

# 基于Python的CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>氛围下 柴油燃烧火焰特征分析

陈睿哲<sup>1</sup>, 刘永峰<sup>1</sup>, 王 龙<sup>2</sup>, 张 璐<sup>1</sup>, 何 旭<sup>3</sup>, 宋金瓿<sup>4</sup>

(1. 北京建筑大学 北京市建筑安全监测工程技术研究中心, 北京 102627;

2. 四川大学化学工程学院, 成都 610065;

3. 北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081;

4. 天津大学先进内燃动力全国重点实验室, 天津 300072)

**摘要:** 为分析柴油在CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>氛围下燃烧的火焰特征, 利用光学定容燃烧室测试并拍摄了6种不同工况下的柴油燃烧过程. 基于自编的Python代码对火焰图像进行后处理, 提取出火焰浮起长度、红绿分量比、平均亮度、相关性系数、面积变化率和重叠率等特征参数并进行分析. 结果表明: 在空气和CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>氛围下, 柴油火焰浮起长度和相关性均随燃烧进程先增大后减小再增大, 平均亮度则先增大后减小, 其在空气下和35% CO<sub>2</sub>+65% O<sub>2</sub>氛围下的峰值分别为210.75 px和138.89 px. 在火焰发展阶段, 红绿分量比保持在0.8~1.2之间, 而在火焰熄灭阶段, 随着CO<sub>2</sub>浓度减小和O<sub>2</sub>浓度增大, 红绿分量比有所减小. 与在空气下燃烧相比, 柴油在CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>氛围下的燃烧火焰形状更加细长, 湍流现象更加明显, 火焰浮起长度缩短, 平均亮度下降.

**关键词:** Python; 柴油; CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>氛围; 火焰特征; 定容燃烧室

**中图分类号:** TK16 **文献标志码:** A **DOI:** 10.19907/j.0490-6756.2024.015002

## Python-based flame characterization of diesel combustion in CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> atmosphere

CHEN Rui-Zhe<sup>1</sup>, LIU Yong-Feng<sup>1</sup>, WANG Long<sup>2</sup>, ZHANG Lu<sup>1</sup>, HE Xu<sup>3</sup>, SONG Jin-Ou<sup>4</sup>

(1. Beijing Engineering Research Center of Monitoring for Construction Safety,  
Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 102627, China;

2. School of Chemical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

3. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

4. State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** To analyze the combustion characteristics of diesel fuel in a CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> atmosphere, optical constant volume combustion chamber tests were conducted to measure and capture the combustion processes under six different operating conditions. The resultant flame images were subject to post-processing using custom Python code, enabling the extraction of parameters including flame lift-off height, red-green ratio, average luminosity, correlation coefficient, area change rate, and overlap ratio. The findings indicate that, in both air and CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> atmospheres, the flame lift-off height and correlation initially in-

**收稿日期:** 2023-05-24

**基金项目:** 国家自然科学基金(51976007); 先进内燃动力全国重点实验室开放研究项目(K2023-04)

**作者简介:** 陈睿哲(1999-), 男, 湖北红安人, 硕士研究生, 主要研究领域为内燃机燃烧.

**通讯作者:** 刘永峰. E-mail: liuyongfeng@bucea.edu.cn; 王龙. E-mail: longwangbeijing@163.com

crease, then decrease, before experiencing a subsequent increase throughout the combustion process. Conversely, the average luminosity demonstrates an initial increase followed by a decline. Specifically, in the air and 35% CO<sub>2</sub> + 65% O<sub>2</sub> atmospheres, the peak values of flame lift-off height were measured as 210.75 px and 138.89 px, respectively. During the flame development stage, the red-green ratio remains within the range of 0.8 to 1.2, while in the flame extinction stage, it decreases as the CO<sub>2</sub> concentration decreases and the O<sub>2</sub> concentration increases. Compared to combustion in air, the combustion of diesel fuel in a CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> atmosphere displays an elongated flame shape, heightened turbulence, reduced flame lift-off height, and diminished average luminosity.

**Keywords:** Python; Diesel; CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> atmosphere; Flame characteristics; Constant volume combustion chamber

## 1 引言

柴油机是一种高效的能量转换装置,在许多领域被广泛应用.但在地下、水下和矿井等封闭场所,传统柴油机会与人争夺环境中的 O<sub>2</sub>,并释放出 CO<sub>2</sub>和 NO<sub>x</sub>等污染物,危害健康<sup>[1]</sup>.为解决此问题,液氧固碳闭式循环柴油机被广泛关注.其用液氧汽化吸热将尾气中的 CO<sub>2</sub>固化成干冰,未固化的 CO<sub>2</sub>与 O<sub>2</sub>混合进入气缸,用 CO<sub>2</sub>的燃烧抑制作用减少 O<sub>2</sub>浓度较高引起的工作粗暴倾向<sup>[2]</sup>.但这种柴油机的燃烧背景特殊,O<sub>2</sub>和 CO<sub>2</sub>浓度均比空气中高得多,因此在变工况时失火问题严重.为保证其在变工况时的稳定燃烧,急需进行柴油在 CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>氛围下燃烧的相关研究.

