

肌肉电刺激服装电极材料的研究进展

蒋云, 王恬雨, 肖学良, 陈天骄

(江南大学纺织科学与工程学院, 江苏无锡 214122)

摘要:柔性电极以其安全、舒适等特性代替传统医用 Ag/AgCl 湿电极片在肌肉电刺激服装中有着极大的发展空间。简述了肌肉电刺激服装的起源和发展, 并从电极结构、性能等方面综述几种常见柔性电极材料的研究现状, 分析肌肉电刺激服装电极材料未来的发展趋势, 认为柔性电极及其材料有很好的应用前景和 market 价值。

关键词:肌肉电刺激; 保健服装; 电极材料

中图分类号:TS 941 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-1928(2022)05-0385-05

Research Progress of Electrode Materials for EMS Muscle Electrical Stimulation Garments

JIANG Yun, WANG Tianyu, XIAO Xueliang, CHEN Tianjiao

(School of Textiles Science and Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: The flexible electrode replaces the medical Ag/AgCl wet electrode for its safety, comfort and other characteristics in the Electrical muscle stimulation clothing. And it developed greatly. In this paper, the origin and development of EMS clothing were briefly described, and several common flexible electrode materials were reviewed, including electrode structure, performance, and research status. Then future development trends were analyzed. It was found that flexible electrode and its materials had good application prospects and special market value.

Key words: electrical muscle stimulation, functional garment, electrode materials

随着物联网、人工智能等技术的发展, 可穿戴电子设备从 20 世纪 60 年代的一种思想雏形到如今可以通过软件支持和数据交互改变人们的生活方式, 成为未来智能服装的重要发展方向之一。肌肉电刺激 (electrical muscle stimulation, EMS) 服装作为一种智能穿戴正在逐渐融入人们的生活。文中通过对 EMS 服装电极材料的综述, 分析其发展方向, 为 EMS 服装研发提供参考。

1 肌肉电刺激与肌肉电刺激服装

1.1 肌肉电刺激起源

中国每年有数百万人因疾病或损伤导致不同

程度的肢体运动功能障碍^[1]。功能性电刺激 (functional electrical stimulation, FES) 是一种改善人体机能失调、恢复丧失机能的重要方法, 其主要原理是神经细胞受到刺激后细胞膜对 Na^+ , K^+ 等离子的通透性改变, 膜内外电势变化产生动作电位^[2]。用电刺激来帮助人体功能恢复和重建始于 1961 年, LIBERSON W 等^[3] 利用腓肠肌刺激成功矫正了偏瘫患者足下垂问题。自 20 世纪 80 年代, FES 的研究在电极及其使用、传感器、刺激系统等方面都取得了很大发展, 并由体表刺激发展到经皮刺激。EMS 是建立在肌肉支配神经完好基础上的 FES。研究证明, EMS 能促进血液循环, 防止产生肌肉萎

收稿日期: 2022-05-20; 修订日期: 2022-08-11。

基金项目: 浙江省清洁染整技术研究重点实验室开放基金项目 (QJRZ1907); 江南大学大学生创新训练基金项目 (1065081501200040)。

作者简介: 蒋云 (1970—), 男, 教授, 硕士生导师。主要研究方向为纺织结构符合材料用预成型体设计与制备、预成型体装备机械化与自动化。Email: jiangyunjg@jiangnan.edu.cn

缩和褥疮,还能促进人体产生吗啡多肽,起到镇痛的效果^[4]。只要刺激电流幅度和刺激频率控制在安全范围内,EMS 就是安全有效的。

1.2 肌肉电刺激服装

现代人多数处于亚健康状态,久坐导致颈肩周围肌肉韧带劳损,关节失稳,颈肩腰背酸痛^[5]。在此背景下,EMS 服装的主要市场需求为疾病预防和身体保健,即用于人体健康、运动状态检测等,并且在军事领域也有很大发展前景。EMS 服装能长期采集人体生物电信号,在急病发生前预警,使患者快速得到救助,为预防心脏疾病、慢性疾病和术后康复等提供重要数据,缓解老龄化带来的社会 and 医疗压力^[6]。

电极是 EMS 服装的核心元件,是保证系统工作的必要条件。电极与人体直接接触,需要尽量减少接触阻抗,以获得稳定的生理信号;同时电极材料应无毒无害,避免引发过敏等不良反应。生物医用电极按功能主要分为刺激电极和检测电极,按使用范围可分为体表电极和植入电极^[7];EMS 服装为保证穿着舒适性一般都采用柔性电极。

