

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.08.026

基于电场诱导填料取向排列的复合材料制备技术

慎志勇¹, 李茂¹, 陈锋¹, 彭意钦², 米彦²

(1. 中国长江电力股份有限公司白鹤滩水力发电厂, 四川凉山 615000; 2. 重庆大学电气工程学院, 重庆 400044)

摘要: 电场取向法作为提升复合材料性能的有效方法, 已成为在低填充条件下制备具有优良性能复合材料的关键技术, 受到国内外众多学者广泛关注。对电场诱导填料取向进行了理论分析, 并对不同电场类型诱导不同填料取向制备复合材料的相关研究进行了整理与分析。针对直流电场和交流电场在取向过程中的热击穿现象, 重点论述了脉冲电场诱导填料取向制备取向型复合材料的研究现状和优势。最后, 分析了利用电场取向法制备复合材料的难点, 并对电场取向法制备复合材料的未来发展方向进行了展望。

关键词: 脉冲电场; 介电运动; 填料取向; 复合材料; 热击穿

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)08-0184-06

Composite material preparation techniques based on electric field induced filler orientation

SHEN Zhiyong¹, LI Mao¹, CHEN Feng¹, PENG Yiqin², MI Yan²

(1. Baihetan Hydropower Plant, China Yangtze Power Co., Ltd., Liangshan 615000, China;

2. School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract : The electric field orientation method, as an effective method to improve the performance of composite materials, has become a key technology for preparing composites with excellent performance under low filling conditions, and has received widespread attention from many scholars at home and abroad. A theoretical analysis of the orientation of fillers induced by electric fields was provided, and the relevant research on the preparation of composite materials induced by different types of electric fields to induce different orientations of fillers was summarized and analyzed. Focusing on the thermal breakdown phenomenon during the orientation process of DC electric field and AC electric field, the research status and advantages of pulse electric field induced filler orientation preparation of oriented composite materials were mainly discussed. Finally, the difficulties in preparing composite materials using electric field orientation method were analyzed, and the future development direction of electric field orientation method for preparing composite materials was prospected.

Keywords : pulse electric field ; dielectric motion ; filler orientation ; composite ; thermal breakdown

聚合物基材料具备成本低廉、易加工的特性以及优异的绝缘性能, 其在电气设备和电网系统中得到广泛应用^[1]。然而, 由于聚合物基材料导热率较低 $[0.1\sim 0.5\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$ ^[2-3], 并且长期处于电网高温高压环境下, 高分子聚合物材料容易发生降解, 降低其力学性能和绝缘性能, 从而对电气设备造成损坏, 对电网稳定运行构成威胁^[4-5]。文献指出, 不同填料颗粒具有独特的理化性质, 向聚合物基体加入无机微米、纳米填料能够明显改善其电学性能^[6-7]和热学性能^[8-9]等诸多性能。Gu等^[10]将氮化硼(BN)作为填料, 制备BN/环氧树脂(EP)基复合材料, 研究发现, 当BN填充量为60%时, 复合材料的热导率是纯EP树脂的5倍左右, 提高到了 $1.052\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

Nagai等^[11]在以氮化铝为导热填料, 制备环氧树脂基复合材料, 研究结果表明, 当填料平均粒径为 $23.9\text{ }\mu\text{m}$, 填充量为68.5%时, 复合材料的热导率提升至 $7.15\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。黄兴溢等^[12]将不同形状的BN纳米片作为填料, 填充到线性低密度聚乙烯中, 研究发现, 相较于其他形状的填料, 片状纳米粒子可提高材料击穿场强。

在基体材料中, 通过外力对填料进行取向可有效提升复合材料的电学性能和导热率, 尤其适用于低填充量情况。常见的填料取向方法包括磁场诱导取向、电场诱导取向、剪切取向法以及冰晶诱导法等^[13-14]。阚宇强等^[15]首先利用湿化

基金项目: 中国长江电力股份有限公司白鹤滩水力发电厂资助科研项目(Z532302048)

通信作者: 米彦, 博士, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为固态脉冲功率技术、电场调控复合材料制备

收稿日期: 2024-06-03

引用格式: 慎志勇, 李茂, 陈锋, 等. 基于电场诱导填料取向排列的复合材料制备技术[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(8): 184-189.

SHEN Zhiyong, LI Mao, CHEN Feng, et al. Composite material preparation techniques based on electric field induced filler orientation[J].

