http://pmse.scu.edu.cn

碳纤维在电磁屏蔽及吸波材料中的应用研究进展

连 兵, 聂艳影, 劳世超, 施兴越, 徐 征, 徐利文
(杭州师范大学 材料与化学化工学院 有机硅化学及材料技术教育部重点实验室,浙江 杭州 311121)

摘要: 随着无线通信技术和电子设备的快速发展,电磁波污染问题日益引起人们的关注。高性能电磁屏蔽材料对于有效控制电磁污染和保护人类健康越来越重要。碳纤维(CF)作为一种集轻质、柔性、化学稳性好、导电性高和力学性能好等特性于一体的碳基材料,广泛应用于电磁屏蔽材料领域。文中从碳纤维的形态、分布、结构及复合电磁屏蔽材料的组成特征出发,对近年来碳纤维在电磁屏蔽及吸波材料中的最新应用进展进行了简要综述。从连续碳纤维复合材料和非连续碳纤维复合材料角度总结了碳纤维在电磁屏蔽复合材料的应用和性能,并对碳纤维基电磁屏蔽材料所面临的挑战、未来发展方向和前景进行了展望,以期为碳纤维在电磁屏蔽领域中的应用提供参考。

关键词: 碳纤维;电磁屏蔽;吸波;复合材料
中图分类号: TQ342^{+}.742 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7555(2025)12-0135-13

随着新一代通讯技术和智能化电子设备的日益普及,电磁辐射干扰和电磁波污染越来越引起人们关注[1]。它不仅会对电子设备和精密仪器的安全和可靠性造成危害,还会对人类健康及生态产生不良影响。开发适用于不同应用场景需要的高性能电磁屏蔽材料迫在眉睫。

早期,人们利用高电导率和介电常数的金属及合金对电磁波的反射来实现对电磁波的屏蔽,但金属基电磁屏蔽材料普遍存在密度高、易腐蚀、加工性能差、无吸波性等固有缺陷[2,3]。无法满足日益多样化应用场景对电磁屏蔽材料的需求,特别是对吸波性能的需求[4]。相比之下,碳纤维[5,6]、碳纳米管、石墨烯和炭黑等碳基材料具有导电性好、密度低和耐腐蚀,将其与透波性聚合物基体复合可制得吸波性好且易于加工的高性能电磁屏蔽复合材料[7]。

碳纤维(CF)作为一种可连续化生产的人造纤维,既有纤维的柔韧性,又具有高电导率、宽吸收频带、高模量、高温强度大、低密度、耐腐蚀、高热传导率、低热膨胀系数和抗氧化等优异性能。近几十年间,碳纤维作为电磁屏蔽填料引起越来越多的关注。碳纤维有连续长纤维、短切纤维及非连续粉末 3 种存在形式,其中,连续长碳纤维主要以有序排列、重叠和编织的方式形成具有定向导电网络的编织型电磁屏蔽(复合)材料[8,9],短切碳纤维和非连续碳纤维主要以填充方式引入功能性聚合物形成无序填充型碳纤维基复合电磁屏蔽材料。近年来,新型高性能碳纤维及其电磁屏蔽复合材料成为研究的热点课题。下面就最新研究进展逐一展开论述。

1 电磁屏蔽原理

电磁屏蔽是将导电或导磁材料制成屏蔽壳体,将需要屏蔽的区域封闭起来形成电磁隔离,以实现限制内部电磁波能量泄漏和防止外来电磁波辐射干扰进入,或者使进出该区域的电磁波能量大幅度衰减的目的。当电磁波接触到材料表面会发生 Fig.1 所示反射、吸收和透射 3 种现象,分别对应于电磁屏蔽材料反射损耗、吸收损耗和多重反射损耗 3 个部分。

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2025.0221
收稿日期: 2024-11-14
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(22371060); 浙江省自然科学基金资助项目(LY21B030007, 2021R51005); 浙江省“尖兵领雁+X”科技计划项目(2025C01159)
通讯联系人: 徐征, 主要从事有机硅化学及材料研究, E-mail: zhengxu@hznu.edu.cn;
徐利文, 主要从事有机硅化学研究, E-mail: liwenxu@hznu.edu.cn

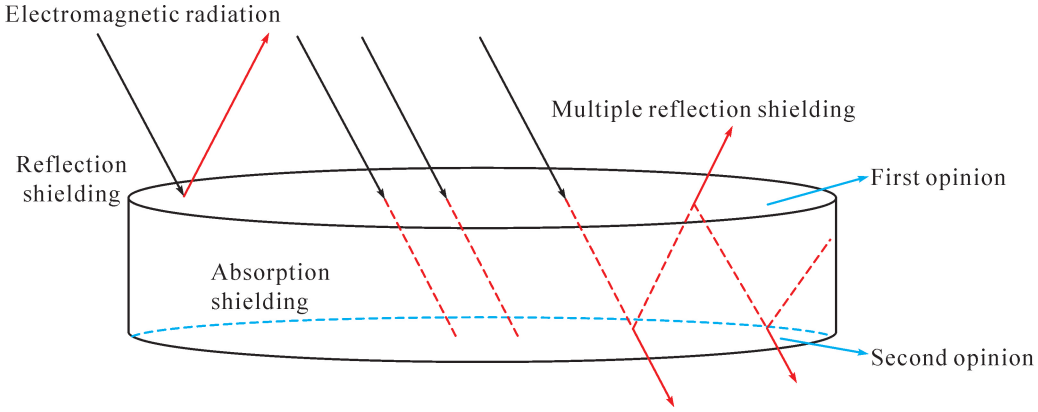


Fig. 1 Schematic representation of the electromagnetic interference shielding mechanism

按照 Schelkunoff 电磁屏蔽理论,电磁波通过屏蔽材料的总屏蔽效果可按式(1)计算[10]

$$SE_T = SE_R + SE_A + SE_M \quad (1)$$

式中:SE_R——反射损耗;SE_A——吸收损耗;SE_M——多次反射损耗。

$$\text{其中:} SE_R = 168 - 101g(\mu_r f/\sigma_r) \quad (2)$$

$$SE_A = 1.31t(f\mu_r\sigma_r)^{1/2} \quad (3)$$

$$SE_M = 201g\left(1-\exp\left(-\frac{2t}{\delta}\right)\right) \quad (4)$$

式中:μ_r——材料的相对于真空的磁导率;σ_r——材料相对于理想铜的电导率;f——电磁波的频率;t——屏蔽层厚度;σ——电磁波穿透材料的深度。

反射损耗是导体材料中的带电粒子(自由电子和空穴)与电磁场相互作用的结果。由式(2)可知,反射损耗与 μ_r/σ_r 的大小有关,材料的电导率越大,磁导率越小,反射损耗越大。吸收损耗是导体材料中的电偶极子或磁偶极子与电磁场作用的结果。由式(3)可知,吸收损耗与 σ_r 和 μ_r 的乘积大小有关,电导率和磁导率大的材料吸收损耗大。综合式(2~4)可知,在一定的电磁波频率和材料厚度时,材料导电率增加,反射损耗和吸收损耗增加,总的电磁波能量衰减增加;材料磁导率增加,一方面使得吸收损耗增加,另一方面却又使得反射损耗减小,二者迭加总的效果是先减小后增大。

2 碳纤维基电磁屏蔽材料的屏蔽原理及设计思路

碳纤维作为一种高长径比的导电型材料,主要通过与电场的相互作用对电磁波产生损耗,即电阻损耗。目前,碳纤维主要以有序编织型和无序填充型 2 种形式应用于碳纤维基电磁屏蔽复合材料中。根据麦克斯韦方程组,碳纤维在复合材料中的形态、分布和结构不同,其电磁屏蔽原理也略有不同。

在空间有序排列的长碳纤维,对电磁波的屏蔽呈现出各向异性的特征。当碳纤维平行于入射电磁波时,产生的传导电流会对入射电场产生强反射,主要体现为反射损耗;当碳纤维垂直于入射电场时,电磁波在碳纤维导体之间传播和散射,电磁波会在碳纤维截面产生的涡流被部分损耗,称为涡流损耗。经散射的电磁波还会发生相位对消现象,引起在碳纤维束之间传递的电磁波的损耗增加[11]。随着电磁波频率增大,碳纤维截面上的涡流会向表面集中,出现电磁波的涡流损耗增大的现象,即趋肤效应。

