

航天情报研究报告
HQ-S91006

内 部

热红外隐身材料测量评估方法

Measurement and Assessment
for Thermal IR Stealth Material



航空航天工业部第七〇七研究所

热红外隐身材料测量评估方法*

Measurement and Assessment for Thermal IR Stealth material

(1990年10月)

执 笔 姚 勇 Yao Yong

提要 本文综述了国外红外隐身材料发射率的测量方法和评价材料的隐身效果的方法。其中,对反射法、辐射法、量热法等几种测量发射率方法和实验室模拟测量系统、计算机模拟计算和评价方法作出了较详细的评述。

主题词 红外伪装材料, 红外测量, 计算机模拟

1. 前 言

随着红外隐身技术的发展,需要对大量的具有隐身作用的潜在材料进行评估。这通常包括挑选热红外隐身材料,确定其主要性能参数,并对它在真实环境中的效果做出评价。这不论对于材料的研究者还是对伪装方案的设计者都很重要。显然,若测试方法或测试手段不当,测量结果将不能正确地反映材料的性能和在真实环境下的效果,或虽有效但很难普遍使用,而隐身方案的设计和材料研究工作将因缺乏正确的指导和及时有效的评价反馈而陷入困境,并可能造成不应有的损失。因此建立能有效地测试、评价材料隐身性能的系统是热红外隐身材料研究的一个重要方面。

对材料的测评包括两个方面: a) 对隐身材料本身性能的评估,这种评价往往没考虑环境对材料的作用。b) 材料的隐身效果评估,这是对材料隐身效果更全面的评估,它不仅考虑材料本身性能,也考虑环境对材料的作用以及目标在背景中的特征。其中,最直接的方法就是外场实测,但此法复杂、耗资较大,常常受到各种条件限制而不能使用。虽然这种评估方法能更真实地反映材料的作用,但使用得不多。更多的是使用各种模拟方法,包括实验室模拟和计算机模拟系统,当然这是一种很复杂的系统,所涉及的问题已不再是单纯的材料问题,而常常需要对目标特性、背景特性、目标与背景相互作用、建模、模拟、探测器特性及图形技术进行研究。虽然这种模拟不能最终代替外场实测,但是它方便、省时、省钱很有发展前途。本文分两个部分分别评述热红外隐身材料的参数测量和材料效果的评估问题。

*热红外隐身材料研制状态分析报告之三, 红外隐身材料课题组

2. 红外隐身材料发射率的测量

对于热红外隐身材料，要求有较低的热红外发射率，热红外吸收率（特别是对太阳热辐射的吸收率 A_{sun} ）并要求材料表面规则反射率小，为漫反射状态。最后这个要求可通过适当的工艺解决。另外，由Kirchhoff定律，吸收对应发射，太阳能吸收率可定义为

$$A_{sun} = \int \alpha(\lambda) D(\lambda) d\lambda$$

其中， $D(\lambda)$ 为太阳辐射分布函数， $\alpha(\lambda)$ 为光谱吸收率，所以测定了材料的发射率就可基本确定材料的隐身特性。发射率是反映隐身材料的最重要的参数。这一部分就着重讨论发射率的测量。测量发射率值有多种方法，对于热红外隐身材料比较重要的有三种：a) 反射法；b) 辐射法；c) 量热法。下面分别进行讨论。另外对于伪装涂料的发射率值可通过数值计算得出，这对涂料的研究开发有重要的指导意义，这里也加以介绍。

