综述·专论

薄型多层雷达吸波材料结构设计与发展

朱立群，古璟
（北京航空航天大学材料科学与工程学院，北京 100083）

［摘 要］ 根据雷达吸波材料厚度薄、质量轻、吸收频带宽、吸波能力强（薄、轻、宽、强）的发展目标，介绍了多层雷达吸波材料的研究现状和几种宽频吸波结构的设计方法。分析讨论了采用多层结构的雷达吸波材料，以及依据阻抗匹配原理提高材料吸波性能的可能性。提出将多层吸波材料和宽频吸波结构结合得到一种涂层型的薄型（20μm左右）多层雷达吸波材料的研究思路，建立了薄型多层雷达吸波材料由多层结构、表面为离散式分布的斑点、内部再穿插一些非吸波薄膜的材料模型。初步试验表明这种薄型多层雷达吸波材料可以提高吸波性能。

［关键词］ 薄型；多层结构；涂层；结构设计；雷达吸波材料
［中图分类号］TB34；TQ637 ［文献标识码］A ［文章编号］1001－3660(2007)03－0049－04

Structure Design and Development of Thin Multilayer RAM

ZHU Li-qun, GU Jing
(School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

［**Abstract**］ According to the development direction-thin thickness, light density, broad frequency band and intensive results of RAM, recent studies of multilayer RAM and designing methods of several broadband absorbing structures were discussed. RAM with multilayer structure and possibility to improve absorbing ability according as impedance matching principle were analyzed. Thin multilayer radar absorbing material integrating the multilayer RAM and the broadband structures is studied to enhance absorbing properties of RAM, and the novel structure of the thin multilayer RAM will produce a new field in the study of RAM. This multilayer structure is made of disperse spot on the surface, non-absorbing film inserted into inner. It indicates that the structure can improve absorbing ability according to primary experiments.

［**Key words**］ Thin type; Multilayer; Coating; Structure design; Radar absorbing materials (RAM)

0 引 言

20世纪30年代随着无线电技术特别是雷达的问世，与之对应的雷达隐身材料也出现了，如荷兰科学家研制的雷达吸波材料，以及日本学者开发的铁氧体材料-硅钢片吸波材料。20世纪50年代，为了既能获取情报又能隐蔽飞行，美军在SR-1型“黑鸟”侦察机上采用了隐身吸波涂层。20世纪60年代中期以后，美、苏、日、英、法等国相继开发先进的隐身技术。20世纪80年代，美国的多种隐身作战飞机已开始装备部队，如F-117A、B-2，并在局部战争中发挥了巨大作用。20世纪90年代以来，随着各种隐身飞机（如F-22、S-37）、隐身导弹、隐身舰船、隐身坦克等隐身兵器的投入使用，隐身技术迅速成为全球军事领域的研究热点。隐身技术中，由于雷达侦察是目前用得最多、最有效的侦察手段之一，雷达隐身成为一种重要的隐身技术。使用雷达吸波材料是雷达隐身中最常用的手段之一，厚度薄、质量轻、吸收频带宽、吸波能力强（薄、轻、宽、强）的吸波材料是雷达吸波材料发展的总体目标。

吸波材料中，多层雷达吸波材料因可设计自由度大、易于展宽频带、降低面密度、适宜于工程应用、理论相对成熟等特点得到了广泛研究。依据阻抗匹配原理设计的多层吸波材料，在吸波性能上较传统的单层吸波材料有较大提高，但普遍因为涂层厚，质量大而影响了武器装备的使用性能；如果单一地减小吸波材料的厚度，将会导致雷达波来不及损耗就反射出吸波体之外，起不到吸收雷达波的作用。因此，在降低多层吸波材料厚度的同时，使其具有较强的雷达波吸收能力，并满足一定的工程应用需求，是目前吸波材料研究领域中亟待解决的一个难点。