2 EMS 服装中电极材料的研究进展

柔性电极是柔性传感材料及其设备的必要组成部分^[8]。它绿色环保、安全性高、寿命长、成本低、可燃性低,并且可在弯曲、拉伸或扭曲的状态下工作,有多层卷绕、性能倍增的特性,常用于柔性医疗传感器、可穿戴式传感器、智能曲面材料^[9]等,也因适应性强、舒适亲肤、循环稳定性好^[10]的特性倍受研究者关注。

2.1 传统医用电极

传统 Ag/AgCl 电极一般由电极芯、Ag/AgCl 层、导电凝胶、无纺布等组成,贴合方便,信号稳定,但使用时需要在皮肤表面涂抹导电胶。早先电极中的 Ag/AgCl 层要用电镀/电解等复杂工艺制备,作为一次性电极^[11]在国内售价昂贵。随着研究深入与技术改良^[12],如今 Ag/AgCl 电极制造方便,价格便宜,能在低电流条件下将离子电流转换成电子电流,且电信号基线稳定,抗干扰能力强。

Ag/AgCl 电极作为一种需要导电胶来实现与皮肤稳定接触的湿电极,受环境或噪音影响较小,但长时间使用时,电极与皮肤间的凝胶会逐渐脱水干燥,导致接触不良^[13]和测量误差。贴合 Ag/AgCl 电极时需去除体表角质层,移除电极时凝胶也会连带移除一层或多层角质,使皮肤受损,引发红肿过敏等问题。因此 Ag/AgCl 电极不适合长期频繁使用。

2.2 纤维素基柔性电极

纤维素是自然界中一种轻质、生物相容性好、柔韧性强的生物高分子材料,兼具环保低价、可再生等优点,广泛用于各行业。纤维素基材料在电刺激服装、生物传感器发展中扮演着重要角色。

纤维素在柔性电极中可起到稳定剂和分散剂的作用,用其制备电极材料的方法有很多种。一种较为简单的方法是直接将纤维素分散,让其在电极中做骨架,发挥支撑作用。另外,可将纤维素与其他材料复合,制备性能更好的复合电极材料;也可将纤维素制成纸、膜等,做柔性基底或隔膜,负载其他导电材料^[14]。溶解纤维素时将导电活性材料混合入溶解体系,可制得以溶解再生纤维素做骨架的均一结构电极^[15]。此外,纤维素种类很多,如纳米纤维素、细菌纤维素、纤维素基衍生物等,都可用来制备柔性电极。其中细菌纤维素以其独特的三维网络结构、高比表面积、高结晶度、超强的力学性能、丰富的表面活性位点等特性,成为理想的柔性基底材料^[16]。

纤维素多孔疏松,为电解质提供了传导通道。纤维素基材料优异的柔韧性和电化学性也为电极活性材料的研究和结构设计提供了更多的可能性,但使其兼具高柔性、高模量和高导电性是目前还需突破的难关^[17]。未来纤维素基电极会在 EMS 服装发展中发挥重要作用,此外,将其他电极材料制成纤维状^[18],也可以突破许多材料的局限。

2.3 纸基柔性电极

近年来纸张以柔韧、质轻、价低且环保的优势成为柔性电极材料的研究重点,纸表面有一些微结构^[19]能提高柔性电极的性能。纸基电极在运动监测等方面也有巨大优势,良好的亲和性利于提高肌肉电刺激服装的穿着舒适性。目前纸基柔性电极已有所应用,如纸基印刷线路板、基于织物的可穿戴纺织应变传感器和压力传感器等。

纸类材料具有多样性,纸基柔性电极的结构设计也很多变,目前主要有“三明治”(叠层结构)和“平面”(叉指结构)两种。纸基柔性电极只需一些如蒸发/溅射金属、表面涂布导电材料等简单的处理就可直接作为集流体使用;或通过电化学沉积、原位聚合等方法在现有电极的基础上生长电活性材料后作为电极^[20],不需引入其他的导电剂和黏结剂。制备纸基柔性电极首先要选择合适的基底,EMS 服装的面料以及与基底复合的材料是影响纸基底选择的首要因素,此外还要考虑纸的孔隙率、表面粗糙度、强度和成本等。目前造纸技术已

