

文章编号: 1000-5862(2019)03-0294-04

斜入射时网格法 在耗损材料参数匹配机理研究中的应用

韩海生, 马 佳, 张海丰*

(佳木斯大学理学院 黑龙江 佳木斯 154007)

摘要: 通过平面波反射系数公式给出了电磁波斜入射时单层电磁损耗材料反射系数公式, 用网格法对影响反射系数的参数进行了分组讨论与优化, 利用计算机对斜入射时耗损材料参数匹配进行了辅助设计, 优化结果有利于实际材料的设计和应用.

关键词: 斜入射; 电磁损耗材料; 辅助设计

中图分类号: TN 927.44 文献标志码: A DOI: 10.16357/j.cnki.issn1000-5862.2019.03.13

0 引言

自 20 世纪 80 年代以来, 世界各国投入巨资研究吸波涂层材料, 吸波涂层材料的研究促进了世界各国军事力量的不断发展, 对抗与反对抗、隐身与反隐身体现了吸波涂层材料的重要作用, 目前吸波涂层材料的研究广泛地应用于通讯及导航系统的电磁干扰、微波暗室消除设备、人体安全防护、安全信息保密等方面^[1-7]. 随着纳米技术的迅速发展, 纳米材料作为新一代隐身材料得到了广泛探索和研究, 纳米粉体优良的电磁吸波性能对国际竞争力和国防事业发展都起到了重要的作用^[8-9].

目前多数文献^[10-19]主要研究了垂直入射时损耗材料的广义匹配规律, 对于电磁波斜入射时电磁匹配规律的研究很少. 本文首先从波阻、波压推导出入射波在入射界面的透射系数与反射系数, 根据传输线理论给出电磁波的输入阻抗与介质电磁参数的关系式, 利用 3 维网格法对影响后向发射率的参数的吸收性能进行分类讨论, 并优化设计.

1 单层损耗材料的反射系数的推导

体系中介质 1 为空气, 波阻为 Z_1 , 介质 2 为损

耗介质, 波阻为 Z_2 , BB' 为介质分界面, 坐标轴 ox 与 BB' 垂直. 设电磁波沿 ox 轴自介质 1 射向介质 2, 在界面上发生反射与透射.

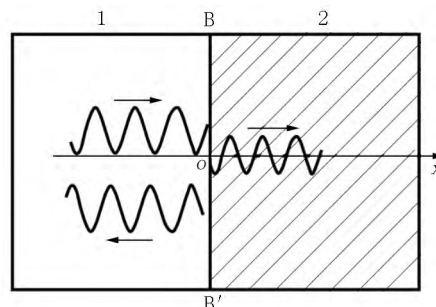


图 1 电磁波在耗损介质中的传播

用 $u_i \sin(\omega t - kx)$ 和 $u_r \sin(\omega t + kx - \varphi_r)$ 分别描述入射波和反射波振动速度, 其中 u_r 和 φ_r 为待定常量. 入射波与反射波叠加后的速度为

$$u = u_i \sin(\omega t - kx) + u_r \sin(\omega t + kx - \varphi_r).$$

考虑到反射波的波速为负, 入射波与反射波声压叠加后有

$$P = Z_1 u_i \sin(\omega t - kx) - Z_1 u_r \sin(\omega t + kx - \varphi_r),$$

介质 2 中透射波的速度波可写成

$$u = u_t \sin(\omega t - kx - \varphi_t),$$

对应声压波方程写成

$$P = Z_2 u_t \sin(\omega t - kx - \varphi_t).$$

BB' 左面的入射波叠加与 BB' 右面的透射波叠加在 BB' 上引起相同的振动, 即令上面各式中

收稿日期: 2018-06-18

基金项目: 国家自然科学基金(21273095, 51141009), 佳木斯大学科学技术研究(Ljz2012-44, Lz2013-017, L2014-014) 和黑龙江省教育厅科研课题(2016-KYYWF-0569) 资助项目.

