

雷达吸波材料低频化研究现状及进展

索庆涛 许宝才 王建江 李 泽

(陆军工程大学石家庄校区先进材料研究所,石家庄 050000)

摘 要 研发新型低频吸波材料成为突防多波段雷达的重要方面。重点讨论了低频雷达波吸波材料吸波性能的影响因素。针对低频吸波材料电磁参数要求,综述了当前重点研究和应用的低频吸波材料,包括铁氧体材料、磁性金属微粉材料等,以及各种微观形貌对低频吸波性能的影响,对进一步扩展低频吸波频带的发展进行了展望。

关键词 低频,吸波材料,介电常数,形貌

Research status and progress on low-frequency wave absorbing material

Suo Qingtao Xu Baocai Wang Jianjiang Li Ze

(Ordnance Engineering College, Army Engineering University Shijiazhuang Campus,
Shijiazhuang 050000)

Abstract The research and development of new low-frequency absorbing materials has become an important aspect of penetration of multi-band radar. The factors affecting the absorbing properties of materials were discussed in detail. In view of the requirements of electromagnetic parameters of low-frequency absorbing materials, the current research and application of low-frequency absorbing materials were summarized, including ferrite materials and magnetic metal powder materials, and the effects of various micro-morphologies on low-frequency absorbing properties. The development of further expansion of low-frequency absorbing bands was prospected.

Key words low frequency, absorbing material, permittivity, morphology

随着军事科技的进步,高频段雷达波吸波材料的研发与应用已逐渐成熟。为了在战场中抢占先机,同时为突破吸波材料防护,世界各国对多波段雷达进行了研究和应用。随着雷达波频段的扩展,低频段电磁波特别是分米波、米波在军事领域发挥了越来越重要的作用^[1]。电磁波各波段的性质作用不同,波长越短分辨率越高,但穿透力弱,分辨距离近。波长较长的分米波、米波适合侦查有遮盖伪装的远距离目标。如美国研发的“铺路爪”远程预警雷达,工作频率 420~45MHz,探测距离一般为 4800km。相比高频雷达波,低频段雷达波具有探测距离更远,覆盖面积更大,防御预警时间更短的优点。为实现武器装备的远距离伪装隐藏,反米波雷达侦查的吸波材料发挥越来越重要的作用。因此,研究应用低频吸波材料对武器装备在战场中的生存能力的提升具有重要意义。

1 低频雷达波吸波材料影响因素

雷达波段的拓宽、预警雷达、超视距雷达的研发

和应用使低频吸波材料的研发迫在眉睫。军用雷达波吸波材料主要用于飞行器隐身以及导弹隐身,由于军用装备对吸波材料的质量以及厚度要求严格,因此对雷达波吸波材料的厚度限制较大,同时在雷达波低频段,吸波材料难以在较小厚度下满足吸波性能要求,因此减小低频段吸波材料厚度成为研究的一个重点和难点。

1.1 低频吸波与高频吸波的不同

低频雷达波与高频雷达波相比,频率低,波长长,在同一材料中,低频电磁波的材料阻抗匹配性能更好,即吸波涂层前界面反射雷达波能量更小,但一般材料吸波涂层在低频反射率较高,表明低频波段进入涂层后被理想金属板反射后由涂层前界面射出的雷达波能量较大。

低频波段吸波材料一般采用磁性吸波材料或以磁性吸波材料为基础的复合材料。从电磁损耗机制方面分析,材料分为介电损耗和磁损耗,介电损耗与材料介质极化有关,但高介电损耗不利于材料低频段的阻抗匹配。故低频段主要依赖于磁损耗,而磁

损耗与材料介质磁化有关,磁损耗机制主要有磁滞损耗、涡流损耗、磁后效、自然共振以及畴壁共振等^[2]。各项磁损耗效率与电磁波频率成正比相关,因此在同一材料中,吸波材料对雷达波段高频电磁波损耗更大。因此从吸波材料现状来看,改善吸波材料雷达波段低频吸波性能较高频难。

1.2 低频吸波与材料厚度、电磁参数的关系

基于 $1/4$ 波长相消机制分析, $1/4$ 波长相消机制为:当单层匀质吸波涂层前界面反射电磁波与后界面金属板反射电磁波相位相差 180° 条件下,2 种反射电磁波干涉相抵消,因此出现反射损耗峰^[3]。相比于高频电磁波,低频电磁波波长长,频率低,因此相应的匹配厚度增加,导致材料厚度增加难以满足要求。可以通过提高材料相对介电常数与相对磁导率降低材料厚度,在低频波段形成干涉相消峰。

