

文章编号:1000-5862(2020)02-0164-04

掺杂纳米稀土氧化物的电磁屏蔽材料的电磁匹配规律研究及设计

张海丰¹,崔久波¹,裴魏魏^{1*},李颖¹,刘明达²,韩海生^{1*}
(1. 佳木斯大学理学院,黑龙江 佳木斯 154007;2. 佳木斯大学附属第二医院,黑龙江 佳木斯 154002)

摘要:利用电磁波传输理论推导出了电磁屏蔽材料表面反射率公式、基于电磁参数广义匹配规律下总后向反射率公式和预设总后向反射率取值的表面反射率公式;通过3维网格法理论分析了电磁参数对表面反射率和总后向反射率的影响,并使用掺杂了纳米稀土氧化物的电磁屏蔽材料进行优化设计. 研究表明:在电磁屏蔽材料的设计中应主要调节材料的电损耗 ϵ ;掺杂了少量纳米稀土氧化物的电磁屏蔽涂层能实现在2~18 GHz内有大于6 dB的衰减值,即表明掺杂纳米稀土氧化物能够较好地提高材料的电磁屏蔽性能.

关键词:电磁屏蔽材料;表面反射;广义匹配规律;纳米稀土氧化物

中图分类号:TN 972.44 **文献标志码:**A **DOI:**10.16357/j.cnki.issn1000-5862.2020.02.09

0 引言

近十几年来,新型电磁屏蔽材料在军事和民用领域中均有重大需求.我国拥有丰富的稀土资源,开发具有高附加值的电磁屏蔽材料具有较高的经济和社会价值.众所周知,纳米稀土氧化物在结构、光、电、磁和化学性质等方面具有独特的性质,从而多年来引起了物理学、材料学和化学等领域研究人员的广泛关注^[1-5].

国内外目前对纳米稀土氧化物的研究主要在于材料的制备^[6-9],如2007年,思锐等利用oleic acid(OA)/oleylamine(OM)/1-octadecene(ODE)的非水解方法合成了单晶体和单分散立方稀土(La、Lu、Y)纳米氧化物晶体(超薄纳米孔和纳米圆盘).另外,稀土材料在电磁屏蔽材料设计中的应用也仅仅是直接掺杂分析,对于纳米尺径的稀土材料在电磁屏蔽材料设计中的应用报道较少,有的也仅限于文献综述.

在前续科研工作中,笔者对于吸波材料的吸波机理及设计进行了详细地理论研究^[10-18].本文基于这些理论研究,推导出电磁波入射到掺杂纳米稀土氧化物电磁屏蔽材料表面的表面反射和总后向反射率理论计算公式,结合Matlab软件对电磁屏蔽材料

的电磁参数的影响进行分析,并进行相应的计算机辅助设计研究.本文涉及的纳米稀土氧化物 Y_2O_3 和 Nd_2O_3 材料是利用乙二醇溶胶-凝胶法和室温固相反应法制备的,由于本文只是理论上分析材料电磁参数的匹配规律和设计,所有具体材料制备问题不在此处论述.

1 表面反射和总反射问题的讨论

如图1所示,设电磁波以 θ_0 角度入射到电磁屏蔽材料表面,材料内部的折射角为 θ .电磁波在材料内部经过多次反射和折射后透射出材料的波2将和只在材料表面反射的波1形成表面干涉,此干涉作用将对总后向反射率产生影响.

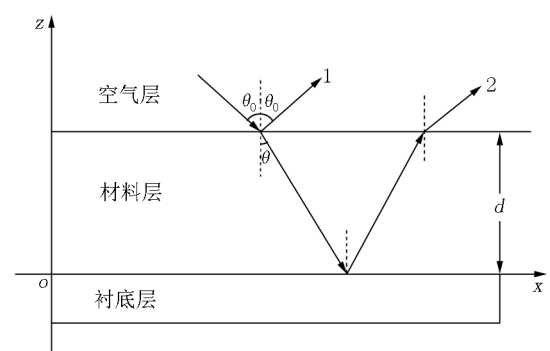


图1 电磁波在电磁屏蔽材料中的传输

收稿日期:2018-09-28
基金项目:国家自然科学基金(51141009)和黑龙江省属高校基本科研业务费备案(2018-KYYWF-0956)资助项目.
通信作者:韩海生(1972-),男,黑龙江海伦人,副教授,主要从事吸波材料研究. E-mail:dblydxhhs@126.com
裴魏魏(1980-),女,黑龙江佳木斯人,讲师,主要从事电磁屏蔽材料研究. E-mail:630084776@qq.com

