

文章编号: 1000-6893(1999) 03-0205-06

直管斜切式方转圆进气道的电磁散射特性及抑制技术的实验研究

廖伟, 郭荣伟

(南京航空航天大学 动力工程系, 江苏 南京 210016)

EXPERIMENTAL RESEARCH OF RCS AND RCSR OF A STRAIGHT RECTANGLE-TO-ROUND SCOOP INLET

LIAO Wei, GUO Rong-wei

(2nd Dept., Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

摘要: 从进气道的雷达散射截面着手, 通过实验研究了直管斜切式方转圆进气道在各种状态下的电磁散射特性, 分析了终端、攻角对其电磁散射特性的影响, 并进一步提出了该型进气道的雷达截面减缩措施, 研究了吸波材料贴敷长度、贴敷位置以及消波器等对雷达截面减缩效果的影响。为有效改善该型进气道的电磁散射特性提供了技术依据。

关键词: 进气道; 电磁散射; 雷达截面; 雷达截面减缩

中图分类号: V228.7 文献标识码: A

Abstract: The Radar Cross Section (RCS) of a straight rectangle-to-round scoop inlet has been investigated. It includes the influences of the attack angle and termination on the electromagnetic scattering characteristics. Then the measurements of the Radar Cross Section Reduction (RCSR) of the inlet are put forward. At the same time, the effects of length, position of absorbing-wave material and absorbing-wave grille on RCSR are further studied. As the results indicate, the measurements suggested here have put very distinct effect on decreasing RCS of the inlet. This paper affords a technological basis for efficiently improving the low-observable inlets.

Key words: air inlets; electromagnetic scattering; RCS; RCSR

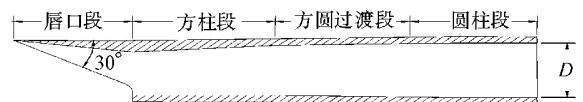
飞行器进气道是雷达波的强散射源之一^[1]。为了较大幅度地降低飞行器的雷达散射截面 (Radar Cross Section, 简称 RCS), 必须对进气道采取特殊的技术措施。直管斜切式方转圆进气道气动性能优良, 但其雷达散射截面过大, 是增大整机雷达散射截面的重要因素之一, 必须尽可能地减小该进气道的雷达散射截面。由于目标本身形状结构的复杂性以及电磁场边界条件的限制, 对电磁散射领域中目标的 RCS 值的精确理论分析十分困难, 实验成为一个主要的研究手段^[2]。

基于以上认识, 本文的实验研究将包括以下两个方面的工作: ①分别研究在不同终端、不同攻角等条件下, 该进气道的电磁散射特性; ②进一步研究其雷达散射截面减缩措施 (RCSR 技术), 包括加消波器及在进气道内壁面贴敷吸波材料等, 以期寻找到合理的吸波材料贴敷长度及位置, 并考察消波器的 RCSR 效果, 为减缩该型进气道

的 RCS 提供切实可行的方案。

1 实验模型及测试设备

实验用的进气道模型如图 1 所示。该模型为木质, 具有单斜切式唇口, 从上唇口处起至终端出口全长 1095mm, 其中唇口段长 245mm, 内管道长 850mm, 内管道由 300mm 的方柱段、283mm 的方圆过渡段及 267mm 的圆柱段组成, 其中最末段为一长度等于出口截面直径的等截面圆柱段。该模型进口截面大小为 135mm × 120mm, 出口截面内径 D 为 170mm。模型管道内壁贴敷有铝箔材料, 铝箔平整光滑, 使电磁散射实验不受表面质量的影响。该进气道的下壁面上装有外物防护孔板, 在模型上为一块按比例缩小的金属板, 其上



也有交错排列的小孔,直径为3mm,孔的中心距为6mm,整块金属板的尺寸为250mm×120mm。

实验工作是在南京航空航天大学无人机研究所的微波暗室进行的。暗室尺寸为28m×8.5m×8.5m,实验时背景电平为-43dBsm。实验时模型与天线之间的距离为11.5m。该暗室目前有3个波段(X, Ku, Ka)的发射和接收装置系统。本实验在X波段下进行,其频率为f=9375MHz。由于该暗室安装了激光瞄准器和光栅编码器,使实验模型的位置、安放姿态和方位角均得到准确地控制,提高了测定结果的可靠性。