基于上述问题，对多层吸波材料、几种宽频吸波结构和薄型多层吸波材料与结构进行了分析讨论，为雷达吸波材料的结构设计和研究提出一些有益建议，突出强调了吸波材料“薄型”的思想，对薄型多层吸波材料结构的设计有一定的指导作用。

1 多层吸波材料的发展

进行多层复合设计时，常用模型为阻抗变换层和损耗层匹

［收稿日期］2007－01－27
［作者简介］朱立群（1955－），男，山东菏泽人，教授，博士生导师，主要从事材料表面功能性涂镀层方面相关的研究工作。

配组成的双层复合吸波结构。为了展宽频带可采用3～5层涂层,随电磁损耗介质含量的变化,形成层间阻抗渐变的多层涂层结构,在各涂层之间、表层与空气之间达到最大可能的阻抗匹配,减小入射雷达波在吸波材料表面的反射,使雷达波较易进入吸波材料内部被损耗吸收。

多层涂层吸波材料中,以纳米多层膜吸波材料和多层匹配涂层吸波材料方面的研究较多。

1.1 纳米多层膜吸波材料

众所周知,提高材料吸波性能的一个关键是提高吸波剂颗粒的电磁性能。传统的铁氧体、羰基铁类吸波剂因良好的吸波效果已被应用于工业生产,但存在密度大、频带较窄等缺点。结合阻抗匹配理论,对涂层中吸波剂颗粒进行表面改性,充分发挥单位质量损耗层材料的作用[1],制备出改性的纳米多层膜吸波剂,是研制新型吸波材料的一条有效途径。

近年来国内外对纳米多层膜吸波剂应用于雷达吸波材料领域开展了相应研究,取得了很多成果,从相关文献的报道可以看出真空沉积法(溅射法)和化学法制备技术比较普遍[2]。美国明尼苏达采矿和制造公司[3]在中空玻璃球(直径 $D=20\sim60$nm)表面利用溅射成膜技术生成纳米多层膜吸波剂,这种材料共有3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0.4～0.46g/cm^3。涂层厚度为2.66mm,电磁波垂直入射时,8～12GHz的反射率在-15dB以下。Sung-SooKima等[4]用化学镀的工艺在空心陶瓷基体上沉积了Co和Co-Fe薄膜,制备的吸波剂不仅具有很低的密度,还具有很强的吸波能力。通过调整薄膜中Co含量可改变吸波剂的吸收峰和频谱效应,其涂层的厚度为1.5mm时的吸波效果如图1所示。法国学者[5]成功研制了一种宽频吸波纳米级微屑,这种纳米微屑是用真空沉积法制成超薄夹层结构后粉碎而得的,由超薄不定形磁性薄层及绝缘层堆叠而成,磁性层厚度为3nm,绝缘层厚度为5nm,绝缘层可以是碳或无机磁性材料。这种纳米多层膜叠合而成的夹层结构具有很好的微波磁导率,在0.1～10GHz的频带内,磁导率的实部和虚部均大于6,与粘结剂复合的吸波涂层在50MHz～50GHz频率范围内具有良好的吸波性能。

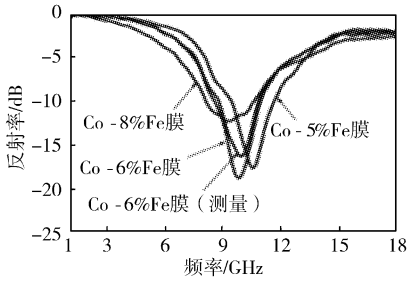


图1 空心陶瓷镀Co-Fe薄膜的吸波效果[4]

Figure 1 Reflection loss determined in the rubber composites containing the microspheres coated with Co-Fe thin film

