

# 表面涂层对毫米波频段反射面天线电性能的影响

朱振华<sup>1,2</sup>, 苏若斌<sup>2</sup>, 李秀伟<sup>3</sup>, 李向芹<sup>4</sup>, 江彬<sup>1</sup>, 高西奇<sup>1</sup>

(1.东南大学 移动通信国家重点实验室, 南京 210096; 2.上海卫星工程研究所, 上海 201109;  
3.上海航天技术研究院, 上海 201109; 4.上海航天电子技术研究所, 上海 201109)

**摘要:** **目的** 确定反射面天线表面涂层参数, 并验证表面涂层参数对毫米波频段反射面天线电性能的影响。**方法** 采用金属导电率、金属层厚度、二氧化硅层厚度等参数, 通过电磁软件仿真、涂层试片加工、电性能实测等方法对反射面电性能开展研究。首先对各种反射面表面涂层材料的参数及反射率的计算公式进行定性分析, 再采用全波电磁仿真软件 HFSS 对不同表面涂层参数下的电性能开展电磁仿真, 比较均匀平面波激励无限大平面的反射率参数性能。在确定涂层参数的基础上, 加工试验样片, 采用接收机等效噪声温度测量法, 在 54 GHz 和 183 GHz 频段完成对涂层试片的电性能测试。**结果** 在理论分析、仿真计算取得一致的结果下, 获取了天线反射面表面金属层厚度与反射率的关系, 结合工程实际加工经验, 确定了反射面金属层的建议厚度为 1~2  $\mu\text{m}$ 。确定了金属层表面涂覆二氧化硅层在厚度小于 2  $\mu\text{m}$  的情况, 对反射面天线电性能影响可忽略。获取了相同厚度的不同种类金属对反射面电性能的影响。**结论** 在理论分析与仿真分析结论的指导下, 完成了 1.8  $\mu\text{m}$  铝+0.1  $\mu\text{m}$   $\text{SiO}_2$  试验样片的加工及反射率实测, 实测结果与仿真结论一致。

**关键词:** 表面涂层; 毫米波; 反射面天线; 电性能; 反射率; 试片

**中图分类号:** TG174.4; TN828.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)08-0132-06

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.08.014

## Effect of Surface Coating on Electrical Performance of Millimeter Wave Reflector Antenna

ZHU Zhen-hua<sup>1,2</sup>, SU Ruo-bin<sup>2</sup>, LI Xiu-wei<sup>3</sup>, LI Xiang-qin<sup>4</sup>, JIANG Bin<sup>1</sup>, GAO Xi-qi<sup>1</sup>

(1.National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China;  
2.Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 201109, China; 3.Shanghai Academy of Spaceflight Technology,  
Shanghai 201109, China; 4.Shanghai Institute of Aerospace Electronics Technology, Shanghai 201109, China)

**ABSTRACT:** The work aims to determine the surface coating parameters of reflector antenna, and verify the influence of the surface coating parameters on the electrical performance of reflector antenna in millimeter wave band. The electrical properties of the reflector were studied by means of electromagnetic software simulation, coating sample processing and electrical performance measurement with different coating materials, different thickness of the same coating, different material combinations and other parameters. Firstly, the parameters and reflectivity formulas of various reflector surface coating materials were

收稿日期: 2019-08-29; 修订日期: 2019-12-30

Received: 2019-08-29; Revised: 2019-12-30

基金项目: “十三五”民用航天预研项目 (D010107)

Fund: Supported by the "Thirteenth Five-Year" Plan Civil Aerospace Pre-research Project (D010107)

作者简介: 朱振华 (1978—), 男, 博士研究生, 研究员, 主要研究方向为微波遥感卫星技术。邮箱: zzhsteed@163.com

Biography: ZHU Zhen-hua (1978—), Male, Doctor student, Research fellow, Research focus: microwave remote sensing satellite technology. E-mail: zzhsteed@163.com

引文格式: 朱振华, 苏若斌, 李秀伟, 等. 表面涂层对毫米波频段反射面天线电性能的影响[J]. 表面技术, 2020, 49(8): 132-137.