为了保证目标RCS的测量精度,必须使进气道模型与天线之间的距离满足远场条件,即 $R \geq 2a^2/\lambda^{[1]}$,在本文中 $R=11.5m, \lambda=32mm, a=120mm$,显然满足远场条件。为了消除地面的影响,微波暗室地面铺有吸波材料,而且使目标架设高度 $H=3.4m$ 。由于本文主要关心进气道内部及口径边缘的散射场,因此在进气道模型外部贴有吸波材料,以消除其外表面的影响。

2 进气道的电磁散射特性研究

本实验测量了该型进气道模型在不同攻角、不同终端等状态下的雷达散射截面。这里的不同终端是指进气道终端分别为短路、静止转子和转动转子;不同攻角是指攻角大小分别为0°、5°、10°。

2.1 不同终端对进气道散射特性的影响

为便于分析,这里仅以0攻角时为例,分别对3种终端状态的影响进行两两比较。

如图2可以看出,在几乎所有的方位角范围内,如果其它状态完全相同,终端短路时的RCS值明显高于终端为静止转子和终端为转动转子时的RCS值,其差值高达近10dB甚至10dB以上;

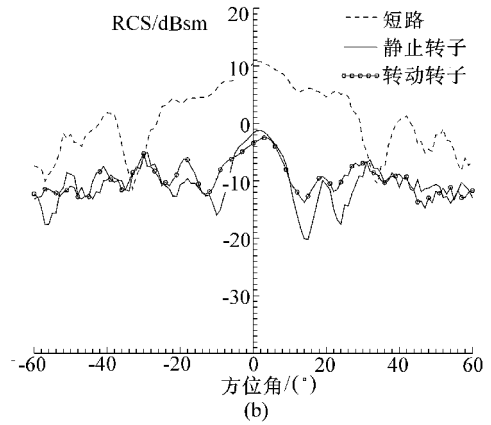
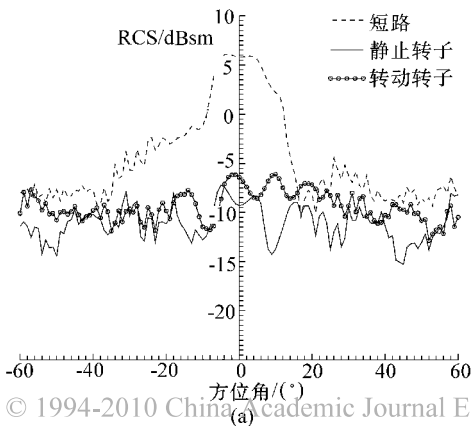


图2 0攻角下,3种不同终端的RCS值比较曲线 (a)水平极化; (b)垂直极化

终端为静止转子时的RCS值和终端为转动转子时的RCS值相差不大。后者比前者略高,差值一般在1~3dB之间。当攻角为5和10时,可以得到大致相同的结论。

2.2 不同攻角对进气道散射特性的影响

图3给出了终端为短路时不同攻角下的

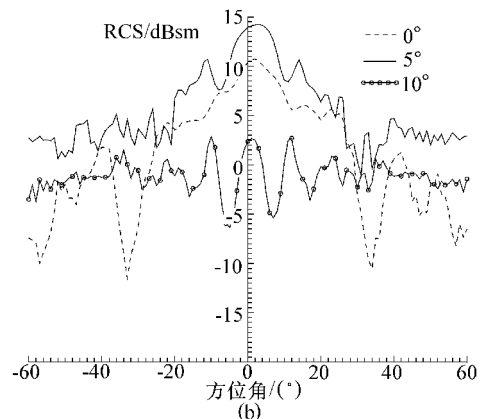
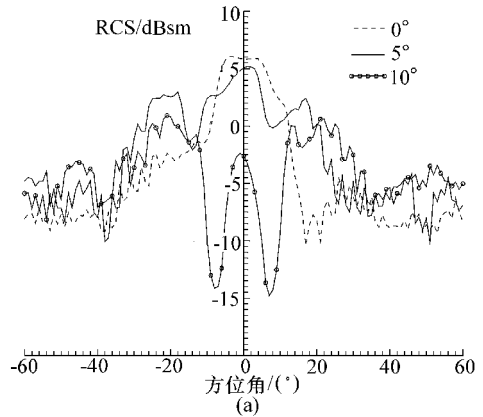


