

典型气溶胶粉体红外消光性能研究(特约)

时家明^{1,2,3}, 李志刚^{1,2,3}, 陈宗胜^{1,2,3}, 吕相银^{1,2,3}

- (1. 国防科技大学脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽合肥 230037;
2. 先进激光技术安徽省实验室, 安徽合肥 230037;
3. 红外与低温等离子体安徽省重点实验室, 安徽合肥 230037)

摘要: 气溶胶粉体是烟幕弹药的核心组成部分,其红外消光性能直接决定了烟幕的红外遮蔽效果。选择石墨粉和铝粉两种典型的气溶胶粉体作为研究对象,通过烟箱实验,测量了不同粒径的两种材料的质量消光系数,分析了粉体粒径对气溶胶红外消光性能的影响,探讨了引起两者红外消光性能差异的原因,考察了在烟箱实验中目标温度等因素对测试结果的影响。结果表明:对于所测试的几种样品,在同等条件下,气溶胶粉体粒径越小,其质量消光系数越大,红外消光性能也就越好;铝粉的红外消光性能要好于石墨的,1 000 目铝粉的中红外(3.7~4.8 μm)和远红外(7.5~14 μm)质量消光系数为分别为 1.78 m^2/g 和 2.01 m^2/g ,显著优于 1 000 目石墨粉体的值(1.02 m^2/g 和 1.01 m^2/g),石墨与铝粉之间的分散性、径厚比和折射率等特性的差异是导致这一现象的主要原因;烟箱实验中,目标和背景的初始温度对测试结果影响较大,应该对它们进行合理设置,以提高测量的准确性。

关键词: 烟幕; 气溶胶粉体; 红外消光性能; 质量消光系数

中图分类号: O434.3 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20201021

Infrared extinction properties of typical aerosol particles(*Invited*)

Shi Jiaming^{1,2,3}, Li Zhigang^{1,2,3}, Chen Zongsheng^{1,2,3}, Lv Xiangyin^{1,2,3}

- (1. State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China;
2. Advanced Laser Technology Laboratory of Anhui Province, Hefei 230037, China;
3. Anhui Province Key Laboratory of Infrared and Low Temperature Plasma, Hefei 230037, China)

Abstract: Graphite and aluminum powders are typical aerosol particles whose infrared (IR) extinction properties are important to the IR obscuring performances of the smoke ammunitions containing these powders. Mass extinction coefficients (MECs) of the two materials with different sizes are measured in a smoke chamber. The relationship between the powder size and the IR extinction property is analyzed, with the difference between their extinction properties being discussed. Moreover, test accuracy is studied at different temperatures of the target and the background. The results show that the IR extinction property gets better as the size of the graphite powder decreases. Due to its better dispersivity, larger radius-thickness ratio and larger IR refractive index, aluminum powder shows better extinction properties than graphite powder of the same size. The IR MECs of aluminum powder (1 000 meshes) are respectively 1.78 m^2/g (3.7- 4.8 μm) and 2.01 m^2/g (7.5-14 μm), with those of graphite powder of the same size being 1.02 m^2/g and 1.01 m^2/g respectively. In addition, test results are found to be closely related to the initial temperatures of the target and the background, showing the necessity of appropriate settings of the temperature.

Key words: smoke screen; aerosol particles; infrared extinction property; mass extinction coefficient

收稿日期:2020-03-20; 修订日期:2020-04-23

作者简介:时家明(1966-),男,教授,博士生导师,博士,主要从事光电隐身技术研究。Email: shijiaming17@nudt.edu.cn

0 引言

烟幕是对抗光学(主要是可见光和红外线)侦察和制导武器的重要手段之一,其原理是利用气溶胶粒子对光波的散射和吸收,有效遮蔽目标的光学特征,增加敌方光学侦察和制导系统探测目标的难度,从而提高目标的生存能力。它具有使用方便、成本低廉、效果显著等优点,在对抗侦察和精确制导武器方面有着不可替代的优势。因此,烟幕虽然是一种传统的技术,却一直能保持强大的生命力,在现代高技术战争中仍然被广泛使用^[1]。

