

红外气动光学效应研究进展与思考 (特邀)

邢 占¹, 陈晓依¹, 彭志勇¹, 杨志旺², 张贺龙¹, 邢忠福¹, 张 宁³

(1. 天津航技术物理研究所, 天津 300308;

2. 空装驻天津地区第三军事代表室, 天津 300308;

3. 北京机电工程研究所, 北京 100074)

摘要: 红外成像探测技术是精确制导的重要手段, 随着导弹武器向超音速、高超音速方向发展, 红外成像探测装置的工作环境更为恶劣。高速飞行条件下恶劣的气动力热环境使红外窗口的结构安全面临极大挑战, 激波、窗口等高温辐射源的辐射干扰严重影响红外探测能力, 流场和窗口的传输效应降低了探测制导精度。气动光学效应是高速红外探测与传统红外探测的本质的区别, 也是决定红外探测应用于高速导弹可行性的关键因素。文中主要介绍了高速红外成像探测的气动力热效应、热辐射效应和传输效应及其影响, 阐述了气动光学效应在机理研究、试验研究、数值模拟和抑制校正技术方面的进展, 最后给出了高速红外探测气动光学效应研究的思考与建议。

关键词: 红外探测; 气动光学; 风洞试验; 数值仿真; 图像校正

中图分类号: TN976 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220228

Research progress and thinking of infrared aero-optical effect (*Invited*)

Xing Zhan¹, Chen Xiaoyi¹, Peng Zhiyong¹, Yang Zhiwang², Zhang Helong¹, Xing Zhongfu¹, Zhang Ning³

(1. Tianjin Jinhang Institute of Technical Physics, Tianjin 300308, China;

2. The Third Military Representative Office in Tianjin of Military Representative Agency in Beijing of the Air Force Equipment Department, Tianjin 300308, China;

3. Beijing Electro-mechanical Engineering Institute, Beijing 100074, China)

Abstract: Infrared imaging detection technology is an important means of precision guidance. With the development of missile weapons to supersonic and hypersonic, the working environment of infrared imaging detection devices is worse. The structure safety of infrared windows faces great challenges because of the severe aerodynamic thermal environment in high speed flight. The radiation interference of high-temperature radiation sources such as shock wave and window seriously affects the infrared detection ability. The transmission effect of flow field and window reduces the detection and guidance accuracy. Aero-optical effect is the most essential difference between high-speed infrared detection and traditional infrared detection, and it is also the key factor to determine the feasibility of infrared detection applied to high-speed missiles. This paper mainly introduced the aerodynamic thermal effect, thermal radiation effect, transmission effect and their influence of high-speed infrared imaging detection, expounded the progress of aero-optical effect in mechanism research, test research, numerical simulation and correction technology, and finally gave the thoughts and suggestions on the research of aero-optical effect of high-speed infrared detection.

Key words: infrared detection; aero-optics; wind tunnel; numerical simulation; image correction

收稿日期: 2022-03-30; 修订日期: 2022-04-16

作者简介: 邢占, 男, 工程师, 硕士, 主要从事红外成像制导和气动光学方面的研究。

0 引言

红外成像探测技术是精确制导的重要手段,随着导弹武器向超音速、高超音速的方向发展,红外成像制导装置工作的气动力热环境越来越恶劣,气动光学效应成为高速红外成像探测的核心问题。

高热流冲击和大气动压力载荷综合作用下,红外窗口产生较大的应力,甚至发生破坏,称为气动力热效应,其决定了高速红外探测系统能不能“活下来”;目标的辐射能量必须穿过高温流场和红外窗口才能到达光学系统,激波、窗口的热辐射干扰影响系统的信噪比,严重时甚至淹没目标信号或使探测器饱和,称为热辐射效应,其决定了高速红外探测系统能不能“看得见”;流场和窗口不均匀的折射率分布和变化影响目标光线的传输,导致目标图像产生模糊、抖动和偏移,称为传输效应,其决定了高速红外探测系统能不能“看的准”。上述三种效应统称为气动光学效应(如图 1 所示)。

文中主要介绍了气动光学三大效应的基本内涵和理论研究、实验研究等方面的进展,最后对气动光学未来的研究重点进行了展望。

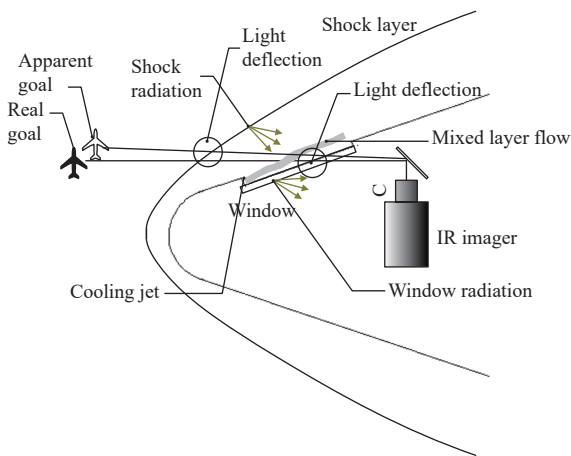


图 1 高速导弹气动光学效应

Fig.1 Aero-optical effects of hypervelocity missile

1 气动力热效应

1.1 气动力热效应概述

在稠密大气层内高速飞行时,红外窗口的气动力载荷和气动热载荷都比较大,随飞行马赫数增大,热

流和压力迅速增大。在内外压差的作用下窗口产生机械应力。红外窗口材料的导热能力一般较差,气动加热使红外窗口温度迅速升高,导致窗口内外产生较大的温度梯度,窗口表面不均匀的热流分布导致窗口径向也存在温度梯度,而且窗口的热膨胀还会受到安装结构的约束。在这些因素的作用下,窗口可能产生较大的热应力。此外,高温条件下红外窗口材料的强度还可能降低。在上述多种因素综合作用下红外窗口可能发生破坏。保证光学窗口承受气动力热载荷不发生破坏成为高速弹载红外探测应用面临的首要问题。风洞试验中发生破坏的红外窗口如图 2 所示。

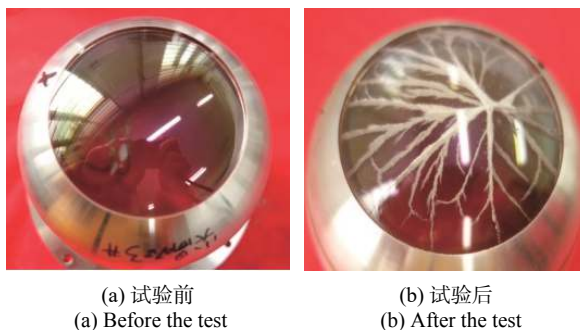


图 2 风洞试验中发生破坏的红外窗口

Fig.2 Infrared window damaged in wind tunnel test

1.2 窗口材料变温力热特性研究

在一定的气动力热载荷条件下,材料力热特性决定了窗口的热影响和力响应,主要影响参数包括:密度、比热容、导热系数、热膨胀系数、弹性模量、泊松比、强度等,在分析计算中采用常温固定值将会严重降低结果的准确性,获取准确的材料力热特性是分析窗口力热响应的基础。

施纯俊等测量了蓝宝石窗口在变温条件下的比热容、导热系数、热膨胀系数,哈尔滨工业大学殷和栋采用激光超声波技术测量了变温条件下的蓝宝石的弹性模量,结果如图 3 所示,可以看出这些参数随温度变化较大^[1-3]。重庆大学成天宝通过建立的脆性材料单轴直接拉伸和压缩强度测试装置测试了 CVD 硫化锌从室温到 600 °C 的直接拉伸强度和单轴压缩强度,其拉伸强度在高温下略有上升,压缩强度基本不变^[4]。如图 4 所示。

