·综述·

国外隐身材料研究进展

张卫东　　冯小云　　孟秀兰
（航天材料及工艺研究所　北京　100076）

文　摘　简单回顾了从二次世界大战至今几十年间,国外隐身材料的发展历程;系统综述了国外在陶瓷材料、导电高分子材料、晶须材料、纳米材料、手征材料等新型隐身材料研究方面所取得的进展;从耐高温隐身材料、智能隐身材料、等离子体隐身三个方面入手,重点介绍了国外近年来在隐身材料领域的最新进展;并且指出了隐身技术未来的发展方向。

关键词　隐身材料,耐高温隐身材料,智能隐身材料,等离子体隐身,陶瓷材料,导电高分子材料

Status and Development of Foreign Study on New Stealthy Materials

Zhang Weidong　　Feng Xiaoyun　　Meng Xiulan
（Aerospace Research Institute of Materials and Processing Technology　Beijing　100076）

Abstract　The development of stealthy materials in the past several decades from the Second World War up to now is compendiously reviewed in this paper. Recent study of new stealthy materials, such as ceramic materials and conducting polymer composites etc, is summarized from three areas of thermal resistance, smart and plasma stealthy materials, and developing trend of the stealthy materials is also predicted in this paper.

Key words　Stealthy materials, Thermal resistance stealthy materials, Smart stealthy materials, Plasma stealth, Porcelain stealthy materials, Electric conduction polymeric materials

1　引言

在入侵巴拿马、海湾战争以及刚刚结束的入侵南联盟的战争中,美国的 F—117 战斗攻击机执行了几千架次的空袭任务,却只损失了一架战机;而 B—2 隐身轰炸机从美国本土长途奔袭到南联盟执行轰炸任务却未受丝毫威胁。创造这一奇迹的原因之一就是隐身技术的应用最大限度地保护了战机,隐身技术在提高现代兵器的突防能力方面正发挥着越来越重要的作用。基于此,本文系统综述了国外隐身技术的发展历程,重点介绍了国外近年来的最新进展,并且指出了隐身技术未来的发展方向。

2　国外隐身材料发展历程

国外隐身技术及材料研究始于第二次世界大战期间,起源在德国,发展在美国并扩展到英、法、俄罗斯及日本等发达国家。经过半个多世纪的发展,成绩斐然。

从 50 年代起,美国开展隐身技术研究,经过 20 多年的发展,70 年代开始研制隐身飞机,80 年代隐身飞机装备部队并投入使用。现已装备的 F—117A 隐形攻击机、B—2 战略轰炸机以及新问世的 F—22 先进战术隐身战斗机均采用了不同类型的隐身材料[1]。俄罗斯的 S—37 隐身战斗机也已问世。这些

收稿日期:1999 - 11 - 29
张卫东,1969 年出生,博士,主要从事雷达吸波涂层的研究工作

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

雷达隐身战机的相继问世标志着国外隐身技术已进入工程发展阶段。

目前,世界上正在研制的第四代超音速歼击机,其机体结构采用复合材料、翼身融合体和吸波涂层,使其真正具有了隐身功能,而电磁波吸收型涂料、电磁屏蔽型涂料已开始在隐身飞机上涂装。美国、俄罗斯等国新一代空对地,地对空导弹的隐身正朝着轻质、宽频带吸波、可喷涂、热稳定性良好的隐身材料方向发展。

3 国外隐身材料研究最新进展

目前,国外在进一步提高与改进传统隐身材料的同时,正致力于多种新材料的探索。美国采用改性的有机硅树脂以研制出寿命达 15 年的隐身涂料被认为是目前最有前途的产品。

近年来晶须材料、纳米材料、陶瓷材料、手征材料、导电高分子材料等新材料逐步应用到雷达波和红外隐身材料中,使涂层更加薄型化、轻量化、适应性更强[2]。英国谢菲尔德大学研制出一种屏蔽雷达吸收剂,如固定电容,这种吸收剂的厚度和质量可以降低;在电容可变的情况下,通过对外部信号的控制,可对吸收剂进行调谐[3]。为了提高这种吸收剂的性能,他们在这种吸收剂的表面覆盖一高介电常数蒙皮,通过这种方法,可以在通常的入射角下增加吸收剂的反射率与带宽之乘积,也可使吸收剂在曲面入射角下对垂直和平行方向的偏振光有相同的吸收带宽[4]。为了拓宽涂层材料的吸收频带,美国在现有的 Dallenbach 涂层材料上加一频率选择性表面,形成一种新的复合吸波涂层,这种新的复合吸波涂层的性能大大优于原有的涂层材料[5]。印度 Roorkee 大学用六角钡基铁氧体作吸收剂,橡胶作粘结剂制备出单层吸波涂层,这种吸波涂层很薄,吸收频带宽,在各个频带范围内的吸收大于 10 dB[6]。

