

不同螺旋体浓度旋波介质吸波性能的研究*

李玉莹 刘祖黎 潘华锦 姚凯伦

(华中理工大学物理系 武汉 430074)

文 摘 利用空间测量方法对不同浓度手性旋波介质的吸波性能进行了测量。实验表明,手性螺旋体的浓度可以做为调节旋波介质吸波性能的一个灵敏参量。在非手性基体中加入适当浓度的螺旋体可有效提高手性介质的吸波性能。手性螺旋体在基体中的浓度有一最佳浓度匹配点,该浓度点在 3.2% 和 4.0% 之间。在设计高吸收宽频段的手征性吸波材料时,应考虑螺旋体在手性介质中的浓度匹配。

关键词 手性介质,反射系数,手性参量,电磁耦合

Study on Absorbing Properties of Chiral Medium with Different Spring Concentration

Li Yuying Liu Zuli Pan Huajin Yao Kailun

(Phys. Department , Huazhong University of Science and Technology Wuhan 430074)

Abstract By using free - space method ,the absorbing properties of chiral materials with different spring concentration are measured. A method to measure chiral parameter is given. The experimental design , the sample preparation , and the measurement technique are discussed. Experimental results indicated that changing spring concentration can be acted as a effective method to adjust the absorbing properties of chiral materials. There is a best matched point of chiral spring concentration between 3.2 % to 4.0 % ,which should be considered when the chiral absorbing materials are designed for wide absorbing band applications.

Key words Chiral material , Reflectance , Chiral parameter , Electromagnetic coupling

1 引言

旋波材料作为一种新的电磁材料,在吸波材料、天线工程、微波、毫米波器件等领域有着广泛的应用前景。旋波材料又称手征性材料。对旋波介质的研究已引起众多科技工作者的重视^[1~3]。对于普通的电磁材料,人们通过改变其介电常数、磁导率 μ 及材料厚度来改变其吸波性能,但这大大限制了参量可调范围。与普通材料不同,旋波介质多了一个可调节的手性参量,它是由手性材料的空间非对称性引起的。电磁波入射到旋波介质中时,会在旋波

介质中产生由于电场变化而引起的磁偶极矩以及磁场变化而引起的电偶极矩,从而导致电磁波在旋波介质中的迅速衰减,提高了旋波介质的吸波性能。

目前,人们在实验上主要采用环氧树脂^[2],通过改变介质中手性旋波体的几何尺寸来改变手性旋波介质材料的性能。在理论上有人提出了一种散射模型^[3],并利用该散射模型对不同手性螺旋体浓度,不同手性螺旋体几何尺寸的旋波介质进行了理论计算和分析。在实验上,对于不同螺旋体浓度的旋波介质的吸波性能,人们还未进行过系统的研究。

收稿日期:1999 - 01 - 25

* 本课题为国家自然科学基金资助项目 19 775 016;国防科工委资助项目 94J10. Z. 7. JW0 535

李玉莹,1972 年出生,博士研究生,主要从事吸波材料方面的研究工作

为探索不同螺旋体浓度对旋波介质吸波性能的影响,我们以石蜡为基体,以铜线金属小螺旋为手性螺旋体,通过改变螺旋体在手性旋波介质中的体积比,制备了不同浓度的手性介质。利用空间测量方法,测量了它们的反射系数、椭偏角、椭偏率,通过这些可测量,利用文献[4,5]中的测量原理,推导可得手性介质的电磁参量 μ 及手性参量 κ 。实验结果表明,改变手性旋波介质中螺旋体浓度可以调节旋波介质的吸波性能。测量结果与国外用微波网络分析仪所测结果相比,符合较好,且规律一致。

2 样品制备及测量方法

2.1 样品制备

为了研究不同浓度旋波介质的吸波性能,我们采用石蜡为基体,制备了不同浓度的手性介质。石蜡为非手性介质,且具有柔韧性,可塑性及热固性,易与同手性螺旋体均匀混合。将大量具有手性结构的金属小螺旋体均匀地嵌在石蜡里面,经热固后可制成具有手征性的旋波样品。每块样品的面积为 $18\text{ cm} \times 18\text{ cm}$,厚度为 10 mm 。金属小螺旋体的几何尺寸参数为:铜线直径 0.24 mm ,螺旋体螺径 0.67 mm ,螺距 0.31 mm ,每个螺旋体为3圈。按铜线与样品体积比不同,制备五块不同浓度的样品。螺旋体浓度分别为: 0.8% 、 1.6% 、 3.2% 、 4.0% 、 6.4% 。作为对比,另制备了一块不含螺旋体的样品。

