

抗红外烟幕材料及消光性能研究进展 (特约)

王玄玉

(陆军防化学院烟火系, 北京 102205)

摘要: 为了促进抗红外烟幕材料研究和应用转化,从抗红外烟幕材料研制和消光性能研究两个方面对研究现状、存在的主要问题和发展趋势进行了系统分析。研究表明:炭黑型、红磷基等热烟材料以改进配方研究为主,层状超分子、超细陶瓷粉体、纳米粉体以及生物材料等冷烟材料在结构设计、合成技术、消光性能评价等方面取得显著成果。当前研究主要存在环境友好型烟幕材料研究少、消光理论创新难等问题。低费效比、环境友好的抗红外烟幕材料将成为该领域的发展重点。

关键词: 红外; 烟幕; 干扰材料; 消光性能; 消光机理

中图分类号: TJ53 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20201019

Development of anti-infrared smoke material and its extinction performance(*Invited*)

Wang Xuanyu

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

Abstract: In order to promote the research and application transformation of anti-infrared smoke screen materials, the research status, main problems and development trend of the materials were systematically analyzed from the material development and research on extinction performance. The results show that the research of carbon black and red phosphorus based hot smoke materials mainly focus on the improvement of the formula. The cold smoke materials, such as layered super-molecular, ultrafine ceramic powder, nano powder and biomaterials, have made remarkable achievements in structural design and synthesis technology. At present, there are some problems in the research, such as the lack of environment-friendly anti-infrared smoke screen materials, the difficulty of extinction theory innovation and so on. In the future, low cost-effectiveness ratio and environment-friendly anti-infrared smoke materials will become the development focus in this field.

Key words: infrared; smoke screen; interference material; extinction performance; extinction principle

收稿日期:2020-03-20; 修订日期:2020-04-25

作者简介:王玄玉(1965-),男,教授,博士,主要从事军事化学与烟火技术方面的研究。Email: wxycrs@aliyun.com

0 引言

精确制导武器自越南战争和中东战争后纷纷登上战争舞台,其中美军率先研发的激光制导炸弹首次在越南经历了实战并取得显著作战效果,1972年6月因成功炸毁越南杜美桥而闻名的宝石路激光制导炸弹^[1]成为最早用于实战的激光制导武器。全世界第一种投入实战并有击落飞机纪录的空对空红外制导导弹是美国20世纪50年代开始研制的响尾蛇空空导弹,参加过越南战争、马岛冲突和海湾战争。由于红外制导具有精度高、抗干扰能力强、隐蔽性好、效费比高、结构紧凑、机动灵活等优点,经过半个世纪的发展,已广泛成为反坦克导弹、空地导弹、地空导弹、空空导弹、末制导炮弹、末制导子母弹以及巡航导弹等武器装备的主要制导方式之一^[2]。

随着激光和红外等精确制导武器的实战化应用,与之相对应的烟幕无源干扰光电对抗技术得到迅速发展。比如在越南战争中,美国飞机在无光电干扰的情况下,只用了20枚激光制导炸弹就摧毁了越南17座桥梁,但在攻击富安发电厂时,越军用水幕进行光电防护,致使美军二十枚激光制导炸弹全部脱靶,只有一枚落在电厂附近^[3],这一成功战例开启了烟幕无源干扰激光侦察和精确制导武器的先河。红外侦察和制导武器也经历了类似的过程,烟幕从传统的遮蔽可见光烟幕发展到对抗红外的干扰烟幕,也推动了国内外新型发烟装备器材的发展,很多国家都相继研发并装备了红外干扰弹药及装备,其中,红外干扰材料一直是烟幕技术发展的重点,与之相应的红外消光机理、评价试验方法等方面研究也取得了长足进展。

此文针对抗红外烟幕材料、消光试验、评价技术等方面研究进展进行简要回顾,并结合新的军事需求对抗红外烟幕材料及消光性能研究方面遇到的问题和挑战进行了分析。

1 典型抗红外烟幕材料

抗红外烟幕材料根据其形成烟幕的过程中是否伴有化学反应而出现放热现象,可以分为热烟材料和冷烟材料。热烟材料如基于红磷的多组分烟幕材料,冷烟材料如复合石墨和黄铜粉等。回顾近二十年抗红外烟幕材料发展历程,热烟材料以改进配方研究为

主,冷烟材料在粒子加工、微观结构设计、表面改性等方面不断创新发展。

1.1 热烟材料

热烟材料主要采用燃烧型配方设计。经典的葱烟幕、六氯乙烷烟幕从二战时期就已经广泛使用,但主要用于遮蔽可见光,对红外作用微弱甚至没有作用。随着红外侦察和制导武器的出现,国内外对于干扰红外的热烟材料研究大多从对传统配方的改进研究起步并发展为红磷型、碳烟型等抗红外发烟剂。

红磷烟幕是目前很多国家装备的一种制式烟幕。刘庚冉等人使用中等烟箱、热像仪和 FTIR 光谱仪等测定了红磷烟幕的遮蔽质量和消光系数^[4]。徐铭、李澄俊在烟雾箱内对磷烟、铜粉及其组合烟雾的红外消光性能进行了系统测试^[5]。研究结果均表明,红磷烟幕对红外具有比较明显的干扰作用,但磷烟对红外的遮蔽能力明显小于对可见光的遮蔽效果。

