

六 院



目 录

序号	姓 名	职 称	单 位	论 文 题 目	刊物、会议名称	年、卷、期	类 别
1	朱正吼	副高	061	碳纤维复合材料电磁特性研究	机械工程材料	012511	H
2	朱正吼	副高	061	国内消失模铸造中的几个问题	热加工工艺	010004	H
3	朱正吼	副高	061	雷达罩复合材料细观电磁特性研究	兵器材料科学与工程	012495	H
4	朱正吼 邱伟娟	副高 硕士	061 061	复合材料电磁特性的非均匀时域有限差分法分析	兵器材料科学与工程	012402	H
5	沈以赴 陈文华 赵剑峰	副高 中级 中级	061 061 052	快速成形技术中材料成形性的研究进展	材料科学与工程	011904	H
6	李子全	副高	061	Solidification and microstructure of ZA27/SiCp composite fabricated by mechanical-electromagnetic combination stirring process	Materials Science and Technology	0117	H*
7	李子全	副高	061	Pretreatment process of SiC particles and fabrication technology of SiC particulate reinforced Zn-Al alloy matrix composite	Materials Science and Technology	0117	H*
8	李子全	副高	061	Determination of elastic constants of metal-matrix composites by a laser ultrasound technique	Composites Science and Technology	0161	H
9	李子全	副高	061	不同冷却条件 SiCp/ZA27 复合材料界面的 TEM 观察	南京大学学报	013701	H*
10	李子全	副高	061	Depth profiling and thermal relaxation of residual stress in Al ₂ O ₃ /SAE321 composites observed by SEAM	Progress in Natural Science	011105	H*
11	屠平亮	副高	061	Study of UBGA solder joint reliability	Microelectronics Reliability	014102	H*
12	屠平亮	副高	061	Reliability of micro BGA assembly using no-flow underfill	Microelectronic Reliability	014112	H*
13	屠平亮	副高	061	Growth kinetics of Ni-Sn/Cu-Sn IMC in UBGA joint on Au/Ni substrate	Scripta Materialia	014402	H*
14	屠平亮	副高	061	Effect of intermetallic compounds on vibration fatigue of UBGA solder joint	IEEE trans. on Advanced Packaging	012402	H*
15	姚正军 徐鸿钧 肖 冰	副高 正高 中级	061 052 052	Ni-Cr 合金钎焊金刚石砂轮机理的研究	农业机械学报	013204	H
16	姚正军 徐鸿钧 肖 冰	副高 正高 中级	061 052 052	Ni-Cr 合金 Ar 气保护炉中钎焊金刚石砂轮的研究	中国机械工程	011208	H
17	姚正军 徐鸿钧 肖 冰	副高 正高 中级	061 052 052	Ni-Cr 合金与金刚石和钢基体界面微区的分析研究	南京航空航天大学学报	013304	J

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物、会议名称	年、卷、期	类别
18	向定汉	副高	061	耐海水腐蚀固体自润滑滑道 TS-70E 的研究	机械工程材料	012501	H*
19	李 勇	中级	062	Interlaminar fracture toughness of	南京航空航天大学学报(英文版)	011802	J
	李顺林	正高	061	multi-directional laminates			
	陶 杰	正高	061				
20	李 勇	中级	062	浅谈提高本科生毕业设计质量的关键要素	南京航空航天大学学报(社科版)	0103 增刊	
21	崔益华	中级	062	大丝束碳纤维制备预浸料的关键工艺	纤维复合材料	010002	
22	崔益华	中级	062	新一代环保型热塑性 POLYPLY™ 树脂	玻璃钢/复合材料	010005	J
23	崔益华	中级	062	Theoretical analysis on forming FRM by V-EPC process	第十二届国际复合材料	2001	
24	崔益华	中级	062	第二届亚澳复合材料 (ACCM-2) 介绍	玻璃钢/复合材料	010001	J
	沃丁柱		062				
	朱正吼	副高	062				
25	李 澄	副高	062	Denseoxygen permeating membrane of mixed conductor $\text{La}_2\text{NiO}_{4+s}$ on porous support prepared by sol-gel method	222nd ACS national Meeting	2001	
26	王海燕 ⁽²⁾	初级	062	Electrontransfer reactivating and eneynatic activity aemoglobin in a SP sephadex membrane	Analytical Chemistry	017313	H*
27	王海燕 ⁽²⁾	初级	062	Incorporation of ttrseradish peroxidase in a kieselguhr membrane and the application to a mediator-free hydrogen peroxide sensor	Analytical Sciences	011702	H*
28	薛建军	副高	062	MAE 技术处理草类纤维制浆黑液的研究	林产工业	012804	J
29	薛建军	副高	062	利用电渗析回收草浆黑液中纳的平行现象	南京林业大学学报(自然科学版)	012503	H*
30	薛建军	副高	062	利用电渗析回收草浆黑液中纳离子的电迁移率	南京林业大学学报	012503	H*
31	薛建军	副高	062	木质素的电化学氧化	林产化学与工业	012102	J

碳纤维复合材料电磁特性研究

朱正吼

(南京航空航天大学材料科学与技术学院, 江苏南京 210016)

摘 要: 测试了碳纤维复合材料层合板的有关电磁参数。数据表明, 随着电场方向与纤维方向夹角的增大, 材料的 ϵ'_r 值增大而 $\text{tg}\delta_e$ 值减小, 铺层呈现极大的各向异性; 然后, 应用时域有限差分法(FDTD 法)分析了复合材料整体电磁特性。

关键词: 复合材料; 碳纤维; 电磁特性

中图分类号: TQ327.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-3738(2001)11-0014-03

Electromagnetic Properties of Carbon Fiber Composite

ZHU Zheng-hou

(Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The electromagnetic parameters concerning of the laminate of carbon fiber composite (CFRP) have been detected. The result of the experiment has indicated that with the angle between electric field and fiber orientation increasing, the dielectric constant ϵ'_r and loss angle tangent $\text{tg}\delta_e$ decreasing, the laminate strongly shows maximum anisotropy. The whole electromagnetic properties of composite have then been analyzed by the finite-difference time-domain imitation method.

Key words: composite; carbon fiber; electromagnetic property

1 引 言

随着碳纤维复合材料(CFRP)在飞机上的用量日益增多, CFRP 对航空电子系统及雷达波反射特性的电磁影响越来越受到重视。因此, 开展 CFRP 表面的隐身、静电防护、电磁屏蔽等电性能的研究具有重要的意义^[1~4]。

本工作测试了碳纤维复合材料层合板的有关电磁参数, 应用时域有限差分法(FDTD 法)^[5]分析复合材料整体电磁特性。

2 试样制备与测试方法

基体材料为 618 树脂; 用台湾产碳纤维 T300。碳纤维预浸料含胶量为 36%, 分别按 $[0^\circ]$ 、 $[90^\circ]$ 、 $[45^\circ]$ 方向压制成图 1 试样, 尺寸为 $20\text{mm} \times 5\text{mm} \times 2\text{mm}$ 。

反射基板材料采用纯铝。用欧姆表测试试样的电导率。电磁波频率在 $50\text{K} \sim 50\text{MHz}$ 时用 QBG-3 型高频 Q 表测试试样的 ϵ_r 、 μ_r 、 $\text{tg}\delta$ 值; 当电磁波频

率超过 50MHz 时, 用准开路短路法测试微波的复介电常数和导磁率。最后, 采用时域有限差分法(FDTD 法)^[5]分析单位厚度试样在 TEM 波正入射时的透波系数与吸波系数。

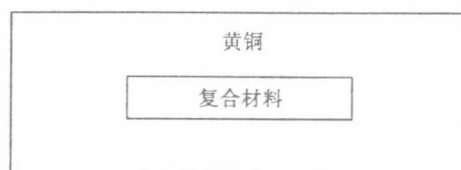


图 1 试样

Fig. 1 Sample

3 碳纤维复合材料的各向异性

按图 2 约定铺层编号。图中 TEM 波沿 X 轴方向垂直于铺层入射。

表 1 表明, 碳纤维复合材料的 ϵ'_r 值远大于 1, 但对 μ_r 值测试显示, μ_r 近似为 1, 因此, 碳纤维复合材料依靠电损耗来吸收电磁波, 同时表明碳纤维复合材料具有很大的反射性。

