

纳米雷达隐身材料研究进展

张卫东 吴伶芝 冯小云 刘剑锋 孟秀兰

(航天材料及工艺研究所 北京 100076)

文 摘 从纳米材料的结构特征出发,简单阐述了纳米材料在雷达隐身方面的应用前景及近年来国内外不同的纳米雷达隐身材料的制备方法、结构特点和雷达吸波性能。结合实际需求和国外发展动态指出了我国未来纳米雷达隐身材料的发展方向。

关键词 纳米材料,隐身材料,吸收剂,复合结构

Development of Nanometric Stealthy Materials

Zhang Weidong Wu Lingzhi Feng Xiaoyun Liu Jianfeng Meng Xiulan

(Aerospace Research Institute of Materials and Processing Technology Beijing 100076)

Abstract The application prospects of nanometric materials in radar stealth are briefly elaborated on the basis of their structural characteristics. Manufacturing methods, structure and radar absorbing properties of different nanometric radar absorbing materials are discussed in detail. From the point of practical requirements and overseas development, our internal nanometric stealth materials are also prospected.

Key words Nanometric material, Stealthy material, Radar absorbent, Composite structure

1 引言

纳米材料是指所有界面浓度很大,具有均匀纳米量度结构的固体材料。制取纳米材料时,通常先把非晶态和准晶态的金属、陶瓷和复合材料等制成纳米颗粒,然后经压实或烧结成颗粒尺寸为几十个纳米左右的块材。

纳米颗粒粉体的尺寸通常在 100 nm 以下^[1~3],这样的粉体具有小尺寸效应、表面效应(比表面积大)、量子尺寸效应和宏观量子效应^[4~7]。由于尺寸小、比表面积大,因而纳米颗粒表面原子比例高,悬挂的化学键多,增大了纳米材料的活性。大量悬挂键的存在使得界面极化,而高的比表面积造成多重散射,这是纳米材料具有吸波特性的主要原因;另一

方面,量子尺寸效应的存在使得纳米离子的电子能级分裂,分裂的能级间隔正好处于微波的能量范围(10^{-2} eV ~ 10^{-4} eV)内,这为纳米材料的吸波创造了新的吸波通道。在微波场的辐射下,原子和电子运动加剧,促使磁化,使电子能转化为热能,从而增加了对电磁波的吸收^[8];此外纳米离子具有较高的矫顽力^[9],可引起大的磁滞损耗。这三方面的共同作用使得纳米材料具有很好的吸波性能。同时,纳米粉体具有吸收峰的等离子共振频移,这种共振频移与量子尺寸有关,随量子尺寸的变化而变化^[10~12],因此可通过改变量子尺寸控制吸收边的位移,从而控制吸收频带的带宽,因此纳米材料作为吸收剂可制得宽频带吸波涂层。纳米粉体的这种结构特征使

收稿日期:2000-11-22

张卫东,1969年出生,博士,主要从事雷达吸波涂层的研究工作
宇航材料工艺 2001年 第3期

得纳米材料具有吸波频带宽、兼容性好、质量轻和厚度薄等特点,易于满足雷达吸波材料“薄、轻、宽、强”的要求。以纳米颗粒及复合颗粒为代表的吸波材料有良好的发展前景,国内外正积极开展这方面的研究。

2 国内纳米吸收剂的研究现状

国内关于纳米吸收剂的研究具有代表性的是成都电子科技大学的纳米针形磁性金属粉、多层纳米膜复合吸收剂,青岛化工学院的手征和纳米磁性金属离子的复合吸收剂以及哈尔滨工业大学的纳米亚单畴氮化铁固体超顺磁体复合吸收剂。

成都电子科技大学以液相法合成出铁基纳米针形粉,并对影响其电磁参数的诸多因素进行了研究,这种纳米铁基金属粉密度低、质量轻,其 μ 和 ϵ 在2 GHz~18 GHz范围内,通过成分变化,可以有效控制其频率特性,有利于展宽吸收频带。在此基础上,他们又对轻质多层膜复合材料进行了研究,利用化学成膜技术在中空玻璃球表面生成均匀、致密的金属镀层从而制备出了轻质颗粒膜复合吸收剂,这种吸收剂具有密度小,能充分发挥单位质量损耗层作用的显著特点,并且可以通过控制镀膜工艺和损耗层成分的方法达到有效调节镀膜颗粒复合材料的电导率、比饱和磁化强度进而调节其电磁参数,是一种轻质复合吸收剂。