火焰特征可以反映燃料燃烧过程中的温度和反应速率等基本特性,通过对火焰特征的分析可以深入了解燃料燃烧的机理和规律,为提高燃烧效率、减少污染物排放等提供依据<sup>[3]</sup>.人们在不同当量比、压力和温度下对 CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>氛围燃烧的火焰特征开展了大量研究.Zeng 等<sup>[4]</sup>在当量比 0.5~1.0,压力 1 atm,温度 1400~1800 K 下在平焰燃烧器上模拟了煤粉的燃烧,发现 CO<sub>2</sub>浓度增大导致火焰亮度减小,颜色趋于均匀的暗红色.谢非等<sup>[5]</sup>在当量比 1.0,压力 1 atm,温度 1173 K 下通过实验获取了煤颗粒的火焰图像,并采用 Image J 进行图像处理,发现随着 CO<sub>2</sub>浓度的增大,火焰亮度减小,且火焰面积先增大后减小.Yang 等<sup>[6]</sup>在当量比 0.6~1.5,压力 1 atm,温度 300 K 下采用自由基化学发光光谱分析了 CO<sub>2</sub>浓度对 CH<sub>4</sub>燃烧火焰的几何特征进行了研究,发现随着 CO<sub>2</sub>浓度的增大,火焰长度逐渐增大,火焰前沿变窄并且核心反应区向燃烧室出口偏移.Saber 等<sup>[7]</sup>在当量比 0.7~1.5,压力 1 atm,温度 300~700 K 下采用粒子图像测速

法测量了 CH<sub>4</sub>的燃烧速度并分析了火焰锋面,发现 CO<sub>2</sub>浓度增大使得燃烧速度降低,火焰前沿高度增加.Wang 等<sup>[8]</sup>在当量比 1.0,压力 1 atm,温度 293 K 下模拟了 CH<sub>4</sub>和 H<sub>2</sub>的燃烧,发现 CO<sub>2</sub>的稀释效应使得 CH<sub>4</sub>的马克斯长度增大,而 H<sub>2</sub>却相反.周昊等<sup>[9]</sup>在当量比 1.0,压力 1 atm,温度 273 K 下实验获取了 CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>OH 的火焰图像,并采用 Matlab 提取出火焰特征参数,发现 CO<sub>2</sub>浓度增大,火焰的高度和面积均呈增大趋势,而平均亮度呈减小趋势.总结来看,上述对于 CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>氛围下燃烧火焰特征的研究大多集中在煤的燃烧和小分子化合物的燃烧,而柴油在 CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>氛围下燃烧的火焰特征却鲜有报道.

本文提出一种基于 Python 的火焰特征提取方法,该方法利用 Sobel 算子边缘检测算法分析火焰形状与火焰浮起长度,采用颜色空间理论计算火焰红绿分量比和平均亮度,根据火焰序列图像的像素值计算相关性系数、面积变化率和重叠率.然后,本文利用光学定容燃烧室试验平台测试并记录了 6 种不同 CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>氛围下的柴油燃烧过程.最后,通过编写的 Python 代码从火焰图像中提取出火焰特征参数并进行分析.

## 2 计算

随着数字图像处理技术的发展,火焰可视化与表征技术在燃烧过程监测中被广泛应用.利用该技术可以获取燃烧过程中的火焰特征信息,有助于对燃烧状态进行量化分析,并为今后的燃烧监测和控制研究提供可靠的理论支持.Python 作为一种简洁清晰的直译型语言,可用于图像数据的批量处理,且具有高效的处理速度和丰富的库资源.本文通过编写 Python 代码来处理火焰图像以获取火

焰特征, 主要包括火焰红绿分量比、平均亮度、相关性、面积变化率和面积重叠率。

## 2.1 红绿分量比

颜色是火焰的重要特征之一, 数字图像处理中通常采用颜色空间的方式定量表示彩色图像中像素的颜色。颜色空间主要包括 RGB、YUV 和 HIS 等空间, 其中 RGB 空间将红、绿、蓝三种单色作为基本色, 认为自然界中所有颜色都可通过这三种基本色加权得到。通过前人对多种火焰 R、G、B 三个分量的仿真实验, 发现高亮区对应到 R、G、B 三通道分量, 其在图像中的所占比例依次减小, 而且红色占比偏高, 蓝色占比极小<sup>[10]</sup>。因此本文采用红绿分量比作为火焰的特征参数之一, 其计算公式为:

$$z = \frac{s_G}{s_R} \quad (1)$$

式中,  $z$  为红绿分量比;  $s_G$ 、 $s_R$  分别为分割出来的火焰可疑区的绿色分量和红色分量的像素数目。

## 2.2 平均亮度

亮度是衡量燃烧火焰剧烈程度、燃烧效率和热输出的重要特征参数。在 YUV 颜色空间中, Y 通道代表图像的亮度信息。因此本文将图像转换为 YUV 格式, 提取出 Y 通道分量以显示图像亮度信息。为了更好地比较不同的火焰图像, 选取平均亮度作为衡量火焰整体亮度的指标, 其计算公式为:

$$\bar{Y} = \frac{\sum_m \sum_n Y_{mn}}{n} \quad (2)$$

式中,  $\bar{Y}$  为平均亮度;  $Y_{mn}$  为  $m$  行  $n$  列处的像素值;  $n$  为像素数目。

## 2.3 相关性

在火焰序列图像中, 火焰区域不仅在空间上具有连续性, 在时间上还具有相关性。火焰相关性反映了相邻两帧图像的火焰亮度的变化状况, 它可以排除颜色均匀干扰物的影响<sup>[11]</sup>。其计算公式为:

$$r = \frac{\sum_m \sum_n (A_{nm} - \bar{A})(B_{nm} - \bar{B})}{\sqrt{(\sum_m \sum_n (A_{nm} - \bar{A})^2)(\sum_m \sum_n (B_{nm} - \bar{B})^2)}} \quad (3)$$

式中,  $r$  为相邻两帧图像的相关性系数;  $\bar{A}$ 、 $\bar{B}$  分别为相邻两帧图像的平均亮度;  $A_{nm}$ 、 $B_{nm}$  分别为相邻两帧图像的  $m$  行  $n$  列处的像素值。当  $r$  达到最大时,  $A$  和  $B$  的相关性最强。

