第 48 卷第 1 期　　硅　酸　盐　学　报　　Vol. 48，No. 1
2020 年 1 月　　JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY　　January，2020
http://www.gxyb.cbpt.cnki.net　　**DOI**：10.14062/j.issn.0454-5648.20190211

念珠状碳化硅/二氧化硅纳米线的制备及电磁波吸收性能

郑海康[1]，武志红[1,2]，张路平[1]，王　倩[1]，蒙真真[1]，尚　楷[1]

(1. 西安建筑科技大学材料科学与工程学院，西安 710055；
2. 中钢集团洛阳耐火材料研究院有限公司，先进耐火材料国家重点实验室，河南 洛阳 471039)

摘　要：通过一种简单、低成本的方法，以竹炭为碳源，在惰性气氛条件下碳热还原二氧化硅，成功制备了念珠状碳化硅(SiC)/二氧化硅(SiO_2)纳米线。采用扫描电子显微镜、X 射线衍射与 X 射线光电子能谱对念珠状 SiC/SiO_2 纳米线的微观形貌、物相组成和化学组成进行了表征。结果表明：SiC 纳米线表面光滑，直径约为 150~200 nm；1~2 μm 的珠状突起主要成分为 SiO_2，并均匀分布在 SiC 纳米线上。室温条件下，在 X 波段(8.2~12.4 GHz)测试了试样的复介电常数，并以传输线理论计算出样品在不同厚度的反射损耗。结果表明：当厚度为 1.80 mm 时，试样的有效吸收带宽(R_L<–10 dB)为 2.32 GHz，最小 R_L 值达到–43.58 dB。

关键词：念珠状碳化硅/二氧化硅纳米线；微观结构；碳热还原；吸波性能
中图分类号：TM25　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2020)01–0008–07
网络出版时间：2019–09–04



Synthesis and Electromagnetic Wave Absorption Properties of Beaded Silicon Carbide/ Silica Nanowires

ZHENG Haikang[1], *WU Zhihong*[1,2], *ZHANG Luping*[1], *WANG Qian*[1], *MENG Zhenzhen*[1], *SHANG Kai*[1]
(1. College of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;
2. State Key Laboratory of Advance Refractories, Sinosteel Luoyang Institute of Refractories Research Co., Ltd., Luoyang 471039, Henan, China)

Abstract: Beaded silicon carbide (SiC) nanowires were synthesized *via* carbothermic reduction of silica in inert atmosphere with bamboo carbon as a carbon source. The morphology, phase and chemical composition of the beaded SiC/SiO_2 nanowires were characterized by scanning electron microscopy, X-ray diffraction and X-ray photoelectron spectroscopy. The as-synthesized beaded SiC/SiO_2 nanowires with the smooth surface are composed of nanowires with the diameters of 150–200 nm and SiO_2 beads with the diameters of 1–2 μm uniformly distributed on SiC nanowires. The dielectric permittivity of the samples were measured at room temperature at X band (*i.e.*, 8.20–12.40 GHz), and the reflection loss of the samples at different thicknesses was calculated by the transmit line theory. The results show that the effective absorption bandwidth of the composite absorbing materials is 2.32 GHz (R_L<–10 dB) with the thickness of 1.80 mm, and the minimum reflection loss of the sample reaches –43.58 dB.

Keywords: beaded silicon carbide/silica nanowires; microstructure; carbothermic reduction; microwaving absorbing properties

现代通信技术的发展，在带给人类便利的同时，也给人类健康和生活造成了不良影响[1–2]。长期处在具有电磁辐射的环境中，会给身体造成严重危害，包括免疫力下降，诱发癌症等[3]。电磁波吸收材料能够有效的减弱或耗散入射的电磁波，将其转化为热能或其他形式的能，引起了世界各国科研人员的

收稿日期：2019–04–03。　修订日期：2019–04–28。
基金项目：国家自然科学基金项目(51502236)；先进耐火材料国家重点实验室开放基金(SKLAR201905)；西安建筑科技大学基础研究基金(JC1496)。
第一作者：郑海康(1993—)，男，硕士研究生。
通信作者：武志红(1974—)，男，博士，副教授。

Received date: 2019–04–03.　**Revised date:** 2019–04–28.
First author: ZHENG Haikang (1993–), male, Master candidate.
E-mail: 2923166815@qq.com
Correspondent author: WU Zhihong (1974–), male, Ph.D., Associate Professor.
E-mail: zhihong@xauat.edu.cn

广泛关注[4–6]。近年来科研人员做了大量的努力，成功制备了以磁性金属及其氧化物、碳系材料、导电高分子材料等为代表的电磁波吸收材料[7–12]，并用于电磁波污染环境，有效地保护了人们的健康和生活安全。电磁波吸收材料在吸波性能方面虽然有了长足的发展，但也存在一些问题。如磁性吸收剂密度大，在 Curie 点发生铁磁–顺磁转变；碳类吸收剂使用环境较为苛刻且易氧化；导电高聚物吸收剂在高温下易分解等。因此，制备具有吸收频带宽，吸波能力强，质量轻，热稳定性好，抗氧化能力强等特点的电磁波吸波材料是当前发展的主要研究方向[13–14]。