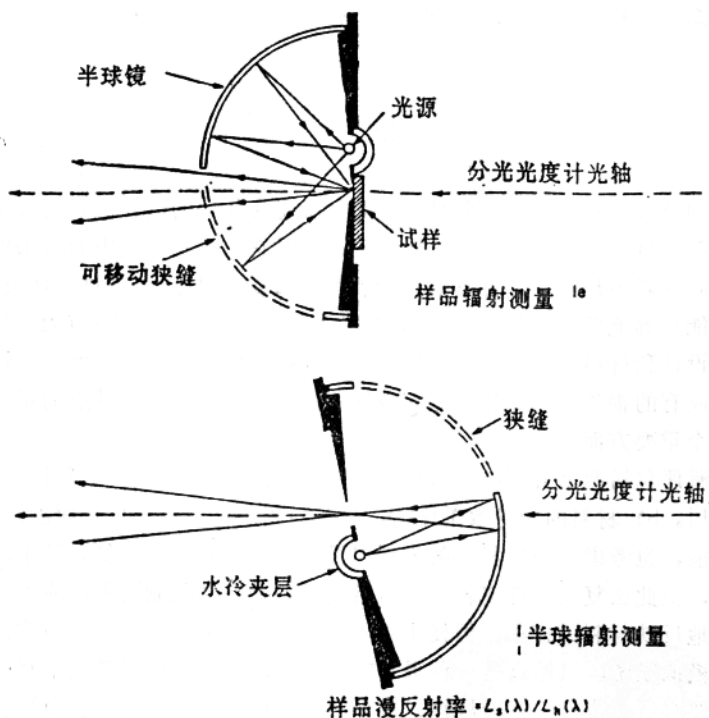
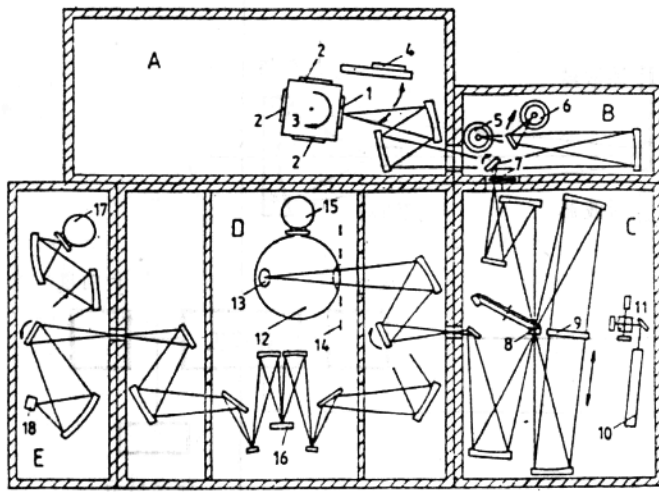


