第 48 卷第 3 期　　硅　酸　盐　学　报　　Vol. 48，No. 3
2020 年 3 月　　JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY　　March，2020
http://www.gxyb.cbpt.cnki.net　　**DOI**：10.14062/j.issn.0454-5648.20190255

燃烧合成碳化硼粉体及其介电吸波性能

丁冬海，白　冰，肖国庆，种小川，王　晶，李子沛
(西安建筑科技大学材料科学与工程学院，西安 710055)

摘　要：以炭黑和 B_2O_3 为原料、金属 Mg 为还原剂，采用燃烧合成法制备 B_4C 粉体。以燃烧合成的 B_4C 粉体为吸收剂、石蜡为结合剂制备试样，采用矩形波导法测试不同 B_4C 掺量试样在 *X* 波段(8.2~12.4 GHz)的复介电常数，基于传输线理论计算试样反射损耗。结果表明：燃烧合成产物酸洗后可除去 MgO、$Mg_3B_2O_6$ 等杂质相，产物晶粒尺寸为 0.4~1.0 μm，为斜六方晶体结构；试样复介电常数实部和虚部随 B_4C 掺量增加而增大，掺量 50%(质量分数)时实部和虚部分别达到 19.33 和 10.40；掺量为 33%时，试样吸波性能最佳，当厚度为 2.3 mm 时，其反射损耗峰值为–21.1 dB，有效吸收频带达 2.95 GHz。说明碳化硼是具有前景的高温微波吸收剂。

关键词：燃烧合成法；碳化硼粉末；吸波性能
中图分类号：TQ174　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2020)03–0343–08
网络出版时间：2019–12–12



Dielectric and Electromagnetic Absorbing Properties of B_4C Powders Fabricated by Combustion Synthesis

DING Donghai, *BAI Bing*, *XIAO Guoqing*, *CHONG Xiaochuan*, *WANG Jing*, *LI Zipei*
(Collage of Material Science and Engineering, Xi'an University of Architectural and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: In order to evaluate the absorbing properties of B_4C ceramic absorber, B_4C powder was fabricated *via* combustion synthesis with carbon black and boron oxide as raw materials, and Mg as a reductant. The microstructure of the products was characterized by X-ray diffraction, scanning electron microscopy, Raman spectroscopy and X-ray photoelectron spectroscopy. The samples for dielectric test were prepared with B_4C powder as an absorber and paraffin as a binder, respectively. The complex permittivity of samples containing different amount of B_4C absorber was tested by a rectangular waveguide method at X band (8.2 GHz–12.4 GHz), and the reflection loss values were calculated based on the transmission line theory. The results show that the impurities such as MgO and $Mg_3B_2O_6$ can be removed by pickling. The grain size of the product is 0.4–1.0 μm with an oblique hexagonal structure. The real and imaginary parts of the complex permittivity increase with the increase of the content of B_4C powder. When the content is 50% (mass fraction), the real and imaginary parts are 19.33 and 10.40, respectively. The calculated results show that the optimum electromagnetic wave absorption performance can be obtained at B_4C powder content of 33%. The minimum reflection loss value is –21.1 dB when the thickness is 2.3 mm, and the effective bandwidth reaches 2.95 GHz. It is indicated that B_4C powder could be a promising candidate as a high-temperature microwave absorber.

Keywords: combustion synthesis; boron carbide powder; electromagnetic absorbing performance

吸波材料能够吸收或衰减入射的电磁波，并将其电磁能转换成热能耗散掉，是实现目标雷达隐身的重要手段，作为特种功能材料受到广泛关注。吸波材料的发展趋势是“厚度薄、吸收频带宽、密度低、吸收能力强”，高超声速飞行器等新型装备对吸波材料提出了宽防热、承载、耐烧蚀、高服役可靠性等苛刻要求[1]。

目前，国内外主要研究的高温吸波材料体系为 C、SiC、ZnO 体系。碳材料电导率高，对电磁波反射较强，使用时需提高其阻抗匹配性。同时，碳材料在氧化气氛中 370 ℃时开始发生氧化反应，500 ℃时氧化速率明显增大，需要通过涂覆抗氧化涂层技

收稿日期：2019–04–18。　修订日期：2019–05–16。
基金项目：国家自然科学基金(51502236，51572212，51772236)资助。
第一作者：丁冬海(1983—)，男，副教授，博士后。
Received date: 2019–04–18.　**Revised date:** 2019–05–16.
First author: DING Donghai (1983–), male, Associate Professor, Postdoctor.
E-mail: dingdongxauat@163.com

术来提高其抗氧化性能。SiC 材料熔点高，高温稳定性优越，且自身为半导体材料，介电性能可调，但其介电损耗较低，需要通过晶格掺杂或其他方式来提高其损耗能力。纯 ZnO 的电导率较低，也需要通过晶格掺杂来提高其损耗能力[2]。

B_4C 作为高温吸波材料，具有明显优势：1) B_4C 为 *P* 型半导体材料，带隙为 2.09 eV，低于 SiC (2.86 eV)[3]，电子由价带被激发到导带更加容易，因此电导率更高、损耗能力更强；2) B_4C 熔点为 2 450 ℃，高温稳定性好，抗氧化性能优异；3) B_4C 硬度高、力学强度高、抗热震性能优异。目前 B_4C 吸波性能方面的研究鲜有报道。