下面只讨论有单层电磁屏蔽材料且电磁波电场 E 分量平行界面的情况. 根据电磁波传输理论,可以得到表面反射系数 $R_0 = (Z_r - 1)/(Z_r + 1)$,其中 Z_r 为电磁屏蔽材料的归一化阻抗,可表示为 $Z_r = (\cos \theta_0 / \cos \theta) \sqrt{\mu_r / \varepsilon_r}$,其中 $\varepsilon_r = \varepsilon_{r1} - i\varepsilon_{r2}$, ε_{r1} 、 ε_{r2} 分别为复数形式的相对介电常数和相对磁导率. 设空气层和材料的波数为 k_0 和 k ,于是根据折射定律 $k_0 \sin \theta_0 = k \sin \theta$,可将归一化阻抗公式变为

$$Z_r = \sqrt{\mu_r^2 \cos^2 \theta_0 / (\mu_r \varepsilon_r - \sin^2 \theta_0)}.$$

若只考虑电磁波垂直入射并且电磁参数匹配满足广义匹配规律($\varepsilon_{r2} / \varepsilon_{r1} = \mu_{r2} / \mu_{r1} = M$),则 $R_0 = (\sqrt{\mu_{r1} / \varepsilon_{r1}} - 1) / (\sqrt{\mu_{r1} / \varepsilon_{r1}} + 1)$,这就是最后得到的电磁波垂直入射并且电磁参数匹配满足广义匹配规律表面反射系数公式.

接下来推导由表面反射系数表示的总后向反射系数公式. 根据文献[18-20]可知,波数 k_0 和 k 可以由波频率和材料的电磁参数表示为 $k_0 = 2\pi f / c$, $k = 2\pi f \sqrt{(\varepsilon_{r1} - i\varepsilon_{r2})(\mu_{r1} - i\mu_{r2})} / c$. 可得总后向反射系数 $R = (R_0 - e^{-2ikd}) / (1 - R_0 e^{-2ikd})$,其中 d 为材料层的厚度. 令 $2kdcos \theta = \alpha - i\beta$,经过推导可得,当电磁波垂直入射时,满足广义匹配规律下的 α 和 β 分别为 $\alpha = 4\pi f d \sqrt{\varepsilon_{r1} \mu_{r1}} / (cM)$, $\beta = 4\pi f d \sqrt{\varepsilon_{r1} \mu_{r1}} / c$.

令反射系数由模和位相表示的形式为 $R_0 = |R_0| e^{i\varphi_0}$ 和 $R = |R| e^{i\varphi}$,于是功率反射率可以表示为

$$R_p = |R|^2 = \frac{|R_0|^2 + 2|R_0| \cos \alpha \cdot e^{-\beta} + e^{-2\beta}}{1 + 2|R_0| \cos \alpha \cdot e^{-\beta} + |R_0|^2 e^{-2\beta}}.$$

由于实验上测量的功率反射率通常是以 dB 为单位的,所以 R_p 表示为 $R_p(\text{dB}) = -20\lg R_p$. 于是可以得

$$|R_0| = \frac{-e^{-\beta} A - \sqrt{e^{-2\beta} A^2 - B}}{|R| e^{-2\beta} - 1},$$

其中 $|R| = 10^{-R_p/20}$, $A = \cos \alpha (|R| - 1)$, $B = (|R| e^{-2\beta} - 1)(|R| - e^{-2\beta})$.

2 利用 3 维网格法讨论电磁参数、表面反射率和总后向反射率的相互关系

2.1 电磁参数对表面反射率的影响

利用 3 维网格法得到如图 2 和图 3 所示的满足

广义匹配规律的表面百分比反射率 $R_0(\%)$ 与电磁参数 μ_{r1} 和 ε_{r1} 的关系网格图和等高线(其中 $M = 0.5$).

