

基于RSM的炭黑陶粒优化与性能研究

李梦春, 卢厚清, 渠立永, 熊磊

陆军工程大学野战工程学院, 江苏 南京

收稿日期: 2025年9月16日; 录用日期: 2025年10月9日; 发布日期: 2025年10月20日

摘要

针对传统吸波材料在荒漠环境中成本高、适应性差的问题, 本研究以工业固废粉煤灰为基体、炭黑为吸波相, 采用Box-Behnken设计结合响应面法, 优化炭黑/陶粒复合材料的制备工艺。以炭黑含量、烧结温度和保温时间为变量, 反射损耗和抗压强度为响应值, 建立显著($p < 0.0001$)的二次回归模型。结果表明, 炭黑含量对微波吸收性能影响最大。优化工艺参数为: 炭黑18.5 wt%、烧结温度655℃、保温时间11.5 min。在该条件下, 陶粒反射损耗达-25.3 dB (@10.2 GHz), 抗压强度为3.0 MPa, 预测与实验值误差小于5%。该材料在X波段表现出强吸收、宽频带特性, 兼具良好力学性能, 适用于开发低成本雷达隐身材料。

关键词

响应面法, 微波吸收, 陶粒, 炭黑, 工艺优化, Box-Behnken设计

Optimization and Performance Study of Carbon Black/Ceramsite Composites for Microwave Absorption Using Response Surface Methodology

Mengchun Li, Houqing Lu, Liyong Qu, Lei Xiong

College of Field Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing Jiangsu

Received: September 16, 2025; accepted: October 9, 2025; published: October 20, 2025

Abstract

Aiming to address the issues of high cost and poor adaptability of traditional microwave-absorbing materials in desert environments, this study used fly ash (an industrial solid waste) as the matrix

文章引用: 李梦春, 卢厚清, 渠立永, 熊磊. 基于 RSM 的炭黑陶粒优化与性能研究[J]. 材料科学, 2025, 15(10): 1868-1876. DOI: 10.12677/ms.2025.1510199

and carbon black as the microwave-absorbing phase. The Box-Behnken design combined with Response Surface Methodology (RSM) was employed to optimize the preparation process of carbon black/ceramsite composites. Taking carbon black content, sintering temperature, and holding time as variables, and reflection loss (RL) and compressive strength (CS) as response values, a highly significant quadratic regression model ($p < 0.0001$) was established. The results indicated that carbon black content had the most significant effect on the microwave absorption performance of the composites. The optimized process parameters were determined as follows: carbon black content of 18.5 wt%, sintering temperature of 655°C, and holding time of 11.5 min. Under these conditions, the ceramsite achieved an RL of -25.3 dB at 10.2 GHz and a CS of 3.0 MPa, with the relative error between the predicted and experimental values being less than 5%. This composite exhibits excellent strong absorption capacity and wide bandwidth in the X-band, along with good mechanical properties, making it suitable for the development of low-cost radar stealth materials.

Keywords

Response Surface Methodology (RSM), Microwave Absorption, Ceramsite, Carbon Black, Process Optimization, Box-Behnken Design

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

合成孔径雷达(SAR)具有高分辨率与全天候侦察能力,对军事目标生存构成严重威胁,尤其在荒漠等光学伪装困难区域。研制具有低雷达散射截面(RCS)的伪装材料是提升战场生存能力的关键,推动了吸波材料的研究热潮。在军事荒漠战场伪装场景中,传统吸波材料(如铁氧体、纯碳材料)因密度大(铁氧体密度 $\geq 4.5 \text{ g/cm}^3$)、制备成本高(碳纳米管市场价超 10 万元/kg)、恶劣环境适应性差(高温易氧化、盐碱易腐蚀)等问题,难以满足规模化应用需求[1][2]。因此,开发“低成本、轻量化、宽频化、高适配”的吸波材料成为该领域的核心方向。

