低、功率密度高、能实现弯曲、伸缩、扭转等多种运动、输出力大等优点,但高度依赖外部气源和复杂的控制系统,集成度低、体积庞大、便携性差,限制了其在移动机器人或可穿戴设备中的应用。

2 电热驱动尼龙人工肌肉

电热驱动是尼龙基人工肌肉中研究最深入、应用最多的驱动方式。尼龙具有独特的负热膨胀效应,受热时非晶区分子链因熵弹性作用而卷曲,导致宏观轴向收缩,晶区分子链伸展,宏观上呈现径向膨胀^[23];停止加热后,尼龙冷却,恢复至初始长度^[24];这种热机械响应是尼龙人工肌肉工作的核心基础。在电热驱动过程中,尼龙既作为热-机械能量转换的

功能基体材料,又保障了加捻、卷绕等复杂结构的稳定性,为后续导电层的复合,以及形变过程中的应力传递提供了高强度、高柔韧性的结构支撑。当尼龙加捻、卷绕、编织出螺旋、超螺旋等复杂几何结构时,径向膨胀被放大,并转化为螺旋节距减小、轴向收缩或旋转的驱动力^[25]。尼龙66直纤维轴向收缩率约4%,通过螺旋结构收缩率可放大至35%以上^[26],扩大驱动行程、放大输出功。目前,该领域深入探讨了捻卷型尼龙人工肌肉形成机制、致动机理、制动特征、物理模型^[27]、内部应力应变场^[28],以及扭转测试方法、扭矩失稳理论^[29]等。将尼龙与导电材料复合,构建加热元件,可实现电热驱动,复合策略主要有表面金属化^[30]、涂覆导电层、与金属线复合^[31-32]等。

2.1 尼龙纤维表面金属化

通过化学镀、电镀或物理气相沉积等,在尼龙纤维表面形成一层均匀的金属涂层,使其表面金属化,镀银尼龙纤维是目前应用最广泛的前体材料之一^[33]。

Tsabadze等^[34]通过将镀银多股尼龙纤维卷绕成超螺旋,再次进行螺旋缠绕,制备“线圈中的线圈”人工肌肉复合结构。该设计整合了传统无芯轴卷绕尼龙肌肉的高输出力与芯轴卷绕尼龙肌肉的大应变这两大优势,性能提升显著,在稳定承载超过90 g负载的前提下,实现15%~55%的应变,解决了传统尼龙驱动器在力与应变之间难以兼顾的瓶颈。Liu等^[35]基于纱线力学与能量法,建立了扭转螺旋尼龙人工肌肉的力学模型,系统探究了制备条件与驱动载荷对其热驱动性能的影响。该研究通过银镀尼龙纤维在悬垂负载下扭转形成螺旋结构,并经180℃热处理定型,构建具有热致收缩特性的捻卷型人工肌肉(TCAMs)。理论模型结合Castigliano第二定理与分层空心圆柱假设,分析了纤维在制备与驱动过程中的几何演变与能量转化,揭示了悬垂负载对螺旋角、接触力及摩擦力的影响规律。实验表明,较小的制备负载有利于获得更大驱动行程,且在约1.43 N驱动负载下达到最大收缩应变。该模型预测与实验数据吻合良好,最大误差约5.8%,为高性能人工肌肉的优化制备与在智能织物、机器人等领域的应用提供了理论指导。在基础结构和理论方面的研究逐步完善后,科学家们致力于解决从单根尼龙人工肌肉走向集成应用的实际问题, Kim等^[36]将具有银涂层的尼龙与高弹性氨纶并行排列并共同扭转,形成以尼龙为芯、氨纶螺旋缠绕的双螺旋结构,制备了具备焦耳热驱动能力的双螺旋扭转卷曲致动器。该致动器在电热驱动下可产生大收缩力与大应变,但单根纤维输出力仍不足以应对大型应用。为解决多根纤维并联捆绑时因残余解捻扭矩导致的缠绕与摩擦问题,作者提出将顺时针与逆时针两种相反扭转方向的致动器配对组合,形成扭矩自补偿的致动器束。通过自动化设备精确控制预拉伸、扭转、卷绕及训练,使两种类型致动器在刚度、电阻与扭矩性能上高度一致(误差<8%)。最终构建的24根致动器束在98.1 N负载下实现31.3%的收缩应变,展现出在假肢、助力外骨骼等大负载软体机器人中的应用潜力。集

