

http://pmse.scu.edu.cn

柔性宽频铁硅铝/芳纶纳米纤维纳米复合薄膜吸波性能

李帆¹, 刘雨杭¹, 文友谊¹, 王浩宇¹, 徐伟伟¹, 李博¹, 宋志梅¹, 陈枫²

(1.成都飞机工业(集团)有限责任公司,四川成都610092;2.四川大学高分子科学与工程学院 高分子材料工程国家重点实验室,四川成都610065)

摘要:片状铁硅铝(FeSiAl)粉末由于具有较高的磁损耗和饱和磁强度而具有宽频、强吸收的电磁波吸收特性。但是, FeSiAl片层厚度较大且呈刚性的本征特性致使其在搭接时,片与片之间的相互作用力极差,因此其薄膜的力学强度和柔韧性较差,极大地限制了其在现代柔性电子器件中的应用。文中将少量水加入到芳纶纳米纤维(ANF)溶液中,诱导ANF分子链之间形成分子间氢键。通过调节水的添加量使其形成柔性水合芳纶纳米纤维网络。并将该柔性的ANF网络通过简单溶液共混的方式引入到FeSiAl薄膜中提升其力学性能和柔韧性。结果表明,当ANF的质量分数为60%时,该纳米复合薄膜兼具良好的电磁波吸收性能和柔韧性,此时,万能拉伸机测得纳米复合薄膜的力学强度高达136.88 MPa,断裂伸长率为4.72%。采用电磁参数测试仪结合仿真计算得到在纳米复合薄膜的厚度仅为3 mm时,有效吸收带宽为2.84 GHz,最大吸收强度为-46.81 dB。此外,该纳米复合薄膜在反复折叠之后仍保持良好的柔韧性。这种纳米复合薄膜简单且绿色的制备方式使其在下一代柔性电子器件的吸波领域具有良好的应用场景。

关键词: 纳米复合材料; 柔性薄膜; 吸波; 铁硅铝; 芳纶纳米纤维

中图分类号:

文献标识码: A

文章编号: 1000-7555(2022)11-000

随着信息科技的快速发展,特别是宽频且高功率的电子器件,如卫星通讯、手机通讯及相控阵能雷达^[1],迫切需求宽频的微波吸收材料来确保人们的身体健康、电子信息安全和国防安全。此外,在航空航天领域或小型电子器件领域,轻质与超薄都是需要特别考虑的问题。通常,铁氧化物、金属合金、陶瓷和它们的复合物被广泛用作电磁波吸收材料,但其薄膜通常缺乏柔性^[2-4]。下一代电子器件正向着柔性可穿戴等方向持续发展,吸波材料是否具有柔韧性成为其能否得到广泛应用的决定性因素。此外,如何采用简单且绿色的方式制备柔性吸波薄膜仍然是一个难题。

电损耗和磁损耗材料是2种最为常见的电磁波吸收材料^[5]。典型的,导电材料通过极化损耗的介电损耗实现对电磁波的有效吸收;而磁性材料则通过动态磁化过程,如自然磁共振,磁滞循环、电流涡流和畴壁共振等方式来损耗电磁波^[6,7]。因此,电磁波吸收材料吸波的主要机理是通过上述损耗机制

将电磁波的能量转换为热量。碳系材料(碳纤维、炭黑、碳纳米管和石墨烯等)、陶瓷材料和导电聚合物等介电损耗材料通常具有很窄的吸收频段且在厚度小于3 mm时,对雷达波的吸收性能均较差。相较于碳系吸波材料,铁氧体、羰基铁、金属合金粉末和多晶铁纤维等具有较宽的有效吸收频段和较强的电磁波吸收能力,特别是在低厚度下具有显著优势^[8-10]。此外,对于磁性吸收材料,吸收粉体的大小、形状和结构也对其吸收性能有着显著影响。相较于原始粉末,当粉体的粒径小至微米和纳米级时,其饱和磁导率会降低且电阻会有效增加。此外,粉末粒径分布越宽,电磁波的有效吸收带宽可以有效增加,但是最大吸收强度会有损失。另一方面,粉末的形状和结构也对吸波材料的性能具有较大影响,例如,通过对吸波材料的结构进行设计或使其形状具有各向异性,能有效地突破材料的Snoek极限并提升电磁波的透过率,进一步增加吸波材料的有效吸收宽频^[11-13]。特别是对于纳米级的

doi:10.16865/j.cnki.1000-7555.2022.0251

收稿日期:2022-03-22

基金项目:四川省科技计划资助项目(2022YFG0111)

通讯联系人:陈枫,主要从事纳米复合材料研究,E-mail: fengchen@scu.edu.cn

吸收材料,由于粒径小且比表面积较大,纳米材料具有较好的力学性能和电磁波损耗能力,使其能在很宽的波段对电磁波进行有效吸收^[14-16]。铁硅铝(FeSiAl)具有较高的磁导率和饱和磁强度、居里温度及磁损耗,因此在2~18 GHz频段范围内具有良好的电磁波吸收特性。报道显示,FeSiAl粉末具有良好的电磁波吸收性能,但是极少有关于其薄膜力学性能的研究。这是由于FeSiAl粉末之间缺乏良好的相互作用,其薄膜的力学强度较弱甚至难以形成薄膜。为解决FeSiAl薄膜力学强度较弱的问题,本文通过在FeSiAl薄膜中引入柔性芳纶纳米纤维(ANF)网络,使复合薄膜在力学强度与吸波性能之间形成巧妙的平衡。