周遵宁、潘功配等人以改进型 HC 发烟剂为基础配方,试验研究了发烟剂中赤磷的含量对烟幕红外透过率的影响^[6]。王玄玉、潘功配通过用镁粉代替锌粉,用氧化锰代替氧化锌,添加红磷和富碳有机化合物等途径确定了改进 HC 抗红外发烟剂配方^[7],使传统 HC 烟幕的抗红外性能得到显著提高。

炭黑烟幕是富碳化合物通过烟火燃烧反应炭化形成炭黑聚集体的一种烟幕,炭黑聚集体质地疏松,比表面积和粒径均比较大,可对红外辐射产生强烈的吸收。保石、周冶等人分析了燃烧型炭黑烟幕的形成机理及其生成特性^[8],杜雪峰、潘功配等人通过试验^[9]表明:炭黑型发烟剂在真空环境中仍具有良好的红外消光能力。

由于热烟依赖于燃烧反应的产物形成对红外的吸收和散射作用,而燃烧产物的粒度分布范围很难控制到与红外波段匹配,另外,自身热辐射明显不利于战场隐蔽,因此,热烟材料的发展相对较慢,科技工作者将更多的精力投入到了冷烟材料的研发中。

1.2 冷烟材料

降低烟幕自身的热辐射更有利于红外隐身,尤其是随着发烟车和爆炸施放技术的成熟,各种冷烟幕材料的研发得到快速发展,主要包括层状超分子烟幕材料、超细陶瓷粉体、纳米粉体、碳纤维、黑曲霉孢子、石墨烯等材料的开发与应用。

1.2.1 层状超分子材料

毕鹏禹、吴昱等人采用水热合成法制备不同粒径的碳酸根插层水滑石,经过硬脂酸表面疏水改性,最终制备得到具有疏水性的层状超分子烟幕材料^[10]。烟箱试验结果表明:7~10 μm 的层状超分子烟幕材料对 3~5 μm 和 8~14 μm 的红外辐射具有显著的衰减效应,经过助剂复配后衰减率可达 95% 以上。

1.2.2 超细陶瓷粉

刘江海等人对以 SiO_2 、 Al_2O_3 、 MgCO_3 、 CaCO_3 和稀土氧化物等为原料制备的超细陶瓷粉体进行了红外干扰性能研究^[11],研究结果表明:不同粒径的陶瓷粉体对红外辐射的干扰效果和持续时间有很大差异,最终确定超细陶瓷粉体用作抗红外烟幕材料的最佳平均粒径应处在 3.5~5.5 μm 。

1.2.3 纳米粉体

张彤、代晓东等人对 6 种不同空心率的纳米空壳样品进行了研究,结果表明:当空心率低于 80% 时,空心率的提高使样品的红外干扰性能显著增强^[12]。王红霞等人研究了纳米石墨等 8 种碳纳米材料的红外消光特性^[13]。结果表明:碳纳米材料形成的烟幕在近红外和中远红外均具有很好的消光特性。彭文联、张兴高等人基于富碳型发烟剂体系,设计制备了纳米石墨基烟幕材料^[14],与炭黑等燃烧产物配合,实现对可见光、红外的高效遮蔽干扰。

1.2.4 黄铜粉

美国陆军及美国 AAI 公司用鳞片状黄铜粉作冷烟剂制作了组合型不可燃遮蔽发烟剂,形成的烟幕能干扰毫米波、红外和可见光^[3]。白林等研究了铜粉烟幕的红外消光特性^[15]并指出了干扰不同波段时铜粉烟幕粒子直径的分布范围。

1.2.5 碳纤维

碳纤维属于新兴材料,在吸波材料、无源干扰材料等方面具有潜在应用。乔小晶等人研究了插层碳纤维与镀铜碳纤维的表面形貌、热稳定性以及对红外的消光性能^[16]。刘志龙等测试并分析了 1.5 mm/4 mm 长度短切碳纤维形成的云团对 8~14 μm 红外的干扰性能^[17],最大衰减率达到 95% 以上。

1.2.6 铁磁体/碳复合材料

李旺昌等人制备并研究了掺杂锰、钴、镍的含锌铁磁体/碳复合纳米材料,使用傅里叶变换红外光谱

仪测试了它们在 2.5~25 μm 波段的红外透过率,根据朗伯-比尔定律计算了质量消光系数^[18]。结果表明:焙烧温度 700~800 $^{\circ}\text{C}$ 时,上述材料的质量消光系数在 0.1~0.25 m^2/g 。

1.2.7 石墨烯

石墨烯兼具纳米和微米级材料的优异特性,是一种极具潜力的新型红外干扰烟幕材料。马德跃等人采用原位还原法制备了还原石墨烯/纳米铜复合材料,并分析了其中远红外波段的吸收和辐射性能^[19],结果表明:该复合材料在 8~9.2 μm 、6~6.5 μm 等波段内的吸收较强。刘清海、刘海锋等人采用氧化还原法制备并表征了石墨烯^[20],结果表明:干扰性能明显优于现有红外干扰烟幕材料。王玄玉、李凯等人还对石墨烯粒子的动力学特性进行了计算分析^[21]。

1.2.8 膨胀石墨

自 20 世纪 60 年代美国联碳公司发明膨胀石墨制造技术以来,膨胀石墨的研究与发展已有 50 多年的历史,但近些年才被视为极具开发前景的新型多波段无源干扰材料。庞敏晖等人对可膨胀石墨进行了掺杂二茂铁和化学镀铜技术改性^[22],姚永平等测得膨胀石墨烟幕对 3~5 μm 、8~12 μm 波段的平均质量消光系数分别为 0.8013 和 0.6187 m^2/g ,表明膨胀石墨烟幕具有良好的红外消光和干扰效果^[23],在红外对抗领域具有广阔的应用前景。

