

凹凸形周期结构遮障面的雷达及红外隐身性能分析

李浩,许卫东,肖菲菲,俞宙,吴昌峰,黄伟
(陆军工程大学,江苏南京 210000)

摘要:为了提高遮障面的雷达及红外隐身效果,采用外形隐身技术,设计了一种具有凸起和凹陷的周期结构遮障面。首先建立4种不同形状模型,进行电磁仿真计算并与实验测量结果进行对比,结果显示仿真与实验数据相关系数在0.9以上,仿真结果准确可用。其次分析各模型的电磁散射机理,为遮障面外形设计提供理论基础。然后设计具有起伏特征的遮障面,经过仿真计算,发现凸起和凹陷程度半径 r 达到24 mm时,遮障面反射系数小于-10 dB, r 达到28 mm时反射系数小于-17 dB。最后,在遮障面的凸起部分填充隔热材料,仿真其覆盖在运行温度为80 °C的装(设)备上,发现具有隔热材料的遮障面温度降低3.5 °C,具有一定的红外伪装效果。

关键词:遮障;起伏;隐身;雷达技术;红外技术

中图分类号:TN219;TN976 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2024.04.016

Stealthy performance analysis of radar and infrared shielding surfaces with concave and convex periodic structures

LI Hao, XU Wei-dong, XIAO Fei-fei, YU Zhou, WU Chang-feng, HUANG Wei
(Army Engineering University of PLA, Nanjing 210000, China)

Abstract: In order to improve the radar and infrared stealth effect of the shielding surface, a periodic structure shielding surface with convex and concave is designed by using contour stealth technology. Firstly, four models with different shapes are established to carry out electromagnetic simulation calculation and compared with experimental measurement results, which show that the correlation coefficients between the simulation and experimental data are above 0.9, and the simulation results are accurate and usable. Secondly, the electromagnetic scattering mechanism of each model is analyzed to provide a theoretical basis for the shape design of the shielding surface. Then, the shielding surface with fluctuating characteristics is designed and after simulation calculation, it is found that the reflection coefficient of the shielding surface is less than -10 dB when the convex and concave degree radius r reaches 24 mm, and the reflection coefficient is less than -17 dB when r reaches 28 mm. Finally, the raised part of the shielding surface is filled with thermal insulation material, and it is simulated to be covered on the equipment with an operating temperature of 80 °C. It is found that the temperature of the shielding surface with thermal insulation material is reduced by 3.5 °C, which has a certain infrared camouflage effect.

Keywords: barrier net; fluctuation feature; stealth performance; radar technology; infrared technology

1 引言

遮障是伪装技术的重要手段之一,散射型遮障网通过电磁散射,改变电磁波的传播方向,从而降低目标的雷达后向散射信号^[1]。当前普遍配发的伪

装遮障网,表面的起伏特征为随机方式^[2],为分析研究粗糙表面对散射机理的影响,本文对遮障网表面的起伏特征采取规律方式。

总体思路为,建立金属模型,通过定标实验确定

作者简介:李浩(1997-),男,硕士,研究方向为新型伪装材料及工程化。

通讯作者:许卫东(1966-),男,博士,教授,研究方向为伪装科学与技术。E-mail: xweibing1968@yahoo.com

收稿日期:2023-07-11

计算的准确性;设计遮障网的凹凸表面,计算其反射系数,并与典型背景的后向散射系数对比;研究遮障网的红外辐射特性。

2 金属模型定标体

掺杂有 ITO 材料的遮障网,其相对介电常数较大,表面较为粗糙,散射特性由电磁参数、表面几何形状共同决定,而仿真软件通过 MOM、PO 等方法计算此类材料的反射系数是否准确尚未明确,因此需要根据遮障表面的起伏特征建立金属模型进行重新定标。

2.1 测试原理

GJB 2038-1994《雷达吸波材料反射率测量方法》,材料的 S_{21} 参数减去金属板的 S_{21} 参数即为材料的反射率,其原理如下:

在雷达方程中:

$$P_r = \frac{P_t}{4\pi r_i^2} \frac{\sigma}{4\pi} \frac{A_r}{4\pi r_r^2} \quad (1)$$

