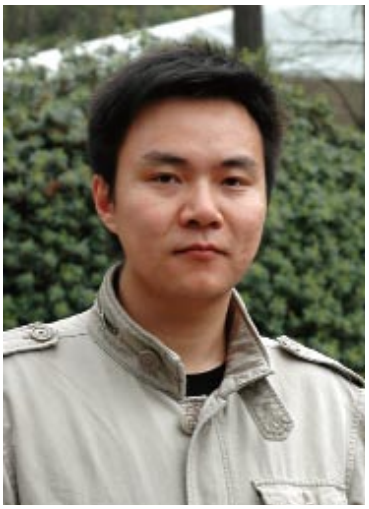
DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2008.06.001

高温吸波材料研究应用现状

Current Study and Application of High Temperature Radar Absorbing Material

西北工业大学凝固技术国家重点实验室 李 鹏 周万城
石 家 庄 铁 路 职 业 技 术 学 院 贺媛媛

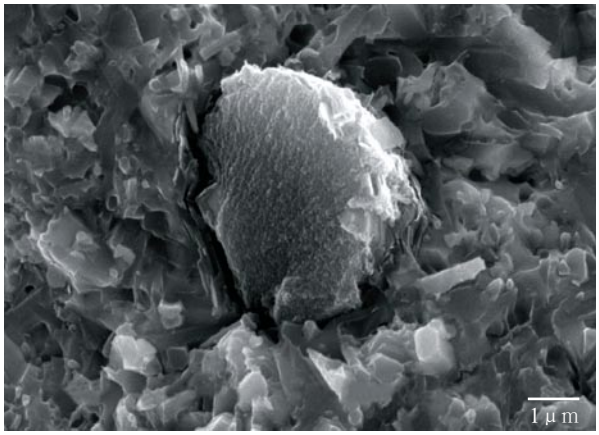


李 鹏
西北工业大学博士，材料学专业，主要从事功能陶瓷材料电性能及介电性能、固体氧化物燃料电池陶瓷材料电性能方面的研究。

武器系统的隐身能力可以通过外形设计和使用隐身材料来实现，但对外形的过多要求会引起空气动力性能的下降，并导致装容空间的减小和其他损失，所以开展吸波材料的研究成为隐身技术的关键。

隐身技术是通过控制和降低武器系统的特征信号，使其难以被探测、识别、跟踪和攻击的技术。现代及未来战争中，雷达是探测目标最可靠的手段，隐身技术的研究以雷达隐身为重点[1]。武器系统的隐身能力可以通过外形设计和使用隐身材料来实现，但对外形的过多要求会引起空气动力性能的下降，并导致装容空间的减小和其他损失，所以开展吸波材料的研究成为隐身技术的关键。

按照吸波材料的结构形式，可将它分为涂料型吸波材料、贴片型吸波材料、吸波腻子、吸波复合材料等[2]。对于吸波／承载一体化吸波材料即结构吸波材料，兼顾了承载和吸波双重功能，不额外增加重量，且材料本身在力学性能和吸波性能上具有较强的可设计性，从而具有较强的实用价值。按照吸波机理可以将吸波材料分为磁损耗型吸波材料、介电损耗型吸波材料和“双复”型吸波材料3类。在飞机的尾喷管等高温部位，其工作温度往往在700℃以上，大部分磁性吸收剂由于居里温度较低而失去吸波性能，致使高温吸波材料仅依靠电损耗机制来吸收雷达波。国外对耐高温吸波材料虽然已进行了较多的研究，但由于涉及军事应用，没有详细报道。从文献分析可以发现，陶瓷基复合材料是国外研制高温吸波材料的主要方向。本文简述了国外高温结构吸波材料基体和吸收剂的研究应用进展，并展望了高温吸波材料的



