中国光学 Chinese Optics 核心期刊

分孔径紫外多波段成像光学系统设计

刘尊辈 蔡毅 刘福平 马俊卉 张猛蛟 王岭雪

Aperture-divided ultraviolet multiband imaging optical system

LIU Zun-bei, CAI Yi, LIU Fu-ping, MA Jun-hui, ZHANG Meng-jiao, WANG Ling-xue

引用本文:
刘尊辈, 蔡毅, 刘福平, 马俊卉, 张猛蛟, 王岭雪. 分孔径紫外多波段成像光学系统设计[J]. 中国光学, 2021, 14(6): 1476-1485. doi: 10.37188/CO.2021-0052
LIU Zun-bei, CAI Yi, LIU Fu-ping, MA Jun-hui, ZHANG Meng-jiao, WANG Ling-xue. Aperture-divided ultraviolet multiband imaging optical system[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(6): 1476-1485. doi: 10.37188/CO.2021-0052

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/CO.2021-0052

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

大相对孔径紫外成像仪光学系统设计
Design of large aperture ultraviolet optical system for ultraviolet camera
中国光学. 2018, 11(2): 212 https://doi.org/10.3788/CO.20181102.0212

分孔径红外偏振成像仪光学系统设计
Design of decentered aperture-divided optical system of infrared polarization imager
中国光学. 2018, 11(1): 92 https://doi.org/10.3788/CO.20181101.0092

大口径光学合成孔径成像技术发展现状
Review on optical synthetic aperture imaging technique
中国光学. 2017, 10(1): 25 https://doi.org/10.3788/CO.20171001.0025

多角度耦合分幅相机光学系统设计
Optical system design of multi-angle coupled framing camera
中国光学. 2018, 11(4): 615 https://doi.org/10.3788/CO.20181104.0615

紫外增强硅基成像探测器进展
Silicon-based ultraviolet photodetection: progress and prospects
中国光学. 2019, 12(1): 19 https://doi.org/10.3788/CO.20191201.0019

紫外双光栅光谱仪结构设计与波长精度分析
Structure design and wavelength accuracy analysis of ultraviolet double grating spectrometer
中国光学. 2018, 11(2): 219 https://doi.org/10.3788/CO.20181102.0219

文章编号 2095-1531(2021)06-1476-10

分孔径紫外多波段成像光学系统设计

刘尊辈[1], 蔡 毅[1,2], 刘福平[3], 马俊卉[1], 张猛蛟[4], 王岭雪[1*]
(1. 北京理工大学 光电学院 光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081;
2. 中国兵器科学研究院, 北京 100089;
3. 云南北方驰宏光电有限公司, 云南 昆明 650214;
4. 常熟理工学院 电子与信息工程学院, 江苏 常熟 215558)

摘要: 为获得火焰燃烧过程中的黑体辐射与特征自由基发出的紫外辐射信息, 实现对火焰温度与燃料成分的定量分析, 本文设计了分孔径紫外多波段成像系统。该系统由前置分孔径光路与后置合像光路两部分组成, 选择熔融石英和氟化钙为透镜材料。通过在各个分孔径光路内放置滤光片的方式, 将目标在 240~280 nm、308 nm、300~360 nm、390 nm 4 个不同波段的紫外辐射同时成像到紫外探测器的 4 个区域上。该系统的 *F* 数为 2.85, 视场角为 10°, 总长为 277.2 mm。分孔径光路的入瞳直径为 10 mm, 单通道焦距为 43.88 mm, 调制传递函数(MTF)接近衍射极限。合像光路边缘物面的 MTF 值在 45 lp/mm 处达到 0.45。将两者组合优化后, 总系统在 45 lp/mm 处各通道的 MTF 值均在 0.5 以上。对系统的各项公差进行了蒙特卡罗分析, 结果表明有 20% 以上的良品率, 该系统适合于科研加工装配, 具有实用价值。

关 键 词: 紫外光学设计; 紫外多波段成像; 分孔径成像; 燃烧火焰; 紫外摄像机
中图分类号: TN23 **文献标志码:** A **doi:** 10.37188/CO.2021-0052

Aperture-divided ultraviolet multiband imaging optical system

LIU Zun-bei[1], CAI Yi[1,2], LIU Fu-ping[3], MA Jun-hui[1], ZHANG Meng-jiao[4], WANG Ling-xue[1*]
(1. *School of Optics and Photonics*, *Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System*, *Ministry of Education of China*, *Beijing* 100081, *China*;
2. *Chinese Academy of Ordnance Science*, *Beijing* 100089, *China*;
3. *Yunnan KIRO-CH Photonics Co.*, *Ltd.*, *Kunming* 650214, *China*;
4. *School of Electronic and Information Engineering*, *Changshu Institute of Technology*, *Changshu* 215558, *China*)
* *Corresponding author*, *E-mail*: *neobull@bit.edu.cn*

Abstract: Ultraviolet radiation of characteristic free radicals and blackbody radiation in combustion flames is essential to the quantitative analysis of flame temperature and fuel composition. An aperture-divided ultraviolet multiband imaging optical system is designed, which consists of an aperture-divided system and an image-combined system. The lens materials are fused silica and calcium fluoride. By placing multiband ultraviolet filters in each divided channel, the combustion flame can be imaged on the detector's four regions with

收稿日期: 2021-03-10; **修订日期:** 2021-04-07
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 61471044)
Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61471044)

four ultraviolet bands, including 240~280 nm, 308 nm, 300~360 nm, and 390 nm. The parameters of the system are: a 2.85 *F*-number, a 10° field-of-view, and a 277.2 mm total length. The entrance pupil diameter of the aperture-divided system is 10 mm, and the single-channel focal length is 43.88 mm. The Modulation Transfer Function (MTF) is close to the diffraction limit. The MTF value of the object surface at the edge of the image-combined system reaches 0.45 at 45 lp/mm. After optimizing the combination of the two parts, the MTF value of the total system surpassed 0.5 at 45 lp/mm in Nyquist frequency. Monte Carlo analysis on the tolerances gives a yield rate of more than 20%. The results show that this system is suitable for research and has practical value.