碳化硅(SiC)以其优异的物理化学性能(如低密度、高硬度、高强度、耐腐蚀和热稳定性好、导电率可调)，成为具有发展前景的电磁波吸收材料[15–18]。一维(1D) SiC 材料具有高比表面积、易成网状结构，是一种广泛研究的电磁波吸收材料[19–20]。Sun 等[21]采用碳热还原法以活性炭、硅粉和二氧化硅为原料，Fe_2O_3 为催化剂制备了 SiC 纳米线并研究了其吸波性能。当试样厚度为 4.6 mm 时，材料的最大反射损耗为–18.02 dB，–10 dB 以下的吸波频带为 1.7 GHz。SiC 晶体结构中堆垛层错可引起强界面偶极极化，破坏电荷分布平衡，增强电磁波能量衰减。Lan 等[22]报道了一种含有堆垛层错 SiC 片材，研究了其电磁波吸收特性，当样品厚度为 2.2 mm 时，反射损耗为–22 dB。Zhang 等[23]以多壁碳纳米管，硅粉以及二氧化硅为原料制备出了含有堆垛层错的碳化硅纳米线，当试样厚度为 4.6 mm，在 6.0~9.7 GHz 频率范围，R_L 均低于–10 dB，最小 R_L 达到–30 dB。因此，制备含有堆垛层错等特殊结构的一维 SiC 纳米线值得研究。本工作以竹炭为碳源，在惰性气氛条件下碳热还原二氧化硅，制备出具有念珠状结构的 SiC/SiO_2 纳米线。通过测量其在 X 波段的介电常数，分析材料的电磁波吸收性能。结果表明，所制备的念珠状 SiC/SiO_2 纳米线具有优良的电磁波吸收性能，是一种很有前途的电磁波吸收材料。

1　实验

1.1　竹炭粉的制备

先将购买的毛竹粉放入陶瓷坩埚并置于箱式真空电阻炉中，在氩气保护下，以 5 ℃/min 由室温加热到 700 ℃并保温 3 h。反应结束后，随炉自然冷却到室温。接着，用 10 % (体积分数)盐酸溶液充分洗涤样品，去除其残留的无机杂质，再用去离子水清洗数次，直到溶液呈中性。最后，将制得的竹炭粉在烘箱中 110 ℃干燥 6 h 后待用。

1.2　SiC 纳米线的制备

先将原料二氧化硅(粒度 1~3 μm，质量分数≥99.0%)和竹炭粉以 3:1 的摩尔比混合，在无水乙醇溶液中超声分散 3 h，干燥后置于刚玉坩埚中，放入气氛电阻炉中在氩气气氛下进行烧结。在加热之前，启动真空泵，抽取炉腔内空气至负压–0.095 MPa，然后缓慢地充入氩气至负压–0.06 MPa，重复上述操作 3 次，并在整个实验中保持氩气气氛与微正压。开启循环冷却水，以 5 ℃/min 的加热速率将炉子从室温自动加热到 1 450 ℃并保温 3 h。试样随炉自然冷却后，在坩埚的顶部获得海绵状的碳化硅纳米线。将样品粉体与固体石蜡按照质量比 2:3 均匀混合，在专用模具中压制成 10.16 mm×22.86 mm×1.50 mm 的块状试样，用于测试其复介电常数。

1.3　性能表征

采用日本理学 MiniFlex600 型 X 射线衍射仪测定样品的物相组成，衍射仪采用 Cu 靶 K_α 辐射(波长 0.154 056 nm)，扫描速度 8 (°)/min^{-1}，管电压 45 kV，电流 40 mA，采样步长 0.02°，2θ=10°~90°；使用日本电子株式会社的 JSM-5900 型扫描电子显微镜(SEM)，观察所制备粉末样品的形貌及分布情况，扫描电压为 30 kV，在扫描观察前，对粉末样品进行喷金处理。采用美国热电公司的 K-Alpha X 光电子能谱仪分析样品元素组成和化合价，空间分辨率 20 μm，真空度 3×10^{-7} Pa 样品的电磁参数用矩形波导法在 E8362B 型网络分析仪中进行测试，测试频率范围为 8.2~12.4 GHz。