表 2 表明, 随着 θ 的增大, 材料的 ϵ'_r 值增大而 $\text{tg}\delta_e$ 值减小。铺层呈现极大的各向异性。

收稿日期: 2000-11-18; 修订日期: 2001-01-16

作者简介: 朱正吼(1969—), 男, 南京航空航天大学副教授, 博士

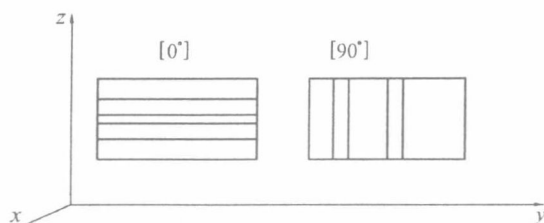


图2 层合板的标定

Fig. 2 Demarcating laminate

表1 [90°]铺层的电磁参数

Table 1 The electromagnetic parameters of laminate[90°]

频率/GHz	ϵ'_r	$\text{tg}\delta_e$
8.0	273	0.15
9.375	222	0.20
10	199	0.33
11	188	0.75
12	102	1.42

表2 铺层的各向异性(9.375GHz)

Table 2 Anisotropy for laminate

$\theta(^{\circ})$	ϵ'_r	$\text{tg}\delta_e$
0°	15.208	0.588
45°	89.153	0.437
90°	222.449	0.199

注: 1) 为纤维方向与Y轴的夹角。

4 铺层数对电磁特性的影响

4.1 [0°]层合板与[90°]层合板

图3表明,随着铺层数(N)增加,透波系数逐步下降,铺层数每增加1层,[0°]铺层的 R_T 值下降0.1~0.12。当铺层数小于3时,[90°]铺层的 R_T 值随 N 的增加而下降较快,但 N 值达到3以后, R_T 值下降缓慢。计算显示,当[90°]铺层数达到8时,其 R_T 值下降到0.01以下。与[0°]铺层相比,[90°]铺层的 R_T 值要小得多(最大为0.25),而且 R_T 值受第一铺层的影响最大。

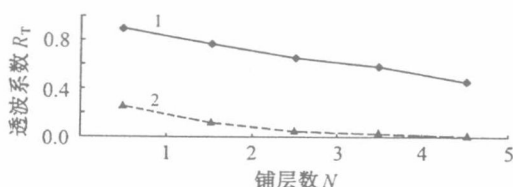


图3 铺层数与透波系数关系

1. [0°]层合板; 2. [90°]层合板

Fig. 3 The relation between laminate count & transmittance

图4表示了铺层数与吸波性能的关系,在 N 值

较小($N \leq 3$)时,铺层每增加一层, R_S 值约上升0.06~0.08,但当 N 值大于4时, N 增大, R_S 值上升缓慢。此现象是因实际进入第四铺层以后的铺层中的电磁波量较小,因此后面铺层对 R_S 值的贡献不大。

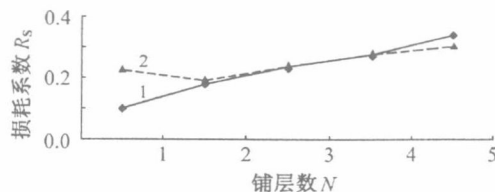


图4 铺层数与损耗系数关系

1. [0°]层合板; 2. [90°]层合板

Fig. 4 The relation between loss coefficient & laminate count

4.2 [0°/90°]层合板与[90°/0°]层合板

将[0°]铺层与[90°]铺层结合在一起制成正交铺层,试验与计算结果均说明:两个铺层的排列方式对 R_T 值几乎没有影响。 R_T 值受正交铺层的第一层影响最大,然后随着 N 的增大, R_T 值下降缓慢。图5结果表明,对于频率为9.375GHz的TEM波, R_T 最大值仅为0.25,铺层数达到6时, R_T 值下降到0.01以下。

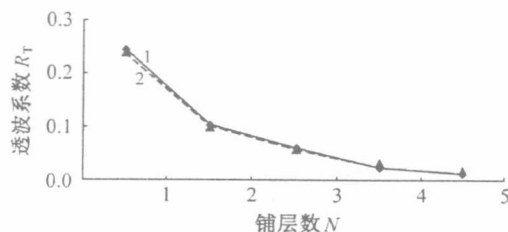


图5 铺层数与透波系数关系

1. [0°/90°]层合板; 2. [90°/0°]层合板

Fig. 5 The relation between laminate count & transmittance

图6表明,每增加一层正交铺层, R_S 值反而下降0.02~0.06。综合 R_F 、 R_T 与 R_S 值,可以看出,正交铺层的反射系数大,所以,增加正交铺层数,使反射波增加,从而大大减弱了透射波,所以 R_T 与 R_S 值均会下降。

5 层合板的频率特性

图7表明,以[90°]铺层为例,电磁波频率在8~10GHz范围内, R_T 值无明显变化,但当频率大于11GHz时, R_T 值下降, R_S 值上升,而且 R_F 值变化幅度小。此现象表明: R_S 值的上升是导致 R_T 值下降的直接原因,即碳纤维复合材料在12GHz以上时,吸波性能增大。

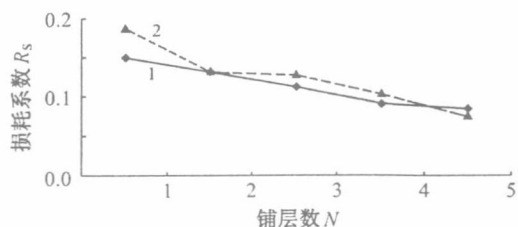


图6 铺层数与损耗系数关系

1. $[0^\circ/90^\circ]$ 层合板; 2. $[90^\circ/0^\circ]$ 层合板

Fig. 6 The relation between loss coefficient & laminate count

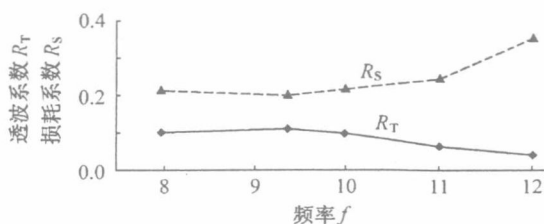


图7 频率与透波系数、损耗系数的关系

Fig. 7 The function of between loss coefficient & transmittance against frequency

6 纤维方向对 R_T 的影响

图8表明,当纤维方向与电场方向平行($\theta=0^\circ$)时(即 $[90^\circ]$ 层合板), R_T 值很小(0.1),随着 θ 值的增大, R_T 值也逐渐增大,直至 $\theta=90^\circ$ 时达到最大值(0.76)。

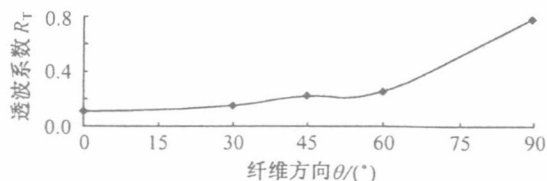


图8 纤维方向与透波系数关系

Fig. 8 The relation between transmittance & fiber orientation

7 结论

(1) 碳纤维复合材料的 ϵ'_r 值远大于1,而 μ_r 近

似为1,碳纤维复合材料依靠电损耗来吸收电磁波。同时具有很大的反射性。随着电场方向与纤维方向夹角的增大,材料的 ϵ'_r 值增大而 $\tan\delta$ 值减小。铺层呈现极大的各向异性。

(2) 随着铺层数(N)增加,透波系数逐步下降,铺层数每增加1层, $[0^\circ]$ 铺层的 R_T 值下降0.1~0.12。当铺层数小于3时, $[90^\circ]$ 铺层的 R_T 值随 N 的增加而下降较快,但 N 值达到3以后, R_T 值下降缓慢。计算显示,当 $[90^\circ]$ 铺层数达到8时,其 R_T 值下降到0.01以下。同 $[0^\circ]$ 铺层相比, $[90^\circ]$ 铺层的 R_T 值要小得多(最大为0.25),而且 R_T 值受第一铺层的影响最大。

(3) 在 N 值较小($N \leq 3$)时,铺层每增加一层, R_s 值约上升0.06~0.08,但当 N 值大于4时, N 增大, R_s 值上升缓慢。

(4) R_T 值受正交铺层第一层的影响最大,然后随着 N 的增大, R_T 值下降缓慢。对频率为9.375 GHz的TEM波, R_T 最大值仅为0.25,铺层数达到6时, R_T 值下降到0.01以下。每增加一层正交铺层, R_T 值反而下降0.02~0.06。

(5) 碳纤维复合材料在12GHz以上时,吸波性能增大。

(6) 当纤维方向与电场方向平行($\theta=0^\circ$)时(即 $[90^\circ]$ 层合板), R_T 值很小(0.1),随着 θ 值的增大, R_T 值也逐渐增大,至 $\theta=90^\circ$ 时达到最大值(0.76)。

参考文献:

- [1] 张考,等.飞行器对雷达隐身性能计算与分析[M].北京:国防工业出版社,1997,50~100.
- [2] 刘玉山,等.雷达对抗与反雷达[M].北京:电子工业出版社,1996,1~5.
- [3] 克拉特,等.雷达散射截面——预估、测量和减缩[M].北京:电子工业出版社,1998,8~10.
- [4] 阮颖铮.雷达截面与隐身技术[M].北京:国防工业出版社,1998,3~5.
- [5] 冯祖伟.时域有限差分法在天线和微波技术中的应用[J].现代雷达,1997,(2):41~48.