ZHU Zhen-hua, SU Ruo-bin, LI Xiu-wei, et al. Effect of surface coating on electrical performance of millimeter wave reflector antenna[J]. Surface technology, 2020, 49(8): 132-137

qualitatively analyzed, and then the electromagnetic simulation software HFSS was used to simulate the electrical properties of different surface coating parameters to compare the reflectivity parameters of infinite plane excited by uniform plane wave. Finally, on the basis of determining the coating parameters, the test samples were processed, and the electrical properties of the coating specimens were tested in 54 GHz and 183 GHz band by the receiver equivalent noise temperature measurement method. Under the consistent results of theoretical analysis and simulation calculation, the relationship between the thickness of metal layer on the reflector surface and the reflectivity was obtained. Combined with the engineering experience, the recommended thickness of the metal layer on the reflector was determined to be 1~2 microns, and the effect on the electrical performance of the reflector antenna could be ignored when the thickness of the metal layer was less than 2 microns. The effects of different kinds of metals with the same thickness on the electrical properties of the reflector were obtained. Under the guidance of theoretical analysis and simulation analysis, the processing and reflectivity of 1.8 microns aluminum + 0.1 microns SiO<sub>2</sub> test sample were completed. The measured results are consistent with the simulation results.

**KEY WORDS:** surface coating; millimeter waves; reflector antenna; electrical property; reflectivity; test sample

近年来,微波辐射计的研究和应用,受到了国内外研究学者的广泛关注。星载微波辐射计可应用于环境监测、土壤湿度监测、大气温湿度廓线测量、台风等灾害天气监测、洪水地域分布探测及海洋表面风速测量等不同领域,目前在多颗极轨卫星(如 FY-3 气象卫星、海洋二号等)上进行了装载,获取了较多有效数据,取得了较大进展。通过静止轨道卫星获取大气微波被动遥感信息是目前大气探测领域研究的热点之一。反射面天线是静止轨道微波辐射计的核心部件之一,其电性能主要包括反射率、增益、主波束效率、波束宽度、旁瓣和交叉极化等。由于静止轨道装载的微波探测仪天线口径较大,型面精度高,拟采用口径为 5 m 左右,精度达微米量级,目前国内外均没有研制过该类要求的产品。综合考虑天线质量及性能,反射面天线的材料选择碳纤维复合材料。碳纤维复合材料<sup>[1-3]</sup>具有高精度、高强度、高刚度、耐腐蚀、耐疲劳、质量轻及易于减震等优点,已经在星载反射面天线领域取得了广泛的应用。随着材料加工工艺的不断进步以及原材料成本的降低,碳纤维复合材料将会成为更多金属材料的绝佳替代品,成为制造车载、机载、舰载和星载等反射面天线的主流材料。

当前,采用碳纤维复合材料制成天线反射面主要有两种工艺方法。第一种方法是采用热压罐中温固化成形工艺。这种工艺的优点是产品的质量稳定以及力学性能好,缺点是成本比较高,且受热压罐口径限制,难以制造大口径反射面。第二种方法是室温湿法固化成形工艺,相比于第一种方法,成本低,而且适合于大口径反射面的制造。在碳纤维复合材料表面需要采用磁控溅射<sup>[4-5]</sup>方法涂覆金属涂层<sup>[6-8]</sup>,以实现电磁波的高效反射。在金属涂层之上,采用磁控溅射方法涂覆介质层对金属层进行保护,不但起到防氧化、防腐蚀等作用,更重要的是保证反射面在太空中的热性能<sup>[9-10]</sup>。

本文系统地研究了反射面天线金属涂层及保护介质层参数对天线电性能的影响,以及表面涂层<sup>[11-12]</sup>的种类及厚度等参数对天线反射率指标的影响,并通

过全波电磁仿真与试验样片实测等方法进行了相互验证,可为静止轨道微波辐射计大口径天线研制的工程方案提供依据。

## 1 反射面天线表面涂层模型

反射面天线表面分层结构如图 1 所示。根据材料的不同,可将反射面由里至外分为四层,其中 Layer4 (最里层)材料为碳纤维结构面板,需要有足够的热稳定性及型面精度,确保反射面面形与设计相符; Layer3 是树脂层,目前树脂室温固化剂多为脂肪胺类; Layer2 是金属涂层,其厚度的选择既要在在工作频段满足趋肤效应,又要满足轻量化需求; Layer1 (最表层)是二氧化硅介质层,对 Layer2 金属涂层起保护作用,并保证反射面在太空中的热性能。

