

DOI: 10.3969/j.issn.1671-024x.2025.05.005

铝粉涂覆型电磁波响应/红外隐身双功能织物的制备及性能

马晓光, 元森阳

(天津工业大学 纺织科学与工程学院, 天津 300387)

摘要: 为制备电磁屏蔽/红外隐身双功能织物, 采用铝粉作为填料, 结合聚丙烯酸树脂制备复合涂料, 通过涂层法使其均匀附着在棉织物上, 制备具有较高电磁屏蔽性能和较低红外发射率的双功能涂覆织物, 测试分析织物性能, 并与其他金属涂覆织物进行比较。结果表明: 相比于铜粉、青铜粉和镍粉, 采用铝粉制备的涂覆织物有着更好的电磁屏蔽性能和红外隐身性能; 随着铝粉含量、铝粉涂覆层厚度的增加, 铝粉涂覆织物的电磁辐射强度先逐渐降低, 然后趋于稳定; 最佳制备条件为铝粉粒径 200 目、质量分数 20%、涂覆厚度 0.2 mm, 与未涂覆铝粉织物相比, 此时铝粉涂覆织物的电磁辐射强度降低了 24%, 红外发射率下降了 22%、在 780~2 500 nm 范围内的近红外反射率提高了 21%, 具有红外线隐身及电磁波屏蔽双功能。

关键词: 铝粉涂覆; 双功能织物; 电磁波响应; 红外隐身

中图分类号: TS106.85

文献标志码: A

文章编号: 1671-024X(2025)05-0030-06

Preparation and properties of aluminum powder-coated fabrics with dual functions of electromagnetic wave response and infrared stealth

MA Xiaoguang, YUAN Senyang

(School of Textile Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

Abstract: To prepare the dual-functional fabrics with electromagnetic shielding and infrared stealth, aluminum powder was used as a filler, and a composite coating was prepared by combining polyacrylic acid resin. The composite coating was uniformly applied to cotton fabric via a coating method, resulting in a dual-functional coated fabric with high electromagnetic shielding performance and low infrared emissivity. The performances of the fabric were tested and compared with other metal-coated fabrics. The results show that compared with fabrics coated with copper powder, bronze powder, and nickel powder, the fabric coated with aluminum powder exhibits superior electromagnetic shielding performance and infrared stealth performance. With the increase in aluminum powder content and the thickness of the aluminum powder coating, the electromagnetic radiation intensity of the aluminum powder-coated fabric first decreases gradually and then tends to stabilize. The optimal preparation conditions are as follows: aluminum powder with a particle size of 200 mesh and a mass fraction of 20%, and a coating thickness of 0.2 mm. Compared with the uncoated fabrics, the aluminum powder-coated fabric prepared under these conditions exhibits a 24% reduction in electromagnetic radiation intensity, a 22% decrease in infrared emissivity, and a 21% increase in near-infrared reflectance within the wavelength range of 780–2 500 nm. Thus, it possesses the dual functions of infrared stealth and electromagnetic wave shielding.

Key words: aluminum powder-coated; dual functional fabric; electromagnetic wave response; infrared stealth

随着科技水平的不断提高, 通信和电子工业取得了飞速发展, 电磁波及相关无形辐射的危害受到了广

泛关注^[1-4], 研究人员在开发新型高效的电磁防护材料方面付出了大量努力。金属材料由于具有较高的导电

收稿日期: 2024-03-02

基金项目: 中央军事委员会装备发展部项目(202GJBZF0140)

通信作者: 马晓光(1963—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为功能材料及智能纺织品等。E-mail: xgma@tiangong.edu.cn

性而一直被视为电磁波吸收的重要材料,其耗散电磁辐射的优异性能在电磁波吸收材料中发挥着重要作用^[5-7]。其中,钢^[8]、铜^[9-10]和铝^[11-12]等金属因为具有优异的导电性,很早就被作为电磁防护材料使用。根据电磁屏蔽原理^[13-15],材料的导电率越高,其电磁吸收和反射损耗就越大,因此金属及其合金材料具有良好的电磁屏蔽性能,在电磁防护领域得到了广泛应用。

