

# 雷达波吸波涂层理想电磁参数的计算机模拟分析

郑天亮 李 谦 郑旷宇 王兵存 鲁立军

(北京航空航天大学,北京 100083)

**文 摘** 目前吸波涂层计算机模拟分析多是从现有材料出发,研究厚度、排布次序等参数对于涂层吸波性能的影响。本文介绍了一种通过预先设定雷达吸波涂层的厚度、反射率等多个参数,反推得到一定入射频率下达到预定反射率所需理想电磁参数区域的研究方法,并通过实验进行了验证。结果表明这种分析方法能够较好的预测吸波剂在不同频段的吸波性能并明确指出吸波剂的改性方向,对于吸波涂层的设计具有重要的作用和意义。

**关键词** 吸波涂层,计算机模拟,介电常数,磁导率

## Computer Simulation Analysis for Ideal Electromagnetism Parameters of Radar Absorbing Coating

Zheng Tianliang Li Qian Zheng Kuangyu Wang Bingcun Lu Lijun

(Beihang University, Beijing 100083)

**Abstract** At present, the research on the influencing factors of radar absorbing performance like thickness, ordering of layers and so on for computer simulation analysis for radar absorbing coating is carried out mostly based on existing materials. In this paper, a new research method is introduced by setting parameters like thickness of coating, reflectivity, and so on in advance and inversion from them to reach their corresponding ideal electromagnetism parameters region and it is verified by experiments. The result shows that this kind of analysis method is of great significance to the designing of radar absorbing coating.

**Key words** Radar absorbing coating, Computer simulation analysis, Dielectric constant, Magnetic permeability

### 1 引言

研究开发具有“薄、轻、宽、强”特点的雷达吸波涂层在国防领域具有重要的意义<sup>[1]</sup>。目前对于雷达吸波涂层的研究方法多采用选择具有电损耗、磁损耗特性的物质,进行组分实验,并结合计算机辅助设计来进行<sup>[2~5]</sup>。目前计算机辅助设计主要采用涂层的电磁参数来推测反射率曲线。而可以作为吸波材料的物质很多,且同种物质的形态、粒径的改变及其在涂层中的含量,以及不同物质的混合比例、混合方式也会在很大程度上影响涂层的吸波性能<sup>[6]</sup>,目前没有恰当的数学模型可以准确预测这些因素如何对材料电磁参数施加影响,故仅从某种物质在特定条件下的电磁参数推导反射率曲线的计算机模拟方法是欠全面的,有时会掩盖其通过一定的处理后获得特别吸波性能的潜力。

根据电磁学传输线理论,雷达波吸波涂层的性能由其复介电常数、复磁导率及厚度等因素决定。由于实际应用的需要,对其厚度有严格限制,因此解决这种片面性的途径在于解决两个问题:(1)要在一定厚度下达到一定的吸波性能需要使材料的复介电常数、复磁导率达到什么样的水平;(2)如何使材料的电磁参数达到这样水平。(1)较为关键,如果理想电磁参数区域可以得到,则解决(2)时可以通过选择电磁参数位于或接近该区域的材料进行共混、改性和形态控制等使电磁参数尽可能向理想电磁参数区域逼近,从而获得最佳吸波效果。因此,这种研究方法更具有目的性。目前对这一问题尚缺乏深层次的研究。

本文根据传输线理论针对该问题进行了编程求解,并通过实验证明了这种研究方法对于雷达波吸波涂层设计的作用和意义。

收稿日期:2008-01-08

作者简介:郑天亮,1949年出生,教授,主要从事功能涂层及高性能树脂、颜填料的研发与应用

## 2 理论分析<sup>[7]</sup>

多层雷达波吸波材料结构如图 1 所示。

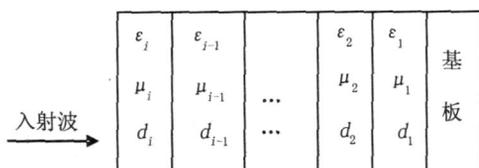


图 1 多层吸波材料结构示意图

Fig 1 Sketch map of structure of multi-layer RAM

令最靠近基板的一层为第 1 层,从右到左依次为第 2, 3, …,  $i-1$ ,  $i$  层,令  $Z_n$  为第  $n$  层到基板的归一化输入阻抗 ( $n=1, 2, \dots, i-1, i$ ), 则有:

$$Z_n = \frac{Z_{n-1} + \frac{1}{j} \operatorname{th}(j \mu_n d_n)}{1 + Z_{n-1} \frac{1}{j} \operatorname{th}(j \mu_n d_n)} \quad (1)$$