1 实验部分

1.1 原料与试剂

凯夫拉49:购于中国杜邦公司;二甲基亚砜(DMSO, $\geq 99\%$)、氢氧化钾(KOH):分析纯, $\geq 98\%$,购于成都科龙科技有限公司;铁硅铝(FeSiAl)粉末: $\geq 99.9\%$,购于北矿磁材科技有限公司。

1.2 复合薄膜的制备

ANF的制备参考了前人的工作^[17]。将7.5 g凯夫拉49和11.25 g KOH加入到500 mL DMSO溶液中。由于少量的水会严重影响ANF的产率,因此,采用封口胶带密封瓶口防止DMSO从空气中吸水。之后,采用磁力搅拌进行充分混合,直至7 d无法观测到明显的凯夫拉纤维,此时溶液为深红色。之后采用8000 r/min的转速对该溶液进行离心5 min,除去没有溶解的凯夫拉纤维和氢氧化钾固体,得到均匀透明的ANF溶液(Fig.1(a))。取1 g ANF溶液烘干并称其固含量得到ANF溶液的浓度,平行测量3个样,得到ANF溶液的平均浓度为0.015 g/mL。

纯的ANF溶液含有大量ANF分子链,它们会堵住抽滤孔,使得薄膜很难以抽滤的方式制备。因此,本文将少量水加入ANF溶液,使ANF析出,形成水合芳纶纳米纤维大分子网络,之后抽滤制备HANF薄膜。Fig.1(b)展示了,随着水的加入,溶液的颜色由红棕色转变为亮黄色,且溶液从无色透明转变为亮黄不透明,证明溶液中有大分子析出。并且,该析出物并不是无规分布的,而是形成了一种网状物质。当ANF溶液与水的体积比达到10:5时,溶液中的ANF完全析出,因此水的最佳添加量为10:5(ANF溶液与水的体积比)。



Fig.1 (a) Dissolution process of Kevlar fiber; (b) ANF solution after adding water

以FeSiAl质量分数40%的纳米复合薄膜为例。将0.4 g FeSiAl粉末加入100 mL DMSO溶液中,再加入40 g ANF溶液(ANF实际质量为0.6 g),充分搅拌10 min直至反应液均匀。之后缓慢滴加50 mL去离子水,边加边搅拌均匀,持续搅拌10 min直至ANF分子完全恢复分子间氢键。取10 mL溶液至有机抽滤膜(直径50 mm、孔径 $0.2 \mu\text{m}$)上抽滤成薄膜。之后将薄膜放置于 60°C 的鼓风烘箱中干燥6 h。采用20 MPa的压力对薄膜进行5 min的冷压,使薄膜变得更密实,以进一步提升薄膜的综合性能。将复合薄膜命名为ANF-N, N代表FeSiAl的质量份数。

1.3 测试与表征

1.3.1 形貌表征:采用扫描电镜(JEOLJSM-5900LV)对FeSiAl粉末、ANF及ANF/FeSiAl纳米复合薄膜的微观形貌进行表征。加速电压为5 kV。粉末样品直接喷涂在导电胶上,喷金进行观察;薄膜样品采用液氮进行脆断,断面喷金进行观察,并对断面的Fe, Si和Al元素做成像处理。

1.3.2 结晶结构分析:采用X射线衍射(Philips X'Pert pro MPD, 荷兰)对FeSiAl粉末及ANF, FeSiAl/ANF纳米复合薄膜进行测试,放射源为Cu K α (波长为0.15406 nm),测试电流为40 mA,电压为40 kV,步长为 0.02° 。

1.3.3 热稳定性能分析:使用热重分析仪(TG 209F1 Iris, 德国NETZSCH)对ANF和FeSiAl/ANF纳米复合薄膜的热分解温度进行测试。测试气氛为氮气,升温速率为 $10^\circ\text{C}/\text{min}$,温度区间为 $100\sim 800^\circ\text{C}$,在 100°C 恒温8 min除去水。

1.3.4 力学性能测试:采用万能拉伸机(Instron 5967, 美国)对ANF和FeSiAl/ANF纳米复合薄膜的力学性能进行测试,拉伸速率为20 mm/min,样条的长宽为 $20 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 。

1.3.5 吸波性能测试:采用矢量网络仪(AgilentN 5230)测试 FeSiAl/ANF 纳米复合薄膜的电磁参数,测试范围为 2~18 GHz,样品为同轴圆环,内径 3 mm、外径 7 mm、厚度 2 mm。

2 结果与讨论

2.1 吸收剂及纳米复合薄膜表征

由于 FeSiAl 粉末具有极高的饱和磁导率和磁损耗,因此其具有极佳的电磁波吸收性能。如图 2 所示,FeSiAl 粉末为均匀的片状结构,片状结构具有较大的比表面积,能有效吸收电磁波。

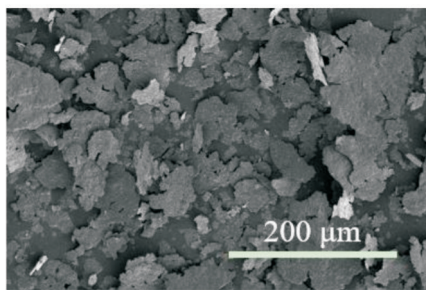


Fig.2 SEM image of FeSiAl

粉末在溶液中的分散性通常对薄膜的综合性能有较大的影响。如果分散不均匀,在水流的作用下,粉末将在溶液中很快团聚形成缺陷,严重影响薄膜的综合性能。Fig.3(a~c)展示了 FeSiAl 粉末悬浮液及 FeSiAl/ANF 复合悬浮液在沉降不同时间之后的数码照片。可见,纯的 FeSiAl 悬浮液为黑色,且 1 h 后悬浮液就出现明显的分层现象,上层为澄清的 DMSO 溶液,下层则为沉降的 FeSiAl 粉末。当 ANF 的质量分数为 30% 时,悬浮液的稳定性明显提升,在 3 h 后,悬浮液的沉降很少,几乎可以忽略不计。与此同时发现,ANF 网络在溶液中十分稳定,停放 24 h 后,依然保持稳定,未发生任何沉降。则可以得到,芳纶纤维柔性网络可以支撑 FeSiAl 粉末,防止 FeSiAl 粉末下沉。因此,芳纶纤维柔性网

