

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2015.07.031

铁氧体复合材料吸波性能研究进展

万晓霞,李翠平,宋宇华,厉宁,范香翠,刘忠刚

(山东非金属材料研究所,济南 250031)

摘要:介绍了铁氧体吸波材料的概况。重点总结了近年来铁氧体复合材料的研究现状和吸波性能。详细介绍了聚苯胺/铁氧体复合材料、环氧树脂/铁氧体复合材料以及铁氧体与其它导电聚合物的复合材料的吸波性能,这些复合材料将是今后吸波材料研究和发展的方向。针对未来发展提出了建议。

关键词:铁氧体;铁氧体复合材料;吸波性能

中图分类号: TQ326.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2015)07-0140-04

Progress of Absorbing Properties of Ferrite Composites

Wan Xiaoxia, Li Cuiping, Song Yuhua, Li Ning, Fan Xiangcui, Liu Zhonggang

(Shandong Nonmetal Material Research Institute, Jinan 250031, China)

Abstract : An overview of ferrite absorbing materials was introduced. The recent research status and absorbing properties of ferrite composite materials were focusing summarized. Absorbing properties of polyaniline / ferrite composites, epoxy resin ferrite composites as well as other conductive polymer / ferrite composites were introduced in detail. These composite will be an important direction for future research and development of absorbing materials. Suggestions for the future development were prospected.

Keywords : ferrite ; ferrite composite ; absorbing property

铁氧体是一种具有磁性的铁的氧化物,这类氧化物具有较好的电损耗和磁损耗,所以具有很好的吸波性能。铁氧体吸波材料具有吸收强、频带较宽、成本较低及制作简单等诸多优点,目前在雷达吸波材料领域中已被广泛地应用^[1-2]。铁氧体根据晶体结构的不同,可分为尖晶石型、磁铅石型和石榴石型等3大类型。

尖晶石型铁氧体是最早应用在隐身技术上的磁性吸收剂,以其性能稳定、制备简单等优点被广泛地研制和应用。但是尖晶石型铁氧体磁晶各向异性场(HA)很小,在高频(>108 Hz)下磁导率很难提高,同时,由于其密度大、对高温稳定性差等缺点使其应用受到限制,研究通过化学物理等方法来降低其密度提高其损耗是一大重要方向^[3]。

具有吸收剂最佳形状—片状结构的六角晶系磁铅石型铁氧体是现阶段研究的主要类型,它具有较高的自然共振频率和磁晶各向异性等效场,使得其电磁性能和吸波效果最佳^[4]。现阶段以M₁W型六角晶系铁氧体为主作为研究重点。

石榴石型铁氧体由于其特殊的晶体结构,其电磁性能较弱,在吸波性能方面的研究和应用较少,但是国外近几年已经开展对其中的铁离子进行替代的研究,并取得了一定的效果。

单一的铁氧体制成的吸波材料存在密度大、高温特性差等缺点,难以满足现阶段对吸波材料宽、轻、薄的要求,因

此,铁氧体与其它材料复合的吸波材料研究是近年来的主要方向,在铁氧体良好的吸波性能的基础上弥补了单一吸收剂的缺陷。

1 铁氧体与聚苯胺类材料的复合

高分子导电聚合物是近几年来研究较多的一种重要的新型吸波材料之一^[5-6],其中聚苯胺(PANI)以其吸收频带宽,密度小,合成简单等优点被广泛地研究和应用,聚苯胺与铁氧体的复合物良好地互补了各自在微波吸收性能方面的缺点,将彼此的优点有机地结合起来,具有广阔的研究和应用空间。

何玲^[7]采用自蔓延燃烧法制备钴铬锌铁氧体(Co_{0.8-x}Cr_xZn_{0.2}Fe₂O₄)和镍铬锌铈铁氧体(Ni_{0.4}Cr_{0.4}Zn_{0.2}Ce_xFe_{2-x}O₄),并分别合成了与导电聚苯胺的复合物PANI/Co_{0.7}Cr_{0.1}Zn_{0.2}Fe₂O₄和PANI/Ni_{0.4}Cr_{0.4}Zn_{0.2}Ce_{0.1}Fe_{1.9}O₄,通过分析发现复合物的电磁参数和吸波性能都比原来的单体有所改善,成功地互补了彼此间的缺陷。

