

文章编号:1000-6893(2009)05-0912-07

# 螺钉/铆钉目标电磁散射特性的试验研究

黄沛霖, 刘战合

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

## Experimental Research on Scattering Characteristics of Bolt/Rivet Objects

Huang Peilin, Liu Zhanhe

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

**摘要:** 通过系列化雷达散射截面(RCS)测试,研究了单列、多列螺钉/铆钉板在单站多方位、双站的散射特性,分析了不同极化方式、不同排列、不同方位角以及不同双站角对螺钉/铆钉散射的影响及关系。试验结果表明,圆头钉板水平极化明显强于垂直极化;沉头钉板水平极化仅略强于垂直极化。列距不同,由于相位叠加的不同,会导致叠加波峰的位置发生偏移,在设计时可平行间距布置,将散射方向集中。对双站散射,较小双站角时曲线与单站时有一定相似性,但波峰幅度和位置均发生较大变化;较大双站角时,电磁散射表现出耦合效应;双站角使测试曲线偏转,幅度为双站角的1/2;RCS均值随双站角增大而减小。

**关键词:** 电磁散射;极化;雷达散射截面;螺钉;铆钉

**中图分类号:** V218 **文献标识码:** A

**Abstract:** The mono-station, bi-station and multi-azimuth scattering characteristics of single-row and multi-rows bolt (rivet) plates were studied by a series of radar cross section (RCS) tests. By changing the polarization of incidence wave, arranging the styles of the bolts/rivets, azimuths and bi-station angles, the relationship between scattering and these parameters was obtained. The results show that the nail head shape influences scattering; for round head nail plates horizontal polarization scattering is much higher than vertical polarization, while for flat head nail plates it is only a little higher. Scattering from multi-rows bolt/rivet plates is the superposition on of all single-row effect plates at their respective phases and it may induce the change of peak position. The parallel distribution of bolts and rivets can concentrate scattering in one orientation. For bi-station scattering, the curves of small bi-station angle scattering are similar to those of mono-station scattering while the magnitude and position are changed. Larger bi-station angles may result in scattering coupling. The bi-station angle results in curve deflection and its magnitude is half the bi-station angle. The average RCS decreases with the increase of the bi-station angle.

**Key words:** electromagnetic wave scattering; polarization; radar cross section; bolt; rivet

隐身技术能有效提高武器系统的生存、突防尤其是纵深打击能力,是立体化现代战争中最重要突防战术技术<sup>[1-3]</sup>。对常规飞行器,缝隙<sup>[4-7]</sup>、台阶<sup>[8-11]</sup>、铆钉<sup>[12]</sup>等不连续特征电磁散射源在总体散射中的比重相对较小。对隐身飞行器,当主要散射源被有效减缩后,不连续特征散射源占总体散射的比重将有较大增加,因此,对其散射机理和减缩措施的研究成为重点<sup>[2]</sup>。

在飞机、导弹表面较多地使用了螺钉和铆钉件,对隐身设计目标而言,螺钉/铆钉的数量较大时,将对散射产生明显影响,有必要进行详细研究,而目前国内外对其未见研究。螺钉和铆钉多

呈列状排列,现代隐身飞机(如F-35)的螺钉/铆钉数量较少,且规则分布(如平行分布),将强散射方向集中。本文通过对不同钉类型、不同排列情况分别进行系列测试,得到了螺钉/铆钉电磁散射的极化特性、空间分布、双站下的散射特性等内容,提出了雷达散射截面(RCS)控制减缩措施并以试验进行了验证,同时研究了钉距、列距、排列等参数的影响。

## 1 研究方法

由于螺钉/铆钉的电磁散射相对较弱,用于研究螺钉/铆钉散射特性的计算方法离精确解尚有差距,且应用有一定限制<sup>[13-15]</sup>,而日趋成熟的测量技术可以有效地获得目标的特征数据,同时也是对电磁理论的有效补充<sup>[1]</sup>。

## 1.1 试件设计

为了有效获取螺钉/铆钉电磁散射的贡献,采用平板中央分布螺钉/铆钉的方式,按照不同钉距、不同排列和钉的种类分别制作试件。从工程应用角度出发,螺/铆钉间距一般在 20 ~ 60 mm,因此,钉距选择 30 mm 和 60 mm,分为单列、3 列(列距 15 mm/30 mm/60 mm)等共 14 件,图 1 分别给出了单列钉的实物图、三列螺钉/铆钉试件的设计图。螺钉/铆钉平均分布在边长 400 mm 的正方形金属板上,沿对角线方向(多列时钉的分布关于对角线对称而且平行)。通过系列试验研究了极化方式、入射频率、双站角等因素对螺钉/铆钉群体电磁散射特性的影响,以及螺钉/铆钉散射的空间分布。