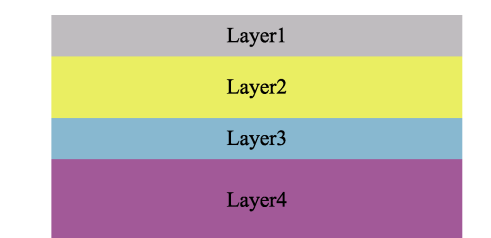


图 1 反射面天线表面涂层结构  
Fig.1 Surface coating structure of reflector antenna

由于 Layer2 金属涂层为良导体,而电磁波在良导体中的衰减极快,在传播很短的一段距离后就几乎完全衰减。根据良导体的趋肤效应现象,良导体中的电磁波局限于导体表面附近的区域。工程上常用趋肤深度  $\delta$  来表征电磁波的趋肤深度,其定义为电磁波的幅值衰减为表面值的  $1/e$  (约为 0.368) 时的电磁波传播距离。在理论上,电磁波趋肤深度<sup>[12]</sup>可表示为:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (1)$$

式中:  $f$  为工作频率;  $\mu$  为磁导率;  $\sigma$  为电导率。

由式(1)可知,在良导体中,电磁波的趋肤深度随着工作频率、媒质的磁导率和电导率的增加而减小。当工作频率在毫米波频段(54 GHz 和 183 GHz)时,良导体的趋肤深度非常小,以致在实际中可以认为电流仅存在于导体表面很薄的一层内。图2给出了青铜、黄铜、铝和银等四种金属在不同频点下的趋肤深度值。由图2可知,若金属涂层的厚度小于1  $\mu\text{m}$ ,则四种金属的电磁波趋肤深度均小于甚至远小于金属涂层厚度。在反射面涂层结构的分析中,采用铝材料的厚度大于1  $\mu\text{m}$ 时,无需考虑金属层之下的环氧树脂层及碳纤维层,仅需考虑二氧化硅层与金属层。因此在后续分析中,仅考虑图1中的 Layer1 和 Layer2 层的参数影响。

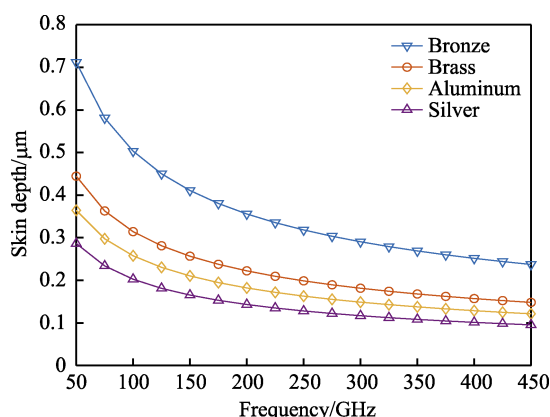


图2 不同金属在50~450 GHz频段的趋肤深度  
Fig.2 Effects of different metals on the 50~450 GHz band

如图3所示,将问题作如下简化:三层不同的媒质,从左往右依次为空气、二氧化硅和金属铝。空气(参数为 $\mu_0$ 、 $\epsilon_0$ )与二氧化硅(参数为 $\mu_1$ 、 $\epsilon_1$ )的分界面位于 $z=0$ ,二氧化硅层厚度设为 $d_1$ ,并在 $z=d_1$ 处与金属层(参数为 $\mu_2$ 、 $\sigma_2$ )交界。

空气区域的波阻抗为:

$$\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \quad (2)$$

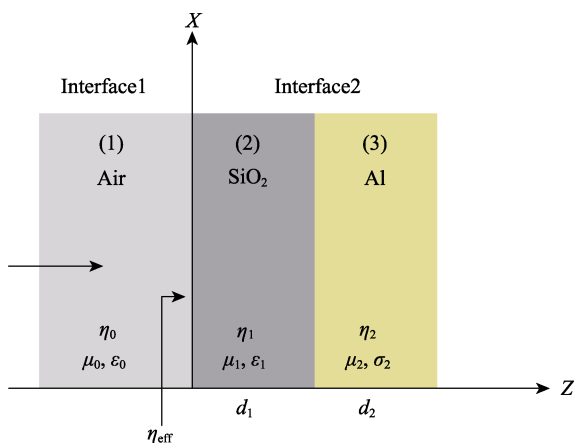


图3 对不同媒质的垂直入射  
Fig.3 Vertical incidence of different transmission media

由于二氧化硅损耗极小,可近似视为无耗介质,其波阻抗为:

$$\eta_1 = \sqrt{\frac{\mu_1}{\epsilon_1}} \quad (3)$$

金属层的波阻抗可以表示为<sup>[13]</sup>:

$$\eta_2 = \sqrt{\frac{2\pi f \mu_2}{\sigma_2}} e^{j\pi/4} \quad (4)$$

从 $z=0$ 侧向右看进去(即 $z>0$ 的区域)的等效波阻抗为<sup>[12]</sup>:

$$\eta_{\text{eff}} = \eta_1 \frac{\eta_2 + j\eta_1 \tan(\beta_1 d_1)}{\eta_1 + j\eta_2 \tan(\beta_1 d_1)} \quad (5)$$

其中 $\beta_1$ 表示在二氧化硅层中传输的平面波的相位常数,其表达式为:

$$\beta_1 = 2\pi f \sqrt{\mu_1 \epsilon_1} \quad (6)$$

由于二氧化硅层的厚度 $d_1$ 是微米级别的,从而 $\beta_1 d_1$ 的取值趋近于0,因此公式(5)可近似为:

$$\eta_{\text{eff}} \approx \eta_2 \quad (7)$$

分界面1( $z=0$ 处)上的反射系数为:

$$\Gamma = \frac{\eta_{\text{eff}} - \eta_0}{\eta_{\text{eff}} + \eta_0} \approx \frac{\eta_2 - \eta_0}{\eta_2 + \eta_0} \quad (8)$$

因此,在目标频率范围之内,金属波阻抗近似于0,分界面反射系数均约等于-1。在已知目标频率范围和金属电导率范围的情况下,可得以下结论:1)同一频率,金属电导率越大,金属波阻抗 $\eta_2$ 越接近于0,反射系数越接近于-1(全反射)。2)金属电导率一定,频率越低,金属波阻抗 $\eta_2$ 越接近于0,反射系数越接近于-1(全反射)。3)若二氧化硅涂层厚度为微米量级,改变二氧化硅层厚度,反射率几乎不变。

目标频点采用大气吸收为主的6个遥感探测频段进行分析,频率范围为50~425 GHz。

## 2 电磁仿真验证

本节将采用ANSYS公司的全波电磁软件HFSS仿真涂层对反射面反射率的影响,并以Floquet周期边界模拟无限大反射面,激励设置为线极化平面波。如图4所示,在ANSYS HFSS中建立一个PEC平面,上面覆盖了一定厚度的有耗金属及二氧化硅等材料,并建立master-slave边界条件,空气盒子上下表面设置Floquet端口。计算频点共计6个,分别为54、89、118、166、183、425 GHz。

本次仿真主要对以下三个方面进行验证:涂覆不同金属材料下的反射率的影响;表面涂覆金属和二氧化硅层情况,金属层厚度变化对反射率的影响;表面涂覆金属和二氧化硅层情况,二氧化硅层厚度变化对反射率的影响。HFSS收敛精度Delta S设为0.001,

