

热压载荷作用下气体检测光学窗口对激光传输影响

李栋 李品烨 王迪 吕妍 郭曦

Influence of optical window for gas detection on laser transmission under thermal pressing loads

LI Dong, LI Pinye, WANG Di, LYU Yan, GUO Xi

引用本文:

李栋, 李品烨, 王迪, 等. 热压载荷作用下气体检测光学窗口对激光传输影响[J]. 应用光学, 2023, 44(1): 195–201. DOI: 10.5768/JAO202344.0107001

LI Dong, LI Pinye, WANG Di, et al. Influence of optical window for gas detection on laser transmission under thermal pressing loads[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(1): 195–201. DOI: 10.5768/JAO202344.0107001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0107001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

532 nm激光辐照下ZnSe薄膜光学特性研究

Optical properties of ZnSe film under 532 nm laser irradiation

应用光学. 2018, 39(6): 929–935 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0607003>

组合式力热动态载荷光学窗口的光学特性研究

Optical properties of combined dynamic thermal dynamic loading optical window

应用光学. 2021, 42(6): 1122–1126, 1132 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0605003>

气体浓度激光光谱检测温度影响修正研究

Study on temperature influence correction of gas concentration laser spectrum detection

应用光学. 2020, 41(2): 348–353 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0203002>

差动柔性绳传动惯性稳定平台载荷分析与结构校核

Load analysis and structure checking of inertially stabilized platform based on cable differential transmission

应用光学. 2018, 39(5): 619–626 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0501005>

开放光路TDLAS气体检测系统光学接收组件设计

Optical receiver design of open-path TDLAS detection system for gas Wu Guozhong, Wang Di, Li Dong, Qi Hanbing

应用光学. 2017, 38(6): 877–883 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0601004>

侧边抛磨的U型金溅射塑料光纤等离子体共振传感器

Side-grinding U-shaped gold sputter plastic fiber SPR sensor

应用光学. 2019, 40(3): 511–516 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0308002>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 01-0195-07

热压载荷作用下气体检测光学窗口对激光传输影响

李 栋¹, 李品烨¹, 王 迪^{1,2}, 吕 妍^{1,2}, 郭 曦¹

(1. 东北石油大学 土木建筑工程学院, 黑龙江 大庆 163318; 2. 东北石油大学 物理与电子工程学院, 黑龙江 大庆 163318)

摘 要: 采用有限元方法研究了不同热压载荷作用下多组分气体原位激光检测系统的光学窗口变形分布情况, 并根据热光效应计算得到光学窗口折射率分布。采用光线追迹法对比分析了氮气吹扫前后光学窗口折射率变化及变形对到达接收面的通光量和辐照度分布影响规律。此外, 基于高温光学窗口激光透射测试平台开展了高温光学窗口对检测信号影响研究。结果表明: 高温高压环境会使光学窗口折射率变化幅度增大及变形加剧, 导致激光光路偏折引起透射光强损耗和探测信号条纹干涉; 氮气吹扫可以有效改善激光传输条件, 增加到达接收面的通光量, 优化辐照分布, 提高激光传输质量。

关键词: 热压载荷; 光窗变形; 折射率; 激光传输

中图分类号: TN249

文献标志码: A

DOI: [10.5768/JAO202344.0107001](https://doi.org/10.5768/JAO202344.0107001)

Influence of optical window for gas detection on laser transmission under thermal pressing loads

LI Dong¹, LI Pinye¹, WANG Di^{1,2}, LYU Yan^{1,2}, GUO Xi¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China; 2. School of Physics and Electronic Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China)

Abstract: The finite element method was used to study the deformation distribution of the optical window of the multi-component gas in-situ laser detection system under different thermal pressing loads, and the refractive index distribution of the optical window was calculated according to the thermo-optic effect. The influence laws of the refractive index change and deformation of the optical window before and after nitrogen purging on the luminous flux and irradiance distribution reaching the receiving surface were compared and analyzed by ray tracing method. In addition, based on the laser transmission test platform of high-temperature optical window, the influence of high-temperature optical window on the detection signal was studied. The results show that the high-temperature and high-pressure environment will increase the refractive index change amplitude and deformation of the optical window, which resulting in the laser optical path deflection induced transmitted light intensity loss and probe signal fringe interference. The nitrogen purging can effectively improve the laser transmission conditions, increase the luminous flux reaching the receiving surface, optimize the irradiation distribution and improve the laser transmission quality.