图1 NPL的反射计原理



A: 辐射部分附件

1 参考源

2 样品

3 加热器

4 镀金镜

B: 光源室

C: 干涉仪

D: 样品部分

12 积分球

13 样品槽

14 倾斜轴

15 探测器

16 样品

E: 探测器室

图2 西德方案的光学系统

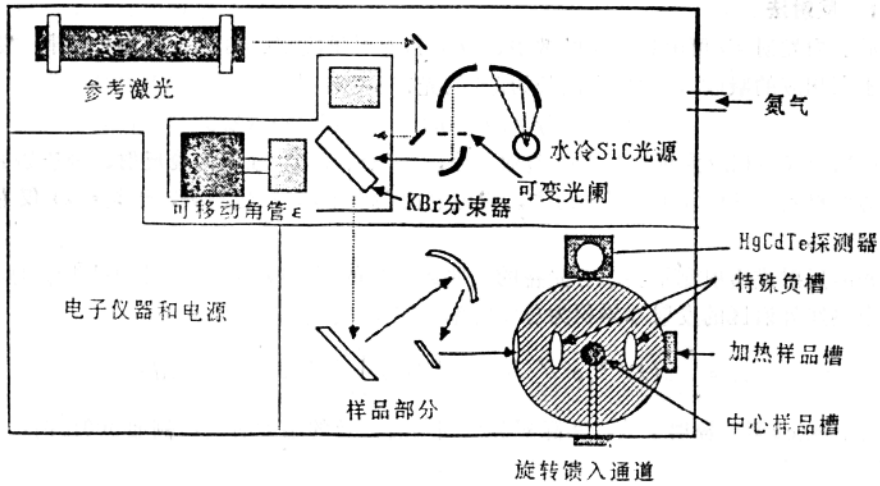


图3 带球形附件的反射计原理图。图中仅标出了关键元件，积分球可以转到各个入射角度，并且可多种形式放置样品。

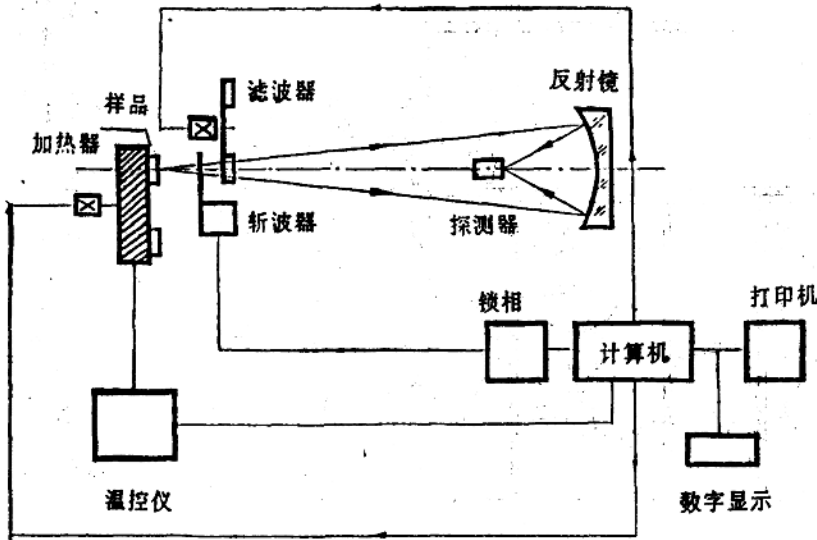


图4 IRE-1辐射测量仪的原理图

2.1 反射法

样品表面发射率 ϵ 可由该表面的散射、反射和透射量决定。由Kirchhoff定律,发射率 ϵ 总是等于其相应的吸收 α ,因此在波长为 λ 处的光谱发射率为^[1]

$$\epsilon(\lambda) = 1 - [\rho_d(\lambda) + \rho_r(\lambda) + \tau_d(\lambda) + \tau_r(\lambda)]$$

其中 $\rho_r(\lambda)$ 、 $\tau_r(\lambda)$ 相应为规则反射、透射部分, $\rho_d(\lambda)$ 、 $\tau_d(\lambda)$ 相应为漫反射、漫透射部分。对于不透明材料 $\tau_r(\lambda)$ 、 $\tau_d(\lambda)$ 部分消失,粗糙表面条件下 $\rho_r(\lambda)$ 也消失,于是 $\epsilon(\lambda)$ 仅依赖于漫反射 $\rho_d(\lambda)$ 。

这种漫反射或透射测量要求有完备的辐照或完备的辐射收集,因此常常用积分球装置测量。整个热红外谱区的发射率累积为总发射率 e_T 在某一温度下,有

$$e_T = \int_0^{\infty} \epsilon(\lambda) \lambda^{-5} [e^{C_2/\lambda T} - 1]^{-1} d\lambda / \int_0^{\infty} \lambda^{-5} [e^{C_2/\lambda T} - 1]^{-1} d\lambda$$

C_2 是Planck第二辐射系数。实际积分区间与所涉及的温度有关,例如300K时,为 $5 \sim 55 \mu\text{m}$ ^[2,3]。

美国国家物理实验室(NPL)采用的是半球反射/透射装置(装置如图1),它具有较高的性能水平。它利用半球铜镜把红外源的光线聚焦到样品上。反射计/透射计接到Perkin-Elmer 580B分光光度计上,它可按半球铜镜的取向和截止光孔来测量散射(漫反射)、规则反射。一个垂直柱状Opperman源沿样品光孔放置,这种安排有助于补偿大角度时的非轴像差。另外,它的另一个优点是Opperman源功率小于14W(其它装置一般为50W),这可有效防止在聚焦成像时样品过热。该装置测量精度高,可作为测量标准。其缺点是费时、测量表面小(12mm×1mm),只能测量均匀表面。

西德人利用傅里叶变换红外 (FTIR) 光谱仪和积分球测量表面粗糙不透明材料的发射率, 其装置见图 2^[3]。FTIR 光谱仪为 Bruker IFS 113V。它可对 1.5~15 μm 谱区测量。在近红外区 (1.5~5.5 μm) 用钨丝灯光源、Si/CaF₂ 分束器和 InSb 探测器。在中波红外区 (2~14.3 μm) 用 SiC 炽热源、Ge/KBr 分束器和 HgCdTe 探测器。该装置使用膜积分球, 其测量范围 (1.5~15 μm) 的长波限主要是由球壁散射特性在长波时衰减造成的。由于球薄膜相对低的反射率, 以及随着波长增加, 由球壁反射的光通量的规则反射部分增加, 因而造成积分球积分能力的部分丧失。这虽然使设备的精度和再现性受到限制, 但在光谱范围的绝大部分谱区内可以接受。与 NPL 结果相比, 其反射率精度为 1% (5~12 μm) 和 7% (2~5 μm 和 12~14 μm)。它的优点是样品操作容易, 材料和样品尺寸几乎可自由选择, 甚至允许样品有小的弯曲, 对样品无热导率限制, 没有样品或光源的升温问题。对于某些大尺寸样品, 这可能是唯一可用的测量方法。

美国海军实验室 (NRL) 的积分球-傅里叶变换光谱仪测量装置如图 3^[4] 所示。它采用 Mattson Cygnus-25 光谱仪, 水冷却的 1300 $^{\circ}\text{C}$ SiC 光源, 计算机控制的光阑, 一个 KBr 分束器和一个面积为 4mm \times 4mm 制冷 HgCdTe 探测器。积分球内壁也镀金膜, 在 10 μm 处反射率为 96.5 \pm 0.5%。该装置使用非成像会聚器, 用一个圆锥镜把对角度的依赖性降至最小。该装置的重复精度高 于 0.2% (3~14 μm)。

