

三种纳米碳材料吸波涂层设计及性能

张泽洋 刘祥莹 吴友朋 郭磊

(第二炮兵工程学院,西安 710025)

文 摘 对纳米炭黑(UC)、特导纳米炭黑(L6)、碳纳米管(CNT)三种材料在8~18 GHz波段吸波涂层进行了优化设计及吸波性能分析。结果表明,三种材料的复介电常数随着纳米碳材料质量分数的增加,其实部和虚部均以不同的速度增大。利用理论计算的Cole-Cole图,结合实验测得的复介电常数,求解出这三种材料理想的介电常数,材料的质量分数和吸波涂层的匹配厚度。结果表明,CNT的吸波效果最好,当CNT质量分数为20%涂层、厚度为1.6 mm时,反射衰减率在11.2~15 GHz均优于-10 dB吸收峰最大值,达到29.6 dB。

关键词 纳米碳材料,介电损耗,反射率,吸波性能

Design and Microwave Absorbing Properties of Carbon Nano-Materials Single-Layer Microwave Absorbers

Zhang Zeyang Liu Xiangxuan Wu Youpeng Guo Lei

(The Second Artillery Engineering College, Xi'an 710025)

Abstract In this paper, the microwave absorption properties of three different types of carbon nano-materials such as U carbon, carbon nanotube and carbon black have been studied at the frequency band of 8 to 18 GHz. The complex permittivity of carbon nano-materials/paraffin composite with different weight fractions were measured at the frequency band of 8 to 18 GHz. The results show that the real and imaginary of the complex permittivity of the composites were increased with filler weight and the increasing rates of the real and imaginary part with respect to the filler weight were all different. These different rates have great effect on the thickness in the designing the single-layer microwave absorbers. The match thickness of coating and the weight of filler were obtained by the Cole-Cole plot. When 20% mass fraction carbon nanotubes were used with coating thickness of 1.6 mm, the reflection loss is superior to -10 dB at 11.2 to 15 GHz and the maximum reflection loss can reach -29.6 dB.

Key words Carbon nano-materials, Dielectric loss, Reflectivity, Microwave absorbing property

0 引言

雷达波吸收涂层能否达到良好的吸收效果,合适吸收剂的选择和吸波涂层的设计是重中之重。在现有的各种电、磁损耗型的雷达波吸收剂中电损耗型吸波剂成为轻质雷达波的首选对象^[1~3]。目前电损耗吸波剂研究较多的有纳米炭黑(UC)、特导纳米炭黑(L6)、碳纳米管(CNT)等纳米碳材料,以其导电性好、质量轻等优点被广泛地应用于吸收剂的设计中^[4~7]。本文通过三种纳米碳材料的复介电常数寻

找吸波涂层设计的最佳条件,利用编程求解了一定频率条件下,不同厚度时最优的复介电常数;讨论了复介电常数实部与虚部对匹配厚度的影响。

1 实验

U型纳米炭黑(德国德固萨公司)、碳纳米管(南昌太阳纳米技术有限公司)、L6型特导纳米炭黑(德国德固萨公司),使用前需经过清洗、烘干处理。

根据测试要求,将三种纳米粉体分别与石蜡按一定比例混合制成内径3 mm,外径7 mm,厚度为2~4

收稿日期:2010-12-01

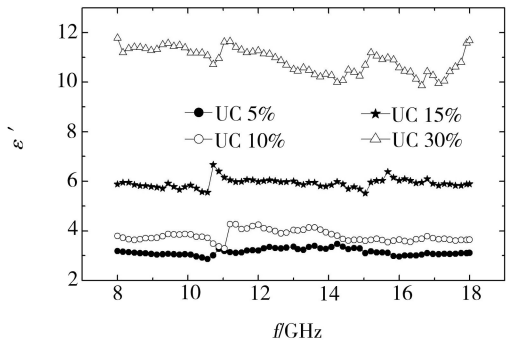
作者简介:张泽洋,1982年出生,博士,主要从事雷达波吸收材料的研究。E-mail: syoungstudy@163.com

