

高温吸波涂层的多目标优化模型设计

赵世鑫¹ 马 华¹ 邵腾强¹ 宁春龙² 王 军¹

(1 空军工程大学基础部, 西安 710051)

(2 中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司, 沈阳 110000)

文 摘 大多数高温吸波材料都属于非磁损耗型, 单层往往很难达到理想的吸波性能。为解决此问题并优化涂层厚度, 通过差分进化算法建立了多层高温吸波涂层的多目标优化模型, 重点以 8.2~12.4 GHz 内反射率 $RL < -10$ dB 频率带宽和涂层总厚度 d 为优化目标。设定三种高温吸波材料, 研究表明, 单层涂层很难达到理想的吸波性能; 在单目标优化中, 以频率带宽为优化目标, 得到了 3.2 GHz 的有效带宽, 吸波性能显著提升; 在多目标优化中, 同时对涂层总厚度 d 进行优化, 优化结果同单目标相比, 在保持良好吸波性能的同时, 涂层厚度下降 30%, 结果表明模型能够优化吸波性能, 并最大限度降低厚度。本文建立的模型适用于多种材料, 不局限于文中设定的三种材料, 能够达到理想的优化结果。

关键词 高温吸波涂层, 差分进化算法, 多目标优化, 吸波性能

中图分类号: TB34

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2021.03.006

Design of Multi-objective Optimization Model of High Temperature Absorbing Coating

ZHAO Shixin¹ MA Hua¹ SHAO Tengqiang¹ NING Chunlong² WANG Jun¹

(1 Department of Basic Sciences, Air Force Engineering University, Xi'an 710051)

(2 AVIC Shenyang Liming Aero Engine Co. Ltd., Shenyang 110000)

Abstract Most high temperature absorbing materials belong to non-magnetic loss type, and it is difficult to achieve ideal absorbing properties in single layer. In order to solve this problem and optimize the coating thickness, a multi-objective optimization model of multi-layer high-temperature absorbing coating was established by differential evolution algorithm. The reflectivity $RL < -10$ dB frequency bandwidth and total coating thickness in the range of 8.2 to 12.4 GHz were taken as the optimization objectives. In this paper, three kinds of high-temperature absorbing materials were set up. And the result shows that it is difficult for single-layer coating to achieve the ideal absorbing performance. In the single-objective optimization, the frequency bandwidth is taken as the optimization objective, and it obtains the effective bandwidth is 3.2 GHz, and the wave absorption performance is improved. In the multi-objective optimization, the total coating thickness is optimized at the same time. Compared with the single objective optimization, the coating thickness d decreases by 30% while maintains good absorbing performance. The results show that the model can optimize the absorbing performance and reduce the thickness to the maximum. The model established in this paper is suitable for many kinds of materials, not limited to the three kinds of materials, and can achieve the ideal optimization results.

Key words High temperature absorbing coating, Differential evolution algorithm, Multi-objective optimization, Absorbing property

0 引言

第二次世界大战期间, 由于实际战争中侦察和反侦察的需要, 欧美国家率先开始研究吸波材料^[1]。

经过七十多年的发展, 在提高军事装备的隐身性能上, 吸波材料得到了广泛的应用, 大大提高了武器装备的生存能力。随着现代战争的迅速发展, 对武器

收稿日期: 2020-09-14

基金项目: 国家自然科学基金(61671467、1671466)和科技部国家重点研发计划资助(2017YFA0700201)

第一作者简介: 赵世鑫, 1996年出生, 硕士研究生, 主要从事高温吸波材料和隐身超材料方面的研究工作。E-mail: 15691845096@163.com

装备的隐身性能提出了更高的要求^[2-3]。一些特殊部件材料的使用温度高达700℃,并且直接暴露在雷达波的探测下,例如,巡航导弹的弹头和弹翼部位、航空发动机的鼻锥帽和尾喷管等,在工作状态下,它们对探测雷达波的反射率较强,极易被敌方雷达发现并摧毁^[4]。在高温环境中,由于居里温度的限制,吸波涂层没有磁性,所以高温吸波涂层大多都是非磁损耗型吸波材料。