反射法适合测量高反射材料。由于隐身材料的发射率一般很低, 不易直接用辐射法测量, 因此这种方法对隐身材料的测量具有重要意义。

2.2 辐射法

辐射法是通过测量样品的辐射能量, 并用它与同一温度下标准黑体的辐射能量相比, 从而直接得到发射率。这种方法一般采用加热样品或冷却环境的方法造成样品温度高于环境温度, 达到样品对环境的辐射。为了得到高精度, 有时需要真空系统。一般说来, 辐射法较适合于高发射率材料, 而用于在较低温度下测量低发射率材料则有很多困难。因为此时材料反射的辐射能增强, 干扰了样品自身辐射^[5,6]。

上海技术物理所的 IRE-1 型辐射测量仪正具有这类仪器的典型结构, 如图 4。它不同于一般同类测量装置的特点是加热器可同时加热 7 个样品, 达到热平衡时 (约 1 小时) 即可同时测量 7 个样品, 这就有效地提高了测量速度。因而适合于广泛筛选材料的需要。样品加热温度为 150~200 $^{\circ}\text{C}$, 测量波长范围为 8~20 μm , 可利用滤光片分光或接光谱仪来测量^[7]。

美国 EG&G 公司的 SR450 发射率测量装置是在 SR400 辐射计的基础上配上加热室及温控设备, 可测量薄膜和涂层红外伪装材料的发射率。其测量波长范围为 1.5~25 μm , 样品加热温度为 30~100 $^{\circ}\text{C}$, 温控精度 \pm 1 $^{\circ}\text{C}$, 一般 5 分钟后就可达到热平衡状态^[8]。

利用热成像器也可以测量材料的发射率和发射率的空间分布^[1,9,10]。热成像器一般测量样品表面的发射和反射的不确定比例的混合结果。对于均一温度环境下无反射的热辐射, 该结果就是发射。不透明材料的发射率和反射率是互补量, 而且被非均匀辐照的目标的反射辐射等于辐照度乘以反射率。NPL 测量空间发射率分布的装置是采用增强型热成像通用组件 I (TICM I) 系统组成的^[1]。探测器是 8 元增强型 SPRITE (8~12 μm) HgCdTe 探测器 (也可通过更换更短波长的滤光片和探测器覆盖 2~5 μm)。高分辨率热成像器的输出接到 Cambridge 有限公司的 GEMS 成像处理系统上。另外, 美国陆军 R.H. Munis 等人也用热成像技术对几种绝热薄膜材料的发射率进行了测量 (2~5.6 μm)^[10]。

2.3 量热法

当使样品加热至高于环境温度而向环境辐射,且加热功率等于辐射功率时,样品不再升温,处于热平衡状态,此时样品的热发射率可写为

$$\varepsilon = P/\sigma A(T_1^4 - T_2^4)$$

P 是使样品处于稳态温度 T_1 时所需加热功率, σ 是 Stefan-Boltzman 常数, A 是样品面积, T_2 为周围样品环境温度^[11,12]。

这种测量方法主要有两个缺点:

- a. 取得稳态温度时间较长,特别是当发射率值非常小时更是如此。
- b. 如果样品固定在支架上会使精度下降。

印度的 G.Moban Rao 等人设计的真空发射率计改善了这两个问题^[12]。其装置基于稳态量热学原理,用两个类似的样品(50mm×50mm)夹着加热器,并用铜螺钉固定,用两个 Chromel-Alumer 热电偶监测温度。采用夹心加热的方法消除了支架对精度的影响。这类系统即使采用最好的技术也需 6 小时才能达到 ±0.2℃ 的精度,但是一般说来,当温度变化范围不大时(正负十几度)对 ε 值影响不大。因此,他们认为可在 1 小时左右就可开始测量。与精确测量进行的比较表明两者的结果接近。

除了上述几种方法外,还有一些特殊的方法,如通过测量薄膜材料的光面电阻 R_D , 可以通过下式推算有关材料的发射率^[13]

$$\varepsilon = 1 - (1 + 0.0053 R_D)^{-2}$$

另外美国 D&S 公司的便携式测量发射率的仪器很有特点^[14]。它方便、实用,测量用时短,但精度欠佳。日本人在它的基础上改进并重新设计,达到了较高的精度和稳定性^[15]。