Key words: ultraviolet optical design; ultraviolet multiband imaging; aperture-divided imaging; combustion flame; ultraviolet camera

1　引　言

火焰燃烧时发出的辐射主要包括黑体辐射和自由基辐射两大类[1]。黑体辐射覆盖紫外到红外波段, 常用于非接触式辐射测温[2], 而自由基辐射是火焰中自由基非稳态电子跃迁后发出的特定波长的辐射, 带宽窄, 通常位于紫外和可见光区域。常见的自由基有 OH^*基、CH^*基、CN^*基、C_2^*基等[3]。同时获取多个自由基的辐射强度可以推算自由基所占的比例, 判断燃烧反应的阶段, 进而分析燃料的组分、控制燃烧的进程, 这是目前发动机燃烧诊断的研究热点之一[4]。本文研究的分孔径紫外多波段成像光学系统, 只使用一个探测器就能同时获取 308 nm 的 OH^*和 390 nm 的 CN^*自由基的辐射强度及其在火焰中的分布情况, 为计算燃空比和燃烧完全度等反映燃烧质量的重要参数提供参考, 此外, 通过获取 240~280 nm“日盲”紫外图像判断火焰是否存在, 获取 300~360 nm“可见盲”紫外图像与自由基辐射图像并进行对比, 可以更直观地了解自由基辐射在火焰中的空间分布情况, 为紫外波段的火焰光谱分析和燃烧诊断提供光学探测手段。

分孔径成像是多波段成像的一种技术路线, 其特点是在一个探测器上同时获得多波段的图像, 相比多探测器成像[5] 和分时滤光成像[6], 具有体积小、成本低、实时性高等优势[7]。目前, 可见光和红外波段的分孔径成像光学系统较为多见[8-13], Guillem Carle 等通过倾斜镜片的方式实现 9 孔径长波红外成像, 各镜片与主光轴夹角各不相同[14]。李芸等通过会聚式单次成像获得了 9 孔径光谱图像, 用边缘孔径更大的 9 孔径光阑提高边缘像面照度, 系统结构紧凑[15]。胡凯丰以单次成像方式设计了 9 路中波红外分孔径光路, 实现了 100% 冷阑效率, 结合超分辨率重构算法, 使系统相较其他分孔径光路具有更大的视场角和分辨率[16]。

常见的紫外透镜材料只有熔融石英和氟化钙两种, 透镜材料的成本也相对较高, 设计时应尽量使用相同形状的透镜, 减少加工成本; 常用的光学胶对紫外辐射的吸收高, 紫外波段透射率低, 这要求设计时减少使用有利于像差校正的胶合透镜形式。本文开展分孔径紫外多波段光学系统的设计, 各分孔径光路使用相同形状的透镜解决加工成本问题、系统整体设计为折射式结构以改善分孔径光路视场角较小的问题, 并以非球面透镜、透镜紧贴等方式校正系统像差, 只使用熔融石英和氟化钙两种材料的单透镜, 使得整个系统的 MTF 在奈奎斯特频率 45 lp/mm 处达到了 0.5, 整体像差较小。

2　成像原理

来自目标的辐射经过分孔径光路及其内置的紫外滤光片后, 分成 240~280 nm、308 nm、300~360 nm 和 390 nm 波段的 4 个光路, 再通过合像光路, 将 4 个波段的图像成像于紫外探测器光敏面上。分孔径紫外多波段成像原理示意图如图 1 所示。

硅基探测器的紫外响应近年来取得了长足进步[17-18]。本文使用的探测器为硅基背照式紫外增强 CMOS, 像元规模为 1 200×1 200, 像素大小为 11 μm, 响应波段为 200~1 100 nm。根据像元的尺寸, 计算得到奈奎斯特频率为 45 lp/mm。每一路

分孔径光路图像的成像像元规模为 600×600。采用的 4 片紫外滤光片均为爱特蒙特光学的窄带滤光片(产品编号分别为: 240~280 nm: #67−742; 308 nm: #34−972; 300~360 nm: #12−089; 390 nm: #67−763),截止波长为200~1 200 nm,外径为12.5 mm,有效孔径为 8.8 mm。

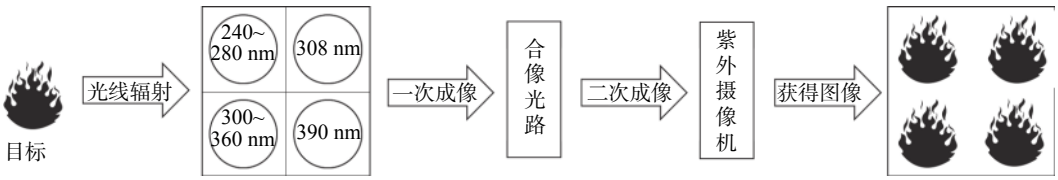

图 1 分孔径紫外多波段成像原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the imaging system based on aperture-divided ultravolet multiband

3 光学系统设计

3.1 系统总体设计

分孔径成像系统通常由望远系统、分孔径系统、合像系统 3 部分组成,合像系统可以提高探测器的有效像素面积,望远系统可以增加探测距离。由于本文面向的是火焰燃烧自由基的光谱分析,为提高探测自由基的准确性、减少背景干扰,作用距离仅为数米,因而本文系统去除望远系统,采取分孔径系统加合像系统的形式。

实际设计时,若将分孔径系统及合像系统同时优化,参数变量多,设计复杂。同时,优化后得到的分孔径系统各光路之间的透镜参数一般都是不同的,这会提高生产装配成本。因此,本文采取先单独设计分孔径系统与合像系统,再将两者整合优化的设计方式。分孔径系统采用常规镜头结构,合像系统采用类显微结构,初始结构容易获取。对分孔径系统,先设计一条透过波段为 240~390 nm 的子光路,再保持透镜形状不变,通过改变透镜间隔对各子光路的中心波长再度进行优化。优化后各分孔径子光路对应的透镜形状相同,降低了加工成本。对合像系统,根据物面的大小和探测器尺寸选择合适的放大率实现完全成像。