在测试条件保持不变的情况下:

$$\frac{Pr_1}{Pr_2} = \frac{\sigma_m}{\sigma_d} = \tau \quad (2)$$

即:

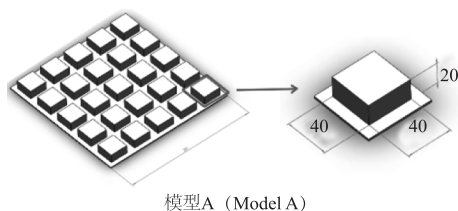
$$\lg \tau = \lg \sigma_m - \lg \sigma_d \quad (3)$$

式中, σ_m 表示材料的 RCS; σ_d 表示金属基板 RCS; τ 表示反射率。此外,由上式可得,在垂直入射情况下,反射率为后向散射率。

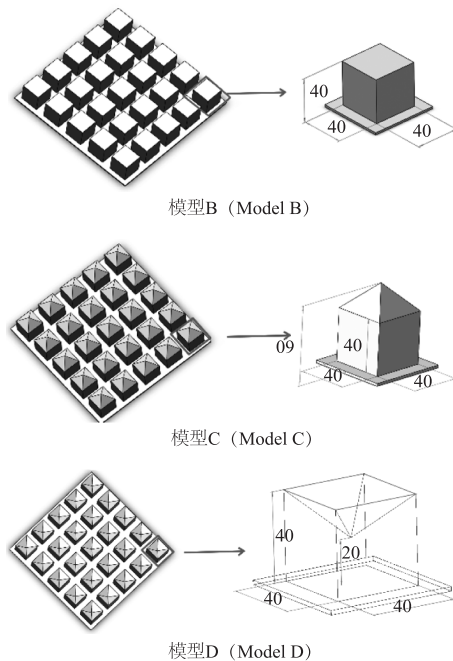
2.2 模型设计与样品制作

弓形框测试系统中,金属基板的尺寸有 100 mm × 100 mm、150 mm × 150 mm、300 mm × 300 mm,模型尺寸应与基板尺寸一致,为减少边缘效应,确定模型的尺寸为 300 mm × 300 mm。

为了分析表面起伏特征对于雷达隐身的影响,从简单模型出发,设计 4 组模型,底板均为厚度 2 mm: 模型 A: 长、宽为 40 mm, 高为 20 mm; 模型 B: 长、宽、高为 40 mm; 模型 C: 柱体长宽为 40 mm, 凸起部分为正四棱锥, 高为 20 mm; 模型 D: 柱体长宽为 40 mm, 凹陷部分为正四棱锥, 高为 20 mm。所有模型为中心对称, 最小单元为 60 mm × 60 mm。各模型如图 1 所示。



模型A (Model A)



模型D (Model D)

图 1 A、B、C、D 四种模型及尺寸图

Fig. 1 Models A, B, C and D and their dimensions

模型 A 和模型 B 用于模拟粗糙表面,模型 C 和模型 D 在粗糙表面的基础上,增加凸起和凹陷。立方体模型的优势在于:利于建模、散射机理分析简单、加工方便。

对于 4 种模型,采用 304 不锈钢材料进行加工,304 不锈钢的电磁参数接近于仿真软件中理想导体材料,相对介电常数为 1, 导电率为 $1.45 \times 10^6 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ 。实验样品如图 2 所示。

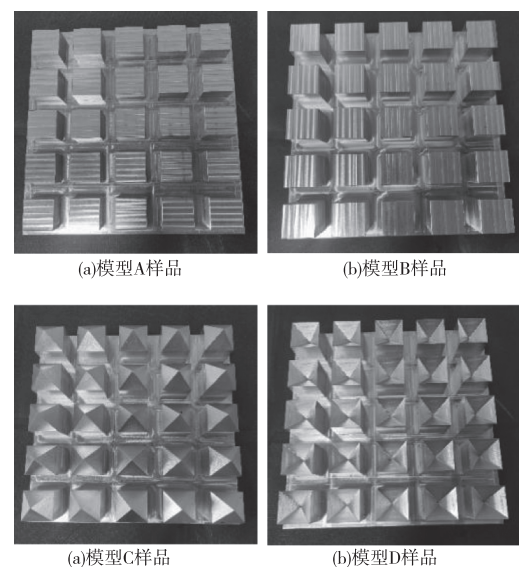


图 2 A、B、C、D 四种实验样品图

Fig. 2 Experimental samples A, B, C and D

2.3 测试及仿真结果

在微波暗室中,采用弓形框测试系统测试其反

射特性,测试波段为 2 - 18 GHz。仿真软件计算反射率时,将材料视为无限大周期材料,为提高仿真准确性,使用 RCS 法计算其反射率。测试及仿真结果如图 3 所示。

