

高温材料反射率测试支撑平台 RCS 减缩仿真

江 禹 姚金杰 杨志良

(中北大学 信息探测与处理技术重点实验室 太原 030051)

摘要: 针对高温材料反射率测试时,测试样板支撑平台的光滑金属炉沿具有极强的散射,导致反射率测试精度大大降低的问题,提出了对加热炉沿进行结构改造的方法,设计不同深度和宽度的 V 型和 U 型槽炉沿,通过 FEKO 软件对设计结构的缩比模型进行 RCS 仿真。三个入射角度的仿真结果表明在 24~40 GHz 左右频段内的频率点时,深度 2 的 V 型和 U 型槽炉沿都有明显 RCS 减缩效果,与平整炉沿对比 V 槽炉沿和 U 槽炉沿分别平均缩减了 8.6 和 9.8 dB 左右,表明结构优化后再进行材料反射率测试可以提高测试精度。

关键词: 雷达散射截面;散射仿真;结构优化;反射率

中图分类号: TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.99

RCS reduction simulation of the support platform for material reflectivity testing at high temperature

Jiang Yu Yao Jinjie Yang Zhiliang

(Information Detection and Processing Technology Laboratory, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Aiming at the problem that the smooth metal furnace edge of the test sample support platform has extremely strong scattering during the reflectance test of high-temperature materials, resulting in a greatly reduced reflectivity test accuracy, a method of structural transformation of the heating furnace edge is proposed, and different depths and widths are designed. RCS simulation of the scaled model of the designed structure is carried out through the FEKO software on the V-shaped and U-shaped furnace edges of the furnace. The simulation results of three incident angles show that the V-shaped and U-shaped groove edges of depth 2 have obvious RCS reduction effects at the frequency points in the frequency band around 24~40 GHz. Compared with the flat furnace edges, the V-shaped and U-shaped groove edges have a significant RCS reduction effect. The furnace edge has been reduced by about 8.6 and 9.8 dB respectively, which indicates that the reflectance test of the material after the structure optimization can improve the test accuracy.

Keywords: RCS; scattering simulation; structure optimization; reflectivity

0 引言

高温材料反射率测试一般采用弓形法,当测试温度达到 1 500 °C 以上且测试平板边长为 300 mm 或更大时,则需要采用较大的金属外壳加热炉做样品支撑平台,但金属加热炉有极强的电磁散射会造成材料反射率测试精度大大降低^[1-2]。为减少加热炉的电磁散射效应,目前存在改变目标外形、涂覆吸波材料和有源与无源加载等方法^[3-4]。其中加热炉外壁可以涂覆吸波材料,但加热炉沿由于炉体升温后炉沿的温度也会很高,炉沿再涂覆耐高温的吸波材料会造成成本太高,所以可以考虑改变炉沿的外形来减小光滑金属沿的散射^[5-6]。

电磁散射强度通常采用雷达散射截面(radar cross section, RCS)来表征,针对 RCS 减缩的问题受到国内外关注。RCS 减缩技术主要被用在天线和飞行器的设计上,目前天线的 RCS 减缩研究常采用超表面材料去调控电磁波的相位和幅度等减少 RCS,利用这种材料设计的天线减缩效果明显,但材料表面的结构也需要精心设计;飞行器隐身设计上出现了众多的新型吸波材料,耐高温的吸波材料虽然 RCS 减缩效果十分出色,但造价过于昂贵,所以也有不少采用特殊结构的方式,将飞行器表面设计为棱边型平面或曲面来减少飞行器的 RCS^[7-9]。本文采用对平整炉沿结构优化的研究方法,设计不同深度和宽度的 U 槽和 V 槽炉沿模型进行仿真实验,一定频段范围内优化结构可明显

减少炉沿的 RCS。在易处理和低成本的情况下,有效地提高了反射率测试精度。

1 理论基础

雷达散射截面是表征雷达目标对照射电磁波散射能力的一个物理量^[10]。RCS 有多种分类方法,按场区可分为远场 RCS 和近场 RCS;按入射频谱可分为点频 RCS 和宽带 RCS;按雷达的收发位置可分为单站 RCS、准单站 RCS 和双站 RCS。入射波与散射波的夹角为双站角,双站角为 0°时称为后向散射,双站角大于 5°时称为非后向散射。依据弓形法的测试条件,本文探讨的为远场、点频和双站 RCS^[11-12]。