converged pass 为 3 次, 周期长度设置为对应频率下的 3 个波长。

反射率与金属电导率的关系曲线如图 5a 所示, 电

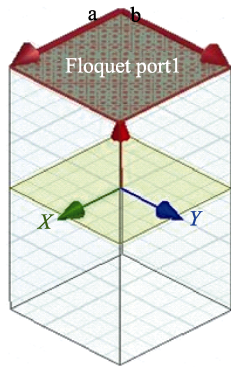


图 4 仿真设置  
Fig.4 Simulation setting

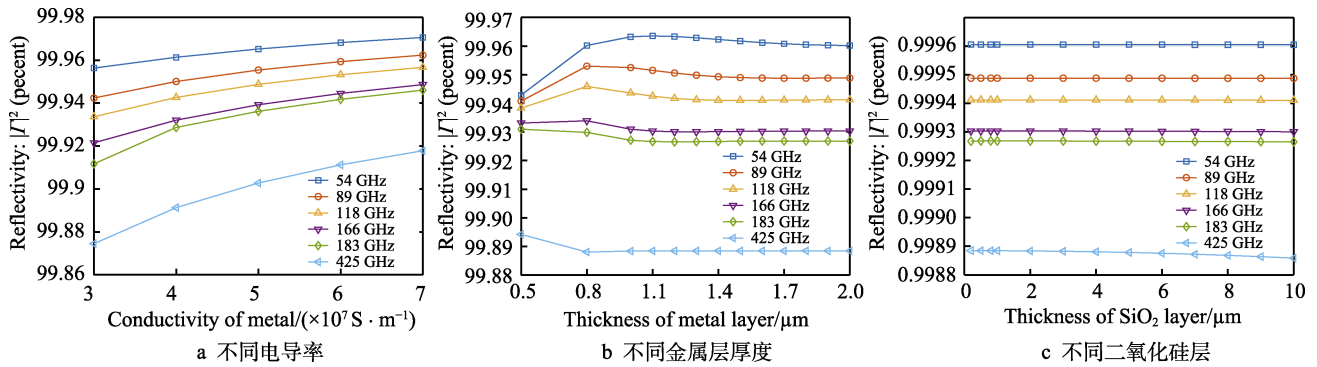


图 5 不同参数对反射率的影响

Fig.5 Influence of different parameters on reflectivity: a) Different conductivity; b) Different thickness of metal layer; c) Different thick layers of silicon dioxide

### 3 试验方法及验证

采用接收机等效噪声温度法测试<sup>[14-16]</sup>VDA (Vacuum Deposit Aluminum or Argentine/SiO<sub>x</sub>, 硅氧化物复合真空沉积铝/银涂层) 涂层的反射率, 来验证涂层对反射率的影响。测试系统包括毫米波接收机、毫米波馈源喇叭、理想金属板、热源、冷源及相关测试设备, 原理如图 6 所示。选择两个典型频段 (54 GHz 及 183 GHz) 对仿真结果与测试结论进行验证。

辐射计系统等效输入噪声功率  $P_{\text{SYS}}$  由  $P_A$  和

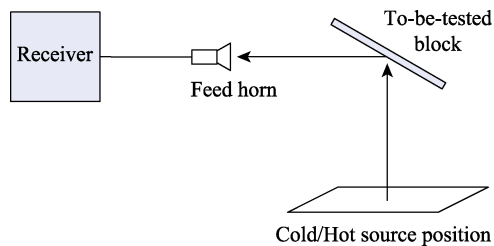


图 6 VDA 基板反射率测试原理

Fig.6 Principle of VDA substrate reflectivity test

导率变化范围为  $3 \times 10^7 \sim 7 \times 10^7 \text{ S/m}$ 。在仿真中, 金属层厚度设为  $1.8 \mu\text{m}$ , 二氧化硅厚度设为  $0.5 \mu\text{m}$ 。可得如下结论: 金属层电导率增大, 反射率增大; 相同电导率下, 频率越高, 反射率越低。

反射率与金属层厚度的关系曲线如图 5b 所示, 金属层厚度变化范围为  $0.5 \sim 2 \mu\text{m}$ 。在仿真中, 金属材料设为铝, 二氧化硅的厚度设为  $0.5 \mu\text{m}$ 。可得以下结论: 当金属层达到一定厚度时, 由于趋肤效应, 反射率与金属层厚度无关。

反射率与二氧化硅层厚度的关系曲线如图 5c 所示, 二氧化硅层厚度变化范围为  $0.2 \sim 10 \mu\text{m}$ 。在仿真中, 金属材料设为铝<sup>[13]</sup>, 厚度设为  $1.8 \mu\text{m}$ 。可得以下结论: 在  $10 \mu\text{m}$  厚度以下, 二氧化硅层的厚度变化对反射率几乎没有影响; 频率越高, 二氧化硅厚度的增加会导致反射率轻微降低, 因为高频条件下, 近似条件越来越不满足。

$P_{\text{REC}}$  两部分组成, 其中  $P_A$  是由天线提供的噪声功率,  $P_{\text{REC}}$  是传输线-接收机组合的等效输入噪声功率。对于辐射效率为  $\eta$ 、物理温度为  $T_p$  的天线, 天线噪声温度  $T_A$  为:

$$T_A = \eta T_{A0} + (1 - \eta) T_p \quad (9)$$

式中:  $T_{A0}$  是由无损天线观测到的场景天线辐射温度。天线噪声功率为:

$$P_A = k T_A B = k (\eta T_{A0} + (1 - \eta) T_p) B \quad (10)$$

式中:  $B$  为中频放大器的有效带宽。传输线-接收机组合的等效输入噪声温度为:

$$P_{\text{REC}} = K T_{\text{REC}} B = K ((L - 1) T_{p0} + L T_{\text{REC}}) B \quad (11)$$