对于涂层,其基板为金属板,可视为理想导体,  $Z_0 = 0$ 。在式 (1) 中,  $Z_n$  是第  $n$  层的本征阻抗:

$$Z_n = \frac{\sqrt{\mu_n}}{N_n} \quad (2)$$

$\mu_n$ 、 $N_n$  分别为第  $n$  层的相对复磁导率和相对复介电常数,  $N_n$  是第  $n$  层的复传播常数:

$$N_n = j \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\mu_n} \quad (3)$$

$f$  是入射电磁波频率,  $c$  是光速。用式 (1) 进行  $i$  次迭代后可求得材料整体的归一化输入阻抗  $Z_i$ , 进一步可求出反射系数:

$$R = \frac{Z_i - 1}{Z_i + 1} \quad (4)$$

将反射率  $R$  以分贝为单位可表示为:

$$R = 20 \lg |R| \quad (5)$$

由上述理论可知,雷达波吸波材料在某一入射频率下反射率的影响因素为层数、每层的复磁导率和复介电常数以及每层的厚度。

### 3 理想电磁参数区域及其影响因素

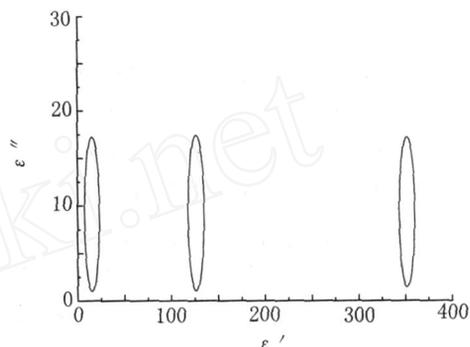
由于与雷达吸波涂层吸波性能有关的电磁参数包括复介电常数实部、虚部和复磁导率实部、虚部,同时对这四个因素进行分析比较困难,因此需要将其中一部分转化为已知条件,而将剩下的部分作为研究对象。限于篇幅,下面的例子固定复磁导率实部为 1,虚部为 0 (常见的电损耗型吸波剂测量值与该值非常接近),对复介电常数进行研究。若需要以复磁导率为研究对象,类似方法仍然适用。

主要计算过程为:分别对复介电常数实部和虚部给定一定的变化范围,结合给定的已知条件由计算机逐一试验,若计算值低于目标反射率则将此时的复介电常数记录,最后根据所有记录的点,以宇航材料工艺 2008 年 第 3 期

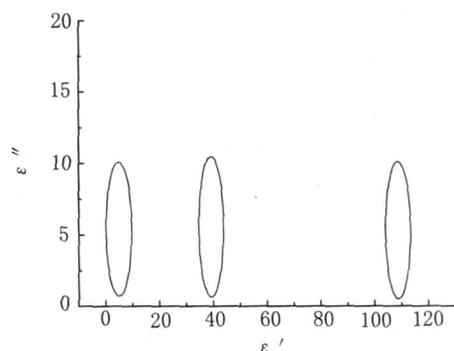
部取值为横坐标、虚部取值为纵坐标作图,可得到该条件下的理想复介电常数区域。在此基础上适当改变已知条件进行计算,可根据理想复介电常数区域的变化得到其影响规律。

#### 3.1 理想复介电常数区域形状

限定吸波涂层为单层、厚度  $d=2$  mm,  $\mu=1$ ,  $\mu''=0$ , 分别令入射频率为 10 及 18 GHz, 以满足目标反射率  $R = -5$  dB 的复介电常数实部为  $x$  轴,虚部为  $y$  轴作图,形状为一组椭圆区域,如图 2 所示。



(a)  $f=10$  GHz



(b)  $f=18$  GHz

图 2 给定条件下的理想复介电常数区域

Fig 2 Ideal complex permittivity region under given conditions

即涂层若满足假设条件,且对应频率下复介电常数为图 2 中的椭圆线上的某一点,则涂层理论上可在该频率下达到  $R = -5$  dB 的吸波性能。随着横坐标轴的延伸,这样的椭圆区域将会有无穷多个。令离原点最近的椭圆为第 1 层椭圆,依次有第 2 层,第 3 层, …, 第  $n$  层,在较高频率下,各层的横坐标绝对值均低于较低频率下对应各层横坐标绝对值,且其程度随椭圆层数增加而增加,同一频率下各层的间隔也随频率升高而拉大。关于频率作为影响因素的对比将在后面详细讨论。由于各层椭圆的情形类似,故此讨论的若未经说明均为第 1 层椭圆。