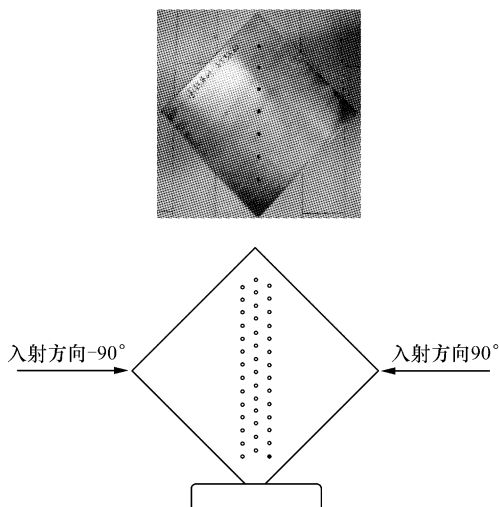


图 1 单列钉及 3 列螺钉/铆钉试件及其测试示意图

Fig. 1 Schematic of bolt/ rivet plates and its testing model

测试仪器为微波暗室内的扫频测试系统,矢量网络分析仪为 Agilent 公司的 PNA 8683B。为分析方便,设单列螺钉/铆钉钉距为  $d$ ,定义目标电尺寸  $D=d/\lambda$ ,其中: $\lambda$  为入射电磁波波长;设 3 列铆钉列距为  $d_s$ ,定义列距电尺寸  $D_s=d_s/\lambda$ 。

## 1.2 测试方法

由于螺钉/铆钉自身电磁散射较弱,因此测试方案选取的重点是适当排除金属平板自身和平板边缘电磁散射的影响。当入射电磁波传播方向与金属平板法线方向平行时,将产生高强度镜面反射,此时螺钉/铆钉散射将被掩盖而无法观测,随入射方向的偏移,镜面反射迅速衰减,镜面反射散射影响增强;更重要的是,当入射电磁波传播方向在

如图 1 所示的  $90^\circ$  和  $-90^\circ$  附近时,边缘会产生较强的电磁绕射,影响对螺钉/铆钉电磁散射的测量。

因此,采取测试方法如下,将螺钉/铆钉置于试件的对角线(如图 1),试件对角线垂直于转台放置。该方法可以保证在试件旋转的绝大多数角度下,平板边缘不会与电磁波入射方向正交,从而削弱金属边缘对测试结果的影响。测试中定义:入射方向垂直于金属平板时为  $0^\circ$  入射角,随转台转动,入射角转动范围为  $-90^\circ \sim 90^\circ$ 。入射电场方向平行于地面为水平极化(此时入射电场方向与缝隙正交,HH 极化),入射电场垂直于地面为垂直极化(此时入射电场方向平行于缝隙,VV 极化)。依次对试件进行 HH/VV 极化的对比分析、散射的空间分布研究以及双站特性研究。

## 2 多方位散射特性分析

### 2.1 单列螺钉/铆钉极化特性分析

钉距  $d$  为 30 mm 和 60 mm,测试频率 10 GHz,对应  $D$  分别为 1 和 2,钉头直径 10 mm,分别为 HH 极化和 VV 极化。以下分别给出圆头螺钉、沉头螺钉以及沉头铆钉的部分测试曲线图和全部测试的 RCS 几何均值表。

图 2~图 4 分别为 10 GHz 入射频率下单列圆头螺钉、单列沉头螺钉、单列沉头铆钉的 HH 极化和 VV 极化 RCS 曲线,表 1 为各试件不同角域内的 RCS 几何均值。

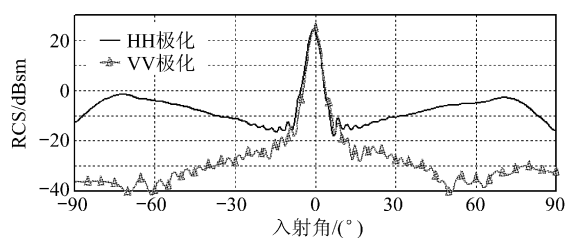


图 2 单列圆头螺钉( $d=30$  mm)测试曲线

Fig. 2 RCS curves of single-row round bolt plate ( $d=30$  mm)

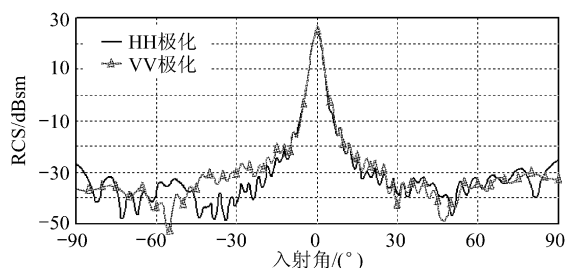


图 3 单列沉头螺钉( $d=60$  mm)测试曲线

Fig. 3 RCS curves of single-row flat bolt plate ( $d=60$  mm)