1.2.9 生物消光材料

随着生物气溶胶研究的深入,微生物红外消光性能的研究逐渐成为国内外研究的热点。P.S Tuminello 等人基于仪器测量光通过枯草芽孢杆菌溶液后的能量衰减获得枯草芽孢杆菌 0.2~2.5 μm 波段的衰减特性^[24]。李乐、胡以华等人对黑曲霉孢子的红外波段消光性能进行了研究^[25],并对黑曲霉孢子灭活前后红外消光特性进行了对比^[26],分析结果表明:保持活性对于提高黑曲霉孢子的电磁衰减能力具有重要的意义。李乐等人研究制备了三种真菌孢子^[27],消光性能良好且具有生产成本低、生产过程无毒、对环境友好等特点。

1.2.10 泡沫

泡沫由于具有特殊的结构,使光线在液膜各个界面都能产生反射、折射和散射等,是一种比较有研究潜力的新型宽波段无源光电干扰介质。海军大连舰艇学院金良安提出在被保护目标上方或周围形成干

扰泡沫云^[28],对军事上常用的可见光、红外、激光、雷达等频段电磁波都有很好的干扰效果。赵军等人对泡沫的红外消光系数进行了测定^[29],结果显示:泡沫可使红外透过率降至 15% 以下。

综合以上研究,冷烟幕材料发展迅速,普遍具有颗粒几何尺寸要求高、微观结构比较复杂、作用频段较宽、红外消光效果好等特性,在今后相当长时间内仍将是抗红外烟幕材料研究的主要对象^[30]。

2 红外消光性能研究技术

2.1 红外消光机理分析

2.1.1 电磁特性分析

烟幕材料的电磁特性对其红外干扰效果具有显著影响。王红霞等利用矩量法建立了纳米碳纤维感应电流和散射场的计算模型,分析表明:纳米碳纤维红外消光特性与电导率密切相关,随着电导率的增加,消光截面迅速增加^[31]。任慧等人研究表明:在欲干扰波段,有较高电导率实部、磁导率虚部、介电常数虚部的材料对电磁波能量损耗较大;有一定电导率的铁磁材料或介电材料遮蔽的频段宽,而共振型材料可在较窄的频段内获得较大的衰减^[32]。

通过电磁特性分析可知,烟幕材料的电磁性能是影响消光的重要因素之一。基于这样的研究结论,开展了通过材料改性优化电磁参数等改性研究,例如化学镀、表面修饰等方面研究。

2.1.2 散射机理研究

封亚欧、朱晨光等人基于米氏散射理论分析了不同晶型 SiO_2 烟幕云团具有单向透视性能的干扰机理^[33],结果表明:其前向散射强度高于后向散射。

王红霞等人利用分形生长理论的有限扩散模型(DLA)模拟了凝聚粒子的可能结构,基于离散偶极子近似方法(DDA)对纳米石墨凝聚粒子的红外消光截面进行了数值计算,结果表明:纳米石墨粒子适当凝聚有利于红外消光^[34]。

李毅等人采用蒙特卡洛方法根据凝聚体—凝聚体凝聚模型对由球形原始粒子聚集成成的凝聚粒子的结构进行仿真,按 T 矩阵方法计算各种结构的消光和吸收系数,以碳黑为例的计算结果表明:粒子的凝聚将减弱烟幕的消光性能;当凝聚结构中原始粒子的数目一定时,存在使烟幕消光性能达到最大的原始粒子

半径^[35]。此外,胡以华等人对生物颗粒结构进行了参数化表征,采用 DDA 计算了生物颗粒远红外波段平均消光效率因子并拟合了相应公式^[36]。

2.1.3 吸收性能分析

不同材料和化学结构的吸收特征不同。刘庚冉等从理论上分析了有机烟幕材料的红外吸收机理^[37],即分子能级从低能态跃迁到高能态而表现出的吸收作用,吸收衰减在本质上是分子的内能状态发生变化。通过实验表明:使用 KBr 进行的固体压片法测得的红外谱图主要反映了物质结构对红外的吸收作用,可以从吸收的角度探讨有机物对红外的消光机理。

消光机理分析为抗红外烟幕材料设计、改性增效提供了理论支撑,也为材料优化、选择和科学使用提供了必要依据。

2.2 红外消光试验方法

2.2.1 实测法

常用的实测法主要包括石蜡法、溴化钾压片法、烟箱试验法和外场试验法。目前,烟幕性能评价最为常用的是烟箱试验法和外场试验法,而消光材料选择则离不开压片法。

王玄玉、潘功配等人利用 KBr 压片法测试了氧化铝粉体样品的红外光谱^[38],李旺昌、李明愉等人使用傅里叶变换红外光谱仪采用 KBr 压片法测试了掺杂锰、钴、镍的含锌铁磁体/碳复合纳米材料在波长 2.5 ~ 25 μm 的红外透过率^[18]。陈望爱将溴化钾浸渍法与常规样品制备方法进行了比较,结果表明:该法可广泛用于红外光谱测试中样品制备和分析^[39]。乔小晶等人将一定量的插层碳纤维与镀铜碳纤维样品粉末与液体石蜡混合均匀,用傅里叶红外变换光谱仪对其进行扫描,根据比尔定律求出质量消光系数^[16]。