《21世纪新材料丛书》出版

21世纪新材料丛书(国家“九五”重点图书)由十余位院士担纲,百余名专家编撰,包括《信息材料》、《复合材料》、《新能源材料》、《生物医用材料》、《智能材料与智能系统》、《生态环境材料》和《材料设计》共7册,全面阐述了新材料发展的理论、技术、现状及发展方向。

丛书既是我国“863”计划实施以来新材料领域重要研究成果的集中体现,又为21世纪新材料技术的进一步研究开发以及产业化提供了可借鉴的理论和实际应用依据。

若有需要者请与《新材料产业》编辑部联系 电话:010-62341486 62341524 传真:010-62333998

国内消失模铸造中的几个问题

A Few Problemes About Full-mold Cast in China

朱正吼

(南京航空航天大学 材料科学与技术学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 介绍了消失模铸造技术实际生产中的几个问题及其解决措施, 并重点阐述了厚大铸件消失模铸造生产时易产生的塌箱和节瘤问题产生的原因与对策。

关键词: 消失模铸造; 涂料; 塌箱; 节瘤

中图分类号: TG249.6

文献标识码: B

文章编号: 1001-3814(2001)04-0065-02

消失模铸造技术在我国中小企业(尤其是小企业)的应用现状, 作者深有感慨, 现就生产中的有关问题作以总结。

1 塑料模的生产问题

塑料模生产是 FMC 技术中的首要也是最为重要的环节, 模型材料必须满足以下要求:

(1) 密度要小, 刚性要好, 并有一定的抗压强度。

(2) 能承受机械加工, 容易得到光洁的外表面。

(3) 气化温度要低。

(4) 与液体金属相互作用而被破坏时, 生成的残渣物要少, 气体的生成量要小, 且对人体无毒。

生产中常用的 EPS, 其成本较其它模型材料低, 生产工艺成熟且材料来源广泛。但这些特点是针对包装行业而言的, 对于 FMC 技术, 当前国内的 EPS 模型离要求还有一定距离, 主要表现在:

(1) 从包装业改行而至 FMC 方面的 EPS 模型内部壁厚不均, 珠粒型号缺乏统一规范;

(2) 企业缺乏生产 FMC 塑料模的工艺规范和经验, 生产出的塑料模成品率很低, 而且质量波动太大;

(3) 塑料模表面粗糙。用包装业的 EPS 发泡工艺很难生产出表面质量能与蜡模表面相近的塑料模。

(4) 成本高。用于包装业的 EPS 件市场计价约为 0.02~0.05 元/g, 其计价方式为按质量多少计价, 这必然导致生产厂家希望加大模型密度, 而这一点与 FMC 的要求从根本上是背道而驰的。因此, 现在的企业对于 FMC 塑料模均改为按件计价, 其折合成按质量计价方式约为 0.12~0.15 元/g, 成本大大提高。

(5) 成型发泡基本上都是以水蒸汽发泡, 因而在浇铸高质量铸件时, 塑料模必须烘干。这一点国内工艺与国外发达国家相差甚远。

为降低塑料模的发气量、残留物等, 国内不少科研单位推荐用 EPMMA-EPS 或 EPMMA 原料来代替 PS, 但这在短期内收效甚微, 其原因是: ① 成本高昂,

其质价比低于 EPS, 一般普通铸铁件生产厂家很难采用; ② 成型发泡温度高(约 125℃), 其最佳发泡法应是热空气发泡, 这种工艺在国内很多企业不成熟, 质量难以控制, 而且发泡设备也缺乏。

正因为以上原因, 消失模铸造业呼唤: 在国内尽快规范 FMC 法专用的 EPS 原料及生产工艺。

2 涂料问题

FMC 涂料包括表面光洁涂料和耐火涂料。

2.1 表面光洁涂料

表面光洁涂料目的是提高模型表面光洁度, 一般为有机物成膜涂料如聚乙醇溶于热水+酒精。

涂挂方式一般为浸涂(主要为小件)和喷涂(中大件)。浸涂后易产生流痕以及模型下部涂层厚度不均等缺陷, 因此, 尽管其工艺简便, 却不省工, 所以笔者推荐使用喷涂。

表面光洁涂料可以有效消除 FMC 铸件表面网纹。

尽管表面光洁涂料可以部分地提高铸件表面质量, 但实际操作时会增加大量人工, 尤其对于大批量小件的生产不太合适。

提高塑料模的表面光洁度是得到表面光洁铸件的根本途径。

2.2 耐火涂料

耐火涂料的作用是防止铸件产生机械粘砂和热化学粘砂, 提高塑料模型的刚度。耐火涂料的种类有水基涂料、醇基涂料、树脂涂料等。水基涂料一般厚度较大(0.5~2 mm), 其强度也较醇基的高。因为水基涂料通常很厚, 为改善其透气性, 一般在水基涂料中加少量发泡剂, 待涂层烘干后, 发泡剂在涂层中产生大量毛细孔, 这些细孔甚至可以对着灯光明显观察到。水基涂层必须人工烘干。

收稿日期: 2000-12-22

作者简介: 朱正吼(1969-), 男, 博士, 副教授。

醇基涂料与树脂涂料均为快干型涂料。涂料中无发泡剂,涂层的渗透性主要靠粘结剂或溶剂挥发而产生,另外快干型涂层比水基涂层薄,故其透气性较好。水基涂料与快干型涂料各有特色,其特点对比如表1。

表1 水基涂料与快干涂料特性比较

	涂层厚度	烘干温度	涂层强度	涂挂性	溃散性	透气性
水基涂料	1~2 mm	60℃左右	高	一般	差	较好
快干涂料	0.5~1 mm	常温晾干	较差	好	好	较好

值得注意的是水基涂料中因为有毛细孔而对液态金属产生毛细吸力,使涂层溃散性变差,正因为如此,很多消失模厂家舍弃水基涂料而选醇基涂料。

必须指出:长期以来在企业中形成两种偏见,一是过分强调涂料的作用如透气性好坏;二是认为醇基涂料虽然方便快捷但成本高昂。其实,事实并非如此。大量的实践表明,能否迅速排除铸型中的气体是涂层厚度、真空度、型砂粒度三者之间的综合结果。具体到每一种涂料上,可以这样认为,水基涂料(内不加发泡剂)与快干涂料在同厚度的条件下其透气性相差无几,根本不可能对FMC工艺产生明显影响。其次,虽然醇基涂料中原材料成本高,但其涂层薄,而且不必专门烘干,清理方便,所以其平均成本反而比水基涂料低。

水基涂料因为含大量毛细孔而易使铸件产生针刺且涂层清除困难,但水基涂料可以涂得厚而使涂层强度升高;醇基涂料防粘砂、针刺功能好,但其强度低。鉴于此,本文建议:对于厚大铸件、重要零件或部位,将这两种涂料结合起来使用将会起到非常好的效果,即内层用醇基涂料(≤ 0.5 mm)而外层涂水基涂料。

3 厚大铸件的生产问题

从理论上讲,FMC法可以生产厚大铸件,但实际生产难度很大,这主要是易塌箱和产生节瘤造成的。根据作者大量的实验与观察,对于厚大铸件,一个最为值得注意的就是局部塌箱。其产生原因是涂料的强度不足。尽管可以通过调整内浇道的数量和位置来弥补涂料强度的不足,但事实证明,该措施作用是十分有限也是不现实的。

解决局部塌箱的根本措施:一是在易塌箱部位施硬壳涂料,二是采用树脂砂充填。图1所示为具有代表性的厚大件——风机箱体,该件单重150 kg,最小壁厚25 mm,最大80 mm。其最佳浇注位置与浇注系统见图上。生产中其中心部位会局部塌箱。该问题可通过采用如下涂层得以解决。