工业固废(如粉煤灰、煤矸石、赤泥、矿渣等)年产量巨大,其硅铝质、铁磁性成分可作为吸波材料基体或损耗相,兼具“以废治废”的环保效益与原料低成本优势,近年来成为吸波材料领域的研究重点。然而,现有固废基吸波材料仍存在显著性能瓶颈:侯如愿等[3]以粉煤灰、煤矸石为原料,通过碳热还原构建 $\text{SiC}/\text{Fe}_x\text{Si}_y/\text{C}/\text{Mullite}$ 复合体系,在 11.2 GHz 处实现 -22.5 dB 的反射损耗(RL),有效吸收带宽(EABW, $\text{RL} \leq -10 \text{ dB}$)达 3.2 GHz,但材料抗压强度仅 2.5 MPa,无法承受荒漠战场风沙冲击等承载需求;李鹏[4]聚焦煤矸石基材料,掺杂 Ni-Zn 铁氧体优化磁损耗,在 11.3 GHz 处 RL 峰值为 -18.7 dB, EABW 2.8 GHz,却因铁氧体颗粒团聚导致介电常数与磁导率匹配失衡,12 GHz 以上高频段 RL 回升至 -10 dB 以上,宽频吸收性能衰减明显。

在其他固废体系中,张艳等[1]以矿渣(30%)、石墨(5%)改性水泥基复合材料,利用矿渣的火山灰活性优化基体密实度,在 2.65 GHz (低频段)实现 -40.84 dB 的超低 RL,但受水泥基材料成型特性限制,匹配厚度高达 36 mm,且 X 波段(8~12 GHz) EABW 仅 1.44 GHz,无法满足雷达隐身“薄型化”需求;方舒雅等[5]以赤泥为原料,通过 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{MnO}_2$ 改性制备铁氧体相,在 12.5 GHz 处 RL 峰值达 -32.4 dB, EABW 4.8 GHz,却因赤泥强碱性($\text{pH} \approx 12.5$)导致成型过程中基体开裂,最终抗压强度仅 2.3 MPa;俞嘉睿等[6]以 FCC 催化剂为载体负载碳纳米管,在 8.5 GHz 处 RL 峰值 -32 dB, EABW 4.2 GHz,但需 1200°C 高温焙

烧, 能耗较高且未开展力学性能测试。此外, 王今华等[7]的尾矿基吸波陶粒($RL = -17.9 \text{ dB}@10.8 \text{ GHz}$, EABW 2.3 GHz)因尾矿成分波动大导致性能稳定性差, 潘虹等[8]的废铁屑- Fe_3O_4 复合体系($RL = -21.6 \text{ dB}@10.1 \text{ GHz}$)存在界面结合差、长期耐候性未验证等问题[7] [8]。

碳基吸波相(如炭黑、碳纤维)与固废复合可增强介电损耗, 但分散性与用量平衡仍是关键: 付健博等[9]在碳基吸波材料综述中指出, 粉煤灰-秸秆炭复合体系($RL = -23.4 \text{ dB}@9.4 \text{ GHz}$) EABW 仅 2.8 GHz, 宽频性能不足; 吴俊宇等[10]研究炭黑掺量对水泥砂浆的影响, 发现 5 wt%炭黑时材料在 10.5 GHz 处 $RL = -15.2 \text{ dB}$, 但匹配厚度达 25 mm, 且高频段 EABW 仅 1.8 GHz; 刘韩韩等[11]将炭黑与聚醚醚酮复合, 虽力学性能优异(抗压强度 85 MPa), 但聚醚醚酮原料成本高(约 200 元/kg), 难以规模化应用。朱炳辉等[12]在改性铁氧体研究中提及, 钢渣-铁氧体复合体系($RL = -30.1 \text{ dB}@8.7 \text{ GHz}$)密度达 2.8 g/cm^3 , 高于轻量化需求($<2.5 \text{ g/cm}^3$), 且未解决高频吸收衰减问题。

响应面法(RSM)作为高效的多因素优化工具, 可通过数学模型揭示工艺参数间的交互作用, 其中 Box-Behnken 设计(BBD)因无需设计因子极端水平、实验效率高的优势, 已被广泛应用于材料制备工艺优化[13] [14]。薛智奇等[14]基于 BBD 优化复合材料制备工艺, 证实该方法可精准调控材料热性能与力学性能; 孙鑫等[13]通过响应面法优化铁苋菜总鞣质提取工艺, 为多因素协同优化提供了方法参考[15]。