#### 3.2 目标反射率的影响

限定吸波涂层为单层、厚度  $d=2$  mm,  $\mu=1$ ,  $\mu''=0$ , 令入射频率为 3 GHz,在此基础上只改变目标反射率的值,所得的“理想复介电常数椭圆”与原椭圆

的关系为:反射率较高的椭圆包含反射率较低的椭圆,但椭圆圆心不重合。如图 3 所示。

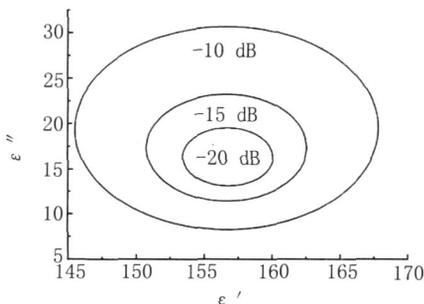


图 3 目标反射率对理想复介电常数区域的影响

Fig 3 Influence of target reflectivity on ideal complex permittivity region

即涂层若满足限定条件,若复介电常数位于图中的“-10 dB 椭圆”所包含的区域,则理论上涂层反射率  $R = -10$  dB,同理,若复介电常数取值位于“-15 dB 椭圆”所包含的区域,则涂层反射率  $R = -15$  dB,以此类推可以最终推导为一点,若复介电常数取值位于该点,则反射率  $R = -$ 。若要使反射率达到 -20 dB,则对复介电常数的要求比 -10 dB 时更苛刻。

### 3.3 厚度的影响

限定吸波涂层为单层,  $\mu = 1, \mu = 0$ , 目标反射率  $R = -10$  dB, 令入射频率为 3 GHz, 在此基础上只改变厚度的值, 理想复介电常数区域随厚度的增大逐渐向原点靠拢, 见图 4。

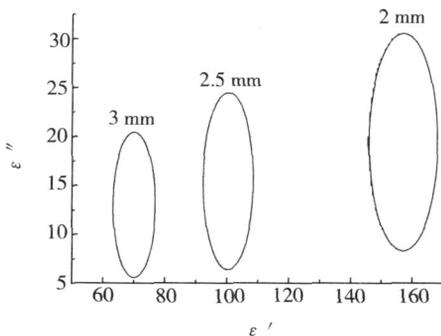


图 4 厚度对理想复介电常数区域的影响

Fig 4 Influence of thickness on ideal complex permittivity region

该结果可以解释为什么对于某些电损耗型吸波涂层,在厚度较小时,低频吸波效果不理想,因为这些材料的复介电常数实部和虚部在低频下难以同时满足厚度较小时对这两个参数的要求,如某种聚苯胺中空微球在 3 GHz 下的复介电常数实部和虚部分别为 14 和 9 左右,根据此值进行计算机模拟,要在 3 GHz 达到 -10 dB 的吸波性能,需要使厚度达到 8 mm 左右。

### 3.4 入射频率的影响

限定吸波涂层为单层,厚度  $d = 2$  mm,  $\mu = 1, \mu = 0$ , 目标反射率  $R = -10$  dB, 在此基础上只改变入射频率的值,理想复介电常数区域随入射频率的增大逐渐向原点靠拢,如图 5 所示。