有研究表明,以镍粉、石墨粉填充丁腈橡胶,制备镍粉/石墨粉/NBR 复合电磁屏蔽材料,当镍粉/石墨粉比例为 1:4 时,复合材料在 10.5 GHz 时屏蔽效能达 18.7 dB^[16];以聚氨酯(PU)掺杂铜粉制备成吸波涂层织物,当铜粉质量分数达到 11%时,其电磁屏蔽效能达到 25.92 dB^[17]。铝具有优异的降低红外发射率的能力、良好电磁屏蔽性能^[18-20]、良好黏附性且成本低廉,可应用于隐形产品制造领域。对片状铝粉进行改性,可制备 Al/Cr₂O₃ 颜料粉体,其涂层在 8~14 μm 波段的红外发射率最低为 0.43^[21];以聚氨酯为树脂,铝粉粒径为 325 目时,在 8~14 μm 波段下涂层的红外发射率达到最低^[22];以硅橡胶混炼胶母胶为基体,镀银铝粉为导电填料,乙烯基偶联剂为处理剂,制备出的导电硅橡胶复合材料具有高导电、高电磁屏蔽性能^[23]。然而,到目前为止,关于具有电磁屏蔽和红外隐身能力的双功能材料的研究报道还很少。

本文通过对不同种类金属粉末进行电磁辐射强度和红外发射率测试,筛选出具有良好电磁波响应性能的铝粉作为填料,通过涂覆技术将其应用于织物上,对铝粉涂覆型织物的电磁辐射强度及红外发射率进行了深入研究,以期研发具有电磁屏蔽及红外隐身双功能的织物奠定基础。

1 实验部分

1.1 原料和设备

原料:经过水洗、烘干的纯棉织物,克重 115 g/m²,吴江市隆达纺织品有限公司;100 目、200 目、325 目铝粉,河北冀盛有限公司;聚丙烯酸酯,威尔精细化工有限公司;铜粉、青铜粉,河南可迪菲材料科技有限公司;镍粉,中迈金属材料有限公司。

设备:MATHISLTZ-8 型涂层机,瑞士 Werner Mathis 公司;Phenom XL 型台式扫描电子显微镜,上海复纳科学仪器有限公司;LZT-1000 型电磁辐射测试仪,北京龙震天电子仪器有限公司;D8 ADVANCE 型 X 射线衍射仪,德国 Bruker 公司;IR-2 型双波段发射

率测试仪,上海诚波光电子技术科技有限公司;Lambda 750 型紫外-可见-近红外分光光度计,美国 Perkin-Elmer 公司。

1.2 涂料的制备

将铝粉、铜粉、青铜粉和镍粉分别按照质量分数为 10%的比例加入到聚丙烯酸树脂中混合,之后将混合好的样品置于高速搅拌机中以 1 200 r/min 的速率搅拌 10 min,再加入适量蒸馏水调节其黏度,以 1 000 r/min 的速率搅拌 10 min 后即制得电磁屏蔽涂料。为考察铝粉粒径和用量对涂料性能的影响,取 100 目、200 目、325 目 3 种不同目数的铝粉,各称取不同质量分数(5%、10%、15%、20%、25%)的铝粉,分别将其加入 40 g 聚丙烯酸树脂中混合,在同等条件下制备电磁屏蔽涂料。

1.3 涂覆织物的制备

采用涂层法,将制备好的电磁屏蔽涂料通过 MATHISLTZ-8 型涂层机均匀涂覆在织物表面,在 70 °C 条件下干燥 10 min,得到具有电磁波屏蔽和红外隐身双功能的涂覆织物。

1.4 测试与表征

(1) 外观形貌:利用 Phenom XL 台式扫描电子显微镜观察涂覆织物的外观形貌。

(2) 电磁辐射强度:先用涂覆织物将辐射源进行包覆密封,然后在不同测试距离下采用 LZT-1000 型电磁辐射测试仪对密封体涂覆织物表面的电磁辐射强度进行测试。电磁辐射强度越低,说明涂覆织物的电磁屏蔽效果越好。

