

引用格式: 雷沛, 吴诗雅, 王蓝陵, 等. 红外透波材料高温动态光学性能测试方法研究进展[J]. 航空材料学报, 2026, 46(10): 60-73.

LEI Pei, WU Shiya, WANG Lanling, et al. Research progress on optical property test technologies of infrared materials under high-temperature and dynamic conditions[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2026, 46(10): 60-73.

红外透波材料高温动态光学性能 测试方法研究进展

雷 沛^{1*}, 吴诗雅², 王蓝陵¹, 谈佳仪¹, 郝常山¹, 陈小婷^{3*}

(1. 北京航空材料研究院股份有限公司, 北京 100095; 2. 北京理工大学 网络空间安全学院, 北京 100081; 3. 北京理工大学 材料学院, 北京 100081)

摘要: 随着红外技术在高超声速飞行器、红外制导及空间探测等领域的发展, 红外窗口材料在高温服役环境下的光学性能测试问题日益突出。传统测试方法主要适用于低温、窄波段和静态条件, 难以反映材料高温动态光学行为。本文系统梳理透过率、折射率、发射率和吸收系数等关键光学参数在高温动态条件下的测试原理与方法, 重点分析傅里叶变换红外光谱技术、双光束分光光度技术、V 棱镜法、最小偏向角法、Etalon 法和激光量热法的应用特点及适用范围, 总结国内外研究进展, 比较不同方法在测试精度、温度范围和实验条件等方面的优缺点。现有研究仍存在高温动态测试标准不统一、通用测试设备不足、测试温度和波段范围受限、服役环境模拟能力不足以及增透保护薄膜研究薄弱等问题。针对上述问题, 提出高温动态连续测试、多波段宽谱测试、增透保护薄膜高温光学性能测试和模拟服役环境测试等发展方向。

关键词: 红外窗口材料; 光学性能; 高温动态测试方法; 透过率; 折射率; 发射率; 吸收系数

doi: 10.11868/j.issn.1005-5053.2026.000006

CSTR: 32420.14.j.issn.1005-5053.2026.000006

中图分类号: V254

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2026)10-0060-14

Research progress on optical property test technologies of infrared materials under high-temperature and dynamic conditions

LEI Pei^{1*}, WU Shiya², WANG Lanling¹, TAN Jiayi¹, HAO Changshan¹, CHEN Xiaoting^{3*}

(1. Baimtec Material Co., Ltd., Beijing 100095, China; 2. School of Cyberspace Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: With the development of infrared technologies in the fields such as hypersonic vehicles, infrared guidance, and space exploration, the evaluation of optical properties of infrared window materials under high-temperature service conditions has become increasingly important. Conventional testing methods are mainly applicable to low-temperature, narrow-band, and static conditions, and therefore can't adequately reveal the high-temperature dynamic optical behavior of these materials. This paper systematically reviews the testing principles and methods for key optical parameters, including transmittance, refractive index, emissivity, and absorption coefficient, under high-temperature dynamic conditions. Particular attention is given to the application characteristics and applicable ranges of Fourier transform infrared spectroscopy, double-beam spectrophotometry, the V-prism method, the minimum deviation angle method, the Etalon method, and laser calorimetry. Recent research progress is summarized, and the advantages and limitations of different methods are compared in terms of testing accuracy, temperature range, and experimental conditions. Existing studies still face several challenges, including the lack of unified standards for high-temperature dynamic testing, insufficient availability of general-purpose testing equipment, limited testing temperature and spectral ranges, inadequate capability for

simulating service environments, and insufficient research on antireflective protective films. In response to these issues, future development directions are proposed, including high-temperature dynamic continuous testing, multi-band broadband testing, high-temperature optical performance testing of antireflective protective films, and testing under simulated service environments.

Key words: infrared window materials; optical property; high-temperature dynamic testing method; transmittance; refractive index; emissivity; absorption coefficient

红外技术是研究红外辐射的产生、传播、转化、测量及其应用的技术科学,在国民经济和国防装备领域具有十分广泛的应用场景^[1]。红外技术的发展以红外材料的发展为先导和标志。红外材料是红外光电探测技术的基础,在红外技术的研究中有举足轻重的地位。红外材料主要分为两类:红外探测材料和红外窗口材料。红外窗口材料位于红外探测器前端,既要保证目标红外辐射的高效透过,又要保护光学成像探测系统,是重要的结构/功能一体化部件,其应用量大、覆盖面广,并趋向应用于多波段、大尺寸。红外窗口由基底材料和功能膜层两部分组成,统称为红外窗口材料。研究和发

展红外窗口材料是红外技术高速发展的关键驱动力。由于大气光谱受水、二氧化碳和臭氧的影响,存在中波红外(3~5 μm)和长波红外(8~12 μm)两个大气窗口。目前,中波红外窗口材料主要有氟化镁(MgF_2)、氧化钇(Y_2O_3)、人工蓝宝石(sapphire)、尖晶石(spinel)和氮化铝(AlN)等。其中多晶氟化镁被认为是综合性能比较好的材料,美国红外型 AIM 系列空空导弹都用 MgF_2 多晶头罩。 MgF_2 透过波段较宽、折射率较低、吸收系数和发射率较小,且折射率温度系数较低,表现出较好的高温光学稳定性^[2];蓝宝石、尖晶石和 AlN 在中波红外波段均具有较高透过率,同时兼具较好的机械性能和热稳定性,但其折射率及折射率温度系数相对更高^[3-5]; Y_2O_3 则具有较低吸收系数和较低发射率,在高温条件下仍能保持较好的透光性能^[6]。理想的中波红外窗口材料除应具备目标波段内较高透过率外,还应同时满足低吸收、低发射率和较小折射率温度系数等要求,以降低高温环境下的热辐射干扰和热致光学误差,从而保证红外系统的成像质量与探测精度^[2-6]。

长波红外窗口材料主要有:IV族半导体材料锗(Ge)和金刚石(diamond);III-V族化合物砷化镓(GaAs)、磷化镓(GaP)等;II-VI族化合物硫化锌(ZnS)、硒化锌(ZnSe)、碲化镉(CdTe)等,其中硫化锌不仅有较高的光谱透过率、较宽的透过波段,而且有良好的力学性能、热性能和化学稳定性等,

是目前最常用的长波红外窗口材料^[7]。长波红外窗口材料光学性能参数存在显著差异^[8-12]; ZnS 和 ZnSe 兼具较宽的透过波段和较好的综合性能,是当前应用较广的长波红外窗口材料; GaP 与 GaAs 具有较低吸收特性,但折射率相对较高; Ge 虽具有较宽透过范围和高折射率,但其折射率温度系数较大,高温下易引发明显热光学效应;金刚石则凭借超宽透过波段、极低发射率及较小折射率温度系数,在极端服役环境中表现出突出优势。因此,长波红外窗口材料的选用需综合权衡透过波段、吸收损耗、热辐射水平及高温折射率稳定性等因素。

典型红外窗口材料除需满足目标波段的高透过性外,还应具备若干关键技术参数要求。首先,材料在工作波段内应具有较低的吸收系数 α ,一般要求 $\alpha < 0.01 \text{ cm}^{-1}$,以减小光能衰减并避免高温下吸收增强导致透过率显著下降。其次,为降低窗口自身热辐射对探测器的噪声贡献,材料在高温条件下应具有较低的光谱发射率 ε ,一般要求 $\varepsilon < 0.1$ 。此外,高温环境下窗口往往存在温度梯度,折射率随温度变化会引起热致光程差和像差,因此材料的折射率温度系数(dn/dT)应尽可能小,通常希望满足 $|\text{dn/dT}| < 10^{-5} \text{ K}^{-1}$,以保证成像稳定性。最后,折射率水平也需兼顾界面反射损失与光学设计可实现性,工程上多倾向于选择中等折射率(约 1.3~2.5)的窗口材料。综上,高温红外窗口材料应满足低吸收、低发射率和低热光敏感性等指标,以支撑高温条件下的透过性能与成像质量。

红外材料部件在服役过程中,由于受到气动加热的影响,窗口表面瞬间被加热到较高的温度。当飞行器以 3~4 马赫在海平面飞行时,其表面温度可以达到 500~900 $^{\circ}\text{C}$ ^[13]。在此温度范围下很多红外窗口材料无法使用,甚至有些红外材料产生热分解,或者吸收系数和折射率显著增加,从而影响红外探测器的探测精度。此外,随着窗口表面温度的提高,其本身的热辐射也在增加,与目标的热辐射叠加在一起产生干扰信号,降低成像质量,影响探测和制导精度。因此,高温和温度变化对红外窗口材料光学性能的影响,是该领域重点关注的问题。

基于此,本文重点介绍几种典型红外窗口材料在高温动态条件下主要光学性能的测试方法,总结国内外研究现状及展望未来的发展趋势。

1 红外窗口材料透过率测试方法

1.1 透过率测试基本方法

红外窗口材料广泛应用在各种成像技术和武器的光学系统中,各种光学系统的成像质量和灵敏度在很大程度上取决于光学材料的透过特性。目前测量透过率最主要的设备是傅里叶变换红外光谱仪。但是对于高温透过率的测试,国际并无统一的规范或标准。