对于短切碳纤维,在体系中随机分布的短切碳纤维可视为电偶极子或谐振子,在电磁场作用下会产生极化耗散电流,在周围基体作用下耗散电流衰减,从而达到将电磁波能量转换为其它形式能量的目的。材料对电磁波的屏蔽效能与填充量相关,低填充量下碳纤维之间相互隔离,无法形成连续传导电流。随着填充量增加,碳纤维之间的间隔距离逐渐减小,间距小到一定程度后,碳纤维中的电子就会穿过高电阻聚合物发生隧穿现象,出现跳跃式移动。当填充量高于渗阈值时,分散于聚合物基体中的隔离的、非连续短碳纤维之间就会产生内部重叠,形成三维的高效导电网络,通过体系中连续流动的电子与电磁场相互作用,从而达到削弱电磁波的传导并发挥屏蔽作用的目的[12]。

电磁屏蔽材料对电磁波的屏蔽效能与其电导

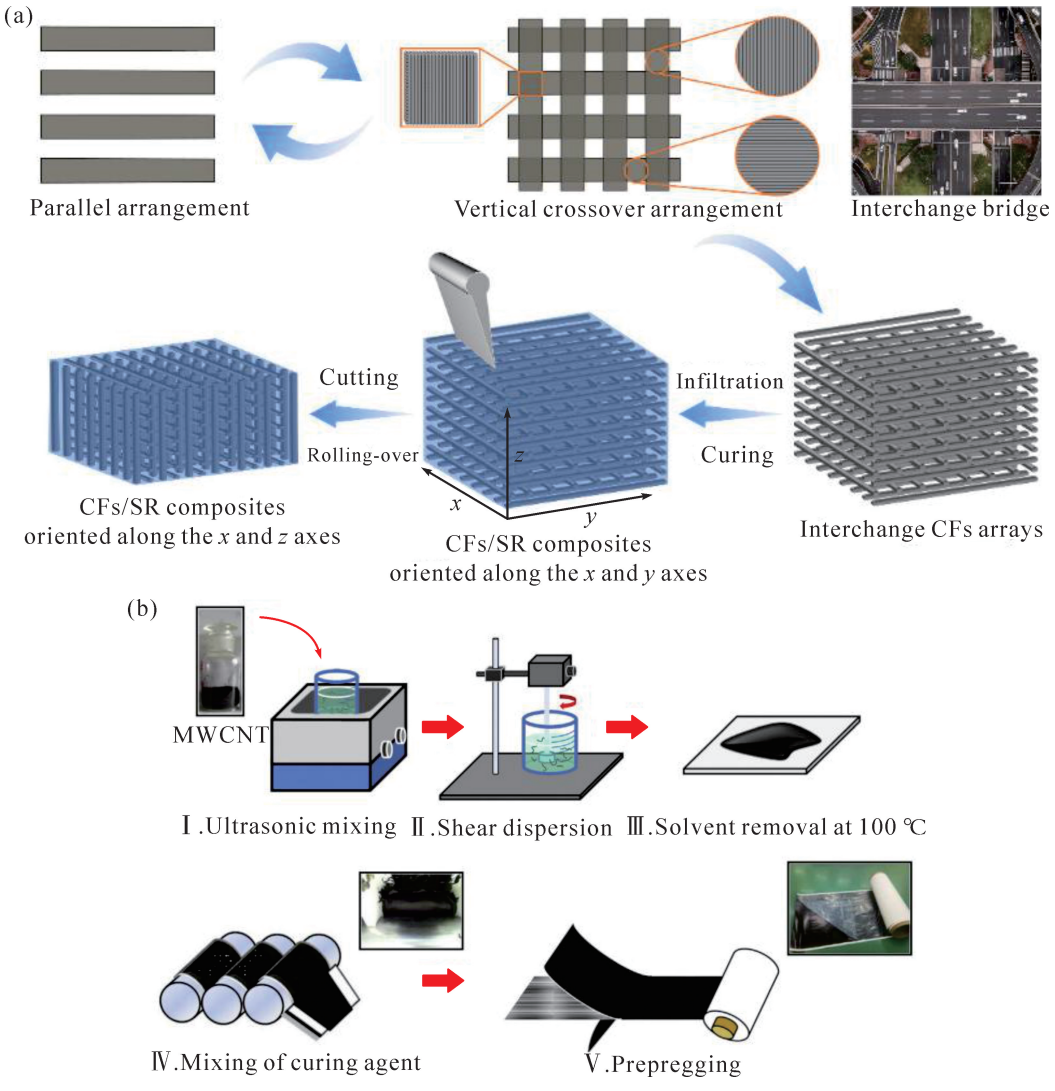
率、介电常数和磁导率密切有关[13],通过特定制备工艺、碳纤维的表面改性和多层异质结构的设计来调整电磁参数,可赋予碳纤维及碳纤维复合材料对电磁波不同的反射和吸收特性。研究和改善碳纤维的电磁性能,使其在满足结构材料所需性能的同时,又具有一定的抗电磁干扰能力,是碳纤维研究的主要领域。

3　连续碳纤维电磁屏蔽材料

3.1　编织型碳纤维基电磁屏蔽复合材料

对于有序编织型碳纤维基复合材料,碳纤维先按预先设计模式编织成有序导电网络,再与聚合物通过特定工艺复合形成单向纤维、二维层合、三维立体编织及连续纤维混杂复合材料,由碳纤维构成的导电网络具有特定取向,碳纤维的排布方向对电磁波的透射和反射性能有很大影响。对于由长碳纤维构成的编织型碳纤维基电磁屏蔽复合材料,碳纤维的含量、间距和排布方式等都会对复合材料的电磁屏蔽性能产生影响。

Munalli 等[14]制备了二维层合碳纤维(T700)增强的环氧树脂复合材料,由 4 层 3 mm 碳纤维构成的复合材料在 30~400 MHz 频域内的平均屏蔽效能高达(81.6±5.3) dB。Shi 等[15]用 Fig.2(a)所示方法制备了一种碳纤维呈立交桥结构的双取向碳纤维/硅橡胶复合材料,双取同的碳纤维可使复合材料在垂直和水平方向上的拉伸强度都得到显著提升。在 62.3%的质量分数下,复合材料的拉伸性能高达 6.18 MPa,导热系数达 25.3 W/(m·K),在 8~12.4 GHz 频域内电磁屏蔽效能为 61.6 dB。对于单取向碳纤维 CF/硅橡胶复合材料,其屏蔽效能性能呈现各向异性,垂直方向为 72.3 dB,水平方向为 46 dB。



