

文章编号: 1003-1480 (2022) 03-0027-05

一种液态干扰材料红外衰减特性实验研究

罗俊潇, 陈亮, 张良, 史卫东, 方国峰

(军事科学院防化研究院, 北京, 102205)

摘要: 在丙二醇水溶液中添加 TiO₂ 纳米颗粒和表面活性剂, 制备成相对均匀稳定的多相体系, 经超声空气雾化形成微细气溶胶, 通过实验研究了添加不同质量分数纳米 TiO₂ 和纳米石墨片对红外衰减特性的影响规律。结果表明: 相对于基液, 添加纳米 TiO₂ 能够有效降低红外辐射透过率, 添加 5.0 wt% TiO₂ 纳米颗粒后 3~5 μm 红外透过率降低 39.5%, 8~14 μm 红外透过率降低 25.6%; 在同样的颗粒质量浓度和喷雾压力下, 相对于添加 TiO₂ 纳米颗粒, 添加纳米石墨片形成气溶胶的红外衰减率在 3~5 μm 波段有所降低, 在 8~14 μm 波段基本一致。

关键词: 液态干扰材料; 纳米颗粒; 超声空气雾化; 红外衰减特性

中图分类号: TQ567.5 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2022.03.007

Experimental Study on Infrared Attenuation Characteristics of A Liquid Interference Material

LUO Jun-xiao, CHEN Liang, ZHANG Liang, SHI Wei-dong, FANG Guo-feng

(Research of Chemical Defense Academy of Military Science, Beijing, 102205)

Abstract: A relatively uniform and stable multiphase system was prepared by adding titanium dioxide nanoparticles and surfactants to propylene glycol aqueous solution, then fine aerosols were formed by ultrasonic air atomization. The effects of adding different mass fractions of nano titanium dioxide and nano graphite on the infrared attenuation characteristics were studied experimentally. The results show that compared with the base solution, the addition of nano titanium dioxide can effectively reduce the infrared radiation transmittance, the addition of 5.0 wt% titanium dioxide nanoparticles can reduce the infrared transmittance of 3~5 microns by 39.5% and 8~14 microns by 25.6%. At the same particle mass concentration and spray pressure, the IR attenuation rate of aerosol formed by adding graphite nanoflakes is reduced in the 3~5 μm band and basically unchanged in the 8~14 μm band relative to adding TiO₂ nanoparticles.

Key words: Liquid interfering materials; Nanoparticles; Ultrasonic air atomization; Infrared attenuation characteristics

红外干扰材料是烟幕技术发展的基础和热点。近年来, 在传统石墨微粉干扰材料的基础上, 发展出石墨烯复合材料^[1]、超细陶瓷粉体^[2]、纳米空壳材料^[3]、层状超分子材料^[4]等新型粉体红外干扰材料, 而对于液体红外干扰材料的研究相对较少。当红外干扰材料应用于发烟机施放时, 粉体材料存储、输送、施放装置较为复杂, 不利于装备向小型化模块化发展, 而液体成烟可采用成熟高效的雾化技术, 因此发展新型液

体红外干扰材料很有意义。曹传新^[5]和陈昕^[6]分别研究了四氯化钛基液体发烟剂和四氯化钛/氨水液体红外发烟剂的红外干扰特性。

前期研究发现, 将传统的微米级粉体干扰材料与液体简单混合时, 由于悬浮稳定性差、雾化粒径偏大等原因, 导致成烟和干扰效果反而下降。而在液体干扰材料中添加纳米级颗粒则可避免这些问题, 从而产生更好的成烟和干扰效果。TiO₂ 纳米颗粒在纳米流体

