

综述与专论

P 波段吸波材料研究进展

李 泽 王建江* 高海涛

(陆军工程大学石家庄校区车辆与电气工程系, 石家庄 050003)

摘 要 吸波材料的出现极大改善了电磁环境,提升了武器装备的作战效能,但随着 P 波段探测技术的迅猛发展,研究具有“薄、宽、轻、强”特性的 P 波段吸波材料有着非常重要的意义。针对目前吸波材料存在的低频瓶颈,对传统吸波材料和超材料吸波体,从影响 P 波段吸收性能的因素及研究现状两方面进行了综述,并对未来 P 波段吸波材料的发展方向进行了总结与展望。

关键词 P 波段,磁性吸波材料,超材料吸波体

Research progress of low frequency P band wave absorbing material

Li Ze Wang Jianjiang Gao Haitao

(Department of Vehicle and Electrical Engineering, Army Engineering University Shijiazhuang Campus, Shijiazhuang 050003)

Abstract The emergence of microwave absorbing materials has greatly improved the electromagnetic environment and improved the operational effectiveness of weapons. With the rapid development of P band low frequency detection technology, therefore research of absorbing materials with “thin, broadband, light and strong” characteristic in the P band has very important significance. Aiming at the low frequency absorbing materials bottlenecks, the traditional absorbing materials and metamaterial absorbers were summarized from the affect factors of P band absorption performance and research status two aspects. In the end, the developing trend and the issues to be resolved of P band absorbing materials were discussed.

Key words P band, magnetic absorbing material, metamaterial absorber

现代武器装备已经进入了隐身化时代,如何降低其特征信号的可探测性成为决胜未来战场的关键。雷达吸波材料能够通过自身独特的结构与物理特性将入射电磁能转化为热能或机械能,实现对雷达电磁波的“隐身”^[1]。吸波材料主要包含以磁损耗、电损耗为主的传统吸波材料和基于结构耦合谐振损耗为主的超材料吸波体,前者拥有丰富的材料种类而后者结构方便可调^[2-4]。

近年来雷达吸波材料的研究工作主要集中在应对火控雷达频率范围(即 X 及 Ku 波段)的减薄、减重方面,而对于低频段电磁波研究较少。P 波段电磁波频率介于 0.23~1GHz 之间,波长横跨米及分米尺度^[5],是目前远程预警雷达的主要工作频段,其长波长对吸波材料的电磁参数设定及厚度控制都带

来了严峻挑战^[6]。正是为了降低低频长波雷达对飞行器的可探测性,研究人员对两类吸波材料的 P 波段电磁波吸收性能进行了探索,发展先进高效的 P 波段雷达吸波材料已成为各国吸波领域的重点研究方向。

1 P 波段传统吸波材料

低频吸波材料经过几十年的发展,已经由最初的电磁软铁及坡莫合金等发展到现在具有双复特性的高磁性材料^[7]。由于 P 波段电磁波频率极低,直接使用磁性合金及铁氧体材料吸收效果不佳。目前研究的重点是以高磁性材料为基础,通过多种材料制备及加工手段改变吸波材料的空间结构、晶型及物相组成,以获得具有理想电磁特性的复合吸波材料^[8-10]。本节对 P 波段传统吸波材料应具备的电磁

基金项目:河北省自然科学基金(E2015506011);国防科技重点实验室基金(9140C870401140C87366)

作者简介:李泽(1990-),男,博士研究生,主要从事电磁吸波材料研究。

联系人:王建江。

特性及现阶段几种 P 波段传统吸波材料进行了整理归纳。

1.1 P 波段吸波材料的电磁特性

传统吸波材料是依靠材料内部的“电摩擦”与“磁摩擦”将入射电磁能转化为热能从而衰减电磁波^[11],而产生这种衰减的关键取决于材料的本征属性,即电磁参数,由介电常数 ϵ 和磁导率 μ 表示,因此吸收 P 波段电磁波就需要吸波材料具有相应的电磁参数。针对 P 波段吸波材料,仍可延用传输线理论进行电磁参数的预测,如杨志民等^[12]采用传输线理论预测分析了 3GHz 吸波材料的电磁特性。