3.2 分孔径系统设计

参考常规镜头的尺寸并考虑到后续合像光路的设计,将一次像面的尺寸定为直径为 30 mm 的圆形区域。考虑到加工时需要预留镜筒边缘及镜片固定边框厚度,每一通道的像高约为 4 mm。结构参数如图 2 所示。透镜和滤光片的镜筒采用不同的镜框内径,但两者的中心须保证位于同一光轴。

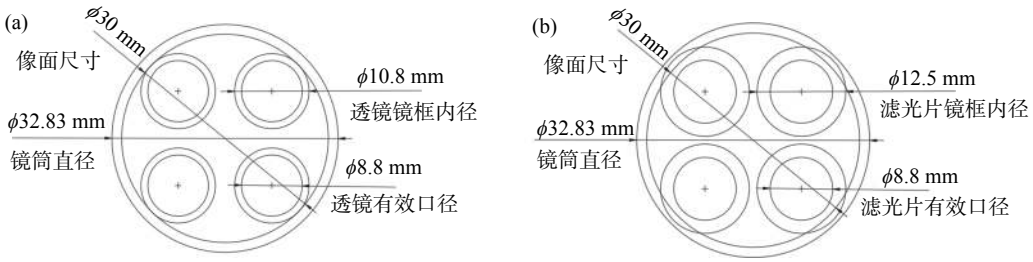

图 2 (a) 透镜及 (b) 滤光片结构参数

Fig. 2 Size parameters of (a) lens and (b) filters

由尺寸图可设定镜头入瞳直径为 10 mm,为了实现数米内的火焰光谱分析,初步设定镜头是有效焦距为 45 mm 的标准镜头,则系统的 F 数为 4.5,计算可得视场角 FOV 为 10°。

在专利镜头库中寻找与设定参数相近的初始结构,在 Zemax 中控制入瞳直径,并用操作数控制光路的有效焦距和像高,得到优化后的结构图如图 3 所示。滤光片置于透镜之后、像面之前。

4 路分孔径光路的 MTF 效果如图 4(彩图见期刊电子版)所示。308 nm 和 390 nm 波段的 MTF 值接近衍射极限,各通道在奈奎斯特频率 45 lp/mm 处的 MTF 值均在 0.85 以上,成像质量都较高。

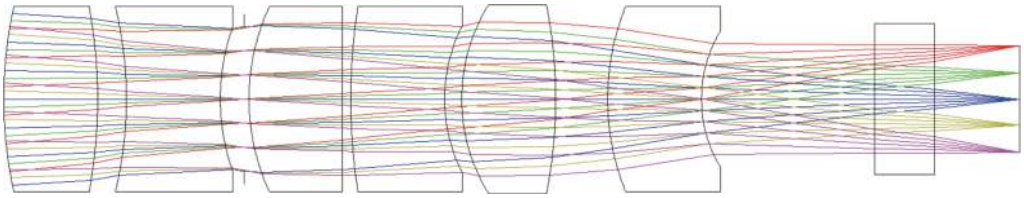

图 3　分孔径光路结构

Fig. 3　Aperture-divided optical path structure

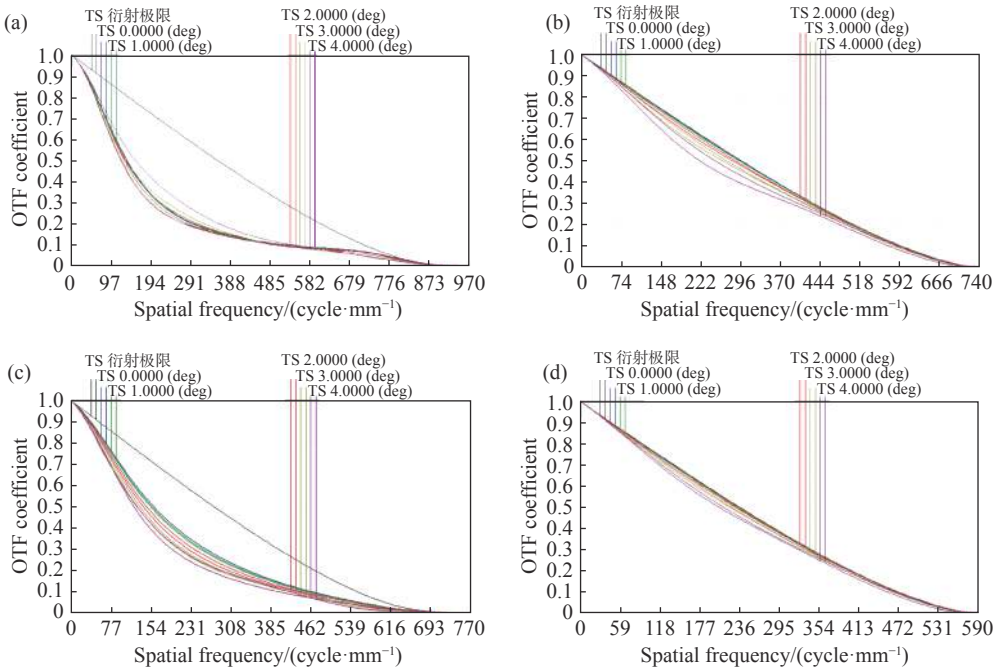

图 4　各分孔径光路 MTF 图。(a) 240~280 nm; (b) 308 nm; (c) 300~360 nm; (d) 390 nm

Fig. 4　MTF diagrams of each aperture-divided optical path. (a) 240~280 nm; (b) 308 nm; (c) 300~360 nm; (d) 390 nm

分孔径光路像差如图 5(彩图见期刊电子版)所示(以 300~360 nm 通道为例), 场曲小于 0.12 mm, 最大畸变约为 1.6%, 各项像差都控制得较好, 整体像质较高。