2.2 测量原理及方法

本文主要利用波导测量线系统和空间测量喇叭天线^[4,5]。喇叭天线由一对角锥喇叭组成,它们之间的距离为 140 cm 。样品和测试系统均固定在导轨上,样品位置可精确调整。在接收喇叭一端具有精确测量旋转角度的旋转装置。实验中,主要测量量包括复反射系数、透射波偏转角和椭偏率。复反射系数通过等指示度方法测量得到,透射波偏转角和椭偏率通过测量透射波椭圆长轴的偏转角及长轴短轴比得到。

3 测量结果和分析

对于以石蜡为基底的手性旋波样品,我们测量了频段为 $8.5\text{ GHz} \sim 11.5\text{ GHz}$ 之间的复反射系数,透射波偏转角和椭偏率。利用这些测量值并结合文献[3,4]中的测量原理,推导可得 μ 、 κ 。本文着重分析不同螺旋体浓度对旋波介质吸波性能的影响,有关透射波偏转角和椭偏率及电磁参量的讨论可参

宇航材料工艺 2000年 第1期

阅文献[6]。

图1是不同螺旋体浓度旋波介质在后加金属板时的反射系数随频率的变化曲线。

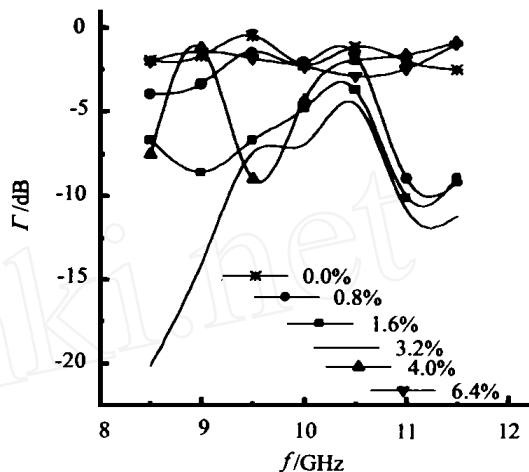


图1 不同螺旋体浓度旋波介质后加金属板时的反射系数随频率的变化曲线

Fig. 1 The reflectance of chiral materials with different spring concentration (with metal plate)

从图中可见,当螺旋体浓度在手性介质中的浓度小于 3.2% 时,手性介质的反射系数随样品中螺旋体浓度的增加而减小。样品浓度为 0.0% 的反射系数随频率的变化较为平缓,且反射系数比其它浓度样品的反射系数大。浓度为 0.8% 样品的反射系数明显小于样品浓度为 0.0% 的反射系数。这说明在非手性介质中加入螺旋体提高了介质的吸波性能,且 0.8% 样品的反射系数在频率点 11 GHz 附近有一最小值。当螺旋体浓度增加到 1.6% 时,样品的反射系数进一步减小。

从图中还可以看出,螺旋体浓度为 1.6% 的样品的反射系数随频率的变化趋势与浓度为 0.8% 样品基本相同,在频率点 11 GHz 附近都具有一个最小值。不难看出,螺旋体浓度为 3.2% 的样品在整个工作频段具有最好的吸波性能。且螺旋体浓度为 3.2% 的样品反射系数在频率大于 9.5 GHz 的频段内与低螺旋体浓度样品有相同的变化趋势。虽然在频率点 11 GHz 附近螺旋体浓度为 3.2% 样品的反射系数有一吸收峰,但反射系数最小值却出现在低频段。随螺旋体浓度的进一步提高,样品的反射系数随样品中螺旋体浓度的增加而增加。从图中可以看出,螺旋体浓度为 4.0% 的样品反射系数与螺旋体浓度为 3.2% 的样品反射系数相比,浓度为 4.0% 的

样品具有较大的反射系数值,且4.0%的样品反射系数随频率的变化波动较大,随频率的变化趋势与低螺旋体浓度样品相比有很大差别。对于螺旋体浓度为6.4%的手性样品,与螺旋体浓度为4.0%的样品相比,则反射系数进一步增加。

从图中还可看出,螺旋体浓度为6.4%的样品反射系数的幅度变化范围与螺旋体浓度为0.0%的样品反射系数的幅度变化范围非常接近,即都具有较大的反射系数。这说明,当螺旋体浓度在手性介质中的浓度大于3.2%时,手性介质的反射系数随样品中螺旋体浓度的增加而增加,手性介质中螺旋体的最佳匹配浓度点在3.2%附近。比较图1与文献[2]中的结果,可以得出两者有相同的规律。

从以上的测量结果及分析可知,在手性介质中,加入一定浓度的手性螺旋体可有效提高手性介质的吸波性能,但手性介质的吸波性能并不随螺旋体浓度的继续增加而增强。当螺旋体在手性介质中的浓度大于一定浓度时,手性介质的反射系数随样品中螺旋体浓度的增加而增加,手性介质的吸波性能随螺旋体浓度的继续增加而减弱。以上分析说明,手性螺旋体浓度对手性介质的吸波性能的调节有一临界浓度匹配点,该浓度点在3.2%和4.0%之间。