络可以辅助 FeSiAl 粉末在溶液中均匀分散。良好的分散性将赋予纳米复合薄膜优良的综合性能。如图 3(a~c)所示为不同含量 ANF 的复合薄膜的数码照片。可见,不加任何 ANF 的 FeSiAl 粉末很脆,近乎没有任何力学性能,也成不了完整的薄膜。究其原因,小型片状的 FeSiAl 粉末之间难以形成紧密搭接,且片与片之间仅有极弱的范德华作用力。当 ANF 的质量分数达到 30% 时,纳米复合薄膜具有良好的力学性能。经过多次反复折叠之后,该纳米复合薄膜依旧没有发生断裂。由此可得出结论,加入少量的 ANF 即可大幅提升薄膜的柔韧性。此外还发现,纯的 ANF 薄膜具有优良的柔韧性,因此可以推测,加入的柔性 ANF 网络赋予该复合纳米薄膜优良的柔韧性,后面将结合扫描电镜结果进行分析。

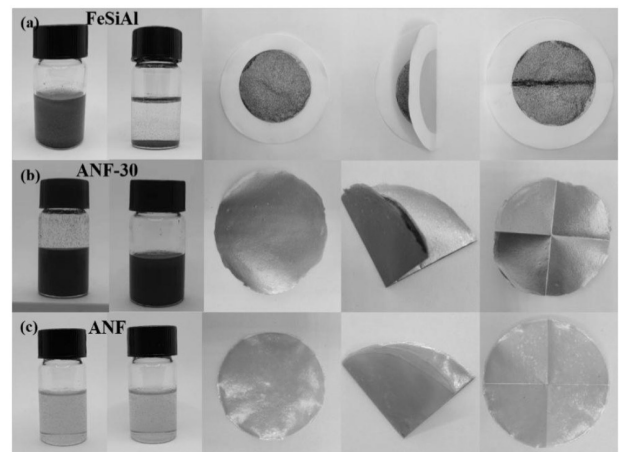


Fig.3 Stability of suspension and the flexibility of films

(a): FeSiAl; (b): FeSiAl/ANF nanocomposite films; (c): ANF

为验证 ANF 纤维是否成功加入到纳米复合薄膜中,采用 XRD 对其进行表征(Fig.4(a))。纯 FeSiAl 粉末有 3 个典型的特征峰,分别为 44.672° 的 (110) 晶面峰, 65.021° 的 (200) 晶面峰和 82.332° 的 (211) 晶面峰,对应 PDF#99-0064 卡片(FeSiAl 标准图谱)。而 ANF 在 24.54° 有 2 个连着的宽峰,为非晶型态的

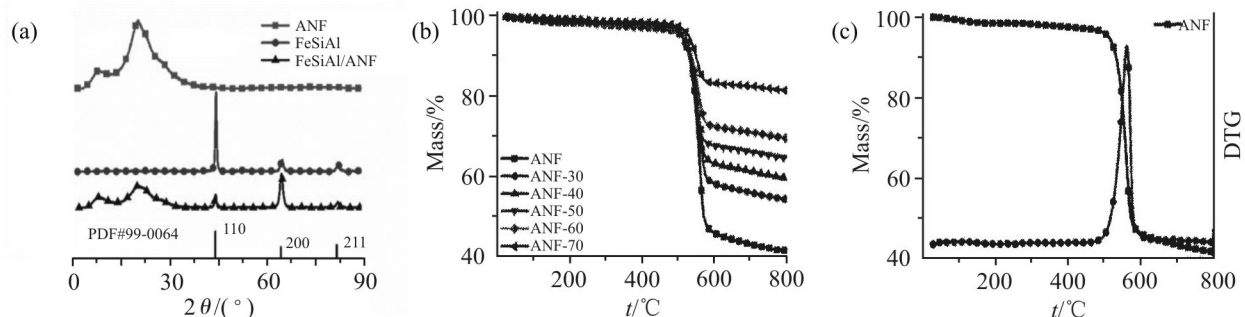


Fig.4 (a) XRD patterns and (b, c) TGA curves of FeSiAl, ANF and ANF/FeSiAl nanocomposite films

