

# 深弹发射装置高温抗腐蚀隐身涂层研究

梁昱晨, 李旺昌, 斯王祥  
(国营第四四五厂, 浙江 杭州 310024)

**摘要** 高温抗腐蚀隐身涂层应用于深弹发射装置, 具有深弹发射时耐高温、抗腐蚀、隐身性能较高的优点。为全面提高传统火箭深弹的隐身效果, 其主要技术瓶颈是突破在高温尾焰工作环境下深弹发射装置有效提高隐身性能。针对该技术瓶颈, 提出了一种吸波复合材料。通过对该方案的理论研究和仿真实验模型的计算表明: 采用吸波复合材料满足深弹发射装置的隐身性指标要求。

**关键词** 隐身性能; 吸波材料; 深弹发射装置; 高温

中图分类号 TU857 文献标识码 A 文章编号 2096-5753(2022)02-0162-04

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2022.02.012

## Research of Hyperthermy and Slushing Stealth Coatings on Depth Charge Launcher

LIANG Yuchen, LI Wangchang, SI Wangxiang  
(State-run No.445 Factory, Hangzhou 310024, China)

**Abstract** Hyperthermy and slushing stealth coatings are applied to depth charge launcher which have the characteristics of high temperature resistance, corrosion resistance and high stealth performance when the depth charge is launched. The technical difficulty of improving the stealth effect of traditional rocket depth charge is to effectively enhance the depth charge launcher's stealth performance in conditions of high-temperature plume. Aiming at this difficulty, one sort of wave-absorbing composite material has been proposed. The theoretical study and simulation theoretical model results of this method show that the wave-absorbing composite materials could meet the depth charge launcher's requirements of stealth performance indicators.

**Key words** stealth performance; wave-absorbing materials; depth charge launcher; high temperature

## 0 引言

随着现代化军事探测技术的飞速发展, 军事设施及武器装备的隐蔽变得日益困难, 因此隐身技术的应用越来越多。隐身概念和技术源于二战, 最早因在航空装备上的应用而闻名。它是指通过研究利用各种不同的技术手段来改变己方目标的可探测性信息特征, 最大程度地降低对方探测系统发现的概率, 使己方的武器装备不被敌方的探测系统发现和探测到<sup>[1-2]</sup>。隐形技术使伪装技术由防御性走向

了进攻, 由消极被动变成了积极主动, 增强我方的生存能力, 提高对敌人的威胁力。通常采用外形隐身与吸波材料隐身相结合的手段实现较好的隐身效果。

吸波材料是由吸收剂、粘结剂及各种助剂构成, 其吸波性能主要由吸波材料的电磁参数和厚度决定<sup>[3]</sup>。吸波材料是指涂在装备或建筑表面的一类材料, 通过能量转换耗散掉电磁波或使电磁波因干涉而消失。吸波材料的分类方法有多种, 根据电磁波的损耗机制, 吸波材料分为电阻型、电介质型和

磁损耗型; 根据成型工艺和承载能力, 分为涂覆型和结构型; 根据吸波原理, 分为吸收型和干涉型<sup>[4]</sup>。

受制于火箭发射时产生的高温尾焰, 采用传统涂层吸波的隐身方法受限, 发射装置隐身效果不佳。因此, 需要研制一种耐高温冲蚀的隐身材料, 以适应发射装置高温尾焰工作环境。

## 1 高温吸波材料研究

由于大多数磁性吸收剂居里温度低, 通常情况下只能应用于武器装备的常温部位的隐身, 在高温环境下容易因氧化失效而失去吸波性能。因此, 在高温环境下武器装备的隐身需要采用高温吸波材料。

碳化硅 (SiC) 作为高温吸波材料的主要成分, 有密度小、耐高温和化学稳定性好等特点, 因而在高温吸波材料中具有良好的应用前景。但常规制备的碳化硅的吸波性比较差, 可通过提高碳化硅的纯度和可控掺杂来改善碳化硅的吸波性能。日本的研究人员通过提高碳化硅的纯度方法, 制备出高纯度的碳化硅粉体并具有优异的吸波效果, 但缺点是难以获得制备碳化硅粉体的高纯度原料, 且生产成本较高, 所以这种方法不适合用于大规模生产。

