

天线罩用透波材料

刘丽 等 编著



冶金工业出版社

<http://www.cnmp.com.cn>

天 线 罩 用 透 波 材 料

刘 丽 等编著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2008

内 容 提 要

本书阐述了天线罩用透波材料及其成型工艺,内容包括天线罩用材料的基本性能要求、陶瓷基体材料、树脂基体材料、增强体及其表面改性、天线罩成型工艺等,并结合实例说明了实际设计经验和体会。

本书适合航空航天、材料领域的科技人员以及高等院校复合材料专业、材料科学与工程等相关专业的师生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

天线罩用透波材料/刘丽等编著. —北京:冶金工业出版社,
2008. 6

ISBN 978-7-5024-4579-9

I. 天… II. 刘… III. 天线罩—工程材料 IV. TN820. 8
TB39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 086748 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 postmaster@cnmip. com. cn

责任编辑 马文欢 美术编辑 张媛媛 版式设计 葛新霞

责任校对 卿文春 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-4579-9

北京百善印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2008 年 6 月第 1 版,2008 年 6 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32;8.75 印张;233 千字;269 页;1-1500 册

28.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

近些年来,航空航天用天线罩材料得到了迅速发展,其研究工作十分活跃。无论是制备工艺技术的创新和改善,还是各种新型天线罩材料的研发及物理、力学性能的研究和利用,都取得了长足的进步。为适应我国航空航天事业发展的需要,方便有关方面的深入研究,本书介绍了目前国内外关于天线罩材料的主要研究成果,希望能够对从事天线罩材料、高性能透波材料等方面的科研人员、工程技术人员以及广大材料工作者有所帮助。如果真能实现这一良好愿望,编者将会感到十分欣慰。

天线罩是飞船、导弹等的必要组件。本书专门阐述天线罩用透波材料及其成型工艺,内容包括天线罩用材料基本性能要求、陶瓷基体材料、树脂基体材料、增强体及其表面改性、天线罩成型工艺等。本书强调基本概念清晰、设计目标明确,以及先进性和工程实用性的结合,并运用实例说明实际设计经验和体会。本书适合从事航空航天、材料领域的科技人员以及高等院校复合材料专业、材料科学与工程等相关专业的师生阅读。

在本书编写过程中,贺金梅、张春华、宋元军、孟令辉老师以及姜再兴、吴丽娜、郭慧、赵峰、景介辉、王艳红、王磊等博士参与了本书的资料收集和部分内容的编写工作,在此对他们的辛勤工作表示衷心的感谢!

由于天线罩用透波材料及其成型工艺正处在蓬勃发

展的阶段,本书内容还有值得商讨的地方,加上编者的水平和技术上的原因,书中疏漏之处,望读者不吝指正。

刘 丽

2008年3月

目 录

1 绪论	1
1.1 天线罩及其对天线的影响	1
1.2 天线罩的种类及其对材料性能的要求	2
1.2.1 天线罩的种类	2
1.2.2 天线罩材料的性能要求	3
1.3 材料的介电性能	4
1.3.1 复合材料的常温介电性能	6
1.3.2 复合材料的高温介电性能	6
1.4 天线罩材料的发展历程	9
参考文献	10
2 透波材料用增强体	12
2.1 玻璃纤维	12
2.1.1 玻璃纤维的生产及其规格	13
2.1.2 玻璃纤维的化学成分及品种	14
2.1.3 玻璃纤维制品	17
2.1.4 玻璃纤维的性能	19
2.1.5 玻璃纤维表面处理技术	24
2.2 芳纶纤维	38
2.2.1 芳纶纤维的发展	38
2.2.2 芳香族聚酰胺的结构与性能	39
2.2.3 芳纶纤维透波复合材料在天线结构中的应用	47
2.2.4 芳纶纤维的改性	53
2.3 超高相对分子质量聚乙烯纤维	57