随着红外侦察和制导技术的发展,用烟幕来实施红外对抗的需求越来越迫切,而烟幕的红外遮蔽性能在很大程度上取决于烟幕材料本身的特性,因此,对烟幕材料的红外遮蔽性能的研究始终是一个热点,也是烟幕装备研制中必不可少的一个环节^[2]。由于烟幕本质上是一种气溶胶,因此,在科技文献中这两个词常相互混用,以下笔者将统一采用气溶胶这个概念。气溶胶粉体的种类较多,传统的有石墨、炭黑、高岭土、滑石粉、铝粉和铜粉等,近年来,生物孢子粉、空心微球等也受到了较多的关注^[3-5]。事实上,迄今为止,即使是对于传统的气溶胶粉体材料,其消光性能的系统性和基础性的研究仍然比较缺乏,因此,有必要对此开展进一步的研究。石墨和铝粉是两种常见的材料^[6-7],其中前者具有层状结构,导电性和导热性好;后者通常也具有片状结构,且径厚比大,导电性和分散性好,两种材料的价格都不贵,因此,它们是比较常用的气溶胶粉体材料。文中将以它们为研究对象,通过烟箱实验,探索粉体粒径等因素对气溶胶红外消光性能的影响规律,并试图给出合理的解释。同时,笔者对烟箱测试的方法进行了讨论,研究了目标初始温度等因素对测试结果的影响。

1 实验原理

气溶胶粉体的红外消光性能通常可用质量消光系数来表征,它是粉体材料本身的性质,不受外界因素的影响,因此,不同粉体的消光性能可以直接用质量消光系数来比较^[8]。质量消光系数通常通过烟箱实验得到,实验原理见图 1。

假设目标本身在特定波段内(以下提到的参数都

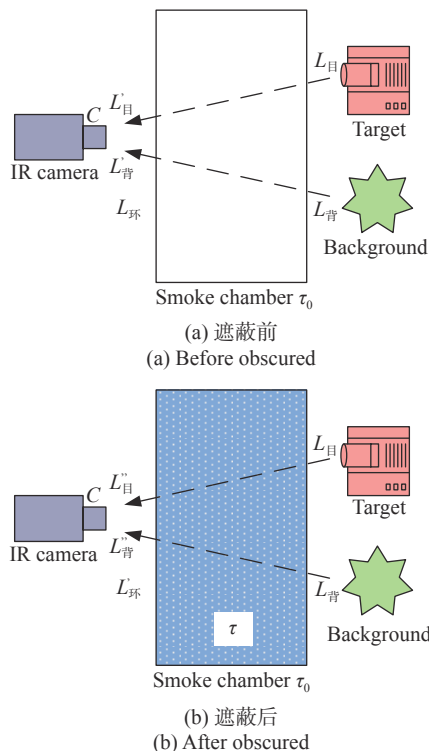


图 1 烟箱实验示意图

Fig.1 Schematic diagram of smoke shielding experiment

是指在特定波段内的值)的辐射亮度为 $L_{目}$,背景的辐射亮度为 $L_{背}$,环境的辐射亮度为 $L_{环}$,它包含箱体窗口材料本身的辐射以及环境辐射在窗口材料上的反射等,气溶胶粉体本身的辐射为 $L_{粉}$,烟幕箱窗口材料透过率为 τ_0 。在没有气溶胶时,红外热像仪接收到目标和背景位置的辐射亮度分别为:

$$L'_{目} = L_{目} \cdot \tau_0 + L_{环} \quad (1)$$

$$L'_{背} = L_{背} \cdot \tau_0 + L_{环} \quad (2)$$

在产生气溶胶后,红外热像仪接收到目标和背景位置的辐射亮度分别为:

$$L''_{目} = L_{目} \cdot \tau_0 \cdot \tau + L_{粉} + L'_{目} \quad (3)$$

$$L''_{背} = L_{背} \cdot \tau_0 \cdot \tau + L_{粉} + L'_{背} \quad (4)$$

式中: τ 为烟幕箱中气溶胶在特定波段内的透过率。将公式 (2) 和 (1)、公式 (4) 和 (3) 分别相减,可得到:

$$L'_{目} - L'_{背} = (L_{目} - L_{背}) \cdot \tau_0 \quad (5)$$

$$L''_{目} - L''_{背} = (L_{目} - L_{背}) \cdot \tau_0 \cdot \tau \quad (6)$$

将公式 (6) 和 (5) 相除,得到烟幕箱内气溶胶的透过率为:

$$\tau = \frac{L''_{目} - L''_{背}}{L'_{目} - L'_{背}} \quad (7)$$

有时也用遮蔽率来描述遮蔽性能,它与透过率的关系为:

$$\eta = 1 - \tau \quad (8)$$

而辐射亮度由普朗克公式的积分给出:

$$L(T) = \frac{1}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{C_1}{\lambda^5} \frac{d\lambda}{e^{C_2/\lambda T} - 1} \quad (9)$$

式中: $C_1=3.741\ 832 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$; $C_2=1.438\ 786 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$; λ_1 和 λ_2 分别为热像仪所用波段的波长下限和上限; T 为从热像仪上读出的物体的辐射温度(即把物体当成黑体后的等效温度)。

在得到透过率后,即可由下式求出气溶胶粉体的质量消光系数:

$$\beta_m = -\frac{\ln \tau}{C \cdot l} \quad (10)$$

式中: C 为粉体在烟幕箱中的质量浓度; l 为红外辐射在气溶胶中的传输路径长度。

2 实验方法

根据上述原理,测量出烟幕箱内产生气溶胶前后背景与目标处的辐射温度,即可计算出气溶胶粉体的质量消光系数。实验装置布局见图 2,烟幕箱尺寸为 $3.0 \text{ m} \times 2.4 \text{ m} \times 3.0 \text{ m}$,在其两侧分别有若干测试窗口,窗口外分别放置目标和热像仪。文中采用的目标为 HFY-300A 面源型黑体(温度范围 $0 \sim 300 \text{ }^\circ\text{C}$),背景为常温黑色钢板,热像仪分别为 SC7700M 中红外热像仪(美国 FLIR 公司,波段范围 $3.7 \sim 4.8 \text{ } \mu\text{m}$,测温范围 $-20 \sim 500 \text{ }^\circ\text{C}$)和 VarioCAM HD Research 875 远红外热像仪(德国 InfraTec 公司,波段范围 $7.5 \sim 14 \text{ } \mu\text{m}$,测温

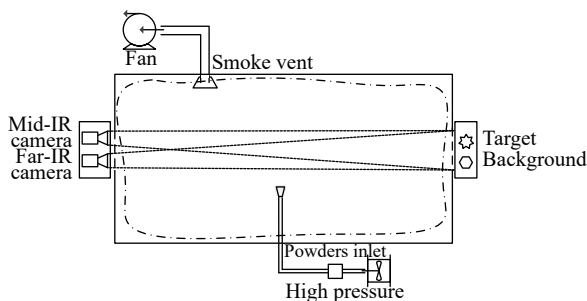


图 2 实验装置布局图

Fig.2 Layout diagram of experiment setup

范围 $-40 \sim 1\ 200 \text{ }^\circ\text{C}$)。将一定质量的气溶胶粉体加入进料口,由气瓶产生的高速气流将其吹入烟幕箱,并在其中均匀扩散。用热像仪记录粉体喷撒前后目标和背景的辐射温度的实时值,用于后期处理。实验结束后,由排烟装置将烟箱内悬浮的气溶胶粒子排到室外。

测试中,目标温度设为 $100 \text{ }^\circ\text{C}$,背景温度为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$,粉体质量取 10 g ,完全扩散后,其在烟幕箱中的质量浓度为 0.46 g/m^3 。待测样品为 200 目 ($74 \text{ } \mu\text{m}$) 石墨、1 000 目 ($14 \text{ } \mu\text{m}$) 石墨、5 000 目 ($2.6 \text{ } \mu\text{m}$) 石墨、10 000 目 ($1.3 \text{ } \mu\text{m}$) 石墨和 1 000 目铝粉。通过实验考察气溶胶粉体粒径对其红外消光性能的影响,并比较石墨和铝粉两种材料的性能。