单层高温吸波涂层很难达到好的吸波性能,设计合理的多层吸波涂层往往能够比同样厚度下的单层吸波涂层具有明显优异的吸波性能^[5-7]。近年来,多层吸波材料的优化设计逐渐成为了研究隐身技术的一种重要方向,其吸波性能不仅与每层吸波材料的电磁参数有关,还与各个涂层厚度以及其排列顺序有关^[8-11]。哈尔滨工业大学的罗志勇研究了吸收材料的计算机辅助设计,能够优化设计三层以下的吸波材料^[12];电子工程总体研究所的郑日升利用粒子群优化算法优化3层Jaumann吸波结构,得到了较好的优化结果^[13];中南大学物理与电子学院的成雨果通过改进后的遗传算法优化多层吸波材料的结构,收敛速度快,寻优能力强^[14]。

本文基于差分进化算法进行高温吸波涂层的多目标优化设计,把多层吸波涂层的厚度和要求频带内的反射率低于-10 dB的频率带宽设定为优化目标,从而建立高温吸波涂层的多目标优化模型。

1 差分进化算法介绍与多层吸波涂层的物理模型

1.1 差分进化算法介绍

1995年,Storm和Kenneth Price博士提出了差分进化(Differential Evolution, DE)算法^[15],其易于实现、结构简单并且全局搜索能力强大,因而得到了广泛的研究。DE算法是一种基于群体的启发式随机搜寻算法,算法思想是随机产生一组初始群体,然后选择种群中的任意2个个体进行矢量相减求差值并进行加权处理。再与随机选取的第三个个体进行变异、交叉,从而产生新个体作为子代。然后将其带入适应度函数求值并与其父代进行比较,如果父代的适应度值劣于新个体,则新个体取代父代。通过持续的迭代运算比较,保留好的个体,淘汰适应度不理想的个体,逐渐逼近最优解^[16]。差分进化算法的进化流程包括变异、杂交和选择,控制因素有种群规模、缩放因子和交叉概率。这与遗传算法(GA)相似,但与GA相比,DE算法具有结构简单、收敛迅速、实现便捷等优点,常用于多目标优化的问题求解。采用差分进化算法求解问题的流程图见图1,参数设置为:初始种群数量(NP)为180,缩放因子(F)为0.3,交叉概率(CR)为0.3,运行迭代范围为0~2000。