燃烧合成法具有工艺周期短、能源消耗低、所需设备简单，产物纯度高等优点，是目前制备 B_4C 粉体的重要方法[4]。本工作以炭黑和氧化硼为原料，金属镁为还原剂，采用燃烧合成法制备 B_4C 粉体。采用 XRD、SEM、Raman 对产物进行微观表征。以燃烧合成 B_4C 为吸收剂，石蜡为结合剂，制备试样，采用矩形波导法测试不同 B_4C 掺量试样在 *X* 波段(8.2~12.4 GHz)的复介电常数，基于传输线理论计算试样反射损耗，研究 B_4C 粉末在石蜡结合剂中掺量对复介电常数和反射损耗的影响，期待能够丰富高温吸波材料体系[5]。

1 实验

1.1 主要原料

炭黑(天津市天力化学试剂有限公司，分析纯)；金属镁粉(国药集团化学试剂有限公司，分析纯)；氧化硼(西安市优立电子化工有限责任公司，分析纯)；钛粉(北京兴荣源科技有限公司，分析纯)；浓盐酸(37%，北京化工试剂总厂，分析纯)。

1.2 试样制备

采用镁热法制备 B_4C[6]。按照反应式(1)配比，取 4.86 g 镁粉 4.73 g 氧化硼以及 0.41 g 炭黑置于坩埚中进行混料，经 60 min 混合均匀后，称取混合粉置于模具中，利用粉末压片机在 1 MPa 下压制试样并保压 5 min，制得直径为 20 mm，高度约在 23~25 mm 的圆柱状试样。连接好自蔓延高温反应炉内的钨丝后，将试样和引燃剂放于反应炉内，用石墨块垫高使得引燃剂刚好与钨丝接触，封闭反应炉，先抽真空，再通入 0.1 MPa 的氩气，然后再抽真空、通氩气，如此反复 3 次，将炉内压力抽至 –0.09 MPa 以证明炉内空气被排尽。通过将炉外变压器调制 20 V 左右，诱发反应后，迅速断电。待炉内温度降至室温后，排出炉内气体，打开炉门，取出试样进行研磨。合成反应按照下面步骤进行：

$$6Mg+2B_2O_3+C=B_4C+6MgO \quad (1)$$

同时这个步骤又分 2 步进行：

$$6Mg+2B_2O_3=4B+6MgO \quad (2)$$

$$4B+C=B_4C \quad (3)$$

考虑到反应过程中会产生副产物硼酸镁($Mg_3B_2O_6$)，为得到纯净的 B_4C，需将燃烧合成产物进行研磨、酸洗、水洗处理以除掉氧化镁(MgO)和 $Mg_3B_2O_6$。将浓盐酸稀释至 10%稀盐酸，缓慢加入盛有产物粉末的烧杯中，用玻璃棒搅拌 0.5 h 后，再将烧杯置于 40 ℃的恒温干燥箱中，酸洗 7 d，每隔 24 h 搅拌 1 次。利用抽滤机将酸洗后的试样用去离子水进行水洗，直至水洗后溶液 pH=7 为止，再将水洗后试样置于 80 ℃的恒温干燥箱中干燥 24 h，最后收集水洗干燥后的产物。

将酸洗烘干后的 B_4C 粉末按照 20%、25%、33%、50%掺量与结合剂石蜡进行混合，分别标记为 B_4C-20，B_4C-25，B_4C-33，B_4C-50。将石蜡融化后与 B_4C 粉末搅拌均匀，倒入标准法栏，待其冷却后将块状试样打磨至和法栏大小完全统一，同时制备了未掺入 B_4C 粉体的纯石蜡试样作为对比记作 B_4C-0，测定其介电常数。

1.3 试样表征

采用 X 射线衍射仪测试样品的晶体结构，用 Cu K_α (λ=0.154 06 nm)射线，工作电压 50 kV，电流 100 mA，扫描范围 20°~90°，扫描速率 2(°)/min，步长 0.02°。采用日本日立公司的 SU6600 型可变真空度场发射扫描电子显微镜和能谱仪对燃烧合成最终产物进行显微结构分析及微区成分分析。采用 Invia 显微共焦 Raman 光谱测试样品的分子结构，激光波长为 785 nm，扫描范围 100~3 200 cm^{-1}，空间分辨率为横向 1 μm，纵向 2 μm。采用 AXIS ULTRA^{DLD} 型 X 射线光电子能谱仪对样品进行 XPS 分析。采用 Agilent E8362B 矢量网络分析仪测试材料的介电常数。

2 结果与讨论

2.1 微观表征

图 1 为以炭黑为原料燃烧合成产物酸洗与未酸洗对比的 XRD 谱。从图 1 可知，未酸洗的产物中主要的物相是 MgO 和 $Mg_3B_2O_6$，酸洗后的产物中主要的物相是 B_4C，且碳化硼的衍射峰与标准卡片的衍射峰吻合度极高。这是因为未酸洗的情况

下：自蔓延反应在高温下进行，反应过程剧烈，反应中体系温度迅速升高，低沸点的 Mg 产生部分挥发，从而导致 MgO 直接与 B_2O_3 反应生成 $Mg_3B_2O_6$。同时，B_4C 属于轻元素相，衍射峰相对于 MgO 和 $Mg_3B_2O_6$ 来说强度很低，但是，生成的 MgO 以及副产物 $Mg_3B_2O_6$ 在酸洗过程中与盐酸反应，生成了可溶于水的物质经过水洗抽滤后除去。酸洗后，XRD 谱中只能看到 B_4C 的衍射峰，且峰形尖锐突出，可以说明产物 B_4C 结晶程度高。