3 结果分析

3.1 粉体性能的比较

图 3、图 4 给出了烟幕箱中气溶胶的中、远红外

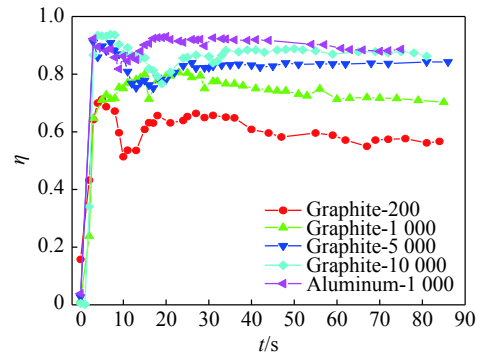


图 3 实验粉剂的中红外遮蔽率随时间的变化关系

Fig.3 Mid-infrared obscuring ratio of the tested particles vs time

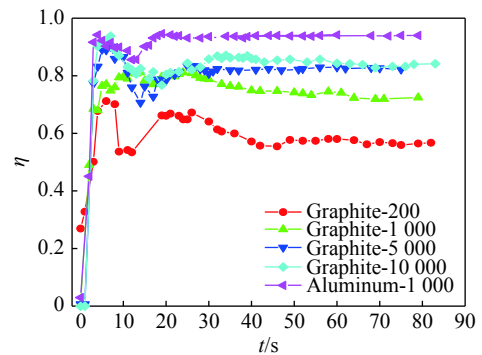


图 4 实验粉剂的远红外遮蔽率随时间的变化关系

Fig.4 Time dependence of the far infrared obscuring ratio of the tested particles

遮蔽率随时间的变化曲线,从图中可以看到,初始时刻各个曲线波动明显,对应着粉体在烟幕箱中的扩散过程。约 30 s 后,遮蔽率曲线趋于平稳,说明此时粉体已形成均匀的气溶胶。在计算质量消光系数时,应该取稳定后的平均值。表 1 给出了不同粉体材料的中、远红外质量消光系数。

表 1 不同粉体质量消光系数测试结果

Tab.1 Testing result of mass extinction coefficient of the different particles

Parameters	Mid-infrared (3.7-4.8 μm)	Far-infrared (7.5-14 μm)
Graphite(200 meshes)	0.63	0.64
Graphite(1 000 meshes)	1.02	1.01
Graphite(5 000 meshes)	1.28	1.23
Graphite(10 000 meshes)	1.54	1.43
Aluminum(1 000 meshes)	1.78	2.02

比较表 1 中不同石墨粉体的质量消光系数,可以发现,10 000 目(粒径 1.3 μm)石墨粒子具有最好的红外消光性能,同时,随着石墨粒子的粒径变大,其质量消光系数逐渐减小,红外消光性能逐渐变差。产生这一现象的原因可以从两个方面来分析,一是在同等质量浓度下,石墨粉体粒径越小,烟幕箱中的粒子数也就越多,气溶胶的粒子数密度也就越大,这样,红外线受到石墨粒子散射(其过程中会有吸收)的次数增多;另一方面,由于石墨具有导电性,根据电磁波理论,红外线作为一种电磁波,它在石墨中传播时具有一定的趋肤深度,这个趋肤深度通常小于粒子的尺寸,也就是说,粒子对红外线产生的散射与吸收作用往往发生在粒子的浅表面。与同质量的单个大粒子相比,多个小粒子具有更大的浅层表面积,对红外线的散射和吸收作用更强。因此,相比于大粒径粉体,同等质量浓度下小粒径粉体形成的气溶胶具有更好的红外消光性能^[9]。

再来比较一下石墨与铝粉两种材料的红外消光性能。从表 1 中可以得到,1 000 目铝粉的中红外和远红外质量消光系数分别为 1.78 m²/g 和 2.01 m²/g,显著优于相同粒径的石墨粉体的值(1.02 m²/g 和 1.01 m²/g)。产生这一现象的原因在于铝粉粒子与石墨粒子之间的特性差异。首先,铝粉粒子的分散性明显好于石墨粒子,铝粉粒子不容易团聚,在烟幕箱中

