

# 羰基铁抗氧化改性对雷达隐身吸波性能的影响

史胜, 赵雨航, 汪梓迅, 刘磊春, 陈文旗,  
孙京丽, 陈一, 袁勇\*

(上海航天精密机械研究所, 上海 201600)

**摘要:** **目的** 改善片状羰基铁 (Flaky Carbonyl Iron, FCI) 在 200 °C 环境下的抗氧化性, 保证其电磁性能和对雷达电磁波的吸收性能。**方法** 采用溶胶-凝胶法, 使用正硅酸乙酯 (Tetraethyl Orthosilicate, TEOS) 对 FCI 进行 SiO<sub>2</sub> 包覆改性。通过矢量网络分析仪对 FCI 包覆改性前后的复电磁参数进行表征, 对比了 TEOS 添加量对 SiO<sub>2</sub> 包覆改性 FCI 电磁性能的影响, 分析了在 200 °C 下 SiO<sub>2</sub> 包覆层对 FCI 雷达隐身吸波性能的影响; 采用扫描电镜 (SEM)、透射电镜 (TEM)、傅里叶变换红外光谱仪和 X 射线荧光光谱仪对 FCI 包覆改性前后的元素组成和微观结构进行了表征和分析。**结果** 复电磁参数分析结果表明, 当 TEOS 添加量为 10 mL 时, SiO<sub>2</sub> 包覆改性 FCI 的电磁性能最优。由电镜微观结构和红外谱图分析可知, FCI 表面成功包覆一层均匀、致密的 SiO<sub>2</sub>, 其厚度在 40~45 nm。反射损耗模拟结果表明, SiO<sub>2</sub> 包覆层的存在使 FCI 在 200 °C 环境下保持了良好的雷达电磁波吸波效果, 在 6.3~14.6 GHz 频带宽度下反射损耗 (Reflective Loss, RL) ≤ -5 dB。**结论** TEOS 对 FCI 的表面改性能够改善其在 200 °C 环境下的抗氧化性, 保证其雷达隐身吸波性能, 在中高温隐身领域具有良好的应用前景。

**关键词:** 羰基铁; TEOS; 抗氧化性; 雷达隐身吸波

**中图分类号:** TB34 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3660(2025)10-0266-09

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2025.10.022

## Effect of Carbonyl Iron Antioxidant Modification on Radar Stealth Wave-absorbing Properties

SHI Sheng, ZHAO Yuhang, WANG Zixun, LIU Leichun, CHEN Wenqi,  
SUN Jingli, CHEN Yi, YUAN Yong\*

(Shanghai Spaceflight Precision Machinery Institute, Shanghai 201600, China)

**ABSTRACT:** This is a surface modification technology that uniformly coats a layer of inorganic oxide on the surface of flaky carbonyl iron (FCI) through the sol-gel method, improving its high-temperature oxidation resistance without reducing its electromagnetic and wave-absorbing properties. Due to its excellent magnetic loss performance, carbonyl iron is often used as a filler in radar stealth wave-absorbing materials. However, at 200 °C, it easily reacts with oxygen and moisture in the air to form non-magnetic or weakly magnetic oxides, resulting in a significant decline in magnetic loss capacity and wave-absorbing properties. The work aims to study the effect of SiO<sub>2</sub>-coated modified carbonyl iron on its high-temperature oxidation resistance and wave-absorbing properties.

收稿日期: 2025-02-26; 修订日期: 2025-04-14

Received: 2025-02-26; Revised: 2025-04-14

引文格式: 史胜, 赵雨航, 汪梓迅, 等. 羰基铁抗氧化改性对雷达隐身吸波性能的影响[J]. 表面技术, 2025, 54(10): 266-274.

SHI Sheng, ZHAO Yuhang, WANG Zixun, et al. Effect of Carbonyl Iron Antioxidant Modification on Radar Stealth Wave-absorbing Properties [J]. Surface Technology, 2025, 54(10): 266-274.

\*通信作者 (Corresponding author)

Four clean flasks were taken, and 368 mL of ethanol, 92 mL of deionized water, 5.3 mL of ammonia water and 2 g of flaky carbonyl iron were added to each flask. After ultrasonic dispersion for 15 minutes, different amounts (5, 10, 15 and 20 mL) of tetraethyl orthosilicate (TEOS) were dropped into the flasks respectively. At room temperature, the reaction solution was stirred uniformly for 30 minutes. Then, the carbonyl iron was adsorbed on the inner wall of the flask with a magnet, and the mixed reaction solution was filtered out. The product was washed three times with anhydrous ethanol and dried to obtain SiO<sub>2</sub>-coated carbonyl iron (denoted as FCI@SiO<sub>2</sub>). The elemental composition and microstructure of FCI before and after coating modification were characterized and analyzed by scanning electron microscopy (SEM), transmission electron microscopy (TEM), Fourier transform infrared spectrometer and X-ray fluorescence spectrometer. The complex electromagnetic parameters of FCI before and after coating modification were characterized by vector network analyzer. The effect of TEOS addition amount on the electromagnetic properties and wave-absorbing properties of FCI was compared. The effect of SiO<sub>2</sub> coating layer on the electromagnetic properties and stealth wave-absorbing properties of FCI at 200 °C was also compared.

The results of electromagnetic parameter analysis showed that when the addition amount of TEOS was 10 mL, the electromagnetic performance of FCI was optimal. The analysis of electron microscope microstructure and infrared spectrum indicated that a uniform and dense SiO<sub>2</sub> layer was successfully coated on the surface of FCI, with a thickness of 40-45 nm. The simulation results of reflection loss showed that the existence of the SiO<sub>2</sub> coating layer could significantly improve the oxidation resistance and radar electromagnetic wave-absorbing effect of FCI at 200 °C. The prepared absorbing material (with a mass fraction of FCI@SiO<sub>2</sub> of 40%) had a minimum reflection loss (RL) of -10.4 dB ( $f=10.59$  GHz), and within the frequency band of 6.3-14.6 GHz, it achieved radar stealth wave-absorbing properties with a reflection loss  $\leq -5$  dB. This is a technology for surface coating modification of carbonyl iron, which hinders its oxidation reaction with oxygen in the air by generating a SiO<sub>2</sub> layer on its surface, avoids the loss of magnetism effect in a high-temperature environment of 200 °C, and ensures the play of radar stealth wave absorption.

