

电磁屏蔽帐篷用石墨烯导电纤维研究现状及未来发展方向

贾 琨^{1,2} 董文洁^{1,2} 宋 进¹ 李锁庄¹ 张 曼³ 马 晨^{1,2}

1. 中国电子科技集团公司第 33 研究所,山西 太原 030032;
2. 中国-白俄罗斯电磁环境效应“一带一路”联合实验室,山西 太原 030032;
3. 太原理工大学 轻纺工程学院,山西 太原 030600

摘 要: 导电纤维是电磁屏蔽帐篷的核心原材料之一。梳理了电磁屏蔽帐篷用石墨烯导电纤维的发展历程,阐述了表面修饰强化法、本征石墨烯纤维制备法和有机纤维掺杂强化法 3 种石墨烯导电纤维的制备方法,指出电磁屏蔽帐篷用石墨烯导电纤维研发面临的主要问题及未来发展方向。

关键词: 石墨烯导电纤维;电磁屏蔽帐篷;表面修饰强化法;本征石墨烯纤维制备法;有机纤维掺杂强化法

中图分类号: TS102;TB34

文献标志码: A

文章编号: 1004-7093(2026)05-0025-06

Research status and future development directions of graphene conductive fibers used in electromagnetic shielding tents

Jia Kun^{1,2}, Dong Wenjie^{1,2}, Song Jin¹, Li Suozhuang¹, Zhang Man³, Ma Chen^{1,2}

1. The 33rd Research Institute of China Electronic Technology Corporation, Taiyuan 030032, Shanxi, China;
2. China-Belarus Belt and Road Joint Laboratory on Electromagnetic Environment Effect, Taiyuan 030032, Shanxi, China;
3. College of Textile Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030600, Shanxi, China

Abstract: Conductive fibers are one of the core raw materials for electromagnetic shielding tents. The development history of graphene conductive fibers used in electromagnetic shielding tents was reviewed. Three processing methods for graphene conductive fibers, including the surface modification strengthening method, intrinsic graphene fiber fabrication method, and organic fiber doping strengthening method, were expounded respectively. And the main problems faced in the research and development of graphene conductive fibers applied in electromagnetic shielding tents, as well as the future development directions, were proposed.

Keywords: graphene conductive fiber; electromagnetic shielding tent; surface modification strengthening method; intrinsic graphene fiber fabrication method; organic fiber doping strengthening method

随着现代军事作战指挥信息化程度的提高,野外通信设备已成为战场信息网络的重要节点,承担

基金项目:山西省重点研发项目(202302040201009);山西省科技合作交流专项项目(202304041101046)

收稿日期:2025-06-18

作者简介:贾琨,男,1990年生,硕士,高级工程师,主要从事碳纳米电磁防护材料的研究工作,jiakun511451432@126.com

着战场情报收集、命令发布与信号传输等功能^[1],其对提升战场信息化作战效率具有关键作用^[2]。通信设备在工作中会无意/有意地向外发射电磁信号,导致信息泄露,故最佳的保障方式便是对覆盖通信设备的防护帐篷进行电磁屏蔽效能的技术升级与改造。

目前,电磁屏蔽帐篷(图1)主流的制备技术方案包括采用金属屏蔽网夹层结构以及利用金属丝-有机纤维混纺纱^[3]等。基于这些方案生产的电磁屏蔽帐篷虽能获得较高的屏蔽性能,但却存在造价高、易氧化、密度大和耐弯折性差等缺点,尤其是在抗氧化性方面,金属丝在高湿、酸碱等环境中极易氧化,导致导电性能显著下降,进而屏蔽效果丧失^[4]。因此,开发非金属电磁屏蔽帐篷已成为该领域的重要发展方向。

