

文章编号: 1006-9941(2018)04-0364-09

# 抗红外烟幕中固体消光材料的研究进展

霸书红, 陈永进, 沙育林, 蒋大千, 王树涛

(沈阳理工大学 装备工程学院, 辽宁 沈阳 110159)

**摘要:** 开发高效环保型抗红外烟幕已引起了国内外广泛关注,为此,世界各国积极致力于发展低毒固体红外消光材料,现已报道的有金属类、新型碳材料类和抗红外复合材料。本文介绍了固态气溶胶粒子红外消光特性的研究现状,综述了上述三类材料的研究进展,指出了气溶胶粒子的消光特性仿真研究、纳米新型碳材料和金属薄膜复合材料仍是未来重点研究的方向。建议积极关注和探索纳米红外吸波材料、单向吸波材料和金属化生物体红外吸波材料,这些材料有望成为新一代的抗红外烟幕消光材料。附参考文献 63 篇。

**关键词:** 烟幕; 固态气溶胶粒子; 红外消光材料; 环保

**中图分类号:** TJ55; TJ530.3

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2018.04.013

## 1 引言

烟幕技术历史悠久,早在公元 1044 年的《武经总要》中,就记载了形成烟雾遮障敌人视线的烟球<sup>[1]</sup>。抗红外烟幕作为高效价廉、实施简易的无源光电对抗手段之一,可广泛用来干扰红外侦察告警、搜索跟踪及制导的激光和红外成像系统<sup>[2]</sup>,也可发展成为对对方卫星的红外探测实施有效干扰<sup>[3]</sup>。抗红外烟幕一般是在传统烟幕剂基础上添加一些红外活性物质而得到<sup>[4-5]</sup>,按照形成方式,分为热烟幕、冷烟幕和组合烟幕三类<sup>[6]</sup>,其中组合烟幕是前两种形式的组合。目前烟幕中常用抗红外材料主要是金属及其合金粉、有机卤化物、红磷、氧化锌、高氯酸钾、磷酸铵、碳酸镁、氯丁橡胶及碳氟化合物等碳粒源物质,由于这些材料含有多种有机物,其燃烧产物对人类有毒害作用,对环境也会造成严重的污染<sup>[7]</sup>,因此,开发无毒、无刺激、无腐蚀的环保型抗红外烟幕成为该领域近年研究的热点之一。目前世界各国积极致力于发展低毒红外消光材料(其毒性在可以接受范围之内),同时研究红磷替代物,以期获得安全、环境友好型的烟幕剂<sup>[8-9]</sup>。本文重点对固态气溶胶粒子的红外消光特性、低毒固体抗红

外材料的研究现状及固体红外消光材料的发展趋势展开系统的分析和探讨,为环保型抗红外烟幕的深入研究及实际应用奠定基础。

## 2 固态气溶胶粒子的红外消光特性

抗红外烟幕是指由许多固态和液态的微粒悬浮于大气中,形成一种具有特定运动规律的气溶胶体系。其中气溶胶粒子通过对红外辐射的吸收和散射共同作用,实现对红外辐射的消光目的,所以也称为红外消光粒子。国内关于气溶胶粒子抑制红外辐射的研究始于 20 世纪 90 年代初<sup>[10]</sup>,并在坦克部队的烟雾干扰中有了实际应用。相对于紫外和可见光波段,红外波段电磁波的波长更长,气溶胶粒子对红外波段电磁波的作用更加明显,特别是大气中长时间停留直径小于 10  $\mu\text{m}$  的粒子。

气溶胶粒子对红外辐射的吸收截面、散射截面、消光截面、不对称因子及散射相函数等光学特征量是研究气溶胶中红外辐射传输特性的重要参数,也是抗红外烟幕理论设计和光学特性研究的重要基础。为了简化起见,一般情况下人们总是将气溶胶粒子视为球形粒子<sup>[11]</sup>,其单次散射符合 Mie 散射规律。然而气溶胶粒子的实际形状多为非球形或凝聚体,因此,研究非球形或凝聚体粒子的红外光学特性更具实际意义。刘亚峰等<sup>[12]</sup>依据粒子电磁散射理论,利用离散偶极子近似方法对不同形状、不同成分气溶胶粒子的光学特性进行了计算,得到了吸收截面、散射截面、消光截面、不对

收稿日期: 2017-10-27; 修回日期: 2017-12-26

基金项目: 辽宁省兵器科学与技术重点实验室开放基金(4771004kfs04)

作者简介: 霸书红(1970-),男,博士,副教授,从事新型含能材料及光电对抗效应研究。e-mail: shuhongba@163.com

称因子随波长变化的数值。结果显示,气溶胶粒子的光学特性取决于气溶胶粒子的形状、折射率等反映自身特性的参量。黄朝军等<sup>[13]</sup>模拟了由64个球形原始微粒凝聚而成的四种取向气溶胶凝聚粒子,计算了1.06 μm激光入射时上述粒子的单次散射反射率和不对称因子随入射角变化,得出了不同尺寸参数下的气溶胶凝聚粒子散射特点。刘黎平等<sup>[14]</sup>用扩展边界条件法及蒙特卡罗方法对随机取向的非球形气溶胶粒子的衰减、吸收截面、相函数、不对称因子、单次散射反射率等辐射参量进行了计算,研究了形状因子及粒子表面粗糙度对这些参量的影响。结果表明,随机取向的粒子形状对相函数、衰减截面产生较大的影响,但对吸收截面、不对称因子影响较小,用球形粒子代替非球形粒子进行辐射参数化处理将带来一定误差。

抗红外烟幕气溶胶粒子的形状多种多样,粒度分布随时间的变化也很大,对红外辐射的消光特性有很大差别。王红霞等<sup>[15]</sup>以等效粒径为0.1 μm的石墨为例,利用Mie散射理论和离散偶极子近似方法,计算了三种形状粒子对近红外波段入射辐射单次散射的消光参量,得出了透过率与烟幕中粒子形状、粒子数密度、入射角度及烟幕厚度有关,粒子形状越偏离球形,相应透过率越小。Yurkin等<sup>[16]</sup>以椭球和圆柱形的石墨粒子为研究对象,利用离散偶极子近似方法计算了随机取向的椭球和圆柱形烟幕粒子的单次散射参量,基于蒙特卡罗方法建立计算模型,计算了非球形粒子透过率,分析得到了含不同形状气溶胶粒子的烟幕透过率与粒子数密度、烟幕厚度、入射角的相关性。类成新等<sup>[17]</sup>基于团簇-团簇凝聚模型,对由球形原始微粒凝聚而成的烟幕气溶胶凝聚粒子进行模拟,并用离散偶极子近似方法研究其消光特性。得出气溶胶凝聚粒子的消光特性受原始微粒数量以及粒径的影响,气溶胶粒子的凝聚将减弱烟幕的消光性能;当凝聚结构中原始微粒的数目一定时,存在使烟幕消光性能达到最大的原始微粒粒径。李丽芳等<sup>[18]</sup>利用Mie散射理论计算并讨论了三种气溶胶粒子近红外波段的消光、散射、吸收效率因子随尺度参数的变化及红外消光系数随半径和波长的变化,得出在粒子半径和入射波长相近时红外消光系数达到最大,并且粒子半径对红外消光、散射、吸收系数的影响比入射波长更明显。陈宁<sup>[19]</sup>基于Mie理论和T-矩阵法,理论计算了真空中球形及非球形石墨粒子的红外消光特性,当干扰材料体积一定时,微粒形状越趋于针状、片状,表面特征形变程度及粗糙程度愈大,红外消光能力愈强;当入射

