文章编号:1001-5078(2014)10-1079-07　　·综述与评论·

气溶胶抑制红外辐射研究综述

刘光猛,邓海飞,汪卫华
(中国人民解放军陆军军官学院,安徽 合肥 230031)

摘　要:气溶胶抑制红外辐射是重要的红外隐身技术之一,国外已处于实用阶段,国内起步较晚,目前还处于机理和实验研究阶段。通过对国内外研究成果进行综述,总结了研究方法和关键技术,并对该技术在无人机上的应用作了展望。

关键词:气溶胶;红外辐射;无人机
中图分类号:TN219　　**文献标识码**:A　　**DOI**:10.3969/j.issn.1001-5078.2014.10.003

Summarization on aerosol suppression of infrared radiation

LIU Guang-meng, DENG Hai-fei, WANG Wei-hua
(Army Officer Academy, PLA, Hefei 230031, China)

Abstract: Aerosol suppression of infrared radiation is one of the important infrared stealth technologies. A lot of research on this at home and abroad has been done. This technology has been in practical stage in foreign countries, but still in the mechanism and experimental research stage in China. Based on the results of these studies, the research methods and key technologies were summarized, and the application of this technology in the UAV was discussed.

Key words: aerosol; infrared radiation; UAV

1　引　言

现代战场光电武器系统的快速发展给红外特征明显的空中目标带来巨大威胁,精确制导武器等现代武器的运用已经达到了“目标只要被发现,就能被击中,只要被击中,就能被击毁”的水平。因此,降低目标红外辐射强度,减少红外探测系统和红外制导导弹威胁变得尤为重要[1]。20 世纪 80 年代中期以来,红外隐身技术的作用日趋突出,主要体现在:①当前使用的各类探测系统中,红外探测器约占 30%;各国使用的精确制导武器中,红外制导约占 60%。②在对空作战中,红外制导导弹击落的飞机约占被击落的飞机总数的 70% ~80%[2-3]。因此,红外隐身技术被广泛应用于高科技武器装备尤其是高价值空中作战平台上。

以飞机为例,作为红外探测器探测的目标,其红外特征主要包括发动机热部件辐射、飞机蒙皮由于气动加热产生的辐射、蒙皮对外界辐射的反射和飞机的尾喷流辐射。针对飞机的红外特征,各国发展的隐身技术主要有[4]:①对飞机的发动机采用遮挡措施(美国的 YF—23A 战斗机采用槽沟伏尾喷排气道,使其尾喷口被后机身从下面遮挡);②改进发动机结构设计(采用复合材料制造的 S 型二元喷管和排气口红外抑制挡板等);③采用红外隐身燃料和反红外探测涂料;④利用气溶胶屏蔽发动机尾焰的红外辐射。

气溶胶红外隐身技术是针对发动机排出的高温燃气及飞机发动机喷口的热部件在 3 ~5 μm 及 8 ~14 μm 波段的红外辐射而研究的一种有效的隐身方法。其作战方式为:利用气溶胶在高温尾喷流周围形成的气溶胶屏蔽层对红外辐射进行散射和吸收,同时在尾喷管周围形成的固体颗粒层对红外辐射也有很好的屏蔽作用。

基金项目:陆军军官学院基金(2013XYJJ-083)资助项目。
作者简介:刘光猛(1988-),男,硕士研究生,研究方向为战场情报处理。E-mail:244216900@qq.com
收稿日期:2014-01-11;**修订日期**:2014-04-13

相对于其他各类隐身技术,气溶胶抑制红外辐射传输技术的优势在于:①对发动机的推力损失较小;②不改变飞机的气动特性;③在发动机喷口施放的气溶胶粒子对尾喷流进行包裹的同时,形成的气溶胶粒子层对尾喷口红外辐射也有一定的散射作用;④随着石墨烯、二氧化硅气凝胶等新型气溶胶材料的研制,气溶胶抑制红外辐射传输技术针对发动机尾流在 3 ~ 5 μm 及 8 ~ 14 μm 两个波段的红外辐射均能起到较好的抑制作用,对新型红外制导导弹具有较好的针对性;⑤该技术可以直接应用于已经列装的武器装备上[5]。