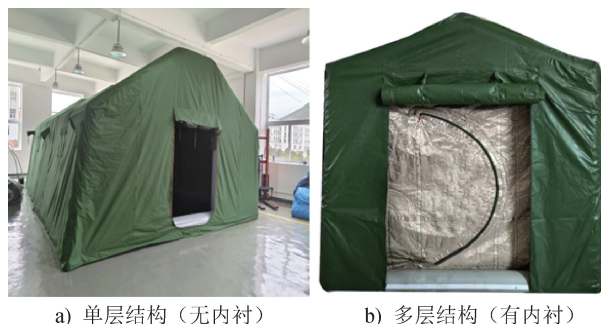


图1 电磁屏蔽帐篷照片

Fig. 1 Photos of electromagnetic shielding tents

1 电磁屏蔽帐篷用导电纤维发展历程

利用导电纤维生产电磁屏蔽帐篷主要涉及导电纤维纺丝、导电织物织制及电磁屏蔽帐篷缝制3个步骤。其中,导电纤维的电导率对最终电磁屏蔽帐篷的屏蔽性能起决定性作用。

导电纤维的制备最初以纤维表面的金属化处理为主要改性手段,主流的技术方案为化学镀铜和电镀镍,即在纤维表面形成铜镍复合金属导电膜,这既可保持纺织品原有的风格,如柔软、透气及一定的强伸性能等,又可实现对某些特定频率电磁波的高效屏蔽,但纤维表面金属镀层容易氧化、脱落,导致屏蔽效能显著下降。后期发展为有机复合导电纤维和导电填料改性纤维^[5],其中加入碳材料的复合纤维电导率高、导电成分不易脱落、导电性能持久、质地柔软,且具备良好的可编织性^[6]。但受限于当前导

电纤维的性能水平,目前野外使用的电磁屏蔽帐篷在基布强度、面密度、环境适应性及电磁屏蔽效能等方面与理想的轻质、高强、高屏蔽效能电磁屏蔽帐篷之间还存在较大差距^[7]。

石墨烯是一种典型的二维碳纳米材料,也是目前已知的导电性能最强的材料。基于石墨烯的导电纤维具有高导电、抗氧化、耐腐蚀、轻质柔软及可印刷等优点,非常适用于户外电磁屏蔽场景。开展基于石墨烯的高性能导电纤维的研究,可以为电磁防护提供新思路和新方法,实现防电磁信息泄露。

2 石墨烯导电纤维的研制

目前,以石墨烯为原料制备导电纤维的方法有表面修饰强化法、本征石墨烯纤维制备法和有机纤维掺杂强化法等。

2.1 表面修饰强化法

表面修饰强化法通过物理吸附或化学键合的方式将石墨烯组装到有机纤维表面,提升纤维导热、导电及抗辐射老化等性能。例如:伊朗科研人员利用石墨烯纳米薄片在纤维表面构建导电涂层,成功制备出电导率可调的导电纤维,用于开发电磁屏蔽织物^[8]。Xiang等^[9]采用逐级喷涂的方法制备了涂覆石墨烯和碳纳米管的Kevlar纤维,其中聚氨酯为Kevlar纤维与碳材料之间的黏结相,所得纤维微观形貌如图2所示。利用该纤维制备的复合材料耐弯折性和耐水洗性良好,可用作可穿戴电子器件的柔性导电材料。