吸波材料在一定厚度条件下,低频波段具有高的介电常数以及低的介电损耗有利于阻抗匹配,即吸波涂层前界面反射雷达波能量很小。但当前吸波材料存在低频段吸波涂层损耗的雷达波能量小,入射到吸波材料中的电磁波能量难以迅速衰减,最后由金属板反射导致吸波性能很差。即表明提高低频波段磁损耗有利于提高低频波段吸波性能。但从吸波材料研究现状来看,材料雷达波段磁导率提高有限。因此,从 $1/4$ 波长相消机制考虑,调节吸波材料阻抗匹配,将吸波涂层前界面反射电磁波能量与入射电磁波能量分配为合适大小范围,有助于在低频波段形成反射峰。

同时,在低频波段还存在吸波频带窄的问题,在厚度适当并一定条件下,随着雷达波频率的增加,需要相对介电常数与相对磁导率逐渐减小。影响反射损耗吸收峰宽度的最主要的因素,是吸波材料的 $1/4$ 波长厚度随频率的变化率^[3]。在雷达波低频段,需要 $1/4$ 波长厚度随频率的变化率较大,即表明吸波材料相对介电常数与相对磁导率随频率而变化,也就是要求吸波材料相对介电常数与相对磁导率随频率的升高在低频波段有较大变化率的降低,即具有良好的频率响应特性。

通过以上分析表明,提高低频波段吸波性能,需要材料具有高的磁损耗,高的介电常数实部以及低的介电损耗,同时具有良好的介电常数频率响应特性。在磁损耗难以满足要求时,优化材料介电常数实部与虚部大小,调节材料阻抗匹配适用于 $1/4$ 波长相消机制,同样可以提高低频吸波性能。

2 低频吸波材料研究现状

在较高频段(8GHz 以上),经过材料设计与优化,基本可以实现较好的吸波效果,但对 $2\sim 8$ GHz 甚至更低频段的雷达波,则难以达到较好的吸波效果。对低频吸波材料吸波性能的优化研究主要侧重于材料复介电常数与复磁导率调控。通过吸收剂成分以及微观形貌的调整,将吸波材料的电磁参数调整到合理的范围。

2.1 吸收剂种类

提高吸波材料低频吸波性能成为扩展材料吸波带宽的一个重要方向,国内外学者在低频吸波材料方面进行了大量的研究,重点研究和应用的低频吸波材料有铁氧体材料、磁性金属微粉材料等,并采用掺杂、包覆和复合等手段对材料进行成分以及结构方面的改性,调节材料电磁参数,提高低频吸波性能。

2.1.1 铁氧体材料

铁氧体材料因具有较高的磁导率(μ_r)值而成为重要且常用的微波吸收剂。铁氧体具有较高的 μ_r 值,用于低频吸波具有良好的性能表现。同时铁氧体是一种双复介质材料,用于吸波既有电吸收又存在磁吸收。特定结构、成分的铁氧体材料在低频吸波方面将有良好的应用前景。Yusoff 等^[4]采用烧结法制备了微米级锂锌铁氧体,4mm 厚涂层最大吸收峰位于 0.8GHz,电磁波反射率达到 -16 dB,低于 -10 dB 吸收带宽为 $0.3\sim 1.5$ GHz。同时在锂锌铁氧体中掺杂了镁和铜后发现锂锌铁氧体的介电常数变小,低于 -10 dB 微波吸收带宽增加为 $0.3\sim 3.0$ GHz。烧结法制备的铁氧体材料面密度大,填充率高,在应用上存在限制。锆铁氧体属于磁铅石型铁氧体,具有较强的磁晶各向异性和饱和磁化强度,但用于低频吸波必须进行改性处理。王文婷等^[5]通过溶胶-凝胶法在碳纳米管(CNTs)表面成功地包覆了 1 层锆铁氧体($\text{SrFe}_{11.5}\text{O}_{19}$)。通过增加复合材料中碳纳米管的含量,吸收峰逐渐向低频移动,且在 6% CNTs- $\text{SrFe}_{11.5}\text{O}_{19}$ 时吸收峰频率最低,处于 1.8GHz,反射率为 -14 dB。Wang 等^[6]采用锰-锌(Mn-Zn)铁氧体与导电聚苯胺制备了 1 种复合材料,通过调节纳米导电聚苯胺复合量的大小来改变复合材料的电磁参数,达到了 $600\sim 1000$ MHz 的电磁波反射率小于 -10 dB。

