

文章编号:1000-6893(2008)05-1213-05

轻质铝箔V型皱褶构型板雷达散射性能研究

王志瑾¹, 徐庆华²

(1. 南京航空航天大学 航天学院, 江苏 南京 210016)

(2. 沈阳飞机设计研究所, 辽宁 沈阳 110035)

Research on RCS of Plates with Folded Structure Made of Aluminium Foil

Wang Zhijin¹, Xu Qinghua²

(1. College of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

(2. Shenyang Aircraft Design and Research Institute, Shenyang 110035, China)

摘要: 设计并制作了14个不同几何特征参数的V型铝箔皱褶构型板。运用电磁数值仿真软件对它们的雷达散射截面(RCS)进行了计算,分析了V型皱褶板几何特征参数对雷达散射性能的影响。同时,用LFY铝箔制作了14个不同几何特征参数的皱褶构型板,并对它们进行了RCS实验测试。通过对比分析发现,数值计算结果和实验测试结果基本吻合。结果显示,在一定的结构参数下,轻质铝箔皱褶板的RCS比同样平面几何尺寸的平板小,有的甚至降低20 dBsm。铝箔皱褶板成型工艺简单,结构重量轻,价格低廉,可用于包敷飞行器内部有较大RCS的大尺寸构件,从而降低整个飞行器的RCS。

关键词: 雷达散射截面; 皱褶结构; 夹层板; 数值计算; 实验研究

中图分类号: TN95 **文献标识码:** A

Abstract: The fourteen different plates with folded structure made of aluminium foil are designed; their radar cross section (RCS) is calculated using the electromagnetic numerical simulation software. The effect of geometric parameters on the RCS of the plates is investigated. The specimens of the fourteen different plates with different geometry are made from LFY aluminium foil. The RCS experiments of the plates are carried out in the anechoic chamber. The comparisons of experimental and simulation results indicate that simulation results are agreement with the experimental results. It is found that the RCS of the plates with folded structure is much lower than that of the common plates. In some cases, the reduction of the RCS can reach 20 dBsm. In conclusion, the plates with folded structure made of aluminium have good features in terms of manufacture, mass and cost. This kind of plates can be used as a covering structure for aircraft components to reduce the RCS.

Key words: radar cross section; folded structure; sandwich plate; numerical calculation; experimental investigation

隐身技术是现代军事上隐蔽自己以免敌人发现,借以增强突击能力或保护自己的重要手段。其中飞行体对雷达波的隐身,使一般雷达失去或降低探测能力,具有突出的意义^[1-2]。武器或飞行体的隐身性能主要决定于它们对雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)的大小,因而以各种方法减缩雷达截面,就成为研究隐身技术的主要目标。对飞行器而言,可以通过多种方式来降低雷达散射截面,比如:修形、采用雷达吸波材料等^[3-5]。修形受到气动、力学等性能的影响,吸波材料价格高、涂敷工艺复杂,并且重量也不轻。本文对不同构型参数的铝箔皱褶构型板的微波反射性能进行了实验和数值研究分析,研究结果表明,

皱褶构型板具有很好的微波散射性能,在一定参数匹配下,其RCS比同平面尺寸平板的RCS可以降低3~22 dBsm。在飞行器外表面(机翼蒙皮、机身蒙皮)常采用吸波涂层、吸波材料^[6-7]来降低RCS。现代飞行器越来越多地采用复合材料结构,会大大降低全机的RCS,但由于受力和连接方面的要求,内部还有较大尺寸的重要金属受力构件,会产生较大的RCS,比如飞机金属大梁等。可以将铝箔皱褶构型板包敷在这些构件表面(如大梁腹板、隔框腹板)上,从而可以降低这些构件并降低整个飞行器的RCS。