辐射波长一定时,干扰材料的复折射率实部和虚部愈大,红外消光性能愈好。程文等<sup>[20]</sup>利用半解析蒙特卡罗方法对红外烟幕干扰效果进行了数值模拟,得出当光子在红外烟幕中传输相同的距离时,光子与红外烟幕气溶胶粒子的碰撞次数越多,衰减系数就越大,随着消光系数的增大和传输距离的增加,多次散射的影响也会增大,最终使红外辐射能量损耗剧烈,很难从中提取出目标的有效信息,从而成为噪声并达到遮蔽目标的作用。高太长等<sup>[21]</sup>将气溶胶粒子视为非球形粒子,并用T矩阵理论对近红外波段的气溶胶粒子进行散射计算,得出其形状因子是不可忽视的元素,进行气溶胶粒子前向体散射计算时,非球形粒子近似成球形粒子带来的误差较小,后向误差仍较大,折射率和数密度的不同,即粒子性质的不同对散射相函数影响较大。

由此可见,气溶胶粒子对红外辐射影响的参数化是一个很复杂的问题,如何建立符合实际情况的模型和仿真计算,仍是抗红外烟幕研究的重点研究方向。

### 3 低毒固体抗红外材料的研究现状

无论是热烟幕还是冷烟幕,选择和制备低毒固体消光材料是实现抗红外烟幕高效和环保的基本要求,也是目前烟幕领域研究的热点问题之一。

#### 3.1 金属类抗红外材料

赖晓霞等<sup>[22]</sup>研究了纳米级和微米级铁原子团簇对近红外激光(波长1.06 μm)和中红外激光(波长10.6 μm)的吸收特性,得出纳米级铁原子团簇材料的红外吸收性能不仅优于微米级铁微粒,而且优于石墨和炭黑。刘香翠等<sup>[23]</sup>研究得出纳米银粉(平均粒径为35 nm)对双波长红外激光系统、红外热像仪均具有显著的干扰作用,在20 m<sup>3</sup>的烟幕箱中喷撒30 g纳米银粉,对近红外和远红外激光的质量消光系数分别为1.833 m<sup>2</sup>·g<sup>-1</sup>和1.474 m<sup>2</sup>·g<sup>-1</sup>,沉降速度为3.031×10<sup>-3</sup> m·s<sup>-1</sup>;对工作波段8~14 μm的红外热像仪,随着银粉的喷撒,红外透过率下降非常迅速,直至靶标图像被完全遮蔽,连续遮蔽时间可达十几分钟,是一种极具潜力的宽波段烟幕干扰材料。尹喜凤等<sup>[24]</sup>以被国外用作装备烟幕干扰弹主装药的铜粉为研究对象,探讨了铜粉粒度、铜含量、添加剂及配方组成和配比等因素对铜粉烟幕红外消光性能的影响(表1)。由表1得出铜含量越高,红外消光性能越好,铜粉粒度接近干扰波长的二分之一时红外消光性能最佳。白林等<sup>[25]</sup>指出了干扰不同波段时铜粉烟幕粒子

直径的分布范围,计算分析得出当铜粉烟幕粒子的直径是干扰波长的0.64倍时,效果最好,且铜粉烟幕红外遮蔽效果不仅优于红磷烟幕,而且遮蔽持续时间更长。刘国生等<sup>[26]</sup>研究了红光铜粉、青红光铜粉和青光铜粉对红外与10.6  $\mu\text{m}$ 激光的衰减能力,得出微米铜粉对红外与10.6  $\mu\text{m}$ 激光均具有明显的衰减效果,其中青光铜粉对红外与激光的质量消光系数最大,浓度为 $2.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的青光铜粉能够完全遮蔽红外热像仪,是一种较好的抗红外与激光干扰材料。肖凯涛等<sup>[27]</sup>研究表明铜粉发烟剂对3~5  $\mu\text{m}$ 中红外波段有良好的消光性能。在 $20 \text{ m}^3$ 烟箱中施放20 g铜粉发烟剂,有效遮蔽时间在3 min以上,相同质量浓度的烟幕在外场红外有效干扰时间在30 s以上。为了改善铜粉易烧结问题及提高铜粉的分散性,阳世清等<sup>[28]</sup>利用纳米 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{SiO}_2$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 包覆铜粉,并加入高氮含能化合物为产气剂,实现了烟幕剂在爆抛后边燃烧边分散铜粉。金属作为抗红外材料具有导电导热性能好、粒径小、耐腐蚀、无磁性、表面光洁、流动性强、在红外波段具有较强的吸收、散射或反射作用等特点,用作抗红外烟幕材料在红外波段有着独特的消光性能。目前金属类抗红外材料的研究大部分集中在铜粉的改性和应用,对于其他金属的报道较少,这可能与金属材料的高密度、高成本和形状难以控制有关。

表1 纳米铜粉对红外辐射的质量消光系数<sup>[24]</sup>

Table 1 The mass extinction coefficients of nano-Cu powder to infrared radiation<sup>[24]</sup>

particle sizes/ $\mu\text{m}$		mass extinction coefficients/ $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$		settling velocity / $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$
$D_{50}$	$D_{90}$	3-5 $\mu\text{m}$	8-2 $\mu\text{m}$	
4.57	10.45	1.7387	1.7894	1.10
7.79	19.58	1.3552	1.3673	2.94
10.64	26.80	0.9134	0.9637	3.34

### 3.2 新型碳材料基抗红外材料

近年来,碳材料基抗红外烟幕研究较多,包括石墨、纳米石墨、炭黑、碳纤维、石墨烯、插层石墨、以及石墨与白炭黑的复合粒子等。缪云坤等<sup>[29]</sup>采用离散偶极子近似(DDA)方法计算了圆形鳞片石墨粒子对红外辐射的消光性能,得出片径3~4  $\mu\text{m}$ 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,且散射作用大于吸收。圆片越薄,消光系数越大,且圆形鳞片石墨粒子的消光性能明显好于对应有效半径的球形粒子。霸书红等<sup>[30]</sup>研究了微粉石墨在燃烧型抗红外烟幕中的应用(图1),得出微粉石墨在