## 2.4 面积变化率与面积重叠率

随着燃料的燃烧过程, 每帧图像中的火焰面积会出现连续的震荡变化, 其变化量可用面积变化率

来描述。在对图像进行处理时, 可用分割出的可疑区的像素数目近似表示火焰面积。因此火焰面积变化率的计算公式为:

$$\psi = \frac{|A_i - A_{i-1}|}{A_i} \quad (4)$$

式中,  $\psi$  为面积变化率;  $A_i$ 、 $A_{i-1}$  分别为相邻两帧图像的火焰可疑区的像素数目。

虽然每帧图像的火焰轮廓、形状、大小不同, 但火焰主体部分保持相对稳定, 相邻两帧图像的火焰可疑区存在重叠, 重叠量大小可用火焰面积重叠率来描述。其计算公式为:

$$\eta = \frac{A'}{A_i} \quad (5)$$

式中,  $\eta$  为面积重叠率;  $A'$  为相邻两帧图像的火焰可疑区的重叠像素数目;  $A_i$  为第二帧图像的火焰可疑区的像素数目。

## 3 试验

### 3.1 试验平台

本研究建立了一个可视化定容燃烧室试验平台, 其系统如图 1 所示, 主要包括定容燃烧室、压力检测系统、温度控制系统、尾气处理系统、制冷系统、高压共轨系统和数据采集系统。

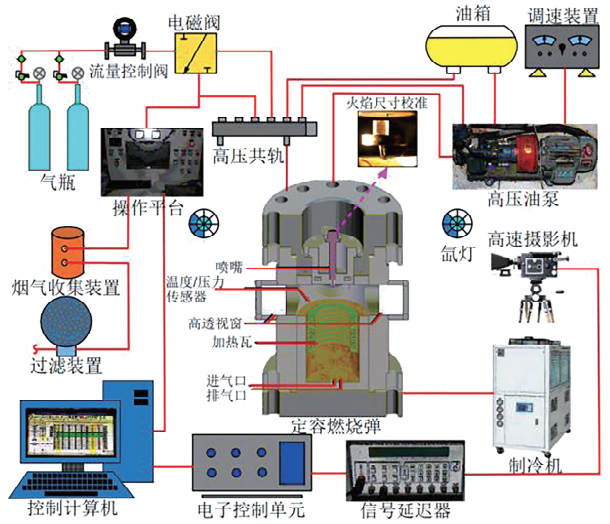


图 1 定容燃烧室试验系统

Fig. 1 Constant volume combustion chamber test system

定容燃烧室为圆柱型结构, 内部直径为 300 mm, 内部高度为 560 mm, 其可承受的最高温度为 900 K, 最大压力为 6 MPa。其顶部喷油系统的最高喷油压力为 175 MPa, 喷油器初始喷油压力为 35 MPa; 下部安装了压力传感器、温度传感器和电热瓦, 可实现对燃烧室压力、温度的调整与实时监

控;底部设有进排气口,排出的气体通入烟气收集装置与过滤装置,实现废气的回收与净化.弹体外侧装有可视化窗口与氙灯光源,辅助高速摄像机拍摄燃料的着火与燃烧过程,弹体外部还接有制冷装置对其进行冷却.数据采集系统主要包括依次相连的高速摄影机、信号延迟器、电子控制单元和控制计算机,其中高速摄影机帧数设置为 10 000 帧/s.

### 3.2 试验方法

首先将高速摄影机调整到与可视化窗口合适的高度,并设置好光圈与拍摄速率.然后启动操作平台,对进气参数与组分进行设置,再开启电磁阀通气将前次试验中残留气体排出,之后控制操作平台逐步地提高燃烧室内温度与压力直至达到试验要求.加热温度间隔为 50 K.加热开始后,打开制冷装置对外部组件进行冷却,同时将已精确配比的气体通过流量控制阀通入燃烧室,使燃烧室内背景气体达到所需工况.喷油系统设置初始加压间隔为 10 MPa,当轨压达到 100 MPa 后将加压间隔调整为 5 MPa,直至轨压升至 120 MPa.当喷油压力与燃烧室环境达到要求后开始喷油,高速摄影机将完整地记录下燃料的燃烧过程,并将拍摄的图像传输给控制计算机进行后处理.根据液氧固碳闭式循环柴油机的实际工况,本试验选取背景气体为 50% CO<sub>2</sub> + 50% O<sub>2</sub>、47% CO<sub>2</sub> + 53% O<sub>2</sub>、43% CO<sub>2</sub> + 57% O<sub>2</sub>、39% CO<sub>2</sub> + 61% O<sub>2</sub> 和 35% CO<sub>2</sub> + 65% O<sub>2</sub>,并加入空气作为对照组,每种工况均进行 20 次试验以减小误差,具体的试验参数如表 1 所示.

表 1 试验参数  
Tab. 1 Test parameters

参数	数值	单位
燃烧室初始温度	850.0	K
燃烧室初始压力	3.0	MPa
喷油压力	120.0	MPa
喷油脉宽	2.0	ms
单次喷油量	18.4	mg
燃油温度	298	K
喷油直径	0.06	mm
摄影速率	19900	FPS
曝光时间	20	μs
光圈	2.8	—
分辨率	256×512	—