作者简介: 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

张海丰(1973-), 男, 吉林乾安人, 副教授, 主要从事吸波材料研究. E-mail: 103096895@qq.com

$x=0$ 有

$$u_i \sin(\omega t) + u_r \sin(\omega t - \varphi_r) = u_t \sin(\omega t - \varphi_t),$$

$$Z_1 u_i \sin(\omega t) - Z_1 u_r \sin(\omega t - \varphi_r) = Z_2 u_t \sin(\omega t - \varphi_t),$$

将此2个方程展开,因 t 可取任意值,故各方程左右含 $\sin(\omega t)$ 的系数应相等,对应含 $\cos(\omega t)$ 的系数亦如此.可得

$$1 + R \cos \varphi_r = \tau \cos \varphi_t,$$

$$1 - R \cos \varphi_r = \tau (Z_1/Z_2) \cos \varphi_t,$$

$$R \sin \varphi_r = \tau \sin \varphi_t,$$

$$R \sin \varphi_r = \tau (Z_1/Z_2) \sin \varphi_t,$$

其中 $R = u_r/u_i$, $\tau = u_t/u_i$. 因为速度振幅 $u_i = \omega A_i$, $\mu_r = \omega A_r$, $\mu_t = \omega A_t$, 所以 R 和 τ 为反射系数与透射系数.

对于反射波有

$$R = (Z_2 - Z_1) / (Z_1 + Z_2) \quad \tau = 1 - R. \quad (1)$$

(1)式对于电磁波成立,根据传输线理论,当电

场量 \vec{E} 垂直入射面时介质的波阻为

$$Z_i = \frac{1}{\cos \theta_i} \sqrt{\mu_i / \varepsilon_i} \quad i=1, 2, 3,$$

其中 μ_i 和 ε_i 分别为第 i 层的磁导率和介电常数.

如图2所示,介质1为空气,介质2为损耗材料,介质3为金属衬底 $Z_3=0$,可得损耗介质的输入阻抗 $Z_{in} = jZ_2 d_2 \tan \alpha_2$,其中 j 为虚数单位, α_2 为波矢量在 z 轴上的投影.

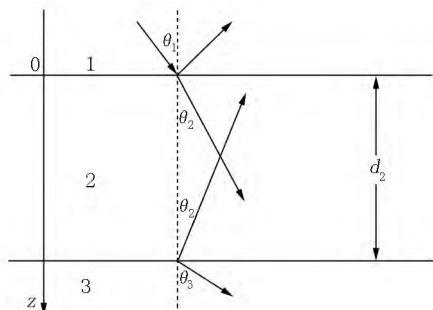


图2 电磁波在损耗介质中的传播

可以看出有金属衬底的单层介质后向反射系数为

$$R = (jZ_2 d_2 \tan \alpha_2 - Z_1) / (jZ_2 d_2 \tan \alpha_2 + Z_1). \quad (2)$$

2 利用网格法讨论参数对反射率的影响

由(2)式可看出,影响单层介质后向反射系数的因素有介质电磁参数、入射电磁波频率、角度和介质厚度等. 鉴于材料设计的需求,利用 Matlab 软件分类绘出影响后向反射率的3维网格曲线和等高线,便于对材料进行优化设计. 如图3~图8所示,在图3和图4中 $d_2 = 10 \text{ mm}$ 、 $f = 10 \text{ GHz}$,可看出后向反射率的衰减值随着介电常数 ε_{r1} 和 ε_{r2} 的增加逐

渐变小,当 $\varepsilon_{r1} < 15$ 和 $\varepsilon_{r2} < 10$ 时后向反射率均大于6 dB的衰减值.

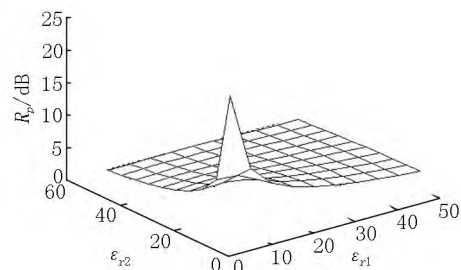


图3 斜入射时 R 与 ε_{r1} 、 ε_{r2} 的关系曲线

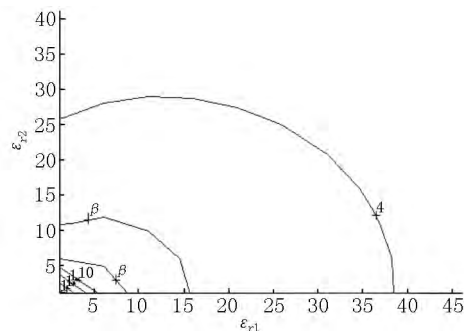


图4 斜入射时 R 与 ε_{r1} 、 ε_{r2} 的等高曲线

观察图5和图6可以看出,当介质的磁导率增大时后向反射率的衰减值增大,而且后向反射率的衰减值随介质的磁导率 μ_{r1} 、 μ_{r2} 的值变化显著.