烟箱试验具有样品消耗量少,条件可控、试验可重复等优点,广泛用于烟幕材料研究。例如,肖凯涛等在 20 m^3 烟箱中测试了铜粉发烟剂的红外消光性能^[40],王红霞等人利用室内 20 m^3 大型烟箱研究了纳米石墨、纳米碳管等材料烟幕对红外衰减和遮蔽特性^[3],都取得了有价值的实验结果。顾有林、曹光华等人设计了 4 m×3 m×2.4 m 烟幕箱^[41],可用于生物材料紫外/红外复合消光性能测试。王玄玉、陈海平等人提出了烟幕遮蔽质量的定义^[30]并阐述了利用烟幕试验箱测定烟幕遮蔽质量的原理方法,相关测试结果已广泛用

于烟幕应用计算。

外场试验广泛用于烟幕材料最终使用性能评价,是所有抗红外烟幕材料研究和转化应用的关键评价手段,也是发烟装备器材评价、设计定型的必要环节。陆斌、吕俊伟曾经利用发烟罐结合外场运动目标,进行外场烟幕的消光和遮蔽效果试验^[42]。

2.2.2 计算法

乔小晶等人通过数值计算比较了壳—核型单分散微球与对数正态分布下多分散微球的质量消光系数的异同^[43]。袁江涛、杨立等人以 MATLAB 软件为编程工具,基于 Mie 散射理论计算了水雾粒子的多光谱消光特性^[44]。胡晓春等对复合镀金属微球的红外消光特性进行了数值计算^[45],结果表明:微球的最佳中径等于波长的三分之一左右。

王玄玉、潘功配等根据 Mie 散射理论计算了多种直径红磷烟幕粒子对不同波长红外的吸收效率因子、散射效率因子和消光效率因子^[46],结果表明:小尺度红磷烟幕粒子对红外的吸收效应比较明显,随着粒子直径增大,散射效应和吸收效应逐渐接近一致。而最大消光效率因子对应的波长随着入射波长的增大而逐渐增加。

缪云坤等利用离散偶极子近似 (DDA) 方法计算了圆形鳞片石墨粒子对中远红外消光性能与波长、圆片直径和厚度等的关系,结果表明:圆片直径 3 ~ 4 μm 的圆形鳞片石墨粒子 (厚度为直径的 1/10) 对中远红外的消光性能较好,散射作用大于吸收作用,圆片厚度越薄消光系数越大,并逐渐趋于最大值^[47]。

马德跃等人利用 Kramers-Kronig 关系计算了还原石墨烯的复折射率,并运用 T 矩阵法计算其在该波段的吸收和消光效率因子,分析其消光和吸收性能^[48]。结果表明:还原石墨烯的可见光—近红外消光和吸收较强,可用作宽波段的光吸收或消光材料。

2.2.3 仿真模拟法

为了评价烟幕对红外制导反舰导弹的干扰效果,邱继进、赵晓哲建立了烟幕浓度扩散模型、红外辐射强度变化规律模型及红外导引头探测能力模型,并对红外、HC 等烟幕干扰红外制导反舰导弹的效果进行了量化研究^[49]。

刘鑫基于 MATLAB 环境分析了石墨粒子对 1.06 μm 和 10.6 μm 波长的激光消光特性进行了仿真研究^[50],

揭示了在粒子半径变化时,质量消光系数的变化规律,以及由石墨粒子及铜粉粒子组成的烟幕的透过率与烟幕厚度、烟幕浓度的变化规律。

代光辉、任智斌采用 MATLAB 语言进行仿真^[51]并对 Mie 理论中消光率的数学性质进行理论分析与数值计算。黎炎图等人对单根碳纤维的电磁散射特性^[52]进行了仿真研究,在 Ansoft HFSS 仿真平台上模拟了碳纤维的电场散射特性,获得了单根碳纤维的电场散射图,仿真结果对设计具有强吸波性能的短切碳纤维复合吸波材料具有参考价值。

3 面临的问题与挑战

3.1 目前遇到的主要瓶颈问题

3.1.1 环境友好型抗红外烟幕材料研究少

目前,各国研究的抗红外烟幕材料在消光性能上取得了长足进步,无论是形成的热烟幕还是冷烟幕,都可满足无源干扰烟幕对抗红外的需要,但是大多数烟幕材料存在环境友好性不理想甚至对环境不安全的缺陷,例如法国、美国、俄罗斯等国的发烟车普遍采用了复合石墨发烟剂^[53],该发烟剂红外消光能力很强,对红外干扰效果非常显著,但其环境友好性却亟待提升,这也成为制约抗红外烟幕材料发展的主要瓶颈之一。

3.1.2 烟幕材料红外消光理论创新难

当前红外消光机理分析采用的消光模型仍以经典的 Mie 散射理论为主,该理论是以球形粒子消光为研究对象的。近年来,有些光学参数计算软件可以对圆片、薄层等特殊形状的颗粒物的消光因子进行计算,但很难由用户进行修正或者定制,需要针对碳纤维、石墨烯等一维、二维粉体材料或者纳米空心材料等特种粒子进行消光模型创新研究。此外,烟幕气溶胶体系通常为多分散体系,而利用 T 矩阵法、基于离散偶极子近似方法等其他模型或算法计算的消光效率因子也多是针对单个烟幕粒子的,理论分析结果通常很难与试验测试结果达成统一,面临烟幕材料红外消光理论创新难题。

3.1.3 烟幕材料消光性能评价试验方法优化难

消光性能研究离不开评价试验结果支撑,但受气象、地形等外在条件制约,目前采用的红外烟幕无源干扰外场试验重复性较差,室内烟箱试验烟幕气溶胶

浓度分布的均一性又难以保障,尤其是各种试验方法之间的相互印证比较困难,压片法、气溶胶法、液溶胶法等方法之间测试结果偏差较大,相互之间同一个样品用不同方法得到的结果差别也较大,如何统一或者对试验结果进行科学转换,需要进一步研究。