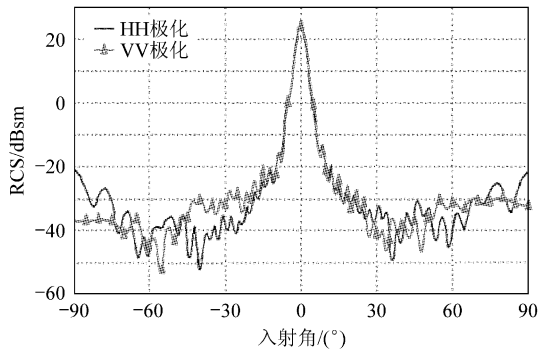
图4 单列沉头铆钉( $d=60$  mm)测试曲线Fig. 4 RCS curves of single-row flat rivet plate ( $d=60$  mm)

表1 不同钉距螺钉/铆钉 RCS 几何均值表

Table 1 RCS average values of bolt or rivet plates with different  $d$ 

钉类型	$d/mm$	RCS 几何均值/dBsm			
		$-15^\circ \sim 15^\circ$ (HH/VV)	$-90^\circ \sim -60^\circ$ (HH/VV)	$60^\circ \sim 90^\circ$ (HH/VV)	$-90^\circ \sim 90^\circ$ (HH/VV)
圆头螺钉	30	-4.73/-7.92	-4.81/-37.68	-6.84/-32.99	-7.47/-28.26
	60	-8.41/-7.49	-32.81/-36.95	-31.26/-32.73	-29.34/-30.03
沉头螺钉	30	-8.44/-7.47	-37.54/-37.63	-32.12/-32.91	-31.24/-30.49
	60	-8.09/-8.41	-25.90/-33.60	-23.51/-32.32	-25.57/-27.60
沉头铆钉	30	-7.90/-7.92	-34.04/-38.59	-30.38/-31.46	-30.83/-30.75
	60	-7.90/-7.92	-34.04/-38.59	-30.38/-31.46	-30.83/-30.75

表2 单列螺钉/铆钉 RCS 几何均值表(HH 极化)

Table 2 RCS average values of single-row bolt/rivet plates (horizontal polarization)

钉类型	$d/mm$	RCS 几何均值/dBsm		
		$-15^\circ \sim 15^\circ$	$15^\circ \sim 60^\circ$	$60^\circ \sim 90^\circ$
圆头螺钉	30	-4.73	-9.24	-6.84
	60	-6.59	-15.30	-15.61
沉头螺钉	30	-8.41	-32.81	-31.26
	60	-8.44	-34.99	-32.12
圆头铆钉	30	-4.40	-9.55	-6.19
	60	-6.58	-16.88	-14.65
沉头铆钉	30	-8.09	-29.86	-23.51
	60	-7.90	-36.41	-30.38

分析表1,对于圆头螺钉,HH极化散射明显强于VV极化,在较大入射角时,这种差异的幅度更大;沉头钉的HH极化比VV极化略强,由于测量误差和试件不完全对称,曲线呈现较弱的不对称性;尺寸相同时沉头钉HH极化和VV极化曲线的变化趋势一致,与钉类无关。

值得注意的是,圆头螺钉与表面小突起的散射类似,十余个圆头螺钉(直径10 mm)的散射就高达 $1 \text{ m}^2$ ,对低可探测性飞行器整体散射具有很大影响,必须对此加以抑制。

从图2和表1可以看出,圆头螺钉的HH极化和VV极化在正头向的 $\pm 10^\circ$ 内的RCS曲线基本一致,其他入射角域内,VV极化明显小于HH极化,达20~30 dB。HH极化的曲线平滑且有而长的峰值(出现在 $\pm 70^\circ$ ),VV极化曲线相对振荡加强且有明显下降。对沉头钉,由图3、图4和表2,在 $-60^\circ \sim -30^\circ$ 入射角域内VV极化曲线逐渐下降,从HH极化曲线的上方降至下方,而在 $30^\circ \sim 60^\circ$ 入射角域的曲线趋势与之相反;同时,在 $\pm 90^\circ$ 为中心的一定角域里,HH极化曲线上扬,其均值增大的幅度在1~10 dB。

## 2.2 螺钉/铆钉散射的空间分布

分别取单列螺钉(不同钉距、含沉头螺钉和圆头螺钉)的RCS测试曲线,单列铆钉(不同钉距、含沉头铆钉和圆头铆钉)的RCS测试曲线,以及相同钉距单列不同钉头的RCS测试曲线,分别进行对比分析,见图5~图7。