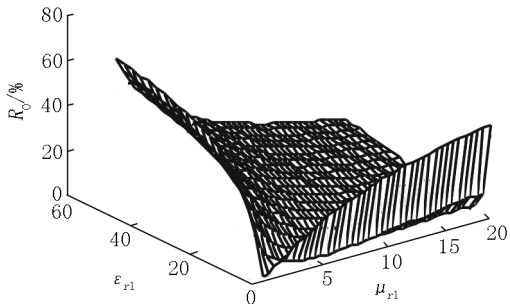


图 2 $R_0(\%) - \mu_{r1}, \varepsilon_{r1}$ 的网格曲线

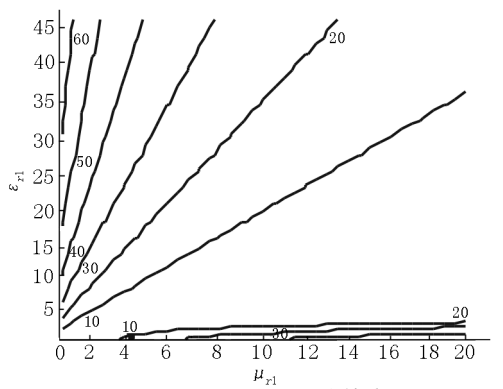


图 3 $R_0(\%) - \mu_{r1}, \varepsilon_{r1}$ 的等高线

由图 2 和图 3 可知, ε_{r1} 对表面反射的贡献比 μ_{r1} 更大. 当 $\varepsilon_{r1} \geq 10$ 时,百分比表面反射率达 40% 以上,而当 $\mu_{r1} \geq 4$ 时,百分比表面反射率只有约 10%. 因此,为了减小表面反射效应的影响,需要适当选取电损耗较小的材料.

2.2 表面反射率对总后向反射率的影响

同样,利用 3 维网格法给出了总后向反射率 $R_p(\text{dB})$ 与电磁参数 μ_{r1} 和 ε_{r1} 的网格线及等高线,具体如图 4 和图 5 所示(其中 $f = 8 \text{ GHz}$, $d = 4 \text{ mm}$, $M = 0.5$).

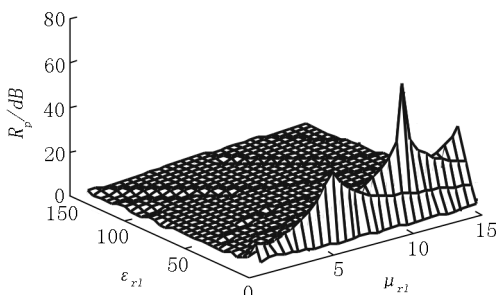


图 4 $R_p(\text{dB}) - \mu_{r1}, \varepsilon_{r1}$ 的网格曲线

由图 4 和图 5 可知,当 $\varepsilon_{r1} \leq 10$ 、 $\mu_{r1} \geq 1$ 时,总后向反射率可得大于 5 dB 的衰减值;而当 $\varepsilon_{r1} \geq 20$ 时, μ_{r1} 要取大于 2 的值才能使总后向反射率得到 5 dB 以上的衰减值,这对于设计材料而言是难以实现的.

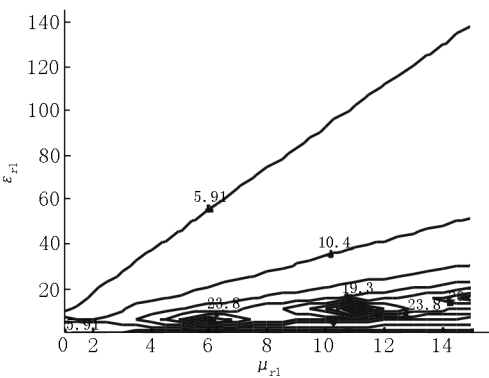


图5 R_p (dB)- μ_{r1} , ϵ_{r1} 的等高线

2.3 当预设总后向反射率 dB 值时表面反射的影响

当预设总后向反射率的 dB 值时,可以通过网格法分析表面反射效应的影响和分析 μ_{r1} 、 ϵ_{r1} 的相应取值.根据这一想法,绘制了 R_0 (%) 与 μ_{r1} 和 ϵ_{r1} 关系的网格曲线,具体如图 6 和图 7 所示(其中 $f = 8\text{ GHz}$, $d = 4\text{ mm}$, $M = 0.5$, $R_p = 15\text{ dB}$).

