第 49 卷第 6 期　　硅　酸　盐　学　报　　Vol. 49，No. 6
2021 年 6 月　　JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY　　June，2021
http://www.gxyb.cbpt.cnki.net　　DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20200651

FeCo@纳米 SiO_2 的抗氧化及吸波性能

李　晶，朱颖丽，李享成，陈平安，朱伯铨

(武汉科技大学省部共建耐火材料与冶金国家重点实验室，武汉 430081)

摘　要：以正硅酸四乙酯和 FeCo 为原料，采用改进的 Stöber 工艺制备了 FeCo@纳米 SiO_2。结果表明：制备粉体为均匀核壳结构；当 SiO_2 含量为 35%(质量分数)时，样品的最低反射损耗(R_L)在厚度为 2.6 mm 时达到–36.1 dB，有效吸收带宽（R_L<–10 dB）为 3.2 GHz；当 SiO_2 含量为 65%时，样品具有最佳的抗氧化性，升温至 800 ℃，质量增加仅 2%。SiO_2 的包覆不仅优化了 FeCo 的阻抗匹配，有利于电磁波吸收，而且在高温下 SiO_2 可以阻隔 FeCo 和氧气接触，增加其抗氧化性。

关键词：铁钴合金@纳米二氧化硅；电磁波吸收；有效吸收带宽；抗氧化性
中图分类号：TM25　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**0454–5648(2021)06–1135–08
网络出版时间：2021–04–06



Oxidation Resistance and Microwave Absorption of FeCo@Nano-SiO_2

LI Jing, *ZHU Yingli*, *LI Xiangcheng*, *CHEN Ping'an*, *ZHU Boquan*
(The State Key Laboratory of Refractories and Metallurgy, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

Abstract: FeCo@nano-SiO_2 was prepared *via* a modified Stöber method using tetraethyl orthosilicate using FeCo as raw materials. The results show that the powder has a uniform core–shell structure. The reflection loss (R_L) of FeCo@nano-SiO_2 reaches –36.1 dB with the thickness of 2.6 mm, and the effective absorption bandwidth with R_L<–10 dB is 3.2 GHz when the content of SiO_2 is 35% (in mass fraction). The mass of FeCo@nano-SiO_2 only increases 2% from room temperature to 800 °C, and the optimum oxidation resistance can be obtained at the content of SiO_2 of 65%. The SiO_2 shell optimizes the impedance matching of FeCo, further facilitating the electromagnetic wave absorption, and prevents the contact between FeCo and oxygen at a high temperature, thus improving the oxidation resistance.

Keywords: iron-cobalt alloy@nano-silicon dioxide; electromagnetic wave absorption; effective absorption bandwidth; oxidation resistance

FeCo 金属合金因其高饱和磁化强度(M_s)、大磁导率(μ_r)、低矫顽力(H_c)和高的 Curie 温度(T_C)在电磁波吸收方面具有较大的潜力[1]。但是磁性金属粒子在高温环境中容易被氧化而丧失吸波能力，引入氧化物与磁性金属粒子形成核壳结构复合材料是一种抑制磁性金属粒子氧化的常用方法[2]。另外，电磁性金属阻抗匹配性较差，不利于电磁波的入射；氧化物的引入可以改善复合材料的阻抗匹配[3]，从而增强复合材料的电磁波吸收能力。

近年来，研究者对于磁性金属与氧化物形成的核壳结构进行了一系列探索，发现氧化物的包覆改善了磁性金属易氧化，易产生涡流和阻抗匹配性差的缺点。如 Chen 等[4]将 SiO_2 壳层引入，发现 Co_7Fe_3@SiO_2 的抗氧化温度从 290 ℃提高至 420 ℃。Tang 等[5]证实将高电阻率 SiO_2 引入可以有效降低 $FeNi_3$@SiO_2 复合材料的涡流。Wang 等[6]合成了

收稿日期：2020–08–29。　修订日期：2020–10–20。
基金项目：国家自然科学基金(51972242)。
第一作者：李　晶(1997—)，女，硕士研究生。
通信作者：朱颖丽(1993—)，女，博士，讲师。
李享成(1978—)，男，博士，教授。

Received date: 2020–08–29.　**Revised date:** 2020–10–20.
First author: LI Jing (1997–), female, Master candidate.
E-mail: 2771182044@qq.com
Correspondent author: ZHU Yingli (1993–), female, Ph.D., Lecturer;
LI Xiangcheng (1978–), male, Ph.D., Professor.
E-mail: yinglizhu@wust.edu.cn;
lixiangcheng@wust.edu.cn

FeCo@SnO_2@graphene@聚苯胺纳米复合材料，通过改进阻抗匹配提高了材料的吸波性能；Cheng 等[7]合成了 Fe@α-Fe_2O_3，发现利用 Fe_2O_3 的绝缘性可以改善材料的阻抗匹配；Wang 等[8]发现 3 层核壳结构的 Fe/Fe_3O_4@管状碳纳米纤维(TCNFs)@TiO_2 材料，阻抗匹配性要好于 Fe@TCNFs。Ding 等[9]制备了包覆有无定形碳和介孔二氧化硅的 FeCo 合金核壳复合材料，证明了磁性合金核提供磁损耗，在外壳的保护下保持稳定，而碳壳促进介电损耗。

二氧化硅具有电阻率高和抗氧化的优点，是一种弱介电材料，同时也会显著影响复合材料的电磁性能。因此本工作通过一种改进的 Stöber 法制备了核壳 FeCo@纳米 SiO_2 复合材料，并研究了不同纳米 SiO_2 壳层厚度对复合材料电磁波吸收特性的影响。

