文章编号：1672-8785(2018)02-0001-07

高架火炬排放光学遥测技术的研究进展

管　齐　张　静

（中国船舶重工集团公司第七一一研究所，上海　201108）

摘　要：在石化工业中，高架火炬是一种用于燃烧上游生产过程中产生的废气的重要装置。然而火炬运行时通常存在不完全燃烧现象，主要表现为以下两种形式：(1)由于热值低引起的未燃烧的可挥发性有机物(Volatile Organic Compounds，VOC)排放；(2)由于空气不足引起的黑烟排放。近年来，火炬工业领域开始尝试用光学方法对其燃烧状态进行遥测。介绍了高架火炬排放中采用的几种光学监测技术，包括被动式傅里叶变换红外(Passive Fourier Transform Infrared，PFTIR)光谱技术、中红外超光谱相机监测技术、自然光消光法(Line-Of-Sight Attenuation using Sky-light，Sky-LOSA)和双波长红外传感器监测技术，并从基本原理、应用和进展等方面对其进行了阐述。最后对光学遥测在高架火炬领域的技术发展和应用前景进行了分析。

关键词：高架火炬；光学监测；燃尽率；污染物排放

中图分类号：TN24　**文献标志码**：A　**DOI**：10.3969/j.issn.1672-8785.2018.02.001

Research Development of Remote Optical Measurement of Elevated Flare Emission

GUAN Qi，ZHANG Jing

(*Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute，Shanghai 201108，China*)

Abstract：In petrochemical industry，elevated flares are the important devices to burn off the waste gas from upstream processes. However，there often exist incomplete combustions during flare operations. These are mainly manifested as two forms：(1) unburned volatile organic compound (VOC) emission due to low heat values in the combustion zone；(2) smoke or soot emission due to insufficient air supply. In recent years，the flare industry has made an attempt to use optical methods on flares to monitor their combustion conditions. Several optical monitoring technologies including passive Fourier Transform Infrared (PFTIR) spectroscopy，mid-infrared hyper-spectral imagery，sky-light line-of-sight attenuation (sky-LOSA) and dual wavelength infrared sensor used in flare industry are presented. Their operating principles，applications and developments are discussed. Finally，the development trend and application prospect of remote optical monitors in the field of elevated flares are analyzed.

收稿日期：2017-10-23

基金项目：上海市浦江人才计划项目(16PJ1432000)

作者简介：管齐(1986-)，男，江苏宿迁人，博士，工程师，主要从事石化工程中的燃烧、流体力学、安全环保等方面的设计和研发工作。

E-mail：Mech_GuanQi@163.com

Key words: elevated flare; optical monitoring; combustion efficiency; pollution emission

0 引言

高架火炬是一种对石化工业生产过程中产生的废气进行集中处理的重要安全装置。在排放过程中，废气经过筒体被输送到火炬头部，燃烧后再排向大气。高架火炬可以近似看作是一种放空式燃烧系统。火炬运行时通常会存在因不完全燃烧而导致的污染排放问题，主要表现为以下两种形式：(1)由于热值低引起的VOC排放；(2)空气不足导致冒黑烟。VOC排放会加剧温室效应并破坏高空臭氧层；黑烟排放会导致呼吸道疾病并改变局部地区的气候，甚至会引发社会恐慌。

由于石化工业发展迅速，火炬燃烧不充分导致的污染问题变得不可忽视。目前，某些国家已经针对高架火炬的污染物排放出台了相关法律规定。例如，美国环保局(Environmental Protection Agency，EPA)要求高架火炬的燃尽率达到98%以上并且不得有明显的黑烟排放。由于火炬头一般都在150 m左右的高空中，且燃烧区的温度很高，一般的监测方法无法适应这种工况。光学遥测技术则因其非接触性、快速、准确等特点而成为了一种合适的选择。

目前，光学遥测技术在国外石化设备企业中发展迅速，而且已有多种仪器和方法被应用在高架火炬的污染排放研究中；而国内的光学遥测技术与国外还存在一定差距，目前在高架火炬测量中的应用还很少。但随着近年来环保要求的提高，国内测量技术也取得了较快发展，很多仪器和方法已被开发出来。本文主要介绍当下火炬工业中几种常用的和新型的监测方法及产品，并比较其技术的不同点和优缺点，最后分析未来火炬排放光学遥测技术的发展趋势。