2.4 利用基本光学参数计算涂料发射率

由于涂料的基本原料、配方及工艺都对涂料的性能有重要影响,筛选涂料和优化各种参数需做大量实验工作。因此有必要建立一种涂料发射率的数值计算方法。

美国的 Aronson 等人^[16,17]和日本空间和宇航科学学院的 T.Hashizume 等人^[18]提出的计算方法解决了这个问题。他们首先将原有的只适于球状颗粒的米氏(Mie)散射理论改造成为适合于非球状填料(包括颗粒和纤维)和填料+粘合剂系统,从而使其计算方法可用于计算和模拟涂料的光学性能。按照这种计算方法,只需给出涂料中各成分的光学常数(复折射率指数)、填料的粒度和分布、填料的体积分、涂层厚度和基材反射率等容易取得的参数,即可通过计算机迅速预测一种新的涂料系统的反射和发射特性。显然,如果该方法的计算值足够准确,即可以指导涂料研究,从而大大节省配方实验的时间和费用。它们比较研究表明,计算机模拟值和实测值吻合较好,从而初步证明了此类方法的有效性。

进行上述计算时,通常唯一不易查得的原材料参数是粘合剂的 n 、 K 值。Hashizume 提出了一种测量与计算相结合的有效方法,可用于确定拟合剂的 n 、 K 值^[18]。

3. 隐身效果的评价

红外隐身材料的评价主要是指通过测量表征红外隐身材料的有效性。由于隐身材料的效果除取决于材料本身特性外,还取决于材料在目标上的应用设计和背景特性,因此,最直接

的方法只能是外场实测。但因这种方法受环境影响大，重现性较差，为获得可靠的结果，需安排有统计意义的大量操作，以致整个实验过程冗长繁杂耗费较大，无法满足材料研究中的经常性需要。为此人们常采用一些较为简单的实验室级测评方法，尽管其结果可能与实战效用不尽一致。目前这类实验室测评方法主要有三种：

- a. 测量材料本身的基本光学参数并据此对材料进行初步筛选。
- b. 利用实验装置模拟典型的实战环境，测量所研制的材料的重要光学参数对这些环境条件的响应，并据此对材料进行初级评价。
- c. 建立环境和目标（即使用红外隐身材料的目标）的数学模型，模拟红外隐身材料的作用，并评价其效果，据此指导材料研制工作。

第一种方法是对材料自身特性进行评价，在材料的初步筛选、研究与开发阶段是经常使用的重要方法，也是必不可少的。由于已经在前面的材料参数测量部分详细说明，这里就不再讨论。材料的热红外发射率无疑是反映材料热隐身性能的重要指标，但还不能直接反映材料在实战中的隐身效果，后者除受材料本身特性的制约外，还取决于“背景-目标-探测器”系统的整体情况。只有在模拟的真实环境中比较和评价材料，才能对其隐身效果得出更恰当的结论。后两种方法是评价材料在环境中的效果。除包括材料自身特性的评价外还包括环境和背景的特性及对目标的影响等因素。这不仅涉及材料本身性能特征的测量，而且涉及目标的探测概率的估算。