张罡等^[8]用原位合成法制备了PANI,并与纳米铁氧体Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe₂O₄及Co_{0.5}Zn_{0.5}Fe₂O₄一起制备了复合吸波涂层。结果表明,制备的吸波涂层在15.9,22.3 GHz时分别具有最大吸收率15.9,39.9 dB,其中聚苯胺/Co_{0.5}Zn_{0.5}Fe₂O₄复合材

联系人:万晓霞,硕士,工程师,主要从事隐身材料的研究与试制
收稿日期:2015-04-24

料大于 20 dB 的有效带宽达到 5.1 GHz。

李元勋等^[9]用原位掺杂聚合法制备了 PANI 和纳米钽铁氧体的复合物,得到具有棒状结构的复合材料样品,发现样品的微波吸收率随着频率的增加而增强,在 4.87 GHz 时,达到最大值 64.2 dB;随着频率的增加(4.87~9.00 GHz),吸收率又迅速下降至 26.34 dB,之后,频率再增加,吸收率几乎保持不变,大约为 25 dB,大于 20 dB 的吸收带宽是 15.07 GHz,具有非常好的宽频高吸收功能。

周克省等^[10]用溶胶-凝胶法制备了 La, Ce, Zn 掺杂锆铁氧体 $\text{Sr}_{0.7}\text{La}_{0.15}\text{Ce}_{0.15}\text{Fe}_{11.7}\text{Zn}_{0.3}\text{O}_{19}$ 纳米晶粉,再通过原位聚合反应法制备了聚苯胺/掺杂锆铁氧体复合材料,研究表明,聚苯胺包覆于掺杂锆铁氧体粒子表面,其微波吸收性能优良,具有磁损耗和电损耗协同作用;复合样品厚度 2.6 mm 时,吸收峰接近 -40 dB,峰值频率高于 12.4 GHz,大于 10 dB 吸收带宽预计达到 5.5 GHz。

熊为华等^[11]用氧化物法制备了具有核壳结构的导电 PANI/铁氧体磁性复合颗粒,并在 0.5~20 GHz 频段内测试了材料的吸波性能。实验结果表明,复合材料具有较好的吸波性能,当 $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ 和 $\text{Li}_{0.45}\text{Zn}_{0.1}\text{Fe}_{2.45}\text{O}_4$ 掺入质量分数分别为 15% 和 5% 时,最大吸收值为 24.7 dB,大于 8 dB 的带宽达 4.4 GHz。

赵海涛等^[12]在超声场下用原位聚合法制备了 PANI/镍铁氧体复合材料,并分析了其电磁性能和吸波性能。镍铁氧体质量分数为 5% 和 15% 的复合材料试样分别具有最大的介电损耗角正切值和最大磁损耗角正切值;镍铁氧体质量分数为 15% 的试样在 8~18 GHz 范围内吸波性能最好,具有最大吸收峰值 23.4 dB,大于 8 dB 的带宽为 5.7 GHz,这与其具有最大的磁损耗角正切值是有关的。

庞建峰等^[13]以溶胶-凝胶自蔓延燃烧法与原位掺杂聚合法相结合的方式制备了 PANI/漂珠/钽铁氧体复合材料。采用矢量网络分析仪在 2~18 GHz 频段内测定了复合材料的电磁参数。结果表明,所制材料的介电损耗和磁损耗最大值分别为 0.30 和 0.52;当试样吸波层厚度为 3.0 mm 时,在 7.1 GHz 处吸收峰值为 33.74 dB,大于 20 dB 的有效吸收带宽为 3.2 GHz。

姜静静^[14]用原位聚合法合成了 PANI 包覆 $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ 的复合材料,研究表明,复合材料是一种电磁性能可调的硬磁性材料,通过改变 PANI 和 $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ 的质量比可以进行调节吸波效果,试验发现当 PANI: $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ 质量比=2:1 时,复合材料的吸波效果最佳,在 14.6 GHz 处出现最大吸收峰为 20.11 dB,大于 10 dB 的有效带宽覆盖了 12.87~16.66 GHz。