mm 的同轴测试样,利用 hp 8510B 矢量网络分析仪,通过传输反射法测定电磁参数,测试频段为 8 ~ 18 GHz。

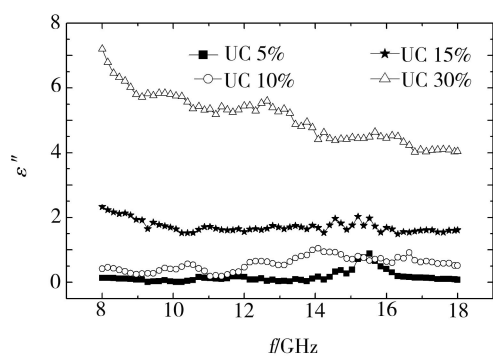
2 结果与讨论

2.1 吸收剂的复介电常数

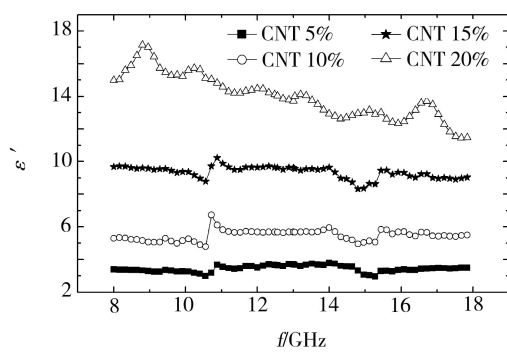
图 1 为三种纳米碳材料/石蜡复合体系的 ϵ' 和 ϵ'' 与频率的关系,可知,随着这三种纳米碳材料质量分数的增加, ϵ' 和 ϵ'' 都增大。UC 和 CNT ϵ' 和 ϵ'' 的变化相对平稳。当 L6 的浓度高于 10wt% 时,其 ϵ' 和 ϵ'' 随频率的增大而下降,L6 的虚部波动最大。图 2 给出了这三种材料在 13 GHz 时 ϵ' 和 ϵ'' 随质量分数变化的曲线,表明,这三种材料 ϵ' 和 ϵ'' 随填料质量分数的变化率各不相同,其中 L6 对填料质量分数的最为敏感,CNT 次之,UC 最差。



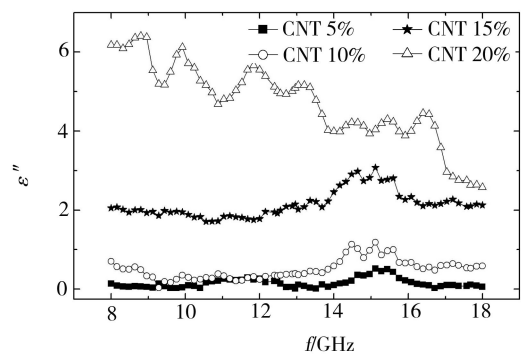
(a) UC ϵ'



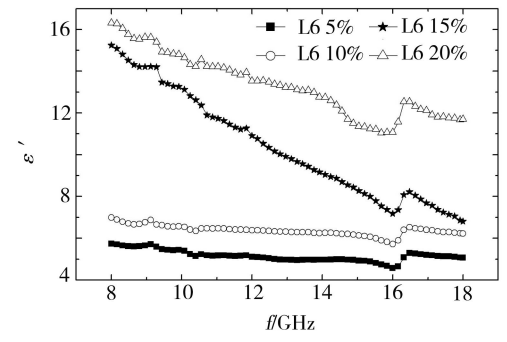
(b) UC ϵ''



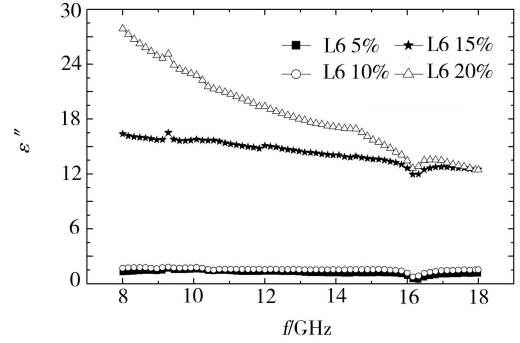
(c) CNT ϵ'



(d) CNT ϵ''



(e) L6 ϵ'



(f) L6 ϵ''

图 1 不同质量分数三种纳米碳材料/石蜡复合材料的复介电常数

Fig. 1 Complex permittivity of carbon nano-materials/paraffin composite at different concentrations