收稿日期: 2022-01-25

作者简介: 罗俊潇(1997-), 男, 在读硕士研究生, 主要从事纳米流体干扰材料雾化特性研究。

通讯作者: 陈亮(1981-), 男, 副研究员, 主要从事烟幕无源干扰技术研究。

中应用广泛^[7-9]，具有一定的红外干扰性能，是一种急性吸入毒性很小的烟幕材料^[10]。纳米石墨片二维材料具有红外干扰性能优良、悬浮性相对较好的特点。1,2-丙二醇是一种成烟性能良好的发烟剂，无毒，易于调节基液粘度。本研究在1,2-丙二醇水溶液中添加纳米颗粒和表面活性剂，通过超声分散制备成液态复合干扰材料；设计超声空气雾化装置，将液态复合干扰材料雾化成微细复合气溶胶，并采用液/气压力调节雾滴粒径分布，实验研究了添加TiO₂纳米颗粒及纳米石墨片对红外干扰特性的影响规律，为液态红外干扰发烟剂设计提供一种新的思路。

1 实验

1.1 液态复合干扰材料制备

基础液体为60wt% 1,2-丙二醇-水溶液；TiO₂纳米颗粒有2种晶型（锐钛晶型、亲水型）和3种粒径（5~10nm、10~25nm和60nm）；纳米石墨片厚度小于40nm，片径为3~6μm。采用阴离子表面活性剂十二烷基苯磺酸钠（SDBS）来改进混合液稳定性和雾化性能。

液态复合干扰材料的制备过程为：（1）通过称量和机械搅拌制备基础液体；（2）添加1.0wt% SDBS活性剂并搅拌均匀；（3）按照设定浓度添加纳米颗粒，并机械搅拌10min；（4）采用超声分散仪（宁波新芝2400F型）振荡分散40~60min，设置功率1500W，频率20kHz，采用水浴控温20℃。

采用原子力显微镜（NT-MDT型）对制备的复合干扰材料液膜进行微观形貌分析，扫描结果如图1所示。由图1可知，纳米TiO₂分散性良好，平均粒径小于100nm。

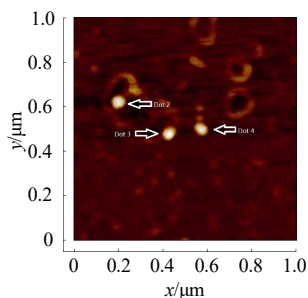


图1 复合干扰材料液膜样品的原子力显微镜扫描图

Fig.1 AFM image of liquid film of the composite interference material

1.2 雾化装置

液态复合材料通过超声波空气雾化喷嘴形成烟幕气溶胶，该喷嘴采用横向气流初级破碎和超声二次雾化，可形成10μm以下的微细雾滴。喷雾气源采用高压钢瓶和两级减压实现0~1MPa气压调节，液体通过压力桶、电磁流量计和电磁阀实现储存、输送和流量测控。结合前期喷雾粒度测试结果，在液体喷射压力为0.08MPa、气流压力为0.55MPa条件下，各浓度样品的雾化效果较好，索特平均粒径为10μm左右；当气流压力降低至0.35MPa时，索特平均粒径增大到25μm左右。

1.3 红外衰减特性测试系统

测试环境为20m³烟幕箱，测试仪器主要有红外热像仪（3~5μm、8~14μm）、SR5000N光谱辐射度计、黑体。其中，热像仪黑体温度为50℃，光谱辐射度计黑体温度为600℃。

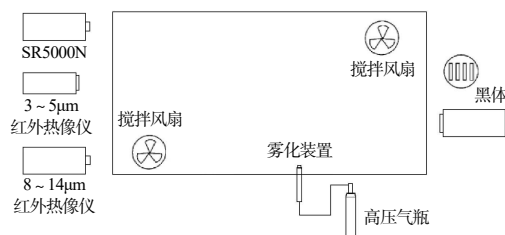


图2 20m³烟幕箱测试系统

Fig.2 20m³ Smoke box test system

2 结果与分析

2.1 添加纳米颗粒对红外辐射衰减特性的影响

采用5~10nm的TiO₂纳米颗粒，测试添加不同质量分数的纳米颗粒对红外辐射衰减特性的影响。在液体喷射压力0.08MPa、气流压力0.55MPa条件下，分别使用60wt%基液及2.0wt% TiO₂悬浊液、5.0wt% TiO₂悬浊液、10.0wt% TiO₂悬浊液，持续喷雾10s，双喷头累积流量约70mL，对3~5μm、8~14μm波段红外辐射透过率进行测试，测试结果如图3所示。其中，0~10s为背景数据，10s时开始喷雾，35s左右在烟箱内形成较为稳定的气溶胶，以下分析均针对气溶胶稳定阶段。