成化应用需对制备工艺系统化、量化研究, Garofalo等^[37]研究了基于镀银尼龙66纤维的扭转卷曲人工肌肉(TCAMs)的制备工艺与热机械性能,构建了集加捻、卷绕、热处理与性能测试于一体的实验平台,重点探究了电机转速(300~900 r/min)、制备负载(0.29~1.77 N)与驱动电流(0.15~0.6 A)对TCAMs收缩性能的影响。实验结果表明,TCAMs在电热驱动下可实现超过15%的收缩应变,输出力达2.5 N,且响应速度随驱动电流增大而提升;较低的电机转速与较高的制备负载有利于获得更优的收缩性能,而结构不稳定性则在高转速下加剧。尼龙也可与其他材料复合制备人工肌肉, Han等^[38]通过将高密度聚乙烯(HDPE)纤维与镀银尼龙(SPN)导线平行排列并共同扭转,诱导形成螺旋及超螺旋结构,构建了一种新型平行股螺旋结构电热驱动人工肌肉(PE@SPN纤维人工肌肉)。该结构利用SPN导线通电产生的焦耳热作为驱动热源,在热刺激下HDPE纤维发生轴向收缩与径向膨胀,螺旋几何结构进一步放大其形变,实现肌肉的伸缩驱动。该肌肉在约50℃的低温环境下即可工作,最大收缩应变达11%,比能量为140 J/kg,比功率为21 W/kg,且在2.5 MPa负载下具有良好的驱动稳定性,循环寿命可达10 000次。通过有限元模拟比较了并联型与外包型两种电热模式,发现并联型结构具有更优的温度分布与响应速度。研究还设计了基于该肌肉的仿生手指,通过多肌肉协同驱动实现了指关节的屈伸运动,展现出在软体机器人、假肢及可穿戴助力设备中的应用潜力。

还可设计多元驱动模式, Wang等^[39]将分别对水分和电热响应的黏胶螺旋纱与镀银尼龙螺旋纱进行组合,无需主客体复合或皮芯结构,构建具备收缩与扭转双响应功能的人工肌肉。水分或电热刺激使其径向膨胀产生解捻趋势,当一端自由时发生扭转,当受结构限制时发生轴向收缩。收缩肌的行程与输出力最高达25%~50%、60%~80%,适应多种环境刺激。通过结构优化可提升性能, Wang等^[40]通过“花环”编织机将液晶弹性体纤维(LCEF)与镀银尼龙纱线交织,构建出具有优异力学性能与电热驱动能力的复合结构。依赖LCEF中液晶基元在紫外光下通过迈克尔加成与光聚合两步反应,形成共价交联网络,锁定取向,实现宏观形状的编程与可逆驱动。该人工肌肉在0.6 V/cm的低电压下可达34%的可逆收缩与18.7 cN的驱动力,最大举重能力达自身重量的205倍。Dai等^[41]通过将镀银尼龙纤维加捻卷曲形成双螺旋结构,并进一步编织成三股绞合尼龙纤维人工肌肉。该肌肉基于焦耳热驱动,尼龙纤维受热后径向膨胀、轴向收缩,通过螺旋几何结构放大为宏观伸缩运动。该肌肉在8.5 V驱动下,可实现10.2%的拉伸行程、5.85 MPa的可逆拉伸应力及527.8 J/kg的比能量,并具备优异的循环稳定性,凸显了该肌肉在软体机器人、智能控制及仿生假肢等领域的应用潜力。前沿研究正致力于赋予人工肌肉生命体的韧性和智能。Dong等^[42]将镀银尼龙纤维缠绕并包裹弹性聚二甲基硅氧烷鞘层,构建了一种弹性驱动能力的人工肌肉纤维,在电热驱

动下可实现约50%的大幅度收缩,并具备感知-驱动一体化功能。弹性鞘层赋予纤维超弹性结构,即使被拉伸375%应变仍能完全回弹至初始螺旋状态,能在变负载、应变条件下稳定驱动。基于此弹性驱动特性,研究设计了拮抗结构肌肉纤维舵机,替代商用扑翼机尾部电动舵系统,在减重92%的同时实现了飞行姿态的有效控制,解决负载波动下的塑性变形难题,对扑翼机飞行姿态精准控制,向智能化、鲁棒化发展。