涂层由内往外:醇基涂层(0.5 mm)→水基涂料(0.5~1 mm)+撒砂→醇基涂层(0.5 mm)。

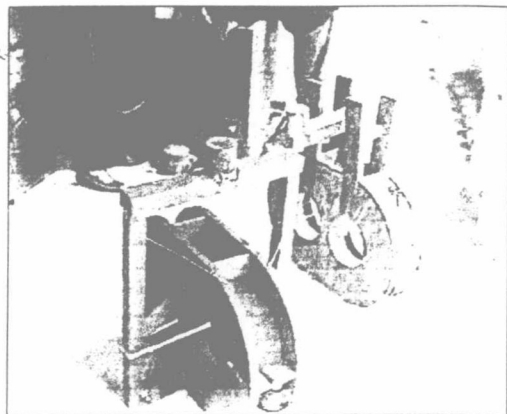


图1 风机箱体

4 厚大件节瘤问题

图2中1#、2#、3#位置均为厚壁,尽管造型时这些部位均被砂子填充,但在砂箱上盖上塑料薄膜抽真空时,这些部位砂子会被压实而下沉,而由于其余部位砂子也已经被压实且壁厚而使砂子流动距离长,结果导致该部位产生空隙,浇注后就不可避免地产生节瘤。这种节瘤不是由于造型原因产生的,通过振动也无法消除。消除这种厚大件特有的节瘤措施,一是在朝下的厚大部位预填自硬型砂如树脂砂;二是采取如下工序:造型→抽真空→去除真空后二次振动→抽真空。

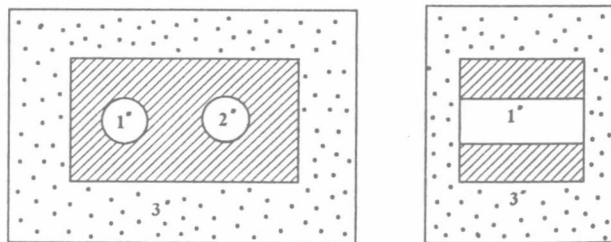


图2 节瘤部位

5 浇注系统设计

FMC法中常用的浇注系统有底注式、顶注式和阶梯式三种,而按各部分截面积比又有开放式与封闭式两类,究竟采用何种浇注系统已有众多文献论述,应该说每一种形式都各有其优缺点。

实践表明:塌箱缺陷主要与内浇口数量和内浇口位置有关,而对浇注系统各部分截面积变化不敏感;对于密度较大的塑料模若其为中小件,建议采用开放式顶注系统,若为厚大件则宜采用开放式阶梯式浇注系统;尽管底注式浇注系统能使液态金属充型平稳,但即使液态金属的温度下降较大,因此,对于普通国产EPS塑料模型,不宜采用底注式。若必须采用时,则应为封闭式。

雷达罩复合材料细观电磁特性研究

朱正吼

(南京航空航天大学, 江苏 南京 210016)

摘要:系统阐述了用网络工作法计算复合材料电磁问题的原理、步骤、实现方法、误差控制等;详细给出了该法的图表计算方法。应用该法研究了雷达罩复合材料受 TEM 波辐射时透波率与频率、入射角等之间的关系。

关键词:复合材料;雷达罩;电磁特性

中图分类号: TB34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-244X(2001)05-0018-07

为了充分发挥不同材料的特长,往往将部件制成具有多层材料组成的结构。在针对电磁波问题上,该结构既可以达到比强度高、比模量高和透波系数高的目的,也可以通过适当选择和布置每层材料的 ϵ_r 和 μ_r 以及厚度,使整个结构具有良好的匹配特性或衰减特性,以达到吸收率最大或透波率最大等目的。

当前,对于复合结构电磁特性的计算主要有网络工作法、FDTD 法,其中网络工作法是经典的计算方法,而 FDTD 法用得较少^[1~4]。本文以水平极化波为例介绍网络工作法。

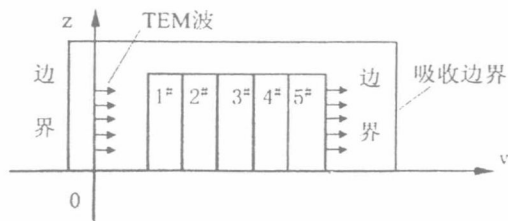


图 1 数学模型

1 多层平板结构的网络工作法设计

1.1 设计原理^[5]

多层平板的反射系数 R_f :

$$R_f = \frac{(A + B') - (C' + D)}{A + B' + C' + D} = R_{f1} - jR_{f2} \quad (1)$$

多层平板的透波系数 R_t :

$$R_T = \frac{2}{A + B' + C' + D} = R_{T1} - jR_{T2} \quad (2)$$

多层平板的功率反射系数为:

$$|R_f|^2 = |R_{f1}|^2 + |R_{f2}|^2 \quad (3)$$

多层平板的功率透波系数为:

$$|R_T|^2 = |R_{T1}|^2 + |R_{T2}|^2 \quad (4)$$

(1) A 、 B 、 C 、 D 的求解

A 、 B 、 C 、 D 为转移矩阵元素,由下式解出

$$\begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 B_1 \\ C_1 D_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_2 B_2 \\ C_2 D_2 \end{bmatrix} \dots \begin{bmatrix} A_n B_n \\ C_n D_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中 A_n 、 B_n 、 C_n 、 D_n 为单层的转移矩阵元素。

$$A_n = D_n = \text{ch}jv_n d_n$$

$$B_n = Z_{cn} \text{sh}jv_n d_n$$

$$C_n = \text{sh}jv_n d_n / Z_{cn} \quad (6)$$

$$B' = B / Z_{c0}$$

$$C' = Z_{c0} C \quad (7)$$

$$Z_{cn} = \frac{\mu_n \epsilon_n}{\epsilon_n} \sqrt{\frac{\epsilon_n}{\mu_n} - \sin^2 \theta_0}$$

$$\epsilon_n = \epsilon'_n (1 - j \tan \delta_n)$$

$$\mu_n = \mu'_n (1 - j \tan \delta_m) \quad (8)$$

$$Z_{c0} = \cos \theta_0$$

$$v_n d_n = \frac{2\pi d_n}{\lambda_0} \sqrt{\frac{\epsilon_n}{\epsilon_0} - \sin^2 \theta_0}$$

(2) 复数的化简

$$\text{ch}jv_n d_n = A_{bn1} \cos \Phi_{bn} + jA_{bn2} \sin \Phi_{bn}$$

$$\text{sh}jv_n d_n = A_{bn2} \cos \Phi_{bn} + jA_{bn1} \sin \Phi_{bn}$$

$$A_{bn1} = \frac{1}{2} \left(A_{bn} + \frac{1}{A_{bn}} \right)$$

$$A_{bn2} = \frac{1}{2} \left(A_{bn} - \frac{1}{A_{bn}} \right)$$

$$A_{bn2} = e^{\frac{2\pi d_n E_{n2}}{\lambda_0}}$$

$$\Phi_{bn} = \frac{2\pi d_n E_{n1}}{\lambda_0}$$

$$E_{n1} = E_n \cos \Phi_n$$

$$E_{n2} = E_n \sin \Phi_n$$

$$\Phi_n = -\frac{1}{2} \arctg \frac{\epsilon_{n0} \operatorname{tg} \delta_n}{\epsilon_{n0} \sin^2 \theta_0}$$

$\epsilon_{n0} = \epsilon_{n0}(1 - j \operatorname{tg} \delta_n)$ 式中 $\operatorname{tg} \delta_n$ 为电损耗角正切。

1.2 条件

网络工作法常用来计算平板结构的电磁波传输系数,其前提条件是:

(1)对象外形是平板结构,且内部所有介质也必须是平板结构,即界面必须是平整界面;

(2)平板的宽度是无限大,即仅计算电磁波从平板正面入射从背面透出情况而不考虑电磁波从平板其它侧面透出。

网络工作法计算简便,但其受上述条件限制,其应用范围十分有限,且误差大,更不可能描述电磁波的传播过程,因此,仅用于结构的整体电磁特性计算。

为了使网络法能更好地应用于复合材料计算且容易被复合材料工作者掌握,本文在其基础上开发了网络法的实用计算机计算方法以及图表估算法,此方法与计算机模拟相似,为了方便描述,在本文中将其称为 Imitation 法。Imitation 法分为两部分 (Imitation 1 法和 Imitation 2 法), Imitation 1 法主要用于复合结构或先由实验测试复合材料铺层等效电磁参数再将复合材料看成是由铺层组成的多层复合结构情况; Imitation 2 法主要用于复合材料电磁特性的直接计算或复合材料等效电磁参数的理论预算。

2 Imitation 1 法设计

2.1 TEM 波正入射情况

(1)入射波时域上离散

在入射面上,入射波方程为:

$$E = E_0 \sin 2\pi f t \quad 0 < t < T \quad (13)$$

将电磁波离散成瞬时波:

$$E_1 = E_0 \sin 2\pi f(t_1) \quad t_1 = 1 \times dt \quad (14)$$

$$E_2 = E_0 \sin 2\pi f(t_2) \quad t_2 = 2 \times dt$$

$$E_3 = E_0 \sin 2\pi f(t_3) \quad t_3 = 3 \times dt$$

$$E_4 = E_0 \sin 2\pi f(t_4) \quad t_4 = 4 \times dt$$

.....