Engineering Plastics Application, 2024, 52(8): 184-189.

学共沉淀法对BN进行磁改性,随后在EP树脂中,通过恒定磁场对BN进行取向,制备了取向型复合材料。研究表明,填充30%的取向型复合材料其热导率达到了1.017 W/(m·K),相较于随机型提升了15.6%。Shen等^[16]利用剪切取向法对六方BN(h-BN)进行取向,制备了取向型h-BN/聚乙烯醇薄膜,研究结果显示,当填料体积含量为30%时,其面内热导率达到了8.8 W/(m·K)。Wang等^[17]采用溶剂浇铸法制备了酯化碳纳米管/聚偏氟乙烯(PVDF)导热复合膜,并通过交流电场对填料进行取向。实验结果表明,在填充量为5%时,取向后复合膜的热导率比纯PVDF提高了57.18%,相较于随机型复合膜提升更为显著。Lian等^[18]利用冰晶取向法制备了具有垂直取向且相互连接的石墨烯网络,并将其与EP树脂混合,制备了取向型复合材料。其热导率达到了2.13 W/(m·K),相较于纯EP树脂提升了12倍以上。

利用外力诱导填料在基体材料中形成取向排列通道,以提升复合材料的性能表现,是制备高性能材料的有效方法,且已在国内外研究中成为热门领域^[19-20]。各种填料取向方法的对比表明,剪切取向法虽然操作简便,但难以实现纳米填料完全垂直于复合膜表面,从而限制了其充分取向效果;磁场取向法虽然取向效果较好且工艺简单,但由于生成强磁场相对困难,而且对于非磁性材料,其取向程度受到表面沉积磁性粒子数量的限制^[14];冰晶诱导法虽然在低填充下能提升材料性能,但其制备复杂,不易规模化生产^[8]。相对而言,外施电场法具有高效、灵敏、易控制、工艺简单等优点^[21],因此利用外施电场使填料取向排列,被认为是最有效和直接的方法之一,其应用前景更为广阔^[22]。

在综合国内外学者对利用电场取向填料制备取向型复合材料的研究基础上,笔者针对不同电场类型和填料参数的变化,对各种电场类型下诱导填料取向排列的研究进行了详细论述,探讨了电场诱导填料取向制备复合材料时的关键技术问题,并对该技术的挑战和未来发展趋势进行了深入分析。

1 电场诱导填料取向排列的原理

非球形颗粒,在外施电场作用下,填料发生极化。将在电场中极化后的颗粒同非均匀电场相互作用,产生的运动,称为介电运动。取向过程中,极化的颗粒在基体中会受到介电力 F_{dep} 、黏滞阻力 F_v 与布朗运动力 F_t 的作用。通过受力分析可得,只有当 F_{dep} 大于 F_v 和 F_t 时,填料才会转动至与电场方向平行^[23]。

麦克斯韦应力张量法被认为是求解复杂电场下,不同形状颗粒所受介电力最严谨的方法。通过在颗粒表面对麦克斯韦应力张量积分,计算颗粒的介电力^[24-25],即:

$$F_{\text{dep}} = \int_{\partial\Omega} (T_E \cdot n) ds \quad (1)$$

式中: T_E 是麦克斯韦应力张量, n 为填料的单位法向矢量。麦克斯韦应力张量可表示为^[26]:

$$T_E = \varepsilon \left[EE - \frac{1}{2} (E \cdot E) I \right] + \mu \left[HH - \frac{1}{2} (H \cdot H) I \right] \quad (2)$$

式中: ε 为相对介电常数, μ 为磁导率, E 为场强, H 为磁场强度, I 为二阶单位矩阵。

复合材料制备过程中,填料受到的 F_v 主要和预混料黏度相关^[27],以片状填料为例其表达式如式(3)所示:

$$F_v = 6\pi\eta_s a^3 \gamma \quad (3)$$

式中: η_s 是固化过程中预聚物黏度,单位为Pa·s; a 为片状填料半径,单位m; γ 为剪切速率,单位s⁻¹。

在材料的制备过程中,颗粒受到布朗力 F_t 作用, F_t 的表达式如式(4)所示:

$$F_t = K_b T \quad (4)$$

式中: K_b 为玻尔兹曼常数; T 为温度。

颗粒在电场中的取向过程如图1所示^[28],首先当颗粒在电场中所受 F_{dep} 大于 F_v 和 F_t 时,在颗粒上产生场致转矩,从而使其发生沿电场方向对齐的取向运动;然后由于两粒子间的介电相互作用,使得两粒子在平行于电场的方向上靠近,形成首尾相连结构。