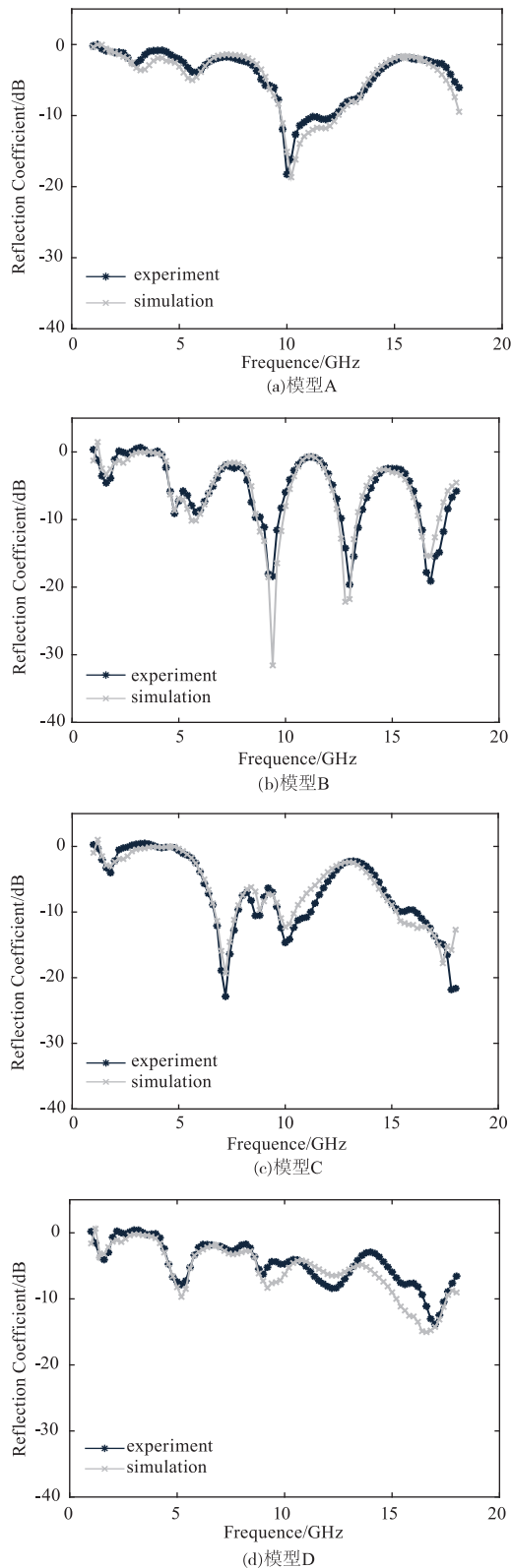


图 3 各模型实验及仿真结果

Fig. 3 Experimental and simulation results of each model

各模型总体曲线趋势一致,实验及仿真结果的皮尔逊相关系数 P 都在 0.9 以上,全波段均值误差 d 在 1 dB 之内,说明仿真精度较高,即可以通过仿真的用来计算其他材料的反射系数,如表 1 所示。

表 1 各模型实验及仿真结果对比

Tab. 1 Comparison of experimental and simulation results of each model

模型	全波段均值 RCS		d	P
	测试	仿真		
A	-4.43	-4.89	0.46	0.967
B	-5.69	-5.92	0.23	0.918
C	-4.63	-5.61	0.98	0.900
D	-6.90	-6.48	-0.42	0.952

3 机理分析

分析模型的电磁散射特性,需要从电磁散射机理出发,分析电场、磁场传播路径。同时,考虑实际应用中,在遮障表面增加凹凸不平的外形,改变的是遮障面的粗糙程度,即要分析粗糙表面对电磁散射的影响。