1 实验

1.1 样品制备

以国药集团化学试剂有限公司购买的 FeCo、正硅酸四乙酯(TEOS)、无水硫酸镁和氨水(28%，质量分数)为原料，所有原料均为分析纯。采用改进 Stöber 法在 FeCo 金属合金表面进行纳米 SiO_2 的外壳包覆。具体步骤如下：将乙醇与去离子水以体积比 4:1 在烧杯中进行混合，同时在高速机械搅拌下加入 FeCo；当 FeCo 均匀分散于混合液，加入氨水调节 pH 值，连续搅拌 30 min 后加入 TEOS，待反应进行 6 h 后停止搅拌，并将溶液转移至 80 ℃水浴锅中。在温度稳定后加入 0.55 g 无水硫酸镁继续搅拌，最后用磁铁将粉体分离并分别用去离子水和酒精数次洗涤后放入 80 ℃真空干燥箱中干燥 4 h。通过调节 TEOS 的含量来控制 SiO_2 外壳的厚度，即改变 FeCo/SiO_2 的理论质量比，制备了 SiO_2 质量分数分别为 0%、35%、50%和 65%的样品，并记为样品 FC、样品 FCS1、样品 FCS2 和样品 FCS3。为了测定 FeCo@纳米 SiO_2 在 500 ℃的吸波性能，将样品 FCS1、样品 FCS2 和样品 FCS3 在 500 ℃空气氛围下煅烧 4 h，得到的样品分别记为样品 FCS1-5、样品 FCS2-5 和样品 FCS3-5。

1.2 性能表征

通过 X 射线衍射仪(XRD，X'Pert MPD PRO，Philips，荷兰)对样品的物相进行鉴定，Cu K_α 射线电压为 40 kV，电流为 40 mA。使用 Al K_α 射线作为激发源，通过 X 射线光电子能谱(XPS，ESCALAB 250XI，Thermo，美国)研究样品的表面组成。利用带有能量色散光谱(EDS)的扫描电子显微镜(SEM，Nova NanoSem 400，Thermo，美国)分析样品形貌；所用样品为块状镶嵌样，即将一定量粉末样品分散在配置好的三乙醇胺与环氧树脂均匀混合液中，干燥后进行切割、磨抛后得到。使用热重分析仪(TG-DSC，STA 449C，Netzsch，德国)对样品的热稳定性进行研究。

用振动样品磁强计(VSM，7404，Lake Shore，美国)在室温下测量样品的静磁曲线。样品在 2~18 GHz 频率范围内的电磁参数通过矢量网络分析仪(VNA，E5071C，Keysight，美国)测量；所用样品为环状样，其由 30% (质量分数)样品均匀分散在石蜡中后，压制成外径为 7.0 mm，内径为 3.0 mm，厚度为(3.0±0.5) mm 的同轴形状。

2 结果与讨论

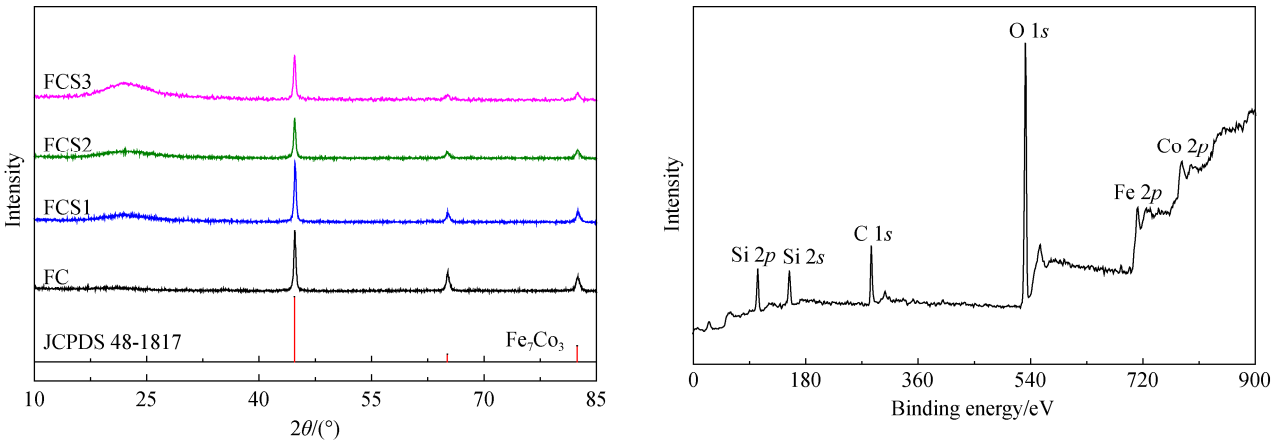
2.1 物相组成

图 1a 为样品 FC、样品 FCS1、样品 FCS2 和样品 FCS3 的物相组成。由图 1a 可见，样品 FC 在 2θ 为 10°~85°范围内出现的约 44.75°、65.11°和 82.39°处的主要衍射峰均来自 Fe_7Co_3 合金(空间群 $Pm\bar{3}m$，JCPDS 48-1817)，从样品 FC 衍射谱中未发现杂质相衍射峰，说明 FeCo 具有较高的纯度。在样品 FCS1、样品 FCS2 和样品 FCS3 的衍射谱中，2θ 约为 44.75°、65.11°和 82.39°的衍射峰与 Fe_7Co_3 合金相衍射峰重合，这说明不同含量 SiO_2 壳层对 Fe_7Co_3 合金的晶体结构无明显影响。此外，在 22.11°附近出现的鼓包说明存在无定形 SiO_2，从样品 FCS1 至样品 FCS3，鼓包越来越明显，这可能与引入的无定形 SiO_2 含量增加有关。

图 1b 为样品 FCS1 的表面组成，研究了 Fe、Co、Si 和 O 的元素状态。由图 1b 可见，在约 103、154、284、532、710 eV 和 781 eV 处的峰分别对应于 Si 2*p*、Si 2*s*、C 1*s*、O 1*s*、Fe 2*p* 和 Co 2*p* 电子[10]。图 1b 中出现在 103 eV 处的 Si 2*p* 峰与出现在 532 eV 处的 O 1*s* 峰，同属于 SiO_2[11]，说明 SiO_2 存在于复合材料中。

图 2a、图 2b 和图 2c 分别为样品 FCS1、样品 FCS2 和样品 FCS3 的扫描电子显微镜照片。图 2 中灰色区域 1 为环氧树脂，白色区域 2 为 FeCo，FeCo 为球状颗粒，透明区域 3 表明存在 SiO_2；绿色区域 4、黄色区域 5 和紫色区域 6 分别是 Fe、Co 和 Si 元素的 EDS 测试结果。由图 2 可见，Fe 和 Co 元素作为核出现在内部，而 Si 作为壳层出现在 Fe 和 Co