由图3可知：喷雾后30s时，基液对3~5μm红外衰减率约为85.6%，TiO₂悬浊液对3~5μm红外衰

减率大于 90.0%；基液对 8~14 μm 红外衰减率约为 71.6%，TiO₂ 悬浊液对 8~14 μm 红外衰减率大于 80.0%。由此可见，所制备的液态干扰材料经雾化可形成稳定的气溶胶，对红外辐射有较好的衰减作用。

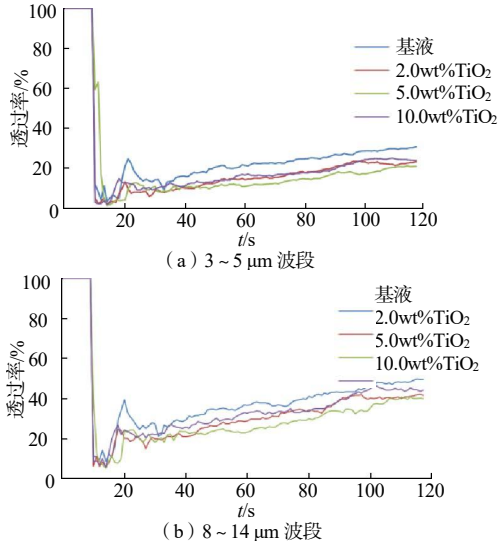


图3 不同质量分数纳米TiO₂悬浊液气溶胶红外透过率
Fig.3 Infrared transmittance of nano-TiO₂ suspension aerosol with different mass fraction

添加纳米 TiO₂ 对基础液体红外透过率的降低率如图 4 所示。

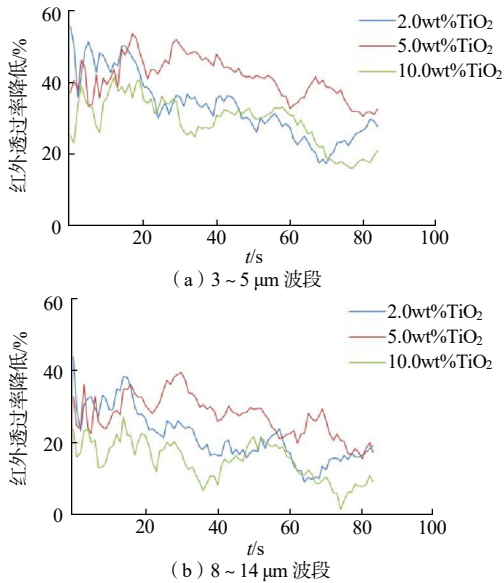


图4 添加纳米TiO₂对基础液体红外透过率的降低率
Fig.4 Reduction of infrared transmittance of base liquid by adding nano-TiO₂

由图 4 可知，相比于基液，2.0wt%、5.0 wt%、10.0 wt% TiO₂ 的悬浊液对 3~5 μm 红外透过率降幅均值分别为 28.3%、39.5%和 24.3%；对 8~14 μm 波段透过率降幅均值分别为 17.5%、25.6%和 10.8%。这是

因为添加纳米颗粒改变了液体材料的电磁特性，增大雾滴对红外辐射的散射和消光特性，从而有效降低红外透过率。对比不同质量分数悬浊液的红外衰减数据发现，当纳米颗粒质量分数增加时，红外衰减能力先增加后减小。分析认为，添加纳米颗粒改变了悬浊液的表面张力、粘度等流体特性，进而影响雾化性能。当颗粒浓度较高时，悬浊液稳定性和雾化性能变差，雾滴增大且留空时间变短，导致红外衰减特性变差。