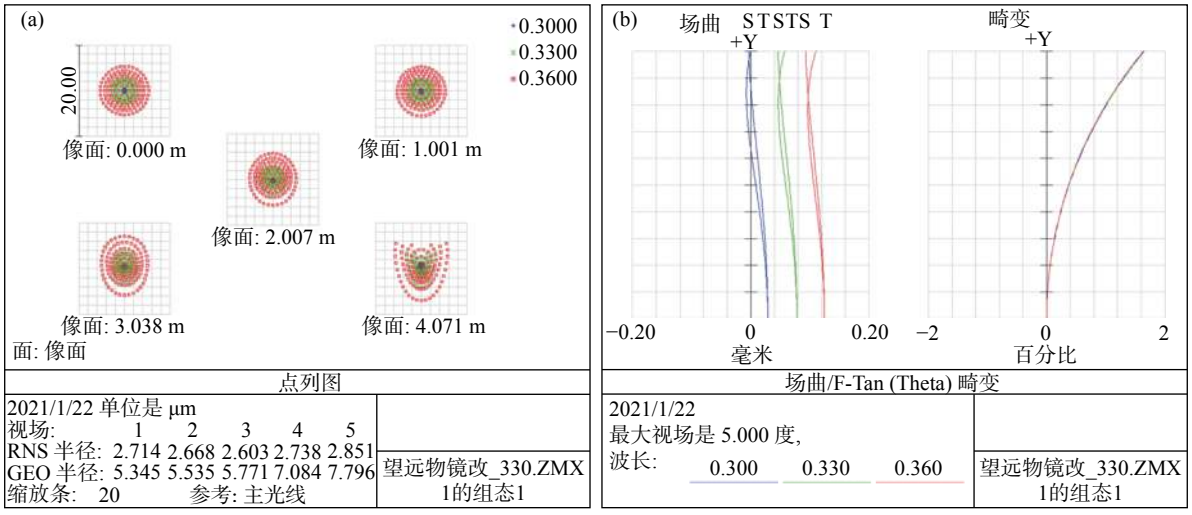

图 5　分孔径光路像差 (300~360 nm)。(a) 弥散斑; (b) 场曲与畸变

Fig. 5　Optical aberration of aperture-divided optical path (300~360 nm). (a) Diffuse spots; (b) field curvature and distortion

3.3 合像系统设计

合像系统是将分孔径系统获得的一次图像成像到探测器上，需要对有限距离的目标成像，采取的结构为类显微镜结构。对显微镜一般采用数值孔径 (Numerical Aperture, NA) 来代替 F 数，NA 越大表示系统接受光的角度越大，分辨率越高。本文中合像光路的数值孔径初步设定为 0.1，合像光路的物面为直径是 30 mm 的圆面，像面为探测器，尺寸为 13.2 mm×13.2 mm 的正方形区域，像高约为 9.35 mm，因此理论上合像系统的理想放大率约为 0.623。探测器的接口为 C 口，法兰焦距为 17.5 mm，设计时要留出足够的像距。另外由于目前的光学胶对短波紫外的透过能力较弱，在 300 nm 处的透过率往往低于 50%，因而设计时采用了紧贴式装配取代胶合透镜。

以专利库中的显微物镜为基础结构，优化后的光路如图 6 所示。在材料及光学胶的限制下，为了更好地校正像差，系统的面 2 与面 24 为偶次非球面，同时采用透镜紧贴的装配方式代替胶合透镜。

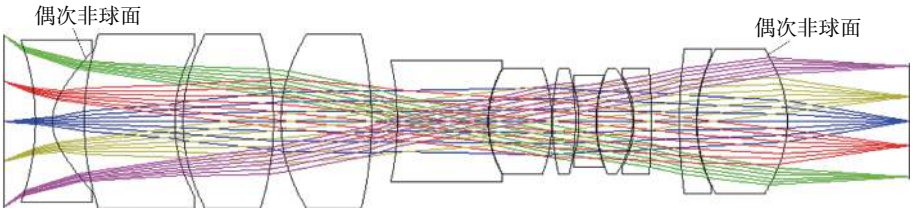

图 6 合像光路图

Fig. 6 Image-combined optical path

优化后合像系统的像高为 9.49 mm、系统放大率为 0.633，略大于理论值，但在可接受范围内。合像系统的 MTF 和像差如图 7(彩图见期刊电子版)所示。在奈奎斯特频率 45 lp/mm 处，系统的 MTF 数值在 0.45 以上，20 lp/mm 处 MTF 值在 0.65 以上，最大弥散斑半径约为半个像素尺寸，符合成像要求。