更容易分散,这样,每个铝粉颗粒都有机会对红外线进行散射和吸收;相比之下,石墨颗粒的团聚性较强,当多个颗粒团聚在一起后,部分粒子可能没有机会直接与红外线发生作用(也是因为趋肤深度较小),导致实际起作用的颗粒数量较少,因而,红外消光效果变差。其次,铝粉粒子的径厚比(直径与厚度之比)大于石墨粒子^[7,10]。虽然铝粉和石墨粉都是片状的,但是由于材料特性和加工过程的影响,铝粉的厚度要比相同直径的石墨粉薄,一般来说,铝粉粒子的径厚比在 40~220 之间,石墨粒子的径厚比往往要小于 60。如果直径相同,同等体积的铝粉粒子数要多于石墨粒子数,这样铝粉烟幕的有效作用粒子数也就会更多,红外消光效果更好。最后,铝粉在红外波段的折射率要大于石墨^[11-12](见表 2)。折射率是决定粉体消光性能的一个重要因素,它的实部和虚部分别反映了粉体材料对入射波的反射能力和吸收能力,折射率的实部和虚部越大,材料对红外线的散射和吸收越强,红外消光能力也就越强。因此,同等粒径的铝粉的红外消光性能要优于石墨的。

表 2 石墨与铝在红外波段的折射率 (n+ik)

Tab.2 IR refractive index of graphite and aluminum(n+ik)

λ/μm	Graphite		Aluminum	
	n	k	n	k
3	2.84	2.35	4.9	29.82
4	3.29	2.67	6.77	38.68
5	3.65	2.94	9.15	47.2
7	4.29	3.23	14.44	63.75
8	4.49	3.36	17.68	71.77
9	4.66	3.52	21.36	79.24
10	4.84	3.67	25.01	85.97
11	5	3.81	28.58	92.43
12	5.14	3.95	32.11	98.76
13	5.26	4.11	35.68	104.63
14	5.37	4.26	39.15	110.19

3.2 温度设置的影响

实验中,笔者发现目标与背景温度的不同会导致测试结果的差异,下面对这一问题进行讨论。为此,再引入一个 60 °C 的热源,进行对比实验。

实验中,设置以下五种情形:(1)以 100 °C 热源为

目标, 20 °C 热源为背景; (2) 以 100 °C 热源为目标, 60 °C 热源为背景; (3) 以 100 °C 热源为目标, 不设置背景热源; (4) 以 60 °C 热源为目标, 20 °C 热源为背景; (5) 以 60 °C 热源为目标, 不设置背景热源。样品为 1 000 目铝粉 10 g, 分别测试不同目标和背景温度时的质量消光系数。

图 5、图 6 为不同实验条件下气溶胶的遮蔽率随时间的变化曲线, 表 3 为气溶胶稳定后测得的质量消光系数。显然, 目标和背景温度的改变影响了质量消光系数的测量准确性。下面从以下两个角度分析其影响的大小。

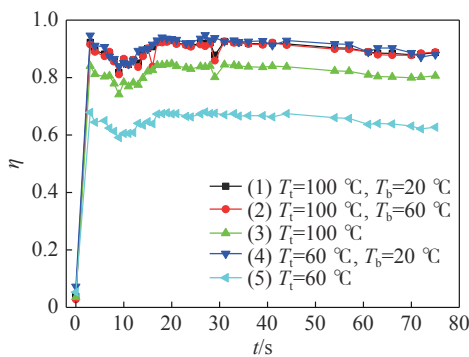


图 5 不同目标和背景温度下铝粉的中红外遮蔽率测试曲线

Fig.5 Mid-infrared obscuring ratio of aluminum powder at different target and background temperatures