2　结果与讨论

2.1　形貌物相分析

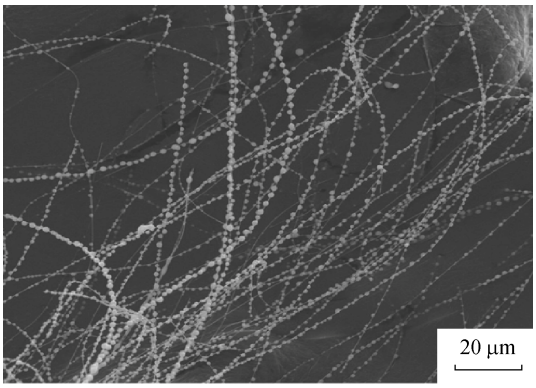
图 1 为在 1 450 ℃采用碳热还原法制备的 SiC 纳米线的 SEM 照片和 XRD 谱。从图 1a 和图 1b 可以观察到清晰的念珠状结构的碳化硅纳米线。SiC 纳米线直径约为 150~200 nm，1~2 μm 的珠状突起均匀分布在 SiC 纳米线上。XRD 谱如图 1c 所示，样品在 35.8°，41.5°，60.0°，72.0°和 75.7°处的 5 个衍射峰与 β-SiC (JCPDS 29-1129)的(111)，(200)，(220)，(311)和(222)晶面参数匹配。

XRD 谱的衍射峰强而尖锐，可见产物为 β-SiC 且结晶较好，而且(111)峰的相对强度明显高于其它峰，表明碳化硅是沿着<111>方向生长[24]。此外，XRD 谱中位于 33.6°处的小衍射峰为 α-SiC，该峰的出现主要是由堆垛层错引起晶型转变造成的[25]。碳化硅材

料的堆垛层错(SF)密度通常用公式(1)来表示[26]：

$$d_{SF}=I_{SF}/I_{(200)} \quad (1)$$

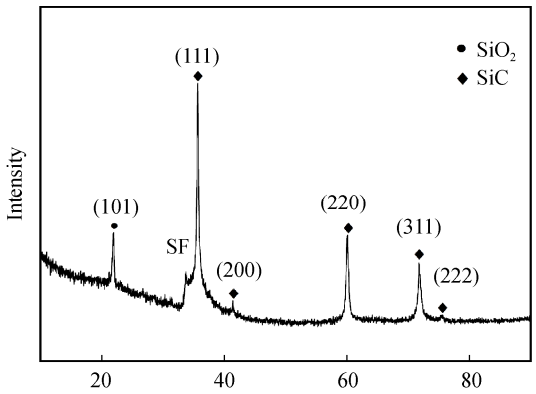
其中：I_{SF} 为 SF 峰(约 33.6°)的峰强值；$I_{(200)}$为(200)峰的峰强值；d_{SF} 表示堆垛层错密度，其数值越大，表明堆垛层错密度越大。根据公式(1)可以得出 d_{SF} 值为 2.40，表明制备的 SiC 纳米线的堆垛层错密度较大。堆垛层错在晶体生长中属于面缺陷，SF 峰的形成可以降低 β-SiC 定向生长的能量需求，从而显著促进 SiC 纳米线沿<111>方向生长[22]。样品在 21.9°处的衍射峰与 SiO_2 (JCPDS 11-0252)的(101)晶面参数匹配。



