

纳米复合镍粉雷达吸波涂层研究

吕艳红

(北京钢铁研究总院,北京 100081)

文 摘 采用机械化学法将纳米 SiC 包覆在镍粉表面制备复合吸波材料,将该材料喷涂在基体上制备吸波涂层,并研究了 SiC 在复合材料中的含量变化对涂层吸波性能的影响。研究表明, SiC 含量为 10% 时,纳米复合涂层的吸波性能最佳。与镍粉吸波涂层相比,该纳米复合涂层中频段的吸波性能明显提高,发射率小于 -5 dB 的带宽由 7 GHz 增加到 10.4 GHz,涂层最高吸收值达到 -23.4 dB。

关键词 超细镍粉,纳米复合,吸波涂层

Nano-Composite Nickel Powder for Radar Absorbing Coating

L üYanhong

(China Iron & Steel Research Institute Group, Beijing 100081)

Abstract The nano-composite radar absorb materials (RAM) composed of nickel powder and nano-SiC were prepared by using mechanical and chemical method with the thermal spraying technology. The materials were sprayed on the body to make absorb coatings, then the effect of the varied of SiC amount in the nano-composite RAM on the absorption property was studied. The results show that when the SiC is about 10% in the nano-composite RAM by weight, the absorption property of the coating is the best. Compared with the nickel powder coating, the absorption property in middle frequency band is improved greatly and when the bandwidth with the reflectivity lower than 5 dB is increased from 7 GHz to 10.4 GHz, the lowest reflectivity can reach -23.4 dB.

Key words Superfine nickel powder, Nano-composite, Absorbing coating

1 前言

随着新一代武器装备的应用,传统吸波材料已不能满足隐身技术要求,开发高性能的雷达吸波材料成为各国军事技术领域中的重大课题。纳米材料因其独特的结构使其具有许多特殊的物理效应,从而使材料呈现奇特的力学、电学、磁学等特性,在雷达吸波材料方面具有非常诱人的前景^[1]。

研究发现,如将纳米与微米粒子制成复合颗粒,可有效避免单一纳米粒子的团聚问题,还可充分发挥纳米粒子的优异性能,提高其使用效果。这种复合颗粒除具有纳米粒子所具有的表面效应、体积效应及量子尺寸效应外,还具有复合协同多功能效应。这种方法大大降低了纳米材料的使用成本,提高微米材料的使用性能和附加值,为打开纳米材料的应用前景开辟了一条新途径^[2]。

本文以微米级还原镍粉为核心粒子,采用机械化学法将纳米 SiC 与镍粉复合,制备纳米复合吸波材料。应用热喷涂工艺制备吸波涂层,研究了 SiC 含量对涂层吸波性能的影响。

2 实验

2.1 纳米复合吸波材料制备

2.1.1 材料

还原镍粉及 SiC 的化学成分见表 1、表 2。

表 1 超细镍粉的化学成分

Tab 1 Chemical composition of nickel powder

%(质量分数)

Co	Fe	Mn	Mg	Cu	Zn	Ca	C	Ni
0.03	0.008	0.001	0.01	0.004	<0.001	0.013	0.03	余量

收稿日期:2009-05-11;修回日期:2009-06-09

作者简介:吕艳红,1976年出生,硕士,主要从事热喷涂材料及工艺的研发工作。E-mail:lyh7680@126.com

http://www.yhclgy.com 宇航材料工艺 2009年 第6期

— 29 —

表 2 SiC的化学成分

Tab 2 Chemical compositions of SiC
%(质量分数)

SiC	游离硅	游离碳	总氧含量	氯含量
>99	<0.2	<0.6	<1.0	<0.25

2.1.2 复合吸收材料制备

将 SiC粉末的解聚、镍粉的分散和两种粉末的复

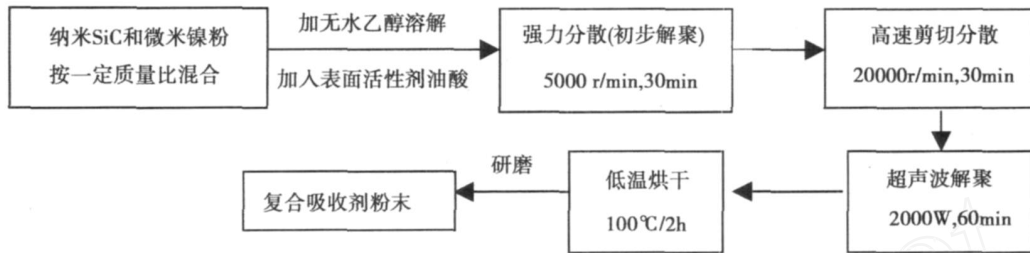


图 1 纳米复合吸波材料制备工艺

Fig 1 Preparation of nano-composite absorbing material

2.2 涂层制备及吸波性能测试

以镍粉和 1#~3#粉末纳米复合吸波剂作为热喷涂材料,采用等离子喷涂工艺将材料喷涂在 180 mm ×180 mm ×5 mm的铝板上,依次标记为 0#, 1#, 2#和 3#涂层。涂层表面没有弯曲、收缩等缺陷。