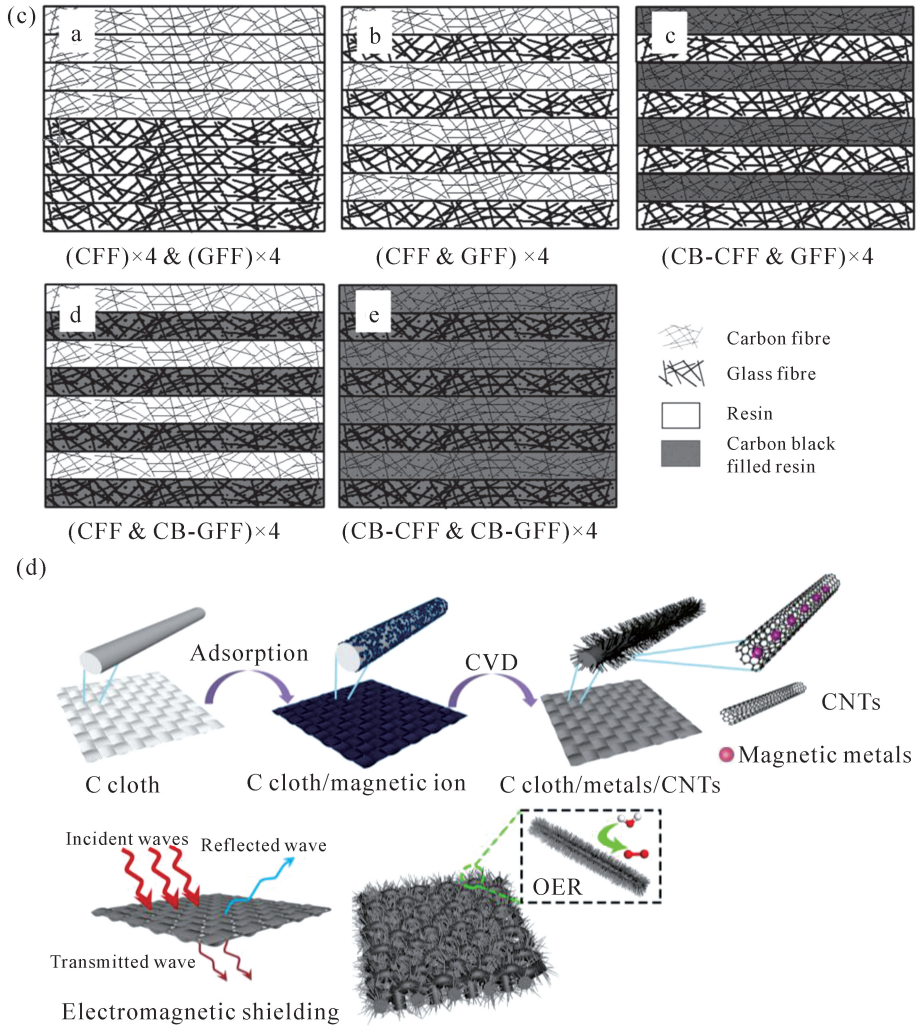


Fig. 2 (a) Schematic diagram of preparation of biaxially stretched carbon fiber/silicone rubber composite material[15]; (b) schematic diagram of preparation process of carbon fiber reinforced composite material (MWCNT-CFRP)[16]; (c) schematic diagram of multi-layer composite material structure[17]; (d) preparation process of magnetic metal encapsulated CNT modified carbon fibers[18]

Zhao 等[16]通过 Fig.2(b)所示方法,以分散了多壁碳纳米管(MWCNT)的航空级环氧基树脂为基体材料,制备了 MWCNT 改性的碳纤维增强环氧树脂复合层压板(CFRP),填充在碳纤维之间绝缘空位的多壁碳纳米管可改变复合材料的各向异性,增强其电磁屏蔽性能。在 3~18 GHz 频域内复合材料的屏蔽效能达到 68 dB。吴师等[17]通过 Fig.2(c)所示方法,以环氧树脂(EP)为基底,以碳纤维毡(CFF)、炭黑(CB)和玻璃纤维为填料,制备了多层结构碳纤维毡复合材料。通过调节多层碳纤维毡/环氧树脂复合材料的厚度、碳毡含量、碳黑填充量及玻璃纤维含量获得了具不同电磁屏蔽性能的复合材料。在 4.00 GHz 时,单层 1.15 mm CB-CFF/EP 结构的屏蔽效能可达到 57.5 dB;多层(CFF & CB-GFF)×4 结构的屏蔽效能可达到 71 dB。Men 等[18]通过 Fig.2(d)所示方法,利用改进的化学气相沉积法制备了一种磁性金属包覆的碳纳米管(CNTs)改性碳纤维布(C-Fe-CNTs,C-FeNi-CNTs 和 C-FeCo-CNTs),在 18~26.5 GHz 内一维核壳结构的表面改性碳纤维布的电磁屏蔽效能值超过 40 dB,主要反射损耗为主。Gamage 等[19]采用浸渍法制备了多壁碳纳米管/碳纤维非织造布复合材料,在 0~3 GHz 频域内,单层复合材料在 2 GHz 时屏蔽效能达到了 37 dB,双层复合材料在 2.7 GHz 时屏蔽效能达到了 68 dB。

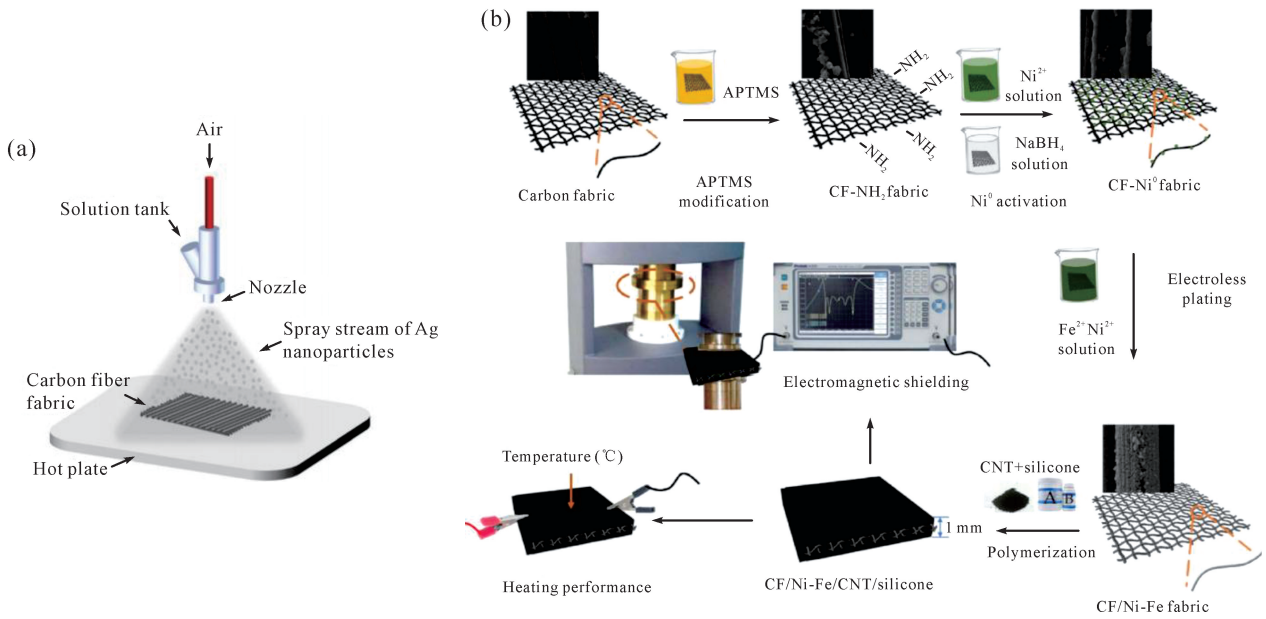
3.2 表面改性连续碳纤维基电磁屏蔽材料

碳纤维属导电材料,以单组分碳纤维作为电磁屏蔽填料对电磁波的损耗机制相对单一[13],无法满足对高性能吸波材料的需求。通过在碳纤维表面引

入高导电或导磁的金属或合金层对碳纤维进行表面改性和结构设计形成多组分异质界面,如在碳纤维表面附着导电层、纳米导电材料、介电材料或磁性材料等,形成具有核壳结构的复合碳纤维,可达到进一步提高其电磁屏蔽性能的目的[20]。

目前,人们已发展出多种碳纤维的表面改性方法,通过电镀法、化学镀沉积法、原位生长和表面涂层等方法在碳纤维表面涂覆金属层制得如 Tab.1 所示金属改性碳纤维,利用金属与碳纤维之间的协同作用增强屏蔽性能。Wu 等[20]在碳纤维表面涂覆不同金属(铜、镍、铝),发现增加金属层的厚度有助于提高其电磁屏蔽性能。其中,镀镍碳纤维的电磁屏蔽性能最好,在 10 kHz ~18 GHz 频域内,碳纤维材料厚度为 8 mm,金属层厚度为 5 μm 时,屏蔽效能最高达到 100 dB 以上。Hu 等[21]通过 Fig.3(a)所示以卷对卷喷涂法将银纳米粒子涂覆在编织碳纤维织物表面,制得一种表面附着银纳米粒子的碳纤维织物(CFF),当表面附着银层厚度为 460 μm 时,在 8.0~12.4 GHz 频域内的屏蔽效能达到了 102 dB。Stupar 等[22]在碳纤维表面镀银,相较于未改性碳纤维织物(<30 dB),其电磁屏蔽性能有很大提升,银沉积碳纤维的电磁屏蔽效能在 1~4 GHz 频域达到 49.67 dB,在 5 ~12 GHz 频域内增加到 51.07 dB。