碳纤维-陶瓷复合材料扫描电子显微照片

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

发展方向。

高温吸波材料基体

为满足低反射、高吸收以及宽频带吸收的要求，吸波材料往往被设计成双层或多层结构，即吸波材料由阻抗变换层和吸收层组成，并通过优化设计使其具有较好的吸波性能。优化设计结果表明，阻抗变换层具有较低的介电常数时，有利于雷达波进入吸波材料内部，从而表现出较好的吸波性能。另外，吸收层中吸收剂的介电常数往往较大，为了使吸收层介电常数不致太大，基体的介电常数不能太大。作为高温结构吸波材料的基体，还应具有较强的承载能力和易烧结制备性。由于材料在高温和常温下工作，基体还应具有较低的热膨胀系数及较强的耐热冲击性，此外，还应考虑到基体与吸收剂的匹配问题。

当前研究较多的高温吸波材料基体可分为两类：(1) 陶瓷基体，如 Si_3N_4、Al_2O_3、AlN、莫来石、堇青石等；(2) 耐高温玻璃基体，如 LAS 玻璃、磷酸盐玻璃、MAS 玻璃等。其性能如表 1 所示 [3-10]。

表1 高温吸波材料基体的性能

高温吸波材料基体	密度 /（g·cm^{-3}）	热膨胀系数 /10^{-6}K^{-1}	抗弯强度 /MPa	断裂韧性 / MPa	相对介电常数实部 ε_r'	相对介电常数虚部 ε_r''
Si_3N_4	3.19	2.5 ~ 3.6	818 ~ 1059	5.8 ~ 6.4	6	0.004
Al_2O_3	3.96	8.8	550 ~ 600	2.8 ~ 4.5	10.2	0.7
AlN	3.3	4.5	331	3.8	8.1	0.08
莫来石	2.72 ~ 2.84	5.3	147 ~ 212	2.3 ~ 3	5.5 ~ 6.3	0 ~ 0.5
堇青石	2.5 ~ 2.72	2.5 ~ 3	74.3	—	4.5	0
LAS 玻璃	—	6.6-8.7	103	1.35	7.5	0.16
MoO_3-V_2O_5-P_2O_5-Fe_2O3 玻璃	3.0 ~ 3.7	6 ~ 11	—	—	8.24 ~ 9.02	0.15 ~ 0.27

高温吸波材料用吸收剂

高温吸波材料主要靠吸收剂对电磁波进行吸收。性能优良的吸收剂要求高效吸收、宽带吸收且密度较小。对于耐高温吸收剂来说，控制其介电常数和损耗是关键。目前，国内外研究和应用较多的耐高温吸收剂主要有以下几类。

1 碳化硅

碳化硅是当前国外研究最为广泛的耐高温吸收剂，其突出优点是具有优良的力学性能、高强度和良好的电性能。另外，碳化硅具有极其优异的耐高温性能，这是普通吸收剂所不具备的。作为高温吸收剂的碳化硅应该是 β-SiC，其性能优于 α-SiC。

碳化硅作为高温吸波材料用吸收剂主要有粉体和纤维两种形式。由于碳化硅纤维具有和碳纤维接近的强度和模量，故将其作为吸收剂的同时还起到了强化力学性能的作用。碳化硅纤维的制备一般采用先驱体转化法，该法制备的纤维具有良好的力学性能和高温抗氧化性能，是金属基、陶瓷基和树脂基复合材料常用的高性能增强纤维 [11]。一般制备的圆形截面碳化硅的电阻率约为 $10^6\Omega\cdot$cm，在 X 波段的 ε_r' 为 3 ~ 5，ε_r'' 基本为 0[12]，对电磁波的吸收效率并不高，须对其进行改性以提高其吸收效率。据报道，当 SiC 纤维的电阻率调整为 10^0 ~ $10^3\Omega\cdot$cm 时，对 X 波段的雷达波具有最佳吸收效果 [13-14]。常见的碳化硅纤维改性方法有：

(1) 高温处理法：Nicalon SiC 纤维在经过高温处理后，会析出大量游离碳粒子，使纤维的电阻率降低、介电损耗增加，从而具有一定的吸波性能。但在高温处理过程中，纤维内部的 O 会与 C、Si 等元素反应，生成 CO_2、SiO_2 等物质，使纤维质量下降，力学性能大幅降低。