傅里叶变换红外光谱仪主要由红外光源、迈克尔逊干涉仪、检测器和数据处理系统组成。红外光源辐射经分束器分为两束光,分别进入定镜与动镜形成的干涉臂。动镜的往复移动引入光程差,使两束光重新叠加后产生干涉信号/干涉图。该干涉信号经过检测器转换为电信号,并通过模块转化实现数字化采集,最终由计算机系统对干涉图进行傅里叶变换得到样品的红外光谱信息^[14]。对于温度变化对透过率影响的测量,通常采用在傅里叶变换红外光谱仪上安装附件加热炉对样品进行加热测量。

此外,双光束分光光度计也可进行红外透过率测试。双光束分光光度计的基本原理是将光源发出的光分为两束:一束通过待测样品(样品光束),另一束通过参比通道(参比光束)。仪器同时检测两束光强并取其比值,从而获得样品的透过率谱。相比单光束测量方式,双光束结构能够有效补偿光源强度波动及环境因素引起的误差,提高测量的稳定性与精度,因此适用于不同温度条件下窗口材料光谱透过特性的准确表征。

1.2 红外窗口材料高温透过率国内外研究现状

在红外窗口材料高温动态透过率的研究方面,美国约翰霍普金斯大学^[15]、洛克西德马丁公司^[16]和雷恩公司^[17]以及海军实验室等率先开展高温透过率测试技术研究工作,取得了一定进展。

Thomas 团队^[18-20]分别在 1999 年和 2003 年利用 BOMEM DA3.02 型傅里叶红外光谱仪对 GaP、GaAs、ZnS、ZnSe 和 MgF_2 等红外材料的高温透过率进行了分析。该测试装置由宽带傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)和激光透射仪共同组成,使用氦氖激光源(分别为 632.8 nm、3.39 μm)和 CO_2 激光源(10.6 μm)。光谱仪能进行精确的宽范围光谱透过

率测试,而激光测试装置能在某一频率点提供优良的稳定性。因此,采用两种设备的联合测试能够确保透过率实验数据的精度。FTIR 装置主要由碲镉汞(MCT)探测器和可用于进行 2~20 μm 测量的 KBr 分光器组成。测试中使用加热炉进行真空加热来模拟样品在高温下的状态,加热范围为室温到 500 $^{\circ}\text{C}$ 。样品温度通过镍铬合金热电偶测得。为克服高温条件下加热炉的辐射和背景透过率偏移引起的测量误差,在高温条件下对测试结果进行基线校正。基底校正有两种方法:一种是在未放样品的条件下,测量加热炉的透过率,对获得的测试曲线进行拟合,然后对样品的透过率曲线进行校正;另一种方法是采用单波长激光(632.8 nm、3.39 μm 和 10.6 μm)在相同温度下对样品的透过率进行测量,然后对样品在整个波段的透过率进行校正。图 1 为 MgF_2 材料在不同温度下的透过率随波数的变化关系^[18]。总体来看, MgF_2 在大部分波数范围内保持较高透过率,温度升高后透过率仅呈现轻微下降趋势。透过率变化主要集中在低波数(长波)端,随温度升高晶格振动相关吸收增强,使长波截止边向高波数方向移动;而在中波红外核心工作区(3~5 μm)各温度曲线基本重合,说明其透过性能具有较好的高温稳定性。此外,在约 3500 cm^{-1} 附近存在窄而深的吸收谷,其位置随温度变化不明显,可能与杂质或表面吸附基团的特征吸收有关。

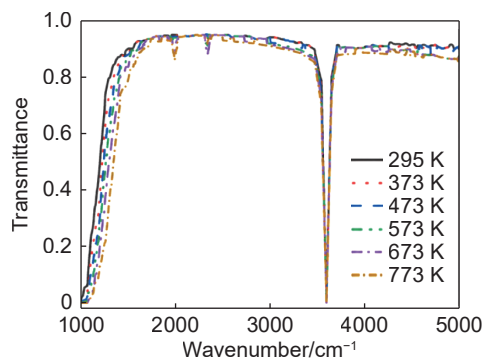


图 1 MgF_2 在不同温度下的透过率^[18]
Fig. 1 Transmittance of MgF_2 at different temperatures^[18]

Freeland 等^[21]利用双光束分光光度计对 3~5 μm 和 8~12 μm 波段的典型红外窗口材料的高温透过率进行测量。为提高测量准确性,还对测量结果进行了修正,即:

$$T_{\text{trans}}(t) = T_{\text{app}}(t) - E(t) \quad (1)$$

式中: $T_{\text{trans}}(t)$ 为在温度 t 条件下测试样品的透过率; $T_{\text{app}}(t)$ 为在温度 t 条件下装置测得总的透过率; $E(t)$ 为在温度 t 条件下测试装置的发射率。实验过

程中采用加热炉对被测样品进行缓慢加热,以减少热冲击对被测样品的影响,该加热炉的加热温度最高可达 600 °C,加热精度为 ± 2 °C,测试温度点分别为 30、100、200、300、400、500、600 °C。图 2 是 Freeland 等利用此方法测试的 ZnS 材料在不同温度下的透过率^[21]。

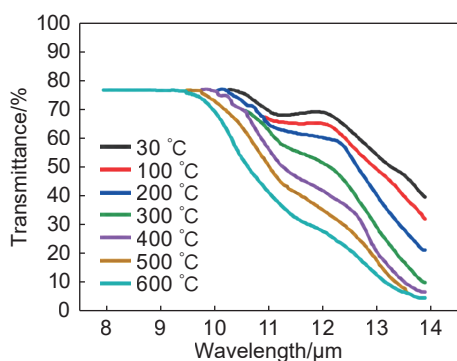


图 2 ZnS 在不同温度下的透过率^[21]

Fig. 2 Transmittance of ZnS at different temperatures^[21]

此外,美国国家标准技术研究所 Kaplan 等^[22]研究了 Al_2O_3 在不同温度下的光谱透过率。日本防卫厅技术研究所和住友电器工业公司研究了多晶 GaAs 红外窗口材料的透过率^[23]。美国加州沉积科学公司、美国东北大学、爱沙尼亚塔林理工大学等也研究过红外窗口材料的高温透过率^[24-26]。

国内在红外窗口材料高温透过率方面也开展了相关研究。范金太等^[27]依托中国科学院上海光学精密机械研究所,采用 FTIR 系统测试了蓝宝石单晶、钇铝石榴石(YAG)单晶、镁铝尖晶石陶瓷、氟化镁(MgF_2)陶瓷及氧化钇(Y_2O_3)陶瓷等常用中波红外窗口材料在 50~400 °C 范围内的高温透过性能及热辐射特性。研究表明,随着温度升高,蓝宝石、YAG 和尖晶石材料在 3~5 μm 波段的透过率下降较为明显,而 MgF_2 与 Y_2O_3 材料的高温透过率衰减较小,同时其热辐射水平也显著低于其他材料。其中, Y_2O_3 表现出优异的超低红外辐射性能,是一种具有较好应用前景的高超声速中波红外窗口材料。王凯旋等^[28]聚焦于 2.7~4.5 μm 中波红外光学窗口的高温光学特性,表明研究对象正由常用候选材料的对比评估,逐步拓展到面向特定波段窗口的高温光学性能分析与应用适配。国内研究正朝着高温透过率、热辐射抑制及波段适配协同评价的方向深入推进,为高温红外窗口材料选型与工程应用提供了重要实验依据。

总的来说,红外窗口材料的高温透过率测试主要采用 FTIR 和双光束分光光度计两种方法,其中

FTIR 适用于宽谱透过率测量,双光束结构则可有效补偿光源波动,提高高温测试稳定性。测试结果表明,窗口材料透过率随温度升高通常整体下降,变化主要集中在长波端,表现为吸收边向高波数方向移动,这是晶格振动与多声子吸收增强导致本征吸收增加的结果。而在中波红外工作区(如 3~5 μm)透过率变化相对较小,表现出较好的高温光谱稳定性。该规律为高温红外窗口材料选型及系统性能评估提供依据。

2 红外窗口材料折射率测试方法

在诸多红外材料光学性能参数中,折射率是红外光学系统设计必须精确确定的重要参数。对于红外窗口材料,如果在较高温度下工作,材料折射率将会随着温度的改变而变化,为了保证成像质量,材料的折射率温度系数必须符合一定的要求(“热致光程差”约束,即 dn/dT 必须足够小,使温度变化引起的波前误差低于系统容许范围)。

2.1 折射率测试基本方法

2.1.1 V 棱镜法

V 棱镜法是将制成直角棱镜的样品放入垂直式测角仪的 V 形凹槽内,利用两者的折射率不同,出射光将发生偏折,测出偏角 θ 而获得被测试样的折射率。当单色平行光束垂直入射到 V 棱镜后,经过多次折射,由于被测样品的折射率与 V 棱镜折射率存在差异,出射光线发生偏折。根据折射定律,按式(2)即可计算出样品的折射率 n :

$$n = \left(n_0^2 + \sin^2 \theta \sqrt{n_0^2 - \sin^2 \theta} \right)^{1/2} \quad (2)$$