Key words: thermal pressing loads; optical window deformation; refractive index; laser transmission

收稿日期: 2022-03-31; 修回日期: 2022-05-23

基金项目: 博士后研究人员落户黑龙江科研启动资助项目 (BHL-Q20101); 东北石油大学优秀科研人才培养基金 (SJQHB201801); 提高油气采收率教育部重点实验室开放课题 (NEPU-EOR-2019-14); 东北石油大学优秀中青年科研创新团队项目 (KYCXTD201901)

作者简介: 李栋 (1979—), 男, 博士, 教授, 主要从事油气介质激光检测技术研究。E-mail: lidonglvyan@126.com

通信作者: 王迪, 男, 博士研究生, 主要从事激光检测及信号处理研究。E-mail: 15776598521@163.com

引言

光学窗口作为管输多组分气体原位激光检测系统的重要组成部分,为在线激光检测提供了光束访问媒介。在检测过程中,光学窗口作为内外环境压力和温度隔离窗直接暴露在高温高压环境中,其光学性能直接影响系统测量精度^[1]。温度载荷作用于光学窗口产生的影响主要表现在两方面:温度梯度产生的热应力引起光学窗口变形使得激光光束通过光学窗口时传播光程发生变化^[2];同时温度梯度引起光学窗口折射率梯度变化,造成激光传输光强分布特性改变,进而增加偏振损耗^[3]。而压力载荷则加剧光学窗口整体形变^[4]。因此,掌握热压载荷作用下光学窗口折射率变化及形变对激光传输的影响规律是提高激光检测系统测量稳定性的关键^[5-6]。

国内外学者对航空、太空等环境下的成像系统光学窗口开展了大量研究。Rogozhin 等人^[7]建立了一个基于大功率连续气体激光器输出窗口的热机械和热光学过程的数学模型,分析了高功率 CO₂、CO 等激光器中窗口材料的性能。Zhang 等人^[8]建立了光学窗口在轴向温度载荷下变形的数学模型,并导入 Zemax 光学软件研究了光学系统图像质量和亮度均匀性。姬文晨等人^[9]使用 Ansys 软件分析了红外透镜在温度梯度下的面形变化并分析了变形后光学系统成像质量。吴天祺等人^[10]通过对光机结构进行有限元分析,结合 Zernike 多项式对光学系统设计的合理性进行了验证。

上述研究主要针对成像系统光学窗口并以成像质量作为评判标准,而本文多组分气体激光检测系统属于典型非成像光学系统,其注重改善激光光束能量传输效率和探测器接收面能量分布。本文基于热压载荷作用下光学窗口的结构变形有限元分析结果,采用光线追迹法对比分析氮气吹扫前后激光传输效果,获得了不同管输流体注入速度、注入温度及窗口侵入侧压力对探测器接收面通光量和辐照度分布的影响规律,并实验研究了高温光学窗口对检测信号的影响。

1 模型建立

1.1 物理模型

本文以柴油燃料燃烧喷射发生器为研究对象,多组分气体原位激光检测系统如图 1(a)所示,包括燃烧喷射发生器和光学检测装置。光学检测装置安装在多组分气体喷射管段的两侧,采用原位对射式在线检测多组分气体含量。2 个相对的光学窗口固定在多组分气体喷射管段的两侧,为对射检测模式的光学传感系统激光发射与接收模块提供光学访问端口^[11]。图 1(b)为本研究中基于计算流体力学(CFD)方法和有限元方法研究多组分气体流动传热的基础几何模型计算域。

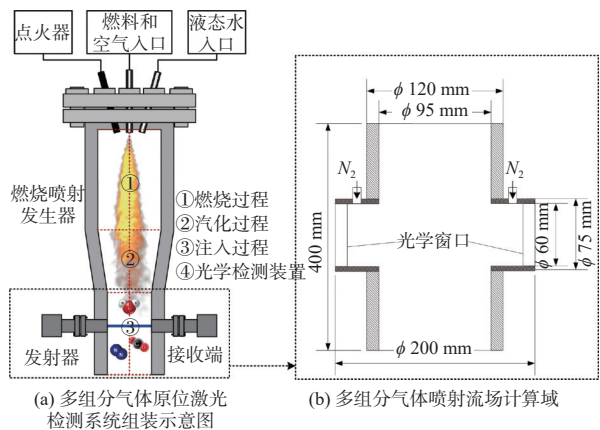


图 1 多组分气体原位激光检测系统及简化物理模型

Fig. 1 Multi-component gas in-situ laser detection system and its simplified physical model

