

碳纤维粒子尺度对红外/毫米波复合干扰性能研究

孙悦悦, 王玄玉, 董文杰, 姚伟召, 刘志龙, 李 凯

(陆军防化学院烟火系, 北京 102205)

摘要: 为了研究不同尺度碳纤维粒子对红外/毫米波的复合干扰性能, 利用试验样板在静态测试条件下针对不同尺度碳纤维进行红外和毫米波衰减率测试, 筛选出对两者分别具有最优衰减效果的碳纤维粒子尺度。在此基础上, 选择远红外和 8 mm 波作为衰减对象, 利用烟幕试验箱动态测试并分析了具有最佳尺度特征的碳纤维在不同配比条件下对红外/毫米波的复合干扰性能。实验结果表明: 碳纤维粉末对红外具有更优异的衰减效果, 短切碳纤维对毫米波的干扰性能更加显著, 800 目、1.5 mm 和 4 mm 是碳纤维粒子衰减红外/毫米波的最佳尺度, 对应配比为 22%、4% 和 74% 时各波段的复合干扰性能最优。

关键词: 碳纤维; 红外; 毫米波; 粒子尺度; 复合干扰

中图分类号: TJ53 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20210254

Study on infrared/millimeter wave composite interference performance of carbon fiber particle size

Sun Yueyue, Wang Xuanyu, Dong Wenjie, Yao Weizhao, Liu Zhilong, Li Kai

(Institute of NBC Defense of PLA Army, Beijing 102205, China)

Abstract: In order to study the composite interference performance of carbon fiber with different particle diameters on infrared/millimeter wave, the attenuation rate of infrared and millimeter wave was tested on carbon fiber with different particle diameters under static test conditions using test samples, and the ones with the best attenuation effects for the two were selected. The far-infrared and 8 mm wave were selected as the attenuation objects. The smoke screen test box was used to dynamically test and analyze the carbon fiber with the best particle size characteristics to the infrared/millimeter wave of composite interference performance. The experimental results show that carbon fiber powder has a better attenuation effect on infrared, and the interference performance of chopped carbon fiber on millimeter wave is more significant. 800 mesh, 1.5 mm and 4 mm are the best particle sizes for carbon fiber attenuation of infrared/millimeter wave. The composite interference performance of each band is the best when the ratio is 22%, 4%, and 74%.

Key words: carbon fiber; infrared; millimeter wave; particle size; compound interference

收稿日期: 2021-12-10; 修订日期: 2022-01-25

基金项目: 装备预研项目 (30110020502)

作者简介: 孙悦悦, 女, 硕士生, 主要从事烟火技术方面的研究。

导师简介: 王玄玉, 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事军事化学与烟火技术方面的研究。

0 引言

烟幕作为一种经济简易、效费比高的无源光电对抗手段,可以有效干扰多种光电侦察与制导武器^[1]。随着现代作战样式和对抗手段的不断发展,烟幕气溶胶的工作范围拓展至多个电磁频谱波段,包括可见光、红外和毫米波等。红外和毫米波是两个比较重要的光电武器工作波段,主要集中在近红外、中红外、远红外以及3、8 mm。因此开发新型多波段、高效率的烟幕干扰材料是解决光电对抗问题的必由之路。

碳纤维(carbon fiber, CF)是由有机纤维经碳化及石墨化处理得到的微晶石墨材料^[2]。作为一种新兴的无源干扰烟幕材料^[3],短切碳纤维密度小、导电性高,具有良好的漂浮性能,能有效衰减电磁波信号强度,同时对红外和毫米波产生干扰作用^[4]。碳纤维烟幕粒子对电磁波的吸收和散射不仅与入射电磁波的波长及入射方向有关,还与烟幕粒子尺度有密切联系。目前,国内外在碳纤维衰减红外或多频谱电磁波的粒子尺度分析及规律研究方面鲜有文献报道。

为了进一步探索碳纤维在烟幕无源干扰领域中的应用,文中选择14种不同粒子尺度的碳纤维材料作为研究对象,通过对碳纤维粒子尺度进行精确地控制,筛选对红外、毫米波具有最优衰减效果的碳纤维粒子,而后改变最佳尺度所对应的配比,测试对红外/毫米波的复合干扰性能变化规律,为新型抗红外/毫米波烟幕剂的军事应用奠定基础。

