论著

文章编号:1000-5404(2006)18-1876-05

微波辐射场中的薄层材料界面屏蔽和防护作用的实验研究

翟建才,蒋 洪,马显光 (第三军医大学基础医学部物理学教研室,重庆 400038)

提 要:目的 探讨微波辐射能量在薄层材料界面分配的一般规律,特别是与辐射照射方向之间的依赖性。为深入研究微波生物效应的屏蔽及防护机制提供实验依据。**方法** 实验对经过精心筛选的多种微波屏蔽薄层材料(加金属网结构的纤维编织材料、化学处理的微波防护布料、纳米碳涂膜金属板和动物体表组织材料等)在特定频段(9.3 GHz)的微波辐射场中,利用微波分光计测定一定入射方向的波束经界面作用后的强度和方向特征表现作了系统研究。**结果** 未形成导电网的金属网结构编织材料并不具备明显的微波屏蔽功能;而化学处理的微波防护布料是强反射型屏蔽材料类;纳米碳涂膜金属板是透射窗型微波隐形材料;而动物体表组织材料等则为复合型的微波反射-吸收材料。此外,生物组织薄层材料在微波辐射场中的界面作用,会随着微波热效应的作用所造成的含水量的改变,呈现规律性的影响。**结论** 尽管微波对于不同类型的薄层材料,总体上是符合波在界面的反射定律的,但是,却在界面附近的反射场区有着丰富的细节变化,结果可能对不同材料界面与定向微波辐射之间的屏蔽防护作用具有特征性的分类功能。由于动物表皮组织对较小入射角的电磁波辐射的吸收较强,因此在考虑微波的防护时,更应该重视这部分辐射的作用。

关键词: 微波;界面材料屏蔽作用;薄层材料;生物组织界面特性;微波防护机制

中图法分类号: R143;R312 **文献标识码:** A

Interfacial reaction of microwave radiating field upon lamellar materials

ZHAI Jian-cai, JIANG Hong, MA Xian-guang (Department of Physics, College of Medicine, Third Military Medical University, Chongqing 400038, China)

Abstract: Objective To explore the rule of energy distribution on the interfaces between lamellar materials, especially the dependence upon the radiating directions for a microwave (MW) radiation and to get some experimental evidences for further research of the shielding and protective mechanism of biological effects of MW. **Methods** Some MW shielding lamellar materials elaborately chosen, including fiber & metal wires intertexture, MW exposure suit materials by chemical treatment, nano-carbon coated metal sheets and fresh pigskin treated as biological tissue material, were exposed to the defined frequency (9.3 GHz) MW field and the characteristics of MW interfacial reactions upon the materials were detected by a micro-spectrometer. **Results** The fiber & insulated metal wires intertexture did not possess obvious MW-shielding function. The MW exposure suit materials by chemical treatment were strong reflecting type MW-shielding materials. The nano-carbon coated metal sheets had a "transparent window" for a rather wide range of MW incidence angles and so were used as MW secret materials. As biological tissue material, the fresh pigskin treated was identified as a kind of complex MW absorbing and reflecting material. Otherwise, the interaction between MW and biological material interfaces might vary regularly as the change in water-content occurred by the MW heating effect. **Conclusion** Although all the kinds of experimental samples exhibited the coherence with the reflection law to MW sheaf, there was plenty of significant diversity in detail nearby the MW reflecting region. The experimental evidence might be of characteristic classification for interaction between MW directional radiation and different material interfaces. Otherwise, as skin tissues absorb microwave rather sharply in little incident angles, this part of radiations should be considered more in the protective mechanism of MW.

Key words: microwave; interfacial material shielding reaction; lamellar materials; interfacial characteristics of biological tissues; MW protect mechanism

作者简介: 翟建才(1944-),男,天津市人,硕士,教授,主要从事医学生物物理学和生物医学工程学教学和物理因子的生物效应方面的研究。电话:(023)68752214,E-mail: zhaimit@mail.tmmu.com.cn

