

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2012.05.025

微波材料的电磁参数测试方法

张军英,张雨,姜维维

(中国兵器工业集团第五三研究所,济南 250031)

摘要:综述了微波材料电磁参数的测量方法,主要介绍了探头法、谐振腔法、自由空间法、单端口传输线法及传输/反射法等5种电磁参数测量方法的基本原理,比较了各种方法的优缺点。并对当前研究中存在的问题进行了讨论。

关键词:微波材料;电磁参数;测试方法

中图分类号: TB330 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2012)05-0107-04

Testing Methods of Microwave Material's Electromagnetic Parameters

Zhang Junying, Zhang Yu, Jiang Weiwei

(CNGC Institute 53, Jinan 250031, China)

Abstract: Testing methods of microwave material's electromagnetic parameters were reviewed, the basic principles of the electromagnetic parameters testing methods such as probe method, resonant cavity method, free space method, single port transmission line method, transmission/reflection method were mainly introduced, and the advantages and disadvantages of various methods were compared. And the current problems existing in the research were discussed.

Keywords: microwave material; electromagnetic parameters; testing method

随着通讯技术和信息技术的发展,特别是近年来国防军事装备技术的发展,微波材料的应用范围日趋广泛,发挥着越来越重要的作用。通常微波材料在整个工作频段内呈现出不同的特性,通过材料合成技术和对数计算法则确定材料电磁参数的方法忽略了频率因素的影响,不能准确描述材料的电磁性能,因此微波材料电磁参数测试技术的研究显得尤为重要。

1 电磁参数测量方法及原理

许多微波测量方法能同时确定材料的微波复介电常数和复磁导率,这些方法包括传输反射法^[1-12]、探头法^[13-17]、谐振腔法^[14-16]、自由空间法^[17-18]及使用多个终端的单端口传输线法^[19-20]等。

1.1 探头法

探头法是一种非破坏性测量方法,它可用于层状材料、液态物质或无定形固态物质的复介电常数和复磁导率测量。探头法主要有终端开路同轴探头法和终端开路矩形波导探头法两种,前者的测量频带很宽,后者的频带相对较窄。探头法还可分为有法兰和无法兰两种,早期的探头都是无法兰探头,存在电磁波的辐射损耗,准确性较差,而有法兰探头的精度相对较高。

同轴探头加载涂层材料的结构如图1所示。通过同轴探头和反射计测得材料的传输系数 Γ_m ,利用电磁理论和计算电磁学建模,从理论上计算出材料的反射系数,以 Γ_m 为

标准值,令样品的反射系数 $\Gamma_c \rightarrow$ 样品中的传输系数 Γ_m 优化迭代可以提取出相对复介电常数 ϵ_r 值;如果需要同时提取 ϵ_r 和相对复磁导率 μ_r 值,则还需适当改变条件,再建立一个方程 $\Gamma_c \rightarrow \Gamma_m$,联立求解出 ϵ_r 和 μ_r 。厚度 d 和频率 f 都是反射系数的独立变量,因此得到新方程的方法包括变厚度法和变频率法。通过测量两块厚度不同的同种材料,得到2个反射系数,建立方程,反演得到 ϵ_r 和 μ_r ;后者通过改变工作频率(扫频)建立电磁参数所需的多个反射系数方程。变频率法只需1块样品和1次扫频测量反射,既减少了误差来源,又简化了测量手续,非常适用于现场快速测量。

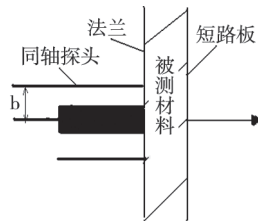


图1 同轴探头测量加短路板单层介质模型

1.2 谐振腔法

谐振腔法是由R.J.Cook于20世纪70年代初提出的。它是将样品放入谐振腔中,根据放入前后其谐振频率和品质因数Q值的变化来确定样品复介电常数和复磁导率的一种

联系人:张军英

收稿日期:2012-03-12

微波测量方法。该方法通常是将样品置于谐振腔中电场最大、磁场最小处测量样品的复介电常数,将样品置于谐振腔中电场最小、磁场最大处测量复磁导率。谐振腔法的局限性在于一般只能用于点频或窄频测量,且操作和分析均比较复杂,对于高损耗材料需要非常小的样品尺寸,固体材料必须经过精确的加工以置入谐振腔。谐振腔法的优点在于测量精度很高,尤其适合于测量低损耗材料的复介电常数和复磁导率。