## 4 结果与讨论

### 4.1 火焰形状与火焰浮起长度

图 2 为不同工况下拍摄的火焰传播进程的火焰边缘检测图.该图像基于 Sobel 算子边缘检测算法得到,包含了更多的火焰边缘特征,可以更好地比较不同工况下柴油燃烧火焰形状的异同.与空气下燃烧相比,CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 氛围下的燃烧火焰边缘出现了更明显的分岔与波动.随着 CO<sub>2</sub> 浓度的增大和 O<sub>2</sub> 浓度的减小,这种现象愈发突出. Watanabe 等<sup>[12]</sup>研究了 CH<sub>4</sub> 在空气和 CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 氛围下的燃烧火焰,同样发现了在 CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 氛围下火焰更容易出现湍流现象.这是由于 CO<sub>2</sub> 的添加阻碍了燃料与 O<sub>2</sub> 间的反应,降低了燃烧温度,减慢了火焰传播速度,使得火焰前沿更容易受到气流等不稳定因素的影响,从而形成更多的火焰尖端和凹陷.此外,由于 CO<sub>2</sub> 的密度高于 O<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>,当 CO<sub>2</sub> 与热气流混合时会产生复杂的气体流动,从而促进火焰的湍流现象.在空气氛围下,柴油进入燃烧室后,热气流被卷吸进入油束中,火焰随着空气流动逐渐向外围扩展,并在锥形柴油射流外围形成薄火焰锋,并且出现火焰回溯现象,这与 Curran 等<sup>[13]</sup>提出的 NO<sub>x</sub> 和碳烟排放模型相似.而 CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 氛围下的火焰结构与空气氛围下有所不同,由于反应物中缺少 N<sub>2</sub>,因此在火焰边缘检测图像中没有 NO<sub>x</sub> 生成的迹象.此外,N<sub>2</sub> 在燃烧过程中起到吸收和扩散热量的作用,维持火焰形状.而在 CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 氛围下,缺少 N<sub>2</sub> 的支撑,火焰形状变得更加细长<sup>[14]</sup>.对比不同工况,空气氛围下的着火延迟时间最长,而在 CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 氛围下,随着 CO<sub>2</sub> 浓度增大和 O<sub>2</sub> 浓度减小,着火延迟时间逐渐增大.这是 CO<sub>2</sub> 的燃烧阻碍和 O<sub>2</sub> 的燃烧促进作用共同导致的.

为了更好地分析不同工况下柴油的燃烧火焰特征,我们从 20 次试验图像中提取出火焰浮起长度并计算其平均值如图 3 所示.通过与手动测量的火焰浮起长度对比,发现最大误差为 2.37%,这表明本文提出的方法可用于提取火焰图像的火焰浮起长度.对比不同工况,发现在 CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 氛围下的火焰浮起长度比空气下更短,这是由于高浓度的 O<sub>2</sub> 促进燃烧,产生了大量热量和气体,这些热量和气体向周围扩散产生了火焰回溯现象,从而导致火焰浮起长度缩短.随着 CO<sub>2</sub> 浓度的增大和 O<sub>2</sub> 浓度的减小,火焰浮起长度逐渐增大,这是由于 CO<sub>2</sub> 的添加抑制了燃烧.此外,每种工况下的火焰浮起长

度均随燃烧进程呈现先增大再减小最后再增大的规律. 这是由于柴油在燃烧初期燃烧速度快, 火焰膨胀产生的高压推动火焰向下扩展, 火焰浮起长度增大. 随着燃烧进一步发展, 燃料与氧化剂的混合物浓度逐渐降低, 燃烧速度减缓, 火焰膨胀产生的高压减小, 火焰回溯现象出现, 使得火焰浮起长度

减小. 而在燃烧的后期燃料减少, 火焰回溯现象减弱, 导致火焰浮起长度增大. Yang 等<sup>[15]</sup> 和李国栋等<sup>[16]</sup> 的研究表明, CO<sub>2</sub> 的添加会影响 CH<sub>4</sub> 和煤粉的火焰结构, 使火焰核心反应区位置逐渐靠近燃烧器出口, 即火焰浮起长度逐渐增大. 这一发现与本文中对柴油火焰的研究结果相似.