1 皱褶构型板及其雷达散射机理

1.1 V型皱褶构型几何特征

皱褶构型——将平板材料(金属薄板、复合纸

等)按有规律的线系进行局部皱褶而得到的立体构型^[8-9]。皱褶后得到的立体结构可看成是由很多小的多边形平面元素形成的具有凸凹表面的构型,各元素之间沿边缘相互连接,如图 1 所示。

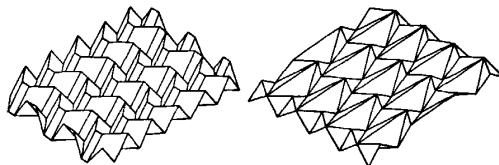


图 1 两种皱褶构型
Fig. 1 Two kinds of folded structure

V-型皱褶构型是最简单的皱褶构型之一。它是由薄板按 V-型折叠线系(图 2(a))通过局部上下皱褶而得到的立体构型^[10](图 2(b))。皱褶后得到的立体结构的基本单元如图 3 所示。它具有 4 个独立的参数:高度 H ; Z 形线的步长 $2S$; 锯齿形线的步长 $2L$; Z 形线的折幅 V 。这 4 个参数唯一确定了,构型特征就确定了。

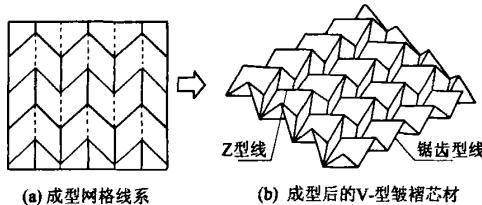


图 2 V-型皱褶芯材成型示意图
Fig. 2 Illustration for forming of folded core

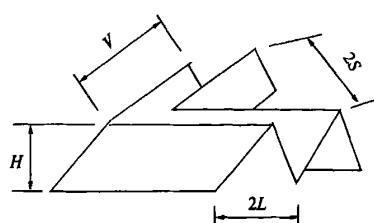


图 3 V-型皱褶芯材几何参数
Fig. 3 Geometric parameters of folded core

1.2 V-型皱褶构型板降低 RCS 的机理

在文献[11-12]中,作者对角形结构的雷达散射特性进行了详细的理论和实验研究,计算和实验结果都表明,当双平面角形反射器的夹角为直角时,具有较宽的高 RCS 波瓣,这是二次镜面反射的结果,它对目标隐身极为不利。但当角形结

构夹角偏离直角时,RCS 峰值下降,且主瓣分裂,在 $\varphi = 0^\circ$ 观察方向上,RCS 峰值可下降 12~30 dBsm。V-型皱褶构型就是由很多单独角形结构组成的连续结构。如果选取适当的几何参数,就有可能寻找到 RCS 较低的构型。文献[13]对简单形状的雷达散射特征进行了分类,认为表面曲率不连续形物体的表面,其雷达散射的回波很小。并且认为,如果试图减小复杂物体的回波,就必须使其仅具有边缘和顶点而无表面。然而这样的物体并不存在。但可以设法增加边缘和顶点^[14],减小大面积回波。在 V-型皱褶构型中,具有很多的边缘,边缘曲率也不连续,整个面的曲率不断变化,具有可减小 RCS 的几何特征。

从皱褶构型的几何形状可以看出,降低 RCS 的机理主要是依靠很多小的斜面减小了镜面反射,从而降低 RCS。但在非镜面方向,RCS 值会略有提高,但由于在非镜面方向的 RCS 值原本就较小,提高的值也有限,总体上看还是降低了 RCS 的最大值。结果具有一定的参考价值。

2 实验和理论研究

设计了 14 个试件。试件由厚度为 0.045 mm 的 LFY 铝箔制作。具体的几何参数见表 1。对该 14 个对象分别进行了雷达散射特性测试^[15],并利用通用电磁数值仿真软件 XFDTD6.1 进行了雷达散射特性数值计算。