(a) Low magnificaiton



(b) High magnification

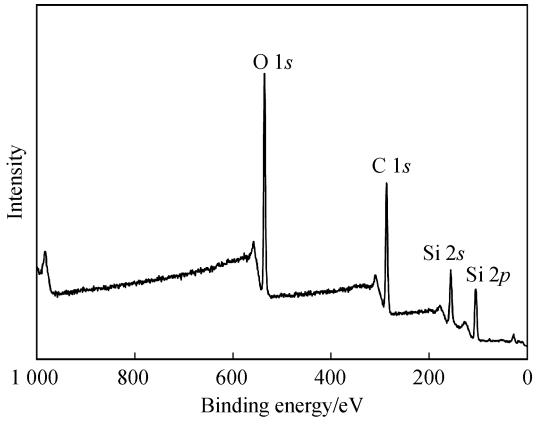


(c) XRD pattern

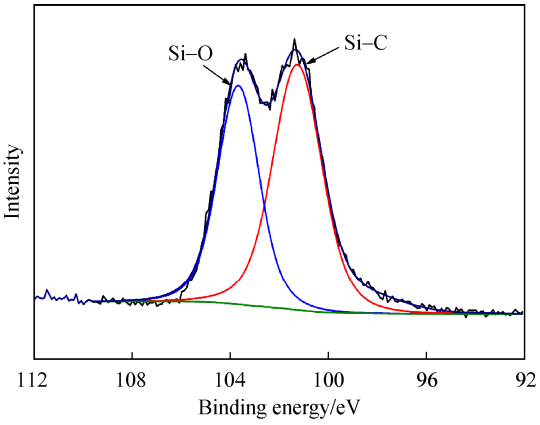
图 1 SiC/SiO_2 纳米线的 SEM 照片和 XRD 谱

Fig. 1 SEM images and XRD pattern of SiC/SiO_2 nanowires samples

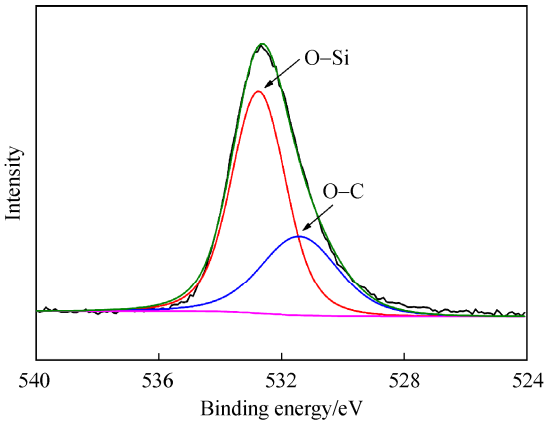
为了进一步研究制备样品的化学成分，采用 X 射线光电子能谱(XPS)对试样进行了表征。从图 2a 全扫描谱中可以看出，试样中主要含有 Si、O 和 C 元素，分别与 99.0 eV 附近的 Si 2*p* 峰，153.0 eV 附近的 Si 2*s* 峰，533.0 eV 附近的 O 1*s* 峰与 284.0 eV 附近的 C 1*s* 峰相对应。图 2b 为试样的 XPS Si 2*p* 分峰拟合曲线图。从图 2b 可见，Si 2*p* 谱中 103.7 和 101.3 eV 的峰值分别归属于 SiO_2 和 SiC 引发的



(a) Survey spectrum



(b) Si 2*p*



(c) O 1*s*

图 2 念珠状 SiC/SiO_2 纳米线的 XPS 谱

Fig. 2 XPS spectra of beaded SiC/SiO_2 nanowires

Si–O 和 Si–C 键[27]。图 2c 为试样的 XPS O 1*s* 分峰拟合曲线图。拟合后，以 532.8 eV 为中心的对称峰归属于 O–Si 键，从而可以证实纳米线上的小球成分为 SiO_2；531.5 eV 的峰值归属于 O–C 键，其中 O–C 键的形成可能是由于在样品转移过程中被空气污染造成的[28]。综上所述，样品表面的化学成分主要包括碳化硅和二氧化硅，与 XRD 结果基本一致。

制备的念珠状碳化硅/二氧化硅纳米线的形成主要经历以下阶段。

在高温下，首先，二氧化硅与 C 反应生成一氧化硅和一氧化碳气体[24, 29]：

$$SiO_2(s)+C(s)=SiO(g)+CO(g) \quad (2)$$

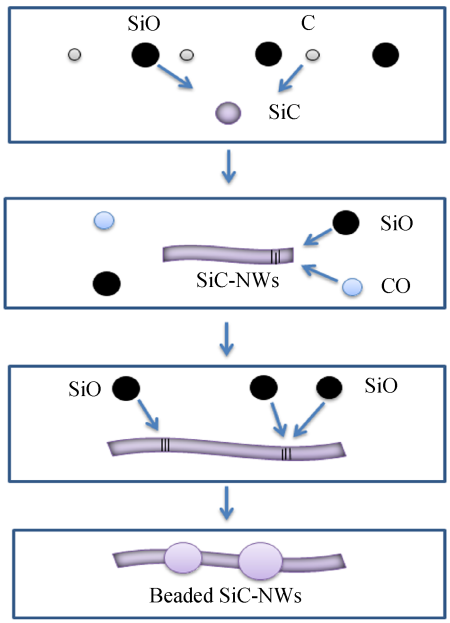
接着，一氧化硅与固体碳颗粒反应生成 SiC 晶核，并沿碳化硅能量最低的(111)晶面上优先单向生长[30]。

$$SiO(g)+2C(s)=SiC(nucleus)+CO(g) \quad (3)$$

在 CO 饱和条件下，通过反应(4)，长大并形成具有的缺陷 SiC 纳米线。

$$SiO(g)+3CO(g)=SiC(nanaowires)+2CO_2(g) \quad (4)$$

降温过程中，在冷凝动力作用下，气相 SiO 分子快速冷凝，从气态迅速转变为固态，中间的液相状态极短。为降低体系自由能，气态 SiO 在缺陷部位形成固态小球，最终选择性地形成 SiO_2 小球包裹在 SiC 纳米线上。生长条件的变动及 SiC 晶体微观结构的差异，造成 SiC 纳米线上小球的分布与直径也不尽相同，其形成机理图如图 3 所示。



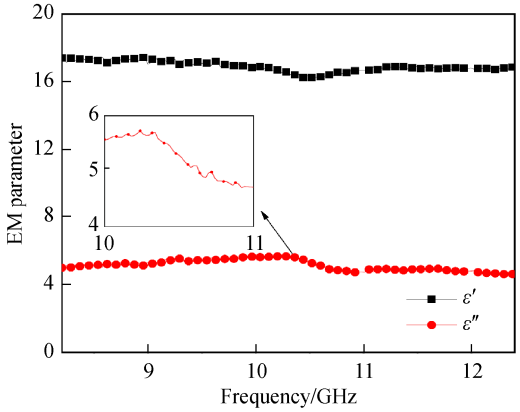
NWs：nanowires.