徐芬芳^[15]通过原位聚合法,以樟脑磺酸(CSA)为掺杂

酸和手性诱导剂,以过硫酸铵为引发剂,制备了手性 PANI/钽铁氧体(BF)复合材料,研究表明,改性后的 PANI/BF 复合材料的电化学性能及微波吸收性能均优于改性前的 PANI/BF 复合材料。当涂层厚度为 0.9 mm 时,手性 PANI/BF 复合材料的最大反射率达到 30.5 dB,反射率大于 10 dB 的有效带宽达 12.8 GHz 几乎覆盖了整个 Ka 频段。设计了 PANI 和 PANI/ Fe_3O_4 复合材料的双层结构,其最大反射率达到 54 dB,大于 10 dB 的有效带宽达到 11.28 GHz。

蒋军军^[16]利用自创的“配位-聚合-水热法”制备了本征态苯胺单体(PAn)- FeOOH , PAn- CoFe_2O_4 及 PAn- $\text{CoLa}_{0.15}\text{Fe}_{1.85}\text{O}_4$ 纳米复合物,对其吸波性能进行分析。分析发现 PAn/ FeOOH 纳米复合物材料厚度为 3 mm 时具有最大吸收率 33.75 dB(12.88 GHz 处),大于 10 dB 的带宽达 6.14 GHz;PAn/ CoFe_2O_4 纳米复合物厚度为 2 mm 时,最大吸收率为 16.71 dB(在 16.01 GHz 处),大于 10 dB 的带宽达 4.68 GHz,并且不同厚度的材料表现出不同的吸波性能;PAn/ $\text{CoLa}_{0.15}\text{Fe}_{1.85}\text{O}_4$ 纳米复合物厚度为 2 mm 时,最大吸收率为 42.65 dB(在 15.91 GHz 处),大于 10 dB 的带宽达 6.14 GHz,吸波性能优良,同时满足了高性能吸波材料所必须的“轻、薄、强、宽”的使用要求。

2 铁氧体与环氧树脂的复合

以环氧树脂(EP)为基体,以铁氧体为分散体制备复合材料,其吸波性能由于 EP 对电磁波的透射性使得复合材料的吸波性能相对于铁氧体单体有了一定的提高,但是改善不大。研究发现,以同样的方法制备与铁氧体性能互补的其它吸收剂的复合材料,再将两者结合起来得到的复合材料其电磁参数有了很大的提高。

马素云等^[17]采用模压法制备了 EP/铁氧体粉体 $\text{Ba}(\text{Zn}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{Fe}_{16}\text{O}_{22}$ 复合材料板,将其与 EP/M-玻璃纤维(GF)复合材料组合成多层复合结构,得到复合材料板的吸波性能为:当铁氧体粉体中 $x=0.75$,铁氧体吸波层厚度为 2.0 mm,结构总厚度 5.3 mm 时,复合结构吸收率在 2~8 GHz 时大于 4 dB;在 8~18 GHz 时大于 10 dB。

沈国柱等^[18-20]设计制备了 EP/M 型铁氧体复合材料为内层,EP/短切 CF 复合材料为外层的双层结构试样,当内层厚度为 1.5 mm,外层厚度为 0.5 mm 时,吸波效果最佳,吸收率大于 10 dB 的有效带宽覆盖了整个 12~18 GHz 波段,最大吸收位于 15.3 GHz 处,约为 23.0 dB;当内外层厚度均为 1.0 mm 时,最大吸收率为 22.0 dB(12.7 GHz 处),大于 10 dB 的带宽为 3.2 GHz。可以发现,铁氧体与短切 CF 双层复合结构具有很大的研究价值和应用前景。