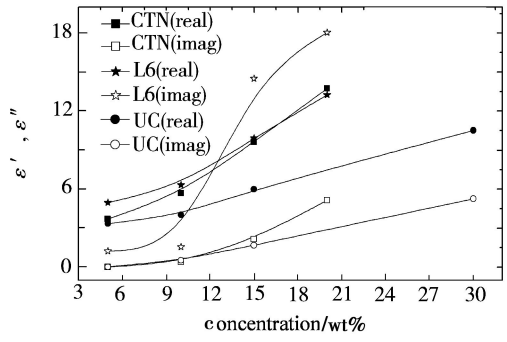


图 2 三种纳米碳材料/石蜡的复介电常数在 13 GHz 的比较

Fig. 2 Comparison of complex permittivity of carbon nano-materials/paraffin composite with different weight fractions at 13 GHz

2.2 单层吸波涂层的设计

依据传输线理论,对于底层为金属板的单层吸波涂层,其反射率 R 的计算公式为^[8-9]:

$$R = 20 \lg \left| \frac{\eta \tanh(\gamma d) - 1}{\eta \tanh(\gamma d) + 1} \right| \quad (1)$$

式中, η 为本征阻抗, γ 为复传播常数。本文中的这三种纳米碳材料为介电型的吸波材料, ϵ' 为 1, ϵ'' 为 0, 所以 η 和 γ 分别可以表示为 $\eta = \sqrt{1/\epsilon}$ 和 $\gamma = j2\pi f \sqrt{\epsilon}/c$, 其中 c 为真空中的光速, f 为电磁波的频率。在理想条件下, 涂层对电磁波的反射率为 0, 这时式(1)可以表示为:

$$\tanh\left(\frac{j2\pi f d \sqrt{\epsilon}}{c}\right) = \sqrt{\epsilon} \quad (2)$$

当入射电磁波的频率和涂层的厚度一定, 通过式(2)可求出 ϵ' 和 ϵ'' 。选择它的中点 13 GHz 作为研究对象。图 3 为 $f = 13$ GHz 时理论和实验的复介电常数 Cole-Cole 图。图 3 中插入了所测得的三种纳米碳材料的复介电常数。在 $f = 13$ GHz, 通过式(2)计算可得: 涂层厚度由 1.5 增大到 3 mm 时, ϵ' 由 15.2 减小为 4.1, ϵ'' 由 4.9 变为 2.4, 这说明 ϵ' 对涂层的厚度影响更大。三种碳材料复介电常数实验值曲线与理论值曲线的交点即为该种碳材料在 13 GHz 时的最佳匹配厚度, 对应的 ϵ' 和 ϵ'' 即为理想复介电常数。对于这三种材料, CNT 的最佳匹配厚度最小, UC 的最佳匹配厚度次之, L6 的最佳匹配厚度最大。 ϵ' 增长率是影响匹配厚度的最主要因素。由图可知, 特导电炭黑的最佳匹配厚度为 2.2 mm 左右, 填料的最佳质量分数在 10% ~ 15%, UC 的最佳匹配厚度在 2.0 mm 左右, 其最佳质量分数 15% ~ 30%, CNT 的最佳匹配厚度在 1.65 mm 左右, CNT 的最佳质量分数略小于 20%。

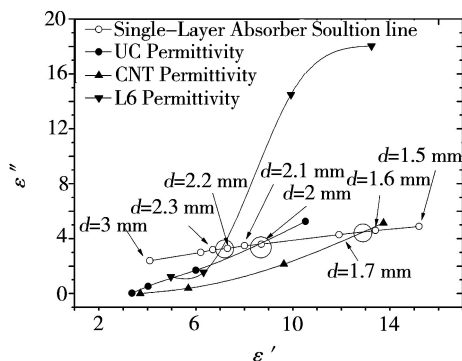
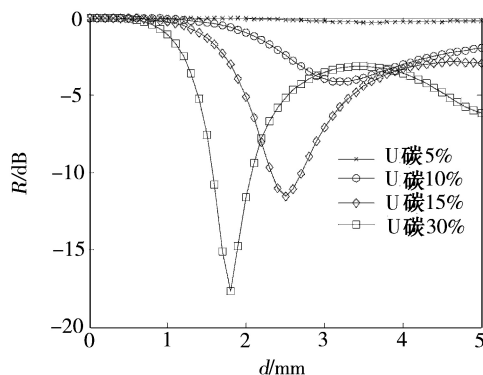