选用熔融石英作为光学窗口材料具有良好的抗热冲击性能,并对柴油燃料燃烧产物中的水蒸气和二氧化碳所用近红外激光器中心波段有较高的透过率^[12],具体材料属性见表 1。

光学窗口厚度可根据材料属性和实际承受压差确定,简单支撑的圆形光学窗口的直径与厚度的最小比值或最小纵横比为^[13]

$$\frac{d}{h} = 2 \left[\frac{8\sigma_F}{3\Delta p(3+\gamma)F_s} \right]^{1/2} \quad (1)$$

式中: d/h 为窗口纵横比; σ_F 为材料折断应力; Δp 为窗口内外表面压力差; F_s 为安全系数,光学机械工程通常采用的安全系数为 4。本文光学窗口直径

表 1 光学窗口材料属性

Table 1 Material properties of optical window

材料	熔点/℃	导热系数/W·(m·K) ⁻¹	线性膨胀系数/10 ⁻⁶ ·K ⁻¹	泊松比	杨氏模量/GPa	断裂模量/MPa
熔融石英	1713	1.4	0.55	0.17	73.6	50

d 为 60 mm, 折断应力 σ_F 为 65 MPa, 假设最大内外表面压差 ΔP 为 2.9 MPa, 则满足强度要求的窗口最小厚度 h 为 13.82 mm, 最终取其厚度参数为 14 mm。

1.2 数学模型

气体激光检测系统外部环境温度设定为室温 298 K, 光学窗口与喷射管段内部环境换热方式为热辐射和强制对流; 同时, 光学窗口与其支撑固定结构之间存在热传导。对光学窗口采用稳态热分析。根据传热学基本定律, 其满足导热微分方程:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0 \quad (2)$$

$$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) \Big|_{s_3} = h(T - T_f) \quad (3)$$

式中: λ 为材料热导率; T 为温度。

光学窗口几何变形方程为^[14]

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u_r}{\partial r} + \beta(T - T_0) \quad (4)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\partial u_z}{\partial z} + \beta(T - T_0) \quad (5)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{u_r}{r} + \beta(T - T_0) \quad (6)$$

$$\varepsilon_{zr} = \frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r} \quad (7)$$

式中: β 为线性膨胀系数; ε 代表应力; u 代表位移量, 下标 r 、 z 、 θ 、 zr 分别代表径向、轴向、环向以及切向。

2 结果分析与讨论

2.1 热压载荷对光窗变形及折射率影响

熔融石英光学窗口四周为固定支撑, 其热膨胀系数较小, 仅考虑轴向热膨胀影响^[15]。在实际多组分气体注入过程中, 注入速度、注入温度和压力控制根据地层情况进行动态调整。如表 2 所示, 分别分析了 3 种工况下温度梯度及压差对光学窗口变形的影响。模拟方案如下: 1) 注入速度 10 m/s、注入温度 473 K 和窗口内外压差 0.9 MPa; 2) 注入速度 15 m/s、注入温度 523 K 和窗口内外压差 1.9 MPa;

3) 注入速度 20 m/s、注入温度 573 K 和窗口内外压差 2.9 MPa。

采用顺序耦合的方式将温度载荷和压力载荷加载到光学窗口进行分析, 热压载荷作用下光学窗口形变分布如图 2 所示。工况 1 下, 光学窗口形变最大值为 108.2 μm , 形变平均值为 17.0 μm ; 工况 2 下, 光学窗口形变最大值为 243.1 μm , 形变平均值为 38.1 μm ; 工况 3 下, 光学窗口形变最大值为 378.0 μm , 形变平均值为 59.2 μm 。随着入口温度、入口速度和内外压力差的增大, 光学窗口形变量逐渐增大, 中心位置形变值最大, 形变的量级为 10^{-1} mm。

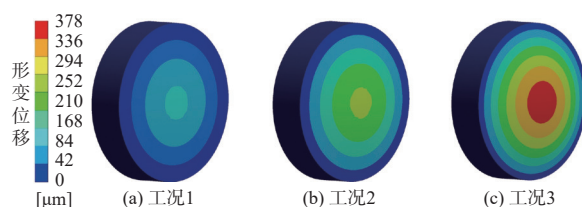


图 2 热压载荷作用下的光学窗口形变分布

Fig. 2 Deformation distribution of optical window under thermal pressing loads

由热压载荷作用对光学窗口的影响可知, 熔融石英材质的光学窗口形变值极小, 故弹光效应对折射率的影响低于热光效应, 因此本文只考虑热光效应带来的影响。热光效应^[16]为