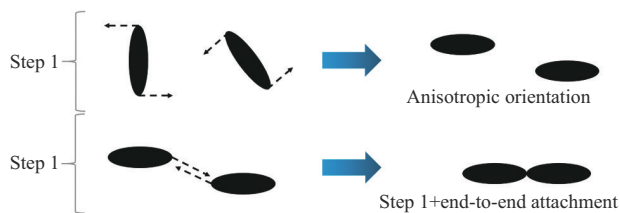


图1 非球形颗粒取向排列的原理图^[28]

Fig. 1 Schematic diagram of orientation arrangement of non-spherical particles^[28]

2 不同电场类型诱导填料取向排列制备复合材料

外加电场诱导填料取向制备复合材料的过程,根据应用的电场类型,通常可划分为直流电场取向、交流电场取向以及脉冲电场^[29-30]取向,而各种电场类型对于填料取向效果的影响略有不同。常见的,基于不同的制样模具,可用于制备电场取向型薄膜类复合材料^[31]和取向型块状复合材料^[32]。

2.1 直流电场诱导填料取向制备复合材料

直流电常用于电池供电、电化学等领域,国内外的一些学者也利用直流电场对填料进行取向排列,以制备复合材料。

Khoramishad等^[33]利用直流电场诱导氧化石墨烯纳米片(GONP)取向,制备取向GONP的胶黏剂,研究发现当填充含量为0.1%时,与随机型GONPs相比,取向型GONPs导致黏合接头的最大载荷和断裂能分别提高56%和42%。

赵博等^[34]利用直流电场诱导纳米炭黑(CB)和碳纤维(CNF)在不饱和树脂基体(UPR)中取向,制备了取向型复合材料。研究结果显示,在随机填充填料的情况下,CNF和CB均随机分散于基体材料当中。然而,随着固化过程中直流电场的加入,虽然CNF的分布未发生变化,但是CB沿着电场

方向定向排列。此外,研究还发现,填料添加量具有阈值,较高的填料添加量不仅会降低填料取向排列程度,还会增加内部的缺陷,致使复合材料导电性能降低。

毕世杰等^[35]在EP树脂基体中填充BN,并利用直流电场对基体中的BN进行取向,以制备取向型复合材料(BN/EP)。研究中通过调节电场强度来探究不同电场强度对取向型BN/EP热导率的影响。研究发现:随着场强的提升,BN纳米片的取向程度增加,同时取向型BN/EP的热导率也随之增加。当电场强度达到13.33 kV/m时,取向型BN/EP的热导率达到了0.93 W/(m·K),相比随机型BN/EP提高了1.6倍。

Liang等^[36]在h-BN/EP复合材料的固化过程中,利用直流电场诱导h-BN的偏转和首尾搭接,从而形成更为有效的导热网络。研究结果显示,相较于其他较低场强而言,在400 V/mm,20 min的电场条件下,h-BN的平均取向角度最大为55°左右,并且其在EP树脂中排列更加有序,形成更为理想的导热网络。取向型复合材料的导热率提升至0.544 W/(m·K),相较于纯EP树脂提高了289%,与具有相同填充量的随机型复合材料相比提高了130%。故而复合材料中导热填料的取向程度随着取向直流场强的提高而增加,并且复合材料的导热率与填料取向角度正相关。

Haruki等^[37]研究了h-BN/氟化聚酰亚胺复合材料制备过程中,直流电场处理对其导热系数的影响。研究结果表明,在体积填充量为14.2%时,取向型复合片材在平面外方向上的导热系数相比随机型复合材料提高了约1.5倍。

Chen等^[38]利用直流电场诱导羧甲基纤维素的取向排列。在直流电场的作用下,羧甲基纤维素能够在聚二甲基硅氧烷中,以几秒钟的时间沿着平面外方向形成柱状物,从而制备出具有高介电常数的复合膜。

在复合材料的制备过程中,施加直流电场对填料产生介电力作用,从而诱导填料的取向排列。在复合材料中,填料含量和直流电场的场强会影响填料在基体中的取向排列程度,较大的场强更有利于颗粒的取向排列。综合以上研究内容可以得出,复合材料性能的提升与填料的取向排列程度密切相关。相比随机填充型复合材料,取向型复合材料的导热性能、抗断裂性能以及导电性能等诸多性能都得到了一定程度的优化。