1.3 自由空间法

该方法采用矢量网络分析仪和收发天线等主要测试设备,构成开放空间测试系统,通过测量矢量反射系数和传输系数,或者测量不同入射角、不同极化方式下的矢量传输系数来确定样品的微波复介电常数和复磁导率。近年来,随着矢量网络分析仪的迅速发展,其测试精度、噪声门限电平、动态范围及自动化程度有了很大提高,微波领域自由空间测试法因准确度提高而得到广泛的关注。

自由空间测试法拟构建测试系统原理框图如图2所示。该测试系统置于测试平台上,计算机在整个测试系统中是控制中心,控制着网络分析仪的自动测试和电磁参数的计算,同时还控制测试转台的转动。网络分析仪的两个测试端分别连有功率放大器,输出端加功率放大器的目的是放大信号,输入端加低噪声放大器是为了改善接收信号的信噪比。当测试环境良好、测试设备和测试技术较先进时可以省去低噪声放大器。

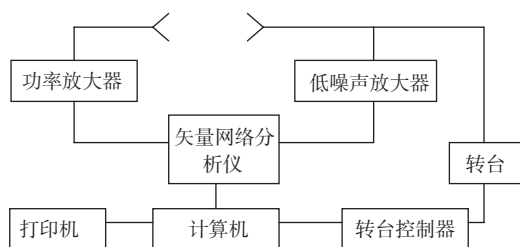


图2 自由空间测试系统原理框图

自由空间法可广泛用于非破坏性、非接触性材料,尤其适用于特殊环境(如高温)测量和非均匀材料(如蜂窝结构吸波板)测量。它的优势在于测量频率高、频带宽,缺点是所需样品的尺寸较大,尤其在低频测量时,另外要求样品的表面必须平坦并且双面平行,该方法的准确性相对较差。

1.4 单端口传输线法

单端口传输线法是通过使用多个不同的终端,进行多次反射系数测量获取复介电常数和复磁导率的一种方法。它适宜于测量无损耗、高损耗或中等损耗材料的微波电磁特性,但不适宜于低损耗材料的复介电常数和复磁导率的测量。它的应用频带取决于传输线的类型,同轴型频带很宽,波导型相对较窄。

1.5 传输/反射法

在众多的测量方法中,传输/反射法^[21](Transmission/Reflection Method)最简单且具有较高精度。其测试原理是:通过网络分析仪直接测量材料的散射参量,然后通过散射方程反演出材料的电磁参量。复介电常数和复磁导率与复反射和复透射系数有着单值关系。

当把线性、均匀的待测材料样品置于同轴线或矩形波导中时,其可等效为传输线及互易、对称二端口网络。设样品的反射系数为 Γ_c ,传输系数为 Γ_t ,则可以得到由等效网络 S 参数计算材料的复相对磁导率与复相对介电常数的计算公式^[22-24]。

这种方法实际上是一种双端口传输线法,它将均匀、线性、各向同性材料的被测样品填充在标准传输线(同轴线、波导等)内,构成一个互易双端口网络,通过测量含样品传输线段的传输系数和反射系数确定样品的电磁参数。传输反射法具有操作简单、测量速度快、测量频带宽、无辐射损耗及测量精度较高等优点,是目前各种材料微波电磁参数测量方法中研究的最多的一种。目前国内外吸波材料微波电磁参数的测量大多采用这种方法。

传输/反射法按照样品夹具或测量座的不同又可分为矩形波导型、带线型、微带线型及同轴型等4种类型。

(1) 矩形波导法

使用波导法测试薄膜电磁参数是由M.Kamarei等在1991年提出的^[25],该方法可同时测量薄膜的复介电常数和复磁导率。在 S (频率范围在1.55~3.4 GHz)波段对0.2 μm 的FeCo基薄膜进行了测试,结果表明,在对微米级薄膜测试时,该方法测试误差较大。该方法适用于对多层介质样品的电磁参数的测量。