不产生凝聚的条件下,粒径越小,其红外消光效果越好。石墨作为成烟物质用于燃烧型抗红外烟幕时,存在燃烧损失,在配比为零氧平衡的相同烟幕剂配方中,石墨添加量从20%降至5%,用有机物B做可燃物时,石墨燃烧损失从31.6%增至57.6%;用金属C做可燃物时,石墨燃烧损失从44.6%增至80.5%。加入5%炭黑能够有效抑制石墨燃烧和提高烟幕的红外消光能力。万敏等<sup>[31]</sup>以粒径1~10  $\mu\text{m}$ 的超微粉天然鳞片石墨为例,计算分析了红外烟幕在外大气层空间中的运动特性、有效遮蔽时间和范围。通过控制烟幕施放速度,可在约10 min内实现对空间目标的遮蔽需求。王红霞等<sup>[32-33]</sup>对纳米石墨凝聚粒子和纳米石墨椭球粒子的红外消光截面进行了计算,得出在中、远红外区,凝聚粒子和纳米石墨椭球粒子的消光性能均明显好于等体积球粒子,纳米石墨粒子适当凝聚(凝聚粒子数 $N < 50$ )有利于红外消光,最佳消光等效粒径与轴长比和入射波长有关。王红霞等<sup>[34]</sup>指出纳米碳纤维的红外消光能力与入射波长、入射角、纤维几何尺寸密切相关,短波段消光是吸收和散射共同作用的结果,吸收是长波段消光的主要形式,在极远红外波段,纳米碳纤维呈现出Rayleigh散射的特征。保石等<sup>[35]</sup>研究了富碳化合物燃烧形成的炭黑烟幕在中、远红外波段的遮蔽率,测定结果表明,富碳化合物燃烧形成的炭黑烟幕在3~5  $\mu\text{m}$ 和8~12  $\mu\text{m}$ 的遮蔽率均达80%以上,并指出燃烧反应温度和速度是影响炭黑最终生成量的主要因素。李素芳等<sup>[36]</sup>研究的快速爆炸分散石墨烯基烟幕对红外光干扰效显著,获得的烟幕对1.06  $\mu\text{m}$ 激光和8~14  $\mu\text{m}$ 红外波段的平均质量消光系数均在 $2.0 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 以上,石墨烯烟幕粒子的微观结构有利于对红外光的吸收和散射。吴慧等<sup>[37]</sup>通过将氧化石墨烯与纳米 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 复合,采用水合肼原位还原制备了石墨烯基吸波材料,对1.06  $\mu\text{m}$ 红外激光系统,该材料形成的烟幕在15s之后,透过率下降到0;当时间超过250 s时,透过率在5%上下浮动,变化比较平稳。对8~12  $\mu\text{m}$ 波段红外热像仪,在烟幕形成的前10 s衰减率可以达到60%~70%,随着时间的推移,衰减率不断下降,到300 s时,衰减率已经下降到40%左右。王红霞等<sup>[38]</sup>利用大型烟幕箱研究了碳纳米管、纳米碳纤维和纳米石墨对8~12  $\mu\text{m}$ 波段红外图像的遮蔽特性。这几种碳纳米材料由于吸收和散射双重作用,表现为对远红外辐射具有很好的消光作用,质量消光系数最小和最大值分别为 $0.8884 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $2.6226 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ,使用时必须做到有效分散。陈作如等<sup>[39]</sup>和姚永平

等<sup>[40]</sup>都研究了膨胀石墨的红外消光性能,一致认为膨胀石墨比天然鳞片石墨具有更好的红外衰减性能,是一种极具潜力的红外干扰材料。霸书红等<sup>[41]</sup>利用浓硫酸和重铬酸钾为强氧化剂,对2~5 mm 微粉石墨进行了浓硫酸和冰醋酸插层,制备出膨胀容积为7.6~13.6 mL·g<sup>-1</sup>的超细石墨插层化合物。实验得出超细石墨插层化合物在近、中、远红外区的消光能力优于原石墨,尤其在远红外区,遮蔽能力的优势更加明显,与原石墨、市售可膨胀石墨相比,空中飘浮能力大大提高,增大了烟幕剂的成烟时间。通过以上研究发现,纳米级新型碳材料表现为更强的红外消光性能,具有更为广阔的发展前景。

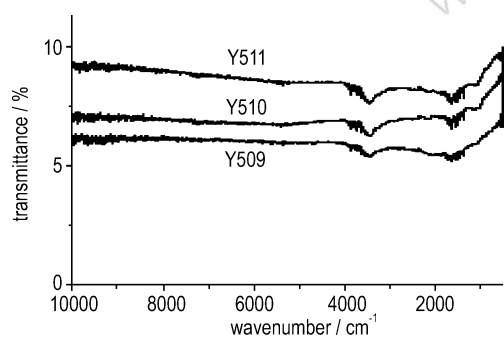


图1 不同粒径石墨的红外消光曲线<sup>[30]</sup>

Fig.1 Infrared extinction curves of graphite with different particle sizes<sup>[30]</sup>

由于新型碳材料具有对红外全波段较好的吸收特性及良好的导电性,并且在一定浓度下,在空气中具有较强的悬浮稳定性,这是该类材料得以成功应用的关键。缺点是该类材料超细化后,易团聚,不易分散,影响到烟幕中新型碳材料粒子的悬浮稳定性及红外吸收特性。

### 3.3 抗红外复合材料

叶明泉等<sup>[42]</sup>制备了石墨/白炭黑复合粒子,在提高粒子的分散性、比表面积及孔容的同时,也增强了悬浮稳定性及红外吸收特性。吴国辉等<sup>[43]</sup>研发了以碳纤维/石墨、碳纤维/竹炭及碳纤维/炭黑等复合材料组成的烟幕剂,该烟幕剂对毫米波(8 mm)及红外辐射(3~5 μm 和 8~12 μm)均具有很好的屏蔽效果。丁楠等<sup>[44-45]</sup>以 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgCO<sub>3</sub>、TiO<sub>2</sub>、CaCO<sub>3</sub>、MgO 等为原料,利用高温烧制的方法,制备了对8~14 μm 红外辐射具有较好遮蔽效果的陶瓷烟幕干扰材料。当该陶瓷烟幕干扰材料的平均粒径为4.2 μm 时,红外遮蔽率不低于85%,同时持续遮蔽时间可达