表 1 试件几何参数

Table 1 Geometric parameters of specimens

试件 编号	几何参数			
	H/mm	L/mm	S/mm	V/mm
No. 0(平板)	0	0	0	0
No. 1	32	22	22	33
No. 2	32	43	22	33
No. 3	32	64	22	33
No. 4	32	85	22	33
No. 5	73	22	22	33
No. 6	93	22	22	33
No. 7	23	22	22	33
No. 8	18	22	22	33
No. 9	13	22	22	33
No. 10	32	22	37	33
No. 11	32	22	53	33
No. 12	32	22	68	33
No. 13	32	22	22	53
No. 14	32	22	22	63

2.1 实验与数值分析计算

(1) 典型试件描述

试件为 $400\text{ mm} \times 400\text{ mm}$ 的正方形板,材料为LFY铝箔。图4所示为从试件中选取的几个典型试件图片。

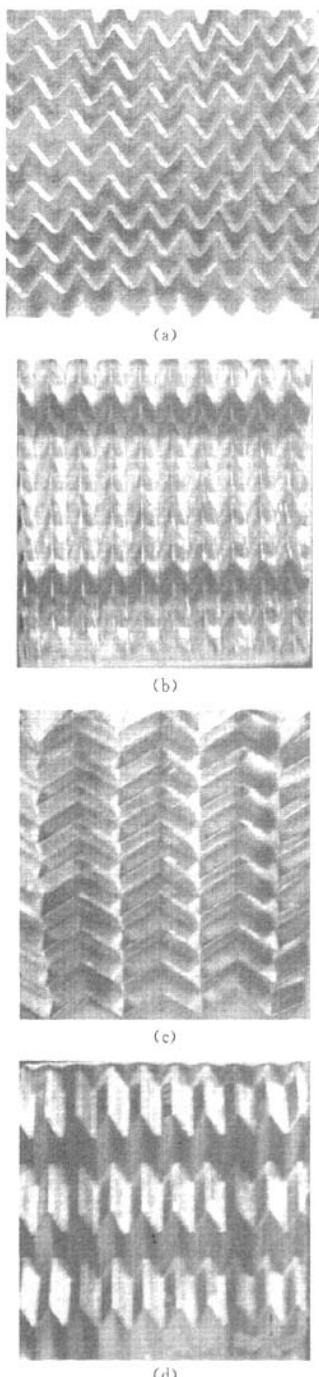


图4 4个不同参数的典型试件

Fig. 4 Four typical specimens with different geometric parameters

万方数据

(2) 实验描述

测试条件:测试频点为9.735 GHz;天线极化方式:水平极化。测试地点:南京航空航天大学天线与电磁散射实验研究室。图5为测试时的实验框图。图6为试件在转台上的安装状态。

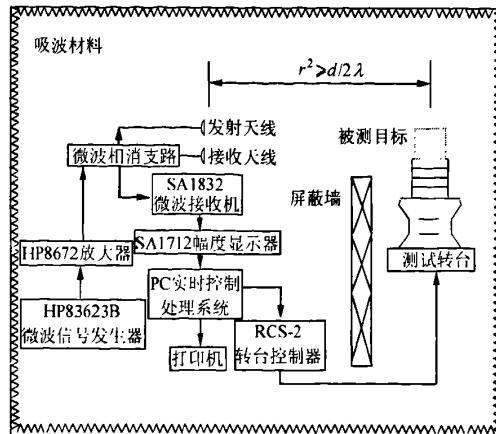


图5 测试框图

Fig. 5 Framework for RCS measurement

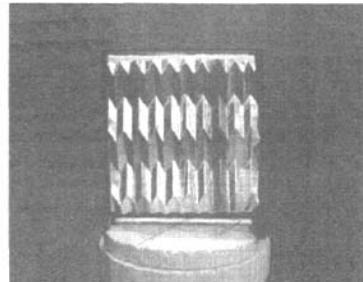


图6 试件安装图

Fig. 6 Specimen installation in the test

(3) 典型 RCS 测试曲线

测试时,将一块LFY铝箔制作的平板和皱褶构型板分别安装在测试转台的两面,因此,在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 转角范围,测得的是平板的RCS,在 $180^\circ \sim 360^\circ$ 范围,测得的是皱褶构型板的RCS。平板和皱褶构型板的RCS曲线放在一起,可以直观地看出皱褶构型板相对于平板的RCS降低程度。图7、图8分别为平板和No. 4试件、平板和No. 3试件的RCS测试曲线。

