

纳米吸波材料研究与发展趋势

焦 桓 罗 发 周万城

(西北工业大学凝固技术国家重点实验室 西安 710072)

摘 要 综述了纳米材料在雷达波吸收领域的应用,对纳米金属与合金吸收剂、纳米陶瓷吸收剂、纳米氧化物吸收剂、纳米导电聚合物、纳米金属与绝缘介质复合吸收剂等几种纳米吸收剂的研究及应用进行了较为详细的描述,比较了各种吸收剂的特点和应用背景,提出了纳米雷达波吸收剂的发展趋势。

关键词 纳米材料,雷达波吸收剂

Development and Prospect of Nano Radar Absorber

Jiao Huan Luo Fa Zhou Wancheng

(State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University Xi'an 710072)

Abstract In recent years, nano materials have been paid more attention by worldwide researchers. The nano materials exhibit great foreground in field of radar absorber. Characterization and application of nano metal-alloy absorber, nano ceramic absorber, nano oxide absorber, nano conductive polymer and nano metal-insulating composite absorber are described. Prospective development for the nano materials in radar absorber is presented on the basis of comparison of various absorbers performance and application background.

Key words Nano material, Radar absorber

纳米材料是指材料组分的特征尺寸在纳米量级(1 nm ~ 100 nm)的材料,纳米晶粒和由此产生的高浓度晶界是它的两个重要特征^[1]。纳米材料独特的结构使其自身具有量子尺寸效应、宏观量子隧道效应和界面效应等独特的性质,金属、金属氧化物和某些非金属材料的纳米级超微粉在细化过程中,处于表面的原子数越来越多,高浓度晶界和晶界原子的特殊结构导致材料在电磁场的辐射下,原子、电子运动加剧,促使磁化,使电磁能转化为热能,从而增加了对电磁波的吸收^[2~4]。纳米材料的发展为吸波材料又提供了新的可能性,纳米材料由于本身颗粒小、比表面积大、表面原子比例高、悬挂键多、界面极化和多重散射是其重要的吸能波机制,量子尺寸效应使纳米粒子的电子能级发生分裂,分裂的能级间隔

正处于微波的量级范围(10^{-2} eV ~ 10^{-5} eV),从而有可能成为新的吸波通道^[5]。纳米雷达波吸收剂作为一种新型的吸收剂已成为各国研究的热点,国内外研究的纳米雷达波吸收剂主要有纳米金属与合金吸收剂^[6]、纳米氧化物吸收剂、纳米陶瓷吸收剂、纳米导电聚合物、纳米金属与绝缘介质复合吸收剂等几种类型。

1 纳米金属与合金吸收剂^[6]

纳米金属与合金用做吸收剂主要是采取多相复合的方式,以 Fe、Co、Ni 等纳米金属与纳米合金粉体为主,其吸波性能优于单相纳米金属粉体,吸收率大于 10 dB 的带宽可达 3.2 GHz,谐振频率点的吸收率均大于 20 dB,其吸波性能的主要影响因素是复合体中各组元的比例、粒径、合金粉的显微结构。

收稿日期:2001-05-29

焦桓,1968年出生,博士,主要从事 CVD 技术、纳米材料及吸波材料的研究工作

2 纳米氧化物吸收剂

纳米氧化物吸收剂有单一氧化物和复合氧化物两类,单一氧化物纳米吸收剂主要有 Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 、 ZnO 、 Co_3O_4 、 TiO_2 、 NiO 、 MoO_2 、 WO_3 等纳米微粉,复合氧化物纳米吸收剂主要有 LaFeO_3 、 $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_3$ 等复合氧化物纳米微粉。复合氧化物纳米吸收剂不仅吸波性能优异,而且还兼有抑制红外辐射等数种功能^[7]。

铁氧体纳米颗粒与聚合物制成的复合材料能有效吸收和衰减电磁波及声波,减小反射和散射,被认为是一种极好的隐身材料。铁氧体纳米复合材料多层膜在 7 GHz ~ 17 GHz 频率段的峰值吸收为 -40 dB,小于 -10 dB 的频宽为 2 GHz。铁氧体纳米颗粒与聚合物复合材料在外国国防领域已进入实际应用阶段,但在其制造过程中,如何保证铁氧体纳米颗粒均匀地分布在聚合物中,这个关键性问题至今尚未见资料透露。

3 纳米陶瓷吸收剂

陶瓷吸收剂的应用可追溯到二战期间,那时德国已把炭黑加入到机翼的夹层中来吸收雷达波^[8],纳米石墨常被用来与纳米碳化硅等吸收剂复合使用,纳米石墨作为吸收剂还可用来制作石墨—热塑性复合材料和石墨—环氧树脂复合材料,美国在这一方面取得了很大进展,这些材料在低温下仍保持良好的韧性。