本研究以粉煤灰为基体(大宗火电固废, 成本约 50 元/吨)、炭黑为介电损耗相, 采用 Box-Behnken 响应面法设计实验, 系统探究炭黑含量(A)、烧结温度(B)、保温时间(C)对陶粒反射损耗(RL)与抗压强度(CS)的影响规律。通过建立二次回归模型, 明确各因素交互作用机制, 优化工艺参数, 旨在解决现有固废基吸波材料“吸波-力学性能失衡、宽频性差、厚度过大”等瓶颈, 为荒漠战场用低成本、薄型化吸波陶粒的规模化制备提供理论依据与实验支撑。

2. 实验部分

2.1. 原料与试剂

实验所用主要原料包括: 粉煤灰(镇江谏壁电厂, 符合 GB/T1596-2017 II 级标准, 化学成分见表 1), 粘土(南京江宁粘土矿, 塑性指数 22.5), N330 炭黑(卡博特公司, 统计厚度表面积 $STSA = 80 \text{ m}^2/\text{g}$, 邻苯二甲酸二丁酯吸收值 $DBP = 100 \text{ cm}^3/100\text{g}$)。化学试剂硅烷偶联剂 KH-550 (分析纯)从国药集团化学试剂有限公司采购。

Table 1. Main chemical composition of fly ash (wt%)

表 1. 粉煤灰的主要化学成分(wt%)

成分	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	烧失量
含量(wt%)	52.3	28.7	7.4	3.2	1.5	1.8	0.9	4.2

2.2. 样品制备

炭黑陶粒的制备工艺流程主要包括原料处理、混合、造粒与烧结:

(1) 原料预处理: 粉煤灰经 200 目筛网过滤。粘土经破碎、干燥后, 行星式球磨至粒度 $D_{90} \leq 20 \mu\text{m}$ 。炭黑用 10 wt% 的 KH-550 乙醇溶液(乙醇为体积分数 95%的分析纯乙醇, 含 5%去离子水, 保证 KH-550 充分水解)于 50°C 下超声处理 30 分钟进行表面改性, 以提高其分散性。

(2) 配料与混合: 按设计配比称取粉煤灰、粘土和改性炭黑。采用双轴强制式搅拌机干混 10 分钟, 然后按水料比 0.23:1 分三次加入去离子水, 湿混 15 分钟至混合均匀。

(3) 造粒与烧结: 混合料经离心式喷雾造粒塔(入口温度 250°C , 出口温度 100°C)制备出生料颗粒。

将生料颗粒置于箱式电阻炉中，根据 BBD 实验设计表(表 2)设定的温度和时间进行烧结。烧结后随炉冷却至室温，得到最终陶粒样品。

Table 2. Factors and levels of the Box-Behnken experimental design

表 2. Box-Behnken 实验设计因素与水平

因素	符号	水平		
		-1	0	+1
炭黑含量(wt%)	A	10	15	20
烧结温度(℃)	B	600	650	700
保温时间(min)	C	5	10	15

2.3. 实验设计

本研究采用 Design-Expert13.0 软件，基于 Box-Behnken 设计原理，设计了 3 因素 3 水平的实验方案。以炭黑含量(A)、烧结温度(B)、保温时间(C)为自变量，以微波反射损耗(RL)和抗压强度(CS)为响应值。因素与水平设计见表 2。

共计需进行 17 组实验，包括 5 个中心点(用于估计实验误差)。实验方案及结果见表 3。

2.4. 测试与表征

微波吸收性能测试：将陶粒样品与石蜡按 7:3 的质量比混合，压制成外径 7.0 mm、内径 3.0 mm 的同轴环状试样。采用矢量网络分析仪(VNA, AgilentAV3629)在 2~18 GHz 频率范围内测试样品的散射参数(S11 和 S21)，并通过传输线理论计算其反射损耗(RL)。

抗压强度测试：采用万能试验机(Instron3365)测试单粒陶粒的抗压强度，加载速率为 1 mm/min，结果取 20 粒有效测试的平均值。

3. 结果与讨论

3.1. 模型建立与方差分析

利用 Design-Expert 软件对表 3 中的实验数据进行多元回归拟合，得到了以反射损耗(RL)和抗压强度(CS)为响应值的二次多项式模型方程：

$$RL = 12.67 - 1.08A - 0.052B - 0.1175C + 0.0175AB + 0.015AC + 0.0025BC + 0.0425A^2 + 0.0001B^2 + 0.0044C^2 \quad (1)$$

$$CS = -10.86 + 0.4625A + 0.0374B + 0.0775C - 0.0025AB - 0.00125AC - 0.00025BC - 0.01525A^2 - 0.000028B^2 - 0.00285C^2 \quad (2)$$

