

# 火炮榴弹涂吸波材料后的 镜面反射特性研究

张培忠,王 虹,米中贺

(白城常规兵器试验中心,吉林白城 137001)

**摘 要:**分析了火炮榴弹具备隐身性能的必要性,计算了普通榴弹的雷达镜面反射截面,为了减小榴弹的镜面反射,研究用涂敷吸波材料技术实现榴弹隐身,计算了榴弹涂敷吸波材料后的镜面反射特性,结果证明榴弹涂敷吸波材料后可以达到隐身效果。

**关键词:**火炮;榴弹;隐身

火炮历经几百年的发展,在实战应用中得到了严酷的考验,技术已经十分成熟,目前仍然是各国军队主要的武器装备。然而,地面压制火炮目前所面临的最主要的现实威胁是:火炮发射后,在空中飞行的弹丸很容易被敌方炮位侦察雷达捕捉,计算出发射阵地,在5分钟左右的时间内就可能遭到敌方火力的快速反击,造成损失。国内外炮位侦察雷达性能见表1<sup>[1]</sup>。为了降低地面压制火炮遭受反击的概率,需要火炮发射的弹丸具有一定的隐身能力,以降低被敌方炮位侦察雷达捕捉的概率和距离。为了使敌方炮位侦察雷达捕捉155mm榴弹的距离减小50%,理论计算出隐身榴弹的雷达镜面反射截面指标:,而目前155mm榴弹的雷达镜面反射截面理论值是: $\sigma \geq 22\text{dB}$ 。

表1 炮位侦察雷达性能

型 号	工作频率或波段	侦察范围	定位精度
国产 373 雷达	3.4 GHz	152mm 榴弹 4.8~30km	$<R \times 0.35\% \text{m}$
美国 TPQ-36, TPQ-37	X, S	40Km, 50Km	35m
英-法-德 COBRA	4~8 GHz	42Km	20m
瑞典-挪威 ARTHUR	5.4~5.9GHz	20Km	20m
俄罗斯 Zoopark-1	6~8 GHz	45Km	30~40m

火炮弹丸隐身目的是降低主要被探测方向上雷达的反射截面。火炮弹丸被敌方炮位侦察雷达探测的示意图如图1所示。从图中可以分析出,弹丸的主要被探测方向是:以弹丸对称轴为轴、锥角大约120°的圆锥内,见图2。

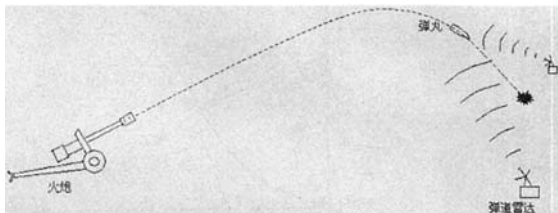


图1 榴弹被雷达探测示

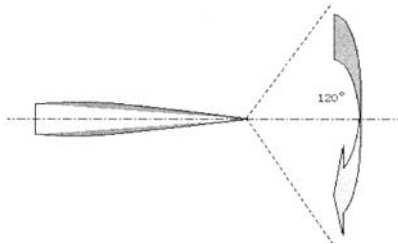


图2 榴弹被雷达捕捉主要方向

## 1 普通榴弹的镜面反射特性

依据高频区或光学区的条件  $k\rho=2\pi\rho/\lambda>10$ ,  $\rho$  为弹丸半径,得到可以使用物理光学法雷达波长条件是  $\lambda>4.87\text{cm}$ 。根据理想导体物理光学理论斯特拉顿-朱兰成(Stratton-Chu)散射场积分式,设雷达发射与接收极化方向相同,对于弹丸上任意一个平面微元  $ds$  的雷达单站后向镜面反射截面 RCS 有:

$$\begin{aligned}\sqrt{\sigma} &= -\frac{ik}{\sqrt{\pi}} \int_s \vec{n} \cdot (-\vec{e} \times \vec{h}) \exp[ik\vec{r} \cdot (\vec{v} - \vec{s})] ds \\ &= \frac{ik}{\sqrt{\pi}} \int_s \vec{n} \cdot \vec{v} \exp[2ik\vec{r} \cdot \vec{v}] ds\end{aligned}$$

$$\sqrt{\sigma_m} = \sum_{i=1}^4 \sqrt{\sigma_i} \exp(2ikR_i)$$

收稿日期:2005-10-25

式中:  $\vec{n}$  面积微元单位法矢量;  $\vec{v}$  为微波入射单位矢量;  $\vec{s}$  为微波反射单位矢量, 单站雷达后向散射有  $\vec{s} = -\vec{v}$ ;  $\vec{e}$  为电场单位矢量;  $\vec{h}$  为磁场单位矢量;  $\vec{r}$  为面积微元位置矢量;  $\sqrt{\sigma_1}, \sqrt{\sigma_2}, \sqrt{\sigma_3}, \sqrt{\sigma_4}$  分别为弹锥面、弹柱面、船尾和引信的雷达镜面反射截面;  $R_1, R_2, R_3, R_4$  分别为弹锥面、弹柱面、船尾和引信的散射中心到雷达距离。