1 实验部分

1.1 材料及仪器

碳纤维:包括碳纤维粉体和短切碳纤维,碳纤维粉体长为800目、400目、200目、140目、70目、35目和25目,短切碳纤维长为1 mm、1.5 mm、2 mm、2.5 mm、3 mm、3.5 mm和4 mm。纤维直径为7 μm ,拉伸强度为3 800 MPa,拉伸模量为228 GPa,密度1.75 g/cm^3 ,电阻率 $1.0\times 10^{-3}\sim 1.6\times 10^{-3}\ \Omega\cdot\text{cm}$,盐城市翔盛碳纤维制品有限公司。

傅里叶变换红外光谱仪WQF-530,北京瑞利分析仪器有限公司;3 mm、8 mm毫米波插损测试系统;红外热成像仪DL700,浙江大立科技股份有限公司;黑体辐射源,广州SAT红外科技有限公司;分析天平SI-234,丹佛仪器有限公司。

1.2 实验方案

1.2.1 实验流程

该实验旨在研究碳纤维对红外/毫米波具有最优衰减效果的粒子尺度及配比。首先进行碳纤维对单一波段的衰减测试,利用傅里叶变换红外光谱仪和毫米波插损测试系统开展静态试验,分别筛选出碳纤维对红外和毫米波衰减效果最优时所对应的粒子尺度,称为最佳尺度。在此基础上,进行碳纤维对红外/毫米波的复合衰减动态测试,将已筛选出的具有最佳粒子尺度特征的试验样品根据均匀配方设计按照不同配比混合后置于微型烟箱中,测试碳纤维对红外/毫米波具有最优复合衰减效果的配比,称为最优配比。

1.2.2 红外波段试验方法

运用傅里叶变换红外光谱仪对碳纤维材料进行红外干扰性能的测定,采取压片法进行测试。由于短切碳纤维初始长度较长,长度达毫米级,无法保证研磨后测试结果的有效性,并且依据半波长谐振理论,许多研究学者^[5-6]均已验证短切碳纤维对毫米波具有更优异的衰减效果,因此选择7种粒子尺度为微米级的碳纤维粉体作为红外波段待测样品。准确称量0.001 g试验样品和0.200 g溴化钾粉末,将两者混合均匀,在玛瑙研钵中充分研磨5 min,使颗粒达到约2.5 μm 以下,称取0.150 g待测混合物均匀地放入固体压片模具,用小扁铲将混合物铺平,置于压力机中使用15 MPa压力保持2 min即可得到透明或均匀半透明的锭片,取出锭片后装入红外光谱仪测试架上绘制红外光谱图(KBr底片作空白)。由于光程影响透过率,因此在实验过程中保证样品的称量条件和待测质量、研磨时间和力度、压片时间和力度等条件的一致性,避免对红外透过率造成影响。

1.2.3 毫米波波段试验方法

毫米波测试样板采用聚苯乙烯泡沫板^[7],面积为336 cm^2 (21 $\text{cm}\times 16\ \text{cm}$)。碳纤维均匀分散在测试样板上,呈现二维空间分布状态。定量控制每种碳纤维样品为0.200 g(精确到0.001 g),将称量后的14种碳纤维分别均匀布撒在14个毫米波测试样板上,利用3 mm和8 mm波烟幕插损测试系统静态测试研究二维状态下不同粒子尺度碳纤维对毫米波干扰性能的影响。首先需测得未施放测试材料时毫米波的功率电平,即

初始电平 V_0 , 然后在测试光路上放置测试材料, 观察毫米波信号降低, 测得衰减后的功率电平, 即衰减后功率电平 V 。定义衰减值 A 为衰减后功率电平 V 与初始电平 V_0 的差, 单位为 dBm; 定义 P_0 和 P 分别是电磁波穿过气溶胶前后的输入及输出能量。碳纤维对毫米波的衰减值 A 、透过率 T 和衰减率 ϕ 存在如下关系:

$$T = \frac{P}{P_0} \times 100\% = 10^{\frac{V-V_0}{10}} = 10^{-\frac{A}{10}} = 1 - \phi \quad (1)$$