2.2 交流电场诱导填料取向排列制备复合材料

相较于直流电场,交流电场在诱导填料取向以制备复合材料方面得到了更广泛的应用和研究。

Qin等^[39]利用交流电场诱导EP树脂中的石墨烯,使其取向排列,提升复合材料电导率。研究发现,当填充质量分数为3%时,相较于随机型复合材料,通过60 V电压处理10 min制备的取向型复合材料的电导率提升了2~3个数量级。

Prasse等^[40]首先在胺固化剂中利用交流电场诱导碳纤维,探索其取向现象,随后利用制备取向型EP树脂基复合材料。实验结果显示,在10 kV/m的交流电场的作用下,碳纤维发生取向排列,并且相较于垂直排列,复合材料在平行排

列方向上的介电常数提高了20倍。

由于BN纳米片的介电常数较低,Kim等^[41]先在BN表面沉积一种介电性能优异的TiO₂,在聚氨酯丙烯酸酯基体中,利用交流电场对纳米TiO₂修饰后的BN微粒进行垂直取向排列。研究结果显示,当体积填充量为20%时,取向型复合材料的热导率达到了1.54 W/(m·K),是随机型复合材料的1.9倍。此外,Kim等^[42]在EP树脂基体材料中,利用交流电场制备了取向型石墨/EP树脂材料。研究发现,利用2.4 kV/mm交流电场制备的取向型复合材料,同随机型复合材料相比,平行电场方向上的弹性模量提高了10%。

Wu等^[43]利用交流电场在热塑性聚氨酯(TPU)基体中取向排列聚苯胺(PANI)颗粒。研究结果表明,通过交流电场诱导PANI在聚合物基体中的排列不仅显著提高了复合材料的介电常数,而且有效地增加了光学各向异性。在相同填料含量下,通过10 Hz电场制备的取向复合材料的介电常数为10.63 (10 Hz),高于随机型复合材料的介电常数(8.58)。并且当频率较低时(5 Hz和10 Hz),颗粒形成了直链状结构;而当频率从5 Hz增加到10 Hz时,形成的链状结构变得更为厚实和完整。在较高频率下,聚苯胺颗粒的结构比在低频率下形成的结构更加厚实。

Wang等^[44]在聚二甲基硅氧烷(PDMS)中利用交流电场诱导苯胺颗粒形成网络结构。通过电场诱导苯胺颗粒制备的复合材料的介电常数明显高于随机型复合材料。研究发现,当添加10%的苯胺颗粒时,通过电场诱导制备的复合材料的介电常数高达99.4,是原始PDMS (3.38)的30倍,并且是随机型复合材料(5.1)的20倍。

Martin等^[45]在EP树脂中,分别研究了直流和交流电场下,碳纳米管的取向规律。研究结果表明,在不同电场作用下,碳纳米管均会发生取向,但是相较于直流电场,交流电场的诱导能形成更整齐的导电网络,取向型复合材料的电导率和电场幅值正相关,并且取向型复合材料的导电性能呈现出各向异性。此外,Zhang等^[46]利用交流电场诱导石墨片在不饱和聚酯树脂中取向,制备了取向型材料。研究发现,电场诱导下制备的取向型复合材料的逾渗阈值由未加电场时的9.5%降低到5.5%,降低了42%。

Liu等^[47]在EP树脂中,施加交流电场和直流电场诱导BN和碳化硅(SiC)的取向,制备了取向型复合材料。研究结果表明利用电场取向制备的取向型复合材料具有更高的热导率。此外,相较于直流电场,交流电场对填料的作用更大,因此通过交流电场制备的复合材料其热导率高于直流电场制备的复合材料。

相对于直流电场而言,交流电场在诱导填料取向方面除了电场的场强,频率也是一个重要的影响因素。研究表明,较高的频率有利于填料取向排列程度的提高。综合交流电场诱导颗粒取向制备取向型复合材料的研究结果分析,利用交流电场诱导填料取向同样能够有效提升复合材料的诸多性能。并且通过进一步分析表明,交流电场对填料的取向