美国 Syracuse 大学研制出一种吸波材料,在基材上覆盖基层相匹配的绝缘层,这些绝缘层的介电常数能够使穿过基材任何角度的入射波折射到正常的入射角范围内。这种吸收剂可在高于正常雷达入射角范围内保持最小的反射率,从而避免了能量散射。这种被散射的能量极有可能被附近的雷达发现,因而大大提高了高于正常雷达入射角范围下的隐身能力[7]。

随着先进红外探测器、米波雷达、毫米波雷达、激光雷达等先进探测设备的相继问世,隐身材料正朝着能够兼容米波、厘米波、毫米波、红外、激光等多波段电磁波隐身的多频谱隐身材料方向发展。

国外先进的多功能隐身材料在可见光、近红外、远红外、8 mm 和 3 mm 五波段一体化方面取得较大进展。美国研制的多功能隐身涂层在毫米波 30 kHz～100 kHz 的吸收率为 10 dB～15 dB,中红外 3 μm～5 μm 辐射率为 0.5～0.9,远红外波段 8 μm～14 μm 辐射率为 0.6～0.95,可见光的光谱特性与背景基本一致。德国研制的半导体多功能隐身材料在可见光范围有低反射率,在热红外波段有低辐射率,在毫米波段有高吸收率。这种涂层可同时对抗可见光、近红外、激光、热红外和雷达的威胁。

除了常见的隐身手段外,隐身织物(伪装网)的研究和应用也方兴未艾。因为隐身织物价格低廉、使用方便、工艺稳定、易于批量生产且可实现多频谱隐身功能,国际上正大力发展此种材料。瑞典的 Diab Barracuda AB 公司,其伪装产品具有国际先进水平。德国的 Pusch Gunter 发明了一种伪装网,在雷达波段、可见光隐身及红外波段(0.4 μm ～2.5 μm, 3 μm ～5 μm, 8 μm ～14 μm)产生逼近环境(树木)的辐射。美国研究厘米波、毫米波兼容可见光、近红外、热红外多频谱隐身伪装网,预期 2000 年后投入使用。

隐身材料的质量大小将直接影响武器的有效载荷量、机动性及速度等性能,因此隐身材料正向"薄、轻、宽、强"的方向发展。为满足这一要求,目前世界军事发达国家正积极开展多晶铁纤维吸波材料和纳米吸波材料的研究。

纳米材料因其具有极好的吸波特性,同时具备了宽频带、兼容性好、质量小和厚度薄等特点,美、俄、法、德、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。金属、金属氧化物和某些非金属材料的纳米级超细粉在细化过程中处于表面的原子数越来越多,增大了纳米材料的活性。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。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 %。法国研制出一种宽频微波吸收涂层,这种吸收涂层由粘结剂和纳米级微粉填充材料组成。这种由多层薄膜叠合而成的结构具有很好的磁

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

导率,在 50 MHz～50 GHz 内具有良好的吸波性能[8]。目前世界军事发达国家正在研究覆盖厘米波、毫米波、红外、可见光等波段的纳米复合材料[1]。法国最近研制成功的 CoNi 纳米材料与绝缘层构成的复合结构,其在 0.1 GHz～18 GHz 范围内,μ'、μ''均大于 6。与粘合剂复合涂层在 50 MHz～50 GHz 频率范围内具有良好吸波性能。纳米薄膜或纳米多层膜材料具有优异的电磁性能,其 μ 超高频到微波频段可在 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)作吸收剂,用于隐身材料宽频带优化设计。

新型的多晶铁纤维吸收剂是一种轻质的磁性雷达波吸收剂[8,9],这种多晶铁纤维为羰基铁单丝,直径 1 μm～5 μm,长度 50 μm～500 μm,纤维密度低,结构为各向同性或各向异性。通过磁损耗或涡流损耗的双重作用来吸收电磁波能量,因此,这种吸收剂可在很宽的频带内实现高吸收率,质量减轻 40 %～60 %,克服了大多数磁性吸收剂存在的严重缺点。据报道,吸收剂体积占空比为 25 %,厚度为 1 mm 的多晶铁纤维吸波涂层,在 2 GHz～5 GHz 频率范围内吸收率大于 5 dB,在 5 GHz～20 GHz 宽频带内吸收率可达 10 dB。目前,GAMMA 公司用这种新型吸收剂制成的吸波涂层已应用于法国国家战略防御部队的导弹和飞行器,同时正在验证用于法国下一代战略导弹弹头的可能性。