从图5和图6中可以看出,对螺钉和铆钉而言,圆头钉比沉头钉的RCS曲线上扬幅度大,而且跟钉类型无关。对于同样圆头的钉,无论螺钉

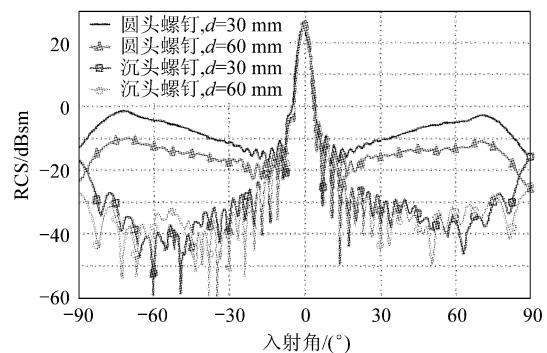


图5 单列圆/沉头螺钉不同钉距 RCS 测试曲线(HH极化)

Fig. 5 RCS curves of single-row bolt plates with different  $d$  (horizontal polarization)

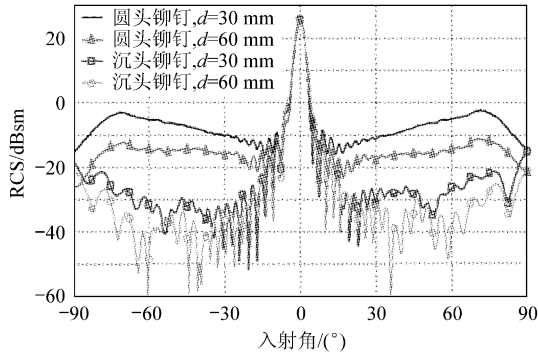


图 6 单列圆/沉头铆钉不同钉距 RCS 测试曲线 (HH 极化)

Fig. 6 RCS curves of single-row rivet plates with different  $d$  (horizontal polarization)

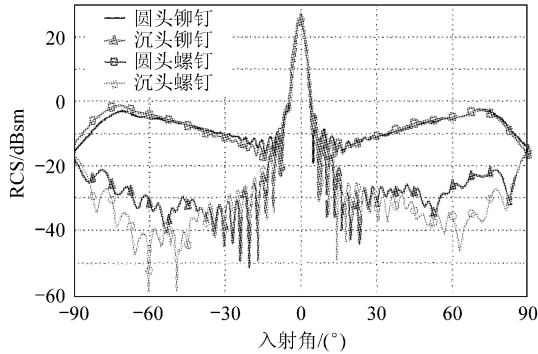


图 7 单列相同钉距螺钉和铆钉 RCS 测试对比曲线 ( $d=30$  mm, HH 极化)

Fig. 7 RCS curves of single-row bolt and rivet plates ( $d=30$  mm, horizontal polarization)

还是铆钉, 测试曲线随钉距增大而下降, 通过计算得知, 其 RCS 均值在 2~9 dB 变化。而对于沉头钉, 曲线随钉距变化趋势相对复杂, 沉头螺钉的曲线随着钉距增大出现微小的下降, 仅在  $\pm 60^\circ$  左右入射角域里有一定的上扬, 计算其均值会发现在  $15^\circ \sim 60^\circ$  和  $60^\circ \sim 90^\circ$  入射角域内钉距 60 mm 比 30 mm 时的 RCS 低 1~2 dB; 沉头铆钉的曲线随钉距增大而出现一定的下降, 钉距 60 mm 时其均值在  $15^\circ \sim 90^\circ$  入射角域里比 30 mm 时减小了约 7 dB。由图 7 可以发现, 当钉距一定 (30 mm) 时, 圆头钉的散射曲线大致相同, 其均值亦相差不到 1 dB; 沉头钉类, 螺钉的曲线比铆钉曲线在  $\pm 30^\circ$  以外的入

射角域有明显上扬, 计算表明均值差达 3~7 dB。

本文考虑的是螺钉板和铆钉板相对于光滑平板的散射情况, 因此选择沉头、钉距 60 mm 的螺钉/铆钉板和相同尺寸的正方形光滑金属平板进行对比测试。为更好地观察其趋势, 测试中选择  $0^\circ \sim 90^\circ$  入射角域, 得到曲线图如图 8 和图 9 所示。