相当成熟,有高达上百种纸可以选择,还可定制或对固有纸类进行处理以达到要求。纸基柔性电极的制备方法主要有印刷法、铅笔图画法、原位聚合、抽滤法和物理化学沉积法等。纸基柔性电极也存在不足,如纸张表面微观形貌粗糙不利于导电油墨附着,影响基底与涂层材料结合等。纸基柔性电极在 EMS 服装中的应用还有待研究和开发^[21]。

2.4 织物电极

织物电极是一种可用于长时间监测人体生理信号的柔性干电极^[22]。将一种或多种导电材料用纺织技术加工成织物电极并编入服装面料就可以采集人体皮肤表面的微弱电信号,织物电极柔软舒适、信号稳定,在柔性电极和智能服装中有着广阔的发展前景。

织物电极材料一般可分为极化金属、非极化金属、聚合物镀层金属、导电聚合物、纳米级有机硅和碳黑等。如银纤维是将一层纯银通过特殊技术永久结合在纤维表面,其织物不仅有纺织品属性,还完美保留了银金属优秀的电学特性,这种织物电极透气性、透湿性好,穿戴舒适,不会损伤皮肤^[23]。

除材料外,不同的纺织结构和织造方法也会影响织物电极的性能。如机织织物电极是用导电纱线通过经纬方向相互交织而成,结构稳定、均匀一致^[24];而针织织物电极由导电纱线相互钩套形成,容易松垮形变、起毛勾丝,影响电极性能^[25]。此外,还有生产流程短、成本低、力学性能好的非织造织物电极,灵活、方便的刺绣织物电极^[26],以及用两种或多种材料复合制备的织物电极,如将碳纳米管等材料与织物或纤维复合制成导电性好、穿戴舒适的织物基柔性电极^[27]。

2.5 碳基电极

碳材料的力学性能和导电性极好,生物质碳材料更是廉价环保,其比表面积高且有多孔结构^[28],既可与高分子材料复合,也可直接用作柔性电极基底^[29],在 LIBs、超级电容器和催化材料等方面有着巨大的应用前景。碳元素可形成多种不同结构的电极材料,如碳纤维、碳纳米管、石墨烯、碳气凝胶和活性炭等^[30],并且各自性能不同。

2.5.1 碳纤维电极 碳纤维密度低,可耐超高温、耐腐蚀,导电性能和力学性能优秀,且纵横比较宽,以上性能使碳纤维成了电子传送的良好材料。将碳纤维和其他金属化合物复合可有效弥补其自身缺点,提高拉伸强度。但碳纤维剪断强度较弱,对加工技术要求较高,且复合材料屏蔽性差,易受外界环境影响。

碳纤维基柔性电极的制备方法有涂覆法、浸渍法、气象沉积法、溶剂热法、真空抽滤法和静电纺丝法等,但每种方法都有弊端。现阶段碳纤维基柔性电极不能实现稳定高产,难以商业化大规模生产。

2.5.2 碳纳米管电极 自碳纳米管(CNTs)被发现,其凭借独特的多孔结构、大比表面积、良好的导电导热性及高强度的机械性能一直备受关注。碳纳米管制备柔性电极通常有两种形式:①与柔性基底复合,前者提供导电性,后者确保力学性能;②用碳纳米纸做柔性基底,碳纳米管以不同的形式既提供导电性,又确保力学性能。碳纳米管与柔性基底复合会降低电极中活性物质的比例,因此第2种复合方式更受欢迎,但碳纳米管易弯曲缠绕,导致团聚,大幅降低了电极的性能。

2.5.3 石墨烯电极 石墨烯作为一种新型纳米材料,是公认的有巨大潜力的电极材料^[31],在目前已发现材料中最薄、强度最大,且有高载流子迁移率^[32]、高导电性、高导热性。