国内邓联文等[6]用磁控溅射工艺制备了$CoFeZr_2$-SiO_2多层膜。用谐振腔法测得$CoFeZr_2$(20nm)/SiO_2(4nm)10多层膜试样在2GHz时$\mu'=121$,$\mu''=147$。陶冶等[7]配制了钡铁氧体PSS(poly sodium 4-styrenesulfonate)溶胶,并利用静电自组装的方法在普通玻璃板上组装了A/B型纳米多层膜,考察了纳米多层膜的吸波性能。结果表明,总层数为30个双层,总厚度为200nm左右的纳米多层膜有显著的吸波效应,在8～18GHz频率范围内,最大吸波率达到16.85dB。朱来宾等[8]利用磁控溅射制备了磁性多层膜微波吸波剂Fe/SiO_2。多层膜Fe层的厚度为435nm,SiO_2层厚度为50nm,经过优化设计,粉体吸波剂样品反射率小于-4dB的带宽为13.84GHz,厚度为1.01mm;短切纤维吸波剂样品反射率小于-4dB的带宽为12.56GHz,反射率小于-10dB的带宽为6.64GHz,厚度为1.47mm。董星龙等[9]用直流电弧等离子体法在甲烷和(H_2+Ar)气氛下分别制备包覆层为多层碳膜和Ni_2O_3膜的两种纳米镍粒子。测试结果表明,碳包覆纳米镍粒子在2～18GHz频率范围内电磁参数大小搭配及频率响应特性优于氧化物包覆纳米粒子。除了上面的溅射法、静电自组装法和直流等离子体法外,国内对纳米多层膜吸波剂的研究还采用了其它如化学沉积[10-11]、离子注入[12]等方法,并取得了一定的吸波效果。

改性纳米多层膜吸波剂对吸波效果有大的改善作用,实现了吸波材料的轻质高强,有望发展为一种实用性的高效吸波材料。而从目前的研究看,大部分的纳米多层膜吸波剂尚未在吸波材料中应用,还处于研究阶段,应用性能需进一步改进,有待深入研究。

1.2 多层匹配涂层吸波材料

多层匹配涂层吸波材料具有可以控制各层的厚度、各层中吸波剂的种类、比例等,而且调节电磁参数也相对容易,实现阻抗匹配方便,易于展宽频带等优点。日本电气公司[13]研制的双层吸波材料的吸收层由铁氧体粉末和黄铜短纤维、环氧树脂组成,变换层由铁氧体和环氧树脂组成。与单一吸收层相比,X波段$R<-20$dB的带宽从0.5GHz增加到4GHz,提高了8倍。

关于多层匹配,崔晓冬等[14]设计了硫化锑作为面层(匹配层)填料,炭粉作为吸波层填料的双层吸波材料。研究表明匹配层自身几乎无耗波作用,与底层叠加可极大提高吸波材料的吸波能力,$R<-10$dB的带宽为7.2GHz。何燕飞等[15]设计了3层平板吸波体,面层由二氧化钛材料组成,底层为铁、钴等强磁损耗体,中间层由磁性微粉与碳纤维组成,3层吸波体在8～18GHz频带的反射率在-8dB以下,叠层涂层总厚度为1mm,电磁波反射率结果如图2所示。罗洁等[16]将不同温度条件下制备的碳团簇型材料细粉以一定比例与环氧树脂混合,然后在模具中固化成型,其中组合方式为1000℃(变换层)+600℃(吸收层)的隐身涂层的吸波能力尤佳。该材料厚度为(1.85±0.1)mm,密度为1.16g/cm^3,在8～12.4GHz频率范围内最小反射率达-30dB,其中反射率小于-10dB的吸收带宽近60%。王智慧等[17]用化学镀镍层和吸波涂层结合的方法,对单层、双层和3层涂层的吸波性能进行了实验研究。结果表明双层复合涂层的吸波性能较单层在低频段有较大的提高,3层复合涂层的吸波性能优于双层,镀镍层对提高吸波性能作用明显。吴键等[18]通过表层微孔发泡以及内层喷涂碳纤维工艺,以玻璃钢复合成型为基础制备了超薄吸波结构板材。这种吸波结构板材的平均厚度为4～5mm,在8mm(30～40GHz)波段及3mm(70～110GHz)波段,材料均有小于-8dB的吸收衰减,平均在-11dB以下,最好可达到-15dB。