图 3 13 GHz 理论和实验的复介电常数 Cole-Cole 图

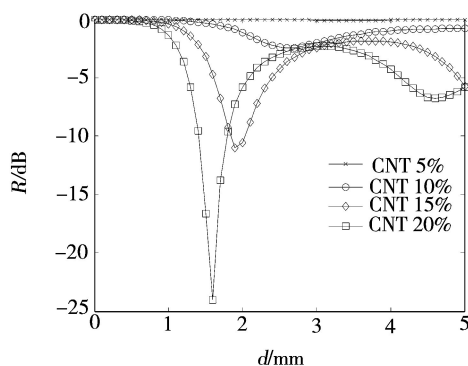
Fig. 3 Cole-Cole plot of complex permittivity from solution of eq. (2) and from experimental results at $f = 13$ GHz

图 4 是三种材料不同质量分数时厚度和反射率的关系, 其中厚度与反射率的关系验证了图 3 的结论。http://www.yhclgy.com 2011 年 第 4 期

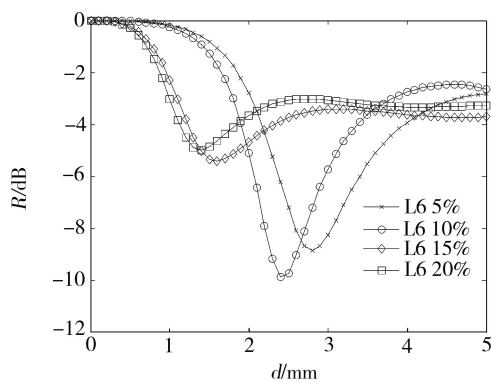
论。通过对图 4 分析可知, 在几种质量分数条件下, UC 在质量分数为 30%, 厚度为 1.8 mm, 有最大的吸收峰; CNT 在质量分数为 20%, 厚度为 1.6 mm, 有最大的吸收峰; L6 在质量分数为 10%, 厚度为 2.4 mm, 有最大的吸收峰。最佳条件下, CNT 有最大的吸收峰, 导电炭黑的效果最差。



(a) UC



(b) CNT



(c) L6

图 4 13 GHz 时反射率与厚度的关系

Fig. 4 Calculated reflection loss of each composite material as a function of thickness at 13 GHz

2.3 单层吸波涂层的吸波性能

将所求得的最佳厚度和所测的三种纳米碳材料的复介电常数代入公式计算, 求得了 UC/石蜡、CNT/石蜡以及 L6/石蜡复合吸波材料的单层反射率。图 5 是在最佳厚度条件下, 不同质量分数三种纳米碳材料/石蜡复合材料在 8 ~ 18 GHz 的单层反射率。可

知,在最佳厚度时三种材料的单层反射率低于-5 dB的带宽分别达到了6.3、5.5、5.1 GHz。CNT有最大的吸收峰,峰值达到了-31.5 dB。

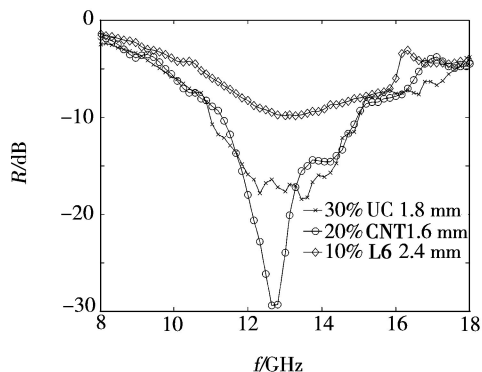


图5 三种纳米碳材料/石蜡复合材料最优反射率与频率的关系

Fig.5 Optimums reflectivity curves of carbon nano-materials/paraffin composite as a function of frequency

