http://pmse.scu.edu.cn

场分散技术在碳系材料改性聚合物基复合材料中的应用进展

王兴佳[1], 马 驰[1], 杨 杨[2], 王 琦[1], LEE Tin Sin[3], 李 范[4]

(1. 沈阳化工大学 材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110142; 2. 辽宁省纤维检验局, 辽宁 沈阳 110004;
3. 马来西亚拉曼大学 化学工程学院, 马来西亚 吉隆坡 53300; 4. 中国医科大学 健康管理学院, 辽宁 沈阳 110122)

摘要: 场分散技术因其非接触、高效、可调控的特点,在能源、环境、生物医学、传感器等领域展现出巨大潜力,同时也为碳系复合材料的制备和性能优化提供了新的思路。文中系统总结了近年来场分散技术在碳系材料改性聚合物基复合材料的应用及其对材料性能的影响。详细介绍了磁性碳材料的制备方法,包括共沉淀法、水热法等,探讨了静态和动态磁场在碳系材料改性聚合物基复合材料的应用。分析了静态和动态电场在辅助碳材料定向排列中的作用,以及电场诱导效应的机理。此外,提出了当前研究存在的问题,并对未来的研究方向进行了展望,旨在为电场和磁场分散技术在复合材料领域的进一步研究和应用提供理论参考和实践指导。

关键词: 碳材料;磁场;电场;聚合物基复合材料;磁性材料
中图分类号: TB33 **文献识别码:** A **文章编号:** 1000-7555(2026)04-0181-10

随着纳米科技突飞猛进的发展,石墨、石墨烯、碳纳米管等碳材料已成为材料科学研究的热点[1]。这些碳材料因其出色的电子迁移率、高热导率、力学强度等在能源存储、电子器件和航空航天等多个领域展现出巨大的应用潜力[2]。然而,碳材料在实际应用中常常面临一个关键问题,其高比表面积和强范德华力使碳材料极易在介质中聚集,导致性能大幅下降[3]。传统的机械搅拌、超声分散和表面活性剂辅助分散等方法虽然在一定程度上能够改善碳材料在聚合物基体中的分散,但往往存在分散效果可控性不强、分散稳定性差等难题。为了解决这一难题,科研工作者开始探索利用外部物理场来调控碳材料的分散状态,其中电场和磁场分散技术因其非接触、高效和可调控的特点而备受关注。

磁场分散技术是利用碳材料(或包裹有磁性纳米粒子的碳材料)在磁场作用下的磁化特性,通过施加外部磁场实现碳材料在介质中的分散和排列。电场分散技术是利用碳材料的固有电学性质,如偶极矩或在外加电场作用下诱导的极化效应,通过施加外部电场实现碳材料的定向排列或分散[4]。在能源领域,电场或磁场分散的碳系材料可应用于高性能电池电极的制备,通过精确控制电场或磁场来实现碳材料(如石墨烯、碳纳米管等)在电极材料中的均匀分散,能够显著提高电池的充放电效率和能量密度,这对于电动汽车和可再生能源存储系统的发展至关重要。在电子信息领域,这种分散技术有助于制造更加精密的碳基电子元件,如利用磁场分散碳纳米管制备的高灵敏度传感器,能够快速检测环境的微小变化,在环境监测和生物医学检测方面能发挥重要作用。电场磁场分散碳系材料还可改善复合材料的力学性能、导热性能等,推动现代工业从传统材料向轻量化、高性能化的碳基复合材料转型,在航

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2026.0052
收稿日期: 2025-04-29
基金项目: 沈阳化工大学"达标立项"项目(512000001185); 辽宁省中国-西班牙材料联合实验室项目(10700005); 辽宁省"兴辽英才计划"青年拔尖人才项目(XLYC1807007)
通讯联系人: 马驰, 主要从事表面活性剂、聚氨酯研究, E-mail: lg_365@163.com;
李范, 主要从事生物医学材料与人工智能研究, E-mail: fanli@cmu.edu.cn

空航天领域有着不可忽视的应用潜力。

本文重点介绍了近年来电场和磁场分散技术在调控聚合物基体中碳材料排列领域的最新进展，包括基本原理、制备方法、面临的挑战和未来的发展方向。通过本文的讨论，为场辅助碳系材料改性聚合物基复合材料的开发提供了借鉴。

1 磁场分散

磁场分散是通过磁场对功能材料粒子在基体材料中的分散状态进行精确调控的一种非接触的、操作灵活的方法。磁场分散碳系材料以其卓越的电磁波吸收能力，在减少电磁干扰和保护电子设备方面发挥着重要作用。此外，其在催化、能源存储、药物运输及传感器和半导体器件的开发中也显示出巨大的潜力[5~8]。在该方法中，要实现磁场诱导排列，功能材料粒子必须对磁场有响应。对于固有磁性较强的材料，普通钕铁硼磁铁即可实现材料的磁响应。对于弱磁和非磁性材料，则需要提供超大的磁场强度。然而，超大的磁场强度并不像超大的电场强度一样能轻松获得，这就加大了实验的难度和成本。为了使用磁场诱导具有较弱磁场响应的碳材料产生定向分散，通常需要使用超磁场（10 T）或外加磁性辅助颗粒，添加磁性辅助粒子具有成本低廉、操作简单、设计灵活等特点，是目前广泛采用的方法之一。

1.1 磁性碳材料制备方法

碳材料本身具有诸多优异特性，如高比表面积、良好的导电性和化学稳定性等，在电子、信息和能源等多个领域得到了广泛的应用[9,10]。但是大部分碳材料自身磁性较弱，很难在常规磁场下实现定向分散，通常需要对碳材料进行适当的改性，如将四氧化三铁（Fe_3O_4）或镍（Ni）等磁性粒子包裹在碳系材料表面，从而赋予碳系材料磁性，使其能够在外加磁场下进行快速的分离与操控，实现定向排列。不同的改性方法直接影响磁性碳材料的结构、磁性等性能。目前，磁性碳材料的制备方法主要有共沉淀法、水热法、溶剂热法、热分解法、溶胶-凝胶法等[11]。