通过对 SiC 有控制的掺杂来有效调控 SiC 的电导率, 是提高 SiC 在高温下吸波性能的主要方法。DOU 等<sup>[5]</sup>对 SiC 微粉进行 N 元素的掺杂, 在 N 元素的掺杂下使材料的介电常数虚部随温度的升高变化趋势加快, 在高温环境下具有较大的介电损耗能力, 因而该材料在高温下具有较强的吸波性能。CHEN 等<sup>[6]</sup>把 B 掺杂在 SiC 纳米线上, 发现其电导率升高进而提高吸波性能, 并且拓宽吸波材料的吸收频带。也有研究人员通过对 SiC 材料进行 Fe 元素掺杂, 改善 SiC 纳米线的介电损耗能力和吸波性能, 同时因为掺杂 Fe 元素使 SiC 具有一定的磁性, 增加了材料的磁损耗进而提高了材料的吸波性能。

当前, 一些研究人员也采用其他的技术制备出耐高温吸波材料, 并取得很好的成果。PING 等<sup>[7]</sup>采用静电纺丝方法制出聚脲硅氮烷/聚苯乙烯 (PUS/PS) 复合纳米纤维, 发现包含多级纳米结构

的碳化硅纤维具有良好的吸波性能。

## 2 吸波涂层理论研究

隐身材料是一种色散介质, 其电磁参数  $\varepsilon$  和  $\mu$  随着频率变化而变化。

介电常数的实部和虚部存在一定的内在关系 Kramers-Kroning 关系:

$$\varepsilon'_r(\omega) - 1 = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\omega' \varepsilon''_r(\omega')}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega'$$

$$\varepsilon''_r(\omega) = -\frac{2\omega}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\varepsilon'_r(\omega') - 1}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega'$$

式中:  $\omega'$  为复频率;  $\omega$  为  $\omega'$  的某一实正值。

Kramers-Kroning 关系指出了色散介质 ( $\varepsilon'$  与频率有关) 一定有损耗, 其介电常数的实部和虚部又相互制约。根据 Kramers-Kroning 关系, 只有理想的真空状态才是无耗介质。隐身涂层的电磁参数随着频率的变化而变化, 因此这是一种典型的色散介质。由此, 在 2~18 GHz 的宽频内, 电磁波会发生色散效应<sup>[3]</sup>。

在铁磁性物质中, 由于 Snoek's 原则使得磁导率和频率相互限制。对于一定的材料, 式子右边是常量。在一定的频率范围内, 右边的值越大, 材料的磁导率虚部越大。由此, 要使得在一定频率范围内磁导率虚部较大的话, 就要求材料有较高的饱和磁化强度, Snoek's 原则如下式:

$$\int_0^{\infty} \mu''(f) f df = k_A \frac{\pi}{2} (\bar{\gamma} 4\pi M_s)^2$$

式中:  $\bar{\gamma}$  是旋磁比;  $k_A$  是与样品磁化方向相关的无量纲因子, 对于均匀的软磁薄膜  $k_A=1$ , 对于大块的烧结铁氧体  $k_A=1/3$ , 对于各向同性的磁性复合材料  $k_A < \tau/3$ ;  $\tau$  为复合材料中磁性粒子的体积率。