式中:  $L$  为传输线损耗因子,  $T_{\text{REC}}$  为接收机等效输入噪声温度,  $T_{p0}$  为传输线的物理温度。由上可知, 系统等效输入噪声功率可表示为:

$$P_{\text{SYS}} = P_{\text{REC}} + P_A = k [\eta T_{A0} + (1 - \eta) T_p + (L - 1) T_{p0} + L T_{\text{REC}}] B \quad (12)$$

根据以上各式, 通过以下步骤便可得到待测试片反射率:

第一步, 将理想金属板置于待测基板位置, 理想金属板反射率  $\eta=1$ , 分别观测冷源 (亮温  $T_c$ ) 和热源

(亮温  $T_h$ ) 时, 系统等效输入噪声功率  $P_{c0}$  和  $P_{h0}$  分别可表示为:

$$\begin{cases} P_{h0} = k[T_h + (L-1)T_{p0} + LT_{REC}]B \\ P_{c0} = k[T_c + (L-1)T_{p0} + LT_{REC}]B \end{cases} \quad (13)$$

式(13)中, 两式相减可得:

$$P_{h0} - P_{c0} = k(T_h - T_c)B \quad (14)$$

第二步, 将 VDA 涂层试片置于待测基板处, 待测试片反射率为  $\eta$ , 分别观测冷源(亮温  $T_c$ )和热源(亮温  $T_h$ )时, 系统等效输入噪声功率  $P_{c1}$  和  $P_{h1}$  分别可表示为:

$$\begin{cases} P_{h1} = k[\eta T_h + (1-\eta)T_p + (L-1)T_{p0} + LT_{REC}]B \\ P_{c1} = k[\eta T_c + (1-\eta)T_p + (L-1)T_{p0} + LT_{REC}]B \end{cases} \quad (15)$$

式(15)中, 两式相减可得:

$$P_{h1} - P_{c1} = k\eta(T_h - T_c)B \quad (16)$$

第三步, 公式(16)与公式(14)之比即为待测试片的反射率:

$$\eta = \frac{P_{h1} - P_{c1}}{P_{h0} - P_{c0}} \quad (17)$$

测试过程中, 分别将理想金属板、铝层待测试片、铝层及二氧化硅层混合待测试片置于图6中测试基板位置, 测试片涂覆的铝层厚度为  $1.8 \mu\text{m}$ , 二氧化硅层的厚度为  $0.5 \mu\text{m}$ 。每个试片测试时分别观测一次冷源和热源, 观测时间大于  $1 \text{ min}$ , 采集数据超过 60 个。测试结果见表1, 与电磁仿真软件计算的反射率结论一致。

表1 仿真与实测反射率  
Tab.1 Simulated and measured reflectivity

Frequency/GHz	Simulation	Measured
54	0.9991	0.9971
183	0.9985	0.9936

## 4 结语

本文研究了毫米波频段反射面表面涂层的种类及厚度等因素对反射面电性能的影响。结合理论分析, 并通过大量的仿真计算与实际测试结果对比, 获得了天线反射面表面金属层厚度与反射率的关系, 结合工程实际经验, 建议反射面金属层的厚度选择  $1 \sim 2 \mu\text{m}$ 。金属层表面涂覆的二氧化硅层, 在厚度较薄(小于  $2 \mu\text{m}$ )的情况, 对反射面天线电性能影响可忽略。获取了相同厚度的不同种类金属对反射面电性能的影响。本文在分析结论的指导下, 完成了反射面涂层试验样片的加工反射率实测, 反射面实测电性能与仿真结论一致。

## 参考文献:

[1] 于长清, 陈利, 裴雨辰. 碳纤维表面涂层对碳纤维增强

锂铝硅玻璃陶瓷复合材料热导率的影响[J]. 材料工程, 2018, 46(6): 101-105.

YU Chang-qing, CHEN Li, PEI Yu-chen. Effect of carbon fiber coating on thermal conductivity of carbon fiber reinforced lithium alumina silicate glass-ceramics composites[J]. Journal of materials engineering, 2018, 46(6): 101-105.