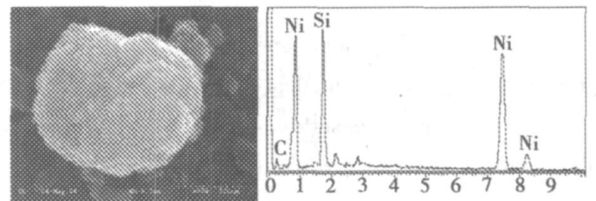
涂层吸波性能测试,由北京航空材料研究院按 GJB2038—94进行。

3 结果与讨论

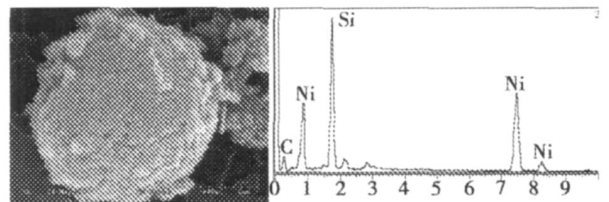
3.1 纳米复合吸波材料微观形貌及成分

纳米复合吸波材料的微观形貌及能谱见图 2。由图 2(a)可见,镍粉表面附着有少量的 SiC颗粒,粉末的微观形貌和化学成分改变不大;图 2(b)中镍粉表面被完全包覆,其粉末微观形貌和化学成分改变较大;图 2(c)中镍粉表面完全被包覆,未参与包覆的纳米颗粒又团聚成较大的颗粒。由此可知,随着纳米粉含量的增大,纳米复合吸波剂的表面形貌及化学成分逐渐发生变化,微米镍粉表面由部分包覆到完全包覆,当纳米粉含量过多时,未参与包覆的纳米颗粒又团聚成较大的颗粒。吸波剂微观形貌和化学成分的不同,必然会引起材料吸波性能的不同。

合同时进行,被分散的微米、纳米粒子在运动中相互碰撞,使得纳米 SiC 粒子与镍粉粒子相互作用而结合,制备工艺见图 1。分别制备 SiC质量分数为 5%、10%、15%的纳米复合粉末,记为 1#、2#和 3#粉末,采用扫描电镜和能谱分析仪对复合粉末形貌及成分进行分析。