主要的散射机理包括如下 5 种:镜面反射、尖顶散射、边缘绕射、行波散射、相互作用散射等^[3]。模型 A 和模型 B 以立方体为基础,最上层表面为平面,在垂直入射情况下,以镜面反射为主,因为直角边的存在,还有部分边缘绕射;模型 C 存在凸起的正四棱锥,以尖顶散射和边缘绕射为主;模型 D 总体反射率较低,说明各散射均不强。

模型 A 和模型 B 的差异在于立方体的高度 h ,图 2 可以看出模型 A 在 10 GHz 有较低反射率,达到 -18 dB,模型 B 在 9.4 GHz、13 GHz、16.8 GHz 有三个反射谷,但也存在 4 个反射峰。反射峰的存在,是镜面反射造成的,模型 B 比模型 A 多反射谷,是模型 B 更为粗糙,根据 Peake 和 Oliver 修改后的瑞利判据,若满足下式则为粗糙表面:

$$R \geq \frac{\lambda}{4.4 \cos \theta} \quad (4)$$

在波长达到 88 mm (3.4 GHz) 时,模型 A 为粗糙表面,在波长达到 176 mm (1.7 GHz) 时,模型 B 为粗糙表面。模型 B 相对模型 A 更加粗糙,所以总体反射率更低,存在更多反射谷。

模型 C 因为存在更多的直边,会产生较强的散射。根据 GTD 理论,投射到尖顶的入射射线将激起无穷多条从尖顶向所有方向发射的绕射射线^[4](如图 4 所示),导致散射增强,整体反射率较高,在遮障面外形设计中,应避免尖顶的存在。

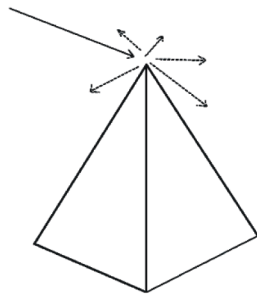


图4 尖顶散射示意图

Fig. 4 Schematic diagram of spire scattering

模型 D 在 7.2 GHz、8.8 GHz、10.2 GHz、17.8 GHz 处有较低反射率,凹陷的设计避免了镜面反射、边缘绕射及尖顶散射,所以整体反射率较低,但凹陷过深,可能会造成腔体散射。

综上所述,通过外形设计降低遮障面的反射率,应尽可能增加表面粗糙程度,但由于遮障面的携带、装备、应用要求,表面凸起不能过高,避免影响使用,同时,表面凸起应减少直边、尖顶的存在。

4 遮障设计

掺杂有 ITO 的遮障面,在红外、雷达波段具有更好的伪装效果^[5],而掺杂 ITO 的遮障面的导电率、介电常数取决于多种因素,在仿真计算时,取导电率为 $0.01 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$,相对介电常数为 11。遮障面采取凹凸不平的表面,凸起和凹陷部分为半圆球体,最小单元尺寸 $60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$,半圆球体半径 r 为 15 mm、20 mm、25 mm、28 mm,模型如图 5 所示。

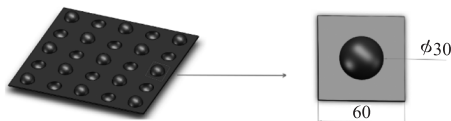


图5 遮障面形状设计

Fig. 5 Shape design of the mask surface

测试波段为 2 GHz ~ 18 GHz,仿真计算结果如图 6 所示。

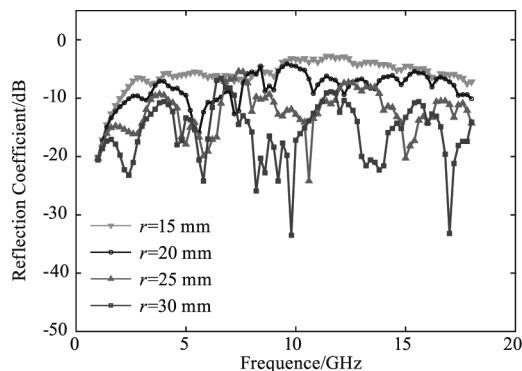


图6 遮障面仿真反射系数

Fig. 6 Reflection coefficient of simulated barrier surface

根据仿真计算,当半径为 15 mm 时,反射系数保持在 -5 dB ,随着半径的增大,即表面越来越粗糙,反射系数整体降低。当半径达到 20 mm 时,在 5.8 GHz 处出现反射谷,当半径达到 25 mm 时,全波段反射系数均值为 -12.4 dB ,满足雷达隐身要求,当半径达到 28 mm 时,在 2.4 GHz、6 GHz、8.4 GHz、9.8 GHz、13.8 GHz、17 GHz 处,共有 6 处反射谷。