2.2 尼龙纤维表面涂覆导电层

涂覆导电层是构建尼龙人工肌肉的一种重要方法,将碳纳米管浆料^[43]、石墨烯复合物或导电聚合物涂覆、包裹或附着在尼龙纤维表面,形成导电层,实现电热驱动。

Qi等^[44]结合表面引发原子转移自由基聚合与化学沉积在尼龙弹簧表面接枝聚合物刷,有效解决了传统化学沉积中导电涂层与基底间的模量与表面能失配问题,进而通过离子交换固定PdCl₄催化剂,引导铜均匀牢固沉积,铜涂层通过化学键合与离子交换作用实现内部固定,确保铜涂层的高稳定性和导电连续性,制备铜涂层扭转螺旋尼龙弹簧人工肌肉(Cu-TCNS)。该肌肉4 s内可提起自重380倍的负载,实现42.85%的收缩率、超过1 000次的循环稳定性,以及67.78 J/kg的比能量与16.95 W/kg的比功率,温度分布均匀且响应迅速,性能显著优于传统铜线缠绕结构。该策略为高性能电热驱动人工肌肉的制备提供了新途径。Matharu等^[45]以尼龙6钓鱼线为基体,嵌入镍铬加热丝,通过加捻、卷绕与180 °C热处理构建电热驱动结构,将一锅法合成的石墨烯-介孔碳-镍-PVA纳米涂层溶液通过振荡与退火工艺在其表面形成均匀导热层,制备了带有镍铬合金加热丝的捻卷型聚合物纤维(TCPFL NR)人工肌肉。涂层提升了肌肉的热导率与驱动性能,在0.27 A电流下,涂层肌肉的驱动应变达48%,提升了41%;动态响应速度提升20%~40%,功耗降低6%~9%,并在0.1 Hz频率下实现超过75 000次循环的稳定驱动。该研究为提升电热驱动人工肌肉的响应速度、能效与寿命提供了有效的表面改性策略。导电层集成驱动、感知一体化是该领域研究前沿方向,Moon等^[46]将碳纳米管(CNT)鞘层包裹在尼龙纤维核心上,构建了一种兼具热驱动与自感知功能的螺旋复合纤维。通过尼龙核心热致收缩实现驱动,同时利用CNT鞘层在形变过程中与电解质接触面积变化引起的双电层电容改变,无需外部偏压即可产生132.8 mV的开路电压信号,实时自感知肌肉运动。当受到60 °C热刺激时,可逆收缩-松弛,通过优化卷绕负载与解捻工艺,最大收缩应变达31.7%。CNT鞘层在形变过程中电容改变、产生电压信号、实现自感知。Wang等^[47]通过将CNT增强的流体泵与尼龙基人工肌肉集成,开发了具备热管理-传感-驱动三功能一体化的流体冷却人工肌肉(FCAM)。该系统采用串联与并联两种构型,其中串联构型利用空心尼龙管作为肌肉主体,结合电热驱动与内置流体泵主动冷却,将冷却时间缩短至自然冷却的1/9,并实现高达67.6%的收缩应变与1 320 kPa的驱动应力,推动了

