

高 Q 腔法与准光腔法用于毫米波段 室温介电性能测试比对研究

陈聪慧¹ 何凤梅¹ 李恩² 杨景兴¹

(1 航天材料及工艺研究所,先进功能复合材料技术重点实验室,北京 100076)

(2 电子科技大学,成都 610054)

文 摘 介绍了用于毫米波段的介电性能测试的高 Q 腔法和准光腔法的原理及物理模型,并分别对其进行仿真分析,建立了相应的测试装置,进行了空腔和石英玻璃的测试。结果表明,准光腔法要比高 Q 腔法在品质因数、可分辨的频点、样品尺寸、测试精度等方面更有优势。

关键词 高 Q 腔法,准光腔法,毫米波段,介电性能

Comparison of High Q Cavity Method and Quasi-Optical Resonator Method Used in Dielectric Properties Testing at Millimeter Wave Band

Chen Conghui¹ He Fengmei¹ Li En² Yang Jingxing¹

(1 Science and Technology on Advanced Functional Composites Laboratory, Aerospace Research Institute
of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

(2 University of Electronic Science and Technology, Chengdu 610054)

Abstract Theory and physical model of high Q cavity method and quasi-optical resonator method used in dielectric properties testing at millimeter wave band was introduced and emulation analyzed. Test setups were built. Tests of cavum and quartz glass were carried out. Result show that quasi-optical resonator method is better than high Q cavity method at quality factor, distinguish frequency point, sample size and testing precision.

Key words High Q cavity method, Quasi-optical resonator method, Millimeter wave band, Dielectric property

0 引言

毫米波通常指频率为 30 ~ 300 GHz 的无线电波,其相应的波长范围应是 10 ~ 1 mm。它介于普通微波和光学(红外,可见光)频段之间,与微波相比,毫米波受恶劣气候条件影响大,但分辨力高,结构轻巧;与红外和可见光比,毫米波系统虽没有那样高的分辨力,但通过烟雾灰尘的传输特性好,主要应用在结构小、质量轻、分辨力高、作用距离近和具有良好多普勒处理特性的场合。目前毫米波在制导^[1]、雷达^[2]、战术和战略通信、电子对抗、遥感、辐射测量等方面得到了广泛应用。毫米波段透波材料的复介电性能是确保毫米波段制导系统、雷达天线系统正常工作的关键技术指标之一,从而对透波材料在毫米波波段的复介电性能评价提出了迫切的需求。

由于毫米波波长小,透波材料毫米波段的介电性能与厘米波相比会有明显差异,国外针对透波材料毫

米波段介电性能测试方法已开展了较广泛的研究,受测试方法对测试样品的限制,针对透波材料毫米波段介电性能测试方法主要选用的有高 Q 腔法、准光腔法和自由空间法,其中高 Q 腔法、准光腔法由于容易实现较高的品质因素,也比较容易实现高温测试而被广泛采用。本文主要对高 Q 腔法、准光腔法用于毫米波段室温介电性能进行测试及比对研究。

1 实验

高 Q 腔法与准光腔法都属于谐振腔法,谐振腔法分为固定频率法和固定腔长法。在现代测量技术中,频率的测量的精确度和分辨率均比长度测量高,由此将采用固定腔体的几何尺寸、测量谐振频率的变化量的方法,简化了操作,提高了整体测量精度。本实验中高 Q 腔法与准光腔法都是采用固定腔长法。

1.1 高 Q 腔法测试原理

在某一固定模式(TE_{0nm}^0)下,圆柱测试腔其初始

谐振频率为 f_0 , 固有品质因数为 Q_0 。在此测试腔放入厚度为 d 的圆片状样品后, 由于介质样品的介电常数 ϵ' 大于 1, 因此使得填充有介质样品的测试腔的相位常数增大, 在固定谐振腔长度的条件下, 其谐振频率降低为 f_ϵ ; 由于介质样品将引入附加的介质损耗, 导致测试腔的固有品质因数下降为 Q_ϵ 。根据在放入介质样品前后测试腔体谐振频率的改变量和 Q 值的改变量, 可以分别计算出介质样品的 ϵ' 和 $\tan\delta$, 测试物理模型见图 1。

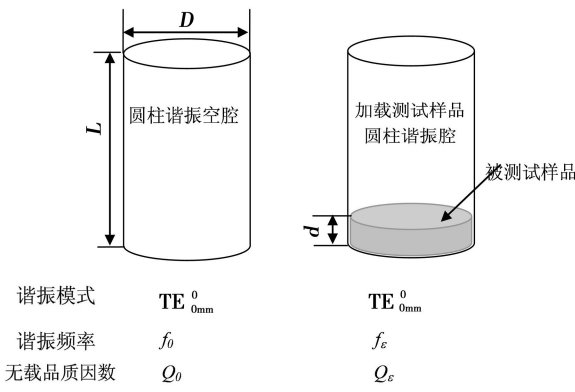


图 1 高 Q 腔法物理模型

Fig. 1 Physical model of high Q cavity method

1.2 准光腔法测试原理

准光腔分为对称双球面准光学谐振腔(双凹腔)和半对称准光学谐振腔(平凹腔)。两种腔体的工作原理是一样的, 但是与双凹腔相比, 平凹腔装载样品方便, 容易定位, 且制作成本较低, 成为目前在介质测量中最常用的准光腔类型, 本实验中的准光腔法采用的是平凹腔。