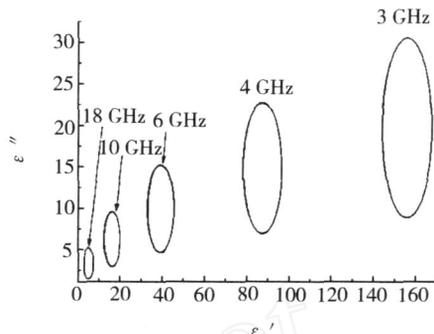


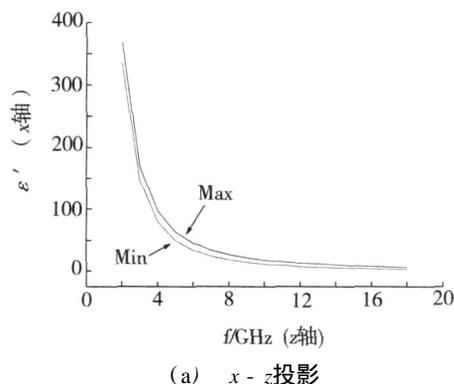
图 5 入射频率对理想复介电常数区域的影响

Fig 5 Influence of frequency on ideal complex permittivity region

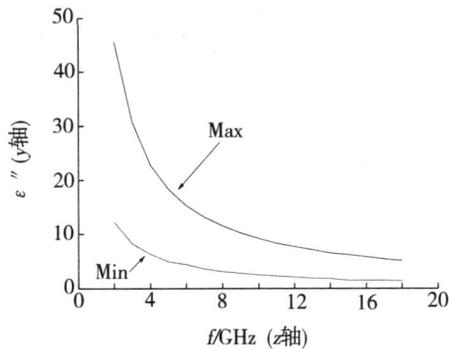
由图 5 可知,在低频下,理想复介电常数区域虽然面积较大,但是本身取值已经比较苛刻,目前相当一部分电损耗型吸波材料在低频下的复介电常数不能满足要求,而在较高频率(如 10~18 GHz)下,虽然理想复介电常数区域面积较小,但是材料的复介电常数取值容易满足要求,因此对于薄层电损耗型吸波涂层,在较高频率下,如 X 波段和 Ku 波段,比较容易获得理想的吸波性能。

如果需要在给定厚度下将频率、复介电常数实部及虚部的关系完整的呈现出来,需要分别以复介电常数实部、虚部为  $x, y$  轴,频率为  $z$  轴作 3 维图像,图 5 即为  $z$  轴取不同频率值时,图形截面在  $x - y$  平面的投影,图 6 给出图形在  $x - z$  和  $y - z$  平面内的投影。

图 6 的意义为:当某种电损耗型吸波涂层的复介电常数实部和虚部随频率变化的曲线分别位于 (a) 图和 (b) 图中的上下两条曲线之间时,有可能满足 2 mm 厚度下低于 -10 dB 的带宽覆盖 2~18 GHz。如果材料的复介电常数实部和虚部分别位于图示两个区域之外,在仅考虑第一层复介电常数椭圆的情况下,则离得越远,吸波性能越差。



(a)  $x - z$  投影



(b) y - z 投影

图 6 图形的投影

Fig 6 Projection of image

#### 4 实验

采用螺旋碳纤维作核心吸波剂,通过一定的改性手段来达到改变其电磁参数的目的,最终验证这种研究方法的指导意义。

未改性螺旋碳纤维复磁导率实部近似为 1,虚部近似为 0,可视为纯电损耗型材料。

由于物质改性对其复介电常数所施加的影响在改性之前尚不明确,而对复磁导率的影响方向基本可以确定(若改性物质为非铁磁性物质则实部虚部基本不变,而铁磁性物质改性将有可能使其复磁导率实部虚部增大)。因此可首先固定其介电常数为测试所得参数,研究其理想复磁导率区域。在  $R = 10$  dB,  $d = 2$  mm 的条件下经计算发现,理想复磁导率区域的实部和虚部上下界所覆盖的区域很宽,远大于理想复介电常数区域,且虚部下界恒为 0,但其最大的局限性在于实部下界的取值在 2 ~ 18 GHz 内远大于 1,如图 7 所示。

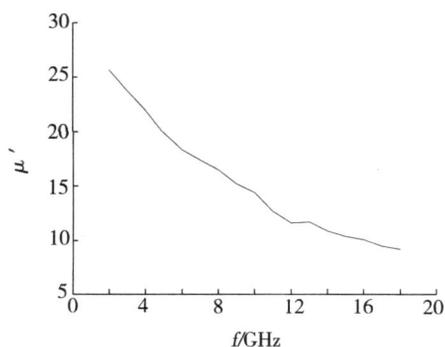


图 7 理想复磁导率实部下界

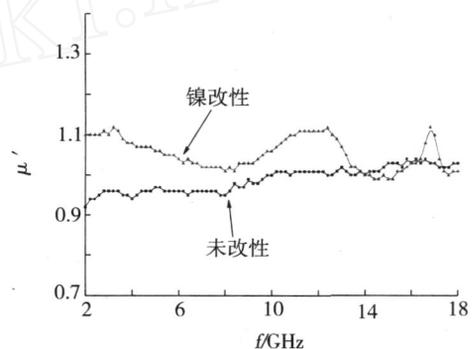
Fig 7 Lower bound of real part of ideal complex magnetic permeability