式中: n_0 为 V 棱镜的折射率; θ 为光束从 V 棱镜最后一面出射的折射角,当 $n=n_0$ 时, $\theta=0$; $n > n_0$ 时, θ 为正值; $n < n_0$ 时, θ 为负值。该方法是为较成熟的方法,可采用 V 棱镜折光仪,其准确度可达到 $\pm 3 \times 10^{-5}$ ^[29]。

2.1.2 最小偏向角法

最小偏向角法是确定折射率的一种较为准确的方法,将被测材料按照要求加工成具有一定顶角的三棱镜形式。利用测角仪准确测量棱镜的顶角和最小偏向角。棱镜材料的折射率 n 可以由式(3)求得^[30]:

$$n = \sin[(\delta_{\min} + \alpha)/2] / \sin(\alpha/2) \quad (3)$$

式中: $\delta_{\min}$ 为最小偏向角; α 为棱镜顶角。

2.1.3 Etalon 法

Etalon 法是一种用来测定折射率和折射率温

度系数的方法。对于表面光滑且前后两个表面平行的样品,当连续改变入射波的波长时,获得的透射光强度呈现波峰波谷交替出现的现象。由于外界光线垂直进入材料内,当光线传播到样品的后表面时部分光线将会发生反射,光线向样品的前表面方向传播,遇到前表面时再次反射向后表面方向传播,最后与在材料中沿直线传播未经反射的光线叠加到一起,二者的光程差为 $2b$ 。当光程差 $2b$ 为 $\lambda_0/2n$ 的偶数倍时,透射光光强呈现极大值;当光程差 $2b$ 为 $\lambda_0/2n$ 的奇数倍时,透射光光强呈现极小值。其中 λ_0 为入射光的波长, n 为样品的折射率。因此,当入射波的波长发生改变时,透射光的强度将会呈现波峰波谷交替出现的现象。

当温度发生改变时,两峰之间的距离 Δ 将会发生改变。通过测量 Δ 随温度的变化关系即可得到折射率温度系数(dn/dT), Δ 与折射率温度系数 dn/dT 满足如下关系:

$$dn/dT = -\Delta \left[\frac{1}{n} \frac{dn}{dT} + \frac{1}{b} \frac{db}{dT} \right] \quad (4)$$

式中: b 为材料的厚度; $\frac{1}{b} \frac{db}{dT}$ 为材料的热膨胀系数。对式(4)进行积分,即可得到被测样品的折射率^[13, 31-32]。

上述3种测量折射率的方法中,V棱镜法比较简单,方便易行,测量仪器容易制作,但该方法测量准确度不高,只能达到 3×10^{-5} 。最小偏向角法测量准确度比V棱镜法略有提高,准确度可达到 2×10^{-5} ,但是该方法依赖于测量的精确性和加工的精确性。Etalon法可以直接测量出折射率温度系数,但对样品前后表面的平行度要求较高。

2.2 红外窗口材料折射率国内外研究现状

2.2.1 折射率温度变化规律

Blodgett等^[33]采用Etalon法对ZnS的折射率温度系数进行测量。采用BOMEM DA3.02型傅里叶红外分光光度计。该分光光度计由碳硅棒源,KBr分光器,MCT探测器构成,测量范围从 $500 \sim 5000 \text{ cm}^{-1}$ ($2 \sim 20 \mu\text{m}$,中远红外范围),而对于近红外范围,采用石英卤素灯,KBr分光器和InSb/AM探测器进行测量,范围从 $4000 \sim 12000 \text{ cm}^{-1}$ ($1 \sim 2.5 \mu\text{m}$)。对于可见光范围,采用石英卤素灯、可见光分光器、Si探测器进行测量,范围从 $9000 \sim 15000 \text{ cm}^{-1}$ ($0.7 \sim 1 \mu\text{m}$)。图3^[32]和图4^[33]分别为蓝宝石和ZnS折射率随温度变化关系。

非晶态材料公司(AMI)Hilton等^[34]采用最小偏向角法对 As_2S_3 的折射率进行了测试。美国普

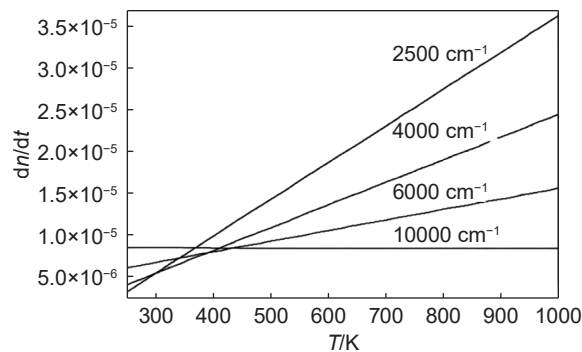


图3 4个不同波数蓝宝石正常光的 dn/dT 与温度的关系^[32]

Fig. 3 Relationships between temperature and dn/dT of sapphire ordinary light at four wavenumbers^[32]

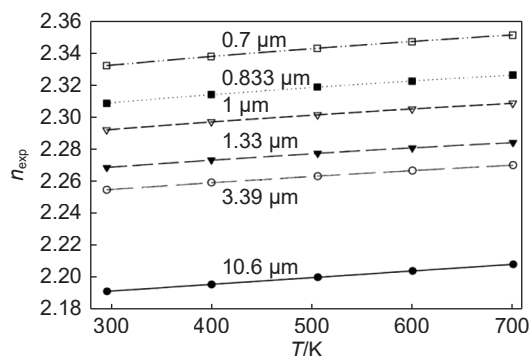


图4 在不同波段处ZnS折射率与温度的关系^[33]

Fig. 4 Relationships between refractive index of ZnS and temperature at different wavelengths^[33]

渡大学Li等^[35]利用最小偏向角法系统地研究了ZnS在 $0.5 \sim 14 \mu\text{m}$ 、 $93 \sim 1400 \text{ K}$ 范围内,ZnSe在 $0.55 \sim 18 \mu\text{m}$ 、 $93 \sim 618 \text{ K}$ 范围内,ZnTe在室温下 $0.55 \sim 30 \mu\text{m}$ 范围内折射率随温度以及波长的变化规律。

此外,近年来发展的变温光谱椭圆偏技术可在不同温度和入射角条件下获取材料的中红外复折射率,并利用光学参数随温度的连续变化约束色散模型,从而提高折射率及吸收参数反演的准确性和可靠性^[36-37]。雷神公司莱克辛顿实验室Hartnett等^[38]系统地研究了铝氮氧化物(AlON)的折射率的变化规律。Fontanella等^[39]研究了金刚石的折射率随温度和压力的变化规律。德国海德堡大学和印度北马哈拉施特拉大学等也都研究过红外窗口材料折射率在高温下的变化规律^[40-41]。

国内针对红外窗口材料折射率随温度变化规律的研究,主要围绕典型材料的高温折射率数据获取与 dn/dT 测试方法体系构建展开。一方面,在单晶窗口材料方面,已有工作在较宽温区内对折射率随温度变化进行了实验测量并结合理论解释。程峥等^[42]报道了基于光位移法对蓝宝石高温折射率

的测量,并结合第一性原理计算对室温至高温范围内折射率变化规律进行验证与机理分析,为高温环境下折射率漂移的定量描述提供了数据与理论支撑。另一方面,在方法学与工程化参数获取方面,国内有研究面向红外透射系统常用材料(如 ZnSe、BaF₂、LiF 等),提出并搭建了基于自准直原理的偏向角相对测量的 dn/dT 测量系统,强调通过红外单点探测实现折射率温度系数的精密测量与误差控制,从而为光学设计(热像系统热漂移、无热化设计等)提供更可靠的 dn/dT 参数来源^[43]。

2.2.2 折射率压力变化规律

Blodgett 等^[33]对 ZnS 的折射率随压力的变化关系进行了测试。测试系统将 He-Ne 激光光源输出的非偏振光经起偏器转换成线偏振光。线偏振光入射到 ZnS 样品圆片,在外加载荷作用下样品内部产生应力分布,从而引起折射率的变化并产生双折射效应。透射光经过检偏器后在观察屏上形成干涉条纹图样。通过分析条纹变化与施加压力之间的关系,可获得材料的应力光学系数 dn/dp ,为材料光学性能及其力学响应研究提供重要依据。对于可见光干涉条纹可用数码相机进行探测,对于中波红外干涉条纹可用 AMBER 相机进行接收。实验过程中,采用螺丝驱动的 MIT 机器对 ZnS 圆盘试样进行加载,为了避免加载点的应力集中,夹具采用黄铜加工制造而成。对于该平面偏振器,干涉条纹的强度计算见式(5):

$$I = K \sin^2(2\alpha) \sin^2[(\sigma_1 - \sigma_2)\pi hc/\lambda] \quad (5)$$

式中: α 为加载轴线与偏振器轴线之间的夹角; h 为圆盘的厚度; c 为 $dn/d\sigma$; λ 为激光的波长; σ_1 、 σ_2 分别为第一、第二主应力。当 $\sin(2\alpha)=0$ 或 $\sin[(\sigma_1 - \sigma_2)\pi hc/\lambda]=0$ 时,干涉条纹消失。对于第二项,当 $\pi hc/(\lambda\Delta\sigma)=0$ 时,即 $c=m\lambda/(h\Delta\sigma)$,干涉条纹消失,其中 m 为干涉级数, $\Delta\sigma=\sigma_1 - \sigma_2$ 。