2 基本原理

气溶胶是由液体或固体小质点分散、悬浮在气体介质中形成的胶体分散体系,又称气体分散体系。其分散相为液体或固体小质点,其大小为 0.001 ~ 100 μm,分散介质为气体[6]。气溶胶抑制红外辐射的基本原理如图 1 所示,由图可以看出气溶胶对红外辐射的抑制主要体现在[7]:气溶胶粒子对被保护目标发射或反射的红外信号具有较强的吸收和散射能力;气溶胶本身可以发射红外辐射将目标和背景的红外辐射覆盖。

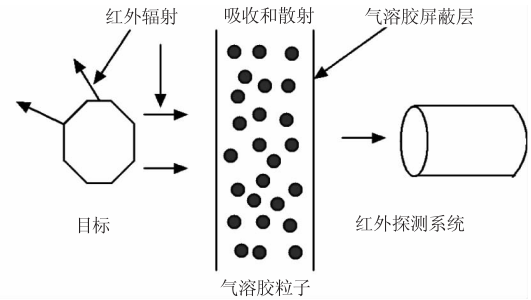

图 1 气溶胶抑制红外辐射基本原理图

气溶胶红外隐身技术就是将微米或纳米级的固体粒子喷射在尾喷流的周围,由于受到空气浮力和湍流的作用而悬浮在空气中,形成气溶胶遮蔽层,对发动机尾喷流形成包裹,使透过的光能量大大减少,光电探测系统因不能拾取足够的光辐射能量而失效,以此达到红外隐身的效果[8-9]。朗伯 - 比尔定律系统地描述了消光效应的实际意义,其表达式为:

$$T = \frac{I}{I_0} = e^{-N\cdot\sigma_e\cdot L}$$

式中,T 为透过率;I 为透过的光强度;I_0 为入射的光强度;N 为气溶胶颗粒粒子浓度;σ_e 为消光截面;L 为传输距离。

由上式可知,消光截面越大,气溶胶颗粒浓度越大,则消光或衰减效果越好。

3 国内外研究现状

3.1 国外研究现状

气溶胶红外隐身技术在军事上的应用得到各个军事大国青睐,国外自 20 世纪以来开展了大量相关工作,并已经在坦克和战机上得到了实际应用。由于军事保密等原因,从公开发表的文献中得知,美国犹他州立大学红外物理实验室早在 20 世纪 60 年代就做了气溶胶红外隐身技术机理方面的研究,但所写论文均未公开发表。60 年代以来,美国空军与约翰·霍普金大学、美国鲍林空军基地、航天总公司及犹他州立大学等合作开展了通过在机身后喷射烟云的方法衰减红外辐射,做了大量实验,实验结果表明:固体颗粒气溶胶抑制效果为最好,不同材料的气溶胶粒子对热喷流红外辐射的吸收、散射作用差别较大[10-11]。除美国外,以色列航空工业部在 20 世纪 80 年代通过在模型发动机四周喷射气溶胶,形成气溶胶遮蔽层,测量了各个角度上的红外辐射衰减情况。结果表明,碳粒形成的气溶胶遮蔽层对尾喷流的红外抑制最高可达 85% 以上[12-13]。气溶胶红外隐身技术已经在国外的武装直升机上得到实际应用,如美军研制并装备的用于飞机防护的 M259 型抗红外烟幕弹,该弹用火箭发射,距飞机 32 m 处形成遮蔽红外辐射的气溶胶烟幕,持续时间约为 5 min,宽度达数公里。国外在气溶胶红外隐身技术方面的研究逐步得到重视并取得大量成果,随着无人机在未来战场上的作用日趋重要,在无人机上应用气溶胶红外隐身技术却尚未见报道,相信未来几年在无人机上应用气溶胶红外隐身技术必将成为现实。

3.2 国内研究现状

国内关于气溶胶抑制红外辐射的研究始于 20 世纪 90 年代初,在坦克部队的烟雾干扰中有了实际应用。90 年代,我国学者针对某种粉末材料开展过抑制热喷流红外辐射的实验研究,得到了一些有益的实验结果[14]。聂传虹[15]等通过测试不同厚度的气溶胶红外抑制效果,得出了红外抑制量随着气溶胶粒子浓度的增加而增大的结论,在其实验条件下,抑制量最高可达 91%。韩启祥[14]等搭建了一套发动机尾喷口的模型实验台及气溶胶喷射系统,通过气溶胶喷射系统在尾喷流四周