坐标系建立在弹丸表面被微波照亮区域, 平面处于明暗区域交界线所在平面上, 见图 3。

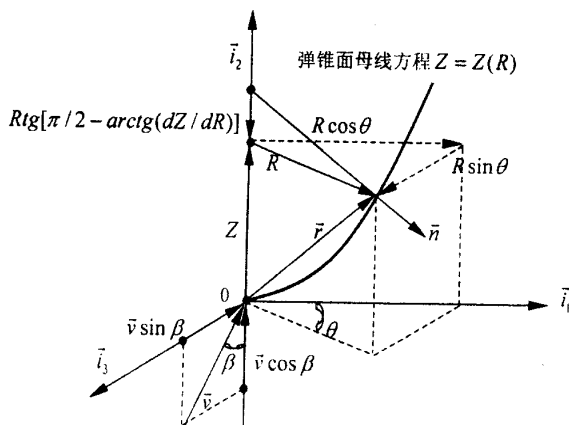


图3 弹丸雷达照射表面母线

以弹锥面为例, 其锥面母线方程为:  $(z-58)^2 + (R+321.8)^2 = 330^2$ 。

$$\sqrt{\sigma_1} = \frac{jk}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\pi} \int_{z_1}^{z_2} \frac{1}{\sqrt{\{R(z) \lg(\frac{\pi}{2} - \arctg \frac{dz}{dR})\}^2 + R^2(z)}} [-R(z) \lg(\frac{\pi}{2} - \arctg \frac{dz}{dR}) \vec{i}_2 + R(z) \cos \theta \vec{i}_1 + R(z) \sin \theta \vec{i}_3] \cdot (\vec{i}_2 \cos \beta - \vec{i}_3 \sin \beta) \exp[2jk(z\vec{i}_2 + R(z) \cos \theta \vec{i}_1 + R(z) \sin \theta \vec{i}_3) \cdot (\vec{i}_2 \cos \beta - \vec{i}_3 \sin \beta)] R(z) dz d\theta$$

利用复数欧拉公式把复指数形式的积分函数转化为复数三角函数积分式, 上式得:

$$\begin{aligned} \sqrt{\sigma_1} = & 1.244 j \int_0^{\pi} \int_{17}^{58} \frac{\sqrt{330^2 - (z-58)^2 - 321.8}}{\sqrt{1 + \lg^2(\frac{\pi}{2} - \arctg \sqrt{(\frac{330}{58-z})^2 - 1})}} [-\lg(\frac{\pi}{2} - \arctg \sqrt{(\frac{330}{58-z})^2 - 1}) \cos \beta \\ & - \sin \theta \sin \beta] \cos[4.4z \cos \beta - 4.4(\sqrt{330^2 - (z-58)^2 - 321.8}) \sin \theta \sin \beta] dz d\theta \\ & - 1.244 \int_0^{\pi} \int_{17}^{58} \frac{\sqrt{330^2 - (z-58)^2 - 321.8}}{\sqrt{1 + \lg^2(\frac{\pi}{2} - \arctg \sqrt{(\frac{330}{58-z})^2 - 1})}} [-\lg(\frac{\pi}{2} - \arctg \sqrt{(\frac{330}{58-z})^2 - 1}) \cos \beta - \sin \theta \sin \beta] \\ & \sin[4.4z \cos \beta - 4.4(\sqrt{330^2 - (z-58)^2 - 321.8}) \sin \theta \sin \beta] dz d\theta \end{aligned}$$

