

雷达吸波功能纤维及纺织品的研究进展

温 娇¹, 丁志荣^{1*}, 欧卫国², 张琰卿¹, 郝瑞莉¹

(1. 南通大学 纺织服装学院, 江苏 南通 226019; 2. 南通金仕达超微阻燃材料有限公司, 江苏 南通 226009)

摘要:介绍了目前吸波材料中常用的碳纤维、碳化硅纤维、多晶铁纤维及其改性纤维、异性截面纤维、纳米级纤维、手性纤维的吸波机理、制备方法和性能;综述了吸波功能纺织品的开发途径、制备方法和性能;展望了纤维吸波剂及其复合材料以及柔性吸波纺织材料的发展前景. 研究表明:对吸波纤维进行物理、化学改性,控制纤维的形态特征、长径比、孔隙率,不仅可提高其吸波性能,还可改善其机械与热学性能;调节吸波纤维的含量、分散方式、织造工艺与组成结构可有效改善吸波纺织品的吸波性能.

关键词:雷达吸波纤维;碳纤维;碳化硅纤维;多晶铁纤维;纺织品

中图分类号: TS101.3

文献标志码: A

文章编号: 1673-2340(2014)03-0043-06

Development of Study on Radar-Absorbing Fiber and Textile

WEN Jiao¹, DING Zhirong^{1*}, OU Weiguo², ZHANG Yanqing¹, HAO Ruili¹

(1. School of Textile and Clothing, Nantong University, Nantong 226019, China;

2. Nantong Flame Retardant Materials Co. Ltd., Nantong 226009, China)

Abstract: The absorbing mechanism, preparation method and properties of several fibers used in wave-absorbing materials, such as carbon fiber, silicon carbide fiber, polycrystalline iron fiber and their modified fiber, anisotropic fiber, nano fiber, chiral fiber were introduced. The study summarized the ways to develop absorbing functional textiles and their preparation method and properties, and provided the prospect of the fiber absorbing agent, their composite materials and flexible wave absorbing textile materials. The result show that physical and chemical modification, morphology, the ratio of length to diameter and porosity, which improve not only the wave absorbing performance, but also the mechanical and thermal properties. Absorbing fiber content, dispersion mode, composition structure and weaving process can effectively improve the performance of absorbing compound textiles.

Key words: radar-absorbing fiber; carbon fiber; silicon carbide fiber; polycrystalline iron fiber; textile

“薄、轻、宽、强”是吸波纺织复合面料开发的方向与目标. 目前现存的吸波剂大多存在密度大、单位厚度内电磁波吸收率低、频带窄等缺点. 而吸波纺织品也很难达到“薄、轻、宽、强”的目标, 涂层类吸波纺织品厚而重, 通过纺丝、纺纱、织造等工艺制

得的一些吸波纺织品在强度和频宽方面又很难达到要求. 碳纤维、碳化硅纤维和多晶铁纤维等是目前研究较多的纤维吸波剂, 研究者在已有基础上不断创新开发出新型改性纤维和吸波功能纺织品. 不同材料与不同形态的吸波纤维所作用的吸波频

收稿日期: 2014-03-12

基金项目: 江苏省科技厅产学研前瞻性研究项目(BY2012131)

作者简介: 温娇(1989—), 女, 硕士.

* 通信联系人: 丁志荣(1961—), 男, 教授, 主要研究方向为纤维及其制品. E-mail: ding.zr@ntu.edu.cn

段、吸波机理、制备方法各有差异,吸波功能纺织品的涂层工艺与纺制方法也层出不穷.本文对此进行系统的总结与对比,以期今后的相关研究提供参考.

1 雷达吸波功能纤维

1.1 碳纤维

碳纤维是结构隐身材料最常用的一种增强材料,碳纤维具有轻质高强高模的特点.连续碳纤维易导电,为电磁波强反射体,故常被用作吸波材料的底层反射基板^[1].而非连续的短切碳纤维在复合材料中随机分布,不会形成连续的传导电流,趋肤效应和碳纤维之间的电磁波散射产生的电磁能损耗减少了电磁波的反射,消耗了部分电磁波,从而实现吸波性能^[2].但碳纤维的抗氧化性差,难以承受较高的使用温度,限制了其在结构型吸波材料上的应用.影响碳纤维吸波性能的因素很多,我们常在制备工艺中通过调节碳纤维的电阻率或者通过纤维改性来改善其吸波性能,在制备复合材料的过程中控制纤维的排列方式、间距以获得更优良的吸波性能^[3].