(3) XRD:利用 D8 ADVANCE 型 X 射线衍射仪表征样品的晶型特征,扫描范围 35°~75°,扫描速率 0.024 °/s。

(4) 红外发射率:采用 IR-2 双波段发射率测试仪测试涂覆织物的红外发射率,测试 10 次并取其平均值。

(5) 红外反射率:采用 Lambda 750 紫外-可见-近红外分光光度计测试涂覆织物的红外反射率,测试波长区间为 250~2 500 nm,步长为 4 nm。

2 结果与讨论

2.1 金属种类对织物电磁屏蔽性能和红外隐身性能的影响

分别用纯棉织物和没有添加任何铝粉的聚丙烯酸树脂涂覆织物对电磁辐射仪的辐射源进行包覆密封后,织物表面的电磁辐射强度如图 1 所示。

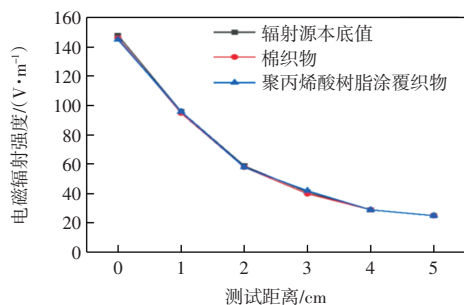


图 1 纯棉织物及聚丙烯酸酯涂覆织物的电磁辐射强度

Fig.1 Electromagnetic radiation intensity of pure cotton fabric and polyacrylate coated fabrics

由图 1 可知,辐射源本底值为 148 V/m,远远超过国家环境电磁辐射限值,但当测试距离大于 5 cm 后,其强度值大幅降低至 25 V/m;分别用纯棉织物和没有添加任何铝粉的聚丙烯酸树脂涂覆织物对辐射源进行包覆密封后,其电磁辐射强度变化趋势与辐射源的本底值相比基本没有变化,表明纯棉织物和聚丙烯酸树脂不具有电磁屏蔽性能。

分别采用不同种类的金属涂覆织物包覆密封辐射源,织物表面的电磁辐射强度如图 2 所示。

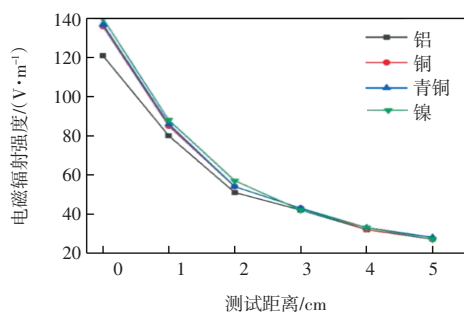


图 2 不同种类金属涂覆织物的电磁辐射强度

Fig.2 Electromagnetic radiation intensity of different kinds of metal-coated fabrics

由图 2 可见,随着测试距离的增加,不同种类金属涂覆织物包覆下辐射源的电磁辐射强度不断降低;不同种类金属涂覆织物的电磁屏蔽性能有所差异,相比较而言,铝粉涂覆织物的电磁屏蔽效果最好,能明显降低辐射源的电磁辐射强度。这是由于铝粉本身具有良好的导电性,涂覆后在织物表面形成了一层致密的铝膜,能够明显将织物内外的电磁场进行隔绝,因此,相对于其他金属粉有着更好的屏蔽性能。

不同种类金属涂覆织物的红外发射率如表 1 所示。

表 1 不同种类金属涂覆织物红外发射率

Tab.1 Infrared emissivity of different kinds of metal-coated fabrics

铝粉	铜粉	青铜粉	镍粉
0.854 4	0.965 2	0.964 7	0.953 2

由表 1 可知,不同种类金属涂覆织物的红外发射率有所差异。铜粉和青铜粉对于涂覆织物的红外发射率降低效果不明显;镍粉涂覆织物的红外发射率略有降低但区别不大;铝粉对涂覆织物的红外发射率影响较大,能明显降低涂覆织物的红外发射率。这是由于铝粉本身具有良好的金属光泽,可对大部分红外光实现有效反射,因此,铝粉涂覆织物具有较低的红外发射率,相对于其他 3 种金属粉末涂覆织物有着更好的红外隐身性能。