2.3.1	UHMWPE 纤维的发展历史	58
2.3.2	UHMWPE 纤维的性能	59
2.3.3	UHMWPE 纤维的表面改性	63
2.4	涤纶纤维	65
2.4.1	涤纶的结构	66
2.4.2	涤纶的性质	66
	参考文献	68
3	天线罩复合材料用树脂基体	69
3.1	环氧树脂	69
3.1.1	环氧树脂的合成	70
3.1.2	环氧树脂的种类	70
3.1.3	环氧树脂的性能	72
3.1.4	环氧树脂的改性	73
3.2	不饱和聚酯树脂	75
3.2.1	不饱和聚酯树脂的合成原理	76
3.2.2	不饱和聚酯树脂改性	77
3.3	酚醛树脂	79
3.3.1	酚醛树脂的合成	80
3.3.2	酚醛树脂固化的基本原理	81
3.3.3	酚醛树脂的性能	82
3.3.4	酚醛树脂的改性	82
3.4	有机硅树脂	85
3.4.1	有机硅树脂的合成	85
3.4.2	有机硅树脂的性能特点	87
3.4.3	甲基硅树脂的合成	89
3.4.4	甲基硅树脂的性能表征	90
3.4.5	有机硅树脂的改性	94
3.4.6	无机硅基树脂基体	96
3.5	聚芳基乙炔树脂	98

3.5.1	PAA 单体及合成方法	99
3.5.2	PAA 的聚合机理及预聚研究	101
3.5.3	PAA 树脂的性能	103
3.5.4	PAA 的改性	105
3.6	氰酸酯树脂	108
3.6.1	CE 的合成	109
3.6.2	CE 的性能	110
3.6.3	CE 的改性	112
3.6.4	CE 的应用	118
3.7	聚四氟乙烯	119
3.7.1	概述	119
3.7.2	PTFE 的组成和结构	119
3.7.3	PTFE 的性能	121
3.7.4	PTFE 的改性	122
3.8	双马来酰亚胺	125
3.8.1	双马来酰亚胺的合成	126
3.8.2	双马来酰亚胺的性能	126
3.8.3	双马来酰亚胺改性方法	127
3.8.4	双马来酰亚胺的应用及研究现状	130
3.9	有机-无机纳米杂化材料	131
3.9.1	POSS 改性有机硅树脂	131
3.9.2	POSS 改性甲基硅树脂的合成	133
3.9.3	POSS 改性甲基硅树脂的性能表征	134
	参考文献	143
4	陶瓷基材料	157
4.1	陶瓷基天线罩材料国内外研究发展现状	157
4.2	陶瓷基天线罩材料的种类	161
4.2.1	氧化物陶瓷	161
4.2.2	氮化物陶瓷	183

4.2.3	磷酸盐材料	203
4.3	陶瓷基天线罩材料高温电性能的影响因素	210
4.3.1	成分和微成分	210
4.3.2	结构和微结构	212
4.3.3	相变	213
4.4	展望	215
	参考文献	217
5	透波材料的成型工艺	219
5.1	无机非金属透波材料的制备工艺	219
5.1.1	粉体(或前驱体)的制备	219
5.1.2	干法成型	220
5.1.3	湿法成型	222
5.1.4	高固相含量泥浆	227
5.1.5	烧结过程	229
5.1.6	无机复合材料制备工艺	233
5.2	树脂基透波复合材料的制备工艺	245
5.2.1	预浸料及预混料制造工艺	246
5.2.2	手糊成型	251
5.2.3	袋压成型	253
5.2.4	缠绕成型	254
5.2.5	模压成型	256
5.2.6	铺层工艺成型方法	258
5.2.7	夹层结构成型方法	261
	参考文献	267

1 绪 论

天线罩是雷达系统的重要组成部分,被称作雷达系统的“电磁窗口”。雷达天线罩对改善雷达特别是雷达天线馈线伺服系统的使用环境、延长雷达系统的使用寿命、提高工作可靠性具有积极的作用,其中飞行器天线罩位于飞行器的头部,多为锥形,有时也有半球形,具有导流、防热、透波、承载等多种功能。天线罩既是寻的制导武器弹头结构的重要组成部分,又是保护天线系统不受高速飞行造成的恶劣气动环境影响、正常进行信号传输工作的屏障。天线罩材料的性能则直接影响了导弹的寻的和生存能力。天线罩材料技术是高速精确制导航天武器的基础,是发展末制导中导、高超声速地空导弹、反辐射导弹和巡航导弹不可缺少的关键技术之一,它直接制约着先进型号航天武器的发展。