人工肌肉在高频、高负载场景下的实用化进程。

2.3 尼龙纤维与金属线复合

与金属线复合是将漆包铜线、镍铬丝^[48]等金属导线以平行、缠绕或编织的方式与尼龙纤维结合,金属线作为加热器,也常作为传感器。

Hu等^[49]通过将尼龙6单丝渔线进行定向扭转,并反向缠绕于金属芯棒形成异手性螺旋结构,两端固定热处理后实现热力学-扭转耦合,形成自支撑结构,制备热驱动人工肌肉纤维。加热时,尼龙纤维径向热膨胀被螺旋几何结构放大,驱动肌肉产生伸缩或旋转;冷却后部分应力恢复,实现可逆驱动。通过调控退火温度与驱动温度,可精确调节肌肉的可逆性与形态,120 °C时可逆伸长347%,180 °C以上部分形变不可逆,实现肌肉长度的重编程。该纤维肌肉具备多模式驱动能力,并成功应用于软体抓取、仿生运动及自适应器件中。该团队进一步引入复合结构以提升性能,通过将尼龙6单丝纤维加捻并自卷曲,将细铜线以反向于线圈方向缠绕在肌肉表面,制备了一种具有等长收缩与等张收缩双模驱动能力的螺旋聚合物人工肌肉,在20~180 °C热驱动下可实现20.1%的拉伸行程和1 300 J/kg的比能量;通过缠绕铜线实现电热驱动,可在低电压(≤ 1 V)下工作,并表现出良好的响应线性与可逆性。值得注意的是该肌肉在等长条件下可产生28.4 MPa的输出应力,约为人体骨骼肌的100倍;应用过程验证了其在大应力输出与大行程驱动方面的双重优势^[50]。Liu等^[51]将尼龙纤维与金属导线螺旋缠绕,退火稳定结构,将多根纤维并联组装成束状,通过外壳和热缩管固定,制备电热驱动传感器。当通电加热发生解捻,解捻转化为轴向收缩;停止加热后,尼龙逐渐冷却恢复原状;通过加热温度可调控扭矩,不同温度下材料的刚度也会发生变化。金属导线兼具加热与温度自感知功能,其电阻随温度变化,可精确控制温度与收缩量。应用于仿生机器人、康复设备、柔性抓持器、太阳能板展开装置。模仿生物肌肉的微观结构可优化尼龙人工肌肉的性能,Sun等^[52]将尼龙丝扭曲并缠绕漆包铜线作为加热元件制成智能驱动执行器,尼龙丝扭曲方法模仿染色体结构,构建扭曲、自卷曲、超卷曲结构。铜线通电生热,尼龙纤维受热径向膨胀解扭转,螺旋结构线性收缩。断电后停止加热,尼龙冷却收缩,执行器恢复原长,可实现抬举、投掷、跳跃、收缩、弯曲、扭转等动作。变形量与温度呈正相关,通过控制电流可实现精确的位移与力输出。

人工肌肉稳定、精确地控制非常关键,Zhou等^[53]将漆包铜线缠绕在已扭转的尼龙66纤维束上,施加适当负载使其自发卷曲形成螺旋弹簧状结构,经热定型制备出兼具驱动、加热与温度自感知功能的人工肌肉。尼龙66的负热膨胀特性使其受热时径向膨胀、轴向收缩,缠绕铜线通电加热时,尼龙温度升高,热膨胀产生解扭转扭矩,此扭矩作用于整个螺旋卷曲结构,导致螺旋节距减小,宏观上表现为肌肉的收缩。停止加热冷却后,纤维恢复原状。通过实时监测铜线电阻变化,可精确自感知其温度,实现对收缩位移的闭环控制;建立

了基于自感知温度的物理解析模型,能准确预测肌肉的驱动性能。将单个高性能驱动器巧妙组合,可产生新的运动模式和更大的输出功,Sun等^[54]提出了一种由尼龙66纤维交叉扭转人工肌肉单元ITAMU驱动的高流量软体泵,通电的漆包铜线加热使尼龙纤维解捻,产生径向膨胀与轴向收缩,并利用交叉的几何结构将单根肌肉的收缩放大为单元整体的大行程线性收缩。ITAMU在0.5 N负载下最大收缩比达41.2%,输出力达3.27 N。基于此驱动的软体泵在30 V低驱动电压下,实现了高达680 mL/min的最大流量和2.3 kPa的输出压力,其性能在流量方面显著优于基于DEA或EHDA的同类软体泵。该研究为开发大流量、低噪声、紧凑型的软体机器人驱动系统提供了一种有效的解决方案。不同驱动器在复杂系统中协同工作能模拟更高级的生物功能,Yin等^[55]将尼龙线与形状记忆合金线(SMA)线螺旋缠绕制备电热驱动复合肌肉。当电流通过SMA线产生焦耳热引发其收缩,同时尼龙因热膨胀系数差异也随之收缩,两者协同作用使复合肌肉整体缩短产生驱动力;电流断开材料冷却恢复原状。通过调节电流大小和持续时间,可精确控制收缩变形量和输出力。纤维阵列肌肉通过多根纤维的同步收缩,放大驱动效果,适用于软体手指的弯曲和抓取动作。Matharu等^[56]构建多层变形软结构,集成了快(SMA)和慢(尼龙缠绕镍铬丝)两种拮抗驱动肌肉、主动水冷系统、触觉和温度传感器,实现了类似生物皮肤的驱动、感知与热管理多功能一体化。人工肌肉向在严苛环境下具备高性能、完成复杂任务发展^[57]。Sun等^[58]受攀缘植物缠绕结构与海豹脂肪层启发,提出一种新型编织—扭转—植物卷曲人工肌肉(BPAM/ SBPAM),以尼龙66纤维与铜线为材料,通过预扭转、编织与螺旋卷绕工艺构建热驱动人工肌肉。该结构结合热绝缘硅胶层,显著抑制水下热耗散,使中心温度提升30.5 °C,并在300 g负载下实现40.0%的收缩率。研究进一步开发了基于弹性储能释放的快速驱动单元(RAU),实现水中180 rad/s的角速度,并构建仿生鳐鱼机器人,在单次驱动周期内完成105 mm直线位移与30°转向。该研究为热驱动人工肌肉在水下软体机器人中的应用提供了结构优化、热管理与运动控制方面的系统性解决方案。