6 min。任慧等<sup>[46]</sup>在超细碳化硅纤维表面镀金属镍,制备出镀镍陶瓷纤维,红外消光率见表2。刘江海等<sup>[47]</sup>以 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgCO<sub>3</sub>、CaCO<sub>3</sub> 和稀土氧化物等为原料,制备出超细陶瓷粉体烟幕材料,陶瓷粉体的粒径不同,对红外辐射的干扰效果和持续时间差异很大,最终确定超细陶瓷粉体的最佳平均粒径为3.5~5.5 μm。李旺昌等<sup>[48]</sup>制备了掺杂锰、钴、镍的含锌铁磁体/碳复合纳米材料,钴锌铁磁体/碳复合材料在700 °C焙烧后,红外质量消光系数达0.25 m<sup>2</sup>·g<sup>-1</sup>,性能优于其他各类铁磁体/碳复合材料。毕鹏禹等<sup>[49]</sup>采用水热法合成和改性处理,制备出粒径不同的疏水性层状超分子烟幕材料(碳酸根插层水滑石),该材料对3~5 μm 和 8~14 μm 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,且具有不导电、易清洗、绿色环保等优点。张伟<sup>[50]</sup>研究了铜包覆 SiO<sub>2</sub> 和 CaCO<sub>3</sub> 粉体复合材料在发烟剂中的应用,通过对比得知,镀铜碳酸钙的消光性能较好,红外辐射透过率低,且遮蔽时间更长。抗红外复合材料是研制具有宽波段乃至全波段干扰烟幕的有效途径之一,它能够弥补单一材料遮蔽率不高、有效遮蔽时间短、遮蔽范围不宽、悬浮能力差、分散性不好等缺陷,是目前研究的热点方向之一。

表2 红外质量消光系数数据<sup>[46]</sup>

Table 2 Data of infrared mass extinction coefficients<sup>[46]</sup>

materials	transparence/%		extinction ratio/m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup>	
	3-5 μm	8-14 μm	3-5 μm	8-14 μm
ceramic fiber	0.694	0.69	0.770	0.78
coating metal fiber	0.564	1.21	0.607	1.05

## 4 固体红外消光材料的发展趋势

发展无毒、无刺激性、无腐蚀性的环保型抗红外烟幕,将是一个非常有前景和挑战性的课题,制备和开发效能更高、悬浮能力更强的新型抗红外烟幕消光材料,也必将成为该领域研究工作者一个崭新的研究方向。人们在积极探索和研究金属类、新型碳材料和抗红外复合材料的基础上,也应对纳米红外吸波材料、单向吸波材料和金属化生物体红外吸波材料引起足够的重视,这些材料将成为抗红外烟幕新的研究热点,有望成为新一代的抗红外烟幕消光材料。

### 4.1 纳米红外吸波材料

纳米红外吸波材料是指对红外光区某一频段或某

几个频段具有较强吸收的纳米级特殊功能材料。刘香翠等<sup>[51]</sup>测试了纳米 TiN 烟幕对 3~5  $\mu\text{m}$  及 8~12  $\mu\text{m}$  红外的干扰性能, 实验表明, 纳米 TiN 烟幕对各波段红外辐射的干扰效果良好, 质量消光系数均大于  $1 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ , 能够有效遮蔽 3~5  $\mu\text{m}$  和 8~12  $\mu\text{m}$  红外热像仪。王玄玉等<sup>[52]</sup>发现纳米  $\text{Al}_2\text{O}_3$  对红外具有良好的吸收特性, 具体结果见表 3, 尤其在远红外波段表现出很宽的吸收带, 纳米  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的比表面积越大, 红外光的平均透过率越小,  $\gamma$  型纳米氧化铝对红外的消光作用好于  $\alpha$  型, 纳米氧化铝对 8~14  $\mu\text{m}$  红外的消光作用优于 3~5  $\mu\text{m}$ 。经过改性处理的纳米  $\text{Al}_2\text{O}_3$  在远红外波段红外消光作用得到显著增强。张彦奇等<sup>[53]</sup>采用熔融共混法制备了线性低密度聚乙烯/纳米  $\text{SiO}_2$  复合材料并吹制成膜, 纳米  $\text{SiO}_2$  在  $1089 \text{ cm}^{-1}$  处有很强的振动吸收, 另外, 纳米  $\text{SiO}_2$  粒径小, 比表面大, 导致平均配位数下降, 不饱和悬键增多, 键的振动在红外电磁场作用下, 对红外吸收频率有较宽的分布, 所以该复合材料薄膜对 7~11  $\mu\text{m}$  波段的长波红外线具有很好的吸收性能。薛峰等<sup>[54]</sup>通过均匀沉淀法制备出纳米 NiO/玻璃微球复合粒子, 该粒子在近红外和远红外波段均具有良好的红外吸收特性, 尤其  $500 \sim 900 \text{ cm}^{-1}$  的红外吸收峰明显变宽。张彤等<sup>[55]</sup>对 6 种不同空心率的纳米样品进行了红外干扰性能测试, 实验结果表明, 当空心率介于 70%~80% 时, 纳米空壳烟幕因具有较高的比表面积和较低的密度, 呈现优良的红外吸收性能和烟幕分散性能, 空心率为 77.5% 时样品综合性能最优, 对红外和激光最高衰减率分别可达

表 3 纳米  $\text{Al}_2\text{O}_3$  对红外的吸收特性<sup>[52]</sup>

Table 3 Infrared absorption characteristics of nano- $\text{Al}_2\text{O}_3$ <sup>[52]</sup>

No.	average particle sizes/nm	specific surface area / $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$	crystal types	average transmittance	
				3-5 $\mu\text{m}$	8-14 $\mu\text{m}$
1	80	<10	$\alpha$	0.3010	0.3114
2	20	<200	$\gamma$	0.2483	0.2561
3	80	<10	$\alpha$	0.2524	0.1927
4	15-30	11.78	$\alpha$	0.3497	0.1143
5	15-30	189.9	$\gamma$	0.2563	0.0785
6	60-80	1.453	$\alpha$	0.4051	0.0990
7	<50	147.6	$\gamma$	0.3286	0.0448
8	27	35	$\alpha$	0.3324	0.0765
9	27	38	$\gamma$	0.3717	0.0745
10	<150	5-15	$\alpha$	0.3163	0.1139
11	25-35	150-210	$\gamma$	0.3116	0.1162
12	5-15	<150	$\alpha$	0.3597	0.12 12
13	25-35	150-210	$\gamma$	0.2590	0.0938