2.1.2 磁性金属微粉

与铁氧体材料相比,磁性金属微粉的晶体结构比较简单,没有铁氧体中磁性次格子之间磁矩的相

互抵消,因此其磁性一般较铁氧体强,具有较高的磁导率和饱和磁化强度。同时,磁性金属微粉可以通过改性处理调节材料介电常数大小以及频率响应特性。因此,对采用磁性金属微粉来解决低频吸波问题得到了广泛关注。臧充光等^[7]采用化学镀的方法在碳纳米管表面进行镀镍,测试分析表明镀镍碳纳米管复合材料的介电常数和磁导率等磁性能增大,镀镍后复合涂层薄膜的吸波效能大幅度提高,在接近1.2GHz处的反射损耗的最低峰值为-37dB,改善了低频电磁波的吸波性能。碳纳米管属于电介质材料,具有较高的导电和介电性,但是磁导率低,没有磁性,镍属于铁磁性材料,将金属磁性微粉与碳纳米管复合能形成具有独特磁性能的复合物,有助于改善低频吸波。Liu等^[8]通过在合金锆-铁-铬($\text{Pr}_{13}\text{Fe}_{84}\text{Cr}_3$)中掺杂不同浓度的钛(Ti),结果显示随着掺杂浓度的提高,吸收峰向低频移动。

磁性金属微粉等通过改性具有良好的低频吸波性能,但经过改性如扁平化后低频段介电常数虚部较大,导致阻抗匹配变差。对吸波剂进行包覆不仅可以提高吸波剂的抗氧化性、耐高温性,而且可以调节介电常数,改善低频波段阻抗匹配性能,提升吸波性能。陈文俊等^[9]通过高能球磨法将表面活性剂硬脂酸钙、单一助剂硅烷偶联剂KH-560和复合助剂(KH-560+硬脂酸钙)分别包覆在片状羰基铁粉表面,其中复合助剂达到的包覆效果最好,起到了更好的介电调控的作用,改善了其阻抗匹配特性,在2GHz处的反射损耗峰值达到-15dB,提高了低频吸波性能。

毛为民等^[10]以2:8的配合比将导电聚苯胺复合入羰基铁粉中,并以聚脲为粘合剂制作吸波涂料。发现在聚苯胺电导率为 10^{-2}S/cm 、羰基铁粉颗粒粒径为 $1\sim 2\mu\text{m}$ 条件下,在 $2\sim 12\text{GHz}$ 的频段范围可获得优于-10dB的吸波性能。其不仅在低频波段有良好的吸波性能,并且吸收频带较宽。导电聚苯胺的电磁波介电损耗随其电导率的升高而上升,但过高的电导率易引起趋肤效应、涡流效应,增加电磁波反射强度。

根据低频高效吸波性能的材料电磁参数条件,对材料选择方面需要采用磁导率高的材料。铁氧体作为亚铁磁性材料,具有较高的磁导率,用于低频吸波有较好的效果。但是铁氧体材料密度大,在实际应用中,难以达到吸波材料轻量化的要求。同时铁氧体居里温度低,高温下失去磁性,难以在高温下应用。磁性金属微粉的主要缺点为抗氧化抗酸碱能力

差,在低频波段吸波频带窄。

2.2 控制形貌

2.2.1 片状

吸波材料的吸波能力很大一部分取决于材料的微观形貌。相对于颗粒状吸收剂,具有较大宽厚比的片状吸收剂,饱和磁化强度、磁导率和居里温度均较高。研究发现,通过引入形状各向异性理论,片状金属微粉能够有效突破 Snoke 极限获得更高的低频磁导率^[11-12]。Walser等^[13]从理论上证明,在片状颗粒的宽厚比在 $10\sim 1000$ 之间条件下,其磁导率可提高 $10\sim 100$ 倍^[14],同时颗粒片状化改性可以提高材料介电常数,因此可以对金属微粉进行片状化处理来提升低频吸波性能。周熠等^[15]采用机械球磨工艺对球形铁硅(FeSi)合金粉末进行扁平化处理,随着球磨时间的增加, FeSi 合金扁平化程度增加,其复介电常数和复磁导率都有所提高,4.3GHz处最小反射率为-10.80dB,低频吸波性能较好,且随着球磨时间增加,吸收峰向低频移动。