3.2 发展趋势与挑战

3.2.1 低费效比烟幕材料研究将成为发展趋势

纳米石墨、超细陶瓷、超分子材料、纳米空壳、石墨烯等新材料大多具有良好的红外消光性能和较小的表观密度,能够形成相对稳定的抗红外烟幕气溶胶,在光电对抗领域具有良好的应用前景,但生产成本普遍较高,费效比较大,因此,在提高烟幕材料红外干扰能力的同时,拓展烟幕材料对可见光、紫外、甚至毫米波的复合干扰效能,研发低成本、高效能的新型抗红外烟幕材料将成为该领域发展的重要趋势。

3.2.2 环保型烟幕材料研究将成为挑战

目前,环境友好型抗红外烟幕材料研究相对较少,各国大量使用的抗红外发烟剂对装备设施、环境和人员健康均存在一定不利影响,因此,可降解、无污染或易清洗、绿色环保的新一代环保型抗红外烟幕材料将成为该领域研究面临的重大挑战。

总之,抗红外烟幕材料研究虽然出现了多种新型材料,但距离高效、安全、环保的新一代干扰材料还存在一定差距,需要在费效比、环保性等方面^[54]不断进行开拓研究。

4 结束语

回顾近年来抗红外烟幕材料的研究进展和取得的主要成就,可以看出:热烟材料发展相对较慢,种类比较单一,而冷烟材料从微米尺度到纳米尺度、从实心结构到空壳结构、从无机材料到生物材料等多种复杂结构特性的材料不断涌现,种类多、消光性能好,发展成效更为显著。新时期,战场环境和公众对干扰材料的红外消光性能和环保性、费效比提出了更高要求,研究以红外干扰为中心,兼容可见光遮蔽和干扰毫米波功能,突破粒子尺度限制,并从理论上积极解决干扰材料电磁参数计算、非常规粒子的消光因子建模及验证,进一步完善试验方法,实现消光研究的统一与可重复验证,实现各种评价结果相互印证,都将成为今后一定时期的研究热点。

参考文献:

- [1] Sun Jing, Shi Lan, Li Hongbo, et al. War field application and analysis of the laser guidance technology and equipment [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(S): 285-290. (in Chinese)
孙静, 石岚, 李红波, 等. 激光制导技术与装备的实战应用与分析[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(S): 285-290.
- [2] Wang Zhongxian, Fan Xiang. The development and key-technology of infrared guided missile [J]. *Aerodynamic Missile Journal*, 2009(10): 14-19. (in Chinese)
汪中贤, 樊祥. 红外制导导弹的发展及其关键技术[J]. *飞航导弹*, 2009(10): 14-19.
- [3] Zhang Dongmei, Zhao Shenghong, Qiao Yanhua, et al. Present status and development of the stealth smoke in overseas armies [J]. *Infrared Technology*, 2008, 30(7): 376-379. (in Chinese)
张冬梅, 赵升红, 乔衍华, 等. 国外军用烟幕隐身剂的现状和发展[J]. *红外技术*, 2008, 30(7): 376-379.
- [4] Liu Gengran, Huang Shunxiang, Hu Fei, et al. IR extinction effect of red phosphorous smoke screen [J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2005, 22(7): 709-715. (in Chinese)
刘庚冉, 黄顺祥, 胡非, 等. 红磷烟幕的红外消光作用[J]. *应用化学*, 2005, 22(7): 709-715.
- [5] Xu Ming, Li Chengjun. The infrared extinction ability of combined smoke of red phosphorus and copper powder [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2002(3): 1-3. (in Chinese)
徐铭, 李澄俊. 赤磷发烟剂铜粉组合烟雾的红外消光性能[J]. *火工品*, 2002(3): 1-3.
- [6] Zhou Zunning, Pan Gongpei, Li Yi, et al. Experimental research of the influence of adding RP on smoke characteristic of modified HC [J]. *Energetic Materials*, 2002, 10(3): 128-131. (in Chinese)
周遵宁, 潘功配, 李毅, 等. 赤磷对改进型HC发烟剂烟幕性能影响的试验研究[J]. *含能材料*, 2002, 10(3): 128-131.
- [7] Wang Xuanyu, Pan Gongpei. New type of anti-infrared smoke agent based upon halogenated organic compound [J]. *Energetic Materials*, 2005, 13(3): 173-177. (in Chinese)
王玄玉, 潘功配. HC基新型抗红外发烟剂研究[J]. *含能材料*, 2005, 13(3): 173-177.
- [8] Bao Shi, Zhou Ye, Zhang Zihao, et al. Research on infrared smoke obscuring performance of burnable carbon black [J]. *Electro-optic Technology Application*, 2013, 28(5): 85-89. (in Chinese)
保石, 周冶, 张紫浩, 等. 燃烧型炭黑烟幕红外遮蔽性能研究[J]. *光电技术应用*, 2013, 28(5): 85-89.