同时将实验得到的 B_4C 衍射峰与 B_4C 标准卡片的特征峰对比。可以得知，产物的 2θ 值、d 值与标准卡片值完全吻合。从低角度衍射峰开始标定，发现其依次对应着(101)、(003)、(012)、(110)、(104)、(021)、(205)、(107)、(125)、(018)、(220)晶面的衍射峰，这说明生成的产物为斜六方晶体结构的 B_4C。

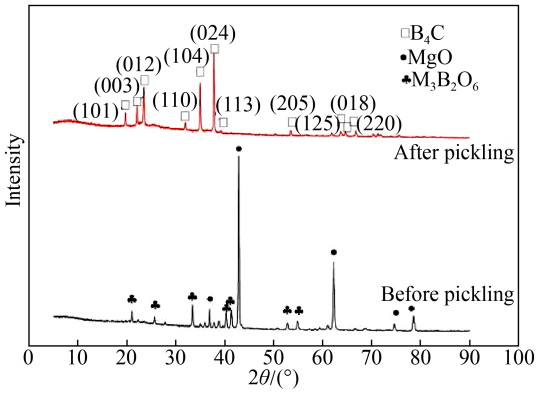
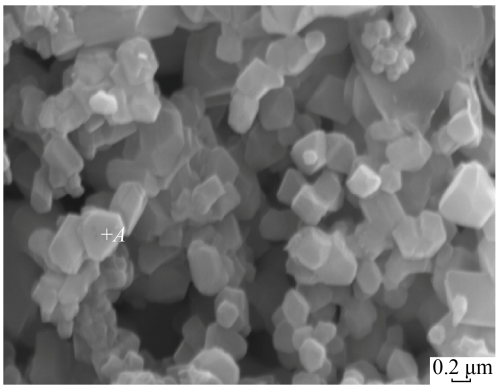


图 1　酸洗前后产物的 XRD 谱

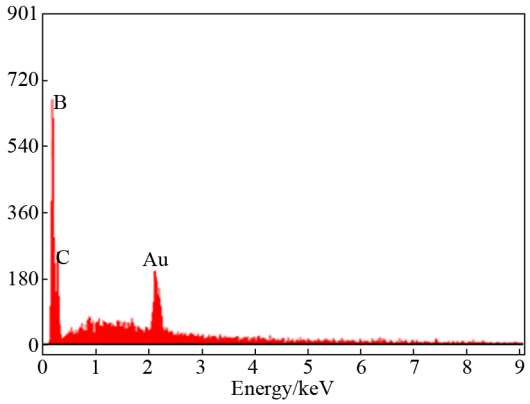
Fig. 1　XRD spectra of before pickling and after pickling products

图 2 为 B_4C 粉末的电子显微镜照片和能谱分析。由图 2 可见：B_4C 的粒度主要分布在 0.4~1.0 μm 之间，表面光滑，晶体结构发育完整，晶粒有团聚现象，晶粒与晶粒之间存在空隙。晶粒与晶粒之间的空隙原本为 MgO 和 $Mg_3B_2O_6$，酸洗后二者分解为能溶于水的物质经水洗后除去产生空隙。对一完整晶粒进行能谱分析后也进一步证实酸洗后的产物中晶粒全部为 B_4C 晶粒。

图 3 为产物的 Raman 光谱。从图 3 分析可知，低频双峰 267 和 320 cm^{-1} 峰为 B_4C 的 A_{lg} 完全对称基本模式，这与 B_4C 结构中链与二十面体的连接方式有关[7]。位于 479 和 530 cm^{-1} 处的峰为 B_4C 的 E_g 模式，这与垂直于(111)方向的 C—B—C 链的旋转和 $B_{11}C$ 二十面体的振动模式[8]有关。高频四峰 721、822、1 001、1 086 cm^{-1} 峰，它们是 $B_{11}C$ 二十面体间 B—B 键的呼吸震动模式[9]。而双峰 1 350 cm^{-1} (D 峰)、1 585 cm^{-1}(G 峰)，是由于样品中残存的炭黑中 Sp^2 杂化碳引起。B_4C 准确的化学计量式为 $B_{12}C_3$，这是由于 $B_{11}C$ 十二面体与 C—B—C 链通过共价键直接连接成菱形六面体结构，由此进一步证实产物中 B_4C 为斜方六面体结构。



(a) SEM photograph



(b) EDS spectrum of point A in Fig. 2(a)

图 2　酸洗后产物的 SEM 照片和能谱

Fig. 2　SEM photograph and energy spectrum of products after pickling

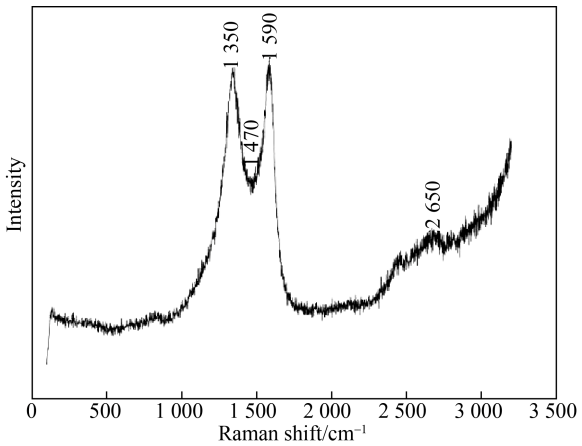
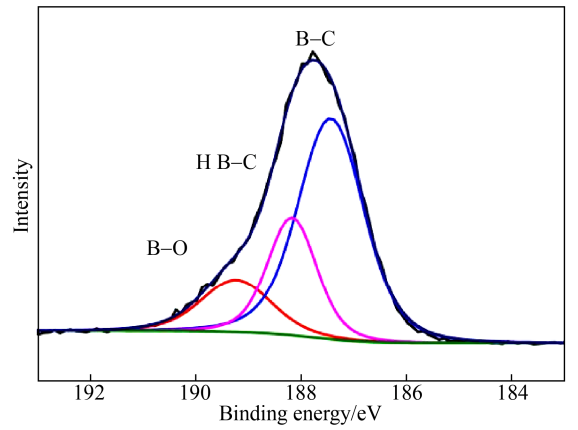


