

热防护层覆盖弹体目标雷达散射截面的修正的等效电流近似法和图形计算电磁学法分析

朱艳菊 江月松 华厚强 张崇辉 辛灿伟

Modified equivalent current approximation and graphical electromagnetic computing method of analyzing radar cross section of missile target scatterer covered with thermal protection layer

Zhu Yan-Ju Jiang Yue-Song Hua Hou-Qiang Zhang Chong-Hui Xin Can-Wei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, **63**, 244101 (2014) DOI: 10.7498/aps.63.244101

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.244101>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2014/V63/I24>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

电大开孔箱体屏蔽效能分析解析模型

Formulation for shielding effectiveness analysis of a rectangular enclosure with an electrically large aperture

物理学报.2014, 63(23): 234101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.234101>

同轴交错圆盘加载波导慢波结构高频特性的研究

Dispersion characteristics of the coaxial interlaced disk-loaded waveguide slow-wave structure

物理学报.2014, 63(22): 224101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.224101>

一种兼具宽带增益改善和宽带、宽角度低雷达散射截面的微带天线

A broad-band gain improvement and wide-band, wide-angle low radar cross section microstrip antenna

物理学报.2014, 63(22): 224102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.224102>

基于动理论模型的一维等离子体电磁波传输特性分析

Analysis of one-dimensional electromagnetic wave transmission characteristics of plasma based on a kinetic theory model

物理学报.2014, 63(21): 214101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.214101>

缩比模型的宽频时域太赫兹雷达散射截面(RCS)研究

Broad-band time domain terahertz radar cross-section research in scale models

物理学报.2014, 63(21): 214102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.214102>

热防护层覆盖弹体目标雷达散射截面的修正的等效电流近似法和图形计算电磁学法分析

朱艳菊 江月松[†] 华厚强 张崇辉 辛灿伟

(北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100191)

(2014年6月5日收到; 2014年6月30日收到修改稿)

将修正的等效电流近似法与图形计算电磁学法相结合引入到热防护层覆盖弹体目标的电磁散射问题的研究中. 应用修正的等效电流近似法对介质和有耗表面进行散射计算, 结合图形计算电磁学法, 借助于计算机显示技术, 将三维目标图形在计算机屏幕上投影, 由图形加速卡完成遮挡和消隐工作, 利用图形计算电磁学的积分公式, 把三维空间的计算转化为二维空间的计算, 大大降低了计算时间和复杂度. 计算结果表明: 当入射波频率较低时, 热防护层的厚度不会影响弹体雷达截面值的大小, 当频率升高, 随着热防护层厚度的增加, 弹体雷达截面值不断减小, 说明热防护涂层为有耗介质, 介电常数的虚部越大其消耗能量的能力越强, 弹体雷达截面变化越明显; 当热防护层中存在孔隙, 热防护层厚度一定, 孔隙率越大, 雷达截面值越大, 孔隙率为零时, 雷达截面值最小. 当孔隙率相同, 热防护层越薄, 其雷达截面值越大; 当弹体在高空出现脱粘现象, 对弹体的雷达截面值影响不大.

关键词: 热防护层, 雷达散射截面, 修正的等效电流法, 电磁散射

PACS: 41.20.Jb, 42.25.Bs, 42.25.Fx

DOI: 10.7498/aps.63.244101

1 引言

防热涂层是战术导弹的主要热防护材料之一^[1], 但热防护层性能预测是个难度很大的课题, 这是由于防热涂料是一种非均质薄层结构, 在加热过程中, 涂料本身要发生一系列的物理化学变化. 导弹在大气层中飞行时, 使空气受到强烈压缩并与之发生摩擦, 其中大部分动能转化为热能导致周围的空气温度急剧升高, 而热能迅速向壳体表面传递, 为此, 弹体表面需要涂覆具有一定厚度和耐久性的绝热陶瓷层薄膜^[2]. 由于热防护层的制备工艺复杂, 不但热防护层的厚度和孔隙率等结构性能直接影响其效果, 而且高温的工作环境会造成各层间粘结状况差的位置脱粘. 为了保证热防护层良好的热防护效果, 并避免在工作过程中失效而造成不必要的损失, 需要对热防护层进行无损检测^[3]. 弹体作为军事目标, 热防护层对其雷达截面(RCS)的影

响显得尤为重要. 虽然在弹体工作前进行热防层的隔热效果检测, 但是弹体在高空飞行时, 满足隔热效果的指标是否对弹体^[4,5] RCS的值有影响, 是否影响弹体的隐身效果, 到目前为止, 相关的文献还十分少见.