1 高架火炬排放的污染源

高架火炬是一种放空式废气处理系统。可燃废气经其筒体被传输到头部，燃烧后直接排向外界大气。这种燃烧方式使得人们非常难以量化排放。根据卫星数据统计[1]，在全球范围内，每年有超过1350亿立方米的废气会通过火炬燃烧处理掉。因此，高架火炬污染排放的测量需求一直存在。

火炬废气主要由碳氢化合物组成。若能充分燃烧，其产物应该是CO_2和H_2O；若燃烧不充分，则会有未裂解或部分裂解的废气排出。工业上，一般用燃尽率(Combustion Efficiency，CE)来衡量燃烧的充分程度，其表达式为[2]

$$CE(\%)=\frac{[CO_2]}{[CO_2]+[CO]+[THC]+[Soot]} \quad (1)$$

式中，$[CO_2]$、$[CO]$和$[Soot]$分别为烟气羽流中测得的CO_2、CO和碳黑的体积含量；$[THC]$为其他所有碳氢化合物的体积含量，如甲烷、乙烯或VOC气体。

如图1所示，燃尽率实验中常用采样抽取测量方法作为其他各种测量方法的参照依据[3]。试验中，在羽流顺风方向上设置一个抽取管并配备抽风机。抽取管对羽流中的各种组分进行采样，最后通过烟气分析仪得到某段时间内的平均燃尽率。

图1 抽取采样测量方法及装备

废气燃烧过程中产生的黑烟排放是另一大污染源。人们很难对其进行量化，目前主要是

用林格曼系数来标定黑烟的不透明度。尽管有研究表明，黑烟排放仅占所有燃烧不充分排放总量的 0.5%或更少[4]，但该研究受制于很多实验条件的限定，因此其结论需要得到更加深入的探讨。美国环保局提出的方法 9 中规定[5]，黑烟测量要由经专门训练的观测人员用肉眼观察，以决定其不透明度。这种方法很明显具有较强的主观判断因素，容易出错，因此无法定量地对黑烟排放进行测量。

2 光学遥测技术

2.1 被动式傅里叶变换红外光谱技术

PFTIR 光谱仪用于分析气体成分的光谱信息。该光谱仪直接以高温燃烧气体的红外辐射作为系统所需光源，根据气体对特定波长吸收峰的形状和大小确定气体组分及浓度。图 2 为用 PFTIR 光谱仪测量火炬羽流燃尽率的示意图。

图 2 基于 PFTIR 光谱仪的火炬燃尽率测量实验

气体辐射对波长具有强烈的选择性。PFTIR 光谱仪正是利用这种特性来判定测量气体的种类和浓度。在波长为 λ、温度为 T 的条件下，燃烧区的热源气体辐射到光谱仪的能量为[6]

$$I(\lambda,T)=[1-\tau(\lambda,T)]\cdot I_{bb}(\lambda,T) \qquad (2)$$

式中，$\tau(\lambda,T)$为气体的透射率；$I_{bb}(\lambda,T)$为该条件下的黑体辐射。

光谱仪接收到的辐射不仅包括来自燃烧区的热气体红外辐射，而且还包括天空背景辐射和大气辐射。所以在测量时，要先进行标定和校准，以去除背景和大气辐射的干扰。

根据比尔-朗伯定律，光强透射率与气体浓度 c 之间存在指数关系：

$$\tau_{plume}=e^{-K(\lambda)\cdot c\cdot L} \qquad (3)$$

式中，$K(\lambda)$为该波长下的吸光系数；L 为气体的光程长度。由式(3)即可得到热源气体中的组分浓度。

如图 3 和图 4 所示，自 2004 年以来，美国德克萨斯环境质量委员会(Texas Commission on Environmental Quality，TCEQ)与 IMACC、URS 等公司合作展开了一系列火炬燃尽率监测研究[7-8]。其中，IMACC 公司生产的 PFTIR 光谱仪具有光谱分辨率高(约0.125 cm^{-1})、扫描时间较短等优点，但其频谱信息仍需专业人员进行解读。另一方面，与火焰羽流的变化相比，该光谱仪的扫描速度还是较慢，无法及时捕捉燃尽率的变化。最后，在利用 PFTIR