忽略各散射源的散射波在相位上的差别, 利用随机相位求和法给出各散射源的 RCS 的非相关叠加结果, 或者利用各散射源的 RCS 的代数和表征总体效果, 即:

$$\sigma_m = |\sqrt{\sigma}|^2 = \left| \sum_{i=1}^4 \sqrt{\sigma_i} \right|^2$$

为了简化计算方法, 可以把弹锥面、弹柱面和船尾锥面统一近似成一个长球体, 计算其镜面反射回波, 镜面反射回波方程:

$$\sigma_m = \frac{\pi a^2 b^4}{(a^2 \cos^2 \beta + b^2 \sin^2 \beta)^2}$$

式中:  $a$ —长球体的长半轴;  $b$ —长球体的短半轴。

引信、弹锥面、弹柱面和船尾锥面合成雷达镜面反射截面计算结果见图 4、图 5<sup>[2]</sup>。

## 2 榴弹涂敷吸波材料后镜面反射特性

为了减少弹体镜面反射回波, 根据弹丸吸波的需要, 在弹体外表面涂 2mm 厚度的双层吸波材料。分析垂直入射场时, 吸波材料的单站后向反射率。根据电磁场传播理论<sup>[3]</sup>:

$$\begin{aligned} Z_1 &= \eta_1 \text{th} \gamma_1 d_1 \\ Z_2 &= \eta_2 \frac{Z_1 + \eta_2 \text{th} \gamma_2 d_2}{\eta_2 + Z_1 \text{th} \gamma_2 d_2} \\ &\vdots \\ Z_n &= \eta_n \frac{Z_{n-1} + \eta_n \text{th} \gamma_n d_n}{\eta_n + Z_{n-1} \text{th} \gamma_n d_n} \end{aligned}$$

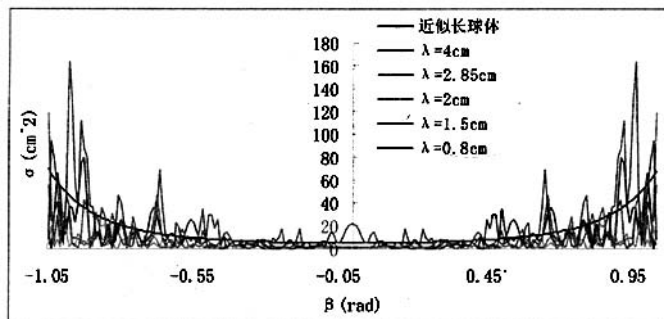


图4 船形榴弹的镜面反射截面

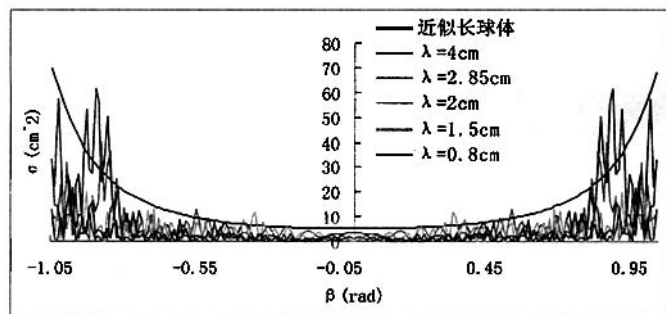


图5 枣核形榴弹的镜面反射截面

式中:  $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n$  为  $1, 2, \dots, n$  层的相对本征阻抗;  $Z_1, Z_2, \dots, Z_n$  为  $1, 2, \dots, n$  层的外表面相对输入阻抗;  $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$  为  $1, 2, \dots, n$  层的传播系数;  $d_1, d_2, \dots, d_n$  为  $1, 2, \dots, n$  层的厚度。

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}$$

式中:  $\mu$  为相对磁导率,  $\mu = \mu' - j\mu''$ ;  $\varepsilon$  为相对介电常数,  $\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$ 。

$$\text{tg}\delta_m = \frac{\mu''}{\mu'} \quad \text{tg}\delta_e = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}$$

式中:  $\delta_m$  为磁损耗角;  $\delta_e$  为电损耗角。

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu' - j\mu''}{\varepsilon' - j\varepsilon''}} = \sqrt{\frac{\sqrt{\mu'^2 + \mu''^2} e^{-j\delta_m}}{\sqrt{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2} e^{-j\delta_e}}} = \sqrt{\frac{\sqrt{\mu'^2 + \mu''^2}}{\sqrt{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2}}} e^{\frac{j(\delta_e - \delta_m)}{2}}$$

$$\gamma = j\omega\sqrt{\mu\varepsilon} = \frac{j\omega}{c} \sqrt{\mu'\varepsilon'(1 - j\text{tg}\delta_m)(1 - j\text{tg}\delta_e)} = \xi + j\zeta$$