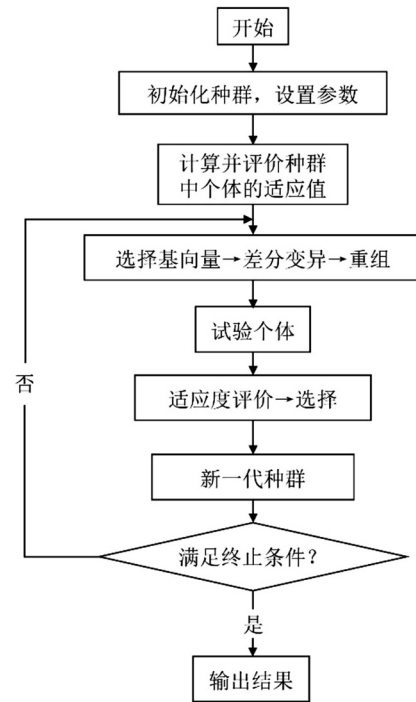


图1 差分进化算法流程图

Fig. 1 Flow chart of differential evolution algorithm

1.2 多层高温吸波涂层的物理模型

电磁波与高温吸波涂层之间的吸收和损耗机制较为复杂,影响多层吸波涂层性能的因素主要有各层材料的介电参数、材料厚度以及材料的排列顺序。多层吸波涂层的结构如图2所示。

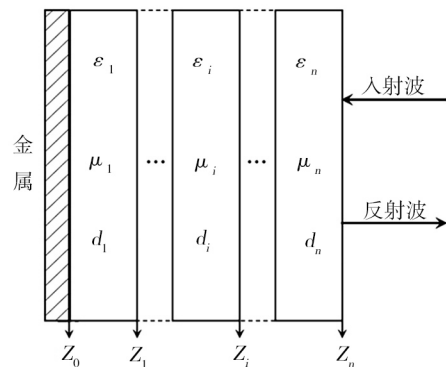


图2 多层吸波涂层结构的简化示意图

Fig. 2 Simplified schematic diagram of multi-layer absorbing material structure

根据传输线理论^[17], ϵ_{ii} 、 μ_{ii} 分别为第*i*层吸波材料的复介电常数和复磁导率,正如前文所述,高温吸波材料通常为非磁损耗型吸波材料,即 $\mu_{ii}'=1, \mu_{ii}''=0$,则第*i*层的复介电常数 ϵ_{ii} 、复磁导率 μ_{ii} 为:

$$\epsilon_{ii} = \epsilon_{ii}' - j\epsilon_{ii}'' \quad (1)$$

$$\mu_{ii} = \mu_{ii}' - j\mu_{ii}'' = 1 \quad (2)$$

其中,金属板与第一层接触,最外层与自由空间(空气)接触,每层都具有各自的厚度、复介电常数。

则第*i*层的特性阻抗 η_i 和传输系数 γ_i 分别为:

$$\eta_i = \sqrt{\frac{1}{\epsilon_{ri}}} \quad (3)$$

$$\gamma_i = j \frac{2\pi f \sqrt{\epsilon_{ri}}}{c} \quad (4)$$

则第*i*层的输入阻抗为:

$$Z_i = \eta_i \frac{Z_{i-1} + \eta_i \tanh(\gamma_i d_i)}{\eta_i + Z_{i-1} \tanh(\gamma_i d_i)} \quad (5)$$

通过材料的输入阻抗就可以得出多层吸波材料对电磁波的反射率:

$$R = \frac{Z_n - 1}{Z_n + 1} \quad (6)$$

$$RL = 20 \lg |R| \quad (7)$$

由上式可以看出,若已知材料的电磁参数,再通过选择合适的算法对多层材料的排列顺序以及各层材料的厚度进行优化,就可以得出最优的吸波性能。

2 模型优化结果

优化模型的频率范围设定为X波段,即8.2~12.4 GHz,采样频率为0.1 Hz,设定三种非磁损耗型吸波材料,其电磁参数如表1所示,其中 $\tan\delta$ 为吸波材料的损耗正切角。

表1 三种非磁损耗型吸波材料的电磁参数

Tab. 1 Electromagnetic parameters of three kinds of dielectric loss absorbing materials

材料	ϵ_r'	ϵ_r''	μ_r'	μ_r''	$\tan\delta$
材料A	9.0	1.1	1.0	0	0.122
材料B	15.0	2.4	1.0	0	0.160
材料C	35.0	8.0	1.0	0	0.228

2.1 单层吸波涂层在不同厚度下的吸波性能

为了研究吸波材料的多目标优化模型的有效性,首先对单层吸波材料的吸波性能进行模拟仿真。单层吸波材料分别是材料A、材料B和材料C,根据反射率公式^[18]可以通过Matlab计算出三种材料分别不同厚度情况下的反射损失。

$$RL = 20 \lg \left| \frac{Z_{in} - 1}{Z_{in} + 1} \right| \quad (8)$$

式中

$$Z_{in} = \left(\frac{1}{\epsilon_r} \right)^{1/2} \tanh \left[j \left(\frac{2\pi f d}{c} \right) \epsilon_r^{1/2} \right] \quad (9)$$

三种材料厚度都选取为2、5、13.4、19.1和25 mm,其中13.4、19.1 mm作为对比与后文的单目标优化结果和多目标优化结果进行研究分析。不同厚度的三种非磁型损耗吸波材料在8.2~12.4 GHz的扫频范围内的吸波性能理论模拟结果如图3所示。

从图中可以看出材料一在厚度13.4 mm时,相比于其他厚度而言,吸波性能较好,但反射损失小于-10 dB的频宽也仅有0.6 GHz;材料二在5.0 mm时吸波性能较好,反射损失小于-10 dB的频宽为0.9 GHz;材料三吸波性能较差,在8.2~12.4 GHz的扫频范围内反射损失均大于-5 dB。从以上的数值模拟可以发现,对于上述三种单层吸波层,在5种不同厚度的情况下,吸波性能都比较差。可见,单层吸波涂层往往很难达到良好的吸波性能。