为适应未来战场对隐身技术的更高要求,目前,世界发达国家正在积极地探索新的隐身机理,开发新的隐身材料。

3.1 耐高温吸波材料

通常,飞行器和武器的某些特殊部位如头锥、发动机进气道和喷嘴等部位需要耐高温、耐高速热气流的冲击,为满足这些特殊部位的隐身要求,目前国内外正在积极开发耐高温吸波材料[10]。主要的耐高温吸波材料包括:陶瓷纤维、陶瓷基复合材料和 C/C 材料。

近几年,国外先后开发了一系列的陶瓷纤维,这些连续的陶瓷纤维主要有:SiC 纤维、Al_2O_3 纤维和 Si_3N_4 纤维等,它们都象棉纱一样可以缠绕编织成各种织物[10]。目前,国外发展最快的耐高温陶瓷纤维吸波材料是 SiC 纤维,其强度大、韧性好、热膨胀系数低、密度与硼纤维相当、耐高温性能特别好,能够在 1 200 ℃下长期工作。另一方面,SiC 纤维具有吸波特性,电阻率在 1 Ω·cm～155 Ω·cm 之间,当它的电阻率在 10 Ω·cm～153 Ω·cm 之间时,具有最佳的吸波性能。此外,SiC 纤维还可以抗 γ 射线辐射以及高速粒子流和电子流的冲击,与各种基体(金属基、树脂基和陶瓷基)的浸润性、复合性好。

陶瓷材料具有耐高温、质量轻的优点,同时具有吸波功能,已被广泛用作耐高温吸波材料。据报道,美国用陶瓷基材料制成的吸波材料和吸波结构,加到 F—117 隐身飞机的尾喷管后,可以承受 1 093 ℃的高温。法国 Alcole 公司采用陶瓷复合纤维制造出了无人驾驶隐身飞机。这种陶瓷复合纤维由玻璃纤维、碳纤维和芳酰胺纤维组成,在这种复合纤维中加入 TiO_2 后可使其耐高温 1 200 ℃,其主要特征是具有特有的电阻率(0～10 Ω·cm),这使其具有最佳的吸波特性[11]。

C/C 材料也是一种优良的耐高温吸波材料。C—C 键是稳定的化学键,它的气化温度高,高温下线膨胀系数低,导热性好,其强度随温度的升高而增大[12];同时,C/C 材料具有优良的吸波性能,它能很好地减少红外和雷达波信号,是耐高温吸波材料的另一重点[10]。在惰性气体下,C/C 材料的耐高温可达 3 000 ℃;但在有氧条件下,只能耐 400 ℃,需要涂上 SiC 抗氧化涂层来提高其抗氧化性从而提高其耐高温能力。用 C/C 材料制造发动机进气道,可以吸收进入进气道的雷达波。

为了提高雷达吸波涂层的耐高温性能,国内外在开展上述结构吸波材料研究的同时,对耐高温吸收剂也进行了大量的研究。陶瓷材料因其具有优良的力学性能和热物理性能,特别是耐高温、强度高、蠕变低、膨胀系数低、耐腐蚀性强和化学稳定性好,能满足隐身的要求,已被广泛用作吸收剂。陶瓷材料中应用最广的吸收剂是 SiC,这种吸收剂的密度小,吸收性也很好[13,14]。

3.2 智能隐身材料

智能材料与结构系统是近年来发展起来的新型的高科技材料[15～21]。将具有独特物理、化学性质的材料作传感器,在具有传感和驱动功能的材料中加上控制功能,便成为智能材料[15～18]。这种材料由传感器、控制器和执行器三部分组成。传感器用来感知背景环境的电磁辐射图像,控制器根据来自

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

传感器的信号,按照预先设定的函数关系发出需要执行的指令,然后通过执行器将自身的电磁辐射图像进行调整使其与背景相融合。智能材料具有感知功能(信号感受功能或传感器功能)、信息处理功能(处理器功能)、自我指令并对信号作出最佳响应的功能(作动器功能或执行功能)[20]。目前这种材料已被广泛应用于军事与航空领域。同时这种智能型材料所具有的感知功能、信息处理功能、自我指令并对信号作出最佳响应的性能,为其实现隐身功能提供了可能性[18,20]。