对于电磁散射的远场计算方法有很多^[6-10], 但是在高频区物理光学法最有效. 传统的物理光学法对理想光滑电大导体目标的散射计算十分有效, 但对于介质和有耗表面的计算不能实现, 修正的等效电流近似法^[11]既考虑了等效电流, 也考虑了等效磁流, 并将物理光学法进行改进扩展到可以处理由介质和有耗表面组成的大场景. 结合图形计算电磁学法^[12], 利用了计算机硬件优势, 借助于计算机显示技术, 由图形加速卡完成最困难、最费时的遮挡和消隐工作, 而且利用图形计算电磁学的积分公式, 将三维空间的积分转化为屏幕像素的二维空间积分, 大大降低了计算时间和复杂度.

[†] 通讯作者. E-mail: yuesongjiang@buaa.edu.cn

本文对三维目标的 RCS 进行了研究. 将修正的等效电流近似法与图形计算电磁学法相结合, 计算了带有热防护层弹体目标在不同热防护层厚度、不同孔隙率和不同脱粘层厚度时的 RCS 值. 数值结果表明, 当入射波频率较低时, 热防护层的厚度对弹体 RCS 值的影响不大; 当频率升高, 随着热防护层厚度的增加, 弹体 RCS 值不断减小, 说明热防护涂层为有耗介质, 可以减小目标的雷达回波. 同时指出目标的单站 RCS 值与热防护层厚度、孔隙率有关, 而在出现脱粘层后, 对弹体的 RCS 值影响不大.

2 物理模型与计算方法

2.1 物理模型

在目标表面涂覆具有一定厚度和耐久性的绝热陶瓷层薄膜, 即热防护层. 本研究中热防护层参考氧化锆陶瓷粉末作为制备热防护层的原材料, 通常在氧化锆陶瓷粉末中加入氧化钇粉末作为原材料, 称为氧化钇稳定氧化锆陶瓷粉末. 当氧化钇粉末质量分数为 7% 时涂层的复介电常数为 $23.6 - j1.645$ ^[13]. 在制备热防护层时, 如果采用离子喷涂, 热防护层中会有一些的孔隙率. 孔隙率指散粒状材料堆积体积中, 颗粒之间的孔隙体积占总体积的比例. 根据热防护层的介电常数与热防护层孔隙率之间的关系公式^[14]

$$\epsilon = (1 - \rho)\sqrt{\epsilon_{r0}} + \rho\sqrt{\epsilon_{air}} \quad (1)$$

计算出热防护涂层的介电常数, 式中 ϵ 为热防护层的介电常数, ρ 为孔隙率, ϵ_{r0} 为无孔隙热防护层的介电常数, ϵ_{air} 为空气的介电常数. 由于热防护层的制备工艺复杂, 高温的工作环境会造成各层间粘结状况差的位置脱粘. 因此, 可得热防护层的基本模型如图 1 所示.

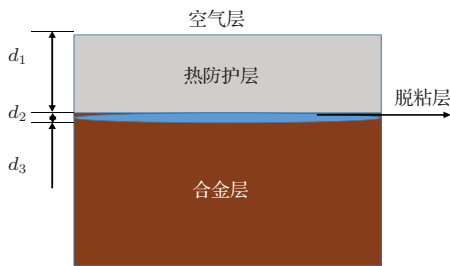


图 1 单层介质有脱粘情况的热防护层模型

模型主要包括空气层、介质层、脱粘层和合金层. 图 1 中所示空气层为自由空间; 介质层对应热防护层, 厚度为 d_1 ; 脱粘层对应热防护层与合金层间的脱粘, 厚度为 d_2 ; 合金层被视为理想导体表面, 没有透射波.

2.2 修正的等效电流近似法与图形计算电磁学法的混合算法

物理光学法是当电磁波照射到目标表面时, 在目标表面会产生感应电磁流, 它们将作为新的源向外辐射电磁场, 这些辐射的电磁场称为散射场, 而且只有照亮区域的感应电磁流才对散射场有贡献. 物理光学法通过对感应电磁流的近似和积分而求得散射场. 目标表面的感应电磁流通过入射电磁场的切向分量确定, 由于感应电磁流只存在于目标表面照亮区域, 所以对于理想金属导体 (PEC), 目标表面的感应磁流密度 M^{PO} 为零, 感应电流密度可以表述为一入射波照射在一个表面光滑的理想导体上产生表面感应电流 J^{PO} :

$$J^{PO} = 2(\mathbf{n} \times \mathbf{H}^i), \quad M^{PO} = 0, \quad (2)$$

其中, \mathbf{n} 为目标表面单位法矢量, \mathbf{H}^i 为入射磁场矢量, 因子 2 是为了满足理想导体边界条件.