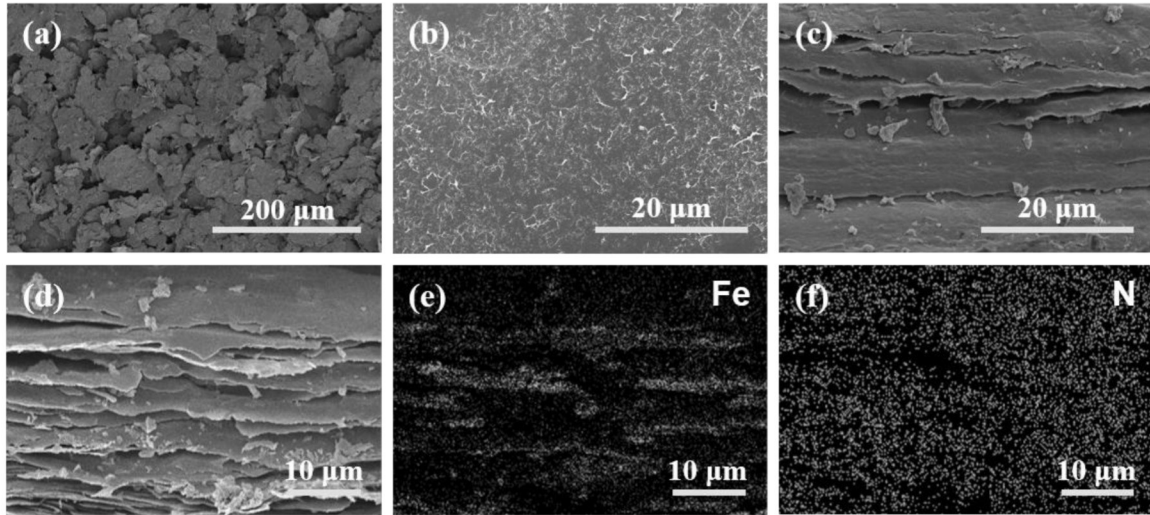


Fig.5 SEM images of (a) the surface of FeSiAl film, (b) the surface of FeSiAl/ANF nanocomposite film, (c) the fracture surface of ANF films, and (d-f) the fracture surface and EDS mapping of FeSiAl/ANF nanocomposite film

ANF。对于纳米复合薄膜，其XRD曲线不仅具有FeSiAl的3个典型特征峰，也包含ANF的宽峰，证明已成功地将ANF与FeSiAl复合在了一起。使用TGA对复合薄膜内ANF的含量进行表征发现，随着ANF含量的逐渐增加，纳米复合薄膜的失重也逐渐增大(Fig.4(b))。这是由于FeSiAl具有较高的分解温度，氮气氛围下在800℃温度范围以内几乎没有失重，而ANF在400℃左右具有明显的失重峰(Fig.4(c))，且ANF-30在800℃时的失重分数大概为18.6%，纯ANF薄膜的失重分数为58.4%，通过纳米复合薄膜的失重进行计算，ANF的质量分数为31.85%(理论加入量为30%)，ANF的加入量和理论加入量几乎相等，因此已成功地将FeSiAl与ANF进行了复合制备出了纳米复合薄膜。

2.2 芳纶纳米纤维增韧机理

为解释ANF的加入赋予纳米复合薄膜优良柔韧性的原因，对无法成膜的FeSiAl薄膜进行表征发现，纯的FeSiAl粉末呈片状，但片与片之间无相互作用，具有很多空隙，无法紧密堆砌形成薄膜(Fig.5(a))。加入ANF之后，纳米复合薄膜的表面非常平坦，可见片状FeSiAl粉末均匀地分布在薄膜内部。对薄膜的断面进行表征发现，ANF能形成良好的骨架，而片状FeSiAl则分布在骨架中，ANF纤维包围在片状FeSiAl周围(Fig.5(b))。此外，可以明显观察到，纳米复合薄膜的断面不平整，且可以观察到ANF纤维的断面有纤维抽拔的痕迹，证明ANF之间有较强的相互作用(Fig.5(d))。采用SEM-EDS面扫元素成像可以看到，Fe和N元素均匀地分布在薄膜

断面内，证明FeSiAl在薄膜内部的分散较为均匀(Fig.5(d-f))。因此可以证明，纳米复合薄膜内部的柔性ANF网络使其具有良好的柔韧性。同时也对ANF薄膜的断面进行观察，可见其断面展现出纤维紧密堆砌的层状结构，且可以明显看见纤维拔出的断头，证明ANF纤维之间有强的相互作用力(Fig.5(c))。作用力主要有ANF纤维析出后相互缠绕的拉脱作用力和ANF分子链之间的氢键作用力。因此，纳米复合薄膜具有良好柔韧性的原因是ANF纳米骨架具有良好的柔韧性。在弯折的过程中，ANF纳米纤维网络能完全进行弯折并恢复原样，因此该纳米复合薄膜也具有同样的柔韧性。

优良的力学性能对吸波薄膜的实际应用具有重要的意义。采用万能力学试验机对薄膜的力学性能进行测试。随着ANF的加入，纳米复合薄膜的力学性能逐渐增加(Fig.6(a)和Fig.6(b))。纯的FeSiAl粉末无法形成薄膜，当ANF的质量分数为30%时(ANF-70)，可以形成完整的薄膜，其力学强度和断裂伸长率分别为88.22 MPa和3.82%。当ANF的质量分数达到70%时，ANF-30纳米复合薄膜的力学强度和断裂伸长率分别为161.7 MPa和5.56%，分别为ANF-70的1.83倍和1.46倍。但随着纳米纤维薄膜中掺杂的FeSiAl粉末含量逐渐提高，纳米复合薄膜的力学强度逐渐降低。纯ANF薄膜的力学强度达到所有薄膜的最大值，为170.7 MPa，也验证了这一设想。断裂能是表征薄膜在断裂过程中柔韧性的重要指标，采用曲线与横坐标的积分面积计算了各薄膜的断裂能。如Fig.6(c)所示，随着ANF的加入，