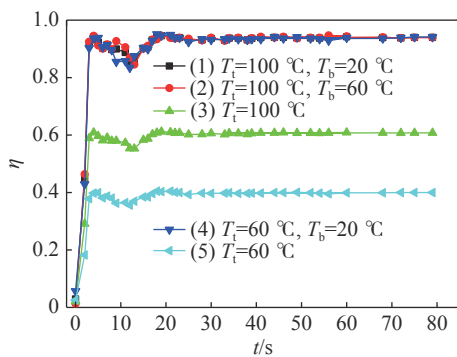


图 6 不同目标和背景温度下铝粉的远红外遮蔽率测试曲线

Fig.6 Far infrared obscuring ratio of aluminum powder at different background temperatures

角度一: 背景的有无。从图 5 和图 6 可以看出: 当设置了背景温度后 (即情形 (1)、(2)、(4)), 遮蔽率曲线与未设置背景温度的情形 (即情形 (3)、(5)) 差异较大, 表 3 中相应的质量消光系数也差别较大, 这说明背景温度的有无对测试准确性影响很大, 实验中背景

表 3 不同目标和背景温度下铝粉的质量消光系数测试结果

Tab.3 Mass extinction coefficient of aluminum powder at different background temperatures

Experimental conditions	MECs/m ² ·g ⁻¹	
	Mid-IR (3.7-4.8 μm)	Far-IR (7.5-14 μm)
Case (1) $T_i: 100\text{ }^{\circ}\text{C}; T_b: 20\text{ }^{\circ}\text{C}$	1.78	2.02
Case (2) $T_i: 100\text{ }^{\circ}\text{C}; T_b: 60\text{ }^{\circ}\text{C}$	1.76	2.01
Case (3) $T_i: 100\text{ }^{\circ}\text{C}; T_b: \text{none}$	1.29	0.67
Case (4) $T_i: 60\text{ }^{\circ}\text{C}; T_b: 20\text{ }^{\circ}\text{C}$	1.82	1.98
Case (5) $T_i: 60\text{ }^{\circ}\text{C}; T_b: \text{none}$	0.79	0.37

的设置不可忽略。从第一节的讨论可以看出, 如果不设置背景, 则无法消除气溶胶自身的辐射以及环境辐射带来的影响, 具体而言, 就是无法通过公式 (1) 和 (2) 相减来消除 $L_{环}$, 也无法通过公式 (3) 和 (4) 相减来消除 $L_{粉}+L_{环}'$, 从而无法消除因这几项的存在而带来的误差, 特别是当目标辐射在气溶胶中的透过率较低时, 这几项辐射在测出的目标处透过的辐射中所占的比重较大, 所带来的误差就会更加明显。

角度二: 目标与背景温度的设置。从上一段的讨论可以看出: 设置背景可以降低测量误差, 那么, 是不是只要设置了背景, 误差即可忽略不计了呢? 背景温度和目标温度需要满足什么样的关系才能减小误差呢? 下面笔者就来考察一下设置不同的目标温度和背景温度对测量结果的影响。从图 5、图 6 和表 3 可以看出, 虽然情形 (1)、(2) 和 (4) 分别设置了不同的目标和背景温度, 但三种情形下的遮蔽率以及质量消光系数值比较接近。说明在这三种情形下, 测量误差确实很小。但仔细比较一下可以发现, 情形 (1) 和 (2) 的结果很接近, 而情形 (4) 与其他两种情形的结果差异稍大。这从理论上分析似乎是不合理的, 因为理论上只要设置了背景, 气溶胶本身的辐射和环境的辐射带来的影响即可消除, 但实际上并非如此。从第一节可以看出, 虽然可以通过公式 (1) 和 (2) 相减以及公式 (3) 和 (4) 相减来消除气溶胶本身以及环境的辐射, 但前提是公式 (1)~(4) 的数值是准确的, 从公式 (3) 和 (4) 可以看出, 如果形成气溶胶后目标和背景处观测到的辐射很接近、且都偏低, 则在所观测到的辐射里面, 来自目标和背景的辐射所占比重均较低, 这对透

过率的准确测量显然是不利的。因此,在设置目标和背景温度时,可以参考下列原则:一是目标与背景温度差别较大(例如大于 40 ℃),二是目标温度要设置得较高(例如 100 ℃)。具体到文中,情形(1)和(2)的温度设置比情形(4)所带来的误差更小。