Klein 等收集并分析了一定时期 4 台力学测试设备红外窗口材料的抗弯强度数据,并假设断裂来自于

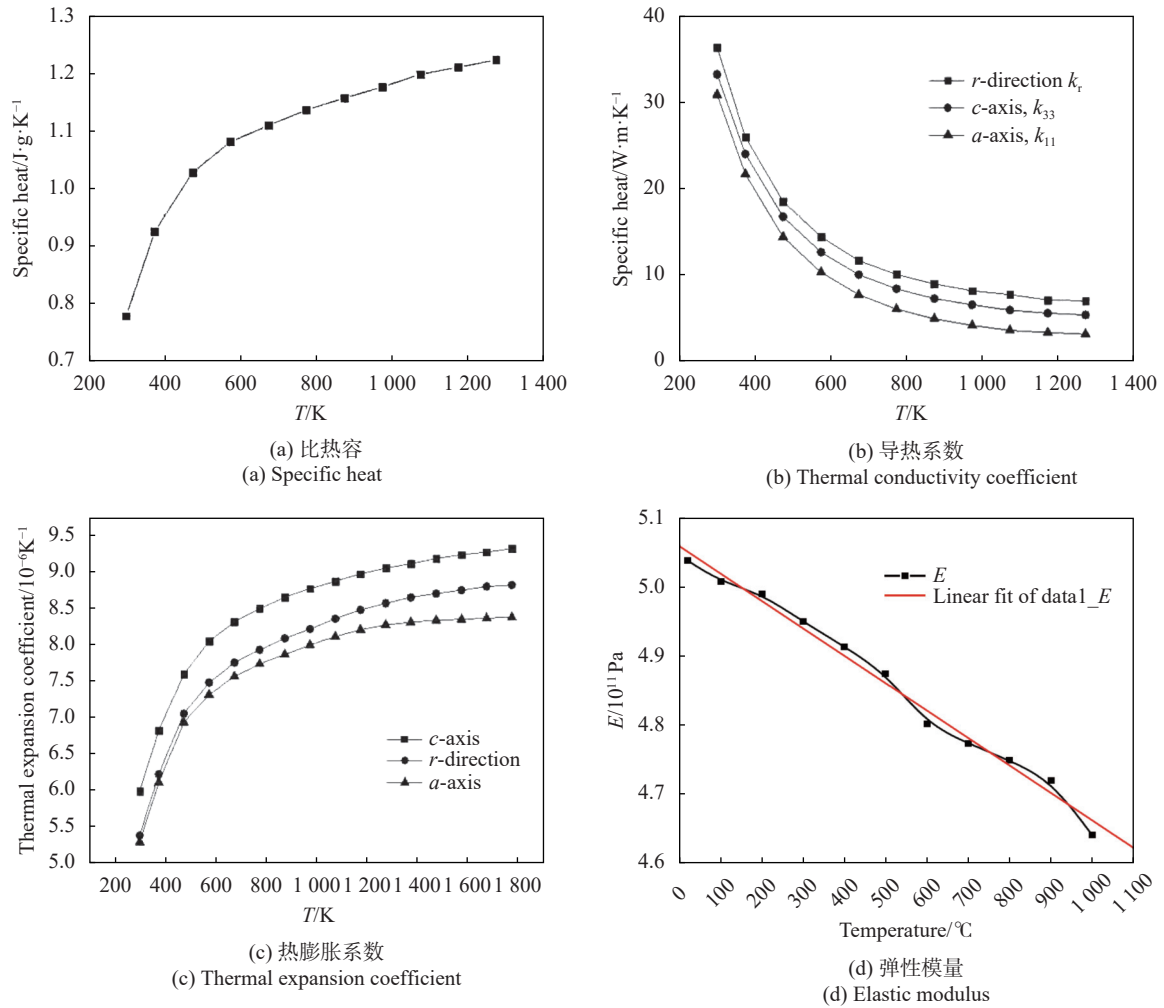


图 3 蓝宝石热力学特性随温度变化曲线

Fig.3 Thermodynamic characteristics vs temperature curves of sapphire

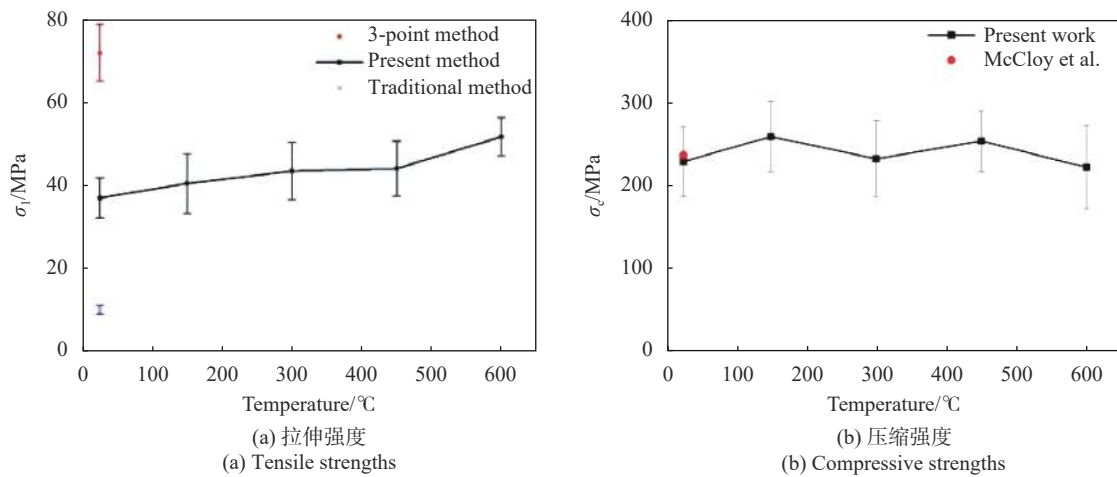


图 4 试验测得 CVD ZnS 的拉伸和压缩强度

Fig.4 Measured tensile and compressive strengths of CVD ZnS

随机分布的表面缺陷,建立了描述窗口材料破坏概率的韦伯双参数模型,对蓝宝石、金刚石、硫化锌等红

外材料进行验证发现,除了氟氧化物玻璃外其他均符合得非常好^[5](图 5)。美国蓝宝石统计特性和风险降

低计划 (SSCARR) 根据萨德反导系统 (THAAD)、标准-2 舰空导弹和“箭”-2 反导导弹红外窗口/球罩应用背景, 通过对 1475 个试样开展弯曲强度测试、激光热结构测试和强度增强研究, 分析了晶向、表面光洁度、加工方法、材料纯度等对强度的影响, 获得了大量实测数据, 建立了蓝宝石窗口/球罩可靠性预测统计模型, 并最终交付了 3 种导弹窗口 (图 6)。

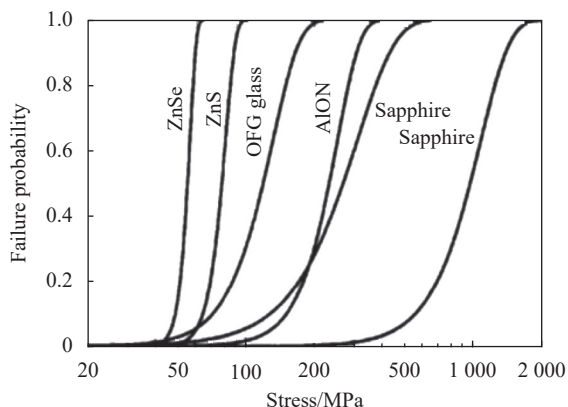


图 5 窗口材料失效模型

Fig.5 Failure model of window materials

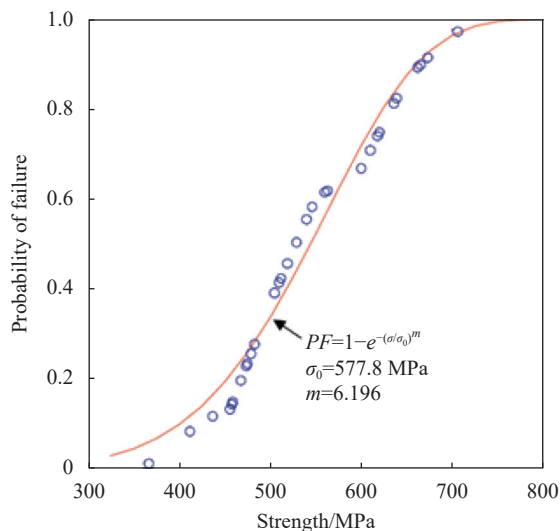


图 6 激光热结构测试结果

Fig.6 Laser thermostructural test results

1.3 窗口气动力热效应预估

从 20 世纪末开始, 通过理论分析来设计窗口也逐渐成为了窗口的主要设计方法, 大量学者通过理论分析和简化得到了一系列的经典公式^[6], 在气动力和气动热载荷作用下的诱导应力分别可以通过如下公

式表示:

$$\frac{\sigma_{\max P}}{\Delta P} = \frac{R}{2L} \left\{ \left(1.6 + 2.44 \sqrt{\frac{R}{L} \sin \theta} \right) \cos \theta - 1 \right\} \quad (1)$$

$$\sigma_{\max Q} = \frac{1}{TSF} \frac{\alpha E}{1-\nu} (T_{st} - T_i) (Bi \geq 1) \quad (2)$$

$$\sigma_{\max Q} = \frac{1}{TSF} \frac{\alpha E}{1-\nu} Bi (T_{st} - T_i) (Bi < 1) \quad (3)$$

经过进一步推导可以得到表征材料经受热冲击能力的抗热冲击品质因子 (FOM), 如下所示:

$$FOM = \frac{\sigma_f (1-\nu)}{\alpha E} (Bi \geq 1) \quad (4)$$

$$FOM = \frac{\sigma_f^{5/3} (1-\nu) \kappa}{\alpha E} (Bi < 1) \quad (5)$$

式中: σ_f 为材料断裂强度; κ 为导热系数。上述公式在早期红外窗口设计、红外窗口材料选择中发挥了巨大作用, 在现在仍有重要意义。

随着数值仿真能力的提升, 有限元方法为窗口气动力热效应分析提供了精细和准确的手段, 该方法已经在传统机械结构仿真中得到大量应用。李建华等利用有限元方法对红外空空弹头罩热载状态下结构的瞬态温度场和热应力进行分析, 结果如图 7 所示, 热应力最大的时刻与温度最高时刻并不重合, 与头罩热应力水平紧密相关的是头罩内部的温度梯度而不是传统意义上的高温^[7]。刘峰等以超声速氟化镁红外头罩为研究对象, 进行了热应力数值分析和电弧风洞试验, 发现头罩被拉坏, 而非被压坏, 即最初破坏位置应位于头罩内表面。与第四强度理论相比, 第一强度理论和莫尔强度理论更适于作为超声速氟化镁红外头罩的材料失效判别准则^[8]。刘元春等采用有限元分

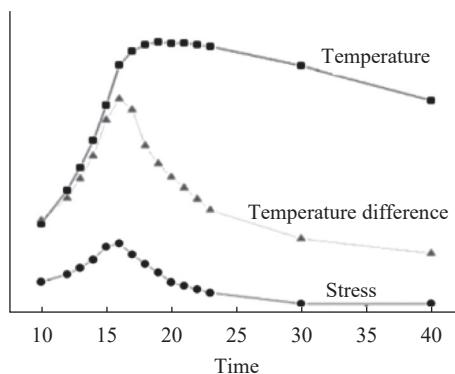


图 7 头罩温度与应力响应

Fig.7 Temperature-stress response of the dome

析方法, 计算了蓝宝石、硫化锌和氮氧铝 3 种材料在恒定热流条件下的热力响应^[9]。鄂羽佳等指出红外窗口的结构失效包括基体材料的破裂和膜层脱落, 韩杰才等采用有限元方法对窗口表面膜层在恒定热流载荷下的热响应和应力响应进行了分析, 发现在厚度方向, 膜层应力几乎恒定^[10-11]。

1.4 窗口气动力热效应试验

窗口气动力热效应试验手段主要有: 热震试验和电弧风洞试验。热震试验主要采用石英灯、燃气喷灯等热源对窗口急速加热, 模拟飞行条件下的热冲击环境。电弧风洞试验因模拟的试验环境与飞行真实环境最相似, 是现阶段公认的评估红外头罩抗热冲击性能最好地面试验手段。

张义广等通过热震试验模拟整流罩在大气层内飞行速度为 2.5 Ma 左右所承受的气动热环境, 对不同厚度的热压硫化锌的试片进行了试验, 5 mm 热压硫化锌的试片发生破坏, 8 mm 热压硫化锌的试片完好^[12]。陶永强等对硫化锌试块进行了燃气急热试验, 发现正面在加热过程中首先出现非贯穿性裂纹, 而背面未出现裂纹, 停止加热后背面裂纹由边缘逐渐向中心扩展, 并利用最小能量原理建立了热冲击裂纹间距的理论预报方法, 预测结果与试验吻合较好^[13]。

梁强等指出红外头罩电弧风洞中传统总加热量与总焓值与飞行状态一致的判断准则并不适用, 提出以计算弹道环境的头罩热应力作为约束条件, 控制风洞试验的最大热应力与弹道状态的最大热应力计算结果尽可能接近的试验设计判据^[14]。吴东等针对电弧风洞试验中试验件快速升温导致传统应力应变测量方法误差较大的问题对应变计标定瞬时热输出, 测量了风洞试验中窗口模型应变应力变化结果, 与有限元仿真结果进行了对比, 结果如图 8 所示, 二者比较吻合, 解决了传统电弧风洞试验窗口应力应变测量不准的难题^[15]。