美国芝加哥大学 Kastner^[44]利用 He 提供压力在光学压力舱内测定了 C、Ge、Si、GaP、GaAs、As₂S₃ 等材料折射率随压力变化的关系。采用 InSb 光电二极管,测定在 He-Ne 激光($\lambda=3.391 \mu\text{m}$)产生的压力作用下,折射率在特定区域干涉条纹位置的偏移。根据测定光程(nl)在压力作用下的偏移以及压力 K ,再根据式(6)得到材料的 dn/dp 。

$$\frac{1}{n} \frac{d(nl)}{dp} = \frac{1}{n} \frac{dn}{dp} - \frac{k}{3} \quad (6)$$

宾夕法尼亚州立大学 Vedam 等^[45-46]采用类似的方法测定材料折射率随压力的变化关系。与 Kastner 方法主要区别在于,首先建立了晶体的坐

标轴,然后利用晶体材料在波长为 λ 光的作用下,测定干涉条纹的位置偏移从而获得折射率的变化。该测试系统所需压力由一个常用的螺杆泵结合一个 Harwood 增强器提供。Mobil 石油公司生产一种名为 Sovasol 的无色光学透过气体被用作气体压力媒介。舱内照明由钠灯或低压汞弧过滤灯产生的平行光提供。样品定域干涉条纹由望远显微镜($\lambda=5.893 \times 10^{-7} \text{ m}$ 和 $\lambda=5.461 \times 10^{-7} \text{ m}$)测定。对于 $\lambda=4.358 \times 10^{-7} \text{ m}$ 和 $\lambda=4.047 \times 10^{-7} \text{ m}$,采用摄影方法测定。因为晶体材料在压力作用下,厚度和折射率的变化有迟滞效应,可利用式(7)得到折射率的变化值 Δn :

$$\Delta n = (p\lambda - 2n\Delta t)/2t_0 \quad (7)$$

式中: p 是发生偏移的干涉条纹数; t_0 是晶体厚度; Δt 是在 λ 波长光和压力作用下晶体厚度的变化量。

此外,美国斯坦福大学和佛罗里达中央大学等一些大学和研究所也研究过红外窗口材料在高温条件下折射率随温度、波长、压力的变化规律^[47-49]。

国内关于红外窗口材料折射率随压力变化规律的研究,主要以光弹效应为核心展开。由于红外窗口在气动载荷或机械压力作用下会产生应力场,从而引起折射率变化及应力导致双折射现象,国内学者多采用压力加载结合偏振光学或干涉测量的方法,通过测量光程差、相位延迟等参数反演材料的光弹系数,进而表征折射率对应力或压力的敏感性^[50]。同时,部分研究也面向红外晶体材料开展了压应力条件下介电常数与折射率变化的理论计算,为高压环境下窗口材料光学常数演化规律提供了机理解释与参数预测。总体而言,国内相关工作已形成以实验测量光弹参数为主、理论计算辅助的研究体系,为红外窗口材料在高压载荷条件下的光学性能评估与工程应用提供了重要依据^[51]。

3 红外窗口材料发射率测试方法

当窗口或整流罩因气动加热而温度升高时,窗口或整流罩本身的辐射会形成探测系统的噪声,导致热成像模糊甚至不能工作,因此研究红外材料的发射率,尤其是在高温条件下的发射率,具有重大意义。

3.1 发射率测试基本方法

发射率测试的传统方法主要是量热法、辐射计法、反射法等^[52-55],但这些方法主要用于不透明材料的发射率测量。由于红外窗口材料透过率较高,因此一般采用直接测量方法。直接测量法即利用

定义式,以黑体或已知反射率标准样品为参考标准建立装置,测量物体或材料的辐射量信号与同样条件下黑体的辐射量信号,两者之比即为发射率。目前,国外主要都是采用傅里叶红外光谱仪及其辅助设备测量红外材料的发射率。近年来,由于傅里叶红外光谱仪的发展和广泛应用,很多学者建立了基于该装置的光谱发射率测量系统和设备。利用傅里叶红外光谱仪测量发射率的方法已经成为该领域的普适标准。

3.2 红外窗口材料高温发射率国内外研究现状

法国国家高温材料研究中心 Rozenbaum 等^[56]利用 BRUKER IFS113 V 型傅里叶红外光谱仪, MELLES FRIOT 型 CO₂ 激光器加热样品,测试样品在不同温度下的光谱发射率。通过调节样品仓不同气体成分及真空度,模拟不同环境气氛下样品的辐射状态,能测定样品在使用环境下的辐射数据。通过旋转由不同材料制备的电子束分裂器和探测器,来调节需测试的特定波长范围。其电子束分裂器可由聚酯树脂、Ge/KBr 以及 Si/SiO₂ 等构成;探测器可由测辐射热仪(液态氦或液态氮冷却)、DTGS/KBr 以及 Si 二极管等构成。不同材料制备的电子束分裂器和探测器,所透过的波段不同,从而能测定样品在特定波段的发射率。最终,通过测试样品在不同温度下多波段的光谱透过率,来模拟样品在服役环境下的辐射状态,得到其在服役环境下的发射率实验数据。图 5 为氧化铝发射率^[56]。

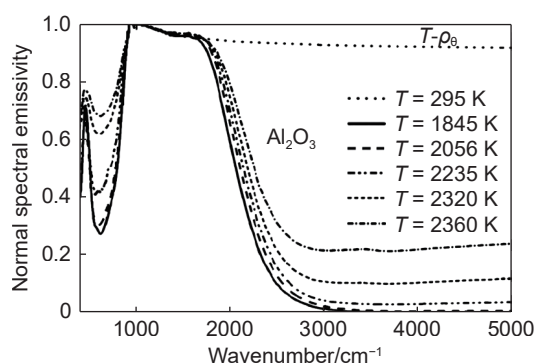


图 5 不同温度下氧化铝的发射率随波数的变化关系^[56]
Fig. 5 Relationships between wavenumber and emissivity of alumina at different temperatures^[56]

美国约翰霍普金斯大学应用物理实验室, Sova 等^[57]基于傅里叶红外光谱仪搭建了一套用于测试材料在不同温度下光谱发射率的装置,其中利用 CO₂ 激光器对样品进行加热,并采用双色高温测试技术测量被测样品表面的温度。该测试装置主要由以下几个部分组成:50 W CO₂ 激光器、真空仓、

1273 K 黑体和傅里叶红外光谱仪。实验过程中,先对 1273 K 黑体的光谱发射率进行测试,然后利用 CO₂ 激光器对样品进行逐渐加热,加热到不同的测试温度,并保持一段时间使其达到热平衡,然后获得其在不同温度下的光谱发射率。图 6 为不同温度下蓝宝石的发射率随波长的变化关系^[57]。

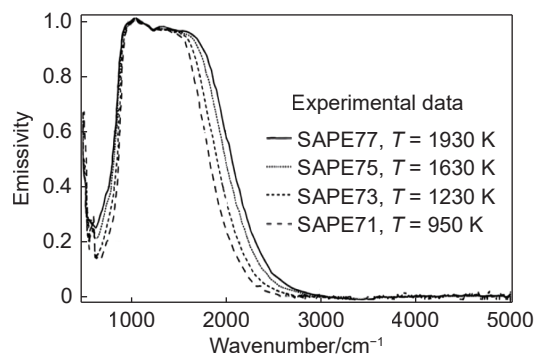


图 6 不同温度下蓝宝石的发射率随波长的变化关系^[57]
Fig. 6 Relationships between wavelength and emissivity of sapphire at different temperatures^[57]

美国雷恩公司 Kisler 等^[58]采用红外相机和一个 K 型 30AWG 的热电偶同步测量样品的发射率和温度,实时动态地测量样品在任意温度下的发射率。通过样品边缘粘接热电偶,并将样品放在离焦轴抛物面 25 英寸(约 63.5 cm)的样品台上,使用 128×128 阵列的 InSb 焦平面探测器(Amber 4128 相机)进行聚焦。辐射数据由 Ambervu 数据获取系统收集,温度数据由 Omega 温度表和 HP 万用表测量。为了使两套系统同步进行测量,采用脉冲激光进行触发,并采用美国国家仪器公司的 LabVIEW 软件协调温度数据收集和两个采集系统同步进行。测试氧化钇在 350 K 到 580 K 温度下具有较低的发射率(约为 2%),且具有温度稳定性^[58]。