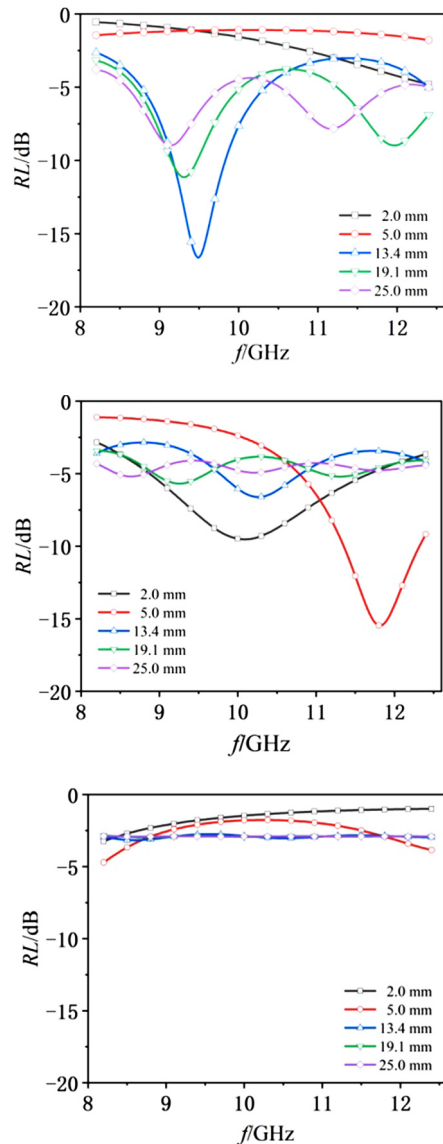


图3 三种非磁损耗型吸波材料在不同厚度下的吸波性能
Fig. 3 The absorbing properties of three kinds of dielectric loss absorbing materials under different thickness

2.2 单目标优化

为了克服单层高温吸波涂层在吸波性能上的不足,采用多层吸波涂层并以反射损失为优化目标进行设计,以验证多层吸波涂层的可行性。在单目标优化模型中,仅以反射损失为优化目标,即要求最大

化多层吸波涂层在 8.2~12.4 GHz 的频率范围内反射损失低于 -10 dB 的带宽,以三种吸波材料的排列顺序和厚度为优化变量,每层吸波材料的厚度上限设定为 15 mm。三种吸波材料在单目标优化模型下的结果如表 2 所示。

表 2 单目标优化结果

顺序	材料	厚度/mm
第一层	材料 B	12
第二层	材料 C	4.8
第三层	材料 A	2.3

从表 2 中可知,三层吸波材料的第一层为材料 B ($d_1=12.0$ mm),与金属面接触,第二层和第三层分别为材料 C ($d_2=4.8$ mm)、材料 A ($d_3=2.3$ mm),总厚度 d 为 19.1 mm。

图 4 是单目标优化的适应度曲线迭代过程,从中可以看出,当迭代次数在 4~30 时,适应度值收敛缓慢,进化停滞,可能陷入了局部最优;但当迭代次数到达 30 次之后,适应度值开始快速下降,急剧收敛,说明缩放因子(F)和交叉概率(CR)数值设置合理,使得进化突破瓶颈,跳出局部最优;当迭代次数达到 100 次时,收敛速度减慢,适应度值趋于平稳,已经达到较好优化结果。说明采用差分进化算法建立的优化模型收敛速度快,能够取得良好的优化结果。