2005年,Didier Vincent等将磁性薄膜材料作为介质基片材料制作矩形波导^[26],利用网络参数法完成了磁性薄膜材料磁导率测试。

在1 MHz~15 GHz内,800℃下和165 kA/m的DC(衰减控制)施加场上,Didier Vincent等对厚2.5 μm 的YIG(钇铁石榴石)薄膜样品进行测试,结果发现,高频下的测试结果与Polder模型的吻合度较高,低频测试时精度较低。在1 MHz~50 GHz内测试了厚35 μm 的钕铁氧体薄膜,未给出准确度分析。该法所用测试样品制作复杂,矩形波导导体需要紧密覆盖在薄膜材料上,使得部分薄膜镀于金属表面上,限制了薄膜材料的基底材料,不利于薄膜材料的研究、应用和无损检测。

(2) 带状线法

采用带状线测试材料电磁参数的方法最早是由Walter Barry提出的^[27]。1993年,A.Fessant等用带状线法在室温、

3 MHz~3 GHz 内对 CoZr 的非晶薄膜($0.4 \sim 5 \mu\text{m}$)进行了磁导率的测量^[28]。将玻璃基片上的 CoZr 膜切割成条状,然后装入带状线夹具中,使用网络分析仪测量其 S 参数。由于样品体积小,对带状线内场结构影响较小,可近似认为传输的是准 TEM 模式。采用格林函数法和变分法对 Laplace 方程求解,结合传输线的阻抗和 S 参数,利用迭代法可解出薄膜复磁导率。这种方法具有测试频带较宽、精度较高、操作比较简单等优点,适合于损耗较低的薄膜材料的测量。

(3) 微带线法

1998 年, P. Queffelec 等将测试样品放于悬置微带线上^[29], 实现了 0.1~10 GHz 内对 $0.5 \sim 100 \mu\text{m}$ 厚的铁磁薄膜的电磁参数测试。微带线法的主要原理为: 将试样放在支撑台上, 用网络分析仪测得等效网络 S 参数。由于微带传输模式中存在高次模, 需对电磁场进行全波分析。正向问题为: 对霍姆霍兹方程进行傅里叶展开, 然后利用时域法和 Galerkin 方法对方程求解, 将 S 参数表示为薄膜复介电常数和复磁导率的函数。逆向问题为: 采用对目标函数求极值和迭代法求出复介电常数和复磁导率^[30]。利用这种方法测试时, 操作方便, 结构简单, 但分层介质的电磁场计算复杂, 并容易激励起高次传输模式, 测试误差大。

2005 年, E. Salahun 等对上述悬置微带线法进行了改进^[31], 将被测样品放置于空气微带线中, 在常温实现 130 MHz~7 GHz 内对矩形形状、 $0.1 \sim 1800 \mu\text{m}$ 厚薄膜样品的电磁参数测试, 测试样品材料均为各向异性铁磁材料, 测试误差 <6%。这种方法的优点是不需要任何磁性参考样品, 且测试误差较小。微带线法适合测试频率较高或者损耗较大的薄膜材料。

(4) 同轴型

同轴传输 / 反射法的测量频带很宽, 一般用于测量 0.1~18 GHz 频率范围的电磁参数, 同轴样品为环状, 用量较少。矩形波导型传输 / 反射法测量频带相对较窄, 一般用于测量厘米波段的电磁参数, 其样品为块状, 用量较多。与同轴和矩形波导型传输 / 反射法相比, 带线型传输 / 反射法具有样品制备方便且易于放置等优点, 但测量精度与样品测量盒的加工精度有关。带状线型传输 / 反射法可用于测量厚度仅有 $1 \sim 10 \mu\text{m}$ 的薄膜材料的电磁参数, 与带状线法一样, 该方法对测量盒的加工精度要求也很高。

同轴传输 / 反射法虽然是通过传输系数和反射系数确定样品的电磁参数, 实际测量时却是首先直接测量端口面的散射参数, 再由散射参数得到传输系数和反射系数, 进而确定样品的电磁参数。