这种方法与常用的扣除背景方法相比,具有以下几个优点:首先扣除背景法是单独测量透过率和反射率,然后再从 100% 中扣除,即得到吸收率。但是其中能量损失包含了散射,因此需扣除散射率才能得到吸收率。如果样品中具有较多的散射点,那么测试的结果会有较大的误差,采用这种方法能有效地区分散射和吸收。其次,对于透明材料,如果能量损失较小,那么对透过率和反射率的测量实验累积误差将很大,将会严重影响测试结果,而此方法采用实时动态直接测量方法能有效地避免这一问题。

美国海军研究中心 Harris 等研究了常用红外窗口材料的高温发射率,其中包括 MgF₂、Al₂O₃、

AlON、MgO、Y₂O₃、SiO₂、CaF₂、LiF、ZnS、ZnSe、GaAs、GaP、Si、Ge 等材料。Mayer 等^[59]研究了 Al₂O₃ 在高温下的光谱发射率。美国海军军械实验室 Stierwalt^[60]研究了红外光学材料的红外光谱测量技术。西班牙巴斯克大学 Campo 等^[61]研究了可控环境下红外光学材料的红外法向光谱发射率的测试方法。此外,美国中佛罗里达大学也研究过窗口材料发射率随温度的变化规律^[62]。

国内红外窗口材料高温发射率研究近年来取得较为明显进展:一方面,研究已从单纯材料参数测量拓展到系统层面,将窗口高温自辐射噪声与中波红外成像退化(如 SNR 下降、NETD 增大)建立联系,并通过加热蓝宝石窗口实验加以验证^[63];另一方面,针对蓝宝石、尖晶石、MgF₂、Y₂O₃ 等典型窗口材料开展了高温透过率与热辐射性能对比,提出 MgF₂ 和 Y₂O₃ 等材料在 3~5 μm 波段具有更低热辐射潜力^[64];同时,高温宽谱法向光谱发射率测试技术不断完善,已实现 1273~3100 K、0.7~12 μm 范围内的测量与不确定度评定,为高温红外窗口材料的工程选材和性能评估提供了重要支撑^[65]。

4 红外窗口材料吸收系数测试方法

光在实际的红外窗口材料中传播,光波中的电位移矢量会使材料中的带电粒子发生极化,并受迫振动,这就使一部分光能转为带电粒子的极化振动,如果这种振动和其他电子、原子或分子发生作用,则振动能量又转化为电子、原子或分子的平均动能,使得材料的温度有所变化,这就形成了对光的吸收^[3]。光通过红外材料时,不只有吸收 α_a,还存在光的散射 α_s,光的散射又分为体散射 α_{bs} 和表面散射 α_{ss} 两部分,共同作用使得透光强度衰减^[3]。因此,可得到:

$$\alpha = \alpha_a + \alpha_s \quad (8)$$

$$\alpha_s = \alpha_{bs} + \alpha_{ss} \quad (9)$$

红外窗口材料吸收系数的测试方法常有以下 4 种。

4.1 通过透过率计算吸收系数

对于吸收系数较大的样品,这是一种非常简单的测量方法,只需测量该样品的透过率 T_{trans} ,然后通过式(10)即可计算得到^[13]:

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \left\{ \frac{(1-R)^2}{2T_{\text{trans}}} + \left[R^2 + \frac{(1-R)^4}{4T_{\text{trans}}^2} \right]^{1/2} \right\} \quad (10)$$

式中: d 为样品厚度; R 是单面反射率, $R = \left(\frac{1-n}{1+n} \right)^2$ 。如果要测量不同温度和入射频率下样品的吸收系数,只需测量在该条件下样品的折射率 n 和透过率 T_{trans} 代入式(10)计算即可。由于 T_{trans} 很小的误差便会引起 α 较大的波动,所以利用此方法测量的吸收系数误差较大。但是,如果材料的吸收系数较大,利用此方法获得的吸收系数较为准确。

4.2 通过厚度差测量吸收系数

对于相同的材料,做两块厚度 d 相差较大的样品(认为吸收性质相同),两块样品的厚度为 d_1 、 d_2 ,分别测量两块样品的透过光光强 $T_{\text{trans}1}$ 和 $T_{\text{trans}2}$,代入式(11)便可得到材料的吸收系数^[66]:

$$\alpha = \frac{\ln(T_{\text{trans}2}/T_{\text{trans}1})}{d_2 - d_1} \quad (11)$$

测量不同温度条件下两块样品的透过光光强,便可计算出该材料在不同温度下的吸收系数;测量出两块样品在不同入射波频率下的透过光光强,即可得到该材料的吸收系数随入射波频率或波长的变化关系。

4.3 激光量热法

激光量热计方法测量红外材料吸收,具有测量结果可靠性高、测量重复性好、可操作性强等特点,使其成为目前较为常用的测量吸收系数的方法之一。这种方法是基于固体试样在吸收辐射能量后产生温度的上升,当测量出固体试样的入射与透射的能量后,用量热计(热电偶或半导体电温计)测量固体试样的温度随时间变化的曲线即温升曲线,通过曲线拟合或是从曲线上求出温度上升的速率代入相应的公式,即可求出吸收系数。目前由于有了高强度的激光源,采用激光量热法能够提供更灵敏和准确的测量数据。

该实验装置辐照光源使用 YAG 连续激光器,功率监测使用 90% 的分光镜,温度测量采用整体分辨力为 1/1000 K 的 Pt100 铂电阻及温度记录仪。该装置的恒温箱由精度为 ±0.1 °C 冷水机和水冷铜罩构成。为防止外部热辐射对测量环境温度的影响,真空室内壁增加了一层防辐射层。测量过程包括照射前(至少 30 s),照射加热(5~300 s)和冷却(至少 200 s)^[9]。

样品的吸收系数 α 可通过式(12)计算得到^[67]:

$$\alpha = \frac{mC}{lP_T} \cdot \frac{2n}{n^2 + 1} \left[\left| \frac{dT_{\text{gain}}}{dt} \right|_{T_1} + \left| \frac{dT_{\text{lose}}}{dt} \right|_{T_1} \right] \quad (12)$$

式中: m 为试样的质量; l 为样品的厚度; C 为样品

比热; n 为折射率。通过试样的透射功率 P_T , 再测量出试样的温升与温降曲线, 求出在曲线上切断激光的 T_1 点的温升速率和温降速率, 即可求出试样的吸收系数。

样品的吸收系数还可以通过曲线拟合的方法来获得^[25]。用式(13)拟合曲线的温降部分:

$$\Delta T = \Delta T_{\max} e^{-\rho(T-T_1)/mC} \quad (13)$$

式中: $\Delta T_{\max}$ 为最高温度与最低温度差值; T_1 为温度最高点; ρ 为待定常数。通过拟合可以获得待定常数 ρ , 将 ρ 代入式(14)中进行拟合即可得到吸收系数 α :

$$\Delta T = \frac{\alpha P_0}{\rho} (1 - e^{-\rho T/mC}) \quad (14)$$

式中: P_0 为入射激光的功率。图7为激光量热法测量得到的吸收系数和计算得到的吸收系数随温度的变化关系。

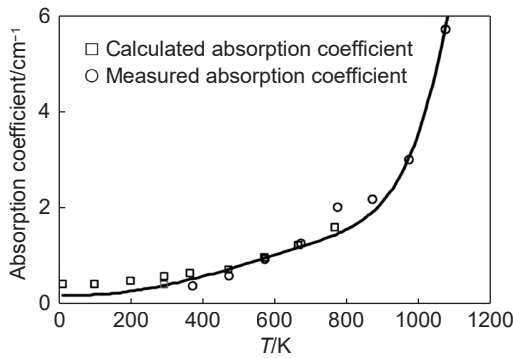


图7 GaP 的吸收系数与温度的变化关系^[20]

Fig. 7 Relationship between absorption coefficient of GaP and temperature^[20]

4.4 通过发射率计算吸收系数

对于吸收系数很小的红外材料, 厚度的变化在透过率上反映不明显。按前两种方法计算的吸收系数会引起很大的误差, 因此对于低吸收系数材料应该用激光量热法技术, 但是激光束是分立的波长, 不能得到连续波长的吸收系数, 但借助于发射率的测量可以求出吸收系数。发射率与吸收系数有如下关系^[68]:

$$\varepsilon = \frac{(1-R)(1-e^{-\alpha d})}{1-Re^{-\alpha d}} \quad (15)$$

由式(15)可以得到:

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \left[1 + \frac{\varepsilon}{1 - (\varepsilon/\varepsilon_\infty)} \right] \quad (16)$$

式中: $\varepsilon_\infty = 1 - R$ 。由于低吸收的材料同时也是低发射率的材料, 因此, 在发射率 ε 很小时, 式(16)可以简化为 $\alpha \approx \varepsilon/d$ 。于是, 测量发射率可以直接得到吸收

系数, 这样求得的吸收系数中不包含散射的影响。图8为美国雷恩公司 Klein 等利用测量发射率的方法得到的 CVD ZnSe 吸收系数与波长和温度的关系^[68]。该图给出并讨论了前视红外 (FLIR) 级化学气相沉积 ZnSe 在当前关注的波长范围 (2~20 μm) 和温度范围 (100~500 K) 内的表面吸收与体吸收相关数据。