收稿日期: 2005-12-20;**修回日期:** 2006-07-05

定向电磁辐射照射到两种不同材料的界面上时，行进方向和能量分配都遵从一定的规律发生改变；人们利用相应的关系和具体的应用场合制作和选用适宜的电磁波屏蔽材料。生物体表是多种多样的有害因素的天然屏蔽。研究表明，微波通过体表在人体内引起的生物效应和损伤，是和微波辐射源的线度、辐射的强度、频率、辐照时间长短和间断周期以及组织的尺寸和介电性质等相关的复杂函数[1]。以往的研究偏重于微波场的整体效应，对于射束入射方向的影响未加注意。随着微波生物效应研究的深入[2-5]，这个影响因素的作用急需研究。而且，生物体内本身由于介电性质的差异就存在着复杂的界面结构[6]，因此对于微波场在不同类型材料界面上的传播规律的实验研究，可能会为微波生物效应的屏蔽和防护模型的建立提供基本思路和依据。为此，我们在大量实验材料的筛选中选取了具有代表性的表面绝缘金属丝编织网状材料、化学处理的微波防护布料、纳米碳涂膜金属板和动物体表组织等薄层材料，在基本相同的实验条件下，用归一化的实验方法，利用微波分光计测定研究了相同的微波定向辐射下的反射场和透射场强度的空间分布规律和特征。研究结果给出了一些在界面作用、微波屏蔽和防护方面有启发意义的结果。

1　材料与方法

1.1　测试材料

实验所用的薄层材料包括第三军医大学微波实验中心提供的防护布料、青岛科技大学纳米材料研究所研制的用作雷达隐形壳体材料的纳米碳纤维涂层金属铝板及自行用漆包线和羊绒细线编织的薄层材料。实验中使用普通纺织布料和铝金属板等作为对照组。实验用生物表层材料选用的是平整均匀、经过表皮下脂肪刮削处理后的健康肉用猪的新鲜表皮层。

1.2　实验仪器

使用北京大华无线电仪器厂生产的 DH926 型微波分光仪来测定薄层实验材料对确定入射方向的微波束散射和透射后的场分布；使用同一厂家生产的型号为 DH1121B 型的 3 cm 固态源作为辐照微波源，工作频率为 9.3 GHz，稳定功率为 20 mW。为了达到设定的实验目的，本实验研究组对原实验装置作了某些改造和调整。

1.3　实验装置图

图 1 中，样品可以是微波功能性材料或生物实验样品材料，置于可以转动、能准确读取角度的度盘上。DH1121 型3 cm 固态信号发生器产生范围在 8.6 ~ 9.6 GHz 的高频微波；经调频螺旋和强度衰减调节螺旋调节，可以选定信号的工作频率与强弱。由发生器产生的微波经喇叭天线发射，在前方形成照射到样品上的实验微波场。喇叭接收天线作为探测器，将接收到的微波信号大小转变成电流讯号，由指针式电表给出对应读数。微波照射在样品上的入射角度（为操作方便，原始数据记录的是入射角的余角-掠角，即射束与材料表面之间的夹角），由安装在固定臂上的指针在度盘上的指示读出；接收喇叭天线在各个测定位置接收到微波信号的角度由活动臂上的指针给出准确读数（最小刻度为 1°）。在实验过程中，严格保持发射天线和接收天线在 2 个臂上的位置与度盘中心等距离。

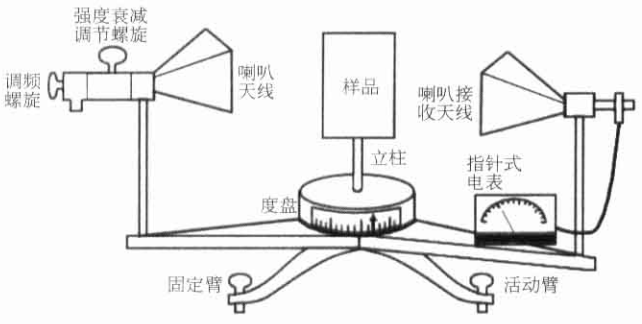


图 1 实验装置示意图

1.4　测试方法

1.4.1　校准信号　　将频率调节旋钮调到所需频率，然后调节衰减器旋钮，使接收天线和发射天线同在一条轴线上时的电表指针恰好指向满刻度（100 μA）。电表最小刻度为 1 μA。

1.4.2　估计吸收率　　将待测的薄层测试材料平整而竖直地置于度盘中心的立柱上；仔细调整使接收天线、发射天线和材料表面法线三者同在一条轴线上。记下电流表的读数，此值即为测试材料对微波在入射角为 0°（即掠角为 90°）时的透射量。由此数据可估算出单位厚度的测试材料对垂直入射的微波吸收率。重复测量 3 次，取平均值。