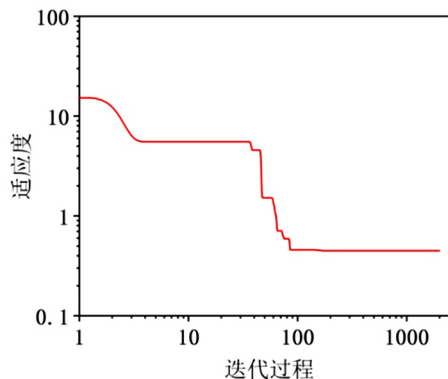


图 4 适应度曲线迭代过程

Fig. 4 Iterative process of fitness curve

从图 5 中可以看出,三层吸波材料在 8.2~12.4 GHz 的雷达频率范围内,全部低于 -9.5 dB,并且低于 -10 dB 频宽为 3.2 GHz,在 8.6、10.0 和 11.7 GHz 出现了三个吸收峰,峰值分别为 -11.8、-11.7 和 -11.6 dB。与图 3 中三种材料在 19.1 mm 下的反射损失相比,通过单目标优化模型优化的三层吸波涂层的吸波性能显著提升。

将三种材料的厚度作为寻优变量进行优化的结果,设定寻优目标为反射率低于 -9 dB,优化结果

如图 6 所示。可以看出三种单一的材料无论再怎么优化都不能使其反射率在优化频率内低于 -9 dB。因此在某些对厚度没有要求,而对电磁指标要求苛刻的应用环境下,单层涂层不具备显著优势。而通过多层的厚度优化,可以使三种材料的等效阻抗更接近于空气中电磁阻抗,并且将每种材料的吸收峰耦合在一起,达到拓宽吸收频率的效果。值得注意的是,多层优化出来的效果并不一定有单层材料呈现的效果好。假设某一单层材料具有优异的电磁参数,使其能在较薄厚度下具有良好的电磁阻抗匹配性能,那么这种材料便会在薄的厚度下是实现优异的电磁性能。但是本文的模型针对的是现有的材料,因此优化具有普适性。

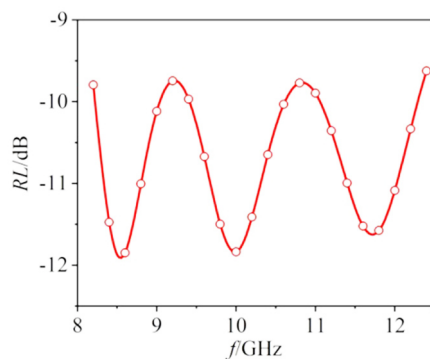


图 5 三层吸波涂层在单目标优化下的吸波性能

Fig. 5 Absorbing properties of three-layer absorbing materials under single objective optimization

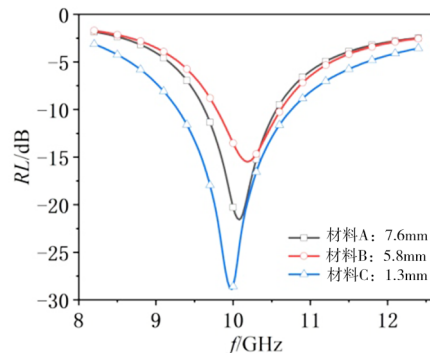


图 6 三种材料在单层下的最优吸波性能

Fig. 6 Optimal absorbing properties of three materials in single layer

2.3 多目标优化

在单目标优化中,吸波性能大幅提升,但也能明显看出,优化结果的总厚度偏大($d=19.1$ mm)。为了在保证吸波性能变化不大的同时,降低三层吸波材料的总厚度 d ,所以采用多目标优化,将反射损失和总厚度都设为优化目标,进行多层高温吸波涂层的多目标优化。

从表 3 的多目标优化结果中可以看出,三层吸波涂

层的第一层为材料B($d_1=3.8$ mm),第二层和第三层分别为材料C($d_2=7.2$ mm)、材料A($d_3=2.4$ mm),总厚度为 $d=13.4$ mm,相比于单目标优化,厚度下降了30%。

表3 多目标优化结果

顺序	材料	厚度/mm
第一层	材料B	3.8
第二层	材料C	7.2
第三层	材料A	2.4

图7是多目标优化的Pareto最优集。Pareto解往往也被称为非支配解(nondominated solutions),即同时优化多个目标时,由于这些目标之间存在着不可调和的冲突和无法比较的现象,当对任意目标函数进行优化时,必然会导致至少一个其他目标函数的解会被削弱,那么这些解的集合就是Pareto最优集,这些解被称为非支配解。从图7可以看出,它的前沿面曲线特征是凸函数,能够得到一组分布性不错的非支配解。