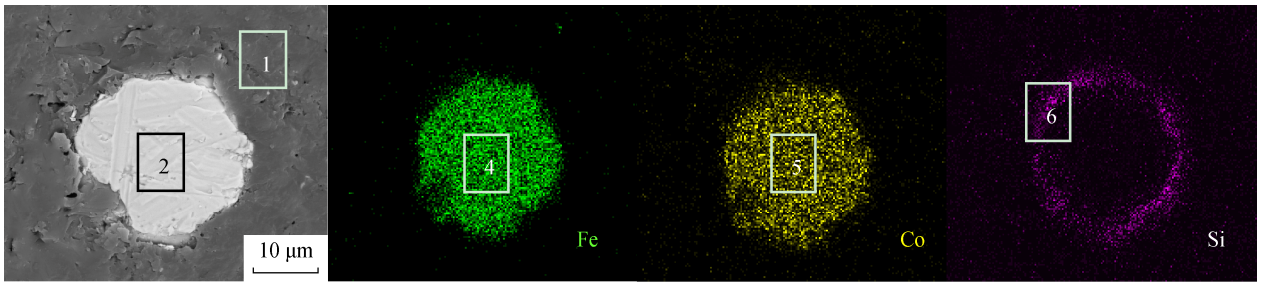
元素的外层，这证明 FeCo 和 SiO_2 形成的结构为核壳结构，且 FeCo 的球状结构仍然存在，SiO_2 并未对其造成影响。从样品 FCS1 到样品 FCS3，SiO_2 的含量不断增加。



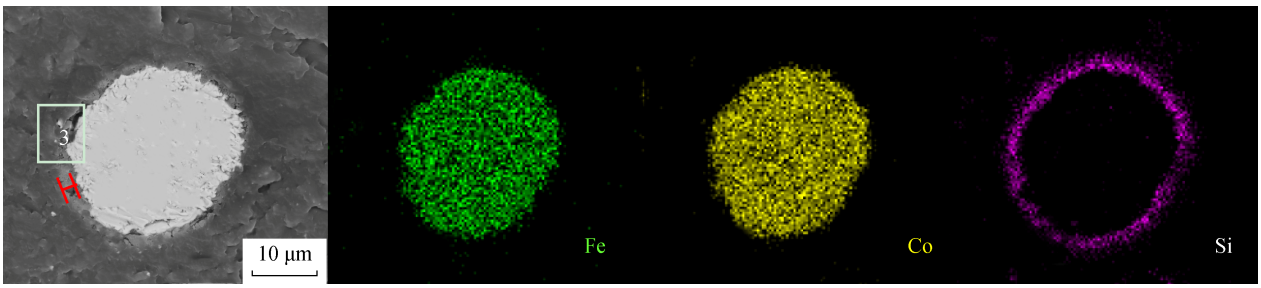
(a) XRD spectra　　(b) Survey spectrum of FCS1 sample

图 1　不同 SiO_2 含量的样品的 XRD 谱和样品 FCS1 的 XPS 谱

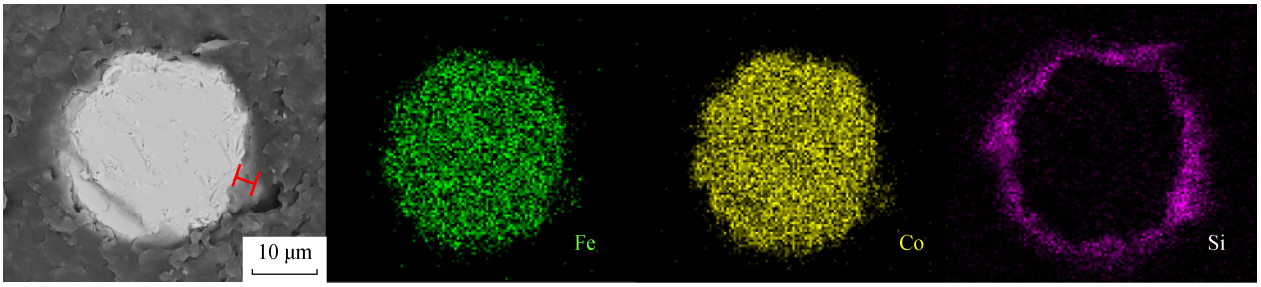
Fig. 1　XRD spectra of samples with different content of SiO_2 and XPS spectrum of FCS1



(a) FCS1 sample



(b) FCS2 sample



(c) FCS3 sample

图 2　不同 SiO_2 含量的样品的 SEM 照片

Fig. 2　SEM images of samples with different content of SiO_2

2.2　抗氧化性能

针对材料的热稳定性进行研究，在空气氛围下以 10 ℃/min 的速率升温至 800 ℃的热重曲线如图 3 所示。样品 FCS1、样品 FCS2 和样品 FCS3

在初始升温阶段，吸附在 SiO_2 表面的羟基脱落[12]，样品的质量略微有所降低。随温度升高，在 250 ℃时未包覆壳层的样品 FC 质量开始增加，而包覆有壳层的样品 FCS1、样品 FCS2 和样品 FCS3 起始质量增加温度分别为 338、394 ℃和 446 ℃，即开始氧化的温度分别增加了 88、144 ℃和 196 ℃，且在升温至 800 ℃过程中质量增加速率缓慢，样品 FCS3 的质量从 100%增至 102%，质量增加仅为 2%，抗氧化性能较好，这是由于 SiO_2 壳层在高温下阻隔了 FeCo 与空气进一步接触，改善了 FeCo 的抗氧化性能，且随着 SiO_2 含量的增加，抗氧化性能提高。