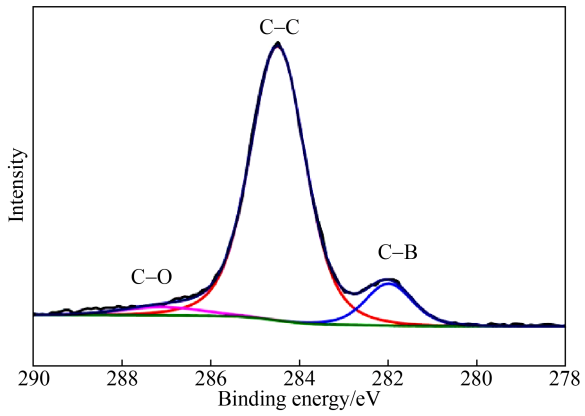
图 3　酸洗后产物的 Raman 光谱

Fig. 3　Raman spectra of products after pickling

图 4 为产物的 X 射线光电子能谱分析。图 4a 和图 4b 分别为 B1s 和 C1s 的高分辨率扫描图。由 X 射线光电子标准谱图可知，B_4C 的 B1s 标准结合能为 186.90 eV，产物的 B1s 标准结合能为 187.78 eV。同时，B_4C 的 C1s 标准结合能为 283.00 eV[10–11]，产物的 C1s 标准结合能为 282.15 eV。因此证明产物为 B 和 C 化学计量比 4:1 的 B_4C。



(a) B1s



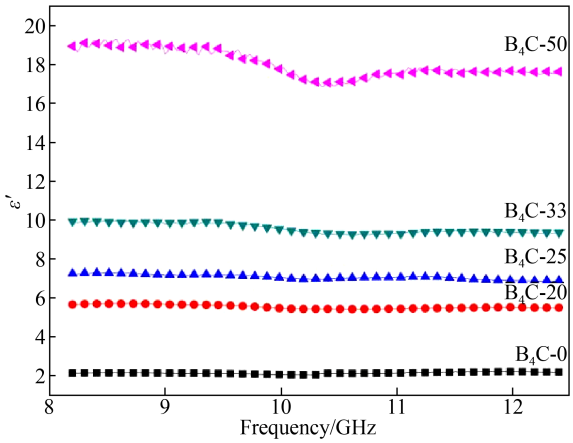
(b) C1s

图 4 酸洗后产物的 X 射线光电子能谱

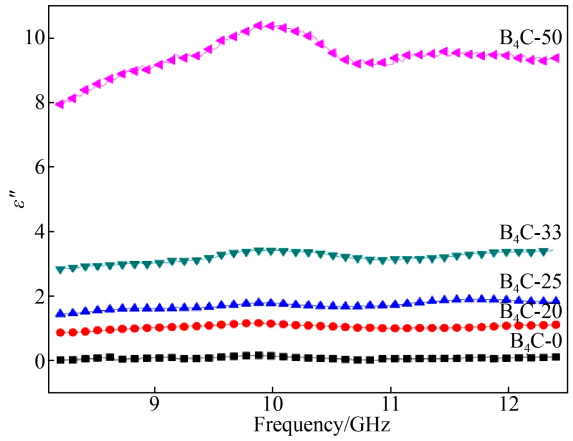
Fig. 4 X-ray photoelectron spectroscopy of products after pickling

2.2 B_4C 粉体的介电性能

不同掺量试样的相对介电常数如图 5 所示。从图 5 可以看出，B_4C-0 的实部在 2.0~2.1 之间，虚部在 0~0.1 之间，说明 B_4C-0 几乎无介电损耗能力。随着 B_4C 掺量的增加，介电常数的实部和虚部有大幅提高，B_4C-50 实部和虚部分别达到 19.33 和 10.40，无论是实部还是虚部显著高于 B_4C-20、B_4C-25、B_4C-33。这说明，B_4C 掺量的增加，使试样储存电磁波和消耗电磁波的能力均有明显提高。同时可以看出，在 9.5~10.0 GHz 时，B_4C-50 试样的实部和虚部分别有明显的下降和上升。此时电场变化的速度快于电介质的极化速度，极化强度滞后于外加电场强度，导致介电常数实部下降，虚部上升，产生较强的介电损耗，这种实部和虚部随频率变化的曲线是频率色散效应和谐振吸波机制的体现[12]。这表明，在 B_4C 晶粒内部存在较完整的导电网络。而 B_4C-0、B_4C-20、B_4C-25、B_4C-33 中，B_4C 的含量较少，其实部和虚部随频率变化的现象均不明显。