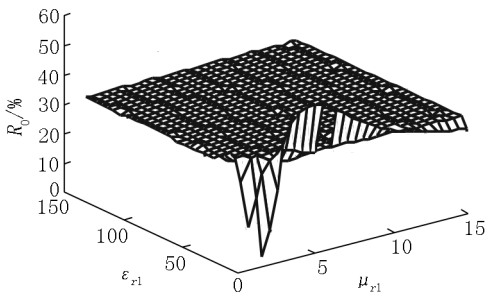


图6 当给定总后向反射率 dB 值时, R_0 (%) - μ_{r1} , ϵ_{r1} 的网格曲线

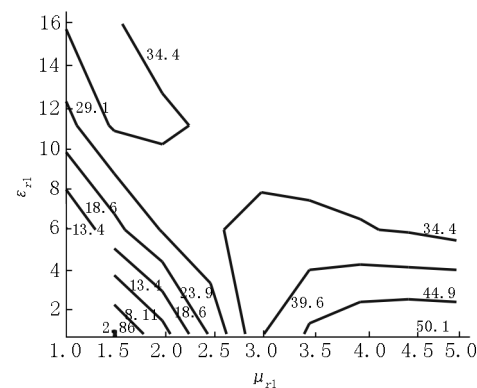


图7 当给定总后向反射率 dB 值时, R_0 (%) - μ_{r1} , ϵ_{r1} 的等高线

由图 6 和图 7 可知,当预设总后向反射为 15 dB 时,在 $\mu_{r1} < 2.2$ 和 $\epsilon_{r1} < 8$ 处,表面反射对总后向反射率的贡献低于 20%,当 $\mu_{r1} > 2.7$ 时,即使 ϵ_{r1} 取较小的值,表面反射对总后向反射率的贡献也会超过 30%.

通过上述网格法的分析可以看出,在电磁屏蔽材料的设计中,对于材料的选取必须考虑表面反射

效应带来的严重影响.相对而言,材料的电损耗项对表面反射的贡献更大,所以在实际电磁屏蔽材料的使用中要考虑使用磁损耗大的材料,这也是本文采取电磁屏蔽材料掺杂纳米稀土氧化物的主要原因.

3 优化设计

这里使用由乙二醇溶胶-凝胶法和室温固相反应法制备的纳米稀土氧化物 Y_2O_3 和 Nd_2O_3 材料掺杂到电磁屏蔽材料之中得到的 2 种材料进行优化设计,经实验测量得到实验数据(见表 1).

表1 掺杂纳米 Y_2O_3 和 Nd_2O_3 的电磁屏蔽材料实验测量结果

f/GHz	2	4	6	8	10	12	14	16	18
R_p/dB	6.2	7.6	8.5	10.2	12.5	14.6	17.3	18.3	20.2

注:掺杂比例为 Y_2O_3 和 Nd_2O_3 各占 1% 的比例,材料层厚度为 4 mm.

4 结论

由以上的网格法分析可以看出,在电磁屏蔽的设计中为了减小表面反射效应的影响,在材料的电磁参数选取方面要选取电损耗 ϵ 较小的材料;掺杂了少量纳米稀土氧化物就能在 2 ~ 18 GHz 频段内较好地提高电磁屏蔽涂层材料的电磁屏蔽作用;可以预见若采用多层设计,同时考虑改变表面的几何设计则将会进一步改善材料的电磁屏蔽效果,这也为后续科研工作地开展指明了方向.

5 参考文献

[1] Rui Si. Controlled-synthesis, self-assembly behavior, and surface-dependent optical properties of high-quality rare-earth oxide nanocrystals [J]. Chem Mater, 2007, 19 (1): 18-27.

[2] 侯翠岭,李铁虎,赵廷凯,等. 稀土掺杂碳纳米管/聚氯乙烯复合材料的吸波性能研究 [J]. 功能材料, 2013, 44(12): 1741-1744.

[3] 王小燕,许文慧,侯豪情. 电纺碳纳米纤维短纤增强的高介电常数聚酰亚胺复合材料 [J]. 江西师范大学学报:自然科学版, 2017, 41(3): 221-224.

[4] 张美丽. 稀土配合物 $[\text{Pr}(1,3\text{-pda})(0.5)(\text{nbc})_2 \cdot (\text{H}_2\text{O})_2]$ 的合成及结构研究 [J]. 江西师范大学学报:自然科学版, 2013, 37(6): 599-602, 646.

[5] 李跃军,曹铁平,刘术侠. 稀土九钨钨杂多酸盐的电化学及电催化性质研究 [J]. 江西师范大学学报:自然科

学版,2007,31(4):344-346.