图 3 IMACC 公司的 PFTIR 光谱仪

图 4 用 PFTIR 光谱仪测量火炬燃尽率

光谱仪进行测量时，要保证烟气羽流的飘动方向尽量与监测方向垂直。因此，在实际测量中，通常相隔 120°配备两台监测仪以防止风向变化，但这也会增加监测成本。

2.2 中红外超光谱成像监测技术

随着红外成像技术的发展，超光谱探测仪器也逐渐用于污染物排放遥测。如图 5 所示，美国 Surface Optics 公司的 SOC750 型中红外超光谱成像仪集成了高灵敏度的高速中红外探测阵列、成像光谱仪以及扫描系统。该成像仪在 2～5 μm 范围内具有 42 个光谱波段，其光谱分辨率约为 73 nm，像素数为 256×240，每秒钟可处理 11～30 帧图片。

图 5 Surface Optics 公司的 SOC750 型中红外超光谱成像仪

Zeng Y 等人[9]基于 SOC750 型成像仪开发了一种新型火炬燃尽率监测设备。如图 6 所示，在配备 50 mm 定焦镜头后，该设备可以在距离火炬 90 m 处监测一个视场角为 8.8°的平面内的燃烧情况。如图 7 所示，在忽略碳黑浓度的情况下，该设备测量了 4 个波段的辐射能(分别对应于 CO_2、CO、未燃烧的碳氢化物 THC 以及一种参考气体)，并反推出了气体的相对浓度值 C（如 CO_2 在 4.26 μm 处有辐射峰值)：

$$C=\frac{I}{B(T_g,\lambda)\alpha(\lambda)L} \tag{4}$$

将各像素上的各个组分浓度代入式(1)，即可计算出各像素上的燃尽率：

$$CE(\%)=\frac{I_2}{B(T_g,\lambda_2)\alpha(\lambda_2)}\div \bar{n}\frac{I_1}{B(T_g,\lambda_1)\bar{\alpha}(\lambda_1)}+\frac{I_2}{B(T_g,\lambda_2)\alpha(\lambda_2)}+\frac{I_3}{B(T_g,\lambda_3)\alpha(\lambda_3)} \tag{5}$$

式中，$\bar{n}$ 为碳氢化物中的碳原子个数；B 与气体热源温度 T_g 及波长 λ 有关，其具体表达式为 $B(T_g,\lambda)=\frac{2hc^2}{\lambda^5}\frac{1}{e^{hc/\lambda k_B}T_g-1}$；$I$ 为探测器所接收的辐射能；α 为吸收率。图 8 所示为火炬羽流燃尽率的空间分布情况。由于 SOC750 型成像仪的数据采集周期很短(仅为 91～33 ms)，可以近似认为烟气羽流的光程长度在这段时间内是不变的。

