

树脂基复合材料在雷达天线罩上的应用

宋来福, 杨彩云

(天津工业大学 纺织学院, 天津 300387)

摘要: 综述了雷达天线罩材料的性能要求,介绍了传统树脂和新型耐高温树脂在复合材料中的应用,分析比较了玻璃纤维、石英纤维和有机纤维作为增强材料的优缺点及其复合材料成型工艺,并指出了天线罩材料今后的发展方向。

关键词: 复合材料; 介电常数; 树脂; 增强材料; 天线罩

中图分类号: TS176.5

文献标识码: B

文章编号: 1001-2044(2018)01-0001-03

DOI:10.16549/j.cnki.issn.1001-2044.2018.01.001

Application of resin based composites in radar radome

SONG Laifu, YANG Caiyun

(College of Textile, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China)

Abstract: The performance requirements of radome materials for radar radome are reviewed. The application of traditional resin and new high temperature resistant resin in wave transmitting composites is introduced. The advantages and disadvantages of glass fiber, quartz fiber and organic fiber as reinforcing material are analyzed and compared. The forming process of the composites is discussed, and the future development trend of radome material is pointed out.

Key words: composite; dielectric constant; resin; reinforcing material; radome

天线罩材料是指能够透过一定频率电磁波,且能保护雷达不受损害的一类功能性材料,被称为“电磁窗口”,是雷达保护系统的重要组成部分。导弹在大气中以超高音速飞行时会受到空气的压缩与摩擦,产生气动加热,而气动加热会使天线罩承受很大的热应力。为了使雷达天线系统正常工作,天线罩既要在气动载荷、加热等恶劣环境中工作,又要保证传输功率与瞄准误差满足制导系统的要求^[1]。对于潜艇雷达系统,天线罩应具有长期耐海水腐蚀、吸湿率低以及抗压能力高的特点^[2]。随着现代航空航天以及海洋军事的发展,飞行器飞行速度不断提升,潜艇下潜深度越来越大,对天线罩材料也提出了更高的要求。

本文通过介绍天线罩材料的性能要求,以及树脂基复合材料的研究进展,展望了未来天线罩材料的发展方向。

1 天线罩材料性能要求

1.1 介电性能

天线罩的介电性能是用来评价材料性能的重要指标,一般用介电常数(ϵ)和损耗角正切值($\tan\delta$)来表征。高性能材料要求介电常数 $\epsilon < 10$ F/m,损耗角正切值 $\tan\delta < 0.01$ ^[3-4]。介电常数小,可以降低电磁波的反射对插入损耗的影响,以及对外界恶劣环境的影响。在高温条件下,要求材料性能稳定,并尽量保证其在气

动加热环境下电磁波不失真。

1.2 热性能

天线罩材料应具备热膨胀系数小,工作温度范围大,能较好地承受高温烧蚀,在高温环境下具有介电性能和力学性能稳定^[5]的特点。否则,导弹在高速飞行时的气动加热会产生很高的升温速率,使天线罩承受极大的热应力,造成材料变形损毁。

1.3 力学性能

作为承载材料,天线罩材料在常温和高温环境下,应具有高强度和一定的刚性,受力时不易变形。导弹在高速飞行时,雷达天线罩的横向和纵向均会产生很大的剪力、弯矩和轴向力^[6],潜艇在深潜中时须承受很高的水压。因此,天线罩材料应具备一定的承载强度和弹性模量以保证系统的机械稳定性。

1.4 耐环境性

天线罩材料应当耐恶劣环境的影响,耐雨水冲刷侵蚀、抗粒子侵蚀^[7],在雨水、辐射环境下确保雷达系统的正常工作。飞行器高速飞行时,受到粒子云的撞击,导致天线罩表面凹凸不平而影响其结构性能,同时,会造成材料厚度分布不均,进而影响其性能,甚至导致材料的分层破坏。

1.5 其他性能

天线罩材料应易加工成型,整体性能好,能与金属部件良好连接,质轻,材料密度要小,以减轻质量和增加有效载荷。

2 雷达天线罩复合材料体系

收稿日期: 2017-05-31

作者简介: 宋来福(1993-),男,在读硕士研究生,主要从事纺织复合材料的研究。

复合材料由两种或两种以上不同性质的材料经设计和人工组合而得的具有优异性能的多相固体材料,雷达天线罩复合材料由基体材料和增强材料组成。其中,基体材料多为连续相,主要起黏结或连接的作用;增强材料多为分散相,也称为增强体,主要用于承受载荷。