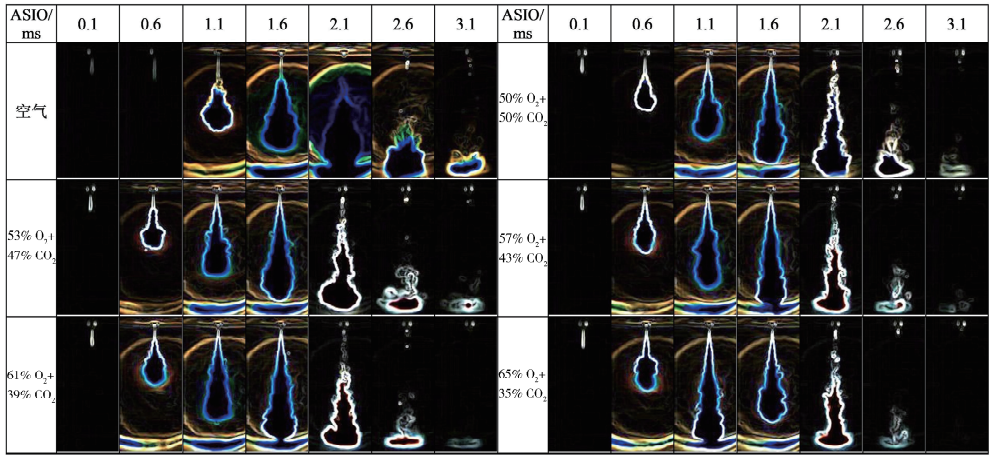


图 2 火焰边缘检测图像  
Fig. 2 Flame edge detection images

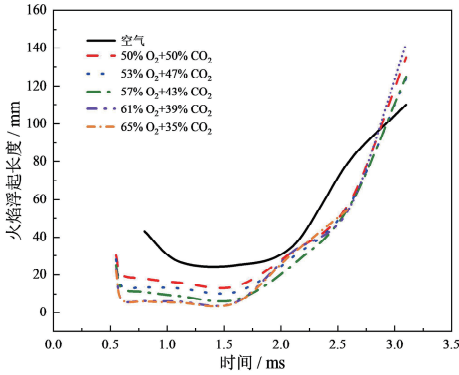


图 3 火焰浮起长度变化  
Fig. 3 Flame float length change

着 CO<sub>2</sub> 浓度减小和 O<sub>2</sub> 浓度增大, 红绿分量比有所减小, 即火焰颜色变浅. 这是由于环境中剩余的

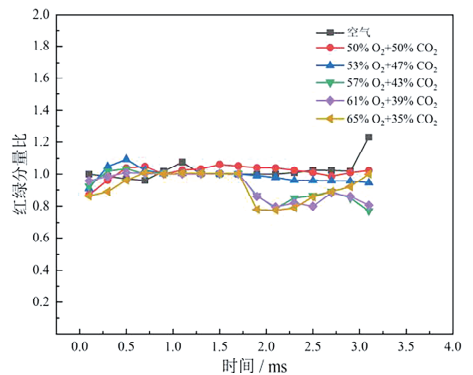


图 4 火焰红绿分量比变化  
Fig. 4 Flame red to green component ratio change

#### 4.2 红绿分量比

对 20 次试验获取的柴油燃烧火焰图像进行红、绿、蓝三色分离, 并根据式(1)计算出不同时间下火焰的红绿分量比平均值, 变化曲线如图 4 所示. 在火焰发展阶段, 红绿分量比在不同工况下基本相同, 且随着燃烧过程的发展没有明显变化, 其数值基本保持在 0.8~1.2 之间. 这与韩铖惠<sup>[17]</sup> 得到的柴油在白天的燃烧火焰红绿分量比相近, 进一步验证了本文提出的红绿分量比提取方法的可行性. 根据红绿分量比数值来看, 火焰图像红色与绿色通道分量值非常接近, 表明火焰的主要色调为红色与绿色的混合色即黄色. 在火焰熄灭阶段, 随

O<sub>2</sub> 浓度较高时, 燃烧产物生成有所减少, 从而导致火焰中可见光吸收和散射减弱, 使得火焰颜色变浅.

#### 4.3 火焰亮度

经过伪色处理的图像可以将不同波长的光线转换成不同颜色, 更好地展示火焰的亮度分布. 图 5 所示为火焰传播进程的伪色图像, 火焰内部的大部分区域为红色, 火焰边缘附近为淡蓝色, 且随着燃烧进程, 淡蓝色边缘逐渐增大. 这是由于火焰内部 O<sub>2</sub> 供应不足, 燃烧不充分, 火焰中存在较多未

燃烧的碳氢化合物, 这些物质发出的光线波长较长, 因此呈现出大面积的红色; 而火焰边缘反应相对完全, 火焰中化合物较少, 产生的光线波长较短, 因此呈现出蓝色<sup>[18]</sup>. 此外, 火焰外围气体受热膨胀, 向火焰中心流动以替换被消耗的  $O_2$ , 因此火焰

外围形成逐渐加强的对流层, 导致更多冷空气吸入, 降低了火焰外围温度. 对比不同工况, 随着  $CO_2$  浓度提高和  $O_2$  浓度降低, 可以明显看出火焰外围的红色雾状物增多, 分析其为未燃烧的碳氢化合物.

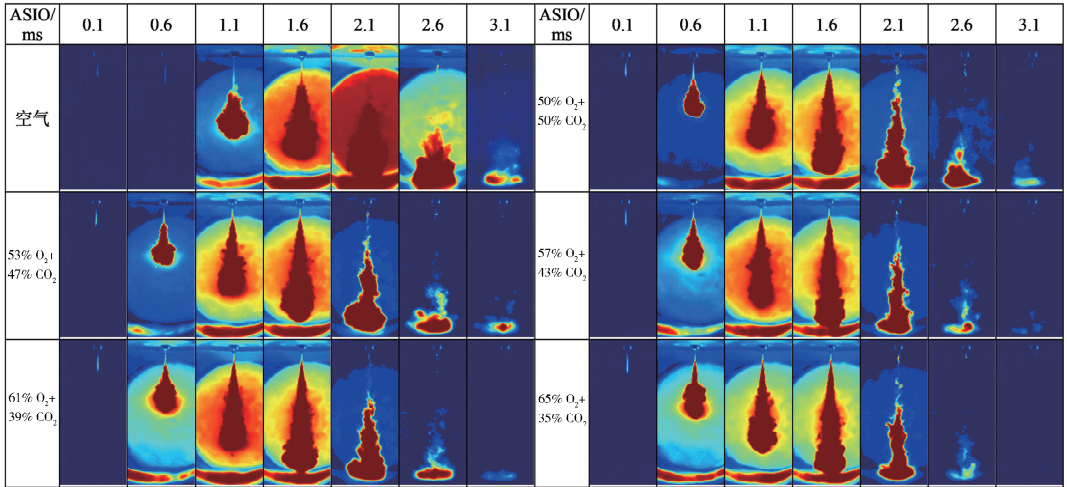


图 5 火焰伪色图像

Fig. 5 Flame pseudo-colour image

为定量描述火焰亮度, 孙继平等<sup>[19]</sup>采用红外摄像机对火焰进行了拍摄, 并通过灰度值来表征火焰亮度. 而这种方法并不能完全反应火焰的整体亮度, 且受到设备的限制. 本文采用的火焰亮度表征方法是从真实火焰图像提取亮度信息, 再根据式(2)计算不同工况的平均亮度, 并对 20 次试验结果进行了平均, 所得结果随时间变化如图 6a 所示. 不同工况下的火焰平均亮度变化曲线均为“单峰”状, 即平均亮度随燃烧进程先增大后减小. 由于  $CO_2/O_2$  氛围下含有大量  $CO_2$ , 它会吸收火焰产生的热辐射, 减弱火焰平均亮度, 而  $O_2$  和  $N_2$  通常不会吸收热辐射, 因此空气下的平均亮度峰值最大, 其数值约为 210.75 px. 对比  $CO_2/O_2$  氛围和空气氛围下的燃烧, 可知  $CO_2/O_2$  氛围下的火焰平均亮度有显著波动, 这是该环境的湍流现象引起的, 验证了前文得出的“ $CO_2/O_2$  氛围下火焰更容易出现湍流现象”. 此外,  $CO_2/O_2$  氛围下的火焰平均亮度峰值比空气氛围下的火焰平均亮度峰值出现得更早, 在  $CO_2/O_2$  氛围下峰值大约出现在 1.1 ms 处, 而在空气氛围下峰值大约出现在 2.1 ms 处. 这是由于高浓度  $O_2$  促进了燃烧, 高浓度  $CO_2$  抑制了燃烧, 但  $O_2$  促进作用强于  $CO_2$  抑制作用, 使其燃烧反应速率加快, 导致了平均亮度峰值的提前出现. 由于不同工况的燃烧速度不同, 因此对比同时刻平均