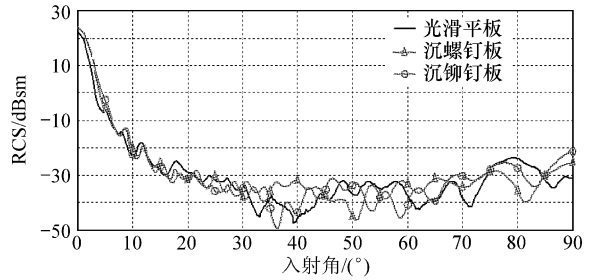


图 8 单列沉头钉板 ( $d=60$  mm) 与光滑平板对比曲线 (HH 极化)

Fig. 8 RCS curves of single-row flat head nail plates ( $d=60$  mm) and flat plate (horizontal polarization)

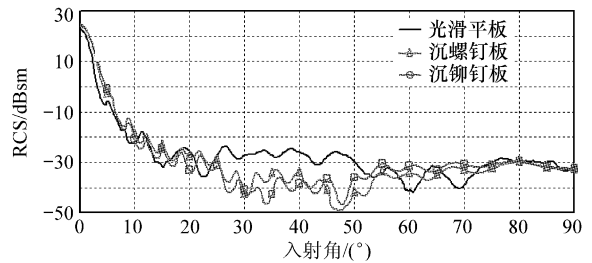


图 9 单列沉头钉板 ( $d=60$  mm) 与平板对比曲线 (VV 极化)

Fig. 9 RCS curves of single-row flat head nail plates ( $d=60$  mm) and flat plate (vertical polarization)

从图 8 和图 9 中可以看到,  $0^\circ \sim 30^\circ$  入射角域里, 3 条测试曲线的趋势基本一致;  $30^\circ \sim 60^\circ$  入射角域内, HH 极化时的曲线变化比较复杂, 钉板曲线在  $45^\circ$  时开始比平板曲线下降, VV 极化下钉板曲线比平板有较明显的下降;  $60^\circ \sim 90^\circ$  入射角域里, HH 极化下的钉板曲线与平板相比可以看做先上升后下降, 在临近  $90^\circ$  的地方出现明显增强; VV 极化下曲线逐渐趋向重合。进一步计算其不同角域的 RCS 几何均值, 可以得到表 3。

表 3 单列沉头钉板 ( $d=60$  mm) 与光滑平板 RCS 几何均值表

Table 3 RCS average values of single-row flat head nail plates ( $d=60$  mm) and flat plate

板型	RCS 几何均值/dBsm		
	$0^\circ \sim 30^\circ$ (HH/VV)	$45^\circ \sim 60^\circ$ (HH/VV)	$60^\circ \sim 90^\circ$ (HH/VV)
光滑平板	-20.19/-19.41	-34.67/-32.35	-32.66/-32.98
沉螺钉板	-20.12/-18.64	-37.98/-40.60	-32.16/-32.91
沉铆钉板	-20.29/-20.18	-37.46/-36.11	-30.51/-31.45

计算表明  $30^\circ \sim 60^\circ$  入射角域里钉板比平板的 RCS 低 4~8 dB, 具有比较好的减缩效果; 在其余范围钉板则与平板有相似的散射值。

总结图 5~图 9 及表 3 可以看出, 对圆头钉来说, 单列螺钉板散射与铆钉板的散射基本相同, 且在掠入射方向上都有较高的峰值(约  $1 \text{ m}^2$ ), 其散射贡献主要包括圆形钉头在各个方向上的几何光学散射以及钉头造成的表面不连续引起的行波散射; 测试中两种钉头尺寸相同, 因此对于圆头钉, 其散射主要取决于钉头尺寸, 与螺钉/铆钉类型基本无关。对于沉头钉, 其散射主要是因表面不连续引发的行波散射, 铆钉的散射比螺钉略强, 掠入射方向二者相对于平板散射均有一定的减弱; 与同等条件下的光滑平板相比, 以沉头螺钉的减缩效果较好。

### 2.3 3 列铆钉板散射特性

对 3 列铆钉板(3 列铆钉平行于对角线)试件进行 RCS 测试, 测试状态与单列一致。测试板为圆头铆钉板, 钉距  $d$  为 30 mm, 对应  $D$  为 1, 列距  $d_s$  分别为 15 mm, 30 mm 和 60 mm, 对应  $D_s$  分别为 2.0, 1.0 和 0.5, 同时取交错布置的 3 列铆钉板( $d=30 \text{ mm}$ ), 共 4 条测试曲线进行分析比较。

图 10 为 3 列铆钉 HH 极化(不同列距、不同铆钉排列方式)的 RCS 测试曲线对比, 图 11 显示了 VV 极化(不同列距、不同铆钉排列方式)的 RCS 测试曲线, 其不同入射角域的计算均值见表 4。