1.1.1 *共沉淀法*：共沉淀法是将磁性前驱体（如铁盐）和碳源（如石墨烯）分别溶解在去离子水中，向混合溶液中加入沉淀剂（如氢氧化钠或氨水），使溶液中的金属阳离子沉淀在碳材料表面，得到磁性碳材料。因其具有可控性强、反应条件温和工艺简单等的优点，广受研究者们青睐[12]。Ling 等[13]采用共沉淀法将具有磁性的 Fe_3O_4 沉积在氧化石墨烯（GO）上制备了 Fe_3O_4@GO 磁性响应粒子。研究结果表明，平均粒径约 10 nm 的 Fe_3O_4 颗粒均匀分散在 GO 片上，其化学反应方程式如下[14]

$$Fe^{2+}+2Fe^{3+}+8OH^- \longrightarrow Fe_3O_4+4H_2O$$

但是化学共沉淀法具有一定的局限性，存在粒径可控性差、磁性包裹物容易脱落等难题。

1.1.2 *水热法*：水热法是合成磁性碳材料的重要方法之一。以水为主要介质，通过对密闭反应容器进行加热，促使反应物在高温高压环境中溶解、化学反应和晶体生长，从而实现磁性物质与碳材料的复合[15,16]。水热法的优点有所得产物纯度高、分散性好、粒度易控制、原料来源广泛、环境友好、相对产量较高等。Cao 等[17]采用水热法制备了磁性 Fe_3O_4@GO 纳米磁性碳材料。结果发现，平均直径为 15~30 nm 的 Fe_3O_4 纳米颗粒修饰在氧化石墨烯表面，使其具有较强的磁场响应能力。Su 等[18]在水热条件下制备了 Fe_3O_4@石墨烯（Fe_3O_4@GN）磁性粒子。结果表明，Fe_3O_4 纳米颗粒密集均匀地沉积在 GN 片上，有效阻止了 Fe_3O_4 纳米颗粒的聚集。Wang 等[19]采用水热法制备了碳包裹磁性纳米颗粒，该工艺通过在 160~180 ℃加热含有 Fe-Au 纳米颗粒的葡萄糖水溶液，制备出了铁@金（Fe@Au）纳米颗粒碳球。结果表明，Fe@Au 纳米颗粒碳球的饱和磁化强度为 14.6 emu/g。

1.1.3 *溶剂热法*：溶剂热法是在水热法的基础上发展起来的一种新的材料制备方法。将水热法中的水换成有机溶剂（如有机胺、醇、氨、四氯化碳或苯等），采用类似于水热法的原理，以制备在水溶液中无法长成、易氧化、易水解或对水敏感的材料。溶剂热法具有流程简单、反应易控等优点[20]。Li 等[21]以乙二醇为溶剂，通过溶剂热法制备了一种新型磁性氮掺杂还原氧化石墨烯（Fe_3O_4@N-RGO），氮原子的引入不仅增加了 N-RGO 的褶皱程度，减少了石墨烯片层的团聚，且与 Fe_3O_4@RGO 相比，Fe_3O_4@N-RGO 拥有更大的比表面积和更多的吸附位点。

1.1.4 *热分解法*：热分解法是利用高沸点的有机溶剂在高温高压条件下热分解有机金属化合物，从而

合成无机金属化合物纳米颗粒的方法。高温分解法可获得单分散性好、粒径可控的 Fe_3O_4 磁性纳米颗粒,从而广泛应用于磁性纳米材料的合成中。

Shen 等[22]通过将三乙酰丙酮铁与氧化石墨烯在 1-甲基-2-吡咯烷酮中进行高温反应,成功制备了一种氧化石墨烯-磁性纳米粒子。结果表明,Fe_3O_4 通过金属-羰基配位效应成功附着在氧化石墨烯纳米片上。Ma 等[23]利用盐前驱体,通过热分解法开发了一种碳封装磁性金属(铁和镍)纳米颗粒的大规模制备技术。

1.1.5 *溶胶-凝胶法*:溶胶-凝胶工艺是一种液相合成技术,通常以二价铁或三价铁为原料。首先将原料在溶液中混合,通过水解与聚合反应生成均匀的溶胶体系,再通过缓慢蒸发使溶质聚合凝胶化,随后,通过干燥或烧结去除有机成分,将凝胶转变为固态材料[24]。此法关键在于溶液中前驱物的羟基化和聚合过程。通过精确控制实验条件,如溶剂种类、温度、前驱物浓度、pH 值及搅拌速度,可以实现对所得材料特性的精确调控。为了将膨胀石墨(EG)的抗磁性转变为铁磁性,并提高其电磁干扰能力,Zhang 等[25]采用溶胶-凝胶技术制备了纳米 γ-三氧化二铁(Fe_2O_3)/EG 磁性复合材料。结果表明,复合材料在 γ-Fe_2O_3 嵌入后具有良好的铁磁性。同时,不同比例的铁氧体凝胶和石墨形成了不同的晶体形态和形状的氧化铁,高含量的铁氧体溶胶(83%)产生了更完美的 γ-Fe_2O_3 五面体晶体,平均尺寸为 44.68 nm。

1.2　静态磁场分散

静态磁场(Static magnetic field)分散技术是指在磁场强度和方向均不随时间变化的条件下,控制磁性碳材料在聚合物基体进行有序取向,从而改善复合材料电磁屏蔽效能、气体阻隔性能、导电性和导热性等性能的一种处理方法。静态磁场分散技术具有操作简单、粒子分散可控性强等特点,在碳系粒子改性复合材料领域具有巨大应用潜力。