(4) RCS 实测数据和数值分析结果对比

在南京航空航天大学天线与电磁散射实验研究室对15个试件(平板和14个皱褶构型板)进行了雷达散射特性测试,并利用通用电磁数值模拟软件XFDTD6.1进行了 90° 入射时的雷达散射特性计算。根据电磁散射的基本原理,皱褶构型中

对电磁散射性能起主要影响的几何特征应该是两斜面之间的夹角——两面角 α (图9),因此,计算出了各试件中的 α 。表2为90°入射时各试件雷达散射截面的数值计算值和实测值。图10为RCS随 α 的变化曲线。

表2 90°入射时各试件 RCS 的数值计算值和实测值
Table 2 Simulation and experimental results for RCS of specimens in 90° incidence

试件编号	两面角/(°)	雷达散射截面 RCS/dBsm	
		数值计算值	实测值
No. 0(平板)	180.0	25.07	25.09
No. 1	41.8	19.49	20.36
No. 2	73.4	13.88	11.36
No. 3	96.0	9.02	8.46
No. 4	111.6	2.94	3.20
No. 5	19.0	21.92	21.56
No. 6	15.0	21.29	21.44
No. 7	55.8	18.18	20.15
No. 8	68.2	15.48	17.81
No. 9	86.4	9.54	11.05
No. 10	54.4	14.68	16.54
No. 11	60.6	20.01	19.51
No. 12	63.4	21.81	20.43
No. 13	29.6	18.09	16.76
No. 14	25.6	21.01	22.70