依据传输线理论^[13],单层均质吸波材料(背板为导电金属)的反射率(Γ , dB)是介电常数实部(ϵ')和虚部(ϵ''),磁导率实部(μ')和虚部(μ''),以及频率(f , GHz)和厚度(d , mm)这 6 个变量的函数,计算公式见式(1)。

$$\Gamma = -20\lg\left|\frac{z \tanh(jk \cdot d) - z_0}{z \tanh(jk \cdot d) + z_0}\right| \quad (1)$$

式中, j 为虚部单位; Z_0 为真空波阻抗, $12\pi\Omega$;其中传播常数 k 和吸波材料的波阻抗 Z 可分别按式(2)和式(3)计算。

$$k = \sqrt{\epsilon_0 \mu_0 (\epsilon' - j\epsilon'')(\mu' - j\mu'')} \quad (2)$$

$$Z = \sqrt{\frac{(\mu' - j\mu'')\mu_0}{(\epsilon' - j\epsilon'')\epsilon_0}} \quad (3)$$

式中, ϵ_0 为真空介电常数; μ_0 为真空磁导率。

通过不断调整磁导率的取值,反推出吸波材料所需的介电常数范围,可得到 P 波段电磁波吸收与吸波材料电磁参数之间的关系^[14-15]。随着材料磁导率的增大在满足 P 波段吸收指标条件下材料所需的介电常数可取值范围越大,即更易满足电磁参数需求。极高的磁导率实部及虚部,较高的介电常数实部以及较低的介电常数虚部是 P 波段吸波材料应具备的基本电磁性能,可见对于磁导率的需求是单调的,越高的磁导率低频吸波性能越好,而对于介电常数的需求实部与虚部各不相同,这也是目前低频吸波材料介电常数调控的难点。

1.2 P 波段传统吸波材料的研究现状

1.2.1 磁性复合吸波材料

吸波材料的复合化是通过多种物理化学手段使两种或多种不同类型材料达到原子或分子尺度的结合进而获得联合损耗机制的材料处理方法^[16]。将磁性吸波材料进行复合设计是提升低频吸波性能的重要手段,旨在改善吸波材料的低频阻抗匹配性能及提升电磁损耗能力。近年来对传统吸波材料复合化处理

更加趋向于多元化以及分子尺度精细化修饰等方面。

Andreev 等^[17]采用两步法合成了 Ni-Zn 铁氧体,并通过控制合成过程对 Ni-Zn 铁氧体进行 Fe_2O_3 掺杂,促进晶体结构畸变,使其在 P 波段获得了优异的磁性能,取得了良好的低频吸收效果,在 0.1~1.1GHz 范围内的反射率均小于 -10dB。Wang 等^[18]制备了 Mn-Zn 铁氧体/导电聚苯胺/环氧树脂纳米复合材料,依靠铁氧体提供磁性能,聚苯胺调节介电性能,实现了 30MHz~1GHz 的有效吸收,在 600MHz 至 1GHz 范围内的反射率均低于 -10dB。此外,如 Genc 等^[19]制备的 $\text{B}_2\text{O}_3/\text{Ni}_x\text{Zn}_{0.9-x}\text{Mn}_{0.1}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 复合材料可用作 0.1~3GHz 吸波材料的磁性添加剂,赵廷凯等^[20]制备的中空双层碳纳米管/羰基铁核壳材料及 Li 等^[21]合成的 Fe_3O_4 镶嵌碳纳米管结构都在保证高磁导率的情况下调节了介电常数,取得了低频吸波性能的突破。通过尝试设计一些新颖的材料复合形式能够对未来 P 波段吸波材料的发展提供新思路。