形成的环形气溶胶遮蔽层,以此降低尾喷口的红外辐射。实验结果表明,粒子浓度越大,红外抑制效果越好,当耗粉量达到 10 g/s 时,气溶胶粒子的红外抑制量可达 90% 以上。黄朝军[16]等通过理论分析和数值计算相结合的方法对气溶胶凝聚粒子散射特性进行研究,分析得出不同尺寸参数下的气溶胶凝聚粒子散射特点。刘亚锋[17]等对红外波段下影响气溶胶粒子光学特性的主要因素分别进行分析计算,得出的结论为红外辐射在气溶胶中的传输特性提供参考依据。王红霞[18]等基于 Mie 和 DDA 方法分别计算了三种形状粒子对近红外波段入射光单次散射的消光参量,得出了透过率与粒子形状之间的关系。刘香翠[19]等对烟幕粒子遮蔽性能的两个特征参数进行定量表征为实验室筛选发烟剂提供依据。

国内在研究气溶胶抑制红外辐射方面最具代表性的是南京航空航天大学以常海萍教授为首的课题组,在“十五”、“十一五”期间,以离散颗粒抑制热喷流红外辐射传输特性为研究对象,从粒子的消光机理出发,利用 CFD 数值模拟和地面实验相结合的方法,在气溶胶材料的选取、离散颗粒消光效率因子的计算、喷射系统的设计等方面开展了深入系统的研究,总结出了气溶胶抑制红外辐射技术在喷气式飞机上应用的规律方法,为该技术的实际应用打下了坚实的理论基础[20-28]。

4 气溶胶抑制红外辐射关键技术

作为一种军用技术,如何将其应用于实际是问题的关键。国外已经将该技术在战机上得到了实际应用,但由于保密等原因,具体应用手段不得而知。国内该方面的研究起步较晚,对机载气溶胶抑制红外辐射技术的研究还停留在机理研究和实验上。而有效气溶胶红外抑制效果取决于两个重要因素:①合理的气溶胶屏蔽层形成方法,即采用何种手段形成均匀、稳定的气溶胶屏蔽层;②气溶胶材料的物理、化学性质,即对红外射线的折射、散射、透过和吸收等。

4.1 气溶胶材料的选取

国内学者在气溶胶材料的选取上做了大量的研究并得到一些有益的结果。其中姚永平[29]利用烟箱测试了膨胀石墨烟幕对 3 ~ 5 μm,8 ~ 12 μm 两个波段红外透过率与时间的关系曲线,用滤膜称重法测量了膨胀石墨烟幕在不同时刻的质量浓度,计算了膨胀石墨烟幕在两个红外波段的平均质量消光系数,分别为 0.8013 $m^2 \cdot g^{-1}$ 和 0.6187 $m^2 \cdot g^{-1}$。结果表明,膨胀石墨烟幕具有良好的红外消光和干扰效果。韩朝江[30]等利用 X 射线衍射,扫描电子显微镜,氮吸附 - 脱附和傅里叶红外吸收光谱对二氧化硅复合气凝胶红外隐身性能进行了表征,结果表明二氧化硅复合气凝胶具备一定的隐身性能。刘本利[31]等基于 T 矩阵理论和 Mie 散射理论,在 10.6 μm波段,利用朗伯 - 比尔定律分别对回转椭圆体和球形碳黑粒子组成的烟幕干扰特性进行了分析。分析结果表明,等体积情况下,回转椭圆体组成烟幕的干扰效果更好,并且当粒径不变时,烟幕浓度和烟幕干扰效果成正比。类成新[32]等采用蒙特卡罗方法对随机分布的混合凝聚粒子的空间结构进行了仿真模拟,利用 Bruggeman 有效介质理论得到了占有不同体积份额黑碳的内混合凝聚粒子的等效复折射率。采用离散偶极子近似方法对随机分布混合凝聚粒子在内外混合状态下的吸收、散射和消光效率因子等消光特性参量进行了数值计算,比较深入的探讨了基本粒子粒径和数量对混合凝聚粒子消光特性的影响规律。结果表明,随着凝聚粒子尺度参数的增大,混合方式对散射和消光效率因子的影响逐渐显著。内外混合方式下,随着黑碳体积比的增大随机分布混合凝聚粒子的吸收、散射和消光效率因子均近似线性增大,并且增大的幅度随着粒子尺度参数的增大而增大。李丽芳[33]等对三种气溶胶粒子在近红外波段的消光和散射能力进行了仿真计算,得出了消光特性与粒子半径之间的关系。吴慧[34]等对石墨烯基纳米复合材料在红外波段消光特性进行测试,测试结果表明石墨烯基复合材料对红外热像仪和红外激光系统均有一定干扰作用。