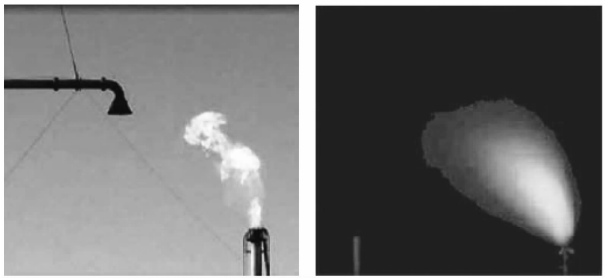

图 6 火炬燃烧试验及红外图像

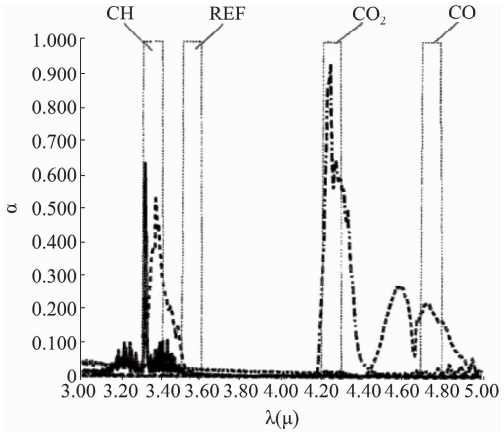

图 7 燃烧产物的测量波段选择

中红外超光谱成像监测技术能够在二维平面内快速捕捉烟气羽流的动态变化，因此可有效抵抗风速风向变化对测量的干扰，并可提供

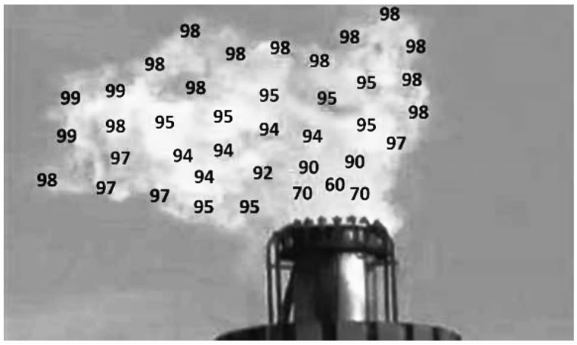

图 8 火炬羽流燃尽率的空间分布情况

比 PFTIR 光谱仪更全面、更有效的信息。另外，由于集成了燃尽率计算功能，该监测设备无需相关人员专门进行频谱分析，因此更加便于现场监测。

2.3 Sky-LOSA 方法

消光法是在实验室尺度下测量火焰中碳黑生成量的方法之一[10]。近年来，Johnson M R 等人将这种方法拓展到了现场火炬黑烟生成量的测量之中[11-12]。他们利用瑞利-德拜-甘氏分形凝聚理论(Rayleigh-Debye-Gans Fractal Aggregate，RDG-FA)将穿透羽流的散射自然光的单色光透射率测量与碳黑浓度联系起来，即 Sky-LOSA 方法。

根据比尔-朗伯定律，波长为 λ 的光穿过羽流的透射率 τ_λ 与该波长所对应的消光系数 K_λ^e 之间存在以下关系：

$$\tau_\lambda=\frac{I_\lambda}{I_{\lambda_0}}=\exp\left[-\int K_\lambda^e \mathrm{d}x\right] \tag{6}$$

式中，I_{λ_0} 和 I_λ 分别为波长 λ 的光穿透羽流前后的光强值。

根据 RDG-FA 理论，瞬态下某一垂直于羽流飘散方向上的透射率 $\tau_\lambda(y)$ 与碳黑流量之间存在以下关系：

$$\dot{m}_{soot}=\frac{-\rho_{soot}\lambda}{6\pi(1+\rho_{sa}^*)E(m)_\lambda}\times\int u(y)\ln[\tau_\lambda(y)]\mathrm{d}y \tag{7}$$

式中，ρ_{soot} 为碳黑密度；ρ_{sa}^* 为烟气羽流对光的散射与吸收之比；$u(y)$ 为烟气羽流的平均速度；$E(m)_\lambda$ 为吸收折射率。通过对式(7)作时间上的平均，可以得到平均碳黑排放流量的表达式：

$$\overline{\dot{m}_{soot}}=A\frac{1}{N_f}\sum_{i=1}^{N_f}\int U(y)\ln[\tau_\lambda(y)_i]\mathrm{d}y \tag{8}$$

式中，$A=(\rho_{soot}\lambda)/[6\pi(1+\rho_{sa}^*)E(m)\lambda]$ 是个常数；$U(y)$ 为数据处理周期内羽流的平均速度；N_f 为这段周期内相机拍摄的帧数。

图 9 所示为 Sky-LOSA 方法用于乌兹别克斯坦现场的相关设置。测量装备距离火炬 216 m。在测量过程中，由 Casio EX-F1 高速摄像机获取火焰羽流的动态变化数据并计算羽流速度。该摄像机每秒钟可以拍摄 300 帧照片，并配有一个 36 ～ 432 mm 镜头。在这样的拍摄速度下，相机可以保持 512×324 像素。其中每个像素代表的空间精度约为 55 mm。羽流的透射率由美国 Princeton 仪器公司生产的 PIXIS 1024BR 型 16 位 CCD 相机获得。该相机每 50 毫秒可以拍摄 1000 帧照片，并配有一个 105 mm 可见光镜头。其每个像素代表的空间精度为 23.8 mm。它通过在镜头前加装一个 532±3 nm 的单色光滤光片来实现单色光测量。

