

# 水热反应时间对氧化锌半导体材料 吸波性能的影响

梁义<sup>1</sup>, 黄伟<sup>2</sup>, 袁悦<sup>1</sup>, 魏世丞<sup>1</sup>, 何学<sup>2</sup>, 姜骄<sup>2</sup>

(1.陆军装甲兵学院 装备再制造技术国防科技重点实验室, 北京 100072;

2.战略支援部队, 福建 厦门 361000)

**摘要:** **目的** 研究水热反应时间对氧化锌吸波性能的影响, 以获得高性能吸波材料。**方法** 通过控制水热反应时间, 制备不同形貌的氧化锌半导体材料, 并采用 XRD、SEM、TEM 等表征手段, 分析水热反应时间对氧化锌半导体材料形貌及结构的影响。利用矢量网络分析仪测定该材料在 2~18 GHz 频率范围内的相对复介电常数和复磁导率, 采用 MATLAB 模拟分析不同厚度下水热反应时间对氧化锌半导体材料吸波机制及吸波性能的影响。**结果** 当水热反应时间为 12 h 时, 氧化锌在高频率处可达到较好的吸波效果, 最大回波损耗可达 -52.86 dB。**结论** 通过控制水热反应时间, 可实现对氧化锌的形貌进行调控, 进而得到吸波性能优异的氧化锌吸波材料。

**关键词:** 氧化锌; 水热法; 反应时间; 介电性能; 吸波能力; 损耗机制

中图分类号: TB34 文献标识码: A 文章编号: 1672-9242(2021)02-0066-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.02.012

## Influence of Hydrothermal Reaction Time on the Absorber Performance of Zinc Oxide Semiconductor Materials

LIANG Yi<sup>1</sup>, HUANG Wei<sup>2</sup>, YUAN Yue<sup>1</sup>, WEI Shi-cheng<sup>1</sup>, HE Xue<sup>2</sup>, JIANG Jiao<sup>2</sup>

(1. National Key Laboratory for Remanufacturing, Army Academy of Armored Forces, Beijing 100072, China;

2. A Department of Strategic Support Force, Xiamen 361000, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the effect of hydrothermal reaction time on microwave absorber performance of ZnO. The ZnO semiconductor materials of different morphologies are prepared by controlling the hydrothermal reaction time, and they are characterized by XRD, SEM and TEM methods in order to evaluate the effects of hydrothermal reaction time on the morphology and structure of ZnO semiconductor materials. The relative complex permittivity and complex permeability of the

收稿日期: 2020-10-27; 修订日期: 2020-11-09

Received: 2020-10-27; Revised: 2020-11-09

基金项目: 国家自然科学基金(51701238, 51905543); 国防科技卓越青年科学基金(2017-JCJQ-ZQ-001)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51701238, 51905543); National Defense Science and Technology Excellence Young Scientists Foundation (2017-JCJQ-ZQ-001)

作者简介: 梁义(1985—), 男, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为表面工程与再制造工程。

Biography: LIANG Yi(1985—), Male, Master, Assistant researcher, Research focus: surface engineering and remanufacturing engineering.

通讯作者: 魏世丞(1974—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为表面工程和装备腐蚀防护。

Corresponding author: WEI Shi-cheng (1974—), Male, Doctor, Professor, Research focus: remanufacturing engineering and equipment corrosion protection.

引文格式: 梁义, 黄伟, 袁悦, 等. 水热反应时间对氧化锌半导体材料吸波性能的影响[J]. 装备环境工程, 2021, 18(2): 066-072.

LIANG Yi, HUANG Wei, YUAN Yue, et al. Influence of hydrothermal reaction time on the absorber performance of zinc oxide semiconductor materials[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(2): 066-072.

material in the frequency range of 2~18 GHz are measured by vector network analyzer. The effects of hydrothermal reaction time on absorbing mechanism and microwave absorber performance of ZnO semiconductor materials under different thickness are simulated by MATLAB. The results show that when the hydrothermal reaction time is 12 h, ZnO has better microwave absorber performance at high frequencies, and the maximum return loss is up to -52.86 dB. By controlling the hydrothermal reaction time, the morphology of ZnO can be controlled, and the excellent absorber performance of ZnO can be obtained.