**KEY WORDS:** carbonyl iron; TEOS; oxidation resistance; radar stealth wave absorption

雷达隐身技术是现代化战争中的关键技术,通过对电磁波信号的吸收和屏蔽,可极大降低军事目标被探测的概率,能够显著提高飞行器的生存和突防能力,受到世界主要军事强国的高度重视<sup>[1-2]</sup>。飞行器的隐身主要有 2 种方法,一是外形隐身,即通过飞行器外形设计减少雷达散射截面积;二是应用隐身材料,即通过隐身材料实现对雷达电磁波信号的吸收。相对来说,降低飞行器的雷达散射截面积对其外观、机动等综合性能提出更高的要求,由于隐身材料适用装备范围广、局限性小,因此隐身材料的开发是发展雷达隐身技术的关键,随着反隐身技术和高超声速飞行技术的发展,对新一代飞行器的隐身提出了耐高温、较宽频的苛刻要求<sup>[3]</sup>。

从电磁波损耗机理的角度分析,在介电损耗(如碳材料、陶瓷材料等)机制和磁损耗(如铁氧体、羰基铁、氧化物等)两类吸波材料中<sup>[4]</sup>,羰基铁(Carbonyl Iron, CI)由于饱和磁化强度高、居里温度高(居里温度为 775 °C,即高温环境下不易失磁)、导电性适中的特点,同时具有磁损耗和介电损耗机制,是现阶段广泛应用的吸收剂材料,同时也能满足未来耐高温和宽频吸波材料的开发需要。但是由于羰基铁具有较大的比表面积和较高的反应活性,易与空气中氧气、水蒸气等气体发生反应,特别是在 200 °C 环境下容易高温氧化成氧化物,导致本体结构发生改变,致使

磁导率等特性大幅降低甚至消失,无法正常发挥电磁波吸收性能<sup>[5]</sup>。因此,为充分发挥羰基铁材料在高温环境下的雷达隐身吸波作用,提高其高温环境下的抗氧化性能是至关重要的。

当前,研究者们为提高羰基铁的耐腐蚀和耐高温氧化性能,主要通过物理或化学手段对羰基铁进行表面包覆改性<sup>[6-7]</sup>,包覆层材料主要有金属材料(如 Co<sup>[8]</sup>、Ag<sup>[9]</sup>等)和氧化物材料(如 SiO<sub>2</sub><sup>[10-12]</sup>、ZnO<sup>[13-14]</sup>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>[15]</sup>等)两大类。曹晓国等<sup>[16]</sup>采用化学渡法在羰基铁表面沉积一层金属银,研究发现均匀的银层能够使羰基铁在高温环境下的抗氧化性明显提升,利用金属银对电磁波的反射性和羰基铁对电磁的吸收性,制备的复合材料在 100 kHz~1.5 GHz 低频下对电磁波有较好的屏蔽效应;郭飞等<sup>[17]</sup>采用水热法制备了氧化锌包覆羰基铁核壳复合粒子,研究发现氧化锌的纳米棒构型可有效将羰基铁与空气隔绝,使其抗氧化性显著改善。在各类包覆层材料中, SiO<sub>2</sub> 因其透波性、绝热性、热稳定性和低成本特点受到广泛关注,以其作为包覆层能够提升羰基铁的耐高温氧化性<sup>[18]</sup>。但当前大多数抗氧化研究只针对 SiO<sub>2</sub> 包覆改性羰基铁开展热失重分析,没有直观对比高温环境下 SiO<sub>2</sub> 包覆改性羰基铁前后对电磁波的吸收能力,同时当前增加 SiO<sub>2</sub> 包覆层厚度的方式主要是延长包覆时间或进行多次包覆,导致改性时间周期长,限制了实际工程大规模

推广应用。

本实验采用正硅酸乙酯 (Tetraethyl Orthosilicate, TEOS) 为硅源, 对片状羰基铁进行表面包覆改性, 探究了 TEOS 添加量对包覆改性后羰基铁电磁性能和雷达吸波性能的影响, 并对其表面元素和微观结构进行表征分析, 对比分析了  $\text{SiO}_2$  包覆羰基铁前后在 200 °C 环境下的雷达吸波性能。

## 1 试验

### 1.1 $\text{SiO}_2$ 包覆改性羰基铁

片状羰基铁 (FCI) 购于中国航发北京航空材料研究院, 颗粒尺寸为 2~8  $\mu\text{m}$ , 厚度为 0.1~0.6  $\mu\text{m}$ ; 正硅酸乙酯、无水乙醇和氨水均购于上海阿拉丁生化科技股份有限公司, 纯度为化学纯; 去离子水为实验室自制。

羰基铁表面包覆改性的步骤如下: 1) 取 4 个洁净的烧瓶, 烧瓶中均加入 368 mL 乙醇、92 mL 去离子水和 5.3 mL 氨水, 称取 2 g 片状羰基铁加入其中, 在超声作用下均匀分散 15 min; 2) 分别向 4 个烧瓶中滴加 5、10、15 和 20 mL 的 TEOS 进行包覆改性, 样品编号分别记为 Y1、Y2、Y3、Y4, 未包覆改性的空白样记为 Y0; 3) 在室温环境下, 均匀搅拌反应 30 min 后, 使用吸铁石将羰基铁吸附在烧瓶内壁, 滤出混合反应液, 再使用无水乙醇反复洗涤 3 次, 干燥后获得  $\text{SiO}_2$  包覆的羰基铁, 记为  $\text{FCI}@\text{SiO}_2$ 。

### 1.2 性能测试和表征

1) 使用矢量网络分析仪, 采用同轴传输法对  $\text{SiO}_2$  包覆改性前后的羰基铁进行电磁性能测试。测试时羰基铁 (或  $\text{SiO}_2$  包覆改性羰基铁) 与石蜡质量比为 4 : 6, 测试频率为 2~18 GHz, 测试结果为粉体的复电磁参数值。

2) 采用扫描电镜和透射电镜对包覆改性前后羰基铁的微观结构进行分析。

3) 采用红外光谱仪和 X 射线荧光光谱仪对包覆改性前后的羰基铁表面组成进行分析, 红外光谱波数测试区间为 400~4 000  $\text{cm}^{-1}$ 。

4) 为验证  $\text{SiO}_2$  包覆改性前后的羰基铁在高温环境下的抗氧化性和雷达吸波性能, 将其放置在 200 °C 鼓风干燥箱中保持 30 min, 样品记为  $\text{FCI}@\text{SiO}_2/200\text{ °C}$ , 其他环境温度以此类推。对高温环境处理后的羰基铁体测试电磁性能, 测试方法与前述相同。根据测试的复电磁参数, 代入传输线理论的反射损耗公式, 可计算出 40% 质量分数下该粉体材料不同厚度的雷达反射损耗随电场频率的变化曲线, 即雷达隐身吸波性能, 可以据此判断  $\text{SiO}_2$  包覆改性羰基铁体的抗高温氧化性。