1.2.4 多频谱波段试验方法

单一长度碳纤维难以同时保证对红外/毫米波的复合衰减效果, 为动态测试碳纤维在三维状态下的复合衰减效果, 通过风扇的外力作用使其能够分散、悬浮于空气中, 形成气溶胶状态的碳纤维粒子, 较准确地模拟出实际运用中的烟幕状态, 使得测试数据更加精确可靠。文中采用由王元和方开泰教授共同提出的一种新的试验设计方法, 即混料均匀设计^[8], 可以决定配方中诸成分的比例。利用 DPS 数据处理系统对 3 种原料配比进行试验设计, 采用非限制混料均匀设计, 各原料取值范围均位于 0%~100%, 建立一个 3 因素 9 水平的混料配方方案, 见表 1。

表 1 混料均匀设计方案

Tab.1 Mixing uniform design scheme

Number	x1	x2	x3
1	0.5918	0.2948	0.1134
2	0.4730	0.0878	0.4392
3	0.2183	0.0434	0.7383
4	0.0282	0.5939	0.3779
5	0.7643	0.0917	0.1440
6	0.3764	0.5890	0.0346
7	0.2929	0.3536	0.3536
8	0.1502	0.7082	0.1416
9	0.0871	0.2536	0.6593

将具有红外最优衰减效果和毫米波最优衰减效果的碳纤维按照不同配比均匀混合后置于微型烟箱底部, 在红外热成像仪、黑体、毫米波插损测试系统和微型烟箱组成的测试体系中完成多频谱动态测试过程。微型烟箱由钢化玻璃材质制成, 尺寸为 (0.58 m×0.38 m×0.48 m), 内部体积 0.1 m³, 实际光程 0.58 m, 在两侧分别有两个测试窗口, 窗口两端放置 8 mm 波插

损测试系统、红外热成像仪和黑体 (温度设定为 80 °C, 室温 25 °C), 箱体顶部设有电动机及风扇, 转速可达 3800 r/min。控制微型烟箱中的样品总量为 1 g, 根据混料均匀设计方案可得到样品各组分所占百分比, 见表 2。设定红外热像仪与毫米波插损测试系统开始探测时间为 0 s, 50 s 时打开风扇, 风扇转动开始施放烟幕, 碳纤维粒子在微型烟箱中均匀分散, 光路穿过碳纤维烟幕后, 红外热成像仪和毫米波接收机开始采集数据, 75 s 时测试结束, 停止记录数据清空烟箱, 计算得出衰减率, 研究 9 种不同配比碳纤维衰减电磁波的变化规律。

表 2 实验样品各组分配比表

Tab.2 Distribution ratio table of each group of experimental samples

Number	Percentage		
	Component 1	Component 2	Component 3
1	59%	30%	11%
2	47%	9%	44%
3	22%	4%	74%
4	3%	59%	38%
5	76%	10%	14%
6	38%	59%	3%
7	30%	35%	35%
8	15%	71%	14%
9	9%	25%	66%

红外热成像仪利用烟幕施放前后环境与目标的温度变化将红外辐射能量密度分布显示出来, 通过测量施放烟幕后背景 and 目标的平均温度可以测得红外透过率 T , 定义 t_b 、 t_a 为烟幕施放后背景和目标的平均温度, t_{b0} 、 t_{a0} 为烟幕施放前背景和目标的平均温度, 单位为 K, 如公式 (2) 所示^[9]:

$$T = \frac{t_b^4 - t_a^4}{t_{b0}^4 - t_{a0}^4} \times 100\% \quad (2)$$

2 结果分析

2.1 红外衰减效果

利用压片法对碳纤维粉体粒子进行红外波段静态测试, 得到的红外光谱图中透过率大小可以判定碳纤维粉体粒子尺度对红外的衰减规律, 实验结果如图 1 所示。

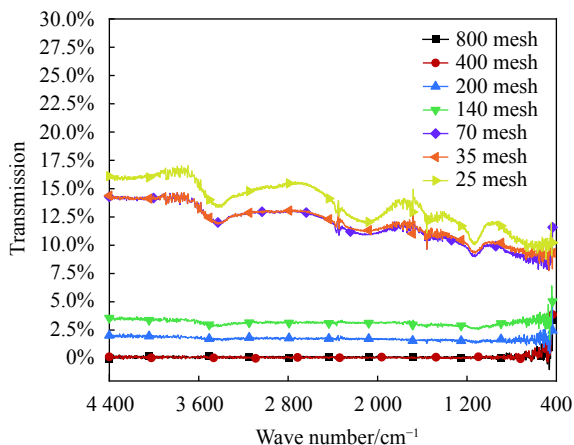


图 1 压片型碳纤维粉体红外光谱图

Fig.1 Infrared spectrum of pressed carbon fiber powder

图 1 结果表明:

(1) 碳纤维粒子对红外波段有明显的衰减作用, 当目标发出的红外辐射入射到碳纤维中, 红外能力遭到衰减。碳纤维粉体对红外的透过率为 0%~18%, 并且碳纤维对红外的衰减效果与粒子尺度大小密切相关。

(2) 对于碳纤维粉体, 70 目 (212 μm)、35 目 (500 μm) 和 25 目 (710 μm) 碳纤维对红外的透过率较高, 800 目 (18 μm)、400 目 (38 μm)、200 目 (75 μm) 和 140 目 (106 μm) 碳纤维的红外吸收光谱图可以近似看做是一条平行于横坐标的直线, 对近、中和远红外的透过率均较低, 其中, 800 目与 400 目碳纤维对红外的透过率趋于 0%。透过率的大小取决于样品质量及其消光特性, 在控制样品含量一致的基础上, 800 目与 400 目碳纤维对红外透过率更低, 消光性能更好。因为 800 目和 400 目碳纤维的粒子尺度小, 相对而言更接近测试波长, 属于米散射, 且粒子数多, 消光好。另外, 碳纤维单丝直径为 7 μm, 直径大小在红外波段范围内, 也起到一定的散射作用。

(3) 碳纤维对红外的吸收特征比较相似。碳纤维粉体样品的红外光谱图中 3330~3240 cm⁻¹ 附近出现了强烈的吸收单峰, 且峰形尖锐, 来自于酚羟基-OH 的伸缩振动^[10], 碳纤维本身并不含羟基, 这可能是由于碳纤维粉体是疏松多孔的凝聚体, 微观上粒子之间存在缝隙, 因此测试过程中样品内夹杂着空气中的水分; 1700~1610 cm⁻¹ 附近的吸收峰来自于碳碳双键的伸缩振动, 且强度较低; 1200~1100 cm⁻¹ 附近的吸

收峰来自于碳碳单键的伸缩振动^[11-12]。这些吸收峰表明碳纤维对红外的衰减与吸收作用相关。

(4) 碳纤维粉体是一种优良的红外烟幕干扰材料。气溶胶颗粒粒子尺度越小, 在空气中分散将会更加均匀, 基于这个特点文中选择衰减性能优异的 800 目碳纤维作为复合衰减测试中红外波段的试验样品。此外, 8~14 μm 红外热像仪难以干扰, 故在动态试验中加以研究。

2.2 毫米波衰减效果

采用室内夹板式静态测试方法^[13] 研究不同粒子尺度碳纤维对 3 mm 和 8 mm 波的衰减性能, 并根据测试结果进一步计算出碳纤维对 3、8 mm 波的透过率和衰减率, 结果如表 3、图 2 所示。通过分析表 3、图 2 中的数据可知:

(1) 各种粒子尺度的碳纤维粉体和短切碳纤维对毫米波均有衰减效果。因为碳纤维具有类金属材料良好的导电性能, 当入射电磁波作用于碳纤维粒子时, 其内部将产生耗散电流或谐振感应电流, 对电磁波有较好地吸收作用。并且, 碳纤维是一种线散射体, 对电磁波辐射能量具有散射衰减效果。