4 结 论

文中通过烟箱实验,测试了 200、1 000、5 000、10 000 目石墨和 1 000 目铝粉的红外质量消光系数,探讨了粉体粒径与材料差异对气溶胶红外消光性能的影响,考察了目标与背景温度设置对测试结果影响。研究结果表明:

(1) 对于所测量的几种石墨粉体,粒径越小,其质量消光系数越大,其中 10 000 目石墨粉体(粒径最小)具有最大的红外质量消光系数。

(2) 1 000 目铝粉的中红外和远红外质量消光系数分别为 1.78 m²/g 和 2.01 m²/g,显著优于 1 000 目石墨粉体的值(分别为 1.02 m²/g 和 1.01 m²/g)。铝粉粒子与石墨粒子的分散性、径厚比和红外折射率的差异是导致这一现象的主要原因。

(3) 烟箱实验中,是否设置背景对测试结果影响较大,因此,在测试中必须设置背景。只要保证目标和背景之间有足够大的温差(例如大于 40 ℃),且目标的温度较高(例如大于 100 ℃),背景温度的高低对测试结果的影响就不大,因此,为了方便,可选用常温物体作为背景。同时,目标温度可设置在 100 ℃ 以上。

参考文献:

[1] 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.

[2] Chen bing, Li Chengjun, Xu Qinghong. Extinction property of particulate and technique path for choosing material of IR smoke screen [J]. *Journal of PLA University of Science and Technology*, 2004(6): 58–61. (in Chinese)
陈兵, 李澄俊, 徐庆红. 红外烟幕消光性能及选材途径分析[J]. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 2004(6): 58–61.

[3] 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.

[4] Du Xuefeng, Pan Gongpei, Qu Jiahui, et al. Study on broad band extinction performance of atomized screen [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 445–448. (in Chinese)
杜雪峰, 潘功配, 曲家惠, 等. 雾化幕障宽波段消光性能研究[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(2): 445–448.

[5] Wang Hongxia, Liu Daizhi, Song Zibiao. Infrared images shielded characteristics of carbon nano-materials [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2008, 16(5): 588–591. (in Chinese)
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): 588–591.

[6] Ba Shuhong, Wang Naiyan. Application of tiny graphite power in combustible anti-infrared smoke screen [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2008, 16(5): 592–594. (in Chinese)
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.

[7] Yin Qiushi, Deng Guodong, Xiao Lei, et al. Preparation and activity of flake aluminum powder [J]. *Explosive Materials*, 2016, 45(4): 30–34. (in Chinese)
殷求实, 邓国栋, 肖磊, 等. 片状铝粉的制备及其活性[J]. *爆破器材*, 2016, 45(4): 30–34.

[8] Wang Jiachun, Shi Jiaming, Yao Bing, et al. Testing study on performance of screening smoke using thermal imager [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(S1): 211–215. (in Chinese)
汪家春, 时家明, 姚冰, 等. 红外热像仪用于遮蔽烟幕材料性能的测试研究[J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(S1): 211–215.

[9] Wang Hongxi, Wang Hongxia, Xue Li. Study on the infrared extinction properties of graphite [J]. *Carbon*, 2004(4): 41–43. (in Chinese)
王宏喜, 王宏霞, 薛丽. 石墨红外消光性能研究[J]. *炭素*, 2004(4): 41–43.

[10] Feng Qiming, Dong Faqin, Wen Cai. Effect of diameter/thickness ratio and mix amount of flake graphite on capacity of conductive concrete [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2005(3): 71–74. (in Chinese)
冯启明, 董发勤, 温才. 鳞片石墨径厚比及掺量对导电混凝土性能的影响[J]. *矿物岩石*, 2005(3): 71–74.

[11] Rakić D. Algorithm for the determination of intrinsic optical constants of metal films: application to aluminum [J]. *Appl Opt*, 1995(34): 4755–4767.

[12] Query R. Optical constants[D]. CRDC-CR-85034, 1985.