美国是最早从事这一领域研究的国家,军方和一些政府机构直接参与了这项工作。目前,美国奥本大学和空军怀特实验室首先提出了直升机旋翼采用智能隐身材料的设计方案,其隐身能力可提高 20 倍[21]。西屋公司正在从事智能飞机蒙皮的研究,这种技术用嵌入蒙皮的共型系统来代替天线和黑箱。与常规的飞机雷达天线相比,共形系统的优点是它可以安装在飞机上象翼尖这样通常难以安装的部位,通过定向操作达到隐身的目的。而常规飞机的雷达天线在 360°范围内操作,向外发射的电磁信号容易泄漏而被发觉。这种飞机蒙皮具有降低飞机被电子探测的功能。通过将电磁发射元件(如雷达和通讯线路)替换成无源且定向性装置从而提高了飞机的作战隐身性能[19]。宾西法尼亚大学等正在从事智能蒙皮天线技术,这种技术用宽频、多功能的共兴天线安装在飞行器的表面以达到隐身目的,这种技术有较宽的吸收频带[18]。

光纤智能隐身是智能隐身的另一重点。美国空军于 1985 年首先提出了光纤智能蒙皮隐身的概念和计划,目前,美国空军正致力于采用光纤传感器作隐身飞机灵巧蒙皮的研究[16]。在这种光纤灵巧蒙皮内嵌入保型雷达、导航设备、目标搜索和各种传感器元件,使光纤数字电路遍布飞机机翼内。这种战斗机不仅可以隐身,而且灵敏度高、易操纵并可自动校正飞行。

智能材料不仅对雷达波具有隐身作用,对可见光和声波也具有很好的隐身效果。譬如,在聚氨酯分子中嵌入高活性的丁二炔链段,在适当的条件下,丁二炔聚合成聚丁二炔,形成具有自由电子的共轭结构,从而改变了整个材料的颜色和光强度。在此基础上,在材料系统中加入传感器和控制器,使用带有 SiC 光探测器的窄带通滤波器可以识别环境的波长和光强度,再将输出信号经模拟数字转换器传输给微处理器进行识别和数据处理,并发出控制指令以改变材料的颜色和色强度,从而达到隐身的效果[18]。另一方面,美国海军军械实验室正在研究利用智能隐身材料制造发动机罩,以减少噪声信号,从而达到对声波进行隐身的目的 。

智能隐身材料的应用降低了电子系统本身的质量和成本,智能光纤代替传统的铜线减少至少 80 %的质量。用智能纤维增强的聚合物作隐身的结构材料,不仅降低了雷达的散射截面,同时把飞机的质量也减轻了 50 %[19]。

3.3 等离子体隐身

俄罗斯目前已经研制开发出一种全新的等离子体隐身技术[22]。这种利用等离子进行隐身的原理是:在飞机或导弹上需要隐身的部位加上等离子体发生器。等离子体发生器中有放射性元素金属铯以及气体发生器。通过下面的两步电离过程从而在飞行器表面形成一等离子云从而达到隐身的目的:

$$N_2 + O_2 \xrightarrow{\text{高温}} 2N + 2O \xrightarrow{\text{高温}} 2N^+ + 2O^+ + 2e^-$$

当雷达波与等离子体相互作用时,产生部分雷达波被吸收和绕射现象,急剧降低了雷达接收机的反射信号,使得荧光屏上的信号消失,从而达到隐身的目的。其隐身效果随雷达波波长的增加而增加,这一点与涂层隐身材料相反,涂层隐身材料的隐身效果随波长的增加而降低。这种隐身技术不仅解决了吸波涂层厚度和质量方面的局限性,具有吸波频带宽、吸收率高、使用简单、使用时间长等优点,适合强反射部位的隐身。

4 结语

如上所述,国外在隐身材料的研究方面,经过数十年的努力,已取得了一定的进展。但是,目前已研制的隐身材料大多只能在某一频带起作用,在其它波段则丧失隐身效果。因此,研究高性能、宽频带吸波材料以展宽有效频带,实现多频谱隐身材料相兼容是隐身材料未来发展的一个主要方向。

参考文献

1 Weyermuller A P. A primer on its doctrine and operational use. AD - A247 951/7/XAD, u9213, Stealth Employment in the Tactical Air Force (TAF),1992:33

(下转第 10 页)

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

(4) : 346～353

14 Saburi T et al. Structure and mechanical behavior of Ti - Ni shape memory alloys. In: Proc. Int. Mtg. on Adv. Mats., Tokyo, 1989; 9: 77～90

15 Miyazaki S et al. Deformation and transition behavior associated with R-phase in Ti - Ni alloys. Metal. Trans., 1986; 17: 56～63