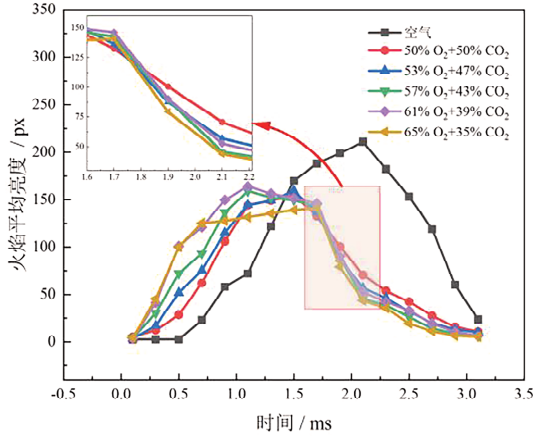
亮度来反映不同工况的火焰亮度是行不通的. 为此本文计算了不同工况的火焰累积亮度, 如图 6b 所示. 空气氛围下的累积亮度约为  $2.54 \times 10^7$  px, 远低于  $CO_2/O_2$  氛围的累积亮度. 随着  $O_2$  浓度从 50% 增加到 57%, 累积亮度逐渐从  $3.75 \times 10^7$  px 增加到  $3.78 \times 10^7$  px, 表明燃烧反应越来越剧烈. 而  $O_2$  浓度从 57% 增加到 65%, 累积亮度却显著减小, 从  $3.78 \times 10^7$  px 减小到  $3.58 \times 10^7$  px. 这是由于过高  $O_2$  浓度环境下燃烧产生了过量的  $CO_2$  和  $H_2O$  等产物, 这些产物会吸收并散射火焰中的光线<sup>[20]</sup>. 此外由于高浓度  $O_2$  环境下燃烧时间缩短, 导致拍摄的火焰图像帧数减少, 火焰累积亮度大幅减小.

#### 4.4 火焰相关性

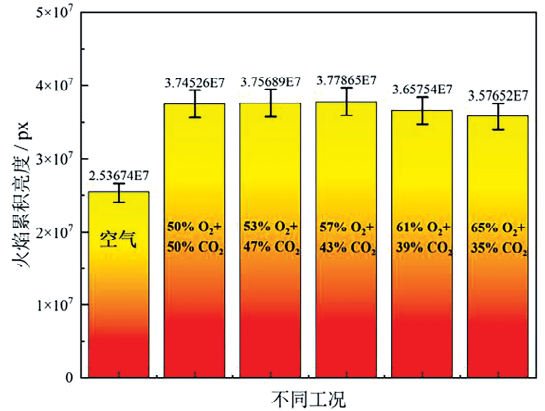
火焰发展具有流动性, 而单帧图像提取的火焰特征忽略了火焰动态信息, 难以反映火焰真实发展. 火焰序列图像的相关性可反映动态特征, 依据相邻两帧火焰图像的像素值计算得到相关性系数, 其随时间变化如图 7 所示. 火焰相关性系数呈先增大再减小最后再增大的趋势. 这是因为在燃烧初期, 火焰迅速膨胀并释放大量热量, 因此相关性系数逐渐增大. 燃烧进入稳态阶段后, 火焰颜色、亮度等开始稳定, 相关性系数也逐渐减小. 最后燃烧进入尾声, 火焰逐渐消失, 其颜色、亮度等随之减

弱,相关性系数有所增大. 与火焰平均亮度变化类似, O<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub> 的共同作用导致 CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 氛围下的火焰相关性系数峰值出现提前. 在 CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 和空气氛

围下,火焰的相关性系数分别在 1.6 ms 和 2.1 ms 之后开始逐渐减小,表明该阶段的燃烧逐渐趋于稳定,燃烧效率逐渐提高.