Ren 等[13]首先合成了包覆有磁性氧化铁纳米颗粒的氧化石墨烯纳米片(Fe_3O_4@GO),然后将其作为填料在静态磁场辅助分散下制备了具有超高气体阻隔性能的聚乙烯醇(PVA)纳米复合膜。仅添加体积分数为 0.072% 的 Fe_3O_4@GO,PVA 薄膜的透氧率从 21.17×10^{-15} $cm^3\cdot cm/(cm^2\cdot s\cdot Pa)$ 降至 0.2126×10^{-15} $cm^3\cdot cm/(cm^2\cdot s\cdot Pa)$,气体阻隔性能提高了约 99.0%(Fig.1(a))。Jiao 等[26]通过化学共沉淀法将 Fe_3O_4 纳米粒子附着在石墨纳米片(GNPs)表面,然后将改性磁性石墨纳米片(m-GNPs)加入环氧树脂,并在低磁场(40 mT)中排列。结果表明,与无序石墨纳米片/环氧树脂(GNPs/EP)复合材料相比,有序排列的 GNPs/EP 复合材料气体阻隔性能提高了 65% 以上(Fig.1(b))。

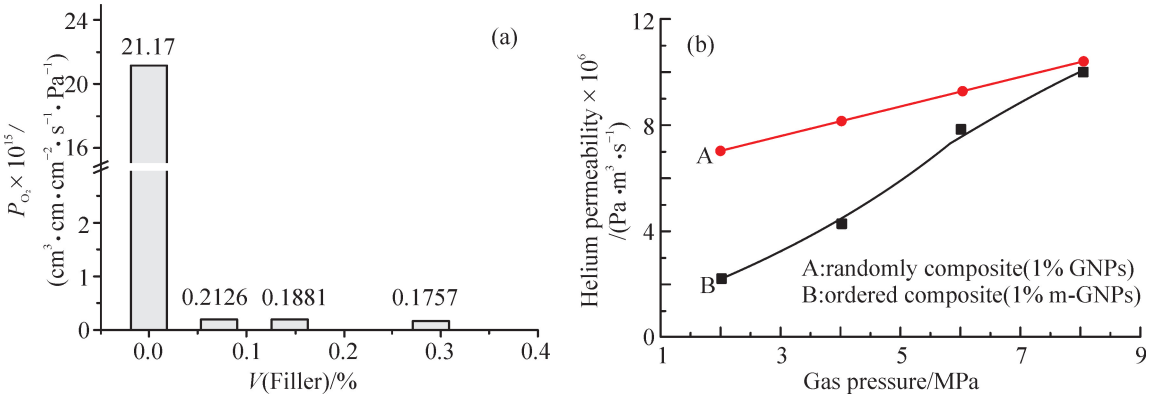


Fig. 1　(a) Oxygen permeability of PVA/Fe_3O_4@GO nanocomposite films with different filler contents[13]; (b) helium permeability measurement results[26]

Zhang 等[27]采用反向微乳液法合成了棒状锌铁氧体($ZnFe_2O_4$),通过冷冻干燥法在 $ZnFe_2O_4$ 表面涂覆无定形碳,得到 $ZnFe_2O_4$@C 核壳颗粒。将不同含量的 $ZnFe_2O_4$@C 分散到聚偏氟乙烯-六氟丙烯共聚物(P(VDF-HFP))基体中以制备复合膜,在热压过程中,利用外部平行静态磁场操纵,得到定向 $ZnFe_2O_4$

@C/P（VDF-HFP）复合膜。实验结果表明，当 $ZnFe_2O_4$@C 与薄膜取向对齐时，复合膜的介电常数比无取向复合膜高 130%，比纯 P（VDF-HFP）高 290%。

1.3 动态磁场分散

1.3.1 *平移/旋转磁场*：静态磁场排布方式只能让磁性石墨烯平行于磁力线取向，在垂直于磁力线的平面内则呈现随机取向，这限制了石墨烯优异性能在宏观上的展现。为了充分利用单片石墨烯的优异性能，需要在多个维度实现其取向控制，动态旋转磁场方案逐渐成为一种备受关注的制备方法。林峰[28]设计了一种将 2 个方向的静态磁场进行快速交替的动态旋转磁场，通过这种动态磁场，实现了在 2 个方向上对石墨烯片的取向控制，为石墨烯的宏观应用提供了可能。旋转磁场通过诱导磁性粒子在基质材料中定向排列，能显著提高复合材料的电导率、热导率和电磁屏蔽效率等，增强材料的拉伸性能和介电性能，展示了其在提高材料性能方面的多样性和灵活性。

Xie 等[29]探究了利用动态磁场，在不牺牲力学性能的前提下，提高硅橡胶（SR）电导率的可行性。在研究中，采用石墨烯负载的磁性纳米粒子（Fe_3O_4@RGO）作为导电填料，通过动态磁场诱导对齐技术以增强复合材料的导电性能（Fig.2）。在磁场强度为 180 mT 的条件下，无论是 2 cm/s 的平移磁场还是 2 r/s 的旋转磁场，都能有效实现 Fe_3O_4@RGO 在 SR 中的定向排列。这种定向排列显著提高了复合材料在磁场方向上的电导率，其中平移磁场方向的电导率达到 1.10 ms/mm，电磁屏蔽效率（EMI）达到了 20 dB；旋转磁场方向的电导率和 EMI 分别为 0.84 ms/mm 和 21.6 dB。此外，研究还发现，通过磁场诱导形成的可控梯度导电结构，可以进一步提升材料的整体电导率。

1.3.2 *振荡磁场*：振荡磁场是一种强度和方向随时间周期性变化的磁场，通常由交流电流产生，磁场具有特定的频率和幅值。从理论上来说，振荡磁场相比于静态磁场更有利于粒子的诱导，但振荡磁场的建立和控制相对静态场而言难度更大。