16 Hwang C M et al. Transformation behavior of a $Ti_{50}Ni_{47}Fe_3$ alloy Ⅲ martensitic transformation. Philisophical Magazine, 1983; A, 47: 177～191

17 Lo Y C et al. A studyof $B_2 \rightarrow B_{19} \rightarrow B_{19}$' two-stage martensitic transformation in a $Ti_{50}Ni_{40}Cu_{10}$ alloy. Acta Matal., 1993; 41:747～759

18 蔡伟. 记忆合金的应变恢复特性与形变马氏体的稳定性. 哈尔滨工业大学博士学位论文, 1994

19 Zhang C S et al. Effects of deformation on the transformation hysteresis and shape memory effect in a $Ni_{47}Ti_{44}Nb_9$ alloy. Scripta Metal. Mater., 1990; 24: 221～226

20 张春生等. $Ni_{47}Ti_{44}Nb_9$ 合金的相变滞后和应变马氏体的稳定性. 金属学报, 1991; 27(3): 211～215

21 Piao M et al. Mechanism of the A_s temperature increase by pre-deformation in-thermoelastic alloys mechanism of the A_s temperature increase by pre-deformation in thermoelastic alloys. Mater. Trans. JIM, 1993; 34(10): 919～929

22 赵连城等. Ni - Ti - Nb 宽滞后形状记忆合金的形变诱发马氏体相变及其可逆性. 金属学报, 1997; 33(1): 90～98

23 Zhao L C et al. The interface structure and stability of deformation-induced martensite in Ni - Ti - Nb alloy with wide hysteresis displacive phase transformations and their applications in materials engineering. The Minerals Metals & Materials Society, 1998: 93～100

(上接第 4 页)

2 Olsson P O. Radar absorberande material: en oeversikt (radar absorbing materials: a review). PB97 - 101695/XAB, u9705, 1995: 27

3 Chambers B. Frequency tuning characteristics of capacitibly loaded salisbury screen radar absorber. Electronics Letters, 1994; 30(19): 1 626

4 Chambers B. Characteristics of a Salisbury screen radar absorber covered by a dielectric skin. Electronics Letters, 1994; 30(21): 1 797

5 Lin F, Shiao L C. Study on a new type of wide frequency absorbing coating. AD - A294 173/XAD, u9522, 1995: 15

6 Gupta S C, Agrawal N K. Broad band thin sheet absorbers for S - ; C - ; X - ; and Ku-bands. Journal of the Institution of Electronics and Telecommunicaton Engineers, 1993; 39(3): 197

7 Perini J, Cohen L S. Design radar absorbing materials (RAMs) for wide range of angles of incidence. IEEE, International Symposium on Electromagnetic Compatibility, New York, 1991: 418

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

9 秦嵘. 隐身技术研究进展. 宇航材料工艺, 1997; (4): 20

10 Leland R W, Charles D H, Ronald W S. Electromagnetic radiatio suppression cover. US Patent: 4 814 546, 1989

11 莫美芳. 国外隐身飞机和隐身材料的发展. 隐身技术发展动态. 隐身技术, 1992; 14(1): 1

12 王秀春. 国外隐身技术的最新进展. 隐身技术, 1993; (4): 68

13 郭全贵, 宋进仁, 刘朗, 张碧江. 碳材料高温氧化防护陶瓷涂层体系研究进展. 宇航材料工艺, 1998; 25(2): 11

14 刘列, 张明雪, 于翘. 吸波涂层材料技术的现状和发展. 宇航材料工艺, 1997; 24(1): 1

15 Soherical Chiroshield. Smart Structures and materials. Electronics Letters, 1991; 27(3): 77

16 蒋宇平, 秦嵘, 朱林崎. 智能结构的发展和应用. 宇航材料工艺, 1998; 25(4): 15

17 张建艺. 光纤智能复合材料的应用展望. 宇航材料工艺, 1998; 28(4): 18

18 卢志环. 智能材料系统的原理和应用. 宇航材料工艺, 1998; 28(5): 45

19 秦嵘, 陈雷. 隐身技术的研究进展. 宇航材料工艺, 1997; 27(4): 17

20 武庆录. 智能隐身飞机蒙皮. 隐身技术, 1993; (1): 43

21 张卫东, 张明雪. 雷达吸波涂层研究进展. 隐身技术, 1999; 1: 6

22 Crowson A. Proceedings of Conference on Recent Advance in Adaptive and Sensory Materials and Their Applications. 1992: 811～821

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net