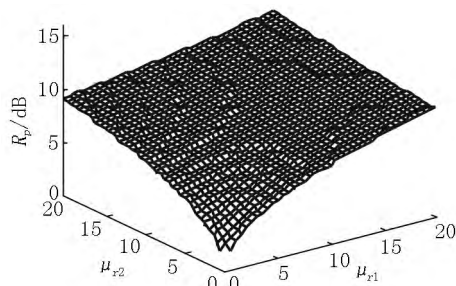


图5 斜入射时 R 与 μ_{r1} 、 μ_{r2} 的关系曲线

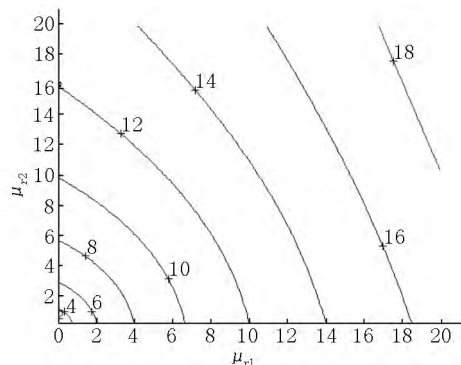


图6 斜入射时 R 与 μ_{r1} 、 μ_{r2} 的等高线

由图3~图6得出: $\varepsilon_{r1} < 15$ 和 $\varepsilon_{r2} < 10$ 或 $\mu_{r1} > 3$ 和 $\mu_{r2} > 3$ 后向反射率均大于6 dB的衰减值. 取 $\varepsilon_{r1} = 10$ 、 $\varepsilon_{r2} = 5$ 、 $\mu_{r1} = 6$ 、 $\mu_{r2} = 4$ 、 $d_2 = 10 \text{ mm}$ 、 $\theta_3 = 45^\circ$ 、 $f = 8 \text{ GHz}$; 由图7和图8得出后向反射率随着入射角的

增加衰减值变得越来越小;可以看出在 1~2 GHz 的低频段内,后向反射率随着频率波动变化显著,随入射角度变化明显,但对电磁波仍然有较好的吸收作用.在 2~18 GHz 频段内,后向反射率随着频率波动无变化,随入射角度变化明显;当入射角小于 50°时,1~18 GHz 频段内后向反射率均大于 6 dB 的衰减值.

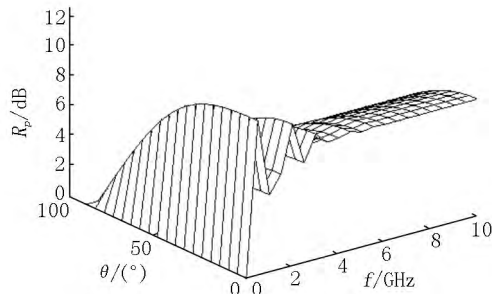


图7 斜入射时 R 与 f 、 θ 的关系曲线

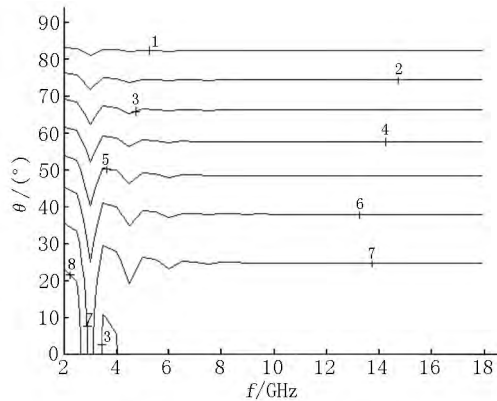


图8 斜入射时 R 与 f 、 θ 的等高曲线

3 单层材料吸波特性的计算机辅助设计

结合对电磁参数与入射角及入射频率的网格法研究与优化设计,选择 Fe-Ni-La 合金的频率特性,取 $\theta_3 = 60^\circ$ 在 1~18 GHz 频段内对后向发射率进行了分析,如图 9 所示.

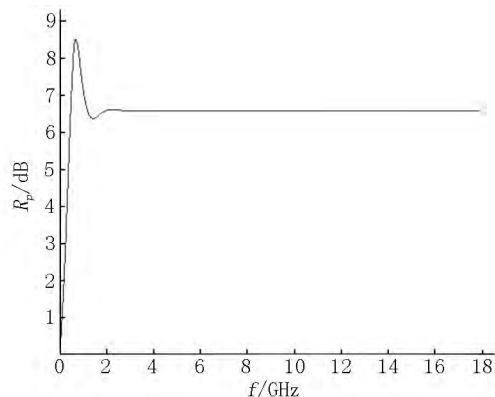


图9 有金属衬底的单层结构的 R 与 f 的关系式

从图 9 可以看出,当入射角为 60° 时,不同厚度的后向反射率出现峰值,但峰值随频率波动变化较大.当厚度减少时后向反射率峰值向低频段移动.