研究还通过其他形式为尼龙螺旋纤维供热,如将聚丙烯梁加电压产生焦耳热,并将热量传导至与之接触的尼龙螺旋人工肌肉^[59];直接对尼龙线圈施加电压,利用线圈间接触点产生的焦耳热来实现尼龙肌肉的电热驱动^[60];通过温度箱对扭转尼龙6纤维进行加热^[61],或将液态金属合金注入空心尼龙纤维并封装,利用其导电性和流动性加热^[62]。电热驱动卷捻尼龙人工肌肉驱动方式直接、控制简便、能量密度高、易实现与感知功能一体化集成,通过几何结构将其负膨胀效应放大,实现大行程收缩与复杂运动。然而,其能量效率受限于焦耳热转换与散热过程,响应频率受热管理能力制约、循环寿命受界面稳定性与材料热老化影响,多功能集成伴随结构复杂化与工艺挑战,限制了其在高频响应、长期运行或极端

集成场景中的应用。

3 其他物理场驱动尼龙人工肌肉

除了气动、电热等主流驱动方式,尼龙材料也展现出对微波、光、电化学等物理场的响应能力,为其在无缆驱动、远程控制、密闭空间操作、与外界无线交互等特殊场景中应用提供解决方案。

微波驱动具有非接触、穿透性强、能量传输效率高等特点,适合于封闭空间或对电气隔离要求高的环境下远程操控。Aziz等^[63]通过将碳纳米管填充的高取向尼龙6纤维进行多股缠绕并形成螺旋状卷曲结构,制备了一种可由微波远程驱动的聚合物人工肌肉。其中,尼龙6纤维作为高取向基体材料,提供了轴向收缩与径向膨胀的各向异性热膨胀特性。该肌肉利用嵌入的碳纳米管吸收外部电磁能,在微波辐射下实现体积式加热,并借助高取向纤维独特的各向异性热膨胀特性(轴向收缩、径向膨胀),驱动螺旋结构产生线性收缩。实验表明,该肌肉在25~100 °C的微波加热过程中可实现约9.1%的可逆收缩应变,初始驱动速度达约0.8%/s,最大比能量约为200 J/kg,超过天然骨骼肌约5倍。该微波驱动人工肌肉无需外接电源,具备快速响应、高能量效率和良好可控性,适用于强电磁辐射环境下的远程操控软体机器人系统。光驱动同样具有非接触、远程控制的优点,调节光斑位置、大小和强度可进行精确驱动。Madani等^[64]在尼龙中掺入聚吡咯-氧化石墨烯光热颗粒,通过熔融挤出、高捻加捻、芯轴卷绕制备光驱动人工肌肉。该尼龙基体作为热响应结构材料,其负热膨胀特性在局部光热加热下产生非对称解捻,从而驱动弯曲。近红外激光照射下,光热转换引发局部解捻,驱动弯曲,通过螺旋手性、光照位置调控弯曲方向,响应迅速约1 s,远超向光性植物,制成器件可实现选择性翼部弯曲、自主追踪光源。电化学驱动基于离子在电极材料中的嵌入、脱出,或界面双电层的形成、改变,导致电极体积或形状变化,进而产生驱动,具有低驱动电压、大应变的特点。Wang等^[65]以尼龙为芯、CNT带为鞘,通过连续缠绕与加捻形成一种米级长度螺旋纱线肌肉(CNT@nylon),其中尼龙基体作为电化学驱动的核心动力源材料,通过尼龙的负热膨胀特性将加捻卷绕形成的螺旋几何结构显著放大,提供收缩驱动力,构建了可在空气中工作的电化学变形织物。与传统研究相比,降低了CNT用量、增大了CNT与电解质的接触面积,有效提升驱动体积。在0.5 mol/L的1-乙基-3-甲基咪唑四氟硼酸盐/碳酸丙烯酯电解液(EMIm-BF₄/PC)中,最大收缩行程率达26.4%、最大收缩速率15.8%/s、最大功率密度0.37 W/g,分别为纯CNT纱线肌肉的1.59、1.82倍和5.5倍。该织物在低驱动电压、空气工作能力、结构柔性和无显著发热等方面展现出优势。