- [9] Du Xuefeng, Pan Gongpei, Qu Jiahui, et al. Study on IR extinction performance of carbon clack smoke composition in vacuum [J]. *Vacuum*, 2016, 53(6): 63–65. (in Chinese)
杜雪峰, 潘功配, 曲家惠, 等. 炭黑型发烟剂在真空中的红外消光性能研究[J]. *真空*, 2016, 53(6): 63–65.
- [10] Bi Pengyu, WuYu, Nie Fengquan, et al. Study on the infrared interference property of layered super molecular smoke material [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2015(2): 1–5. (in Chinese)
毕鹏禹, 吴昱, 聂凤泉, 等. 层状超分子烟幕材料红外干扰性能研究[J]. *火工品*, 2015(2): 1–5.
- [11] Liu Jianghai, Zhang Liang, Dai Xiaodong. Research on the infrared jamming performance of ultrafine ceramic powders [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2011(2): 10–14. (in Chinese)
刘江海, 张良, 代晓东. 超细陶瓷粉体红外干扰性能研究[J]. *火工品*, 2011(2): 10–14.
- [12] Zhang Tong, Dai Xiaodong, Ren Lina, et al. Hollow rate and infrared jamming performance of a nanoshell material [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(S1): 93–98. (in Chinese)
张彤, 代晓东, 任丽娜, 等. 纳米空壳材料的空心率及其红外干扰性能[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(S1): 93–98.
- [13] Wang Hongxia, Liu Daizhi, Song Zibiao. Study on the characters of infrared extinction for carbon nano-materials[C]//Proceedings of 2011 China Functional Materials Technology and Industry Forum, USA: Scientific Research publishing, 2011:716-719. (in Chinese).
王红霞, 刘代志, 宋仔标. 碳纳米材料红外消光特性研究[C]//2011中国功能材料科技与产业高层论坛论文集, 美国: 美国科研出版社, 2011: 716-719.
- [14] Peng Wenlian, Zhang Xinggao, Liu Gengran, et al. Research on shadowing and interference characteristics of nano-graphite based smoke screen material [J]. *Electro-optic Technology Application*, 2019, 34(6): 17–20. (in Chinese)
彭文联, 张兴高, 刘庚冉, 等. 纳米石墨基烟幕材料的遮蔽干扰特性研究[J]. *光电技术应用*, 2019, 34(6): 17–20.
- [15] Bai Lin, Li Ning, Guo Yongli. Extinction characteristic of the copper powder smoke screen and the comparative trial of the infrared [J]. *Ship Electronic Engineering*, 2009, 29(5): 161–163. (in Chinese)
白林, 李宁, 郭永利. 铜粉烟幕的消光特性及其红外遮蔽效果对比试验[J]. *舰船电子工程*, 2009, 29(5): 161–163.
- [16] Qiao Xiaojing, Yu Renguang, Ren Hui. Comparison of intercalated carbon fibers with copper-plated carbon fibers [J]. *Journal of Material Engineering*, 2004(7): 47–50. (in Chinese)
乔小晶, 于仁光, 任慧. 插层碳纤维与镀铜碳纤维的性能比较[J]. *材料工程*, 2004(7): 47–50.
- [17] Liu Zhilong, Wang Xuanyu, Dong Wenjie, et al. Composite interference performance of chopped carbon fiber clouds to millimeter wave and infrared [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2016, 24(12): 1219–1224. (in Chinese)
刘志龙, 王玄玉, 董文杰, 等. 短切碳纤维云团对毫米波/红外复合干扰性能影响[J]. *含能材料*, 2016, 24(12): 1219–1224.
- [18] Li Wangchang, Li Mingyu, Wang Shuman, et al. IR Jamming of the ferromagnetic/carbon composite [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2013, 39(4): 604–609. (in Chinese)
李旺昌, 李明愉, 王书满, 等. 铁磁体/碳复合材料红外衰减性能[J]. *北京工业大学学报*, 2013, 39(4): 604–609.
- [19] Ma Deyue, Wang Chengming, Li Xiaoxia, et al. Research on preparation and infrared property of graphene and nano-copper Composites [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(3): 03160021–03160026. (in Chinese)
马德跃, 王成名, 李晓霞, 等. 石墨烯/纳米铜复合材料的制备及红外性能研究[J]. *光子学报*, 2018, 47(3): 03160021–03160026.
- [20] Liu Qinghai, Liu Haifeng, Dai Xiaodong, et al. Infrared interfering performance of graphene smoke screen [J]. *Infrared Technology*, 2019, 41(11): 1071–1076. (in Chinese)
刘清海, 刘海锋, 代晓东, 等. 石墨烯烟幕红外干扰性能研究[J]. *红外技术*, 2019, 41(11): 1071–1076.
- [21] Wang Xuanyu, Likai. Basic characteristics and aerodynamic parameters of graphene particles[C]//Abstracts of Papers of the 1st Chinese Conference of Aerodynamics, 2018: 100-101. (in Chinese)
王玄玉, 李凯. 石墨烯粒子的基本特性及空气动力学参数[C]//首届中国空气动力学大会论文摘要集, 2018: 100-101.
- [22] Pang Minhui, Wang Xuanyu, Dong Wenjie, et al. Attenuation performance of modified expanded graphite to infrared/millimeter wave [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2014, 37(4): 4–8. (in Chinese)
庞敏晖, 王玄玉, 董文杰, 等. 改性膨胀石墨衰减红外/毫米波性能研究[J]. *兵器材料科学与工程*, 2014, 37(4): 4–8.
- [23] Yao Yongping, Jia Qi. Study on infrared extinction performance of expanded graphite [J]. *Infrared Technology*, 2011, 33(7): 385–388. (in Chinese)
姚永平, 贾其. 膨胀石墨红外消光性能研究[J]. *红外技术*, 2011, 33(7): 385–388.
- [24] Tuminello P S, Arakawa E T, Khare B N, et al. Optical properties of bacillus subtilis spores from 0.2 to 2.5 μm [J]. *Appl Opt*, 1997, 36(13): 2818–2824.
- [25] Li Le, Hu Yihua, Gu Youlin, et al. Infrared extinction