1.1.1 改性碳纤维

碳纤维的改性处理主要通过对碳纤维进行掺杂和表面涂镀层,以改善碳纤维的电磁性能.为提高碳纤维的磁性能,可在碳纤维中掺杂或涂镀镍、钴、 Fe_3O_4 、铁氧体和合金粉等磁性材料,如:黄小忠等^[4]用 SOL-GEL 技术在碳纤维表面涂覆 $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ 型铁氧体,制备了具有磁性涂层的复合碳纤维.为改善碳纤维的电性能,可在碳纤维中掺杂或涂镀 SiC、石英纤维等,如:高文等^[5]采用化学气相沉积(CVD)法在碳纤维表面制备 SiC 涂层,实现了涂层改性在防热、隐身双功能复合材料应用中的可能性,碳纤维表面涂层同时较大幅度地提高了碳纤维的抗氧化性和力学性能.

1.1.2 异形截面碳纤维

除吸波剂本身的性能外,吸波剂的形状无疑会影响吸波材料的吸波性能.不同形状的吸波剂结构直接影响到吸波剂的电磁参数和散射效应.异形截面的碳纤维非圆形,而是有棱角的多角形、多边形以及中空多孔结构.这样的结构除改善了其吸波性

能外还有利于提高碳纤维的机械性能,使其更加轻量化.目前制备异形截面碳纤维的途径主要是通过控制纺丝工艺或者是设计不同的喷丝孔形状.杨国伟等^[6]以中间相沥青为原料,采用氮压式纺丝机制备了不同炭化温度的中空截面沥青基碳纤维,当炭化温度为 900 °C、碳纤维交叉铺层时,吸波合格带宽为 10 GHz,最大吸收峰在 -25 dB.谢炜^[7]选取中空多孔 PAN 纤维为原料制备中空多孔炭纤维(HPCFs)作为轻质雷达吸波材料(RAMS)的吸收剂,结果表明预氧化和炭化工艺对 HPCFs 组成、结构、导电性、介电常数和吸波性能具有重要影响,以 850, 950 °C 时炭化的中空多孔纤维作吸收剂的吸波材料低于 -10 dB 的反射率带宽分别为 3.05, 2.62 GHz,较之实心纤维吸波性能得到了提高.

1.1.3 螺旋形手征碳纤维

螺旋形手征碳纤维结构规则均匀,类似弹簧或 DNA,吸波机理在于其特殊的螺旋几何结构,除电磁场的自发极化外还会出现电磁场的交叉磁化,使得螺旋形手征碳纤维对电磁波的吸收增加.螺旋手征碳纤维具有优异的电磁性能、光学性能和弹性力学性能,是理想的填充材料,可用于电磁隐身和能量吸收材料等.韩翠林等^[8]用基板法以乙炔为碳源,镍板为催化剂, PCl_3 为助催化剂,通过化学气相沉积制备螺旋形碳纤维手性吸波剂,其具有较高的介电损耗,电磁参数随频率的增大而有减小的趋势,有利于实现宽频吸波. S. Motojima^[9]研究了螺旋碳纤维/PMMA 复合微球在 W 波段的电磁波吸收性能,不同螺旋碳纤维含量的复合微球吸波性能差异较大.当螺旋碳纤维含量大于 1%,吸波效能均优于 -10 dB,含量超过 4%后,随含量的增加吸波效能下降,并逐渐向低频移动.

1.1.4 活性碳纤维

活性碳纤维是通过活化工艺得到的一种表面多孔的碳质材料,结合了轻质和各向异性的特点.活性碳纤维随频率的增大,介电常数的实部减小、虚部增大,具有频响效应.活化时间、活化温度、炭化时间、炭化温度对活性碳纤维的吸波效能有突出影响.邹田春等^[10]通过炭化、活化工艺制备了粘胶基活性碳纤维,研究发现粘胶基碳纤维随炭化温度的

升高,其石墨化程度、吸波性能先提高后降低,而随活化时间的延长,其内部结构逐渐趋向不规整化,对电磁波的损耗能力也得到了增强.赵乃勤等^[11]以活性碳纤维为导电材料制备单层电路模拟吸波材料,制备的材料不管是容性还是感性都可在8~18 GHz 频率范围内达到-10 dB 以下的反射衰减,最大衰减峰达-30 dB.目前对活性碳纤维吸波材料的研究相对较少.