$$\begin{cases} n_{\text{rel}}[\lambda, T(x, y, z)] = n_{\text{rel}}(\lambda, T_0) + \frac{dn_{\text{rel}}(\lambda, T)}{dT} \Delta T(x, y, z) \\ \Delta T(x, y, z) = T(x, y, z) - T_0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: $n_{\text{rel}}[\lambda, T(x, y, z)]$ 为考察温度下的折射率; $n_{\text{rel}}(\lambda, T_0)$ 为参考温度下的相对折射率; $dn_{\text{rel}}(\lambda, T)$ 为热光系数; $\Delta T(x, y, z)$ 为温度变化量; T_0 为参考温度。

本文非成像光学系统注重能量传输效率和改善目标面能量分布, 故无需关注整个通光口径内折射率变化对光线传播的影响, 只需考察用于激光束传播的光学窗口中心区域(半径为 5 mm 的区域)。分别根据光学窗口温度分布进行折射率计算, 结果如图 3 所示。光学窗口轴向折射率变化幅度分别为 0.000 13、0.000 11、0.000 8, 而光学窗口中心区域径向折射率变化幅度低于 4×10^{-6} 。因而忽略光学窗口径向折射率变化, 仅需考虑轴向折射率变化对激光传输的影响。

2.2 光窗变形及折射率变化对光束传输的影响

将上文不同工况下的变形结果导入光学分析

表 2 光学窗口梯度折射率拟合

Table 2 Gradient refractive index fitting of optical window

工况	拟合公式
工况1	$n = 4 \times 10^{-9} n^3 - 2 \times 10^{-7} n^2 + 8 \times 10^{-6} n + 1.447 4$
工况2	$n = -8 \times 10^{-9} n^3 - 8 \times 10^{-8} n^2 + 1 \times 10^{-5} n + 1.447 8$
工况3	$n = -1 \times 10^{-8} n^3 + 7 \times 10^{-8} n^2 + 1 \times 10^{-5} n + 1.448 2$

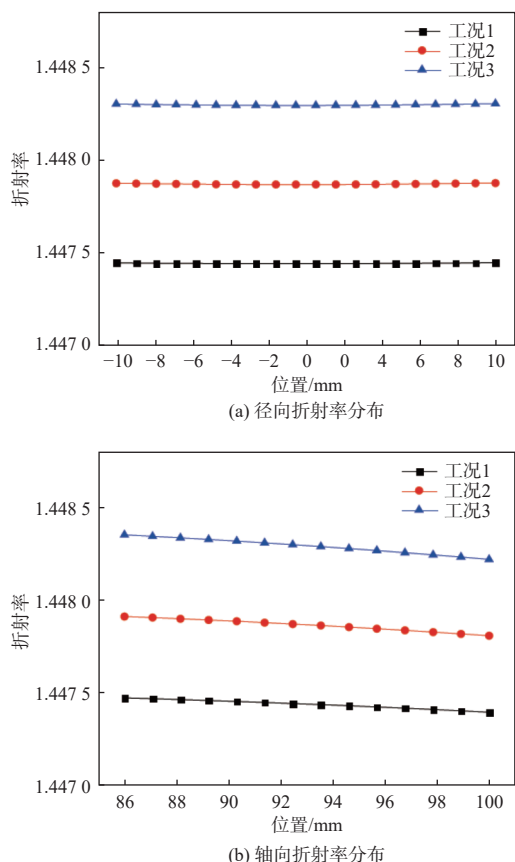


图3 不同工况下光学窗口径向折射率分布和轴向折射率分布

Fig. 3 Radial refractive index distribution and axial refractive index distribution of optical window under different working conditions

软件,以水蒸气探测激光 1 392 nm 为例,建立变形窗口激光传输模型,其由 1 392 nm 激光光源、光学窗口以及接收面组成。激光发射部分采用高斯分布的激光光源,直径为 3 mm,发散角为 1.5 mrad,功率为 5 W,激光光源与左侧光学窗口的间距为 100 mm。接收面直径 4 mm,位于距离右侧光学窗口 100 mm 处。

采用 Axial 拟合公式的前 4 项拟合光学窗口梯度折射率,通过对图 3(b)中的轴向折射率分布进行三次多项式拟合,求解各项折射率系数,结果如表 2 所示。

不同工况下接收面所形成的辐照分布如图 4 所示。激光辐照在接收面的能量峰值位于中心区域,并从内到外逐渐衰减。从工况 1~工况 3 下,接收面的通光量分别为 3.8311 W、3.8098 W 和 3.7442 W。与无热压载荷作用时相比,分别衰减了 9.47%、9.97% 和 11.53%。由此可知,当光学窗口变形加剧以及折射率变化幅度增大,接收面的