图 3　念珠状 SiC/SiO_2 纳米线形成机理示意图

Fig. 3　Schematic drawing of the formation mechanism of synthesis of beaded SiC/SiO_2 nanowires

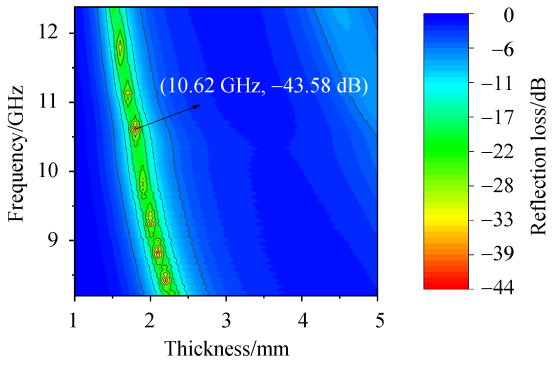
2.2　吸波性能分析

图 4a 为与石蜡混合的念珠状 SiC/SiO_2 纳米线复合材料复介电常数的实部(ε')和虚部(ε'')随频率变化的趋势图。从图 4a 可以看出，在 X 波段，ε'与 ε''值随频率升高分别在 16.1~17.5 和 4.6~5.7 范围内小范围波动，且样品的 ε''在 10.32 GHz 出现 1 个介电损耗峰，表明有极化弛豫发生。这是由于 SiC 纳米线和二氧化硅小球的界面处，在外加电磁场作用下引起界面极化弛豫，其次 SiC 纳米线中的堆垛层错产生电子极化，协同增强了材料对电磁波能量的衰减。



(a) Complex permittivity (ε' and ε'')

EM is electromagnetic wave.



(b) Reflection loss

图 4　样品的介电实部与虚部图及相应的反射损耗图

Fig. 4　Values of complex permittivity (ε' and ε'') and reflection loss for the sample

材料的电磁波吸收性能可用以 dB 为单位的反射损耗(R_L)来评价。根据传输线理论[31]，材料的反射损耗可由复介电常数和复磁导率根据公式(5)与公式(6)计算得到：

$$R_L = 20\lg\left|\frac{Z_{in}-1}{Z_{in}+1}\right| \quad (5)$$

$$Z_{\text{in}}=\sqrt{\frac{\mu_{\text{r}}}{\varepsilon_{\text{r}}}}tanh\left[j\left(\frac{2\pi}{c}\right)\sqrt{\mu_{\text{r}}\varepsilon_{\text{r}}}fd\right] \tag{6}$$

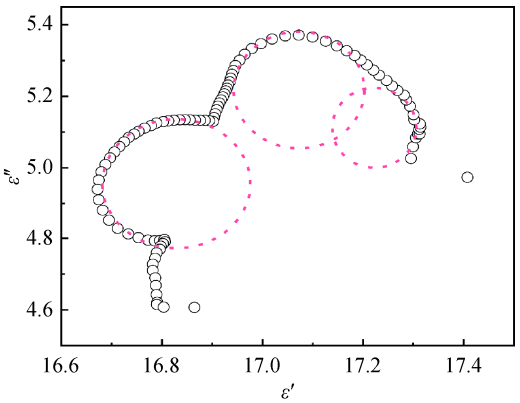
其中：Z_{in} 是材料的输入阻抗；$\varepsilon_{\text{r}}=\varepsilon'-j\varepsilon''$ 是其复介电常数；$\mu_{\text{r}}=\mu'-j\mu''$ 是其复磁导率；c 是光速；f 是频率；d 是试样的厚度。R_{L} 值为–10 dB 对应于 90% 的电磁波吸收。

图 4b 为根据复介电常数值计算的念珠状 SiC/SiO_2 纳米线/石蜡复合材料在不同厚度的反射损耗。当样品厚度为 1.8 mm 时，在 10.62 GHz 处有最优值–43.58 dB，并且有效吸收带宽(R_{L} <–10 dB)在 X 波段达到 2.32 GHz。从图 4b 最小 R_{L} 值随厚度变化的分布趋势曲线可以看出，在较薄的厚度范围内，念珠状 SiC/SiO_2 纳米线/石蜡复合材料可实现优异的吸波效果。

对于介电损耗型吸波材料，Debye 偶极弛豫是一个重要的机制。根据 Debye 弛豫定律，物质的 ε'' 和 ε'之间的关系可表示为[32]：

$$\left(\varepsilon'-\frac{\varepsilon_{\text{s}}+\varepsilon_{\infty}}{2}\right)^2+(\varepsilon'')^2=\left(\frac{\varepsilon_{\text{s}}-\varepsilon_{\infty}}{2}\right)^2 \tag{7}$$

其中：ε_{s} 为静态介电常数；ε_{∞} 为随频率变化的介电常数的极限值。通过分析可知 ε''和 ε'的函数关系应该是一个半圆形，这个半圆被称 Cole-cole 半圆，其中每个半圆代表 1 个 Debye 弛豫过程。图 5 显示了多个半圆，这意味着存在多个 Debye 弛豫过程。在外部交变电磁场下，SiC 纳米线界面中的电荷滞后，造成弛豫现象导致电磁波能量的损耗。



ε′ is real part of dielectric constant; ε″ is imaginary part of dielectric constant.