当被照射物体为介质或是有耗媒质时, 也要将等效表面磁流计算进来, (2) 式需要进行修改. 在这种情况下, 表面电流用 J^{MECA} 表示, 表面磁流用 M^{MECA} 表示. 由边界条件可得

$$\begin{aligned} J^{MECA} &= \mathbf{n} \times \mathbf{H}^{tot}, \\ M^{MECA} &= -\mathbf{n} \times \mathbf{E}^{tot}, \end{aligned} \quad (3)$$

\mathbf{E}^{tot} 和 \mathbf{H}^{tot} 为在自由空间和介质表面边界上总电场和总磁场. 将入射场 \mathbf{E}^{inc} 分解为横电场 \mathbf{E}_{TE}^{inc} 和横磁场 \mathbf{E}_{TM}^{inc} 分量:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}^{inc} &= \mathbf{E}_{TE}^{inc} + \mathbf{E}_{TM}^{inc} \\ &= \mathbf{E}_{TE}^{inc} \mathbf{e}_{TE} + \mathbf{E}_{TM}^{inc} \mathbf{e}_{TM}, \end{aligned} \quad (4)$$

式中 \mathbf{e}_{TE} 和 \mathbf{e}_{TM} 分别是入射电场的横电场分量和横磁场分量方向的单位矢量. 总的电场和磁场可以写为入射电场、垂直极化反射系数 R_{TE} 、水平极化反射系数 R_{TM} 、特性阻抗 η_1 、传播矢量 \mathbf{k}^{ref} 和单位矢量 \mathbf{e}_{TE} 的函数:

$$\mathbf{E}^{tot} = \mathbf{E}^{inc} + R_{TE} \mathbf{E}_{TE}^{inc} \mathbf{e}_{TE} + R_{TM} \mathbf{E}_{TM}^{inc} (\mathbf{k}^{ref} \times \mathbf{e}_{TE}),$$

$$\mathbf{H}^{\text{tot}} = \frac{1}{\eta_1} \mathbf{k}^{\text{inc}} \times \mathbf{E}^{\text{inc}} + \frac{1}{\eta_1} [R_{\text{TE}} \mathbf{E}_{\text{TE}}^{\text{inc}}(\mathbf{k}^{\text{ref}} \times \mathbf{e}_{\text{TE}}) - R_{\text{TM}} \mathbf{E}_{\text{TM}}^{\text{inc}} \mathbf{e}_{\text{TE}}]. \quad (5)$$

回到边界条件, 从边界 S (5) 式中的总场可以计算出修正的等效电流密度, 磁流不再是零^[15],

$$\begin{cases} \mathbf{J}^{\text{MECA}} = \mathbf{n} \times \mathbf{H}^{\text{tot}} \Big|_S = \frac{1}{\eta_1} \left\{ \mathbf{E}_{\text{TE}}^{\text{inc}} \cos \theta^{\text{inc}} (1 - R_{\text{TE}}) \mathbf{e}_{\text{TE}} + \mathbf{E}_{\text{TM}}^{\text{inc}} (1 - R_{\text{TM}}) (\mathbf{n} \times \mathbf{e}_{\text{TE}}) \right\} \Big|_S, \\ \mathbf{M}^{\text{MECA}} = -\mathbf{n} \times \mathbf{E}^{\text{tot}} \Big|_S = \left\{ \mathbf{E}_{\text{TE}}^{\text{inc}} (1 + R_{\text{TE}}) (\mathbf{e}_{\text{TE}} \times \mathbf{n}) + \mathbf{E}_{\text{TM}}^{\text{inc}} \cos \theta^{\text{inc}} (1 + R_{\text{TM}}) \mathbf{e}_{\text{TE}} \right\} \Big|_S, \end{cases} \quad (6)$$

θ^{inc} 是入射波与表面法线的夹角, 对于反射系数的求解, 根据入射波不同形式的极化可分为水平极化反射系数和垂直极化反射系数, 多层介质模型如图 2 所示.

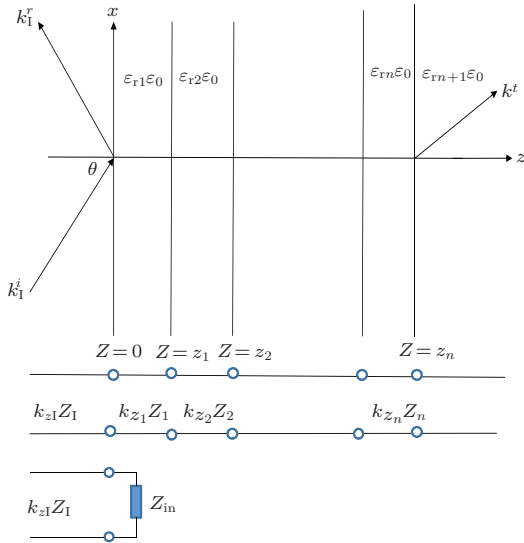


图 2 多层介质系统及其等效电路

对于多层介质反射系数的求解可利用传输线等效理论进行求解, 根据斯奈尔定律, 各个区域 x 方向传播常数 k_x 都相等, 即

$$k_x = k_{x1} = k_{x2} = \cdots = k_{xn} = k_1 \sin \theta. \quad (7)$$

第 j 节传输线的传播常数 k_{zj} 和特征阻抗 Z_j (或特征导纳 Y_j) 可表示为

$$\begin{cases} k_{zj} = \sqrt{k_j^2 - k_x^2} = \sqrt{k_0^2 \epsilon_{rj} - k_1^2 \sin^2 \theta} \\ (j = 1, 2, 3, 4, \cdots, n), \\ \begin{cases} Z_j = \frac{1}{Y_j} = \frac{\omega \mu}{k_{zj}} (\text{TE}) \\ Z_j = \frac{1}{Y_j} = \frac{k_{zj}}{\omega \epsilon_{rj} \epsilon_0} (\text{TM}) \end{cases} \\ (j = 1, 2, 3, 4, \cdots, n). \end{cases} \quad (8)$$