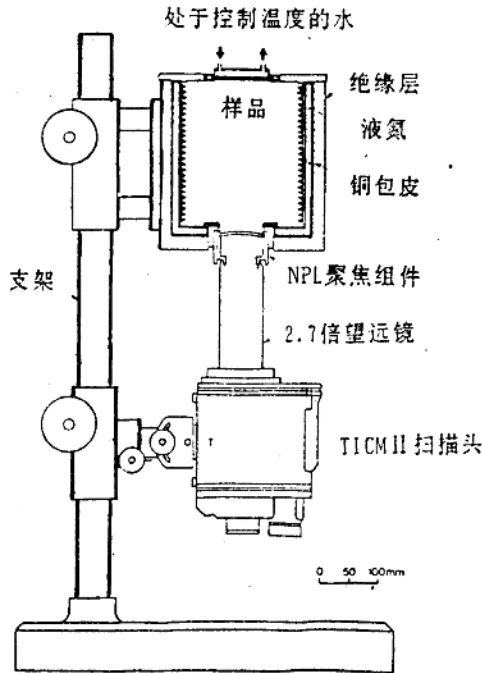


图5 NPL测量辐射率空间分布的设备

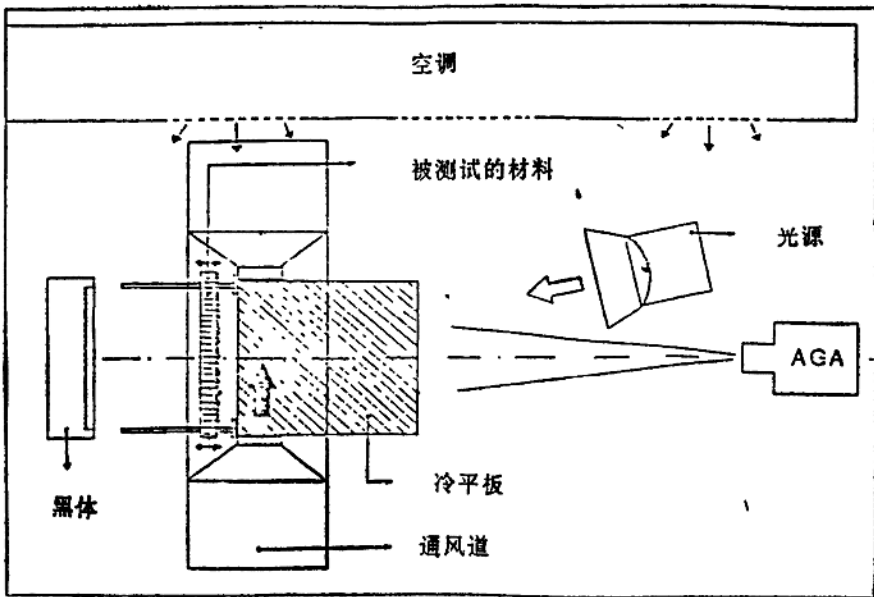


图6 西德的实验测试方案

这类方法与外场实地测量相比成本效益更好。当然实验室模拟是不能代替外场实测的，但使用模拟方法使人们能在开发的早期阶段研究伪装方案，并在实际测试之前即开发优化方案和评估特定方案的工作。

由于真实条件下目标与背景的情况很复杂，并且在不断变化，完全真实的模拟不太可能，只能采取一些近似方法。例如创造的小空间范围的微环境。

3.1 实验室模拟测评系统

该系统一般包括材料参数测试和环境模拟两个基本部分。西德的一套能模拟简单环境影响的装置值得注意^[19]。其参数测试部分集中到一测试台。参数测试采用反射法，测试台上装有一个直径为6 cm、试样孔径为1英寸的积分球和InSb-HgCdTe夹芯探测器，以测量样品的反射特性，并据此求出发射率和吸收率等与隐身性能直接有关的重要参数。测量谱区除包括3~5 μm和8~14 μm两个大气窗口外，还可包括0.4~1.2 μm的近红外、可见谱段。为使该试验装置可以同时考查材料的多频谱隐身兼容性，还计划加装必要设备，以同时测试试样的可见光单向反射率以及对激光和毫米波（雷达波）的吸收能力。

环境实验台装在一个底板为8.0m×4.5m的热稳定舱中，其中装有风洞、黑体辐射源、水银灯和冷屏蔽板等模拟设施，可以模拟阴暗、昼夜、季节、风速等环境变化和伪装目标内有无热源等情况。并用两台记录密度为20帧/秒的AGA Thermorision摄像机（782长波（8~12 μm）和短波（3~5 μm））测量试样温度对各种环境条件的响应（见图6）。

评价被测材料隐身性能的方法包括相对评价法和绝对评价法两种；前者也称为“比较法”，即通过把已知其特性（例如经过外场测试）的材料和待测材料置于同一模拟条件下测试性能，比较测试结果来确定新材料的优点、不足和改进方向。这种方法简单易行，在许多

场合能满足实际需求，为实验室评价隐身材料性能的主要方法。目前需要做的是完善参比材料系列的工作。绝对法（也称直接评价法）是一种更加理想的评价方法，它用评价函数 P 来度量材料的性能的优劣。

$P = 1$ 表示材料的隐身效果理想。

$P = 0$ 表示材料无隐身作用（此时材料在热像图上不是热点就是冷点）。

使用绝对法评价材料的隐身性能，需将材料的实验值变成 P 值，为此必须先完成以下两个步骤：

- 1) 估价模拟条件的权重。
- 2) 确定背景的“特性温度带”。

由于这种方法的实行必须以建立有效的背景信号特征的模型等条件为前提，而目前这些条件涉及的课题正在研究中，这种方法不如前一种方法成熟。

3.2 计算机模拟计算和评价方法

这种方法的特点是不用实验设备测评热红外隐身材料的效果，并可根据要求实现评价材料对其它谱段的隐身效果。这种方法的关键是建立准确和有效的目标和背景或材料与环境的数学模型（或模型库）来正确模拟目标与环境及其变化的真实特征。