## 2 结果及分析

### 2.1 TEOS 量对羰基铁电磁性能和吸波性能的影响

图 1 为样品 Y0~Y4 的复电磁参数、介电损耗角正切 ( $\tan \delta_e$ ) 和磁损耗角正切 ( $\tan \delta_\mu$ ) 随频率变化的情况, 由图 1a、c、d、f 可知, 随着 TEOS 量的增加,  $\text{FCI}@\text{SiO}_2$  的复介电常数实部 ( $\epsilon'$ )、复磁导率实部 ( $\mu'$ )、复磁导率虚部 ( $\mu''$ ) 和磁损耗角正切值整体表现出先增加后降低的变化趋势。这是由于随着 TEOS 添加量增加, 相同改性时间下羰基铁表面  $\text{SiO}_2$  包覆层厚度逐渐增加<sup>[19]</sup>, 在电磁场作用下, 包覆界面处的电荷由于两侧材料导电性的不同产生了聚集现象, 同时  $\text{SiO}_2$  包覆层的绝缘性, 使羰基铁表面电阻率相对提高, 抑制了羰基铁的涡流损耗, 减少了趋肤效应, 表现为在 Y0~Y2 样品中, 随着 TEOS 添加量增加,  $\epsilon'$ 、 $\mu'$  和  $\mu''$  都增加; 而随着 TEOS 量的继续增加, 即  $\text{SiO}_2$  包覆层进一步增厚,  $\text{SiO}_2$  材料的非磁性破坏了羰基铁间的导电网络和空间电荷极化作用, 同时羰基铁的有效颗粒尺寸相对减小, 使复介电常数实部、复磁导率和磁损耗角正切值均有所下降。由图 1b、d 可知, 随着 TEOS 量的增加,  $\text{FCI}@\text{SiO}_2$  的复介电常数虚部 ( $\epsilon''$ ) 和介电损耗角正切值呈现先减小后增加的变化, 这是由于  $\text{SiO}_2$  层包覆初期, 虚部的主要贡献来源于羰基铁的导电损耗, 而  $\text{SiO}_2$  的存在减少了羰基铁表面缺陷和极子损耗, 即降低了复介电常数虚部和介电损耗角正切值; 随着包覆层厚度增加, 界面极化和偶极子损耗逐渐占主导地位, 导致复介电常数虚部增加、介电损耗角正切值增大<sup>[20-23]</sup>。此外, 可以看到复电磁参数值在交变电场作用下起跳, 特别是在 12~18 GHz 高频段比较明显, 这与磁滞损耗、涡流损耗、磁后效等作用有关, 表现为电磁介质的极化和磁化状态的改变在时间上落后于外场的变化, 有一定的时间滞后效应<sup>[24-26]</sup>。

吸波材料高效吸收电磁波需要满足 2 个基本条件, 一是电磁波入射材料表面时, 电磁波能量最大限度地进入材料内部, 即阻抗匹配特性; 二是进入材料内部的电磁波迅速衰减, 即材料损耗或衰减特性。根据传输线理论, 由羰基铁 (或  $\text{SiO}_2$  包覆的羰基铁) 制备的单层吸波材料, 其阻抗匹配特性和衰减特性可用以下公式表示:

$$Z_{\text{in}} = Z_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh \left[ j \frac{2\pi f d}{c} \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \right] \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{\sqrt{2\pi f}}{c} \times \sqrt{(\mu''\epsilon'' - \mu'\epsilon') + \sqrt{(\mu'\epsilon'' + \mu''\epsilon')^2 + (\mu''\epsilon'' - \mu'\epsilon')^2}} \quad (2)$$

$$\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (3)$$

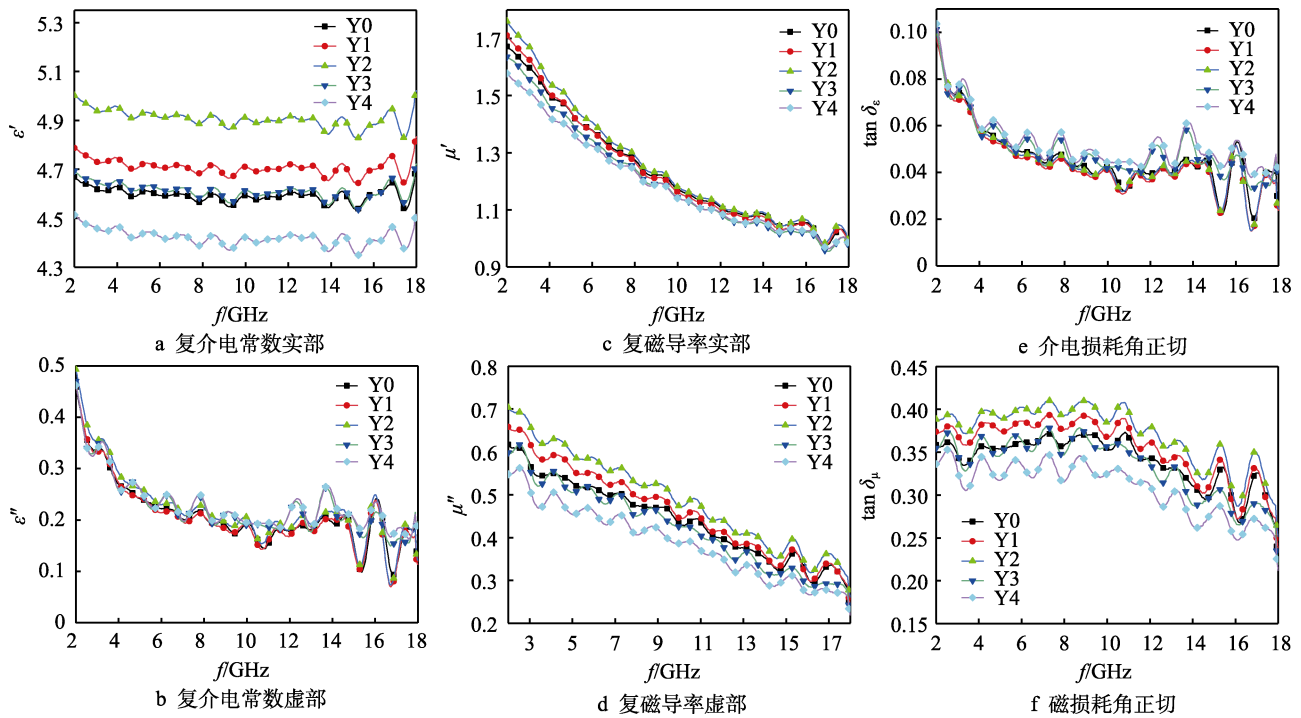
图 1 TEOS 添加量对 FCI@SiO<sub>2</sub> 电磁性能的影响

Fig.1 Effect of TEOS addition on the electromagnetic properties of FCI@SiO<sub>2</sub>: a) real part of the complex dielectric constant; b) imaginary part of complex dielectric constant; c) real part of the complex permeability; d) imaginary part of the complex permeability; e) dielectric loss angle tangent; f) magnetic loss angle tangent

$$\mu_r = \mu' - j\mu'' \quad (4)$$

式中:  $f$ 、 $d$ 、 $c$ 、 $\varepsilon_r$ 、 $\mu_r$ 、 $Z_0$ 、 $Z_{in}$  和  $\alpha$  分别为电磁波频率、吸波材料厚度、光速、复介电常数、复磁导率、自由空间阻抗、输入阻抗和衰减常数。