测试原理为在某一固定模式 TEM_{00q} 下, 初始谐振频率为 f_0 , 固有 Q 值为 Q_0 。在此测试腔放入厚度为 d 的圆片状样品后, 在固定谐振腔长度的条件下, 其谐振频率降低为 f_ϵ , 测试腔的固有 Q 值下降为 Q_ϵ 。根据在放入介质样品前后测试腔体谐振频率的改变量和 Q 值的改变量, 可以分别计算出介质样品 ϵ' 和 $\tan\delta$, 测试物理模型见图 2。

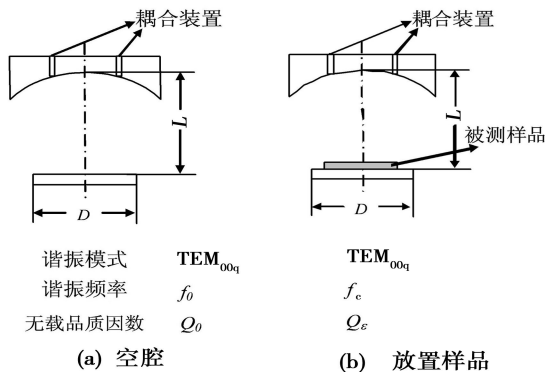


图 2 准光腔法物理模型

Fig. 2 Physical model of quasi-optical resonator method

1.3 比对分析

准光腔法和高 Q 腔法测试毫米波段介电性能, 都是通过加载介质样品前后腔体的谐振频率和品质因数(Q 值)来计算样品的相对介电常数和损耗角正切。但两种谐振腔有着本质的区别。

高 Q 腔法因测试精度高、测试技术成熟度高被广泛采用。但它随着频率的升高, 对于封闭的腔体因导体损耗的 Q_c 值均按 f^2 减少, 到毫米波段时腔体的 Q 值将降低, 在高温环境中受所选材料和温度的限制, Q 值将大大降低, 从而降低损耗角正切的测试精度。

当频率升高到毫米波段, 高 Q 腔法工作在基模上的封闭谐振腔的尺寸也要相应的减小, 这给腔体的使用带来了不便, 而且频率的升高会激励更多的高次模和简并模, 这使得腔体在高频端的模式密度增大, 难以区分基模和高次模^[3], 将需要减小样品的尺寸。如果样品为常用的编织类透波材料, 其制样厚度尺寸需小于编织单元尺寸, 样品将不具有代表性且很难制备合格样品。

准光腔法的谐振频率稀疏, 单模性能较好, 尺寸可以远大于其工作波长, 不受工作波长的制约, 其构造简单, 加工方便。而且准光学谐振腔约束电磁能量的形式与高 Q 谐振腔不同, 准光腔不需要金属侧壁就能将能量约束在腔内, 降低了腔体的金属损耗, 这使得准光学谐振腔的 Q 值要比高 Q 谐振腔的 Q 值高许多, 因此测量能达到更高精度^[4]。

2 结果与讨论

选取毫米波 30 ~ 40 GHz 频段, 根据上述测试原理进行建模, 用 Matlab 仿真计算分析, 得出具体的高 Q 腔法及准光腔法比对数据结果见表 1。

由表 1 仿真结果可见, 准光腔法腔体尺寸及样品尺寸都要比高 Q 腔法的大。另外准光腔法干扰模式少、 Q 值高, 测试精度也高。

根据测试原理, 分别制备了准光腔法和高 Q 腔法室温/30 ~ 40 GHz 测试装置, 见图 3。

分别用准光腔法和高 Q 腔法测试了室温/30 ~ 40 GHz 的空腔无载品质因素, 测试结果见图 4。

按仿真计算结果, 制备相应的石英玻璃样品测试结果见图 5。

图 4 表明, 准光腔法的品质因素明显高于高 Q 腔法, 且高 Q 腔法在同样的带宽内可分辨的频点少, 而准光腔法可分辨的频点多。

表1 准光腔法与高Q腔法仿真结果比较

Tab.1 Emulation analysis comparison of high Q cavity method and quasi-optical resonator method