$$\xi = \frac{\omega}{\sqrt{2}c} \sqrt{\mu'\varepsilon'\{\text{tg}\delta_m \text{tg}\delta_e - 1 + \sqrt{(1 + \text{tg}^2\delta_m)(1 + \text{tg}^2\delta_e)}\}}$$

$$\zeta = \frac{\omega}{\sqrt{2}c} \sqrt{\mu'\varepsilon'\{1 - \text{tg}\delta_m \text{tg}\delta_e + \sqrt{(1 + \text{tg}^2\delta_m)(1 + \text{tg}^2\delta_e)}\}}$$

$$\text{th}\gamma d = \frac{\text{sh}\xi d \text{ch}\xi d + j \sin\zeta d \cos\zeta d}{\cos^2\zeta d \text{ch}^2\xi d + \sin^2\zeta d \text{sh}^2\xi d}$$

式中:  $\xi$  为衰减常数;  $\zeta$  为相位常数;  $\omega$  为角频率。

涂层表面电压振幅反射率:

$$\rho = \frac{Z_n - \eta_0}{Z_n + \eta_0} = \frac{Z_n - 1}{Z_n + 1}$$

涂层表面功率反射率:  $R = |\rho|^2$ , 或以分贝表示  $R = \lg |\rho|$ 。

工程应用的吸波涂料中, 以铁氧体、碳基铁粉比较成熟, 价格便宜, 性能基本稳定。国内外常用吸波涂料的电磁参数见表2<sup>[4-6]</sup>。利用文献[5]中涂层优化设计的结果, 以LDT-10为匹配层、LDT-20为吸收层, 优化两层的厚度, 控制涂层总厚度2mm, 计算了反射率。

根据弹锥面、弹柱面、弹带柱面和船尾锥面合成雷达镜面反射截面及吸波材料的反射率, 计算弹丸涂吸波材料后的雷达镜面反射截面, 见图6、图7。

表2 吸波涂料的电磁参数

种类	品名	(fGHz)	$\varepsilon'$	$\text{tg}\delta_e$	$\mu'$	$\text{tg}\delta_m$
铁氧体	美国 268E	8.6	7.4	0.15	1.4	0.48
	美国 269E	8.6	4.6	0	1.09	1.98
	国产	10.02	11.24	0.34	0.88	0.64
	日本	8~12	8	0.10	1.9	0.6
碳基铁粉	国产 DT-5	9	22.6	0.15	1.73	0.58
	国产 LDT-10	9	22.6	0.13	1.69	0.69
	国产 LDT-20	9	20.6	0.15	1.74	0.56
	国产 LDT-60	9	18.8	0.11	1.86	0.47

### 3 结论

上述理论分析表明: 榴弹涂敷吸波材料以后, 可以明显降低雷达镜面反射, 理论上可以降低雷达散射截面 10~15dB 左右, 能够达到指标要求的 -32dB, 可以明显缩短敌方炮位侦察雷达对榴弹的探测距离, 实现榴弹隐身的目的, 最终达到减小火炮阵地暴露的概率。

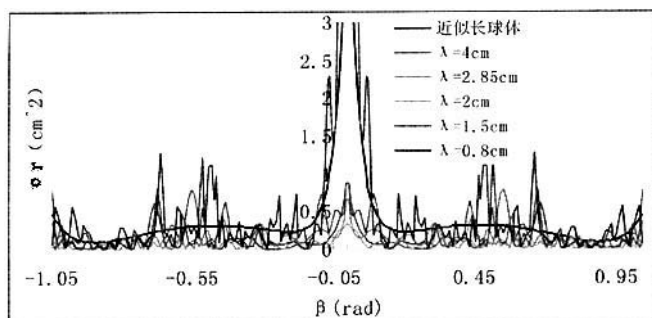


图6 船形榴弹涂吸波材料后的镜面反射

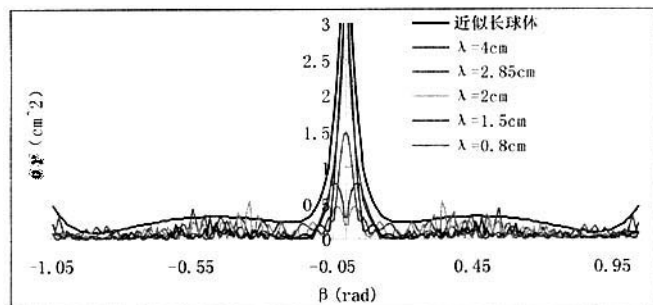


图7 枣核形榴弹涂吸波材料后的镜面反射

(上接第18页)