利用传输线阻抗变换关系, $Z_{\text{in}}(0)$ ^[16] 是从最左端沿 z 方向看进去的输入阻抗. 由此得到 $z = 0^-$ 处

的反射系数 $R(z = 0^-)$ 为

$$R(z = 0^-) = \frac{Z_{\text{in}}(0) - Z_1}{Z_{\text{in}}(0) + Z_1} = \frac{Y_1 - Y_{\text{in}}(0)}{Y_1 + Y_{\text{in}}(0)}. \quad (9)$$

在上面公式中代入不同形式的阻抗值得垂直极化和水平极化反射系数 R_{TE} 和 R_{TM} . 因此, 散射电场 \mathbf{E}^s 和磁场 \mathbf{H}^s 可以写为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}^s &= \frac{j \exp(-jkr)}{r} \int_{S_1} \left[\mathbf{k}_s \times \mathbf{M}^{\text{MECA}} \right. \\ &\quad \left. - (\mathbf{k}_s \times \eta_1 \mathbf{J}^{\text{MECA}} \times \mathbf{k}_s) \right] \exp(j2k \mathbf{k}_s \cdot \mathbf{r}') ds, \\ \mathbf{H}^s &= \frac{-j \exp(-jkr)}{r} \int_{S_1} \left[\mathbf{k}_s \times \mathbf{J}^{\text{MECA}} \right. \\ &\quad \left. - \left(\mathbf{k}_s \times \mathbf{k}_s \times \frac{1}{\eta_1} \mathbf{M}^{\text{MECA}} \right) \right] \\ &\quad \times \exp(j2k \mathbf{k}_s \cdot \mathbf{r}') ds, \end{aligned} \quad (10)$$

其中, S_1 为照明面, r 为场点的位置, \mathbf{r}' 为源点位置矢量, \mathbf{k}_s 为散射方向的单位矢量, k 为波数. 在单站的情况下, (10) 式可简化为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}^s &= \frac{j \exp(-jkr)}{r} \int_{S_1} (2 \cos \theta^{\text{inc}} E_{\text{TE}}^{\text{inc}} R_{\text{TE}} \mathbf{e}_{\text{TE}} \\ &\quad - 2 \cos \theta^{\text{inc}} E_{\text{TM}}^{\text{inc}} R_{\text{TM}} \mathbf{e}_{\text{TE}}) \exp(j2kz) ds, \\ \mathbf{H}^s &= \frac{-j \exp(-jkr)}{r} \\ &\quad \times \int_{S_1} (\cos \theta^{\text{inc}} E_{\text{TE}}^{\text{inc}} (1 - R_{\text{TE}}) \mathbf{e}_{\text{TM}} \\ &\quad + \cos \theta^{\text{inc}} E_{\text{TM}}^{\text{inc}} (1 - R_{\text{TM}}) \mathbf{e}_{\text{TE}}) \\ &\quad \times \exp(j2kz) ds, \end{aligned} \quad (11)$$

其中, θ^{inc} 为导体表面法线与入射线之间的夹角, z 为面元与观察点之间的距离, S_1 积分域为照明区域. 结合图形计算电磁学法, 提取目标图像可视部分的有效信息进行求解计算, 这是一种将目标的计算机辅助设计建模、计算机图形学和高频雷达散射截面计算相结合的方法. 图形电磁学法充分利用了计算机硬件优势, 借助于计算机显示技术, 由图形加速卡完成最困难、最费时的遮挡和消隐工作. 在图形计算电磁学法中, 可将三维空间的物体转化到二维空间进行积分计算. 图形计算电磁学法处理的

目标图形为目标三维表面在计算机屏幕上的投影, 如图 3 所示, 这里 \mathbf{k}_i 为源点的入射方向矢量, \mathbf{k}_d 为观察方向矢量, \mathbf{n} 为表面法矢量, ϕ_i 为入射方向与法线的夹角, ϕ_d 为观察方向与法线的夹角. 计算机屏幕上的积分元 $ds' = \cos\theta \cdot ds$.