为统一阻抗匹配和衰减能力的影响,为吸波材料电磁参数设计提供量化依据,通常用反射损耗 (Reflective Loss, RL) 表征材料的吸波性能。

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \quad (5)$$

$$RL = 20 \times \lg \left| \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \right| \quad (6)$$

式中:  $\Gamma$ 、 $R_L$  分别为反射系数和反射损耗。

将上述 Y0~Y4 号样测试的复介电常数和复磁导率代入式 (6) 后,可模拟计算出由 Y0~Y4 号样碳基铁制备的单层吸波材料在不同厚度下的反射损耗 RL 值(其中碳基铁的质量分数占整个吸波材料的 40%),结果如图 2 所示。

考虑吸波材料实际使用工况和施工工艺性,模拟厚度设置为 1~4 mm。由图 2 可知,相对于 Y0 空白样, Y1~Y4 包覆改性样中 Y2 样具有最高的反射损耗峰值和最宽的吸波频带宽度(指反射损耗  $RL \leq -5$  dB 下的频率区间范围),在 3 mm 厚度下,具有 -12 dB 的反射损耗峰值( $f=9.8$  GHz)和 9.6 GHz 频带宽度( $RL \leq -5$  dB)。Y2 样吸波性能的改善,主要是由于 SiO<sub>2</sub> 包覆层的存在使磁损耗角正切值增加,同时减少了阻抗失配效应,这与前述 TEOS 添加量对改性碳基铁电磁性能

的影响一致,因而 Y2 样获得相对最优的吸波性能。后文,未特别说明的 SiO<sub>2</sub> 包覆改性碳基铁样均指 Y2 样。

## 2.2 微观形貌分析

图 3 是 TEOS 改性碳基铁前后的微观形貌。图 3a 是未改性碳基铁的原始形貌扫描电镜图,可以看出其颗粒形状呈片状,尺寸范围为 1.5~10  $\mu\text{m}$ ,厚度小于 1  $\mu\text{m}$ ;图 3b 和图 3c 是 TEOS 改性后的碳基铁透射电镜图,可以清晰地看到,改性后的碳基铁表面形成一层厚度均匀且致密的包覆层,包覆层的厚度为 40~45 nm。

## 2.3 元素分析

图 4 为碳基铁包覆改性前后的红外光谱图,曲线 a、b、c 分别代表原始碳基铁 (FCI)、包覆改性后碳基铁以及包覆改性后 200  $^{\circ}\text{C}$  处理下碳基铁的红外光谱曲线。曲线 a、b、c 均在 1 384~1 636  $\text{cm}^{-1}$  和 3 431~3 443  $\text{cm}^{-1}$  处发生 O—H 的弯曲振动和伸缩振动吸收峰,表明碳基铁表面含有一定的水分;其中曲线 b 和 c 在 947~949  $\text{cm}^{-1}$  处表现出较弱的 Si—OH 伸缩振动峰、1 082~1 095  $\text{cm}^{-1}$  处表现出 O—Si—O 键振动峰,曲线 a 相应位置无特征基团吸收峰,表明包覆改性后碳基铁 (FCI@SiO<sub>2</sub>) 和包覆改性后 200  $^{\circ}\text{C}$  处理下碳基铁 (FCI@SiO<sub>2</sub>/200  $^{\circ}\text{C}$ ) 表面含有 O—Si 基团。结合上述微观结构分析,证明了 TEOS 对碳基铁的改性使其表面形成了 SiO<sub>2</sub> 包覆层<sup>[27-28]</sup>,同时经过 200  $^{\circ}\text{C}$  高温处理后, SiO<sub>2</sub> 包覆层依然存在。

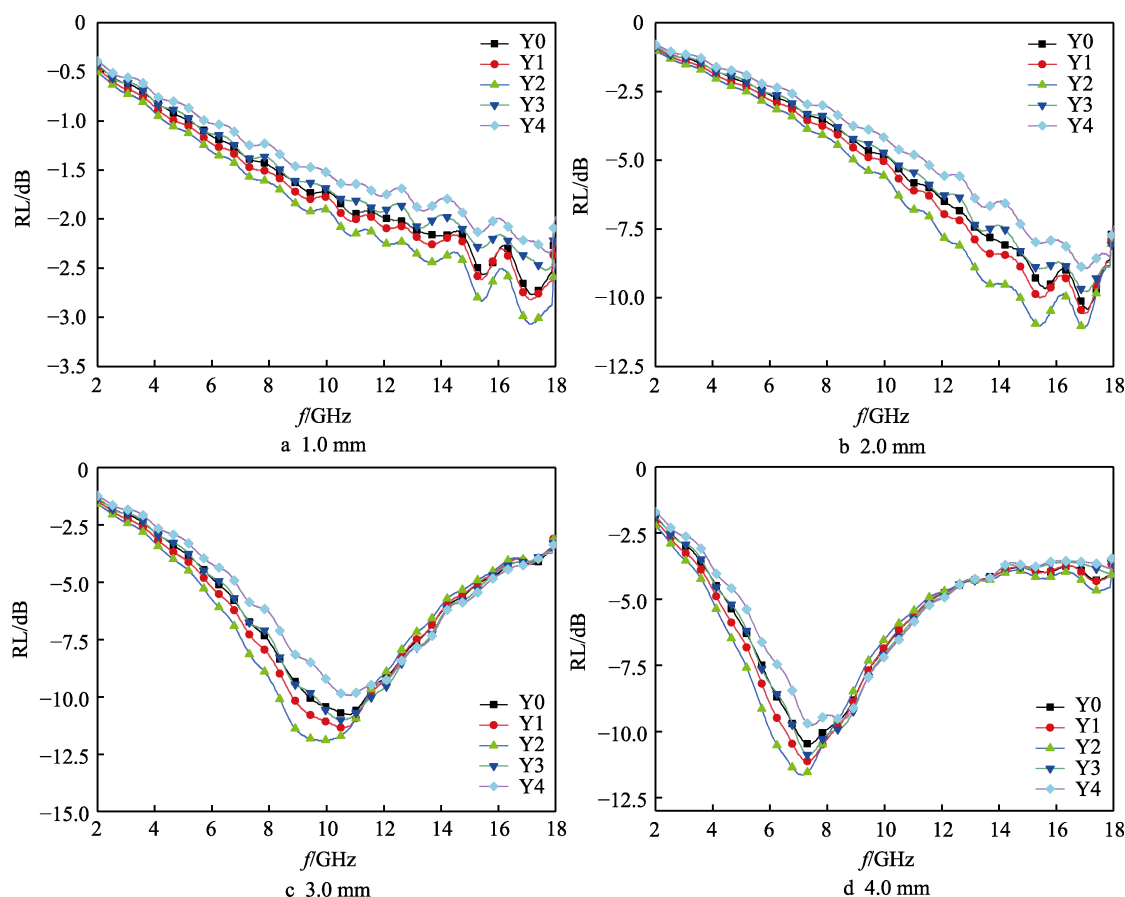


图2 TEOS添加量对FCI@SiO<sub>2</sub>在不同厚度下的反射损耗影响  
Fig.2 Effect of TEOS addition on reflection loss of FCI@SiO<sub>2</sub> at different thicknesses