基于磁性材料的复合结构材料,在保证磁性能的前提下,通过复合化处理,改善了介电性能,提升了匹配阻抗能力,可设计性强,能够充分利用各种材料的研究成果。但其同样存在复合结构设计缺少突破、合成工艺日趋复杂以及制备条件控制严格等问题,距离大规模生产应用仍有较大距离。

1.2.2 超高磁导率金属吸波材料

磁性金属是指有磁性能的金属及合金,具有高的饱和磁化强度,主要依靠磁致损耗、涡流损耗衰减电磁波^[22]。由于磁性金属本身存在的 Snoek 极限,为进一步提升低频磁导率,相继研究出了具有特殊结构及成分配比的磁性金属材料,如具有几何各向异性的磁性材料以及纳米晶/非晶磁性材料^[23]。

早期就有日本学者^[24]使用粒径 $1\mu\text{m}$ 的微纳米羰基铁粉与环氧树脂进行混合制备了厚度 2mm 的吸波涂层,控制羰基铁粉填充率体积分数达到 57% 时,在 P 波段具有一定吸收能力,最佳吸收频率在 2GHz 处反射率达到 -22dB。刘立东^[25]采用高速离心雾化法制备了具有形状各向异性的纺锤形纳米晶 FeSiAl 合金粉,结果显示当吸收剂与基体质量比为 16:1,涂层厚度仅为 1.1mm 时,在 590MHz~1.8GHz 范围内反射率均低于 -4dB。Xu 等^[26]制备了体积分数为 50%微纳米羰基铁与 5%石墨的橡胶基复合吸波涂层,随着涂层厚度的增加低频吸波性能逐渐提升,当涂层厚度为 2mm 时,对 0.8~1GHz 电磁波有低于 -5dB 的吸收。Deng 等^[27]制

备的非晶 CoFeZr 合金,在低频段具有极高的磁导率,1GHz 频率下磁导率虚部达到 5。

磁性金属吸波材料磁性能好,价格便宜,应用广泛,通过各向异性化及非晶化处理能够进一步提升磁性能,但密度大易腐蚀氧化的特点限制了其进一步发展。尽管目前能够应用于 P 波段的传统吸波材料较少,但通过现有的研究成果可以看出,复合化、纳米晶/非晶化以及颗粒空间形态控制等手段均对突破传统材料电磁性能束缚有一定帮助,未来通过更广泛的综合设计以及创新电磁理论等方面都能够对提升 P 波段吸波材料发展有重要意义。

2 P 波段超材料吸波体

超材料是一种特殊的结构型吸波材料,主要由表面图案层、中介质层以及底层导电层 3 层结构组成,能够利用自身结构组成谐振单元损耗吸收电磁波,具有结构简单、可控可调、吸收率高的特点^[28]。

通过合理设计超材料的结构单元,能够使超材料在某一频段内的输入阻抗与自由空间的阻抗相等,达到完美的阻抗匹配条件,使入射电磁波几乎无反射的被超材料吸收^[29]。此外,由于吸波机理的不同,超材料吸波体无需追求极致的材料本征电磁参数,而只需进行合理的结构设计就能满足低频 P 波段的吸波需求。正是由于超材料吸波体良好的可设计性以及不受 1/4 波长规律限制,使其在低频吸波领域取得快速发展。表 1 为两类吸波材料在解决低频问题上的优缺点^[30-31]。

表 1 两类吸波材料在解决低频问题上的优缺点对比

类型	吸波机理	优点	缺点
传统吸波材料	材料内部的共振及滞后效应	材料种类丰富,制备手段成熟	厚度大、密度大
超材料吸波体	谐振作用、表面电流的欧姆损耗	亚波长特性、易于调节、可设计性强、可实现异常反	吸波频带窄、结构单元尺寸大