**KEY WORDS:** ZnO; hydrothermal method; reaction time; dielectric properties; electromagnetic wave absorption capacity; loss mechanism

近年来,随着现代军事技术突飞猛进的发展,武器装备火力毁伤能力不断提升,军事目标受到“发现即摧毁”的威胁日趋严峻<sup>[1-3]</sup>。当前陆、海、空、天、电磁五位一体的立体化战争体系中,隐身技术已经成为军事强国决胜战场的关键技术手段之一。隐身材料对电磁波的吸收耗散能力直接影响了装备的隐身性能,目前发展系列“薄、轻、宽、强”的新型吸波材料受到国内外学者的广泛关注<sup>[4-7]</sup>。

氧化锌(ZnO)是一种直接带隙 n 型半导体材料,室温环境下 ZnO 的禁带宽度为 3.37 eV,激子束缚能为 60 meV,具有优异的光学性能、压电性能、化学稳定性以及热稳定性<sup>[8-9]</sup>。由于 ZnO 具有丰富的形貌结构特点和厚度薄、吸收频带宽、吸波性能好等优点,是一种极具发展前景的新型吸波材料<sup>[10-12]</sup>。水热法以制备条件简单、制备的材料性能稳定等优点被广泛用于制备不同形貌的 ZnO 材料<sup>[13-15]</sup>。在水热法制备 ZnO 材料的过程中,影响其尺寸大小和形貌样式的主要因素包括反应时间、表面活性剂、碱源沉淀剂等。这些工艺参量相互作用,造成 ZnO 形貌结构的多样性,进而造成其电磁波吸收性能各有差异<sup>[16-18]</sup>。文中以醋酸锌为锌源,氢氧化钠为碱源沉淀剂,十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)为表面活性剂,研究了水热反应时间对氧化锌吸波材料形核生长的影响,系统分析了不同水热反应时间条件下制备的 ZnO 半导体吸波材料对 2~18 GHz 范围内电磁波的吸收特性与吸波机制。

## 1 实验

### 1.1 ZnO 吸波材料制备

取 400 mL 去离子水置于烧杯中,分别加入 10.975 g (0.05 mol) 醋酸锌、5 g (0.125 mol) 氢氧化钠、18.2 g (0.05 mol) 十六烷基三甲基溴化铵(CTAB),超声 60 min 使其均匀混合。将上述混合溶液转移到以聚四氟乙烯为内衬的高压反应釜中,密封后置于预先升温好的鼓风干燥箱中,在 120 °C 温度条件下,反应时间分别为 8、12、16 h。取出高压反应釜,在室温中冷却,而后将沉淀在反应釜中的固体通过去离子水和无水乙醇反复洗涤,再置于真空干燥

箱中,在 40 °C 条件下干燥 24 h。收集干燥后的粉末,将反应时间分别为 8、12、16 h 制备获得的 ZnO 样品分别标记为 1#、2#、3#。

### 1.2 ZnO 吸波材料测试与表征

取不同水热反应时间(8、12、16 h)制备的 ZnO 吸波材料,采用扫描电子显微镜及透射电子显微镜对样品的微观形貌进行分析。采用高功率 X 射线衍射仪对 ZnO 吸波材料样品进行物相分析(Cu 靶,步长为 0.02°,扫描范围 20°~80°)。采用氮气吸附脱附测试仪对 ZnO 吸波材料样品进行比表面积分析。采用矢量网络分析仪对 ZnO 吸波材料样品进行电磁参数测试,根据传输线理论,将测试得到的电磁参数进行 MATLAB 模拟,分析不同水热反应时间对 ZnO 吸波材料吸波机制及吸波性能的影响。

## 2 结果与讨论

### 2.1 对 ZnO 吸波材料物相的影响

在不同水热反应时间条件下,采用水热法合成 ZnO 样品的 XRD 谱如图 1 所示。从图 1 中可以看出,随着反应时间的延长,物相没有发生改变,衍射峰先增强、后减弱,不同水热反应时间条件下的 2θ 均为 31.7°、34.4°、36.2°、47.5°、56.6°、62.8 和 67.6°,

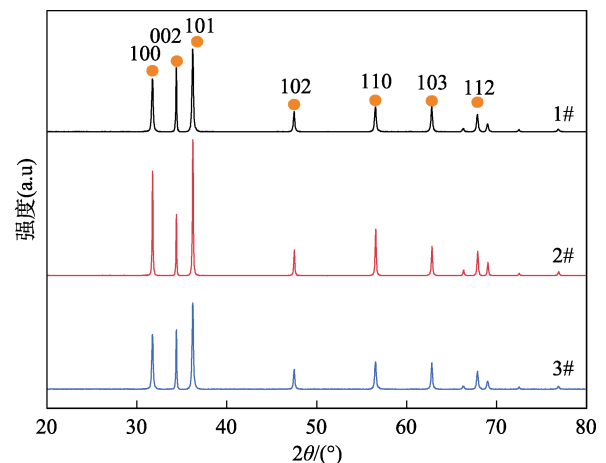


图 1 不同水热反应时间制备 ZnO 样品的 XRD 图谱  
Fig.1 XRD patterns of ZnO samples prepared at different hydrothermal reaction time