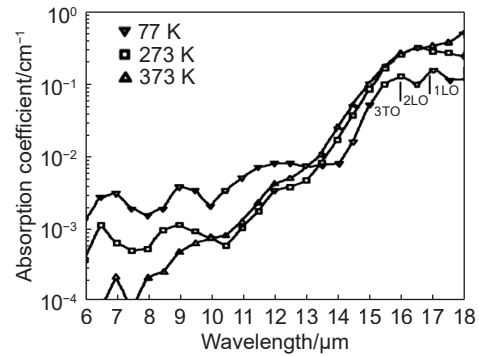


图8 CVD ZnSe 吸收系数与波长的关系^[68]

Fig. 8 Relationships between absorption coefficient of CVD ZnSe and wavelength at different temperatures^[68]

上述几种方法中, 通过测量透过率和厚度的方法适用于测量和计算吸收系数较大的红外材料。当 α 值在 $10^{-1} \sim 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$ 范围内时, 利用这两种方法可以求出较为准确的吸收系数, 但对于像 ZnSe ($\alpha = 10^{-3} \sim 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$) 这样吸收系数较小的材料不能用这两种方法来测量和计算, 而需要用激光量热法和通过测量发射率方法计算获得。此外, 当吸收系数较小时, 利用测量透过率方法计算获得的吸收系数误差较大; 利用厚度测量方法获得的吸收系数包含体散射的部分, 但不包含表面散射的部分; 利用激光量热法获得的吸收系数, 由于激光是分立的波长, 所以不能得到连续波长的吸收系数; 利用测量发射率的方法得到的吸收系数不包含散射的部分。

红外窗口材料吸收系数的研究大都是与折射率、透过率或其他光学性能结合进行研究。单纯地研究红外窗口材料的吸收系数主要集中在对 Ge、GaAs 等半导体红外窗口材料吸收系数的研究。美国德州仪器公司 Syllaios 等^[69] 利用傅里叶红外光谱仪测量了 CdZnTe 材料在红外波段的吸收系数随光谱的变化规律, 并研究了在不同波段下其吸收系数与自由载流子浓度的关系。该公司 Kloczek 等^[70] 还研究了 GaAs、GaP 和 Diamond 吸收系数在不同温度下随波长的变化规律。美国 Eagle-Picher 工业公司 Richter 等^[71] 研究了 Ge 在不同温度下红外的吸收率、波长、温度以及自由载流子浓度之间的相

互关系。此外,美国费尔菲德大学和密苏里-罗拉大学等也研究过 Ge 和 GaAs 等在不同温度吸收系数随波长的变化规律^[72-73]。

国内针对红外窗口材料高温辐射特性也有一些研究,材料在高温条件下不仅存在透过率下降问题,其自身热辐射与吸收效应也会显著影响红外探测系统性能。已有研究在近超声速高温蓝宝石窗口条件下,基于实验测得的窗口发射率、吸收率等参数建立了介质内部辐射传输模型,并通过加热实验验证了窗口热辐射噪声对中波红外成像信噪比和 NETD 等指标的退化作用,说明发射率与吸收特性是窗口热辐射分析的关键输入参数^[74]。同时,针对红外窗口材料的热辐射测量方法研究也指出,高温下窗口自身辐射会显著增强并可能引起探测器局部饱和,因此需要结合发射特性开展系统评估^[75-76]。此外,在含镀膜窗口杂散辐射分析中,也提出了窗口表观辐射模型以等效描述介质内辐射贡献,进一步凸显发射率与吸收系数在红外窗口工程应用中的重要性^[77]。综上,国内研究正在从高温窗口辐射测量与成像影响分析出发,逐步推进发射率-吸收率-吸收系数的参数反演与系统级应用,为高温红外窗口材料设计与性能评估提供理论与实验支撑^[78-79]。

5 结束语

通过上述对红外材料光学性能常用测试方法的分析可知,现有最适合的红外材料光学性能测试方法包含:

(1)透过率:傅里叶变换红外光谱仪具有响应时间短、探测率高和光谱信噪比高等优点;

(2)吸收系数:对于吸收系数大的材料($\alpha=10^{-1}\sim 10^{-2}\text{ cm}^{-1}$),采用通过测量透过率计算吸收系数,该方法简单易行,易于实现;对于吸收系数小的材料($\alpha=10^{-3}\sim 10^{-4}\text{ cm}^{-1}$),采用激光量热法,该方法具有测量结果可靠性高、测量重复性好、可操作性强等优点;

(3)折射率:最小偏向角法,测量准确度高,准确度可达到 2×10^{-5} ;

(4)发射率:傅里叶红外光谱仪,具有扫描时间短、信噪比高、光通量大、灵敏度高、宽光谱范围和较低的杂质辐射等优点,已经成为该测量领域的常用标准。

通过对上述红外窗口材料主要光学性能的测试方法分析中可以看出目前还存在以下几个问题:

(1)国内外缺乏统一且规范的国家(国际)测试标准;

(2)缺乏通用的测试设备和测试手段,无商业化或现存的设备;

(3)缺乏关键的红外材料在高温及服役条件下的有效数据库;

(4)现有测试技术存在测试温度低,测试波段范围窄,只能在静态条件下测试等问题;

(5)目前红外窗口材料光学性能的测试方法主要应用于红外窗口块体材料,缺乏针对红外窗口增透保护薄膜光学性能的测试方法研究。

随着科学技术的发展,目前单一的红外透光材料已很难满足先进探测应用需求,未来必然的发展趋势是多种红外材料复合使用,这也对复合型红外材料光学性能的测试提出了新的挑战。因此,可以预见红外材料光学性能测试方法未来的发展趋势如下:

(1)高温动态连续测试技术。随着服役部件面对剧烈的气动加热作用,其表面温度不断升高,传统的测试技术已不能满足需求。因此搭建高温动态条件下连续测试装置,以获得红外材料在服役条件下的主要光学性能将是未来的发展趋势。

(2)多波段宽范围测试技术。单一近、中和长波红外材料局限性日益明显,多波段宽范围(覆盖从紫外到红外,涵盖中波、长波红外乃至毫米波范围)的测试技术将是红外材料光学性能测试技术的未来发展方向。

(3)红外窗口增透保护薄膜的高温光学性能测试技术。随着红外技术综合性能的不断发展,单一的块体红外窗口材料已不能满足使用要求,需在块体材料表面镀制增透保护多功能薄膜。由于红外窗口增透保护薄膜的物化性能与块体材料性能之间存在较大差异,因此准确测试红外窗口增透保护薄膜在高温条件下的光学性能将成为未来红外窗口材料光学性能测试的发展趋势。

(4)模拟服役环境测试技术。未来红外材料光学性能测试设备的发展仍将以定制化设计为主。在具备加热条件的真空仓内,利用激光器模拟产生气动压力,充入不同气体及其他介质,模拟红外窗口材料在服役环境条件下热力状态。以傅里叶红外光谱仪为主,辅以高性能计算机及其他辅助设备,测试红外窗口材料在不同温度和压力条件下光学性能的变化规律。

此外,需要指出的是,傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)虽然是当前红外光谱测量中应用最为广泛

的技术手段之一,但在超高温环境下并非唯一或最优选择。当样品温度升高至 1300 K 以上时,其自身将表现为强热辐射源,且辐射能量主要集中于可见-红外波段,这会对传统 FTIR 测量造成显著干扰,甚至导致探测器饱和,从而限制高温条件下透射率与反射率测量的准确性与可信度。随着超宽谱光源及超短脉冲激光技术的发展,近年来高温红外光谱测量逐渐呈现出新的发展趋势,即采用超宽谱超快脉冲激光器替代传统热光源。因此,未来超高温红外光谱测量的发展方向将更加依赖于超宽谱超短脉冲光源、时序门控探测以及空间屏蔽技术的结合,以解决传统 FTIR 在高温辐射背景下易饱和、信噪比下降等关键技术难题,并推动高温材料辐射特性测量向更高精度、更宽波段和更复杂工况发展。

参考文献:

- [1] 汪越,刘爱云,石旺舟,等. 远红外显微成像光学系统的设计与仿真[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(11): 1122005.
Wang Y, Liu A Y, Shi W Z, et al. Design and simulation of far infrared microscopic imaging optical systems[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(11): 1122005.
- [2] Goldstein A, Krell A, Burshtein Z. Transparent ceramics: materials, engineering, and applications[M]. New York: John Wiley & Sons, 2020.
- [3] 余怀之. 红外光学材料[M]. 2 版. 北京: 国防工业出版社, 2015.
Yu H Z. Infrared optical material[M]. 2nd ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2015.
- [4] Symmons A, Lifshitz M. Field guide to infrared optical materials[M]. Bellingham: SPIE Press, 2021: 62-68.
- [5] 仇志刚,刘永华,韩滨,等. 中波红外透过光学材料研究与发展趋势[J]. 中国建材科技, 2024, 33(3): 79-83.
Qiu Z G, Liu Y H, Han B, et al. Research and development of optical transparent materials in mid-infrared band[J]. *China Building Materials Science & Technology*, 2024, 33(3): 79-83.
- [6] Savage J A. Infrared optical materials and their antireflection coatings[M]. Bristol: Adam Hilger Ltd., 1985.
- [7] 耿怡斐,李腾飞,林禹泽. 长波近红外有机光电探测材料研究进展[J]. 中国科学(化学), 2025, 55(6): 1487-1498.
Geng Y F, Li T F, Lin Y Z. Advances in organic long-wave near-infrared detecting materials[J]. *Scientia Sinica Chimica*, 2025, 55(6): 1487-1498.
- [8] 刘蒙,张伟科,黄立,等. 高超声速飞行器红外波段及窗口选择[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(4): 20220161.
Liu M, Zhang W K, Huang L, et al. Infrared waveband and window selection for hypersonic vehicle[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(4): 20220161.
- [9] Bacchus J M. Using new optical materials and DOE in low-cost lenses for uncooled IR cameras[C]//SPIE Proceedings, 2004, 5249: 425.
- [10] 高一骁,汪健伟,徐雷,等. 长波红外平板透镜: 材料、大尺寸制备及挑战[J]. 光电工程, 2025, 52(8): 1-22.
Gao Y X, Wang J W, Xu L, et al. Optical flat lenses at long-wave infrared: materials, large-scale fabrication, and challenges[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2025, 52(8): 1-22.
- [11] Au R H. Optical window materials for hypersonic flow[C]//Window and Dome Technologies and Materials. Bellingham, WA: SPIE, 1989.
- [12] 杨国健,孙鹏,王跃忠,等. 数值模拟超高密度热流下红外窗口材料的受热冲击[J]. 硅酸盐学报, 2024, 52(3): 862-873.
- [13] Harris D C. Materials for Infrared Windows and Domes: Properties and Performance, Second Edition[M]. Bellingham, WA: SPIE, 2024.
- [14] Faramarzi B, Moggio M, Diano N, et al. A brief review of FT-IR spectroscopy studies of sphingolipids in human cells[J]. *Biophysica*, 2023, 3(1): 158-180.
- [15] Sullins G A. Exo-atmospheric intercepts: bring new challenges to standard missile[J]. Johns Hopkins APL Technical Digest, 2001, 22(3): 260-274.
- [16] Harris D C, Baronowski M, Henneman L, et al. Thermal, structural, and optical properties of Cleartran® multispectral zinc sulfide (erratum) [J]. *Optical Engineering*, 2024, 63(2): 029801.
- [17] Klein C A, Dibeneditto B, Pappis J. ZnS, ZnSe, and ZnS/ZnSe windows: their impact on FLIR system performance[J]. *Optical Engineering*, 1986, 25(4): 254519.
- [18] Terry D H, Thomas M E, Linevsky M J. Optical properties of polycrystalline magnesium fluoride[C]//SPIE Proceedings, 1999, 3705: 105-112.
- [19] Blodgett D W, Thomas M E, Hahn D V, et al. Longwave infrared absorption and scatter properties of ZnS and ZnSe[C]//SPIE Proceedings, 2003, 5078: 137.
- [20] Thomas M E, Blodgett D W, Hahn D V, et al. Characterization and modeling of the infrared properties of GaP and GaAs[C]//SPIE Proceedings, 2003, 5078: 159.
- [21] Freeland C M. High temperature transmission measurements of IR window materials[C]//SPIE Proceedings, 1988, 929: 79.
- [22] Kaplan S G, Thomas M E. Measurement of the o-ray and e-ray infrared refractive index and absorption coefficients of sapphire from 10 K to 295 K[C]//SPIE Proceedings,

- 2002, 4822: 41.
- [23] Nagashima M, Wada H. Multilayer infrared anti-reflection and hard coating on polycrystal gallium arsenide[J]. *IEEE Transactions on Fundamentals and Materials*, 2007, 127(7): 375-381.
- [24] Alves L C. Investigation of the temperature dependent complex index of refraction of infrared thin-film coating materials[C]//SPIE Proceedings, 2010, 7786: 778619.
- [25] Whalen R A, Kowalski G J. Microscale heat transfer in thermally stimulated nonlinear optical materials[C]//SPIE Proceedings, 1999, 3798: 85-92.
- [26] Dedova T, Mere A, Krunk M, et al. Structural and optical characterization of sprayed ZnS thin films[J]. *Optical Materials and Applications*, 2006, 5946: 34-40.
- [27] 范金太, 许杨阳, 覃显鹏, 等. 常用中波红外窗口材料高温透过与热辐射性能比较[J]. *红外技术*, 2017, 39(10): 951.
- Fan J T, Xu Y Y, Qin X P, et al. Comparative study on transmittance and radiance of sapphire, YAG, spinel, MgF_2 and Y_2O_3 at high temperatures[J]. *Infrared Technology*, 2017, 39(10): 951.
- [28] 王凯旋, 周晟, 刘定权, 等. 中波红外 2.7~4.5 μm 光学窗口的高温光学特性[J]. *光学学报*, 2025, 45(21): 345-355.
- Wang K X, Zhou S, Liu D Q, et al. High-temperature optical properties of 2.7-4.5 μm mid-wave infrared optical windows[J]. *Acta Optica Sinica*, 2025, 45(21): 345-355.
- [29] 王之江. 光学技术手册-下册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.
- Wang Z J. Handbook of optical technology-volume II [M]. Beijing: China Machine Press, 1994.
- [30] 李亮亮, 林尤华, 乔运蒙, 等. 玻璃材料折射率温度系数测量方法研究[J]. *计量科学与技术*, 2025, 69(11): 11-17, 33.
- Li L L, Lin Y H, Qiao Y M, et al. Research on the measurement method of the temperature coefficient of refractive index of glass materials[J]. *Metrology Science and Technology*, 2025, 69(11): 11-17, 33.
- [31] Thomas M E, Tropic W J. Optical properties of diamond[C]//Klocek P. Window and Dome Technologies and Materials IV. Proceedings of SPIE, 1994, 2286: 144-151.
- [32] Yang D, Thomas M E, Tropic W J. Infrared refractive index of sapphire as a function of temperature[C]//Proceedings of SPIE, 1999, 3705: 60-69.
- [33] Blodgett D W, Yang D, Walts S C, et al. Measurement of the temperature-dependent refractive index and relative photoelastic constant of zinc sulfide[C]//SPIE Proceedings, 2001, 4375: 224-234.
- [34] Hilton A R, McCord J, Whaley G, et al. Production of arsenic trisulfide glass[C]//SPIE Proceedings, 1997, 3060: 335-343.
- [35] Li H H. Refractive index of ZnS, ZnSe, and ZnTe and its wavelength and temperature derivatives[J]. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 1984, 13(1): 103-150.
- [36] Yin S W, Cho J W, Feng D M, et al. Preventing overfitting in infrared ellipsometry using temperature dependence; fused silica as a case study[J]. *Optical Materials Express*, 2025, 15(8): 1939.
- [37] Synowicki R A, Pribil G K, Cooney G, et al. Fluid refractive index measurements using rough surface and prism minimum deviation techniques[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2004, 22(6): 3450-3453.
- [38] Hartnett T M, Bernstein S D, Maguire E A, et al. Optical properties of AlON (aluminum oxynitride) [J]. *Infrared Physics & Technology*, 1998, 39(4): 203-211.
- [39] Fontanella J, Johnston R L, Colwell J H, et al. Temperature and pressure variation of the refractive index of diamond[J]. *Applied Optics*, 1977, 16(11): 2949.
- [40] Hu Z G, Hess P. Optical constants and thermo-optic coefficients of nanocrystalline diamond films at 30-500 $^{\circ}\text{C}$ [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(8): 081906.
- [41] Gaikwad S A, Samuel E P, Patil D S, et al. Temperature dependent analysis of refractive index, band gap and recombination coefficient in nitride semiconductor lasers[J]. *Indian Journal of Pure & Applied Physics*, 2007, 45(3): 238-242.
- [42] 程峥, 朱敏, 刘禹男, 等. 光位移法测定蓝宝石高温折射率及理论研究[J]. *光学学报*, 2023, 43(9): 0916003.
- Cheng Z, Zhu M, Liu Y N, et al. Determination of high-temperature refractive index of sapphire by laser displacement measurement and theoretical research[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(9): 0916003.
- [43] 王雷, 杨照金, 黎高平, 等. 红外光学材料折射率温度系数测量装置[J]. *应用光学*, 2005, 26(3): 54-56.
- Wang L, Yang Z J, Li G P, et al. An equipment for measuring the temperature coefficient of refractive index of infrared materials[J]. *Journal of Applied Optics*, 2005, 26(3): 54-56.
- [44] Kastner M. Pressure dependence of the refractive index of amorphous lone-pair semiconductors[J]. *Physical Review B*, 1972, 6(6): 2273-2279.
- [45] Vedam K, Davis T A. Pressure dependence of the refractive indices of the hexagonal crystals beryl, a-CdS, a-ZnS, and ZnO[J]. *Physical Review*, 1969, 181(3): 1196-1201.
- [46] Vedam K, Schmidt E D D. Variation of refractive index of MgO with pressure to 7 kbar[J]. *Physical Review*,