美国陆军航空和导弹研究发展与工程中心 (AMRDEC) 为满足在海平面实现高超音速飞行的紧凑动能拦截弹 (CKEM) 制导窗口需求, 开展了窗口选材和安装设计, 采用有限元方法分析了气动力热载荷下蓝宝石、氮氧铝和熔融石英 3 种窗口材料热响应和应力响应分析, 分析结果表明: 压力载荷的诱导应力

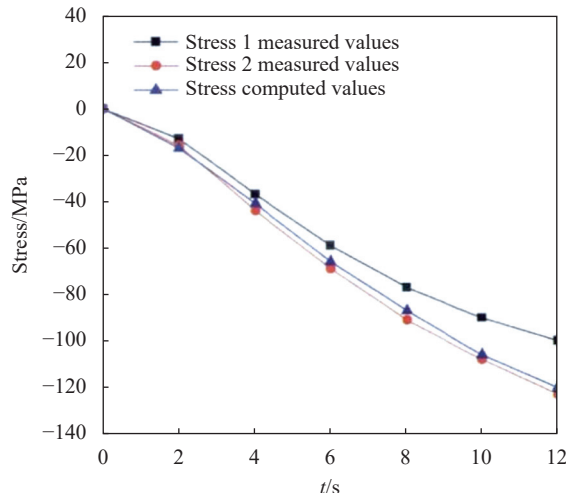


图 8 窗口模型测量值计算值对比应力曲线

Fig.8 Measured values and computed values compared stress histories of window model

相较于热流载荷导致的温度梯度产生的热应力可以忽略不计, 蓝宝石和氮氧铝的峰值应力是材料自身强度的 2~5 倍, 熔融石英的峰值应力明显低于材料强度, 最终选择熔融石英窗口, 在海军空战中心进行了风洞试验验证了仿真分析结果, 最终在埃格林空军基地进行了飞行试验验证, 飞行试验中导弹峰值速度超过 4 Ma^[16-17], 实现了光学窗口设计、仿真、地面试验、飞行试验的闭环验证。如图 9 所示。

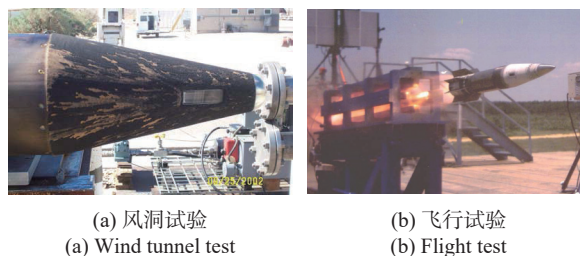


图 9 CKEM 制导窗口风洞试验与飞行试验

Fig.9 Wind tunnel test and flight test of CKEM guidance window

2 热辐射效应

2.1 热辐射热效应概述

红外成像探测的本质是探测目标与背景之间的辐射能量差异, 目前超声速红外探测系统的噪声等效温差一般 100 mK 以下, 而窗口、激波等近场高温辐射源的温度都在几百甚至上千摄氏度, 远高于目标背景的温度, 这些高温热源的热辐射干扰降低了系统的

信噪比,严重时甚至淹没目标信号或使探测器饱和,对红外探测的影响不可忽视。

高速飞行气动加热使红外窗口温度迅速升温产生较大的热应力的同时,还会造成窗口的透过率下降和自身辐射增强,如图 10 所示,随温度升高蓝宝石窗口的透过率明显降低,自身辐射明显增强。红外窗口自身辐射会使红外图像背景亮度增强,透过率降低增加了目标信号的损耗。

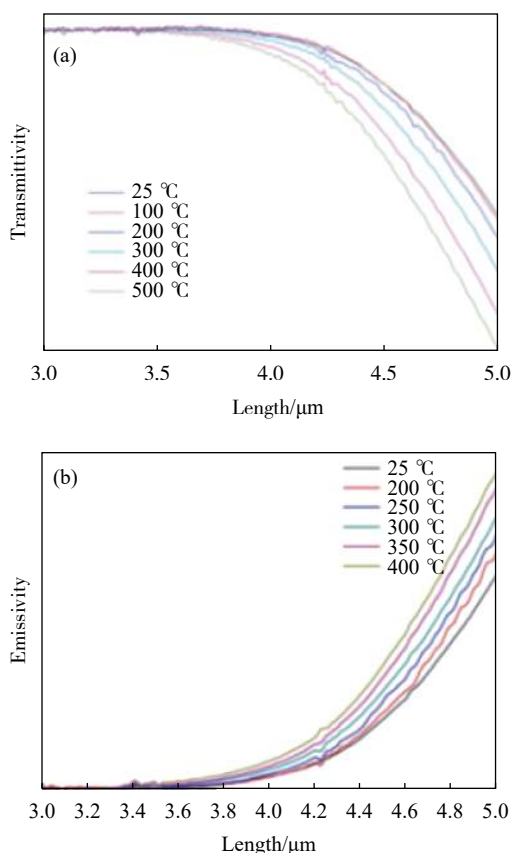


图 10 蓝宝石窗口不同温度光谱透过率和发射率

Fig.10 Spectral transmittivity and emissivity of sapphire window at different temperatures

高速飞行时气体压缩导致光学头罩附近产生激波,激波后气体温度和密度增大,气体分子旋转、振动、电子能级跃迁引起气体辐射,辐射光谱覆盖从紫外到长波红外谱段。在空气中占极大比例的 N_2 和 O_2 具有固定偶极矩,不具有红外辐射特性;而在空气中占很小比例的 CO_2 和 H_2O 具有非固定偶极矩,表现出强烈的红外辐射特性,是产生红外辐射的主要气体。如图 11 所示。

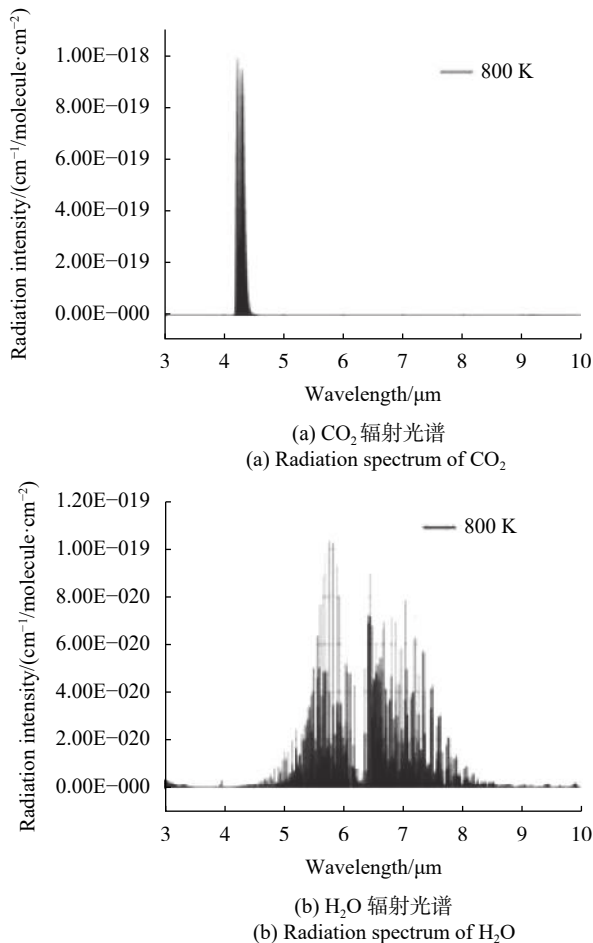


图 11 HITRAN 数据库计算的 CO_2 和 H_2O 辐射光谱

Fig.11 Radiation spectrum of CO_2 and H_2O calculated by HITRAN

2.2 窗口辐射效应

高温条件下窗口材料的光学特性是窗口热辐射效应的研究基础。范金太等测试了蓝宝石单晶、钇铝石榴石单晶、镁铝尖晶石陶瓷、氟化镁陶瓷和氧化钇陶瓷 5 种常见中波红外窗口材料在 50~400 °C 的高温透过性能和高温辐射性能^[18](图 12)。潘枝峰等从高温透过范围、红外辐射系数、高温力学性能以及抗热冲击等角度分析比较了 MgF_2 、蓝宝石、尖晶石、 $AlON$ 和 Y_2O_3 材料,认为 Y_2O_3 陶瓷是未来高超声速中波红外窗口/红外窗口的最佳候选材料^[19]。王亚辉等通过对蓝宝石高温透射和辐射特性测量,发现相较于透过率下降,自身热辐射影响更为显著^[20]。一些学者通过红外头罩/窗口加热试验,研究了氟化镁、硫化锌、尖晶石等窗口在气动加热条件下对红外成像的影响^[21-23]。

在窗口材料辐射特性研究的基础上,评估高温窗口热辐射对红外成像的影响成为进一步研究的重

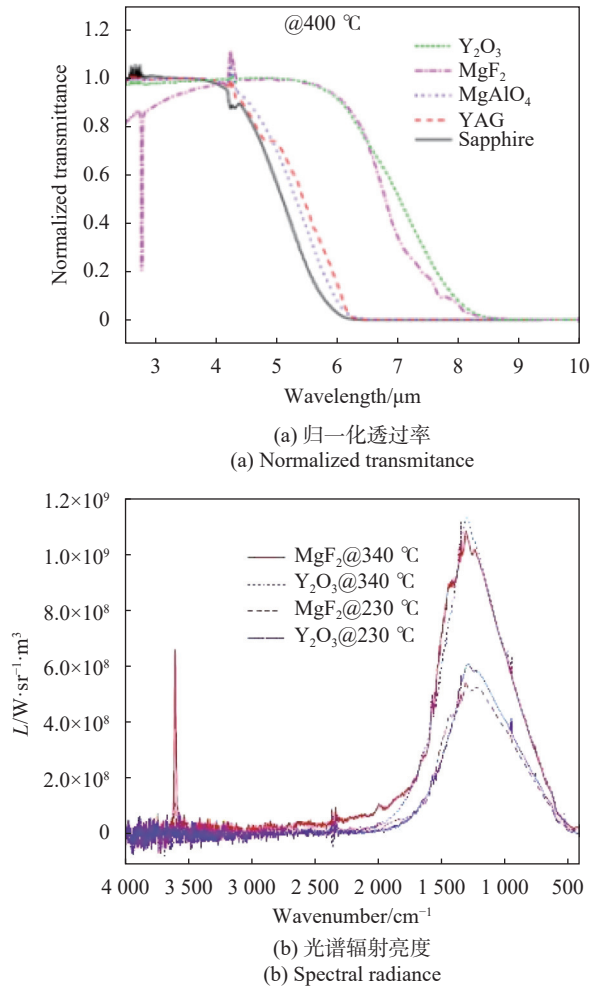


图 12 红外窗口材料的透过和辐射性能

Fig.12 Transmittance and radiance characteristics of infrared window material

点。Whitney T R 指出窗口热辐射对红外成像的影响主要包括:非均匀的窗口加热导致焦平面辐照度不均匀和窗口辐射光子噪声降低了信噪比^[24]。Edward F. Cross 建立了红外成像系统等温窗口辐射响应模型,分析温度分布均匀的高温窗口对成像的影响^[25]。Claude A. Klein 采用信噪比和噪声等效辐照度来评价高温窗口红外辐射引起的系统性能退化,并推导出了一组用于评估“热窗口”的辐射光子导致系统性能退化的方程^[26]。