[2] 张萍, 邓为难. 碳纤维表面涂层制备研究进展[J]. 贵州工程应用技术学院学报, 2015, 33(6): 152-156.

ZHANG Ping, DENG Wei-nan. Study on preparation of coatings on surface of carbon fibers[J]. Journal of Guizhou University of Engineering Science, 2015, 33(6): 152-156.

[3] 陈育秋, 祖亚培, 宫骏, 等. AI 薄膜对玻璃纤维增强树脂基复合材料电磁性能的影响[J]. 金属学报, 2017, 53(11): 1511-1520.

CHEN Yu-qiu, ZU Ya-pei, GONG Jun, et al. Effect of AI film on the electromagnetic properties of glass fiber reinforced resin matrix composite[J]. Acta metallurgica sinica, 2017, 53(11): 1511-1520.

[4] 王晓婧, 刘艳红, 冯硕, 等. 铝合金表面磁控溅射制备 SiC/Cr 复合涂层的研究[J]. 真空科学与技术学报, 2018, 38(4): 332-338.

WANG Xiao-jing, LIU Yan-hong, FENG Shuo, et al. Synthesis and property characterization of magnetron sputtered SiC/Cr coatings on Zr-based alloy[J]. Chinese journal of vacuum science and technology, 2018, 38(4): 332-338.

[5] 营帅. 基于粗糙表面的红外低发射率涂层发射率建模研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2017.

JIAN Shuai. Modeling emissivity of infrared low emissivity coating based on rough surface[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2017.

[6] 王飞, 张超, 周隐玉, 等. 表面涂层技术的研究现状[J]. 热加工工艺, 2017, 46(10): 21-24.

WANG Fei, ZHANG Chao, ZHOU Yin-yu, et al. Research status of surface coating technology[J]. Hot working technology, 2017, 46(10): 21-24.

[7] 王勇, 沈绍传. 工程级反光膜表面涂层配方设计及性能评价[J]. 涂料工业, 2017, 47(9): 35-40.

WANG Yong, SHEN Shao-chuan. Formula design and characterizations of surface coating for engineering grade retro-reflective sheeting[J]. Paint & coatings industry, 2017, 47(9): 35-40.

[8] 刘成臣, 赵连红, 王浩伟, 飞机表面涂层海洋环境试验与实验室环境试验相关性研究[J]. 装备环境工程, 2018, 15(6): 16-20.

LIU Cheng-chen, ZHAO Lian-hong, WANG Hao-wei. Correlation between marine atmospheric environmental test and laboratory environmental test of aircraft surface coating[J]. Equipment environmental engineering, 2018, 15(6): 16-20.

[9] 魏其睿, 王健, 李德杰, 等. Mo-SiO<sub>2</sub> 太阳选择性吸收涂层的空气高温热稳定性[J]. 太阳能学报, 2011, 32(8): 1186-1189.

WEI Qi-rui, WANG Jian, LI De-jie, et al. Thermal stability of Mo-SiO<sub>2</sub> solar selective coatings at high temperatures



- in air[J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2011, 32(8): 1186-1189.
- [10] 龙超, 陈军燕, 杨雨川, 等. 温度变化下研磨金属表面反射率和发射率的测量[J]. *发光学报*, 2016, 37(12): 1566-1570.
- LONG Chao, CHEN Jun-yan, YANG Yu-chuan, et al. Temperature dependence of reflectance and irradiation of the ground metallic target[J]. *Chinese journal of luminescence*, 2016, 37(12): 1566-1570.
- [11] 刘丰, 朱忠博, 崔万照, 等. 太赫兹技术在空间领域应用的探讨[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2013, 11(6): 857-864.
- LIU Feng, ZHU Zhong-bo, CUI Wan-zhao, et al. Application of terahertz techniques in space science[J]. *Journal of terahertz science and electronic information technology*, 2013, 11(6): 857-864.
- [12] 刘彦, 张庆明, 黄风雷, 等. 反射面变形对天线辐射特性的影响[J]. *北京理工大学学报*, 2004, 24(6): 541-544.
- LIU Yan, ZHANG Qing-ming, HUANG Feng-lei, et al. Influence of distortion of a shaped beam reflector on the radiation characteristics of an antenna[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2004, 24(6): 541-544.
- [13] ULABY F T, MOORE R K, FUNG A K. *Microwave remote sensing fundamentals and radiometry*[M]. New Jersey: Addison-Wesley Publishing Company, 1981: 153-165.
- [14] DU Xin-kang, WANG Cong, WANG Tian-min, et al. Microstructure and spectral selectivity of Mo-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> solar selective absorbing coatings after annealing[J]. *Thin solid films*, 2008, 516(12): 3971-3977.
- [15] DAVID M P. *微波工程*[M]. 第三版. 张肇仪, 周乐柱, 吴德明, 译. 北京: 电子工业出版社, 2015.
- DAVID M P. *Microwave engineering*[M]. Third Edition. ZHANG Zhao-yi, ZHOU Le-zhu, WU De-ming, et al. Translated. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2015.
- [16] 闫克丁. 随机粗糙表面光散射场分布特性的机理研究[J]. *光散射学报*, 2017, 29(3): 197-202.
- YAN Ke-ding. Study on the scattering characteristics mechanism of random rough surfaces[J]. *The journal of light scattering*, 2017, 29(3): 197-202.