喷雾在 30s 和 60s 时不同波长的透过率如图 5 所示。由图 5 可知，复合气溶胶在 3~5 μm 波段衰减率大于 8~14 μm 波段衰减率，这说明 TiO₂ 纳米颗粒悬浊液雾滴对红外衰减作用以散射为主，雾滴粒径分布对衰减效果影响较大。

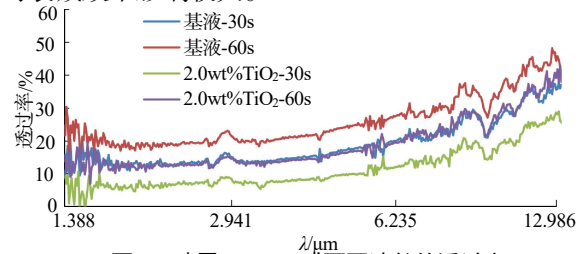


图5 喷雾 30s/60s 时不同波长的透过率
Fig.5 Transmittance of 30s/60s at different wavelengths

2.2 雾化气流压力对红外衰减特性的影响

添加 5~10nmTiO₂ 颗粒，在液体喷射压力 0.08 MPa、气流压力分别为 0.55MPa 和 0.35MPa 条件下，对 10.0 wt% TiO₂ 悬浊液进行雾化，测得红外透过率如图 6 所示。

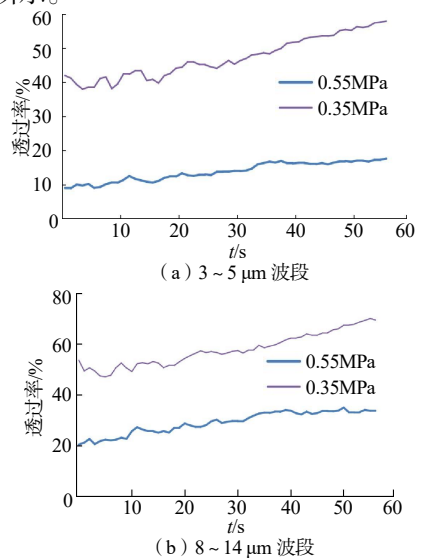


图6 不同雾化气流压力条件的红外透过率
Fig.6 Infrared transmittance under different atomization gas flow pressure

由图6可知,气流压力对所形成气溶胶的红外衰减特性有较大影响。气流压力减小,气溶胶雾滴平均粒径增大,红外衰减率降低。说明气溶胶雾滴粒径分布是影响红外衰减特性的重要因素之一,减小雾滴粒径尺度可提高红外衰减性能。

2.3 添加不同颗粒对红外衰减特性的影响

对10.0 wt%纳米石墨片悬浊液和10.0 wt% 纳米TiO₂ (粒径5~10nm)悬浊液进行雾化,测得红外透过率如图7所示。由图7可知,在3~5 μm 波段,TiO₂悬浊液红外衰减率优于纳米石墨悬浊液,在8~14 μm 波段,两者红外衰减率基本一致。