使用同轴传输 / 反射法进行材料电磁参数的测试所使用的同轴测量夹具通过两根同轴电缆与矢量网络分析仪的

端口 1 和端口 2 相连, 矢量网络分析仪是整个测试系统的核心, 用于进行样品散射参数的测量, 整个系统由计算机控制。所采用的样品测量夹具是一段特性阻抗为 50Ω 的标准同轴空气传输线。该夹具由内导体和外导体组成, 内导体直径为 3.0 mm , 外导体直径为 7.0 mm , 夹具有效长度为 10.0 mm 。夹具的接头为 N 型, 一端为 N 型阳, 另一端为 N 型阴。

显然, 与同轴传输 / 反射法相比, 矩形波导传输 / 反射法具有测量频带较窄, 样品用量较多的缺点, 而带状线和微带线传输 / 反射法对样品测量盒的加工精度要求较高, 难以自行加工。在 IEEE Std 1128—1998 标准中也推荐使用同轴传输 / 反射法进行频域射频吸波材料的电磁参数测试。

2 结语

上述几种电磁参数测量方法各有其特点。开口同轴探头法不需检测相位信息, 可简化测量仪器, 具备非破坏性、仪器设备简化、操作方便、快速等特点, 适合用于现场测量, 但精度受到限制。谐振腔法的优点在于目前它具有最高的测量精度, 尤其适合测量低损耗材料的电磁参数, 其局限性在于一般只能用于点频或窄频测量, 且操作和分析都比较复杂, 对于高损耗材料需要非常小的样品尺寸, 固体材料必须经过精确的加工以填充进谐振腔。自由空间法不进行相位测量, 系统校准简单, 缺点是需要复杂的算法, 需由测量值反演出材料的电磁参数。单端口传输线法适宜于测量无损耗、高损耗或中等损耗材料的微波电磁特性, 但不适宜于低损耗材料的复介电常数和复磁导率的测量。传输 / 反射法可以进行扫频测量, 也较为方便, 但当试样厚度为介质波长的整数倍时, 测试结果会出现较大偏差, 即“厚度谐振”现象。此外, 在实际测试中还需解决 NRW (“Nicolson-Ross-Weir”) 算法中的多值性和相角跳变等问题。在实际应用过程中, 可根据需要以及测量条件选择适合的测量方法。

参考文献

- [1] Nicolson A M, et al. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1970, 19 (8): 377-382.
- [2] Queffelec P, et al. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1998, 47 (4): 956-959.
- [3] Li C L, et al. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1995, 44 (1): 19-27.
- [4] Wang S, et al. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1998, 46 (12): 2 145-2 148.
- [5] Niu M, et al. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1999, 47 (2): 476-479.
- [6] Chang C W, et al. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1997, 46 (5): 1 084-1 088.
- [7] Tantot, et al. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1997, 46 (2): 519-521.

- [8] Okada F, et al. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1991, 40 (2):476-478.
- [9] 董树义. 微波测量技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1991: 329-330.
- [10] Musal H M. IEEE Transaction on Magnetics, 1992, 28 (5):3 129-3 131.
- [11] Munoz J, et al. IEEE Transactions on Instrumentation and Measuerment, 1998, 47 (4):886-889.
- [12] Ghodgaonkar D K, et al. IEEE Transactions on Instrumentation and Measuerment, 1990, 39 (2):387-391.
- [13] Fannin P C, et al. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1997, 167:274-280.
- [14] Sequeira H B. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements, 1990,39 (4):621-624.
- [15] Achour M E, et al. Journal of Applied Polymer Science, 1999, 73: 969-973.
- [16] Sihvola A H, et al. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, 1991, 29 (4):679-686.
- [17] Sihvola A H. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, 1989, 27:403-415.
- [18] Pullar R C, et al. Journal of Materials Science Letters, 1998, 17: 973-975.
- [19] 葛副鼎,等. 宇航材料, 1996,26 (5):42-49.
- [20] Choi H D, et al. Journal of Applied Polymer Science, 1999, 72:75-83.
- [21] Weir W B. Proc IEEE, 1974, 62 (1): 33-36.
- [22] Tian B N, et al. Chinese Journal of Radio Science, 2002, 17 (1):10-15.
- [23] Tian B N, et al. Chinese Journal of Radio Science, 2001, 16 (1):57-60.
- [24] Jing S H, et al. Proceedings of 2003 Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetic [C]. 2003:590-595.
- [25] Kamarei M, et al. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1991, 34 (1): 68-74.
- [26] Fessant A, et al. IEEE Transactions on Magnetics, 1993; 29: 1-2.
- [27] Patrick Queffelec, et al. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1998, 47: 4-5.
- [28] 陶洁. 磁性纳米膜微波电磁参量谐振腔法测量研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- [29] Erwan Salahun, et al. IEEE Transactions on Magnetics, 2001, 37: 4-5.
- [30] Kamarei M, et al. Electronics Letters, 1991; 27 (1): 68-70.
- [31] Salahun E, et al. IEEE, Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2005, 53: 4-5.