英国航空航天公司的模拟方法很有特点^[20]。它仅对目标（飞行器）建立数学模型，天空背景和地面反射的影响预先利用热成像通用组件（TICMI）进行测量，并根据大气传输而使信号特征的改变进行修正，输入到计算机（并数字化）作为背景部分。然后，加入目标信号特征部分，这一部分包含了背景对目标的影响。通过计算机模拟，求出目标的信号特征和在背景条件下的形态，并在图像终端上显示。所用的飞行器模型如下：观察者与飞行器距离 $R = 0$ 时飞行器的视在辐射 L_i 为

$$L_i = L_s + L_g + L_a$$

这里， L_s 为飞机本征（自身）辐射， L_g 地面反射， L_a 天空反射， $R \neq 0$ 时，进入探测器的热信号为

$$L_{i,R} = \varepsilon_i \Gamma^x(\lambda, T_i, \tau_{\lambda,R}) + (1 - \varepsilon_i) V_{g \rightarrow i} \Gamma^x(\lambda, T_{app,g}, \tau_{\lambda,R}) + (1 - \varepsilon_i) V_{a \rightarrow i} \Gamma^x(\lambda, T_{app,a}, \tau_{\lambda,R}) + \varepsilon_a \Gamma^x[\lambda, T_a, (1 - \tau_{\lambda,R})]$$

其中 $L_{i,R}$ 为在 R （单位 km）处的总的视在辐射， ε_i 为目标的发射率， T_i 为目标的绝对温度（K）， λ 为感兴趣的辐射波长（这里为 $8 \sim 13 \mu\text{m}$ ）， Γ^x 为大气透射的 Blannck 等式

$$\Gamma^x(\lambda, T, \tau_{\lambda,R}) = \int_0^1 \frac{1.19 \times 10^{-22} \tau_{\lambda,R} d\lambda}{\lambda^5 [\exp(0.0144/\lambda T)]^{-1}} \text{Wm}^{-2} \text{sr}^{-1}$$

$\tau_{\lambda,R}$ 为大气透射率， $V_{g \rightarrow i}$ 为地面-目标视场因子，即目标看到地面部分， $T_{app,g}$ 为地面视在温度， $V_{a \rightarrow i}$ 为天空对目标视场因子， $T_{app,a}$ 为天空视在温度， ε_a 为大气发射率（假定整个谱带内为常数）， T_a 为空气温度（单位 K）。

式中第一项代表目标的本征辐射，第二项为地面反射，第三项为天空反射，第四项为天空光线部分。

由于计算机容量的限制，目前只对静态目标（匀速飞行）的目标进行模拟。显然这种方法也可应用于动态方法中，而且适当改造也可用于地面目标的模拟。用类似的方法也可以对其它谱段的效果进行评价。实验证明，这种方法提供了一个有力的评估手段，可用于研究伪装材料，目标与背景信号特征以及目标被探测的概率等问题。

美国陆军沃特威斯实验站 (VES) 建立了一个伪装效果评估系统 (CESS)^[21], 以使设计者或设备使用人员评价被攻击概率并采取伪装方案对付预计的威胁。该系统的基本原理是把天气、背景、伪装和结构特性综合成代表目标场景的信号特征, 然后, 模拟它在大气传输中的改变, 并由目标捕捉传感器接收。该系统通过传感器逻辑处理信号特征, 并提供由武器的传感器系统捕获目标的能力。有关这种能力信息可通过战斗模型来决定。在用于对付热威胁的CESS中, 已经开发了预测目标表面温度和辐射的数学模型, 并可用于室温条件下的各种地貌。这些模型可针对土壤、岩石、水、树冠、混凝土、木材、金属及具有其它表面特点的物体, 预测其信号特征。输入计算机的数据来源于外场实测、物理模型或成像处理器的数据。最后结果输出可合成为目标及周围场景的图像。大气衰减和辐射的影响包括粉尘、水蒸汽、烟雾等的作用, 被归入信号沿传输路径的衰减。这种方法为设计者提供了全面的考虑, 这类评价涉及的已不单是材料问题。目前WES正开发CESS的其它部分, 与热红外系统类似的雷达版本的CESS也在开发中。

评价隐身效果的计算机模拟方法对于红外背景的模式有很强的依赖性, 因此在这方面有大量的研究工作要做。例如, 美国陆军夜视实验室 (NVL) 开发的SPACE计算机模拟系统^[22]可以计算和模拟太阳、雨雾、大气、云层和地面的热红外信号, 预测目标和背景间的反射辐射。美国陆军弹道研究实验室和康内尔大学建立了一种简单的模拟红外背景数学模型和模型库^[23]。以色列对于在沙漠地形条件下的红外背景进行了模拟和测量^[24]。目前已有多种特定背景下的模型^[22~25], 同时正在努力建立复杂背景的综合模型以实现目标特性的更理想评价^[25]。