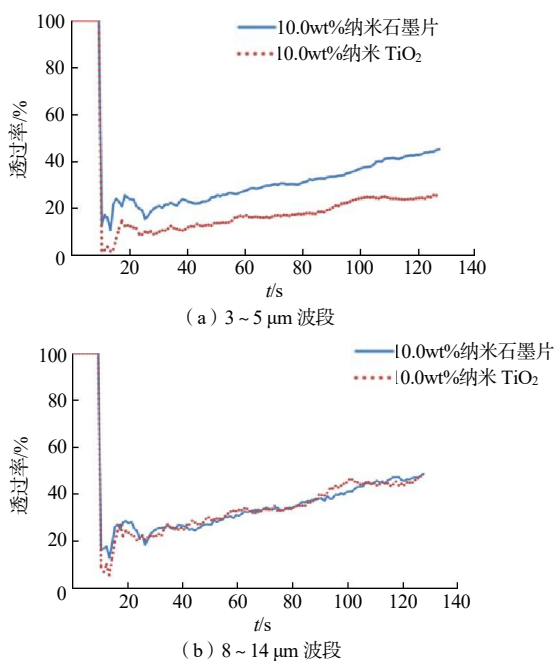


图7 添加不同颗粒红外透过率

Fig.7 Infrared transmittance of adding different particles

一般认为,纳米石墨材料对红外辐射具有较强的吸收作用,其粉末气溶胶的红外衰减性能优于纳米TiO₂,但是其悬浊液气溶胶的红外衰减率却低于(3~5 μm)或接近于(8~14 μm)纳米TiO₂。这是因为纳米石墨的片径为微米级,其悬浊液雾化所形成雾滴粒径较大,难以获得有利于红外衰减的粒径分布范围,而纳米TiO₂悬浊液可形成粒径很小的雾滴,通过米氏散射获得较好的红外衰减性能;在雾化后,纳米TiO₂复合雾滴留空性能较好,而雾滴与微米尺度片状石墨的结合体更易沉降。因此,添加颗粒的尺度及形貌是设计液态干扰材料需要考虑的重要因素。

2.4 纳米颗粒粒径对红外衰减特性的影响

在液体喷射压力为0.08MPa、气流压力为0.55MPa条件下,采用单喷头对5.0wt% 纳米TiO₂悬浊液开展喷雾实验,测试纳米TiO₂颗粒粒径分别为5~10nm、10~25nm和60nm时的红外透过率,测试结果如图8所示。由图8可知,在所测试的纳米颗粒粒径尺度范围内,随着粒径减小,红外衰减率呈上升趋势。其原因有二:一是纳米颗粒越小,越有利于纳米流体的雾化分散;二是在同等质量浓度下,粒径越小粒子数越多,受溶剂化层效应影响^[1],纳米颗粒的等效体积分数越大,从而导致消光性能提升。

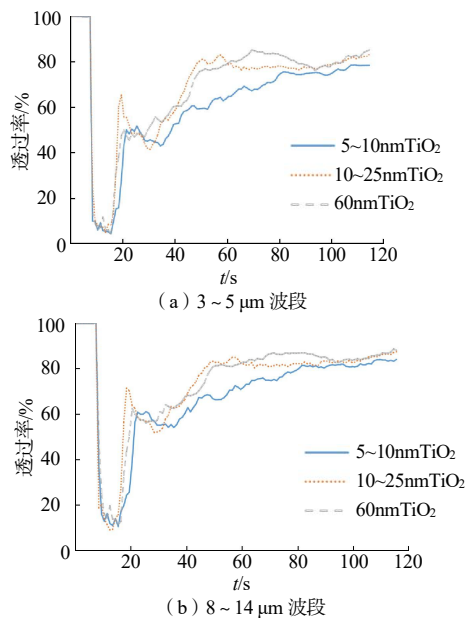


图8 不同颗粒粒径纳米流体气溶胶的红外透过率

Fig.8 Infrared transmittance of aerosol of nanofluid with different particle sizes

2.5 不同基液比对红外衰减特性的影响

在液体喷射压力为0.08MPa、气流压力为0.55MPa、添加颗粒为5.0 wt% TiO₂ (粒径5~10nm)条件下,分别测试了以40 wt%、60 wt%、80 wt% 1,2丙二醇-水溶液为基液时的红外透过率,测试结果如图9所示。由图9可知,以60 wt% 1,2丙二醇-水溶液作为基液的红外衰减性能最优。其原因是:一方面,丙二醇质量分数越大,基液粘度越大,不利于雾化分散形成微小雾滴;而丙二醇质量分数越小,其粘度越小,有利于雾化分散;另一方面,丙二醇的空气饱和度远低于水,随着丙二醇质量分数变小,所形成的雾滴越容易蒸发,不利于保持稳定的气溶胶状态。分析可知,