式中 dt 为时间步长。

(2)空域上仿真

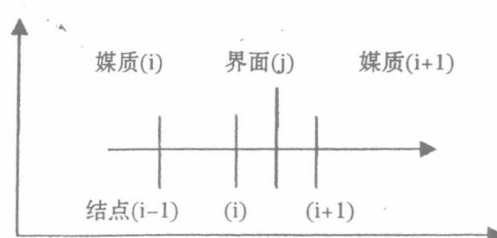


图2 结点

不需要设置吸收边界条件,仅在每个界面上直接设置过渡方程,然后直接模拟电磁波的传播。假设电磁波从 t_{i-1} 时刻(在结点(i)处)到 t_i 时刻(在结点(i+1)处),电磁波将可能遇上界面(j)。若不遇上界面,则在结点(i)上波的强度、方向不变,若遇上界面,则波会分散成反射波与折射波,反射波又成为一个新的瞬时波。

每一个脉冲电磁波行进的方程为:

在非媒质界面上时:

$$E(t_i, m) = E(t_{i-1}, m) e^{\operatorname{aid}(i)} \quad (15)$$

$$Y(t_i, m) = Y(t_{i-1}, m) + d(i) \times f_x(t_{i-1}, m) \quad (16)$$

$$f_x(t_i, m) = f_x(t_{i-1}, m) \quad (17)$$

在媒质界面(j)上时,每一个瞬时波分散成折射波与反射波,

折射波:

$$E(t_i, m) = E(t_{i-1}, m) \times [1 - r(j)] e^{\operatorname{aid}(i)} \quad (18)$$

$$Y(t_i, m) = Y(t_{i-1}, m) + d(i) \times f_x(t_{i-1}, m) \quad (19)$$

$$f_x(t_i, m) = f_x(t_{i-1}, m) \quad (20)$$

反射波:

$$n = m + 1$$

$$E(t_i, n) = E(t_{i-1}, m) \times r(j) e^{\operatorname{aid}(i)} \quad (21)$$

$$Y(t_i, n) = Y(t_{i-1}, m) + d(i) \times f_x(t_{i-1}, m) \quad (22)$$

$$f_x(t_i, n) = -f_x(t_{i-1}, m) \quad (23)$$

$$r(j) = \frac{\sqrt{\epsilon_{i+1}} - \sqrt{\epsilon_i}}{\sqrt{\epsilon_{i+1}} + \sqrt{\epsilon_i}} \quad (24)$$

式中 t_i —时刻

m, n —瞬时波序号

$d(i)$ —空间步长

$f_x(t_{i-1}, m)$ —第 t_{i-1} 时刻第 m 号波的前进方向

$r(j)$ —界面(j)的反射系数

α_i —第 i 层的衰减因子

ϵ_i —第 i 层的相对介电常数。

上式物理意义:当一个瞬时波在媒质中传播时,当未遇上媒质界面时,电磁波强度、方向不变,波向

下一个结点行进;当波遇上界面时,分散成折射波与反射波,反射波的方向改变。

(3) 空间步长与时间步长的修正

在媒质(i)中的空间步长为:

$$d(i) = v_i \times dt$$

式中 v_i —瞬时波在媒质(i)中的传播速度。

为了保持空间步长 $d(i)$ 与 dt 的一致, $d(i)$ 与 dt 必须随时改变。因此必须对(16)和(19)式修正。

对于折射波:

$$Y(t_i, m) = jd(j) + \frac{|y(t_i, m) - jd(j)|}{d(i)} dt \times v_{i+1} \times f_x(t_i, m) \quad (26)$$

$$E(t_i, m) = E(t_{i-1}, m) [1 - r(j)] \times \exp[\alpha_i \times \{jd(j) - yE(t_{i-1}, m)\}] + \frac{|y(t_i, m) - jd(j)|}{d(i)} dt \times v_{i+1} \times \alpha_{i+1} \quad (27)$$

对于反射波:

$$Y(t_i, n) = jd(j) + \frac{|y(t_i, n) - jd(j)|}{d(i)} dt \times v_i \times f_x(t_i, n) = jd(j) + |y(t_i, n) - jd(j)| \times f_x(t_i, n) \quad (28)$$

式中 $jd(j)$ —媒质(i)与媒质(i+1)间的界面(j)坐标。

经过修正,达到了间接改变 dt 的目的。

$d(i)$ 的取值:

$$d(i) \leq d_i / 10 \quad (29)$$

$$dt = \min(d(i)) / C_0 \quad (30)$$

根据 dt 值,重新确定 $d(i)$ 值

$$d(i) = dt \times v_i \quad (31)$$

式中 d_i 为第 i 层厚度

C_0 为真空中的光速。

(4) 初始条件

$$E(0, 0) = E_i \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (32)$$

$$Y(0, 0) = 0 \quad (33)$$

$$f_x(0, 0) = 1 \quad (34)$$

(5) 误差控制

根据上述计算,每一个入射的瞬时波均会经过无数次反射后产生大量甚至是无限数量的反射波,必然会影响计算进度,因此,必须设置截断误差 ΔE_1 。

$$\Delta E_1 = E(t_i, m) / E_i \quad (35)$$

上式的物理意义:当瞬时波与入射瞬时波强度(绝对值)比值小于 ΔE_1 时,忽略反射波。

显然, ΔE_1 值越小,计算精度就越高。

计算时间 t 的取值也会带来微小的误差,这是

因为一次反射波(或透射波)与二次反射波之间存在着相差($2\pi f \Delta t$),一次反射波与二次反射波自 $t = \Delta t$ 时刻开始叠加;当 $t = T$ 时,一次反射波已经全部反射完毕,而二次反射波却滞后了 Δt 。一次反射波比二次反射波提前的 Δt 与二次反射波落后的 Δt 就产生了微小的误差 ΔE_2 。控制 ΔE_2 的方法是 T 的取值, T 的值越大, ΔE_2 就越小。

根据反复计算, T 的取值必须是电磁波周期的整数倍。

总误差 ΔE 为:

$$\Delta E = \Delta E_1 + \Delta E_2 \quad (36)$$

2.2 Imitation 1 法图表计算

对于平板受 TEM 波正入射问题,为了便于人工直接计算,作者经过长时间摸索,总结出了一套图表计算方法,非常行之有效,下面给予简单介绍。

瞬时波经过媒质界面的层层反射后产生大量的反射波与透射波,其中一次、三次、五次等奇数次反射波为最终通过反射面的反射波,而0次、二次、四次等偶数次反射波为最终通过透射面的透射波。所有奇数次反射波的叠加构成反射波,所有偶数次反射波的叠加构成透射波。

$$\text{反射波为: } E_1 = \sum E_i \quad (37)$$

$$\text{透射波为: } E_2 = \sum E_i \quad (38)$$

$$E_i = E_0 R_i \sin 2\pi f(t - t_i) \quad (39)$$

所以,只要求出 R_i 与 t_i ,就可以得出反射系数 R_i 与透波系数 R_T 。 R_i 、 R_T 与入射波强度 E_0 无关。

$$R_i = \frac{\sum R_i \sin 2\pi f(t - t_i)}{\sum \sin 2\pi ft}$$

$$R_T = \frac{\sum T_i \sin 2\pi f(t - t_i)}{\sum \sin 2\pi ft} \quad (40)$$

所有 R_i 、 T_i 与 t_i 可通过以下图表写出。

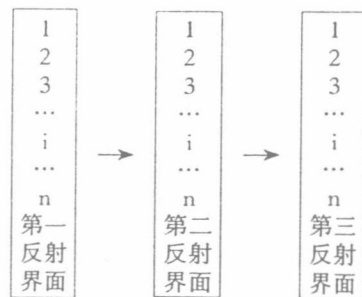


图3 图表

第一步,确定反射界面

(1)对于一次反射波,第一反射界面可以是:1~n;