1.1.5 纳米碳纤维

纳米碳纤维导电性强,表面积大,具有管状结构和较高的介电常数,既为电损耗型材料,又具有一定的磁损耗性能.目前,催化热解烃法是制得纳米碳纤维的主要途径.常用方法是喷淋法、基体法和流动催化法^[12].螺旋碳纤维也可以制备成纳米级,目前,国内外制备螺旋纳米碳纤维大多采用的是CVD法^[13].螺旋结构和手征性是碳纳米管吸波的重要机理,碳纳米管具有较强的宽频吸波性能.Takikawa等^[14]用碳气体作为原料,Cr, Mn, Fe, Co, Cu, Al, Si, Ti, V, Nb, Mo, Hf, Ta, W及其氧化物作为催化剂,通过物理气相沉积(PVD)制备具有吸波功能的纳米螺旋碳纤维.孙晓刚^[15]利用碳纳米管和环氧树脂混合制成复合吸波涂料,浇铸在铝板上制成吸波涂层.结果表明,碳纳米管含量的增加能有效提高复合材料的吸波性能,在2~18 GHz频段内出现双吸波峰,在18 GHz以上的高频也同样表现出良好的吸波性能.

1.2 SiC_f纤维

SiC_f纤维是发展前景最广阔的耐高温陶瓷纤维吸波材料之一.SiC_f纤维耐高温性能优异,可在1200℃下长时间工作,与基体材料能较好地相容^[16].SiC_f纤维的制备方法主要有先驱热解法(制备SiC_f束丝)和化学气相沉积法(制备SiC_f单丝).SiC_f纤维含硅,不仅吸波性能好,而且能减弱红外信号,还具有耐高温、相对密度小、韧性好、强度大、电阻率高的优点,但仍存在一些问题,如电阻率太高,需要进一步改性提高吸波性能.

1.2.1 改性SiC_f纤维

目前,国内外改性SiC_f纤维的制备方法主要有对SiC_f纤维进行高温处理、表面改性和掺杂.杨孚

标等^[17]采用CVD方法在SiC_f纤维上沉积一层B₄C,试验结果表明:SiC_f纤维经B₄C涂层处理后,调节了纤维的电阻率,SiC_f纤维的电损耗增大,介电常数的实部随频率升高而降低;涂层后SiC_f纤维频散特性好,对拓展吸波频宽有利;同时SiC_f纤维单丝的强度得到了大幅度提高,涂层后的SiC_f纤维可用于结构吸波材料的增强材料.王军^[18]采用超声波的方法将金属微粒均匀分散到聚碳硅烷(PCS)内,通过熔融纺丝工艺,制备出具有良好力学性能和吸波性能的掺混型SiC_f纤维.控制先驱体内金属含量和掺混型SiC_f纤维的烧成温度可以有效控制和调节掺混型SiC_f纤维的电阻率、复介电常数和复磁导率.含铁SiC_f纤维是一种非磁性纤维,掺杂Fe、C、Ni的掺混型SiC_f纤维显一定磁性.通过阻抗匹配优化设计,所制备的掺混型SiC_f纤维与环氧树脂复合制成的多层结构吸波材料对X波段的电磁波具有较好的吸收性能.

1.2.2 异形截面SiC_f纤维

异形截面SiC_f纤维的力学性能、纤维与基体间的复合性能等都有较大改善,更有意义的是异型截面SiC_f纤维还表现出良好的吸波性能.制备异型截面SiC_f纤维可通过不同形状喷丝孔纺丝获得.王应德等^[19]采用不同规格的异形喷丝孔,制备了多角形、多叶形、多边形和中空碳化硅纤维.研究发现,在相同表面积下,随叶片数量增加,SiC_f纤维的介电常数增大,中空SiC_f纤维的介电常数小于C形纤维,而损耗角正切高于C形纤维.殷玲玲等^[20]利用先驱体转化法制备了三叶形SiC_f纤维,其异形度、当量直径有一定的分布.电磁参数研究结果表明,在X波段具有较好的频响特性.反射率测试结果表明,厚度为1.55 mm时,在Ku波段具有较好的吸波效果,反射衰减最大达-26 dB.