1.4.3　生物薄层材料的制备　　为比较生物体表薄层组织与微波隐形和屏蔽材料对微波束的效应的异同，取宰杀不久的食用猪肉，选质地均匀、致密、无损伤的猪皮，绷在平板上，经冷冻后用手术刀仔细刮去皮下脂肪，并尽量使样品厚度均匀一致。

1.4.4　测定材料对不同掠射角的微波束的反散射和透射所造成的场分布的影响　　由于受到仪器固定臂和活动臂之间的最小夹角（约 30°）的限制，最小掠射角从 20°开始（以下的实验条件与此类同，不再做说明），以 10°为递增量，直到有测量意义的终止值为止；依次记下每个入射角值的微波束对应反射角分布区域内的反射量以及透射量（均用相对于入射角为 0°时的透射量的百分比来表示）。为确保测量结果的准确度，每次测量按照某个方向顺序测得结果，再反向进行 1 次，最后取平均值。在生物薄层材料实验中，由于测量指标的不同，会采用辅助器件和特殊的方法表示，这将在相应位置作具体说明。最后，根据所有测试结果，比较分析各类测试材料和生物材料对微波的作用的表观现象，进而探讨薄层材料界面对微波辐射场的作用和影响的基本规律。

2　结果

下面依次给出 3 组（每组有 2 ~ 3 个平行试样）实验样品的相关参数测量结果和直接分析，本研究对特殊的实验条件和技术方法作了必要的介绍和说明。对于前 2 项测试，我们还给出

了所需的对照组(只有1组)测量结果。

2.1 碳纤维涂层铝板对微波的反射与透射(窗效应)

表1和图2给出的是青岛科技大学纳米材料研究所研制的用于微波隐形壳体的纳米碳纤维涂层的铝金属板对微波的反射和透射效果的测量数据,每项数据的测量误差为最小刻度的1/2。需要说明的是,为了便于形象和深入地分析和讨论,我们对相同的数据采用表和图两种不同形式加以表达。而下面的其他实验结果则按照常例只采用表或图的任意一种表达形式。

表1 碳纤维涂层铝板(微波隐形材料)对微波的反射与透射(Φ_0 =0 时,材料的吸收率为37%)

$\Phi_{入}$=20.0				30.0				40.0				50.0			
Φ_1	I_1	φ_2	I_2	φ_1	I_1	φ_2	I_2	φ_1	I_1	φ_2	I_2	φ_1	I_1	φ_2	I_2
10.0	31.0	120.0	0	10.0	0	110.0	0	20.0	0	100.0	0	20.0	0	100.0	3.0
20.0	54.0	130.0	7.0	20.0	24.0	120.0	5.0	30.0	22..0	110.0	4.5	30.0	2.0	110.0	20.0
30.0	18.0	140.0	12.0	30.0	44.0	130.0	14.0	40.0	32.0	120.0	18.0	40.0	15.0	120.0	11.5
40.0	0	150.0	6.0	40.0	16.0	140.0	8.0	50.0	12.0	130.0	10.0	50.0	19.0	130.0	61.0
		160.0	56.0	50.0	0	150.0	64.0	60.0	2.0	140.0	63.0	60.0	8.0	140.0	8.5
		170.0	8.0			160.0	6.0	70.0	0	150.0	6.0	70.0	2.0	150.0	24.0
		180.0	14.0			170.0	20.0			160.0	17.0	80.0	1.0	160.0	2.0
		190.0	8.0			180.0	8.0			170.0	8.0	90.0	2.0	170.0	1.0
		200.0	0			190.0	0			180.0	0			180.0	0

表1中,吸收率是微波垂直入射材料后,相对于无试料放置条件下所测得的强度相对比值(%)。数据 $\Phi_{入}$ 表示微波照射到样品上的掠角(单位为°),即习惯表示的入射角的余角。Φ_1 表示微波通过样品反射后测量点与入射点联线与材料平面所交的角度,I_1 表示微波在照射样品后,在 Φ_1 角处的接收天线所测得的强度相对比值(%)。Φ_2 表示微波通过样品后的测量点与入射点联线与平面所成的角度(单位为°),I_2 表示微波通过样品后接收天线在 Φ_2 处所测出的微波强度比率(%)。角度和相对强度的测量绝对误差都在最小刻度的1/2之内,平行试样测量结果的偏差主要取决于微波源的稳定性,不大于5%。