(b) 2#粉末



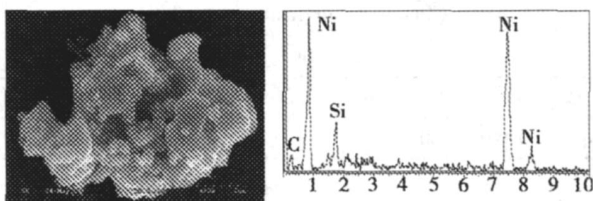
(c) 3#粉末

图 2 纳米复合吸波材料微观形貌和能谱分析图

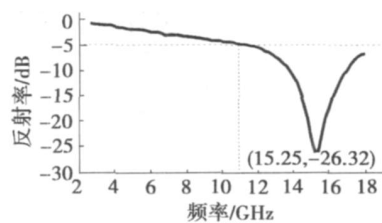
Fig 2 SEM and EDS of nano-composite RAM

3.2 涂层吸波性能

涂层吸波性能测试结果见图 3。表 3 列出了吸波性能的主要参数。



(a) 1#粉末



(a) 0#

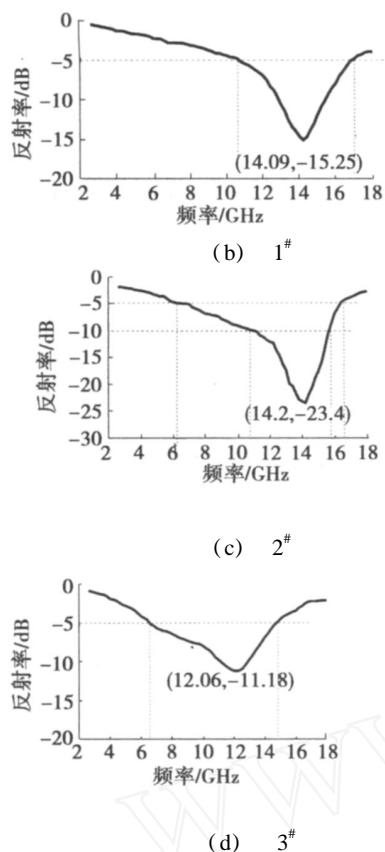


图 3 涂层在 2~18 GHz 的吸波曲线

Fig 3 Reflective-frequency curve of coating in 2 - 18 GHz

表 3 涂层吸波性能主要参数

Tab 3 Parameters of absorption properties for coating

涂层	反射率 < -5 dB 的带宽 /GHz	吸收峰 值 /dB	峰值频 率 /GHz	涂层厚 度 /mm	涂层面密 度 /kg·m ⁻²
0 [#]	11~18	-26.32	15.25	1.02	2.72
1 [#]	10.5~17	-15.26	14.09	1.03	2.49
2 [#]	6.4~16.8	-23.40	14.20	1.02	2.25
3 [#]	6.6~14.8	-11.18	12.06	1.01	2.11

由图 3、表 3 可知,镍粉涂层在高频吸波性能好,低中频吸波性能差,经纳米包覆后,涂层中频段的吸波性能有了一定程度的改善。与 0[#]相比,2[#]试样反射率低于 -5 dB 的频段由 11~18 GHz 向中频移至 6.4~16.8 GHz,吸收峰值频率向中频移动;1[#]涂层吸波性能无明显变化;3[#]涂层中频段吸波性能有明显改善,但高频吸波性能下降。由此可知,SiC 在复合吸波材料中质量分数为 10% 时,涂层的吸波性能最佳。

根据电磁场理论,涂层的吸波性能主要受三个因素影响^[3~5]:第一,是入射波在涂层表面由于波阻抗不匹配引起的反射,理想情况是空气与涂层介质两者波阻抗相等,实际很难满足该条件,只能尽量减少两者的差距,降低涂层反射率;第二,是涂层介质对电磁波的损耗,电磁损耗越大,吸波性能越好;第三,是由

金属基体反射的电磁波与涂层表面的反射波相互干涉的影响,这两路反射波干涉的结果由层厚和频率的相位差决定。对于不同的吸波涂层及不同的频率、层厚,这三个因素对反射率 R 的影响也不相同。

要想使金属基体的反射波与涂层表面的反射波相互干涉而消耗,须满足以下条件:涂层厚度为 $\lambda_n/4$ 的奇数倍^[6] (λ_n 为涂层内电磁波波长),由 $f \cdot \lambda_n = c$ (光速)得出 2~18 GHz 各点频率对应的最小干涉层厚度见表 4。

表 4 吸波涂层在 2~18 GHz 的干涉层厚度

Tab 4 Thicknesses of interference coating in 2 - 18 GHz

入射频率 /GHz	对应波长 /mm	干涉层厚度 /mm
2	150	37.5
4	75	18.8
6	50	12.5
8	37.5	9.38
10	30	7.5
12	25	6.25
14	21.4	5.35
16	18.8	4.69
18	16.7	4.18

本文涂层厚度为 1 mm 左右,不满足干涉条件,不会出现因干涉损失而降低反射率的情况。

对单层吸波涂层,要使电磁波入射到涂层表面时的反射率为 0,需满足波阻抗的匹配条件:

$$\mu_r = \mu_0, \quad \epsilon_r = \mu_r \quad (1)$$

式中, ϵ_r 、 μ_r 分别为吸波材料复介电常数 ϵ_r 的实部和虚部, μ_r 、 μ_i 分别为吸波材料复磁导率 μ_r 的实部和虚部。实际应用中单一材料的复介电常数和复磁导率之间存在着较大的差异。

电磁波在涂层中的衰减与吸波材料的电磁参数也有着非常密切的关系,其关系用公式表示为^[3]:

$$= [(f/c) 2\mu_r^{-1/2} [(1 + \tan^2 \delta_M + \tan^2 \delta_E + \tan^2 \delta_M \tan^2 \delta_E)^{1/2} + \tan^2 \delta_M \tan^2 \delta_E - 1]^{1/2}] \quad (2)$$

式中, α 为电磁波在涂层中的衰减, $\tan \delta_E = \mu_i / \mu_r$, $\tan \delta_M = \epsilon_i / \epsilon_r$ 。

由此可见,对于一定厚度的单层吸波涂层,吸波材料的电磁参数 ϵ_r 和 μ_r 是影响涂层吸波性能的主要参数,而材料的电磁参数与颗粒大小、微观晶体类型、成分、形貌及制备工艺密切相关。因此通过表面改性的方法改变材料的微观形貌和成分可以改善其电磁参数。