- performance of aspergillus niger spores [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(7): 2175–2179. (in Chinese)
- 李乐, 胡以华, 顾有林, 等. 黑曲霉孢子红外波段消光性能研究[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(7): 2175–2179.
- [26] Gu Youlin, Wang Cheng, Yang Li, et al. Infrared extinction before and after aspergillus niger spores inactivation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 36–42. (in Chinese)
- 顾有林, 王成, 杨丽, 等. 黑曲霉孢子灭活前后红外消光特性[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(1): 36–42.
- [27] Li Le, Hu Yihua, Gu Youlin, et al. Infrared extinction performance of Biological materials [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(11): 3430–3434. (in Chinese)
- 李乐, 胡以华, 顾有林, 等. 生物材料红外波段消光性能分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(11): 3430–3434.
- [28] Jin Liangan, Wang Xiaotong, Fu Jianguo, et al. Study on special foam screen and its multi-band interfering performance [J]. *Acta armamentarii*, 2006, 27(2): 248–251. (in Chinese)
- 金良安, 王孝通, 付建国, 等. 泡沫型干扰幕及其多波段干扰特性研究[J]. *兵工学报*, 2006, 27(2): 248–251.
- [29] Zhao Jun, Pan Gongpei, Chen Xin. Infrared extinction coefficient testing of a novel foams obscuring agent [J]. *Laser & Infrared*, 2007, 37(10): 1062–1066. (in Chinese)
- 赵军, 潘功配, 陈昕. 新型泡沫干扰剂的红外消光系数测试研究[J]. *激光与红外*, 2007, 37(10): 1062–1066.
- [30] Ding Hongxiang, Du Qiang, Yao Qiang, et al. Analysis on field dispersion law of cold smoke type smoke screen agent [J]. *Technology and Economic Guide*, 2018, 26(4): 56. (in Chinese)
- 丁洪翔, 杜强, 姚强, 等. 冷烟型烟幕剂野外分散规律浅析[J]. *科技经济导刊*, 2018, 26(4): 56.
- [31] Wang Hongxia, Tian Tao, Xu Haibuo, et al. Impact of electric conductivity of carbon nanofibers on infrared extinction capability [J]. *Optical Technique*, 2008, 34(S): 272–274. (in Chinese)
- 王红霞, 田涛, 徐海波, 等. 纳米碳纤维导电性对红外消光性能的影响[J]. *光学技术*, 2008, 34(S): 272–274.
- [32] Ren Hui, Qiao Xiaojing, Jiao Qingjie. Study on the aerosol material to countermeasure IR MMW compound guidance weapons [J]. *Modern Defence Technology*, 2002, 36(6): 36–38. (in Chinese)
- 任慧, 乔小晶, 焦清介. 抗红外毫米波双模制导的烟幕剂研究[J]. *现代防御技术*, 2002, 36(6): 36–38.
- [33] Feng Yaou, Zhu Chenguang, Xie Xiao. Study on jamming mechanism and performance of interference materials with one-way transparency [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2016(6): 40–43. (in Chinese)
- 封亚欧, 朱晨光, 谢晓. 单透向烟幕干扰材料及其干扰机理研究[J]. *火工品*, 2016(6): 40–43.
- [34] Wang Hongxia, Zhu Youzhang, Ma Jin, et al. Study on the infrared extinction properties of nano-graphite aggregates [J]. *Journal of Functional Materials*, 2011, 42(4): 616–618. (in Chinese)
- 王红霞, 竹有章, 马进, 等. 纳米石墨凝聚粒子红外消光特性研究[J]. *功能材料*, 2011, 42(4): 616–618.
- [35] Li Yi, Pan Gongpei, Zhou Zunning. A study on the extinction Properties of cluster particles in smokescreen [J]. *Acta Armamentarii*, 2002, 23(2): 184–187. (in Chinese)
- 李毅, 潘功配, 周遵宁. 烟幕凝聚粒子的消光特性研究[J]. *兵工学报*, 2002, 23(2): 184–187.
- [36] Hu Yihua, Huang Baokun, Gu Youlin, et al. Model construction of biological particles' average extinction efficiency factor in far infrared band [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(10): 1004003. (in Chinese)
- 胡以华, 黄宝锟, 顾有林, 等. 生物颗粒远红外波段平均消光效率因子模型构建[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(10): 1004003.
- [37] Liu Gengran, Huang Shunxiang, Hu Fei, et al. Researching into the infrared absorption mechanism of Organic smoke material [J]. *Modern Scientific Instruments*, 2004(3): 48–50. (in Chinese)
- 刘庚冉, 黄顺祥, 胡非, 等. 压片法用于抗坏血酸有机烟幕材料红外吸收特性研究[J]. *现代科学仪器*, 2004(3): 48–50.
- [38] Wang Xuanyu, Pan Gongpei, He Yanlan. Infrared extinction characteristic of nanometer aluminas [J]. *Energetic Materials*, 2005, 13(5): 312–316. (in Chinese)
- 王玄玉, 潘功配, 何艳兰. 几种纳米氧化铝的红外消光性能研究[J]. *含能材料*, 2005, 13(5): 312–316.
- [39] Chen Wang'ai. Application of KBr immersion method in infrared spectra analysis [J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2015, 43(16): 147–149. (in Chinese)
- 陈望爱. 溴化钾浸渍法在红外光谱分析中的应用[J]. *广州化工*, 2015, 43(16): 147–149.
- [40] Xiao Kaitao, Liu Jiping. Study of smoke agent based on copper powder in anti-3-5 μm infrared performance [J]. *Infrared Technology*, 2008, 30(8): 458–461. (in Chinese)
- 肖凯涛, 刘吉平. 铜粉烟幕干扰3-5 μm 红外波段性能测试研究[J]. *红外技术*, 2008, 30(8): 458–461.
- [41] Gu Youlin, Cao Guanghua, Hu Yihua, et al. Measurement of ultraviolet and infrared composite extinction performance of biological materials [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(3): 0321003. (in Chinese)