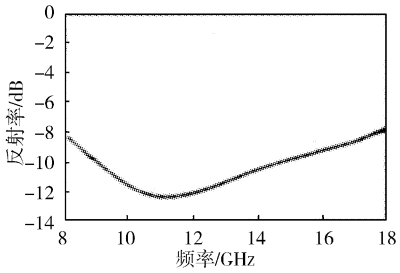


图 2　3 层平板吸波体的反射率[15]

Figure 2 Reflectivity of three-layered sheet absorber

从上述研究看，与单层相比，多层涂层吸波材料吸波频带变“宽”，吸波能力增“强”，涂层厚度有减“薄”的趋势，因此，是一种很有发展潜力的雷达吸波材料。

但目前存在的问题是：多层匹配吸波材料的报道大都是采用计算机编程的方法，从理论和模型的角度来设计吸波涂层结构[19-21]，多用 2 层或 3 层叠加，实验研究中采用 4 层以上的设计较少，因此，许多试验研究还有待深入。

2　宽频吸波结构

除了以上介绍的多层吸波材料各层阻抗渐变的设计外，还可从结构的角度设计吸波材料以达到宽频吸收的效果。

2.1　分块结构

分块设计主要利用不同区域吸波材料具有不同的吸波效果，电磁波入射时，在吸波材料表面产生不同频率或振幅的反射电磁波相遇，会发生干涉而抵消大部分电磁波这一原理而设计的一种吸波结构。

如图 3 所示，将平板试样分成两个区域分别填充两种吸波材料，并且分为两层，同一吸波材料在两层的浓度可以不一样，通过调节各层的浓度也可以调节平面试板的吸波性能[22]。

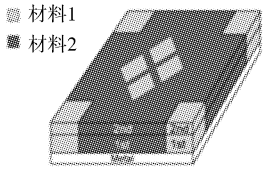


图 3　分块设计法吸波涂层的几何结构[22]

Figure 3 Geometrical structure of sub-division absorbing coating

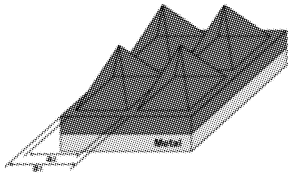


图 4　锥形吸波涂层的几何结构[23]

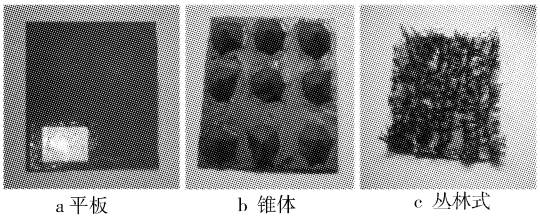
Figure 4 Geometrical structure of pyramidal absorbing coating

2.2　立体结构

立体结构指立体式构型如锥体状、丛林状等结构，这种结构可以使电磁波在立体式构型中产生多次震荡损耗，从而吸收电磁波。

锥形（方锥或圆锥）设计方法是一种典型的立体结构设计方法。如图 4 所示，制备方法是在一个同轴铸模中将磁性粉末和高聚物粘合剂定模注入[23]，待固化成型后取出即制成。

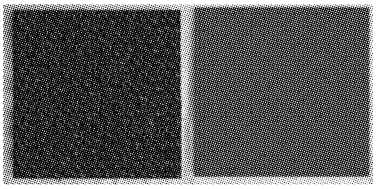
胡传炘等[24]在伪装网表面结构的设计过程中，对平板、锥体和丛林式三种几何结构进行对比，三种几何结构如图 5 所示，发现在相同条件下，立体式结构的吸波效果要远远优于平板式，而立体式结构中，丛林式吸波效果最好，2 ~ 18GHz 频带内，最大衰减值达 18.24dB，且对应频率移向低频区，5.75 ~ 18GHz 频带内实现了大于 8dB 的衰减量。这种立体式结构可以增加电磁波在吸收材料中的反射次数，从而提高吸波效果。



a 平板　b 锥体　c 丛林式

图 5　三种结构的试板[24]