[6] 马善钧. 空间飞行器尾部区域内等离子体与场的非稳态相互作用 [J]. 江西师范大学学报:自然科学版,2001,25(3):251-255.

[7] 李先春,李思群,谭玉华,等. 用偶氮膦 PN 显色剂光度法测定混合稀土氧化物中的钇 [J]. 江西师范大学学报:自然科学版,1985(2):74-78.

[8] 解家英. 含稀土纳米材料微波吸收特性的研究 [J]. 内蒙古大学学报:自然科学版,2001,32(6):625-627.

[9] 李国栋. 稀土材料微波吸收特性的研究 [J]. 磁性材料及器件,2001,32(5):14-16.

[10] 张海丰,于森红,葛洪亮. 网格法在电磁屏蔽涂料参数计算机辅助设计中的应用 [J]. 佳木斯大学学报:自然科学版,2018,36(1):42-44.

[11] 张海丰,李颖,韩海生,等. 斜入射时电磁损耗材料吸波性能研究及计算机辅助设计 [J]. 信阳师范学院学报,2017,30(4):623-626.

[12] 张海丰,石宪明,崔虹云,等. 平板抗电磁辐射材料反射性能的研究及设计 [J]. 佳木斯大学学报:自然科学版,2011,29(4):596-598.

[13] 张海丰,崔虹云,周忠祥,等. Salisbury 屏电磁匹配特性及其在抗电磁辐射中的应用研究 [J]. 信阳师范学院学报,2011,24(2):265-267.

[14] 张海丰. 多层损耗材料的实验研究及计算机辅助设计 [J]. 佳木斯大学学报:自然科学版,2005,23(4):602-605.

[15] Zhang Haifeng, Wang Meini, Sun Yanbin. Study on the characteristics of salisbury screen electromagnetic matching and its application in anti electromagnetic radiation [EB/OL]. [2019-12-18]. <http://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2018AIPC.194460051z>.

[16] 张海丰,王东方,崔虹云. 3 维网格法在 Salisbury 屏优化设计中的应用 [J]. 佳木斯大学学报:自然科学版,2006,24(3):435-438.

[17] 张海丰,周忠祥,秦柏,等. “广义匹配规律”在多涂层吸波材料设计中的应用 [J]. 哈尔滨工业大学学报,2003,35(9):1140-1143.

[18] 秦柏,秦汝虎,金崇君. “广义匹配规律”的论证及在隐身材料中的应用 [J]. 哈尔滨工业大学学报,1997,29(4):115-117.

[19] 秦汝虎,秦柏,田春亮,等. 吸波材料设计中的全貌分析方法 [J]. 哈尔滨工业大学学报,2002,34(5):679-683.

[20] 张海丰,李颖,王东方,等. 斜入射时平板吸波材料电磁参数匹配规律研究 [J]. 江西师范大学学报:自然科学版,2017,41(6):641-644.

The Study and Design on the Electromagnetic Matching of Electromagnetic Shielding Materials Doped with Nano-Rare Earth Oxides

ZHANG Haifeng¹, CUI Jiubo¹, PEI Weiwei^{1*}, LI Ying¹, LIU Mingda², HAN Haisheng^{1*}
(1. College of Natural Science, Jiamusi University, Jiamusi Heilongjiang 154007, China;
2. The Second Affiliated Hospital, Jiamusi University, Jiamusi Heilongjiang 154007, China)

Abstract: Using electromagnetic wave transmission theory, the surface reflectance formula of electromagnetic shielding materials, the total backward reflectance formula based on the generalized matching law of electromagnetic parameters and the surface reflectance formula of preset total reflectance are derived, respectively. Then, the effect of electromagnetic parameters on the surface reflectivity and total back-reflectivity is analyzed by the three-dimensional grid method, and the electromagnetic shielding materials doped with nano-rare earth oxides are used to optimize design. The results show that the electric loss of electromagnetic shielding materials shall be mainly regulated in the design of electromagnetic shielding materials. And the electromagnetic shielding coating doped with a small number of nano-rare earth oxides can achieve an attenuation value greater than 6 dB at 2 ~ 18 GHz, which indicates that the doping of nano-rare earth oxides can improve the electromagnetic shielding performance of the materials.

Key words: electromagnetic shielding materials; surface reflectivity; generalized matching law; nano-rare earth oxides

(责任编辑:冉小晓)