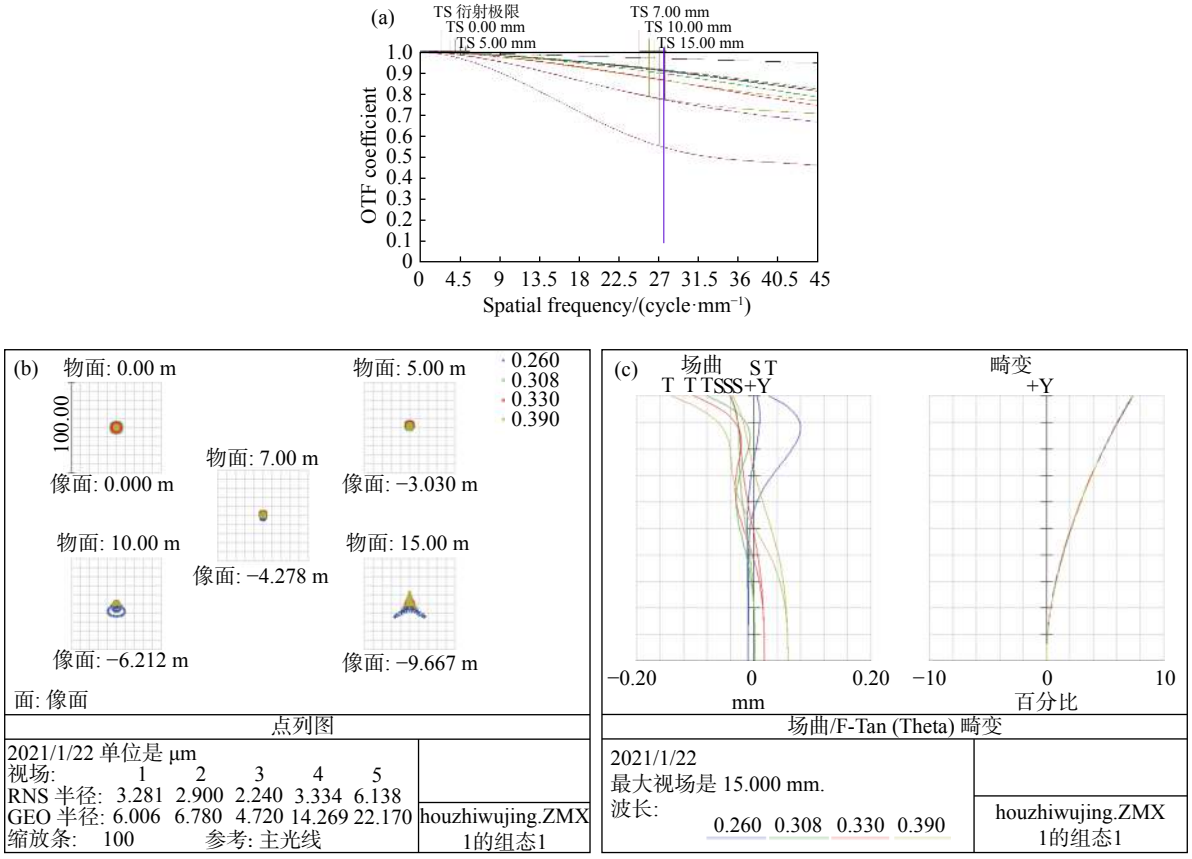

图 7 合像光路成像质量。(a)MTF 曲线；(b) 弥散斑；(c) 场曲畸变

Fig. 7 Aberration curves of image-combined optical path. (a) MTF curve; (b) diffuse spots; (c) field curvature and distortion

3.4　系统总体布局

将分孔径系统与合像系统组合在一起就构成了分孔径紫外多波段成像系统。分孔径系统与合像系统组合的必要条件是两个系统的光瞳匹配。单独设计的图 3 分孔径光路和图 6 合像光路存在光瞳不匹配的问题, 因此需要将二者进行整合优化, 优化时以远心光路结构为目标。为了控制一次像面大小, 保持分孔径系统参数不变, 只对合像光路的参数进行了调整。优化后系统整体布局如图 8 所示。

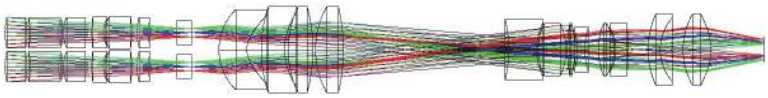

图 8　组合系统整体布局

Fig. 8　Overall layout of assembly system

在 Zemax 中, 读取像面数据得到单通道的像高为 2.65 mm, 各像面中心与探测器中心的距离约为 3.88 mm。在成像过程中, 一次像面和探测器表面的成像区域尺寸如图 9 所示。此时合像系统的放大率约为 0.33。

各通道的 MTF 值如图 10(彩图见期刊电子版)所示, 308 nm 通道的MTF 值接近衍射极限, 300~360 nm 和 390 nm 通道的 MTF 值在 45 lp/mm 处达到了 0.6, 240~280 nm 通道的 MTF 值大于 0.5, 整体像质较好。