我国沥青碳纤维新材料迈向产业化

由四川创越炭材料有限公司投资的阆中炭材料产业园奠基仪式日前在四川省阆中市七里工业区举行,此举标志着我国沥青碳纤维向产业化发展进入实质阶段。阆中炭材料产业园是国内第一家以沥青碳纤维为主的生产基地,总投资达 32.7 亿元,建成后可实现年产 2 000 t 通用级沥青碳纤维生产线及配套设施,产值达 60 多亿元。

新型炭材料的应用领域涉及人类生活的方方面面——钓鱼杆、高尔夫球杆、轻量级自行车、刹车片,抑或是电动汽车、飞机等。碳纤维比头发丝细,却比钢结实,比铝轻,比不锈钢耐腐蚀,又能像铜那样传热导电,被看作当今新材料领域的顶级材料。目前,全世界只有美国、日本等少数国家掌握了碳纤维生产的核心技术,产量每年仅有 4 万 t。

科技部中国技术市场协会副秘书长孙小林说,目前我国碳纤维整体处于比较落后的状态,产业化发展滞后,产品性能低,产量少。国内高性能碳纤维至今没有成熟的技术,每年需要高价大量进口碳纤维产品。发达国家不但对我国实行技术封锁,而且对部分碳纤维品种限制出口。

碳纤维研究成果在国内处于领先地位的中科院山西煤炭化学研究所所长王建国表示,就沥青碳纤维而言,目前我国沥青碳纤维发展的瓶颈在于纺丝沥青和熔融纺丝生产技术,其制约着碳纤维的生产成本和市场竞争能力。

四川创越董事长兼总经理石强表示,在这样的背景下,作为一家新型炭材料企业的四川创越通过自主创新,与中

院山西煤炭化学研究所合作,破解了制约我国碳纤维材料技术发展的瓶颈,通用级沥青碳纤维产业化生产工艺及制备关键技术,在性能、功耗、成本、绿色制造等方面都取得重大突破,填补了我国沥青碳纤维大规模生产的空白,主要指标达到国外同类产品水平,并已获得国家发明专利一项。项目投产后,沥青碳纤维将给我国诸多产业带来巨大的经济效益。(中聚网)

美 PMC 公司展出热塑性聚氨酯新品

制造连续纤维增强热塑性塑料单向带和片材的美国 PMC 公司及其加拿大子公司 Baycomp 将在 2012 年欧洲 JEC 展览会上展出多种用于各种市场的新产品,包括:

(1) PC-ABS/碳纤维或玻璃纤维复合产品,用于 3C 行业(电脑、通讯和消费电子类),可与镁、铝金属和热固性复合材料相媲美,其产品可利用周期时间模塑快速成型。在其产品部件上可用普通的热塑性树脂进行重叠注塑,进而获得高水平的结构部件。

(2) 热塑性聚氨酯/碳纤维复合产品,用于娱乐行业,具有良好的力学性能、高韧性、耐疲劳性及与聚氨酯胶粘剂的亲和性。

(3) PA6/玻璃纤维带复合产品,用于汽车结构部件,亦可对其进行重叠注塑,进而获得复杂的混杂结构部件。

(4) 高密度聚乙烯/玻璃纤维复合产品,用于防弹领域,其纤维含量高达 80%,可与超高分子量聚乙烯进行共注塑。(工程塑料网)