Liu 等[30]研究了恒定磁场和振荡磁场对磁性碳纳米管（CNTs）纳米排列及导热系数的影响，在外部恒定磁场的作用下，水-CNT/Fe_3O_4 铁流体的热导率先上升后下降，而使用振荡磁场可以防止热导率的下降趋势。在同等磁场强度下，振荡磁场与恒定磁场相比，水基 Fe_3O_4/CNT 铁流体的平均热导率增加了 24.25%（Fig.3）。

1.3.3 *脉冲磁场*：在磁场作用下，聚合物基体中的大部分粒子经过一段时间后会相互接触并排列成链状结构。由于磁场作用始终存在，不同相对位置的粒子链之间会产生不同的相互作用。对于粒子相互对齐的链，链间的相互作用表现为相互排斥，磁场阻碍了粒子链的靠近，甚至使其相互远离。而对于粒子未对齐的链，链间则存在相互吸引力，磁场会促使这

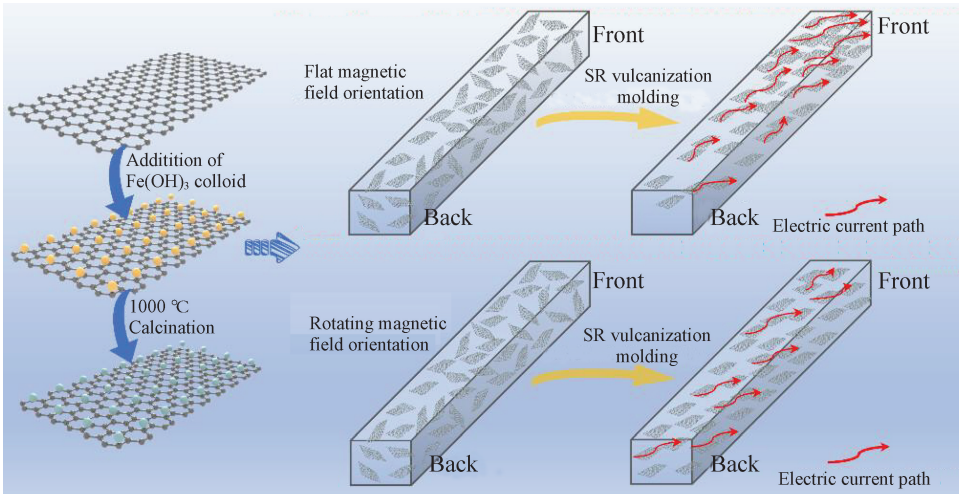


Fig. 2 Possible mechanisms for improving the electrical properties of SR composites by moving magnetic fields[29]

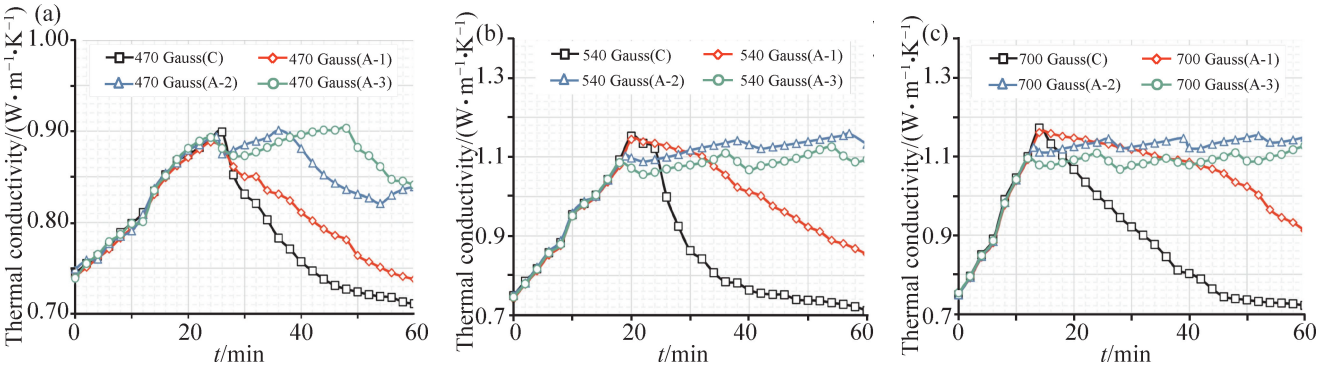


Fig. 3　Variation of thermal conductivity of aqueous-CNT/Fe_3O_4 under constant and oscillating magnetic field conditions (at different magnetic field strengths) [30]

些粒子链相互靠近并最终合并。在稳恒磁场的持续作用下,聚合物基体中会形成大量相互对齐的粒子链,这些粒子链被磁场力固定在原位,无法自由运动。磁场在相邻粒子链之间形成了能量势垒,从而限制了复合材料中粒子网络结构的进一步优化。为了解决恒定磁场对粒子空间网络立体结构构建的抑制作用,学者们在改变磁场形式方面进行了许多研究。Swan 等[31]发现,施加脉冲磁场可以使磁性粒子流动,防止粒子在原稳定状态下停滞,脉冲磁场的特殊作用可以驱动相邻的粒子链相互靠近并发生合并(如 Fig.4 所示)。这说明脉冲磁场可以克服稳恒/交变磁场对粒子网络结构进一步发展的阻碍作用,驱动粒子持续运动,从而改变粒子的网络结构。

2　电场分散

电场分散技术利用碳材料的固有电学性质,如偶极矩或在外加电场作用下诱导的极化效应,通过施加外部电场实现碳材料的定向排列或分散。可以通过控制电场方向来实现碳系粒子的定向排列,目前常用的电场形式有:交流电场、直流电场与脉冲电场[4,32]。电场分散技术在调控碳材料在电子器件中的电荷传输路径和提高光电器件的光电转换效率方面展现出巨大潜力。