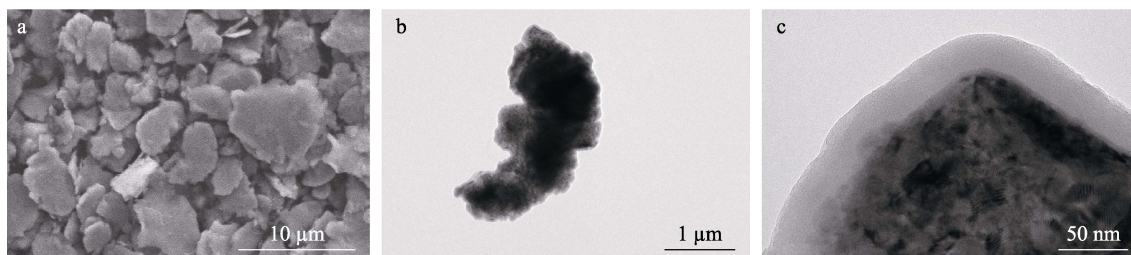


图3 羰基铁的SEM图(a)及包覆改性羰基铁的TEM图(b~c)  
Fig.3 SEM images of carbonyl iron (a) and TEM images of coated modified carbonyl iron (b-c)

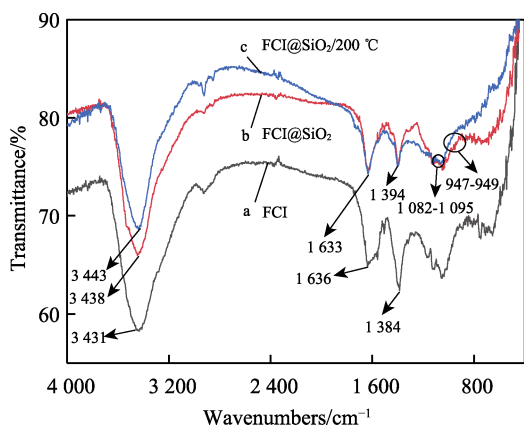


图4 包覆改性前后羰基铁的红外谱图  
Fig.4 Infrared curves of carbonyl iron before and after coating modification

表1为X射线荧光光谱(XRF)分析结果,可以看到SiO<sub>2</sub>包覆改性羰基铁及200℃处理前后的表面元素含量变化情况。羰基铁改性前Si元素质量分数为0.03%,这可能是工业生产过程的少量氧化层;改性后Si元素质量分数为0.38%,提升将近10倍,由于Si元素以SiO<sub>2</sub>形式存在,说明改性后羰基铁表面成功包覆一层SiO<sub>2</sub>;对FCI@SiO<sub>2</sub>进行200℃环境30 min处理后,发现其表面Si元素质量分数为0.63%,相对于未进行高温处理的FCI@SiO<sub>2</sub>样Si含量有所增加,即经200℃处理后,在原有SiO<sub>2</sub>包覆层的基础上进一步生成了少量硅氧化物,推测是源于高温诱导SiO<sub>2</sub>层致密化,SiO<sub>2</sub>前驱体残留的—Si—OH基团进一步缩合,增加了交联密度,使XRF检测时Si信号增强<sup>[29]</sup>。



表 1 羰基铁 SiO<sub>2</sub> 包覆改性前后元素分析  
Tab.1 Elemental analysis of carbonyl iron before and after SiO<sub>2</sub> coating modification

FCI		FCI@SiO <sub>2</sub>		FCI@SiO <sub>2</sub> /200 °C	
Element	Content%	Element	Content%	Element	Content%
Fe	69.78	Fe	67.49	Fe	67.16
O	30.75	O	30.48	O	30.62
Cr	0.64	Cr	0.61	Si	0.63
Ni	0.25	P	0.48	Cr	0.56
P	0.19	Si	0.38	P	0.48
Co	0.13	Ni	0.26	Ni	0.26
Ca	0.08	Ca	0.14	Ca	0.16
Mn	0.05	Cu	0.07	Cu	0.05
Si	0.03	Cl	0.05	Cl	0.04
Cu	0.03	Mn	0.04	Mn	0.04
Mo	0.01			Mo	0.01

2.4 高温环境下的隐身吸波性能和抗氧化性

图 5a~c 分别是原始羰基铁 (FCI) 在 25、150 和 200 °C 空气氛围环境下保持 30 min 后 1~4 mm 厚度下的反射损耗曲线, 可以看到, 150 °C 处理后的羰基铁反射损耗性能相对于 25 °C 处理的羰基铁略有降低, 而 200 °C 处理后的羰基铁反射损耗性能显著降低,

反射损耗最小值由-10.7 dB 变为-4.7 dB, 这是由于羰基铁在 200 °C 环境下被氧化产生失磁效应, 导致吸波性能损耗严重。图 5d 是 SiO<sub>2</sub> 包覆改性的羰基铁在 200 °C 下的反射损耗曲线, 可以看到相对于原始羰基铁, 其吸波能力基本一致, 在 3 mm 厚度下, 反射损耗最小值为-10.4 dB ( $f=10.59$  GHz), 这是因为 TEOS 发生水解反应, 在羰基铁颗粒表面生成均匀、致密的 SiO<sub>2</sub> 保护层, 阻止了空气氧气和水分的扩散, 有效避免了羰基铁在 200 °C 下的氧化失磁效应<sup>[30]</sup>。

为进一步解释温度对羰基铁包覆改性前后抗氧化性和吸波性能的影响, 图 6 为原始羰基铁 (FCI) 和 SiO<sub>2</sub> 包覆改性羰基铁 (FCI@SiO<sub>2</sub>) 的复电磁参数、介电损耗角正切 ( $\tan \delta_e$ ) 和磁损耗角正切 ( $\tan \delta_\mu$ ) 随温度变化情况图。从图 6a、b、c 可知, 原始羰基铁经过 25、150 和 200 °C 温度处理后, 其复介电常数实部先减小后增大, 复介电常数虚部和介电损耗角在低频段先减小后增大, 推测其原因是从 25~150 °C, 热处理去除了羰基铁表面的吸附水或有机杂质, 减少了偶极子极化的贡献, 降低了介电常数实部, 而在 200 °C 下热处理, 随着氧化现象加剧, 表面生成的非磁氧化物具有较高的介电常数, 表现为介电常数实部、虚部和介电损耗角正切值的增加, 在高频段复介电常数虚部和介电损耗角正切值的跳跃性增大, 可能