(上接第 96 页)

- [100] 方燕洁, 白涛. 石墨烯/TiO<sub>2</sub> 陶瓷薄膜的制备及其摩擦学性能研究[J]. *摩擦学学报*, 2017, 37(3): 297-304.
- FANG Yan-jie, BAI Tao. Preparation and tribological properties of graphene/TiO<sub>2</sub> ceramic films[J]. *Tribology*, 2017, 37(3): 297-304.
- [101] BAI Tao, FANG Yan-jie, WANG Jia-le. Preparation and tribological properties of graphene/TiO<sub>2</sub> ceramic films[J]. *Tribology*, 2017, 43(16): 297-304.
- [102] 刘虎. 石墨烯对聚四氟乙烯导热和摩擦磨损性能的影响[J]. *工程塑料应用*, 2017, 45(11): 123-126.
- LIU Hu. Effect of graphene on thermal conductivity, friction and wear properties of PTFE[J]. *Engineering plastics application*, 2017, 45(11): 123-126.
- [103] LEYU Lina, NICHOLAS Ecke, SEBASTIAN Kamerling, et al. Study on the impact of graphene and cellulose nanocrystal on the friction and wear properties of SBR/NR composites under dry sliding conditions[J]. *Wear*, 2018, 414-415: 43-49.
- [104] LIU Xiao-yu, LI Yan-peng, GUO Wen-mao, et al. Dielectric and mechanical properties of polyimide composite films reinforced with graphene nanoribbon[J]. *Surface & coatings technology*, 2016, 320: 497-502.
- [105] GUTIERREZ-MORA F, MORALES-RODRIGUEZ A, GALLARDO-LOPEZ A, et al. Tribological behavior of graphene nanoplatelet reinforced 3YTZP composites[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2019, 39: 1381-1388.
- [106] 卢晓通, 张志刚, 罗洪杰, 等. 石墨烯/铜复合材料的制备与摩擦性能测试[J]. *中国有色金属学报*, 2019, 29(1): 72-79.
- LU Xiao-tong, ZHANG Zhi-gang, LUO Hong-jie, et al. Preparation and friction property test of graphene/Cu composites[J]. *The Chinese journal of nonferrous metals*, 2019, 29(1): 72-79.
- [107] LUO Bing-wei, ZHOU Hai-tao, LIU Da-bo, et al. One-step in-situ reaction synthesis of TiC/graphene composite thin film for titanium foil surface reinforcement[J]. *Vacuum*, 2019, 160: 472-477.
- [108] UPADHYAY R K, KUMAR A. Effect of humidity on the synergy of friction and wear properties in ternary epoxy-graphene-MoS<sub>2</sub> composites[J]. *Carbon*, 2019, 146: 717-727.
- [109] 于洋, 田浩亮, 王长亮, 等. 石墨烯含量对石墨烯改性 WC-Co 自润滑耐磨涂层性能的影响[J]. *金属热处理*, 2018, 43(10): 173-178.
- YU Yang, TIAN Hao-liang, WANG Chang-liang, et al. Effect of graphene content on properties of self-lubrication and wear resistant GO/WC-Co coating[J]. *Heat treatment of metals*, 2018, 43(10): 173-178.