除炭黑外,纳米陶瓷粉体是陶瓷类吸收剂的一种新类型,主要包括纳米碳化硅粉、纳米氮化硅粉、纳米 Si/C/N 及纳米 Si/C/N/O 等。纳米陶瓷类吸收剂的显著特点是在高温下抗氧化性较强,吸波性能稳定。

碳化硅作为吸收剂已经进行了较多的研究^[9],碳化硅不仅具有一定的吸波性能、能减弱发动机红外信号,而且具有耐高温、相对密度小、韧性好、强度大、电阻率高等优点,是国外发展很快的吸收剂之一,纳米碳化硅吸收频率带更宽,对毫米和厘米波段都有很好的吸收效果。纳米碳化硅和磁性纳米吸收剂(如纳米金属粉等)复合后,吸波效果还能大幅度提高,纳米量级的碳化硅晶须加入到纳米碳化硅吸收剂中其吸波效果也有很大提高。

纳米 Si/C/N 吸收剂的主要成分为碳化硅、氮化硅和自由碳,还可能存在 $\text{SiC}_{(4-x)/4}\text{N}_{x/4}$ 、 $\text{SiC}_{(4-x)/4}$

$\text{N}_{x/3}$ ($x=0\sim 4$) 等物质^[10],即在 SiC 中由 N 替代了 C 的位置,这样使 SiC 中的载流子浓度明显增大,从而有效提高其吸波性能。Si/C/N 纳米吸收剂主要依靠碳化硅、自由碳、 $\text{SiC}_{(4-x)/4}\text{N}_{x/4}$ 、 $\text{SiC}_{(4-x)/4}\text{N}_{x/3}$ 等吸收和衰减雷达波,而氮化硅的含量可以调节整体电阻率。Si/C/N/O 纳米吸收剂的主要成分为 SiC、 Si_3N_4 、 $\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$ 、 SiO_2 和自由碳。最近的研究表明 Si/C/N 和 Si/C/N/O 纳米吸收剂不仅在毫米波段,而且在厘米波段也有很强的吸波性能。

纳米氮化物吸收剂主要有氮化硅和氮化铁等,纳米氮化硅在 $10^2\text{ Hz}\sim 10^6\text{ Hz}$ 有比较大的介电损耗,纳米氮化硅的这种强介电损耗是由于界面极化引起的,界面极化则是由悬挂键所形成电偶极矩产生的^[11~13]。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^[13],有可能成为性能优良的纳米雷达波吸收剂。

4 纳米导电聚合物吸收剂

作为吸收剂的导电聚合物主要有聚乙炔、聚吡咯、聚噻吩和聚苯胺等,它的结构特点是具有电子共轭体系。有研究表明,当导电聚合物处于半导体状态时对微波有较好的吸收,其机理类似介电损耗型吸波材料的机理。这类化合物作为吸收剂主要是利用其共轭电子的线性或平面构型与高分子电荷转移给络合物的作用设计导电结构,这些导电聚合物的纳米微粉具有非常好的吸波效果,与纳米金属吸收剂复合后吸波效果更好。

5 纳米金属膜与绝缘介质复合吸收剂

制备具有纳米结构单元的块体吸波材料是当今吸波领域发展的重要方向之一。将金属沉积到绝缘介质膜上制成的吸收剂,金属膜和绝缘介质膜的厚度均保持在纳米量级,再用这种吸收剂制成吸波材料对吸波性能会有大的改善。法国科学家研制成功的一种宽频微波吸收涂层,这种吸波涂层的具体制法是采用真空沉积法将钴镍合金与碳化硅沉积在基体上,形成超薄电磁吸收夹层结构,将超薄夹层结构粉碎为碎屑与粘结剂混合即可。涂层由粘结剂和纳米级微屑填充材料构成,填充微屑由 3 nm 超薄不定形磁性薄膜及 5 nm 绝缘层堆叠而成,绝缘层可以是碳或无机材料。据报道,这种由多层膜叠合而成的夹层结构具有很好的磁导率,其 μ 和 μ' 均大于 6 (在 0.1 GHz ~ 18 GHz)。与粘结剂复合而成的材料

宇航材料工艺 2001 年 第 5 期

的电阻率高于 5 cm , 在 50 MHz 至 50 GHz 具有良好吸波性能^[2]。

近年来国外对多层纳米颗粒膜应用于电磁波吸收材料领域开展了较多研究。将纳米量级的金属膜沉积到绝缘介质球上, 例如以 $3 \mu\text{m}$ 左右玻璃球为载体, 镀上以 Ni、Al、W 等为损耗层的薄膜 (10 nm 左右), 体积充填率为 50% 左右时, 其中金属损耗层的质量分数为 0.01%。当采用球形多层颗粒膜厚度为 2 mm 时, 在 8 GHz ~ 18 GHz 频率范围, 吸收率可达到 10 dB, 厚度为 2.5 mm 时, 在 8 GHz ~ 18 GHz 频率范围, 吸收率为 20 dB。采用这种颗粒膜, 可以克服金属、铁氧体材料密度大的缺点, 充分发挥单位质量损耗作用, 对单个吸收颗粒引入了匹配设计机理。