Table 3. Box-Behnken experimental design matrix and results

表 3. Box-Behnken 实验设计方案与结果

Run	A: 炭黑含量(wt%)	B: 温度(℃)	C: 时间(min)	响应 1: RL (dB)	响应 2: 强度(MPa)
1	-1 (10)	-1 (600)	0 (10)	-12.5	3.2
2	1 (20)	-1 (600)	0 (10)	-14.2	2.8
3	-1 (10)	1 (700)	0 (10)	-11.8	2.9
4	1 (20)	1 (700)	0 (10)	-13.5	2.5
5	-1 (10)	0 (650)	-1 (5)	-12.0	3.0

续表

6	1 (20)	0 (650)	-1 (5)	-14.0	2.7
7	-1 (10)	0 (650)	1 (15)	-11.5	3.1
8	1 (20)	0 (650)	1 (15)	-13.8	2.6
9	0 (15)	-1 (600)	-1 (5)	-18.5	3.1
10	0 (15)	1 (700)	-1 (5)	-17.0	2.8
11	0 (15)	-1 (600)	1 (15)	-17.8	3.0
12	0 (15)	1 (700)	1 (15)	-16.5	2.7
13	0 (15)	0 (650)	0 (10)	-25.6	3.0
14	0 (15)	0 (650)	0 (10)	-25.0	3.1
15	0 (15)	0 (650)	0 (10)	-25.8	2.9
16	0 (15)	0 (650)	0 (10)	-25.2	3.0
17	0 (15)	0 (650)	0 (10)	-25.5	3.0

对模型进行方差分析(ANOVA), 结果见表 4。对于 RL 模型, 其 F 值为 125.36 ($p < 0.0001$), 表明模型整体极其显著; 失拟项 F 值为 2.85 ($p = 0.1653 > 0.05$), 不显著, 说明模型拟合良好, 未控因素干扰小。模型的调整决定系数($\text{AdjR}^2 = 0.9843$)与预测决定系数($\text{PredR}^2 = 0.9423$)接近且均大于 0.9, 表明模型具有高度的准确性和预测能力。

对各模型项的显著性分析表明: 一次项 A (炭黑含量, $p = 0.0012 < 0.01$)和二次项 A2 ($p < 0.0001$)对反射损耗(RL)的影响极其显著; 二次项 C2 ($p = 0.0345 < 0.05$)的影响显著; 而一次项 B (烧结温度, $p = 0.8105$)、一次项 C (保温时间, $p = 0.5886$)、二次项 B2 ($p = 0.9525$)以及所有交互项(AB, AC, BC, $p > 0.05$)均未表现出显著性影响。

因此, 各因素对 RL 影响的大小顺序为: A (炭黑含量) > B (烧结温度) > C (保温时间)。可知, 炭黑含量是影响微波吸收性能的最关键主导因素。

3.2. 响应面分析与交互作用

响应面图可以直观地反映各因素对响应值的影响及其间的交互作用。图 1(a)显示了在保温时间(C)固定为 10 min 时, 炭黑含量(A)和烧结温度(B)对反射损耗(RL)的交互影响。响应面曲线陡峭, 表明炭黑含量的变化对 RL 影响显著, 这与方差分析结果一致。随着炭黑含量从 10%增加至 20%, RL 值显著降低(绝对值增大), 这是由于炭黑形成了更连续的导电网络, 增强了介电损耗能力。然而, 曲面在炭黑含量过高时略有回升, 可能与阻抗失配加剧有关。烧结温度的影响相对平缓, 但在高温段($>670^\circ\text{C}$) RL 性能有下降趋势, 可能与炭黑的部分氧化有关。