从以上研究可以看出,石墨、二氧化硅、黑碳三种材料的消光特性较为明显,可以作为抑制红外辐射的气溶胶材料,而材料的粒径、浓度、混合方式对材料的消光特性是有一定影响的,如何确定合理的粒径、浓度和混合方式对抑制红外辐射的效果有直接影响。

4.2 气溶胶屏蔽层生成方式

气溶胶烟雾的生成方式主要有爆炸法和喷射法[35]。采用爆炸法时,物质被压实在一个密封的弹体内,弹体中心有一个扩爆管,爆炸后粉末干扰

物分散到空中,发烟剂则被爆炸的火焰点燃。采用喷射法时,要求固态材料必须是事先经过粉碎的小颗粒,在流化状态下经过喷射装置喷射到大气中,对于液态材料必须先进行雾化。爆炸法是军舰、坦克、装甲车等运动速度较慢的军事目标采用的气溶胶生成方法,其方法是将红外烟雾弹发射到空中,利用爆炸生成大量的烟雾将目标淹没包围,使敌方导弹失去导引信号,该方法已经在坦克上大量使用。由于飞机是高速运动的,爆炸产生的烟雾是静态的团块分布,不能对尾焰进行跟踪和包裹。对比之下喷射法生成的气溶胶烟雾更适用于飞机,即在尾喷管四周布置适当的气固两相喷嘴,利用气体携带离散颗粒,产生稳定均匀的气溶胶遮蔽层,包裹尾焰[36]。

4.3 气溶胶抑制红外辐射数值模拟研究

由于气溶胶抑制红外辐射研究中材料的选取,材料浓度、粒径、喷射角度对于红外辐射抑制效果均有一定的影响,广泛开展实验研究周期太长,耗资巨大,数值模拟研究成了探索气溶胶抑制红外辐射研究规律的重要手段之一。计算气溶胶粒子包裹的尾喷流红外辐射主要包括以下两个部分[27]:

(1)含离散颗粒热喷流流场的数值计算。主要采用商用 CFD 软件进行数值模拟,选择合适的辐射模型、两相模型以及组分模型等,旨在得到不同条件下的热喷流(含离散相)温度场、组分浓度场以及离散颗粒的分布特征,为后面的红外辐射传输计算提供接口数据。

(2)红外辐射传输计算。在此前数值模拟获得的接口数据基础上,以大气红外辐射传输计算方法为基础,同时考虑计算单元体内离散颗粒对入射能量的衰减,采用射线踪迹法编制计算程序,求解不同探测点探测到的辐射强度,计算得到喷射气溶胶前后尾喷流(含热空腔)的红外辐射强度,从而获得气溶胶的红外抑制效果。