图3 终端为短路时,不同攻角下RCS值比较曲线 (a)水平极化; (b)垂直极化

RCS值比较曲线。如图3所示,水平极化时,在大约±15方位角范围内,0和5攻角的RCS曲线

明显高于10 度角的 RCS 曲线;在0 度方位角附近,0 度角的 RCS 曲线比5 度角的 RCS 曲线略高,但就较大方位角范围而言,则前者比后者低。垂直极化时,0 和5 度角时的 RCS 曲线也明显高于10 度角时的 RCS 曲线,而0 度角时的 RCS 曲线却比5 度角时的 RCS 曲线略低。当终端分别为静止转子和转动转子时,可得出同短路时基本一致的结论,因此在0°;5°;10°三种不同大小的攻角中,如果其它状态完全相同,一般说来,10 度角时的 RCS 值最小,5 度角时的 RCS 值最大。

3 进气道的雷达截面减缩研究

该实验将研究该型进气道雷达散射截面的减缩措施及其效果。适用于本文实验的 RCS 减缩措施只有雷达吸收技术,包括在进气道内壁贴敷吸波材料和在进气道后部加消波器。本节研究了吸波材料的4种贴敷长度。这里所说的4种长度均是指吸波材料的长度相当于进气道内通道长度的比例,分别为1/2长度、1/3长度、1/4长度和1/5长度。除1/2长度外,其余每一种贴敷长度的吸波材料均有8种贴敷方式,这8种方式是由唇口贴、前贴和后贴组合而得。

贴敷方式如图4所示,所谓唇口贴是指唇口

(a段)贴敷有吸波材料,前贴是指进气道模型内通道前部(b段)贴敷有吸波材料,后贴是内通道后部紧靠消波器位置处(c段)贴敷有吸波材料,全贴就是指a,b,c3段均贴有吸波材料,全金属则是指a,b,c段均不贴吸波材料,即整个进气道内壁都是金属的。至于唇口贴+前贴则是指a,b段贴有吸波材料,而c段不贴,其余贴敷方式表示的意义可由此类推。若吸波材料贴敷过多,将造成进气道的重量及成本大大增加,就1/2长度而言,全贴意味着整个进气道内壁贴满吸波材料,因此,在该长度下将不考虑全贴和前贴+后贴。对于每一种贴敷方式,均分为加消波器和不加消波器两种状态。

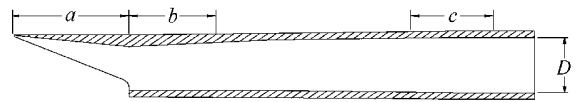


图4 进气道模型吸波材料贴敷位置示意图

表1给出了方位角范围内4种长度的吸波材料在各种状态下相对于全金属的 RCS 平均值的下降 dB 数。很显然,表1中的值越大说明其减缩效果越好。

表1 在方位角±15°内,各种状态相对于全金属的 RCS 平均值下降 dB 数

极化方式		水平极化				垂直极化			
贴敷方式	有无吸波器	1/2长度	1/3长度	1/4长度	1/5长度	1/2长度	1/3长度	1/4长度	1/5长度
全贴	有		10.68	7.96	7.91		12.13	13.01	7.71
	无		13.86	7.06	6.69		5.82	6.96	4.43
唇口贴	有	8.32	8.98	11.52	8.57	5.95	5.56	9.41	5.69
	无	5.81	7.43	6.46	5.25	0.39	6.36	5.93	7.39
唇口贴	有	8.56	8.11	10.49	4.43	5.57	9.4	11.4	7.91
	无	7.81	5.48	5.69	2.56	2.47	4.87	4.14	2.25
唇口贴	有	6.91	5.29	7.76	6.4	4.25	4.58	6.37	5.08
	无	0.37	1.32	1.68	1.34	2.6	3.45	3.99	4.72
全金属	有		6.29				3.30		
	无		0				0		
前贴	有	6.56	3.94	10.96	5.22	8.05	4.96	8.67	5.21
	无	4.59	2.61	4.12	2.07	3.42	3.82	3.85	0.86
前贴	有		8.37	7.78	6.36		9.1	9.78	5.19
	无		5.76	5.78	3.99		9.61	9.31	6.88
后贴	有	5.98	6.34	8.37	5.6	5.82	7.42	7.03	5.35
	无	5.04	4.54	4.95	3.7	2.89	2.91	2.77	3.95