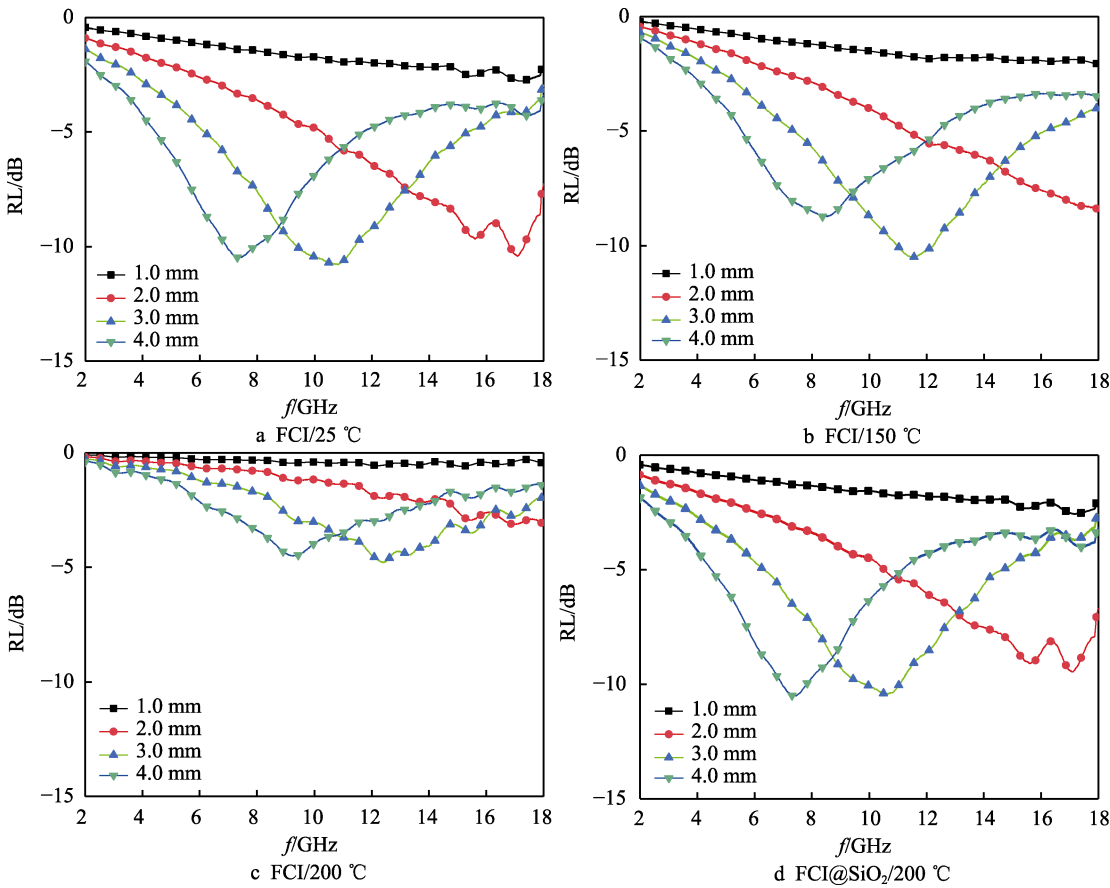


图 5 温度对 FCI 和 FCI@SiO<sub>2</sub> 反射损耗的影响  
Fig.5 Effect of temperature on the reflection loss of FCI and FCI@SiO<sub>2</sub>

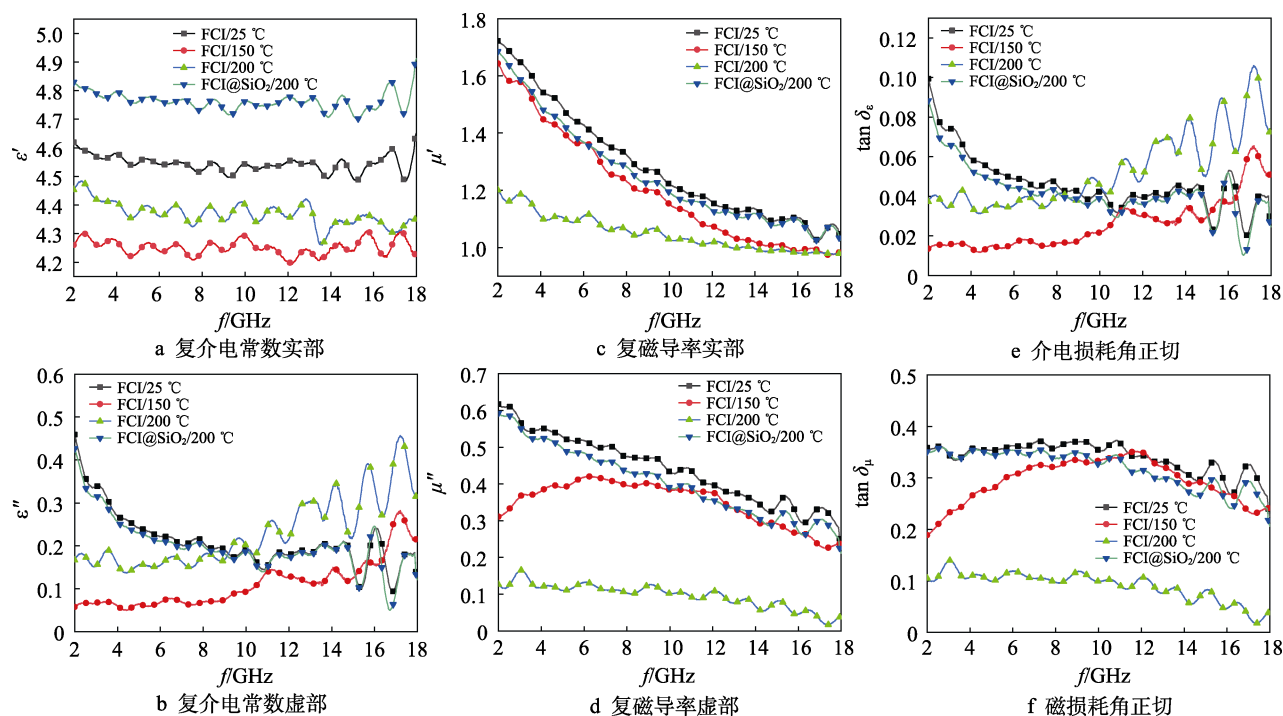
图6 温度对 FCI 和 FCI@SiO<sub>2</sub> 电磁参数的影响

Fig.6 Effect of temperature on the electromagnetic parameters of FCI and FCI@SiO<sub>2</sub>: a) real part of the complex dielectric constant; b) imaginary part of complex dielectric constant; c) real part of the complex permeability; d) imaginary part of the complex permeability; e) dielectric loss angle tangent; f) magnetic loss angle tangent