刘立、王亚辉等基于部分窗口热辐射试验数据建立红外窗口热辐射模型,分析窗口热辐射在探测器上的响应特征^[27-28];范志刚等对光学头罩辐射、辐射传输和探测器响应进行研究,基于反向蒙特卡洛法、四阶-龙格库塔法光线追迹法、几何光学等方法实现了

红外窗口的气动热辐射效应对成像质量影响建模,对存在温度梯度的窗口自身辐射对红外图像影响、飞行条件下窗口热辐射动态响应等问题进行了研究^[29-34]。

窗口热辐射效应试验研究主要手段有高温窗口试验和电弧风洞试验两种。窗口静态加热试验可以获得窗口在特定温度下的辐射特性和对红外图像的影响,由于操作简单成为实验室条件下研究窗口热辐射效应的常用手段,但很难模拟飞行条件下窗口温度变化的动态过程。电弧风洞试验可以模拟飞行条件下窗口辐射的动态变化过程,是最受欢迎的地面试验手段。程梅莎等在电弧风洞上设计了三通试验方案,原理如图 13 所示,在保证窗口气动加热的同时可以透过目标光线,应用于多型红外探测装置窗口热辐射效应试验,但存在三通内壁高温辐射影响成像效果问题^[35]。陈连忠^[36]等利用电弧风洞对红外窗口进行气动加热,模拟了窗口热辐射噪声淹没目标信号的过程,结果如图 14 所示。

抑制窗口热辐射效应是高速弹载窗口设计的核心问题。殷兴良指出采用积分时间自适应技术可以

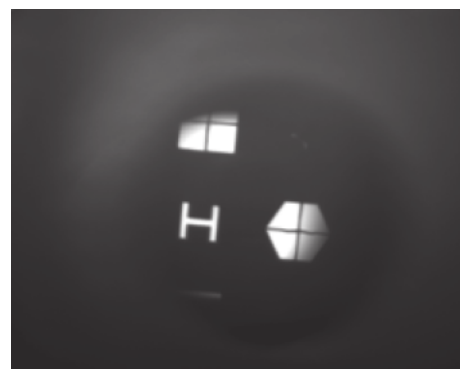
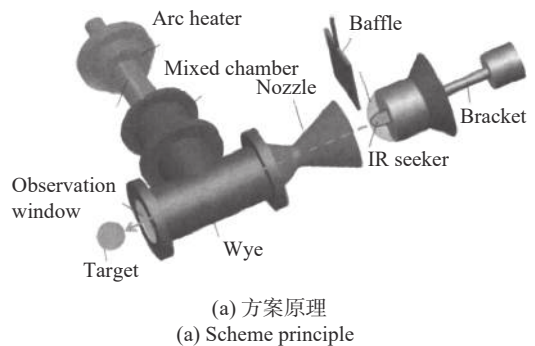


图 13 三通方案试验原理及采集到的红外图像

Fig.13 Principle of three way test and collected infrared image

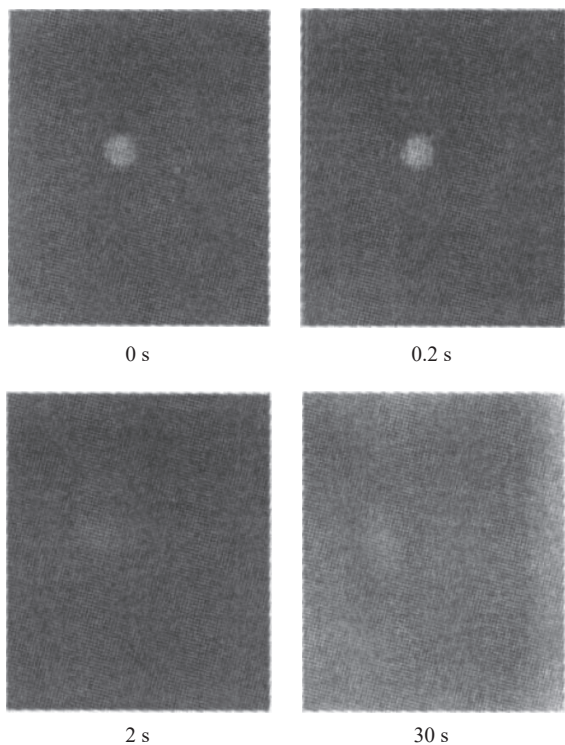


图 14 加热过程中不同时刻的红外图像

Fig.14 Infrared image at different time during the heat

防止探测器饱和,提高成像质量^[37]。红外窗口的热辐射干扰通常伴随着接近目标的过程逐渐增强,根据接收到的窗口辐射能量动态调整积分时间,可以在保证足够探测能力的同时使探测器工作在最佳响应范围,提高成像质量,该方法已经在工程实践中得到广泛应用。

一些研究指出采用共形头罩、在窗口表面镀低发射率膜层、改变窗口厚度等手段也可以在一定程度上降低窗口热辐射干扰。薛文慧等发现在相同工况下椭球面以及抛物面形头罩产生的干扰明显低于球形整流罩^[32]。刘元春等研究发现在 CVD 硫化锌窗口表面镀 HfO_2 膜、在蓝宝石窗口表面镀氧化钇膜可以延迟头罩辐射干扰饱和的时间,提高头罩抵抗热辐射干扰的能力^[38-39]。王慧等发现相同飞行工况和时间内,增加整流罩厚度可以降低头罩的温度,有效抑制头罩产生的红外热辐射^[40]。李一涵等指出一定的飞行条件下存在一个最优的窗口厚度,可以使红外探测的灵敏度达到最佳^[41]。还有一些学者探索采用图像校正处理方法抑制窗口的热辐射效应,王超等提出采用二次非线性回归分析法进行窗口辐射噪声修正提高系统信噪比^[42],洪汉玉等提出了一种基于梯度分布和暗通道的窗口辐射校正方法^[43]。

采用窗口制冷技术可以有效降低改善窗口所处气动热环境或降低窗口温度,是最为有效地抑制窗口热辐射效应的手段。窗口制冷方法主要包括外部喷流制冷和内部冷却,外部冷却方案冷却气流与原边界层内的气流混合,形成剪切/混合层复杂流动,可能影响目标光线的传输。R. Gentilman 等提出通过使用折射率匹配的玻璃粘接,内部开一组冷却剂通道,通过主动冷却带走气动加热传导给窗口的热量^[44]。冷却窗口如图 15 所示。

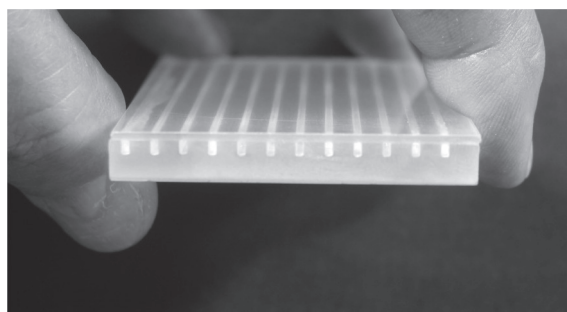


图 15 内冷窗口

Fig.15 Internal cooling window

2.3 激波辐射效应

随着飞行速度提高,激波辐射干扰对红外成像的干扰变得不可忽略。国外从试验和理论两方面对高温气体辐射特性进行了大量研究^[44-49]。建立了 HITRAN 数据库、高温气体光谱数据库 CSDS 和 HITEMP 数据库,开发了空气非平衡辐射特性计算程序 NEQAIR,在工程中得到广泛应用。通过 NEQAIR 计算得到的 CO_2 在 $4.3 \mu\text{m}$ 附近的光谱透过率与实验值对比如图 16 所示。美国 Science Applications International Corporation 开发研制的激波辐射仿真软件,它包括: EXTC 流场计算模块、SIRRM—II 辐射传输模块和 NORSE 热辐射数据库。并对某飞行器激波辐射及其对信噪比的影响进行了分析预测。

针对高温气体辐射特性,国内也有大量学者开展研究。董士奎等基于 HITEMP 数据库,采用统计谱带模型计算了 $300\sim 3000 \text{ K}$ 范围内的水蒸气辐射光谱^[50]。杨乾锁等利用激波管加热技术测量了高温空气在宽波段和几个特定中心波长的绝对辐射功率^[51]。闫鹏利用超高分傅里叶变换光谱仪系统测试了浓度和温度变化的条件下 CO_2 气体发射光谱特性,结果如图 17

所示,其光谱辐射能量在 4.3 μm 附近随温度和浓度增加明显增大^[52]。张军等在高频等离子体风洞上获得

了 CO₂ 中波和长波波段的红外辐射谱图,结果如图 18 所示,发现辐射峰随温度的升高向长波方向展开^[53]。

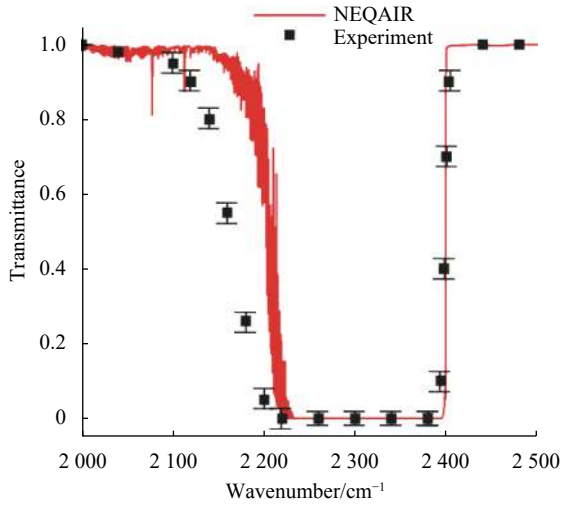


图 16 50% 含量的 CO₂ 在 1300 K 的计算透过率与测试值

Fig.16 Computational and Experimental transmittance, 50% CO₂ gas mixture at 1300 K