3.1 吸波材料长度对 RCS 减缩效果的影响

对于某一特定长度的吸波材料,不可能使目标在所有状态下的 RCS 平均值都达到最小,但如果使其在大多数情况下的 RCS 平均值最小,即其相对于全金属的 RCS 平均值下降 dB 数最大,则

可以认为当吸波材料为这一长度时,其雷达截面减缩效果最好。在对表1进行初步观察之后,可以大致判断出1/3、1/4长度吸波材料的减缩效果要好一些。为便于比较,可以选定1/4长度的吸波材料(以下简称为1/4长度,其余类推)作为一个比较基准。这里先将1/5长度同1/4长度的情况

比较,在对16种状态逐一分析对比之后,可以发现在任一状态下,无论极化方式如何,当吸波材料为1/4长度时,其相对于全金属状态的下降dB数均大于1/5长度时的对应值,因此在RCS减缩效果上,1/4长度明显优于1/5长度。同样比较1/4长度与1/3、1/2长度的各种状态下的下降dB

数,可以看出在多数情况下,前者均比后者低,即1/4长度均优于1/3、1/2长度。综上所述,当吸波材料为1/4长度时,其RCS减缩效果最好。结合表1和图5、图6进一步分析可知,当贴敷长度为1/4长度、贴敷方式为唇口贴+前贴(或后贴)+消波器时减缩效果最佳。

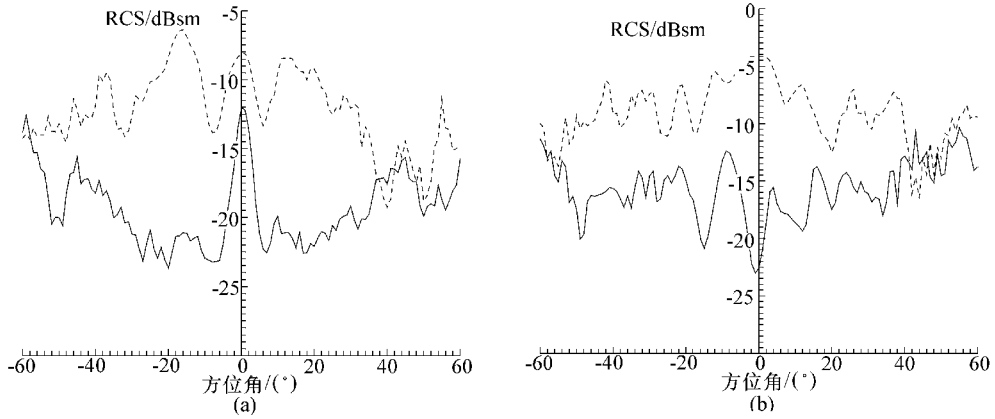


图5 1/4长度吸波材料为唇口贴+前贴+格栅时的RCS曲线
(a)水平极化; (b)垂直极化

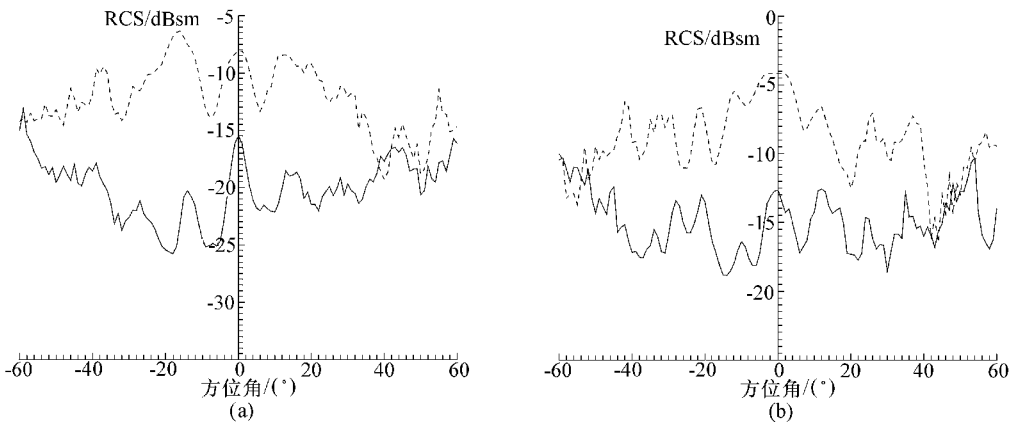


图6 1/4长度吸波材料为唇口贴+后贴+格栅时的RCS曲线
(a)水平极化; (b)垂直极化

3.2 贴敷位置对RCS减缩效果的影响

分析吸波材料贴敷位置对RCS减缩效果的影响将主要考虑两个方面:

(1) 唇口贴敷吸波材料的作用 为了清楚认识唇口贴敷吸波材料的效果,这里将对以下4组贴敷方式进行分析对比:唇口贴和全金属、唇口贴+前贴和前贴、唇口贴+后贴和后贴、全贴和前贴+后贴。从表1中可知,当仅有唇口贴和全金属时,水平极化下,唇口贴的作用并不显著,而垂直极化下,作用相对来说要明显一些,其减缩效果达3~5dB不等。再分别对比唇口贴+前贴和仅有前贴、唇口贴+后贴和仅有后贴2组贴附方式,可以看到无论极化方式如何,前者相对于全金属的下

降dB值仅比后者的对应值略高,这说明与前贴或后贴结合使用时,唇口贴虽然有一定效果,但作用不明显。对于全贴和前贴+后贴,情况稍微复杂一些,多数情况下唇口贴有较显著的作用,但在垂直极化下,前贴+后贴的下降dB值比全贴时要大,即唇口贴不但没有RCS减缩作用,而且还使RCS值进一步增大。根据以上分析可知,在多数情况下,唇口贴敷吸波材料能在一定程度上起到减缩RCS值的作用,但在某些情况下,却有适得其反的效果,可能使目标的RCS值进一步增大。

(2) 前贴与后贴作用的比较 下面以表1为依据分别进行2组贴敷方式的比较:前贴和后贴、唇口+前贴和唇口+后贴。对比仅有前贴和仅有后贴可以看出,当吸波材料为1/2长度及1/4长

度时,无论极化方式如何,前贴相对于全金属的下降 dB 值比后贴高 1~3dB,即前贴比后贴的效果略好一些;而对于 1/3 长度,后贴却比前贴的效果要好,因为后贴比前贴的下降 dB 值大 2dB 左右;对于 1/5 长度而言,情况稍微复杂一些,但前贴与后贴的效果大体上还是差不多。对比唇口+前贴和唇口+后贴同样可知,当吸波材料为 1/2 长度及 1/4 长度时,无论是水平极化还是垂直极化,其唇口+前贴和唇口+后贴的相对于全金属的下降 dB 数基本相等,因此,2 者的 RCS 减缩效果基本相当;当吸波材料长度为 1/3 长度和 1/5 长度时,2 种贴敷方式的下降 dB 值分布规律不够明显,其值的相对大小同有无消波器相关,但从 2 者的相对差值来看,也可以认为 2 种贴敷方式的效果大致相当。综上所述,在吸波材料的贴敷方式当中,前贴和后贴对 RCS 减缩效果的影响大体上差不多,即使在某些状态下有一定差别,但 2 者的差值一般也在 2dB 左右,考虑各种因素的综合影响,对于前贴和后贴的差别基本上可以不予考虑。

3.3 消波器对 RCS 减缩效果的影响

在进气道后部加消波器被认为是降低其雷达散射截面的一个非常有效的手段。为了全面准确地了解消波器在 RCS 减缩中的作用,这里将以吸波材料的 8 种贴敷方式为线索,结合表 1 来讨论消波器的作用效果。①全金属状态:从表中可以看出,对任一吸波材料贴敷长度而言,消波器对于降低进气道 RCS 的效果都非常明显,通常能降低其 RCS 平均值 3~8dB。②仅有唇口贴:消波器的作用也比较明显,水平极化时,能降低进气道 RCS 平均值 3~7dB;垂直极化时,效果稍差一些,其降低幅度为 2~3dB。③仅有前贴:消波器作用也很显著,水平极化下,仅 1/2 长度有些例外,对于其余长度,消波器能使 RCS 平均值降低 6dB 左右;在垂直极化下,一般说来,其降低效果都能达到 4~6dB。④仅有后贴:消波器的效果依然不错,除吸波材料贴敷长度为 1/5 的状况外,就其余长度而言,消波器均能降低进气道 RCS 平均值 2~5dB。⑤唇口贴+前贴:对于任何贴敷长度,消波器均有明显的效果,消波器使进气道的 RCS 平均值降低幅度一般在 2~6dB 之间。⑥唇口贴+后贴:仅垂直极化下的 1/5 长度有些例外,而对其余任何一种贴敷长度,不管极化方式如何,消波器基本上能使 RCS 平均值降低 2~6dB,而且垂直极化时作用更为明显。⑦前贴+后贴:消波器的作用