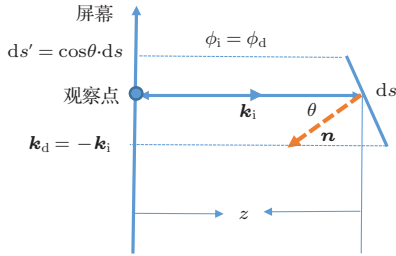


图 3 三角面元在计算机屏幕上的投影

利用上述方法得到修正的等效电流近似方法与图形计算电磁学法混合算法的散射电场和散射磁场的表达式为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}^s &= \frac{j \exp(-jk r)}{r} \int_s (2E_{TE}^{inc} R_{TE} e_{TE} - 2E_{TM}^{inc} R_{TM} e_{TE}) \exp(j2kz) ds', \\ \mathbf{H}^s &= \frac{-j \exp(-jk r)}{r} \int_s (E_{TE}^{inc} (1 - R_{TE}) e_{TM} + E_{TM}^{inc} (1 - R_{TM}) e_{TE}) \exp(j2kz) ds'. \end{aligned} \quad (12)$$

3 热防护层覆盖弹体目标散射体的 RCS

在本节中将采用修正的等效电流近似法与图形计算电磁学法混合算法讨论热防护层覆盖的三维弹体目标的电磁散射特性. 热防护层结构基本建模大致如图 1 所示, 所采用弹体目标模型如图 4 所示. 民兵 III 型洲际弹道导弹 MK-12 母弹头外形为尖拱形, 可简化为由底部的细长圆锥台和顶部近似为半径 0.075 m 的球状锥顶组成. 母弹头底部直径 1.32 m, 全长 3.66 m^[17].

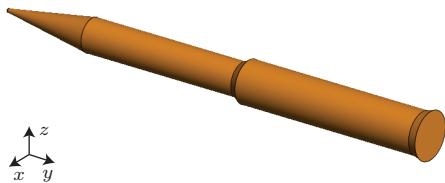


图 4 弹体目标模型

为了说明热防护层覆盖的弹体目标的散射特性, 分别分析了热防护层厚度、热防护层所含孔隙

率及出现脱粘层时, 弹体目标 RCS 值的变化情况. 首先选择从低频到高频不同频率下改变热防护层厚度, 单独观察厚度对弹体 RCS 值的影响. 然后在不同热防护层厚度的基础上, 在防护层中增加孔隙率对弹体 RCS 值的影响, 通过 (1) 式把孔隙率的影响转化为介电常数的影响进行计算. 最后考虑当在高空飞行时, 由于弹体温度过高, 出现脱粘层时, 脱粘层的厚度对弹体目标 RCS 值变化的影响.

弹体模型在直角坐标系 $o-xyz$ 中, 设雷达照射到目标入射波的方向与 z 轴的夹角为雷达扫描角 θ_{in} , 入射波在 xoy 平面内的投影与 x 轴的夹角为方位角 ϕ_{in} , $\phi_{in} = 0^\circ$, θ_{in} 为 $0^\circ-180^\circ$, 分别选定入射波频率 f 为 10 和 100 GHz, 热防护层厚度 d 为 0, 1 和 2 mm 时, 利用混合算法仿真计算得到弹体 RCS 值如图 5 所示.

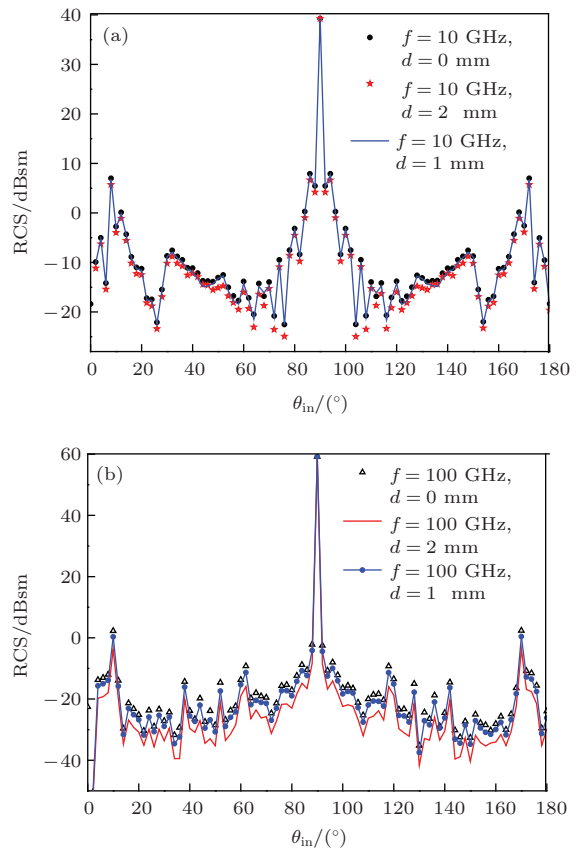


图 5 (网刊彩色) 弹体目标在覆盖热防护层的 RCS 值 (a) 频率为 10 GHz 时, 弹体 RCS 值; (b) 频率为 100 GHz 时, 弹体 RCS 值

从图 5 中可知, 当入射波频率为 10 GHz 时, 随着角度的变化, 热防护层厚度为 0, 1, 2 mm 时, 弹体的 RCS 值变化不大, 当入射波频率增大到 100 GHz 时, 随着厚度为 0—2 mm, 弹体 RCS 值依次减小.