4.4 地面实验平台搭建

开展地面实验对气溶胶红外辐射抑制效果进行验证是非常必要的。早在 20 世纪 90 年代韩启祥[14]等就建立了一套发动机尾喷口模型试验台及气溶胶施放系统,通过气溶胶施放系统在尾喷流四周形成环形气溶胶层,降低尾喷口向外的红外辐射,试验对不同流速的尾喷流及二股流、不同的气溶胶施放位置、施放量及在不同的方位角上的气溶胶红外抑制效果作了测量与分析。胡路平[37]搭建了一套气溶胶消光实验装置,整套实验装置由发射系统、接收系统、气溶胶输送系统三部分构成,对吸湿率对气溶胶材料红外消光特性效果的影响进行了评估,其中发射系统部分可以作为气溶胶生成方式提供参考。潘金栋[38]在 Beer-Lambert 定律的基础上,将 7 种颗粒样品分别均匀悬浮于具有高透光性的背景溶剂中,利用傅立叶红外光谱仪来测量颗粒系的透射率光谱,并计算了颗粒的质量消光系数,可用于衡量颗粒材料的消光性能。常海萍[39]等搭建了由热喷流实验台、气溶胶发生装置以及测量系统组成的实验装置,对两种气溶胶材料在三个方位上的气溶胶红外抑制效果进行了测量,对气溶胶抑制红外辐射的规律研究有着重要意义。李卉荟[27]搭建了一套完整的气溶胶施放系统,制作了喷粉环并和喷管进行了组装,采用 FT-IR 红外光谱辐射仪对颗粒包裹的尾喷流红外辐射强度进行了测量,实验结果与数值模拟结果吻合。

5 总结与展望

目前针对气溶胶抑制红外辐射的研究主要集中在气溶胶材料的消光特性、材料的选取、粒径的确定、喷射方式的选择以及含离散颗粒尾喷流红外辐射特性计算方法上,这个过程中涉及到粒子消光效率因子的计算,计算流体力学,计算传热学和计算辐射学等综合性数值分析,进而获得气溶胶抑制红外辐射的效果,为气溶胶抑制红外辐射实际应用奠定基础。

鉴于研究大部分集中在高空高速飞机尾喷流红外辐射抑制上面,而随着无人机在未来战场上的作用日趋重要,无人机的作战方式决定无人机面临的威胁日益增多,红外隐身技术在无人机上的应用变的更加迫切。气溶胶抑制红外辐射技术作为有效的红外隐身技术之一,如何运用已经取得的研究进展对气溶胶抑制红外辐射技术在无人机上的应用进行系统的规律性研究是无人机红外隐身重要的课题之一。由于无人机和其他飞机对推力的要求不同,机体结构、发动机、燃料均有不同,发动机喷口部件和尾喷流的红外辐射特征差异较大,螺旋桨发动机由于螺旋桨的旋转对尾喷流的扰动,如何形成稳定、有效的气溶胶屏蔽层对尾喷流进行包裹等新问题既是气溶胶抑制红外辐射技术在无人机上的应用面临的挑战,同时也对

丰富无人机红外隐身技术具有重要意义。因此，在无人机上开展气溶胶抑制尾喷流红外辐射技术具有重要的军事应用价值。

参考文献：

[1] SANG Jianhua, ZHANG Zongbin. Development trends of infrared stealth technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(1): 14 – 19. (in Chinese)
桑建华，张宗斌. 红外隐身技术发展趋势[J]. 红外与激光工程，2013，42(1)：14 – 19.

[2] WANG Chaoqun. Detecting and tracking technology about IR stealth target[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35: 127 – 132. (in Chinese)
汪朝群. 空中目标的红外隐身及探测跟踪技术[J]. 红外与激光工程，2006，35：127 – 132.

[3] ZONG Jingguo, ZHANG Jianqi, LIU Delian. The infrared radiation characteristics of the stealth aircraft[J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(2): 289 – 294. (in Chinese)
宗靖国，张建奇，刘德连. 隐身飞机尾焰的红外辐射特性[J]. 光子学报，2011，40(2)：289 – 294.

[4] YANG Luyi. UAV technology[M]. Beijing: The People's Liberation Army Press, 2006. (in Chinese)
杨鹭怡. 无人机技术[M]. 北京：解放军出版社，2006.

[5] SONG Xinbo, LU Xueyan, ZHANG Jianjun. Study on the infrared stealth technology of plane[J]. Laser & Infrared, 2012, 42(1): 3 – 7. (in Chinese)
宋新波，吕雪艳，章建军. 飞机红外隐身技术研究[J]. 激光与红外，2012，42(1)：3 – 7.

[6] Dennis R. Aerosols handbook[M]. LIANG Hongfu, LU Zhengyong, transl. Beijing: Atomic Energy Press, 1988 Dennis R. (in Chinese)
Dennis R. 气溶胶手册[M]. 梁鸿富，卢正永，译. 北京：原子能出版社，1988.