1.2.3 纳米SiC_f纤维

纳米SiC_f纤维目前国内外的研究较少,但是纳米SiC_f纤维由于尺寸小,比表面积大,因而纳米SiC_f纤维表面的原子比例高,悬挂的化学键多,增大了其活性.界面极化、多重散射和吸波单元的非连续化是纳米SiC_f纤维吸波的优势.杨大祥等^[21]研究了PCS静电纺丝工艺对纺丝性能的影响,将PCS

原纤维经不熔化、 N_2 中 1 200 °C 热处理 1 h, 制备了亚微米/纳米 SiC_f 纤维. 徐先锋等^[23]以电镀 Ni 颗粒为催化剂, 采用 CVD 法, 在碳纤维表面原位生长 SiC 纳米纤维(SiC_2NF), 制备出 SiC_f 纳米纤维/碳纤维共增强毡体. 以上都是比较主流的纳米纤维的制备工艺.

1.3 多晶铁纤维

新型的多晶铁纤维是一种轻质的磁性雷达波吸收剂, 其具有很强的涡流损耗、磁滞损耗, 较强的介电损耗, 以及独特的形状各向异性. 黏合剂中多晶铁纤维层状取向排列所形成的吸波涂层, 在宽频内可实现高效吸收^[23]. 磁场引导羰基铁热解法是目前制备吸波多晶铁纤维的最佳方法, 制备的多晶铁纤维直径小, 微波磁导率高^[24]. 用高磁导率和低电导率材料制备的多晶铁纤维有利于其磁导率的提高, 且磁导率随长径比的增大而增大, 随纤维直径的增大而减小^[25]. 多晶铁纤维相对于碳纤维和碳化硅纤维, 在吸波材料轻量化和高强化方面表现较弱.

2 雷达吸波功能纺织品的制备方法

开发具有吸波功能的纺织品可以对人体起到有效的防护作用, 在军用隐身方面也有一定的战略应用意义. 目前主要通过以下几个途径开发吸波功能纺织品:

1) 将吸波粉体加入纺丝原液中进行纺丝或通过接枝聚合以获得具有一定吸波功能的化学纤维. 王娇娜等^[26]将钡铁氧体及纳米级钡铁氧体粉体与聚乙烯吡咯烷酮共混纺丝, 调节钡铁氧体的工艺参数、分散状态等条件, 探索最佳纺丝工艺, 制备了具有吸波功能的纤维毡.

2) 将具有吸波功能的可纺纤维和普通纤维混合, 制作具有良好雷达波吸收性能的非织造布. 朱华等^[27]使用羊毛纤维、沥青基碳纤维和双组分热熔黏合纤维, 通过粗梳毛纺成网工艺和热风法工艺制作了对雷达波有一定吸收能力的非织造布.

3) 将具有吸波功能的可纺纤维和普通纤维按一定比例混纺成纱. 王旭东等^[28]采用 CVD 法得到功能纤维, 采用阻燃涤纶纤维和功能纤维进行混纺的编织工艺, 编织成均匀网格布. 研究结果表明: 功能

纤维质量分数为 8% 时, 在 8~12 GHz 和 26.5~40 GHz 范围该篷布的吸波性能最佳, 反射率都低于 -13 dB.

4) 将吸波涂层剂涂覆在织物表面, 形成吸波层. 朱立群等^[29]以无纺布为基材, 采用复合叠层结构制备无纺布涂层吸波材料, 通过控制织物组成结构和涂层工艺, 增加入射电磁波与吸波材料的作用几率, 改进了材料的吸波性能并降低了材料面密度.

5) 运用透气透湿性较好的吸波薄膜与导电织物复合, 这种材料正处于研究阶段, 未有相关文献涉及和报道.

6) 将吸波材料配成网印浆, 利用传统的网印设备进行单面或双面网印, 制成吸波织物. 任晓峰等^[30]选用吸波物质, 在用硫化铜纤维编织成“蜂巢”结构的织物上采用双面网印技术, 试制出吸波功能织物.

目前具有吸波功能的纺织品的研发受到吸波频带窄、重量大、厚度厚、亲肤性能差等因素的制约.