基于电磁散射理论的观点,RCS 用 σ 来表示, σ 表达式为:

$$\sigma = 4\pi \frac{p_0}{p_i} \quad (1)$$

式中: p_0 为散射回波功率; p_i 为入射波功率密度。

设材料反射率测试中金属标准板的 RCS 为 σ_1 ,材料样板的 RCS 为 σ_2 ,金属板的回波功率为 p_1 ,材料样板的回波功率为 p_2 ,标准板可看作完全反射,则:

$$\sigma_2 = 4\pi \frac{p_2}{p_i} \quad (2)$$

$$p_i = 4\pi \frac{p_1}{\sigma_1} \quad (3)$$

则材料样板的反射率为:

$$\Gamma = \frac{p_2}{p_1} = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \quad (4)$$

由式(4)可知样板的 σ_2 和 Γ 为线性关系,因此可以利用目标的 RCS 去反映它的反射率。

加热炉沿的 V 型槽可细分为多个二面角,U 型槽则可近似看作是将 V 型槽所有二面角的尖锐角用一小段弧线替代,可以利用二面角的理论去分析 V 型槽和 U 型槽的散射情况。如图 1 所示 V 槽内的电磁波的散射情况大部分为二次散射,如果改变槽的宽度 a 和深度 b 导致夹角 2β 变为锐角后会发生多于两次的散射。V 槽平面 1 和平面 2 的长度都为 c ,二次散射的入射角为 α ,接收角为 θ 。当只考虑二次散射时,V 槽中二面角的 RCS 主要由四部分组成,分别为平面 1 和平面 2 的一次散射 σ_1 和 σ_2 ,平面 1 反射到平面 2 再反射的二次散射 σ_{12} ,平面 2 反射到平面 1 再反射的二次散射 σ_{21} 。可得二面角 RCS 为^[13]:

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_{12} + \sigma_{21} = \frac{\lambda^2}{\pi} |S_1 + S_2 + S_{12} + S_{21}|^2 \quad (5)$$

二面角是由两块金属板组成的,需要先分析平板的双站 RCS,如图 2 所示,根据物理光学法理论^[14]可知:

$$S = \frac{jk\lambda c}{2\pi} \cdot \frac{(\hat{s} \times \hat{h}_r) \cdot (\hat{s} \times \hat{h}_i)}{e^{jkr_0}(\hat{i} - \hat{s})} \cdot \frac{\sin kc(\sin\theta_i - \sin\theta_r)/2}{kc(\sin\theta_i - \sin\theta_r)/2} \quad (6)$$

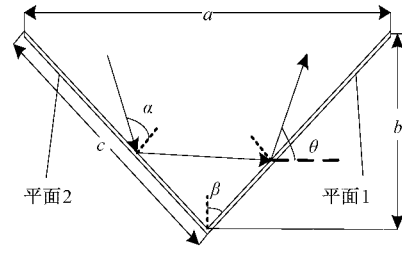


图 1 V 型槽示意图

式中: $k = 2\pi/\lambda$; $\vec{r}_0$ 为平板中心的位置向量; $\hat{i}$ 为入射方向的单位向量,极化方向为 $\hat{h}_i$, $\hat{s}$ 反射方向的单位向量; $\hat{h}_s$ 为极化方向; $\hat{n}$ 为垂直平板方向的单位向量; θ_i 和 θ_s 分别为入射角和反射角。

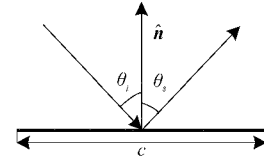


图 2 平板的双站散射图

由式(6)可计算出 S_1 、 S_2 、 S_{12} 和 S_{21} ,再根据式(5)可以推导^[15]出:

$$\sigma = \frac{l^2}{4\pi} \left| \frac{kc \sin(\beta + \alpha)(e^{iQ_1} - 1)}{Q_1} + \frac{kc \sin(\beta - \alpha)(e^{-iQ_2} - 1)}{Q_2} + \frac{kb' \sin(3\beta + \alpha)(e^{iQ_{12}} - 1)}{Q_{12}} + \frac{ka' \sin(3\beta - \alpha)(e^{-iQ_{21}} - 1)}{Q_{21}} \right|^2 \quad (7)$$