刘志宾等^[21]利用手糊工艺制备 EP/铁氧体/M-GF 复合材料板,将其与 EP/非晶粉体/M-GF 复合材料组合成

多层复合结构,发现此结构可以改善复合材料板与空气的电磁匹配性能,有利于提高样板的吸波性能。

常传波^[22]采用界面法合成纤维状的 PANI/ $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 复合材料, PANI/ $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 铁氧体复合材料的吸波性能明显优于本征态的 PANI 和纯 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 铁氧体。这与其独特的纤维结构有关。同时,采用化学镀的手段成功地制备出 Co-Ni 合金/ $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 纳米复合材料,其中 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 纳米材料颗粒均匀,粒径在 30~40 nm 之间,通过分析发现,棒状铁氧体镀层后吸收峰值可以达到 23 dB。这主要是因为棒状纳米铁氧体镀层后仍保持了较大的矫顽力,具有较大的磁损耗,另外,棒状纳米铁氧体材料具有更大的分散均匀性和比表面积,使得电磁波更容易进入材料而不是被反射回去。

伊翠云^[23]以 EP, PANI、纳米钡铁氧体制备了高性能复合吸波材料。此材料同时具备导电性、磁性和纳米效应,克服了铁氧体密度大、导电高聚物极性太强,匹配困难的缺点。

3 铁氧体与其它材料的复合

在研究铁氧体与 PANI 和 EP 复合材料的基础上,铁氧体与其它导电聚合物和吸波材料的研究也在探索,并取得了一定的成果。

赵海涛等^[24]采用热压法制备了 PANI/ 纳米镍铁氧体复合材料,在 X 波段,复合材料的复介电常数和复磁导率值随着镍铁氧体煅烧温度的升高而增大,最小反射率系数值随温度的升高而降低。1000℃煅烧的镍铁氧体所制备的聚苯乙烯/ 镍铁氧体复合材料在 11.47 GHz 处的最小反射率为 -12.67 dB、大于 10 dB 的带宽为 2.63 GHz。

张磊^[25]采用溶胶-凝胶法将多壁碳纳米管(L-MWNTs)、铁氧体和聚酰亚胺(PI)复合制备成 PI/L-MWNTs/ $\text{Co}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 复合材料,随 L-MWNTs 含量的增加,复合材料最大吸收值增加,当 L-MWNTs 质量分数增加到 0.75% 时,大于 10 dB 的吸收带宽为 5 GHz,最大吸收值达到了 24.37 dB,当 L-MWNTs 质量分数增加到 1% 时,有效带宽变窄,但是有向高频移动的趋势。

李永波^[26]合成了具有核壳结构的纳米复合材料聚吡咯/ ZnFe_2O_4 和聚吡咯/ Fe_3O_4 , 两种复合材料,均具有良好的饱和磁化强度和矫顽力,以及良好的微波吸收性能。研究发现,对于聚吡咯/ Fe_3O_4 纳米材料试样,当厚度为 2.3 mm 时,具有最大吸收率 22.4 dB,大于 10 dB 的有效带宽为 5 GHz。良好的吸波性能可能是由于核壳结构引起的。

刘姣等^[27]采用化学沉淀和非均匀成核相结合的方法制备了 MgFe_2O_4 铁氧体和羰基铁粉的复合粒子,通过电磁分析发现,复合粒子在 9 GHz 附近存在一个电损耗的谱峰,在进行吸波性能试验后发现复合粒子的最大吸收峰值为

17.8 dB,大于 10 dB 的带宽为 5.5 GHz,试验结果表明,经铁氧体改性后的粒子比单一的羰基铁粉粒子的吸波性能有了明显的提高。

王文婷等^[28]采用溶胶-凝胶法制备了锆铁氧体包覆碳纳米管(CNTs)复合材料,通过测试和分析发现,CNTs 质量分数为 5% 时,复合材料在 3.1 GHz 附近产生最大吸收峰,峰值为 19.7 dB,结果表明,通过锆铁氧体包覆的 CNTs 可以实现低频段的强吸收,为今后的研究提供了方向。