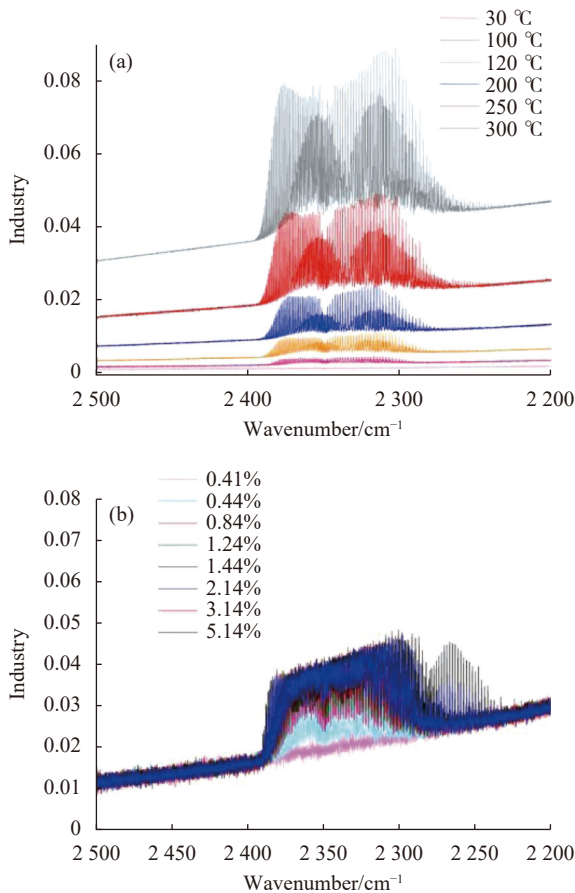


图 17 不同温度和浓度下 CO₂ 气体整体光谱吸收图

Fig.17 Global absorption spectrum of CO₂ gas at different temperatures and concentrations

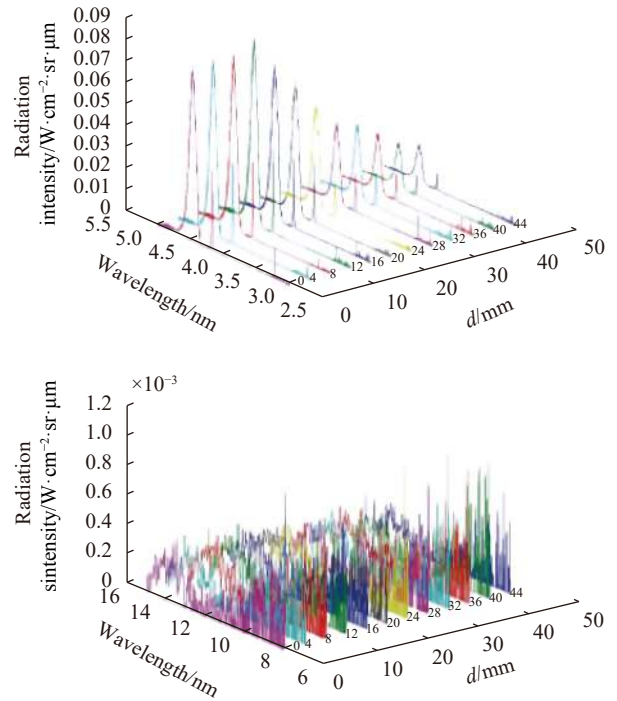


图 18 3~5 μm 和 8~12 μm 的辐射光谱

Fig.18 Emission spectrum for 3-5 μm and 8-12 μm

一些学者通过对流动解算、气体辐射特性和辐射传输的研究,完成了高速飞行器从流动到辐射的全过程计算方法的建立,并对典型飞行条件下的流场辐射特性进行分析,得到了一些非常有用的结论:(1) 流场红外辐射以 CO₂ 分子 2.7 μm 和 4.3 μm 谱带发射为主,4.3 μm 谱带最强;(2) 激波流场为光学薄介质,其对目标辐射的吸收可以忽略;(3) 辐射噪声和飞行速度、气体成分等密切相关,当高度减小、马赫数增大时,激波辐射噪声显著增大^[54-59]。

激波辐射具有强烈的光谱选择性,根据这一特点,在成像系统中设计合适的滤光片,可以减小激波辐射对目标探测的影响,提高探测的信噪比^[57]。此外激波辐射在飞行器头部最为显著,将红外探测装置布置在远离头部位置,可以在一定程度上减弱激波辐射的影响。

3 传输效应

3.1 传输效应概述

光学窗口传输效应来源有 3 方面:(1) 在气动力

热载荷下窗口产生变形,窗口面型偏离设计状态;(2)热光效应导致窗口气动加热所产生的非均匀温度分布引起窗口折射率不均匀分布;(3)弹光效应导致窗口气动力热载荷诱导应力引起窗口折射率不均匀分布。热光效应和弹光效应作用下窗口的折射率可以表示为:

$$n = n_0 + \alpha \Delta T + \beta \Delta \sigma \quad (6)$$

式中: n_0 为窗口材料的标准折射率; α 为热光系数; ΔT 为窗口温度的变化量; β 为弹光系数矩阵; $\Delta \sigma$ 为应力的变化量。

流场传输效应来源于流场中空气密度的不均匀分布和密度脉动。流场中气体的折射率可以表示为:

$$n_{\text{air}} = 1 + K_{GD} \frac{\rho}{\rho_0} \quad (7)$$

式中: K_{GD} 为比折射度常数; ρ 为流场中空气密度; ρ_0 为标准空气密度。折射率场中光线传输可以表示为:

$$\frac{d}{ds} \left(n \frac{dr}{ds} \right) = \nabla n \quad (8)$$

式中: s 为光线传播路径上的弧长; r 为光线矢径; n 为折射率; 光线通过折射率场的光程可以表示为:

$$\Lambda = \int n dl \quad (9)$$

除气动力热载荷引起窗口变形产生的传输效应外,窗口弹光效应、热光效应和流场引起的传输效应本质上都是介质折射率的变化导致光线传播过程中产生偏折和光程差,进而引起目标图像偏移、抖动和模糊。

3.2 窗口传输效应

传输效应的来源主要是光学窗口和流场,针对窗口传输效应,以哈尔滨工业大学范志刚课题组为代表的一批学者对气动力热载荷下光学窗口面型变化、弹光效应和热光效应引起的成像质量下降进行了大量理论研究^[60-68],采用光线追迹法、折射率重构、有限元方法等对球罩、共形头罩、多面体拼接窗口、平窗等不同形式窗口的传输效应引起的点扩散函数峰值大小及峰值位置(像偏移)变化进行了仿真分析。发现:光线在窗口上的入射角的大小是影响成像质量的一个重要因素,指出:一般情况下热光效应在窗口传输效应中占据主导作用。马吴军等采用离子体射流中对二维尖劈模型中的石英窗口进行加热,利用径向剪

切干涉技术测量了气动加热条件下红外窗口引起的传输光束波面相位、点扩散函数和斯特列比的变化^[69]。

3.3 流场传输效应理论

以美国为代表的西方军事强国对传输效应研究起步较早,在传输效应机理、仿真分析和校正方面进行了大量研究,建立了比较完善的传输效应数学模型,开发了 AOQ Code、AOTS 等传输效应仿真软件,实现对气动光学引起的像偏移、像模模糊的分析预测,通过像点半径、相位、斯特列尔比等定量评价传输效应的影响^[70-71]。

我国在气动光学方面进行相关研究起步于 20 世纪 90 年代末,远晚于国外。2003 年,殷兴良出版了《气动光学原理》一书,系统地介绍了气动光学效应的基本理论、数值模拟、校正方法和试验验证^[37]。同一年,李桂春编著的《气动光学》出版,系统地论述了在高超声速空气动力流场中光束传输的原理和特性,阐明了气动光学基本理论,又提供了风洞模拟试验中的各种气动光学效应的测量方法^[72]。这两部著作作为国内气动光学研究人员提供了理论支持和试验指导,掀起了国内气动光学问题研究的高潮。

流场传输效应涉及多个学科领域,由于流动的复杂性,其理论研究难度极大,如何将传输效应模型与流场变量关联起来是其中的关键问题。Sutton 采用统计理论将湍流统计量和气动光学畸变统计量进行关联^[73]。Lee 等通过研究指出瞄视误差和斯特列尔比没有正相关的关系,即使斯特列尔比接近 1,瞄视误差也可能很大,并通过试验证实了这一理论^[74]。

闫溟等针对流场传输效应数值模拟需求,发展了相应的 RANS 计算方法和光波折射率脉动值的输运方程,用以模化脉动密度对光学成像的畸变效应^[75]。针对影响光学传输预测的流场湍流脉动量预测问题,潘宏禄等选取平板、压缩拐角、凹腔流动模型,采用大涡模拟 (LES) 方法给出脉动工程模型的系数修正结果,该结果已经应用于型号飞行器的光学窗口气动光学效应预测中^[76]。刘洪等提出了适用于高速流场气动光学数值模拟的 RANS/DSMC 混合算法,全局时均流场采用 RANS 方法,局部流场的脉动量采用 DSMC 进行数值模拟,极大提高了计算效率,并采用超声速环境下尖劈模型对比试验结果论证了算法的合理性^[77]。李波在传统 (RANS/DSMC) 混合算法的

基础上开发出了 RADA0 混合算法^[78]。吴琳用高折射率梯度门限提取流场高折射率梯度区域,当超过 70% 的折射率梯度被忽略时,重建的折射率场仍能捕捉到绝大多数气动光学畸变,表明高超声速流场的高折射率梯度区域是产生气动光学畸变的主要原因^[79]。

结合高速导弹红外探测背景,不少学者对超声速流动和光学传输效应进行了数值模拟研究。冯定华等指出凹腔流动的剪切层结构将引起光线抖动,导致严重的波面畸变,明显降低光强斯特列尔比,斯特列尔比随空间和时间变化^[80]。陈勇等的研究表明凹窗流动的边界层、分离剪切层、激波和旋涡等是影响光束传输的重要因素,并研究了窗口深度对传输效应的影响^[81]。朱志斌等研究了喷流对凹窗的影响,流动由层流向湍流的转换过程产生大尺度的湍流结构会引起流场剧烈密度脉动,严重影响光线传输^[82]。邢博阳等研究了攻角、飞行高度、来流马赫数、入射光线角度、波长等对流场传输效应的影响^[83-87]。史可天等对凹窗、凸窗和球头 3 种光学头罩的光学传输效应进行仿真。通过瞄准误差、斯特列尔比、含能半径等气动光学效应参数描述了流场引起的成像畸变,发现从成像偏移的角度讲,凹窗模型最大,凸窗模型次之,球头模型最小;从成像模糊的角度讲,凹窗模型最大,球头次之,凸窗模型最小^[88]。如图 19 所示。