$$\begin{cases} Q_1 = kc[\cos(\beta + \alpha) + \cos(\beta + \theta)]/2 \\ Q_2 = kc[\cos(\beta - \alpha) + \cos(\beta - \theta)]/2 \\ Q_{12} = kb'[\cos(3\beta + \alpha) + \cos(\beta - \theta)]/2 \\ Q_{21} = ka'[\cos(3\beta - \alpha) + \cos(\beta + \theta)]/2 \end{cases} \quad (8)$$

式中: a' 和 b' 分别为二次散射到平面 1 和平面 2 的等效长度。分析式(7)和(8)中变量可知 V 槽二面角 RCS 的大小主要随入射波波长 λ 、入射角 α 和二面角夹角 2β 而变化,所以首先需要考虑这 3 个变量的合理取值,才能达到炉沿 RCS 减缩的效果。

2 模型设计与仿真

为比较哪种结构对平整炉沿 RCS 减缩效果更好,本文设计了两种深度和两种宽度的 V 槽与 U 槽炉沿,加上平整炉沿共 9 种结构。由于按照实际炉体(如图 3 所示)进行仿真,计算量过大,所以利用 FEKO 建立了部分炉体的 20:1 缩比模型。模型如图 4 所示,炉体内的支撑圆盘实际直径

为 300 mm,圆盘上放置 180 mm×180 mm 的样板,并对模型各部分赋予了相应的材料属性。因主要是比较炉沿的影响,所以模型中省略了炉沿和支撑圆盘之间的氧化锆保温层。