2.1 基体树脂体系

目前,酚醛树脂(PF)、环氧树脂(EP)和不饱和聚

酯树脂(UP)等传统树脂作为复合材料的树脂基体普遍应用在各种导弹雷达天线罩上。而双马来酰亚胺树脂(BMI)、聚四氟乙烯(PTFE)、聚酰亚胺(PI)、氰酸酯树脂(CE)、有机硅树脂等新型耐高温树脂近年来也逐步成为研究焦点,部分已经投入生产。几种常见树脂的基本性能见表1,表1中介电常数和损耗角正切值在10 GHz条件下测得。

表1 几种常见树脂基本性能

名称	密度/(g·cm ⁻³)	弯曲强度/MPa	弯曲模量/GPa	介电常数	损耗角正切值	长期工作温度/(°C)
酚醛树脂	1.30	92	3.5	4.5~5.0	0.015~0.030	250
环氧树脂	1.30	97	3.8	3.2~5.0	0.010~0.019	110
不饱和聚酯树脂	1.29	85	3.2	2.8~4.0	0.006~0.026	120
双马来酰亚胺树脂	1.25	150	3.7	2.9	0.012	250
聚四氟乙烯	2.20	20	0.7	2.1	0.003~0.004	400
聚酰亚胺	1.29	134	3.5	2.7~3.2	0.005~0.008	300
氰酸酯树脂	1.19	134	3.5	2.8~3.2	0.002~0.008	315
有机硅树脂	0.99	60	7.1	3.0~5.0	0.003~0.030	250

2.1.1 酚醛树脂

酚醛树脂是较早使用在雷达天线罩上的基体树脂,由酚类化合物和醛类化合物在催化条件下通过缩聚反应制得。该制备工艺简单但不易成型,制得的酚醛树脂的力学性能良好,可长期在250°C以下的环境中使用,但其介电稳定性较差,介电损耗大,本身较脆。改性的酚醛树脂的耐热性显著提高,介电损耗降低,力学性能也大为改善。

2.1.2 环氧树脂

环氧树脂是一种有机化合物,其分子中有两个或两个以上的环氧基团,由于环氧基团较为活泼,因此环氧树脂具有优异的力学性能和良好的黏结性能。其耐腐蚀,固化收缩率低,尺寸稳定性好,线膨胀系数小,且介电性能较好,被广泛应用在天线罩复合材料中,但环氧树脂基复合材料的耐热性能较差,不能使用在高温环境中,因此不符合高性能天线罩材料的要求。

2.1.3 不饱和聚酯树脂

不饱和聚酯树脂是一种常用的热固性树脂,通过酸类化合物和醇类化合物发生缩聚反应获得线性聚合物,再由活性溶剂稀释制得,制备工艺简单且价格低廉,是最早用于天线罩材料的基体树脂之一,但其不耐热,材质较脆,耐冲击性能差。改性不饱和聚酯树脂的使用温度和力学性能都得到了改善。

2.1.4 双马来酰亚胺树脂

双马来酰亚胺是由聚酰亚胺树脂体系衍生出的另

一类树脂体系,其优点是耐热性好,使用温度在170°C~250°C^[8],耐潮湿、耐腐蚀、耐辐射,力学性能良好,尺寸稳定,是一类综合性能较好的天线罩复合材料树脂基体。但由于双马来酰亚胺树脂杂质较多,严重影响其介电性能,导致电磁波透过性能差。

2.1.5 聚四氟乙烯

聚四氟乙烯具有高度耐腐蚀性能,化学稳定性好,耐酸耐碱,抗各种有机溶剂,在宽频范围内介电性能优异,工作温度范围大,耐高温和热稳定性好,其在常温环境下力学性能较差,需要通过改性使其力学性能得到增强。聚四氟乙烯制备工艺复杂^[9],需要烧成型,且潮湿环境对其性能影响较大,极大地限制了应用范围。

2.1.6 聚酰亚胺

聚酰亚胺具有优异的介电性能,尺寸稳定性好,是一种耐高温树脂,可长期在300°C的环境中使用。聚酰亚胺基复合材料与环氧树脂基复合材料力学性能接近,可满足高性能天线罩材料要求,但其加工困难,熔点高^[10],需要高温高压的生产条件且升温过程复杂。

2.1.7 氰酸酯树脂

氰酸酯树脂耐热性能好、吸湿率低且介电性能受温度变化影响小,制备工艺简单。石英纤维/氰酸酯树脂基复合材料所制造的天线罩材料性能比环氧基复合材料更加优异^[11-12],其易与增强体结合,已经成功应用在天线罩领域。