对应 ZnO 的(100)、(002)、(101)、(102)、(110)、(103)和(112)晶面,与 JCPDS 036-1451 一致。上述结果表明,反应时间对反应产物的物相无影响,但其衍射峰强度呈现先升高后降低的趋势,说明随着反应时间的延长,ZnO 晶化程度先升高后降低。当反应时间为 12 h 时,其衍射峰强度最强,晶型最优。

## 2.2 对 ZnO 吸波材料形貌的影响

ZnO 生长过程中,反应溶液的 pH 值越高,其沿 c 轴的极性生长能力越强。在阳离子表面活性剂 CTAB 的生长取向约束下,水热反应初期,ZnO 会优先沿 c 轴方向生长成细长条棒状结构。同时,为降低棒状结构的表面能,逐步通过更紧密的肩并肩拼接方式生长为层片状的 ZnO,不同水热反应时间条件下,ZnO 各晶面生长速率及生长时间存在差异,导致形貌有所不同<sup>[19-21]</sup>。为分析水热反应时间对产物 ZnO 形貌的影响,分别对 1#、2#、3#进行了 SEM 和 TEM 分析,如图 2 所示。图 2a、b 分别是 1#样品的 SEM 和 TEM 形貌图。可以看出,ZnO 呈片层状分布,样品中片层状结构的比例较低。经测量,片层厚度约为

50 nm。结合 TEM 分析,还存在少部分棒状结构。随着反应时间的延长,当反应时间为 12 h 时,棒状形貌 ZnO 数量减少,其 SEM 和 TEM 形貌如图 2c、d 所示(2#样品),表面较为光滑,样品中片层状结构的比例较高,且片层间互相搭接较好,其厚度约为 70 nm。随着反应时间的继续延长,当反应时间为 16 h 时,其 SEM 和 TEM 形貌图如图 2e、f 所示(3#样品),样品中片层结构尺寸增加,其厚度约为 50 nm。上述结果表明,不同反应时间下生成的 ZnO 均呈层片状结构,随着反应时间的延长,片层厚度先增加、后减小,片层尺寸持续增加。

为进一步比较不同水热反应时间对 ZnO 材料微观尺寸的影响,通过对产物进行了氮气吸附-解析测量实验,基于 BET 方程,研究其比表面积情况。不同水热反应时间制备 ZnO 样品的氮气吸附-解析等温线如图 3 所示。经公式  $V_m=1/(k+b)$  (式中:  $V_m$  为比表面积;  $k$  为斜率;  $b$  为截距) 计算可得,1#、2#、3#样品比表面积分别为 24.9、18.3、10.4  $\text{m}^2/\text{g}$ 。由此可见,随着反应时间的增加,ZnO 的比表面积呈逐渐减小的趋势,这也与前文的分析结果相一致。

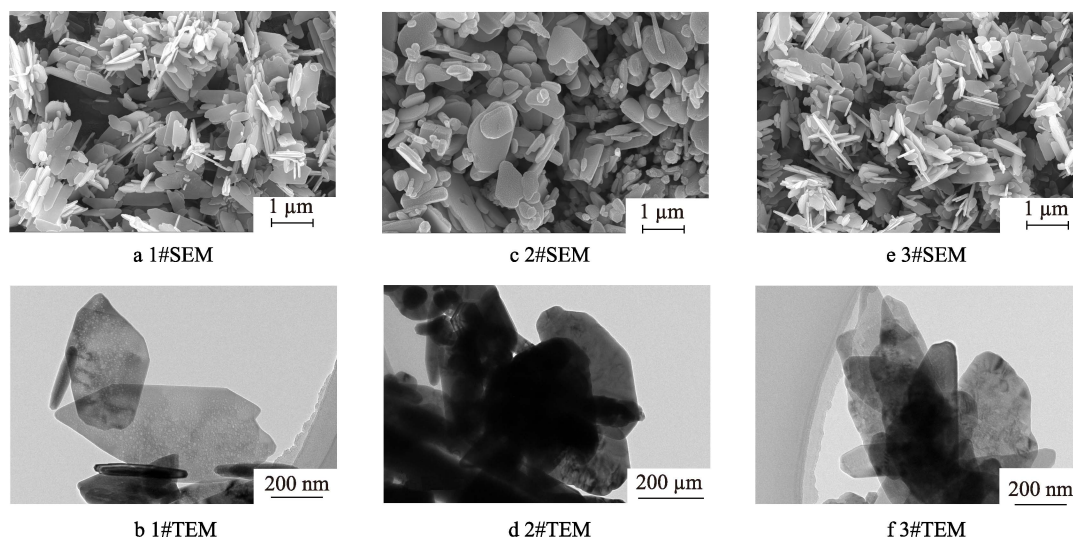


图 2 不同水热反应时间制备 ZnO 样品的 SEM 图和 TEM 图

Fig.2 SEM and TEM of ZnO samples prepared at different hydrothermal reaction time