[7] LIU Shunmin. The effect of material granularities of pyrotechnic agent on infrared radiancy with its application [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2004. (in Chinese)
刘顺民. 发烟剂材料粒径影响红外辐射规律及应用[D]. 南京：南京理工大学，2004.

[8] YU Yong. The use and the development trends of smokescreen in modern war[J]. Electro-Optic Technocogy Application, 2003, 3: 29 – 32. (in Chinese)
余勇. 现代战争中烟幕的应用及发展趋势[J]. 光电技术应用，2003，3：29 – 32.

[9] YU Yong, LIU Qingjun, ZHU Yuping. Smoke screen: the "strong shield" of information warfare[J]. Modern Defence Technology, 2004, 32(3): 44 – 47. (in Chinese)
余勇，刘庆军，祝玉平. 烟幕—信息战的"坚盾"[J]. 现代防御技术，2004，32(3)：44 – 47.

[10] R D Harris, S J Young, et al. Final report: study of radiation scattering concept of plume[C]. Infrared Radiation Obscuration, Utah State University and Chemistry and Contract No. F49620 – 77 – c – 0121, 1978.

[11] Johna Hopking. Radiation Laboratory. Quarterly progress report on infrared countermeasures[C]. Contracts AF 33 (616) – 68 and AF 33(616) – 3374.

[12] S A Weisrose, R Davidsion, M Lindner, et al. Aerosol effects on jet-engine IR radiation[J]. SPIE 1988, 0972.

[13] S Jacobson. IR group activities at the isral aircraft industries[J]. SPIE 1987, 819: 139.

[14] HAN Qixiang, TAN Haoyuan. Experimental study on inhibition of jet engine infrared radiation by aerosol[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 1995, (3): 341 – 345. (in Chinese)
韩启祥，谈浩元. 气溶胶抑制尾喷口红外辐射的实验研究[J]. 南京航空航天大学学报，1995，(3)：341 – 345.

[15] NIE Chuanhong, HAN Yuanjie. The experimental and theory of the infrared extinction effect of powder aerosol[J]. Journal of Guilin Institute of Electronic Technology, 2002, 2(2): 50 – 55. (in Chinese)
聂传虹，韩无杰. 粉末气溶胶红外消光作用的实验与理论分折[J]. 桂林电子工业学院学报，2002，2(2)：50 – 55.

[16] HUANG Chaojun, WU Zhensen, LIU Yafeng. Scattering characteristics of aerosol aggregation particles of 1.06μm [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(9): 2353 – 2357. (in Chinese)
黄朝军，吴振森，刘亚锋. 1.06μm 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.

[17] LIU Yafeng, HUANG Chaojun, LOU Benzhuo. Numerical calculation of aerosol optical properyies based on infrared ban[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(6): 1605 – 1609. (in Chinese)
刘亚锋，黄朝军，娄本浊. 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.

[18] WANG Hongxia, SUN Honghui, SONG Zibiao, 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. (in Chinese)

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.

[19] LIU Xiangcui, CHENG Xiang, ZHANG Liang, et al. Quantitative evaluation of obscuring effect of smoke to infrared thermal imaging system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(1):37 - 42. (in Chinese)
刘香翠,程翔,张良,等. 烟幕对红外热像仪遮蔽效果的定量表征[J]. 红外与激光工程,2012,41(1):37 - 42.

[20] LI Li. Numericalsimulation of gas solid two phase annular jet[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2005. (in Chinese)
李丽. 气固两相环形喷流的数值模拟[D]. 南京:南京航空航天大学,2005.

[21] YAO Dongsheng. Study on the mechanism of infrared extinction characteristics of aerosol[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2005. (in Chinese)
么东升. 气溶胶红外消光特性机理研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2005.

[22] DUAN Ruiwei. Selection and study of aerosol infrared camouflage material[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2003. (in Chinese)
段瑞伟. 气溶胶红外隐身材料的选择和研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2003.

[23] CHEN Xiongbin. Design and performance study of aerosol spray system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2004. (in Chinese)
陈雄斌. 气溶胶喷射系统的设计及其性能研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2004.

[24] WANG Huiyuan. Research on the method of radiation calculation of heat exhaust with particulates based on ray tracing method[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2004. (in Chinese)
王慧元. 基于射线踪迹法的含离散颗粒热喷流辐射数值计算方法研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2007.