对于二次以上反射波,第一反射界面可以是:2

~n;假设为界面(i);

(2)第二次反射界面必须是(i)以前的界面:1-1,1-2,1-3...1;假设为界面(j);

(3)第三次反射界面必须是(j)以后的界面:j+1,j+2,j+3...n,假设为界面(k);

如此类推,如果波经过奇数次反射(反射界面为(i))后,波往界面(i-1)、(i-2)方向前进;如果波经过偶数次反射(反射界面为(j))后,波往界面(j+1)、(j+2)方向前进。根据以上规律,容易写出图3.3中所有组合的波行进所经过的反射界面和透射界面。也可以用计算机程序很容易实现。

第二步,画出波行进路线

电磁波经过:1,2...i⁽¹⁾→i-1,i-2,i-3...j⁽²⁾→j+1,j+2,j+3...k⁽³⁾→k-1,k-2,k-3...1。

第三步,写出 R_i 、 T_i 与 t_i ,其中 R_i 、 T_i 是相同的,当波经过奇数次反射时为反射波,其电场反射系数为 R_i ;当波经过偶数次反射时为透射波,其电场透射系数为 T_{li} 。

以反射界面依次是3⁽¹⁾、2⁽²⁾、4⁽³⁾,总界面数为6情况为例:

波行进路线:1,2,3⁽¹⁾→2⁽²⁾,3,4⁽³⁾→3,2,1

$$R_{il} = (1-r_1)(1-r_2)r_3(-r_2)(1-r_3)r_4(1+r_3)(1+r_2)(1+r_1)$$

$$t_i = \Delta t_1 + \Delta t_2 + 0 + 2\Delta t_2 + \Delta t_3 + 0 + \Delta t_3 + \Delta t_2 + \Delta t_1$$

$$sh_i = s_1 + s_2 + 0 + 2s_2 + s_3 + 0 + s_3 + s_2 + s_1$$

$$R_i = R_{il} \exp(-sh_i) \sin 2\pi f(t - t_i) \quad (41)$$

式中 $s_i = d_i \alpha_i$, α_i 为第 i 层的衰减因子;

Δt_i —第 i 层的透过时间。

上式的写法规则是:

(1)高界面→低界面时:

界面反射系数: $-r_i$ 对应的时间: $2\Delta t_i$ 损耗: $2s_i$

界面透波系数: $1-r_i$ 对应的时间: Δt_i 损耗: s_i

(2)低界面→高界面时:

界面反射系数: r_i 对应的时间: 0 损耗: 0

界面透波系数: $1+r_i$ 对应的时间: Δt_i 损耗: s_i

根据上述规则,可以任意组合出反射波与透射波方程。表1给出了6个界面(5层)时的一次反射波方程。

表1 一次反射波方程

R_i	T_i
$(1-r_1)r_2(1+r_1)\exp(-s_1-s_2)$	$\Delta t_1 + \Delta t_2$
$(1-r_1)(1-r_2)r_3(1+r_2)(1+r_1)\exp(-2s_1-2s_2)$	$2\Delta t_1 + 2\Delta t_2$
$(1-r_1)(1-r_2)(1-r_3)r_4(1+r_3)(1+r_2)(1+r_1)\exp(-2s_1-2s_2-2s_3)$	$2\Delta t_1 + 2\Delta t_2 + 2\Delta t_3$
$(1-r_1)(1-r_2)(1-r_3)(1-r_4)r_5(1+r_4)(1+r_3)(1+r_2)(1+r_1)\exp(-2s_1-2s_2-2s_3-2s_4)$	$2\Delta t_1 + 2\Delta t_2 + 2\Delta t_3 + 2\Delta t_4$
$(1-r_1)(1-r_2)(1-r_3)(1-r_4)(1-r_5)r_6(1+r_5)(1+r_4)(1+r_3)(1+r_2)(1+r_1)\exp(-2s_1-2s_2-2s_3-2s_4-2s_5)$	$2\Delta t_1 + 2\Delta t_2 + 2\Delta t_3 + 2\Delta t_4 + 2\Delta t_5$

2.3 斜入射情况

(1)波行进的方程

在仿真过程中,描述一束斜入射的瞬时波所需要的参量见表2。

每一个脉冲电磁波行进的方程为:

在非媒质界面上时:

$$E(t_i, m) = E(t_{i-1}, m) e^{ad(i)} \quad (42)$$

$$Y(t_i, m) = Y(t_{i-1}, m) + d(i) \times f_{xc}(t_{i-1}, m) \quad (43)$$

$$Z(t_i, m) = Z(t_{i-1}, m) + d(i) \times f_{xs}(t_{i-1}, m) \quad (44)$$

$$f_{xc}(t_i, m) = f_{xc}(t_{i-1}, m)$$

$$f_{xs}(t_i, m) = f_{xs}(t_{i-1}, m)$$

在媒质界面(j)上时,每一个瞬时波分散成折射波与反射波(见图4),

表2 参量列表

参量	名称	备注
$E(t_i, j)$	电场强度	t_i :时刻, j:波号
$X(t_i, j), Y(t_i, j), Z(t_i, j)$	波在 t_i 时刻的坐标	$X=0$
α	入射角	
β	反射角	
γ	折射角	
Φ	入射线与 Y+ 的夹角	逆时针方向
Ψ	反射线与 Y+ 的夹角	逆时针方向
θ	折射线与 Y+ 的夹角	逆时针方向
$f_{xc}(t_i, j)$	波前进方向线与 Y+ 的夹角余弦	
$f_{xs}(t_i, j)$	波前进方向线与 Y+ 的夹角正弦	

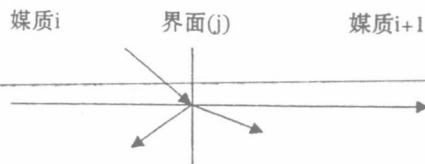


图4 界面上的反射与折射

折射波:

$$E(t_i, m) = E(t_{i-1}, m) \times z_{sxs} \times e^{aid(i)} \quad (45)$$

$$Y(t_i, m) = Y(t_{i-1}, m) \times d(i) \times f_{xc}(t_{i-1}, m) \quad (46)$$

$$Z(t_i, m) = Z(t_{i-1}, m) \times d(i) \times f_{xs}(t_{i-1}, m) \quad (47)$$

$$f_{xc}(t_i, m) = y1 \quad (48)$$

$$f_{xs}(t_i, m) = y2 \quad (49)$$

$$x1 = f_{xc}(t_{i-1}, m)$$

$$x2 = f_{xs}(t_{i-1}, m)$$

反射波:

$$n = m + 1$$

$$E(t_i, n) = E(t_{i-1}, m) \times f_{sxs} \times e^{aid(i)} \quad (50)$$

$$Y(t_i, n) = Y(t_{i-1}, m) \times d(i) \times f_{xc}(t_{i-1}, m) \quad (51)$$

$$Z(t_i, n) = Z(t_{i-1}, m) \times d(i) \times f_{xs}(t_{i-1}, m) \quad (52)$$

$$f_{xc}(t_i, n) = -x1 \quad (53)$$

$$f_{xs}(t_i, n) = x2 \quad (54)$$

表 3 y1/y2 的确定

入射线在界面左侧	y1 = $\alpha \sin \gamma$, y2 = $-\sin \gamma$	入射线在法线上方
	y1 = $\alpha \sin \gamma$, y2 = $\sin \gamma$	入射线在法线下方
入射线在界面右侧	y1 = $-\alpha \sin \gamma$, y2 = $-\sin \gamma$	入射线在法线上方
	y1 = $-\alpha \sin \gamma$, y2 = $\sin \gamma$	入射线在法线下方

$$f_{sxs} = \frac{\sqrt{\epsilon_{i+1}} \cos \alpha - \sqrt{\epsilon_i} \cos \gamma}{\sqrt{\epsilon_{i+1}} \cos \alpha + \sqrt{\epsilon_i} \cos \gamma} \quad (55)$$

$$z_{sxs} = \frac{2 \sqrt{\epsilon_{i1}} \cos \alpha}{\sqrt{\epsilon_{i+1}} \cos \alpha + \sqrt{\epsilon_i} \cos \gamma}$$