2.1 P 波段超材料吸波体的设计要求

超材料的吸波特性主要由图案层和介质层的结构类型、结构参数和材料性质决定^[32],其中结构类型与材料性质的多样性以及结构参数的复杂性,使超材料具有了优良的可调节性,通过对控制因素的调控,超材料吸波体的 P 波段吸波性能能够得到拓展。

2.1.1 图案层部分

图案层是超材料的主要设计部分,包含了材料选择与图案设计。材料方面:包括基于电阻膜的电阻型与导电金属的谐振型两类,其中电阻型超材料

依靠电阻膜产生的欧姆损耗以及电阻膜与金属底板形成的磁损耗衰减电磁波,具有良好的宽频匹配特性,但低频吸收效果较差^[33],常用于宽频吸波。谐振型超材料基于基本单元耦合结构对入射电磁波产生强烈的电、磁谐振,从而产生金属膜表面的欧姆损耗和基板的介质损耗,通过结构参数设计可以实现任何频段的强吸收^[34],表现出窄带强吸收的特点,目前低频范围内使用较多。

图案设计方面:图形结构能够直接影响谐振频率与带宽,是目前超材料研究的重点。针对 P 波段超材料吸波体图案设计应满足以下 3 点要求:

(1)为消除入射电磁波的极化现象,其图案结构应具有至少大于四重的旋转对称性^[35]。

(2)由于低频段吸收峰主要由等效电容和电阻决定,通过减小图案相邻线条的间隔,能够提升等效电容 C,从而使吸收频率 f 向低频移动^[36],因此图案在电磁波入射时应能够更利于电荷聚集,设计成类似镂空结构或多曲折的样式。

(3)根据驻波共振发生的条件超材料结构单元尺寸存在的关系如式(4)所示^[37]。

$$l \approx (2j-1) \frac{c}{2n(f_1)f_1} \quad (4)$$

式中, l 为结构单元尺寸,mm; c 为真空波速, 3×10^8 m/s; j 为驻波共振模数; n 为介质层折射率; f_1 为共振频率,GHz。当共振模次为 1 时可简化为式(5)。

$$l \approx \frac{\lambda}{2\sqrt{\epsilon_r}} \quad (5)$$

式中, ϵ_r 为相对介电常数。式(4)和式(5)表明图案尺寸越大谐振频率越低,表面单元的长度大约为谐振波长的 1/2。

2.1.2 介质层部分

介质层同样包括两方面设计内容:材料和厚度。目前介质层材质主要包括无耗材料如空气层、聚甲基丙烯酸酯亚胺(PMI)泡沫层及玻纤布基材含浸耐燃环氧树脂铜箔基板(FR-4)等,为超材料结构提供支撑和谐振空间^[38]。介质层的材料选择与厚度两者相互影响并且与图案层的设计有密切关系,需要采用计算机仿真软件进行综合优化。

庞永强^[39]讨论了一种简单结构吸波体 Salisbury 屏的工作频率与电介质厚度和相对介电常数的关系,如式(6)所示。

$$f = c/4h\sqrt{\epsilon_r} \quad (6)$$

式中, f 为工作频率,GHz; c 为真空波速, $3 \times$

10^8 m/s ; h 为电介质厚度, mm。

可以看出,在确定图案设计的前提下,提升介质层的介电常数和厚度能够促进吸收频率降低。近年来在介质层的设计中引入了磁性能,使介质层不仅具有高的介电常数还具有一定的磁导率,为研究低频宽带超材料带来了新的突破点。研究发现,用有耗材料作为介质层后,还可在介质层对应 $1/4$ 波长处产生一个吸收峰,形成双峰宽频吸收有助于提升综合低频吸波性能。

2.2 P 波段超材料吸波体研究现状

2.2.1 谐振型超材料吸波体

Zuo 等^[40]设计了一种电路谐振型超材料,该超材料单元结构组成依此为加载电阻元件的导电金属线、FR-4 介质层、空气层以及金属背板,通过与无弯曲金属线图案的超材料进行对比发现,增加金属线长度及减小金属线间隔能够使超材料的共振频率向低频移动,并且可以使结构单元尺寸缩小 2 倍,优化后的结构在 910MHz 达到完美吸收,在 840 ~ 970MHz 范围内的吸收率超过 90%。