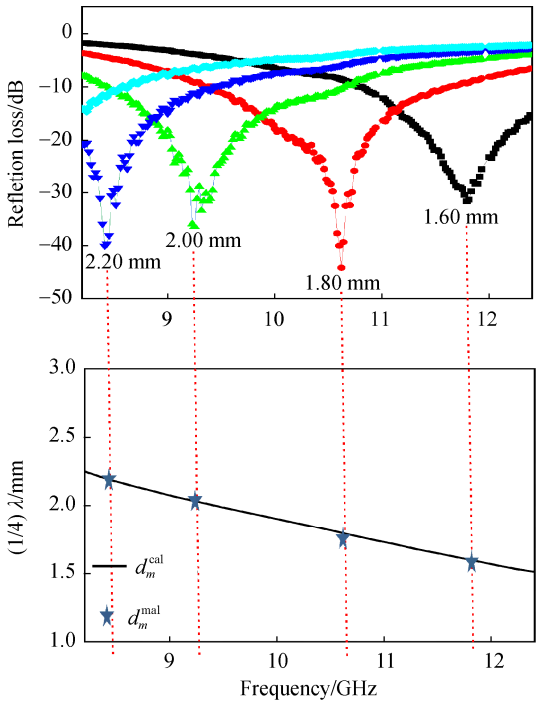
图 5　念珠状 SiC/SiO_2 纳米线/石蜡复合材料 Cole–Cole 半圆

Fig. 5　Cole–cole semicircles for beaded SiC/SiO_2 nanowires/ paraffin composite

根据共振吸收理论[33]，当电磁波入射到理想的吸收体样品上时，在匹配频率 f 下的预测匹配厚度 d_m^{mal} 为：

$$d_m^{\text{cal}}=\frac{c}{4f\left(\sqrt{|\mu(f)\varepsilon(f)|}\right)} \tag{8}$$

其中：$\mu(f)$和 $\varepsilon(f)$分别为在频率 f 下的复磁导率和介电常数。根据式(8)计算得到的厚度(d_m^{cal})(如图 6 所示)，与反射损耗结果得到的测试厚度(d_m^{mal})(如图 6 所示)相吻合。随着样品厚度的增加，念珠状 SiC/SiO_2 纳米线/石蜡复合材料的特征峰向低频偏移。表明念珠状 SiC/SiO_2 纳米线的电磁波吸收性能遵循 1/4 波长定律。



λ is wavelength.

图 6　念珠状 SiC/SiO_2 纳米线/石蜡复合材料在不同厚度的反射损耗图与念珠状 SiC/SiO_2 纳米线/石蜡复合材料匹配厚度(d_m^{mal})与计算厚度(d_m^{cal})的关系

Fig. 6　Reflection loss (R_{L}) curves of the beaded SiC/SiO_2 nanowires/paraffin composites with different thickness and the frequency dependence of matching thickness (d_m^{mal}) and calculated thickness (d_m^{cal}) for beaded SiC/SiO_2 nanowires/ paraffin composites

根据以上分析可知，念珠状 SiC/SiO_2 纳米线的电磁损耗机制主要来自以下 3 个方面：1) 在石蜡基体中，交错分散的 SiC 纳米线形成了复杂的三维网络结构，使得由变化磁场引起的微电流沿着 SiC 纳米线迁移运动，将电磁波转化成热能，引起电磁波能量的耗散；2) 念珠状 SiC/SiO_2 纳米线具有较大的比表面积，纳米线上存在大量的堆垛层错，在碳化硅晶体结构中引入了大量的空位、层错，导致电荷

分布失衡，在电磁作用下形成电子极化，进而损耗电磁波能量；3) SiC 纳米线被球状的二氧化硅包裹着，引入了更多的界面，电磁波穿过这些小球，一部分电磁波能量被界面消耗掉。

表 1 列出了一些文献中 SiC 材料的电磁波吸收性能。与以往制备的碳化硅材料相比，本工作制备的念珠状 SiC/SiO_2 纳米线具有更强的电磁波吸收性能和更薄的厚度。因此，本工作研制的念珠状 SiC/SiO_2 纳米线是一种具有成本低、质量轻、厚度薄、吸波能力强等特点的新型电磁波吸收剂。

表 1　SiC 材料的电磁波吸收性能对比

Table 1　Comparison of electromagnetic absorption properties of SiC samples

Sample	Minimal R_L/dB	Corresponding f_m/GHz	Corresponding t_m/mm	Absorption bandwidth (R_L<–10 dB)	Reference
SiC powders	–35.00	9.20	1.5	1.34	[34]
SiC nanofibers	–19.90	10.60	2.0	2.50	[35]
SiC whiskers	–25.40	9.50	2.4	2.00	[36]
SiC nanowires	–18.02	14.28	4.0	1.70	[21]
SiC fibers	–16.00	9.30	3.2	2.60	[37]
SiC microtubes	–23.90	17.50	1.0	2.00	[38]
Beaded SiC/SiO_2 nanowires	–44.23	10.62	1.8	2.32	This work