(2) 空间步长与时间步长的修正

为了保持空间步长 $d(i)$ 与 dt 的一致, $d(i)$ 与 dt 必须随时改变。因此必须对(45)和(46)式修正。

对于折射波:

$$Y(t_i, m) = jd(j) + \frac{|y(t_i, m) - jd(j)|}{d(i) f_{xc}(t_{i-1}, m)} dt \times v_{i+1} \times f_{xc}(t_i, m) \quad (56)$$

$$E(t_i, m) = E(t_{i-1}, m) [1 - r(j)] \times \exp[\alpha_1 \times (dl_i + dl_{i+1}) \times \alpha_{i+1}] \quad (57)$$

式中 dl_i/dl_{i+1} 为波在 dt 时间内在媒质 i 与媒质 $i+1$ 中行进的位移。

(3) 误差控制

斜入射时, 不仅有截断误差 $\triangle E_1$ 和误差 $\triangle E_2$, 而且在 Z 方向上还存在另一微小误差 $\triangle E_3$ 。 $\triangle E_3$ 也是由于在 Z 方向上计算时产生的, 其产生原因同 $\triangle E_2$ 相同, 解决的方法是 Z 的取值, Z 的值越大, $\triangle E_3$ 就越小。

根据反复计算, 当 Z 的取值大于波长的一倍以上时, $\triangle E_3$ 小于 10^{-4} 。

总误差 $\triangle E$ 为:

$$\triangle E = \triangle E_1 + \triangle E_2 + \triangle E_3 \quad (58)$$

2.4 Imitation 1 法图表计算斜入射问题

只要将上述正入射图表计算程序中的反射系数与媒质厚度作适当的修正, 就可以用图表法简便地计算斜入射问题。

(1) 反射系数修正

$$r(j) = \frac{\sqrt{\epsilon_{i+1}} \cos \alpha - \sqrt{\epsilon_i} \cos \gamma}{\sqrt{\epsilon_{i+1}} \cos \alpha + \sqrt{\epsilon_i} \cos \gamma} \quad (59)$$

(2) 媒质厚度修正

根据图 3、图 4, 界面 (j) 两侧的媒质分别为 (i) 和 $(i+1)$, 设界面 (j) 的折射角余弦/正弦为 $rc(j)/rs(j)$ 。则媒质 $(i+1)$ 的修正厚度为: $d(i+1)/rc(j)$, $d(i+1)$ 为媒质 $(i+1)$ 的原厚度。

在平板结构中, 界面 (j) 的折射角余弦/正弦 $rc(j)/rs(j)$ 是下一个界面 $(j+1)$ 的入射角余弦/正弦, 所以, (36) 式中, $\cos \alpha = rc(j-1)$, $\cos \gamma = rc(j)$ 。根据此规律, 有:

$$\begin{aligned} rs(1) &= \cos \alpha_0 \times \frac{\sqrt{\epsilon_0}}{\sqrt{\epsilon_1}} \\ rc(1) &= \sqrt{1 - rs(1)^2} \\ rs(2) &= rs(2) \times \frac{\sqrt{\epsilon_1}}{\sqrt{\epsilon_2}} \\ rc(2) &= \sqrt{1 - rs(1)^2} \end{aligned} \quad (60)$$

.....

$$\begin{aligned} rs(i+1) &= rs(i) \frac{\sqrt{\epsilon_i}}{\sqrt{\epsilon_{i+1}}} \\ rc(i+1) &= \sqrt{1 - rs(1)^2} \end{aligned}$$

2.5 Imitation 1 法特点

Imitation 1 法利用网络法原理直接对电磁波的传播过程进行模拟, 具有其独特的优点:

(1) 可以解决曲面结构问题

网络法只能计算在 Z 方向上无限大平板结构的反射系数与透波系数, 对于界面是曲面的结构即非平板问题, 网络法不适用。

同样, 非均匀 FDTD 法只能将曲面用梯形边界来代替, 从而对于界面为曲面问题, 误差很大, 也不能很好地解决曲面问题。

(2) 误差可以控制

Imitation 1 法是对电磁波传播过程的直接模拟,不必设置吸收边界,也不存在计算步长带来的误差,且截断误差可以根据需要设置。

(3)不存在色散和不收敛问题

采用 FDTD 法时,尤其是非均匀 FDTD 法,易产生色散和不收敛情况,给计算带来很多限制条件,影响了 FDTD 法的应用。

(4)模拟了电磁波整个传播过程

与网络法不同,网络法计算的是整个体系的反射系数(结果),而 Imitation 1 法则从时间和空间上计算了整个传播过程,可以了解所有时刻每一个结点位置电磁波的电场强度、磁场强度、功率以及电磁波的传播方向。这一点对于波导计算尤为重要。

(5)节省计算时间

非均匀 FDTD 法的时间步长不可以改变,计算时间无法有效控制,而 Imitation 1 法的时间步长与空间步长都随时改变,大大地节省了计算时间,且使计算更加简洁明了。

3 雷达罩电磁特性研究

雷达罩是用来保护天线免受自然环境影响的外壳。除单层结构和空间桁架式结构外,薄壳式雷达罩结构均为典型的多层结构曲面板。本文以 A—夹层结构的雷达罩为例,应用 Imitation 1 法和实验研究多层复合结构的电磁特性。

通常使用的雷达罩,其横截面是 A—夹层。它由两个比较致密、电气上很薄的蒙皮和一个较厚的低密度芯子组成。芯子呈泡沫或蜂窝状,表皮一般是玻璃纤维增强塑料。由于考虑电的因素,夹层结构的蒙皮通常做成对称的。A—夹层多用于尺寸较小的飞行器上的鼻锥天线罩,也常与介质桁架一起做成高质量的地面雷达天线罩。

下面以某型气象雷达罩为例,研究复合结构的电磁特性。

表 4 各层参数测试结果

No	ϵ_r	$\text{tg}\delta_n$	厚度 d_n/mm
1	4.20	0.02	0.6
2	1.10	0.003	7.3
3	4.20	0.02	0.6
4	3.50	0.03	0.2
5	6.30	0.25	0.05

3.1 雷达罩材料正入射时的电磁特性

通常测试雷达罩透波性能时,测试的电磁波均

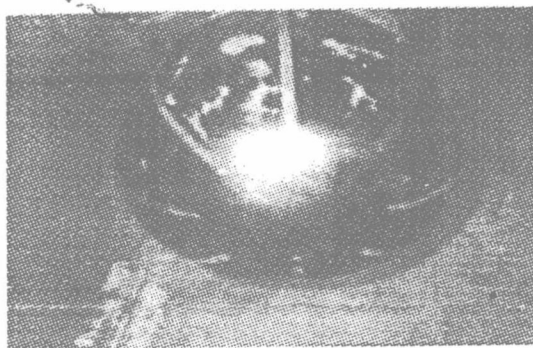


图 5 某型气象雷达罩

- 1#层和3#层:玻璃钢层(正交双向铺设);
- 2#层:玻璃钢蜂窝层,正六边形蜂窝结构;
- 4#层:抗静电保护层;
- 5#层:防雨水层。

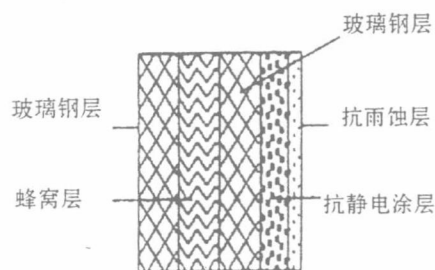


图 6 雷达罩夹芯结构示意图

沿雷达罩的法线方向入射,即为正入射。当雷达罩的曲率较小时,可以将其作为平板问题解决。

(1)透射波与频率特性

在 9.3~9.4GHz 频带内,材料透波率平均值约为 96% 左右,透波系数在 9.395GHz 以下时,频率每增加 10MHz,透波系数下降 0.0004;但 9.395GHz 以上,反射系数上升较大,说明材料透射超高频电磁波能力明显下降,该结构不适用于超高频情况。

(2)材料表面厚度对雷达罩电磁性能的影响

$$\text{材料透波系数: } R_T = \sum_A R(i, j)$$

式中 $R(i, j)$ —表面 A 各点的透波系数,而 $R(i, j) = f(d)$, $R(i, j)$ 是电磁波透过该点所经过距离即该点处厚度 d 的函数,因此, d 的大小直接影响了 R_T 值。

当涂层施工出现尺寸偏差或出现涂层厚薄不均匀时,材料的透波系数也会发生变化。

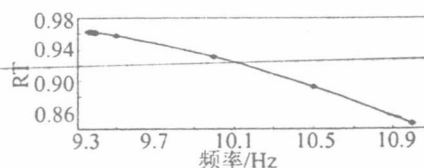
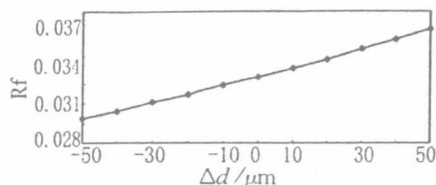