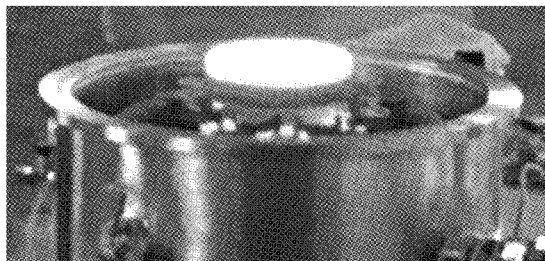


图 3 加热炉实物图

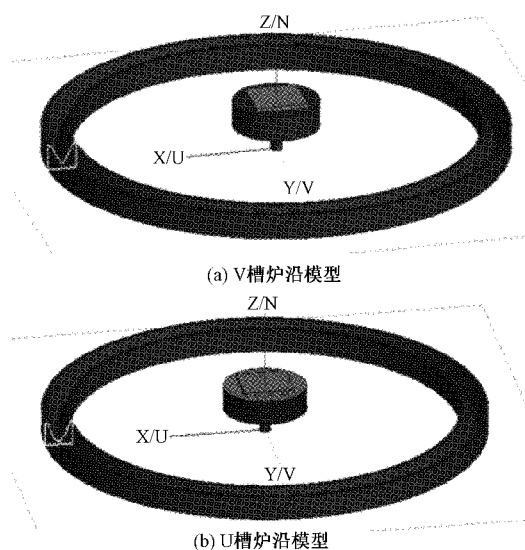


图 4 两种槽型设计模型

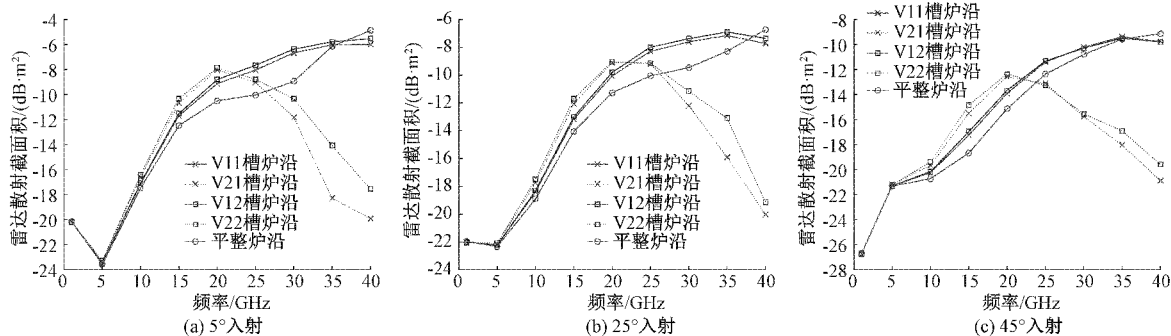


图 5 平整炉沿与 V 槽炉沿仿真结果对比

从 3 个入射角度的仿真对比图可以看出,在 1~26 GHz 范围内频率点的平面波照射下,4 种 V 槽结构的炉沿基本没有 RCS 减缩效果。但在 26~40 GHz 范围内频率点的平面波照射下,深度 2 的 V 槽炉沿在 3 个入射角度下都具有明显的 RCS 减缩效果,且频率越高减缩的越多。40 GHz 时,V21 的 3 个角度平均最高可减缩 13.37 dB 左右。V21 槽和 V22 槽的二面角夹角分别约为 53°和 67°,这

缩比模型中 V 槽的深度 1、深度 2、宽度 1 和宽度 2 分别为 1.5、3、3 和 4 mm,U 槽的深度和宽度情况与 V 槽一致,平整炉沿宽度为 5 mm。仿真的频率范围为 1~40 GHz,选取 9 个仿真频率点,分别为 1、5、10、15、20、25、30、35 和 40 GHz;仿真的激励源定义为平面波;选取 3 个入射角度,分别为 5°、25°和 45°;设置计算远场双站 RCS。分别对 9 个模型划分网格,最后提交计算。

3 仿真结果分析

为更清晰地观察和比较高温支撑平台的 RCS 仿真结果,将 3 个入射角度下各种结构的 FEKO 仿真数据全部导出,且通过 Matlab 绘制了仿真结果对比图。

3.1 V 槽炉沿仿真结果分析

平整炉沿与 V 槽炉沿仿真结果对比如图 5 所示。图 5 中 V12 的数字标号中前面数字记为深度,后面数字记为宽度,即 V12 记为深度 1 宽度 2 的 V 槽,其他 V 槽模型标记方式与 V12 同理。

由图 5 可知,5°、25°和 45°3 个入射角度下,深度 1 的 V 槽炉沿只在 40 GHz 时 RCS 值相比平整炉沿偏小,具有轻微减缩效果,但其他频率点的 RCS 值大体上接近或偏大,没有减缩的效果。根据 V 槽的深度和宽度可知 V11 槽和 V12 槽的二面角夹角分别为 90°和 106°,这说明了直角和钝角的 V 槽在绝大部分的测试频段内是没有减缩 RCS 的效果的。由图 5 还可知当 V 槽深度不变时,宽度越小 RCS 值越小,说明 V 槽的角度越小散射也就越小。对于直角和钝角二面角的电磁散射情况已经有很多文献展开研究过,得出的研究结论都是钝角和直角具有增强电磁散射的效果。这与本文的仿真结果情况一致,表明炉沿首先要设计成锐角二面角的结构。

表明在相对高频范围内两个锐角的 V 槽炉沿都有减缩效果,且锐角越小减缩效果一般更明显;在相对低频范围内文中的 4 个 V 槽角度都没有减缩效果。本文第 2 章推导的 RCS 计算公式说明了 RCS 的大小不仅与二面角夹角相关,也与入射波的频率有关系,仿真结果也验证公式的合理性。因此要实现炉沿在全频段内都具有明显 RCS 减缩效果,还需对结构再优化。

3.2 U 槽炉沿仿真结果分析

很多隐身飞行器表面更多设计为曲面的结构,因为曲面相对于平面具有更小的电磁散射,因此还设计了 U 型槽模型进行仿真分析。U 型结构类似于 V 型结构,可看成将 V 型结构内的平面转换为曲面。如图 6 所示为 U 型炉沿结构与平整炉沿的仿真结果对比,图中的标识与 V 槽同理。从图 6 可知深度 2 的 U 槽炉沿从 22 GHz 左右开始就具有明显的 RCS 减缩效果,40 GHz 时,U21