Figure 5 The plate of three kinds of structure



a 非连续体试样　b 热压致密试样

图 6　不同成型试样照片[25]

Figure 6 The photographs of different molding samples

段玉平等人[25]设计了一种非连续体吸波平板，将炭黑造成颗粒直径为 3mm，高度为 3 ~ 5mm 的圆柱体，并制成两种试样，一种将颗粒用粘接剂包裹后浇铸成型制备非连续体试样，另一种在模具中热压为致密试样，进行了对比试验，两种试样的照片如图 6 所示。测试结果表明，不同厚度（6mm、10mm）的非连续体试样反射率均超过 -6dB；当厚度达到 20mm 时，其反射率在 8 ~ 18GHz 频率范围内超过 -15dB。而不同厚度的热压致密试样除几个吸收峰值外，反射率都低于 -10dB。

2.3　多孔结构

多孔结构对提高吸波材料的电磁波吸收效果也有一定作用。赵彦波等人[26]对发泡型聚苯乙烯（EPS）填充普通硅酸盐水泥制备的水泥基多孔复合材料的吸波性能进行了研究，结果表明：EPS 的体积分数为 60%，样品厚度为 20mm 时反射率最小，在 8 ~ 18GHz 范围内，小于 -10dB 的带宽达 6GHz。

从以上各种宽频吸波结构可以看出，无论是分块结构、立体结构，还是多孔结构，都基于一个思想，即将电磁波引入吸波材料内部通过一系列的反射吸收过程损耗。将这些宽频吸波结构引入吸波材料，不仅可以在沿吸波材料的厚度方向缓慢改变有效阻抗以获得最小反射，同时能够降低吸波材料的密度，达到“轻”的要求。

3　薄型多层吸波材料与结构

通过对上述各种多层吸波材料的分析，可以看出多层结构提高了吸波材料的吸波效果，但同时由于吸波材料吸收雷达波的能力和材料本身厚度有一定关系，厚度薄的情况下吸波效果不明显，因此，现有多层吸波材料一般厚度较大，会导致实际应用中使用性能的降低。从介绍过的几种宽频结构可以看出，离散式结构，如丛林式、非连续体等对吸波材料吸波能力的提高有

较明显的作用。设想将多层涂层吸波材料和宽频结构相结合，在降低吸波材料厚度的同时引入某种离散式结构强化吸波能力，设计制备一种薄型多层吸波材料与结构。

结合上述构想，我们以多层涂层吸波材料和表面离散式结构为依据，设计了一种薄型多层吸波结构，见图7。最表面是某种离散式结构，内部为多层涂层吸波材料叠加，将每层厚度控制在20μm左右，d是这种吸波材料的总厚度。按照这种设计进行了初步试验。

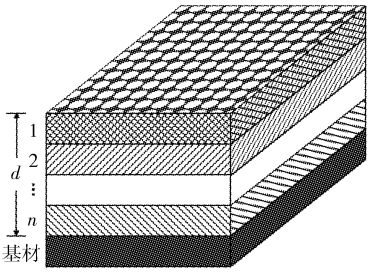


图7 薄型多层吸波材料结构示意图

Figure 7 The structure sketch map of the thin multilayer RAM

以薄型吸波材料和表面离散式结构为出发点，采用一种由薄型涂层吸波材料与金属斑点组成的复合结构。这种结构体现了吸波材料尽可能地薄，并且依据宽频吸波结构的吸波原理，在吸波材料表面设计一种斑点分布的离散式结构，研究这种离散斑点分布对材料吸波性能的影响。