利用表1的数据,我们可以用极坐标绘出不同入射角(即表1中掠射角的余角)条件下等高平面上的微波反射和透射相对强度的等二维分布图(图2)。

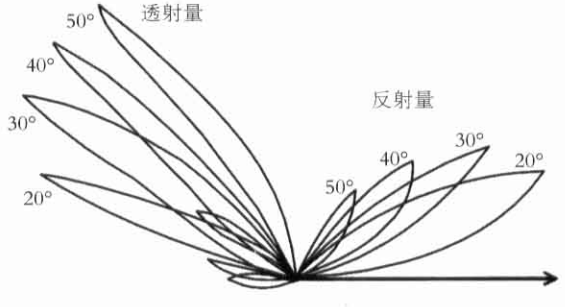
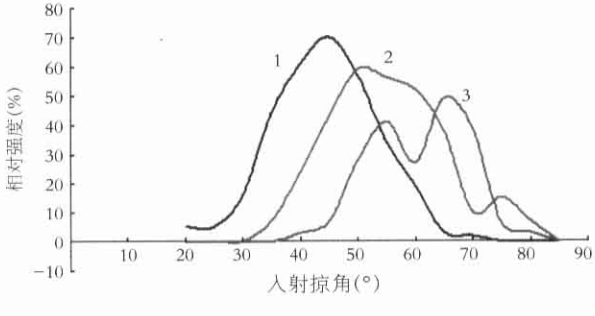


图2 不同入射角时的微波反射量和透射量在基准平面上的二维分布图(极坐标系)

由表1和图2的结果,可以十分直观地看出受到碳纤维涂层铝板作用的微波场的分布有如下特征:① 微波在照射到材料表面入射角等于反射角时,有最大的反射量,而且反射量的最大值随着掠角的增加(即入射角的减小)而减小。此外,微波对材料表面的掠射角愈大,反射量的相对值愈大,透射量的相对值愈小;反之亦然。这表明实验结果完全符合波的反射定律。②微波在通过材料后的某个确定角度处,透射能量有极大值出现;而且,此数值当掠射角在20°~50°变化范围(或许更大一些的)内基本维持定值63°不变。对照 Φ°=0 时材料的吸收率为37%的数值,则明确表明,它们对微波的吸收完全等价于微波垂直入射时的结果,而获得最大的透射率。换句话说,实验材料对微波的穿透具有"窗效应"。从而可以判定碳纤维涂层铝板属于微波强吸收类材料。③在透射能量达到极大值对应的角度 Φ_2 ±20°处,有2个基本对称的、能量已被大大减弱的次极大值。透射波在空间形成有一定规律性的强弱相间的分布,可能是微波受材料作用而发生某种叠加机制有关;而微波的"窗效应"可能就是这种相互作用的叠加机制的结果。

选取表面没有敷纳米碳纤维涂层的抛光铝金属板材的对应测试结果作为对照,如图3所示。其中,曲线1、2、3分别对应入射掠角为30°,40°和50°时微波场的相对透射强度角分布。可以看出,随着入射掠角的增大,对称性也有所降低,最终函数曲线逐渐由单峰转变为双峰分布。这是和纳米碳纤维表面涂层的铝板材料的表现截然不同的。初步分析认为,金属铝表面层的结构和性质对发生相互作用的微波场的分布有着决定性影响,这是和我们以前的研究结果相符的[6]。



1:入射掠角为30°;2:入射掠角为40°;3:入射掠角为50°

图3 抛光铝板对微波透射的相对强度角分布

2.2 防护布对微波的反射(强反射坪效应)

表2给出的是微波防护布料在定向微波束照射下的反射场二维角分布的结果。

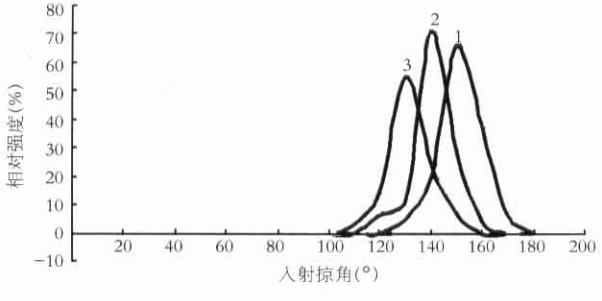
表 2　防护布对微波作用的测试结果（当 $\Phi_0 = 0$ 时，$I_{透} = 0$）