[25] ZHANG Jingyu, CHANG Haiping, WANG Huiyuan. Numerical simulation on infrared suppression characteristics of thermo jet with powder aerosol[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2008, 40(1): 21 - 25. (in Chinese)
张净玉,常海萍,王慧元. 粉末状气溶胶抑制热喷流红外辐射数值模拟[J]. 南京航空航天大学学报,2008,40(1):21 - 25.

[26] WANG Jing. Research on IR suppressant of hot exhaust with the discrete particles[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008. (in Chinese)
王京. 离散颗粒对热喷流红外辐射特征影响规律研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2008.

[27] LI Huihui. Research on IR suppressant of hot exhaust with the discrete particles in flight[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009. (in Chinese)
李卉荟. 飞行状态下含离散颗粒热喷流的红外特征研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2009.

[28] ZHANG Yanjun. Numerical simulation and validity research on the distribution characteristics of discrete particles in hot exhaust[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008. (in Chinese)
张彦军. 含离散颗粒热喷流颗粒分布特征数值研究及验证[D]. 南京:南京航空航天大学,2008.

[29] YAO Yongping, JIA Qi. Study on infrared extinction performance of expanded graphite[J]. Infrared Technology, 2011, (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,(7):385 - 388.

[30] HAN Chaojiang. Preparation and characterization of silica composite aerogels for infrared stealth[J]. Infrared Technology, 2012, (9):551 - 556. (in Chinese)
韩朝江. 二氧化硅复合气凝胶红外隐身材料的制备及表征[J]. 红外技术,2012,(9):551 - 556.

[31] LIU Benli, WANG Hongxia, ZHU Youzhang, et al. Research on infrared interference characteristics of carbon black smoke screen[J]. Infrared Technology, 2010, (8): 483 - 486. (in Chinese)
刘本利,王红霞,竹有章,等. 碳黑烟幕红外干扰特性研究[J]. 红外技术,2010,(8):483 - 486.

[32] LEI Chengxin, WU Zhensen. The extinction properties of cluster particles in random orientation of smoke[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2010, (4):593 - 597. (in Chinese)
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.

[33] LI Lifang, ZHANG Jilong, LI Xiao, et al. Study on extinction characteristics of the aerosol in near-infrared bands[J]. laser Infrared and Laser Engineering, 2013, 3(1): 24 - 28. (in Chinese)
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,2013,3(1):24 - 28.

[34] WU Hui, MA Yongjun, ZHU Dongsheng, et al. Research on preparation and extinction characteristic of graphene-

based infrared absorbing nano-composites [J]. Infrared Technology, 2013, 35(4): 242 – 246. (in Chinese)
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.

[35] LIU Yongbo, FAN Xiang, SHUI Xinheng. Anti infrared imaging guidance technology[J]. Electro-optics & Passive Countermeasures, 2002, (3): 5 – 9. (in Chinese)
刘勇波,樊祥,水心恒. 抗红外成像制导技术浅析[J]. 光电对抗与无源干扰, 2002, (3): 5 – 9.

[36] ZHANG Jingyu. Rrsearch on IR suppressant of hot exhaust with the spherical particles [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007. (in Chinese)
张净玉. 球形离散颗粒抑制热喷流红外辐射规律研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2007.

[37] HU Luping. Effect of environmental relative humidity extinction of aerosol material on the [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006. (in Chinese)
胡路平. 气溶胶材料的吸湿性及含湿量对消光效果影响的实验研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2006.

[38] PAN Jindong. Research on the infrared radiation characteristic and optical constant of discrete particles[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008. (in Chinese)
潘金栋. 离散颗粒的红外辐射特性与光学常数研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2008.

[39] ZHANG Jingyu, CHANG Haiping, CHEN Xiongbing, et al. Experiment on infrared suppression characteristics of thermo jet with powder aerosol[J]. Journal of Propulsion Technology, 2006, (4): 326 – 330. (in Chinese)
张净玉,常海萍,陈雄兵,等. 粉末气溶胶抑制热喷流红外辐射特性实验[J]. 推进技术, 2006, (4): 326 – 330.