3 雷达吸波功能纺织品

3.1 涂覆型吸波纺织品

将吸波剂、分散剂、黏合剂等配制成涂层剂, 涂敷在织物表面或采用化学的方法镀层沉积在织物表面, 制成的吸波织物吸波性能较好, 但是涂层剂渗透到纱线内部, 影响了织物的透气透湿性, 可通过拉伸织物和发泡的方法获得涂层内部孔隙.

Ding Donghai 等^[31]采用化学气相沉积法在 Al_2O_3 编织体上沉积热解碳涂层. 热解碳涂层可以改善 Al_2O_3 纤维编织体的吸波性能, 对于沉积 60 min 的热解碳涂层的编织体, 反射率在 9.5 GHz 达到 -40.4 dB, 吸波频带接近 4 GHz. Li Weiping 等^[32]利用超声波化学镀铜方法在羰基铁粉上涂覆沉积铜颗粒制得改性羰基铁, 在非织造织物上涂覆改性羰基铁粉, 结果表明当匹配厚度为 2.08 mm 时, 非织造吸波织物在 9.35 GHz 的反射损耗可达到 -26 dB. O. Akman 等^[33]通过电解金属沉积法在聚丙烯腈织物上涂覆 2 mm 厚的磁性纳米粒子镍、钴及其合金, 研究结果表明, 复合织物吸波效果与涂层时间相关. 吸收峰值出现在 14.3~15.8 GHz, 反射损耗达到 -30~-50 dB. 研究发现, 随着涂层时间减少, 反

射损耗减少,吸收带宽增加,而吸收峰移向低频. Yoshihiro Egami 等^[34]将无纺布浸渍在不同浓度氧化剂和掺杂剂中,织物干燥后置于充满吡咯蒸气的箱子中,制得导电无纺布,可吸收 75~110 GHz 范围内的 95%以上的电磁波.

涂覆型吸波纺织品的制备工艺相对而言比较简单,可通过传输线理论和涂层工艺(包括涂层介质、介质混比、涂层层数的选择)的设计实现其吸波性能,但是其缺点也是显而易见的,往往较厚重,不适合做服用产品,可做产业用纺织品.

3.2 纤维结构型吸波纺织品

纤维结构型吸波纺织品是相对涂覆型吸波纺织品而言的,这类纺织品产生吸波功能主要依赖于纺织品本身特性,通过控制构成纺织品的纤维、纤维的排列方式、织物组织结构、纺织工艺、纺织品的改性等等来实现.

于名讯等将涤纶短绒、不锈钢短纤维、碳纤维及多晶铁纤维混合,以仿抄纸装置和湿法纺织工艺,制备厘米波/毫米波兼容隐身湿纺织物,在 8~12 GHz 和 30~40 GHz 频段内有一定的吸波性能^[35]. 蒋洪晖等^[36]利用功能纤维和涤纶 2 种材料混纺,并根据不同编织工艺,制备出 4 种功能织物. 分别研究了 4 种织物在 8~12 GHz 和 26.5~40 GHz 频段范围内的吸波性能,并对其吸波性能进行了比较. 结果表明,在 4 种结构中,网格平纹布的吸波性能最佳,当功能纤维质量分数为 4%左右时,在 8~12 GHz 范围内,反射衰减都低于-18 dB,最大反射率衰减为-21 dB,在 26.5~40 GHz 范围内,反射衰减都低于-19 dB,最大反射衰减为-26 dB. 赵思^[37]利用非织造工艺制造碳纤维非织造布,从材料本身的碳纤维含量、厚度、内部结构和孔隙率,以及非织造制造工艺梳理方式、铺网方式、针刺密度等论述对吸波性能的影响,并研究出最佳工艺. Huang Zhibin 等^[38]将聚丙烯腈布进行碳化,结果表明,材料的复介电常数与 PAN 布的碳化程度密切相关,复合材料的微波吸收能力与碳化的聚丙烯腈布石墨片的生长有关. E.Tan 等^[39]通过热处理得到以 SiC 为基体的具有导电性的陶瓷纤维机织物,分析了织物的组织结构,多层织物的不同组合和氧化程度对织物吸波性

能的影响,制得的织物在一定范围内可吸收 90%以上的电磁波.