3　结论

以竹炭和二氧化硅为原料，采用碳热还原法成功地制备了具有堆垛层错的念珠状 SiC/SiO_2 纳米线。念珠状 SiC/SiO_2 纳米线/石蜡复合材料，在厚度为 1.8 mm，频率为 10.62 GHz 时获得的最小 R_L 值为–43.58 dB，并且有效吸收带宽(R_L<–10 dB)在 X 波段达到 2.32 GHz。念珠状 SiC/SiO_2 纳米线的电磁波吸收性能是由导电损耗，极化损耗和界面损耗协同引起的。念珠状 SiC/SiO_2 纳米线在制备厚度薄且质量轻的电磁波吸收材料方面有着广阔的应用前景。

参考文献:

[1] LIN J C. Human exposure to RF, microwave, and millimeter-wave electromagnetic radiation [Health Effects][J]. IEEE Microw Mag, 2016, 17(6): 32–36.

[2] INSKIP P D, TARONE R E, HATCH E E, et al. Cellular-telephone use and brain tumors[J]. N Engl J Med, 2001, 344(2): 79–86.

[3] WIART J, HADJEM A, WONG M F, et al. Analysis of RF exposure in the head tissues of children and adults[J]. Phys Med Biol, 2008, 53(13): 3681.

[4] QUAN L, QIN F X, ESTEVEZ D, et al. Magnetic graphene for microwave absorbing application: Towards the lightest graphene-based absorber[J]. Carbon, 2017, 125: 630–639.

[5] LI X, YIN X, SONG C, et al. Self-assembly core–shell graphene bridged hollow mxenes spheres 3D foam with ultrahigh specific EM absorption performance[J]. Adv Funct Mater, 2018, 28(41): 1803938.

[6] 武志红, 李好婕, 张聪, 等. 竹炭/SiC复合材料结构及其吸波性能[J]. 硅酸盐学报, 2018, 46(1): 150–155.
WU Zhihong, LI Yujie, ZHANG Cong, et al. J Chin Ceram Soc, 2018, 46(1): 150–155.

[7] 张雪珂, 向军, 吴志鹏, 等. Co含量对轻质微波吸收剂C/Co纳米纤维吸波性能的影响[J]. 无机材料学报, 2017, 32(12):1299–1307.
ZHANG Xueke, XIANG Jun, WU Zhipeng, et al. J Inorg Mater (in Chinese), 2017, 32(12):1299–1307.

[8] LONG C, XU B, HAN C, et al. Flaky core–shell particles of iron@ iron oxides for broadband microwave absorbers in S and C bands[J]. J Alloy Compd, 2017, 709: 735–741.

[9] 葛超群, 汪刘应, 刘顾. 碳纳米管/平面各向异性羰基铁复合材料的液相共混法制备及其电磁性能[J]. 复合材料学报, 2018, 35(7): 1912–1920.
GE Chaoqun, WANG Liuying, LIU Gu. Acta Mater Compos Sin (in Chinese), 2018, 35(7): 1912–1920.

[10] WU H, WU G, WANG L. Peculiar porous α-Fe_2O_3, γ-Fe_2O_3 and Fe_3O_4 nanospheres: Facile synthesis and electromagnetic properties[J]. Powder Technol, 2015, 269: 443–451.

[11] 褚海荣, 陈平, 于祺, 等. FeCo/石墨烯的制备和吸波性能[J]. 材料研究学报, 2018, 32(3): 161–167.
CHU Hairong, CHEN Ping, YU Qi, et al. Chin J Mater Res (in Chinese), 2018, 32(3): 161–167.

[12] WU F, SUN M, JIANG W, et al. A self-assembly method for the fabrication of a three- dimensional (3D) polypyrrole (PPy)/poly (3, 4-ethylenedioxythiophene) (PEDOT) hybrid composite with excellent absorption performance against electromagnetic pollution[J]. J Mater Chem C, 2016, 4(1): 82–88.

[13] YE F, SONG Q, ZHANG Z, et al. Direct growth of edge-rich graphene with tunable dielectric properties in porous Si_3N_4 ceramic for broadband high-performance microwave absorption[J]. Adv Funct Mater, 2018, 28(17): 1707205.

[14] FANG Y, WENYAN D, RAN M, et al. Silicon oxycarbide powders doped with *in situ* grown sic nanowires: Synthesis and dielectric properties[J]. Rare Metal Mat Eng, 2019, 48(1): 39–43.

[15] 穆阳, 邓佳欣, 李皓, 等. 两种连续SiC纤维的高温介电及吸波性能对比[J]. 无机材料学报, 2018, 33(4): 427–433.
MU Yang, DENG Jiaxin, LI Hao, et al. J Inorg Mater (in Chinese), 2018, 33(4): 427–433.