左伟庆等^[41]设计了一种 3 层金属方环叠加结构超材料吸波体,将低频吸波频带进行有效拓宽,在 UHF 波段 (300 ~ 3000MHz) 吸收率超过 90%。Buitung 等^[42]设计了一种针对 P 波段的沙漏型图案超材料吸波体。研究发现,能量损耗主要集中在曲折金属部分,通过增加曲折金属线的长度能够降低共振频率。谐振型超材料结构简单易于设计,但其只有在谐振点可达到完美吸收,吸收频带窄,难以实际应用,如何增加吸收带宽是基于金属线图案的谐振型超材料亟需解决的问题。

2.2.2 复合结构超材料吸波体

复合结构超材料是将不同类型超材料或超材料与传统吸波材料进行有机的整体化设计。Nie 等^[43]设计了一种复合超材料,将谐振型超材料与电阻膜型超材料相叠加,在厚度为 2mm 时, P ~ C 波段 (1 ~ 7GHz) 内电磁波吸收率均大于 90%。Cheng 等^[44]设计的一种复合型超材料,将羰基铁橡胶层替代超材料中的电介质层,表面采用印刷电路板 (PCB) 技术制备了十字金属图案。结果表明,在同一厚度下,该型磁介质超材料比羰基铁橡胶层有效吸收带宽提升了 70%,不仅低频性能得到提升,而且拓展了吸收带宽。Zhang 等^[45]设计了一种磁介质的复合超材料结构,依次由针形图案层、磁介质层与金属背板组成。研究发现,将传统磁性吸波材料加入到超材料整体设计中,不仅能够保留传统吸

波材料的吸波特性,还能在更低频率赋予一个新的谐振吸收峰。

目前针对 P 波段的复合结构超材料相对匮乏,但是在一些关于低频宽频化的研究中,复合超材料展现出良好的 P 波段吸波潜力,复合后能够发挥各部分材料/结构的优势,有望实现对 P 波段电磁波的有效吸收。同时如果能够解决复合结构超材料设计中的盲目性,形成一套完善的设计原则对后续的低频超材料吸波体发展有重要价值。

3 结语与展望

P 波段吸波材料随着长波雷达的发展与应用而受到了极大的重视,在近些年也取得了快速发展,实现了由最初的高填充率单一磁性材料逐渐过渡到多元复合材料及超材料吸波体,吸波性能逐渐提升。但是,目前的 P 波段吸波材料依然存在许多不足,如传统吸波材料因高填充率而导致的高密度、超材料吸收频带窄以及结构单元尺寸大等问题,并且无论传统吸波材料还是超材料厚度均偏大,实际应用价值较低。通过前期研究将传统吸波材料应用到超材料结构设计当中成为目前取得低频吸波性能突破的有效方式,但还需要进一步从理论、材料、结构设计等方面进行研究与改进。

加强理论研究,超材料与传统吸波材料的复合结构设计存在较大随意性,缺乏理论指导。尤其表现在电磁波经由图案层后对传统吸波材料输入阻抗的影响以及传统吸波材料电磁参数与超材料结构之间的关系。

丰富传统吸波材料种类,目前应用在超材料结构中的传统吸波材料多为磁性材料且种类较为单一,没有充分利用传统吸波材料种类丰富、电磁参数可调的特点,如何最优化的将两类吸波材料进行复合还需要进一步探索最佳的材料选择与结构参数。

结构设计由二维拓展到三维,在前期超材料与传统吸波剂相结合的研究过程中,研究工作多集中在图案层的设计及参数优化方面,而对于厚度方向的多层结构与立体结构研究较少。通过对三维方向综合设计,有助于充分发挥超材料的电磁参数调控优势,拓展低频吸波性能。

参考文献

- [1] 周影影, 谢辉, 周万城. 羰基铁粉抗氧化性能研究现状[J]. 材料导报, 2018, 32(3): 749-751.
- [2] 庞建峰, 马喜军, 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): 7-10.