本文中镍粉是以磁损耗为主的磁性吸波材料,材料的磁导率高;SiC 是以介电损耗为主的吸波材料,材料的介电常数大,两种材料复合制得的纳米复合吸

波剂可弥补单一吸波材料仅依靠磁损耗或介电损耗而吸收电磁波的不足。与镍粉相比,复合材料的介电常数和磁导率之间的差值缩小,降低了涂层与空气的波阻抗不匹配性,减少了电磁波在涂层表面的反射,同时介质损耗角正切 $\tan \delta = \mu''/\mu'$ 增大,也增加了电磁波在涂层中的衰减。

通过表面改性的方法,粉末的微观形貌也发生了较大的变化,尤其是对于 2[#]涂层来讲,微米粒子表面被纳米粒子完全包覆 [图 2 (b)],大大增加了复合材料的界面,这就使电磁波在行程中被反复的吸收、反射、折射、散射,形成复杂的折射、反射波干涉叠加现象,增强了涂层对电磁波的衰减作用。1[#]涂层中纳米粉末含量较少,镍粉表面未完全包覆,化学成分和表面状态变化很小,对改善波阻抗的匹配性和增加材料界面都无明显效果,涂层吸波性能改善不明显。3[#]涂层中 SiC 的质量分数提高至 15%,达到了改善涂层波阻抗匹配性和增加材料界面的效果,但是它的吸波性能却不如 2[#],可能是纳米粉含量过多,未参与包覆的纳米颗粒又团聚成较大的颗粒,这些较大的 SiC 颗粒分散在吸波涂料中,降低了吸波性能。

由以上分析可知,纳米复合镍粉涂层的吸波性能优于镍粉涂层,但是纳米 SiC 的含量存在一个最佳值。一般认为,当微米粉表面被纳米粉完全包覆且涂料中闲散纳米颗粒最少时的纳米粉含量为最佳^[7]。对于纳米复合镍粉吸波材料,纳米 SiC 质量分数为 10% 时其吸波性能达到最佳,涂层的吸波性能得到明显改善。反射率小于 -5 dB 的带宽由 7 GHz 增加到 10.4 GHz,中频吸波性能有较大改善,最高吸收值达到 -23.4 dB。这表明镍粉的吸波性能可以通过采用与纳米 SiC 复合的方法得到改善。但是也应看到,吸波性能的改善难免出现顾此失彼的现象,很难在整个频段内都得到改善,单层纳米复合吸波涂层的吸波峰值出现在高频段,要想使其吸收峰值向中频段平移,获得所希望的带宽,仅仅依靠单层吸波涂层较难

实现,采用双层或多层涂层复合的方法,对涂层结构进行合理设计,有望在较大程度上改善涂层的吸波性能。

4 结论

(1)制备纳米复合镍粉吸波材料时,纳米 SiC 的质量分数在 10% 左右时,镍粉的表面被完全包覆且闲散纳米颗粒最少,复合吸波涂层对镍粉涂层吸波性能的改善最佳;

(2)纳米复合涂层反射率小于 -5 dB 的带宽范围为 6.4 ~ 16.8 GHz,最高吸收值为 -23.4 dB,与镍粉吸波涂层相比,中频吸波性能明显改善。

要想使涂层具有理想的吸波性能,仅依靠单层纳米复合镍粉涂层较难实现,可考虑采用涂层复合的方法,合理调配各参数之间的关系,达到改善吸波性能的目的。

参考文献

- 1 孟凡文,杨觉明,严文. 纳米隐身复合材料. 西安工业学院学报, 1999; 19 (4): 324 ~ 328
- 2 李凤生,杨毅等. 纳米/微米复合技术及应用. 北京:国防工业出版社, 2002: 8 ~ 16
- 3 Cloete H, Bingle M. Absorption of electromagnetic waves at microwave frequencies by synthetic chiral and racemic materials. International Journal of Applied Electromagnetic and Mechanics, 1998; 38 (2): 103 ~ 114
- 4 张秀成,赵爱军. 网格图形法在涂层吸波材料电磁参数调整中的应用. 磁性材料及器件, 2002; 33 (5): 8 ~ 10
- 5 Kmori Hideki, Konishi Yoshihiro. Wide band electromagnetic wave absorber with thin magnetic layers. IEEE Transactions on Broadcasting, 1994; 40 (4): 219 ~ 222
- 6 赵东林,周万城. 涂敷型吸波材料及其涂层结构设计. 兵器材料科学与工程, 1998; 21 (4): 58 ~ 62
- 7 王国强,章平,邹勇. 纳米复合高分子电磁参数及吸波性能的研究. 华中科技大学学报, 2001; (7): 23 ~ 26

(编辑 吴坚)