2.2 铝粉含量及粒径对织物电磁屏蔽性能的影响

对不同铝粉含量的涂覆织物进行电磁辐射强度测试,结果如图 3 所示。

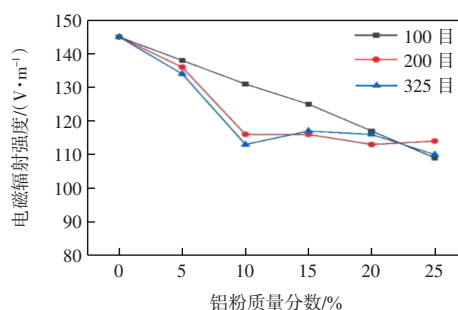


图 3 不同质量分数铝粉涂覆织物的电磁辐射强度

Fig.3 Electromagnetic radiation intensity of coated fabrics with different aluminum powder content

由图 3 可以看出,当开始向材料中添加铝粉时,涂覆织物的电磁辐射强度不断下降,而当添加的铝粉含量达到一定值时,涂覆织物电磁辐射强度的下降幅度逐渐趋于平缓。根据电磁辐射屏蔽理论^[24-26],这是由于掺杂型电磁屏蔽涂料的导电率并不是随着掺杂浓度的提升而无限提高的,随着其中导电填料的不断增加,涂料的导电率会趋向一个临界值,称为“渗滤阈值”。随着涂料中铝粉含量的不断增加,铝粉涂覆织物的导电率逐渐趋近于“渗滤阈值”,不会再出现明显的变化。相比于 100 目的铝粉来说,200 目和 325 目的铝粉粒径更小,在织物上分布的更加均匀,同时更容易趋近于“渗滤阈值”,此时进一步向涂料中添加铝粉,涂料本身的导电率也不会有明显的提升。另一方面,当金属填料过多时,其在涂料中容易出现团聚现象,导致分散不均匀和涂覆表面不完整,反而会影响涂覆织物的屏蔽性能。

2.3 铝粉涂覆层厚度对涂覆织物电磁屏蔽性能的影响

不同铝粉涂覆层厚度的涂覆织物的电磁辐射强度如图 4 所示。

由图 4 可知,涂覆织物的电磁辐射强度随着涂覆层厚度的增加呈下降趋势,之后逐渐放缓,涂覆层越

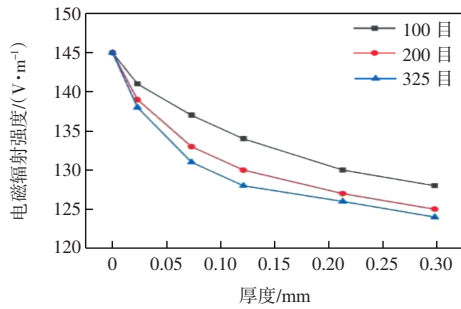


图 4 不同铝粉厚度下的涂覆织物的电磁辐射强度

Fig.4 Electromagnetic radiation intensity of coated fabrics with different aluminum powder thicknesses

厚涂覆织物的屏蔽性能越好。随着涂覆层厚度的增加,在烘干过程中铝粉会出现一定程度的沉降,影响涂覆层表面的均匀性,同时考虑到涂覆层厚度过厚更加容易脱落,所以涂覆层厚度取 0.30 mm 以下为宜,这样能够使涂覆织物的屏蔽性能更好。

2.4 铝粉涂覆工艺优化

通过上述实验可知,铝粉粒径、铝粉含量、涂覆层厚度等 3 个因素对涂覆织物的电磁波响应性能有着重要影响。为了筛选出制备铝粉涂覆型电磁波响应织物的最佳工艺,采用 $L_9(3^4)$ 正交表设计了正交实验,试验结果如表 2 和图 5 所示。