解释这种现象,我们可以考虑手性介质内部的电磁耦合机制。在手性旋波介质内部存在着手性螺旋体之间的藕合以及手性螺旋体与基体之间的藕合。首先,手性螺旋体之间的藕合是由于螺旋体的空间非对称性引起。由于手性螺旋体的加入,使得整个介质板具有了手性。电磁波入射到手性介质内部,由于螺旋体的空间非对称性,会在螺旋体上产生由于电场时变性而引起的磁偶极矩以及由于磁场时变性而引起的电偶极矩。电偶极矩和磁偶极矩之间的相互作用导致了螺旋体之间的藕合。此外,手性螺旋体加入到非手性介质中时,使做为基体的非手性介质也具有了手性^[3],因而,手性螺旋体与基体之间也存在着由于螺旋体的空间非对称性引起的电磁藕合。手性螺旋体之间的藕合以及手性螺旋体与基体之间的藕合会在金属螺旋体上产生耦合电容,耦合电感,耦合阻抗^[3]。这些耦合量与手性介质中螺旋体的浓度,几何尺寸有关。手性介质与普通介质相比,多了一个手性参量,这一手性参量就是由于手性介质内部的电磁藕合而产生的。从这一角度考

虑,手性参量是衡量手性介质内部电磁藕合强弱的物理量。为了更加直观地了解不同螺旋体浓度对手性介质内部的电磁藕合的影响,我们利用文献[4,5]中的测量原理,结合所测得的量,计算得出了不同螺旋体浓度手性介质的手性参量随频率的变化(图2、图3)。

从图2中可知,当螺旋体浓度在手性介质中的浓度小于3.2%时,手性介质的手性参量实部随样品中螺旋体浓度的增加而增大。0.0%的样品的手性参量实部在零附近,且随频率的变化波动不大。0.8%、1.6%及3.2%的样品的手性参量实部随频率的增加而呈减小的趋势,且在9.5GHz有一极大值,但在频率大于10GHz的情况下,三种样品的有交叠现象。从图中还可看出,当螺旋体浓度在手性介质中的浓度大于3.2%时,手性介质的手性参量实部随样品中螺旋体浓度的增加而减小。螺旋体浓度为4.0%、6.4%的样品的明显小于螺旋体浓度为3.2%手性介质的,且4.0%和6.4%样品的随频率的变化波动很大。在低频段(小于9.5GHz)螺旋体浓度为4.0%的样品的大于6.4%的样品的,但在高频段(大于9.5GHz),螺旋体浓度为4.0%的样品的小于6.4%的样品的。

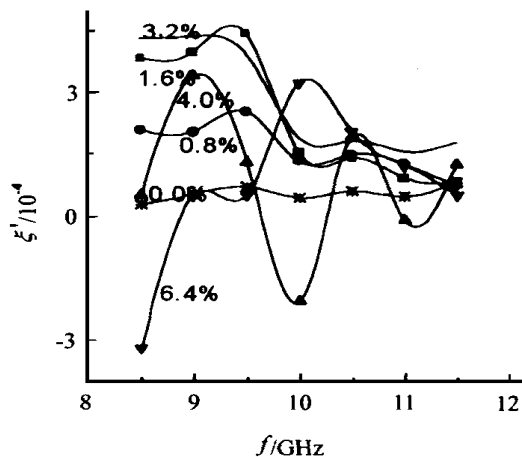


图2 不同螺旋体浓度手性介质的手性参量实部随频率的变化

Fig. 2 The real part of chiral parameter of chiral materials with different spring concentration

从图3中可知,当手性介质中的螺旋体浓度小于3.2%时,样品的手性参量随样品中螺旋体浓度的增加而负增大,且随频率的增加而呈增大。当手性介质

宇航材料工艺 2000年 第1期

中的螺旋体浓度大于 3.2% 时, 样品的 ξ'' 随样品中螺旋体浓度的增加而负减小。螺旋体浓度为 4.0% 和 6.4% 的样品的 ξ'' 随频率的改变起伏很大, 在所测频段内都有多个极值出现。