不同背景具有不同的后向散射系数,表 2 为典型背景的 X 波段后向散射系数,这些数据是经过大量实验,在获得大量数据基础上,采用统计的方法得到的^[6]。当入射角为 0° 时,后向散射系数等于反射系数,那么,由 SAR 雷达获得的典型背景后向散射系数,可以视为该类型背景的反射系数^[7]。

表2 典型背景的反射系数

Tab. 2 Reflection coefficient of typical background

地面类型	σ°/dB	地面类型	σ°/dB
树木	-12	耕地	-11
棉花地	-12	城市	-12
大豆	-7	起伏地	-12
小麦	-13	石子路	-20
燕麦	-6	煤屑路	-20
高粱	-7	茅草地	-20
谷类	-10	柏油路面	-25
牧场	-10	混凝土路面	-27
荒地	-17	沙地	-20
绿草	-10	沼泽地	-12

为适应不同的背景,可以调整遮障表面凸起和凹陷程度,使得遮障面的雷达散射特性与背景完美融合。但通过外形设计来降低反射系数的效果有限,还需要结合吸波等功能共同提高遮障面的雷达隐身效果,结合表 2 和表 3 可以看出,具有凸起和凹陷的遮障面可以应对大部分背景下的雷达隐身要求,但在石子路、混凝土路等具有很低后向散射系数的背景下,效果有待提高。

表3 不同粗糙程度下遮障面反射系数(X波段)

Tab. 3 Reflection coefficient of masking surface under different roughness(X-band)

半径 r/mm	反射系数 τ/dB
28	-16.9
26	-13.2
24	-10.6
22	-7.9
20	-6.3

5 红外辐射特性研究

对于具有起伏特性的遮障面,在凸起部分填充隔热材料,即能够实现红外伪装功能。根据斯蒂芬玻尔兹曼定律:

$$E = \varepsilon\sigma T^4 \quad (5)$$

热辐射能量取决于温度,而当汽车等装备运行时,温度可达 80 °C 甚至超过 100 °C,属于严重的暴露征候。气凝胶等一类的固体材料,具有低导热系数、低密度、高孔隙率等特点^[8],是优良的隔热材料,能有效降低装备运行时的表面温度,减少被探测概率,而当遮障网与背景环境温度小于 4 °C 时,即可认为遮障网与背景环境实现融合^[9]。

下面通过仿真计算,对比具有隔热材料与没有隔热材料的遮障面,分析两者的表面温度,探究遮障面的红外伪装性能。参数设置如表 4 所示。

表 4 遮障面热力学仿真参数设置表

Tab. 4 Parameters setting table of thermodynamic simulation of barrier surface

参数	值
装(设)备运行温度	80 °C
气凝胶导热系数 ^[10] /(W·m ⁻² ·K ⁻¹)	0.03
遮障面发射率 ^[11]	0.6
环境温度/°C	25
自然对流系数/(W·m ⁻² ·K ⁻¹)	10

气凝胶填充于遮障面凸起部分的下面,这样既不会改变遮障面的雷达隐身性能,又不会过多增加遮障面的重量,如图 7 所示。

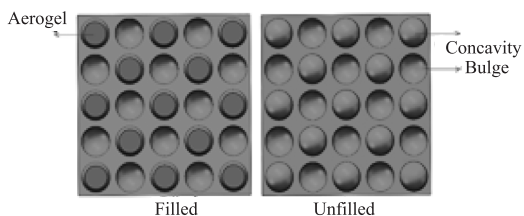


图 7 气凝胶填充示意图
Fig. 7 Aerogel filling diagram

装设备运行温度为 80 °C,在其上方 20 cm 处覆盖遮障面,经过仿真,温度稳定后,结果如图 8、9 所示。

含有气凝胶的遮障面,平均温度在 30.3 °C,比不含气凝胶的遮障面低 2.4 °C,最高温度保持一致,最低温度下降 4.9 °C(如表 1 所示)。通过图 9、图 10 可以看出,在凸起部分(A 点处),有气