- 顾有林, 曹光华, 胡以华, 等. 生物材料紫外红外复合消光性能测试[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(3): 0321003.
- [42] Lu Bin, Lv Junwei, Sun Xiaoying. Research on measuring method of smoke extinction efficiency test [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2017, 27(2): 70–73. (in Chinese)
- 陆斌, 吕俊伟, 孙晓颖. 烟幕消光效能试验测量方法研究[J]. 光电技术应用, 2017, 27(2): 70–73.
- [43] Qiao Xiaojing, Feng Changgen, Zhang Tonglai. The extinction of infrared by micro sphere particles having logarithm normal distribution [J]. *Acta Armamentarii*, 2004, 25(2): 175–177. (in Chinese)
- 乔小晶, 冯长根, 张同来. 对数正态分布下壳—核型微球对红外的消光[J]. 兵工学报, 2004, 25(2): 175–177.
- [44] Yuan Jiangtao, Yang Li, Xie Jun, et al. Study on extinction properties of water fog particles in multi-spectrum based on Mie theory [J]. *Optical Technique*, 2007, 32(3): 459–451. (in Chinese)
- 袁江涛, 杨立, 谢骏. 基于Mie理论的水雾粒子多光谱消光特性研究[J]. 光学技术, 2007, 32(3): 459–451.
- [45] Hu xiaochun, Qiao Xiaojing, Li Jiangchun. Extinction of aerosol base on composite spheres in infrared waveband [J]. *Infrared Technology*, 2005, 27(2): 179–183. (in Chinese)
- 胡晓春, 乔小晶, 李江存. 复合微球型气溶胶对红外的消光[J]. 红外技术, 2005, 27(2): 179–183.
- [46] Wang Xuanyu, Pan Gongpei, Liu GengRan. Study on the testing of granularity and calculation of infrared extinction factors of red phosphorus smoke [J]. *China Powder Science and Technology*, 2005, 11(Special): 54–57. (in Chinese)
- 王玄玉, 潘功配, 刘庚冉. 红磷烟幕粒度测试及红外消光因子计算分析[J]. 中国粉体技术, 2005, 11(Special): 54–57.
- [47] Miao Yunkun, Liu Haifeng, Liu Qinghai, et al. Numerical calculation of infrared extinction performances of graphite flakes [J]. *Infrared Technology*, 2015, 37(3): 190–193. (in Chinese)
- 缪云坤, 刘海锋, 刘清海, 等. 鳞片石墨粒子红外消光性能数值计算[J]. 红外技术, 2015, 37(3): 190–193.
- [48] Ma Deyue, Li Xiaoxia, Guo Yuxiang, et al. Complex refractive index and extinction performance of reduced graphite oxide in optical bands [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(12): 1216002. (in Chinese)
- 马德跃, 李晓霞, 郭宇翔, 等. 还原石墨烯光学波段复折射率及消光性能研究[J]. 光子学报, 2017, 46(12): 1216002.
- [49] Qiu Jijin, Zhao Xiaozhe. Jamming effect of smoke screen on infrared-guided anti-ship missile [J]. *Electronics Optics & Control*, 2006, 13(4): 31–33. (in Chinese)
- 邱继进, 赵晓哲. 红外烟幕干扰效果的计算与模拟[J]. 光电与控制, 2006, 13(4): 31–33.
- [50] Liu Xin. Analysis and research on laser smoke jamming based on MATLAB [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2017, 32(1): 86–90. (in Chinese)
- 刘鑫. 基于MATLAB环境的激光烟幕干扰分析与研究[J]. 光电技术应用, 2017, 32(1): 86–90.
- [51] Dai Guanghui, Ren Zhibin. Study of microsphere extinction efficiency by Matlab language computer simulation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(3): 231–234. (in Chinese)
- 代光辉, 任智斌. 采用Matlab语言的计算机仿真微球体消光率特性研究[J]. 红外与激光工程, 2004, 33(3): 231–234.
- [52] Li Yantu, Wang Chaoying, Du Zuojuan, et al. Simulation of electromagnetic scattering of chopped carbon fiber based on FEM [J]. *Computer Integrated Manufacturing System*, 2011, 28(5): 139–144. (in Chinese)
- 黎炎图, 王超英, 杜作娟, 等. 短切碳纤维电磁散射特性仿真研究[J]. 计算机仿真, 2011, 28(5): 139–144.
- [53] Wang Xuanyu. Basis of Pyrotechnic Technology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2017: 104–105. (in Chinese)
- 王玄玉. 烟火技术基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2017: 104–105.
- [54] Ba Shuhong, Chen Yongjin, Sha Yulin, et al. Research progress of solid extinction materials in anti-infrared smokescreen [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2018, 26(4): 364–372. (in Chinese)
- 霸书红, 陈永进, 沙育林, 等. 抗红外烟幕中固体消光材料的研究进展[J]. 含能材料, 2018, 26(4): 364–372.