(a) The real part of complex permittivity



(b) The imaginary part of complex permittivity

图 5 X 波段不同 B_4C 掺量试样的介电常数

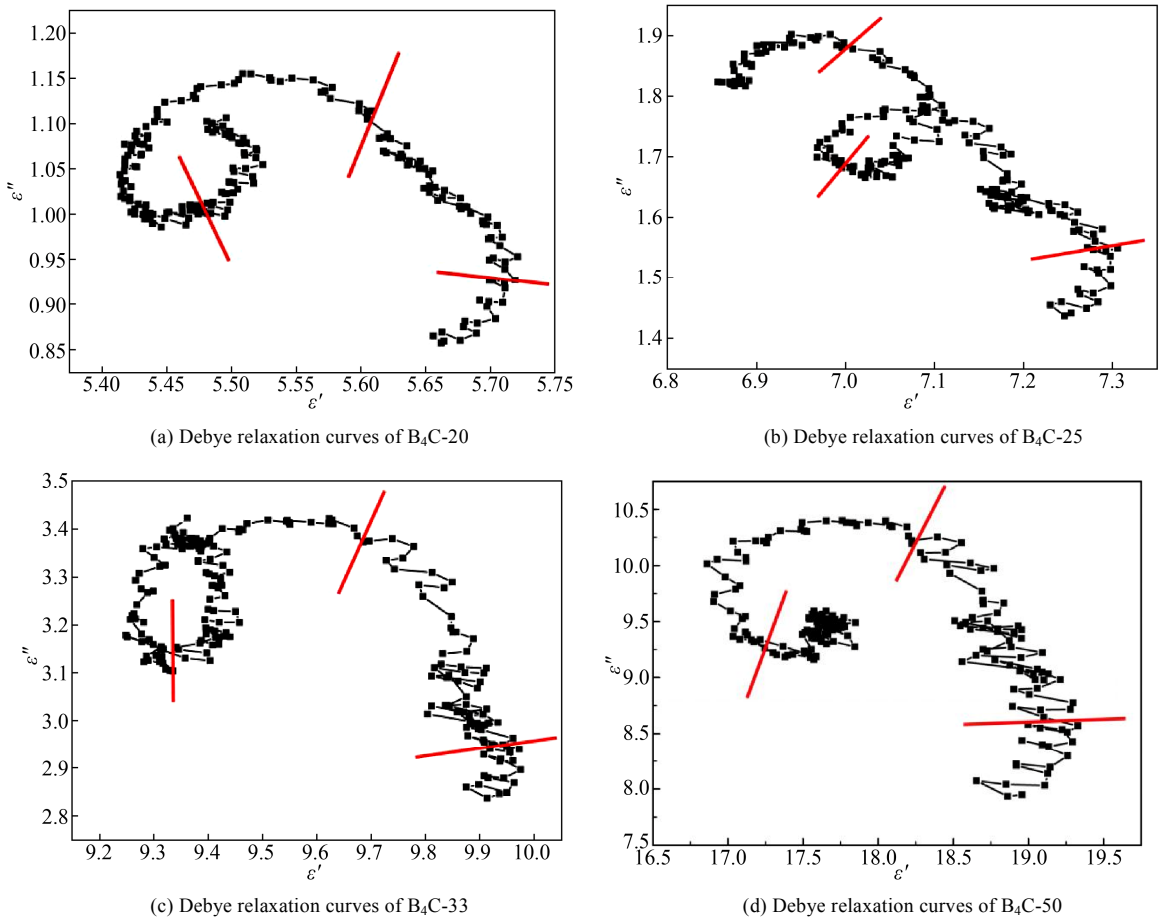
Fig. 5 Permittivity of different B_4C content of samples in the X band

试样的介电性能 Debye 弛豫模型如图 6 所示。在 Debye 弛豫模型中，ε'和 ε''的关系如式(4):

$$\left(\varepsilon'-\frac{\varepsilon_s-\varepsilon_\infty}{2}\right)^2+(\varepsilon'')^2=\left(\frac{\varepsilon_s+\varepsilon_\infty}{2}\right) \tag{4}$$

其中：ε_s 为静态介电常数；ε_∞为光频介电常数。由式(4)可知，对于标准介电损耗型吸波剂，ε'和 ε''的曲线应该表现为一个完整的半圆，称为 Cole-Cole 半圆。每个完整的半圆应该对应一种 Debye 弛豫机

制。由图 6a~图 6d 可以看出，在 4 组曲线中，均无完整的半圆，只存在 3 个较小的半圆片段。这说明其内部存在多重 Debye 弛豫机制。介电弛豫主要是由于极化过程滞后于电场的变化速度引起的。在 4 组吸波材料中，B_4C 自身的介电极化起主导作用。同时由于其内部结构的复杂性也引起了多种介电极化，如碳化硼–石蜡界面极化，碳化硼–碳化硼界面极化，或在界面和缺陷处产生的电偶极子极化，因此表现出多重 Debye 弛豫机制，这将使材料在宽频条件下的吸波表现更加优异。



(a) Debye relaxation curves of B_4C-20　(b) Debye relaxation curves of B_4C-25

(c) Debye relaxation curves of B_4C-33　(d) Debye relaxation curves of B_4C-50

图 6　B_4C-20,B_4C-25,B_4C-33 和 B_4C-50 的 Debye 弛豫模型

Fig. 6　Debye relaxation curves of B_4C of B_4C-20, B_4C-25, B_4C-33, and B_4C-50

2.3　B_4C 粉体的吸波性能

为了说明 B_4C 的电磁损耗性能，计算了其介电损耗角正切，如图 7 所示。计算公式如式(5)。

$$\tan\delta\varepsilon = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \tag{5}$$

损耗角正切值体现了材料将电磁能转化为热能消耗掉的能力[13]。如图 7 所示，介电损耗角正切值随着 B_4C 掺量的增加而增大，B_4C-50 的介电损耗角正切值最大，在 0.4~0.6 之间变化；B_4C-33 的损耗角正切值在 0.28~0.35 之间；B_4C-25 的损耗角正切值 0.20~0.25 之间；B_4C-20 的损耗角正切值最小，在 0.15~0.19 之间变化。这是因为，随着 B_4C 掺量增加，能够发生极化的 B_4C 晶粒数量增加，单个 B_4C 晶粒