4 结论

在电磁波传输过程中,相邻介质的阻抗匹配和入射角度对后向发射率的影响显著,本文利用 3 维网格法对影响吸收性能的介质电磁参数、介质厚度、入射角等进行分类讨论和优化设计,得出入射角对后向反射率的大小影响显著,介质的频率特性在设计损耗材料时应引起重视.网格法对参数匹配机理研究有利于实际材料的设计和开发.

5 参考文献

- [1] Li Na, Hu Changwen, Cao Minhua. Enhanced microwave absorbing performance of CoNi alloy nanoparticles anchored on a spherical carbon monolith [J]. Physical Chemistry Chemical Physics 2013, 15(20): 7685-7689.
- [2] Wang Li. Preparation and microwave absorbing properties of carbon/cobalt ferromagnetic composites [J]. J Nanosci Nanotechnol 2013, 13(2): 793-798.
- [3] Chambers B. Optimum design of a salisbury screen radar absorber [J]. Electronics Letters, 1994, 30(16): 1353-1354.
- [4] Xia Ting, Zhang Chi, Nathan A O, et al. Hydrogenated TiO_2 nanocrystals: a novel microwave absorbing material [J]. Advanced Materials 2013, 25(47): 6905-6910.
- [5] Joo-Yun Jung, Jong Yeon Park, Sangwook Han, et al. Wavelength-selective infrared Salisbury screen absorber [J]. Applied Optics 2014, 53(11): 2431-2436.
- [6] Zhang Xingmiao, Ji Guangbin, Liu Wei, et al. Thermal conversion of an Fe_3O_4 metal organic framework: a new method for an efficient Fe-Co/nanoporous carbon microwave absorbing material [J]. Nanoscale 2015, 30(7): 12932-12942.
- [7] Ni Qingqing, Zhu Yaofeng, Yu Lujun, et al. One-dimensional carbon nanotube barium titanate polyaniline multi hetero structures for microwave absorbing application [J]. Nanoscale Research Letters 2015, 10(1): 174.
- [8] 布列霍夫斯基赫. 分层介质中的波 [M]. 北京: 科学出版社, 1960: 30-52.

- [9] 张海丰,崔虹云,周忠祥,等. Salisbury 屏电磁参数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:自然科学版, 2011, 24(2): 265-267.
- [10] 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): 579-583.
- [11] 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.
- [12] 彭泽雨,李颖,张海丰,等. 雷达吸波材料在 Salisbury 屏优化设计中的应用 [J]. 黑龙江工程学院学报, 2018, 32(2): 41-44.
- [13] 翟祥宇,慕忠杰,李颖,等. 平板型吸波材料设计中表面反射的影响研究 [J]. 佳木斯大学学报:自然科学版, 2018, 36(2): 315-318.
- [14] 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, 54.
- [15] 王伟强,王志民,张海丰,等. 网格法在雷达波吸收体电磁参数匹配中的应用研究 [J]. 佳木斯大学学报:自然科学版, 2018, 36(1): 141-143.
- [16] 张志明,于安琪,张海丰,等. 有机抗电磁辐射材料在 Salisbury 屏优化设计中的应用 [J]. 黑龙江工程学院学报, 2016, 30(2): 42-45.
- [17] 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:自然科学版, 2017, 30(4): 623-626.
- [18] 杜明明,于安琪,王东方,等. 三维网格法在 Salisbury 电屏优化设计中的应用 [J]. 黑龙江工程学院学报, 2016, 30(3): 43-46.
- [19] 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 Application of Mesh Method in the Param-Pattern Study of Loss Materials at Oblique Incidence

HAN Haisheng, MA Jia, ZHANG Haifeng*

(College of Science, Jiamusi University, Heilongjiang Jiamusi 154007, China)

Abstract: The single-layer material reflection coefficient formula are given by the plane wave reflection coefficient formula when the electromagnetic wave oblique incidence. Using the grid method, the parameters affecting the reflection coefficient are discussed and optimized in groups. Based on the consideration of the frequency characteristics of the medium, a computer aided design is carried out by using the computer to match the parameters of the dissipated material in oblique incidence. The optimized result is helpful for the design and application of actual materials.

Key words: oblique incidence; electromagnetic loss materials; aided design

(责任编辑:冉小晓)