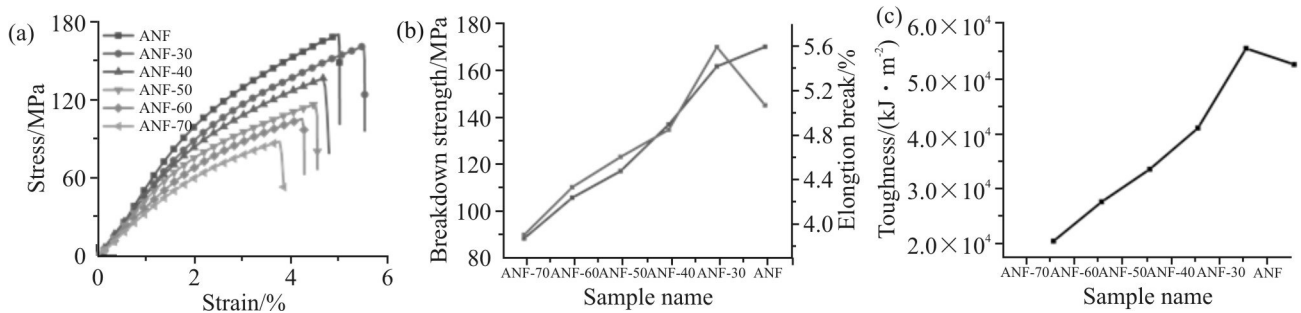


Fig.6 (a) Mechanical properties, (b) summary of breakdown strength and elongation at break and (c) summary of fracture toughness of ANF and FeSiAl/ANF nanocomposite films

薄膜的断裂能随之提升。ANF-30 纳米复合薄膜的断裂能为 $5.5498 \times 10^4 \text{ kJ/m}^3$ ，为 ANF-70 的 2.71 倍。因此，ANF 纤维的加入为纳米复合薄膜提供了力学和柔韧性极为优良的骨架，能显著提升纳米复合薄膜的力学强度和柔韧性。

2.3 纳米复合薄膜电磁性能及吸波机理

电磁参数对材料的吸波性能有着直接影响，采用矢量网络仪对纳米复合薄膜的电磁参数进行测试 (Fig.7(a-f))。可见，在添加量较低时，ANF/FeSiAl 纳米复合薄膜的介电常数实部对频率依赖性很弱，在 0.5~18 GHz 频段内随着频率增大损耗略微降低。但是磁常数的实部却表现出较强的频率依赖性，随着频率的增加，磁常数的实部出现下降，且 FeSiAl 粉末加入的值越少，磁常数的实部变化幅度

也越小，如 ANF-30，其磁常数的实部从 1.78 下降至 0.89。通常情况下，磁常数和介电常数在大频率范围内保持不变有利于吸波材料在较宽频率范围内形成有效的阻抗匹配，有利于拓宽吸收频段。对于 FeSiAl 粉末的质量分数小于 70% 的纳米复合薄膜，其介电损耗几乎为 0。对于 ANF-70 纳米复合薄膜，其介电常数虚部随着频率逐渐增大，在 18 GHz 处达到最大值为 24.25。这是因为在 FeSiAl 粉末加入量较低时，由于 FeSiAl 片层无法有效搭接，因此无法形成有效的导电网络，无法在电磁场的作用下感应产生电流，形成有效的电损耗。只有在质量分数达到 70% 时才有较弱的电损耗，因此其介电常数虚部才会有所增加。而 ANF/FeSiAl 纳米复合薄膜的磁常数虚部均呈先上升后下降的趋势，出现 1 个明显的