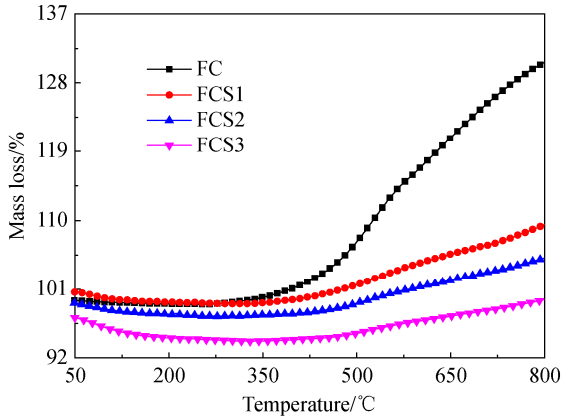


图 3 不同 SiO_2 含量的样品的热重曲线

Fig. 3 Thermogravimetric curves of samples with different content of SiO_2

2.3 静磁性能

图 4 为样品 FC、样品 FCS1、样品 FCS2 和样品 FCS3 在室温下的磁滞回线，插图为不同样品的饱和磁化强度(M_s)和矫顽力(H_c)。图 4 为磁化强度(M)–磁场强度(H)曲线。由图 4 可见，随着纳米 SiO_2 含量的增加，样品 FC、样品 FCS1、样品 FCS2 和样品 FCS3 的 M_s 逐渐减小，从 221.9 emu/g 分别降低到 114.8、81.4 emu/g 和 50.4 emu/g，M_s 与原子磁矩的大小以及每单位体积中此类原子的数量有关[13]，因此 M_s 的降低是由于引入了不具有磁性的 SiO_2 壳层。文献[14]表明：H_c 与材料磁各向异性有关，而样品 FC、样品 FCS1、样品 FCS2 和样品 FCS3 所有样品中的磁性成分都是相同的，因此，所有样品的 H_c 变化很小。

2.4 电磁性能

衡量吸波性能的重要参数是样品的复介电常数($\varepsilon_r=\varepsilon'-j\varepsilon''$)和复磁导率($\mu_r=\mu'-j\mu''$)[15]，其中实部 ε'和 μ' 分别表示其储存电磁波交变电场能量和磁场能量的能力，虚部 ε''和 μ''则分别代表其损耗电磁能的能力，即将电磁能转化为热能或机械能损失掉。

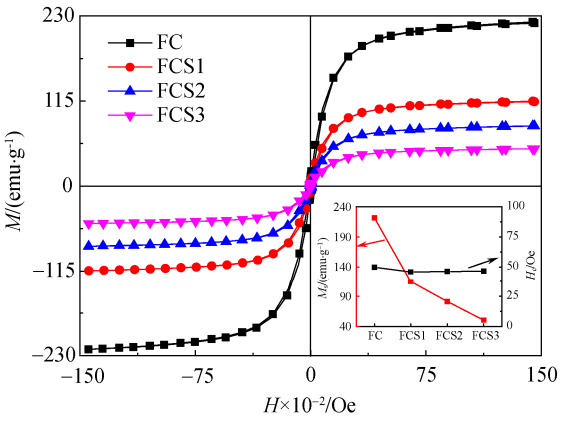


图 4 不同 SiO_2 含量的样品的磁滞回线

Fig. 4 Hysteresis loops of samples with different content of SiO_2

图 5a 和图 5b 为样品 FC、样品 FCS1、样品 FCS2 和样品 FCS3 在 2~18 GHz 频率范围内的介电常数实部(ε')和虚部(ε'')。当频率增加至 11 GHz 时，样品 FC 的 ε'从 19.4 降至 11.0，之后趋于稳定。ε'的减小遵循 Debye 理论，随着外加电磁场频率的增加，电偶极子产生极化弛豫而滞后于外加电场[16]。样品 FCS1、样品 FCS2 和样品 FCS3 的 ε'在 2 GHz 时分别为 8.9，6.5 和 4.7，之后随频率的增加基本没有波动。与样品 FC 相比，样品 FCS1、样品 FCS2、样品 FCS3 的 ε'均减小，这是由于引入了低介电常数的 SiO_2 壳层，壳层越厚，样品的 ε'越低。