石墨烯的片层结构和大比表面积能让电荷或离子快速传播,但在生产中也易因化学键作用及范德华力导致片层间团聚、堆叠^[33],这种团聚效应会降低石墨烯的有效面积,减缓电荷的扩散速度。研究证明,掺杂杂原子或引入多孔结构(如复合 MnO_2)等方法可有效克服团聚效应,既确保电子快速迁移,又可进一步改善电极性能^[34]。另外,也可用氧化还原法制备或改性石墨烯,使其携带含氧官能团,提高它的亲水性和在极性溶剂中的分散性,使石墨烯更易被化学改性^[35]。为满足不同结构的柔性电极,石墨烯可制成一维纤维、二维薄膜和三维泡沫^[36]等结构。柔性电极中石墨烯主要应用方式为:①以纸、无纺布等高分子材料为柔性基底,通过浸润、涂覆等技术将石墨烯分散在基底上用作导电增强相;②以石墨烯薄膜为基底,石墨烯既是柔性基底又是导电相。

目前,石墨烯制备工艺复杂、成本高,实际性能远低于理论值,石墨烯复合材料的复合方法、模式和比例都会影响最终电极的结构和性能。因此关于石墨烯电极的研究还需深入。

2.6 金属氧化物基柔性电极

金属氧化物种类很多,不同的金属氧化物因其性能不同,应用范围也有所差异。一般可用作电极的金属材料主要有过渡金属氧化物/氢氧化物^[37]、碳材料/过渡金属氧化物^[38]、混合金属氧化物、其他物质(如聚吡咯^[39])与金属框架复合等。

过渡金属氧化物储量丰富,有多重氧化态,适

用于低成本的柔性电极材料。一元过渡金属氧化物导电性极差,不可直接用作电极材料,但可与柔性基底牢固结合且不改变基底柔性。基于此,可将导电聚合物与上述基底复合成三元电极,充分发挥所有材料的优势,或将过渡金属氧化物与导电柔性基底(如碳纸、碳布)复合制得二元电极。双金属氧化物是过渡金属氧化物的一种,常被用作电极材料,类似的还有单金属氧化物。双金属氧化物的优势在于其含有两种不同价态的过渡金属阳离子^[40],活性位点更多,更易发生氧化还原反应。电极材料中,混合金属氧化物在很大程度上发挥单金属氧化物和双金属氧化物的共同优势,也能进一步改善电极性能。

3 结 语

柔性可穿戴设备结合了生物传感、智能识别、柔性显示、无线通信等前沿技术,现已在人体健康管理、运动数据监测、日常休闲娱乐和便携移动支付等领域应用。肌肉电刺激服装作为智能服装的一种,在人体保健等方面有着非常重要的研究价值。柔性电极是柔性可穿戴设备的核心部件,电极材料是不可缺少的组成部分。柔性电极及其材料正在展现出更好的应用前景和非凡的市场价值。

参考文献:

- [1] 尹琪敏,李晓欧,刘巧红. 具有表面肌电反馈的功能性阵列电极电刺激系统设计[J]. 生物医学工程学杂志, 2020, 37(6): 1045-1055.
YIN Qimin, LI Xiaou, LIU Qiaohong. Design of functional array electrode stimulation system with surface electromyography feedback[J]. Journal of Biomedical Engineering, 2020, 37(6): 1045-1055. (in Chinese)
- [2] 彭谦. 基于柔性电极阵列微电流刺激的虚拟触觉反馈研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- [3] LIBERSON W, HOHNQUEST H, SCOT D, et al. Functional electrotherapy: stimulation of the peroneal nerve synchronized with the swing phase of the gait of hemiplegic patients [J]. Archives of Physical Medicine and Rehabilitation, 1961(42): 101-105.
- [4] 欧道阳, 石萍, 杜佳昊, 等. 基于电刺激的多模式康复系统设计和研究[J]. 上海理工大学学报, 2020, 42(2): 194-200.
OU Daoyang, SHI Ping, DU Jiahao, et al. Design and study of multi-mode rehabilitation system based on electrical stimulation technology [J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2020, 42(2): 194-200. (in Chinese)
- [5] 陈慧娴, 鲁虹. 电理疗功能服装的开发需求调研与分析[J]. 毛纺科技, 2020, 48(11): 68-73.
CHEN Huixian, LU Hong. Research and analysis on the development of electric physiotherapy functional clothing [J]. Wool Textile Journal, 2020, 48(11): 68-73. (in Chinese)
- [6] 叶华标, 周金利, 杨红英, 等. 可穿戴电极采集心电图的原理与研究进展[J]. 纺织导报, 2019(5): 42-45.
YE Huabiao, ZHOU Jinli, YANG Hongying, et al. Principle and research progress of wearable electrodes collecting ECG[J]. China Textile Leader, 2019(5): 42-45. (in Chinese)
- [7] 周伟, 刘伟, 邱清富, 等. 生物医用电极制造技术及应用研究进展[J]. 科学通报, 2015, 60(15): 1352-1360.
ZHOU Wei, LIU Wei, QIU Qingfu, et al. Development, fabrication, and applications of biomedical electrodes[J]. Chinese Science Bulletin, 2015, 60(15): 1352-1360. (in Chinese)
- [8] 宋利黎, 韩颖慧, 李玉娟, 等. 柔性超级电容器电极材料研究进展[J]. 电源技术, 2019, 43(2): 354-356.
SONG Lili, HAN Yinghui, LI Yujuan, et al. Research progress of flexible supercapacitor electrode materials[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2019, 43(2): 354-356. (in Chinese)
- [9] 申婧文. 高活性柔性电极材料的制备及性能研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2020.
- [10] DELBARI S A, GHADIMI L S, HADI R, et al. Transition metal oxide-based electrode materials for flexible supercapacitors: a review[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 8(857): 1-21.
- [11] 张驰, 魏德健, 曹慧. 用于心电信号采集的织物电极技术的研究进展[J]. 生物医学工程学杂志, 2018, 35(5): 811-816.
ZHANG Chi, WEI Dejian, CAO Hui. Research progress on fabric electrode technologies for electrocardiogram signal acquisition[J]. Journal of Biomedical Engineering, 2018, 35(5): 811-816. (in Chinese)
- [12] 马恩慧, 文学, 戴莹菲, 等. 基于移液器吸头的微型全固态 Ag/AgCl 参比电极的制备及其性能[J]. 化工设计通讯, 2020, 46(5): 140-143.
MA Enhui, WEN Xue, Dai Yingfei, et al. Preparation and performance research of micro all-solid Ag/AgCl reference electrode based on pipette tip[J]. Chemical Engineering Design Communications, 2020, 46(5): 140-143. (in Chinese)
- [13] 马美静, 刘丽妍, 高新华, 等. 基于新型材料的柔性生物电干电极的研究进展[J]. 现代纺织技术, 2021(4): 18-26.
MA Meijing, LIU Liyan, GAO Xinhua, et al. Research progress of flexible biopotential dry electrodes based on new materials [J]. Advanced Textile Technology, 2021(4): 18-26. (in Chinese)
- [14] MUTHOKA R M, ROY S, KIM H C, et al. Polydopamine-