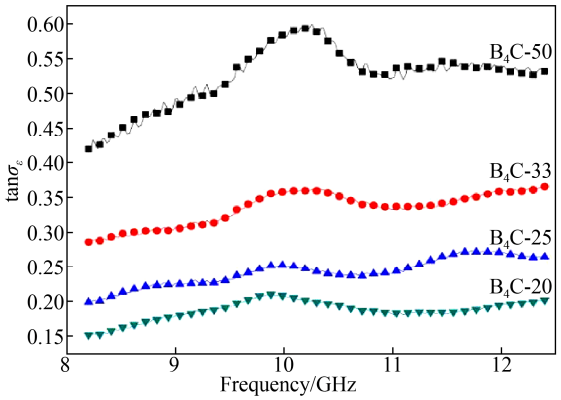


图 7　X 波段 B_4C-20,B_4C-25,B_4C-33 和 B_4C-50 的介电损耗角正切

Fig. 7　Dielectric loss factor of B_4C in the X band of B_4C-20, B_4C-25, B_4C-33, and B_4C-50

对电磁波的损耗增强，大量 B_4C 粒子之间的散射作用也得到加强。

理想的吸波材料必须同时满足以下 2 个条件：1) 吸波材料与自由空间的阻抗匹配好，电磁波的反射少，大多数的电磁波能够进入吸波材料内部，而非在表面被反射；2) 进入材料内部的电磁波尽可能多的被损耗，即要求材料有足够高的复介电常数。因此计算了不同掺量试样的阻抗。阻抗的计算公式如(6)。

$$\frac{Zin}{Z_0}=\sqrt{\frac{\mu r}{\varepsilon r}}\tan(\gamma d) \tag{6}$$

其中：Z_{in} 为吸波材料的阻抗；Z_0 为自由空间的阻抗，若二者相等，那么电磁波可以完全进入材料内部而不发生反射，所以该比值越接近于 1 越有利于吸波材料对电磁波的吸收[14]。对阻抗进行计算，得到阻抗–频率曲线如图 8 所示。可以看出，B_4C-20 的阻抗最大，在 0.41~0.42 之间变化，且阻抗随频率变化不大。随着 B_4C 掺量的增加，阻抗逐渐减小，B_4C-50 的阻抗仅有 0.21~0.22。因此 B_4C-20 的阻抗匹配性最好，电磁波能够进入吸波剂的比例最大，这是由于，随着 B_4C 掺量的增大，相对介电常数增大，由式(6)可知，其阻抗将减小，引起吸波材料的阻抗和自由空间阻抗失配。

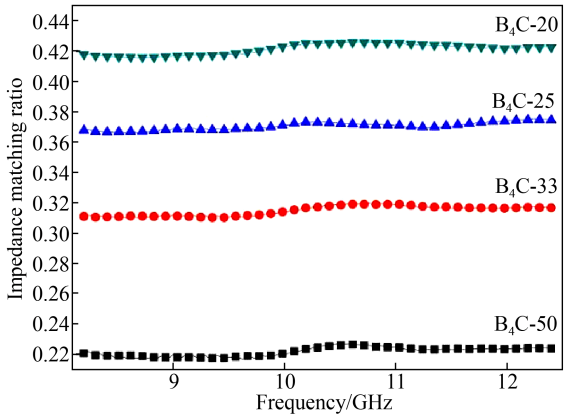


图 8 B_4C-20, B_4C-25, B_4C-33 和 B_4C-50 的阻抗–频率曲线

Fig. 8 Impedance–frequency curve of B_4C of B_4C-20, B_4C-25, B_4C-33, and B_4C-50

本工作测试所用电磁波为 *X* 波段，频率在 8.2~12.4 GHz 之间，选取频率中间值 10.006 GHz 时，不同厚度试样的反射损耗来寻找匹配厚度如图 9。由图 9 可以确定，B_4C-20 的匹配厚度为 3.5 mm，B_4C-33 的匹配厚度为 2.5 mm，B_4C-25 的匹配厚度为 2.9 mm，B_4C-50 的匹配厚度为 2 mm。根据每个试样不同的匹配厚度，在 1.5~3.9 mm 范围内每隔 0.5 mm 共选取 6 个厚度做出其反射损耗–频率曲线如图图 10a~图 10d 所示。计算结果显示，B_4C-33 在 2.3 mm 时吸波性能最好，所以在图 10c 中加入了 2.3 mm 曲线。