(a) 不同时刻的火焰平均亮度



(b) 不同工况下的火焰累积亮度

图 6 火焰亮度

Fig. 6 Flame brightness

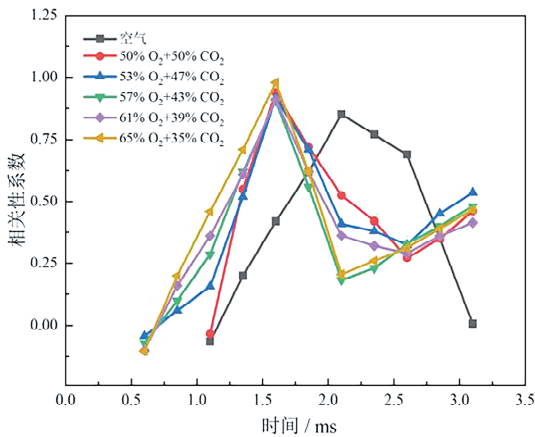


图 7 火焰相关性

Fig. 7 Flame correlation

### 4.5 面积变化率与面积重叠率

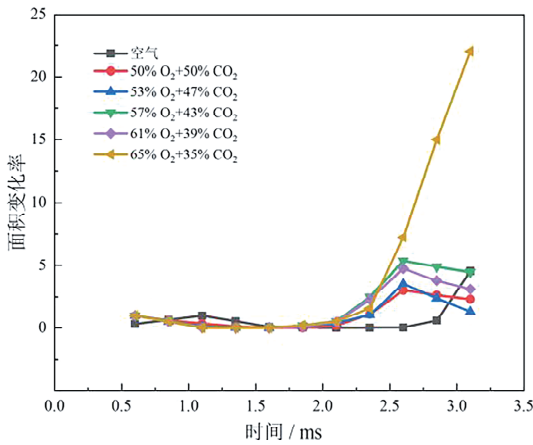
根据式(4)所得不同时刻火焰面积变化率如图 8a 所示. 对于 CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 氛围,火焰面积变化率从 0.6 ms 到 2.1 ms 几乎均保持 0~1 不变,此后迅速增大,在 2.6 ms 处达到峰值后有所减小. 这是由于 0.6~2.1 ms 为火焰向外扩展阶段,后一帧火焰总比前一帧火焰面积大,并且面积差值小于后一帧图像火焰面积,因此所得的 0.6~2.1 ms 火焰面积变化率保持在 0~1 范围内. 从图 2 可知,2.1 ms 后的每帧图像均比前一帧图像火焰面积小,其中 2.1 ms 与 2.6 ms 两帧图像火焰面积变化量与后一帧图像火焰面积比值达到最大. 在 2.6~3.1 ms 时间范围内,燃烧速度减慢,前后两帧火焰面积变化量与后一帧图像火焰面积比值有所减小. 值得

说明的是,65% O<sub>2</sub>+35% CO<sub>2</sub> 氛围下的火焰面积变化率没有在 3.1 ms 处减小. 这是由于在 3.1 ms 时,火焰已经基本熄灭,检测出的火焰可疑区像素数很小,因此与其他工况相比面积变化率较大. 对于空气氛围,火焰面积变化率从 0.6~2.6 ms 始终保持在 0~1 范围,之后才逐渐增加. 这是由于空气中 O<sub>2</sub> 浓度较小,燃烧速度缓慢导致的. 此外,在火焰逐渐熄灭过程中,随着 CO<sub>2</sub> 浓度增大和 O<sub>2</sub> 浓度减小,火焰面积变化率总体呈减小趋势. 但火焰熄灭过程受燃烧速度和气体流动等诸多因素影响,受本研究限制还无法确定具体原因,有待进一步研究.

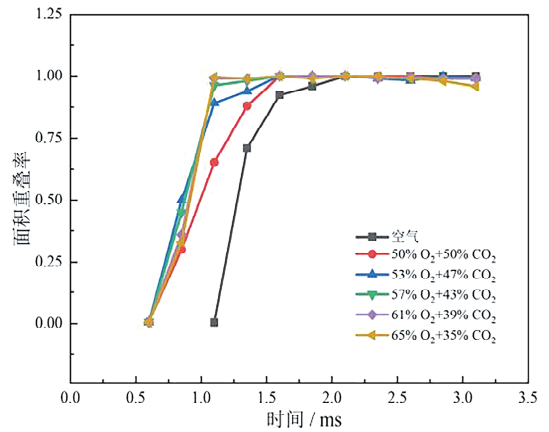
根据式(5)所得不同时刻火焰面积重叠率如图 8b 所示. 对于所有工况,火焰面积重叠率均随燃烧进程从 0 迅速增加至 1,之后维持稳定. 由于第一帧火焰图像尚未燃烧,因此前两帧图像面积重叠率为 0. 随着火焰扩展,后一帧图像火焰面积总是大于前一帧火焰面积,直至 1.6 ms 和 2.1 ms,CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 氛围和空气氛围下的火焰面积分别达到峰值. 因此火焰重叠面积总是小于第二帧火焰面积,导致面积重叠率落在 0~1 之间. 随着燃料和氧化物消耗,火焰逐渐缩小,最终熄灭. 因此,后续时刻后一帧图像火焰面积总小于前一帧火焰面积. 此时,两帧图像火焰重叠面积总是约等于第二帧图像火焰面积,因而所得面积重叠率维持在 1 附近. 对比不同 CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 浓度下的面积重叠率,在火焰扩展过程

中,随着  $\text{CO}_2$  浓度增大和  $\text{O}_2$  浓度减小,面积重叠率随时间增加而增大的速率逐渐减小. 这表明  $\text{CO}_2$  /

$\text{O}_2$  浓度对火焰扩展速度和面积重叠率的增长速率具有重要的影响.



(a)不同时刻的火焰面积变化率



(b)不同时刻的火焰面积重叠率

图 8 火焰面积变化率与面积重叠率

Fig. 8 Flame area change rate and area overlap rate

## 5 结 论

(1) 本文提出的基于 Python 的火焰特征提取方法能够用于分析燃烧火焰的特征.

(2) 在空气和  $\text{CO}_2/\text{O}_2$  氛围下,柴油的火焰浮起长度和火焰相关性均随着燃烧进程呈现先增大后减小再增大的趋势. 而平均亮度则先增大后减小,其在空气下和 35%  $\text{CO}_2$ /65%  $\text{O}_2$  氛围下的峰值分别为 210.75 px 和 138.89 px. 在火焰发展阶段,红绿分量比保持在 0.8~1.2 之间;而在火焰熄灭阶段,随着  $\text{CO}_2$  浓度减小和  $\text{O}_2$  浓度增大,红绿分量比有所减小.

(3) 与在空气下燃烧相比,柴油在  $\text{CO}_2/\text{O}_2$  氛围下的火焰形状更加细长,湍流现象更加明显,火焰浮起长度缩短,平均亮度下降,相关性系数峰值和平均亮度峰值出现时间提前了约 0.5 ms. 随着  $\text{CO}_2$  浓度的增大和  $\text{O}_2$  浓度的减小,柴油燃烧火焰浮起长度和着火延迟时间均呈现增大趋势.