1.1 天线罩及其对天线的影响

天线罩可以定义为保护天线免受自然环境影响的外壳,是通信和雷达系统的重要组成部分。天线罩一词从英文 Radome(Radar dome)翻译而来,它是由天然或人造电介质材料制成的覆盖物,或是由桁架支撑的电介质壳体构成的特殊形状的电磁窗口。

天线罩对天线或整个微波系统的保护是多方面的。主要是防止恶劣环境的影响,如超声速导弹中天线罩隔断了高强度气动压力对导引头内部天线及其他设备的影响。同时,天线罩还提供一个适宜的分界面,以保持天线-天线罩系统的结构、温度和空气动力等特性,同时维持一定的电气性能。

天线罩是随着微波天线的发展而发展的。1940年前后,天线口径的尺寸已经很大,雷达工作的波长日益变短,雷达测量的精度要求越来越高,于是天线罩就应运而生。较早期的天线罩是飞机上用的流线形罩,主要是二战期间空军发展的结果,这方面最

早的实用报道是 1941 年安装在 B18-A 战斗机上的半球形天线罩,它的材料是树脂玻璃。20 世纪 50 年代开始出现大量的地面天线罩,不过当时的地面天线罩大多是充气的。为了克服充气天线罩结构上的不足,使之适应更恶劣的环境,1952 年美国开始研制刚性地面天线罩。此后,经过几十年的发展,天线罩演变出适应不同用途的多种形式。目前,不但有用于雷达的通常意义上的天线罩(又称雷达罩),还有给彩电中心、微波塔楼等提供电磁窗口的微波透波墙以及用于改善天线馈源特性的相位校正透镜等变形形式。

1.2 天线罩的种类及其对材料性能的要求

1.2.1 天线罩的种类

按使用场合,天线罩可分为航空型、地面固定型和地面移动型(如舰载)三大类。航空天线罩在尺寸和外形方面变化很大,从小的平板外形到高度流线形都有;地面固定或移动型天线罩则一般是半球形,直径较大。

按工作频率,天线罩可分为:低频天线罩,工作频率不大于 2.0GHz;狭带天线罩,工作频带宽度小于 10%;多频段天线罩,可以在两个或两个以上狭带频段内工作;宽带天线罩,工作带宽介于 0.1007GHz 和 0.667GHz 之间;超宽带天线罩,工作带宽大于 0.667GHz。

按罩壁横断面结构,天线罩可分为:a 型,半波长单层壁结构,壁厚是波长的一半;b 型,单层薄壁结构,壁厚小于工作频率高端波长的 0.1 倍;c 型,即所谓 a 型夹层结构,由三层介质组成,外表是两个比较致密的表皮,中间则是较厚的低密度芯子,表皮的介电常数比芯子高;d 型,即所谓多夹层结构,由五层或五层以上介质层组成,通常是奇数层的密度比偶数层的密度大,表层的介电常数比里层的介电常数大。一般来说,随着层数的增加,天线罩的频带宽度会有所改善,常用的是五层结构(所谓 c 型夹层)。

此外,为获取宽频带性能或减小天线罩厚度,还可能在介质

层中使用金属含物,金属含物薄层通常呈现为跨接在传输线上分流的集总电路元件的特性;为防止雨蚀、雷击、阳光照射、大气老化和热核辐射等,也常在天线罩的外表面加敷各种薄膜涂层;近几年,还出现了关于在天线罩介质层表面或内部嵌入频率选择表面(FSS)的报道。

由于组成天线罩的材料电特性与空气不同,罩壁内外表面会引起电磁波的反射和折射,使天线的辐射波束发生畸变。

1.2.2 天线罩材料的性能要求

目前,各类先进战术导弹的飞行速度(马赫数)多在4以上,地地导弹的再入速度已达到8~12,甚至更高。根据不同的使用环境,天线罩的耐温要求在500~2400℃不等。除耐高温性能外,对天线罩材料的基本要求还包括:

(1) 透波性能。一般情况下,制作雷达天线罩的适宜微波透波材料是波长为1~1000mm,即频率在0.3~300GHz范围内,电磁波的单向透过率大于70%的材料。

(2) 稳定的高温介电性能。天线罩材料要具有低的介电常数($\epsilon < 10$)和损耗角正切值($\tan\delta < 10^{-2}$),在微波频率范围内,透波材料比较合适的 ϵ 值为1~4, $\tan\delta$ 则为 10^{-1} ~ 10^{-3} 数量级,并且这种材料的 ϵ 不随温度、频率有明显的变化(如温升100℃, ϵ 变化小于1%),以便保证在气动加热条件下,尽可能不失真地透过电磁波。

(3) 低的线膨胀系数。高速航天器的表面温度一般与其飞行速度的平方成正比,某些导弹再入大气层时的热变化率达540~820℃/s左右,瞬时的急剧温升在罩壁产生相当大的温度梯度,导致高的热应力,天线罩材料线膨胀系数过高将直接导致天线罩变形或损毁。

(4) 抗粒子云侵蚀。未来战争不仅要求武器具有很强的杀伤力和突防能力,而且要求其具备全天候作战能力。航天器飞行时,受到粒子云撞击,使天线罩表面变得粗糙不平。这一方面影响

天线罩的结构性能,使气动加热更为严重;另一方面,改变天线罩的壁厚分布,从而影响其电气性能,加大瞄准误差。对于高速飞行的航天器,粒子云侵蚀问题更为严重,所以天线罩材料还必须具有抗粒子云侵蚀能力。

目前没有任何一种材料能够完全满足上述要求。每一种材料既有其优点,也有其不足。与纤维增强树脂基复合材料相比,陶瓷材料具有耐高温、宏观均质、强度高等优点,但陶瓷材料的最大缺点,就是高脆性导致其抗冲击能力差,加工成型性能差,这些缺点严重影响了陶瓷材料的应用。纤维增强树脂基复合材料的价格低廉,不到陶瓷材料的十分之一。但由于树脂的耐热性能差,限制了它的应用。近年来人们对耐高温树脂及非碳化烧蚀材料的认识水平的逐步提高,为树脂基复合材料在天线罩制造领域的应用注入了强大的活力。

1.3 材料的介电性能

材料被引入到交变电磁场中以后,介质将被反复极化,它内部的束缚电荷会在小范围内发生迅速的振动或转动而形成交变电流,这种电流不同于自由电荷的运动所形成的传导电流,称为束缚电流。由电介质物理学可知,介质极化之后产生束缚电荷,进而产生退极化电场,这个电场的方向与外加电场的方向相反,从而削弱了外电场。对于不同的介质,如果极化得越厉害,则合成电场就越弱,同一外电荷所造成的电场强度就越小,此时我们就说介质的介电常数 ϵ 也就越大。由此可见,介电常数 ϵ 是标志介质极化难易的一个物理量,它反映了介质对外电场反作用的强弱。

一般来说,只要电磁波频率不是足够低(近似直流)和超高频(大于 10^{10} Hz),那么由于周围分子的摩擦阻力以及碰撞,极化电荷从电场中取得的能量就不可能全部交回给电场,有一部分能量会通过摩擦被介质吸收,转化为介质的内能,我们称之为介电损耗;另外,由于电介质不是理想的绝缘体,不可避免地存在一些弱

联系的导电载流子,在外电场作用下定向漂移,从而形成小的传导电流。这些传导电流以热的形式消耗掉,即为电导损耗。

实际应用的电介质的阻抗都非常大,从而导致在电磁波作用下传导损耗很小,对电磁波的吸收主要表现在介电损耗上。此时,由于周围分子的摩擦阻力的作用,束缚电荷吸收的电磁场能量就必然有一部分会传递给周围的分子,以热能的形式消耗掉。这样,束缚电荷将跟不上外电场变化的速度,从而介质内部瞬时电流超前电压的相角达不到 $\pi/2$,而比 $\pi/2$ 要小一个角度 δ 。于是位移电流就有了有功分量, δ 即为损耗角。