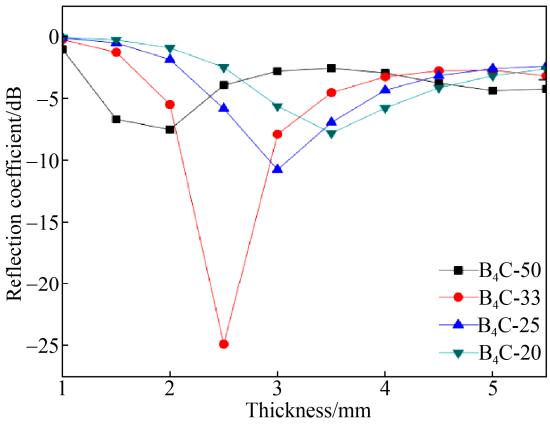
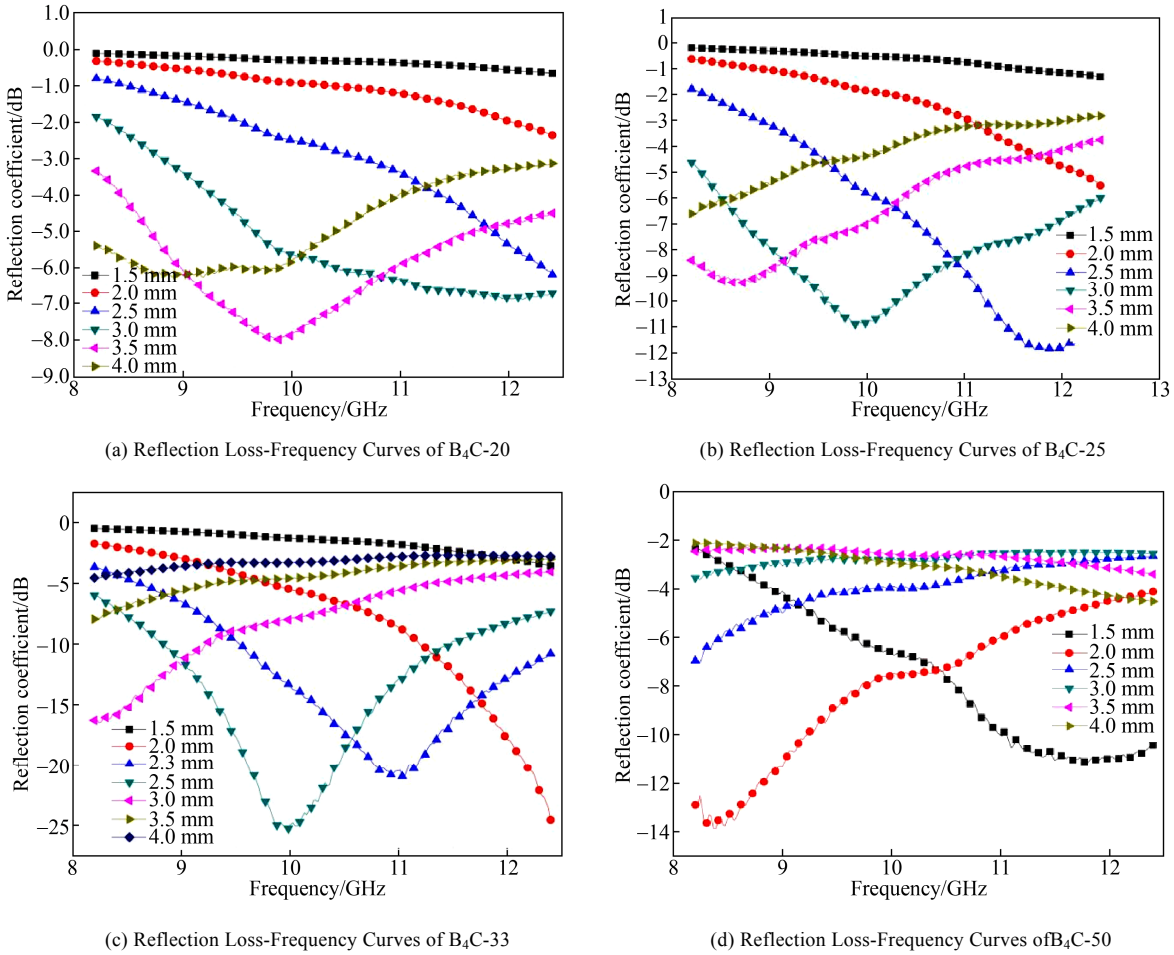


图 9 10.006 GHz 时 B_4C-20,B_4C-25,B_4C-33 和 B_4C-50 的厚度–反射损耗关系曲线

Fig. 9 Thickness– reflection loss curves at 10.006GHz of B_4C-20, B_4C-25, B_4C-33, and B_4C-50 at 10.006 GHz

反射损耗小于–10 dB 的频率范围被定义为有效吸收频带，表示仅反射 10%的电磁波并且衰减 90%以上电磁波的频率范围，有效吸收范围和吸收峰值通常用来评估材料的吸波性能。由图 10c 可知，当厚度为 2.3 mm 时，B_4C-33 的反射损耗在 11.01 GHz 可达–21.1 dB，且在 9.45 GHz~12.40 GHz 频率范围内均可有效吸收。同时，B_4C-50 试样和 B_4C-25 能够有效吸收的范围非常小，B_4C-20 无有效吸收范围。由图 10a~图 10d 可以看出，随着厚度的增加，最大反射率所出现的位置逐渐朝着低频率的方向移动。随着 B_4C 掺量的增加，能够发生极化的 B_4C 晶粒增多，单个粒子的极化率增大。粒子增多也导致散射截面增大，B_4C 粒子之间的散射作用得到加强，对于电磁波的损耗能力增强。同时，B_4C 掺量的增加，也使得材料内部导电网络更加完善，电导率增高。电导率高的吸波剂能够提供电子迁移的媒介，而大量的电子迁移能够引起电子极化和空间电荷极化，会使介电常数实部 ε'增大，有利于更多的电能被转化成热能消散掉[15]。同时，B_4C 粒子的增多，也使得碳化硼-石蜡界面极化、碳化硼-碳化硼界面极化、或在界面和缺陷处的电偶极子极化作用得到增强，进一步提高其损耗能力。



(a) Reflection Loss-Frequency Curves of B_4C-20

(b) Reflection Loss-Frequency Curves of B_4C-25

(c) Reflection Loss-Frequency Curves of B_4C-33

(d) Reflection Loss-Frequency Curves ofB_4C-50

图 10　B_4C-20,B_4C-25,B_4C-33 和 B_4C-50 的反射损耗–频率关系曲线

Fig. 10　Reflection loss–frequency curves of B_4C-20, B_4C-25, B_4C-33, and B_4C-50