由图 7 可知,如果改性使螺旋碳纤维的复介电常数保持不变,则至少应在 2 ~ 18 GHz 内使复磁导率实部随频率变化的曲线提高到图 7 中曲线以上的区域,

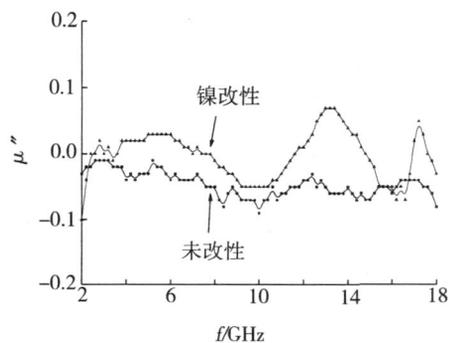
才有可能达到 2 ~ 18 GHz 全频段 10 dB 的衰减,虽然常见吸波材料的复磁导率实部不易达到这一目标,但是由该图可看出提高磁导率实部对于改善螺旋碳纤维吸波性能具有积极意义。

另一种改性模式即固定其复磁导率不变,适当改变其复介电常数。未改性螺旋碳纤维的复磁导率如图 8 所示,复介电常数实部虚部与图 6 中理想区域的对比如图 9 所示。从图 9 中可以看出,制约螺旋碳纤维吸波性能发挥的主要因素为其过高的介电损耗(复介电常数虚部)。

通过以上分析,改性的主要方向可确定为提高材料整体的复磁导率实部,并降低其复介电常数虚部。实验采用纳米镍粉对其进行改性,改性后的复磁导率变化如图 8 所示。



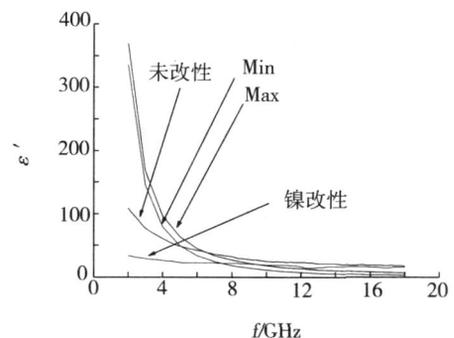
(a) 实部



(b) 虚部

图 8 改性后的复磁导率变化

Fig 8 Change of complex magnetic permeability after modification



(a) 实部

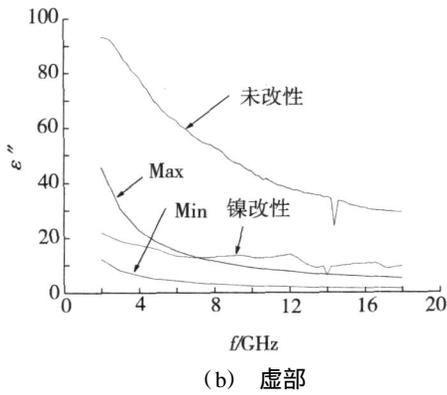


图 9 镍改性 未改性螺旋碳纤维复介电常数与理想复介电常数区域的对比

Fig 9 Contrast between complex permittivity of Ni modified/unmodified micro-coiled carbon fibers and ideal region

从图 8 可以看出,改性后材料的复磁导率实部和虚部在较宽频率范围内均有小幅度上升,但其实部与图 7 中的下界还存在较大的距离,图 9 为螺旋碳纤维镍改性前后复介电常数实部和虚部的变化,以及分别和图 6 中两个区域的相对位置关系,由图 8 及图 9 可以看出改性后材料的损耗机制仍然是电损耗占据主导地位, $\mu'$ 、 $\mu''$ 略有上升,但仍分别接近于 1 和 0,因此仍可以将其近似看作电损耗型吸波材料来进行分析。