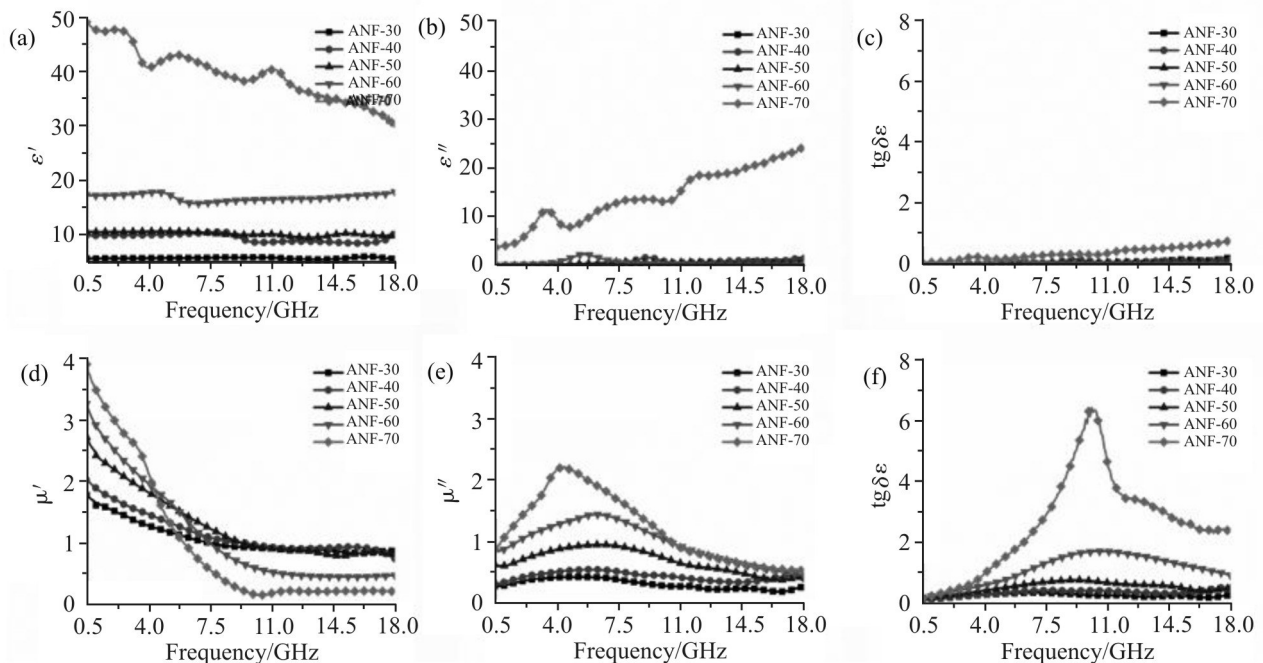


Fig.7 (a-c) Real part, imaginary part and loss of dielectric constant, (d-f) real part, imaginary part and loss of magnetic permeability for ANF and FeSiAl/ANF nanocomposite films

峰,峰的位置大约在 4.32 GHz 处,这是磁性材料的自然共振峰。可见,随着 FeSiAl 含量的逐渐增加,在整个频率范围内,磁常数的虚部都呈现上升趋势,证明纳米复合薄膜的磁损耗在逐渐增加。综上所述,ANF/FeSiAl 纳米复合薄膜的介电损耗几乎为 0,只有当 FeSiAl 的质量分数达到 70% 时,才有较弱的电损耗。然而该纳米复合薄膜的磁损耗却很大,且磁损耗随着 FeSiAl 含量的增加均呈现逐渐增大的现象。当 FeSiAl 的质量分数达到 70% 时,纳米复合薄膜的磁损耗达到最大值,在 10.19 GHz 处的磁损耗为 6.369,此时电损耗为 0.348,证明该纳米复合薄膜对电磁波的损耗主要是磁损耗而非电损耗。但是磁损耗值越高通常只代表该材料对电磁波的损耗特性并不代表其对电磁波的吸收特性,因为电磁波波吸收材料的阻抗匹配通常也会显著影响材料对电磁波的吸收。

通过线传输理论,如式(1)~(3)

$$Z_{in} = Z_0(\mu_r/\epsilon_r^{1/2})\tan h\{j(2\pi fd/c)(\mu_r/\epsilon_r)^{1/2}\} \quad (1)$$

$$T = (Z_0 - Z_{in})/(Z_0 + Z_{in}) \quad (2)$$

$$RL = 20\log_{10} |T| \quad (3)$$

式中: $Z_0 = 376.7 \Omega$; c ——光速; d ——吸波材料的厚度,反射损耗值低于 -10 dB ($RL < -10 \text{ dB}$) 代表超过 90% 的电磁波都能被吸收,被称为有效的电磁波吸收。计算了 ANF/FeSiAl 纳米复合薄膜在不同厚度时的电磁波吸收性能 (Fig.8(a~f))。C 波段 (4~8 GHz) 和 X 波段 (8~12 GHz) 的电磁波可用于众多通讯领域,因此本文重点关注这些波段的电磁波吸收性能。对于 ANF-30, ANF-40, ANF-50, ANF-60 和 ANF-70 这 5 种纳米复合薄膜,其电磁波吸收性能呈现出先上升后下降的特点 (Fig.8(f)); 但是,从电磁参数得到的磁损耗却是逐渐递增 (Fig.7(f)), 在 8 GHz 处的磁损耗分别为 0.402, 0.497, 0.797, 1.47 和