Φ_i20.0		Φ_i30.0		Φ_i40.0		Φ_i50.0		Φ_i60.0	
$\Phi_{反}$	$I_{反}$	$\Phi_{反}$	$I_{反}$	$\Phi_{反}$	$I_{反}$	$\Phi_{反}$	$I_{反}$	$\Phi_{反}$	$I_{反}$
10.0	56.0	10.0	6.0	10.0	0	20.0	0	30.0	0
20.0	81.0	20.0	81.0	20.0	10.0	30.0	10.0	40.0	4.0
30.0	60.0	30.0	88.0	30.0	84.0	40.0	80.0	50.0	59.0
40.0	17.0	40.0	48.0	40.0	92.0	50.0	99.0	60.0	100.0
50.0	0	50.0	12.0	50.0	53.0	60.0	52.0	70.0	78.0
60.0	0	60.0	12.0	60.0	10.0	70.0	22.0	–	–
–	–	70.0	0	70.0	0	80.0	10.0	–	–

$I_{透}$：微波垂直入射材料后，相对于无试料放置条件下所测得的强度相对比值（%）；数据 Φ_i：微波照射到样品上的掠角（单位为度）即习惯表示的入射角的余角；$\Phi_{反}$：微波通过样品反射后测量点与入射点联线与材料平面所交的角度；$I_{反}$：微波在照射样品后，在 $\Phi_{反}$ 角处的接收天线所测得的强度相对比值（%）。角度和相对强度的测量绝对误差都在最小刻度的 1/2 之内，平行试样测量结果的偏差不大于 5°

从防护布在和铝板实验组同样的微波辐射条件下的实验结果可以看出，它对微波辐射场的作用和影响的主要特征如下：①结果也符合波的反射定律。但是反射量的最大值随着掠角的增加（即入射角的减小）很快地增大到稳定值 100 %。可以认为这就是反射型屏蔽材料类的作用特征。②反射场角分布明显偏离对称性，与最大值对应角度等距离的两个数值的变化并不是单调的；除 $\Phi_{入} = 20.0$ 外的 4 组数据中，与最大值相邻的两个数值之和都十分接近 135.0。可以作为该类材料对微波辐射在一个很宽的入射立体角内都具有强而稳定的反射能力，即强反射坪效应的直接验证。

图 4 给出的是羊绒线和 0.025 的细漆包线混合编织薄层材料的实验结果。其中，曲线 1、2、3 分别对应于入射掠角取 30°，40°和 50°时的微波场反射强度的角分布。明显看出，材料对微波辐射的反射是符合反射定律的，场的角分布也是基本对称的，并不表现出微波防护布料所表现的强反射坪的特征。



1：入射掠角为 30°；2：入射掠角为 40°；3：入射掠角为 50°

图 4　毛绒纤维和细漆包线的编织物对微波的透射角分布曲线

2.3　新鲜猪皮对微波的作用（吸收-反射复合效应）

我们使用处理后的新鲜猪皮表层作为试料，实验间隔放在 4 ℃的冰箱中保存。使用减质量法测定试样的含水量。计算所得的猪皮的面密度平均值 $p_{猪皮} = 0.4\ g/cm^2$。表 3 给出微波对不同含水量猪皮在微波作用下的实验结果。

表 3　不同含水量猪皮对不同入射角的微波的作用

$\Phi_{入}$（度）	$h_{水}$ = 56.27%		$h_{水}$ = 52.86%		$h_{水}$ = 43.14%	
	$I_{反}$（%）	$I_{折}$（%）	$I_{反}$（%）	$I_{折}$（%）	$I_{反}$（%）	$I_{折}$（%）
垂直入射	$I_{透}$ = 3.0%		$I_{透}$ = 7.0%		$I_{透}$ = 9.0%	
20.0	49.0	0	54.5	0	69.0	0
30.0	53.0	0	58.0	0	71.0	0
40.0	64.0	0	68.0	0	76.0	0
50.0	66.0	0	78.0	0	89.0	0