## 2 隐身技术新机理

隐身技术的发展不断有新的突破,针对探测技术方面的改进,目前在探索新的隐身机理方面有:

1)等离子体隐身技术。实验证明,用等离子体气体层包围诸如飞机、舰船、卫星等的表面,当雷达波碰到这层特殊气体时,由于等离子体层对雷达波有特殊的吸收和折射特性,使反射回雷达接收机的能量很少。例如,应用等离子体技术可使一个13cm长的微波反射器的雷达平均截面在4~14GHz频率范围内平均减小20dB,即雷达获取的回波能量减少到原来的1%。美国休斯实验室已进行了这方面的实验。

2)应用仿生技术。试验证明,海鸥虽与燕八哥的形体大小相近,但海鸥的雷达反射截面比燕八哥大200倍。蜜蜂的体积小于麻雀,但它的雷达反射截面反而比麻雀大16倍。有关科学家们正在研究这些现象,试图采用仿生技术,寻求新的隐身技术。

3)应用“微波传播指示”技术。这种技术是利用计算机预测雷达波在大气中的传播情况。大气层的变化(如湿度、温度等的变化)能使雷达波的作用距离发生变化,使雷达覆盖范围产生“空隙”(即盲区),同时雷达

## 参考文献

- [1]扬春. 国外火炮定位雷达的现状和发展趋势. 现代防御技术[J]. 2005, (2): 52-57.
- [2]张培忠. 火炮榴弹的微波隐身特性分析. 雷达与对抗[J]. 2005, (3): 5-9.
- [3]周克定. 电磁场与电磁波. 北京: 机械工业出版社[M]. 2002, (8): 275.
- [4]张培忠. 榴弹隐身涂层粘合强度分析. 军械工程学院学报[J]. 2005, (5): 17-21.
- [5]周馨我. 功能材料学. 北京: 北京理工大学出版社[M]. 2002, (3): 240-242.
- [6]陈珂. 雷达隐身材料技术研究. 现代防御技术[J]. 2005, (2): 58-61.

波在大气里传播时要形成“传播波道”,其能量集中于“波道”内,“波道”之外几乎没有能量。如果突防兵器在雷达覆盖区的“空隙”内或“波道”外通过,就可避开敌方雷达的探测而顺利突防。

## 3 结束语

理论研究是技术发展的基石和原动力。搞清理论研究动态就相当于把握了技术发展的脉搏,能指导陆军装备隐身技术的研发。新的隐身机理可以给隐身材料的开发带来更多的思路,比如仿生学隐身机理、等离子体隐身机理等将给隐身材料的设计带来更广阔的空间。

## 参考文献

- [1]耿海军. 隐身技术洞开未来前景[J]. 国防科技, 2003, (9) P: 33-34
- [2]李大光. 隐身技术与隐身武器[J]. 现代军事, 2004, (12) P: 32-35
- [3]于名讯、贾瑞宝等. 红外隐身材料技术探讨[J]. 隐身技术, 2005, (1) P: 49-53, 56
- [4]李国强、武文军等. 当代隐身技术的现状和发展[J]. 国防科技, 2005, (4) P: 22-25

## 雷达散射截面 ( RCS ) 分析培训课程

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立, 致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养, 是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司, 以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

雷达散射截面 ( Radar Cross Section, 简称 RCS ) 是雷达隐身技术中最关键的概念, 也是电磁理论研究的重要课题, 使用 HFSS 软件可以很方便的分析计算各种目标物体的 RCS。

由易迪拓培训推出的《HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装》是从零讲起, 系统地向您讲授如何使用 HFSS 软件进行雷达散射截面分析的全过程。该套视频课程由专家讲授, 边操作边讲解, 直观易学。

### HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装



套装包含两门视频培训课程, 其中: 《两周学会 HFSS》培训课程是作为 HFSS 的入门培训课程, 帮助您在最短的时间内迅速熟悉、掌握 HFSS 的实际操作和工程应用; 《HFSS 雷达散射截面(RCS)分析》培训课程是专门讲授如何使用 HFSS 来分析计算雷达散射截面, 包括雷达散射截面、单站 RCS、双站 RCS 等的定义, 实例讲解使用 HFSS 分析单站 RCS、双站 RCS 和宽频 RCS 的相关设置和实际操作等。视频课程, 专家讲授, 从零讲起, 直观易学...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/130.html>

### 更多培训课程:

- HFSS 培训课程

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

- CST 培训课程

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

- 天线设计培训课程

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>