- 1966, 146(2): 548-554.
- [47] Almodovar C A, Su W W, Strand C L, et al. High-pressure, high-temperature optical cell for mid-infrared spectroscopy[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2019, 231: 69-78.
- [48] Howe A, Gaume R, et al. Refractive index and thermo-optic coefficients of single-and poly-crystalline ZnSe[J]. *Optics Express*, 2026, 34(9): 16238.
- [49] Gavdush A A, Spektor I E, Dolganov K B, et al. Temperature evolution of the optical parameters of sapphire in the THz-IR range[J]. *Applied Optics*, 2025, 64(15): 4453.
- [50] 刘卫平, 王雷, 许荣国, 等. 光学材料光弹系数测量装置及测量方法: CN202211667698.3[P]. 2023-05-23.
- [51] 高赫. 基于第一性原理方法的 ZnS、ZnSe 光学晶体压应力效应[D]. 天津: 天津师范大学, 2024.
- Gao H. Compressive stress effect of ZnS and ZnSe optical crystals based on first principles method[D]. Tianjin: Tianjin Normal University, 2024.
- [52] Cosoli G, Chiariotti P, García-Baños B, et al. A measurement approach for characterizing temperature-related emissivity variability in high-emissivity materials[J]. *Sensors*, 2025, 25(2): 487.
- [53] 王瑞琴, 韩颖, 高原. 红外材料光谱发射率与半球发射率测量方法研究[J]. *宇航计测技术*, 2024, 44(4): 40-43, 81.
- Wang R Q, Han Y, Gao Y. Research on measurement method for spectral emissivity and hemispherical emissivity of infrared materials[J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2024, 44(4): 40-43, 81.
- [54] Giulietti N, Cosoli G, Napolitano R, et al. Spectral emissivity measurement for high-temperature applications: a systematic review[J]. *Acta IMEKO*, 2025, 14(1): 1-17.
- [55] 刘纳溪, 赵申奥, 宋仁康, 等. 耦合石墨烯光电探测的傅里叶红外光谱仪研制[J]. *红外与激光工程*, 2024, 53(11): 20240352.
- Liu N X, Zhao S A, Song R K, et al. Fourier transform infrared spectrometer based on graphene photodetection[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2024, 53(11): 20240352.
- [56] Rozenbaum O, De Sousa-Meneses D, Auger Y, et al. A spectroscopic method to measure the spectral emissivity of semi-transparent materials up to high temperature[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1999, 70(10): 4020-4025.
- [57] Sova R M, Linevsky M J, Thomas M E, et al. High-temperature optical properties of oxide dome materials[C]// *SPIE Proceedings*, 1992, 1760: 27-40.
- [58] Kisler Y, Kupferberg L C, MacKenzie G, et al. Direct emissivity measurements of IR materials[C]// *SPIE Proceedings*, 1999, 3705: 308-315.
- [59] Mayer J M, Abraham J A, Surhigh B, et al. Temperature-dependent diffuse reflectance measurements of ceramic powders in the near- and mid-infrared spectra[J]. *Solar Energy*, 2022, 245: 193-210.
- [60] Stierwalt D L. Infrared spectral emittance measurements of optical materials[J]. *Applied Optics*, 1966, 5(12): 1911.
- [61] Campo L, Pérez-Sáez R B, Esquisabel X, et al. New experimental device for infrared spectral directional emissivity measurements in a controlled environment[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2006, 77(11): 113111.
- [62] Lim G, Kar A. Radiative properties of thermal barrier coatings at high temperatures[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2009, 42(15): 155412.
- [63] 彭志勇, 王向军, 卢进. 近高超声速高温蓝宝石窗口下中波红外成像退化分析仿真与性能测试实验[J]. *物理学报*, 2013, 62(23): 98-107.
- Peng Z Y, Wang X J, Lu J. Method of imaging performance deterioration analysis and its experiment simulated high heating sapphire MW infrared window during near-hypersonic flight[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(23): 98-107.
- [64] 潘枝峰, 毛小建, 张红刚, 等. 高超音速中波红外窗口材料思考[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(9): 149-155.
- Pan Z F, Mao X J, Zhang H G, et al. Investigation on middle-wave infrared window materials for hypersonic application[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(9): 149-155.
- [65] 袁良, 袁林光, 董再天, 等. 高温状态下的材料法向光谱发射率测量[J]. *应用光学*, 2023, 44(3): 580-585.
- Yuan L, Yuan L G, Dong Z T, et al. Measurement of normal spectral emissivity of materials at high temperature[J]. *Journal of Applied Optics*, 2023, 44(3): 580-585.
- [66] Shibata K I, Nakamura H, Fujii A. Nondoped Y₂O₃ for 3-5 μ m IR transmission[C]// *SPIE Proceedings*, 1990, 1326: 48.
- [67] 刘志国, 熊胜明, 张云洞. 激光量热法测量红外光学薄膜吸收[J]. *光学仪器*, 2004, 26(2): 194-197.
- Liu Z G, Xiong S M, Zhang Y D. Laser calorimeter for IR absorption measurement of thin films[J]. *Optical Instruments*, 2004, 26(2): 194-197.
- [68] Klein C A, Miller R P, Stierwalt D L. Surface and bulk absorption characteristics of chemically vapor-deposited zinc selenide in the infrared[J]. *Applied Optics*, 1994, 33(19): 4304-4313.
- [69] Syllaios A J, Liao P K, Dean B E. Optical absorption coefficient of CdZnTe[C]// *SPIE Proceedings*, 1994,

- 2274: 49.
- [70] Klocek P, Hoggins J T, McKenna T A, et al. Optical properties of GaAs, GaP, and CVD diamond[C]//SPIE Proceedings, 1991, 1498: 147-157.
- [71] Richter J C, Poznich C R, Thomas D W. Minimization of IR absorption by germanium at elevated temperatures[C]//SPIE Proceedings, 1990, 1326: 106.
- [72] Peters J E, Ownby P D, Poznich C R, et al. Transmission of silicon and germanium in the infrared at reduced temperatures[C]//SPIE Proceedings, 1999, 3759: 380-388.
- [73] Haegel N M. BIB detector development for the far infrared: from Ge to GaAs[C]//SPIE Proceedings, 2003, 4999: 182.
- [74] 范志刚, 肖昊苏, 高豫强. 气动热环境下高速飞行器光学头罩特性分析[J]. 应用光学, 2009, 30(3): 361-365.
Fan Z G, Xiao H S, Gao Y Q. Characteristics analysis of high-speed aircraft optical dome in aerodynamic heating environment[J]. Journal of Applied Optics, 2009, 30(3): 361-365.
- [75] 王亚辉, 王强, 张伯川, 等. 红外窗口材料的热辐射特性测量方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2015(7): 1269-1274.
Wang Y H, Wang Q, Zhang B C, et al. Measurement method for thermal radiation characteristics of IR window materials[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015(7): 1269-1274.
- [76] 陈聪慧, 何凤梅, 李恩, 等. 透波材料高温介电性能评价表征[J]. 宇航材料工艺, 2011, 41(2): 30-33.
Chen C H, He F M, Li E, et al. Evaluation and characterization on high temperature dielectric properties of microwave-transmitting materials[J]. Aerospace Materials & Technology, 2011, 41(2): 30-33.
- [77] 程小浩. 含镀膜窗口的红外探测系统内杂散辐射传输特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
Cheng X H. Research on stray radiation transmission for infrared detecting system with a window coated by thin film[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [78] 凡丽梅, 李荣成, 董方旭, 等. 红外热波成像检测技术研究进展及在航空航天领域的应用[J]. 航空材料学报, 2025, 45(6): 45-59.
Fan L M, Li R C, Dong F X, et al. Research progress of infrared thermal-wave imaging technique and its application in aerospace field[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2025, 45(6): 45-59.
- [79] 蔡德龙, 陈斐, 何凤梅, 等. 高温透波陶瓷材料研究进展[J]. 现代技术陶瓷, 2019, 40(1/2): 4-120.
Cai D L, Chen F, He F M, et al. Recent progress and prospection on high-temperature wave-transparent ceramic materials [J]. Advanced Ceramics, 2019, 40(1/2): 4-120.

收稿日期: 2026-01-09; 录用日期: 2026-02-25

基金项目: 新材料平台揭榜挂帅项目(ZCGSTM2401)

通讯作者: 雷沛(1986—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为航空光电功能薄膜, 联系地址: 北京市 81 信箱 83 分箱(100095), E-mail: leipei.1232008@163.com; 陈小婷(1989—), 女, 博士, 特别副研究员, 研究方向为表界面物理化学与电化学, 联系地址: 北京市海淀区中关村南大街 5 号(100081), E-mail: xt.chen@bit.edu.com

(本文责编: 张 琴)