邓联文等^[16]对成分为的铁基快淬非晶带进行高能球磨改性处理,获得薄片状纳米晶材料,在球磨时间为2h条件下,该材料在2GHz附近的复磁导率可达 $\mu' = 3.95, \mu'' = 3.27$ 。因此,材料片状化程度越高,材料的电磁性能越强。高能球磨处理可以减小材料晶粒大小,提升材料复磁导率,但随着球磨时间的增加,出现剩余应力增加、缺陷增多以及晶粒破碎等,导致磁导率下降影响吸波性能。

2.2.2 纤维

纤维状吸收剂是实现“薄、轻、宽、强”吸波涂层的理想吸收剂之一。相比各向同性材料,纤维的独特形状各向异性使其具有较高的磁导率,因此可以通过材料纤维化来调节材料的电磁参数。磁性纤维吸收剂一般都包括铁氧体磁性纤维、金属磁性纤维、磁性非晶纤维和纳米纤维^[17]。磁性金属材料本身具有高饱和磁化强度,将该材料纤维化后,形状各向异性的增加,更大提高了材料的低频磁导率和磁损耗,对提高材料低频吸波性能具有较好的效果。高正平等^[18]在普通电磁损耗材料中加入了磁性金属纤维,由于磁性金属纤维比普通损耗材料具有更大的低频磁导率,表明低频波段吸波性能有了较大的改善。

2.2.3 其他形貌

其他如通过纳米线氧化钴(CoO)^[19]、树枝状氧化锌(ZnO)^[20]、海胆状四氧化三铁(Fe_3O_4)^[21]和空心状 Fe_3O_4 ^[22]等复杂几何形态来实现良好低频吸

波性能。蔡旭东等^[23]采用自反应淬熄法制备了铁氧体空心复相微珠,表征后发现在匹配厚度为 4mm 条件下低频吸波性能良好,最低反射率为 -14.5dB,对应的吸收频率为 5.8GHz,低于 -10dB 的吸收频带为 4.8~6.8GHz。空心微珠相比片状材料,具有密度小、低频吸波性能较好的优点,但存在吸波频带较窄,同样没有解决低频吸波材料的厚度问题。

通过对材料的微观形貌进行改性处理,可以提高材料磁导率,提升吸波性能。但是材料形貌改性难度主要在控制方面,通过改变微观形貌提高低频吸波性能,需要研究改进改性工艺,对材料的微观形貌做到精准控制,因此做到低频特别是 0.3~2.0GHz 的高效吸波需要继续深入研究材料制备以及改性的工艺手段。

3 结语与展望

为应对低频预警雷达的威胁,军事武器装备低频隐身越来越受到重视,并且低频段的隐身研究也取得了较大的进步。但是对分米波、米波的研究较少,同时分米波、米波隐身研究制备方面难度较大,存在隐身频带窄,面密度大等问题;同时材料厚度问题并没有得到有效解决。因此,对低频吸波,需要进行更深入的研究。

(1) 低频段特别是分米波、米波波段吸波微观机理进行深入研究,研究材料的微观结构对材料电磁参数的影响,在此基础上,研究适用于低频吸波的材料以及制备方法。

(2) 传统铁磁材料密度大,材料厚度有限制,在满足低频性能条件下,很难满足吸波材料‘薄’、‘轻’的要求;同时材料磁导率的控制范围较小,应深入研究材料频率响应特性以及介电常数实部、虚部有效调节方法,降低低频吸波材料厚度要求。

(3) 针对低频波段的吸波原理以及吸波材料特点,研究开发应用低频吸波新材料,如超材料、非晶态合金材料等。并与其他材料复合做到吸波频段全覆盖。

参考文献

- [1] Kaouther N, Douraid D, Ahmed L. Effects of microwave (2.45GHz) irradiation on some biological characters of salmonella typhimurium[J]. Comptes Rendus Biologies, 2013, 336(4): 194-202.
- [2] 刘顺华, 刘军民, 董星龙, 等. 电磁波屏蔽及吸波材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014: 164-176.
- [3] 王涛, 位建强, 张钊琦, 等. 片型 FeSiAl 磁粉复合材料的雷达