与氧化导致的局域能级或缺陷态在高频场下被激发和磁滞效应有关；从图 6c、d、e 可知，复磁导率实部、虚部和磁损耗角正切值随着温度升高而降低，在高频段逐渐趋于相近，这是因为原始羰基铁因其自身磁畴壁运动和自然共振贡献，具有较高的磁导率，随着温度升高，表面生成了非磁性氧化物，减小了有效磁性体积，降低了复磁导率等参数，随着频率进一步升高（10~18 GHz），3 种温度下处理的羰基铁磁导率趋近于“涡流主导区”，氧化物对涡流的限制作用减弱，复磁导率等参数差距缩小；由图 6a~e 可知，200 °C 下 SiO<sub>2</sub> 包覆改性羰基铁（FCI@SiO<sub>2</sub>）的复介电常数实部大于 25 °C 下的原始羰基铁（FCI），这源于 SiO<sub>2</sub> 绝缘层的存在导致界面处产生显著的空间电荷积累，增强了偶极子极化，使复介电常数实部增大，同时绝缘层阻碍了自由电子传导，减小了漏导对介电常数实部的负面影响，而复介电常数虚部、介电损耗角正切、复磁导率参数相当。25 °C 下的羰基铁略高，这是因为磁性能主要由 Fe 核决定，薄层 SiO<sub>2</sub> 不显著改变 Fe 磁畴，主要改善羰基铁本身的抗氧化性，与图 5a~d 所示温度对 FCI 和 FCI@SiO<sub>2</sub> 反射损耗性能的影响一致，也进一步说明了 SiO<sub>2</sub> 包覆层的存在能有效改善 200 °C 环境下羰基铁的抗氧化性，保证其作为吸收剂对电磁波的吸收性能<sup>[31-32]</sup>。

通过上述吸波性能和电磁性能对比分析可知，在 200 °C 高温环境下，由于氧化、失磁效应，未改性羰基铁的吸波性能和电磁性能相对于 25 °C 环境下显著降低；而改性后，由于 SiO<sub>2</sub> 包覆层的存在，阻止了

羰基铁高温环境下与空气中氧气、水分的反应，提高了羰基铁的抗氧化能力，使 200 °C 环境下的羰基铁仍具有较好的吸波性能和电磁性能。

### 3 结论

本文系统探讨了 TEOS 添加量对 SiO<sub>2</sub> 包覆改性 FCI 前后的电磁性能、抗氧化性和雷达隐身性的影响，具体结论如下：

1) 当 TEOS 添加量为 10 mL 时，羰基铁包覆改性后的电磁性能相对最好，红外、XRF 和电镜分析发现，羰基铁表面均匀生成了一层 SiO<sub>2</sub> 保护层，厚度为 40~45 nm。

2) 200 °C 下处理 30 min，发现原始羰基铁吸波性能显著下降，3 mm 厚度下，吸波材料（FCI 质量分数为 40%）反射损耗最小值由 -10.7 dB 变为 -4.7 dB；而经 SiO<sub>2</sub> 包覆改性的羰基铁仍保持较好的吸波性能，吸波材料（FCI@SiO<sub>2</sub> 质量分数为 40%）的反射损耗最小值为 -10.4 dB（ $f=10.59$  GHz），在 6.3~14.6 GHz 频带宽度下，反射损耗  $\leq -5$  dB。说明羰基铁在高温环境下的抗氧化性得到明显改善，进而保证了雷达隐身吸波性能的发挥。

### 参考文献：

- [1] HUANG Y F, CHEN G J, WANG X R, et al. Advances in

- Radar/Infrared Compatible Stealth Materials[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2025, 36(4): 278.
- [2] XU D G, LIU J S, LUO S, et al. Development Status and Trend of Stealth Technology of Tactical Missiles[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2023, 2460(1): 012064.
- [3] JIN L, ZHAO Y M, CHEN C, et al. Application, Development, and Challenges of Stealth Materials/Structures in Next-Generation Aviation Equipment[J]. *Applied Surface Science Advances*, 2024, 19: 100575.
- [4] SHARMA S, PARNE S R, PANDA S S S, et al. Progress in Microwave Absorbing Materials: A Critical Review[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2024, 327: 103143.
- [5] JIA Z R, LIN K J, WU G L, et al. Recent Progresses of High-Temperature Microwave-Absorbing Materials[J]. *Nano*, 2018, 13(6): 1830005.
- [6] 田浩源, 王军军, 夏立建, 等. 羰基铁吸收剂耐腐蚀、抗氧化表面改性技术研究进展[J]. *材料保护*, 2024, 57(11): 82-92.
- TIAN H Y, WANG J J, XIA L J, et al. Research Progress on the Corrosion Resistance and Oxidation Resistance Surface Modification Technology of Carbonyl Iron Absorbent[J]. *Materials Protection*, 2024, 57(11): 82-92.
- [7] 洪起虎, 燕绍九, 陈翔, 等. 表面改性对 FeSiCr 磁性吸波材料耐温吸波性能的影响[J]. *特种铸造及有色合金*, 2019, 39(2): 136-138.
- HONG Q H, YAN S J, CHEN X, et al. Effects of Surface Modification on the Heat-Resistant and Absorbing Properties of FeSiCr Alloy[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2019, 39(2): 136-138.
- [8] ZHOU Y Y, ZHOU W C, LI R, et al. Enhanced Antioxidation and Electromagnetic Properties of Co-Coated Flaky Carbonyl Iron Particles Prepared by Electroless Plating[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 637: 10-15.
- [9] XIE H, ZHOU Y Y, REN Z W, et al. Enhancement of Electromagnetic Interference Shielding and Heat-Resistance Properties of Silver-Coated Carbonyl Iron Powders Composite Material[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2020, 499: 166244.
- [10] 刘晓彤, 曾元松, 韦国科, 等. SiO<sub>2</sub> 包覆羰基铁粉电磁特性及吸波性能研究[J]. *航空制造技术*, 2019, 62(22): 82-87.
- LIU X T, ZENG Y S, WEI G K, et al. Study on Electromagnetic and Microwave Absorption Properties of Carbonyl Iron Powder Coated by SiO<sub>2</sub>[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2019, 62(22): 82-87.
- [11] 王光华, 孔金丞, 李雄军, 等. 羰基铁粉表面改性及其热稳定性研究[J]. *中国粉体技术*, 2011, 17(2): 5-8.
- WANG G H, KONG J C, LI X J, et al. Investigation on Surface Modification and Thermal Stability of Carbonyl Iron Particles[J]. *China Powder Science and Technology*, 2011, 17(2): 5-8.
- [12] WANG H Q, WANG M, ZHANG X C, et al. A New Type of Catalyst Allows Carbonyl Iron Powder to Be Coated with SiO<sub>2</sub> for Tuned Microwave Absorption[J]. *Surfaces and Interfaces*, 2020, 21: 100755.
- [13] 叶丰, 陆明, 冀鑫炜, 等. ZnO 对材料吸波性能的影响研究[J]. *兵器材料科学与工程*, 2012, 35(4): 43-46.
- YE F, LU M, JI X W, et al. Influence of ZnO on the Absorbing Performance of Material[J]. *Ordinance Material Science and Engineering*, 2012, 35(4): 43-46.
- [14] 夏宁博. 铁包覆四针状氧化锌晶须的制备与性能[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008.
- XIA N B. Preparation and Properties of Iron-coated Tetrapod-like Zinc Oxide Whiskers[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008.
- [15] 田威. 铁磁吸收剂表面改性及耐腐蚀机理研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2023.
- TIAN W. Study on Surface Modification and Corrosion Resistance Mechanism of Ferromagnetic Absorber[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2023.
- [16] 曹晓国, 张海燕. 镀银羰基铁粉的制备及其性能的研究[J]. *材料工程*, 2007, 35(8): 69-72.
- CAO X G, ZHANG H Y. Preparation and Performance of Silver-Coated Carbonyl Iron Powder[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2007, 35(8): 69-72.
- [17] 郭飞, 杜红亮, 屈绍波, 等. 海胆状氧化锌/羰基铁粉核壳结构复合粒子的抗氧化及吸波性能[J]. *无机化学学报*, 2015, 31(4): 755-760.
- GUO F, DU H L, QU S B, et al. Oxidation Resistance and Microwave Absorption Property of Core Shell Urchin-Like ZnO/Carbonyl Iron Powder Composite Particles[J]. *Chinese Journal of Inorganic Chemistry*, 2015, 31(4): 755-760.
- [18] 韩敏阳, 韦国科, 周明, 等. 低频雷达吸波材料的研究进展[J]. *复合材料学报*, 2022, 39(4): 1363-1377.
- HAN M Y, WEI G K, ZHOU M, et al. Research Progress of Low-Frequency Radar Absorbents[J]. *Acta Materialiae Compositae Sinica*, 2022, 39(4): 1363-1377.
- [19] AZUMA Y, NOGAMI K, OHSHIMA N. Coating of Ferric Oxide Particles with Silica by Hydrolysis of TEOS[J]. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 1992, 100(1161): 646-651.
- [20] YANG Y, LI Z W, NEO C P, et al. Model Design on Calculations of Microwave Permeability and Permittivity of Fe/SiO<sub>2</sub> Particles with Core/Shell Structure[J]. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2014, 75(2): 230-235.
- [21] YAN L G, WANG J B, HAN X H, et al. Enhanced Micro-