图8和图9就是依据这种结构设计的薄型吸波材料照片。图8是薄型涂层吸波材料与金属镀斑组成的复合材料照片，图9为薄型涂层吸波材料与某种粉末组成的离散式圆形斑点的复合材料照片。

矢量网络分析仪的初步测试表明，单层涂层吸波材料对雷达波无吸收效果，在涂层表面复合金属镀层后吸波能力提高，而且镀层在涂层表面成斑点分布时的吸波效果比涂层表面完全覆盖镀层后的吸波效果好，表明这种离散式斑点分布结构对提高吸波能力有一定作用，可以通过斑点分布的设计和进一步试验提高这种离散式结构的吸波效果。这种镀层金属的厚度只有几个微米，对吸波材料厚度增加的影响不大。

另外，我们认为在涂层表面复合粉末组成的离散式圆形斑点有可能提高吸波效果，提高程度可能与圆斑的直径和间距大小有关。由于离散式的圆斑分布在表面形成了阻抗匹配层以及粉末的疏松结构对电磁波起到了一定的“诱入”作用而提高吸波效果。这些都有待于进一步试验研究。

初步试验发现，在测量图8和图9所示的吸波材料吸波效果时，下方放置一块相同大小的基体材料（聚乙烯薄膜），对吸波材料的吸波性能有所提高；还发现若在上述多层薄膜中穿插某些无吸波能力的薄膜（如聚乙烯薄膜等），形成“空隙”结构，也可以改进多层薄膜材料的吸波能力。

目前试验的这种复合吸波材料厚度太薄（10～20μm），虽可在一定程度上提高吸波效果，但还需要加强这种结构的优化试验验证，来进一步提高这种结构的吸波性能。

总之，我们认为将薄型多层吸波材料和离散式表面结构相结合，以及在多层吸波材料中穿插“空隙”的设计结构，可以改进吸波材料的吸波性能；并且通过各层薄型涂层（20μm左右）的叠加，也可以实现这种薄型多层吸波材料吸波性能的提高；通过改进多层之间的匹配设计和离散式斑点的分布结构，最终希望得到一种能够满足实际工程应用的薄型多层吸波材料与结构。

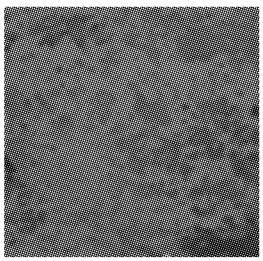


图8 薄型涂层吸波材料与镀斑复合材料照片

Figure 8 The photograph of thin RAM and plating spot composite material

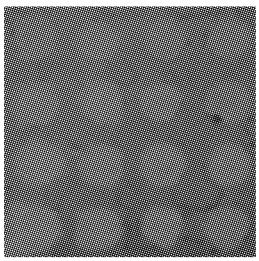


图9 薄型涂层吸波材料与某种圆形斑点复合材料照片

Figure 9 The photograph of thin RAM and certain roundness spot composite material

4 结 语

将多层涂层吸波材料中多层涂层匹配设计和宽频结构设计相结合，多层涂层匹配设计依据阻抗匹配原理通过调整各层中吸波剂的种类及含量改变各层的电参数，宽频结构设计采用离散式表面结构或在各层中加入“空隙”结构，将各涂层厚度控制在一个较薄的范围内（20μm左右），制备一种涂层型的薄型多层吸波材料，为多层吸波材料与结构设计找到了一条新思路，可望改进现有吸波材料的吸波效果并减小涂层厚度。

初步试验结果表明，这种涂层型的薄型多层吸波材料吸波能力较单一涂层有一定改进。通过调整各层的电磁参数、各层之间的相互次序等，使吸波材料的吸波效果达到较好的工程应用需求，以及进一步拓展这种薄型多层吸波材料的工程应用范围，是多层吸波材料的发展方向。

[参 考 文 献]