表 2 正交实验测试结果及分析

Tab.2 Test results and analysis of orthogonal experiment

试验编号	铝粉粒径(A)/目	铝粉质量分数(B)/%	涂覆层厚度(C)/mm	电磁辐射强度/(V·m ⁻¹)
1	100	10	0.1	131
2	100	15	0.2	125
3	100	20	0.3	112
4	200	10	0.2	116
5	200	15	0.3	122
6	200	20	0.1	122
7	325	10	0.3	129
8	325	15	0.1	124
9	325	20	0.2	116
K_{j1}	368	376	377	
K_{j2}	360	371	357	
K_{j3}	369	350	363	
\bar{K}_{j1}	122.67	125.33	125.67	
\bar{K}_{j2}	120	123.67	119	
\bar{K}_{j3}	123	116.67	121	
极差	3	8.66	6.67	

由表 2 中极差值的大小可以看出,各因素对涂覆织物电磁辐射强度的影响大小顺序为 $B > C > A$,即铝粉含量具有较大的影响。由图 5 可以看出,制备铝粉涂覆型电磁波响应织物的最佳工艺条件为 $A_2B_3C_2$,即铝粉粒径为 200 目,铝粉质量分数为 20%,涂覆层厚度为 0.2 mm。

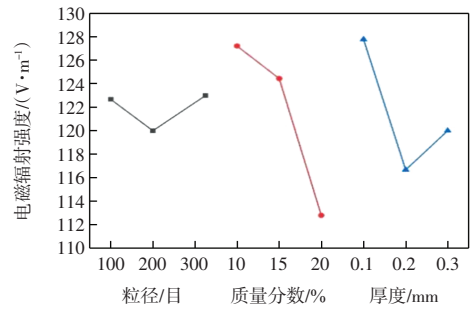
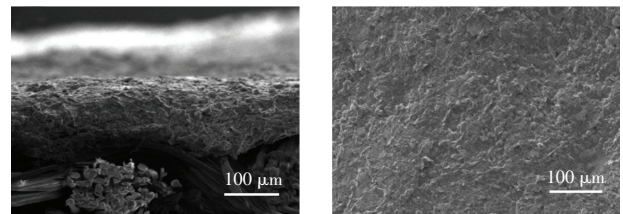


图 5 正交实验直观图

Fig.5 Direct view of orthogonal experiment

采用该工艺条件制备铝粉涂覆织物,对其进行形貌及 XRD 表征,并对电磁辐射率、红外发射率和红外反射率等性能指标进行测试分析,结果如图 6—图 9 及表 3 所示。



(a) 横截面 (b) 表面

图 6 最优工艺涂覆织物电镜图

Fig.6 Scanning electron microscope images of optimal coated fabric

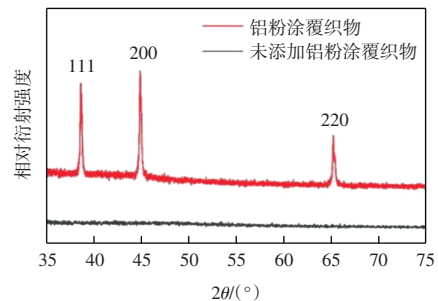


图 7 铝粉涂覆前后 XRD 谱图对比

Fig.7 Comparison of XRD spectra before and after adding aluminum powder

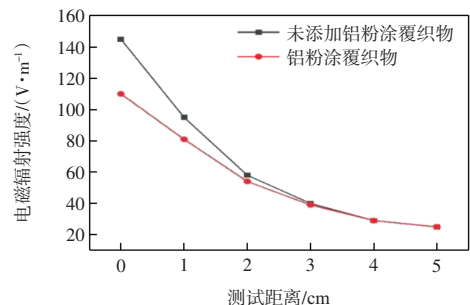


图 8 铝粉涂覆前后电磁辐射强度对比

Fig.8 Comparison of electromagnetic radiation intensity before and after adding aluminum powder