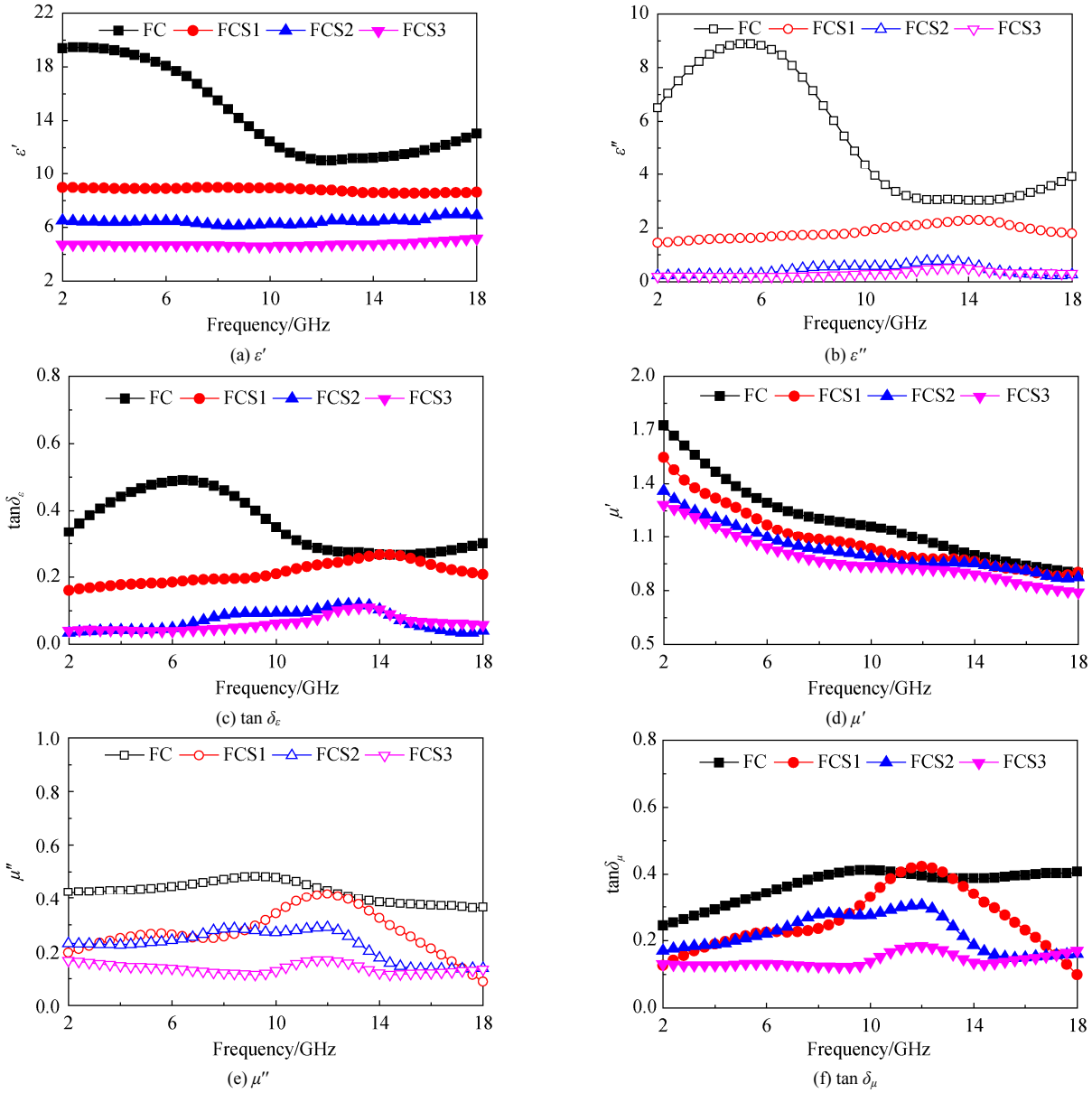
样品 FC 的 ε''随频率增加至 6 GHz 左右达到最大值 9.0，之后逐渐下降；样品 FCS1、样品 FCS2 和样品 FCS3 则均在 10~16 GHz 出现峰值，且随着纳米 SiO_2 含量的增加，ε''越来越小。样品 FC 在 6 GHz 出现的峰可能是由于电导损耗造成的；样品 FCS1、样品 FCS2 和样品 FCS3 在 10~16 GHz 出现的共振峰主要来自于界面极化[17]，电磁波射入后，FeCo 与 SiO_2 的直接接触使电荷在界面处聚集[11]，聚集的偶极子在电磁场中旋转反射产生共振，增加了界面极化损耗[18]。综上所述，SiO_2 加入后增强了界面极化作用。同时计算了样品的介电损耗因子($\tan\delta_\varepsilon=\varepsilon''/\varepsilon'$)，如图 5c 所示。样品 FC 在 0~10 GHz 内 $\tan\delta_\varepsilon$ 达到最大值 0.49，样品 FCS1、样品 FCS2 和样品 FCS3 在 10~16 GHz 内最大分别为 0.27、0.13 和 0.11。

图 5d 和图 5e 为样品 FC、样品 FCS1、样品 FCS2 和样品 FCS3 在 2~18 GHz 频率范围内的磁导率实部

(μ')和虚部(μ'')。样品 FC、样品 FCS1、样品 FCS2 和样品 FCS3 的 μ'在 2~18 GHz 频率范围内总体均呈下降趋势，随着纳 SiO_2 含量的增加，样品 FCS1、样品 FCS2 和样品 FCS3 的 μ'都较样品 FC 略有降低；在 2 GHz，样品 FC、样品 FCS1、样品 FCS2 和样品 FCS3 的 μ'分别为为 1.72、1.55、1.39 和 1.30，这是因为引入的 SiO_2 壳层不具有磁性，SiO_2 含量越高，μ'越低。样品 FC、样品 FCS1、样品 FCS2 和样品 FCS3 的 μ''在 8~14 GHz 频率范围内均出现 1 个较宽的峰，揭示了自然共振的存在，这是由于 FeCo 粒子具有铁磁性且产生了铁磁共振[19]。随着纳米 SiO_2 含量的增加，μ''越来越小，这一现象可以用 μ''与 M_s 的关系来解释[20]：

$$\mu'' = \frac{M_s}{3\mu_0 H_A \alpha} \tag{1}$$

式中：H_A 为各向异性场强；α 为 Gilbert 阻尼系数。由图 4 可见，样品 FCS1、样品 FCS2 和样品 FCS3 的 M_s 均低于样品 FC，μ''的降低归因于 M_s 的减小[7]。同时计算了样品的磁损耗因子($\tan\delta_\mu=\mu''/\mu'$)，如图 5f 所示。样品 FC、样品 FCS1、样品 FCS2 和样品 FCS3 的 $\tan\delta_\mu$ 均在 10~16 GHz 内达到最大，分别为 0.41、0.41、0.29 和 0.17，说明自然共振发挥作用。



ε' is real part of the complex dielectric permittivity; ε'' is imaginary part of the complex dielectric permittivity; tan δ_ε is dielectric loss factor; μ' *is* real part of the complex permeability; μ'' is imaginary part of the complex permeability; tan δ_μ is magnetic loss factor.

图 5　不同 SiO_2 含量的样品的电磁参数和介电、磁损耗因子

Fig. 5　Electromagnetic parameters and loss factors of samples with different content of SiO_2