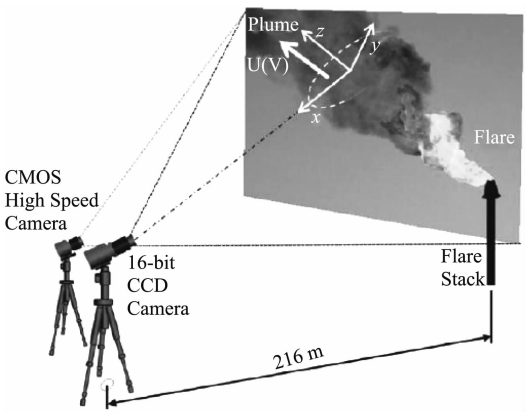

图 9 Sky-LOSA 方法的实验设置图

2.4 双波长红外传感器监测技术

由于傅里叶红外光谱仪和超光谱成像仪价格昂贵，且现场环境经常伴随雨雪风沙等恶劣天气，因此它们并不适合长期的室外监测应用。美国 Williamson 公司和德国 LumaSense Technologies 公司都基于双波长红外传感器技

术研制了用于监测燃烧时黑烟排放情况的火炬燃烧监测仪，并可根据测量信号调节和控制消烟蒸气或空气。

双波长红外传感器使用两块窄带滤光片选择性地接收来自燃烧区的红外辐射。图 10 所示为 Williamson 公司生产的 FM-17-N4 型火炬监测仪。它测量的是火焰中 CO 和 OH 的相对辐射强度[13]，用于定性地反映燃烧区内的残氧量和碳氧比。燃烧区中的 OH 优先与碳黑发生氧化反应[14]。因此，当火焰内碳黑较多时，OH 的相对含量低；当火焰内碳黑较少时，OH 的相对含量高。基于燃烧区内 CO 与 OH 的比值，该仪器可输出用于判定燃烧是否有黑烟生成的信号。

图 10 Williamson 公司的 FM-17-N4 型火炬监测仪

仪器信号并不与黑烟的能见度或浓度有直接的对应关系，其目的是为了定位发烟点并使燃烧处在发烟点附近，且保持较高的燃烧效率[7-8]。图 11 所示为 FM-17-N4 型火炬监测仪的视场角范围。在现场使用该仪器之前，应将其瞄准镜对准火炬头，并选择合适的测量位置，以使视场角至少为火炬头直径的 3 倍，从而尽可能多地收集燃烧区的辐射能量。

与傅里叶红外光谱仪和超光谱成像仪相比，双波长红外传感器造价便宜，在配备吹扫、加热、防爆等装备后适于长期现场工作，且无需专业人员解读数据，可大大节省人工费用。但其缺点是仪器接收和计算的是视场范围

图 11 FM-17-N4 型火炬监测仪的视场角范围

内的平均辐射。因此，如果监测视场内含有多个火炬头或其他干扰火源，那么双波长红外传感器就无法判断黑烟排放的具体来源。另外，该仪器只能相对地定性反映黑烟的变化，并不具有量纲，所以没有明确的物理定义。

3 国内光学遥测技术及其应用

与欧美发达国家相比，我国的光学遥测技术还有明显差距，相关应用主要集中在危险气体泄露[15]、火灾防范[16]和大气环境监测[17]等领域。高架火炬污染排放监测研究及应用还比较缺乏。

中国石油化工股份有限公司的赵日峰和刘琎等人基于火炬视频，利用动态图像模式识别技术设计了一种由摄像机、硬盘录像机和图形服务器等构成的火炬排放流量实时监测系统[18-19]。该系统通过图像处理判断火焰大小，进而测量火炬流量排放。其测量精度在 10％以内，因此可以间接地控制火炬排放。

武汉科技大学的王昶文等人基于可见光辐射特性以及图像处理技术，设计了一种高架火炬火焰与黑烟遥测监控系统[20-21]。通过分析摄像机拍摄的火焰图片中黑烟像素面积与火焰像素面积的比值，可以判断火焰的燃烧状态并调节消烟蒸气量。