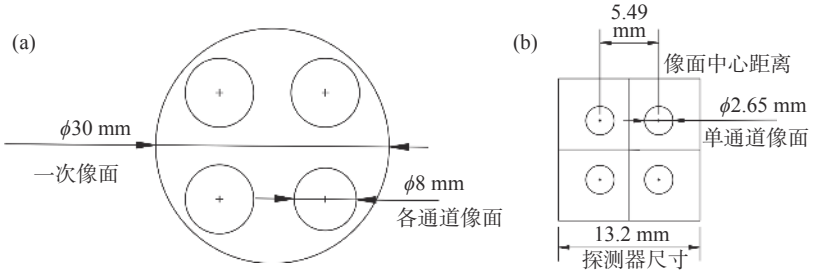

图 9　(a) 一次像面成像区域尺寸及 (b) 探测器成像区域尺寸

Fig. 9　(a) Primary imaging area size and (b) detector imaging area size

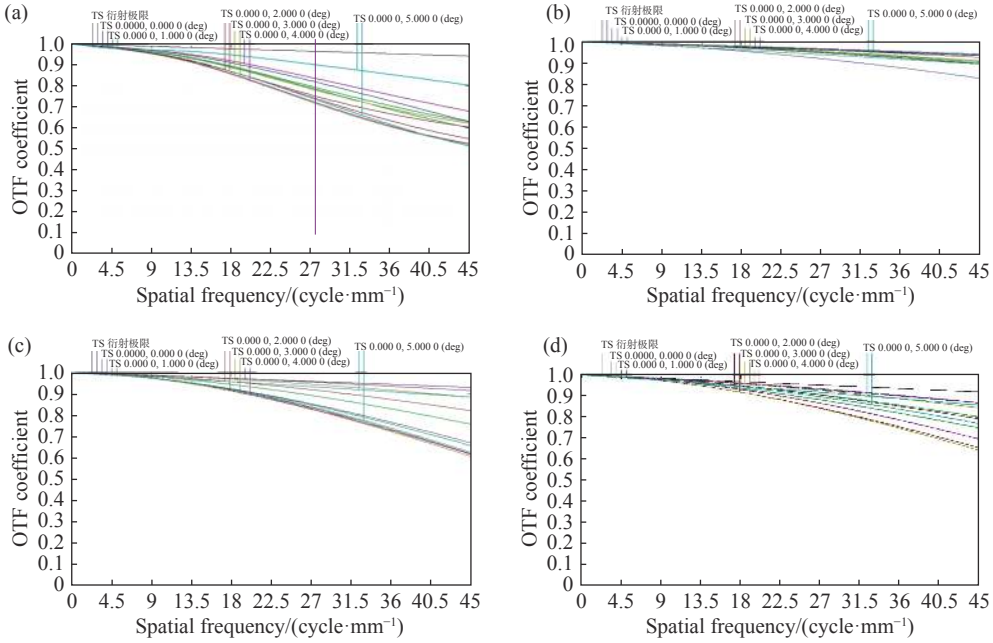

图 10　图 8 所示总系统的各通道 MTF 图。(a) 240~280 nm; (b) 308 nm; (c) 300~360 nm; (d) 390 nm

Fig. 10　MTF diagram of each channel of the system in Fig.8. (a) 240~280 nm; (b) 308 nm; (c) 300~360 nm; (d) 390 nm

图 8 所示总系统的像差情况如图 11(彩图见期刊电子版)所示，弥散斑半径为 8.449 μm，小于像素尺寸，符合成像要求。系统场曲较小但有接近 10% 的畸变，可以通过后续的算法处理进行校正。

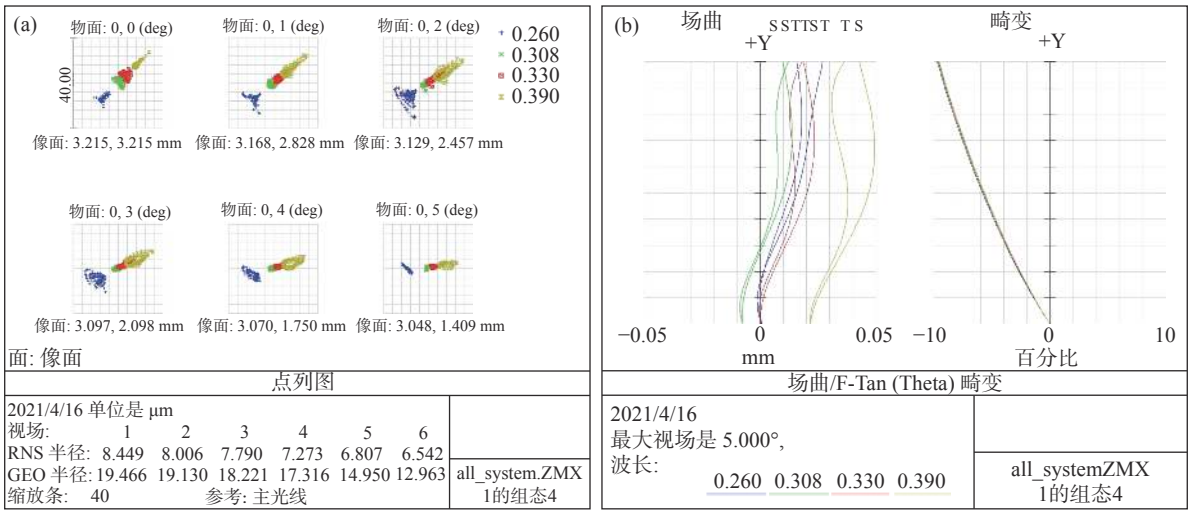

图 11 图 8 所示总系统的像差图。(a) 弥散斑 (b) 场曲和畸变

Fig. 11 Aberration of the system in Fig.8. (a) Diffuse spots; (b) field curvature and distortion

4 系统公差分析

根据实际光学元件的加工能力与器件的装配精度，设定的光学系统公差如表 1 所示。

对优化后的整个系统采用蒙特卡洛模拟法对公差数据进行 100 轮敏感度分析，以 45 lp/mm 处 MTF 值为评价指标，结果如表 2 所示。由表 2 可知，在设定的公差范围内，308 nm 通道的公差分析结果最好，至少有 50% 的镜头在 45 lp/mm 处的 MTF 值达到 0.39，符合设计要求。240~280 nm 通道的公差分析结果最差，但仍有 20% 的镜头在 45 lp/mm 处的 MTF 值达到了 0.33。从整体上考虑，可认为系统有 20% 以上的良品率，在实际出片至少需要 10 组透镜的加工情况下，本系统目前适用于科学研究的少量加工、尚未达到批量生产的水平，后续研究将进一步优化系统提高加工良品率。

表 1 光学系统公差

Tab. 1 Optical system tolerance

表面公差			元件公差				折射率公差	
半径/mm	厚度/mm	S+A不规则度	*X*偏心/mm	*Y*偏心/mm	倾斜*X*轴/(°)	倾斜*Y*轴/(°)	折射率	阿贝数(%)
0.01	0.05	0.2	0.05	0.05	0.03	0.03	0.000 1	0.1

表 2 公差分析结果

Tab. 2 Results of tolerance analysis

通道/nm	MTF(45 lp/mm处)		
	均值	50%结果均值大于值	20%结果均值大于值
240~280 nm	0.608 664 74	0.218 426 92	0.331 266 76
308 nm	0.894 693 95	0.392 170 21	0.559 694 16
300~360 nm	0.723 244 70	0.279 941 23	0.419 064 91
390 nm	0.778 107 88	0.349 707 94	0.447 556 79

5 原理性实验

本文设计的分孔径紫外多波段成像光学系统仍在联络加工事宜，因此以更换滤光片分时成像的方式进行系统的原理性试验，拍摄对象为甲烷火焰。火焰测量系统由急速混合管、紫外相机、紫外镜头、光学支架等组成，如图 12 所示。急速混合管的两个管道输入甲烷，另外两个管道输入氧气，侧面的相邻管道可以输入更多的气体。使