基于微波、光、电化学等物理场驱动的尼龙人工肌肉,具有非接触能量传输、远程精准控制、环境适应性好等优势,可在封闭空间、无菌环境或电磁敏感等特殊场景下无缆驱动;然而,能量转换效率低、响应速度慢、应变或输出力有限,需

要特定能源或电解质环境,制约功率密度和整体性能提升。

4 总结与展望

尼龙凭借优异的力学性能、独特的负热膨胀效应,以及良好的加工性、复合性,成为人工肌肉领域的关键材料。在气动驱动人工肌肉中,尼龙作为不可拉伸的限制层,定向约束弹性体变形,将气压能转化为弯曲、伸缩或扭转运动,且尼龙的高强、轻质特性可显著提高力重比和穿戴舒适性。在电热驱动人工肌肉中,尼龙因其负热膨胀效应,经螺旋、超螺旋等几何结构放大为宏观驱动力,是热—机械能量转换的功能基体;同时,作为结构材料,支持表面金属化、涂覆导电层等多种电热策略。此外,尼龙能够赋予驱动器自感知潜能,为实现驱动、感知、热管理一体化奠定基础。在微波、光、电化学等其他物理场驱动中,尼龙凭借负热膨胀性、结构可设计性,实现了非接触、远程可控的响应性驱动,拓展了人工肌肉在密闭空间、无线操控等特殊场景的应用边界。总之,尼龙已从被动结构材料,成为主动驱动、多功能集成的核心动力材料,其作用贯穿于能量转换、形变放大、结构承载、感知反馈等关键环节。

面向机器人行业发展需求,尼龙基人工肌肉的未来研究、发展应重点关注以下方向。(1)高性能驱动系统。提升应变、输出力、响应频率、循环寿命等,突破在力、应变、速度之间权衡的瓶颈,满足机器人对高频动态、大负载应用场景的需求。(2)智能闭环驱动与感知集成。深入研究导电网络在形变过程中的电阻、电容、电压等信号变化规律,建立精确的自感知模型,结合机器学习算法,实现闭环控制,使人工肌肉具备感知反馈能力,为机器人提供自适应、高精度的柔顺驱动。(3)轻量化、集成化。面向可穿戴设备、移动机器人等应用领域,开发高度集成模块,采用柔性电路、微型化元件,达成无缆化、低噪声、低能耗、轻质的目标;探索多根肌肉纤维并联、拮抗编排,模仿生物肌肉组织,产生复合运动模式。(4)多物理场、多功能融合。深入研究力、热、电、光、化学等多场耦合机理,开发能够在水下、强辐射、高温差等复杂环境中稳定驱动的系统。将驱动与能量收集、自修复、变色、伪装等功能融合,赋予机器人更高的环境适应性、与任务多样性。通过上述研究方向的持续攻关,尼龙基人工肌肉有望在下一代柔顺、智能、仿生机器人系统中,发挥核心驱动作用,助推机器人技术向更高效、更安全、更智能的方向演进。