Lu 等[23]通过 Fig.3(b)所示方法制备了表面镀 Ni-Fe 合金的碳纤维布(CF/Ni-Fe),再用原位聚合法与填充了 10% 碳纳米管(CNT)的室温硫化硅橡胶复合制得厚度为 1 mm 的 CF/Ni-Fe/CNT/硅橡胶层状复合材料。该复合材料具有硅橡胶的柔性、弹性和形变能力,在 0~4800 MHz 频域内的电磁屏蔽效能为 60.2~85.5 dB。Kwac 等[24]利用化学镀在碳纤维布(CFs)表面镀上 FeCoNi 软磁金属制得表面磁化的碳纤维布(FeCoNi-CFs),发现相较于碳纤维布,FeCoNi-CFs 的电磁屏蔽性能显著增长,在 300 kHz ~3 GHz 频域内的最大屏蔽效能达到 69.4 dB。Abhyankar 等[25]将镍钴酸盐($NiCo_2O_4$)纳米针原位接枝到编织碳纤维(WCF)制得表面改性碳纤维($NiCo_2O_4$@WCF),发现在 X 波段,处理 12 h 的 $NiCo_2O_4$@WCF(~0.4 mm)的电磁屏蔽效能达到了 72 dB,显著高于裸 WCF 的 40 dB。Kim 等[26]通过 Fig.3(c)所示方法,以具有高表面积(1500 m^2/g)的沥青基活性短切碳纤维作为碳框架,利用改进湿铺法制得非织造碳纤维织物(ACFs),通过化学镀沉积法在碳纤维织物表面镀上铜薄层制得一种镀铜碳纤维织物(Cu@ACFs),考察了其在 30 MHz ~1.5 GHz 和 1.5~10 GHz 频域的电磁屏蔽性能,发现 Cu@ACFs 相较于纯碳纤维织物和铜膜具更优异的 *SSE*(高达 482.2 dB·cm^3/g)和 SSE_t(11162 dB·cm^2/g)值,推测镀铜碳纤维的多重内反可能会对电磁屏蔽性能起增效作用。



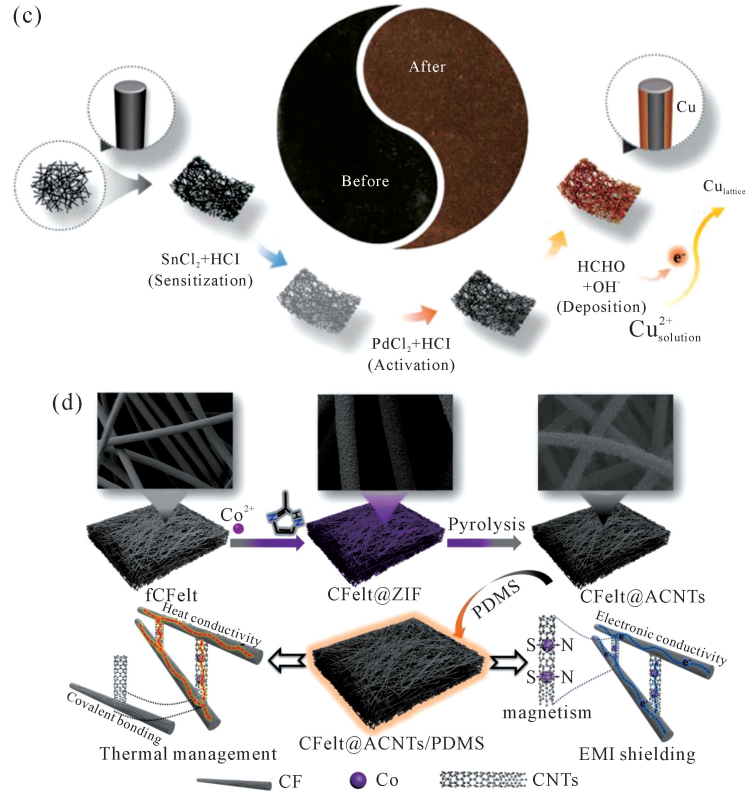


Fig. 3 **(a) Preparation of electromagnetic shielding composite materials by spraying nano silver on carbon fiber matrix[21]; (b) schematic diagram of CF/Ni Fe/CNT/silicone layered electromagnetic shielding material[23]; (c) fibrous like Cu@ACF schematic diagram of network preparation process[26]; (d) synthesis process of CFelt@ACNTs/PDMS[27]**

Tab. 1 Comparison of the EMI shielding performance of continuous carbon fiber based composites

Conductive materials	Other fillers	Matrix	Thickness /mm	Frequency	EMI SE /dB	Ref.
CF		EP	12	30~400 MHz	~81	[14]
CF		PDMS		8~12.4 GHz	72	[15]
CF	MWCNT	RP	2	3~18 GHz	68	[16]
CFF	CB	EP	4.6	3.2~4.9 GHz	71	[17]
Fe-CNTs-CF				18~26.5 GHz	>40	[18]
MWCNT-CF			0.12~0.2	0~3 GHz	37	[19]
Ni-CF			8	10 kHz~18 GHz	>100	[20]
Ag-CFF			460	8.0~12.4 GHz	102	[21]
Ag-CF				1~12 GHz	~50	[22]
Ni-Fe-CF	CNT	PDMS	1	0~4800 MHz	60~85	[23]
FeCoNi-CF			0.3	300 kHz~3 GHz	69	[24]
$NiCo_2O_4$-WCF			0.4	8~12 GHz	72	[25]
Cu-ACF				30 MHz~10 GHz	70~90	[26]
Co-CF-CNT		PDMS	2	8~40 GHz	35~75	[27]
PANI-CF		EP	0.37	0.5~2.5 GHz	65	[28]

note: CF, carbon fiber; PDMS, silicon rubber; PR, phenolic resin; EP, epoxy resin

Qian 等[27]通过 Fig.3(d)所示方法以聚二甲基硅氧烷为基底,在碳纤维上涂覆钴纳米颗粒,并用碳纳米管将其相连,制备了钴/碳纳米管/碳纤维/聚二甲基硅氧烷复合材料。在 8~40 GHz 的超宽带频率范围内,复合材料具有超过 35 dB 的电磁屏蔽效能,在 Ka 波段屏蔽效能最高达到 75.33 dB。Lu 等[28]以环氧树脂为基底,通过电聚合法在碳纤维表面涂覆聚苯胺(PANI),设计和制备了具有层间微结构的新型碳纤维非织造复合材料。在 0.5~2.5 GHz 频率范围内,复合材料的电磁屏蔽效能达到了 65 dB,绝对屏蔽效能高达 3904 dB·cm^2/g。

4　非连续碳纤维基电磁屏蔽复合材料

非连续碳纤维基电磁屏蔽材料,是指将短纤维或粉末形式的(改性)碳纤维以无序方式引入绝缘聚合物,如聚酰亚胺、硅橡胶、环氧树脂等,可制得功能化的碳纤维增强的电磁屏蔽复合材料。基于不同聚合物的固有特性[29],如 Tab.2 所示,所制得的复合材料不仅对电磁波具有屏蔽性能,还兼具导热性、绝缘性、耐高低温性等功能,可适用于不同应用场景。

Tab. 2　Comparison of key properties and application field of different polymers

Type	Key properties	Applicationfields
Polyimide (PI)	High-temperature resistance, excellent insulation	Aerospace equipment, navigation devices, aircraft instruments, military guidance systems, and electronic products such as mobile phones, digital devices, automotive satellite positioning systems, LCD TVs, and laptops
Polycarbonate (PC)	High toughness, high dielectric constant	Glass assembly, automotive industry, and electronics & electrical appliances manufacturing
Nylon 66	Good heat resistance, low friction coefficient	Automotive, machinery, electronics, and precision instruments
Silicone rubber (PDMS)	High/low-temperature resistance, insulation, flexibility	Medical devices, aerospace equipment, and electronic products
Phenolic resin (PR)	Heat resistance, excellent insulation, corrosion resistance	Electronic components, anti-corrosion materials, and thermal insulation materials
Epoxy resin (EP)	Strong adhesion, excellent insulation, chemical stability	Electrical and electronic products, aerospace applications
Acrylonitrile butadiene styrene resin (ABS)	High strength, good toughness	Instrumentation, electrical appliances, machinery components, and various industrial parts
Polyurethane (PU)	Superior mechanical properties	Coatings, adhesives, synthetic leather, and lubricants
Polyetheretherketone (PEEK)	High mechanical strength, heat resistance, impact resistance, flameretardancy, chemical resistance, wear resistance, fatigue resistance	Aerospace, automotive, electronics, and medical machinery
Silica aerogel	Thermal insulation, sound insulation, lightweight	Insulation materials, aerospace, military applications, and petrochemical industries