效果优于直流电场^[47]。

2.3 脉冲电场诱导填料取向制备复合材料

Huynh等^[31]在利用直流电场制备取向型复合材料时,发现基体材料可能出现击穿现象,这是由于在直流电场中,绝缘高分子的击穿电压较低所致。为解决交、直流电场下的热击穿问题,Cho等^[48]采用了脉冲电场诱导取向的方法。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。Cho等研究了纳秒脉冲电场(脉宽为50 ns、频率为1~20 Hz)作用下BN在基体材料中的取向行为。研究表明,施加在样品两端的脉冲电场场强幅值可达40 kV,并且在该电场的作用下,BN发生了取向排列。这一研究为利用脉冲电场制备取向型复合材料提供了指导和参考。

戴锦炎等^[49]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(GNPs)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16.48 dB至15.86 dB,而取向型复合材料的电磁屏蔽效能则显著提升至21.37 dB至20.99 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。

米彦等^[50]利用微秒脉冲电场取向BN纳米片,制备了EP树脂基复合材料。研究发现,随着电场强度由0 kV/mm提升到12 kV/mm,BN纳米片的平均取向角由10°左右上升到75.56°,复合材料的导热系数也由0.286 W/(m·K)提升到0.491 W/(m·K);随着频率由0 Hz升高到100 Hz,BN纳米片的平均取向角10°左右增大到了80.25°,非常接近平行电场方向。可以得到结论,随着场强和脉冲频率的增加,BN纳米片平均取向角度和越来越大,并且复合材料的导热率随着BN纳米片的取向角度的提高而提高。研究结果显示,当频率由50 Hz提升到100 Hz时,其取向角度变化很小,但是复合材料导热率的提升并未达到饱和。其原因在于,电场不仅能使BN纳米片发生局部取向还能进行全局排列,在BN纳米片取向角度达到饱和之后,BN纳米片之间相互移动,形成导热通道,导热率得到进一步提升。

Liang等^[51]利用脉冲方波电场诱导h-BN在EP树脂基体中的取向排列,并深入研究了脉冲方波电场的电场强度、频率和作用时间对复合材料导热性能的影响。研究结果发现复合材料的导热系数随着电场强度的增加而逐渐增大。在10%负载条件下,当施加200 V/mm、0.001 Hz的脉冲方波电场持续作用1 h时,复合材料的热导率达到了0.453 W/(m·K),是纯EP树脂的3.24倍,相较于随机型复合材料提高了1.94倍。

Lee等^[52]在聚硅氧烷基体中,通过纳秒脉冲电场诱导氧化钛纳米管(TNT)的取向,成功制备了具有氧化钛线性排列结构的聚硅氧烷基纳米复合薄膜。在不同电场条件下制备的TNT/聚硅氧烷基纳米复合材料,与随机型复合材料相比,在加入脉冲电场后,取向型复合材料中TNT呈线性密集排列。

研究结果表明,经过幅值为3 kV、重复频率50 Hz、脉宽70 ns的纳秒脉冲电场诱导后,取向型复合薄膜的电阻率由 $3.25 \times 10^8 \Omega \cdot \text{m}$ 降低到了 $3.08 \times 10^7 \Omega \cdot \text{m}$,电阻率显著降低,表明纳秒脉冲电场诱导可以有效改善复合薄膜的电性能。

综上所述,通过利用脉冲电场诱导填料取向排列,制备的取向型复合材料,成功解决了交流电场和直流电场在取向过程中可能出现的热击穿问题。同时,这种方法能够有效促使填料在基体材料中实现有序排列和取向,从而显著提升复合材料的性能。因此,利用脉冲电场对填料取向的方法具有广泛的应用前景。

3 电场诱导不同填料取向制备复合材料

在电场诱导填料在基体材料中取向的过程中,填料的形状和尺寸差异导致其受到的介电力和阻力不同,因而影响了填料在基体材料中的取向程度。这种取向程度的差异进而对复合材料的性能产生一定的影响。

3.1 电场诱导不同形状填料取向制备复合材料

李长青等^[53]利用交流电场对多壁碳纳米管(MWCNTs,一维)进行取向排列,并制备了取向型MWCNTs/EP树脂复合材料,研究了场强、填充量和电压作用时间等因素对MWCNTs定向排列的影响。研究结果显示,在MWCNTs质量分数为2.5%时,有序排列的MWCNTs/EP树脂复合材料的拉伸强度明显高于随机排列的复合材料,提高约26.3%。