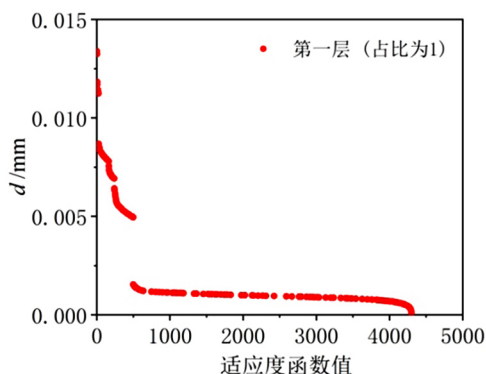


图7 Pareto解集

Fig. 7 Pareto solution set

从图8中可以看出,三层吸波材料在8.2~12.4 GHz的雷达频率范围内,反射损失全部低于-9 dB,并且低于-10 dB的频宽为2.5 GHz,在8.5 GHz和10.4 GHz出现了两个吸收峰,峰值分别为-11.7 dB和-13.0 dB,吸波性能良好。

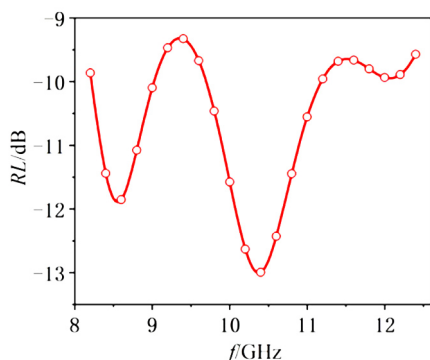


图8 三层吸波材料在多目标优化下的吸波性能

Fig. 8 Microwave absorbing properties of three-layer absorbing materials under multi-objective optimization

总体来看,虽然多目标优化时低于-10 dB的频宽比单目标优化减少了0.7 GHz,但厚度却降低了30%,而且反射损失在8.2~12.4 GHz的雷达频率范围内全部低于-9 dB,所以多目标优化相比于单目标优化,能够在保持良好的吸波性能的同时,在一定程度上降低了涂层的总厚度。

3 结论

(1)由于高温吸波涂层是非磁损耗吸波材料,由材料A、材料B和材料C组成的单层吸波涂层在不同厚度下的吸波性能普遍较差,很难达到理想的吸波性能。

(2)以反射率 $RL < -10$ dB的频率带宽为优化目标,对三层高温吸波涂层进行单目标优化,发现优化结果与相同厚度的单层涂层相比,吸波性能明显优异。

(3)以反射率 $RL < -10$ dB的频率带宽和涂层厚度 d 同时为优化目标,对涂层进行多目标优化,优化结果与单目标优化相比,吸波性能下降不明显,但涂层厚度下降30%,说明模型能够在优化吸波性能的同时,能够最大限度的降低厚度。

综上所述,通过差分进化算法建立了多层高温吸波涂层的多目标优化模型,可以通过对吸波材料的厚度和排列顺序进行合理设计,优化多层高温吸波涂层的总厚度和吸波性能,适用于多种材料,不仅局限于本文的三种材料,能有效解决多层高温吸波涂层的结构优化问题。

参考文献

- [1] 刘丹莉,刘平安,杨青松,等. 吸波材料的研究现状及发展趋势[J]. 材料导报,2013,27(17):74-78.
- LIU Danli, LIU Pingan, YANG Qingsong, et al. Research status and prospect of wave absorbing materials [J]. Materials Reports, 2013, 27(17): 74-78.
- [2] 肖卫要,徐晋勇,高成,等. 吸波涂层材料的研究进展[J]. 中国胶粘剂,2019,28(5):53-56,61.
- XIAO Weiyao, XU Jinyong, GAO Cheng, et al. Research progress in electromagnetic absorbing coating materials [J]. China Adhesives, 2019, 28(5): 53-56, 61.
- [3] 徐剑盛,周万城,罗发,等. 雷达波隐身技术及雷达吸波材料研究进展[J]. 材料导报,2014,28(9):46-49.
- XU Jiansheng, ZHOU Wancheng, LUO Fa, et al. Research progress on radar stealth technique and radar absorbing materials [J]. Materials Reports, 2014, 28(9): 46-49.
- [4] 梁彩云,王志江. 耐高温吸波材料的研究进展[J]. 航空材料学报,2018,38(3):1-9.
- LIANG Caiyun, WANG Zhijiang. Research progress of high temperature microwave absorption materials [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2018, 38(3): 1-9.
- [5] 周万城,王婕,罗发,等. 高温吸波材料研究面临的问题[J]. 宇航材料工艺, 2021年 第3期