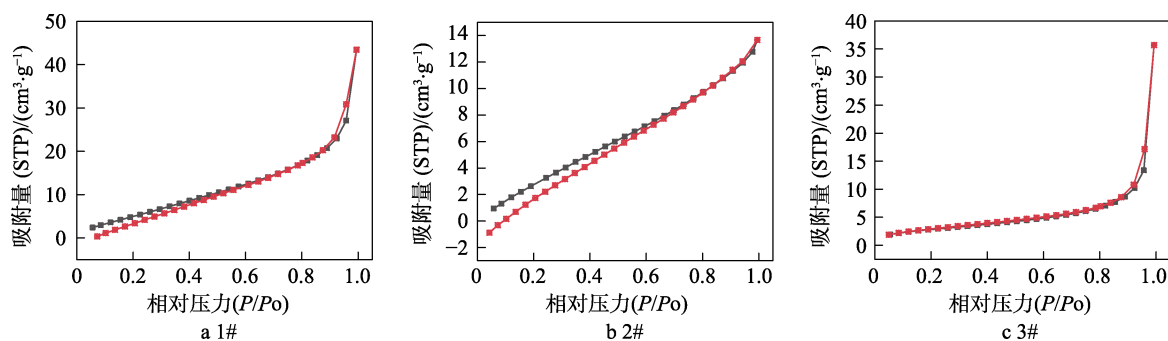


图 3 不同水热反应时间制备 ZnO 样品的氮气吸附-解析等温线

Fig.3 Nitrogen adsorption-desorption isotherms of ZnO samples prepared at different hydrothermal reaction time

### 2.3 对 ZnO 吸波性能的影响

ZnO 作为一种典型的介电损耗材料,复介电常数  $\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon''$ , 其中实部 ( $\epsilon'$ ) 表示 ZnO 在交变磁场环境中的电磁能量存储能力, 虚部 ( $\epsilon''$ ) 表示电磁能力损耗能力<sup>[22]</sup>。不同水热反应时间制备的 ZnO 样品在 2~18 GHz 频率范围内, 复介电常数实部和虚部的相应变化曲线如图 4 所示。从图 4 中可以看出, 随着水热反应时间的增加, 1#、2#、3#样品的复介电常数实部和复介电常数虚部均呈现先增大、后减小的趋势, 1#和 3#样品的复介电常数实部和复介电常数虚部大致相当。此外, 还可以发现制备的 3 种 ZnO 材料在 2~18 GHz 频率范围内, 复介电常数曲线表现出了典型的弛豫特征, 其中 2#样品的复介电常数虚部曲线中, 可以观察到 3 个明显的共振弛豫峰。根据自由电子理论<sup>[23]</sup>,  $\epsilon'' \approx 1/(\pi\epsilon_0\rho f)$  ( $\rho$  为电阻率), 可以估算出 2#样品的电阻率最小, 1#和 3#样品电阻率相当。这是因为 2#样品具有更为均匀光滑且长度适中的形貌结构, 可以在有限的空间范围内更好地搭接导电网

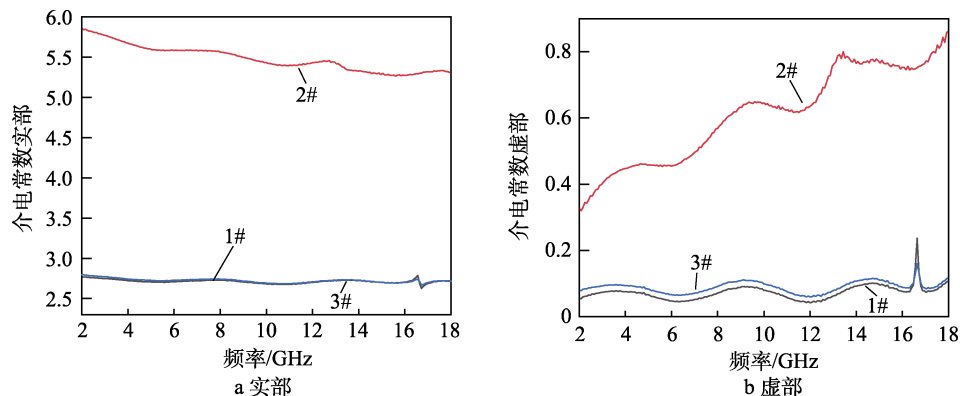


图 4 不同水热反应时间制备 ZnO 样品的复介电常数

Fig.4 Complex permittivity of ZnO samples prepared by different hydrothermal reaction time: a) real; b) imaginary