由图 10 可知, HH 极化下, 平行布置的 3 列钉板, 列距增大, 曲线的振荡加强, 波峰随之变得短促, 波峰数增多; 在  $0^\circ \sim 60^\circ$  入射角域内以列距 60 mm 曲线的峰值为最高,  $60^\circ \sim 90^\circ$  入射角域列距 15 mm 时的曲线有高而长的波峰, 峰值也最高。交错布置的多列铆钉测试曲线则与同列距平行布置的钉板曲线趋势相同, 在  $-90^\circ \sim -60^\circ$  和  $60^\circ \sim 90^\circ$  入射角域内交错布置比平行时的曲线有明显上升,  $-45^\circ \sim -15^\circ$  和  $15^\circ \sim 45^\circ$  入射角域则相反,  $-15^\circ \sim 15^\circ$  入射角域二者曲线基本相同。

VV 极化时(见图 11), 平行布置的三列钉板, 随列距增大曲线的波峰变得明显, 在  $-90^\circ \sim -60^\circ$  入射角域内列距 30 mm 和 60 mm 的曲线表现出了较稳定的散射特性, 列距 15 mm 板则有较大的波谷; 同样的, 交错布置和平行布置的钉板在  $-45^\circ \sim 45^\circ$  入射角域里基本吻合, 在  $45^\circ$  以外角域内交错钉板曲线急剧下降, 至  $90^\circ$  左右二者曲线逐

渐靠近。

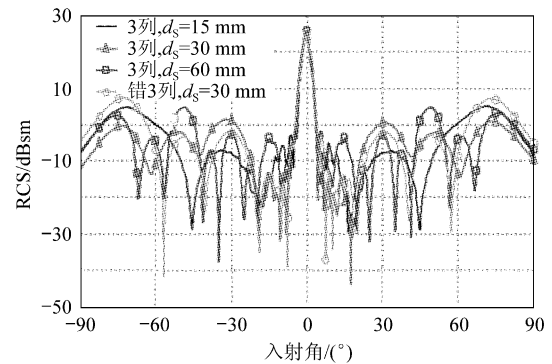


图 10 3 列圆头铆钉板 RCS 测试曲线(HH 极化)

Fig. 10 RCS curves of three-row rivet plates (horizontal polarization)

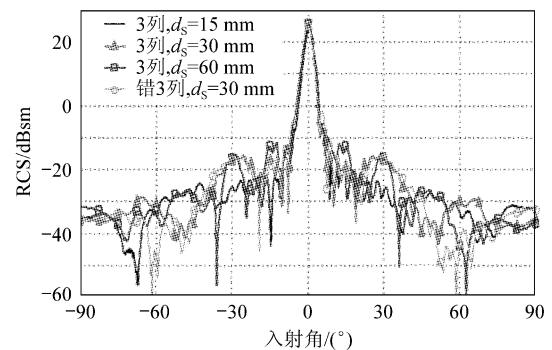


图 11 3 列圆头铆钉板 RCS 测试曲线(VV 极化)

Fig. 11 RCS curves of three-row rivet plates (vertical polarization)

表 4 3 列圆头铆钉板( $d=30 \text{ mm}$ )不同列距 RCS 几何均值表

Table 4 RCS average values of three-row rivet plates ( $d=30 \text{ mm}$ ) with different  $d_s$

排列方式	$d_s/\text{mm}$	RCS 几何均值/dBsm		
		$-15^\circ \sim 15^\circ$ (HH/VV)	$15^\circ \sim 60^\circ$ (HH/VV)	$60^\circ \sim 90^\circ$ (HH/VV)
3 列	15	-2.31/-8.82	-11.61/-28.75	1.11/-34.99
3 列	30	-7.62/-8.05	-6.39/-26.79	-4.18/-35.15
3 列	60	-3.07/-5.71	-8.39/-27.40	-2.74/-39.36
错 3 列	30	-7.05/-6.47	-10.25/-29.39	2.23/-37.30

由以上分析结合表 4 可以看出, 多列钉散射的主要机理是各列钉之间的散射耦合。钉距的不同主要导致耦合波峰的位置发生偏移; 电场方向垂直于铆钉列(HH 极化)时的电磁散射高于电场方向平行于铆钉列(VV 极化), 尤其在  $60^\circ \sim 90^\circ$  表面波散射较强处, 差值高达 10~20 dB; 铆钉列交错布置时的电磁散射高于同样列距平行布置的情况, 在  $60^\circ \sim 90^\circ$  入射角域内表面波散射较强处,