青岛化工学院纳米材料研究所用纳米金属作催化剂通过聚合反应制备出导电螺旋手征吸收剂,这是一种集纳米材料、导电高聚物与螺旋手征于一体的新型轻质、宽频吸收剂。由于螺旋的作用,这种吸收剂对吸波涂层具有增强作用,具有工艺性能好、使用方便等优点。同时,对手征吸收剂与纳米磁性金属粒子的复合吸收剂的电磁及吸波性能进行了初步研究,取得了一定的进展。

哈尔滨工业大学制出了具有纳米粒度的单畴氮化铁固体超顺磁体并对超顺磁体的研制工艺也进行了探索性研究,建立了工艺研究设备。纳米氮化铁具有很高的饱和磁感应强度,而且有很高的饱和磁流密度^[3],因此纳米粒度的氮化铁超顺磁体吸收剂具有较高的磁导率。纳米氮化硅是另一种常见的纳米氮化物吸收剂,纳米氮化硅中大量悬挂键的存在形成电偶极矩,使其界面发生极化从而使纳米氮化硅在 10^2 GHz~ 10^4 GHz范围内产生强的介电损耗,

具有良好的吸波性能^[13,14]。

3 国外纳米吸收剂研究进展

纳米技术的迅速发展及纳米微粉优良的电磁吸波性能使得纳米吸收剂成为国外吸收剂研究的方向和热点。美、法、日等国都把纳米材料作为新一代隐身材料加以研究和探索。

日本用二氧化碳激光法研制出一种在厘米和毫米波段都有很好吸波性能的硅/碳/氮和硅/碳/氮/氧复合吸收剂^[15~17]。在这两种复合吸收剂中,氮原子代替了碳化硅中碳的位置,并存在着大量的自由态碳。这种复合结构中载流子浓度随氮原子含量的增加而明显提高^[16],其吸波机理为:通过碳化硅、氮化硅和自由碳等对雷达波进行吸收和衰减,利用氮化硅的含量调节整体电阻率^[3]。

法国最近研制成功的钴镍纳米材料与绝缘层构成的复合结构,由粘结剂和纳米级微屑填充材料组成,这种由多层薄膜叠合而成的结构具有很好的磁导率,其在0.1 GHz~18 GHz范围内, μ 、 ϵ 均大于6,与粘合剂复合涂层在50 MHz~50 GHz内具有良好的吸波性能^[9]。纳米薄膜或纳米多层膜材料具有优异的电磁性能,其 μ 从超高频段到微波频段可在1位、2位、3位数可调,作成纳米(单层、多层膜)结构的微米粉(球状、片状、针状)吸收剂,可在隐身材料宽频带优化设计时采用^[8]。

美国研制出的“超黑粉”纳米吸波材料,对雷达波的吸收率大于99%^[8],这种“超黑粉”纳米吸波材料实质上就是用纳米石墨作吸收剂制成的石墨—热塑性复合材料和石墨环氧树脂复合材料,不仅吸收率大,在低温下仍保持很好的韧性^[3]。

美国明尼苏达采矿和制造公司在中空玻璃球(直径 $D=20$ nm~60 nm,密度 $d=0.2$ g/cm³~0.6 g/cm³)表面利用溅射成膜技术生成多层纳米颗粒膜吸收剂,这种材料共有三层,自内向外依次是中空玻璃球、损耗层、绝缘层,当吸收剂体积填充率为60%时,所得涂层的密度为0.4 g/cm³~0.46 g/cm³。当电磁波垂直入射到2.18 mm厚涂层上时,其反射特性曲线如图1中曲线所示:吸收性能 $f=7.5$ GHz~20 GHz, $R<-5$ dB; $f=9.5$ GHz~11.5 GHz, $R<-10$ dB;当涂层厚度增至2.66 mm时,其反射特性曲线如图1中曲线所示,吸收更强、频带更宽, $f=6.5$ GHz~20 GHz, $R<-5$ dB; $f=7.5$ GHz~20