98%和 100%, 有效遮蔽时间达 20 min 以上。随着纳米技术的不断发展与成熟, 已经可以制备出不同粒径、不同组分、不同结构、不同类型的纳米复合吸波材料, 这些研究成果为探讨纳米材料的红外吸收性能奠定了坚实的基础。由于纳米红外吸波材料具有小尺寸效应、表面效应、量子尺寸效应、宏观量子隧道效应、介电限域效应和宽波段吸波效应等特性, 使其应用前景十分广阔。如何获得多功能纳米红外吸波材料, 以及纳米材料的红外吸收机制等问题仍需深入系统的研究。

#### 4.2 单向红外吸波材料

单向透视烟幕是一个全新的概念, 其理念是指在使用干扰光源照射时, 对方借助红外探测仪无法观察到我方, 我方的前视效果不受影响, 可以容易检测到对方。Embury 等<sup>[56]</sup>发明了单向可见光烟幕, 方法是同时施放两层烟雾, 第一层烟云团生成气溶胶体系能够吸收可见光, 而第二层烟云团则不吸收可见光, 即靠近我方的是吸收云团, 而靠近对方的是发散云团, 其单向性表现为仅从我方向对方观察才能看清。Schneider 等<sup>[57]</sup>设计出遮蔽可见光, 而在红外波段单向透视的复合型烟幕, 研究结果表明分散粒子的粒径在 5~50  $\mu\text{m}$  内特别适合红外光的散射。国内封亚欧<sup>[58]</sup>首先进行单向烟幕材料及其干扰机理的探讨, 提出  $\text{SiO}_2$  可以作为中远距离的单向透射红外烟幕材料, 其衰减特性与粒子的粒径和形状有一定的关系。单向红外吸波材料的研究刚刚起步, 对于一些前向折射率大的干扰材料能否应用到发烟剂、单向烟幕的遮蔽机理及性能试验等问题还不够细致, 需要进一步深入探索。

#### 4.3 金属化生物体红外吸波材料

生物体气溶胶粒子是指在气溶胶中稳定悬浮的有生命的活性成分, 包括空气中的细菌、真菌、病毒、尘螨、花粉、孢子、动植物碎裂分解体等。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。Tuminello 等<sup>[59]</sup>通过测量光通过枯草芽孢杆菌溶液的透过率, 计算出枯草芽孢杆菌 0.2~2.5  $\mu\text{m}$  波段的消光截面。冯明春等<sup>[60]</sup>也计算出波段 6~16  $\mu\text{m}$  枯草芽孢杆菌的质量消光系数。李乐等<sup>[61]</sup>利用 Kramers-Kronig 关系, 计算出黑曲霉孢子在 2.5~15  $\mu\text{m}$  波段的平均质量消光系数为  $0.68 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ , 与石墨、铁粉、铜粉、水相比, 黑曲霉孢子在 2.5~15  $\mu\text{m}$  波段具有良好的消光性能。由于金属颗粒存在密度高、形状难控制等问题, 以玻璃质微珠、粉煤灰或者高分子材料为轻质核芯制备的表面金属化颗粒, 存在制备比较复杂, 且颗粒密度较大、形态种类极少的缺点, 针对

这一现象,采用形态丰富、粒径分布广、培养快捷方便、质量密度低等特点的生物颗粒作为核芯,制备金属化生物体颗粒尤为重要。孙杜鹃等<sup>[62-63]</sup>利用化学镀铜方法制备了表面镀铜的金属化花粉,对金属化花粉的形态、红外与微波特性进行了分析,发现在 4000 ~ 400  $\text{cm}^{-1}$ ,电磁波的透过率均在 25% 以下,甚至达到 2%。得出金属化花粉的金属镀层使颗粒显示出特殊的红外特性,而轻质花粉内核保证了颗粒具有较低的质量密度,具有作为红外消光材料的潜力。采用微生物、花粉、芽孢等生物颗粒作为核芯,研究相应的金属化工艺,有望成为开发新型红外消光材料的新途径。

## 5 结论与展望

红外观瞄探测器材和红外制导武器的迅速发展使各种军事目标的生存和安全受到严重威胁,这既为抗红外烟幕技术研究提供了广阔的发展前景,也对抗红外烟幕的性能和使用提出了更高的要求,目前世界各国积极致力于开展低毒抗红外烟幕技术研究。本文在介绍固态气溶胶粒子红外消光特性研究的基础上,综述了金属材料、新型碳材料和复合材料三类抗红外材料的研究进展,指出了气溶胶粒子的消光特性仿真研究、纳米新型碳材料和金属薄膜复合材料仍是未来重点研究的方向。建议积极开展纳米红外吸波材料、单向吸波材料和金属化生物体红外吸波材料研究,这些有望成为新一代的抗红外烟幕材料。依据电磁波理论、光学原理和计算机仿真技术,努力探索新的干扰机理,自主开发新型抗红外材料仍是迫切需要解决的问题。只有合理地选择抗红外烟幕材料、微粒形状、大小和形成方法,改善烟幕分散效果,提高有效遮蔽时间,大大降低或消除烟幕毒性,改进长储稳定性,才能研制出性能优异的烟幕器材,进而提高光电对抗领域红外波段的防御能力,更好地促进烟幕干扰技术快速发展。

### 参考文献:

- [1] 王兆春. 世界火器史[M]. 北京: 军事科学出版社, 2007.  
WANG Zhao-chun. The firearms history of world[M]. Beijing: Military Science Publishing House, 2007.
- [2] 冯长根, 乔小晶, 李旺昌. 烟幕弹药研究进展[J]. 科技导报, 2014, 32(4/5): 110-115.  
FENG Chang-gen, QIAO Xiao-jing, LI Wang-chang. Research Progress in Smoke Bombs[J]. *Science Technology Review*, 2014, 32(4/5): 110-115.
- [3] 白宏, 张廷玖. 卫星光电无源对抗技术[J]. 现代防御技术, 2011, 39(6): 7-9.  
BAI Hong, ZHANG Ting-jiu. Optoelectronic passive countermeasure technique of satellite[J]. *Modern Defence Technology*,