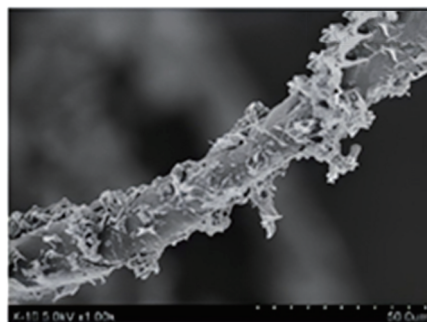


图2 石墨烯修饰的Kevlar纤维

Fig. 2 Graphene-modified Kevlar fibers

2.2 本征石墨烯纤维制备法

本征石墨烯纤维制备法基于石墨烯前驱体(通常为氧化石墨烯)直接制备出棒状纤维,实现了电

磁屏蔽用轻质石墨烯导电纤维制备技术的突破。目前国内方面,浙江大学高超团队、南京邮电大学赵春燕团队等就本征石墨烯纤维的制备展开了研究。现有本征石墨烯纤维的制备方法主要包括液晶湿法纺丝法、水热法和化学气相沉积法等^[10]。韩国成均馆大学 Park 等^[11]针对纯石墨烯纤维还原后仍存在结构缺陷,其导电性受限的问题,通过仅增加一步简单后处理即利用真空扩散工艺将 N、P、S 等杂原子精准引入还原氧化石墨烯纤维结构中,显著提升了其导电性,最终制备出电导率高达 1.1×10^4 S/m 的本征石墨烯纤维。Xin 等^[12]采用高温热还原工艺,将

热处理温度从 1 400 ℃ 提高到 2 850 ℃,同时调整不同尺寸石墨烯的质量分数,制备出具有良好导电性的本征石墨烯纤维,电导率最高可达 2.2×10^5 S/m,纤维微观结构如图 3 所示。Ma 等^[13]通过引入聚多巴胺衍生 N-掺杂碳物种作为阻力增强剂、黏合剂和导电连接“桥”,将石墨烯基纤维的拉伸强度、电导率分别提高到 724 MPa 和 6.6×10^4 S/m。本征石墨烯纤维具备优良的导电性,但目前制备技术尚处于实验室阶段,距离成熟的工业化应用尚存在较大差距^[14],故暂时无法实现基于本征石墨烯纤维的电磁屏蔽帐篷的规模化生产。