[1] 张池明. 超微粒子的化学特性[J]. 化学通报,1993,(8):2

[2] 李世涛,乔学亮,陈建国,等. 纳米复合薄膜吸波材料的研究进展[J]. 材料工程,2006,(增刊1):469-475

[3] 张卫东,吴伶芝,冯小云,等. 纳米雷达隐身材料研究进展[J]. 宇航材料工艺,2001,(3):1-3

[4] Sung-Sookima, Seon-Taekima, Joon Moahnb, et al. Magnetic and microwave absorbing properties of Co-Fe thin films plated on hollow ceramic microspheres of low density [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2004, 271:39-45

[5] Kumurdjian Pierre. High frequency electromagnetic radiation absorbent coating comprising a binder and chips obtained from a laminate of alternating amorphous magnetic films and electrically insulating[P]. EP Pat:91400462.7,1991.

[6] 邓联文,江建军,冯则坤,等. 高磁损耗型纳米多层膜研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2004,32(11):51-53

[7] 毕云飞,陶冶,刘培英. 自组装纳米多层膜吸波性能和机理的研究[J]. 金属热处理,2004,29(10):21-24

（下转第73页）

多领域发挥越来越大的作用。

[参 考 文 献]

[1] Aisenberg S, Ronald. Chabot. Ion-beam deposition of thin films of diamond like carbon[J]. Journal of Applied Physics, 1971,42(7):2953-2959
[2] 朱纪军,左敦稳,王珉. 过滤式阴极电弧沉积类金刚石薄膜工艺研究[J]. 航空精密制造技术,1998,34(6):23-26
[3] 李芳,刘东平,甲翠英. α-C:H 薄膜组成及结构[J]. 真空与低温,2001,7(2):85-88
[4] 李刘合,夏立芳,张海泉,等. 类金刚石碳膜的摩擦学特性及其研究发展[J]. 摩擦学报,2001,21(1):76-79
[5] 郑伟涛. 薄膜材料与薄膜技术[M]. 北京:化学工业出版社,2004. 47-107
[6] Christophe Wyon, Rene Gillel, Louis Lambard. Properties of amorphous carbon films produced by magnetron sputtering[J]. Thin Solid Films, 1984,122(3):203-206
[7] Deshpandey C V, Bunshah R F. Plasma-assisted deposition techniques for hard coatings[J]. Vacuum,1990,41(9):2190-2195
[8] Morihiro Okada, Takumi Kono, Koki Tanaka. Properties and structure of carbon films prepared by ion-beam deposition[J]. Surface and Coatings Technology,1991,47(1):233-243
[9] Chr. Weissmantel. Reactive film preparation [J]. Thin Solid Films, 1976,32(1):11-18
[10] 袁镇海,邓其森,罗广南,等. 类金刚石膜的制备、性能和应用[J]. 材料科学与工程,1994,12(4):32-38
[11] Simone Anders, Daniel L Callahan, George M Pharr, et al. Multilayers of amorphous carbon prepared by cathodic arc deposition[J]. Surface and Coatings Technology,1997,94(10):189-194
[12] Whitmell D S, Williamson R. The deposition of hard surface layers by hydrocarbon cracking in a glow discharge[J]. Thin Solid Films,1976, 35(2):255-261
[13] Nyaiesh A R. Target profile change during magnetron sputtering[J]. Vacuum,1986,36(6):307-309
[14] 吕反修. 超硬材料薄膜涂层研究进展及应用[J]. 热处理,2004,19(4):1-6
[15] 郭立军,许念坎,刘正堂,等. 极板负偏压对类金刚石薄膜性质的影响[J]. 材料研究学报,1994,8(1):67-70
[16] 朱怀义. 类金刚石碳膜的制备和性能及其在工具和模具中的应用[J]. 新技术新工艺,2005,(8):25-28
[17] 李敬财,何玉定,胡社军. 类金刚石薄膜的应用[J]. 新材料产业,2004,124(3):39-42
[18] 张敏,程发良,姚海军,等. 类金刚石膜的性质和制备及应用[J]. 表面技术,2006,35(2):4-7
[19] 满卫东,汪建华,王传新,等. 金刚石薄膜的性质、制备及应用[J]. 新型炭材料,2002,17(1):62-70
[20] Jones M I, McColl I R, Grant D M, et al. Effect of substrate preparation and deposition conditions on the preferred orientation of TiN coatings deposited by RF reactive sputtering[J]. Surface and Coatings Technology,2000,132(2):143-151
[21] Vercammen K, Meneve J, Dekempeneer E, et al. Study of RF PACVD diamond-like carbon coatings for space mechanism applications[J]. Surface and Coatings Technology,1999,121(11):612-617