- 2011, 39(6): 7-9.
- [4] 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.  
WANG Xuan-yu, PAN Gong-pei. New type of anti-infrared smoke agent based upon halogenated organic compound[J]. *Chinese Journal of Energetic Material(Hanneng Cailiao)*, 2005, 13(3): 173-177.
- [5] 豆正伟, 李晓霞, 樊祥. 抗红外/毫米波复合制导的无源干扰技术发展现状[J]. 红外技术, 2009, 31(3): 125-129.  
DOU Zheng-wei, LI Xiao-xia, FAN Xiang. Research and development of passive interfering to IR/MMW compound guidance[J]. *Infrared Technology*, 2009, 31(3): 125-129.
- [6] 时家明, 路远. 红外对抗原理[M]. 北京: 解放军出版社, 2002.  
SHI Jia-ming, LU Yuan. Infrared countermeasure principle[M]. Beijing: Liberation Army Publishing House, 2002.
- [7] Sau C, Lazaroaie C, Zecheru T, et al. Toxicity evaluation of smoke pyrotechnic compositions based on the dimensional analysis of solid combustion products[J]. *Revista de Chimie*, 2011, 62(7): 718-722.
- [8] Hemmilä M, Hihkiö M, Kasanen J P, et al. Cytotoxicity and genotoxicity in vitro and irritation potency in vivo of two red phosphorus-based pyrotechnic smokes[J]. *Mutation Research*, 2010, 701(2): 137-144.
- [9] Zimmermann C, Moeller K. Plastic-bonded pyrotechnical mixture for producing alkali metal chloride or earth alkali metal chloride aerosols as smokescreen: WO, 2011042114[P]. 2011-04-14.
- [10] 刘长城, 雷遂仁. 烟幕红外消光的理论研究[J]. 火箭技术, 1992(2): 1-10.  
LIU Chang-cheng, LEI Sui-ren. Theoretical study on infrared extinction of smoke screen[J]. *Projectile and Rocket Technology*, 1992(2): 1-10.
- [11] Holler S, Auger J C, Stout B, et al. Observations and calculations of light scattering from clusters of spheres[J]. *Appl Opt*, 2000, 39(36): 6873-6887.
- [12] 刘亚峰, 黄朝军, 姜本洪. 红外波段气溶胶粒子光学特性的数值计算[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(6): 1605-1609.  
LIU Ya-eng, HUANG Chao-jun, LOU Ben-zhuo. Numerical calculation of aerosol optical properties based on infrared band[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(6): 1605-1609.
- [13] 黄朝军, 吴振森, 刘亚峰. 1.06  $\mu\text{m}$  激光气溶胶凝聚粒子散射特性[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(9): 2353-2357.  
HUANG Chao-jun, WU Zhen-sen, LIU Ya-feng. Scattering characteristics of aerosol aggregation particles of 1.06  $\mu\text{m}$  [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(9): 2353-2357.
- [14] 刘黎平, 钱永甫. 气溶胶粒子形状对其辐射特性影响的研究[J]. 南京大学学报, 1996, 32(2): 316-321.  
LIU Li-ping, QIAN Yong-fu. Effect of the shape of aerosol on its radiative characteristics[J]. *Journal of Nanjing University*, 1996, 32(2): 316-321.
- [15] 王红霞, 孙红辉, 宋仔标, 等. 基于蒙特卡罗方法的烟幕透过率计算与分析[J]. 红外与激光工程, 2013, 41(5): 1200-1205.  
WANG Hong-xia, SUN Hong-hui, SONG Zi-biao, et al. Numerical calculation and analysis of transmittance of smoke screen based on Monte Carlo method[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 41(5): 1200-1205.
- [16] Yurkin M A, Hoekstra A G. The discrete dipole approximation: an overview and recent developments[J]. *J Quant Spectrosc Radiat Transf*, 2007, 106: 558-589.
- [17] 类成新, 吴振森. 随机取向烟幕凝聚粒子的消光特性[J]. 计算物