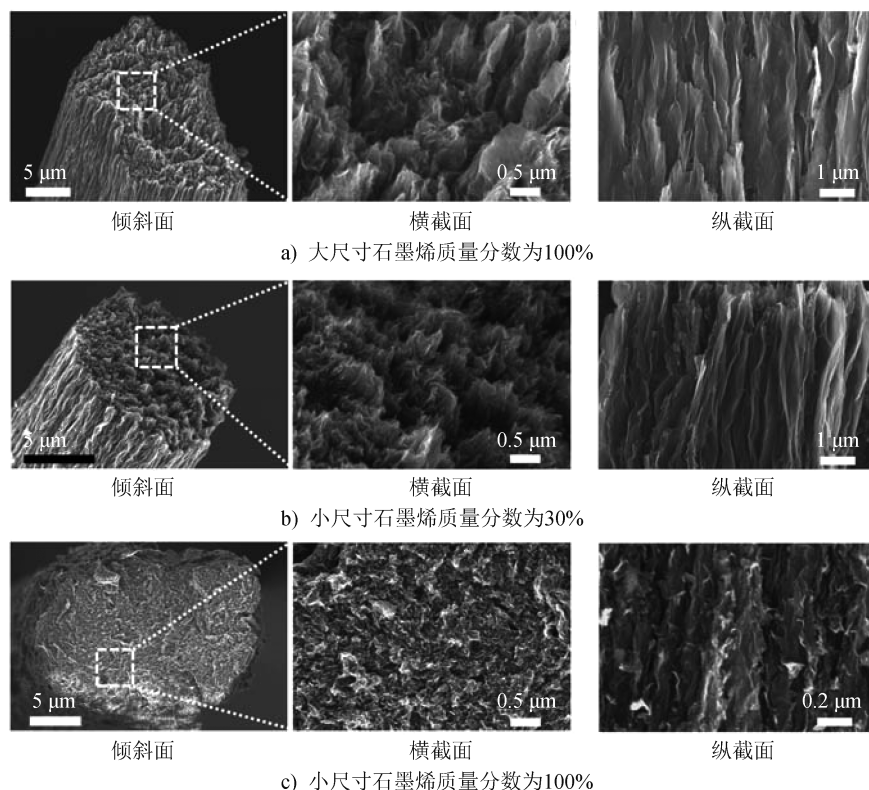


图 3 本征石墨烯纤维扫描电镜照片
Fig. 3 SEM photos of intrinsic graphene fibers

2.3 有机纤维掺杂强化法

石墨烯是有机纤维理想的掺杂增强体。以石墨烯及其衍生物作为功能相或增强相,在聚合物基复合材料领域已得到广泛研究。目前,有机纤维掺杂强化法主要包括原位缩聚法、熔融共混法和溶液共混法等^[15]。其中,原位缩聚法作为实验室常用的方法,其核心在于将石墨烯引入聚合物合成阶段。这种方法不仅有利于增强纳米填料在基体中的分散性,还可通过层间受限聚合效应实现单体在石墨烯

片层间的原位聚合,形成独特的界面结构。相比之下,熔融共混法适用于热塑性聚合物的熔融纺丝,其通过将石墨烯直接掺入聚合物熔体中实现复合;而溶液共混法则依托聚合物溶液体系辅助分散纳米填料,随后经溶液纺丝工艺成形。后两种方法虽操作简便,对聚合物化学结构的影响甚微,但受限于聚合物熔体或溶液的高黏度特性,石墨烯粉体难以实现均匀分散^[16],这已成为制约其规模化生产与应用的关键。

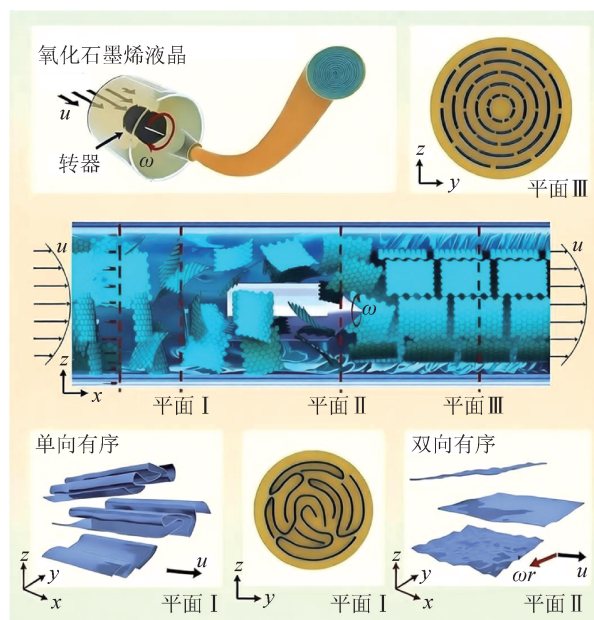
Li 等^[17]利用氧化石墨烯/*N,N*-二甲基甲酰胺溶液,通过多重剪切流场,实现了氧化石墨烯片层在截面内的同心圆状排列以及沿纤维轴向的高度取向,从而双向促进了固态纤维中石墨烯片层的有序堆叠,生成了致密且结晶良好的石墨化结构,最终制得具有超高模量和热导率的石墨烯导电纤维(图4)。张晓琳^[18]以热塑性聚氨酯纤维为基体,石墨烯和聚苯胺为导电成分,采用原位缩聚法,制备出电导率分别为 7.8×10^{-3} S/cm 和 1.2×10^{-2} S/cm 的石墨烯/热塑性聚氨酯和石墨烯/聚苯胺/热塑性聚氨酯导电复合纤维。迟淑丽^[19]基于熔融共混法及湿法纺丝技术纺制出石墨烯/再生纤维素复合纤维,发现随着石墨烯质量分数的增加,复合纤维的导电性开始逐渐增强,并在石墨烯质量分数达到 25% 时,电导率达到 1.77×10^{-2} S/cm,之后增加石墨烯质量分数,导电性趋于稳定。段楠楠^[20]先通过共混法将石墨烯分散在聚合物基体中,然后采用静电纺丝技术制备出石墨烯/纳晶纤维素/聚己内酯复合纤维,并发现,当石墨烯的质量分数为 3.5% 时,石墨烯/纳晶纤维素/聚己内酯复合纤维膜的电导率达到最大值(9.5072×10^{-8} S/cm)。