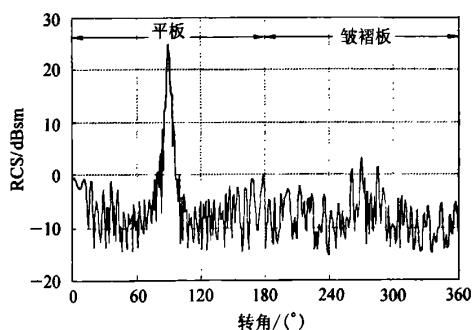


图7 平板和No. 4试件的RCS比较

Fig. 7 RCS comparison of the plate with No. 4 specimen

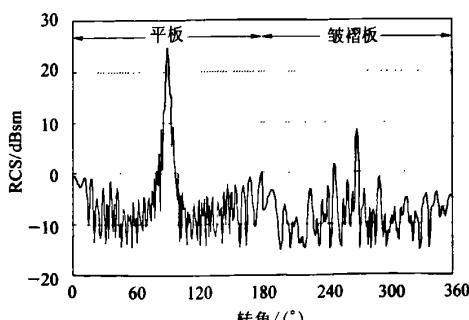


图8 平板和No. 3试件的RCS比较

Fig. 8 RCS comparison of the plate with No. 3 specimen
万方数据

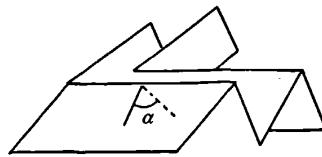


图9 错褶构型对 RCS 有明显影响的参数——两面角

Fig. 9 An effective parameter on RCS of folded structure—dihedral angle

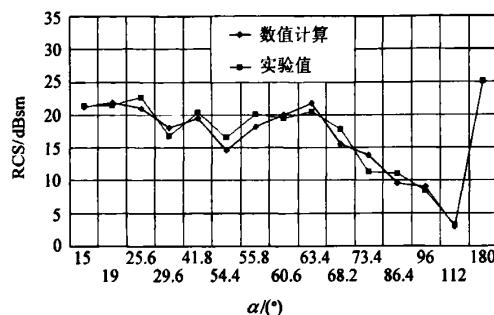


图10 错褶构型板 RCS 与两面角的变化关系

Fig. 10 Variation of RCS of folded plates with dihedral angle

3 结论

(1) 从图10可以看出,本文研究中采用实验研究方法和数值计算方法得出的皱褶构型板雷达散射截面结果基本吻合,从而验证了计算方法的可行性。

(2) 由于皱褶板表面凸凹不平,面、线不连续,相对于同样轮廓尺寸的平板,具有较好的雷达散射性能,RCS 明显降低,其降低程度与两面角有较大的关系。

(3) 在所选择的14个试件中,No. 4试件的RCS 最小,此时的两面角为111.6°,并且比同样尺寸平板的RCS降低22 dBsm左右。

(4) 利用轻质铝箔制作皱褶构型板,在一定参数匹配条件下,RCS 可以降低20 dBsm 多。这种方法工艺简单,附加重量轻,价格便宜。可用于包敷飞行器上具有较大几何平面的金属构件,如大梁、加强框腹板等,以较低的重量和成本代价达到降低RCS的目的。

参 考 文 献

- [1] 吴丹. 隐身飞机探测技术研究[J]. 航空科学技术, 2005(5): 36-39.

Wu Dan. Research on detecting technique of stealth aircraft[J]. Aeronautical Science and Technology, 2005(5):

- 36-39. (in Chinese)
- [2] 马东立, 张考. 雷达散射截面对飞机生存力的影响[J]. 北京航空航天大学学报, 1998, 24(5): 538-541.
- Ma Dongli, Zhang Kao. Effect of radar cross section on aircraft survivability[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1998, 24(5): 538-541. (in Chinese)
- [3] 吴晓光, 车晔秋. 国外吸波材料[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1992: 171-178.
- Wu Xiaoguang, Che Yeqiu. Microwave absorb material at abroad [M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 1992: 171-178. (in Chinese)
- [4] 黄培康, 殷红成, 许小剑. 雷达目标特性[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 182-184.
- Huang Peikang, Yin Hongcheng, Xu Xiaoqian. Radar target characteristics [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005: 182-184. (in Chinese)
- [5] 黄爱凤, 余雄庆, 姚卫星. 翼面隐身结构电磁散射特性的数值模拟[J]. 航空学报, 2005, 26 (4): 422-425.
- Huang Aifeng, Yu Xiongqing, Yao Weixing. Numerical simulation of electromagnetic scattering for wing structures with low observability[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2005, 26 (4): 422-425. (in Chinese)
- [6] 聂毅, 余雄庆. 翼面隐身结构电磁散射特性稳健优化设计研究[J]. 航空学报, 2007, 28 (Sup.): S104-S108.
- Nie Yi , Yu Xiongqing. Study on robust design optimization of electromagnetic scattering for stealthy wing structure[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28 (Sup.): S104-S108. (in Chinese)
- [7] 李江海, 孙秦. 结构型吸波材料及其结构型式设计研究进展[J]. 机械科学与技术, 2003, 22(11): 188-190.
- Li Jianghai, Sun Qin. A review of structural radar absorption materials and their structural pattern design[J]. Mechanical Science and Technology, 2003, 22(11): 188-190. (in Chinese)
- [8] Халиуллин В И. Технологические схемы изготовления многослойных конструкций[M]. Казань: Изд-во Казан. Гос. Техн. Ун-та, 1999: 112-126.
- Чжицзинь В, Халиуллин В И. Геометрическое моделирование при разработке складчатого заполнителя криволинейных панелей[J]. Авиационная Техника, 2003. (1): 3-7.
- [10] 王志瑾, Khalilulin V I. 皱褶结构芯格构型的几何设计方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2002, 34(1): 6-11.
- Wang Zhijin, Khalilulin V I. Geometry design method of folded structure[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2002, 34(1): 6-11. (in Chinese)
- [11] Brown A C. Fundamentals of low radar cross-sectional aircraft design [J]. Journal of Aircraft, 1993, 30 (3): 289-290.
- [12] Knott E F. 雷达散射截面 [M]. 阮颖铮, 陈海, 译. 北京: 电子工业出版社, 1988: 173-176.
- Knott E F. Radar cross section[M]. Ruan Yingzheng, Chen Hai, translated. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1988: 173-176. (in Chinese)
- [13] 阮颖铮, 冯林, 邓书辉, 等. 雷达截面与隐身技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998: 261-266.
- Ruan Yingzheng, Feng Lin, Deng Shuhui, et al. Radar cross section and stealth technology[M]. Beijing: Nationalal Defence Industry Press, 1998: 261-266. (in Chinese)
- [14] 王中杰, 黄沛霖, 刘战合, 等. 锯齿台阶目标电磁散射特性研究[J]. 沈阳航空工业学院学报, 2008, 25(1): 1-3.
- Wang Zhongjie, Huang Peilin, Liu Zhanhe, et al. Analysis on the electromagnetic scattering characteristic of serrated steps[J]. Journal of Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, 2008, 25(1): 1-3. (in Chinese)
- [15] 聂毅, 余雄庆, 黄爱凤. 低成本翼面隐身结构的设计和RCS测试分析[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(9): 1594-1596.
- Nie Yi, Yu Xiongqing, Huang Aifeng. Design and RCS analysis of a low cost wing structures with low observability[J]. Systems Engineering and Electronics, 2005, 27(9): 1594-1596. (in Chinese)