差值高达 2~4 dB。

### 3 双站散射特性分析

固定发射、接收天线,旋转待测目标,即可得到一整条测试曲线,之后改变双站角,经重新定标后测试下一条 RCS 曲线。

测试的单列圆铆钉板钉头直径 10 mm,钉距 30 mm,双站角分别取 30°,60°,90°,120°,试件

的摆放方式与单站时相同,固定发射天线位置,接收天线位于以转台为中心的圆周(半径为发射天线到转台的距离)上,二者夹角(即双站角)分别取 30°,60°,90°,120°。测试状态为台阶正对发射天线,沿顺时针方向旋转 360°。得到加入极坐标图之后的各不同双站角下 RCS 测试曲线如图 12 所示,主要方位上的 RCS 几何均值统计结果见表 5。

表 5 铆钉板( $d=30\text{ mm}$ )双站 RCS 几何均值表

Table 5 Bi-station RCS average values of rivet plates ( $d=30\text{ mm}$ )

双站角	RCS 几何均值/dBsm				
	0°~30°	330°~360°	关于发射天线 -30°~30°	关于接收天线 -30°~30°	0°~360°
0°	-9.32	-11.28	-10.29	-10.29	-20.51
30°	-15.39	-5.59	-10.39	-10.14	-20.87
60°	-14.36	-10.60	-12.75	-12.06	-23.91
90°	-26.14	-14.89	-20.56	-19.13	-27.15
120°	-27.42	-20.79	-24.12	-22.65	-19.56

从图 12 可以发现,曲线到达峰值所需的入射角偏移幅度为双站角的 1/2,0°~90°入射角域内,0°~60°双站角下的测试曲线均出现波峰,随着双站角增大而逐渐前移,波峰数略增,峰值有所降低,90°双站角的曲线振荡加强,120°双站角曲线明显平缓;120°~180°为最大波峰出现的区域,不同双站角的最大峰值均在 20 dB 左右;210°~270°入射角域里,120°双站角测试曲线明显上扬,RCS 值同样维持在 -25~20 dB 的范围里,除此之外的各双站角曲线较相近,且有较强振荡性;270°~360°入射角域内,除了又一次出现大峰值

之外,还有与 0°~90°入射角域内相似的小波峰,同样随双站角的增大而逐渐前移,120°双站角时则是一个较大的波谷。

从曲线趋势看来,测试数据所形成的椭圆状曲线随双站角增大而逐渐收缩,而且其长轴方向亦出现一定的偏移,整个散射曲线关于双站角角分线对称,不同双站角散射曲线具有相似性;120°双站角的测试曲线有一定的上扬,应是发射天线与接收天线之间的影响所致。计算得到的全向 RCS 均值亦说明了这一点,在 120°之前均值随双站角增大而减小,减缩值在 0.3~6 dB 之间,但在双站角 120°时显著上升,升幅约 8 dB;在关于发射天线和接收天线±30°的范围里,RCS 均值随双站角的增大而逐渐减小,幅度在 2~13 dB;在头向和尾向的±30°范围里,双站角 30°时散射有较明显的增强,除此之外的双站角,其均值有不同程度的减小。

由以上分析,螺钉/铆钉的电磁散射及其引起的行波散射体现为群体效应,在双站角增大时电磁散射波峰幅度和位置均发生较大变化,散射强度随双站角增大而迅速变小,曲线椭圆明显收缩,散射图随双站角而偏转,偏转量为双站角的 1/2。

### 4 结论

通过系列化的试验,分别在多方位和多站条件下对不同排列的螺钉/铆钉板的电磁散射特性进行测试与分析,探讨了不同排列、不同极化方

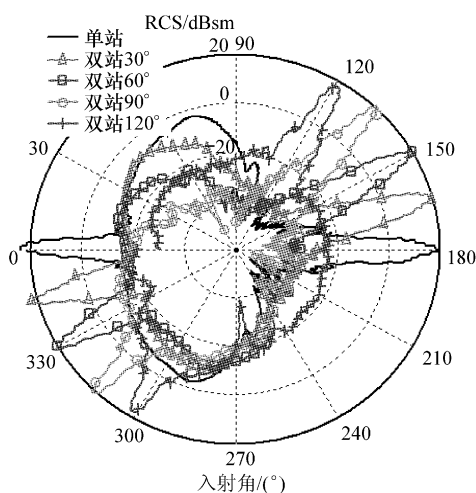


图 12 单列圆铆钉板不同双站角测试曲线( $d=30\text{ mm}$ , HH 极化)

Fig. 12 Bi-station RCS curves of single-row rivet plates ( $d=30\text{ mm}$ , horizontal polarization)

式、不同方位角以及不同双站角对螺钉/铆钉散射的影响,有如下结论:

(1) 极化特性:单列和多列钉板的 HH 极化散射均比 VV 极化散射强,在较大的入射角下情况尤为明显。

(2) 空间分布:螺钉/铆钉的形状对散射水平影响较大,圆头钉的散射明显强于沉头钉;螺钉/铆钉列间距的不同,由于相位叠加耦合散射效应,会导致叠加波峰的位置发生偏移,在设计时可以考虑等间距平行布置; $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 入射角域里钉板比平板有较好的减缩效果,较小入射角时钉板与平板有相近的 RCS 均值。