图 7 透波系数与频率

图8 抗静电层公差与 R_T 有关系

当涂层厚度减小时,材料透波系数增加。

3.2 雷达罩材料斜入射时的电磁特性

从图9可以看出,入射角增大,材料反射系数增大,当入射角小于 20° 时,曲线平缓,而后曲线迅速上升。

3.3 雷达罩电磁特性实验研究

(1)测试方法。图10为雷达罩结构测试框图,包括测试支架、控制台、矢量网络分析仪、接收和发射天线等。测试在微波暗室内进行,暗室的四周及顶部和底部均放置微波吸收材料,以降低外界环境干扰,减少反射影响。在测试过程中,在喇叭容易照到的金属支架部位放置吸波材料,降低散射。

发射喇叭天线和接收喇叭天线分别与矢量网络分析仪的两个收发通道相联,并放置在测试支架的两侧,由两个三脚架支撑,喇叭高度相等,极化相同,口面平行。

在测试支架上未放置雷达罩的情况下,测试 S_{21} 参数,记录下相应的幅相数据,以备系统校准;然后将被测对象放置在测试支架上,重复上述测量 S_{21} 参数的过程,并利用校准数据通过微机进行数据处理,消除周围环境影响,求出雷达罩的传输系数。

(2)测试过程。测试采用X波段喇叭天线,测试中心频率 $f_0 = 9.375\text{GHz}$,频带范围 $9.355 \sim 9.395\text{GHz}$ 。

测试步骤:在测试支架上无雷达罩的情况下,以 10MHz 的频率间隔逐点进行 S_{21} 参数测量,将幅相值作为校准数据保存在计算机中,然后加上雷达罩,以同样方法重复进行 S_{21} 测量,并利用校准数据通过计算机处理后获得雷达罩的透波系数。

将测试支架旋转一个角度,采用上述方法重复进行透波系数的测量,可获得雷达罩各个区域的透波系数。

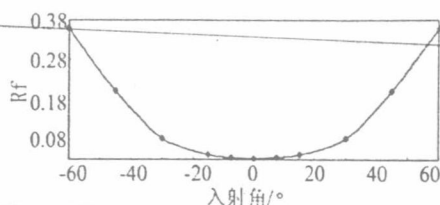


图9 反射系数与入射角关系

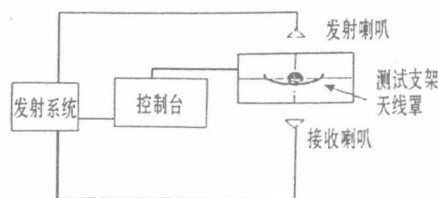


图10 测试框图

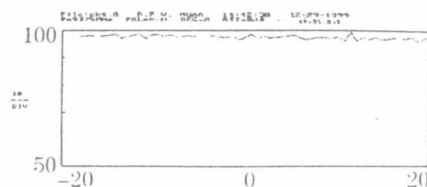


图11 雷达罩测试结果

(3)测试结果。从测试结果可以看出,在频带范围内,雷达罩第1区的透波系数平均值为96%左右。比较实验测试结果与计算结果显示,两者基本吻合,表明计算方法可靠。

4 小结

(1)本文以复合结构计算为例,系统阐述了Imitation 1法计算复合结构问题的原理、步骤、实现方法、误差控制等;详细给出了Imitation 1法的图表计算方法。

(2)当材料受一瞬时TEM波正入射时,材料透波系数为0.96。进入材料内部的电磁波经过多层材料的反射、折射后穿出材料,其透射波的持续时间被延长,已成为一幅值逐渐递减的连续波。

(3)在 $9.3 \sim 9.4$ 频带内,材料透波率平均值约为96%左右,透波系数在 9.385GHz 以下时随频率变化不大,但 9.395GHz 以上,透波系数上升较大,说明,材料对于高频具有很好的透射功能。

(4)当表面呈负公差值时,材料的透波性好,随着材料向内部的加厚,材料透波系数明显下降。

(5)当涂层厚度减小时,材料透波系数增加。

(6)入射角增大,材料反射系数增大,当入射角小于 20° 时,曲线平缓,随后曲线迅速上升;

(7)测试结果在频带($9.3 \sim 9.4\text{GHz}$)范围内,雷达罩受TEM波正入射时透波率平均值为96%左右。实验测试结果与计算结果基本吻合,表明计算方法具有一定的可靠性。

参考文献:

- [1] 张考等.飞行器对雷达隐身性能计算与分析.北京:国防工业出版社,1997.50-100.

(下转第34页)

复合材料电磁特性的非均匀时域有限差分法分析

朱正吼 邱伟娟

(南京航空航天大学)

摘要:介绍了用非均匀时域有限差分方法计算复合材料电磁特性问题的基本原理、数学模型、网格划分、边界条件与初始条件等。文章着重针对解决材料结构为各向异性时的电磁特性计算问题。最后,利用非均匀时域有限差分方法求解了 $[0^\circ]$ 玻璃纤维/环氧树脂层合板在TEM波入射时的散透射高频电磁波的情况,计算结果表明透射出的辐射强度与垂直于电磁波传播方向的层合板截面上纤维所占面积百分比具有直接的关系。

关键词:时域有限差分法;复合材料

中图分类号:TQ327.1 TQ327.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-244X(2001)02-0030-04

求解电磁场的计算方法有矩量法、有限元法、传输线矩阵法和时域差分法等,因为电磁场涉及的内容非常丰富,所以数值计算的直接应用课题很多,例如,天线设计、微波器件、RCS计算、生物体内SAR计算等。但上述计算方法却对复合材料和复杂的复合结构电磁特性难于有效地计算和分析。

时域有限差分法(FD-TD法)是一种当前正在迅速发展且具有很大发展前景的数值计算方法。它最早是由 Kane, S. Yee^[1]在1966年提出的。这种方法首先将解域离散化成直角立方体(包括正方体)网格,并将直角坐标系中的 Maxwell 旋度(矢量)方程用有限差分法来代替,然后在相应的边界条件和初始条件下解有限差分方程。

FD-TD法的特点是把各类问题都当作初值问题来处理,使电磁波的时域特性直接反映出来。这一特性使它能直接给出非常丰富的电磁场问题的时域信息,用清晰的图象描述复杂的物理过程。要获得宽频带的信息,只需在宽频带的脉冲激励下进行一次计算。FD-TD法模拟空间电磁性质的参数是按空间网格给出的,因此只需给定相应空间点的媒质参数,就可以模拟复杂的电磁结构。当然,还需要对源进行正确的模拟,这样FD-TD法最终就能精确地解决:不管问题是散射、辐射、传输、穿透或吸收,也不论是暂态问题还是稳态问题。

同其它计算方法相比,FD-TD法不仅具有节

省存储空间和计算时间、简单等优点,更重要的是FD-TD法可以有效地解决含有透吸波材料复杂结构的电磁特性分析问题,如RCS计算。

由于FD-TD法的核心问题是:一是要求待分析问题的边界呈规则形状,以便于划分成直角六面体或立方体状;二是对于网格的划分为等步长(均匀空间)。这给复合材料的电磁特性分析带来问题。为此,本文尝试着用变步长的计算方法——非均匀TD-DT法来克服上述不足之处。

1 非均匀FD-TD法的基本理论

1.1 非均匀FD-TD法的一般特征

求解电磁特性问题的FD-TD法是基于在时空域中对 Maxwell 旋度方程的有限差分离散化——以具有两阶精度的中心有限差分格式来近似地代替原来微分形式的方程。这里的两阶精度是指方程的时、空导数一阶误差项在方程中不存在,仅保留两阶或高阶误差项。

在 Yee 算法中,采用的是均匀空间(直角六面体或正方体)网格把一给定几何空间离散化和经此格式离散化所得的直角坐标系中的电磁场有限差分方程。FD-TD法的任务就是在适当的边界和初始条件下解所有有限差分方程。

与 Yee 算法不同的是,非均匀FD-TD法在保持网格划分正交性的前提下,采用变步长,这样不仅

收稿日期:1999-09-27

作者简介:朱正吼(1969-),男,安徽,副教授,复合材料方向,南京航空航天大学材料科学与工程系,210016,Email:zzhshh@public.ptt.js.cn.