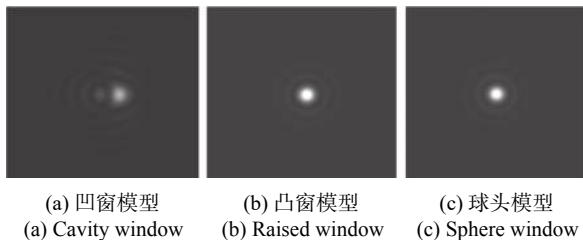


图 19 流场传输效应结果

Fig.19 Results of field transmission effects

3.4 流场传输效应试验

在气动光学试验研究方面,美国气动光学评价中心(AEDC)开发了一套基于正交轴的全息流场测量系统,可以实时观察流场的结构和波前畸变^[89],介绍了在气动光学效应风洞试验模拟中面临的 4 大技术难题:(1)地面模拟飞行环境十分困难,在很多情况下甚至是不可能的;(2)由于流动的空变和时变特性,气动光学试验测量的物理量和数据量十分巨大;(3)对测

量的空间和时间分辨率要求很高;(4)影响测量结果的干扰因素很多,比如振动、附加流场干扰等,最终的测量结果很难将其区分开。R. Deron 等采用 Shack-Hartmann 波前传感器在风洞中测量了 14~22 km 3.7 Ma 飞行条件下超音速双锥体侧窗的流场传输效应,研究了飞行高度、窗口坡度和视线角角度对传输效应的影响^[90],如图 20、图 21 所示。Jumper 对 Shack-Hartmann 传感器、Malley 探针、基于背景纹影技术的波前传感器(BOS-WS)和纳米粒子示踪技术(NPLS)等常用的气动光学试验研究方法进行了详细介绍^[91]。

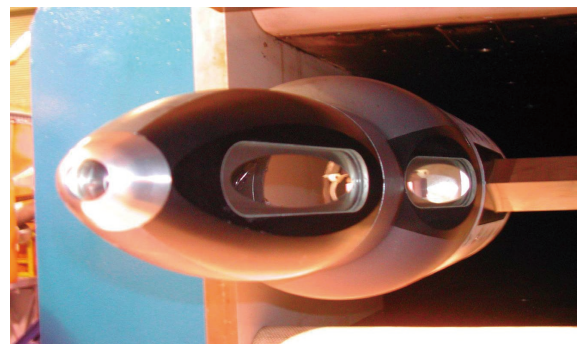


图 20 双锥体模型

Fig.20 Biconical model

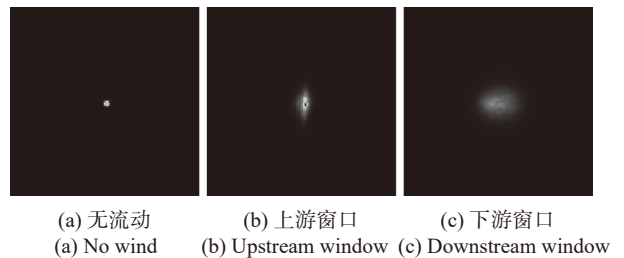


图 21 波前重构图像

Fig.21 Reconstructed images from wave fronts

郭隆德采用全息测量技术对高速拦截弹导引头的二维流场折射率进行了测量,采用光栅干涉法测量了其三维密度场,并利用哈特曼传感技术测量了气动光学效应,提出了波长相关性原则^[92]。李文煜研究了非接触气动光学测量方法,给出了高速线阵 Shack-Hartmann 波前传感器的设计方法^[93]。国防科技大学易仕和课题组以超声速红外窗口气膜冷却为应用背景,对超声速湍流边界层、超声速混合层等的流动现象和光学特性进行了深入研究^[94-102],采用基于纳米示踪的平面激光散射(NPLS)技术及基于背景导向纹影

的波前传感技术 (BOS-WS) 等高分辨率气动光学畸变与抖动测量方法, 对超声速湍流边界层、超声速混合层、有无喷流的超声速后台阶模型等的流动机理开展了一系列试验研究, 并测量了其气动光学效应, 对马赫数、喷流压力、后台阶高度等对流动和光线传输的影响进行了分析。针对高速飞行器气动光学地面试验很难模拟飞行条件的问题, 测量不同雷诺数对应状态的光程差, 通过分析光程差的均方根值与雷诺数之间关系, 证明雷诺数是影响气动光学效应的一个相似准则数。姚向红等采用哈特曼传感器和剪切干涉仪两种手段在 $3 Ma$ 连续超声速风洞中进行了光学传输效应的试验测量, 结果表明导流板可明显抑制风洞洞壁边界层干扰, 两种测量手段测试结果相近^[103]。

3.5 流场传输效应抑制和校正

认识流场传输效应对光学探测带来的不利影响, 并进行抑制和校正, 以提高工程应用中目标探测的准确性。

在流场传输效应抑制研究方面, Wissler 和 Roshko 指出层流流场平稳、光学质量最好; 完全湍流后虽然光线偏折严重, 但空间流动结构是各向同性的, 光学脉动较为规律; 转捩区内流动现象复杂, 对光线传输最为不利^[104]。根据壁面冷却可以减少流动脉动的原理, Sontag 和 Gordeyev 等定量研究了平板壁面冷却对光线穿过流场的光差的影响^[105]。White 和 Visbal 对壁面抽吸、冷却、速度振荡等方法采用数值模拟进行详细对比, 发现上述方法减弱流场传输效应的效率很低^[106]。

吴琳等发现波长对气动光学效应有重要作用, 采用长波段波长有助于提高成像质量, 并且多数情况下, 大涡造成的气动光学效比小涡应严重, 控制湍流尺度也可提高成像质量^[86]。丁浩林等通过超声速喷流光学头罩光学畸变试验测量研究发现施加微型涡流发生器可以较为有效地抑制气动光学高阶畸变并且提高波前的稳定性^[107]。易仕和针对红外窗口气膜冷却时喷流带来的附加传输效应, 提出了剪切层折射率匹配和压力匹配的设计理念, 既可以将外部高温气流与窗口隔开, 对窗口起到冷却作用, 又可以降低冷却喷流与外流混合的复杂流动对光线传输的影响^[108]。李波针对光学窗口外形参数对其气动光学性能的影响进行了研究, 采用遗传优化算法实现对高速飞行器

光学窗口的优化设计^[77]。

流场传输效应校正主要方法包括自适应光学矫正方法和图像处理校正方法。早在 2003 年夏天, 美国圣母大学就开始在风洞中进行简单的自适应低带宽的气动光学矫正尝试, 并建立了自适应矫正系统, 对简单二维热射流采用前向反馈系统, 将成像时均质量提升 38%^[109]。SY Technology Inc 以弹载应用为背景研制成功的微型高频光电子自适应校正系统, 应用光学干涉原理进行高速流场引起波前畸变的检测, 采用微光学技术和照相平板印刷技术制成校正光电子器件, 其校正工作频率可达几百千赫兹, 基本满足高速飞行器气动光学效应校正的需要^[110]。张丽琴等介绍了气动光学效应的光电校正方法, 并对各种方法进行了比较分析^[111]。

杨荣慧等针对气动光学数字图像校正工程应用对算法适用性及实时性的要求建立了基于先验知识的数字图像校正算法, 校正时间达到毫秒量级^[112]。2014 年, 华中科大张天序教授及其研究团队在图书《气动光学效应与校正-原理、方法及应用》, 全面介绍了气动光学效应的基本原理, 深入分析研究了成像谱段优选、热辐射校正、单帧图像和序列图像校正恢复、相位校正恢复、模型和先验知识约束的智能校正恢复以及数字/光电混合校正等方面的新方法、新技术^[113]。

4 气动光学效应研究思考

西方军事强国尤其是美国, 在气动光学 3 大效应方面都有深入研究, 对其产生机理、计算仿真、试验验证及校正等方面都有了比较成熟的理论, 这些研究成果在军事、民用等多方面得到了应用。国内气动光学研究起步较晚, 经过大批学者的研究, 虽然取得了巨大进步, 但与国外相比仍存在较大差距。在今后的研究中, 以下几个方面值得注意:

(1) 红外窗口在气动力热载荷下的温度响应和力学响应问题的研究上比较透彻, 目前建立了涵盖结构设计、仿真分析、地面试验、飞行试验等全过程的设计分析验证手段, 基本可以支撑高速红外探测系统研制。但对窗口材料变温力热特性研究较少, 尚未形成足以支撑工程应用的完备的窗口材料的力热特性数据库, 此外红外窗口的强度与制造方法、加工工艺、杂质含量等密切相关, 需要通过大量样本的测试建立

材料失效模型。窗口材料的高温光学特性研究存在同样的不足,在今后需要重视窗口材料基础热光学数据的测量和研究,充分发挥材料的性能极限以满足随飞行速度提高日益严酷的气动力热环境。

(2)在窗口热辐射研究方面,虽然目前已经有不少学者提出了窗口辐射仿真分析模型,但大多缺少地面试验和飞行试验的验证,尚不能满足工程应用需求。日益显著的窗口热辐射干扰成为制约未制导阶段导弹飞行速度的提高的主要因素,工程上传统的以窗口平均温度或最高温度评估窗口热辐射效应的方法已不满足使用需求,因此,需要结合理论分析、数值模拟、试验测量与验证等手段建立一套考虑窗口温度梯度的动态窗口热辐射效应分析手段。

(3)窗口制冷技术作为最为有效的抑制窗口热辐射的手段,是红外探测应用于未来更高飞行速度的导弹武器的核心技术之一。对于外部喷流制冷,如何抑制其复杂流动带来的传输效应影响是关键。对于内部冷却技术,尤其值得注意的是金刚石窗口的应用。随着人工合成金刚石窗口技术的日益成熟,利用金刚石极高的热导率进行边框制冷是今后窗口冷却技术中最有前景的发展方向。

(4)由于目标光线需要穿过流场才能被光学系统接收到,高温激波辐射源不可避免地出现在光学系统视场内被“看到”,利用激波热辐射强烈的光谱选择特性对激波辐射开展更为精细的光特性研究,进而采用光谱滤波等技术抑制其对热辐射噪声是未来解决激波热辐射效应的主要技术手段。

(5)窗口和流场传输效应的研究目前主要集中在机理研究方面,尚不足以支撑工程化应用。但随着导弹武器飞行速度的提高,流场传输效应将成为影响高速红外光电系统探测制导精度的核心问题。