Table 4. Analysis of variance (ANOVA) results for the reflection loss (RL) model

表 4. 反射损耗(RL)模型的方差分析结果

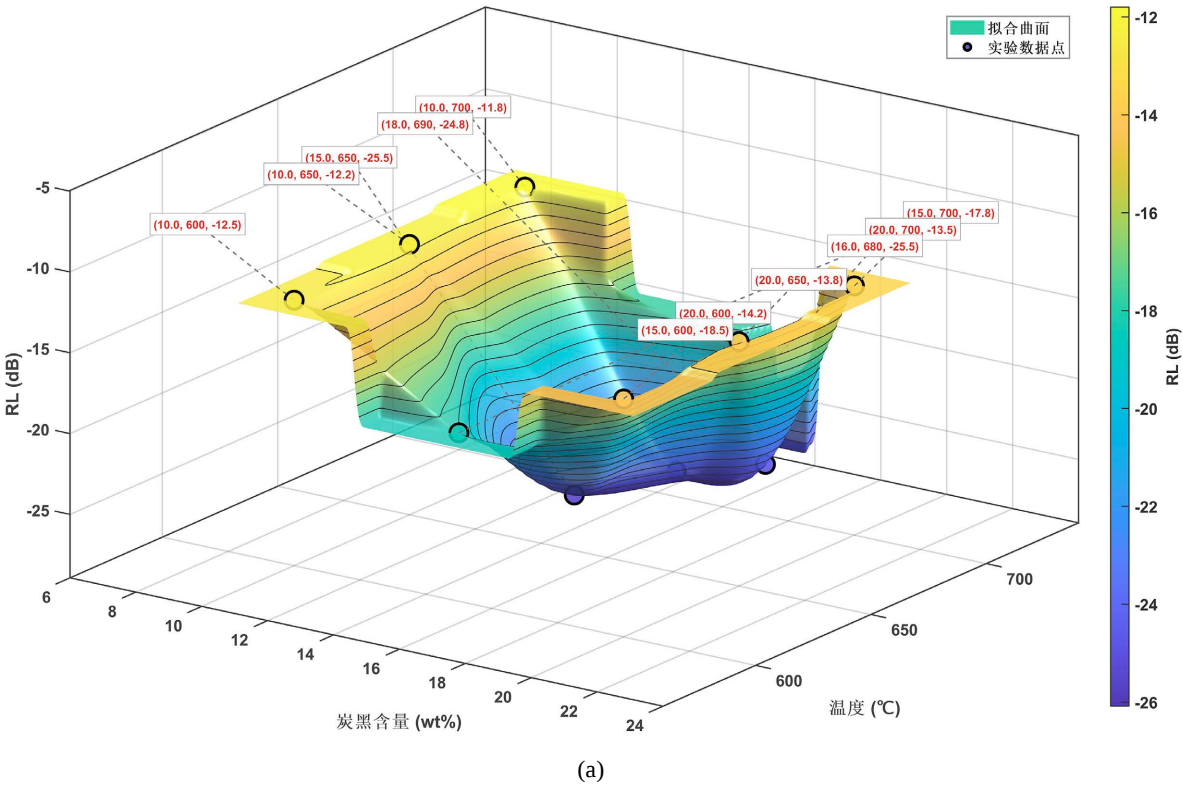
来源	平方和	自由度	均方	F 值	p 值	显著性
模型	384.65	9	42.74	125.36	<0.0001	显著
A-炭黑含量	9.30	1	9.30	27.28	0.0012	

续表

B-温度	0.021	1	0.021	0.062	0.8105	
C-时间	0.110	1	0.110	0.32	0.5886	
AB	1.23	1	1.23	3.60	0.0994	
AC	0.090	1	0.090	0.26	0.6232	
BC	0.0025	1	0.0025	0.0073	0.9345	
A ²	230.30	1	230.30	675.68	<0.0001	
B ²	0.0013	1	0.0013	0.0038	0.9525	
C ²	2.28	1	2.28	6.70	0.0345	
残差	2.39	7	0.341			
失拟项	1.79	3	0.597	3.27	0.1653	不显著
纯误差	0.60	4	0.150			
总和	387.04	16				

注：R² = 0.9938, AdjR² = 0.9843, PredR² = 0.9423。

方差分析及响应面结果表明，炭黑含量(A)是影响陶粒微波吸收性能的最关键因素(p<0.01)。这主要是因为炭黑作为导电损耗介质，其含量的增加有助于在绝缘的陶粒基体中形成更完善的导电网络[11]，从而增强对电磁波的欧姆损耗能力。然而，含量过高(如接近 20 wt%)时，反射损耗的改善趋势放缓(见图 1(a))，这可能源于材料表面阻抗与自由空间阻抗的失配加剧，导致更多电磁波在表面被直接反射而无法进入材料内部。