## 参考文献:

- [1] Park H, Hwang E, Jang M, *et al.* Exposure assessment of elemental carbon, polycyclic aromatic hydrocarbons and crystalline silica at the underground excavation sites for top-down construction buildings [J]. *PloS One*, 2020, 15: 239010.
- [2] 裴普成, 刘永峰. 液氧固碳零排放内燃机: ZL201010519636.9 [P]. 2012-12-26.
- [3] Albert C H J, Ahmad F A Z, Ahmad Z S Z, *et al.*

Flame analysis using image processing techniques [J]. *IOP Conf Ser: Mater Sci Eng*, 2018, 342: 012060.

- [4] Zeng Z K, Zhang T Y, Zheng S K, *et al.* Ignition and combustion characteristics of coal particles under high-temperature and low-oxygen environments mimicking MILD oxy-coal combustion conditions [J]. *Fuel*, 2019, 253: 1104.
- [5] Xie F, Li J Y, Song X D, *et al.* Alkali metal spectral radiation characteristics of single coal particle flames during the  $\text{O}_2/\text{CO}_2$  and  $\text{O}_2/\text{N}_2$  atmospheres [J]. *Proc CSEE*, 2022, 13: 1. [谢非, 李金云, 宋旭东, 等.  $\text{O}_2/\text{CO}_2$  和  $\text{O}_2/\text{N}_2$  气氛下单颗粒煤火焰碱金属光谱辐射特性[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 13: 1.]
- [6] Yang J B, Gong Y, Guo Q H, *et al.* Dilution effects of  $\text{N}_2$  and  $\text{CO}_2$  on flame structure and reaction characteristics in  $\text{CH}_4/\text{O}_2$  flames [J]. *Exp Therm Fluid Sci*, 2019, 108: 16.
- [7] Saber J R, Ehsan H, Mehdi A. Combined experimental-numerical investigation on the structure of methane/landfill gas flame using PIV [J]. *Exp Therm Fluid Sci*, 2018, 94: 23.
- [8] Wang D, Ji C W, Wang S F, *et al.* Chemical effects of  $\text{CO}_2$  dilution on  $\text{CH}_4$  and  $\text{H}_2$  spherical flame [J]. *Energy*, 2019, 185: 316.
- [9] Zhou H, Li N, Li Y, *et al.* Experimental study on ethanol spray combustion characteristics under oxy-fuel conditions [J]. *J Zhejiang Univ (Eng Sci)*, 2018, 52: 1821. [周昊, 李宁, 李源, 等. 富氧条件

- 下乙醇喷雾燃烧特性的实验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2018, 52: 1821.]
- [10] Jia Y, Wang H Q, Hu Y, *et al.* Flame detection algorithm based on improved hierarchical cluster and support vector machines [J]. *Comp Eng Appl*, 2014, 50: 165. [贾阳, 王慧琴, 胡燕, 等. 基于改进层次聚类 and SVM 的图像型火焰识别[J]. 计算机工程与应用, 2014, 50: 165.]
- [11] Li C, Yao Y, Yang R, *et al.* Correlation analysis between environmental pressure and vision-based flames from monitoring camera during depressurization process [J]. *Signal Image Video P*, 2022, 16: 1369.
- [12] Watanabe H, Shanbhogue S J, Taamallah S, *et al.* The structure of swirl-stabilized turbulent premixed CH<sub>4</sub>/air and CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> flames and mechanisms of intense burning of oxy-flames [J]. *Combust Flame*, 2016, 174: 111.
- [13] Curran H J, Fisher E M, Glaude P A, *et al.* Detailed chemical kinetic modeling of diesel combustion with oxygenated fuels [J]. *Sae Int J Fuels Lubr*, 2001, 110: 514.
- [14] Zeng Z K, Li G D, Zhang T Y, *et al.* Experimental investigation on combustion characteristics of coal particles under low-oxygen dilution conditions [J]. *J Chin Soc Power Eng*, 2019, 39: 959. [曾柱楷, 李国栋, 张廷尧, 等. 低氧稀释条件下煤粉颗粒燃烧特性实验研究[J]. 动力工程学报, 2019, 39: 959.]
- [15] Yang J B, Gong Y, Guo Q H, *et al.* Dilution effects of N<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> on flame structure and reaction characteristics in CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub> flames [J]. *Exp Therm Fluid Sci*, 2019, 108: 16.
- [16] Li G D, Zhang T Y, Zeng Z K, *et al.* Experimental investigation on the ignition and combustion characteristics of different coal ranks under low-oxygen dilution conditions [J]. *J Chin Soc Power Eng*, 2021, 41: 439. [李国栋, 张廷尧, 曾柱楷, 等. 低氧稀释条件下不同煤种着火燃烧特性实验研究[J]. 动力工程学报, 2021, 41: 439.]
- [17] Han C H. Research of fire image segmentation and character selection method [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017. [韩铖惠. 火焰图像分割及特征选择算法研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017.]
- [18] Wu R M, Xie F, Song X D, *et al.* The mechanism of hydrocarbon flame soot formation in spectral diagnosis: a review [J]. *Spectrosc Spect Anal*, 2023, 43: 1. [吴润民, 谢非, 宋旭东, 等. 基于光谱诊断的烃类火焰碳烟形成机理研究综述[J]. 光谱学与光谱分析, 2023, 43: 1.]
- [19] Sun J P, Sun Y Y, Fan W Q. Mine exogenous fire identification method based on visible light and infrared image [J]. *Ind Mine Automat*, 2019, 45: 1. [孙继平, 孙雁宇, 范伟强. 基于可见光和红外图像的矿井外因火灾识别方法[J]. 工矿自动化, 2019, 45: 1.]
- [20] Pourhoseini S H, Taghvaei I, Moghiman M, *et al.* Tangential flue gas recirculation (TFGR) technique for enhancement of radiation characteristics and reduction of NO<sub>x</sub> emission in natural gas burners [J]. *J Nat Gas Sci Eng*, 2021, 94: 104130.