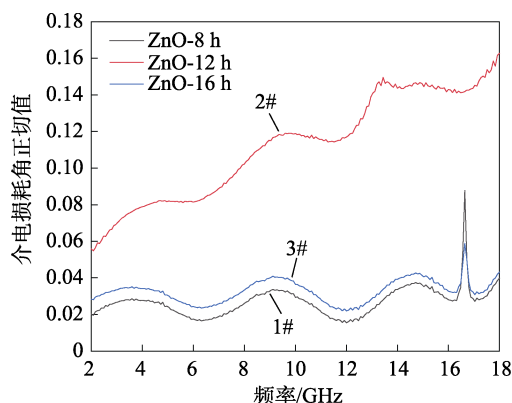


图 5 不同水热反应时间制备 ZnO 样品的电损耗角正切值  
Fig.5 Tangent value of electric loss angle of ZnO samples prepared at different hydrothermal reaction time

为进一步研究不同水热反应时间对 ZnO 样品电磁能量衰减能力和界面阻抗匹配性的影响, 分别计算了在 2~18 GHz 范围内 ZnO 样品的衰减系数  $\alpha$  和特征

络, 更有利于电子的迁移, 提高材料的介电性能和电磁波的吸收损耗能力。

电磁波吸收材料的复介电常数虚部与实部的正切值  $\tan \delta_E$ , 称为介电损耗角正切, 是衡量 ZnO 吸波材料电损耗能力的表征物理量。通常数值越大, 表示具有越好的电磁波介电损耗能力。2~18 GHz 范围内, 3 个 ZnO 样品的介电损耗角正切变化曲线如图 5 所示。从图 5 中可以发现, 3 种样品的介电损耗角正切值与介电常数虚部的变化规律基本一致, 其中 2#样品的介电损耗能力要明显优于 3#和 1#样品, 3#样品的介电损耗能力略高于 1#。这是因为随着反应时间的延长, ZnO 材料具有更为完整的形貌结构, 介电损耗能力更强。当反应时间达到 12 h 时, ZnO 形貌光滑、片层较厚、大小适中, 更有利于形成空间导电网络, 降低材料电阻率, 提高对电磁能力的储存与消耗。随着反应时间延长, ZnO 片层长度继续增加, 会导致更多的搭接空隙存在, 对电子的转移起到了负面影响, 降低了材料的介电损耗能力, 这与电磁参数的分析结果一致。

阻抗  $Z$ , 如图 6 所示。通过图 6a 衰减系数随频率的变化曲线可以发现, 2#样品的曲线数值明显大于 1#和 3#样品, 表明通过 12 h 反应时间制备的 2#样品具有较好的电磁波吸收衰减性能, 这也与上述分析的电磁参数和电损耗角正切值分析结果一致。同时, 随着频率的增大, 3 个样品的衰减系数同样呈现逐步增大的趋势, 这是因为 ZnO 材料具有较好的高频电磁波衰减特性。在 16.64 GHz 附近出现的波峰, 也是受 ZnO 材料的本征吸收峰的影响。从 ZnO 材料特征阻抗随频率的变化曲线 (图 6b) 中发现, 3 种 ZnO 样品的特征阻抗基本稳定成常数, 其中  $Z_{1\#} \approx 0.61 > Z_{3\#} \approx 0.60 > Z_{2\#} \approx 0.42$ 。说明虽然 2#样品的电磁波损耗能力较强, 但是特征阻抗系数却最低, 在界面处更容易造成电磁波的反射。

为进一步分析不同水热反应时间制备的 ZnO 样品在 2~18 GHz 频率范围内的电磁波损耗机制, 计算绘制了 3 个 ZnO 样品的 Cole-Cole 曲线, 如图 7 所示。

从图 7 中发现, 1#、2#和 3#样品均有多个德拜弛豫半圆, 表示 3 个 ZnO 样品在电磁波诱导下均发生了多重弛豫现象, 主要损耗机制仍然是介电极化弛豫损耗。此外, 图 7a、c 具有较为相似的 Cole-Cole 曲线规律, 说明 1#和 3#样品具有相似的介电损耗方式和

能力。图 7b 中 2#样品的圆心坐标和曲率半径均明显大于其他 2 个样品, 说明经过 12 h 反应制备的 ZnO, 其形貌结构更为均匀光滑, 尺寸厚度适中, 电子转移能力更强, 更有利于在电磁波辐射下诱导发生德拜极化弛豫, 具有更强的介电极化弛豫损耗能力。