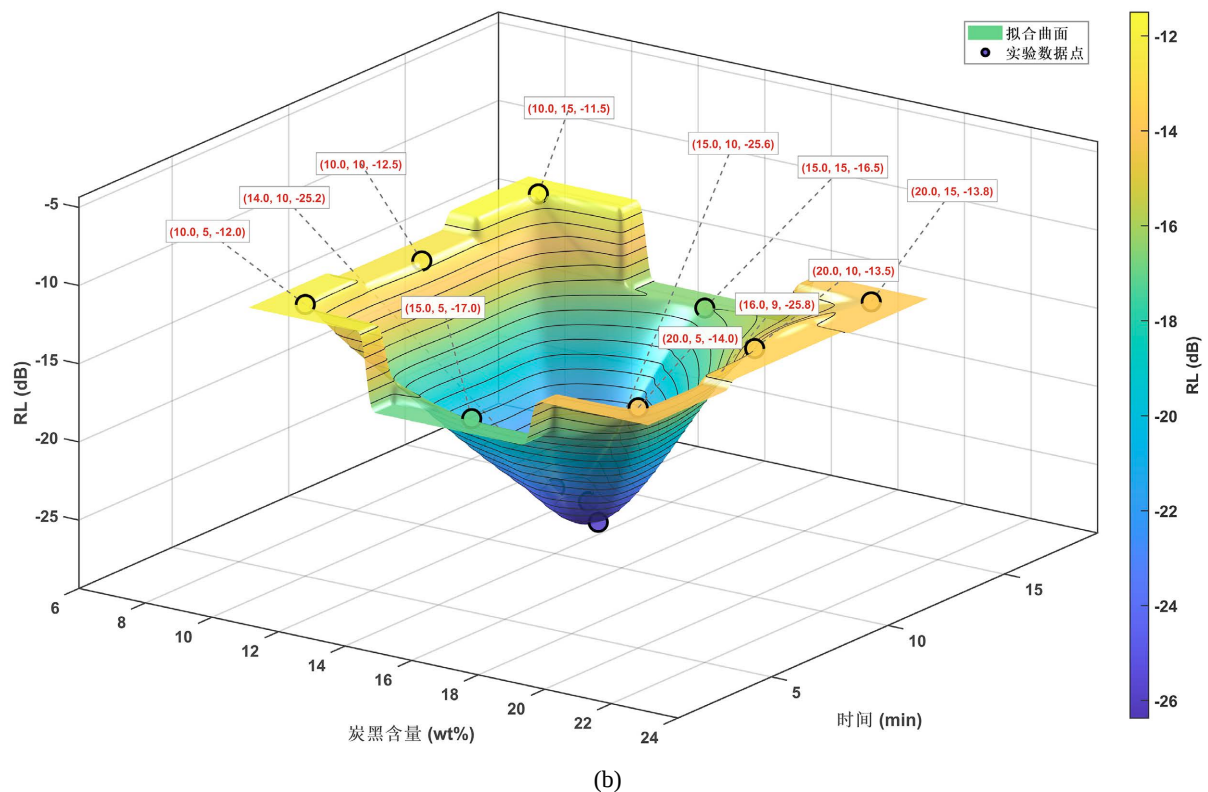


Figure 1. Response surface plots showing the effects of various factors on the reflection loss (RL): (a) Carbon black content and sintering temperature (with holding time fixed at 10 min); (b) carbon black content and holding time (with sintering temperature fixed at 650°C)

图 1. 各因素对反射损耗(RL)影响的响应面图: (a) 炭黑含量与烧结温度(固定时间 10 min); (b) 炭黑含量与保温时间(固定温度 650°C)

图 1(b)显示了在烧结温度(B)固定为 650°C 时, 炭黑含量(A)和保温时间(C)的交互作用。曲面沿炭黑含量方向变化明显, 而沿保温时间方向变化相对较小, 表明保温时间对 RL 的影响是三个因素中最弱的。较长的保温时间有助于晶体发育和结构致密化, 但过长保温时间可能导致炭黑在高温下进一步氧化, 从而削弱介电损耗能力, 导致吸波性能衰减。