根据材料与电场的相互作用,按照介电损耗角可以分为低介电损耗材料($\tan\delta < 0.01$)、中介电损耗材料($\tan\delta < 0.1$)、高介电损耗材料($\tan\delta > 0.1$)。从材料的介电常数考虑,可以分为介电常数小于 12 的绝缘材料、介电常数大于 12 的电容器介质材料、铁电和电磁材料。优良航天透波材料的介电常数一般要求小于 4。

材料的介电性能是由电介质的极化引起的,电介质的极化现象是在内外电场力的作用下电荷的移动引起的,同时在电介质表面或体积内部形成被约束的电荷。电介质的另一个重要特性是其介电常数及其介电性能随温度、频率和其他因素的变化规律与极化有关,某些极化过程伴随着在电介质中发生能量损耗。在电介质中,能量损耗是由三种主要过程造成的:

(1) 离子迁移损耗,其中包括电导损耗、离子跃迁和偶极子弛豫损耗;

(2) 离子振动和变形损耗;

(3) 电子极化损耗。

在外部条件及电气系统变化的情况下,损耗变化的数值及特征由极化过程确定。航天透波材料在高温高频状态下主要发生电极化损耗和表面电导损耗。

极化率 P 与材料的介电常数 ϵ 有下面的函数关系:

$$P = E(\epsilon - 1)/4\pi \quad (1-1)$$

式中, E 为作用于介质材料的电场强度。在电场强度一定的

情况下材料的极化程度越高,介电常数越大。从固体物理的角度考虑,在常温状态下一物质存在一定的可用来计算极化和介电常数的关系式。不同的材料有不同的结构极性,在电场作用下偶极矩的响应值不同,产生出不同的介电常数。

1.3.1 复合材料的常温介电性能

在同一透波复合材料体系中,各组分比例不同,材料的介电性能也不同。对于复合材料,根据材料组分体积分数和各分组的介电常数,其介电常数可表示为:

$$\epsilon^d = \sum V_i \epsilon_i^d \quad (1-2)$$

式中, d 为常数; V_i 为第 i 组分的体积分数。当 d 趋于 0 时, $\epsilon^n = 1 + d \lg \epsilon$,有:

$$\lg \epsilon = \sum V_i \lg \epsilon_i \quad (1-3)$$

式(1-3)即所谓 LICHTENECHER 对数混合法则。

以航天透波中广泛采用的二氧化硅体系为例来讨论,为讨论方便,把石英纤维织物增强二氧化硅基复合材料的石英纤维织物和二氧化硅基体材料同视为 SiO_2 材料,该复合材料可视为 SiO_2 和孔隙的复合体,应用该法则于复合体则有如下关系式:

$$\lg \epsilon_{\text{复合体}} = (D_{\text{复合体}} / D_{\text{SiO}_2}) \lg \epsilon_{\text{SiO}_2} \quad (1-4)$$

式中, $\epsilon_{\text{复合体}}$ 为 SiO_2 和孔隙复合体的介电常数; $D_{\text{复合体}}$ 为 SiO_2 和孔隙复合体的体积密度; D_{SiO_2} 为单纯 SiO_2 的体积密度,取 2.2 g/cm^3 ; ϵ_{SiO_2} 为单纯 SiO_2 的介电常数,取值 3.78。

对于不同的孔隙率或复合密度,可计算出对应的石英织物增强二氧化硅复合材料的介电常数,结果如图 1-1 所示。

低介电常数透波材料是宽频耐热材料研究追求的目标之一,织物增强二氧化硅基复合材料因含有 20%~25% 的孔隙率,在具有较高力学性能的同时,具有较低的介电常数,为耐热宽频透波材料的应用提供了一种较理想的选择。