中国电子科技集团公司第 33 研究所在此方面也开展了大量研究。其以石墨烯掺杂聚酰胺高分子母料为原料,采用熔融纺丝-牵伸-热定型的方法,制备出石墨烯/聚酰胺复合长丝(图5)^[21-22],并确立了适用于石墨烯复合长丝的喷丝板关键参数(如孔径、孔的长径比等)^[23],且所纺石墨烯复合长丝导电性好、力学性能优良,在 450 MHz~10 GHz 频段内屏蔽效能大于 45 dB^[24],实现了野外帐篷在电磁屏蔽、轻质机动等方面的全面改善,为提升通信设备电磁屏蔽性能提供了技术支撑^[25-26]。该公司还通过熔融共混法制备了石墨烯/涤纶复合纤维。该纤维与普通涤纶相比具备更高的强度和导电性,所制备的织物能在经过多层保护膜涂覆强化后达到更高的电磁屏蔽效能和耐老化性能^[27],满足电磁屏蔽帐篷的相关功能指标要求,具有较好的应用前景和经济效益^[28]。

2.4 小结

3 类方法制备的石墨烯导电纤维的比较归纳于表 1^[29-30]。

综上,纤维中掺杂石墨烯的目的是实现内部电路的有效连接,提高纤维导电性^[31]。其掺杂的质量



u —单向管流速; ω —旋转角速度; r —转子中心到石墨烯片的距离。

图4 纤维制备流程中双向促进石墨烯有序组装原理示意
Fig. 4 Schematic illustration of bidirectional promotion mechanism for ordered graphene assembly during fiber preparation process



图5 石墨烯/聚酰胺复合长丝
Fig. 5 Graphene/polyamide composite filaments

分数需在 20% 以上,但此时纤维分子链在长度方向上的连续性会因过多的界面作用而受损,导致抗拉强度降低,这会对最终织物的强度产生不利影响。因此,需探究低掺杂量增强方案,解决导电性增强和力学性能增强之间的矛盾。

3 结束语

当前,以石墨烯为原料制备导电纤维的方法主要包括表面修饰强化法、本征石墨烯纤维制备法和

表 1 3 种方法制备的石墨烯导电纤维对比

Tab. 1 Comparison of graphene conductive fibers prepared with three methods

项目	表面修饰强化法	本征石墨烯纤维制备法	有机纤维掺杂强化法
优点	工艺简单、成本低	性能水平高	工艺简单、成本适中
缺点	环境适应性不足,存在高污染工序	生产成本低	性能存在理论上限,屏蔽效能无法达到最高水平
下一步技术发展方向	改进工艺,提高表面层附着力	扩大生产规模,降低成本	多角度提升纤维导电性能
是否已在电磁屏蔽帐篷中应用	是 ^[29]	否	是 ^[30]

有机纤维掺杂强化法等。尽管石墨烯导电纤维的制备已取得一些成果,但在多项关键技术方面还有待突破,例如:层片组装石墨烯薄膜存在方块电阻大,屏蔽效能低的不足;纤维表面组装的石墨烯易脱落,使用性能难以保障;本征石墨烯纤维生产工艺复杂,批量化生产难度较高;石墨烯掺杂聚合物挤出纺丝过程易发生相分离,性能均一性差;等等。针对这些技术难题,研究者还需进行深入探究,将电磁屏蔽技术与纺丝技术相结合,实现石墨烯导电纤维的大规模生产,进而推动石墨烯在电磁屏蔽帐篷中的应用。未来,石墨烯导电纤维及其屏蔽帐篷研究将围绕以下几个方向展开:

(1) 纤维性能的提升。石墨烯导电纤维轴向电导率与银、铜等金属纤维仍存在较大差距,需开发新的技术路线,充分发挥石墨烯导电纤维的面内高导电特性,将石墨烯导电纤维轴向的电导率提升至 10^7 S/m 水平。