作者简介:

王志瑾(1963—) 女,博士,教授。主要研究方向:飞行器结构设计,复合材料结构优化设计,皱褶结构设计及其性能研究,热防护系统设计。

Tel: 025-84891791

E-mail: zhijin@nuaa.edu.cn

徐庆华(1980—) 男,硕士,助理工程师。主要研究方向:飞行器总体设计,飞行器结构设计。

Tel: 024-86360961

E-mail: qinhua_x@126.com

(责任编辑:李铁柏)

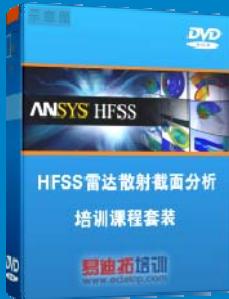
雷达散射截面（RCS）分析培训课程

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养，是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

雷达散射截面（Radar Cross Section，简称 RCS）是雷达隐身技术中最关键的概念，也是电磁理论研究的重要课题，使用 HFSS 软件可以很方便的分析计算各种目标物体的 RCS。

由易迪拓培训推出的《HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装》是从零讲起，系统地向您讲授如何使用 HFSS 软件进行雷达散射截面分析的全过程。该套视频课程由专家讲授，边操作边讲解，直观易学。

HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装



套装包含两门视频培训课程，其中：《两周学会 HFSS》培训课程是作为 HFSS 的入门培训课程，帮助您在最短的时间内迅速熟悉、掌握 HFSS 的实际操作和工程应用；《HFSS 雷达散射截面(RCS)分析》培训课程是专门讲授如何使用 HFSS 来分析计算雷达散射截面，包括雷达散射截面、单站 RCS、双站 RCS 等的定义，实例讲解使用 HFSS 分析单站 RCS、双站 RCS 和宽频 RCS 的相关设置和实际操作等。视频课程，专家讲授，从零讲起，直观易学...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/130.html>

● 更多培训课程：

● **HFSS 培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

● **CST 培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

● **天线设计培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>