对于吸波材料而言, 磁导率虚部代表了磁损耗性能。由上式可知, 材料的饱和磁化强度越大, 磁导率虚部越大<sup>[8]</sup>。

吸波复合材料的介电常数和磁导率通常表达了复合材料的电磁性能。为了进一步研究纳米粒子的本征电磁性能, 根据 Bruggman 有效媒质理论, 由下式可得纳米粒子的本征介电常数  $\varepsilon_i$  和磁导率  $\mu_i$ 。

$$\varepsilon_i = \frac{\varepsilon[2\varepsilon + \varepsilon_m(3q - 2)]}{\varepsilon(3q - 1) + \varepsilon_m}$$

$$\mu_t = \frac{\mu[2\mu + \mu_m(3q - 2)]}{\mu(3q - 1) + \mu_m}$$

式中： $\varepsilon$ 、 $\mu$  为石蜡基复合材料的介电常数和磁导率； $\varepsilon_m$ 、 $\mu_m$  为树脂基体的介电常数和磁导率，其数值分别为 2 和 1<sup>[9-10]</sup>。

### 3 仿真实验模型

建立单层吸波涂层模型(图 1)，分析电磁波在涂层中的衰减。由于涂层的厚度远小于雷达波波长，所以可以用传输线理论对其阻抗和反射率进行理论分析预测。

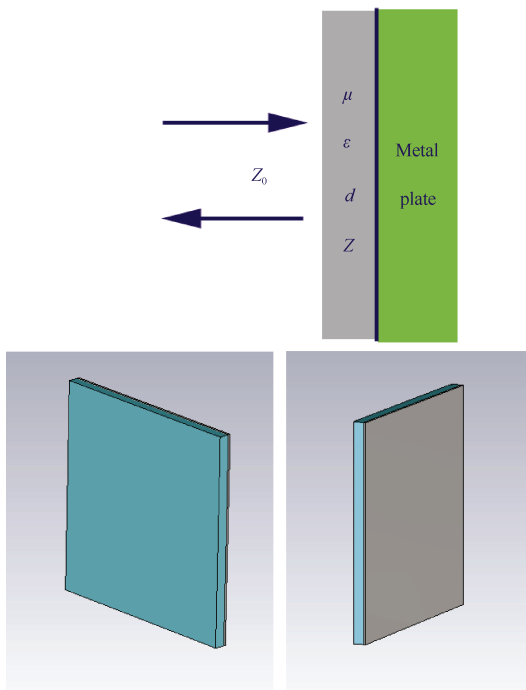


图 1 单层吸波材料示意图

Fig. 1 Schematic diagram of monolayer wave-absorbing materials

利用网络矢量分析仪测定吸波材料的动态相对介电常数  $\varepsilon_r$  和磁导率  $\mu_r$ 。根据传输线理论，计算得到涂层的阻抗  $Z$ 。

涂层的传输系数  $\gamma$  为

$$\gamma = \frac{i\omega\sqrt{\mu_r\varepsilon_r}}{c}$$

由此得到涂层的阻抗为

$$Z = \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} \tanh(\gamma d)$$

由涂层的阻抗值可得到涂层的反射率：

$$R.L. = 20 \lg \left| \frac{Z - 1}{Z + 1} \right|$$

涂层的衰减因子如下：

$$\alpha = \text{Re}(\gamma) = \text{Re}\left(\frac{j\omega\sqrt{\mu_r\varepsilon_r}}{c}\right) = \frac{\omega}{\sqrt{2}c} \sqrt{\mu''\varepsilon'' - \mu'\varepsilon' + \sqrt{(\mu'^2 + \mu''^2)(\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2)}}$$

式中  $c$  表示真空中的光速。

衰减因子是依赖于材料的复介电常数和磁导率的参数，其表示电磁波在涂层中的衰减。

为了满足最小的反射率，在设计涂层时要尽量达到匹配条件：

$$\sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} \tanh\left(\frac{j\omega\sqrt{\mu_r\varepsilon_r}}{c}d\right) = 1$$

### 4 仿真计算结果

在研究过程中，选用高磁导率纳米金属吸波材料和高频金属氧化物磁性吸波材料作为 2 种典型的吸波隐身材料。根据以上的传输线理论通过计算机模拟得到耐高温吸波材料的反射率。采用 CST 软件和 MATLAB 语言编写程序模拟得到吸波涂层的反射率图。以涂层的厚度和电磁波的频率为变量，研究吸波涂层厚度在 1~2 mm 时对 1~18 GHz 雷达波的反射率变化。在反射率图中，反射率越小代表材料对雷达波的吸收和损耗越大，其吸波性能也越好。