纤维结构型吸波纺织品主要还是依赖于功能性吸波纤维以及纤维的改性来实现,但是从一定程度上可实现吸波材料轻薄化,目前这些吸波纺织品从实用意义而言无法用于日常的穿着中,而是通过纺织工艺和方法使刚性吸波材料向柔性吸波材料过渡,从而实现其应用领域的拓展.

4 展望

综上所述,高性能纤维吸波剂有其独特的吸波优势. 国内外已成功将这些吸波纤维制成复合吸波材料应用于隐身飞机、隐身导弹等武器装备. 传统的、单一的吸波纤维已很难应对现实状态下的应用. 吸波纤维的长径比、含量、分散方式等都会影响其吸波性能,同时可通过对纤维进行改性,调节纤维的电磁参数从而改善其吸波性能,于此同时提高纤维机械性能、热学性能等,拓展吸波纤维的应用领域. 雷达吸波功能纺织品的研发还处于初步阶段,存在较多亟待改进的问题,“薄、宽、轻、强”是吸波功能纺织品研发的方向和目标. 材料形态的低维化、材料组成复合化、功能多频谱兼容化、材料设计智能化是吸波纤维和吸波纺织品极具潜力的发展方向. 柔性吸波材料的开发有助于拓展吸波材料的应用范围.

参考文献:

- [1] 赵东林,沈曾民,迟伟东. 碳纤维及其复合材料的吸波性能和吸波机理[J]. 新型炭材料, 2001, 16(2):66-72.
- [2] 王祖鹏,于名讯,潘士兵,等. 纤维复合吸波材料的研究进展[J]. 化工新型材料, 2010, 38(4):13-15.
- [3] 郭伟凯. 碳纤维排布方式对结构吸波材料吸波性能的影响及其机理分析[D]. 天津:天津大学, 2004.
- [4] 黄小忠,冯春祥,李效东,等. 一种新型的 Ba-M 型铁氧体磁性涂层吸波碳纤维研制[J]. 新型炭材料, 1999, 14(4):72-74.
- [5] 高文,冯志海,黎义,等. 涂层改性碳纤维复合材料的微波性能研究[J]. 宇航材料工艺, 2000, 5:53-57.
- [6] 杨国伟,迟伟东,沈曾民,等. 沥青基中空碳纤维的制备及其吸波性能[J]. 化工进展, 2009, 28(8):1400-1404.
- [7] 谢辉. 中空多孔碳纤维轻质吸波材料研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2008.