(2) 碳纤维粉体对毫米波的衰减率均低于 10%,

表 3 碳纤维对毫米波衰减性能的测试结果

Tab.3 Test results of carbon fiber attenuation performance of millimeter wave

Number	Particle size	3 mm			8 mm		
		A/dBm	T	φ	A/dBm	T	φ
1	800 mesh	0.08	98.29%	1.71%	0.06	98.63%	1.37%
2	400 mesh	0.18	96.05%	3.95%	0.26	94.16%	5.81%
3	200 mesh	0.20	95.50%	4.50%	0.22	95.06%	4.94%
4	140 mesh	0.13	97.05%	2.95%	0.05	98.86%	1.14%
5	70 mesh	0.35	92.26%	7.74%	0.30	93.33%	6.67%
6	35 mesh	0.20	95.50%	4.50%	0.23	94.84%	5.16%
7	25 mesh	0.37	91.83%	8.17%	0.21	95.28%	4.72%
8	1.0 mm	8.45	14.29%	85.71%	5.23	29.99%	70.01%
9	1.5 mm	14.95	3.20%	96.80%	10.24	9.46%	90.54%
10	2.0 mm	13.83	4.14%	95.86%	10.45	9.02%	90.98%
11	2.5 mm	13.65	4.32%	95.68%	10.93	8.07%	91.93%
12	3.0 mm	13.47	4.50%	95.50%	11.68	6.79%	93.21%
13	3.5 mm	13.24	4.74%	95.26%	12.23	5.98%	94.02%
14	4.0 mm	13.02	4.99%	95.01%	12.71	5.36%	94.64%

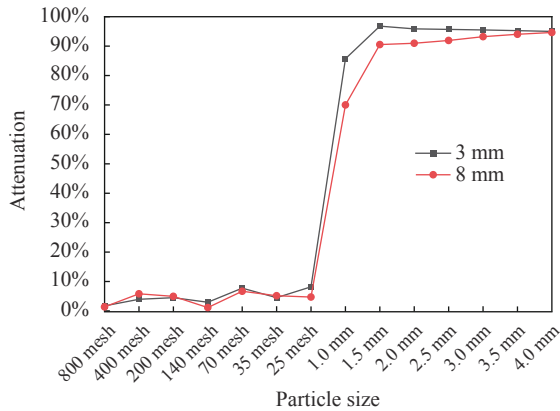


图 2 碳纤维粒子尺度对毫米波衰减性能的影响

Fig.2 Influence of carbon fiber particle size on millimeter wave attenuation performance

短切碳纤维对毫米波的衰减率均高于 70%。这是由于碳纤维粉体在 800~25 目之间的粒子尺度远小于毫米波入射波长,属于瑞利散射,其光的强度和入射光波长的 4 次方成反比,散射很小所致。而短切碳纤维粒子尺度范围在毫米级别,属米氏散射,因此短切碳纤维对毫米波的衰减效果表现较好。

(3) 在 1~4 mm 区间的短切碳纤维对毫米波的衰减率均不小于 70%。随着长度的增加,短切碳纤维对 3 mm 波的衰减率先增大后减小,当长度为 1.5 mm 时衰减率达到峰值;短切碳纤维对 8 mm 波的衰减率逐步增大,当短切碳纤维长度为 4 mm 时衰减率达到峰值。这是因为短切碳纤维遵循半波长谐振理论,当短切碳纤维长度接近入射电磁波半波长时,将与外场产生强烈的谐振效应,损耗电磁波能量。为达到理想的毫米波衰减效果,选择 1.5、4 mm 短切碳纤维作为烟幕干扰材料。

(4) 对于 3 mm 波,1 mm 短切碳纤维衰减率为 85%,长度大于 1 mm 的短切碳纤维衰减率均大于 95%,最大值与最小值之间相差 1.8%;对于 8 mm 波,1 mm 短切碳纤维衰减率仅为 70%,长度大于 1 mm 的短切碳纤维衰减率均大于 90%,最大值与最小值之间相差 4%。由此可见,长度大于 1 mm 的碳纤维粒子尺度变化对 3 mm 波影响较弱,对 8 mm 波影响较显著。因此,在下一步的动态实验中,为探究不同粒子尺度混合后的碳纤维对毫米波的衰减规律影响,选择易受干扰的 8 mm 波,研究不同配比的混合碳纤维对 8 mm 波的衰减规律。