图6为选取频率 f 为10, 300和500 GHz时, 弹体RCS随着热防护层厚度 d 的变化

从图6中可以看出, 当热防护层厚度不断增加, 在频率较低的10 GHz时, 弹体RCS值变化不明显, 在高频300和500 GHz时RCS值逐渐下降, 这表明热防护层为有耗介质, 相对介电常数由实部和虚部两部分组成. 其中介电常数的实部表示介质储存能量的能力, 而介电常数的虚部表示介质消耗能量的能力. 因此, 介电常数的实部越大其储存能量的能力越强, 介电常数的虚部越大其消耗能量的能力越强, 弹体RCS变化越明显.

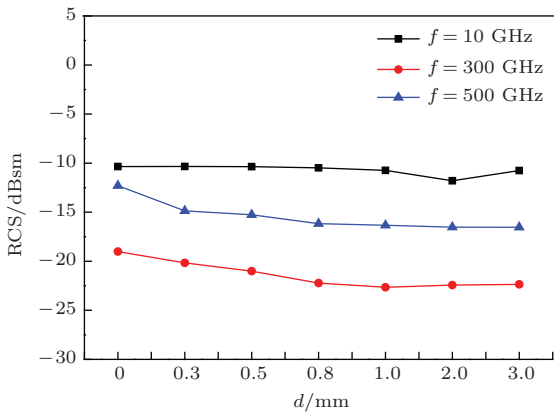


图6 热防护层厚度变化对弹体RCS的影响

图7为热防护层中存在孔隙时, 对弹体RCS值的影响. 图7(a)为固定频率100 GHz, $\phi_{in} = 0^\circ$, θ_{in} 为 $0^\circ-180^\circ$. 选取热防护层厚度 d 为2 mm, 孔隙率 p 分别为0, 0.03和0.15时, 弹体RCS值的变化. 可以看到, 当孔隙率增加, 弹体RCS值增大, 没有孔隙时, RCS值达到最小. 图7(b)中固定频率为500 GHz, 当热防护层厚度为0.5 mm时, 孔隙率为0.03和0.15, 从图中可以看到, 虽然热防护层厚度很薄, 但是孔隙率越大, RCS值越大, 无涂覆层时, 弹体RCS值最大.

图8为当频率变化时, 选取孔隙率相同, 不同热防护层厚度对弹体RCS的影响. 从图中可以看到, 当频率较低时, 热防护层厚度对RCS值影响不大, 频率升高, 孔隙率相同, 防护层厚度越小, RCS的值越大.

图9中固定频率为300和500 GHz, $\phi_{in} = 0^\circ$, θ_{in} 为 $0^\circ-180^\circ$, 选取热防护层厚度为 $d = 2$ mm, 对比存在脱粘层 $d1 = 2$ mm与不存在脱粘层时RCS值的变化. 可以看出, 对于不同频率, 脱粘层的存在对弹体RCS值影响不大.

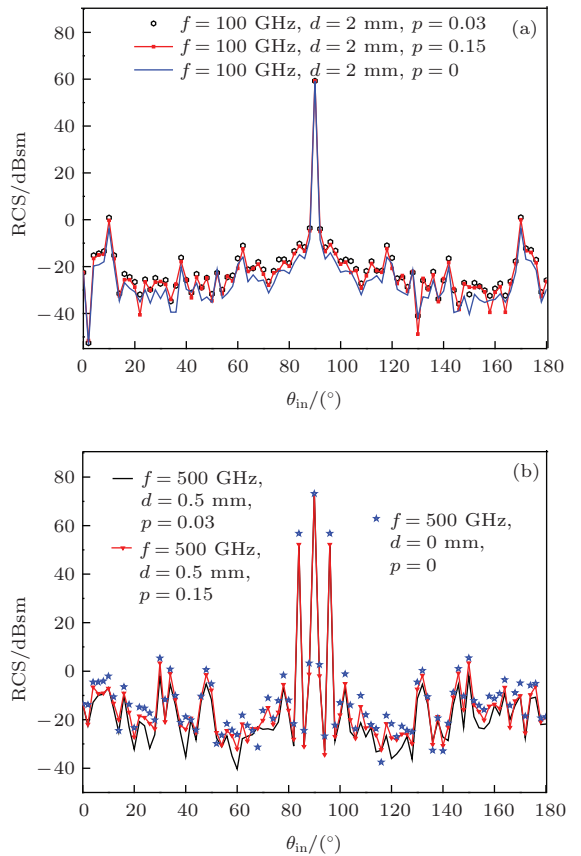


图7 (网刊彩色) 孔隙率对弹体RCS值的影响 (a) 频率为100 GHz时, 热防护层厚度相同, 孔隙率不同; (b) 频率为500 GHz时, 热防护层厚度不同, 孔隙率不同