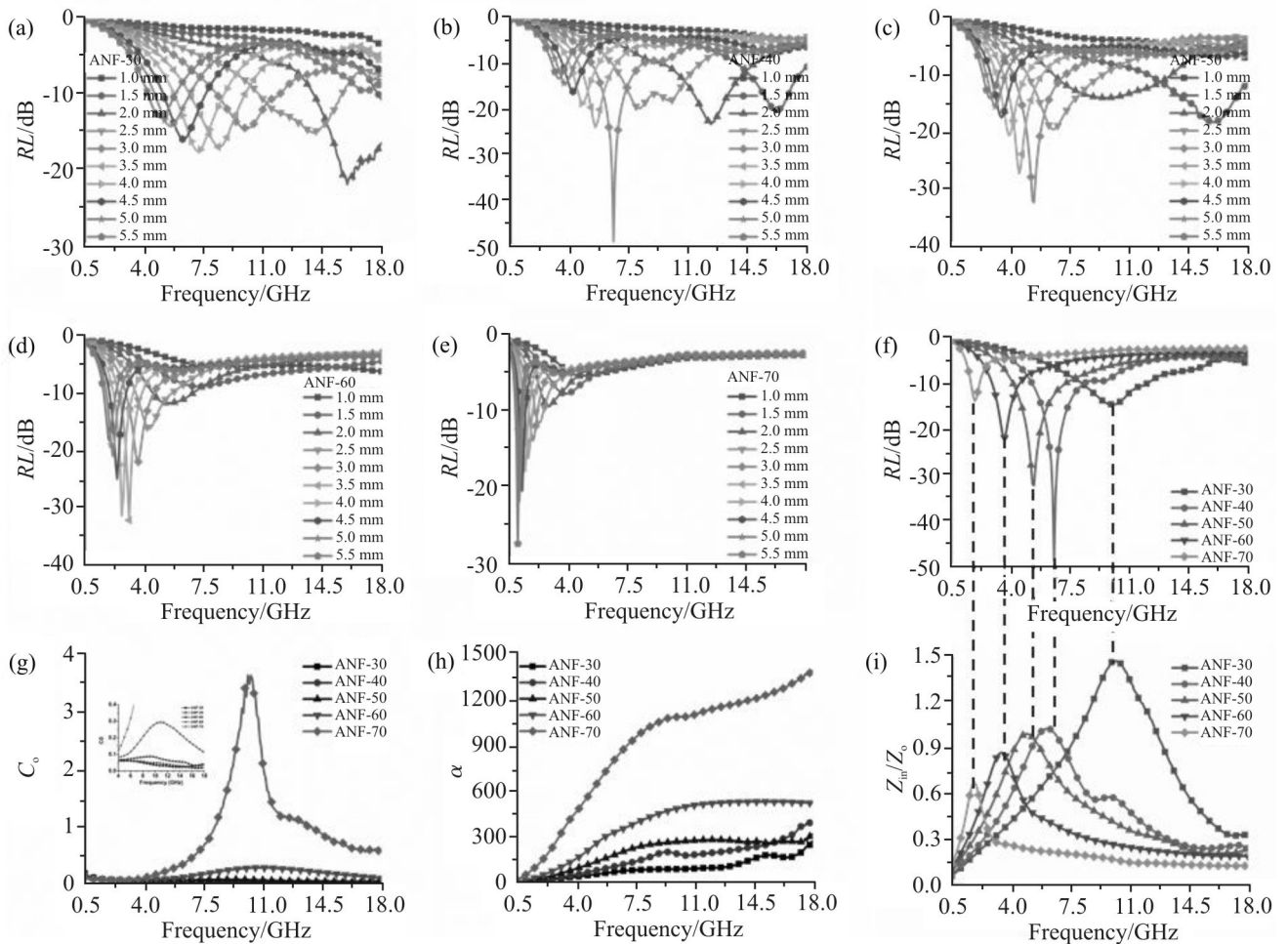


Fig.8 Electromagnetic wave absorption performance of (a) ANF-30, (b)ANF-40, (c)ANF-50, (d)ANF-60 and (e)ANF-70, (f)FeSiAl/ANF nanocomposite films; (g) C_o constant, (h) loss factor and (i) impedance matching coefficient of ANF and FeSiAl/ANF nanocomposite films

3.45。然而当厚度为3 mm时,它们在该频点附近的电磁波吸收强度分别为-14.29 dB, -48.61 dB, -31.61 dB, -21.46 dB和-13.35 dB,与损耗变化趋势不一致。计算三者的阻抗匹配系数,通常阻抗越接近于1,代表着阻抗越好(Fig.8(i)),阻抗越好代表着电磁波能完全地进入到吸波材料内部,对电磁波进行有效的损耗。阻抗越差则电磁波存在趋肤效应,在吸波材料表面则被反射,四者的最大阻抗分别为1.46, 1.03, 0.99, 0.87和0.67,与吸收强度趋势是一致的,可见,阻抗是电磁波吸收的核心影响要素。为分析三者阻抗存在差异的原因,对三者的涡流相关系数进行了计算(式(4)和式(5))

$$\mu'' \approx 2\pi\mu_0 d^2 \sigma (\mu')^2 f \quad (4)$$

$$C_0 = \mu'' (\mu')^{-2} f^{-1} = \pi\mu_0 d^2 \sigma / 3 \quad (5)$$

式中: C_0 ——涡流损耗相关系数; σ ——材料的电导率。可以发现,ANF-50, ANF-60和ANF-70的涡流系数很高,因此会产生较强的表面电流,将电磁波从表面反射出去,存在较强的趋肤效应,因此对电磁波的吸收较弱,而ANF-30和ANF-40的涡流效应很低,可以让电磁波进入材料内部,进行有效的电磁波损耗(Fig.8(g)),其吸收特性与其损耗特性相关。通常,磁性材料对电磁波的损耗有磁滞效应、畴壁共振,涡流损耗、自然共振和交换共振。畴壁共振发生在1 MHz~1 GHz,因此畴壁共振是不存在的。因此,在低频是自然共振、高频为交换共振,在高频也有微弱的涡流损耗。此外还发现,对于同一个样品,随着厚度的增加,其电磁波吸收峰均向低频移动,这是由于四分之一波长理论。综上所述,ANF-40具有良好的损耗系数和阻抗匹配系数,因此对电磁波的吸收性能最佳,其最佳匹配波段的匹配厚度为3 mm,低于-10 dB的有效吸收波段为5.35~8.18 GHz,有效带宽为2.84 GHz;低于-20 dB的有效吸收波段为6.22~7.03 GHz,有效带宽为0.81 GHz,且最低反射率达到-48.61 dB。

3 结论

本文通过调节ANF溶液中水的添加量,使ANF分子间氢键恢复形成柔性ANF网络,并采用简单的溶液共混方法将ANF网络巧妙地引入到FeSiAl薄膜中制备了兼具良好电磁波吸收和柔韧性的纳米复合薄膜。当ANF的质量分数达到60%时(ANF-40),FeSiAl/ANF纳米复合薄膜的力学强度为136.88 MPa、断裂伸长率达到4.72%;其X波段的匹配厚度为3 mm,低于-10 dB的吸收波段为

5.35~8.18 GHz,有效带宽为2.84 GHz,最大吸收强度为-48.61 dB。此外,该复合薄膜还具有良好的柔性,能经受反复的折叠而不发生断裂。该FeSiAl/ANF纳米复合薄膜能用于下一代柔性电子器件的电磁波吸收领域。

参考文献:

- [1] 李洪瑞,刘长华. 雷达吸波材料技术研究综述[J]. 中国西部科技, 2008, 7(25): 6-7.
Li H R, Liu C H. Summarization research on absorbing materials of radar[J]. Science and Technology of West China. 2008, 7(25): 6-7.
- [2] Wang B, Wu Q, Fu Y, *et al.* A review on carbon/magnetic metal composites for microwave absorption [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 86: 91-109.
- [3] Wang L, Li X, Shi X, *et al.* Recent progress of microwave absorption microspheres by magnetic - dielectric synergy [J]. Nanoscale, 2021, 13: 2136-2156.
- [4] Zhi D, Li T, Li J, *et al.* A review of three-dimensional graphene-based aerogels: synthesis, structure and application for microwave absorption [J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 211: 108642.
- [5] 邹海仲,万炜涛.复合粉体制备导热吸波材料及其表征[J].高分子材料科学与工程,2019,35(2):136-140.
Zou H Z, Wan W T. Preparation and property of thermal absorbing materials via aluminum oxide and carbonyl iron[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2019, 35(2): 136-140.
- [6] 赵鹏飞,宋喜梅,张海琛,等.碳纳米管与二硫化钼协同增强丁腈橡胶复合材料吸波性能[J].高分子材料科学与工程,2021,37(4): 174-181.
Zhao P F, Song X M, Zhang H C, *et al.* Synergetic effects of molybdenum disulfide and multiwalled carbon nanotubes on the microwave absorbing performance of nitrile butadiene rubber composites[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2021, 37(4):174-181.
- [7] 郝婧,曹雪媛,潘凯.碳化硅纳米纤维的制备及电磁波吸收性能[J].高分子材料科学与工程,2020,36(2):127-132.
Hao J, Cao X Y, Pan K. Preparation and electromagnetic wave absorption of SiC nanofiber[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2020, 36(2):127-132.
- [8] Sista K S, Dwarapudi S, Kumar D, *et al.* Carbonyl iron powders as absorption material for microwave interference shielding: a review [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 853: 157251.
- [9] Chen X, Wu Y, Gu W, *et al.* Research progress on nanostructure design and composition regulation of carbon spheres for the

- microwave absorption[J]. Carbon, 2022, 189: 617-33.
- [10] 王轩,朱冬梅.羰基铁吸收剂的研究进展[J].材料导报,2014,28(23):17-21.
Wang X, Zhu D M, Research progress on carbonyl iron absorber [J].Materials Review, 2014,28(23):17-21.
- [11] Li J, Zhou D, Wand P- J, *et al.* Recent progress in two-dimensional materials for microwave absorption applications [J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 425: 131558.
- [12] Houbi A, Aldashevich Z A, Atassi Y, *et al.* Microwave absorbing properties of ferrites and their composites: a review [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2021, 529: 167839.
- [13] 李泽,许宝才,王建江,等.片状羰基铁低频吸波性能的多因素参数调控[J].磁性材料及器件,2017,48(2):45-48.
Li Z, Xu B C, Wang J J, *et al.* Multivariate parameters regulation of flake carbonyl iron absorbing properties in low-frequency[J]. Journal of Magnetic Materials and Devices, 2017,48(2):45-48.
- [14] Bhattacharjee Y, Bose S. Core - shell nanomaterials for microwave absorption and electromagnetic interference shielding: a review [J]. ACS Applied Nano Materials, 2021, 4: 949-972.
- [15] Gunwant D, Vedrtnam A. Microwave absorbing properties of carbon fiber based materials: a review and prospective [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 881: 160572.
- [16] 曾强,王荣超,张小兰,等.电磁吸波材料研究进展[J].江西化工, 2021,37(6):100-103.
Zeng Q, Wang R C, Zhang X L, *et al.* Research progress of electromagnetic wave absorption materials[J]. Jiangxi Chemical Industry, 2021,37(6):100-103.
- [17] Yang M, Cao K . Dispersions of aramid nanofibers:a new nanoscale building block [J]. ACS Nano, 2011, 5:6945.

Preparation of Flexible FeSiAl/Aramid Nanofiber Nanocomposite Films with Broad Band Microwave Absorption Properties

Fan Li¹, Yuhang Liu¹, Youyi Wen¹, Haoyu Wang¹, Weiwei Xu¹, Bo Li¹, Zhimei Song¹, Feng Chen²

(1. AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co. Ltd, Chengdu 610091, China; 2. College of Polymer Science and Engineering, State Key Laboratory of Polymer Materials Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

ABSTRACT: High magnetic loss and saturated magnetic conductivity endow FeSiAl sheets with broadband microwave absorption properties. However, due to thick sheet thickness and rigid sheet, the mechanical properties and flexibility of FeSiAl films are poor, greatly influencing its use in flexible electronic devices. In this study, a small amount of water was introduced into the aramid nanofiber (ANF) suspension to recover their intermolecular hydrogen bonds. By controlling the water content, the FeSiAl/ANF nanocomposite films exhibit excellent mechanical properties and flexibility. The results indicate the nanocomposite films show high flexibility and good microwave absorption properties when the ANF mass fraction reaches 60%. The stress and strain of the nanocomposite films can reach 136.88 MPa and 4.72%, respectively, by using universal mechanical tester. When the thickness reaches 3 mm, the effective absorption bandwidth and reflection loss are 2.84 GHz and -46.81 dB tested by vector network analyzer and simulation. Besides, the nanocomposite films can resist folding circles. The easy and green preparation process endows the nanocomposite films with great potential application in the microwave absorption field of flexible electric devices.

Keywords: nanocomposites; flexible films; microwave absorption; FeSiAl; aramid nanofiber