- 波吸收机理[J]. 中国材料进展, 2013, 32(2): 94-100.
- [4] Yusoff A N, Abdullah M H. Microwave electromagnetic and absorption properties of some LiZn ferrites[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2004, 269: 271-280.
- [5] 王文婷, 李巧玲, 常传波. 铁氧体包覆碳纳米管吸波材料的制备及表征[J]. 化工新型材料, 2011, 39(2): 69-71.
- [6] Wang W J, Zang C G, Jiao Q J. Magnetic ferrite/conductive polyaniline nanocomposite as electromagnetic microwave absorbing materials in the low frequency[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 333: 1811-1815.
- [7] 臧充光, 张玉龙, 朱祥东, 等. 镀镍碳纳米管/环氧树脂复合材料的吸波性能研究[J]. 中国科技论文, 2016, 11(16): 1872-1877.
- [8] Liu X, Pan S K, Cheng L C, et al. Microwave absorbing performance of RE-Fe based alloys[J]. Journal of Wuhan University of Technology-Mater, 2015, 30(3): 607-610.
- [9] 陈文俊, 谢国治, 王锰刚, 等. 复合助剂高能球磨对羰基铁粉低频吸波性能的影响[J]. 电子元件与材料, 2016, 35(10): 30-33.
- [10] 毛卫民, 方鲲, 吴其晔, 等. 导电聚苯胺/羰基铁粉复合吸波材料[J]. 复合材料学报, 2005, 22(1): 11-14.
- [11] Yanagimoto K, Majima K, Sunada S, et al. Effect of powder compositions on GHz microwave absorption of EM absorbing sheets[J]. J Jpn Soc Mctal, 2004, 51(4): 293-296.
- [12] 葛副鼎, 朱静, 陈利民. 吸收剂颗粒形状对吸波材料性能的影响[J]. 宇航材料工艺, 1996(5): 42-49.
- [13] Walser R M, Win W, Valanju P M. Shaprotimized ferro-magnetic particles with maximum theoretical microwave susceptibility[J]. IEEE Trans Magn, 1998, 34(4): 1390-1392.
- [14] Wang X, Gong R, Li P. Effects of aspect ratio and particle size on the microwave properties of Fe-Cr-Si-Al alloy flakes[J]. Mater Sci Eng A, 2007, 466(1): 178-182.
- [15] 周熠, 丘泰, 冯永宝. 扁平化对 FeSi 吸波材料微波电磁性能的影响[J]. 电子元件与材料, 2010, 29(4): 31-33.
- [16] 邓联文, 江建军, 赵振声, 等. 片状纳米晶微粉的制备及微波吸收特性[J]. 功能材料与器件学报, 2002, 8(3): 271-275.
- [17] 李享成, 龚荣洲, 何华辉, 等. 磁性纤维吸收剂的国内外研究进展[J]. 兵器材料科学与工程, 2008, 31(5): 86-90.
- [18] 高正平, 毕兆亿. 含磁性金属纤维的多层雷达吸波材料的设计[J]. 电子科技大学学报, 2006, 35(3): 412-418.
- [19] Zhou R F, Feng H T, Chen J T, et al. Multistep synthesis growth mechanism optical and microwave absorption properties of ZnO dendritic nanostructures[J]. Journal of Physical Chemistry C, 2008, 112: 11767-11775.
- [20] Tong G X, Wu W H, Guan J G, et al. Synthesis and characterization of nanosized urchin-like α -Fe₂O₃ and Fe₃O₄ microwave electromagnetic and absorbing properties[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2011, 509(11): 4320-4326.
- [21] Wang F L, Liu J R, Kong J, et al. Template free synthesis and electromagnetic wave absorption properties of monodispersed hollow magnetite nanospheres[J]. Journal of Materials Chemistry, 2011, 21: 4314-4320.
- [22] Qi H P, Cao H L, Huang Y D. Synthesis of flowerlike nickel particles and their microwave absorbing properties[J]. J Cent South Univ, 2014, 21: 3007-3012.
- [23] 蔡旭东, 王建江, 许宝才, 等. LiZn 铁氧体空心微珠的自反应淬熄法制备及其低频吸波性能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44(8): 2038-2043.

收稿日期: 2017-11-29

修稿日期: 2019-01-24