- [8] 韩翠林, 赵东林, 沈曾民, 等. 螺旋形碳纤维手性吸收剂的制备及其微波电磁特性研究[C]//中国仪表功能材料学会. 2009中国功能材料科技与产业高层论坛论文集. 重庆:中国仪表功能材料学会, 2009:255-256.
- [9] Motojima S, Hoshiya S, Hishikawa Y. Electromagnetic wave absorption properties of carbon microcoils/PMMA composite beads in bands[J]. Carbon, 2003, 41(13):2653-2689.
- [10] 邹田春, 赵乃勤, 师春生, 等. 制备工艺对活性碳纤维微观结构和吸波性能的影响[J]. 材料导报, 2010, 24(2):86-89.
- [11] 赵乃勤, 郭伟凯, 李家俊. 用活性碳毡制备电路模拟吸波材料的研究[J]. 宇航材料工艺, 2004(6):20-23.
- [12] 信思树, 项金钟, 吴兴惠. 纳米碳纤维的制备方法及其吸波特性[J]. 材料导报, 2003, 17(S1):24-26.
- [13] 李宁, 寇开昌, 晁敏, 等. 螺旋纳米碳纤维的研究进展[J]. 材料导报, 2011, 25(9):89-91.
- [14] Hirofumi Takikawa, Shigeo Itoh, et al. Method for preparing nano-carbon fiber and nano-carbon fiber;US, 6986877B2 [P]. 2006-01-17.
- [15] 孙晓刚. 碳纳米管吸波性能研究[J]. 人工晶体学报, 2005, 34(1):174-177.
- [16] 李轶, 徐劲峰, 徐政. 吸波纤维研究进展[J]. 现代技术陶瓷, 2005(1):24-29.
- [17] 杨孚标, 李永清, 程海峰, 等. SiC纤维的B₄C涂层研究[J]. 功能材料, 2002, 33(3):286-287.
- [18] 王军. 含过渡金属的碳化硅纤维的制备及其电磁性能[J]. 材料导报, 1998, 12(5):60.
- [19] 王应德, 刘旭光, 姜勇刚, 等. 几种异形碳化硅纤维制备及其吸波性能[J]. 功能材料信息, 2011, 8(2):20-24.
- [20] 殷玲玲, 王应德, 薛金根, 等. 连续三叶形碳化硅纤维的性能研究[J]. 功能材料, 2005, 36(3):445-447.
- [21] 杨大祥, 肖平, 赵晓峰, 等. 静电纺丝制备连续SiC亚微米/纳米纤维[J]. 中国表面工程, 2010, 23(1):39-44.
- [22] 徐先锋, 肖鹏, 许林, 等. 碳化硅纳米纤维/碳纤维共增强毡体的制备[J]. 功能材料, 2008, 39(4):692-694.
- [23] 刘顺华, 刘军民, 董星龙, 等. 电磁波屏蔽及吸波材料[M]. 北京:化工工业出版社, 2007:246.
- [24] 周永江, 程海峰, 楚增勇, 等. 吸波多晶铁纤维制备工艺研究[J]. 高科技纤维与应用, 2006, 31(2):34-36.
- [25] 赵振声, 张秀成, 聂彦, 等. 多晶铁纤维吸波材料的微波磁性研究[J]. 磁性材料及器件, 2000, 31(1):18-20.
- [26] 王娇娜, 郭远征, 李从举. 钡铁氧体粉体及其复合电纺纤维的制备[J]. 合成纤维, 2009(7):17-20.
- [27] 朱华, 李双会, 王相承. 纤维表面绝缘处理对含碳纤维非织造布雷达波吸收性能的影响[J]. 产业用纺织品, 2007(12):14-19.
- [28] 王旭东, 蒋洪晖, 顾兆梅, 等. 多功能战术篷布的研制与性能分析[J]. 表面技术, 2011, 40(3):85-87.
- [29] 朱立群, 古璟, 李卫平, 等. 无纺布织物涂层的吸波性能[J]. 航空材料学报, 2008, 28(4):70-75.
- [30] 任晓峰, 商思善, 刘满华. 双面网印吸收电磁波织物的试制[J]. 上海纺织科技, 2005, 33(12):32-33.
- [31] Ding Donghai, Zhou Wancheng, Luo Fa, et al. Influence of pyrolytic carbon coatings on complex permittivity and microwave absorbing properties of Al₂O₃ fiber woven fabrics [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(2):354-359.
- [32] Li Weiping, Zhu Liqun, Gu Jing, et al. Microwave absorption properties of fabric coated absorbing material using modified carbonyl iron power[J]. Composites, 2011, 42:626-630.
- [33] Akman O, Kavas H, Baykal A, et al. Magnetic metal nanoparticles coated polyacrylonitrile textiles as microwave absorber[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2013, 327:151-158.
- [34] Yoshihiro Egami, Takashi Yamamoto, Kunio Suzuki, et al. Stacked polypyrrole coated non-woven fabric sheets for absorbing electromagnetic waves with extremely high frequencies[J]. Journal of Materials Science, 2012, 47(1):382-390.
- [35] 于名讯, 赵均英, 朱洪立, 等. 厘米波/毫米波兼容隐身湿纺织物研究[J]. 功能材料, 2006, 37(6):874-876.
- [36] 蒋洪晖, 顾兆梅, 于富强, 等. 功能纤维织物的制备及其吸波性能[J]. 表面技术, 2010, 39(5):72-76.
- [37] 赵思. 非织造布吸波材料的开发[D]. 天津:天津工业大学, 2008.
- [38] Huang Zhibin, Zhou Wancheng, Kang Wenbo, et al. Dielectric and microwave absorption properties of the partially carbonized PAN cloth/epoxy-silicone composites[J]. Composites, 2012, 43(8):2980-2984.
- [39] Tan E, Kagawa Y, Dericioglu A F. Electromagnetic wave absorption potential of SiC-based ceramic woven fabrics in the GHz range[J]. Journal of Materials Science, 2009, 44(5):1172-1179.

(责任编辑:张燕)