通光量逐渐下降,对激光传输的干扰加强。此外,由于光学窗口受热不均致使折射率非均匀分布,导致通过光学窗口的激光光路发生偏折,到达接收面的激光束质量下降。

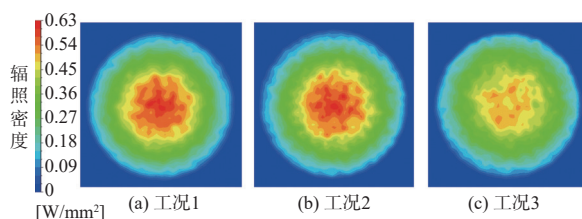


图4 不同工况下接收面所形成的辐照分布

Fig. 4 Radiation distribution formed by receiving surface under different working conditions

本文提出使用氮气吹扫测量通道来降低温度,改善温度载荷带来的折射率变化及窗口形变影响。分别在光学测量端口设置 2 个氮气吹扫进口,吹扫进口直径为 10 mm,入口速度设为 8 m/s,初始温度为 298 K。通过顺序耦合的方式将吹扫后的温度载荷和压力载荷加载到光学窗口进行分析,吹扫后不同工况下光学窗口形变分布如图 5 所示。工况 1 下,光学窗口形变最大值为 107.5 μm ,形变平均值为 13.9 μm ;工况 2 下,光学窗口形变最大值为 241.1 μm ,形变平均值为 31.3 μm ;工况 3 下,光学窗口形变最大值为 375.2 μm ,形变平均值为 48.7 μm 。经氮气吹扫后,不同工况下光学窗口最大形变值降低,形变平均值分别降低 18.2%、17.8% 和 17.7%,窗口变形得到改善。

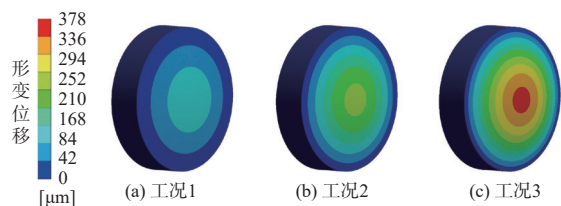


图5 吹扫后不同工况光学窗口形变分布

Fig. 5 Deformation distribution of optical window under different working conditions after purging

图 6 为吹扫后不同工况下光学窗口径向折射率分布和轴向折射率分布。与图 3 对比分析可知,由于光学窗口温度的降低,光学窗口整体折射率也随之降低,光学窗口中心区域径向折射率变化幅度低于 4×10^{-5} ,轴向折射率变化幅度低于 6×10^{-5} 。因此,氮气吹扫有利于降低光学窗口轴向折射率变化幅度,改善激光传输条件。

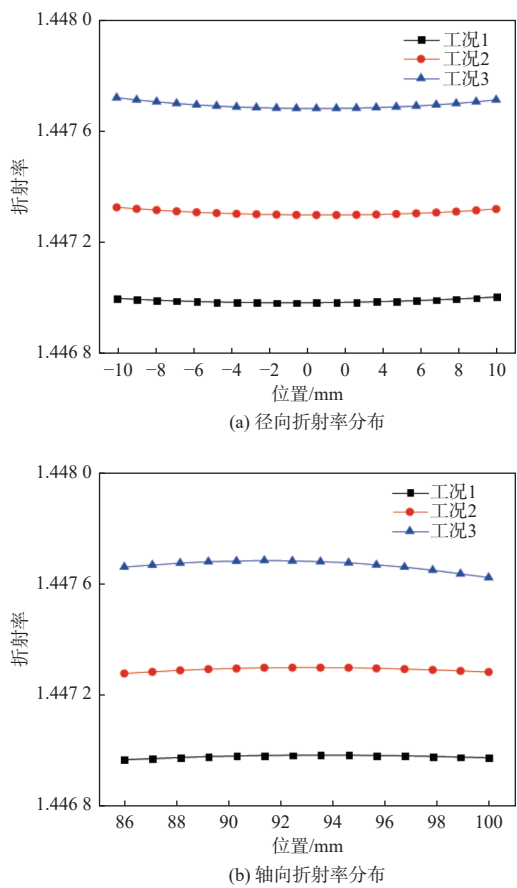


图6 吹扫后不同工况下光学窗口径向折射率分布和轴向折射率分布

Fig. 6 Radial refractive index distribution and axial refractive index distribution of optical window under different working conditions after purging