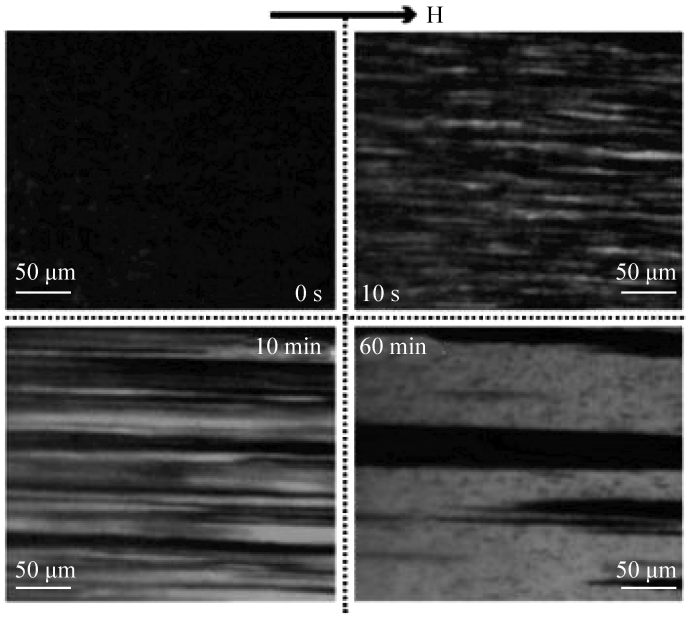


Fig. 4　Dynamic behavior of magnetic particles under a magnetic field[31]

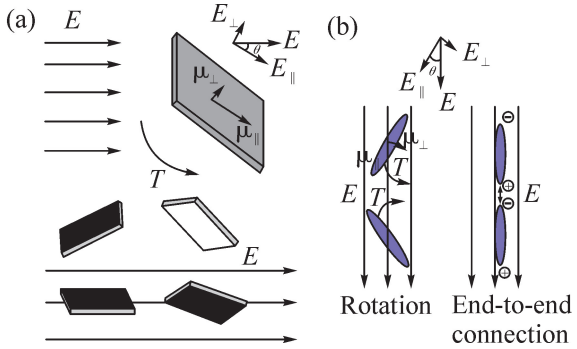


Fig. 5 (a) Schematic diagram of the mechanism of electric field-induced graphene alignment[34]; (b) rotation and end-to-end connection of polarized graphene nanosheets under the action of electric field[35]

2.1 电场诱导效应机理

电场诱导碳材料排列的机理较为复杂。目前被多数学者认可的作用机理是,在电场作用下,粒子在液体介质中受到多种力的作用,如电场的极化作用、热运动、流体拉伸作用、重力、胶体的引力和斥力。如果电场的极化作用占主导地位,粒子将在液体介质中沿电场方向发生取向排列,从而实现碳系粒子在聚合物基体中的定向分散。如果粒子的形状不一样,其在电场作用下的运动情况也不一样,如果粒子是球形颗粒,其在电场作用下的运动方式为聚集、排列;如果粒子是纤维状或片状,其在电场作用下的运动方式为取向、聚集、排列[33]。以石墨烯为例,石墨烯纳米片具有各向异性特征,面内的极化矩远高于厚度方向的极化矩(如 Fig.5(a)所示)[34],在外加电场作用下,石墨烯纳米片的自由电荷首先在其平面内发生极化,对于具有晶态或形状各异的石墨烯纳米片来说,极化力矩(μ)一般不与电场(E)对齐,使石墨烯纳米片在平行于电场两侧形成偶极子,这种极化力矩可以分为 2 个极化力矩分量,一个平行于石墨烯纳米片($\mu_\parallel$),一个垂直于石墨烯纳米片($\mu_\perp$),诱导后的石墨烯扭矩 $T^e=\vec{\mu}\times\vec{E}$。由于平行于石墨烯纳米片的极化力矩远大于垂直于石墨烯纳米片的极化力矩,极化后的石墨烯纳米片往往会由于其首末两端存在相反的电荷而相互吸引,带动石墨烯在周围介质的黏滞阻力下旋转,从而沿着电场方向定向排列[35],如 Fig.5(b)所示。

2.2 静态电场分散

直流电场控制取向是指通过 2 个平行电极施加电势,使具有导电性能的颗粒或包覆有优异介电性涂层的非导电颗粒,沿电场方向通过电泳和介电电泳作用实现取向排列的制备方法。直流电场在材料科学中具有重要作用,能够促使纳米材料如碳纳米管和石墨烯在聚合物基体中定向排列,从而显著提高复合材料的力学性能和功能性。

Prasse 等[36]将直流电场应用到诱导聚合物基体中碳材料的分散。在直流电场作用下,实现了炭黑在环氧树脂基体中的定向排列。Zhang 等[37]通过直流电场诱导开发了一种基于石墨烯/聚二甲基硅氧烷涂层的高灵敏度超疏水织物传感器,如 Fig.6 所示。石墨烯片在电诱导下排列形成网络结构,增强

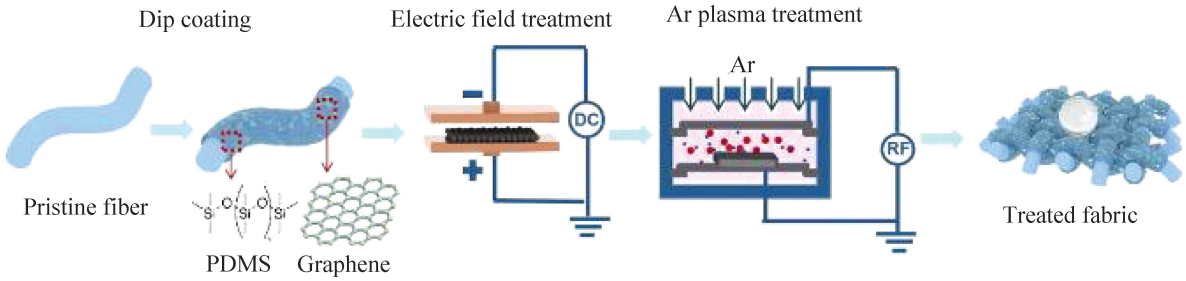


Fig. 6 Schematic diagram of superhydrophobic conductive fabrics prepared by electric field, argon plasma treatment[37]