- [3] Landy N, Smith D R. A full-parameter unidirectional metamaterial cloak for microwaves[J]. *Nat Mater*, 2012, 12(1): 25.
- [4] 郑夏莲, 朱正吼, 卢慧芳. 纳米 FeNi 粉体的吸波性能研究[J]. *功能材料*, 2014, 45(24): 15-17.
- [5] 吴剑旗. 反隐身与发展先进米波雷达[J]. *雷达科学与技术*, 2015, 13(1): 3.
- [6] 霍天旭, 乔亮, 王涛, 等. 取向易面各向异性羰基铁粉体的高频磁性研究[J]. *物理学报*, 2014, 63(16): 167503.
- [7] 宦峰, 谢国治, 陈将伟, 等. 低频吸波材料研究进展[J]. *材料导报 A: 综述篇*, 2014, 28(1): 18.
- [8] Kwang P, Woo H K, Jae G L. Influence of aluminum doping in Li-Co-Ti ferrite[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2012, 324(18): 2701-2704.
- [9] 韩瑞. 易面各向异性磁粉复合材料微波吸收性能研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2010.
- [10] 傅朕, 周晓军, 范仲康, 等. Ni 取代对 MnZn 铁氧体磁特性的影响[J]. *磁性材料与器件*, 2012(2): 61-63.
- [11] 赵灵智, 胡社军, 李伟善, 等. 吸波材料的吸波原理及其研究进展[J]. *现代防御技术*, 2007, 35(1): 28.
- [12] 杨志民, 毛昌辉, 杨剑, 等. 低频(3GHz)微波吸收材料电磁参数匹配特性的研究[J]. *稀有金属*, 2004, 28(6): 1006-1008.
- [13] 田维. 低频铁基复合吸波材料的制备及电磁特性研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2016.
- [14] 周静. 纳米晶铁基片状材料的制备与微波电磁性能研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
- [15] 高芳乾. 搅拌磨工艺参数对制备片状铁的结构及微波电磁性能的影响[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.
- [16] Wang W J, Jiao Q G, Zang C G, et al. Study on the absorption properties of spinel type ferrite composite coatings in the low frequency[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 415: 30-34.
- [17] Andreev V G, Menshova S B, Klimov A N, et al. The influence of basic composition and microstructures on the properties of Ni-Zn ferrite radio-absorbing materials[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Material*, 2015, 393: 569-573.
- [18] Wang W J, Zang C G, Jiao Q G. Magnetic ferrite/conductive polyaniline nanocomposite as electromagnetic microwave absorbing materials in the low frequency[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 333: 1811-1813.
- [19] Genc F, Tur E, Kavs H, et al. Magnetic and microwave absorption properties of $Ni_xMn_{0.9-x}Fe_2O_4$ prepared by boron addition[J]. *J Supercond Nov Magn*, 2015, 28: 1047-1050.
- [20] 赵廷凯, 张红燕, 朱若星, 等. 碳纳米管包覆空心羰基铁粉的制备及其磁性[J]. *稀有金属材料与工程*, 2016, 45(8): 2166-2168.
- [21] Li N, Huang G W, Li Y Q, et al. Enhance microwave absorption performance of coated carbon nanotubes by optimizing the Fe_3O_4 nanocoating structure[J]. *Applied Materials*, 2017, 9: 2973.
- [22] 景红霞. 低频复合吸波材料的制备及电磁性能研究[D]. 太原: 中北大学, 2013.
- [23] 谷国强, 苏勋佳, 侯根良, 等. 涂覆型吸波材料的研究现状及展望[J]. *工艺与材料*, 2010(11): 85-89.
- [24] Matsumoto M, Miyata Y. Thin wave absorber containing carbonyl-iron particles surface-treated with a coupling agent[J]. *Journal of Japan Applied Magnet Association*, 1998, 22: 885.
- [25] 刘立东. 铁磁性吸波材料的制备及其电磁性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2011.