PAN碳纤维扫描电子显微照片

(2) 表面处理法：通过在碳化硅纤维表面沉积或涂敷其他物质以改善纤维电磁性能。常用的沉积物质有碳 [15-16]、磁性金属 [17-18]、钡铁氧体 [19] 等。但对于磁性沉积物，在高温下会失去磁性而导致碳化硅纤维吸波性能下降。

(3) 掺杂异元素法：通过在 SiC 纤维内掺杂一些具有良好导电性的元素或物相以调节 SiC 纤维的介电损耗和吸波能力。掺杂的方法主要有物理掺杂法 [20] 和化学掺杂法 [21] 两种。

(4) 改变纤维截面形状法：将碳化硅纤维制备成三叶形、C 形或中空

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

等截面形状后，其吸波性能得到不同程度的改善。另外，与圆形截面碳化硅纤维相比，异形截面碳化硅纤维的力学性能、纤维与基体间的复合性能等都有较大改善[22-23]。

碳化硅粉体的制备方法包括Acheson法[24]、溶胶－凝胶(Sol-gel)法[25]、CVD法[26-28]等。碳化硅粉体同样需要经过掺杂改性才能制备出性能优良的高温吸收剂。

碳化硅粉体和纤维作为高温吸收剂已经有了较多的应用。法国ADE公司研制的Alkard S C陶瓷吸收体是一种以SiC为主体的掺杂体系，其最高使用温度为1000℃，并可机械加工，在35GHz频带内反射率从-10dB线性下降[29]；法国SEP公司制造的C/SiC复合材料喷瓣、尾喷管调节片已用在Rafel战斗机的M88SNEMA发动机和Mirage 2000战斗机的M53发动机上[30]；洛克希德公司在F-117隐身飞机的研制中，采用陶瓷基材料制备的结构吸波材料，加在尾喷管的后沿可承受高达1093℃的高温[31]；法国马特拉防御公司开发的两大系列隐身材料之一，主要是应用于1000℃高温的陶瓷基材料，可以用作亚音速导弹某些部位的面层，如喷管或进气道，这种材料已制成多层的砖块形状，可用来包覆导弹上承受强烈热应力的尾部壳体[32]。

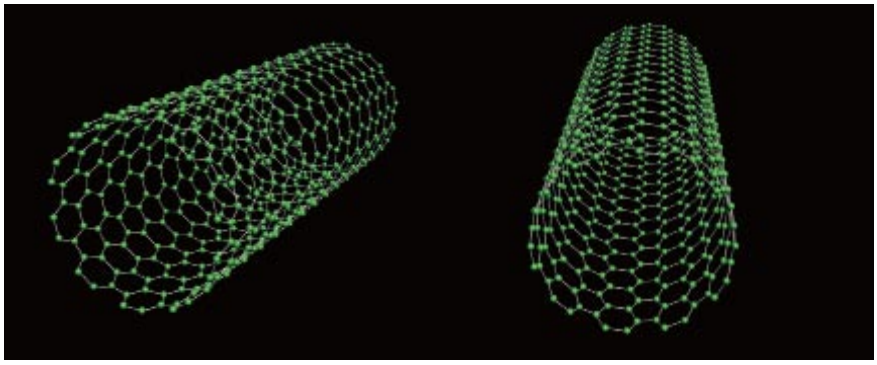
2 碳纤维、碳纳米管

碳纤维属于电损耗型吸收剂。但由于碳纤维电阻率较低，会对电磁波产生强反射，故必须对其进行化学掺杂或表面改性处理。随着纳米科技的发展，对纳米级碳纤维的研究也越来越多。常见的纳米碳纤维的生产方法有：基体法[33-35]、喷淋法[36]、气相流动催化法[37]等。纳米级的碳纤维不仅表现出对雷达波的电损耗特性，同时也具有一定的磁损耗特性。螺旋形碳纤维是一类手性吸波材料，具有普通碳纤维所不具备的特殊性能，能够在电磁波作用下产生感应电流，感应电流除部分转化为热能外还可通过螺旋碳纤维形成次级电磁波，并与原电磁波相互干涉，进一步将电磁波能量转化为其他形式能量。通过调节螺旋碳纤维的螺径、螺距等参数，可以使吸波材料具有优良的性能。研究表明[38]，螺旋形碳纤维手性参数 ξ 对提高吸波性能的影响大于相对介电常数 ε_r 对它的影响。