4.1 短切碳纤维增强的聚合物基电磁屏蔽材料

对于短切碳纤维增强的聚合物基电磁屏蔽材料，可通过调节包含短切碳纤维在内的电磁屏蔽填料与聚合物的比例来调整复合材料的电磁参数和电磁屏蔽性能。Zhang 等[30]将碳纤维(CF)与热塑性聚碳酸酯(PC)复合制得碳纤维增强聚碳酸酯复合材料，如 Fig.4(a)所示，复合材料(2 mm，60% CF)在 12~18 GHz 范围内的电磁屏蔽效能达到 40 dB。Jou 等[31]制备了碳纤维/尼龙 66 复合材料，考察了碳纤维长度、含量对复合材料电磁屏蔽性能的影响，发现等量填充量下，长碳纤维的屏蔽效能优于短碳纤维；相同长度下，填充量高的复合材料具有更高的电磁屏蔽性能。Xiao 等[32]通过 Fig.4(b)所示方法以形状记忆聚酰亚胺(SMPI)为基底，以短切碳纤维和炭黑为填料，制备了一种耐高温的电磁屏蔽复合膜(EMSMPI)。在 5% 短切碳纤维和 4% 炭黑填充量下，复合薄膜的玻璃态转化温度高达 308 ℃，在 8~12 GHz 频域内 0.35 mm 厚度的复合膜在 X 波段的平均电磁屏蔽效能达 23.9 dB。彭祖雄等[33]以硅橡胶(PDMS)为基体，制备了镀银玻璃微珠(Ag-GM)、短切碳纤维填充的硅橡胶复合材料，考察了碳纤维对 Ag-GM/PDMS 复合材料电磁屏蔽效能的影响。发现碳纤维添加量为 20 phr，镀银玻璃微珠填充量 120 phr 时，复合材料在 2.6~3.95 GHz 频率范围内电磁屏蔽效能达到 82.0 dB，与添加 150 phr 镀银玻璃微珠的复合材料的电磁屏蔽性能等效。Liu 等[34]采用湿法连续抄纸技术制备了具有三维导电网络骨架的碳纤维纸(CFP)，利用浸渍共混法将二硫化钼/铁氧化物(MoS_2/Fe)、CFP 与酚醛树脂复合制得二硫化钼/铁氧化物/碳纤维纸基复合屏蔽材料。介电性 MOS_2 和磁性 Fe 与短碳纤维纸构成的导电骨架之间的协同效应可起到电磁屏蔽增效的作用。当 MoS_2 与 Fe 的体积比为 10∶3 时，复合材料在 8.2~12.4 GHz 频域内的屏蔽效能达到 77.63 dB，拉伸强度达到 34.39 MPa。

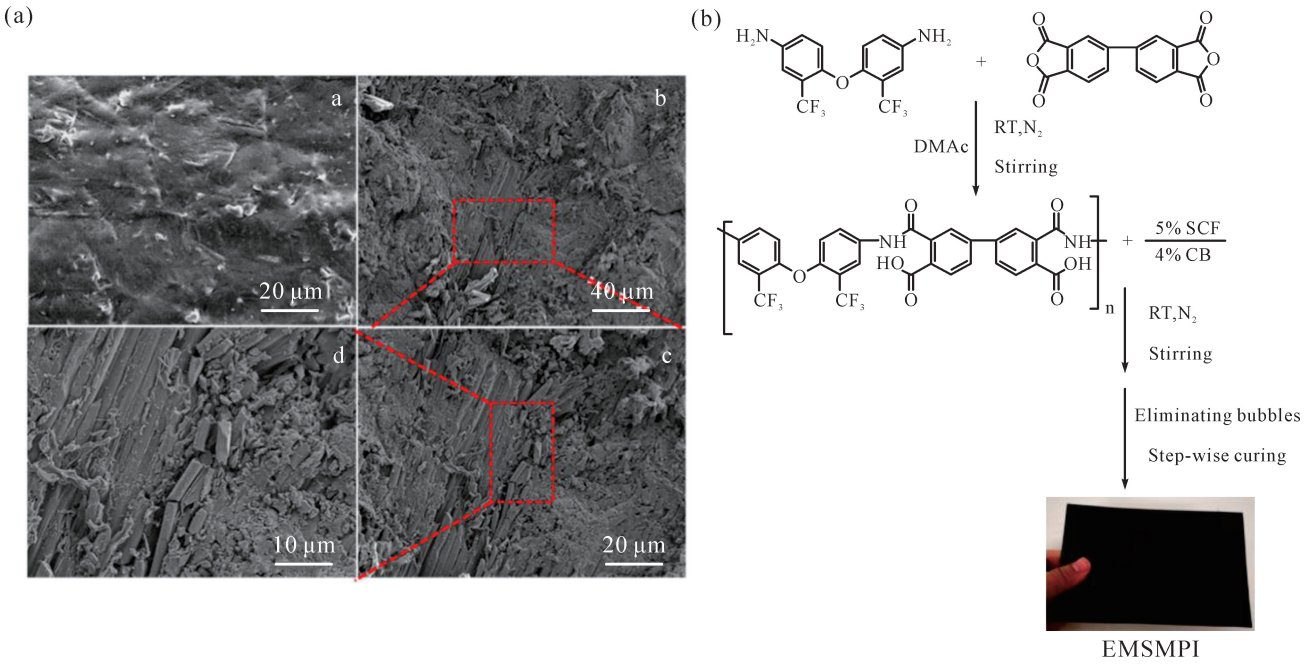


Fig. 4 (a) Surface morphology of CF/PC composite materials[30]; (b) synthesis of EMSMPI[32]

4.2 表面改性短切碳纤维增强的聚合物基电磁屏蔽复合材料

通过电化学沉积法、化学镀法、涂覆法、原位生长/聚合法等方法在碳纤维表面引入导电或导磁金属或导电聚合物镀层对碳纤维表面改性，可制得电磁参数可调的表面改性碳纤维，将其作为电磁波吸收材料与聚合物基体进行有效组合，不仅可通过调整复合材料的阻抗匹配提高吸波性能，还可赋予复合材料更优异的界面兼容性、导热性和力学性能等。Li 等[35]采用化学镀法制得镀层厚度为 450 nm 的镀银碳纤维(APCF)，将其与环氧树脂(EP)复合制得 APCF/EP 复合材料，发现银镀层可使复合材料的导

热性显著提升。4.5% 质量分数下,复合材料的热导率达到 2.33 W/(m·K),是无银镀层复合材料的 2.6 倍,在 8.2~12.4 GHz 频域内的电磁屏蔽效能为 35~38 dB,以反射损耗为主导。Huang 等[36]将镀 Ni-P 碳纤维(ENCF)与丙烯腈-丁二烯-苯乙烯树脂(ABS)复合制得 ENCF/ABS 复合材料,在 30~1000 MHz 的频域内,30 phr 填充下(每百份树脂)的电磁屏蔽效能达 44 dB,并且该复合材料具有很好的热稳定性,60 ℃热处理 5 周电磁屏蔽性能无显著衰减。Lu 等[37]采用连续电镀法制备了镀层厚度为 0.2~0.5 μm 的镀镍碳纤维,用溶剂法和 Brabender 混合法将其与 ABS 复合制得 ENCF/ABS 复合材料,发现镍镀层可使纤维的电导率提高。要获得同样电阻率的复合材料,镀镍碳纤维的使用量较碳纤维低很多。10 MHz ~ 1.5 GHz 频域内,10% 体积分数复合材料的屏蔽效能达到了 50 dB。