但是 B_4C 掺量的增加，使得阻抗减小，引起吸波材料的阻抗和自由空间阻抗失配，这会导致电磁波在吸波材料表面的大量反射，吸波性能欠佳。随着试样厚度的增加，入射波在材料内部发生的散射和反射次数都会增加，这会使损耗能力增加，吸波能力增强，但也会使得吸波材料的阻抗和自由空间阻抗进一步失衡。

为了更加直观的比较 B_4C-20、B_4C-25、B_4C-33、B_4C-50 的吸波性能，对其能够有效吸收的厚度、吸收峰值与频率、有效吸收范围、有效吸收带宽进行比较见表 1。综合比较可知，B_4C-33 的吸收峰值最大，有效吸收频带最宽，吸波性能最好。

表 1　X 波段吸波性能比较

Table 1　Comparison of X-band electromagnetic absorbing performance

Absorber	Matching thickness/mm	Peak value and frequency	Effective absorption range/GHz	Effective bandwidth/GHz
B_4C-20	None	None	None	None
B_4C-25	2.7	–11.1 dB at 11.44 GHz	10.61~12.14	1.53
B_4C-33	2.3	–21.1 dB at 11.01 GHz	9.45~12.40	2.95
B_4C-50	1.7	–10.9 dB at 10.74 GHz	9.39~11.08	1.69

3　结论

1) 采用镁热法燃烧合成制备 B_4C 粉体，可以得到斜六方晶体结构的 B_4C 晶体，其晶粒大小在 0.4~1.0 μm 之间；

2) 介电常数和介电损耗角正切结果均显示 B_4C-50 的损耗能力最强；阻抗计算结果显示，B_4C-20 与空气的阻抗优于 B_4C-50 与空气的阻抗；

3) 反射率计算结果显示，B_4C-33 时电磁波吸收性能最佳，当厚度为 2.3 mm 时，其最大损耗可达–21.1 dB，且 9.45~12.4 GHz 频率范围内均可有效吸收。

4) B_4C-33 优异的吸波性能主要来源于 B_4C 自身的介电极化作用，以及其内部多重德拜弛豫机制

的共同作用。

参考文献:

[1] DUAN Wenyan, YIN Xiaowei, LI Quan, et al. A review of absorption properties in silicon-based polymer derived ceramics[J]. J Eur Ceram Soc, 2016, 36(15): 3681–3689.

[2] DING Donghai, LUO Fa, ZHOU Wancheng, et al. Research status and outlook of high temperature radar absorbing materials[J]. J Inorg Mater (in Chinese), 2014, 29(5): 461–469.

[3] MENG Dechuan. Study on conductivity and electromagnetic shielding properties of boron carbide composites (in Chinese, dissertation). Dalian. Dalian University of Technology, 2014.

[4] VAST N, BESON J M, BARONIS, et al. Atomic structure and vibrational properties of icosahedral boron and B_4C boron carbide[J]. Comp Materi Sci, 2000, 17(2/4): 127–132.

[5] MA Mengdong, YANG Ruilong, ZHANG Can, et al. Direct large-scale fabrication of C encapsulated B_4C nanoparticles with tunable dielectric properties as excellent microwave absorbers[J]. Carbon, 2019, 148: 504–511.

[6] DIMITAR Radev, EWARD Ampaw. Classical and contemporary synthesis methods of boron carbide powers[J]. CR Acad Bulg Sci, 2015, 68(8): 944–956.

[7] KUHLMANN U, WERHIT H. Raman effect of boron carbide ($B_{4.3}C$ to $B_{10.37}C$)[J]. J Alloy Compd, 1994, 205(1/2): 87–91.

[8] GHOSH D, SUBHASH G, SUDARSHAN T S, et al. Dynamic indentation response of fine grained boron caibide[J]. J Am Ceram Soc, 2007, 90(6): 1850–1857.

[9] SIMEONE D, MALLET C, DUBUISSON P, BALDINOZZI G, et al. Study of Boron Caibide Evolution under Neutron Irradiation by Raman spectroscopy[J]. J Nucl Mater, 1999, 277(1): 1–10.

[10] ADITHYA Prakash, KALPATHY B, SUNDARAM. Optical and XPS studies of BCN thin fifilms by co-sputtering of B_4C and BN targets[J]. Appl Surf Sci, 2017, 396: 484–491.

[11] ZHANG Song, LU Wenzhong, WANG Chubin, et al. Synthesis and characterization of $B_{13}C_2$ boron carbide ceramic by pulsed electric current sintering[J]. Ceram Int, 2012, 38(2): 895–900.

[12] CHEN R, PENG L M, DUNG X F, et al. Microwave absorption enhancement and complex permittivity and permeability of Fe ancapsulated within carbon nanotubes[J]. Adv Mater, 2004, 16(5): 401–405.

[13] SINGH V K, SHUKLA A, PATRA Mk, et al. Microwave absorbing property of a thermally reduced graphene oxide/nitrile butadiene rubber composite[J]. Carbon, 2012, 50(6): 2202–2208.

[14] TIAN J B, YAN Z, XIAO F S, et al. A Study of electromagnetic properties of cobalt-multiwalled carbon nanotubes composites[J]. Mater Sci Eng B, 2011, 176(12): 906–912.

[15] QUAN Bin, LING Xiaohui, JI Guangbin, et al. Dielectric polarization in electromagnetic wave absorption: Review and perspective[J]. J Alloy Compd, 2017, 728(25): 1065–1075.