2.1.8 有机硅树脂

有机硅树脂的耐热性能好^[13],介电性能优良且不易受环境影响,化学性能稳定,但是其力学性能和黏结性能较差,制备过程中需要高压成型,工艺复杂。

2.2 增强材料体系

纤维增强复合材料是将增强纤维置于基体树脂中

表2 雷达天线罩应用的纤维增强材料主要性能

名称	密度/(g·cm ⁻³)	拉伸强度/MPa	杨氏模量/GPa	断裂伸长率/%	介电常数	损耗角正切值
E-玻璃纤维	2.54	3 140	72.0	4.5	6.13	0.003 8
S-玻璃纤维	2.49	4 020	85.0	5.1	5.21	0.006 8
M-玻璃纤维	2.77	3 700	91.6	4.5	7.00	0.003 9
D-玻璃纤维	2.10	2 000	52.0	4.5	4.00	0.002 6
石英纤维	2.20	1 700	72.0	4.6	3.78	0.000 2
高硅氧玻璃纤维	2.30	2 500	52.0	4.5	4.00	0.004 8
Kevlar-49 纤维	1.46	3 620	137.0	3.3	2.50	0.001 5
UHMWPE 纤维	0.9	5 010	172.0	3.5	3.00	0.000 1

玻璃纤维和石英纤维是天线罩最常用的增强材料,由表2可知,D-玻璃纤维的介电常数和损耗角正切值在玻璃纤维中最小。从介电性能来看,D-玻璃纤维、高硅氧玻璃纤维和石英纤维的介电常数相当,但是损耗角正切值差异较大,其中,石英纤维介电损耗最小。这是因为石英纤维中的SiO₂含量高达99.95%,所以其介电性能优异。低介电损耗材料制得的天线罩制品性最好,而D-玻璃纤维中的SiO₂含量最低,且杂质较多,所以其介电损耗值较大。高硅氧玻璃纤维中的SiO₂含量介于两者之间,约在91%~99%,力学性能高于D-玻璃纤维,生产成本远远低于石英纤维。有机纤维的介电常数均小于无机纤维,具有高强高模等优良的力学性能。其中,Kevlar-49纤维密度小、抗冲击性能好,具有高比强度和高比刚度等特性,广泛应用在航空航天领域,但其耐温性较差,不能应用在高马赫数的飞行器中。UHMWPE纤维介电性能优良,拉伸强度大,但其耐热性差,强度和模量受温度影响较大,表面高度规整有序的分子结构导致UHMWPE纤维与基体树脂黏结强度较差,因此在使用前须对其进行表面处理且选择合适的树脂基体。

3 树脂基复合材料制备工艺

3.1 手糊法

手糊法是将增强材料和基体树脂交替铺设辊压^[14]直至所需要的厚度。该方法操作简单,在常温常压条件下即可固化成型,但是其劳动量大,机械化水平低且产品质量和性能不稳定。

复合而成,增强体在复合材料中既作为结构材料承载载荷,亦可作为功能材料发挥作用。飞行器雷达天线罩常用的增强材料主要有玻璃纤维、石英纤维和有机纤维。各种增强纤维主要性能见表2,表2中介电常数和损耗角正切值在9.375 GHz条件下测得。

3.2 真空辅助成型法

真空辅助成型法是在真空作用下实现树脂对增强材料的浸渍。树脂应在真空条件下流动性好,否则粘度过大导致流动性变差,无法使增强材料充分浸渍。

3.3 纤维缠绕成型

纤维缠绕成型是将浸渍过树脂的纤维均匀有序地缠绕在缠绕机旋转芯模上,固化脱模后获得成品。该工艺可使纤维分布规律且强度较好,制件纤维体积分量较高、方向性强,不易在制件上开口。

3.4 模压成型

模压成型技术适合大批量生产,产品尺寸精确。成型用的模具分为阴、阳模两部分,其制品结构紧密性能好,但是制备过程繁琐复杂,不易生产较大尺寸的制件。

3.5 热压罐成型

热压罐成型技术是将预浸料按尺寸切裁并铺好,然后将预浸料堆叠并与其他辅助材料结合,置于热压罐中,在一定温度和压力下固化成型。该方法主要用于生产高质量的复合材料,能生产大尺寸的复杂构件,且产品表面和内部质量较好,但其制件的尺寸大小受罐体尺寸的限制。

3.6 树脂传递模塑成型

树脂传递模塑(RTM)是将预制件铺放在密封的模腔内,树脂注入到模腔内浸渍预制件后固化脱模获得制品。该技术适用于中批量生产高质量复合材料,其制品表面光滑、精度高、孔隙率低、性能好,生产效率

☞(下转第7页)