Yakovenko等^[54]在EP树脂中利用交流电场对石墨烯纳米片(GNP)(二维)和多壁碳纳米管(MWCNTs)(一维)进行取向,制备了取向型复合材料。研究发现,在电场的作用下,聚合物基质中获得了一致对齐的GNP链,并且随着电场作用时间的增加,一致对齐的GNP链相互靠近,逐渐形成网络。另一方面,Yakovenko等^[55]还利用电场诱导MWCNTs,发现其在电场作用下呈链状定向,并且随着作用时间的提升,链状结构逐渐加粗。结合两研究结果可以发现,在相同条件下,GNP相较于MWCNTs更快地形成了对齐网络,主要原因是MWCNTs在基体材料中的团聚现象会阻止其在电场方向上的对齐。

Wu等^[56]在PDMS中掺入了具有不同形状的BN(片状)和 Al_2O_3 (球状)两种不同类型的颗粒,通过这两者之间的协同效应改善了BN/ Al_2O_3 /PDMS复合材料的导热系数。同时,这些填料在电场作用下的取向进一步提高了导热系数,在相同的填充量下,取向型三元复合材料的导热系数为0.228 W/(m·K),明显高于随机复合材料(0.215 W/(m·K))以及只含有一种填料的复合材料[BN/PDMS为0.196 W/(m·K), Al_2O_3 /PDMS为0.172 W/(m·K)]。

Du等^[57]利用交流电场分别在不同的分散系中诱导炭黑(零维)、碳纳米管(CNTs)(一维)和GNP(二维)的取向排列,研究了相同电场下不同维度材料的取向特征。研究结果发现,当电场强度相对较低(例如20 V/mm)时,炭黑呈现出精细的纳米线结构,CNTs在溶剂中呈随机分散状态,没有明显的取向排列,而石墨烯纳米片沿电场方向取向,但只形成了小尺

寸的短横向结构。随着电场强度的增加,作用于碳纳米材料上的扭矩增加,克服了溶剂中的黏性阻力,形成了更加规则的取向结构。

3.2 电场诱导不同尺寸填料取向制备复合填料

Kinoshita等^[58]在EP树脂基体中,利用2 kV/mm交流电场诱导三种不同尺寸(片径分别为2 μm 、7 μm 、10 μm)的片状氧化铝取向排列。研究结果显示,在电场的作用下,样品中的填料呈链状结构,并且该填料取向方向和电场方向相同,取向型复合材料的热扩散率相较于随机型有显著提升,且填料尺寸越大,热扩散率提升的幅度越大。

Muruges等^[59]在EP树脂基体中,利用直流和交流电场对五种不同尺寸的MWCNTs进行取向,研究了交流电泳下MWCNTs的取向和聚集成“条纹”线的情况。其结果表明,在这五种不同尺寸的MWCNTs中,具有最大外径和长度的MWCNTs的迁移率最高。

Ravindran等^[60]利用交变电场分别处理碳纳米纤维(CNF,直径:70~300 nm,长:19.1 μm)和短碳纤维(SCF,直径:7 μm ,长:720 μm),制备取向型EP树脂基复合材料。研究结果发现,CNF和SCF均在短时间内旋转并朝向电场方向排列,并且在相同电场作用下,二者旋转速度相同,并且由于在电场中,纤维两端电荷不同,相互吸引,从而形成一个沿电场方向排列的“链状”网络。在相同电场的作用下,等填充质量的取向型CNFEP树脂材料的断裂韧性优于取向型SCFEP树脂材料,并且相较于随机型复合材料而言,提升更多。由此可知,相较于随机型复合材料而言,电场制备的取向复合材料,其填料直径与长度越小时,复合材料的断裂韧性提升越多。

目前,许多研究利用电场诱导基体材料中片状和棒状填料的排列取向,制备取向型复合材料。在电场作用下,不同参数的填料取向排列程度和性能提升均存在差异。

4 结语

利用外施电场法能够在低填充量的条件下显著提升复合材料的各项性能,因此备受国内外学者的关注。然而,尽管该方法在理论上具有巨大潜力,但在实际生产中应用较少,主要是由于存在一些难以克服的问题。因此,需要通过进一步的研究来解决这些问题。