- wave Absorption of Fe Nanoflakes after Coating with SiO<sub>2</sub> Nanoshell[J]. *Nanotechnology*, 2010, 21(9): 095708.
- [22] 周乾, 陆明. 纳米 SiO<sub>2</sub> 包覆对羰基铁粉电磁性能的影响[J]. *兵器材料科学与工程*, 2013, 36(6): 91-93.
- ZHOU Q, LU M. Effect of Nano-SiO<sub>2</sub> Coating on Electromagnetic Properties of Carbonyl Iron[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2013, 36(6): 91-93.
- [23] QI W W, XIANG L, NING M Q, et al. Dual-Oxides Confined Carbonyl Iron Enabling Superior Electromagnetic Wave Absorption and Anticorrosion Performance[J]. *Nano Materials Science*, 2024.
- [24] ELMAHAISHI M F, AZIS R S, ISMAIL I, et al. A Review on Electromagnetic Microwave Absorption Properties: Their Materials and Performance[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 20: 2188-2220.
- [25] 叶志民, 庄海燕, 董伟, 等. 羰基铁粉表面改性及其电磁性能研究[J]. *材料开发与应用*, 2014, 29(6): 87-92.
- YE Z M, ZHUANG H Y, DONG W, et al. Study on the Electromagnetic Properties of the Surface Modified Carbonyl Iron[J]. *Development and Application of Materials*, 2014, 29(6): 87-92.
- [26] 梁莹, 李天天, 李菊红, 等. 羰基铁粉/石墨烯复合粉体的制备及其电磁性能研究[J]. *电子元件与材料*, 2024, 43(6): 668-677.
- LIANG Y, LI T T, LI J H, et al. Preparation and Electromagnetic Properties of Carbonyl Iron Powder/Graphene Composite Powder[J]. *China Industrial Economics*, 2024, 43(6): 668-677.
- [27] MAŁECKI P, KOLMAN K, PIŁGOWSKI J, et al. Sol-Gel Method as a Way of Carbonyl Iron Powder Surface Modification for Interaction Improvement[J]. *Journal of Solid State Chemistry*, 2015, 226: 224-230.
- [28] 冯旺军, 郑文谦, 李靖, 等. APTES 为单一硅源制备 SiO<sub>2</sub> 包覆羰基铁粉及其吸波性能[C]// 湘潭, 中国国际功能材料科技与产业高层论坛, 2015.
- FENG W J, ZHENG W Q, LI Q, et al. APTES as a Single Silicon Source for the Preparation of SiO<sub>2</sub>-Coated Carbonyl Iron Powder and its Electromagnetic Wave Absorption Performance[C]// Xiangtan, China International Forum on Functional Materials Technology and Industry, 2015.
- [29] 刚骏涛, 冯旺军, 李靖, 等. 以 APTES 为硅源制备 SiO<sub>2</sub> 包覆羰基铁粉的吸波性能[J]. *材料科学与工程学报*, 2018, 36(5): 773-777.
- GANG J T, FENG W J, LI J, et al. Microwave Absorption of SiO<sub>2</sub>@Carbonyl Iron Powder Prepared by Using APTES as the Silica Source[J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2018, 36(5): 773-777.
- [30] 潘云星. 基于羰基铁和石墨烯宽频吸波涂层制备及耐温抗氧化性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- PAN Y X. Preparation and Temperature Resistance and Oxidation Resistance of Broadband Absorbing Coating Based on Carbonyl Iron and Graphene[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021.
- [31] 袁江杭, 曲兆明, 赵芳, 等. 片形羰基铁粉热处理工艺及其吸波性能研究[J]. *材料导报*, 2022, 36(18): 130-135.
- YUAN J H, QU Z M, ZHAO F, et al. Research on Heat Treatment Technology and Wave Absorption Property of Flake Carbonyl Iron Powder[J]. *Materials Reports*, 2022, 36(18): 130-135.
- [32] 王道明, 侯友夫, 田组织, 等. 颗粒尺寸及温度对羰基铁粉磁化性能的影响[J]. *功能材料*, 2014, 45(19): 19006-19009.
- WANG D M, HOU Y F, TIAN Z Z, et al. Effect of Particle Size and Temperature on Magnetization Properties of Carbonyl Iron Powder[J]. *Journal of Functional Materials*, 2014, 45(19): 19006-19009.