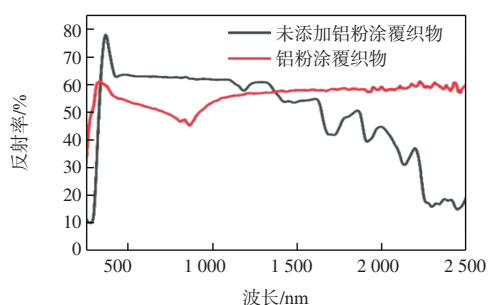


图9 铝粉涂覆前后红外反射率对比

Fig.9 Comparison of infrared reflectance before and after adding aluminum powder

表3 红外发射率对比

Tab.3 Comparison of infrared emissivity

棉织物	未添加铝粉涂覆织物	铝粉涂覆织物
0.965 0	0.954 3	0.746 0

由图6可以看出,铝粉均匀分布在织物的表面,形成一层致密的金属铝膜,且铝粉充分地填充到棉纤维缝隙之间,与棉织物结合度较好。由图7可知,在 2θ 值为 $35^\circ\sim 75^\circ$ 之间,涂覆织物有3个不同强度衍射峰,代表3个不同的晶面,分别是 38.63° 的(111)晶面、 44.87° 的(200)晶面、 65.24° 的(220)晶面,均属于铝的特征衍射峰,表明铝粉已经附着在棉织物上。由图8可知,经过正交工艺优化所得的涂覆织物相比于未添加铝粉的涂覆织物具有更好的电磁屏蔽性能,其电磁辐射强度最大降低了24%,达到110 V/m。

由表3可知,经过正交工艺优化所得的铝粉涂覆织物相比于未添加铝粉的涂覆织物红外发射率明显降低,具有更好的红外隐身性能,其红外发射率降低了22%,达到0.746 0。由图9可知,金属铝粉涂覆整理之后的织物反射率有所提高,这是因为金属铝粉作为一种单质粉末,本身呈银白色,而且具有很好的金属光泽,随着铝粉的加入会在织物表面形成比较完整的金属薄膜,因此加入铝粉的涂覆织物在780~2500 nm的近红外波段具有较高的红外反射率,相比于未添加铝粉的涂覆织物提高了21%,达到57%。织物表面的反射率提高使得织物所受红外辐射降低,同时降低了其表面温度,使其更不易被红外设备察觉,提高了其隐身性能。

3 结论

(1) 通过将不同种类的金属粉与聚丙烯酸树脂进行复合制备出一系列涂覆织物,结果表明,相比于铜粉、青铜粉和镍粉,采用铝粉制备的涂覆织物有着更

好的电磁屏蔽性能和红外性能。

(2) 随着铝粉含量、铝粉涂覆层厚度的增加,涂覆织物的电磁辐射强度逐渐降低,其中200目和325目铝粉的涂覆织物在铝粉质量分数达到10%以后电磁辐射强度逐渐趋于稳定,涂覆层厚度为0.3 mm时,电磁辐射强度逐渐趋于稳定。

(3) 铝粉涂覆电磁波响应织物的最佳制备条件为铝粉粒径200目、质量分数20%、涂覆厚度0.2 mm,与未涂覆铝粉织物相比,此时铝粉涂覆织物的电磁辐射强度降低了24%,达到110 V/m,红外发射率下降了22%,达到0.746,在780~2500 nm范围内的近红外反射率提高了21%,达到57%,具有红外线隐身及电磁波屏蔽双功能。

参考文献:

- [1] 胥文军,管登高,徐冠立,等.电磁屏蔽材料的研究进展与展望[J].安全与电磁兼容,2014(2):57-60.
XU W J, GUAN D G, XU G L, et al. Research progress and prospects of electromagnetic shielding materials[J]. Safety & EMC, 2014(2): 57-60(in Chinese).
- [2] PARASURAMAN S, XIN E, ZOU L. Health hazards with electromagnetic radiation[J]. International Journal of Pharmaceutical Investigation, 2018, 8(4): 157-163.
- [3] CHRISTINA JOSEPHINE MALATHI A. Electromagnetic radiation hazards on humans due to mobile phones[J]. Indian Journal of Science and Technology, 2016, 9(20): 1-7.
- [4] RIFAI A B, HAKAMI M A. Health hazards of electromagnetic radiation[J]. Journal of Biosciences and Medicines, 2014, 2(8): 1-12.
- [5] 黎嘉威,马泽南,贺爱娜,等.金属电磁屏蔽材料的研究进展[J].宁波大学学报(理工版),2022,35(4):93-108.
LI J W, MA Z N, HE A N, et al. Recent progress of metal electromagnetic shielding materials[J]. Journal of Ningbo University (Science and Technology), 2022, 35(4): 93-108(in Chinese).
- [6] FRAH M A, PAVLUSHKINA T, BABINOVA A, et al. Protection from electromagnetic pollution by using metal based shielding materials[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2056(1): 012058.
- [7] LUMNITZER E, JURGOVSKA E L, ANDREJIOVA M, et al. Application of metal shielding materials to protect buildings occupants from exposure to the electromagnetic fields[J]. Materials (Basel), 2023, 16(15): 5438.
- [8] FAGAN J, PEEK C. Stainless steel-filled thermoplastic composites for use in electromagnetic shields[J]. Auto Technology, 2007, 7(1): 40-43.
- [9] PAN Y F, HU S Q, ZHENG X, et al. Efficient electromagnetic interference shielding of three-dimensional hydrophobic Cu/