[16] LI W, GUO H. A novel and green fabrication of 3C-SiC nanowires from coked rice husk-silicon mixture and their photoluminescence property[J]. Mater Lett, 2018, 215: 75–78.

[17] WU R, ZHOU K, YUE C Y, et al. Recent progress in synthesis, properties and potential applications of SiC nanomaterials[J]. Prog Mater Sci, 2015, 72: 1–60.

[18] KRAUS H, SOLTAMOV V A, RIEDEL D, et al. Room-temperature quantum microwave emitters based on spin defects in silicon carbide[J]. Nat Phys, 2014, 10(2): 157.

[19] HU W, WANG L, WU Q, et al. Preparation, characterization and microwave absorption properties of bamboo-like *β*-SiC nanowhiskers by molten-salt synthesis[J]. J Mater Sci-Mater Electron, 2014, 25(12): 5302–5308.

[20] CHIU S C, YU H C, LI Y Y. High electromagnetic wave absorption performance of silicon carbide nanowires in the gigahertz range[J]. J Phys Chem C, 2010, 114(4): 1947–1952.

[21] SUN Z G, WANG S J, QIAO X J, et al. Synthesis and microwave absorbing properties of SiC nanowires[J]. Appl Phys A, 2018, 124(12): 802.

[22] LAN X, LIANG C, WU M, et al. Facile synthesis of highly defected silicon carbide sheets for efficient absorption of electromagnetic waves[J]. J Phys Chem C, 2018, 122(32): 18537–18544.

[23] ZHANG H, XU Y, ZHOU J, et al. Stacking fault and unoccupied densities of state dependence of electromagnetic wave absorption in SiC nanowires[J]. J Mater Chem C, 2015, 3(17): 4416–4423.

[24] LUO X, MA W, ZHOU Y, et al. Synthesis and photoluminescence property of silicon carbide nanowires *via* carbothermic reduction of silica[J]. Nanoscale Res Lett, 2010, 5(1): 252.

[25] SEO W S, KOUMOTO K, ARIA S. Morphology and stacking faults of *β*-silicon carbide whisker synthesized by carbothermal reduction[J]. J Am Ceram Soc, 2000, 83(10): 2584–2592.

[26] TATEYAMA H, SUTOH N, MURAKAWA N. Quantitative analysis of stacking faults in the structure of SiC by X-ray powder profile refinement method[J]. J Ceram Soc Jpn, 1988, 96(1118): 1003–1011.

[27] ZHANG M, LI Z, WANG T, et al. Preparation and electromagnetic wave absorption performance of Fe_3Si/SiC@ SiO_2 nanocomposites[J]. Chem Eng J, 2019, 362: 619–627.

[28] POURASAD J, EHSANI N, KHALIFESOLTANI S A. Preparation and characterization of SiO_2 thin film and SiC nanofibers to improve of graphite oxidation resistance[J]. J Eur Ceram Soc, 2016, 36(16): 3947–3956.

[29] MAROUFI S, MAYYAS M, SAHAJWALLA V. Novel synthesis of silicon carbide nanowires from e-waste[J]. ACS Sustain Chem Eng, 2017, 5(5): 4171–4178.

[30] CHEN S, LI W, LI X, et al. One-dimensional SiC nanostructures: Designed growth, properties, and applications[J]. Prog Mater Sci, 2019, 104: 138–214.

[31] SUMFLETH J, PREHN K, WICHMANN M H G, et al. A comparative study of the electrical and mechanical properties of epoxy nanocomposites reinforced by CVD and arc-grown multi-wall carbon nanotubes[J]. Compos Sci Technol, 2010, 70(1): 173–180.

[32] COLE K S, COLE R H. Dispersion and absorption in dielectrics I. Alternating current characteristics[J]. J Chem Phys, 1941, 9(4): 341–351.

[33] INUI T, KONISHI K, ODA K. Fabrications of broad-band RF-absorber composed of planar hexagonal ferrites[J]. IEEE Trans Magn, 1999, 35(5): 3148–3150.

[34] WANG Y, XIAO P, ZHOU W, et al. Microstructures, dielectric response and microwave absorption properties of polycarbosilane derived SiC powders[J]. Ceram Int, 2018, 44(4): 3606–3613.

[35] ZHOU W, LONG L, XIAO P, et al. Silicon carbide nano-fibers *in-situ* grown on carbon fibers for enhanced microwave absorption properties[J]. Ceram Int, 2017, 43(7): 5628–5634.

[36] KUANG J, JIANG P, RAN F, et al. Conductivity-dependent dielectric properties and microwave absorption of Al-doped SiC whiskers[J]. J Alloy Compd, 2016, 687: 227–231.

[37] LIU X, ZHANG L, YIN X, et al. The microstructure and electromagnetic wave absorption properties of near-stoichiometric SiC fibre[J]. Ceram Int, 2017, 43(3): 3267–3273.

[38] MENG S, GUO X, JIN G, et al. Preparation and microwave absorbing properties of SiC microtubes[J]. J Mater Sci, 2012, 47(6): 2899–2902.