用升降架调整相机到合适的高度拍摄混合管口的火焰, 火焰后方放置黑布以减少墙壁反射对图像的影响。

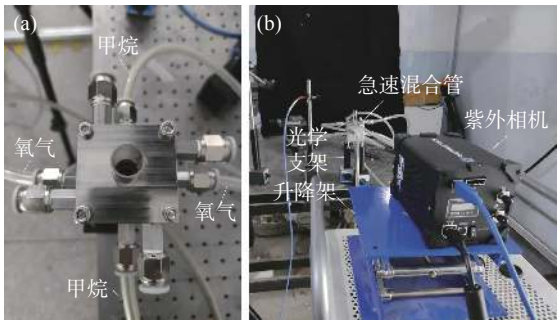

图 12　火焰测量系统。(a) 急速混合管; (b) 测量实验系统结构

Fig. 12　Flame measurement system. (a) Rapid mixing tube; (b) measurement experiment system structure

拍摄时关闭日光灯等外部光源, 构造暗室环境以减少外部杂散光的影响。拍摄的 4 波段图像如图 13(a)~(d) 所示, 可以看出:

(1)4 幅图像的内容和效果不完全相同, 带通的 240~280 nm 和 300~360 nm 图像对比度稍低于窄带的 308 nm 和 390 nm 图像, 但呈现的火焰面积更大、更全面, 而且火焰的细节表现优于 200~1 000 nm 的宽波段图像(图 13(e)), 其因宽波段的火焰信号强而导致大面积的饱和, 从而缺乏细节。

(2)窄带的 308 nm 和 390 nm 图像对比度最高, 这是因为 OH^*和 CN^*自由基辐射在窄带滤光片透射的总辐射中所占的比例高。成像效果与文献 [19] 的研究结果相符。另外, 308 nm 和 390 nm 图像的亮区域位于火焰的不同位置, 如图 13(f)(彩图见期刊电子版) 所示, 其是将 308 nm 和 390 nm 图像的亮区域分别赋予黄色和绿色后叠加到带通 300~360 nm 图像上。308 nm 的亮区域位于管道底部, 对应 OH^*自由基的辐射。OH^*自由基是甲烷气体与氧气在急速混合管中混合后燃烧的产物, 因此靠近管道底部; 390 nm 图像的亮区域位置高于 308 nm 图像, 对应 CN^*自由基, 甲烷和氧气的混合气体在空气中燃烧, 燃烧时产生的 CH^*自由基与空气中的氮气反应产生 CN^*自由基[20]。通过分析 OH^*和 CN^*自由基的空间分布, 可以计算出燃空比、燃烧完全度等重要参数, 进而诊断燃烧质量, 为控制燃烧条件以提高发动机的效率和可靠性提供依据。

(3)200~1 000 nm 宽波段火焰图像中, 可见光辐射占主要比例, 整个火焰区域都是亮区域, 紫外辐射被可见光辐射淹没。

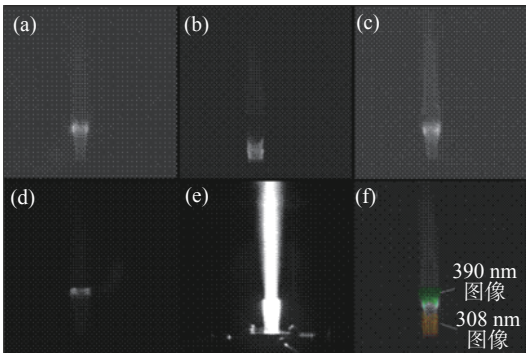

图 13　原理性实验结果。(a) 240~280 nm; (b) 308 nm; (c) 300~360 nm; (d) 390 nm; (e) 200~1 000 nm; (f) 308 nm 和 390 nm 图像的亮区域分别赋予黄色和绿色后叠加到带通 300~360 nm 图像的效果图

Fig. 13　Principle experiment results. (a) 240~280 nm; (b) 308 nm; (c) 300~360 nm; (d) 390 nm; (e) 200~1 000 nm; (f) the results of fusing the 300~360 nm image with bright regions from the 308 nm and 390 nm images, which are rendered as yellow and green, respectively

6　结　论

本文面向火焰燃烧自由基的光谱分析, 设计了分孔径紫外多波段成像光学系统, 实现了单个紫外探测器同时获取 240~280 nm, 308 nm, 300~360 nm 和 390 nm 4 个波段的紫外图像。通过先分别设计分孔径系统和合像系统, 再将两者整合优化的方式降低了系统的设计难度。光学系统的视场角为 10°, 各通道在 45 lp/mm 处的 MTF 值都达到了 0.5 以上, 整体像质较高。系统总长为 277.2 mm, 每一通道由 18 片透镜组成, 分孔径系统的透镜形状相同, 只使用紫外熔融石英和氟化钙两种材料, 降低了生产成本。公差分析结果表明系统的良品率在 20% 以上, 在科研领域具有实用价值。系统目前仍存在畸变较大和良品率较低的问题, 接下来将开展相关工作通过光学设计降低畸变, 提高良品率。

致谢

感谢国家自然科学基金(No. 61471044)对本文的资助。感谢北京理工大学宇航学院石保禄副教授和王宽宇博士等人为拍摄甲烷火焰实验提供实验条件及操作指导。

参考文献:

[1] 宋旭东, 郭庆华, 龚岩, 等. 气流床撞击流水煤浆气化火焰光谱辐射特性实验研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(2): 465-471.
SONG X D, GUO Q H, GONG Y, *et al*.. Chemiluminescence characteristics of coal-water slurry impinging flames in bench-scale entrained flow gasifier[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2020, 40(2): 465-471. (in Chinese)

[2] 张磊, 陈绍武, 赵海川, 等. 基于光电探测的多光谱测温装置[J]. 中国光学, 2019, 12(2): 289-293.
ZHANG L, CHEN SH W, ZHAO H CH, *et al*.. Multi-spectral temperature measuring system based on photoelectric detection[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(2): 289-293. (in Chinese)

[3] KRABICKA J, LU G, YAN Y. Profiling and characterization of flame radicals by combining spectroscopic imaging and neural network techniques[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2011, 60(5): 1854-1860.