2.5 吸波性能

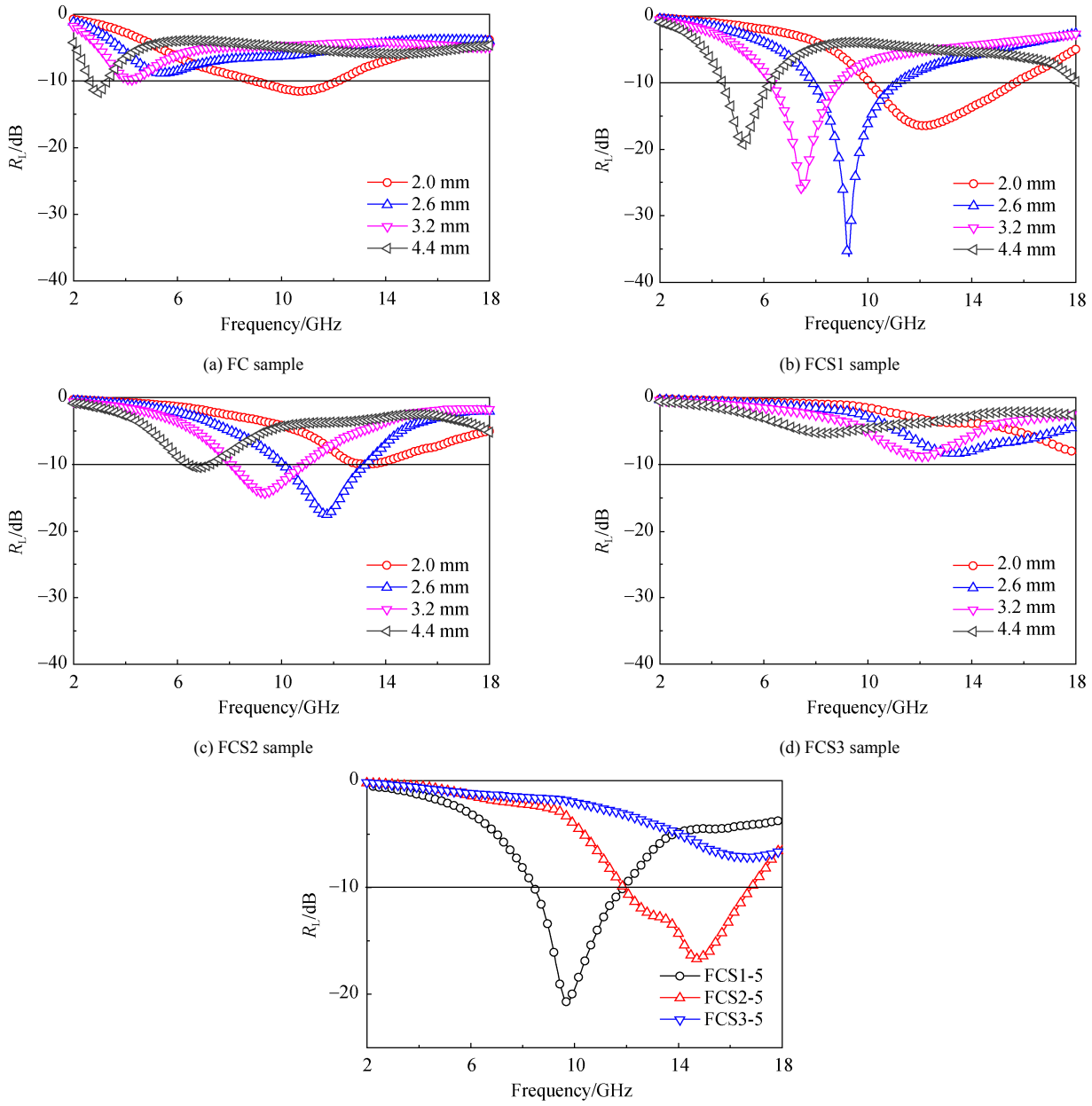
为了进一步分析样品的电磁波吸收能力，利用传输线理论方程[21]计算了材料反射损耗 R_L(dB)：

$$R_L = 20\lg\left|\frac{Z_{in}-1}{Z_{in}+1}\right| \quad (2)$$

$$Z_{in} = Z_0\sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}}\tan h\left[j\left(\frac{2\pi}{c}\right)\sqrt{\mu_r\varepsilon_r}fd\right] \quad (3)$$

式中：Z_{in} 为电磁波吸收层的输入特性阻抗；Z_0 为自由空间阻抗，即 377 Ω；ε_r 和 μ_r 分别为样品的复介电常数和复磁导率；c 为真空中的光速；f 为频率；d 是吸收层的厚度。

图 6 为不同厚度下样品的 R_L 值与频率的关系。随着厚度的增加，样品 FC、样品 FCS1、样品 FCS2 和样品 FCS3 的最小 R_L 值明显向低频区移动。相较于样品 FC，纳米 SiO_2 含量越高，同一厚度下的最小 R_L 值越趋向于高频。如图 6a 所示，样品 FC 的最小 R_L 值在 3.0 GHz，4.4 mm 时为–11.8 dB，有效吸收带宽(R_L 值低于–10 dB)为 0.7 GHz(2.6~3.3 GHz)。与样品 FC 相比，样品 FCS1 的微波吸收性能得到了明显提高，在 16.6 GH，2.6 mm 处最小 R_L 值达–36.1 dB，



(a) FC sample (b) FCS1 sample

(c) FCS2 sample (d) FCS3 sample

(e) FCS1-5, FCS2-5 and FCS3-5 samples at 2.6 mm

图 6 不同 SiO_2 含量的样品在不同厚度下的反射损耗曲线

Fig. 6 Reflection loss curves of samples with different content of SiO_2 at different thickness

同时有效吸收带宽为 3.2 GHz(7.9~11.1 GHz)，如图 6b 所示。随着纳米 SiO_2 含量的增加，样品 FCS2 的最小 R_L 值在 11.8 GHz，2.6 mm 处为–17.5 dB，有效吸收带宽达 3.2 GHz(10.0~13.2 GHz)，如图 6c 所示；而样品 FCS3 最小 R_L 值在 3.2 mm 时只有–8.8 dB，如图 6d 所示。为了研究 SiO_2 壳在高温下电磁波吸收性能的影响，测量了样品 FCS1-5，样品 FCS2-5 和样品 FCS3-5 的反射损耗，如图 6e 所示。在 2.6 mm 厚度下，样品 FCS1-5 的最小 R_L 值在 9.6 GHz 时为–20.7 dB，有效吸收带宽为 3.4 GHz(8.4~11.8 GHz)；样品 FCS2-5 的最小 R_L 值在 14.7 GHz 处为–16.7 dB，有效吸收带宽达 4.9 GHz(11.9~16.8 GHz)；而样品 FCS3-5 最小 R_L 值只有–7.1 dB。与样品 FCS1、样品 FCS2 和样品 FCS3 相比，金属核在 500 ℃的轻微氧化导致 FeCo@纳米 SiO_2 的反射损耗有一定程度的下降，但总体看来，煅烧后的 FeCo@纳米 SiO_2 样品仍然保持较好的电磁波吸收性能。