(3) 铆钉散射的双站特性:较小双站角时曲线与单站时有一定相似性,但波峰幅度和位置均发生较大变化;较大双站角时,螺钉/铆钉电磁散射体现出群体效应,与单站曲线有较大差异;双站角的出现使得测试曲线出现偏转,幅度为双站角的 1/2,曲线 RCS 均值随双站角增大而减小。

### 参 考 文 献

- [1] 颜丙新,黄俊. 突防飞机的隐身效能分析[J]. 云南大学学报, 2005, 27(5A):127-135.  
Yan Bingxin, Huang Jun. Stealthy effectiveness of the breaching aircraft [J]. Journal of Yunnan University, 2005, 27(5A):127-135. (in Chinese)
- [2] 阮颖铮. 雷达截面与隐身技术[M]. 北京:国防工业出版社, 1998.  
Ruan Yingzheng. Radar cross section and stealth technology [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1998. (in Chinese)
- [3] 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)
- [4] Senior T, Volakis J. Scattering by gaps and cracks[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1989, 37(6):744-750.
- [5] Senior T, Natzke J. Scattering by a narrow gap[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1989, 37(3):362-372.
- [6] 朱劲松,于洋,王宝发. 飞行器结构缝隙电磁散射问题的研究[J]. 北京航空航天大学学报, 1999, 25(1):99-102.  
Zhu Jinsong, Yu Yang, Wang Baofa. Research on electromagnetic scattering for aircraft structural slot [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1999, 25(1):99-102. (in Chinese)
- [7] 袁宁,聂小春,梁昌洪. 有限厚导电平板上任意缝隙的耦合特性分析[J]. 电波科学学报, 1999, 14(3):261-267.  
Yuan Ning, Nie Xiaochun, Liang Changhong. Analysis of coupling properties of an arbitrary slit in a thick conducting plate[J]. Chinese Journal of Radio Science, 1999, 14(3):261-267. (in Chinese)
- [8] 朱湘琴,葛德彪. 单层和多层有缝金属板电磁波透射的 FDTD 分析[J]. 电波科学学报, 2004, 19(6):654-657.  
Zhu Xiangqin, Ge Debiao. FDTD analysis of transmission through slits on single and stacked conducting plates [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2004, 19(6):654-657. (in Chinese)
- [9] 杨弃疾. 厚金属板与台阶的散射[J]. 电波科学学报, 2003, 18(3):233-241.  
Yang Qiji. Scattering of the thick metallic plate and step [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2003, 18(3):233-241. (in Chinese)
- [10] Margaret K. Scattering reducing step: theory and measurements[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1996, 44(6):896-901.
- [11] 钮保强,王宝发. 飞机座舱金属-介质连接处凸台的雷达散射分析[J]. 系统工程与电子技术, 2000, 25(7):37-39.  
Niu Baoqiang, Wang Baofa. Analysis on the radar scattering for the boss at the position of the metal-medium connection of aircraft cabin [J]. Systems Engineering and Electronics, 2000, 25(7):37-39. (in Chinese)
- [12] 李江海,孙秦,马玉娥. 铆钉间距对二维 SRAM 蒙皮隐身性的影响分析[J]. 宇航学报, 2005, 26(1):90-93.  
Li Jianghai, Sun Qin, Ma Yue. The analysis of influence of rivets' space to stealth property of 22D SRAM skin[J]. Journal of Astronautics, 2005, 26(1):90-93. (in Chinese)
- [13] Song J M, Chew W C. Interpolation of translation matrix in MLFMA[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2001, 30(2):109-114.
- [14] Wen J, Hu J, Nie Z P. A novel strategy of the multipole numbers of the MLFMA[C] // Digital Object Identifier APMC. Piscataway:IEEE, 2005:4-7.
- [15] Ergul O, Gurel L. Enhancing the accuracy of the interpolations and antepolations in MLFMA[J]. IEEE Transaction on Antennas Propagation, 2006, 54(12):3822-3826.

### 作者简介:

黄沛霖(1975—) 男,博士,讲师。主要研究方向:飞行器隐身设计、飞行器总体设计。

Tel: 010-82317503

E-mail: peilin\_h@buaa.edu.cn

刘战合(1977—) 男,博士后。主要研究方向:飞行器总体设计、飞行器隐身设计及其计算研究。

Tel: 010-82317503

E-mail: nwpulzh@163.com

(责任编辑:李铁柏,孔琪颖)