(2) 纤维工作频段低频化。当前,电磁屏蔽织物的屏蔽频带主要集中在 30 MHz~18 GHz,但现有设备的工作频率已覆盖 30 MHz 甚至更低的频段。因此,拓宽石墨烯导电纤维的工作频段,尤其是提升其电磁屏蔽织物在低频段(10 KHz~30 MHz)的屏蔽性能,具有重要的意义。

(3) 电磁屏蔽帐篷智能化。智能化是未来产品的发展趋势,电磁屏蔽帐篷有望引入电磁特性可控功能,根据探测雷达与信号干扰器的工作频率,实现对屏蔽频段的智能调控。



期刊采编平台



中国知网下载

参考文献

[1] ZHAO X G, ZHOU Y, GUO Y Z, et al. Research on

the new multilayer composite lightning electromagnetic shielding materials [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 217/218/219: 717-720.

[2] 丁雪, 王建才, 叶志国, 等. 高性能石墨烯电磁屏蔽材料的研究进展[J]. 功能材料, 2023, 54(10): 10069-10076.

[3] 郑志勇, 王毅. 一种高性能电磁屏蔽帐篷设计方案[J]. 中国新通信, 2012, 14(17): 80.

[4] 夏浩宇, 戴伟, 李望骏, 等. 电磁屏蔽织物的研究进展[J]. 纺织工程学报, 2024, 2(6): 66-78.

[5] 陈才香, 周惠敏, 徐阳. 镀银织物基 SiO₂@FCIP 涂层复合材料的制备及电磁屏蔽性能[J]. 化工新型材料, 2023, 51(12): 91-96.

[6] 陈锟, 许晶莹, 郑怡倩, 等. 丝网印刷还原氧化石墨烯改性蚕丝织物的导电与电热性能[J]. 纺织学报, 2024, 45(3): 122-128.

[7] 杨杰, 李跃波, 刘锋, 等. 电磁防护与电磁伪装及隔震技术在防护工程中的综合运用[J]. 防护工程, 2012, 34(1): 60-63.

[8] 郑宁来. 石墨烯制导电纤维[J]. 合成纤维, 2013, 42(10): 51.

[9] XIANG C S, LU W, ZHU Y, et al. Carbon nanotube and graphene nanoribbon-coated conductive Kevlar fibers [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2012, 4(1): 131-136.

[10] 王纯, 游志昌, 关福旺, 等. 柔性纺织基电磁屏蔽复合材料的研究进展[J]. 复合材料学报, 2025, 42(6): 3042-3053.

[11] PARK B J, PARK H S. Enhanced electrical conductivity of doped graphene fiber via vacuum deposition [J]. Carbon Letters, 2021, 31(4): 613-618.

[12] XIN G Q, YAO T K, SUN H T, et al. Highly thermally conductive and mechanically strong graphene fibers[J]. Science, 2015, 349(6252): 1083-1087.