图 7 为 R_L 相对于频率和厚度的 3D 投影图。样品 FC 在 1.0~5.0 mm 内的有效吸收带宽达 9.8 GHz (2.8~3.8 GHz，9.2~18.0 GHz)(图 7a)；样品 FCS1 的有效吸收带宽高达 14 GHz(4.0~18.0 GHz)(图 7b)；样品 FCS2 的有效吸收带宽有 8.1 GHz(6.5~14.6 GHz)(图 7c)；样品 FCS3 的有效吸收带宽为 0(图 7d)。整体看来，引入纳米 SiO_2 后材料的吸波性能与纳米 SiO_2 含量有关，在一定 SiO_2 含量下表现出优良的吸波性能(样品 FCS1)，当纳米 SiO_2 含量过高时，这种优良的性能逐渐减弱(样品 FCS2)，甚至样品 FCS3 的性能低于不含 SiO_2 的样品 FC。显然，适量的 SiO_2 使 FeCo@纳米 SiO_2 的电磁波吸收性能明显提高。

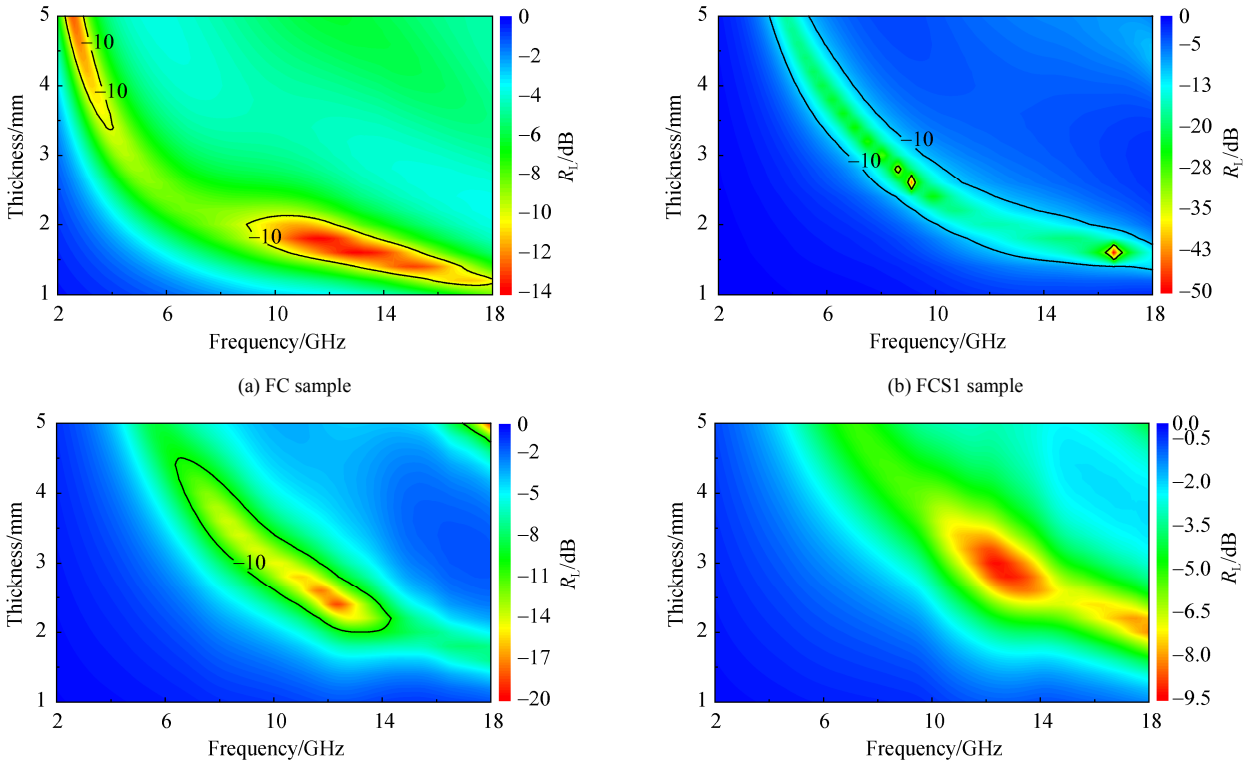


图 7　不同含量 SiO_2 样品在不同厚度下的 3D 投影

Fig. 7　3D projection diagrams of samples with different content of SiO_2 at different thickness

FeCo@纳米 SiO_2 电磁波吸收原理如图 8 所示，入射电磁波进入复合材料后被损耗吸收，吸收机理包括 3 方面：电导损耗、介电极化损耗和磁损耗。1) 引入纳米 SiO_2 增加了材料的电阻率，降低了电导率，电导损耗减小；2) SiO_2 壳有利于储存空间电荷，与 FeCo 核之间产生界面极化；且纳米 SiO_2 的引入会产生更多缺陷，从而产生更多的缺陷偶极极化，介电损耗增加；3) FeCo 金属核产生的磁损耗包括涡流损耗和共振损耗，SiO_2 减弱了材料的涡流损耗。另外，FeCo@纳米 SiO_2 的核壳结构改善了 FeCo 的阻抗匹配，从而获得优异的电磁波吸收性能。

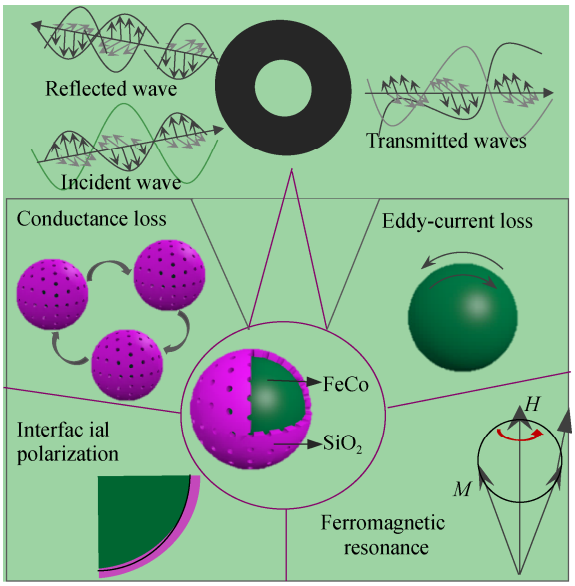


图 8 电磁波吸收原理

Fig. 8 Absorption principle of electromagnetic wave

3 结论

通过改进的 Stöber 法制备了 FeCo@纳米 SiO_2。当 SiO_2 质量分数为 35%时，在厚度 2.6 mm 的最小 R_L 值为–36.1 dB，有效吸收宽带(R_L<–10 dB)为 3.2 GHz，500 ℃处理后样品的 R_L 值仍能达到 –20.7 dB；当 SiO_2 质量分数为 65%时，样品在温度上升至 800 ℃的过程中，质量增加仅 2%。FeCo@纳米 SiO_2 表现出了优异的电磁波吸收特性和抗氧化性，这是因为引入的纳米 SiO_2 壳层不仅改善了材料的阻抗匹配，还减少了 FeCo 金属核在高温下与空气的接触。