如图 12 所示，在获得拍摄的火焰图像之后，利用黑烟与火焰及背景的灰度级差别设定分割阈值，并对图像进行二值化处理。其中，黑色像素部分可近似认为是黑烟区域。

近两年来，中国船舶重工集团公司第七一一

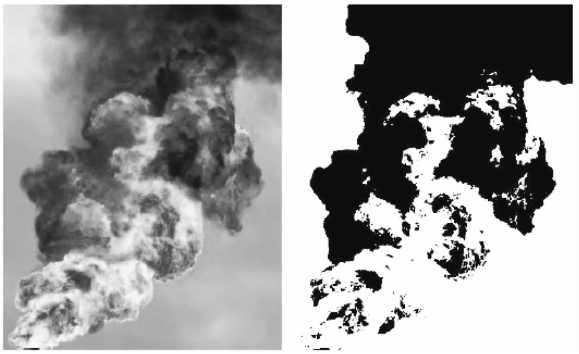

图 12 用二值化阈值法提取火焰黑烟面积

研究所展开了火炬火焰燃烧光学遥测产品的研制工作。他们采用可见光成像结合图像处理的方法提取火炬火焰的颜色和饱和度等特征，并利用帧间差分等算法捕捉和分析火焰的动态变化。

与中红外成像技术相比，可见光成像在能见度低的情况(如黑夜或雨雾等天气)下接收到的辐射能少，受到的干扰多，所以需要利用图像增强等技术作进一步处理。但由于具有造价低、算法成熟等特点，该技术是一种很有潜力的监测手段，并具有广阔的推广前景。

4 结语及展望

自 20 世纪 80 年代以来，针对高架火炬废气燃烧的光学遥测技术发展迅速，目前已有多种仪器在现场得到了应用。但仍有一些关键技术点需要继续探索，比如：

(1)监测仪器要朝被动接收、低成本、专业化的方向发展，且具有集成数据处理功能，以省去专业人员现场解读数据的工作；

(2)监测仪器要能适应现场测量条件，以抵御天气和气候变化对信号接收带来的衰减或干扰；

(3)随着数字信号处理技术、图像处理技术和嵌入式系统技术的发展，监测技术的性能、测量精度以及算法处理都将会得到不断优化。

与国外相比，我国在高架火炬污染排放监测方面还有明显不足。除了要提升仪器自主研发和加工制造水平之外，我们还需要增强环保意识，大力推广和加强光学监测设备在现场环境中的应用。

参考文献

[1] Elvidge C D, Ziskin D, Baugh K E, et al. A Fifteen Year Record of Global Natural Gas Flaring Derived from Satellite Data [J]. *Energies*, 2009, **2**(3): 595-622.

[2] Allen D T, Torres V M. TCEQ 2010 Flare Study Final Report [R]. Texas: TCEQ, 2011.

[3] Pohl J H, Tichenor B A, Lee J, et al. Combustion Efficiency of Flares [J]. *Combust Sci Technol*, 1986, **50**(4-6): 217-231.

[4] McDaniel M D. Flare Efficiency Study [R]. North Carolina: US EPA, 1983.

[5] US Environmental Protection Agency. Method 9-Visual Determination of the Opacity of Emissions from Stationary Sources [S]. Code of Federal Regulations (Part 60, Title 40), 1991.

[6] Clean Air Engineering Inc. Performance Test of a Steam-assisted Elevated Flare with Passive FTIR-Detroit [R]. Detroit: Marathon Petroleum Company, 2010.

[7] URS Corporation. Passive FTIR Phase I Testing of Simulated and Controlled Flare Systems Final Report [R]. Texas: TCEQ, 2004.

[8] ENVIRON. Cost Analysis of HRVOC Controls on Polymer Plants and Flares [R]. Texas: TCEQ, 2008.

[9] Zeng Y, Morris J, Dombrowski M. Validation of a New Method for Measuring and Continuously Monitoring the Efficiency of Industrial Flares [J]. *J Air Waste Manage Assoc*, 2015, **66**(1): 76-86.

[10] Johnson M R, Devillers R W, Yang C, et al. Sky-scattered Solar Radiation Based Plume Transmissivity Measurement to Quantify Soot Emissions from Flares [J]. *Environ Sci Technol*, 2010, **44**(21): 8196-8202.

[11] Johnson M R, Devillers R W, Thomson K A. Quantitative Field Measurement of Soot Emission from a Large Gas Flare Using Sky-LOSA [J]. *Environ Sci Technol*, 2011, **45**(1): 345-350.

(下转第 27 页)