宇航材料工艺 2001年 第3期

GHz, $R < -10$ dB; $f = 8$ GHz ~ 12 GHz 和 $f = 13$ GHz ~ 19 GHz, $R < -15$ dB^[18]。填充有这种吸收剂的吸波材料具有质量轻、吸收强的优点,单个吸收粒子引入匹配设计机理,充分发挥了单位质量损耗层材料的作用^[9]。

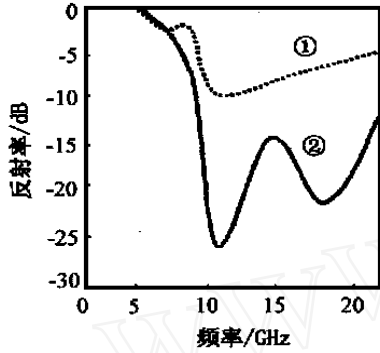


图1 轻质吸波材料反射特性曲线

Fig. 1 Reflectance curves of lightweight absorbers

国外对 Fe、Co、Ni 等纳米金属及合金吸收剂进行了广泛的研究。一般来说,采用多相复合法制出的复合粉体具有优良的吸波性能,其吸收频带宽,当吸收率大于 10 dB 时,吸收带宽可达 3.2 GHz。另外,国外对纳米金属氧化物吸收剂也进行了大量研究。具有复合结构的金属氧化物吸收剂不仅有良好的吸收雷达波性能,同时还有抑制红外辐射的功能^[3]。

4 结语

综上所述,纳米雷达隐身材料具有“薄、轻、宽、强”的特点,美、法、日等世界军事发达国家在纳米隐身材料的研究方面已取得长足的进展,目前正在研究覆盖厘米波、毫米波、红外、可见光等波段的多频谱纳米复合隐身材料。我国对纳米隐身材料的研究虽然取得了一定的成效,但应继续加大这方面的研究和投入,使我国的隐身技术迈上一个新的台阶。

参考文献

1 程戎,章明秋,曾汉民. 高分子纳米复合材料研究进展. 宇航材料工艺,1999;3:1

2 王旭,黄锐,濮阳楠. 聚合物基纳米复合材料的研究进展. 塑料,2000;4:25

3 赵东林,周万成. 纳米雷达波吸收剂的研究进展. 材料工程,1998;53(5):3~5

4 张立德,牟季美. 纳米材料科学. 第一版,辽宁科技出版社,1994:25

5 Louis Brus. Diffusion-controlled reactions: A variational formula for the optimum reaction coordinate. J. Chem. Phys., 1983; 79(18):5 563

6 Louis Brus. Electron-electron and electron-hole interactions in small semiconductor crystallite: the size dependence of the lowest excited electronic state. J. Chem. Phys., 1984; 80(16): 4 403

7 Jiang P, Jona F, Marcus P M. Phys. Rev., 1987; B36:6 336

8 张卫东,冯小云,孟秀兰. 国外隐身材料研究进展. 宇航材料工艺,2000;3:1

9 张池明. 超微粒子的化学特性. 化学通报,1993;8:20

10 Wang Y, Herron. Nanometer-sized semiconductor clusters: metal synthesis, quantum size effective and photophysical properties. J. Phys. Chem., 1991; 95(1): 52

11 Wang Y. Local field effect in small semiconductor clusters and particles. J. Phys. Chem., 1991; 95(5): 1 119

12 陈次平,任新民. 半导体超微粒子的光学特性. 化学通报,1992;9:10

13 王涛,张立德. 纳米非晶氮化硅的界面极化行为及其机制. 科学通报,1994;39(11):983

14 朱以华等. Si₂N₄ 超微粒子的 RF-CVD 合成及其介电性质. 硅酸盐学报,1996;24(3):278

15 Suzuki M et al. Synthesis of silicon carbide-silicon nitride composite ultrafine particles using a CO₂ laser. J. Am. Ceram. Soc., 1993;76(5): 195

16 Suzuki M et al. Preparation of SiC ultrafine particles by using a CO₂ laser. Seramikkusu Ronbunshi, 1989;97(4):972

17 Masaki Suzuki et al. Characterization of silicon carbide-silicon nitride composite ultrafine particles synthesized using a CO₂ laser by silicon-29 magic angle spinning NMR and ESR. J. Am. Ceram. Soc., 1995; 78(1): 83

18 Charles E B, Eric J B, Richard J K et al. Microwave absorber employing acicular magnetic metallic filaments. US Patent, 5 085 931, 1992