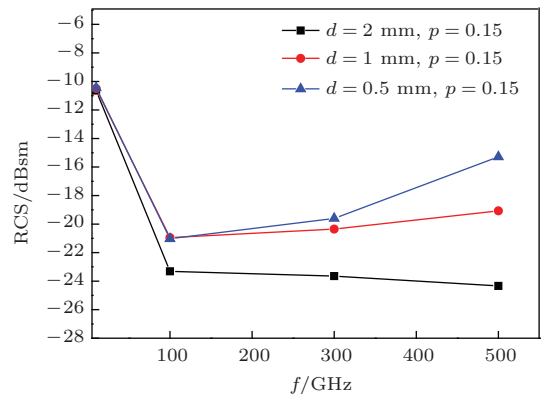


图8 孔隙率相同, 不同热防护层厚度对弹体RCS影响

从以上研究中可以得到以下结论: 当入射波频率较低时, 热防护层的厚度不会影响弹体RCS值的大小, 当频率升高, 随着热防护层厚度的增加, 弹体RCS值不断减小, 说明热防护涂层为有耗介质, 相对介电常数由实部和虚部两部分组成. 其中介电常数的实部表示介质储存能量的能力, 而介电常数的虚部表示介质消耗能量的能力. 因此, 介电常数的实部越大其储存能量的能力越强, 介电常数的虚部越大其消耗能量的能力越强, 弹体RCS变化越

明显; 当热防护层厚度一定, 热防护层中存在孔隙时, 孔隙率越大, RCS 值越大, 孔隙率为零时, RCS 值最小; 当孔隙率相同, 热防护层越薄, 其 RCS 值越大; 弹体在高空中出现脱粘现象, 对弹体的 RCS 值影响不大.

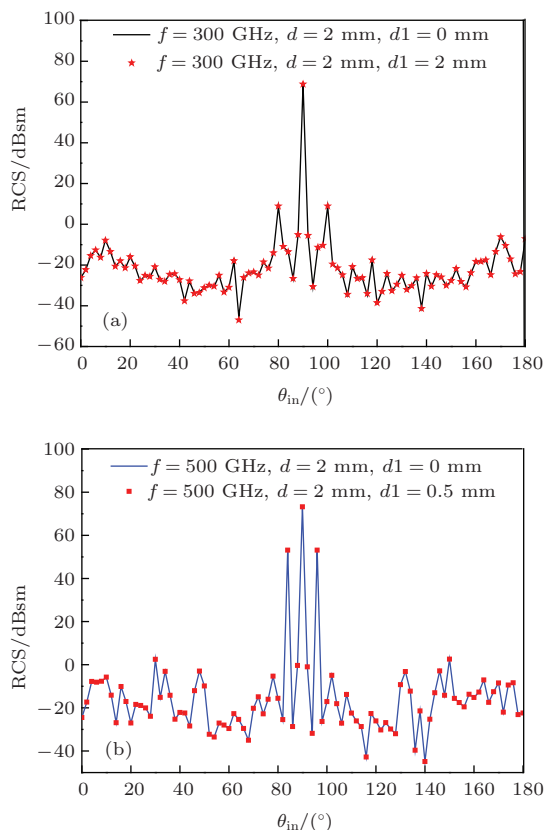


图9 (网刊彩色) 有无脱粘层的弹体 RCS 值 (a) 频率 300 GHz 时, 脱粘层的影响; (b) 频率 500 GHz 时, 脱粘层的影响

4 结 论

本文将修正的等效电流近似法与图形计算电磁学法相结合, 计算了热防护层覆盖三维弹体目标的散射特性. 分析了热防护层厚度、孔隙率和脱粘层对 RCS 值的影响. 计算结果表明: 随着热防护层厚度的增加, 弹体 RCS 值不断减小, 说明热防护涂层为有耗介质, 介电常数的虚部表示介质消耗能量的能力. 因此, 介电常数的虚部越大其消耗能量的能力越强, 弹体 RCS 值变化越明显; 当热防护层中存在孔隙时, 热防护层厚度一定, 孔隙率越大, RCS 值越大, 孔隙率为零时, RCS 值最小, 当孔隙率相同, 热防护层越薄, 其 RCS 值越大; 弹体在高空中出现脱粘现象, 对弹体的 RCS 值影响不大. 本文提

出的混合算法特别适合于求解高频电大涂覆多层介质的散射特性, 对于不同的更复杂的防护层材料的散射特性理论分析具有很好的应用前景. 同时也为弹体隐身特性提供了理论参考, 但对于涂层表面较为粗糙的情况没有考虑, 我们将在以后的工作中对此类问题做进一步研究.