对于金属化改性碳纤维,附着于表面的金属的形貌对其电磁屏蔽性能有一定影响。He 等[38]以聚酰亚胺树脂(PI)为基体,比较了碳纤维织物表面镀常规镍和纳米锥形镍对改性碳纤维增强的 PI 复合薄膜(CF@NN/PI 和 CF@CN/PI)电磁屏蔽性能的影响,发现纳米锥形镍较常规镍具有更优异的电磁屏蔽性能和力学性能,在 8~12.4 GHz 频域内,1.2 mm 厚度添加了 0.3 g 纳米锥形镍碳纤维的复合薄膜的屏蔽效能高达 71 dB,拉伸强度达 22.4 MPa。

Li 等[39]用电镀法制备了镀镍碳纤维(Ni-CF),用熔融共混法与聚醚醚酮(PEEK)复合制得镀镍碳纤维/聚醚醚酮复合材料(Ni-CF/PEEK),40% 质量分数下 0.6 mm 厚度的复合材料在 8.2~12.4 GHz 频段内屏蔽性能可达到 29 dB,热导率是纯 PEEK 的 2.54 倍,达到 0.59 W/(m·K)。Slosarczyk 等[40]制备了镀镍碳纤维/二氧化硅气凝胶纳米复合材料,发现尽管碳纤维表面的镀镍纳米层会影响碳纤维与二氧化硅骨架之间的结合,但在 8~18 GHz 的频率范围内有很高的电磁波吸收能力,屏蔽效能介于 40~56 dB。Wang 等[41]将镀镍碳纤维(Ni-CF)与硅橡胶复合制得镀镍碳纤维/硅橡胶复合材料,发现随着 Ni-CF 填充量的增大,复合材料的体积电阻率降低,屏蔽效能增大;当 Ni-CF 质量分数达到 80% 时,在 30~1200 MHz 的测试频率范围内屏蔽效能约为 80 dB。周锐等[42]以水性聚氨酯(WPU)为基体,依次以 CF,CF@Ni 和 CF@FeNi 为填料,制备了轻质、柔性的复合材料。当质量分数为 9% 时,WPU@CF@FeNi 在 30~3000 MHz 与 10~100 kHz 的屏蔽效能峰值分别达到了 26.9 dB 和 18.0 dB。

相较于在碳纤维上涂覆传统金属,在碳纤维表面涂覆磁性铁氧体(Fe_3O_4)或导电聚合物(聚苯胺)不仅可增强碳纤维的表面活性,还可提高碳纤维和聚合物基体之间的结合力,近年来引人关注。Farid 等[43]采用多步电泳沉积和原位聚合法制得一种三相异质结构复合碳纤维 (PANI@nano-Fe_3O_4@CFs),并将其与环氧树脂(EP)复合制得复合材料,3 mm 厚度时在 8.2~18 GHz 频率范围内的最大屏蔽效能达到了 29 dB。Vishnumurthy 等[44]通过共沉淀法将 Fe_3O_4 涂覆到活性碳纤维(ACF)上制得 Fe_3O_4-ACF 复合材料,将其以不同的质量分数(5%,10% 和 15%)引入到环氧树脂基体中;10% 填料的复合材料在 10 GHz 下屏蔽效能达到了 22.5 dB,15% 的复合材料在 8.8 GHz 下屏蔽效能达到了 27.15 dB。徐阳课题组[45]利用聚多巴胺(PDA)和磁性 Fe_3O_4 纳米粒子对导电碳纤维(CF)进行表面修饰制得一种杂化碳纤维(CF/PDA/Fe_3O_4),与 WPU 共混发泡后层间复合于含银导电基布制得具有高电磁屏蔽性能的导电布基 WPU/(CF/PDA/Fe_3O_4)发泡涂层复合材料,系统考察了短切碳纤维的质量分数(2%~10%)、长度(1~6 mm)对复合材料电磁屏蔽性能和力学性能的影响。发现 3 mm 短切碳纤维的质量分数增至 6% 时屏蔽效能增加趋势开始变缓,超过 8% 后材料的弹性模量和拉伸强度下降;6% 填充量下,复合材料电磁屏蔽性能随着碳纤维长度的增加呈现先增加后变缓的趋势,弹性模量和拉伸强度呈上升趋势。在 30~1500 MHz 频率范围内,复合材料的电磁屏蔽性能达到 24.9 dB。

由各类复合碳纤维与不同聚合物构成的电磁屏蔽材料的屏蔽效能见 Tab.3,不难看出,设计制备多层异质碳纤维,将其与不同性质的聚合物基体复合可制得多功能一体化的电磁屏蔽复合材料,是未来的一个发展方向,可大大拓宽其应用领域。

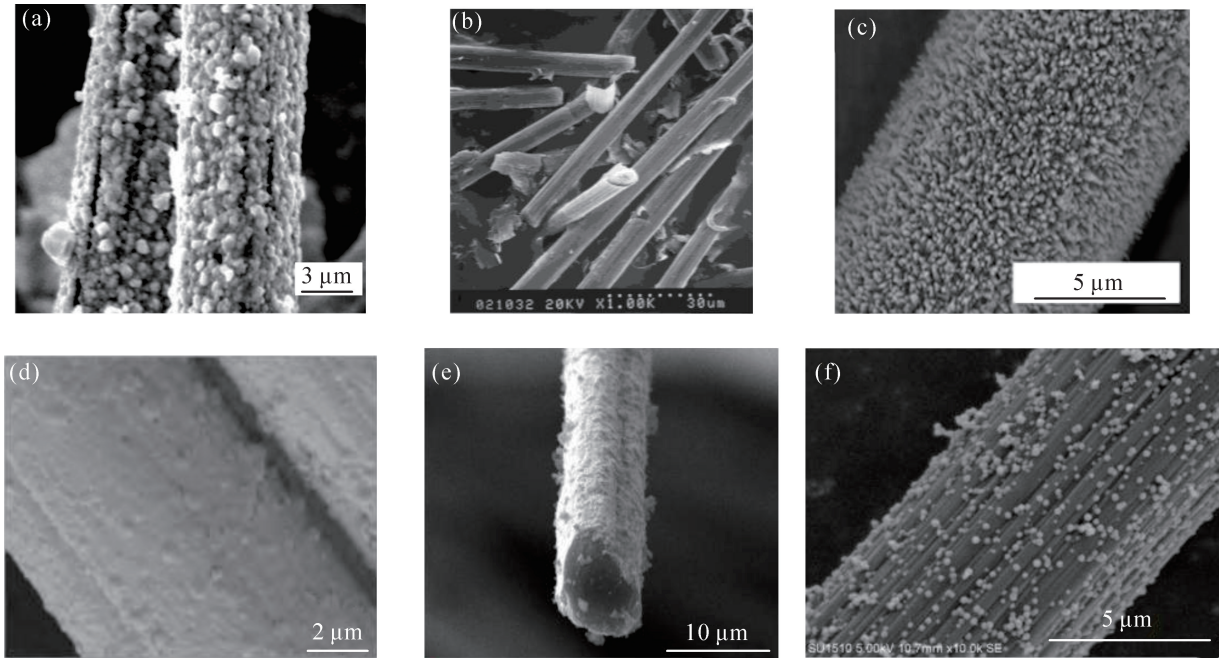


Fig. 5 (a) SEM image of Ag coated carbon fiber[35]; (b) SEM image of Ni coated carbon fiber[36]; (c) SEM image of nano conical nickel coated carbon fiber[38]; (d) SEM image of FeNi coated carbon fiber[42]; (e) SEM image of Fe_3O_4 coated carbon fiber[43]; (f) SEM image of Fe_3O_4/polydopamine coated carbon fiber[45]

Tab. 3 Summary of EMI shielding effectiveness (SE) of carbon fiber based composites