(6)国内现有的风洞试验设备主要包括电弧风洞、常规风洞、燃气风洞和激波风洞等,基本都是根据力学试验和热学试验需求建设的,很难满足气动光学效应试验需求,尤其是整机级试验。电弧风洞试验一般马赫数较低,很难模拟飞行试验流场,基本用于窗口的气动热环境;常规风洞来流总温很难达到飞行试验水平;燃气风洞基本能模拟飞行试验的流场,但其流场介质中 CO_2 和水蒸气含量较高,一般无法用于光学试验;激波风洞连续运行时间短,难满足气动光

学试验要求。因此,亟需建设专门的气动光学效应风洞试验设备,支撑气动光学研究和地面试验验证。

5 结论

气动光学是一门涉及流体力学、光学、工程热物理、图像处理等多学科知识的交叉学科,气动光学效应是高速红外探测与传统红外探测的本质区别,也是决定红外探测应用于高速导弹可行性的关键因素。目前气动光学效应研究取得了极大进展,但在试验技术和应用研究方面还需要进一步加强,适应红外探测高速化发展方向。

参考文献:

- [1] Shi Chunjun, Zhang Lianhan, Hong Jiaqi, et al. Study on thermal properties of sapphire crystal [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2015, 44(10): 2652-2657. (in Chinese)
- [2] Yin Hedong. Experimental measurements of sapphire's elastic modulus with temperature change[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011: 39-40. (in Chinese)
- [3] Song Yunfei, Yu Guoyang, Yin Hedong, et al. Temperature dependence of elastic modulus of single crystal sapphire investigated by laser ultrasonic [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 33(6): 2652-2657. (in Chinese)
- [4] Cheng Tianbao. Strength and thermal shock resistance of advanced high-temperature materials[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016. (in Chinese)
- [5] Klein C A. Flexural strength of infrared-transmitting window materials: bimodal Weibull statistical analysis [J]. *Optical Engineering*, 2011, 50: 023402.
- [6] Yu Huaizhi. Infrared Optics Materials[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015. (in Chinese)
- [7] Li Jianhua, Guo Changning, Xu Quan, et al. Thermal stress analysis for the dome of the infrared air-to-air missile [J]. *Structure & Environment Engineering*, 2012, 39(2): 46-52. (in Chinese)
- [8] Liu Feng, Tang Xiaofeng. Study on thermal strength failure criteria for supersonic infrared MgF_2 missile dome [J]. *Aerospace Shanghai*, 2014, 31(3): 39-42. (in Chinese)
- [9] Liu Yuanchun, He Yurong, Peng Wengen, et al. Numerical study on thermal and stress responses of an infrared functional window [J]. *CIESC Journal*, 2011, 62(S1): 123-129. (in Chinese)
- [10] E Yujia, Wang Tianyu, Gao Ge, et al. Aerothermal dynamic failure of infrared window in high-speed aircraft [J]. *Advances*

- in Mechanics*, 2018, 48(1): 148-211. (in Chinese)
- [11] Liu Xing, Wang Xinzhi, Zhu Jiaqi, et al. Thermal mechanical response of microscale functional film for infrared window [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, 24(6): 791-1799.
- [12] Zhang Yiguan, Yang Jun, Li Xiaodan. Thermal property assessment experiment of the optic dome [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(S2): 556-559. (in Chinese)
- [13] Tao Yongqiang, Li Jing, Song Yuee, et al. Experiment and prediction of crack spacing of ZnS under thermal shock [J]. *Journal of Materials Science & Engineering*, 2017, 35(4): 528-533. (in Chinese)
- [14] Liang Qiang, Xu Quan, Yang Hua. A new quantified criterion to arc heated wind tunnel test of infrared dome [J]. *Aerospace Shanghai*, 2013, 30(3): 11-15. (in Chinese)
- [15] Wu Dong, Cheng Dejiang, Ma Haojun. Experimental thermal stress analysis of glass window in aerodynamic thermal environment [J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2016, 34(5): 592-597. (in Chinese)
- [16] Gerald Russell, Stephen Cayson, Mike Jones, et al. Army hypersonic compact kinetic energy missile laser window design [C]//Proceedings of SPIE, 2003, 5078.
- [17] Gerald Russell, Stephen Cayson, Mike Jones, et al. Laser window design for the army hypersonic compact kinetic energy missile [J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2006, 43(5): 982-989.
- [18] Fan Jintai, Xu Yangyang, Qin Xianpeng, et al. Comparative study on transmittance and radiance of sapphire, YAG, Spinel, MgF₂ and Y₂O₃ at high temperatures [J]. *Infrared Technology*, 2017, 39(10): 951-957. (in Chinese)
- [19] Pan Zhifeng, Mao Xiaojian, Zhang Honggang, et al. Investigation on middle-wave infrared window materials for hypersonic application [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(9): 091601. (in Chinese)
- [20] Wang Yahui, Wang Qiang, Zhang Bochuan, et al. Experiment of the thermo-radiation characteristic of infrared window of hypersonic vehicles [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(6): 1399-1403. (in Chinese)
- [21] Zhang Tianyi, Wei Qun, Wang Chao, et al. Thermal barrier effect analysis of magnesium-fluoride conformal dome and the experimental validation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(2): 0220001. (in Chinese)
- [22] Zhang Jinquan, Zhang Guoyin, Fan Jisong, et al. The experimentation research of IR thermograph measurement affected by IR window's pneumatic calefaction [J]. *Infrared Technology*, 2001, 29(2): 32-34. (in Chinese)
- [23] Ma Yifei, Zhao Wenping. Effects of window radiation on infrared imaging detection [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2005, 27(3): 427-430. (in Chinese)
- [24] Whitney T R. Aerodynamic window heating and its effect on FLIR imagery[C]//Proceedings of SPIE, 1976, 95.
- [25] Edward F Cross. Window heating effects on airborne infrared system calibration[C]//Proceedings of SPIE, 1992, 1762: 576-583.
- [26] Klein C A. How infrared missile windows degrade the noise-equivalent irradiance of infrared seeker systems [C]//Proceedings of SPIE, 1994, 2286.
- [27] Liu Li, Meng Weihua, Pan Guoqing. Modeling and analysis of infrared radiation from the dome flying at supersonic speed [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(7): 1193-1198. (in Chinese)
- [28] Wang Yahui, Wang Qiang, Zhang Bochuan, et al. Evaluation method for aero-thermo-radiation effect of IR window [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(2): 0204001. (in Chinese)
- [29] Fan Zhigang, Yu Cuiping, Xiao Haosu, et al. Numerical simulation of thermal radiation effect about optical dome in aerodynamic thermal environment [J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, 33(4): 649-653. (in Chinese)
- [30] Chen Lei, Zhang Liqin, Guo Mingjiang. Modeling of thermal radiation effect of aero optical window [J]. *Modern Defence Technology*, 2015, 43(6): 148-152. (in Chinese)
- [31] Song Minmin, Wang Biyun, Wang Shuang, et al. Thermal radiation calculation of optical dome for high speed vehicle [J]. *Aerospace Shanghai*, 2016, 33(4): 50-55. (in Chinese)
- [32] Xue Wenhui. Research on the thermal radiation characteristics of conformal dome in the aero-dynamic environment[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [33] Wang Jian. The thermal radiation building and emulation of optical dome in aerodynamic thermal environment[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese)
- [34] Gao Xilei. Modeling and simulation of the aerodynamic heating of dome influence on the imaging system[D]. Xi'an: Xidian University, 2013. (in Chinese)
- [35] Cheng Meisha, Chen Lianzhong. Aero-optics testing schemes for infrared radome [J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2010, 40(3): 73-75. (in Chinese)
- [36] Chen Lianzhong, Zhang Jiayang, Fei Jindong. Experiment research on the aerodynamic heating effect on the infrared imaging [J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39(1): 36-38. (in Chinese)
- [37] Yin Xingliang. Aero-Optical Principle [M]. Beijing: China

- Astronautics Publishing House, 2003. (in Chinese)
- [38] Liu Yuanchun, Yuan Ziguan, He Yurong, et al. Numerical simulation of jammer saturation of thermal radiation effect on two-dimensional optical domes [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2015, 36(10): 1356-1360. (in Chinese)
- [39] Liu Yuanchun, Hua Zhiwei, He Yurong, et al. Investigation of thermal radiation effect on optical dome of sapphire coated yttrium oxide [J]. *Science Bulletin*, 2016, 61(10): 801-810.
- [40] Wang Hui, Dang Fanyang, Zhang Rongda, et al. Influence of thickness of hemispherical dome on aerodynamic thermal radiation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(12): 1204002. (in Chinese)
- [41] Li Yihan, Hu Haiyang, Wang Qiang. Radiative transmission property of infrared window in hypersonic vehicle [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(4): 0404002. (in Chinese)
- [42] Wang Chao, Chen Juan, Wei Qun, et al. Thermal noise analysis and correction of infrared conformal dome [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(10): 1022001. (in Chinese)
- [43] Hong Hanyu, Shi Yu, Zhang Tianxu, et al. A correction method for aero-optics thermal radiation effects based on gradient distribution and dark channel [J]. *Optoelectronics Letters*, 2019, 15(5): 374-380.
- [44] Gentilman R L, McGuire P T, Fiorea D, et al. Low-cost sapphire windows[C]//Proceedings of SPIE, 2003, 5078.
- [45] Rothman L S, Jacquemart D, Barbe A, et al. The HITRAN 2004 molecular spectroscopic database [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2005, 96(2): 139-204.
- [46] D. P. Kratz. The sensitivity of radiative transfer calculations to the changes in the HITRAN database from 1982 to 2004 [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2008, 109(6): 1060-1080.
- [47] Bharadwaj S P, Modest M F. Medium resolution transmission measurements of CO₂ at high temperature-an update [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2007, 103(1): 146-155.
- [48] Dong S K, Li J Y, He Z H, et al. Modeling for the transient radiative properties of alumina particles with phase transition [J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2008, 22(1): 121-125.
- [49] Li J Y, Dong S K, Tan H P. Effective optical constant of alumina particle containing carbon [J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2009, 23(1): 216-219.
- [50] Dong Shikui, Tan Heping, Yu Qizhang, et al. Infrared radiative spectral band model parameters for water vapor in the 300-3000 K temperature range [J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*, 2001, 16(1): 33-38. (in Chinese)
- [51] Yang Qiansuo, Peng Zhimin, Liu Chun, et al. Experimental investigation of absolute radiation power for high temperature air by shock wave [J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2009, 27(S): 84-89. (in Chinese)
- [52] Yan Peng. The characteristic study of high temperature CO₂'s emission spectra[D]. Guilin: Guilin University of Electronic and Technology, 2017. (in Chinese)
- [53] Zhang Jun, Wang Guolin, Ma Haojun, et al. Infrared radiation experimental measurement and analyse of carbon dioxide at high temperature [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(12): 3169-3173. (in Chinese)
- [54] Mu Lei, Ma Yu, He Zhihong, et al. Radiation characteristics simulation of non-equilibrium flow field around the hypersonic blunted cone [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2012, 33(11): 1958-1962. (in Chinese)
- [55] Lu Junming, Hao Jingke, Cheng Xiao, et al. Computational methods of gas radiative noise for hypersonic vehicles [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28(8): 98-105. (in Chinese)
- [56] Hu Lanfang. Numerically simulation of nonequilibrium flow and optical radiation characteristic of hypersonic vehicle[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. (in Chinese)
- [57] Du Lei, Zhao Yan, An Yongquan, et al. Analysis of hypersonic shock layer radiance effect on an IR imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 291-296. (in Chinese)
- [58] Gao Tiesuo, Jiang Tao, Ding Mingsong, et al. Numerical simulation of infrared radiation characteristics of flow over hypersonic interceptors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(12): 1204001. (in Chinese)
- [59] Bao Chunhui. Study on thermal radiation characteristics of shock layer of high speed aircraft[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese)
- [60] Han Wei, Zhao Yuejin, Hu Xinqi, et al. Study on aero-optical effects of hypersonic vehicle's optical window [J]. *Optical Technique*, 2010, 36(4): 622-626. (in Chinese)
- [61] Fan Zhigang, Xiao Haosu, Li Hui. Numerical simulation for optical transmission of aero-optical dome [J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, 32(2): 189-194. (in Chinese)
- [62] Fan Zhigang, Xiao Haosu, Li Hui, et al. Analysis of optical transmission through high speed aircraft optical dome in aerodynamic thermal environment [J]. *Aero Weaponry*, 2010(5): 59-61, 64. (in Chinese)
- [63] Fan Zhigang, Xiao Haosu, Gao Yuqiang. Characteristics analysis of high-speed aircraft optical dome in aerodynamic