的 3 个角度平均最高可减缩 13.43 dB 左右,相比 V 槽可减缩 RCS 的频率范围更广,且减缩的效果优于 V 型结构。这证实 U 型结构是更优的结构,对于低频段内的 RCS 依然没有减缩效果。但在保证高温加热炉升温 and 控温无影响的前提下,只对炉沿做了简单且较小的改变便可在一定频段内具有明显 RCS 减缩效果,这对接下来进一步设计更宽频段减缩和更大减缩结构的研究提供了思路。

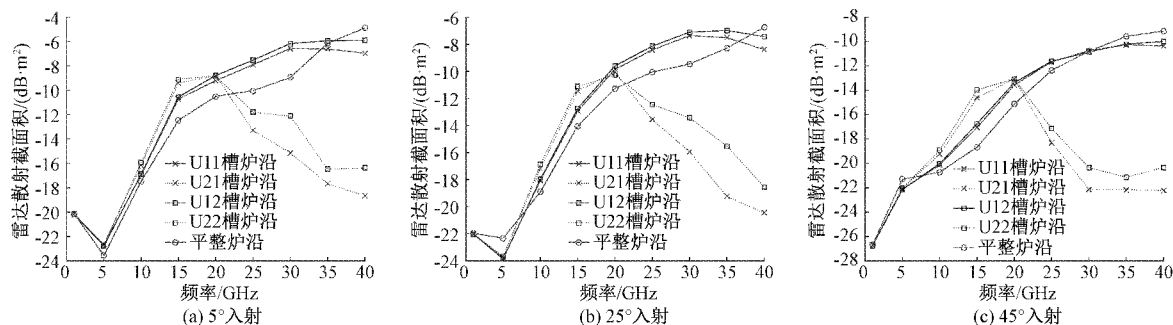


图 6 平整炉沿与 U 槽炉沿仿真结果对比

3.3 9 种结构结果对比与平均 RCS 对比

为更清楚对比 V 槽和 U 槽炉沿仿真结果,将 9 种结构的仿真结果绘制了对比如图 7 所示。从图 7 可知 3 个入射角度

下,U 槽和 V 槽炉沿在 1~20 GHz 范围内频率点的 RCS 差距很小,说明低频范围两种结构都没有减缩效果;在 20~40 GHz 范围内频率点可明显看出 U 槽的 RCS 比 V 槽更小。

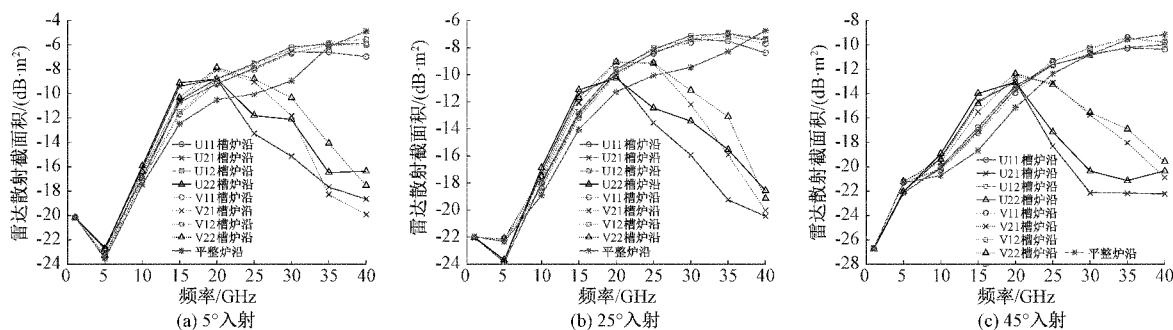


图 7 9 种结构仿真结果对比

为对比九种炉沿结构整体散射情况,对各种结构在 3 个入射角度下的 1~40 GHz 范围内频率点 RCS 值分别取平均,如表 1 所示。从表中可知入射角度越小,平均 RCS

就越大,与入射角越小反射率越大的情况一致。从表中还可得出在每个入射角度下,同深度和宽度的 U 槽炉沿平均 RCS 比 V 槽炉沿的基本更小,表明 U 槽结构炉沿的整体散射能力也是比 V 槽炉沿更弱。