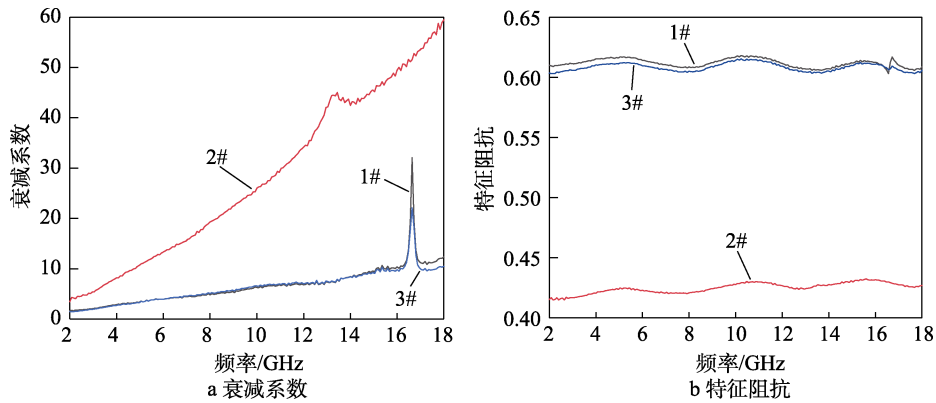


图 6 不同水热反应时间制备 ZnO 样品的衰减系数和特征阻抗

Fig.6 Attenuation coefficient (a) and characteristic impedance (b) of ZnO samples prepared at different hydrothermal reaction time

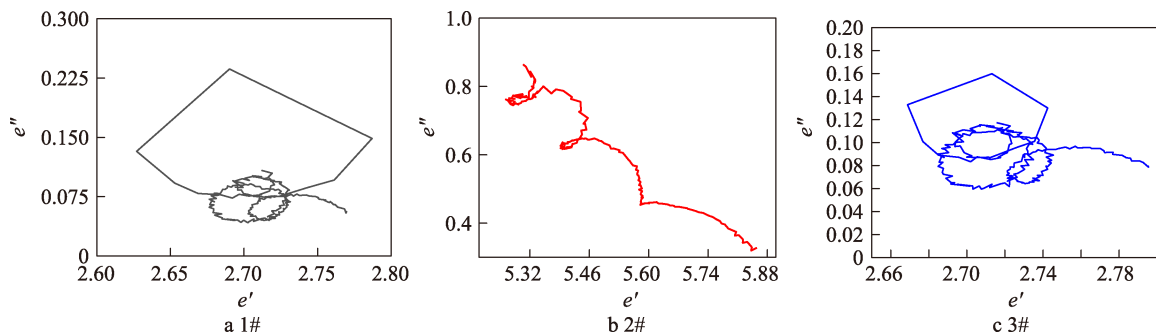


图 7 不同水热反应时间制备 ZnO 样品的 Cole-Cole 图

Fig.7 Cole-Cole diagram of ZnO samples prepared at different hydrothermal reaction time

基于线传输理论<sup>[24]</sup>, 回波损耗  $R_L = 20 \lg \left| \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \right|$ ,  $Z_{in}$  为输入阻抗。由此构建了在 2~18 GHz 频率范围内, 不同水热反应时间制备的 ZnO 样品的回波损耗与材料厚度的三维空间模型, 如图 8 所示。由图 8a、c 发现, 1#、3#样品在大于 -10 dB 的频率范围对电磁波的无反射损耗, 仅在 16.64 GHz 处有最大回波损耗, 分别为 -7.89 dB 和 -5.36 dB, 难以满足电磁波隐身防护的要求。2#样品回波损耗能力相对

较好, 如图 8b 所示。通过调整材料匹配厚度, 当匹配厚度为 5.75 mm 时有最大有效带宽, 为 2.4 GHz (15.6~18 GHz)。当匹配厚度为 5.39 mm 时, 在 17.76 GHz 处, 达到最大回波损耗, 为 -52.86 dB, 在高频段范围呈现出良好的吸波性能。研究表明, 虽然随着反应时间的延长, 2#样品的特征阻抗最小, 但其介电极化弛豫损耗能力最强。因此, 吸波材料在拥有较好匹配特性的同时, 还需要兼具较强的电磁损耗能力, 才能具备较强的吸波能力。