需综合考虑液态发烟剂粘度特性、空气饱和度等,确定一个较优的基液配比区间,从而获得较好的红外衰减性能。

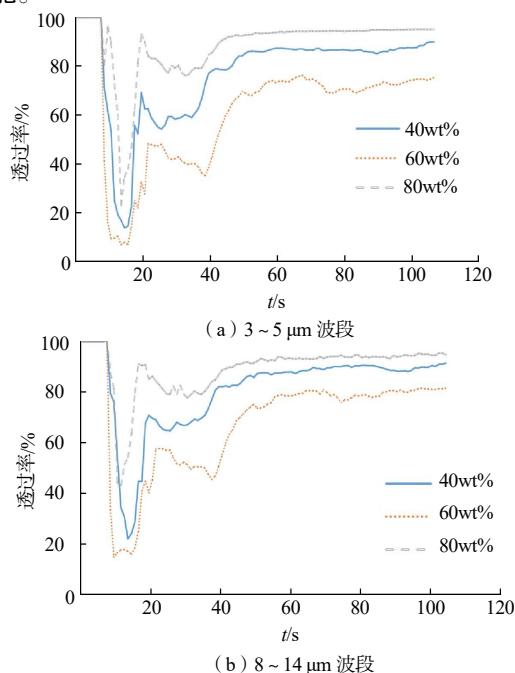


图9 不同基液配比纳米流体气溶胶的红外透过率
Fig.9 Infrared transmittance of aerosol of nanofluid with different liquid concentrations

3 结论

本文对添加纳米颗粒浓度、雾化粒径分布等因素对液态干扰材料红外衰减特性的影响规律进行了初步分析,主要结论如下:

(1)由1,2丙二醇水溶液添加 TiO_2 纳米颗粒制备的液态干扰材料,经雾化装置可形成稳定的气溶胶,对红外辐射有较好的衰减作用,喷雾后30s时,对3~5 μm 红外辐射衰减率大于90.0%,对8~14 μm 红外辐射衰减率大于80.0%。

(2)相比于基液,添加纳米颗粒能够有效降低红外辐射透过率,添加5.0 wt% TiO_2 后3~5 μm 红外透过率降低39.5%,8~14 μm 红外透过率降低25.6%。

(3)气溶胶雾滴粒径分布是影响红外衰减特性的重要因素之一,减小雾滴粒径尺度至10 μm 以内可

提高红外衰减性能。

(4)添加颗粒的尺度、形貌以及基液流变特性是设计液态干扰材料需要考虑的重要因素。

参考文献:

- [1] 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): 1 071-1 076.
- [2] 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.
- [3] 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): 93-97.
- [4] 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.
- [5] 曹传新,陈昕,邓正栋,等. $\text{TiCl}_2\text{-NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$ 液体发烟剂红外衰减性能实验[J].解放军理工大学学报(自然科学版), 2003(5): 52-55.
- [6] 陈昕,潘功配,曹传新,等.四氯化钛基液体发烟剂的性能研究[J]. 含能材料, 2007(1): 73-75,82.
- [7] Miglani A, Basu S. Effect of particle concentration on shape deformation and secondary atomization characteristics of burning nanotitania dispersion droplet[J]. ASME J. Heat Transfer, 2015,137(10): 102 001.
- [8] Basu S, Miglani A. Combustion and heat transfer characteristics of nanofluid fuel droplets: a short review[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016(96): 482-503.
- [9] Khaleduzzaman SS, Mahbulul IM, Shahrul IM, Saidur R. Effect of particle concentration, temperature and surfactant on surface tension of nanofluids[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2013(49): 110-114.
- [10] 周遵宁.光电对抗材料基础[M].北京:北京理工大学出版社,2017.
- [11] Zhao NB, Li ZM. Experimental and artificial neural network prediction of thermal conductivity and viscosity for alumina-water nanofluids[J]. Materials, 2017(10): 552-568.