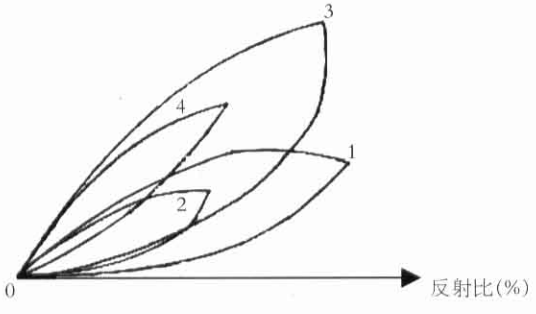
$h_{水}$ 为猪皮的含水量；$I_{透}$ 为垂直入射时的透射/入射强度比，即微波的透射率；$\Phi_{入}$ 为入射角度；$I_{反}$ 为在反射角出射方向上测得的强度/入射强度比；$I_{折}$ 为在微波从试料出射后强度最大值/入射强度比

由表 3 可见，生物组织材料中的含水量的多少对微波能量的吸收呈正相关；而生物组织材料对微波的反射随含水量减小而增大。众所周知，动物性胶原是猪皮等组织的主要成分，而植物性纤维素是天然布料的主要成分。我们对猪皮试料与微波防护布料实验结果做了比较。比较表 3 和表 2 给出的结果，我们把新鲜猪皮（含水量 $h_{水}$ = 56.27%）与防护布料在可比较的 4 个入射角下的对微波反射和折射的相对结果重新整理，列于表 4。可以看出微波防护布料和新鲜猪皮对入射微波都具有显著的减弱效应，但是在能量的吸收份额方面存在着较大的差别。

表 4　新鲜猪皮与防护布料对微波作用比较

$\Phi_{入}$（°）	新鲜猪皮		微波防护布料	
	$I_{反}$（%）	$I_{折}$（%）	$I_{反}$（%）	$I_{折}$（%）
垂直入射	$I_{透}$ = 3.0		$I_{透}$ = 0	
20.0	49.0	0	81.0	0
30.0	53.0	0	88.0	0
40.0	64.0	0	92.0	0
50.0	66.0	0	99.0	0

图 5 则给出掠射角分别为 20°和 40°时的防护布以及猪皮对微波反射比在极坐标中的分布曲线（分别对应于曲线 1 和曲线 3）；曲线 2 和 4 分别给出掠射角为 20°和 40°时的对微波的反射比在极坐标中的分布曲线。



1：掠射角为 20°，防护布；2：掠射角为 20°，猪皮；3：掠射角为 40°，防护布；4：掠射角为 40°，猪皮

图 5　两种材料反射比角分布图（极坐标）比较

从图 5 可以看出，两种材料的变化趋势相同。表明二者在对微波的反射特性方面具有一致性。但是，二者又有值得注意的差异：除小角照射外，微波辐射在很大的照射角度范围内，对猪皮试料几乎都不能透射；反射比仅是随着入射角的增大而增

大;而且反射场分布比较局限。这充分表明对微波吸收在天然状态的生物组织中占重要成分,动物表皮组织对微波吸收的份额随入射角的增大而减小的实验事实对考虑微波防护的措施是有意义的:正是由于生物组织对微波的吸收与辐射的入射角度的相关性,较小入射角的电磁波辐射的吸收较强,更应该突出对正面辐射的防护。

3 讨论

不同物质结构的材料一般会在介电特性方面表现出明显的差异,却又服从着基本的、统一的、简单规律。研究结果表明,尽管微波对于不同类型的薄层材料交界面,基本上都符合波的反射定律,但是,却在界面附近的反射场区有着丰富的细节变化,这个结论是我们原有研究结果的延伸[7]。这不仅再一次从不同的实验条件和视角得出铝金属板等高导电媒质对微波辐射在反射场近区规律性的叠加现象的存在,且进而发现诸如反射场角分布的对称性、广角微波强反射坪区和透射窗效应等新特征。这些都为我们进一步研究并建立生物材料与微波辐射场作用和防护机制提供了可贵的实验依据。尤其是动物表皮组织对小角入射电磁波辐射具有强吸收倾向结果的获得对研究微波在人体内的复杂作用及防护问题时,有着模型的借鉴作用。