图 9 中的 Max 和 Min 分别代表理想复介电常数投影区域的上、下界,用纳米镍粉改性使得螺旋碳纤维的复介电常数实部和虚部在 7 ~ 18 GHz 内均向理想复介电常数区域靠拢,因此改性在这一频段内对其具有积极意义,特别是 7 ~ 8 GHz 内,改性所得吸波剂复介电常数的实部虚部均靠近理想复介电常数区域的平面投影,因此在 7 ~ 8 GHz 内会出现较高的吸收峰。但是在 2 ~ 6 GHz 范围内其实部大大远离理想复介电常数区域,因此改性螺旋碳纤维在该频率范围内吸波性能有可能会低于未改性螺旋碳纤维。图 10 给出吸波剂改性前后模拟吸波曲线对比。

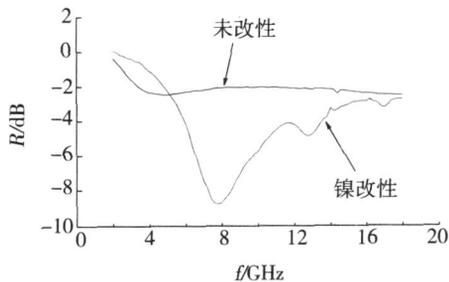


图 10 镍改性及未改性螺旋碳纤维吸波性能对比

Fig 10 Contrast between microwave absorbing performance of unmodified and Ni modified micro-coiled carbon fibers

由图 10 可知,改性前后的吸波曲线变化基本与前面预测的一致。未经改性的螺旋碳纤维并不是一种优良的吸波材料,而经过纳米镍粉改性后,其在 5

~ 18 GHz 内的吸波性能均有不同程度的提升。

在此基础上参照理想电磁参数区域对纳米改性物质用量及吸波剂在涂层中含量作进一步调整,并在标准铝板上进行涂刷和测试,得到了图 11 所示较为理想的反射率曲线。

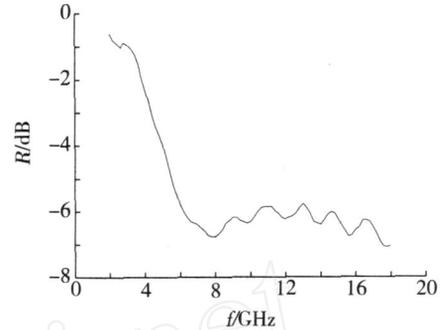


图 11 改进成分后涂层的反射率曲线

Fig 11 Reflectivity curve of composition-adjusted coating

图 11 中的曲线在 6 ~ 18 GHz 的宽频范围内均能达到 -6 ~ -7 dB 左右的吸波性能,反射率曲线在 6 GHz 以后形状较为平坦,与常见的漏斗状反射率曲线有明显不同,与未改性螺旋碳纤维涂层的反射率曲线相比,吸波性能获得了较大的提升。由以上实验和分析可知,以理想电磁参数区域为参考,不仅可以较好的预测涂层在给定条件下的吸波性能,而且能为改性实验提供依据,从而避免了通过大量的改性和涂板实验来寻找最佳搭配的过程,节省了原料,缩短了研制开发周期。

## 5 结论

本文所介绍的方法能够较好的预测吸波剂在不同频段的吸波性能并明确指出吸波剂的改性方向。对现有吸波剂进行有目的的改性,可在一定程度上的挖掘其潜力,甚至获得较大的性能提升。它可为吸波涂层实验方案提供明确有效的指导,从而起到减少实验盲目性、缩短研发周期、节省原材料的作用。

## 参考文献

- 1 刑丽英等. 隐身材料. 北京: 化学工业出版社, 2004
- 2 罗志勇等. 微波吸收材料的计算机辅助设计. 哈尔滨工业大学学报, 2000; 32(5): 132 ~ 136
- 3 胡齐发. 基于 VB 的多层吸波材料反射率计算程序. 计算机与数字工程, 2006; 34(10): 157 ~ 160
- 4 唐宏等. 多层吸波材料的数值优化设计. 微波学报, 2003; 19(3): 55 ~ 58
- 5 胡传妍. 隐身涂层技术. 北京: 化学工业出版社, 2004
- 6 杨志民等. 低频 (3GHz) 微波吸收材料电磁参数匹配特性的研究. 稀有金属, 2004; 28(6): 1 006 ~ 1 009
- 7 Dieter Klement, Jurgen Preissner, Volker Stein. Special problems in applying the physical optics method for backscatter computations of complicated objects. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1988; 36(2): 228 ~ 237

(编辑 任涛)