- 理, 2010, (4): 593-597.
- LEI Cheng-xin, WU Zhen-sen. The extinction properties of cluster particles in random orientation of smoke[J]. *Chinese Journal of Computational Physics*, 2010, (4): 593-597.
- [18] 李丽芳, 张记龙, 李晓, 等. 近红外波段气溶胶的消光特性研究[J]. *激光与红外*, 2013, 43(1): 24-28.
- LI Li-fang, ZHANG Ji-long, LI Xiao, et al. Study on extinction characteristics of the aerosol in near-infrared bands[J]. *Laser and Infrared*, 2013, 43(1): 24-28.
- [19] 陈宁. 真空中红外干扰材料的消光性能及动力学特性研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
- CHEN Ning. Research on extinction performance and dynamics properties of IR interference Materials in vacuum[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008.
- [20] 程文, 李俊山, 余宁. 红外辐射在烟幕中的蒙特卡洛模拟[J]. *红外技术*, 2010, 32(11): 672-676.
- CHENG Wen, LI Jun-shan, YU Ning, et al. Monte carlo simulation of infrared radiation through smoke screen[J]. *Infrared Technology*, 2010, 32(11): 672-676.
- [21] 高太长, 刘磊, 李浩. 近红外波段气溶胶粒子形状和性质对散射特性的影响[J]. *解放军理工大学学报*, 2007, 8(3): 302-306.
- GAO Tai-chang, LIU Lei, LI Hao. Effect of shape and character of aerosol on its near-infrared scattering characteristics[J]. *Journal of PLA University of Science and Technology*, 2007, 8(3): 302-306.
- [22] 赖晓霞, 宋定熙. 铁原子团簇对红外激光吸收特性的实验研究[J]. *四川大学学报*, 1997, 34(6): 767-770.
- LAI Xiao-xia, SONG Ding-xi. The experiment study of absorbent properties of Fe clusters to CE IR lasers[J]. *Journal of Sichuan University*, 1997, 34(6): 767-770.
- [23] 刘香翠, 郑卫平. 纳米银粉的红外消光特性研究[J]. *红外技术*, 2008, 30(5): 301-304.
- LIU Xiang-cui, ZHENG Wei-ping. Study on IR Extinction Characteristic of Nano-Ag Powder[J]. *Infrared Technology*, 2008, 30(5): 301-304.
- [24] 尹喜凤, 陈于忠, 陈宏达, 等. 铜基红外干扰发烟剂性能影响因素[J]. *火工品*, 2003(4): 5-9.
- YIN Xi-feng, CHEN Yu-zhong, CHEN Hong-da, et al. Study on the affecting factors on the performance of smoke agent based on copper powder[J]. *Initiators and Pyrotechnics*, 2003(4): 5-9.
- [25] 白林, 李宇, 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.
- BAI Lin, LI Ning, GUO Yong-li. Extinction characteristic of the copper powder smoke screen and the comparative trial of the infrared[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2009, 29(5): 161-163.
- [26] 刘国生, 关华, 吕惠平, 等. 微米铜粉对红外、10.6 $\mu\text{m}$  激光的衰减性能研究[J]. *激光与红外*, 2009, 39(6): 598-601.
- LIU Guo-sheng, GUAN Hua, LV Hui-ping, et al. Study on attenuation characteristic of micron-copper powders to IR and 10.6  $\mu\text{m}$  laser[J]. *Laser and Infrared*, 2009, 39(6): 598-601.
- [27] 肖凯涛, 刘吉平. 铜粉烟幕干扰 3-5  $\mu\text{m}$  红外波段性能测试研究[J]. *红外技术*, 2008, 30(8): 458-461.
- XIAO Kai-tao, LIU Ji-ping. Study of smoke agent based on copper powder in anti-3-5  $\mu\text{m}$  infrared performance[J]. *Infrared Technology*, 2008, 30(8): 458-461.
- [28] 阳世清, 徐松林, 岳守体, 等. 含高氮化合物的铜基红外干扰烟幕剂研究[J]. *光电技术应用*, 2006, 21(4): 22-26.
- YANG Shi-qing, XU Song-lin, YUE Shou-ti, et al. Study on the IR interfering smoke agent based on copper powder and high nitrogen energetic materials[J]. *Electro-optic Technology Application*, 2006, 21(4): 22-26.
- [29] 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.
- MIU Yun-kun, LIU Hai-feng, LIU Qing-hai, et al. Numerical calculation of infrared extinction performances of graphite flakes[J]. *Infrared Technology*, 2015, 37(3): 190-193.
- [30] 霸书红, 王乃岩. 微粉石墨在燃烧型抗红外烟幕中的应用[J]. *含能材料*, 2008, 16(5): 592-594.
- BA Shu-hong, WANG Nai-yan. Application of tiny graphite powder in combustible anti-infrared smoke screen[J]. *Chinese Journal of Energetic Material(Hanneng Cailiao)*, 2008, 16(5): 592-594.
- [31] 万敏, 冷杰, 邹凯, 等. 外大气层空间红外烟幕运动特性和遮蔽特性[J]. *强激光与粒子束*, 2008, 20(5): 734-738.
- WAN Min, LENG Jie, ZOU Kai, et al. Motional characteristics and obscuration effect of infrared smoke screen in exoatmospheric space[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(5): 734-738.
- [32] 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): 616-619.
- WANG Hong-xia, ZHU You-zhang, MA Jin, et al. Study on the infrared extinction properties of nano-graphite aggregate[J]. *Journal of Functional Material*, 2011, 42(4): 616-619.
- [33] 王红霞, 马进, 周战荣, 等. 随机取向纳米石墨椭球粒子的红外消光特性[J]. *光散射学报*, 2010, 22(4): 339-344.
- WANG Hong-xia, MA Jin, ZHOU Zhan-rong, et al. Infrared extinction properties of randomly oriented nano-graphite ellipsoid particles[J]. *The Journal of Light Scattering*, 2010, 22(4): 339-344.
- [34] 王红霞, 周战荣, 张清华, 等. 纳米碳纤维红外消光数值计算[J]. *物理学报*, 2010, 59(9): 6111-6117.
- WANG Hong-xia, ZHOU Zhan-rong, ZHANG Qing-hua, et al. Numerical calculation of infrared extinction for carbon nanofibers[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(9): 6111-6117.
- [35] 保石, 周冶, 张紫浩. 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): 85-88.
- BAO Shi, ZHOU Ye, ZHANG Zi-hao. Research on infrared smoke obscuring performance of burnable carbon black[J]. *Electro-optic Technology Application*, 2013, 28(5): 85-88.
- [36] 李素芳, 查文珂, 方建军, 等. 石墨烟幕红外激光消光性能研究[J]. *红外技术*, 2010, 32(6): 366-370.
- LI Su-fang, ZHA Wen-ke, FANG Jian-jun, et al. Extinction characteristic of graphene smoke to infrared and laser wave[J]. *Infrared Technology*, 2010, 32(6): 366-370.
- [37] 吴慧, 马拥军, 朱东升, 等. 石墨烯基纳米红外吸波材料的制备及消光性能研究[J]. *红外技术*, 2013, 35(4): 242-246.
- WU Hui, MA Yong-jun, ZHU Dong-sheng, et al. Research on preparation and extinction characteristic of graphene-based[J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(4): 242-246.
- [38] 王红霞, 刘代志, 宋子彪. 碳纳米材料红外图像遮蔽特性研究[J]. *含能材料*, 2008, 16(5): 588-593.
- WANG Hong-xia, LIU Dai-zhi, SONG Zi-biao. Infrared images shielded characteristics of carbon nano-materials[J]. *Chinese Journal of Energetic Material(Hanneng Cailiao)*, 2008, 16(5): 588-593.
- [39] 陈作如, 万纯, 李有富. 膨胀石墨蠕虫的红外衰减性能研究[J]. *材料科学与工程学报*, 2005, 23(1): 42-44.
- CHEN Zuo-ru, WAN Chun, LI You-fu. Study on infrared attenua-