参考文献

- [1] LIU Z S, et al. *Materials Horizons*, 2021, 8(6):1 783–1 794.
- [2] YANG L, et al. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 489. DOI: 10.1016/j.ccej.2024.151402.
- [3] JIANG J, et al. *Advanced Intelligent Systems*, 2024, 6(3). DOI: 10.1002/aisy.202300568.
- [4] WU H Y, et al. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2024, 186. DOI: 10.1016/j.chaos.2024.115327.
- [5] GUO H S, et al. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(10). DOI: 10.1002/adfm.202312068.
- [6] HU X, et al. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2024, 309 (1). DOI: 10.1002/mame.202300252.
- [7] 赵顺. 基于串并联人工肌肉驱动的仿人行走机器人研究[D]. 长春: 吉林大学, 2023.
ZHAO Shun. Research on humanoid walking robot driven by series parallel artificial muscles[D]. Changchun: Jilin University, 2023.
- [8] HIGUERAS-RUIZ D R, et al. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2022, 17(4). DOI:10.1088/1748-3190/ac6e6d.
- [9] DU H Y, et al. *Smart Materials and Structures*, 2023, 32(10). DOI: 10.1088/1361-665X/acf1e8.
- [10] MURIN J, et al. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2024, 376. DOI:10.1016/j.sna.2024.115563.
- [11] DONG L Z, et al. *Accounts of Materials Research*, 2024, 5(5): 479–491.
- [12] LIU Y X. *Smart Bot*, 2025. DOI:10.1002/smb2.12005.
- [13] PETRŠ J, et al. *Advanced Intelligent Systems*, 2025, 7. DOI: 10.1002/aisy.202500310.
- [14] JAMIL B, et al. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2024, 11:277–289.
- [15] 范锐冰. 基于织物限制层的气动软体机械夹爪致动特性与反馈控制研究[D]. 上海: 东华大学, 2023.
FAN Ruibing. Research on the actuation characteristics and feedback control of soft gripper based on fabric constraint[D]. Shanghai: Donghua University, 2023.
- [16] LUO Y C, et al. *Advanced Intelligent Systems*, 2021, 3. DOI: 10.1002/aisy.202000257.
- [17] 刘文栋. 基于硅橡胶的气动软体致动器的结构设计性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2023.
LIU Wendong. Structural design and performance research of pneumatic soft actuators based on silicone rubber[D]. Shanghai: Donghua University, 2023.
- [18] FENG M, et al. *Science Advances*, 2023, 9(38). DOI: 10.1126/sciadv.adi7133.
- [19] BANYARANI P B, et al. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2024, 370. DOI:10.1016/j.sna.2024.115278.
- [20] EL-SAYED A E A, et al. *Smart Materials and Structures*, 2025, 34. DOI:10.1088/1361-665X/ae05dc.
- [21] LU J Y, et al. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2026, 39. DOI:10.1016/j.cjme.2025.100085.
- [22] HONG T, et al. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2025. DOI:10.1109/LRA.2025.3541377.
- [23] 朱震东. 共加捻法制备聚合物导电复合螺旋纤维及人工肌肉性能研究[D]. 成都: 四川大学, 2022.
ZHU Zhendong. Preparation of conductive coiled hybrid polymer fibers by co-twisting and research on actuation performance of artificial muscles[D]. Chengdu: Sichuan University, 2022.
- [24] LENG X Q, et al. *Chemical Society Reviews*, 2023, 52: 9 192–9 232.
- [25] HAINES C S, et al. *Science*, 2014, 343(6173):868–872.
- [26] 朱宏辉. 基于超螺旋聚合物人工肌肉的多功能软体机器人研究