凝胶的温度低于无气凝胶的温度,相差 3.5 °C;在凹陷部分(B 点处),两者温度一致。填充气凝胶的遮障面,能够有效降低表面温度,使其更加接近于环境温度,降低红外暴露征候,实现雷达及红外波段伪装。

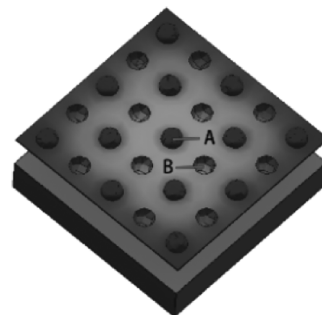


图 8 无气凝胶的遮障面温度示意图

Fig. 8 Schematic diagram of shielding surface temperature without aerogel

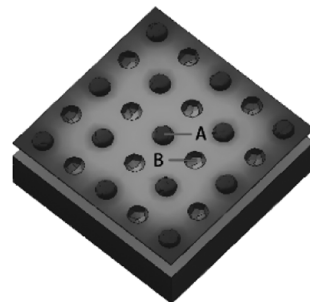


图 9 有气凝胶的遮障面温度示意图

Fig. 9 Schematic diagram of barrier surface temperature with aerogel

表 5 两种遮障面温度对比

Tab. 5 Comparison of temperature of two types of barrier surface

温度	无气凝胶	有气凝胶
最高温度/°C	34.4	34.3
最低温度/°C	31.6	26.7
平均温度/°C	32.7	30.3

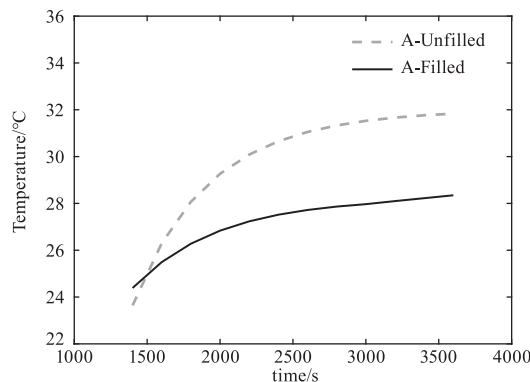


图 10 A 点温度变化图

Fig. 10 Temperature variation diagram at point A

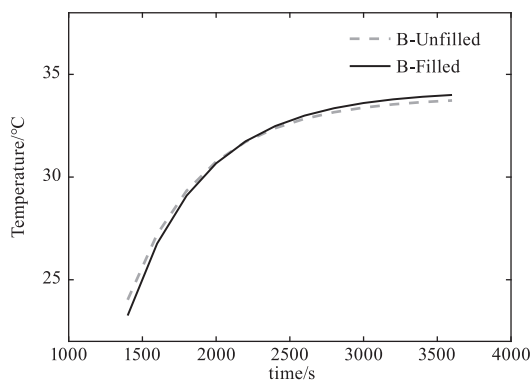


图 11 B 点温度变化图

Fig. 11 Temperature variation diagram at point B

6 总结

针对 4 种模型进行了反射系数实验测试及仿真计算,并对遮障面进行了外形设计,得到以下结论:4 种模型中,模型 B 较模型 A 有更多的反射谷,模型 D 比模型 C 总体反射系数低,一方面和各形状的散射机理有关,另一方面取决于材料表面相对于波长的粗糙程度。具有起伏特征的遮障面,随着表面凸起和凹陷的程度增加,整体反射系数降低,当凸起和凹陷半径 r 达到 24 mm 时,反射系数低于 -10 dB。通过对遮障面表面起伏特性的设计,可以实现遮障面与大部分地面背景融合,当地面的反射系数小于 -17 dB 时,还需考虑遮障面的吸波吸能。在遮障面的凸起部分填充气凝胶之类的隔热材料,总体平均温度能降低 2.4 °C,有气凝胶部分温度降低 3.5 °C,具有一定的红外伪装效果。通过实验确定了仿真的准确性,下一步工作中,还需结合材料特性,考虑加工工艺,来制作凹凸形的周期结构遮障面。