表 1 各种结构的平均 RCS

炉沿结构	平均 RCS/(dB·m ²)		
	5°入射	25°入射	45°入射
U11 槽炉沿	-11.97	-13.15	-15.85
U21 槽炉沿	-15.21	-16.83	-20.06
U12 槽炉沿	-11.63	-12.87	-15.74
U22 槽炉沿	-14.84	-15.99	-19.30
V11 槽炉沿	-12.03	-12.96	-15.57
V21 槽炉沿	-15.07	-15.89	-18.44
V12 槽炉沿	-11.82	-12.78	-15.52
V22 槽炉沿	-14.31	-14.99	-17.76
平整炉沿	-12.68	-13.67	-16.04

4 结 论

本文分析了减少平整金属炉沿电磁散射的方法,设计 V 槽和 U 槽炉沿结构且通过 FEKO 对 9 种结构进行 RCS 仿真,对每种结构的仿真结果都进行详细的对比分析。从仿真结果中可以得出深度 1 的 V 槽和 U 槽基本没有 RCS 减缩效果,但深度 2 的 V 槽和 U 槽在 25~40 GHz 入射波频率范围内的仿真频率点都有明显减缩效果,且 U 槽的减缩效果优于 V 槽。另外,在仿真过程中,由于设备不足以进行大型计算导致仿真模型进行了缩比且省略了炉体内

的一部分结构,以及在1~25 GHz频率范围内没找到适合结构有明显RCS减缩效果,这些问题在后续研究中都有待解决。

参考文献

- [1] 郭高凤,周杨,李恩,等.吸波材料反射率变温测试系统研制[J].仪器仪表学报,2011,32(5):1009-1014.
- [2] 李亭,韩红斌,刘宇.基于FEKO的雷达目标电磁散射特性研究[J].现代电子技术,2015,38(21):39-41.
- [3] 班国东,刘朝辉,叶圣天,等.新型涂覆型雷达吸波材料的研究进展[J].表面技术,2016,45(6):140-146.
- [4] 廖旭涛,洪天求,刘东甲,等.线电流激励下偏心介质的电磁散射[J].电子测量与仪器学报,2018,32(3):52-59.
- [5] TS A, HUA M A, JW A, et al. High temperature absorbing coatings with excellent performance combined Al_2O_3 and TiC material[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2020, 40(5):2013-2019.
- [6] 李业华,何山,王智勇.一种用于高温RCS测试的目标体支架研究[J].电子测量技术,2020,43(9):13-17.
- [7] ZOU S, WEI J, XIN M. Wideband RCS reduction of patch antenna using PRRS[J]. Electronics Letters, 2017, 53(8):522-524.
- [8] 包晓翔,张云飞,杜晓松.通用直升机雷达散射特性及RCS减缩[J].北京航空航天大学学报,2013,39(6):745-750.
- [9] JIA Y, LIU Y, HAO Y, et al. Vivaldi antenna with reduced RCS using half-mode substrate integrated waveguide[J]. Electronics Letters, 2014, 50(5):345-346.
- [10] 何恺.基于电磁超材料的天线雷达散射截面缩减研究[D].北京:北京邮电大学,2016.
- [11] 沈鹏,宋广,周钰鑫.X波段RCS跟踪测量系统不确定度分析[J].电子测量技术,2019,42(7):59-62.
- [12] 张云鹏.隐身涂层微波反射率现场检测技术研究[D].成都:电子科技大学,2019.
- [13] LIPUMA D, MERIC S, GILLARD R. RCS enhancement of flattened dihedral corner reflector using reflectarray approach[J]. Electronics Letters, 2013, 49(2):152-153.
- [14] BAHAR E, BARRICK D E. Scattering cross sections for composite surfaces that cannot be treated as perturbed-physical optics problems[J]. Radio Science, 2016, 18(2):129-137.
- [15] 胡程,敖东阳,曾涛,等.二面角的双基地散射特性分析[J].数据采集与处理,2016,31(4):675-687.

作者简介

江禹,硕士研究生,主要研究方向为微波测试技术等。

E-mail:1846952357@qq.com

姚金杰,博士,副教授,主要研究方向为毫米波测试技术与北斗导航定位技术应用等。

E-mail:1910382988@qq.com

杨志良,博士,讲师,主要研究方向为微波测试技术等。

E-mail:76888700@qq.com