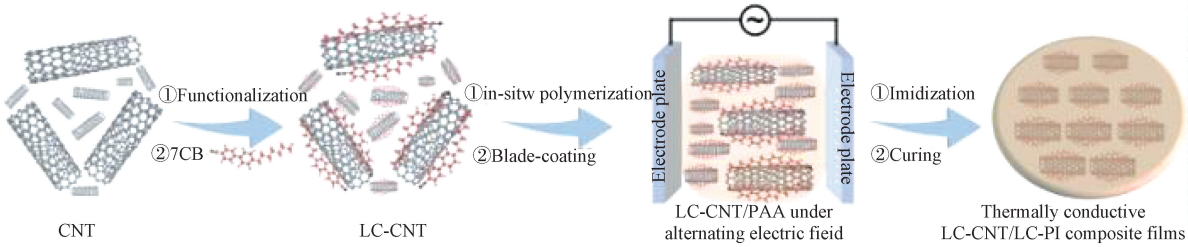


Fig. 7　Preparation process of CNT/PI composite film[38]

了传感器的灵敏度,并缩短了响应时间(约 100 ms),这种可穿戴传感器具有很强的超疏水性能(水接触角为 153.9°)。

2.3　动态电场分散

2.3.1　交流电场:交流电场,简称 AC 电场,是一种周期性变化的电场,其特点是电场的方向和大小随时间呈正弦波或其他周期性波形变化。AC 电场取向法是在交流电场作用下,使碳材料颗粒有序排列,从而提升复合材料的导热、电性能和力学性能的一种制备方法。AC 电场通常比直流电场更有利于形成均匀的填料网络结构,其在制备具有高导热性和电性能复合材料方面,具有丰富的可扩展性和广阔的应用前景。然而,这种方法对电场均匀度和电力使用较为依赖,可能影响其经济效益。

为了解决 CNT 在聚酰亚胺基体中无序分布的问题,Ruan 等[38]通过电场诱导聚酰亚胺(PI)复合膜内 CNT 的取向排列,制备了 CNT/PI 复合膜。当 CNT 的质量分数为 15% 时,室温时导热复合膜的热导率可达到 4.02 W/(m·K)。

Goto 等[39]使用聚己内酯接枝聚轮烷合成了一种复合弹性体滑环(SR)材料,将碳纳米纤维(CNF)和 CNT 组成的混合填料与硅橡胶(SR)混合后置于交流电场中,利用一维碳材料在电场中的极化效应,在复合材料内形成了 CNF 和 CNTs 的单向导热路径。通过电场取向法成功制备出了具有高导热性的 CNT/CNF/SR 复合材料。结果表明,含质量分数 5% CNT 的复合材料表现出最高的导热性,导热系数达到 14.2 W/(m·K)。此外,研究发现,与施加直流电场时相比,在交流电场中形成的 CNT 网络结构更齐整,并且随着电场强度、电流频率的增大,CNT 的定向效果越好。

交流电场通常可以获得比直流电场中更加均匀的碳系材料分布网络,交流电场取向法是较为通用的非原位技术,相比于其他取向方法,该法简单、高效、可扩展,适用于更加广泛的工业应用,在实际生产中可以实现大范围的填料取向。

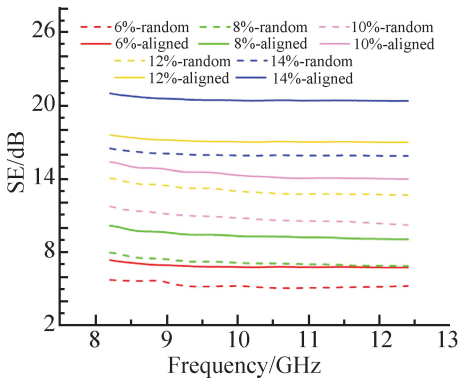


Fig. 8　Electromagnetic shielding efficacy of randomly dispersed and oriented aligned samples with different filler levels[40]

2.3.2　脉冲电场:在 2 个极板间产生电场很简单,但是部分树脂基体的介电击穿电压较低,无法对其施加较高的交直流电场。为了克服这一难题,部分学者将脉冲电场引入了碳系聚合物基复合材料的制备中。脉冲电场具有高场强和短脉冲宽度的特点,因此能够有效减少击穿风险。Mi 等[40]利用双极性脉冲电场的方法,在聚硅氧烷基体中诱导石墨烯纳米片取向排列,形成导电网络,使得复合材料的电磁屏蔽性能得到了提升。研究结果显示,在填充 14% GNPs 的情况下,针对 X 波段,随机型复合材料的电磁屏蔽效能为 15.86 ~ 16.48 dB,取向型复合材料的电磁屏蔽效能显著提升至 21.37 dB,这表明通过双极性脉冲电场诱导取向,可有效改善复合材料的电磁屏蔽性能。采用脉冲电场技术促进材料有序排列,所研制的定向排列增强体避免了在交流和直流电场作用下可能出现的电介质击穿现象。此外,该技术

还有助于增强体在基体中的有序分布和取向,从而显著提高复合材料的综合性能,因此,利用脉冲电场技术对增强体进行有序排列的方法展现出了广阔的应用前景。

3 结语与展望

电场和磁场分散技术为碳材料在聚合物基体中的分散提供了新思路,但仍面临诸多挑战。首先,实现碳材料在不同介质和尺度上的高效分散仍是行业领域内面临的普遍难题。其次,该技术的理论基础尚不完善,对碳材料在电场和磁场中的动力学行为等研究不够深入,这也是制约其发展的主要瓶颈。最后,目前定向分散技术大多停留在实验室阶段,将这些技术与现有材料加工工艺结合,实现大规模工业化生产是其实现产业化应用必须予以重点关注的方向之一。预期未来有可能在以下几个方面实现技术突破。