Entry	Matrix	Fillers	Thickness/mm	Frequency	SE/dB	Ref.
1	PC	C-CF (60%)	2	12~18 GHz	40	[30]
2	Nylon 66	C-CF (30%)	1.2	0~1500 MHz	40~70	[31]
3	SMPI	C-CF (5%)+ CB (4%)	0.35	8~12 GHz	23.9	[32]
4	PDMS	CF (20 phr)/ Ag@glass beads (120 phr)	2.75	2.6~395 GHz	82	[33]
5	PR	MoS_2/Fe, C-CF (13%)		8.2~12.4 GHz	77.63	[34]
6	EP	Ag@ C-CF (4.5%)	2.5	8.2~12.4 GHz	35~38	[35]
7	ABS	Ni@ C-CF (30 phr)		30~1000 MHz	44	[36]
8	ABS	Ni@ C-CF (10%)	3	0~15 GHz	50	[37]
9	PI	Ni@ CF (0.3 g)	1.2	8~12.4 GHz	71	[38]
10	PEEK	Ni@ C-CF(40%)	0.6	8.2~12.4 GHz	29	[39]
11	Silicaaerogel	Ni@ C-CF(15%)		8~18 GHz	40~56	[40]
12	PDMS	Ni@ C-CF(80%)	2	30~1200 MHz	80	[41]
13	WPU	FeNi@ C-CF(9%)	2	30~3000 MHz	26.9	[42]
14	EP	Fe_3O_4/PANI@ C-CF(5%)	3	8.2~18 GHz	29	[43]
15	EP	CF/Fe_3O_4@ Carbon(15%)	3	8~12 GHz	27.15	[44]
16	WPU	Fe_3O_4/PDA/C-CF(6%)		30~1500 MHz	24.9	[45]

note: PC, polycarbonate; C-CF, chopped carbon fiber; SMPI, shape memory polyimide; PDMS, silicon rubber; PR, phenolic resin; EP, epoxy resin; CB, carbon black; ABS, acrylonitrile butadiene styrene resin; PI, polyimide; PEEK, polyetheretherketone; WPU, waterborne based polyurethane; PDA, polydopamine

5　结语与展望

碳纤维凭借其独特的轻质柔性特征、卓越的化学稳定性、优异导电特性与力学性能的协同优势,在过去五年中已发展成为电磁屏蔽材料领域极具应用前景的碳基材料。通过表面改性工程调控碳纤维本征特性,或基于应用场景需求将其与功能性聚合物基体复合,可有效实现材料电磁屏蔽性能与力学性能的协同提升。当前研究主要集中在纤维形貌与空间分布优化、异质结构界面设计及多组分协同效应开发 3 个角度。其中,通过引入导电、介电或磁性组分形成的多重异质界面构建双/多组分异质结构碳纤维,不仅能触发电磁波的多重反射和干涉效应,更可优化阻抗匹配特性,显著降低电磁波的反射和透射损耗,实现电磁能量的高效吸收与耗散,已成为该领域的重要突破口。

然而,面向工业化应用需求仍存在关键挑战亟待突破:(1)在电子器件高度集成化背景下,现有导电型碳纤维复合材料面临绝缘性能缺失导致的短路风险,亟需开发兼具高屏蔽效能与绝缘特性的新型复合材料;(2) 金属/碳纤维复合体系虽展现出优异屏蔽性能,但受限于涂覆工艺缺陷导致的界面腐蚀、涂层脱落及力学强度劣化等问题,其环境稳定性与力学可靠性仍需根本性提升;(3) 聚合物基复合材料中,碳纤维与基体的界面相容性差异导致屏蔽效能与力学性能的显著波动,高填充量需求与材料延展性下降的矛盾尚未解决;(4) 现有制备工艺在规模化生产过程中普遍面临流程复杂、成本高昂等问题,制约了产业化进程。

未来研究应重点围绕以下方向展开:(1) 发展新型界面工程策略,通过化学键合或物理锚定技术强化异质界面结合强度;(2) 构建多尺度复合结构体系,利用微纳结构设计与宏观构型优化的协同效应实现低填充量下的高效屏蔽;(3) 开发智能响应型复合材料,赋予材料环境自适应屏蔽特性;(4) 推进绿色制造技术创新,发展高效、低成本的规模化制备工艺。通过多学科交叉融合与全链条技术集成,有望突破现有技术瓶颈,推动碳纤维基电磁屏蔽材料在航空航天、智能电子、军事隐身等高端领域的规模化应用。

参考文献:

[1] 苏东林. 电磁干扰、电磁兼容、电磁环境效应、电磁安全[C]// 2020 年全国微波毫米波会议论文集(上册). 上海: 中国电子学会, 2020.

[2] Wu X M, Wen B Y. A cauliflower-shaped nickel @ porous calcium silicate core-shell composite: preparation and enhanced electromagnetic shielding performance[J]. Composites Science and Technology, 2020, 199: 108343

[3] Suji M Z, Yves G, Nandakumar K, *et al*. Hybrid materials for electromagnetic shielding: a review[J]. Polymer Composites, 2022, 43: 2507-2544

[4] Xing D, Lu L, Teh K S, *et al*. Highly flexible and ultra-thin Ni-plated carbon-fabric/polycarbonate film for enhanced electromagnetic interference shielding[J]. Carbon, 2018, 132: 32-41.

[5] Liang J Y, Gu Y Z, Bai M, *et al*. Electromagnetic shielding property of carbon fiber felt made of differentypes of short-chopped carbon fibers[J]. Composites Part A, 2019, 121: 289-298.

[6] Pisello A L, D'alessandro A, Sambuco S, *et al*. Multipurpose experimental characterization of smart nanocomposite cement-based materials for thermal-energy efficiency and strain-sensing capability[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2017, 161: 77-88.

[7] Bian X M, Liu L, Li H B, *et al*. Construction of three-dimensional graphene interfaces into carbon fiber textiles for increasing deposition of nickel nanoparticles: flexible hierarchical magnetic textile composites for strong electromagnetic shielding[J]. Nanotechnology, 2017, 28: 045710.

[8] Tunakova V, Tunak M. Carbon-fiber reinforcements for epoxy composites with electromagnetic radiation protection-prediction of electromagnetic shielding ability[J]. Composites Science and Technology, 2021, 215: 109029.

[9] Zhang H Y, Li J Y, Pan Y. Flexible carbon fiber-based composites for electromagnetic interference shielding[J]. Rare Metals, 2022, 41: 3612-3629.

[10] 尹波, 于润泽, 杨鸣波. 电磁屏蔽聚合物材料的研究进展[J]. 中国塑料, 2006, 20(3): 14-18.
Yin B, Yu R Z, Yang M B. Research progress on electromagnetic shielding polymer materials[J]. China Plastics, 2006, 20(3): 14-18.

[11] Zhang X, Qiao J, Jiang Y Y, *et al*. Carbon-based MOF derivatives: emerging efficient electromagnetic wave absorption agents[J]. Nano-Micro Letters, 2021, 13: 135.

[12] Liu Y J, Zhao X M, Tuo X. The research of EMI wave absorbing properties of ferrite/silicon carbide/graphite three-layer composite coating knitted fabrics[J]. The Journal of the Textile Institute, 2016, 107: 483.

[13] Wang G, Gao Z, Tang S, *et al*. Microwave absorption properties

of carbon nanocoils coated with highly controlled magnetic materials by atomic layer deposition[J]. ACS Nano, 2012, 6: 11009.

[14] Munalli D, Dimitrakis G, Chronopoulos D, *et al*. Electromagnetic shielding effectiveness of carbon fibre reinforced composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 173: 106906.

[15] Song J N, Fan Y C, Shi A J. Bidirectionally oriented carbon fiber/silicone rubber composites with a high thermal conductivity and enhanced electromagnetic interference shielding effectiveness[J]. Materials, 2023, 16: 6736.

[16] Zhao Z J, Zhang B Y, Du Y, *et al*. MWCNT modified structure-conductive composite and its electromagnetic shielding behavior[J]. Composites Part B: Engineering, 2017, 130: 21-27.

[17] 吴师, 罗文, 陈润华. 多层碳纤维毡复合材料的电磁屏蔽性能研究[J]. 材料开发与应用, 2023, 38(4): 75-80.
Wu S, Luo W, Chen R H. Electromagnetic shielding properties of carbon felt/epoxy multilayer composites[J]. Development and Application of Materials, 2023, 38(4): 75-80.