2.3 红外/毫米波复合衰减效果

目前,考核烟幕剂衰减性能的通用方法一般是在烟箱中进行测试。为使碳纤维达到更好的衰减效果,结合静态测试条件下单一波段干扰性能的测试结果,制定不同配比的 800 目、1.5 mm 和 4 mm 碳纤维样品含量表,如表 4 所示。单一波段的实验结果表明碳纤维长度的变化对 8 mm 波的衰减影响更为显著^[4],且由于 8~14 μm 红外热像仪较难干扰,因此选择 8~14 μm、8 mm 作为红外/毫米波的干扰波段,将混合后的多频谱烟幕材料置于微型烟幕内,动态测试 9 种烟幕云团对红外/毫米波干扰性能后得到的实验结果,如表 5 和图 3 所示。

通过分析表 4、表 5、图 3 中数据可知:

(1) 对于碳纤维衰减 8~14 μm 的变化曲线,方案 1、5 的 800 目碳纤维粉体质量分数较高,所对应的远红外衰减率也较高,表明随着碳纤维粉体质量分数增加,远红外透过率降低,衰减效果越显著。对于碳纤维衰减 8 mm 的变化曲线,方案 3、9 的 4 mm 短切碳纤维质量分数较高,所对应的 8 mm 波衰减率也较高,方案 6、8 的 1.5 mm 短切碳纤维含量较高,但所对应的 8 mm 波衰减较低,这表明增加 1.5 mm 碳纤维质量分数对提高 8 mm 波衰减率影响较小,并且随着 4 mm 短切碳纤维质量分数增加,8 mm 波透过率降低,衰减效果越显著。这进一步验证了米氏散射理论,烟幕粒子粒子尺度与波长越相近,对电磁波的衰减效果会更优。

(2) 综合 8~14 μm 和 8 mm 的衰减率变化曲线,为

表 4 不同配比的碳纤维各组分样品含量表

Tab.4 Sample content table of each component of carbon fiber with different proportions

Number	Concent/g		
	800 mesh	1.5 mm	4 mm
1	0.59	0.30	0.11
2	0.47	0.09	0.44
3	0.22	0.04	0.74
4	0.03	0.59	0.38
5	0.76	0.10	0.14
6	0.38	0.59	0.03
7	0.30	0.35	0.35
8	0.15	0.71	0.14
9	0.09	0.25	0.66

表 5 不同配比碳纤维多频谱衰减性能测试结果

Tab.5 Test results of different ratios of carbon fiber on multi-spectrum attenuation performance

Program	8-14 μm						8 mm		
	$t_{b0}/^\circ\text{C}$	$t_{d0}/^\circ\text{C}$	$t_b/^\circ\text{C}$	$t_d/^\circ\text{C}$	T	ϕ	A/dBm	T	ϕ
1	20.70	69.30	20.80	51.60	58.06%	41.94%	2.40	57.54%	42.46%
2	21.70	68.40	21.20	59.20	77.57%	22.43%	5.00	31.62%	68.38%
3	21.80	68.40	23.00	56.70	68.63%	31.37%	13.20	4.79%	95.21%
4	21.90	68.00	23.50	61.80	81.16%	18.84%	5.20	30.20%	69.80%
5	24.50	69.60	22.90	46.60	46.56%	53.44%	0.40	91.20%	8.80%
6	21.40	66.60	21.30	48.50	54.97%	45.03%	0.10	97.72%	2.28%
7	23.00	65.60	23.20	51.70	62.51%	37.49%	2.60	54.95%	45.05%
8	24.60	68.20	24.90	61.30	80.82%	19.18%	2.50	56.23%	43.77%
9	25.90	68.70	25.70	57.20	69.50%	30.50%	10.4	9.12%	90.88%