当微波等不同频段的电磁波通过媒质界面传播时,界面薄层会由于某些作用机制使行进前方的第二媒质深部的电磁波的强度显著减弱,即产生我们习惯所称的屏蔽作用。实验结果表明,未形成导电网的金属网结构编织材料并不具备明显的微波屏蔽功能,而化学处理的微波防护布料是强反射型屏蔽材料;纳米碳涂膜金属板是透射窗型微波隐形材料;而动物体表组织材料实质上是复合型的微波反射-吸收材料。我们认为,研究结果可以作为对微波乃至射频电磁波的屏蔽防护机制分类的基本依据。

西原浩[8]从理论中提出,电磁波在界面上的反射本质上是介质表面电偶极子受激发而发出的次级辐射,电磁波从高折射率介质射向低折射率介质时,也能发生全透射,而且透射系数还会大于1(以振幅为对象)。总的说来,就是电磁场一般会在金属界面近区形成比较复杂的分布。这些都在我们不同视角的多次实验研究中获得有力的验证的。由于不同薄层材料表面电偶极子在同一微波激发场的作用下存在着继发次级辐射特性方面的差异,因此可以作为人们对电磁场屏蔽和防护机制的基本分类的理论依据之一。由于理论和实验研究都已确认生物材料含水量的多少对微波的生物效应有很大的影响[1],并提出微波辐射在机体内的产热,主要由于组织的介电性质(生物组织的磁导率基本上与真空相同,因此电磁场的磁效应通常比较小,可忽略)不同而呈非均匀分布。肌肉、皮肤等含水量高的组织对微波的吸收强、穿透浅;含水量低的脂肪和骨等则相反。后者对微波的吸收较前者小一个数量级。微波产热和一般的热对流不同,可能在皮下组织中会造成严重烧伤。毛均杰等[9]解释为,生命状态的生物大分子,在生物大分子与结合的水分子之间,存在着结合力,也存在着电磁排斥力,从而使得它们在电磁场的作用下表现为电磁振荡子的性态。这就启发我们,生物体内的极性水分子受微波激发而发出次级辐射的机制在不同的结构环境中的不同表现,对微波的生物效应产生、屏蔽和防护等机制有着至关重要的作用。我们的实验结果给出:随着含水量的增大,生物组织材料吸收增强,反射减弱。而且,材料对微波吸收的份额随着入射角的增大而减小。如果考虑到生物组织薄层材料在微波辐射场中的界面作用,可能会随着微波热效应造成含水量的改变,呈现规律性的影响,其可能的机制是生命状态的生物大分子在电磁场的作用下表现为电磁振荡子。那么,有理由认为当生物体内某些调节含水量功能的机制缺损或减弱时,会间接影响微波对生物体伤害的严重程度。而体内水分含量低,甚至于在脱水的情况下,微波对机体的伤害反而会减小。这就提示我们可以从一个新的视角来探索生物对微波防护的途径。

参考文献:

[1] 刘 静, 王存诚. 生物传热学[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 80-83.

[2] STAUFFE P R, ROSSETTO F, PRAKASH M, *et al*. Phantom and animal tissues for modelling the electrical properties of human liver [J]. Int J Hyperthermia, 2003, 19(1): 89-101.

[3] CHOI M K, TAYLOR K, BETTEMANN A, *et al*. Broadband 10-300 GHz stimulus-response sensing for chemical and biological entities [J]. Phys Med Boil, 2002, 47(21): 3777-3787.

[4] HERMAN C. Introduction to Health Physics [M]. 3rd ed. New York: McGraw-Hill Inc., 1996: 225-258.

[5] PAKHOMOV A G, AKYEL Y, PAKHOMOVA O N, *et al*. Current state and implications of research on biological effects of millimeter waves: a review of the literature [J]. Bioelectromagnetics, 1998, 19(7): 393-413.

[6] LEDNEV V V. Possible mechanism for the influence of weak magnetic fields on biological systems [J]. Bioelectromagnetics, 1991, 12(2): 71-75

[7] 翟建才, 史立群, 马显光. 基底材料对微波场分布影响的研究[J]. 中国医学物理学杂志, 2000, 17(4): 225-226,228.

[8] 西原浩. 光与电磁波[M]. 熊 缨, 胡夏夏, 译. 北京: 科学出版社, 2003: 10-18.

[9] 毛均杰, 刘 荧, 朱建清. 电磁场与微波工程基础[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004: 32-44.

(编辑 薛国文)