同样采用 Axial 拟合公式的前 4 项拟合光学窗口梯度折射率,通过对图 6(b)中吹扫后的轴向折射率分布进行三次多项式拟合,求解各项折射率系数,结果如表 3 所示。

表 3 吹扫后光学窗口梯度折射率拟合
Table 3 Gradient refractive index fitting of lower optical window after purging

工况	拟合公式
工况1	$y = 5 \times 10^{-9}n^3 - 4 \times 10^{-7}n^2 + 5 \times 10^{-6}n + 1.447$
工况2	$y = 1 \times 10^{-8}n^3 - 7 \times 10^{-7}n^2 + 7 \times 10^{-6}n + 1.4473$
工况3	$y = -5 \times 10^{-9}n^3 - 9 \times 10^{-7}n^2 + 9 \times 10^{-6}n + 1.4477$

经过光线追迹,吹扫后不同工况下接收面形成的辐照分布如图 7 所示。在工况 1~工况 3 下,接收面的通光量分别为 3.8421 W、3.8385 W 和 3.7966 W。与图 4 相比,分别提高了 0.29%、0.75% 和 1.4%,同时辐照分布均匀,激光束质量得到提高。因此,

采用氮气吹扫可以有效改善光学窗口折射率变化幅度及形变程度。若需要改善压力载荷带来的形变影响,则可以从增加光学窗口厚度、减小窗口直径、更换其他材料等方面改善。

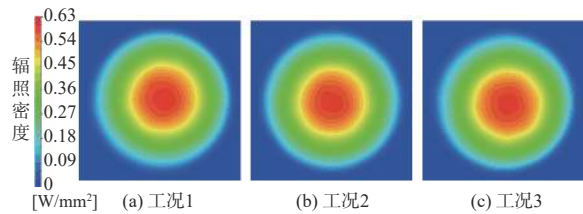


图 7 吹扫后不同工况下接收面所形成的辐照分布
Fig. 7 Radiation distribution formed on the receiving surface under different working conditions after purging

2.3 高温光窗对无吸收基线信号的影响

搭建了高温光学窗口激光透射测试平台,如图 8 所示。开展高温光学窗口对检测信号影响研究。实验过程中调节激光器输出波段至气体无吸收区域,以观测气体吸收信号的背景基线变化情况,通过调节电加热带工作功率改变熔融石英窗口整体温度,采集不同温度下的探测信号数据。

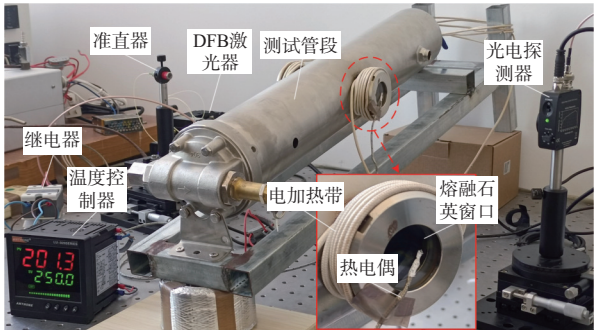


图 8 高温光学窗口激光透射测试平台
Fig. 8 Laser transmission test platform of high-temperature optical window

如图 9 所示,分别采集了室温、140 ℃、180 ℃ 和 220 ℃ 下无气体吸收时的探测信号。选取在采样点 1~300 和 3244~3543 区间无吸收部分数据,对不同温度下的探测信号进行基线拟合,得到无气体吸收时探测信号随采样点的变化关系。由图 9 可知,随着窗口温度升高,探测信号逐渐出现条纹干涉现象且愈发严重,基线拟合残差的标准差亦逐渐增大,其主要原因是在室温下通过光束倾斜透过窗口来抑制条纹干涉,但窗口温度升高引起窗口折射率变化导致原有光路遭到破坏,因此条

纹干涉现象逐渐加重。

结合 2.2 小节内容可知,热压载荷下光学窗口折射率变化及变形会导致透射光强损耗和探测信号条纹干涉,从而影响气体激光检测精度。因此,在高温高压多组分气体激光原位检测过程中,光