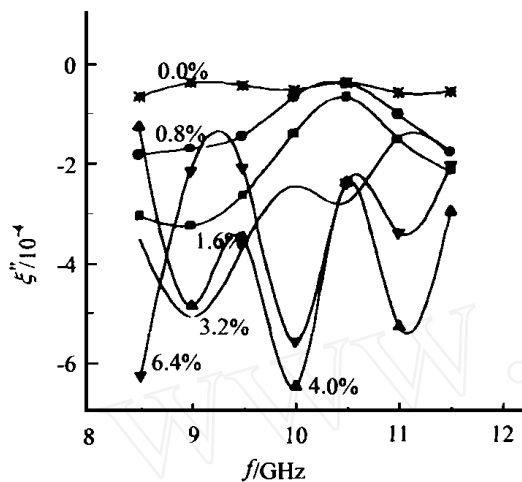


图 3 不同螺旋体浓度手性介质的
手性参量虚部 随频率的变化

Fig. 3 The imaginary of chiral parameter of chiral materials with
different spring concentration

由以上分析可知, 当手性介质中的螺旋体浓度不大于 3.2% 时, 手性参量的幅值随螺旋体浓度增加而增加, 当手性介质中的螺旋体浓度大于 3.2% 时, 手性参量的幅值随螺旋体浓度的增加而减小。以上现象说明, 当手性介质中螺旋体浓度低于某一临界点时, 介质中的电磁耦合随螺旋体浓度的增加而增强, 电磁波在手性介质中的衰减程度也随螺旋体浓度的增加而加大。比较我们所得的手性参量与国外用网络分析仪所测结果^[1], 可以得出两者在数量级和变化规律上都非常相近。

由实验结果及讨论可知, 在非手性介质中加入一定浓度的螺旋体, 可有效提高手性介质的吸波性能。这是因为, 手性螺旋体的加入使非手性介质具有了手性, 与非手性介质相比, 多了一个可调节的参量——手性参量, 使电磁波在手性介质内的衰减比在非手性介质中更大。随螺旋体浓度的增加, 手性介质中单位体积内的螺旋体个数加大, 螺旋体与螺旋体之间以及螺旋体与基体之间的电磁耦合得到了增强, 反映手性介质中电磁耦合强弱的手性参量也随螺旋体浓度的增加而增加, 因此电磁波在手性介质内的衰减程度也因螺旋体浓度的增加而加强。

宇航材料工艺 2000 年 第 1 期

从图 1 中可以看出, 当手性介质中螺旋体的浓度在不大于 4.0% 的情况下, 手性介质的吸波性能随螺旋体浓度的增加而增强。从图 2 和图 3 中可以看出, 手性参量实部及虚部的绝对值在螺旋体的浓度在不大于 4.0% 的情况下随螺旋体浓度的增加而增大。随螺旋体浓度的进一步提高, 手性介质的吸波性能下降, 手性参量实部及虚部的绝对值也有减小的趋势, 而且随频率的变化起伏加大。这是因为螺旋体浓度的进一步提高, 手性介质中单位体积内的螺旋体个数继续加大, 当手性介质中单位体积内的螺旋体个数加大到使螺旋体相互接触的时候, 整个手性介质样品相当于一块金属板, 手性介质样品对电磁波的反射程度加大, 样品对电磁波的吸收能力减弱。因此在设计高吸收宽频段的吸波材料时, 应考虑螺旋体在手性介质中的浓度匹配。

4 结论

利用空间测量方法, 对不同螺旋体浓度手性介质的吸波性能进行了测量。实验结果表明手性介质中螺旋体浓度的改变可以作为调节手性介质吸波性能的一种手段。在非手性基体中加入适当浓度的螺旋体可有效提高手性介质的吸波性能。手性螺旋体在基体中的浓度有一最佳浓度匹配点, 该浓度点在 3.2% 和 4.0% 之间。在设计高吸收宽频段的手征性吸波材料时, 应考虑螺旋体在手性介质中的浓度匹配。

参考文献

- 1 Varadan V V, Ro R, Varadan V K. Measurement of the electromagnetic properties of chiral composite materials in 8 - 40 GHz range. *Radio Science*, 1994; 29: 9 ~ 22
- 2 Güire T, Varadan V V, Varadan V K. Influence of chirality on reflection of EM waves by planar dielectric slab. *IEEE. Trans. Electroman. Compat.*, 1990; 32: 300 ~ 303
- 3 Alfred J. Bahr, Karl R Clauaing. An approximate model for artificial chiral material. *IEEE. Trans on Antennas & Propagation*, 1994; 42: 12
- 4 Sun G C, Yao K L, Liu Z L, Huang Q L. A study on measuring the electromagnetic parameters of chiral materials. *J. Physics D: Applied Physics*, 1998; 31(17): 2109 ~ 2111
- 5 黄全亮, 刘祖黎, 潘华锦等. 手性材料电磁参量测量方法的理论研究. *计量学报*, 1997; 18(3): 222 ~ 226
- 6 潘华锦, 刘祖黎, 李玉莹等. 不同浓度螺旋体旋波介质手性参量的研究. *华中理工大学学报*, 1998; 26(3): 16 ~ 18