刘晓霞等^[29]采用沸腾回流法制备了 $\text{Ni}_{0.4}\text{Zn}_{0.35}\text{Co}_{0.25}\text{La}_x\text{Fe}_{x-2}\text{O}_4$ 与 CNTs 复合的吸波材料,考察了稀土元素镧(La)的掺杂量对复合材料电磁性能及吸波性能的影响。结果表明,当 La 元素的掺杂量 x 为 0.05 时,复合材料的饱和磁化强度最高;当 La 元素的掺杂量 x 为 0.07 时,复合材料的矫顽力最大(34.38Oe),同时,在 0~6 GHz 频率范围内,此复合材料的微波吸收性能最佳,最大吸收值达到 12.0 dB,大于 5 dB 的带宽为 1.4 GHz。

张衡^[30]制备了铁磁性材料(铸铁粉、铁屑、钡铁氧体)-乙丙橡胶复合材料,并研究了不同吸波剂含量对其微波隐身特性的影响,发现当吸收剂质量分数为 60% 时,各种复合材料均在高频处(大于 10 GHz)有强吸收,当将不同复合材料试样进行叠加时,则在低频处(2~8 GHz)出现高吸收。此现象精确的理论知识还需要大量的试验研究。

4 结语

综上所述,近几年有关铁氧体复合材料的研究取得了很大的进展,特别是聚苯胺和铁氧体的复合物,其电磁性能和吸波性能较之单体都有很大改善。虽然进展迅速,但是还有广阔的研究前景。笔者认为有两点将是今后发展趋势:一是铁氧体复合材料制备技术的进一步研究,特别是形态、容貌的控制。二是从理论出发,更加明确铁氧体与导电聚合物的吸波机理,为以后的研究提供强有力的理论依据和方向,使得更多的材料相互结合起来,将其优点集中起来,取长补短、优势互补,制备出“薄、轻、宽、强”的新型吸波材料。

参考文献

- [1] Abbas S M, et al. Materials Science and Engineering(B), 2005, 123:167-171.
- [2] Peng Cheng-Hsiung, et al. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2004, 284:113-119.
- [3] Mu Guohong, et al. Materials Letters, 2008, 62:840-842.
- [4] 靳强.W 型铁氧体及其复合吸波材料的制备和性能研究[D]. 太原: 中北大学, 2014.
Jin Qiang. Preparation and microwave absorbent properties of W-type ferrite and composite[D]. Taiyuan:North University of China, 2014.
- [5] Kazantseva N E, et al. Journal of Magnetism and Materials, 2004,