1.3.2 复合材料的高温介电性能

人们推导总结出了一些公式用于复合材料介电常数的近似

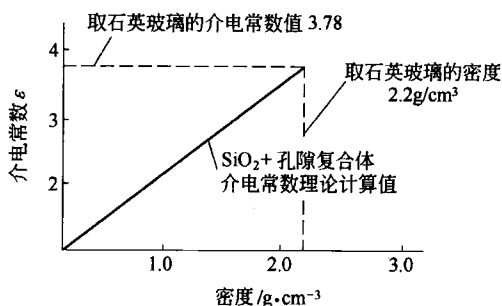


图 1-1 二氧化硅复合材料密度与介电常数的关系

计算,在室温条件下用于均匀混合物时准确性较高,但在高温作用下,混合组分常发生相变,最重要的变化如组织结构变化,反应引起化学成分变化,引起发热现象的不稳定性改变等,不宜应用有关的公式直接进行计算。在包括高温的各种相关因素的作用下,进行试验验证是评价航天透波复合材料介电性能的唯一可靠的方法。

航天透波复合材料通常都在各种温度下使用,有些在 1200℃ 温度下使用,有些在 1200℃ 以上使用,环境差异很大,分析了解温度对透波材料介电性能的影响因素及其规律,是航天透波复合材料的研究及应用面临的主要课题之一。

1.3.2.1 物性变化对介电性能的影响

所有介质材料或多或少都具有一定的电导性。好介质材料的电导率很小,一般为 $\sigma = 10^{-20} \sim 10^{-10} \text{ S/m}$ 。在使用温度较低、材料物性未发生变化时介质材料的导电电流 $J_{\text{np}} = \sigma \cdot E$ 很小,这时主要是由温度及频率引起的松弛损耗,物性变化具有可逆性。但当温度继续升高时,有些介质材料开始出现热解、分解现象,特别是有机材料在较低的温度下就开始出现热解、分解现象,如航天透波材料中经常使用的有机硅材料在温度高于 200℃ 时就开始出现物性变化。在航天飞行器的飞行环境中,温度的变化最突出,温度从几百摄氏度到几千摄氏度范围变化,材料发生一系列

的热沉积、熔化、气化、分解、电离等变化,并且是不可逆的。

从图 1-2、图 1-3 介质材料的介电性能随温度的变化曲线可看出,在温度作用下材料的介电性能出现明显变化。为证明材料的物性发生了不可逆性变化,对测试试样进行了冷却跟踪测试,材料的介电性能不能恢复到加热前的状态。利用透波材料的升温-介电性能曲线和降温-介电性能曲线可了解到透波材料在实际使用过程中的一些关键的物性变化,如先把材料加热至水分挥发温度,再跟踪测试冷却时的介电性能,可得到材料不含吸附水或结构水时的介电性能,为电气系统设计提供依据。

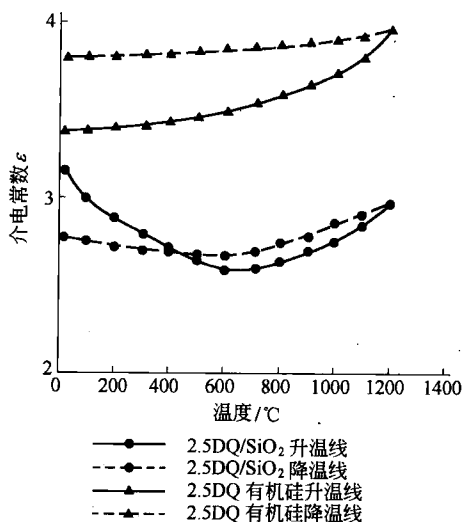


图 1-2 温度对材料介电常数 ϵ 的影响

1.3.2.2 杂质含量对介电性能的影响

防热性能和透波性能对于防热透波多功能复合材料同样重要,在高状态再入飞行条件下保持低的烧蚀率和高透波率是高性能防热透波材料的重要特点。但由于原材料的纯度不高或在复合工艺过程引入了杂质,对透波材料的高温介电性能有一定影响,对于石英织物增强二氧化硅基为主的介电防热复合材料,主