未来对于电场诱导填料制备复合材料的研究应该从以下三个方面着手进行:1)通过仿真和实验相结合的方法,调整脉冲参数和填料参数,进行系统的实验研究,以总结出不同脉冲参数对不同几何参数填料取向的定性规律;2)基于实验与仿真数据,利用理论分析方法对不同脉冲参数作用下填料取向进行深入的理论研究,以得出其定量的公式或者准确的模型;3)结合理论分析结果和实际应用需求,对电场进行优化,根据工业应用的具体形状和要求,设计出适用于不同工业尺寸和要求的优化电场,以此来制备满足工业需求的复合材料。

参考文献

- [1] 李寒梅,等. 化学研究,2018,29(4): 429-440.
LI Hanmei, et al. Chemical Research, 2018, 29 (4): 429-440.
- [2] 杜元开,等. 化学通报,2023,86(9): 1 026-1 034.
DU Yuankai, et al. Chemistry, 2023, 86 (9): 1 026-1 034.
- [3] RUAN K, et al. Materials Today Physics, 2021, 20. DOI: 10.1016/j.mtphys.2021.100456.
- [4] BAFFETT J. Microelectronics Reliability, 1998, 38(6-8): 1 277-1 286.
- [5] PREETHA P, et al. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(5): 1 526-1 534.
- [6] 杨俊. 聚丙烯基绝缘及半导体屏蔽材料力学与电学性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2021.
YANG Jun. Mechanical and electrical properties of polypropylene-based insulating and semi-conductive shielding materials[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2021.
- [7] 张城城,等. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(5). DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20220809.009.
ZHANG Chengcheng, et al. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(5). DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20220809.009.
- [8] 代瑞,等. 塑料, 2024, 53(1): 119-124.
DAI Rui, et al. Plastic, 2024, 53(1): 119-124.
- [9] 郭境涛,等. 化工新型材料, 2024, 52(2): 125-129.
GUO Jingtao, et al. New Chemical Materials, 2024, 52(2): 125-129.
- [10] GU J, et al. Polymers for Advanced Technologies, 2012, 23(6): 1 025-1 028.
- [11] NAGAI Y, et al. Journal of the ceramic Society of Japan, 1997, 105(1219): 197-200.
- [12] 黄兴溢,等. 中国电机工程学报, 2016, 36(24): 6 606-6 612.
HUANG Xingyi, et al. Proceedings of the CSEE, 2016, 36 (24): 6606-6 612.
- [13] 赵春宝,等. 塑料工业, 2022, 50(11): 23-28.
ZHAO Chunbao, et al. China Plastics Industry, 2022, 50(11): 23-28.
- [14] 陈海斌,等. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(4): 1 486-1 497.
CHEN Haibin, et al. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39 (4): 1486-1 497.
- [15] 阚宇强. 磁场诱导下环氧树脂/BN有序复合材料的制备及其特性研究[D]. 石家庄: 华北电力大学, 2019.
KAN Yuqiang. Study on preparation and properties of epoxy resin/BN ordered composite through magnetic alignment[D]. Shijiazhuang: North China Electric Power University, 2019.
- [16] SHEN H, et al. ACS applied materials & interfaces, 2015, 7(10): 5 701-5 708.
- [17] WANG Z, et al. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 2015, 54(5): 515-522.
- [18] LIAN G, et al. Chemistry of Materials, 2016, 28(17): 6 096-6 104.