3 结论

通过计算获得了介电型单层吸波涂层的理想复介电常数,结果表明,复介电常数的实部对涂层匹配厚度的影响比虚部要大。利用理论计算值和实验值相结合的复介电常数 Cole-Cole 图,获得了 UC,CNT,L6 三种碳材料的理想匹配厚度及其相应的填料质量分数。优化结果表明,导电炭黑涂层厚度最大,U 碳涂层的厚度次之,CNT 涂层的厚度最小。最后对优化设计后的单层吸波涂层的吸波曲线进行了计算,CNT 涂层吸波效果最好,峰值达到了-31.5 dB,同时三种纳米碳材料小于-5 dB 的带宽都超过了 5 GHz。

参考文献

(编辑 任涛)

(上接第 10 页)

[10] Ray N, Li W C, Levy B, et al. Periodic global parameterization[J]. ACM Transactions on Graphics, 2006, 25(4): 1460-1485

[11] Zigelman G, Kimmel R, Kiryati N. Texture mapping using surface flattening via multidimensional scaling[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2002, 8(2): 198-207

[12] Chen Zhonggui, Liu Ligang, Zhang Zhengyue, et al. Surface parameterization via aligning optimal local flattening[C] // Proceedings of the 2007 ACM Symposium on Solid and Physical Modeling. Beijing, 2007: 291-296

[13] Davis J, Marschne S R, Garr M, et al. Filling holes in complex surfaces using volumetric diffusion[C] // First International Symposium on 3D Data Processing. Padua, 2002: 428-438

[14] 王乾,程筱胜,戴宁,等.基于变分隐式曲面的三角网格孔洞修补[J].中国制造业信息化,2006,35(23):75-78

[1] 赵东林,沈曾民.螺旋形手征碳纤维的微波介电特性[J].无机材料学报,2003,18(5):1057-1062

[2] Jung Hoon Oh, Kyung Sub Oh, Chun Gon Kim, et al. Design of radar absorbing structure using glass/epoxy composite containing carbon in X-band frequency ranges[J]. Composite: Part B, 2004, 35: 49-56

[3] 谢炜,程海峰,楚增勇,等.短切碳纤维复合材料的吸波性能[J].无机材料学报,2008,23(3):481-485

[4] Che R C, Peng L M, Duan X F, et al. Microwave absorption enhancement and complex permittivity and permeability of Fe encapsulated within carbon nanotubes[J]. Adv. Mater., 2004, 16(5): 401-405

[5] 段玉平,刘顺华,王桂芹,等. CB/ABS 连续导电介质吸波性能研究[J].功能材料,2007,38(2):227-233

[6] Aimad Saib, Lukasz Bednarz, Raphael Daussin, et al. Carbon nanotube composites for broadband microwave absorbing materials[J]. IEEE Trans. Microw. Theory Techniq., 2006, 54: 2745-2753

[7] Jun Yan, Zhuangjun Fan, Tong Wei, et al. Carbon nanotube/MnO₂ composites synthesized by microwave-assisted method for supercapacitors with high power and energy densities[J]. J. Power. Sources., 2009, 194: 1202-1207

[8] Naito Y, Suetake K. Application of ferrite to electromagnetic wave absorber and its characteristics[J]. IEEE Trans. Microw. Theory Techniq., 1971, 19(1): 65-72

[9] Meshram M R, Agrawal N K, Bharoti Sinha, et al. Characterization of M-type barium hexagonal ferrite-based wide band microwave absorber[J]. J. Magn. Magn. Mater., 2004, 271: 207-214

[15] Hoop H, DeRose T, Duchamp T, et al. Surface reconstruction from unorganized points[J]. Computer Graphics, 1992, 26(2): 71-78

[16] Yoshizawa S, Belyaev A, Seidel H P. A fast and simple stretch-minimizing mesh parameterization[C] // International Conference on Shape Modeling and Applications. Genova, 2004: 200-208

[17] Weiss V, Andor L, Renner G, et al. Advanced surface fitting techniques[J]. Computer Aided Geometric Design, 2002, 19(1): 19-42

[18] 谭昌柏,周来水,张丽艳,等.裁剪 B 样条曲面重建算法研究[J].中国机械工程,2007,18(19):2366-2370

[19] Farin G, Hansford D. Discrete coons patches[J]. Computer Aided Geometry Design, 1999, 16(7): 691-700

(编辑 吴坚)