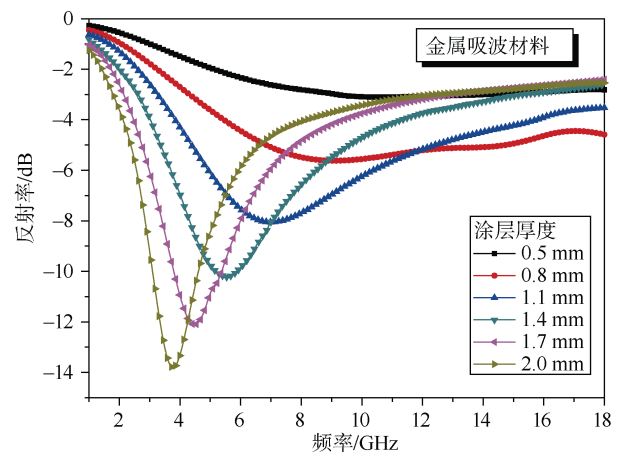


图 2 纳米金属吸波材料反射率仿真图

Fig. 2 Simulation diagram of nanometer metal wave-absorbing materials reflectivity

## 5 结束语

针对深弹发射装置既满足热流冲蚀的耐高温, 又满足在高频的隐身要求。采用经典的纳米金属和纳米金属氧化物吸波剂, 采取热等离子喷涂的方法做吸波涂层。通过仿真研究发现, 纳米金属吸波材料在 1~2 mm 区间, 吸收频段主要集中在 3~8 GHz, 而纳米金属氧化物的吸收频段主要集中在 10~18 GHz, 可以通过厚度的变化调控吸收频率。由于等离子喷涂的涂层表面和结构都很均一, 因此其对电磁波的散射都较均匀, 不存在极化方向的问题。

## 参考文献

- [1] 李旺昌, 周祥, 应耀, 等. 雷达吸波隐身材料的进展及发展趋势[J]. 材料导报, 2015, 29 (2): 353-357.
- [2] 孙志岗, 乔小晶, 任庆国, 等. 新型吸波材料研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2013, 43 (2): 8-12.
- [3] 王涛, 张峻铭, 王鹏, 等. 吸波材料吸波机制及吸波剂性能优劣评价方法[J]. 磁性材料及器件, 2016, 47 (6): 7-13.
- [4] 肖卫要, 徐晋勇, 高成, 等. 吸波涂层材料的研究进

- 展[J]. 中国胶粘剂, 2019, 28 (5): 53-56.
- [5] DOU Y K, LI J B, FANG X Y, et al. The enhanced polarization relaxation and excellent high-temperature dielectric properties of N-doped SiC[J]. Applied Physics Letters, 2014, 104 (5): 052102.
- [6] CHEN J H, LIU M, YANG T, et al. Improved microwave absorption performance of modified SiC in the 2-18 GHz frequency range[J]. CrystEngComm, 2017, 19 (3): 519-527.
- [7] PING L, HUANG Q, MUKHERJEE A, et al. Effects of polymer matrices to the formation of silicon carbide (SiC) nanoporous fibers and nanowires under carbothermal reduction[J]. Journal of Materials Chemistry, 2011, 21 (4): 1005-1012.
- [8] 周敏, 杨觉明, 周建军. 吸波材料研究进展[J]. 西安工业大学学报, 2000, 20 (4): 296-302.
- [9] 刘东青, 程海峰, 彭亮, 等. 一种选择性红外辐射与雷达吸波兼容的隐身材料及其制备方法: 中国, CN110737035A[P]. 2020-01-31.
- [10] 李妍, 乔小晶, 任庆国, 等. 镀 NiCo/NiFe 碳纤维的制备及其吸波性能[J]. 宇航材料工艺, 2012 (3): 29-33.

(责任编辑: 曹晓霖)