[13] MA T, GAO H L, CONG H P, et al. A bioinspired

- interface design for improving the strength and electrical conductivity of graphene-based fibers [J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(15): 1706435.
- [14] ZHENG K Y, YU C J, LI W J, et al. Rapid preparation of graphene-skinned alumina fiber fabric and its electromagnetic interference shielding application [J]. *Nano Research*, 2025, 18(5): 94907330.
- [15] TAO H C, YAN M, ZHANG L, et al. Progress in preparation, processing, and application of high dielectric polypropylene matrix composite materials [J]. *Polymer Composites*, 2024, 45(6): 4819-4838.
- [16] 周子滢, 刘宁娟, 贾可, 等. 电磁屏蔽织物研究进展 [J]. *产业用纺织品*, 2020, 38(10): 1-5.
- [17] LI P, WANG Z Q, QI Y X, et al. Bidirectionally promoting assembly order for ultrastiff and highly thermally conductive graphene fibres [J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 409.
- [18] 张晓琳. 聚氨酯基柔性导电纤维的制备及其气敏特性的研究 [D]. 上海: 东华大学, 2013.
- [19] 迟淑丽. 石墨烯/再生纤维素复合纤维制备及其在传感器领域的应用 [D]. 青岛: 青岛大学, 2017.
- [20] 段楠楠. 静电纺制备石墨烯/聚合物复合纳米纤维及其性能研究 [D]. 武汉: 武汉纺织大学, 2016.
- [21] LIU W, JIA K, YAO T T, et al. Graphene-wrapped magnetic multichamber $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ spheres for stable broadband microwave absorption [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, 16(38): 51118-51128.
- [22] 刘伟, 贾琨, 王东红, 等. 基于电磁场仿真的金属-石墨烯多层复合薄膜结构设计 with 可控制备 [J]. *复合材料学报*, 2025, 42(5): 2706-2716.
- [23] LU G G, XIONG T, WU G H. YOLO-BGS optimizes textile production processes: enhancing YOLOv8n with bi-directional feature pyramid network and global and shuffle attention mechanisms for efficient fabric defect detection [J]. *Sustainability*, 2024, 16(18): 7922.
- [24] LIU W, JIA K, WANG D H, et al. Growth of magnetic graphene films with higher electromagnetic interference shielding at moderate annealing temperatures [J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2022, 33(30): 23781-23791.
- [25] 刘奇, 马凌, 董晓玉, 等. 一种便携式设备用电磁屏蔽帐篷: CN202321615939. X [P]. 2024-02-20.
- [26] 陈玮君, 郑凯, 张小刚, 等. 一种具有电磁防护功能的镀镍石墨涂料及其制备方法: CN202210631129. 7 [P]. 2022-07-29.
- [27] 张曼, 权英, 冯宇, 等. 纺织基可穿戴柔性应变传感器的研究进展 [J]. *纺织学报*, 2024, 45(12): 225-233.
- [28] ZHANG H Y, CHEN J Y, JI H, et al. Study on frequency selective/absorption/reflection multilayer composite flexible electromagnetic interference shielding fabric [J]. *Textile Research Journal*, 2022, 92(5/6): 851-859.
- [29] GUO Q F, TIAN H H, CHENG Y, et al. Structural-functional integrated graphene-skinned aramid fibers for electromagnetic interference shielding [J]. *ACS Nano*, 2024, 18(49): 33566-33575.
- [30] 谢跃亭, 李洁, 邢善静, 等. 一种导电石墨烯纱线及其制备方法与应用: CN202510675425. 0 [P]. 2025-08-29.
- [31] FAN Z W, LIU R T, CHENG X J. Nonwoven composite endowed with electromagnetic shielding performance by graphene nanosheets adherence [J]. *The Journal of the Textile Institute*, 2022, 113(7): 1411-1417.

规范使用“浓度”“分数”和“含量”

术语“浓度”常加在量的名称上,用以表示该量被总体积除所得之商。例如:“B 的物质的量浓度”表示 B 的物质的量与总体积之比,单位如 mol/L;“B 的质量浓度”表示 B 的质量与总体积之比,单位如 mol/kg。只有“物质的量浓度”可以简称“浓度”。其他含“浓度”的量的名称,不应简称浓度。

“分数”既可以指“质量分数”,也可以指“体积分数”,二者的单位均为 1,但前者是某物质的质量与混合物的质量之比,后者可以理解为某物质的体

积与混合物的体积之比。因此,在使用“分数”一词时,应使用其确切的量的名称。如,“溶液中, B 的质量分数为 50%”。

“含量”可作为一般性的术语或不同量的泛称使用,如可表述为“该非织造材料中涤纶含量高、棉含量低”,但其不能表示一个具体量。当定量阐述时,应改用相应的量的名称,如“空气中 O_2 的含量为 21%”应改为“空气中 O_2 的体积分数为 21%”。

《产业用纺织品》编辑部