同样存在,但其效果要差一些。在水平极化时,能使进气道的 RCS 平均值降低 2~3dB,但在垂直极化时,消波器可以说几乎毫无效果。⑧贴敷方式为全贴:在水平极化下,对于 3 种中的任一长度而言,消波器的减缩效果几乎都为零,甚至在 1/3 长度时还使进气道的 RCS 平均值进一步增大,而在垂直极化下,其作用却很突出,能降低 RCS 平均值达 3~7dB。

由以上分析可知,对于绝大多数情况而言,消波器的作用是非常明显的,一般能使进气道的 RCS 平均值降低 3~6dB 以上。这是由于对于一个腔体而言,进入腔体的大部分电磁波是通过终端的反射而回到雷达方向的,入射到管壁上的电磁波也都要通过终端的反射而对腔体的后向散射作出贡献,因此,在进气道腔体内部靠近终端的地方加消波器,就能较好地减缩其雷达散射截面。

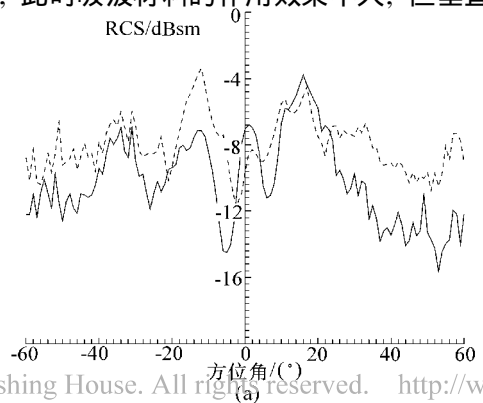
3.4 带孔金属板贴有吸波材料时对 RCS 减缩效果的影响

这里将研究在无任何其它的吸波材料且没有消波器的情况下,贴敷吸波材料的带孔金属板对进气道 RCS 减缩的影响(该吸波材料上有同带孔金属板上排列一致且大小相同的孔)。表 2 给出了在 $\pm 5^\circ$ 、 $\pm 15^\circ$ 、 $\pm 30^\circ$ 方位角范围内带孔金属板是否贴敷吸波材料时的 RCS 平均值,图 7 则给出了两种情况的 RCS 对比曲线。

表 2 在方位角 $\pm 5^\circ$ 、 $\pm 15^\circ$ 、 $\pm 30^\circ$ 内,带孔金属板有无贴敷吸波材料时的 RCS 平均值/dBsm

极化方式	水平极化			垂直极化		
	5	15	30	5	15	30
平均角度范围/(°)	5	15	30	5	15	30
无吸波材料孔板	-9.56	-7.27	-7.39	-6.05	-8.40	-9.09
有吸波材料孔板	-9.69	-8.88	-8.78	-10.09	-11.43	-10.70

结合表 2 及图 7 分析可知,在水平极化下,带孔金属板贴敷吸波材料时与不贴吸波材料时,其 RCS 平均值大致相等,前者仅比后者低 1dB 左右,此时吸波材料的作用效果不大;但垂直极化