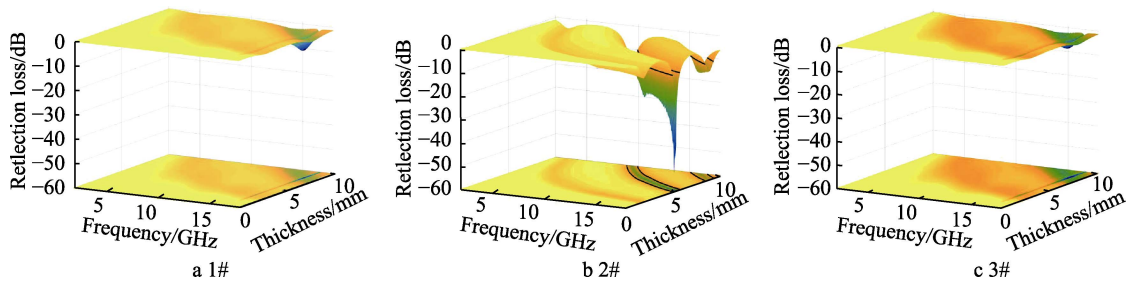


图 8 不同水热反应时间制备 ZnO 样品的反射损耗的三维图

Fig.8 Three dimensional diagram of reflection loss of ZnO samples prepared at different hydrothermal reaction time

### 3 结论

1) 水热反应时间影响了 ZnO 吸波材料的形貌, 但未对其物相产生影响, 且随着反应时间的延长, ZnO 吸波材料的尺寸逐渐增大, 片层厚度先增加后减小。

2) 当水热反应时间为 12 h 时, ZnO 吸波材料表面光滑、结构均匀、尺度适中, 其介电损耗及高频电磁波衰减能力较强, 尤其在 X 波段和 Ku 波段具有更明显的优势, 其主要吸波机制为多重极化弛豫损耗。

#### 参考文献:

- [1] 刘丹莉, 刘平安, 杨青松, 等. 吸波材料的研究现状及发展趋势[J]. 材料导报, 2013, 27(17): 74-78.  
LIU Dan-li, LIU Ping-an, YANG Qing-song, et al. Research status and prospect of wave absorbing materials[J]. Materials reports, 2013, 27(17): 74-78.
- [2] 李宇明, 武占成, 孙永卫, 等. 武器装备吸波材料及谐振型吸波体设计[J]. 装备环境工程, 2012, 9(1): 50-53.  
LI Yu-ming, WU Zhan-cheng, SUN Yong-wei, et al. Design of wave-absorbing materials and resonant wave-absorber for armament[J]. Equipment environmental engineering, 2012, 9(1): 50-53.
- [3] 庞建峰, 马喜君, 谢兴勇. 电磁吸波材料的研究进展[J]. 电子元件与材料, 2015, 34(2): 7-12.  
PANG Jian-feng, MA Xi-jun, XIE Xing-yong. Research progress of microwave absorption materials[J]. Electronic components and materials, 2015, 34(2): 7-12.
- [4] 李希, 魏文政, 汪家辉. 超材料复合吸波体的设计与研制[J]. 装备环境工程, 2020, 17(8): 70-77.  
LI Xi, WEI Wen-zheng, WANG Jia-hui. Design and development of metamaterial composite absorber[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(8): 70-77.
- [5] 徐剑盛, 周万城, 罗发, 等. 雷达波隐身技术及雷达吸波材料研究进展[J]. 材料导报, 2014, 28(9): 46-49.  
XU Jian-sheng, ZHOU Wan-cheng, LUO Fa, et al. Research progress on radar stealth technique and radar absorbing materials[J]. Materials Reports, 2014, 28(9): 46-49.
- [6] 班国东, 刘朝辉, 叶圣天, 等. 新型涂覆型雷达吸波材料的研究进展[J]. 表面技术, 2016, 45(6): 140-146.  
BAN Guo-dong, LIU Zhao-hui, YE Sheng-tian, et al. Research progress of new radar absorbing coating[J]. Surface technology, 2016, 45(6): 140-146.
- [7] 刘佳良, 陈平, 徐东卫, 等. 磁性多孔 RGO@Ni 复合材料的制备和吸波性能[J]. 材料研究学报, 2020, 34(9): 641-649.  
LIU Jia-liang, CHEN Ping, XU Dong-wei, et al. Preparation and microwave absorption properties of magnetic porous RGO@Ni composites[J]. Chinese journal of materials research, 2020, 34(9): 641-649.
- [8] 郝锐, 邓霄, 杨毅彪, 等. ZnO 纳米线/棒阵列的水热法制备及应用研究进展[J]. 化学学报, 2014, 72(12): 1199-1208.  
HAO Rui, DENG Xiao, YANG Yi-biao, et al. Research progress in preparation and applications of ZnO nanowire/rod arrays by hydrothermal method[J]. Acta chimica sinica, 2014, 72(12): 1199-1208.
- [9] 熊静芳, 肖佩, 吴强, 等. 氧化锌多孔微米花的制备及其气敏性能研究[J]. 化学学报, 2014, 72(4): 433-439.  
XIONG Jing-fang, XIAO Pei, WU Qiang, et al. Synthesis and gas-sensing properties of ZnO porous microflowers[J]. Acta chimica sinica, 2014, 72(04): 433-439.
- [10] 王士鹏, 姜姐, 王萍, 等. 形貌和掺杂对纳米 ZnO 吸波性能影响的研究进展[J]. 科技创新导报, 2019, 16(32): 99.  
WANG Shi-peng, JIANG Da, WANG Ping, et al. Research progress on the influence of morphology and doping on the microwave absorbing properties of nano-ZnO[J]. Science and technology innovation herald, 2019, 16(32): 99.
- [11] 闫军锋. 菊花状 ZnO 纳米线簇的制备及其吸波性能研究[D]. 西安: 西北大学, 2009.  
YAN Jun-Feng. Research of chrysanthemum-like ZnO nanowire clusters preparation and microwave absorbing properties[D]. Xi'an: Northwest University, 2019.
- [12] 王健. ZnO 纳米材料及核壳结构的制备和光催化性能研究[D]. 长春: 中国科学院大学(长春光学精密机械与物理研究所), 2016.  
WANG Jian. Synthesis and photocatalytic properties research of ZnO nanomaterials and core-shell structure[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics), 2016.
- [13] SUN Y, GUO H, ZHANG W, et al. Synthesis and characterization of twinned flower-like ZnO structures grown by hydrothermal methods[J]. Ceramics international, 2016, 42(8): 9648-9652.
- [14] GE X, HONG K, ZHANG J, et al. A controllable microwave-assisted hydrothermal method to synthesize ZnO nanowire arrays as recyclable photocatalyst[J]. Materials letters, 2015, 139(15): 119-121.
- [15] YANG J, XU C, YE T, et al. Synthesis of S-doped hierarchical ZnO nanostructures via hydrothermal method and their optical properties[J]. Journal of alloys and compounds, 2016, 657(2): 261-267.
- [16] SALEH S M, SOLIMAN A M, SHARAF M A, et al. Influence of solvent in the synthesis of nano-structured ZnO by hydrothermal method and their application in solar-still[J]. Journal of environmental chemical engineering, 2017, 5(1): 1219-1226.
- [17] 李珍珍. ZnO 材料的绿色制备及性能研究[D]. 新乡: 河南师范大学, 2014.  
LI Zhen-zhen. Study on the green preparation and per-