3.3. 参数优化与验证实验

本研究的目标是获得最小反射损耗(RL minimize)和最大抗压强度(CS maximize)。利用 Design-Expert 软件的数值优化功能, 设定优化目标后, 软件给出了多个优化方案。综合考量微波性能与力学性能, 选择最优方案为: 炭黑含量 18.5 wt%, 烧结温度 655°C , 保温时间 11.5 min。在此条件下, 模型的预测值为: $RL = -26.1 \text{ dB}$, $CS = 2.9 \text{ MPa}$ 。

为验证模型的可靠性, 按此最优工艺参数进行了 3 组验证实验。测得的平均反射损耗为 -25.3 dB (@10.2GHz), 平均抗压强度为 3.0 MPa 。预测值与实验值相对误差小(RL 误差 3.1%, CS 误差 3.3%), 证实了所建立的响应面模型能够准确预测炭黑陶粒的制备工艺与性能之间的关系, 优化结果是可靠有效的。

3.4. 与现有固废基吸波材料的性能对比

为客观评估本研究陶粒的综合性能, 基于现有固废基吸波材料研究, 将关键性能指标整理为表 5。对比分析可知: (1) 吸波性能方面, 本研究 EABW (3.5 GHz) 覆盖 X 波段核心区域, 优于煤矸石基 (2.8 GHz)、

尾矿基(2.3 GHz)材料[4] [7], 虽 RL_{min} 低于赤泥基材料, 但避免其高频吸收衰减问题; (2) 力学性能方面, 3.0 MPa 的抗压强度高于粉煤灰-煤矸石基(2.5 MPa)、赤泥基(2.3 MPa)材料[3] [5], 可适配野外承载需求; (3) 成本工艺方面, 无高成本组分(如碳纳米管[6]、改性铁氧体[12]), 烧结温度(655℃)低于废 FCC 催化剂基材料(1200℃) [6], 符合规模化生产需求。

Table 5. Performance comparison between this work and existing solid waste-based microwave absorbing materials
表 5. 本研究与现有固废基吸波材料的性能对比

研究体系	RL_{min} (dB) @频率 (GHz)	EABW (GHz)	匹配厚度 (mm)	密度 (g/cm ³)	抗压强度 (MPa)	原料成本等级
本研究(粉煤灰 + 炭黑)	-25.3@10.2	3.5	2.2	2.5 ± 0.1	3.0	低
粉煤灰 + 煤矸石 + SiC	-22.5@11.2	3.2	2.8	2.7 ± 0.1	2.5	低
矿渣 + 石墨 + 水泥	-40.84@2.65	1.44	36.0	2.4 ± 0.1	35.3	中
赤泥 + Fe ₂ O ₃ + MnO ₂	-32.4@12.5	4.8	2.2	2.6 ± 0.1	2.3	低

注：表中数据均来自参考文件，成本等级基于原料类型判定。

4. 结论

(1) 采用响应面法中的 Box-Behnken 设计成功优化了炭黑/粉煤灰基陶粒复合材料的制备工艺。所建立的二次多项式模型显著($p < 0.0001$), 失拟项不显著($p > 0.05$), 调整决定系数 $AdjR^2 = 0.9843$, 表明模型拟合良好, 预测精度高。

(2) 各工艺参数对陶粒反射损耗影响的主次顺序为：炭黑含量 >> 烧结温度 > 保温时间。

(3) 通过模型优化得到最优工艺参数为：炭黑含量 18.5 wt%, 烧结温度 655℃, 保温时间 11.5 min。验证实验结果表明, 在此条件下制备的陶粒性能优异：在 10.2 GHz 处反射损耗达-25.3 dB, 抗压强度为 3.0 MPa, 与预测值吻合良好。

(4) 本研究证实了响应面法在优化吸波材料制备工艺中的有效性和可靠性, 为开发高性能、低成本的荒漠战场用雷达隐身材料提供了重要的实验数据和理论依据。

5. 研究不足及展望

5.1. 研究不足

本研究通过响应面法成功优化了炭黑陶粒的制备工艺, 并建立了可靠的预测模型。但从研究的完整性与深度来看, 仍有不少改进之处：受限于现有实验设备条件, 本次研究未对优化工艺制备的陶粒样品开展系统的微观结构表征工作, 仅通过宏观性能数据反推材料的吸波机制, 未能直观呈现炭黑在陶粒基体中的分散状态(如是否存在团聚、导电网络构建是否均匀)、陶粒内部孔隙的形貌与分布特征(如孔径大小、孔隙率)等关键微观信息, 而这些微观结构参数恰恰是影响材料介电特性与电磁波损耗能力的核心因素, 导致当前对“工艺-微观结构-吸波性能”构效关系的阐释缺乏直接的实验支撑。