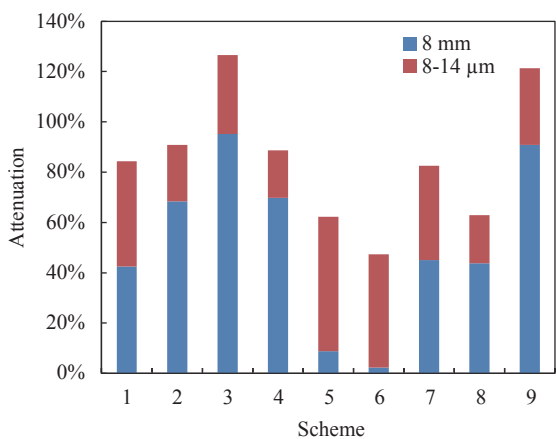


图 3 不同配比碳纤维衰减红外/毫米波柱状图

Fig.3 Histogram of the attenuation rate of carbon fiber with different ratios to infrared/millimeter wave

使碳纤维达到最优的复合干扰性能,应当选择方案 3,即 800 目、1.5 mm、4 mm 碳纤维的质量分数分别为 22%、4%、74%,此时碳纤维对红外/毫米波的衰减效果更好,具有最佳粒子尺度、最优配比的特征。

3 结 论

研究表明,对于碳纤维此种烟幕材料,具有红外最优衰减效果的是 800 目碳纤维粉体,具有 3 mm 波最优衰减效果的是 1.5 mm 短切碳纤维,具有 8 mm 波最优衰减效果的是 4 mm 短切碳纤维。三者均匀混合形成的碳纤维烟幕具备优异的红外/毫米波复合干扰性能,三种粒子尺度碳纤维的配比变化对红外/毫米波干扰性能影响显著。在文中实验条件下,22%

800 目、4%1.5 mm、74%4 mm 碳纤维的配比方式具有最优的复合干扰性能,对远红外和 8 mm 波的衰减较均衡。碳纤维具有独特的光电特性,作为一种新型多频谱烟幕干扰材料能够在特定的粒子尺度及配比方式下发挥更显著的作用,有望在光电对抗材料领域取得突破发展。

参考文献:

- [1] Weidong X, Heng L, Jianhua W. Preliminary research on production and interference characteristic of one multiband smoke material [J]. *Materials Research Innovations*, 2015, 19(4): 62-64.
- [2] He F. Carbon Fiber and Its Application Technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 202. (in Chinese)
- [3] Wang X Y. Research progress on anti-infrared smoke screen materials and extinction properties (special contract) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(7): 20201019. (in Chinese)
- [4] Liu Z L, Wang X Y, Dong W J, et al. Influence of chopped Carbon Fiber cloud cluster on millimeter wave/infrared composite interference performance [J]. *Energetic Materials*, 2016, 24(12): 1219-1224.
- [5] Zhang D Z. Multi-spectrum interference material composite technology and performance research [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
- [6] Du G P, Miao Y K, Liu H F. Study on the 3mm wave attenuation performance of chopped carbon fibers [J]. *Fire Industrial Products*, 2005, 12(5): 4-7.
- [7] Dong W J, Wang L G, Wang X Y, et al. Research on the interference performance of copper-plated carbon fiber on

- millimeter wave [J]. *Initiator*, 2020(3): 28-32.
- [8] Wang Y, Fang K T. Uniform mixture design [J]. *Science in China*, 1996(1): 1-11. (in Chinese)
- [9] Wang X Y. Testing the infrared extinction characteristics of red phosphorous smoke screen by thermal imaging method [J]. *Journal of Anti-Chemistry*, 2007(3): 63-65.
- [10] Liu Q H, Liu H F, Dai X D, et al. Research on infrared interference performance of graphene smoke screen [J]. *Infrared Technology*, 2019, 41(11): 1071-1076. (in Chinese)
- [11] Weng S F. Fourier Transform Infrared Spectroscopy Analysis [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [12] Ning Y C. Structural Identification of Organic Compounds and Organic Spectroscopy [M]. Beijing: Science Press, 2000. (in Chinese)
- [13] Wang X Y, Bai H T, Pang Y H, et al. Smoke screen interference performance splint laminated test device and method: China,105115898A [P]. 2015-12-02.
- [14] Liu Z L, Wang X Y, Yao W Z, et al. The influence of the length ratio of chopped Carbon Fiber on the performance of explosively dispersed clouds [J]. *Initiator*, 2019(1): 26-29.