- [D].南京:南京信息工程大学,2023.
- ZHU Honghui. Research on Multifunctional Soft Robots Based on Supercoiled Polymer Artificial Muscles[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2023.
- [27] 刘磊. 捻卷型聚合物人工肌肉的形成机制与致动特性研究[D]. 武汉:华中科技大学,2024.
- LIU Lei. Study on the formation mechanism and actuation characteristics of twisted and coiled polymer artificial muscles[D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology, 2024.
- [28] HIGUERAS-RUIZ D R, et al. Smart Materials and Structures, 2020, 29(2). DOI:10.1088/1361-665X/ab5e5a.
- [29] 胡建辉. 精密扭秤装置的改进及其在单纤维扭转力学性能测量中的应用[D]. 武汉:华中科技大学,2022.
- HU Jianhui. Improvement of the precision torsion balance and its applications in the measurement of torsional properties of single fibers[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022.
- [30] 朱震东. 高分子材料科学与工程, 2022, 38(7):136–142.
- ZHU Zhendong. Polymer Materials Science and Engineering, 2022, 38(7):136–142.
- [31] HAINES C S, et al. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2016, 113(42):11 709–11 716.
- [32] 王一伦. 热驱动螺旋卷绕型聚合物人工肌肉的制备与驱动特性研究[D]. 镇江:江苏大学,2022.
- WANG Yilun. The study on preparation and driving characteristics of thermally driven twisted and coiled polymer artificial muscles[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2022.
- [33] 戴靖. 仿生尼龙纤维柔性驱动器的结构设计和性能研究[D]. 长春:吉林大学,2025.
- DAI Jing. Structural design and performance of bionic nylon fiber flexible actuator[D]. Changchun: Jilin University, 2025.
- [34] TSABEDZE T, et al. Sensors and Actuators A: Physical, 2021, 331. DOI:10.1016/j.sna.2021.113018.
- [35] LIU G D, et al. Smart Materials and Structures, 2023, 32(1). DOI: 10.1088/1361-665X/aca455.
- [36] KIM K, et al. Materials Research Express, 2021, 8(11). DOI: 10.1088/2053-1591/ac2b7f.
- [37] GAROFALO S, et al. Engineering Proceedings, 2025, 85. DOI: 10.3390/engproc2025085001.
- [38] HAN Y L, et al. Fibers and Polymers, 2024, 25:3 151–3 163.
- [39] WANG Z P, et al. Smart Materials and Structures, 2023, 32. DOI: 10.1088/1361-665X/acdd3b.
- [40] WANG X, et al. Advanced Materials Technologies, 2023, 8. DOI: 10.1002/admt.202300814.
- [41] DAI J, et al. ACS Applied Polymer Materials, 2025, 7: 12 187–12 196.
- [42] DONG L Z, et al. Matter, 2025, 8. DOI: 10.1016/j.matt.2025.102281.
- [43] ZHU Z, et al. Matter, 2022, 5(4):1 092–1 103.
- [44] QI Y, et al. Sensors and Actuators A: Physical, 2024, 365. DOI: 10.1016/j.sna.2023.114918.
- [45] MATHARU P S, et al. Biomimetics, 2024, 9. DOI:10.3390/biomimetics9080458.
- [46] MOON J H, et al. MRS Communications, 2025. DOI: 10.1557/s43579-025-00866-y.
- [47] WANG L F, et al. Materials Horizons, 2025, 12:1 262–1 273.
- [48] MAXSON S, et al. Manufacturing Letters, 2024, 40:75–80.
- [49] HU X H, et al. Journal of Bionic Engineering, 2023, 20:1–10.
- [50] HU X Y, et al. National Science Review, 2023, 10(1). DOI: 10.1093/nsr/nwac198.
- [51] LIU S H, et al. Sensors and Actuators A: Physical, 2020, 315. DOI: 10.1016/j.sna.2020.112292.
- [52] SUN J, et al. Research, 2025, 8. DOI: 10.34133/research.0642.
- [53] ZHOU D, et al. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(10):10 374–10 384.
- [54] SUN J, et al. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(7):7 153–7 161.
- [55] YIN H B, et al. Advanced Robotics, 2020, 34(9):599–609.
- [56] MATHARU P S, et al. Smart Materials and Structures, 2024, 33 (11). DOI:10.1088/1361-665X/ad6a5a.
- [57] 富源. 纤维卷绕型人工肌肉驱动的仿生鳐鱼设计与实验研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2022.
- FU Yuan. Design and experimental research of bionic rays driven by twisted and coiled artificial muscles[D]. Harbin Institute of Technology, 2022.
- [58] SUN J, et al. Advanced Science, 2025. DOI: 10.1002/advs.20250 7572.
- [59] SALAHUDDIN B, et al. Polymers, 2021, 13(8). DOI: 10.3390/polym13081235.
- [60] KOTAK P, et al. Soft Robotics, 2024, 11(3):267–278.
- [61] CHEN Y P, et al. Smart Materials and Structures, 2025, 34. DOI: 10.1088/1361-665X/ade2c3.
- [62] 朱宇,等. 载人航天, 2025, 3(1):52–59.
- ZHU Yu, et al. Manned Spaceflight, 2025, 3(1):52–59.
- [63] AZIZ S, et al. Applied Materials Today, 2021, 23. DOI:10.1016/j.apmt.2021.101021.
- [64] MADANI Z, et al. Advanced Materials, 2024, 36. DOI:10.1002/adma.202405917.
- [65] WANG X B, et al. ACS Nano, 2024, 18:9 500–9 510.