(上接第52页)

[8] 朱来宾,李永清,程海峰,等. 磁性多层薄膜微波吸收剂的制备[J]. 航空材料学报,2005,25(1):36-39
[9] 董星龙,钟武波,左芳,等. 镍/碳复合纳米粒子的制备及电磁性能研究[J]. 功能材料,2005,4(36):519-521
[10] 杜光旭,王旭辉,涂国荣,等. 陶瓷粉末的镍钴复合镀工艺研究及其吸波性能的测试[A]. 中国化学会第二届隐身功能材料学术研讨会论文集[C]. 山东:中国化学会,2004. 195-200
[11] 刘家琴,吴玉程,薛茹君. 空心微珠表面化学镀 Ni-Co-P 合金[J]. 物理化学学报,2006,22(2):239-243
[12] 李岳,陶冶,刘培英,等. 纳米表面改性纤维增强树脂基复合材料吸波性能及机理研究[J]. 材料工程,2004,(1):46-48
[13] 胡传炘. 隐身涂层技术[M]. 北京:化学工业出版社,2004. 125-126
[14] 崔晓冬,李长茂,刘顺华. 双层雷达波吸收平板吸波特性研究[J]. 材料开发与应用,2006,21(4):8-10
[15] 何燕飞,龚荣洲,李享成,等. 多层复合吸波材料的制备及其吸波性能[J]. 无机材料学报,2006,21(6):1449-1453
[16] 罗洁,徐国亮,蒋刚,等. 双层结构碳团簇型微波隐身材料的吸波性能研究[J]. 功能材料,2004,33(4):401-402
[17] 骆武,胡传炘. 涂层与镀层复合雷达波吸收性能研究[J]. 材料工程,2005,增刊1:128-131
[18] 吴键, 李兵, 张焰. 超薄吸波结构材料的制备[J]. 中国塑料,2003,17(7):45-48
[19] 唐宏,赵晓鹏,邢丽英,等. 多层吸波材料的数值优化设计[J]. 微波学报,2003,19(3):55-58
[20] 袁杰,肖刚,曹茂盛. 用遗传算法计算设计多薄层雷达吸波材料的程序实现技术[J]. 材料工程,2005,(6):13-16
[21] 亓家钟,陈倍京,陈利民. 多层吸波材料反射损失计算机模拟[J]. 金属功能材料,2006,13(2):33-36
[22] 王科委,时家明,樊祥. 宽频带吸波材料的设计方法[J]. 兵器材料科学与工程,2005,29(6):42-45
[23] Park Myung joon, Kim Sung soo . Control of complex permeability and permittivity by air cavity in ferrite-tubber composite sheets and their wide-band absorbing characteristics [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1999,35(5):3181-3183
[24] 孙娜,胡传炘. 伪装网表面工艺与结构的研究 [J] . 中国表面工程,2004,(4):46-48
[25] 段玉平,刘顺华,管洪涛,等. 非连续体吸波平板的设计制备及吸波机理分析[J]. 复合材料学报,2006,23(3):37-43
[26] 赵彦波,刘顺华,管洪涛. 水泥基多孔复合材料吸波性能[J]. 硅酸盐学报,2006,34(2):225-228