- cellulose nanofiber composite for flexible electrode material[J]. Smart Materials and Structures, 2021, 30(3):11-19.
- [15] 邢健雄,郑凯,韩尊强,等. 纤维素基电极材料在柔性超级电容器中的应用研究进展[J]. 林产化学与工业, 2019, 39(4):9-17.
- XING Jianxiong, ZHENG Kai, HAN Zunqiang, et al. Research progress on application of cellulose-based materials as electrode in flexible supercapacitor[J]. Chemistry and Industry of Forest Products, 2019, 39(4):9-17. (in Chinese)
- [16] 周浩. 自支撑纤维素基柔性电极材料的制备及电化学性能研究[D]. 西安:陕西科技大学, 2020.
- [17] 李仁坤,王习文. 石墨烯/MnO₂/纳米纤维素柔性电极材料的制备及其性能研究[J]. 中国造纸, 2020, 39(10):8-14.
- LI Renkun, WANG Xiwen. Preparation and properties of graphene/MnO₂/nanocellulose flexible electrode material[J]. China Pulp and Paper, 2020, 39(10):8-14. (in Chinese)
- [18] 李聪聪,顾杰,毕引霞,等. 纤维状柔性电极的研究进展[J]. 广州化工, 2020, 48(18):3-5.
- LI Congcong, GU Jie, BI Yinxia, et al. Research progress on fiber-shaped flexible electrodes[J]. GuangZhou Chemical Industry, 2020, 48(18):3-5. (in Chinese)
- [19] 张建,张鹏,陈昱丞,等. 基于纸基电极的柔性电容式压力传感器[J]. 微纳电子技术, 2021, 58(3):233-237, 253.
- ZHANG Jian, ZHANG Peng, CHEN Yucheng, et al. Flexible capacitive pressure sensor based on paper-based electrodes[J]. Micronanoelectronic Technology, 2021, 58(3):233-237, 253. (in Chinese)
- [20] 周嵬,张云龙,崔朝军,等. 纸基柔性电极材料研究进展[J]. 化工新型材料, 2020, 48(6):6-8, 14.
- ZHOU Wei, ZHANG Yunlong, CUI Chaojun, et al. Research progress on paper-based flexible electrode material[J]. New Chemical Materials, 2020, 48(6):6-8, 14. (in Chinese)
- [21] 李克伟,谢森培,李康,等. 织物/纸基柔性印刷电子薄膜导电性能研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(6):200-206.
- LI Kewei, XIE Senpei, LI Kang, et al. Study on conductivity of fabric/paper-based flexible printed electronic films[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(6):200-206. (in Chinese)
- [22] 金佳勤,于淼,王侠,等. 基于柔性传感技术的压力监测运动裤设计[J]. 服装学报, 2022, 7(3):202-208.
- JIN Jiaqin, YU Miao, WANG Xia, et al. Design of pressure monitoring sports pants based on flexible sensing technology[J]. Journal of Clothing Research, 2022, 7(3):202-208.
- [23] 尹明,汤如,韩柯,等. 新型银纤维织物心电电极替代传统银/氯化银心电电极片的可行性研究[J]. 中国医疗设备, 2021, 36(1):69-74.
- YIN Ming, TANG Ru, HAN Ke, et al. Study on the feasibility of replacing the Ag/AgCl ECG electrode with a new ECG electrode[J]. China Medical Devices, 2021, 36(1):69-74. (in Chinese)
- [24] 温东伟. 心电监测用织物电极的设计与研究[D]. 天津:天津工业大学, 2018.
- [25] 张佳慧,王建萍. 圆形纬编针织物电极导电性能及电阻理论模型构建[J]. 纺织学报, 2020, 41(3):56-61.
- ZHANG Jiahui, WANG Jianping. Electric conduction and resistance theory model of circular weft knitted electrodes[J]. Journal of Textile Research, 2020, 41(3):56-61. (in Chinese)
- [26] 肖学良,董科,何文涛,等. 可穿戴电子服装中织物电极的研究进展[J]. 服装学报, 2017, 2(1):1-6.
- XIAO Xueliang, DONG Ke, HE Wentao, et al. Research progress of electrodes in wearable electronic garments[J]. Journal of Clothing Research, 2017, 2(1):1-6. (in Chinese)
- [27] 杨静,刘艳君. 织物基柔性超级电容器电极材料的研究进展[J]. 棉纺织技术, 2017, 45(10):79-84.
- YANG Jing, LIU Yanjun. Research progress of fabric based flexible electrode material in supercapacitor[J]. Cotton Textile Technology, 2017, 45(10):79-84. (in Chinese)
- [28] ZHENG Y, NI D J, LI N, et al. Nano-channel carbon fiber film with enhanced mechanical and electrochemical properties by centrifuged electrospinning for all-solid-state flexible symmetric supercapacitors[J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2021, 316.
- [29] 白方磊,叶文豪,叶家铭,等. 碳基柔性电极材料的研究进展[J]. 河南化工, 2019, 36(12):7-9, 21.
- BAI Fanglei, YE Wenhao, YE Jiaming, et al. Research progress of carbon-based flexible electrode materials[J]. Henan Chemical Industry, 2019, 36(12):7-9, 21. (in Chinese)
- [30] 刘永坤,姚菊明,卢秋玲,等. 碳纤维基柔性超级电容器电极材料的应用进展[J]. 储能科学与技术, 2019, 8(1):47-57.
- LIU Yongkun, AO Juming, LU Qiuling, et al. Progress in carbon fibers based flexible electrodes for supercapacitors[J]. Energy Storage Science and Technology, 2019, 8(1):47-57. (in Chinese)
- [31] 姜丽丽,王雅琴,鲁云. 柔性自支撑石墨烯基复合超级电容器电极材料研究进展[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2020, 39(3):97-103.
- JIANG Lili, WANG Yaqing, LU Yun, et al. Recent research on flexible, free-standing graphene-based electrodes for supercapacitors[J]. Journal of Xihua University (Natural Science Edition), 2020, 39(3):97-103. (in Chinese)
- [32] 崔晓晓. 基于石墨烯的理疗服装创新设计与研究[D]. 大连:大连工业大学, 2019. (下转第415页)