- heating environment [J]. *Journal of Applied Optics*, 2009, 30(3): 361-365. (in Chinese)
- [64] Fan Zhigang, Zhang Yaping, Pei Yangwei, et al. Numerical simulation of optical transmission through high speed aircraft optical window in aero-dynamic thermal environment [J]. *Infrared Millim Waves*, 2007, 26(5): 396-400. (in Chinese)
- [65] Wang Yefang. The POD analysis and optical transmission simulation of aero-optical window[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012. (in Chinese)
- [66] Shi Jinfeng, Wu Qingwen, Zhang Jianping, et al. Thermal-optical analysis for optical window of high-altitude And high-speed aerial camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(4): 0422004. (in Chinese)
- [67] Tan Xiaosong, Xu Dong. Thermal-fluid-solid coupling optical transmission analysis of high speed aircraft [J]. *Aero Weaponry*, 2016(2): 32-37. (in Chinese)
- [68] Shi Yaotao, Wang Yulei, Xie Fang, et al. Optical transmission simulation of dome in aero-dynamic heating environment based on code V [J]. *Aero Weaponry*, 2015(5): 41-45. (in Chinese)
- [69] Ma Haojun, Wang Guolin, Chen Dejiang, et al. Experimental study on aero-optical transmission effect of infrared window in aerothermal environment [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(9): 0904001. (in Chinese)
- [70] Offer Pade. Models of turbulence for aero-optics applications[C]//SPIE, 2001, 4419: 494-498.
- [71] Trolinger J D, Rose W C. Technique for simulating and evaluating aero—optical effects in optical system[C]//42nd AIAA Aerospace Science Meeting and Exhibit, 2004: 471P.
- [72] Li Guichun. Aero-Optics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003. (in Chinese)
- [73] Sutton G W. Aero-optical foundations and applications [J]. *AIAA Journal*, 1985, 23(10): 1525-1537.
- [74] Lee S, Yoon H, Jeung I S, et al. Super/hypersonic aero-optical effects induced by external jet cooling[C]//30th International Symposium on Shock Waves, 2017: 233–238.
- [75] Yan Ming, Shi Ketian, Ma Handong. A study on RANS computation for aero-optical effects [J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2013, 31(4): 462-465. (in Chinese)
- [76] Pan Honglu, Li Junhong, Cheng Xiaoli, et al. Model coefficient revision on supersonic turbulent pulse for aero-optic effect [J]. *Computational Physics*, 2018, 35(2): 194-204. (in Chinese)
- [77] Li Bo, Liu Hong. An investigation of hybrid RANS/DSMC method for aero-optical effects in high speed flow [J]. *Chinese Quarterly of Mechanics*, 2011, 32(1): 74-80. (in Chinese)
- [78] Li Bo. Investigation on the aero-optical characteristics of flow field around high speed vehicle and optical window design[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011. (in Chinese)
- [79] Wu Lin, Fang Jiancheng, Yang Zhaohua. Study on aero-optical distortion simulation of high refraction index gradient regions in hypersonic turbulent flow [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(11): 2952-2957. (in Chinese)
- [80] Feng Dinghua. Fine numerical simulation and experimental research on high-speed flow and its application in aero-optics[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010. (in Chinese)
- [81] Chen Yong, Guo Longde, Zhang Long, et al. Investigation on aero-optical effects of high-speed turbulence over a slope with a cavity [J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2010, 28(6): 666-671. (in Chinese)
- [82] Zhu Zhibin, Pan Honglu, Cheng Xiao. Flow field structures and density fluctuation characteristics around a blunted double cone with cooling jet [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2019, 34(7): 1425-1432. (in Chinese)
- [83] Xing Boyang, Zhang Bin, Liu Hong. Analysis of aero-optical effects of hypersonic vehicle in high angle of attack[C]//The Chinese Congress of Theoretical and Applied Mechanics, 2017: 1066-1074. (in Chinese)
- [84] Li Bo, Liu Hong. Aero-optical evaluation method for high speed flow [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, 38(5): 21-29. (in Chinese)
- [85] Wan Shizheng, Chang Xiaofei, Yan Jie. Research method of aero-optical transmission effect for IR air to air missiles [J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2015, 33(4): 621-626. (in Chinese)
- [86] Wu Lin, Fang Jiancheng, Yang Zhaohua. Analysis of influence parameters of aero-optical effects based on turbulence vortex model [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 37(1): 97-101. (in Chinese)
- [87] Zhan Qiaolin, Wang HongLi, Lu Jinghui, et al. Study and simulation of aero-optical transmission effects on the star image [J]. *Electronic Design Engineering*, 2011, 19(20): 68-71. (in Chinese)
- [88] Shi Ketian, Cheng Xiaoli, Ma Handong. Numerical simulation of aero- optical effects for the flow field around the optical window [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(1): 6-11. (in Chinese)
- [89] Havener George, Stepanek Chip. Aero-optics testing capabilities at AEDC[C]//AIAA, Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 1992.
- [90] Deron R, Mendez F, Montri J. Wavefront sensing of supersonic aero-optical effects on side-mounted windows[C]//Optics in Atmospheric Propagation and Adaptive Systems XI, 2008,

- 71080: 71080B.
- [91] Eric J Jumper, Stanislav Gordeyev. Physics and measurement of aero-optical effects: Past and present [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2017, 49: 419-441.
- [92] Gu Longed. Research on ground simulation test of aero-optical effects of high-speed interceptor [D]. Chengdu: Sichuan University, 2003. (in Chinese)
- [93] Li Wenhao. Study on non-intrusive aero-optical measurement methods and experiments[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005. (in Chinese)
- [94] Ding Haolin, Yi Shihe, Fu Jia, et al. Experimental investigation of aero-optical effect due to supersonic turbulent boundary layer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(10): 1018007. (in Chinese)
- [95] Xie Wenke. Aero-optical distorted wavefront measurement and control. [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007. (in Chinese)
- [96] Zhao Yuxin. Experimental investigation of spatiotemporal structures of supersonic mixing layer[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008. (in Chinese)
- [97] Tian Lifeng. Mechanism study of fine structures and aero-optical effects of supersonic flow around an optical dome [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese)
- [98] Zhu Yangzhu. Experimental mechanism study on the flow around supersonic optical domewith film cooling and its aero-optical effects[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese)
- [99] Zhu Yangzhu. Experimental investigation on supersonic flow over an optical dome with backward facing step and its aero-optical effects[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2015. (in Chinese)
- [100] Zhu Yangzhu, Yi Shihe, Chen Zhi, et al. Experimental investigation on aero-optical aberration of the supersonic flow passing through an optical dome with gas injection [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(8): 267-274. (in Chinese)
- [101] Zhu Yangzhu, Yi Shihe, Tian Lifeng, et al. Flow visualization of supersonic optical dome with jet [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2013, 39(1): 105-108. (in Chinese)
- [102] Ding Haolin, Yi Shihe, Fu Jia, et al. Experimental investigation of influence of Reynolds number on supersonic film aero-optics [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(2): 0211002. (in Chinese)
- [103] Yao Xianghong, Wu Yungang, Chen Yong, et al. Experimental study on the optical propagation effect of the flowfield surrounding the optical headcover in supersonic wind tunnel [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanic*, 2013, 27(4): 97-101, 108. (in Chinese)
- [104] Wissler J, Roshko A. Transmission of thin light beams through turbulent mixing layers[C]//30th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 1992.
- [105] Sontag M J, Gordeyev S. Studies of density fields in non-adiabatic boundary layers using wavefront sensors[C]//48th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, 2017.
- [106] White M D, Visbal M R. Computational investigation of wall cooling and suction on the aberrating structures in a transonic boundary layer[C]//51st AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, 2013.
- [107] Ding Haolin, Yi Shihe, Zhao Xinhai, et al. Experimental investigation on aero-optics imitation of hypersonic optical dome with supersonic film [J]. *Physics of Gases*, 2018, 3(6): 26-34.
- [108] Yi Shihe. The study of supersonic free-vortex aerodynamic window and its optical quality[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2003. (in Chinese)
- [109] Duffin D A. Feed-forward adaptive-optic correction of aero-optical aberrations caused by a two-dimensional heated jet[C]//36th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, 2005: 1-12.
- [110] Rod Clark, John Karpinsky, Gregg Borek, et al. High speed interferometric device for real-time correction of aero-optic effects[C]//AIAA, Plasmadynamics and Lasers Conference, 1995: 1-11.
- [111] Yang Ronghui, Chen Cheng. Engineering application method of aero-optic digital image correction [J]. *Modern Defence Technology*, 2012, 40(6): 19-22. (in Chinese)
- [112] Zhang Liqin, Fei Jindong. Photoelectric correction methods applied to aero-optical effects [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(6): 580-583. (in Chinese)
- [113] Zhang Tianxu. Aero-optical Effect Correction Principle, Method and Application[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2014. (in Chinese)