[4] 周莹, 白永辉, 宋旭东, 等. 自由基的化学发光特性在火焰光谱诊断的应用综述[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(11): 3358-3364.
ZHOU Y, BAI Y H, SONG X D, *et al*.. Application of chemiluminescence in spectral diagnosis: a review[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2020, 40(11): 3358-3364. (in Chinese)

[5] 韩培仙, 任戈, 刘永, 等. 可见/中波双波段共口径光学系统设计[J]. 应用光学, 2020, 41(3): 435-440.
HAN P X, REN G, LIU Y, *et al*.. Optical design of VIS/MWIR dual-band common-aperture system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(3): 435-440. (in Chinese)

[6] 韩仲志, 万剑华, 刘杰, 等. 利用油品紫外荧光特性的多光谱成像检测[J]. 发光学报, 2015, 36(11): 1335-1341.
HAN ZH ZH, WAN J H, LIU J, *et al*.. Multispectral imaging detection using the ultraviolet fluorescence characteristics of oil[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, 36(11): 1335-1341. (in Chinese)

[7] 高泽东, 高洪兴, 朱院院, 等. 快照式光谱成像技术综述[J]. 光学 精密工程, 2020, 28(6): 1323-1343.
GAO Z D, GAO H X, ZHU Y Y, *et al*.. Review of snapshot spectral imaging technologies[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(6): 1323-1343. (in Chinese)

[8] 苏永鹏, 谢洪波, 王瑶, 等. 分孔径中波红外多光谱成像光学系统的设计[J]. 应用光学, 2018, 39(6): 767-772.
SU Y P, XIE H B, WANG Y, *et al*.. Design of aperture-divided multispectral imaging system in mid-infrared band[J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(6): 767-772. (in Chinese)

[9] 王琪, 梁静秋, 梁中翥, 等. 分孔径红外偏振成像仪光学系统设计[J]. 中国光学, 2018, 11(1): 92-99.
WANG Q, LIANG J Q, LIANG ZH ZH, *et al*.. Design of decentered aperture-divided optical system of infrared polarization imager[J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(1): 92-99. (in Chinese)

[10] 万钇良. 红外分孔径偏振成像技术研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2019.
WAN Y L. Study on infrared split-aperture polarization imaging technology[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2019. (in Chinese).

[11] 陈阳, 刘钧, 岳宝毅. 基于孔径/视场分割的红外复眼接收系统设计[J]. 激光与红外, 2019, 49(4): 454-459.
CHEN Y, LIU J, YUE B Y. Design of infrared compound eye receiving system based on aperture /field segmentation[J]. *Laser & Infrared*, 2019, 49(4): 454-459. (in Chinese)

[12] 李西杰, 刘钧, 邹纯博, 等. 双波段共口径同时偏振光学系统设计[J]. 西安工业大学学报, 2020, 40(1): 25-31.
LI X J, LIU J, ZOU CH B, *et al*.. Design of dual-band optical system with shared-aperture and complete polarization[J]. *Journal of Xi'an Technological University*, 2020, 40(1): 25-31. (in Chinese)

[13] 中国科学院西安光学精密机械研究所. 会聚光分孔径多光谱成像光学系统: 中国, 110631701A[P]. 2019-12-31.
Xi'an Institute Optics & Precision Mechanics CAS. Convergent light sub-aperture multispectral imaging optical system: CN, 110631701A[P]. 2019-12-31. (in Chinese).

[14] CARLES G, BABINGTON J, WOOD A, *et al*.. Superimposed multi-resolution imaging[J]. *Optics Express*, 2017, 25(26): 33043-33055.

[15] 李芸. 紧凑型分孔径快照式光谱成像系统研究[D]. 西安: 中国科学院大学(中国科学院西安光学精密机械研究所), 2018.
LI Y. Research on the compact division-aperture snapshot spectral imaging system[D]. Xi'an: University of Chinese

Academy of Sciences (Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences), 2018. (in Chinese).

[16] 胡凯丰. 仿生多孔径系统超分辨成像研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
HU K F. Research on super-resolution imaging system with bionic muti-apertures[D]. Changchun: Jilin University, 2020. (in Chinese).

[17] 张猛蛟, 蔡毅, 江峰, 等. 紫外增强硅基成像探测器进展[J]. 中国光学, 2019, 12(1): 19-37.
ZHANG M J, CAI Y, JIANG F, *et al*.. Silicon-based ultraviolet photodetection: progress and prospects[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(1): 19-37. (in Chinese)

[18] 朱晓秀, 葛咏, 李建军, 等. 量子点增强硅基探测成像器件的研究进展[J]. 中国光学, 2020, 13(1): 62-74.
ZHU X X, GE Y, LI J J, *et al*.. Research progress of quantum dot enhanced silicon-based photodetectors[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(1): 62-74. (in Chinese)

[19] 何磊, 龚岩, 郭庆华, 等. 甲烷/氧气层流同轴射流扩散火焰OH^*自由基的数值研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(3): 685-691.
HE L, GONG Y, GUO Q H, *et al*.. Numerical study on OH^* radicals in the laminar methane/oxygen Co-flowing jet diffusion flame[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, 38(3): 685-691. (in Chinese)

[20] LAMOUREUX N, EL MERHUBI H, GASNOT L, *et al*.. Measurements and modelling of HCN and CN species profiles in laminar $CH_4/O_2/N_2$ low pressure flames using LIF/CRDS techniques[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2015, 35(1): 745-752.

作者简介:

刘尊辈(1995—), 男, 浙江温州人, 硕士, 2018 年于南京理工大学电子科学与技术专业获得学士学位, 2021 年于北京理工大学光学工程专业获得硕士学位, 主要从事紫外探测方面的研究。E-mail: llazzyb@163.com

王岭雪(1973—), 女, 云南石屏人, 工学博士, 副教授, 2003 年于北京理工大学光电工程系获得博士学位, 主要从事红外成像、图像处理和红外光谱方面的研究。E-mail: neobull@bit.edu.cn