参考文献:

- [1] Zeng Chaoyang, Wang Hao, Lü Xuliang. The relationship between the shielding fusion performance of the shielding and its microwave transmission characteristics [C]//2009 National Functional Materials Technology and Industry Forum, Zhenjiang, Jiangsu, China, 2009. (in Chinese)
曾朝阳,王浩,吕绪良. 遮障的遮蔽融合性能与其微波传输特性的关系 [C]//2009 全国功能材料科技与产业高层论坛,江苏,镇江,2009.
- [2] Li Yupeng, Wang Jijun, Su Ronghua, et al. Simulation analysis of shielding performance of absorbing and scattering camouflage shielding [J]. Protective Engineering, 2021, 43(2): 68 - 72. (in Chinese)
李玉鹏,王吉军,苏荣华,等. 吸收散射型伪装遮障遮蔽性能仿真分析 [J]. 防护工程, 2021, 43(2): 68 - 72.
- [3] Ai Xiaofeng, Xu Zhiming, Qiu Mengqi, et al. Research progress on bistatic scattering characteristics of radar targets [J]. Terahertz Journal of Science and Electronic Information, 2022, 20(2): 106. (in Chinese)
艾小锋,徐志明,邱梦奇,等. 雷达目标双基地散射特性研究进展 [J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2022, 20(2): 106.
- [4] Babich V M, Smyshlyaev V P, Dement'Ev D B, et al. Numerical calculation of the diffraction coefficients for an arbitrary shaped perfectly conducting cone [J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 1996, 44(5): 740.
- [5] Xü Rong, Zhang Xiaozong, Wu Xiao. New multi-band composite vegetation camouflage material [J]. Infrared Technology, 2021, 43(3): 266 - 271. (in Chinese)
徐戎,张晓忠,吴晓. 新型多波段复合植被伪装材料 [J]. 红外技术, 2021, 43(3): 266 - 271.
- [6] Jia Yunhe. Research on camouflage effect based on radar simulation imaging [D]. Nanjing: Army Engineering University, 2010. (in Chinese)
贾云鹤. 基于雷达仿真成像的伪装效果研究 [D]. 南京: 陆军工程大学, 2010.
- [7] Hong Lina, He Hongtao, Hao Xiaojun, et al. Simulation and prediction method of static zone performance in microwave darkroom [J]. Terahertz Journal of Science and Electronic Information, 2012, 10(3): 295 - 299. (in Chinese)
洪丽娜,何洪涛,郝晓军,等. 微波暗室静区性能仿真预测方法 [J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2012, 10(3): 295 - 299.
- [8] Liu Haixin. Research progress of aerogel insulation materials [J]. Brand and Standardization, 2023, (2): 178 - 180. (in Chinese)
刘海馨. 气凝胶隔热材料研究进展 [J]. 品牌与标准化, 2023, (2): 178 - 180.
- [9] Cui G Z, HU J H, JIAN C C, et al. Analysis and research on thermal infrared properties and adaptability of the camouflage net [J]. Proceeding of the SPIE, 2016, 10157: 1015735 - 1015742.
- [10] Li Guangde, Liu Dongqing, Wang Yi, et al. Research status and progress of thermal infrared camouflage technology [J]. Infrared Technology, 2019, 41(6): 495 - 503. (in Chinese)
李广德,刘东青,王义,等. 热红外伪装技术的研究现状与进展 [J]. 红外技术, 2019, 41(6): 495 - 503.
- [11] Su Ruyue, Wang Xinbo, Li Li, et al. Preparation and properties of carbon aerogel/carbon foam composite thermal protection materials [J]. Carbon Technology, 2021, 40(2): 27 - 31. (in Chinese)
苏茹月,王馨博,栗丽,等. 炭气凝胶/泡沫炭复合热防护材料的制备及性能研究 [J]. 炭素技术, 2021, 40(2): 27 - 31.