- tion characteristic of expanded graphite worm[J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2005, 23(1): 42-44.
- [40] 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.  
YAO Yong-ping, JIA Qi. Study on infrared extinction performance of expanded graphite[J]. *Infrared Technology*, 2011, 33(7): 385-388.
- [41] 霸书红, 张进, 宋东明, 等. 超细石墨插层化合物的制备及性能测试[J]. *火工品*, 2004(1): 14-16.  
BA Shu-hong, ZHANG Jin, SONG Dong-ming, et al. The preparation and property determination of super power of GIC[J]. *Initiators and Pyrotechnics*, 2004(1): 14-16.
- [42] 叶明泉, 韩爱军, 宋洪昌, 等. 气溶胶用石墨/白炭黑超细复合粒子的制备及表征[J]. *化学世界*, 2004, (3): 120-123.  
YE Ming-quan, HAN Ai-jun, SONG Hong-chang, et al. Preparation and characterization of ultrafine graphite/silica aerogel composite particles[J]. *The Chemical World*, 2004, (3): 120-123.
- [43] 吴国辉, 陈保惠, 龚彦彰, 等. 具有多频谱烟幕遮蔽的材料及其制造方法: 中国台湾, 200906932[P]. 2009-02-16.
- [44] 丁楠, 张其土, 王庭慰. 红外烟幕干扰材料的制备与性能研究[J]. *光学技术*, 2005, 31(3): 452-454.  
DING Nan, ZHANG Qi-tu, WANG Ting-wei. Preparation and properties of IR aerosol material[J]. *Optical Technique*, 2005, 31(3): 452-454.
- [45] 丁楠, 张其土. 抗红外/激光双模烟幕干扰材料的研究[J]. *材料科学与工程学报*, 2006, 24(5): 750-753.  
DING Nan, ZHANG Qi-tu. Study on anti-IR laser compound smoke interfering material[J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2006, 24(5): 750-753.
- [46] 任慧, 焦清介, 康飞宇, 等. 镀镍碳化硅纤维红外消光率研究[J]. *含能材料*, 2007, 15(2): 151-154.  
REN Hui, JIAO Qing-jie, KANG Fei-yu, et al. Infrared extinction of super-fine ceramic Fiber coated nickel[J]. *Chinese Journal of Energetic Material(Hanneng Cailiao)*, 2007, 15(2): 151-154.
- [47] 刘江海, 张良, 代晓东, 等. 超细陶瓷粉体红外干扰性能研究[J]. *火工品*, 2011, (2): 10-14.  
LIU Jiang-hai, ZHANG Liang, DAI Xiao-dong, et al. Research on the infrared jamming performance of ultrafine ceramic powders[J]. *Initiators and Pyrotechnics*, 2011, (2): 10-14.
- [48] 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): 604-608.  
LI Wang-chang, LI Ming-yu, WANG Shu-man, et al. IR jamming of the ferromagnet/carbon composite[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2013, 39(4): 604-608.
- [49] 毕鹏禹, 吴昱, 聂风泉, 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.  
BI Peng-yu, WU Yu, NIE Feng-quan, et al. Study on the infrared interference property of layered Supramolecular smoke material[J]. *Initiators and Pyrotechnics*, 2015, (2): 1-5.
- [50] 张伟.  $\text{CaCO}_3/\text{SiO}_2$  粉体化学镀铜工艺及遮蔽性能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.  
ZHANG Wei. The process of electroless copper plating on  $\text{CaCO}_3/\text{SiO}_2$  powder and study on attenuation effect[D]. Nanjing: Nanjing University and Technology, 2016.
- [51] 刘香翠, 程翔, 张良, 等. 纳米 TiN 烟幕干扰激光和红外性能研究[J]. *激光与红外*, 2011, 41(8): 920-924.  
LIU Xiang-cui, CHENG Xiang, ZHANG Liang, et al. Jamming effect of nano-TiN smoke on laser and infrared[J]. *Laser and Infrared*, 2011, 41(8): 920-924.
- [52] 王玄玉, 潘功配, 何艳兰. 压片法测试纳米氧化铝的红外消光特性[J]. *光谱实验室*, 2005, 22(3): 450-452.  
WANG Xuan-yu, PAN Gong-pei, HE Yan-lan. Characteristics of infrared extinction of nanometer alumina by pressing potassium bromide troche[J]. *Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory*, 2005, 22(3): 450-452.
- [53] 张彦奇, 华幼卿. LLDPE/纳米  $\text{SiO}_2$  膜的光学特性[J]. *应用化学*, 2003, 20(7): 638-642.  
ZHANG Yan-qi, HUA You-qing. Optical behaviour of LLDPE/nano-silica film[J]. *Chinese Journal of applied chemistry*, 2003, 20(7): 638-642.
- [54] 薛峰, 强春媚, 于美, 等. 纳米氧化亚镍/玻璃微球复合粒子的制备及表征[J]. *复合材料学报*, 2008, 25(1): 101-104.  
XUE Feng, QIANG Chun-mei, YU Mei, et al. Prepared and characterization of nano-NiO/hollow glass spheres composite particles[J]. *Acta Materials Composite Sinica*, 2008, 25(1): 101-104.
- [55] 张彤, 代晓东, 任丽娜, 等. 纳米空心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): 93-97.  
ZHANG Tong, DAI Xiao-dong, REN Li-na, et al. Hollow rate and infrared jamming performance of a nanoshell material[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(S1): 93-97.
- [56] Embury Jr. Method for creating a one way visible screening smoke: US, US5682010[P]. 1997-3-27.
- [57] Schneider J, Koch EC, Dochnahl A. Method of producing a screening smoke with one-way transparency in the infrared spectrum: US, US6484640[P], 2002-11-26.
- [58] 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.  
FENG Ya-ou, ZHU Chen-guang, XIE Xiao. Study on jamming mechanism and performance of interference materials with one-way transparency[J]. *Initiators and Pyrotechnics*, 2016, (6): 40-43.
- [59] Tuminello P S, Arakawa E T, Khare B N, et al. Optical properties of bacillus subtilis spores from 0.2-2.5  $\mu\text{m}$ [J]. *Appl Opt*, 1957, 36(3): 2818-2824.
- [60] 冯明春, 徐亮, 高闽光, 等. 傅里叶红外光谱仪对枯草芽孢杆菌的光学特性研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(12): 3193-3196.
- [61] 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.  
LI Le, HU Yi-hua, GU You-lin, et al. Infrared extinction performance of aspergillus niger spores[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(7): 2175-2179.
- [62] 孙杜鹃, 胡以华, 李乐. 金属化花粉红外、微波特性测试与分析[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(9): 2531-2535.  
SUN Du-juan, HU Yi-hua, LI Le. Test and analysis of infrared and microwave characteristics of metallic farinas[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(9): 2531-2535.
- [63] 孙杜鹃, 胡以华, 顾有林, 等. 金属化生物颗粒的制备与性能测试[J]. *光子学报*, 2013, 42(5): 555-558.  
SUN Du-juan, HU Yi-hua, GU You-lin, et al. Preparation and performance testing of metallic biologic particle[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(5): 555-558.



## Research Progress of Solid Extinction Materials in Anti-infrared Smokescreen

BA Shu-hong, CHEN Yong-jin, SHA Yu-lin, JIANG Da-qian, WANG Shu-tao

(School of Equipment Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

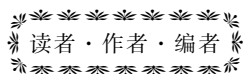
**Abstract:** The development of high efficiency and environmental protection type anti-infrared smokescreen has attracted wide attention at home and abroad. For this reason, all countries in the world actively develop low-toxic solid infrared extinction materials. Now metals, new carbon materials and anti-infrared composites are reported. In this paper, the research status of infrared extinction characteristics of solid aerosol particles is introduced. The research progress of the above-mentioned three kinds of materials is reviewed. It is pointed out that simulation study on extinction characteristics of aerosol particles, nano carbon materials and metal film composites are still the key research directions in the future. It is suggested that nano infrared absorbing materials, absorbing materials with one-way transparency and metallized biosome infrared absorbing materials should be actively focused on and explored. These materials are expected to become a new generation of anti-infrared materials in smokescreen. 63 references are attached.

**Key words:** smokescreen; solid aerosol particles; infrared extinction materials; environmental protection

**CLC number:** TJ55; TJ530.3

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2018.04.013



### 《含能材料》“损伤与点火”专栏征稿

含能材料的损伤特征与点火过程有密切的联系,炸药、推进剂的内部损伤及其对力学特性、安全特性和点火行为的影响规律受到了含能材料学界的高度重视,为推动这一重要研究方向的学术交流,本刊特设立“损伤与点火”专栏。专栏主要征集炸药、推进剂等含能材料的损伤观测与多尺度表征技术、含损伤的本构方程、准静态与动态损伤演化规律、损伤与破坏的宏(细)观模式、损伤对起爆、爆炸、爆轰成长以及非冲击起爆行为的影响等方向的原创性研究论文。来稿请注明“损伤与点火”专栏。