测试方法	腔体/mm	工作模式	空腔无载品质因数/ 10^4	测试精度	石英玻璃样品厚度/mm
高Q腔法	腔长 ≈ 80 腔体直径 ≈ 30	TE_{0mn}^0 , 高次模多	2~4	$ \Delta\varepsilon'/\varepsilon' \leq 2.0\%$ $ \Delta\tan\delta \leq 10\% \tan\delta + 5 \times 10^{-4}$	1.1
准光腔法	腔长 ≈ 200 平面镜口径 ≈ 55	TEM_{00q} , 高次模少	8~12	$ \Delta\varepsilon'/\varepsilon' \leq 1.5\%$ $ \Delta\tan\delta \leq 10\% \tan\delta + 5 \times 10^{-5}$	2.5

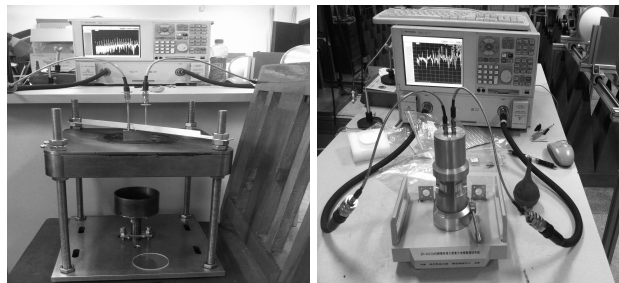


图3 室温准光腔法和高Q腔法测试装置
Fig.3 Test setup of high Q cavity method and quasi-optical resonator method

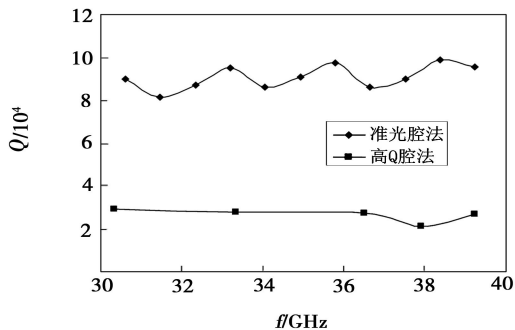
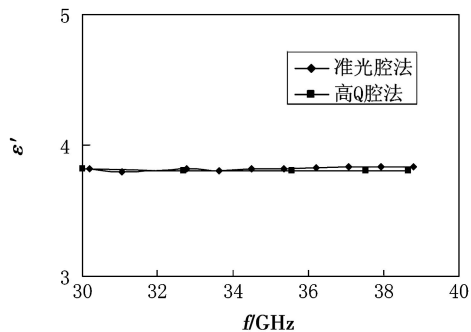
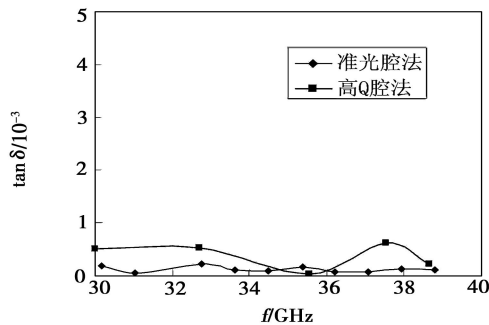


图4 准光腔法和高Q腔法室温品质因素测试结果
Fig.4 Quality test result of high Q cavity method and quasi-optical resonator method

图5中两种方法的室温石英玻璃的测试结果表明,两者介电常数的相对偏差不大于 $\pm 1\%$,损耗角正切相对偏差小于 2×10^{-4} ,均达到各自分辨率的上限,且准光腔法优于高Q腔法,这与其高品质因素相关。这与表1的仿真结果是一致的。



(a) ε'



(b) $\tan\delta$

图5 准光腔法和高Q腔法室温石英玻璃测试结果
Fig.5 Quartz glass test result of high Q cavity method and quasi-optical resonator method

3 结论

(1)高Q腔法属于闭合腔体,技术成熟度高,但随着频率升高,腔体及样品尺寸要减小,加工制备困难;而准光腔法为开放式腔体,腔体及样品尺寸不受工作波长的制约。

(2)高Q腔法腔体在高频段的模式多,工作模式和基模辨识难;而准光腔法谐振频率稀疏,单模性能较好。

(3)高Q腔法随着频率升高腔体Q降低,以至于 $\tan\delta$ 测试精度降低;而准光腔法毫米波段Q值高 $\tan\delta$ 测试精度高。

因此,综合考虑各方面的对比结果,在毫米波段的介电性能测试中,准光腔法比高Q腔法更有优势。

参考文献

[1] 李瑛. 战术导弹导引头技术及毫米波制导的发展趋势[J]. 科技信息, 2010(9): 40-41
 [2] 刘荣丰, 李博. 毫米波雷达的应用及发展趋势[J]. 科协论坛, 2009(1下): 87-88
 [3] 吴超, 李恩, 等. 高Q腔法测试透波材料毫米波复介电常数[J]. 宇航材料工艺, 2009, 39(1): 82-84
 [4] 雷丹, 张其劭, 等. 用3 mm准光腔测试介质片复介电常数[J]. 宇航材料工艺, 2006, 36(2): 71-74

(编辑 任涛)