5.2. 未来展望

基于现有研究基础, 后续可从三个方面深化拓展：一是, 引入扫描电子显微镜(SEM)观察陶粒断面的微观形貌, 结合能谱分析(EDS)表征炭黑的元素分布, 明确炭黑分散性与工艺参数的关联; 利用透射电子显微镜(TEM)解析炭黑与陶粒基体的界面结合状态, 揭示界面极化损耗的形成机制。二是, 通过氮气吸附-脱附实验测试陶粒的孔隙结构参数(比表面积、孔径分布), 结合介电常数测试数据, 量化分析孔隙结构

对材料阻抗匹配特性的影响规律,为通过调控孔隙优化吸波性能提供依据。三是,可尝试引入其他功能填料(如磁性颗粒、碳纳米管等)与炭黑复配,利用介电损耗与磁损耗的协同效应进一步提升材料的宽频吸波性能,同时探索材料在不同恶劣环境(如高温、高湿、盐雾)下的性能稳定性,为其在荒漠等复杂战场环境中的实际应用奠定基础。

基金项目

军事类研究生资助课题(课题编号: JY2023B058)。

参考文献

- [1] 张艳, 谢建斌, 王大富, 等. 不同掺合料对水泥基复合材料吸波性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2025, 44(1): 49-58, 100.
- [2] 吴金津, 戴忠晨, 方振卫, 等. 电磁波吸收超材料的研究进展[J]. 包装工程, 2024, 45(23): 72-90.
- [3] 侯如愿. 基于粉煤灰、煤矸石构建 SiC/Fe₃Si₂/C/Mullite 复合吸波材料[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原科技大学, 2024.
- [4] 李鹏. 煤矸石基电磁吸收复合材料制备与性能研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2024.
- [5] 方舒雅, 刘兵兵, 杨佩东, 等. 赤泥材料化利用技术及发展趋势[J]. 矿产综合利用, 2025, 45(5): 133-140.
- [6] 俞嘉睿, 黄海霞, 滕礼扬, 等. 基于废 FCC 催化剂的陶瓷/碳复合材料的制备及其吸波性能[J]. 高校化学工程学报, 2025, 39(2): 352-364.
- [7] 王今华, 李哲, 张宇. 尾矿陶粒制备技术要点分析及应用研究进展[J]. 非金属矿, 2025, 48(2): 45-49.
- [8] 潘虹, 胡磊, 徐丽慧, 等. 绿色低温法制备 Fe₃O₄ 及其复合材料吸波性能[J]. 材料工程, 2025, 53(4): 150-162.
- [9] 付健博, 张超, 李萌. 碳基吸波隐身材料的研究新进展[J]. 材料导报, 2025, 39(S2): 78-85.
- [10] 吴俊宇, 张莉, 王强. 炭黑掺量及分散性对水泥砂浆力学和电磁性能影响[J]. 建筑材料学报, 2025, 18(3): 89-95.
- [11] 刘韩韩, 宋文哲, 宋亚星, 等. 炭黑含量对增材制造聚醚醚酮及碳纤维增强聚醚醚酮复合材料吸波性能和力学性能的影响[J]. 材料导报, 2025, 39(S1): 674-679.
- [12] 朱炳辉, 刘阳, 张磊. 改性铁氧体复合吸波材料研究进展[J]. 功能材料, 2025, 56(3): 3089-3096.
- [13] 孙鑫, 张悦, 李娜, 等. 响应面法优化铁苋菜总鞣质提取工艺及其抗氧化活性[J]. 食品工业科技, 2024, 45(18): 156-163, 171.
- [14] 薛智奇, 王汉青, 赵金萍, 等. 基于 Box-Behnken 响应面法优化复合材料制备与热性能研究[J]. 功能材料, 2025, 56(8): 8013-8020.
- [15] 孙鑫, 李娜, 张悦, 等. 响应面法优化植物活性成分提取工艺的研究进展[J]. 农产品加工, 2024(15): 68-72, 77.