[18] Men Q Q, Wang S, Yan Z K, *et al*. Iron-encapsulated CNTs on carbon fiber with high-performance EMI shielding and electrocatalytic activity[J]. Advanced Composites and Hybrid Materials, 2022, 5: 2429-2439.

[19] Gamage S J P, Yang K, Braveenth R, *et al*. MWCNT coated free-standing carbon fiber fabric for enhanced performance in EMI shielding with a higher absolute EMI SE[J]. Materials, 2017, 10: 1350.

[20] Wu L Q, Chen X, Zhu L Z. Study of surface metallization on the electromagnetic shielding performance of carbon fiber reinforced composite[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1605: 012142.

[21] Park J, Hu X Y, Torfeh M, *et al*. Exceptional electromagnetic shielding efficiency of silver coated carbon fiber fabrics via a roll-to-roll spray coating process[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2020, 8: 11070-11078.

[22] Stupar S L, Vuksanovi'c M M, Mijin D Z, *et al*. Multispectral electromagnetic shielding and mechanical properties of carbon fabrics reinforced by silver deposition[J]. Materials Chemistry and Physics, 2020, 289: 126495.

[23] Luan W Y, Wang Q W, Sun Q, *et al*. Preparation of CF/Ni-Fe/CNT/silicone layered rubber for aircraft sealing and electromagnetic interference shielding applications[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34: 91-102.

[24] Yim Y J, Lee J J, Alexandre T, *et al*. Electromagnetic interference shielding behavior of magnetic carbon fibers prepared by electroless FeCoNi-plating[J]. Materials, 2021, 14: 3774.

[25] Yadav K, Kotabage C, Abhyankar A C. $NiCo_2O_4$ nanoneedles decorated woven carbon fibres for electromagnetic shielding in X-band[J]. Materials Letters, 2021, 292: 129622.

[26] Lee J, Liu Y N, Liu Y, *et al*. Ultrahigh electromagnetic interference shielding performance of lightweight, flexible, and highly conductive copper-clad carbon fiber nonwoven fabrics[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2017, 5: 7853-7861.

[27] Yan Y Y, Wu B, Qian G, *et al*. Ultra-wideband electromagnetic interference shielding effectiveness composite with elevated thermal conductivity[J]. Composites Part A, 2023, 167: 107430.

[28] Lu H, Liao B Q, Wang H B, *et al*. Electromagnetic shielding of ultrathin, lightweight and strong nonwoven composites decorated by a bandage-style interlaced layer electropolymerized with polyaniline[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2019, 30: 20420-20431.

[29] Jadwiga S, Dorota Z, Kamila S, *et al*. Conducting silicone-based polymers and their application[J]. Molecules, 2021, 26: 2012.

[30] Fang M, Ma Y, Zhang N, *et al*. Solid particle erosion resistance and electromagnetic shielding performance of carbon fiber reinforced polycarbonate composites[J]. Materials Research Express, 2020, 7: 045305.

[31] Jou W S, Wu T L, Chiu S K, *et al*. Electromagnetic shielding of nylon-66 composites applied to laser modules[J]. Journal of Electronic Materials, 2001, 30: 1287-1293.

[32] Kong D, Li J, Guo A, *et al*. High temperature electromagnetic shielding shape memory polymer composite[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 408: 127365.

[33] 彭祖雄, 张海燕, 陈天立, 等. 镀银玻璃微珠/炭纤维填充导电硅橡胶的电磁屏蔽性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2011, 27(1): 88-91.
Peng Z X, Zhang H Y, Chen T L, *et al*. The electromagnetic shielding performance of conductive silicon rubber filled with silvered glass beads/carbon fiber[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2011, 27(1): 88-91.

[34] Liu Z, Liu C H, Wang Y, *et al*. Preparation and simulation performance of light carbon fiber paper based electromagnetic shielding materials[J]. Carbon Letters, 2023, 34: 1287-1299.

[35] Li J P, Qi S H, Zhang M Y, *et al*. Thermal conductivity and electromagnetic shielding effectiveness of composites based on Ag-plating carbon fiber and epoxy[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2015, 132: 42306.

[36] Huang C Y, Pai J F. Studies on processing parameters and thermal stability of ENCF/ABS composites for EMI shielding[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1997, 63: 115-123.

[37] Lu G H, Li X T, Jiang H C. Electrical and shielding properties of ABS resin filled with nickel-coated carbon fibers[J]. Composites Science and Technology, 1996, 56: 193-200.

[38] Wang Y X, Wang J, Liu Z H. Nanocone-shaped Ni-electroplated carbon fiber composite films for electromagnetic shielding

applications[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 27: 4625-4632.

[39] Li S, Jin Y, Wang Z Y, *et al*. Preparation and characterisation of nickel-plated carbon fibre/polyether ether ketone composites with high electromagnetic shielding and high thermal conductivity[J]. Colloid and Polymer Science, 2019, 297: 967-977.

[40] Słosarczyk A, Klapiszewski Ł, Buchwald T, *et al*. Carbon fiber and Nickel coated carbon fiber-silica aerogel nanocomposite as low-frequency microwave absorbing materials[J]. Materials, 2020, 13: 400.

[41] Wang R, Yang H, Wang J L. The electromagnetic interference shielding of silicone rubber filled with nickel coated carbon fiber[J]. Polymer Testing, 2014, 38: 53-56.

[42] 周锐, 俞科静, 徐阳. 化学镀铁镍碳纤维制备及其电磁屏蔽性能[J]. 化工进展, 2024, 43(7): 1-10.
Zhou R, Yu K J, Xu Y. Preparation and electromagnetic interference shielding properties of electroless iron-nickel plated carbon fiber[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2024, 43(7): 1-10.

[43] Farid M A, Aidin B K, Amin A A. Three-phase PANI@ Nano-Fe_3O_4 @ CFs heterostructure: fabrication, characterization and investigation of microwave absorption and EMI shielding of PANI @ Nano Fe_3O_4 @ CFs/epoxy hybrid composite[J]. Composite Science and Technology, 2017, 150: 65-78.

[44] Anu K S, Vishnumurthy K A, Mahesh A. Effect of carbon fiber reinforcement on the mechanical and electromagnetic shielding properties of the Fe_3O_4-carbonaceous/epoxy composites[J]. Polymers Advanced Technologies, 2023, 34: 2946-2960.

[45] 杨晔. 改性短切碳纤维发泡复合材料的制备及电磁屏蔽性能研究[J]. 无锡: 江南大学, 2022.
Yang Y. Preparation and EMI shielding performance of modified chopped carbon fiber foamed composites[J]. Wuxi: Jiangnan University, 2022.

Developments in Carbon Fiber Composites for Electromagnetic Interference Shielding and Wave Absorption

Bing Lian, Yanying Nie, Shichao Lao, Xingyue Shi, Zheng Xu, Liwen Xu

(*Key Laboratory of Organosilicon Chemistry and Material Technology of ministry of Education, College of Materials, Chemistry and Chemical Engineering, Hangzhou Normal University, Hangzhou 311121, China*)

ABSTRACT: With the rapid development of wireless communication technologies and electronic devices, the issue of electromagnetic wave pollution has increasingly attracted public attention. High-performance electromagnetic shielding (EMI) materials have become increasingly crucial for effectively controlling electromagnetic pollution and protecting human health. Carbon fiber (CF), as a carbon-based material integrating lightweight properties, flexibility, excellent chemical stability, high electrical conductivity, and superior mechanical performance, has been widely applied in the field of electromagnetic shielding materials. This paper provided a concise review of recent advances in the application of carbon fibers in electromagnetic shielding and wave-absorbing materials, focusing on their morphology, distribution, structure, and the compositional characteristics of composite electromagnetic shielding materials. From the perspectives of continuous carbon fiber composites and discontinuous carbon fiber composites, the applications and performance of carbon fibers in electromagnetic shielding composites were systematically summarized. Furthermore, this paper discussed the current challenges, future development directions, and prospects of carbon fiber-based electromagnetic shielding materials, aiming to provide references for advancing the application of carbon fibers in the field of electromagnetic shielding.

Keywords: carbon fiber; electromagnetic interference shielding; wave absorption; composites