参考文献

- [1] Sun J, Liu W Q 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 094401 (in Chinese) [孙健, 刘伟强 2014 物理学报 **63** 094401]
- [2] Wei Z W, Xiao J, Liu J J, Fan L E 2006 *Aero Wea.* **2** 50 (in Chinese) [魏仲委, 肖军, 刘建杰, 樊来恩 2006 航空兵器 **2** 50]
- [3] Sayar M, Seo D, Ogawa K 2009 *NDT & E. Inter.* **42** 398
- [4] Shi Y L, Zhou Q L, Zhang C L 2009 *Chin. Phys. B* **18** 5511
- [5] Wang Z L, Zhou M, Gao C Y, Zhang W 2012 *Chin. Phys. B* **21** 064202
- [6] Li X F, Xie Y J, Wang P, Yang R 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2930 (in Chinese) [李晓峰, 谢拥军, 王鹏, 杨瑞 2008 物理学报 **57** 2930]
- [7] Wu Z S, Zhang X D, Wu C K 1997 *Chin. Phys. Lett.* **14** 32
- [8] Li X F, Xie Y J, Fan J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 908 (in Chinese) [李晓峰, 谢拥军, 樊君 2009 物理学报 **58** 908]
- [9] Li J, Guo L X, Zeng H, Han X B 2009 *Chin. Phys. B* **18** 2757
- [10] Ma J, Guo L X, Wang A Q 2009 *Chin. Phys. B* **18** 3431
- [11] Meana, J G, Martinez-Lorenzo J A, Las-Heras F, Rappaport C 2010 *IEEE Trans. Anten. Propag.* **58** 3757
- [12] Rius J M, Ferrando M, Jofre L 1993 *IEEE Trans. Anten. Propag. Mag.* **35** 7
- [13] Li P, Luo F, Wang X Y, Zhou W C, Zhu D M 2007 *Rare Metal. Mater. Engin.* **36** 623 (in Chinese) [李鹏, 罗发, 王晓艳, 周万城, 朱东梅 2007 稀有金属材料与工程 **36** 623]
- [14] Yang Y E 2013 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Beijing University of Technology) (in Chinese) [杨玉娥 2013 博士学位论文 (北京: 北京工业大学)]
- [15] Meana J G, Martinez-Lorenzo J A, Las-Heras F 2010 *Elec. Waves. Propag. Comp. Matt.* **21** 208
- [16] Chen K S 2007 *Electromagnetic Fields and Waves* (Beijing: High Education Press) pp239-247 (in Chinese) [陈抗生 2007 电磁场与电磁波 (北京: 高等教育出版社) 第 239—247 页]
- [17] Wang W X, Zhu K L 2001 *Missile Encyclopedic Dictionary* (Beijing: China Astronautic Publishing Press) pp52-60 (in Chinese) [汪维勋, 朱坤岭 2001 导弹百科词典 (北京: 中国宇航出版社) 第 52—60 页]

Modified equivalent current approximation and graphical electromagnetic computing method of analyzing radar cross section of missile target scatterer covered with thermal protection layer

Zhu Yan-Ju Jiang Yue-Song[†] Hua Hou-Qiang Zhang Chong-Hui Xin Can-Wei

(School of Electronic Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

(Received 5 June 2014; revised manuscript received 30 June 2014)

Abstract

In this paper, we combine the modified equivalent current approximate method and graphical electromagnetic computing method to solve the electromagnetic scattering problems in the missile target covered with the thermal protective layer. The modified equivalent current approximate method is used to calculate the lossy dielectric and combining graphical electromagnetic method, and using a computer display technology, blanking and occlusion, a three-dimensional surface is projected on a computer screen, and the pixels are calculated. The calculation in three-dimensional space is converted into the calculation in two-dimensional space, thereby greatly reducing the computation time and complexity. The results show that when the incident frequency is low, the thickness of the thermal protection layer does not affect the radar cross section value. When the frequency is increased with the thickness of the thermal protection layer, the radar cross section value continuously decreases, which indicates that the thermal barrier coating is a lossy medium: the bigger the imaginary part of the dielectric, the stronger the ability to consume the energy is and the more obvious the change of missile radar cross section is. When the thermal protective layer has pores, the higher the porosity, the greater the value of the radar cross section is; when the porosity is zero, the value of the radar cross section is minimal; when the porosity is the same, the thinner the thermal protection layer, the bigger the radar cross section is. When the projectile phenomenon occurs, it does not affect the radar cross section.

Keywords: thermal protection layer, radar cross section, the modified equivalent current approximation, electromagnetic scattering

PACS: 41.20.Jb, 42.25.Bs, 42.25.Fx

DOI: 10.7498/aps.63.244101

[†] Corresponding author. E-mail: yuesongjiang@buaa.edu.cn