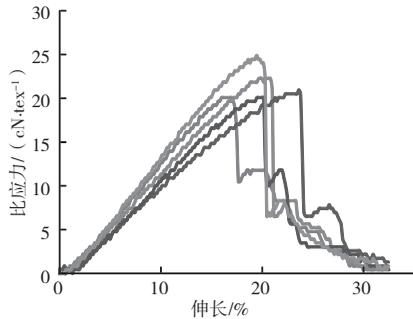


图4 低扭矩纱特殊的拉伸曲线

3 结语

本文通过标准强度测试法、变隔距低速拉伸测试法、断裂端显微镜分析法,对比分析了环锭单纱和低扭矩单纱的拉伸断裂特点,并结合低扭矩环锭单纱内部纤维三维构型,分析了低扭矩环锭单纱中纤维强度利用效率,得出结论如下:

(1)无论在标准测试条件下还是低速拉伸断裂时,在低扭矩纱中同时参与断裂的纤维根数较多,即纤维的强度利用效率较高,因此低扭矩纱的断裂强度明显高于同捻度的环锭纱,甚至在捻度更低的情况下,低

扭矩纱仍能保持较高的强度。

(2)结合对纱线断裂端的显微镜分析,在小隔距低速拉伸时,低扭矩纱中部分纤维片段具有极高的纤维强度利用效率。

(3)变隔距低速拉伸测试发现,低扭矩纱受拉伸断裂时,常在拉伸曲线上最大比应力后又出现一个或多个断裂峰值,尤其是在小隔距拉伸时,这主要是因为低扭矩纱内部纤维螺旋线上有较多的“螺旋结”。

(4)低扭矩纱的拉伸断裂特点印证了以往关于其内部结构特点的分析。



参考文献:

- [1] 于伟东.纺织材料学[M].1版.北京:中国纺织出版社,2006.
- [2] ISHTIAQUE S M, RENGASAMY R S, SHARMA O P, et al. Influence of fiber strength and yarn structural characteristic on tensile failure of blended spun yarns; a prediction model[J]. The Journal of the Textile Institute, 2016, 107(1): 127-135.
- [3] LAWRENCE C A, FOSTER W. A study of the structure and properties of friction spun yarns; The VI International IZMIR Textile Symposium [C]. 1992.

(上接第3页)

高,可制备大尺寸、结构复杂的产品,但是其模具的设计加工较为复杂。

4 展望

未来雷达天线罩材料不仅要求介电常数和损耗角正切值小,还要满足在更高温度、更加恶劣环境中的工作要求,能够承受更大的载荷和热冲击,并保证传输功率与瞄准误差满足制导系统的要求。因此,天线罩材料除了具有优良的力学性能和介电性能外,还必须具备耐高温烧蚀、抗热冲击以及抗雨蚀能力。树脂基复合材料具有很高的比强度,力学性能、耐高温性能和介电性能好,密度小、质量轻,能够在减少飞行器质量的同时又确保较高的结构强度。现有的纤维增强材料的耐高温性能有待提升,新型高性能增强纤维与树脂基体的选择以及相应的复合材料制备工艺有待做进一步研究。



参考文献:

- [1] 范叶明,温广武.几种新型陶瓷天线罩材料与制备工艺[J].热处理技术与装备,2008,29(6):1-5.
- [2] 肖卫东,黄一清,蔡正燕.潜用雷达天线罩材料及成型工艺研究[J].造船技术,2013(5):24-25.
- [3] 宗熙,张其助,王玉功.微波介质基片介电常数测量[M].北京:中

国计量出版社,1991.

- [4] 赵磊,秦华宇,梁国正,等.氰酸酯树脂在高性能印刷电路板中的应用[J].绝缘材料,1999(3):7-10.
- [5] LIU H K, HUANG C C. Impact response and mechanical behavior of 3-D ceramic matrix composites[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2001, 21(2): 251-261.
- [6] 姜勇刚,张长瑞,曹峰,等.高超音速导弹天线罩透波材料研究进展[J].硅酸盐通报,2007,26(3):500-505.
- [7] 胡伟,郭浩,王萍萍,等.陶瓷天线罩材料的研制进展[J].纤维复合材料,2010(3):16-23.
- [8] 刘萝葳,曹运红,王蕾,等.导弹雷达天线罩用的工艺材料[J].战术导弹技术,2004(1):23-28.
- [9] 石毓燧,梁国正,兰立文.树脂基复合材料在导弹雷达天线罩中的应用[J].材料工程,2000(5):36-39.
- [10] 方志宁.新型聚酰亚胺材料及其合成[J].化学工程与装备,2009(10):124-126.
- [11] 赵磊,梁国正.氰酸酯树脂在宇航复合材料中的应用[J].宇航材料工艺,2000,30(2):17.
- [12] 秦华宇,梁国正.氰酸酯树脂的合成与表征[J].化工新型材料,1998,26(10):33.
- [13] 胡连成,黎义,于翹.俄罗斯航天透波材料现状考察[J].宇航材料工艺,1994,24(1):48.
- [14] 杨燕.石英纤维/有机硅树脂复合材料的制备及性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.