(1)电场和磁场的联合应用:将电场和磁场联合应用,探索两者之间的协同效应,进一步优化碳系材料的分散效果,能为制备具有特定性能的复合材料提供新的策略。

(2)磁性粒子高效改性方法:通过结合人工智能技术,将无毒、可再生的原料和溶剂引入磁性/介电性碳系粒子的改性中,通过大数据分析和智能建模,精准预测和优化改性过程中的关键参数,如反应条件、材料配比和表面修饰策略,从而显著提升改性效率和产物性能,推动其在生物医学、信息存储和能源环境等高端领域的技术革新和创新应用。

(3)定向排列特殊功能的开发:通过电场磁场定向排列功能,构建材料高传热通道、触发材料的自修复机制、自增韧机制等,赋予材料特殊的功能性,从而为其在生物医学、电子器件和光学器件等领域的应用提供更加丰富的可能性。

参考文献:

[1] Goswami A D, Trivedi D H, Jadhav N L, *et al*. Sustainable and green synthesis of carbon nanomaterials: a review[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021, 9: 106118.

[2] Hu D, Huang X, Li S, *et al*. Flexible and durable cellulose/MXene nanocomposite paper for efficient electromagnetic interference shielding[J]. Composites Science and Technology, 2020, 188: 107995.

[3] Peng L, Peng X, Liu B, *et al*. Ultrathin two-dimensional MnO_2/graphene hybrid nanostructures for high-performance, flexible planar supercapacitors[J]. Nano Letters, 2013, 13: 2151-2157.

[4] Du J R, Zheng J, Ma K, *et al*. Electric field-induced orientation of carbon nanomaterials in dispersions[J]. Chemistry Select, 2024, 9: e202303547.

[5] 张丰发, 布和巴特尔, 齐海群, 等. 碳基磁性复合材料在电磁波吸收领域的研究进展[J]. 黑龙江工程学院学报, 2021, 35(2): 1-6.
Zhang F F, Buhe B, Qi H Q, *et al*. Research on the progress of carbon-based magnetic composites in electromagnetic wave absorption field[J]. Journal of Heilongjiang Institute of Technology, 2021, 35(2): 1-6.

[6] Wang S S, Gao B, Zimmerman A R, *et al*. Removal of arsenic by magnetic biochar prepared from pinewood and natural hematite[J]. Bioresource Technology, 2015, 175: 391-395.

[7] Yang Z, Zhao Z W, Yang X, *et al*. Xanthate modified magnetic activated carbon for efficient removal of cationic dyes and tetracycline hydrochloride from aqueous solutions[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2021, 615: 126273.

[8] Wang J, Xu J Q, Meng X G, *et al*. Template-assisted synthesis and novel microwave absorption properties of superparamagnetic 2D-nanolamellar Fe_3O_4[J]. Materials Research Bulletin, 2014, 49: 176-179.

[9] Liu Z F, Chen Z H, Yu F. Enhanced thermal conductivity of microencapsulated phase change materials based on graphene oxide and carbon nanotube hybrid filler[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2019, 192: 72-80.

[10] Zhang Y H, Rhee K Y, Hui D, *et al*. A critical review of nanodiamond based nanocomposites: synthesis, properties and applications[J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 143: 19-27.

[11] Lingamdinne L P, Koduru J R, Karri R R. A comprehensive review of applications of magnetic graphene oxide based nanocomposites for sustainable water purification[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 231: 622-634.

[12] Koo K N, Ismail A F, Othman M H D, *et al*. Preparation and characterization of superparamagnetic magnetite (Fe_3O_4) nanoparticles: a short review[J]. Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences, 2019, 15: 23-31.

[13] Ren P G, Wang H, Yan D X, *et al*. Ultrahigh gas barrier poly(vinyl alcohol) nanocomposite film filled with congregated and oriented Fe_3O_4 @ GO sheets induced by magnetic-field[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2017, 97: 1-9.

[14] Xie G Q, Xi P X, Liu H Y, *et al*. A facile chemical method to produce superparamagnetic graphene oxide-Fe_3O_4 hybrid composite and its application in the removal of dyes from aqueous solution[J]. Journal of Materials Chemistry, 2011, 22: 1033-1039.

[15] Yang G J, Park S J. Conventional and microwave hydrothermal synthesis and application of functional materials: a review[J]. Materials, 2019, 12: 1177.

[16] Li F, Li J, Chen L, *et al*. Hydrothermal synthesis and up conversion properties of about 19 nm Sc_2O_3: Er^{3+}, Yb^{3+} nanoparticles with detailed investigation of the energy transfer mechanism[J]. Nanoscale Research Letters, 2018, 13: 1-9.

[17] Cao L L, Yin S M, Liang Y B, *et al*. Preparation and characterisation of magnetic Fe_3O_4/graphene oxide nanocomposites[J]. Materials Research Innovations, 2015, 19: S1-364-S1-368.

[18] Su J, Cao M H, Ren L, *et al*. Fe_3O_4-graphene nanocomposites with improved lithium storage and magnetism properties[J]. Journal of Physical Chemistry C, 2011, 115: 14469-14477.

[19] Wang Z F, Xiao P F, He N Y. Synthesis and characteristics of carbon encapsulated magnetic nanoparticles produced by a hydrothermal reaction[J]. Carbon, 2006, 44: 3277-3284.

[20] 武泽林, 王聪伟, 张晓祥, 等. 石墨烯基二氧化碳还原电催化材料研究进展[J]. 新型炭材料(中英文), 2024, 39(1): 100-130.
Wu Z L, Wang C W, Zhang X X, *et al*. Graphene-based CO_2 reduction electrocatalysts: a review[J]. New Carbon Materials, 2024, 39: 100-130.