参考文献:

[1] YANG F, CHEN H, LIU D, et al. The microstructure and magnetic properties of FeCo@SiO_2 core–shell nanoparticles synthesized by using a solution method[J]. J Alloy Compd, 2017, 728: 1153–1156.

[2] WEI Y, YUE J, TANG X Z, et al. Enhanced magnetic and microwave absorption properties of FeCo-SiO_2 nanogranular film functionalized carbon fibers fabricated with the radio frequency magnetron method[J]. Appl Surf Sci, 2018, 428: 296–303.

[3] LIANG C, LIU C, WANG H, et al. SiC–Fe_3O_4 dielectric–magnetic hybrid nanowires: controllable fabrication, characterization and electromagnetic wave absorption[J]. J Mater Chem A, 2014, 2(39): 16397–16402.

[4] CHEN N, JIANG J T, XU C Y, et al. Co_7Fe_3 and Co_7Fe_3@SiO_2 nanospheres with tunable diameters for high-performance electromagnetic wave absorption[J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2017, 9(26): 21933–21941.

[5] TANG N J, ZHONG W, JIANG H Y, et al. Complex permeability of $FeNi_3$/SiO_2 core–shell nanoparticles[J]. Solid State Commun, 2004, 132(2): 71–74.

[6] WANG Y, ZHANG W, LUO C, et al. Superparamagnetic FeCo@SnO_2 nanoparticles on graphene-polyaniline: Synthesis and enhanced electromagnetic wave absorption properties[J]. Ceram Int, 2016, 42(10): 12496–12502.

[7] CHENG Y, GUO Y H, ZHANG Z Y, et al. Achieving the broader frequency electromagnetic absorber by development of magnetic core-shell composite with tunable shell/core sizes[J]. Appl Surf Sci, 2018, 434: 763–770.

[8] WANG J Q, CUI Y H, WU F, et al. Core–shell structured Fe/Fe_3O_4@TCNFs@TiO_2 magnetic hybrid nanofibers: Preparation and electromagnetic parameters regulation for enhanced microwave absorption[J]. Carbon, 2020, 165: 275–285.

[9] DING L, HUANG Y, LIU X, et al. Broadband and multilayer core-shell FeCo@C@mSiO_2 nanoparticles for microwave absorption[J]. J Alloy Compd, 2020, 812: 152168.

[10] WANG Z, ANG J, ZHANG B, et al. FeCo/FeCoNi/N-doped carbon nanotubes grafted polyhedron-derived hybrid fibers as bifunctional oxygen electrocatalysts for durable rechargeable zinc–air battery[J]. Appl Catal B-Environ, 2019, 254: 26–36.

[11] JAVID M, ZHOU Y, WANG D, et al. Strong microwave absorption of Fe@SiO_2 nanocapsules fabricated by one-step high energy plasma[J]. J Phys Chem Solids, 2019, 129: 242–251.

[12] 高月英, 顾惕人. 无定形二氧化硅的表面结构[J]. 石油化工, 1984, 13(3): 205–212.
GAO Yueying, GU Tiren. Pet Technol (in Chinese), 1984, 13(3): 205–212.

[13] KUANG D, HOU L, WANG S, et al. Large-scale synthesis and outstanding microwave absorption properties of carbon nanotubes coated by extremely small FeCo-C core–shell nanoparticles[J]. Carbon, 2019, 153: 52–61.

[14] CHU W L, TIAN C H, WANG Y, et al. Performance *vs* convenience of magnetic carbon-metal nanocomposites: A low-cost and facile citrate-derived strategy for FeCo alloy/carbon composites with high-performance microwave absorption[J].Comments Inorg Chem, 2017, 37(6): 301–326.

[15] 武志红, 张路平, 郑海康, 等. $MoSi_2$对C_f/SiC/Ni复合材料微观结构及吸波性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(4): 525–532.
WU Zhihong, ZHANG Luping, ZHEN Haikang, et al. J Chin Ceram Soc, 2020, 48(4): 525–532.

[16] UDDIN W, REHMAN S U, ASLAM M A, et al. Enhanced microwave absorption from the magnetic-dielectric interface: A hybrid rGO@Ni-doped-MoS_2[J]. Mater Res Bull, 2020, 130: 110943.

[17] ZHU Y L, LI X C, CHEN P A, et al. Synthesis, oxidation resistance and microwave absorbing properties of FeCo-based heterostructures[J]. Ceram Int, 2020, 45(15): 23985–23996.

[18] KUANG B Y, DOU Y K, WANG Z H, et al. Enhanced microwave absorption properties of Co-doped SiC at elevated temperature[J]. Appl Surf Sci, 2018, 445: 383–390.

[19] GREEN M, LIU Z Q, XIANG P, et al. Doped, conductive SiO_2 nanoparticles for large microwave absorption[J]. Light-Sci Appl, 2018, 7(1): 87.

[20] FENG J T, WANG Y C, HOU Y H, et al. Tunable design of yolk–shell $ZnFe_2O_4$@RGO@TiO_2 microspheres for enhanced high-frequency microwave absorption[J]. Inorg Chem Front, 2017, 4: 935–945.

[21] 郑海康, 武志红, 张路平, 等. 念珠状碳化硅/二氧化硅纳米线的制备及电磁波吸收性能[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(1): 8–14.
ZHENG Haikang, WU Zhihong, ZHANG Luping, et al. J Chin Ceram Soc, 2020, 48(1): 8–14.