题[J]. 中国材料进展, 2013, 32(8):463-472, 462.

ZHOU Wancheng, WANG Jie, LUO Fa, et al. Problems faced with high-temperature microwave absorbing materials [J]. Materials China, 2013, 32(8):463-472, 462.

[6] SHAO T Q, MA H, WANG J F, et al. Ultra-thin and high temperature NiCrAlY alloy metamaterial enhanced radar absorbing coating [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 832: 154945.

[7] SHAO T Q, MA H, WANG J F, 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.

[8] 张跃, 张明雪. 多目标规划方法在隐身涂层设计中的应用[J]. 宇航材料工艺, 2001, 31(6):63-66.

ZHANG Yue, ZHANG Mingxue. Application of multi-objective optimization approach in the design of radar absorbent coatings [J]. Aerospace Materials & Technology, 2001, 31(6): 63-66.

[9] 胡悦, 黄大庆, 史有强, 等. 耐高温陶瓷基结构吸波复合材料研究进展[J]. 航空材料学报, 2019, 39(5):1-12.

HU Yue, HUANG Daqing, SHI Youqiang, et al. Research progress of high temperature microwave-absorbing ceramic matrix composites [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2019, 39(5):1-12.

[10] 黄成亮, 李永波, 张伟, 等. 耐高温吸收剂研究进展和现状[J]. 材料导报, 2018, 32(S1):86-88.

HUANG Chengliang, LI Yongbo, ZHANG Wei, et al. Progress and situation of high temperature resistant absorbers [J]. Materials Reports, 2018, 32(S1):86-88.

[11] 桑建华. 飞行器隐身技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2013: 119-130.

SANG Jianhua. Stealth technology of aircraft [M]. Beijing:

Aviation Industry Press, 2013: 119-130.

[12] 罗志勇, 李月菊, 罗祺. 微波吸收材料的计算机辅助设计[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2000, 32(5):132-136.

LUO Zhiyong, LI Yueju, LUO Qi. Computer aided design (CAD) of microwave absorbing material [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2000, 32(5):132-136.

[13] 郑日升, 张春林. 粒子群优化算法对吸波结构材料优化研究[J]. 现代防御技术, 2019, 47(6):88-93.

ZHENG Risheng, ZHANG Chunlin. Optimized design of absorbing structural materials using a particle swarm optimization algorithm [J]. Modern Defence Technology, 2019, 47(6):88-93.

[14] 成雨果, 蒋礼, 黄小忠, 等. 多层吸波材料结构优化仿真研究[J]. 计算机仿真, 2018, 35(7):1-5.

CHENG Yuguo, JIANG Li, HUANG Xiaozhong, et al. Simulation of structure optimization of multi-layer microwave absorbers [J]. Computer Simulation, 2018, 35(7):1-5.

[15] RAINER S, KENNETH P. Differential Evolution: A simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces [J]. Global Optimization, 1997(11): 341-359.

[16] 毕晓君, 肖婧. 基于自适应差分进化的多目标进化算法[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(12):2660-2665.

BI Xiaojun, XIAO Jing. Multi-objective evolutionary algorithm based on self-adaptive differential evolution [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, 17(12): 2660-2665.

[17] KRAUS J D. Helical beam antennas for wide-band applications [J]. Proceedings of the IRE, 1948, 36(10): 1236-1242.

[18] MICHELSEN Y, SAGER J M, RANJITHAN S, et al. Design of lightweight, broad-band microwave absorbers using genetic algorithms [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1993, 41:1024-1031.