- 269:30–37.
- [6] Sapurina I, et al. *Synthetic Metals*, 2002, 129(1):29–37.
- [7] 何玲. 聚苯胺 / 钴锌铁氧体复合材料的制备及其电磁性能的研究 [D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2014.
- He Ling. Preparation and electromagnetic performance of polyaniline / Co Zn ferrite composites[D]. Shenyang:Shenyang Ligong University, 2014.
- [8] 张罡, 等. 材料保护, 2009, 42(9):19–21.
- Zhang Gang, et al. *Materials Protection*, 2009, 42(9):19–21.
- [9] 李元勋, 等. 高等学校化学学报, 2008, 39(3):640–644.
- Li Yuanxun, et al. *Chemical Journal of Chinese Universities*, 2008, 39(3):640–644.
- [10] 周克省, 等. 功能材料, 2009, 40(5):720–723.
- Zhou Kesheng, et al. *Journal of Functional Materials*, 2009, 40(5):720–723.
- [11] 熊为华, 等. 磁性材料及器件, 2007, 38(3):30–32.
- Xiong Weihua, et al. *Journal of Magnetic Materials and Devices*, 2007, 38(3):30–32.
- [12] 赵海涛, 等. 中国有色金属学报, 2011, 21(4):843–847.
- Zhao Haitao, et al. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2011, 21(4):843–847.
- [13] 庞建峰, 等. 电子元件与材料, 2012, 31(3):40–44.
- Pang Jianfeng, et al. *Electronic Components and Materials*, 2012, 31(3):40–44.
- [14] 姜静静. 导电聚苯胺 / 钡铁氧体复合材料的制备及吸波性能 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- Jiang Jingjing. Preparation and microwave absorption properties of conductive polyaniline / barium ferrite composite materials[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology, 2007.
- [15] 徐分芳. 基于樟脑磺酸诱导手性聚苯胺 / 铁氧体复合物的制备、表征及吸波性能研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- Xu Fenfang. Preparation, characterization and microwave absorbing properties of composite of ferrites / chiral polyaniline induced by chiral camphorsulfonic acid[D]. Chongqing:Chongqing University, 2014.
- [16] 蒋军军. “配位–聚合–水热”法制备聚苯胺 / 铁氧体纳米复合物及吸波性能 [D]. 长沙: 湖南师范大学, 2014.
- Jiang Junjun. Study on microwave absorption properties of polyaniline / ferrite nanocomposites synthesized by “coordination-polymerization-hydrothermal” method[D]. Changsha:Hunan Normal University, 2014.
- [17] 马素云, 等. 功能材料, 2010, 41(10):1 750–1 752.
- Ma Suyun, et al. *Journal of Functional Materials*, 2010, 41(10):1 750–1 752.
- [18] 沈国柱, 等. 同济大学学报: 自然科学版, 2008, 36(3):379–382.
- Shen Guozhu, et al. *Journal of Tongji University:Natural Science Edition*, 2008, 36(3):379–382.
- [19] 沈国柱, 等. 玻璃钢 / 复合材料, 2007(1):19–23.
- Shen Guozhu, et al. *Fiber Reinforced Plastics / Composites*, 2007(1):19–23.
- [20] 沈国柱, 等. 同济大学学报: 自然科学版, 2006, 34(7):933–936.
- Shen Guozhu, et al. *Journal of Tongji University:Natural Science Edition*, 2006, 34(7):933–936.
- [21] 刘志宾, 等. 功能材料, 2011, 42(1):124–127.
- Liu Zhibin, et al. *Journal of Functional Materials*, 2011, 42(1):124–127.
- [22] 常传波. $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 铁氧体基纳米复合材料的制备及其吸波性能研究 [D]. 太原: 中北大学, 2011.
- Chang Chuanbo. Studies on the preparation and microwave absorbing properties of $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ferrite-based nanocomposite materials[D]. Taiyuan:North University of China, 2011.
- [23] 伊翠云. 聚苯胺 / 纳米钡铁氧体复合吸波材料性能的研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.
- Yi Cuiyun. Research polyaniline / barium ferrite composite absorbing material properties[D]. Wuhan:Wuhan University of Technology, 2007.
- [24] 赵海涛, 等. 功能材料, 2009, 40(3):467–469.
- Zhao Haitao, et al. *Journal of Functional Materials*, 2009, 40(3):467–469.
- [25] 张磊. MWNTs / $\text{Co}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ / PI 复合吸波材料的制备及其性能研究 [D]. 天津: 天津大学, 2011.
- Zhang Lei. Preparation and properties of composite absorbing materials MWNTs / $\text{Co}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ / PI[D]. Tianjin:Tianjin University, 2011.
- [26] 李永波. 铁氧体 / 聚吡咯和镍 / 硫化锌磁性复合材料的制备与表征 [D]. 长沙: 中南大学, 2010.
- Li Yongbo. Preparation and characterization of composite magnetic about nickel / ZnS and ferrite / poly-pyrrole[D]. Changsha:Central South University, 2010.
- [27] 刘姣, 等. 有色金属 (冶炼部分), 2009(1):21–24.
- Liu Jiao, et al. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2009(1):21–24.
- [28] 王文婷, 等. 化工新型材料, 2011, 39(2):69–71.
- Wang Wenting, et al. *New Chemical Materials*, 2011, 39(2):69–71.
- [29] 刘晓霞, 等. 化工新型材料, 2013, 41(3):63–65.
- Liu Xiaoxia, et al. *New Chemical Materials*, 2013, 41(3):63–65.
- [30] 张衡. 宽频带微波隐身材料的吸波性能研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.
- Zhang Heng. Absorbing performance wideband microwave stealthy material[D]. Xi'an:Xidian University, 2012.