大量采用碳纤维复合吸波材料的F-22战斗机

同颗粒型吸收剂相比，碳纤维对吸波复合材料力学性能优化的贡献更大。另外，碳纤维的密度只有1.7～2.0g/cm^3，易制得轻质复合材料，实现吸波材料的高效吸收、宽带吸收的要求。碳纤维微晶在生长过程中沿轴向择优取向，故对于电磁波的吸收表现出明显的各向异性，通过对碳纤维在基体中排布方式的设计，也可以达到优化材料吸波性能的目的。

碳纤维复合吸波材料已经得到了广泛应用。美国F-117隐形战机在其发动机四周、主翼前缘、垂直尾翼及前部机身等部位大量采用了碳纤维和反射率很小的硼纤维复合材料。B-2战略轰炸机也在中翼盒段、中后段及外翼段大量采用碳纤维结构吸波材料，减轻了机身重量。YF-22、YF-23、F-22等战机以及先进巡航导弹上都大量采用了碳纤维、碳/芳纶或碳/玻璃纤维混杂作为增强材料的结构吸波材料[39]。法国的“幻影(Mirage)F-1”战斗机副翼蒙皮采用碳纤维结构的吸波材料[40]；“幻影2000”战斗机垂尾的大部分和方向舵的全部蒙皮也用吸波的硼/


碳纳米管分子结构图

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

环氧树脂／碳复合材料制造；法国海军战斗机“阵风(Rafale)”的机翼和两段式全翼升降副翼用碳纤维复合材料制造，机身采用50%碳纤维复合材料，起落架舱门及发动机舱门为碳纤维复合材料；英、德、意、西班牙4国合作研制的新型EF2000的机身大量采用碳纤维复合材料；美国空军战斗机F-16“战隼(Fighting Falcon)”机身采用翼身融合技术，尾翼的垂直安定面蒙皮采用碳纤维复合材料，平尾也部分地采用碳纤维复合材料；前苏联战斗机米格-29的机翼翼尖、襟翼和副翼采用碳纤维蜂窝结构，垂尾采用碳纤维复合材料。

碳纳米管(CNT)是由日本NEC公司的电镜专家S. Iijima[41]1991年首次发现的。它具有高温抗氧化、稳定性好等优点[42]，适合作为高温吸波材料的吸收剂。对于碳纳米管产生雷达波损耗的原因，一般认为，纳米材料比表面积大，大量悬挂键的存在容易导致界面极化，而高的比表面积会造成多重散射；另外，量子尺寸效应使纳米离子的电子能级分裂，增加了对电磁波的吸收[43]。

有研究表明[44]，作为偶极子，碳纳米管在电磁场的作用下会产生耗散电流，在周围基体作用下，耗散电流被衰减，从而使电磁波能量转换为其他形式的能量，主要为热能，这是含碳纳米管材料微波损耗的主要机理。对于螺旋形的碳纳米管吸收剂，其结构因素也对电磁波的损耗起到了重要作用。

碳纳米管结构对其介电性能影响很大。碳纳米管晶化程度越好，介电常数降低幅度和磁导率实部增大幅度越大。非晶碳的存在使碳纳米管的 ε_r' 和 ε_r'' 在某些频段偏高[45]。多壁碳纳米管的 ε_r'、ε_r'' 比单壁碳纳米管的大许多，其电损耗、磁损耗增加比较明显；阵列多壁碳纳米管与聚团多壁碳纳米管相比，其电损耗、磁损耗均增加。研究表明，碳纳米管具有较强的压阻效应[46]，当形变量从0增加到3.2%时，碳纳米管的电导率从 $10^{-5}S\cdot cm^{-1}$ 下降到 $10^{-7}S\cdot cm^{-1}$，且变化可逆。通过对碳纳米管结构、排列方式及外应力的改变，可以达到控制吸收剂介电性能的目的。