- wood/Cu porous composites[J]. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 2023, 43(4): 206–220.
- [10] CHANG J L, MENG C, SHI B W, et al. Flexible, breathable, and reinforced ultra-thin Cu/PLLA porous-fibrous membranes for thermal management and electromagnetic interference shielding[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2023, 161: 150–160.
- [11] DONG N, CHEN L Q, YIN X W, et al. Fabrication and electromagnetic interference shielding effectiveness of $Ti_3Si(Al)C_2$ modified Al_2O_3/SiC composites[J]. *Ceramics International*, 2016, 42(8): 9448–9454.
- [12] TAN Y Q, CHEN C, LUO H, et al. Large electromagnetic interference shielding effectiveness in $Ti_3(Al, Si)C_2$ system[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2019, 30(12): 11011–11016.
- [13] 孔静, 高鸿, 李岩, 等. 电磁屏蔽机理及轻质宽频吸波材料的研究进展[J]. *材料导报*, 2020, 34(9): 9055–9063.
KONG J, GAO H, LI Y, et al. Research progress of electromagnetic shielding mechanism and lightweight and broadband[J]. *Materials Reports*, 2020, 34(9): 9055–9063 (in Chinese).
- [14] 陆颖健, 严明, 高屹. 电磁屏蔽材料的屏蔽机理及现状分析[J]. *价值工程*, 2019, 38(1): 159–162.
LU Y J, YAN M, GAO Y. Mechanism and development of electromagnetic shielding materials[J]. *Value Engineering*, 2019, 38(1): 159–162 (in Chinese).
- [15] 高党鸽, 郭世豪, 周莹莹, 等. 柔性基电磁屏蔽材料的研究进展[J]. *精细化工*, 2021, 38(11): 2161–2170.
GAO D G, GUO S H, ZHOU Y Y, et al. Research progress of flexible base electromagnetic shielding materials[J]. *Fine Chemicals*, 2021, 38(11): 2161–2170 (in Chinese).
- [16] 林宇霖, 吴惠民, 刘瑞来, 等. 镍粉/石墨粉/NBR 复合电磁屏蔽材料的研制及性能[J]. *炼油与化工*, 2023, 34(3): 65–68.
LIN Y L, WU H M, LIU R L, et al. Development and properties of nickel powder/graphite powder/NBR composite electromagnetic[J]. *Refining and Chemical Industry*, 2023, 34(3): 65–68 (in Chinese).
- [17] 张梦欣, 刘让同, 李亮, 等. 聚氨酯掺杂铜粉涂层的电磁特征及其涂层织物的吸波性能[J]. *中国塑料*, 2022, 36(9): 46–52.
ZHANG M X, LIU R T, LI L, et al. Electromagnetic characteristics of copper-powder-doped polyurethane coating and absorbing[J]. *China Plastics*, 2022, 36(9): 46–52 (in Chinese).
- [18] YAN X X. Effect of different color paste on properties of fluorine resin/aluminum infrared low emissivity coating[J]. *Coatings*, 2020, 10(1): 70.
- [19] SORGUCU U. Electromagnetic interference (EMI) shielding effectiveness (SE) of pure aluminum: An experimental assessment for 5G (SUB 6GHZ)[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2023, 34(36): 2325.
- [20] 宁亮, 董春蕾, 王贤明, 等. 雷达-红外双波段兼容的碳纤维/铝粉/改性三元乙丙复合涂层[J]. *复合材料学报*, 2024, 41(11): 5985–5992.
NING L, DONG C L, WANG X M, et al. Radar-IR dual band compatible carbon fiber/aluminum powder/modified EPDM composite coating[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2024, 41(11): 5985–5992 (in Chinese).
- [21] 吴护林, 朱敏. 红外低发射率颜料制备及其可见光/红外特性研究[J]. *表面技术*, 2016, 45(6): 147–152.
WU H L, ZHU M. Preparation and visible & IR light properties of low IR emissivity pigments[J]. *Surface Technology*, 2016, 45(6): 147–152 (in Chinese).
- [22] 陶睿, 刘朝辉, 班国东, 等. 8~14 μm 波段低发射率涂层材料的制备及性能研究[J]. *表面技术*, 2017, 46(10): 207–212.
TAO R, LIU Z H, BAN G D, et al. Preparation and properties of low-emissivity coatings materials in 8–14 μm band[J]. *Surface Technology*, 2017, 46(10): 207–212 (in Chinese).
- [23] 刘小艳, 王帮武, 朱巍, 等. 镀银铝粉/导电硅橡胶复合材料的制备与性能[J]. *弹性体*, 2017, 27(1): 36–41.
LIU X Y, WANG B W, ZHU W, et al. Preparation and properties of silver coated aluminum powder/conductive silicone rubber composites[J]. *China Elastomerics*, 2017, 27(1): 36–41 (in Chinese).
- [24] 刘顺华, 刘军民, 董星龙, 等. 电磁波屏蔽及吸波材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
LIU S H, LIU J M, DONG X L, et al. *Electromagnetic Wave Shielding and Absorbing Materials*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007 (in Chinese).
- [25] 张涛, 高鹏, 余争平. 镍基复合涂料对环境电磁辐射的屏蔽效能研究[J]. *辐射防护*, 2019, 39(6): 483–486.
ZHANG T, GAO P, YU Z P. Study on shielding efficiency of nickel-base composite coating for environmental electromagnetic radiation[J]. *Radiation Protection*, 2019, 39(6): 483–486 (in Chinese).
- [26] 牛翔宇, 凌新龙. 电磁屏蔽材料的研究进展[J]. *纺织科学与工程学报*, 2023, 40(2): 109–118.
NIU X Y, LING X L. Research progress of electromagnetic shielding materials[J]. *Journal of Textile Science and Engineering*, 2023, 40(2): 109–118 (in Chinese).

本文引文格式:

马晓光, 元森阳. 铝粉涂覆型电磁波响应/红外隐身双功能织物的制备及性能[J]. *天津工业大学学报*, 2025, 44(5): 30–35.

MA X G, YUAN S Y. Preparation and properties of aluminum powder-coated fabrics with dual functions of electromagnetic wave response and infrared stealth[J]. *Journal of Tiangong University*, 2025, 44(5): 30–35 (in Chinese).

(责任编辑: 孙广宇)