- formance of ZnO[D]. Xinxiang: Henan Normal University, 2014.
- [18] LI H, HUANG Y, SUN G, et al. Directed growth and microwave absorption property of crossed ZnO netlike micro-/nanostructures[J]. *Journal of physical chemistry C*, 2010, 114(22): 10088-10091.
- [19] DU Y, YANG Y, WANG X, et al. Hydrothermal synthesis and optical properties of CTAB modified nano-ZnO[J]. *Integrated ferroelectrics*, 2019, 200(1): 161-167.
- [20] 郑兴芳, 张广远. 不同形貌纳米氧化锌的水热法合成[J]. *化学研究*, 2012, 23(5): 66-69.  
ZHENG Xing-fang, ZHANG Guang-yuan. Hydrothermal synthesis of nanosized zinc oxides with different morphology[J]. *Chemical research*, 2012, 23(5): 66-69.
- [21] 任雨雨, 付新. CTAB-ZnO 的制备及其对亚甲基蓝的降解性能研究[J]. *山东化工*, 2020, 49(4): 19-22.  
REN Yu-yu, FU Xin. The preparation of CTAB-ZnO and the degradation of methylene blue[J]. *Shandong chemical industry*, 2020, 49(4): 19-22.
- [22] 王彦平, 惠贞贞, 张雨露, 等. 核壳结构  $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{ZnO}$  纳米粒子的制备及电磁波吸收性能研究[J]. *人工晶体学报*, 2019, 48(05): 827-833.  
WANG Yan-ping, HUI Zhen-zhen, ZHANG Yu-lu, et al. Preparation and electromagnetic wave absorption properties of core-shell structured  $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{ZnO}$  nanoparticles[J]. *Journal of synthetic crystals*, 2019, 48(5): 827-833.
- [23] LI N, HUANG G W, LI Y, et al. Enhanced microwave absorption performance of coated carbon nanotubes by optimizing the  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanocoating structure[J]. *Acs appl mater interfaces*, 2017, 9(3): 2973-2983.
- [24] KIM S S, JO S B, GUEON K I, et al. Complex permeability and permittivity and microwave absorption of ferrite-rubber composite at X -band frequencies[J]. *IEEE transactions on magnetics*, 1991, 27(6): 5462-5464.