除改变碳纳米管结构和排列方式外，也可对碳纳米管进行改性。常用的改性方法有填充[47-48]和表面镀层[49]。最常用的填充和表面镀层物质是磁性金属，如Fe[50]、Co[51]、Ni[52]等。通过碳纳米管与其他耐高温材料复合，可以制备出性能优良的吸波复合材料[53-54]。

3 石墨及炭黑

炭黑属于电损耗型吸收剂，是目前应用最广泛的填料，其体积电阻率为0.1～10Ω·cm，将其分散到基体中，依靠介质内部的极化易形成导电链或局部导电网络，以此可有效控制复合材料的电性能，达到对雷达波吸收的目的。特别当基体材料电导率处于半导体范围时，对电流产生耗散作用，吸波性能得到加强。

炭黑密度较低，故常被填充在蜂窝夹层结构中。石墨已经应用于结构吸波材料[55]，美国在石墨／热塑性基复合材料和石墨／环氧树脂基复合材料的研究方面取得了很大进展，这些复合材料在低温(-53℃)下仍然保持韧性，只是对高温和高湿度环境比金属稍微敏感。另外，石墨和炭黑也被用在掺杂高损物吸波涂料中，这类吸波涂料由导电纤维与高损物(如炭黑、陶瓷和粘土等)和树脂组成，其中导电纤维的长度是雷达波波长的一半，高损物的厚度最好是雷达波波长1/4的奇数倍[56]。

由于炭黑粒径在纳米级，不仅能吸收电磁波，还能有效抑制红外辐射。但作为高温吸波材料吸收剂，石墨和炭黑的缺点是耐高温性不如SiC材料。

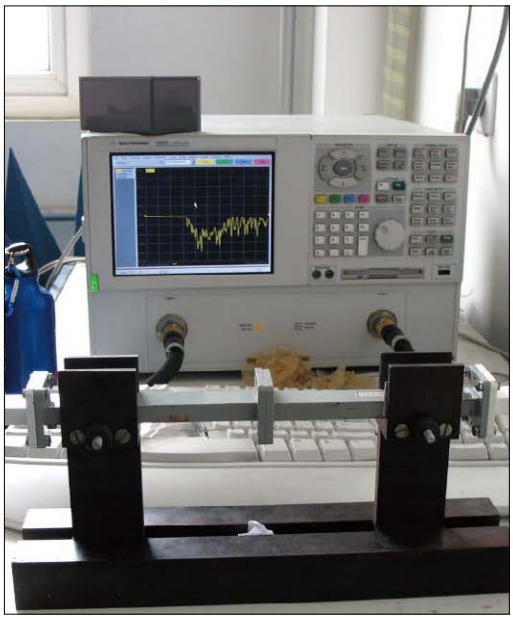
高温吸波材料的发展方向

在高温吸波材料的研究过程中，其理论和应用研究取得了较大的进展，但仍然存在许多不足，今后高温吸波材料的研究和应用应该集中在以下几个方面：

(1)以理论指导高温吸波材料的研制开发，深入研究高温吸波材料损耗机理。

(2)发挥耐高温吸收剂力学性能优势，研究重点为高温结构吸波复合材料。

(3)高温吸波材料研究应向兼容型发展，研制开发雷达波、红外、激光等多频段兼容隐身材料。



材料介电性能测试设备——矢量网络分析仪

(4)研制开发智能型高温吸波材料，即能够对探测信号做出感知，并做出最佳响应，使其对各频率电磁波具备宽带吸收能力。

本文有参考文献56篇，因篇幅所限未一一列出。读者如有需要，请向编辑部索取。

(责编 金卯)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net