- [19] SHANG Z, et al. *Polymers for Advanced Technologies*, 2021, 32 (12): 4 745–4 754.
- [20] BAI Y, et al. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2022, 307(1): 2100632. DOI: 10.1002/mame.202100632.
- [21] 申子魁,等. *中国电机工程学报*, 2024, 44(2): 790–805.
SHEN Zikui, et al. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(02): 790–805.
- [22] 戚宇. 磁场排列石墨烯基复合材料及其热导性能的研究[D]. 成都:电子科技大学, 2022.
QI Yu. Research on magnetic field aligned graphene-based composites and the thermal conductivity[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2022.
- [23] 刘露露. 微秒脉冲电场诱导 BNNS 取向对复合材料电热性能的影响[D]. 重庆:重庆大学, 2020.
LIU Lulu. Effect of microsecond pulsed electric field induced BNNS orientation on electrothermal properties of composites[D]. Chongqing: Chongqing University, 2020.
- [24] ROSALES C, et al. *Electrophoresis*, 2005, 26(11): 2 057–2 065.
- [25] AL-JARRO A, et al. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2006, 40(1). DOI:10.1088/0022-3727/40/1/S11.
- [26] WANG X, et al. *Journal of electrostatics*, 1997, 39(4): 277–295.
- [27] 顾佳. 电场诱导蒙脱土在聚乙烯中取向分散及其电树枝特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
GU Jia. Electric field induced oriented of montmorillonite in polyethylene and properties of electrical tree growing in this composite [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [28] CHO H B, et al. *Composites Science and Technology*, 2016, 129: 205–213.
- [29] CHEN J, et al. *ACS nano*, 2018, 13(1): 337–345.
- [30] CHO H B, et al. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 2016, 124(3): 197–202.
- [31] HUYNH M T T, et al. *Composites Science and Technology*, 2018, 154: 165–174.
- [32] ZHU Y F, et al. *Journal of Applied Physics*, 2009, 105(5). DOI: 10.1063/1.3080243.
- [33] KHORAMISHAD H, et al. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2018, 41(12): 2514–2 529.
- [34] 赵博,等. *材料工程*, 2013(4):85–91.
ZHAO Bo, et al. *Journal of Materials Engineering*, 2013(4): 85–91.
- [35] 毕世杰,等. *绝缘材料*, 2023, 56(5): 14–19.
BI Shijie, et al. *Insulation Materials*, 2023, 56(5): 14–19.
- [36] LIANG L, et al. *Polymer Composites*, 2024, 45(1): 181–192.
- [37] HARUKI M, et al. *Thermochimica acta*, 2020, 684. DOI:10.1016/j.tca.2019.178491.
- [38] CHEN T, et al. *Carbohydrate Polymers*, 2024, 329. DOI:10.1016/j.carbpol.2024.121803.
- [39] QIN Q, et al. *Journal of Polymer Research*, 2024, 31(2). DOI: 10.1007/s10965–024-03882-z.
- [40] PRASSE T, et al. *Composites Science and Technology*, 2003, 63 (13): 1 835–1 841.
- [41] KIM K, et al. *Ceramics International*, 2016, 42(7): 8 657–8 663.
- [42] KIM G H, et al. *Journal of materials research*, 2004, 19(4):1 164–1 174.
- [43] WU W, et al. *Polymer Engineering & Science*, 2022, 62(12): 3 945–3 951.
- [44] WANG Q, et al. *Polymer Bulletin*, 2023, 80(11): 12 417–12 431.
- [45] MARTIN C A, et al. *Polymer*, 2005, 46(3): 877–886.
- [46] ZHANG H, et al. *Integrated Ferroelectrics*, 2020, 206(1): 173–184.
- [47] LIU X, et al. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2019, 29(2): 1–5.
- [48] CHO H B, et al. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 2010, 118(1373): 66–69.
- [49] 戴锦炎. 双极性脉冲电场诱导 GNPs 取向排列对复合材料电磁屏蔽性能的影响[D]. 重庆:重庆大学, 2022.
DAI Jinyan. Effect of GNPs alignment induced by bipolar pulsed electric field on electromagnetic shielding performance of composite materials[D]. Chongqing: Chongqing University, 2022.
- [50] 米彦,等. *电工技术学报*, 2020, 35(15): 3 348–3 355.
MI Yan, et al. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(15): 3348–3 355.
- [51] LIANG L, et al. *Polymer*, 2024, 290. DOI: 10.1016/j.polymer.2023.126491.
- [52] LEE J W, et al. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 2014, 2(2): 97–101.
- [53] LI Changqing, et al. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2018, 35 (9). DOI:10.13801/j.cnki.fhclxb.20171207.002.
- [54] YAKOVENKO O, et al. *Nanoscale Research Letters*, 2017, 12: 1–11.
- [55] YAKOVENKO O, et al. *Physica Status Solidi(A)*, 2014, 211(12): 2 718–2 722.
- [56] WU W, et al. *Composites Communications*, 2022, 35. DOI: 10.1016/j.coco.2022.101309.
- [57] DU J R, et al. *Chemistry Select*, 2024, 9(6). DOI: 10.1002/slct.202303547.
- [58] KINOSHITA S, et al. Effect of electric field application during curing process on thermal conductivity of epoxy composite materials with low content inorganic particles[C]//2012 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. IEEE, 2012: 183–190.
- [59] MURUGESH A K, et al. *Applied Physics A*, 2010, 100: 135–144.
- [60] RAVINDRAN A R, et al. *Composites Science and Technology*, 2018, 167: 115–125.