4. 结论和建议

目前国外已对热红外伪装材料建立了系统的测评方法。关于材料发射率的测量方法, 国外已经很完善, 这可能从他们高水平的辐射测温技术中获益匪浅。但在评价隐身材料隐身效果的方法方面还需进一步完善。例如, 对目标与背景的模拟和建模、计算机算法和编程等方面, 仍需要进一步发展。另外, 模拟复杂条件下的背景和考查材料的多波段兼容性需要建立大型背景库和采用大型计算机。从目前的发展情况看, 计算机模拟技术将会以更快的速度发展, 并使其结果更接近实际。

从国外的隐身材料测评方法的发展情况看, 我们认为下面的几点值得注意:

- a. 国外测评方法的基本发展趋势是向衡量和评价材料隐身效果的方向发展。国内目前虽然还停留在测量材料本身参数的阶段, 但迟早必须走这一步。对此我们应当早做安排。
- b. 发展能与计算机、特别是微机配套使用的测量仪器以及相应的软件。这不仅能方便实验、提高效率, 还可进一步应用于将来的评估系统中。
- c. 开发对红外隐身效果的评价的研究, 重点是建立实验室模拟评价方法和计算机模拟评价方法。可以以国内其它单位现有的目标与背景特性的研究成果为基础, 进行研究和修改, 以适应隐身效果评价的需要。

隐身测评方法在隐身材料研究中占有重要地位, 材料研究的深入必将促使其进一步发展。

参 考 文 献

- [1] Larkin J A et.al, NPL facilities for measuring the emissivity of materials for near-ambient conditions, SPIE, Vol.636, p.71-78.(1986).
- [2] Clarke F J F et.al, Measurement of total reflectance, transmittance and emissivity over the thermal IR spectrum. Infrared Phys., Vol.25, No.1/2, p.359~367.(1985).
- [3] Gindele K et.al, Measurement of near-normal/hemispherical reflectance and directional emittance in the mid-infrared. SPIE. Vol.807, p.160~164. (1987).
- [4] Leonard M et.al, Infrared Diffuse Reflectometer for Spectral, Angular and Temperature Resolved Measurements, SPIE, Vol.807, p.148~159. (1987).
- [5] 江涛泽, 比辐射率校正技术. 红外, 8~12页.(1989).
- [6] Barua S K. Measurement of band emissivity of porous spheres at high temperatures. The Canadian Journal of Chemical engineering. Vol. 65, p.329~334.(1987).
- [7] 苏锦文, IRE-1红外辐射测量仪研制技术报告.(1989).
- [8] Precision infrared emissivity meter 1.8~25 μ m, EG&G Gamma scientific LTD.
- [9] 段靖峰, 热发射率的热象测定法研究, 红外技术, 11卷(5), 29~33页.(1990).
- [10] Munis R H et.al Thermal emissivity of diathermanous materials. Optical Engineering. Vol.24(5), p.872~878. (1985).
- [11] Calvert R L et.al. Surface coatings for low emittance in the thermal surveillance band. AD-A152257. (1984).
- [12] Rao G M et.al, Vacuum emissivity meter for thermal emittance measurements of coatings. Rev. Sci. Instrum, 59(5), p.817~818. (1988).
- [13] Frank G et.al, Transparent heat-reflecting coatings based on highly doped semiconductors. Thin solid films. Vol.77, p.107~117. (1981).
- [14] Emissometer Model AE Operating Instructions. Devices & Services Co.
- [15] Sando M, High accuracy emittance measurement by newly designed portable device, SPIE. Vol.692, p.136~142. (1986).
- [16] Aronson J R et.al, Modelling the infrared reflectance of paints, AD-A121879.(1982).
- [17] Aronson J R et.al. Modelling the infrared reflectance of paints and coatings. ADA110824. (1982).
- [18] Hashizume T, The evaluation of the emittance of coating paints, AIAA-85-0992.(1985)
- [19] Clement D et.al. Laboratory assessment of camouflage materials effectiveness in the thermal IR. IEEE Conference No.263, p.65~96. (1987).
- [20] Davies P A W et.al. Measurement of aircraft detectability using simulated infrared surveillance equipment. SPIE Vol.807, p.73~78. (1987).
- [21] Keown M P et.al. Camouflage research, The military engineer, No. 8, p.452~453. (1985).
- [22] D'Agostino J A The SPACE thermal signature model principles and applications, SPIE, Vol.781, p. 2~5.(1987).
- [23] Strenzwilk D F. A simple mathematical model for the simulation of IR background. AD-A193797. p.27~36.(1989).
- [24] Ben-Yosef N. Measurement and modelling of natural desert terrain in the infrared. Optical engineering. Vol.27(11), p.928~932.(1988).