- [26] Xu Y G, Zhang D Y, Cai J, et al. Microwave absorbing property of silicone rubber composites with added carbonyl iron particles and graphite platelet[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2013, 327: 82-86.
- [27] Deng L W, Jiang J J, Fan S C, et al. GHz microwave permeability of CoFeZr amorphous by two-step mechanical alloying[J]. *J Magn Magn Mater*, 2003, 264(1): 50.
- [28] 周卓辉, 刘晓来, 黄大庆, 等. 一种基于十字镂空结构的低频超材料吸波体的设计与制备[J]. *物理学报*, 2014, 63(18): 184101.
- [29] 高海涛, 王建江, 许宝才, 等. “三明治”型超材料吸波体及其设计优化的研究现状[J]. *材料导报 A: 综述篇*, 2017, 31(2): 15.
- [30] 赵碧辉, 文岐业, 谢云松, 等. 电磁超材料吸波器的研究进展[J]. *电子元件与材料*, 2011, 30(11): 82.
- [31] Mayank A, Ashis K B, Manoj K M. Dual resonating C-band with enhanced bandwidth and broad X-band metamaterial absorber[J]. *Appl Phys A*, 2016, 122: 166.
- [32] Landy N, Smith D R. A full-parameter unidirectional metamaterial cloak for microwaves[J]. *Nat Mater*, 2012, 12(1): 25.
- [33] 程用志, 王莹, 聂彦, 等. 基于电阻型频率选择表面的低频宽带超材料吸波体的设计[J]. *物理学报*, 2012, 61(13): 134102.
- [34] 王国栋. 电磁超材料的设计及其吸波性能的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
- [35] Smith D R, Schurig D, Pendry J B. A negative refraction of modulated electromagnetic wave[J]. *Phys Lett*, 2008, 88: 187041.
- [36] Yoo Y J, Zheng H Y, Kim Y J, et al. Flexible and elastic metamaterial absorber for low frequency based on small-size unit cell[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105: 041902.
- [37] 院伟, 杨进, 王一龙, 等. 宽带吸波超材料的研究进展[J]. *材料导报 A: 综述篇*, 2016, 30(11): 105.
- [38] Cheng Y Z, He B, Zhang J C, et al. Ultra-thin low-frequency broadband microwave absorber based on magnetic medium and metamaterial[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2017, 46(2): 1295.
- [39] 庞永强. 电磁吸波超材料理论与设计研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2013.
- [40] Zuo W Q, Yang Y, He X X, et al. A miniaturized metamaterial absorber for ultrahigh-frequency RFID system[J]. *IEEE Antennas and wireless propagation letter*, 2017, 16: 329-331.
- [41] 左伟庆, 杨阳, 何小祥. UHF 频段超材料吸波体设计[C]. 合肥: 2015 年全国微波毫米波会议论文集, 2015.
- [42] Buitung S, Khuyenbui V, Dungnguyen V, et al. Small-size metamaterial perfect absorber operating at low frequency[J]. *Adv Nat Sci*, 2014, 5: 045008.
- [43] Nie Y, Cheng Y Z, Guo R Z. A low-frequency wideband metamaterial absorber based on a cave-disk resonator and resistive film[J]. *Chin Phys B*, 2013, 22(4): 44102.
- [44] Cheng Y Z, Nie Y, Wang X, et al. Adjustable low frequency and broadband metamaterial absorber based on magnetic rubber plate and cross resonator[J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 115: 64902.
- [45] Zhang H B, Deng L W, Zhou P H, et al. Low frequency needle-point-shape metamaterial absorber based on magnetic medium[J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 113: 13903.