在为数众多的纳米吸收剂中, 性能比较突出的是美国研制的“超黑色”纳米吸波材料, 据称对雷达波的吸收可达 99%^[2]。

纳米雷达波吸收剂作为一类新型吸收剂正处于研制阶段, 纳米吸收剂有潜力实现吸波性能的更大突破。针对吸波材料要求“薄、轻、宽、强”等性能方面的更高要求, 磁性纳米微粒、纳米颗粒膜和多层膜有可能成为新一代实用型吸收剂, 应该对多层膜的生产技术、颗粒膜的电设计、电磁波和多层膜颗粒之间的相互作用、最优成分与结构设计等进行深入研究, 使其尽快进入应用阶段, 使纳米雷达波吸收剂研究取得长足进展。目前纳米雷达波吸收剂研究的总体发展趋势主要集中在以下几个方面: 首先要开发新的具有吸波性能的纳米粉体; 其次要研究具有吸波性能的自组装纳米材料; 再次是要在现有纳米吸波粉体的基础之上, 采取各种方式将不同种类的粉体复合, 使其性能得到大的改善。

6 结束语

纳米雷达波吸收剂作为一类新型的吸收剂以崭

新的姿态出现于吸收剂研究前沿, 吸引了为数众多的各国科学家致力于这一领域的探索, 是一个极有可能取得重大突破的方向, 纳米微粒、纳米微粒膜和多层膜无不展示了巨大的应用前景; 针对雷达波吸收剂在性能方面的要求, 纳米材料完全有可能成为这一领域的新型实用材料。

参考文献

- 1 张中太, 林元华, 唐子龙, 张俊英. 纳米材料及其技术的应用前景. 材料工程, 2000; (3): 42 ~ 48
- 2 秦嵘, 陈雷. 国外新型隐身材料研究动态. 宇航材料工艺, 1997; (4): 17 ~ 19
- 3 邱慧中. 国外巡航导弹用材料及工艺. 宇航材料工艺, 1996; 26(2): 7 ~ 12
- 4 林鸿益. 纳米隐身材料. 目标特征信号控制技术, 1995; 5(5): 2 ~ 5
- 5 刘列, 张明雪, 胡连成. 吸波涂层材料技术的现状和发展. 宇航材料工艺, 1994; 24(1): 1 ~ 5
- 6 赵东林. 耐高温雷达波吸收剂的制备及其性能研究. 西北工业大学博士学位论文, 1999
- 7 焦桓. 用化学气相沉积法制备吸收剂的探索研究. 西北工业大学博士学位论文, 1999
- 8 Paol F O. Microwave Absorbers. Microwave Journal, 1993; (11): 88 ~ 94
- 9 Lederer P G. An introduction to radar materials. AD - A169895
- 10 Suzuki M, Hasegawa Y, Aizawa M. Characterization of silicon carbide-silicon nitride composite ultrafine particles synthesized using a CO₂ laser by silicon 2p magic angle spinning NMR and ESR. J. Am. Ceram. Soc., 1995; 78(1): 83 ~ 89
- 11 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 ~ 985
- 12 朱以华, 朱宏杰, 韩今依. 氮化硅超微粒的 FR - CVD 合成及其介电性能. 硅酸盐学报, 1996; 24(3): 278 ~ 284
- 13 蔡树芝, 牟季美. 纳米非晶氮化硅键态结构 X 射线径向分布函数研究. 物理学报, 1992; 411(10): 1 620 ~ 1 623

双机并用椭圆切割机

该机可完成长轴不大于 190 mm 的任意椭圆加工, 加工速度为 $18 \text{ mm}^2/\text{min}$, 粗糙度 $Ra = 1.6 \mu\text{m} \sim 2.5 \mu\text{m}$, 解决了过去只能用多段圆弧连接加工出近似椭圆的问题, 填补了用 3B 指令切割机加工精确椭圆的空白。

该机加工原理是用两台切割机控制台做特定的程序连接, 一台完成 $x = a \cos \theta$ 、 $y = b \sin \theta$ 的运算和控制, 另一台完成 $a/b = x/y$ 的运算和控制, 并使两公式通过主机实现同步叠加。本成果经生产使用效果理想, 有推广应用前景。

· 李连清 ·

— 11 —