[21] Li N, Chen J, Shi Y P. Magnetic nitrogen-doped reduced graphene oxide as a novel magnetic solid-phase extraction adsorbent for the separation of bisphenol endocrine disruptors in carbonated beverages[J]. Talanta, 2019, 201: 194-203.

[22] Shen J F, Hu Y Z, Shi M, *et al*. One step synthesis of graphene oxide-magnetic nanoparticle composite[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2010, 114: 1498-1503.

[23] Ma C, Luo B, Song H H, *et al*. Preparation of carbon-encapsulated metal magnetic nanoparticles by an instant pyrolysis method[J]. New Carbon Materials, 2010, 25: 199-204.

[24] Livage J, Gangguli D. Sol-gel electrochromic coatings and devices: a review[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2001, 68: 365-381.

[25] Zhang Q, Yan J, Li T P, *et al*. Preparation of magnetic expanded graphite by sol-gel method and its electromagnetic properties[J]. Advanced Materials Research, 2011, 295: 93-97.

[26] Jiao W C, Shioya M, Wang R G, *et al*. Improving the gas barrier properties of Fe_3O_4/graphite nanoplatelet reinforced nanocomposites by a low magnetic field induced alignment[J]. Composites Science and Technology, 2014, 99: 124-130.

[27] Zhang Y M, Wang X M, Weng L, *et al*. Magnetic field induction $ZnFe_2O_4$@carbon for construction of a PVDF-HFP-based 3D dielectric network[J]. Chemistry Select, 2024, 9: e202400425.

[28] 林峰. 磁场排列石墨烯及其性能和应用研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
Lin F. Magnetic field alignment of graphene flakes: properties and applications[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.

[29] Xie J K, Zhou Q, Guo J X, *et al*. Preparation of conductive silicone-rubber composites by dynamic magnetic field-induced orientation of ferrosoferric oxide-loaded reduced graphene oxide[J]. ACS Applied Polymer Materials, 2024, 6: 5684-5695.

[30] Liu W I, Alsarraf J, Shahsavar A, *et al*. Impact of oscillating magnetic field on the thermal-conductivity of water-Fe_3O_4 and water-Fe_3O_4/CNT ferro-fluids: experimental study[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2019, 484: 258-265.

[31] Swan J W, Vasquez P A, Whitson P A, *et al*. Multiscale kinetics of a field-directed colloidal phase transition[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2012, 109: 16023-16028.

[32] Goh P S, Ismail A F, Ng B C. Directional alignment of carbon nanotubes in polymer matrices: contemporary approaches and future advances[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2014, 56: 103-126.

[33] Jones T B. Dielectrophoretic force calculation[J]. Journal of Electrostatics, 1979, 6: 69-82.

[34] Wang H Q, Zhang H Y, Zhao W F, *et al*. Preparation of polymer/oriented graphite nanosheet composite by electric field-inducement[J]. Composites Science and Technology, 2008, 68: 238-243.

[35] Wu S Y, Ladani R B, Zhang J, *et al*. Aligning multilayer graphene flakes with an external electric field to improve multifunctional properties of epoxy nanocomposites[J]. Carbon, 2015, 94: 607-618.

[36] Prasse T, Flandin L, Karl S, *et al*. In situ observation of electric field induced agglomeration of carbon black in epoxy resin[J]. Applied Physics Letters, 1998, 72: 2903-2905.

[37] Zhang P R, Gu L L, Liu W W, *et al*. Underwater highly pressure-sensitive fabric based on electric-induced alignment of graphene[J]. Materials, 2023, 16: 1567.

[38] Ruan K P, Shi X T, Zhang Y L, *et al*. Electric-field-induced alignment of functionalized carbon nanotubes inside thermally conductive liquid crystalline polyimide composite films[J]. Angewandte Chemie, 2023, 62: e202309010.

[39] Goto T, Ito T, Mayumi K, *et al*. Movable cross-linked

elastomer with aligned carbon nano-tube/nanofiber as high thermally conductive tough flexible composite[J]. Composites Science and Technology, 2020, 190: 108009.

[40] Mi Y, Zhu Y, Dai J, *et al*. Graphene nanoplatelets/polydimethylsiloxane electromagnetic shielding composites based on bipolar pulsed electric field-induced alignment[J]. Journal of Applied Physics, 2023, 133: 095105.

Progress in the Application of Field Dispersion Technology in the Modification of Polymer Matrix Composites with Carbon-Based Materials

Xingjia Wang[1], Chi Ma[1], Yang Yang[2], Qi Wang[1], Tin Sin Lee[3], Fan Li[4]

(*1. School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang 110142, China;*
2. Liaoning Fiber Inspection Bureau, Shenyang 110004, China;
3. Department of Chemical Engineering, University Tunku Abdul Rahman, Kajang 53300, Kuala Lumpur, Malaysia;
4. School of Health Management, China Medical University, Shenyang 110122, China)

ABSTRACT: Field dispersion technology, characterized by contact-free operation, high efficiency, and controllable properties has shown great potential in fields such as energy, environment, biomedicine, and sensors, and it also provides novel approaches for the preparation and performance optimization of carbon-based composites. The preparation methods of magnetic carbon materials for magnetic field modification were introduced in this paper, including coprecipitation method, hydrothermal method, and other methods. The application of static and dynamic magnetic fields in polymer matrix composites modified with carbon materials was reviewed systematically. Additionally, the role of static and dynamic electric fields in the directed arrangement of carbon materials was analyzed, as well as the mechanism of electric field-induced effects. Finally, the current challenges in this field were discussed, and future research directions were proposed, aiming to provide both theoretical insights and practical guidance for the further development and application of electric and magnetic field dispersion techniques in composite materials.

Keywords: carbon materials; magnetic fields; electric fields; polymer matrix composites; magnetic materials