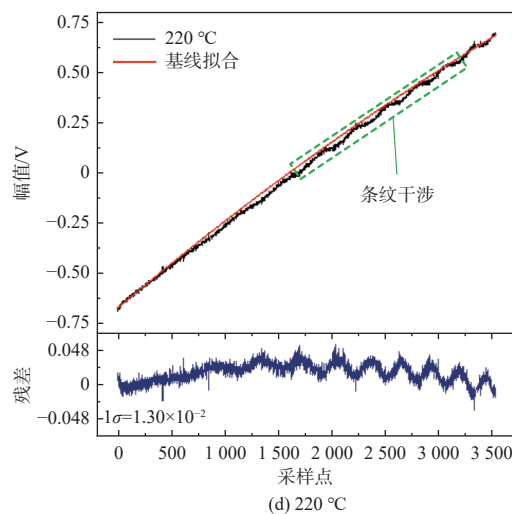
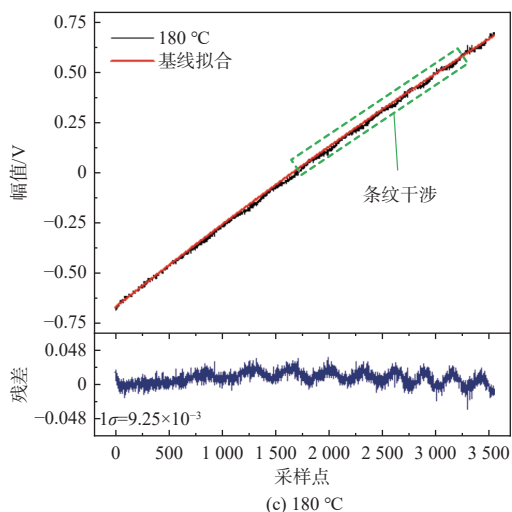
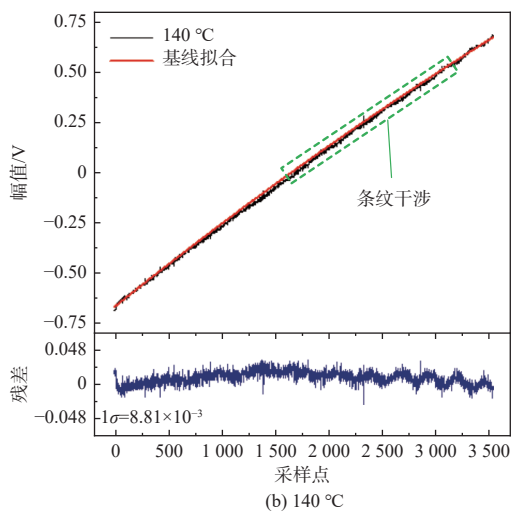
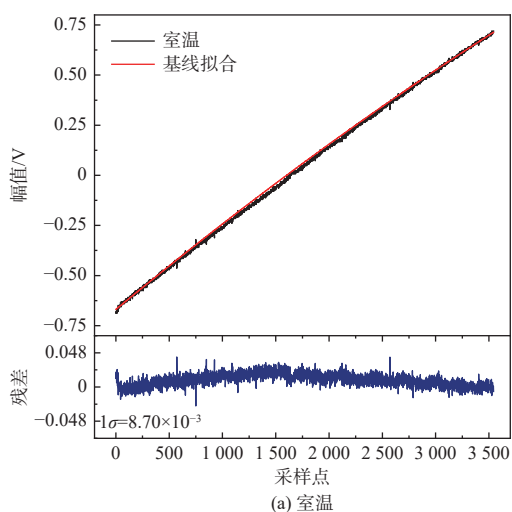


图 9 不同温度下探测信号基线拟合

Fig. 9 Baseline fitting of detected signals at different temperatures

学窗口物性变化对气体检测精度的影响不容忽视。

3 结论

针对高温高压工作环境下多组分气体原位激光检测系统的光学窗口,采用有限元方法结合光线追迹法研究了氮气吹扫前后光学窗口折射率变化及形变对光束传输的影响规律,并实验研究了高温光学窗口对无气体吸收时探测信号的影响。在高温高压环境下,光学窗口折射率变化及形变会导致透射光强损耗和探测信号条纹干涉,氮气吹扫可以降低光学窗口折射率变化幅度及形变程度,从而增加到达接收面的通光量,优化辐照分布,提高激光传输质量。

参考文献:

- [1] 李博, 杨军, 汤霞清, 等. 激光干涉测量中光学窗口受动态压力的影响分析[J]. 振动与冲击, 2020, 39(9): 126-131.
LI Bo, YANG Jun, TANG Xiaqing, et al. Influence of dynamic pressure on the optical window in laser interferometry[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(9): 126-131.
- [2] 徐钰蕾, 王乃祥, 许永森. 高速航空遥感器的双层光学窗口设计研究[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 378-386.
XU Yulei, WANG Naixiang, XU Yongsen. Design analysis of double optical window of high speed aerial remote sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 378-

- 386.
- [3] 范达, 明星, 刘昕悦, 等. 高空高速环境热光学分析及光学窗口设计[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(8): 202-208.
FAN Da, MING Xing, LIU Xinyue, et al. Thermal optical analysis and design of optical window in high-altitude and high-speed environment[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(8): 202-208.
- [4] 张燕, 苏瑛, 许小雷, 等. 拼接式光学窗口装配关键技术研究[J]. 应用光学, 2018, 39(6): 896-901.
ZHANG Yan, SU Ying, XU Xiaolei, et al. Research on assembly key technologies for stitched optical window[J]. Journal of Applied Optics, 2018, 39(6): 896-901.
- [5] 张丽琴, 费锦东. 高速飞行器成像探测气动光学效应研究[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(6): 228-232.
ZHANG Liqin, FEI Jindong. Study on aero-optical effect of the imaging detection system of high speed flight vehicle[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(6): 228-232.
- [6] 方煜, 相里斌, 吕群波, 等. 光学窗口厚度设计及形变对相机性能影响[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 220-225.
FANG Yu, XIANGLI Bin, LYU Qunbo, et al. Design of optical window thickness and influence of its deformation on multi-spectral camera's optical performance[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 220-225.
- [7] ROGOZHIN M V, ROGALIN V E, KRYMSKII M I. Thermo-optical processes in the window of a high-power gas laser[J]. Optics and Spectroscopy, 2017, 122(5): 843-849.
- [8] ZHANG Lei, LIU Ming, LI Danni, et al. Thermal optics property study and athermal design on optical window of IR aiming device reliability testing system[J]. Optik, 2017, 136: 586-594.
- [9] 姬文晨, 张宇, 黄攀, 等. 温度梯度对红外光学系统成像质量的影响[J]. 激光与红外, 2015, 45(6): 640-645.
JI Wenchen, ZHANG Yu, HUANG Pan, et al. Effect of temperature gradient on imaging quality of infrared optical system[J]. Laser & Infrared, 2015, 45(6): 640-645.
- [10] 吴天祺, 徐熙平, 潘越, 等. 红外长波投影镜头的光机结构设计及热光分析[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2018, 41(4): 64-67.
WU Tianqi, XU Xiping, PAN Yue, et al. Opto-mechanical structure design and thermal optical analysis on LWIR projection lenses[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2018, 41(4): 64-67.
- [11] 吕妍, 王迪, 王志国, 等. 多元热流体激光检测及杂光抑制光路[J]. 中国光学, 2019, 12(2): 310-320.
LYU Yan, WANG Di, WANG Zhiguo, et al. Optical path of laser detection and stray light suppression for multiple thermal fluids[J]. Chinese Optics, 2019, 12(2): 310-320.
- [12] 张兴德, 刘琳, 李荣刚. 机载光电设备红外窗口技术[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(4): 601-606.
ZHANG Xingde, LIU Lin, LI Ronggang. Infrared optical window for airborne photoelectric equipments[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(4): 601-606.
- [13] 黎明, 吴清文, 余飞. 基于热光学分析的光学窗口玻璃厚度的优化[J]. 光学学报, 2010, 30(1): 210-213.
LI Ming, WU Qingwen, YU Fei. Optimization of optical window glass thickness based on the thermal optical analysis[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(1): 210-213.
- [14] 韩炜, 赵跃进, 胡新奇, 等. 超高声速飞行器光学窗口气动光学效应分析[J]. 光学技术, 2010, 36(4): 622-626.
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.
- [15] PAN Hongyu, SUN Chuang, CHEN Xue, et al. Simulation of stray radiation from optical window with temperature-dependent spectral properties[J]. Applied Optics, 2021, 60(22): 6695.
- [16] 刘囿辰, 马国鹭, 赵涌, 等. 组合式力热动态载荷光学窗口的光学特性研究[J]. 应用光学, 2021, 42(6): 1122-1126.
LIU Youchen, MA Guolu, ZHAO Yong, et al. Optical properties of combined dynamic thermal dynamic loading optical window[J]. Journal of Applied Optics, 2021, 42(6): 1122-1126.