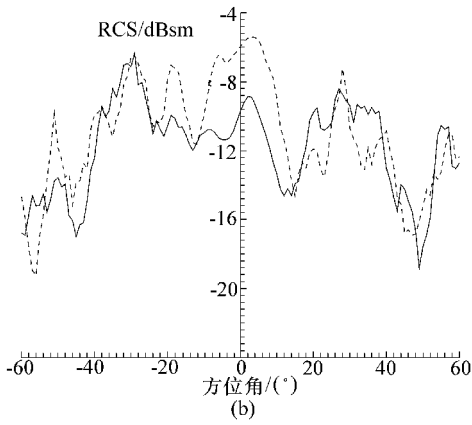


图7 带孔金属板有否贴敷吸波材料 RCS 对比曲线
(a)水平极化; (b)垂直极化

下,前者比后者的 RCS 平均值要低 2~4dB,吸波材料的效果表现得较为明显。

4 结论

(1)在几乎所有的方位角范围内,终端短路时的 RCS 值明显高于终端为静止转子和终端为转动转子时的 RCS 值;终端为转动转子时的 RCS 值比终端为静止转子的 RCS 值略大。

(2)在 0°、5°、10° 三种不同大小的攻角下,一般说来,10° 攻角时的 RCS 值最小,5° 攻角时的 RCS 值最大。

(3)吸波材料贴敷长度为 1/4 长度时,其 RCS 减缩效果最好。而当贴敷长度为 1/4 长度、贴敷方式为唇口贴+前贴(或后贴)+消波器时减缩效果最佳。

(4)唇口贴敷吸波材料对 RCS 减缩有一定作用,但总的说来,效果并不是非常明显。

(5)在吸波材料的贴敷方式当中,前贴和后贴对 RCS 减缩效果的影响大体相同。

(6)消波器的作用非常明显,一般能使进气道的 RCS 平均值降低至少 3~6dB 以上。

(7)在水平极化下,带孔金属板贴有吸波材料时与不贴吸波材料时相比,吸波材料的作用不大;但在垂直极化下,吸波材料的效果表现得较为明显。

参考文献

- [1] 克拉克 E F. 雷达散射截面—预估、测量和减缩[M]. 阮颖铮,陈海,等译. 北京:电子工业出版社,1985. 179~199, 308~320.
- [2] 郭荣伟,舒永泽. 进气道电磁散射机理与应用研究(一)(六)[R]. 科技报告,南京:南京航空航天大学,1993.

作者简介



廖伟,男,25岁,南京航空航天大学动力工程系博士研究生。参与完成过涡喷七机匣疲劳应力计算、进气道电磁散射特性及抑制技术等课题。现正从事埋入式进气道内流气动实验及流场数值模拟等相关课题。联系电话:(025)4890965, E-mail: ldwpe@dn.s.nu-aa.edu.cn.



郭荣伟,教授(博士生导师),男,1939年生,现任南京航空航天大学副校长。长期从事教学和科研工作,在国内外学术刊物和会议上发表学术论文30余篇,并著有《低RCS飞行器设计初步指南》等书,1989年获全国优秀教师称号,多次获得国家及省部委的科技进步奖,并两次荣立航空航天研究院科研工作一等功。现从事进气道内流、进气道隐身、进发匹配等方面的研究。联系电话:(025)4892444, E-mail: grwao@nuaa.edu.cn.

第九届全国疲劳与断裂学术会议在昆明召开

由中国航空学会、中国力学学会、中国机械工程学会、中国金属学会及中国材料研究会联合举办,首次合并的“第九届全国疲劳与断裂学术会议”于1998年12月11日至14日在昆明市云南工业大学胜利召开,本次会议由中国航空学会主办、西北工业大学承办。会议共收到科技论文161篇,参加会议的代表104人,分别来自我国19个省份、28个城市。会议共安排大会报告17篇,其他论文分别在三个分会场宣读交流。大会报告中,我国老一代科学家张福泽院士、黄克智院士、孙训方教授、杨庆雄教授等分别介绍了我国在疲劳、断裂科技领域里的科研工作回顾、理论研究进展以及学术发展动向;中青年科学家、工程技术专家介绍了各自领域里的研究成果、工程应用领域里迫切需要解决的重大问题以及新的实验测试技术动态等。大会上,两位法国知名学者还分别介绍了国外在材料、结构疲劳、断裂领域里的研究进展与动向。

与会代表一致认为,五学会联合举办,疲劳、断裂两专业合并,跨专业、跨学科交叉是一种极好的学术交流形式,对于促进进行专业交流、学术发展、优势互补,促进我国疲劳、断裂领域的事业发展起到了积极作用。

根据五学会商定,第十届全国疲劳与断裂学术会议将由中国力学学会于2000年主办。

(李铁柏)