

文章编号:1002-2082(2011)02-0261-06

火焰周边扰流脱火效能的图像分析技术

蒋晓刚¹, 石 侃², 罗育洪¹, 王 涌²

(1. 海军大连舰艇学院 研究生二队, 辽宁 大连 116018; 2. 海军大连舰艇学院 航海系, 辽宁 大连 116018)

摘 要:脱火现象的分析研究是喷射火灾脱火法施救等诸多技术的重要基础。论文提出并较为深入地研究了火焰周边扰动气流脱火效能的图像分析技术。详细阐述了技术思想, 分析了图像的获取及其信息的处理过程, 建立了求解表征扰流脱火效能的火焰脱开距离数学模型, 并通过专门设计的实验, 初步验证了这一分析技术的可行性, 为脱火现象的分析研究提供了重要的技术基础。

关键词:消防工程技术; 脱火; 射流; 喷射火焰; 图像分析

中图分类号: TN247; O381; TP752

文献标志码: A

Calculative method for fire lift-off capability of perturbation flow based on image parameters

JIANG Xiao-gang¹, SHI Kan², LUO Yu-hong¹, WANG Yong²

(1. Postgraduate Team 2, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China;

2. Dept. of Navigation, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China)

Abstract: As the research about lift-off fire is the foundation of lift-off extinguishing against jet fire, the calculative method based on image parameters was proposed for studying the fire lift-off capability of perturbation flow surrounding flame. Firstly, the calculative method was explained. Then, the image acquisition and processing were introduced, and the mathematic model was established to calculate the lift-off distance, which represented the fire lift-off capability of the flow. Finally, the experiment was designed and the feasibility of the method was validated.

Key words: fire extinguishing technology; lift-off fire; jet flow; jet flame; image analysis

引言

脱火法施救技术是为克服现有喷射火灾施救代价高、效率低、方法器材通用性差等固有问题而提出的一种新型高效低耗通用技术^[1-2]。脱火施救的原理基础是利用火焰周边气流能够破坏火焰位置稳定性, 扰动火焰使其脱离燃料喷口燃烧, 因此其研究离不开不同工况扰流的脱火效能分析。此外, 火焰位置稳定性历来是工程燃烧质量的重要指标, 相关燃烧参数的测量也是众多研究的重点和热点。例如, A. Palacios 等人采用红外成像的

方法测量了火焰的长度^[3]; 陈志斌等人利用图像亮度统计分析了火焰的高度特征^[4]; Phillip M. Brisley 等人构建了基于单色 CCD 摄影机的火焰三维温度场测量系统^[5]; A. G. Hendricks 等人使用调谐激光接收器测量了火焰的动力学特性^[6]; 赵建荣等人采用了平面激光诱导荧光技术 (PLIF) 测量了火焰中 OH 的分布等^[7]。然而, 现有研究几乎没有涉及火焰脱开距离 (火焰根部与燃料喷口的距离) 的测量。由于不同流动强度、流场形式和理化性质的扰动气流对喷射火焰位置稳定性的

收稿日期: 2010-10-25; 修回日期: 2010-11-02

作者简介: 蒋晓刚 (1987—), 男, 河南许昌人, 硕士研究生, 主要从事军事航海安全保障与防护技术工作。

E-mail: music@163.com

影响存在差别,即具有不同的脱火效能,这就需要有针对性地对不同扰流工况的相应脱火效能展开深入、全面的研究。为此,本文提出利用数字图像处理的方法研究火焰周边不同工况扰流脱火效能的新思路,旨在提供具有装置简易、使用方便、处理快捷等优点的火焰周边扰流脱火效能研究的一种新方法。

1 理论研究

1.1 分析的技术思想

脱火法施救技术提出的火焰周边扰流的脱火效能,特指驻定在燃料喷口处的喷射火焰,如图1(a)所示,由于燃烧前沿面的速度平衡被扰动气流破坏而引起脱火现象如图1(b)所示,火焰根部与喷口边缘在图像平面的投影距离^[8]。显然,脱火燃烧时火焰根部与燃料喷口的距离可以通过图像来反映,并且由于脱火法施救设计的扰动气流脱火效果稳定,相应图像容易直接获取,因此不同工况扰流的脱火效能完全可以借助图像处理技术来分析。

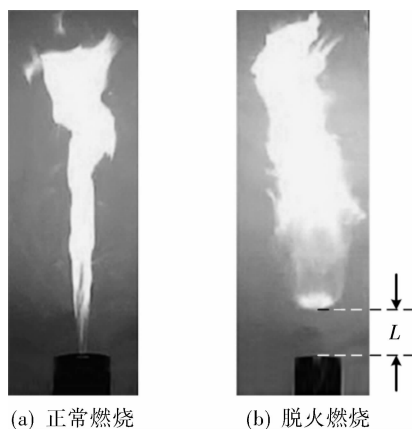


图1 燃烧现象示意图

Fig. 1 Different kinds of flames

研究表明,导致脱火的根本原因在于可燃混合物的流速大于燃烧传播的速度^[9-11]。脱火法施救设计的扰动气流主要通过汇流提速和多效缓燃两种效应的综合作用,使喷射火焰脱离燃料喷口燃烧。汇流提速,就是在燃料射流上施加一股与其相交的扰动射流,使两者相互作用形成一股汇合流,提高可燃混合物的流速;多效缓燃则是通过两股射流的相互掺混实现稀释、降温、负催化等多种效果,综合缓慢燃烧反应,降低燃烧传播的速度。本文的实验旨在对其进行原理性验证分析,

由于实验装置尺度有限,仅凭肉眼直接观察不易分辨扰流脱火效果的差别,因而需借助相应的分析技术。

目前,火焰几何参数的测量主要有目测法、特征参数法和图像测量法^[4,12-14]。实验时测者用眼睛直接观察火焰几何参数的方法即为目测法,该方法较为简便,但易受测者主观因素的影响,存在较大误差;特征参数法则是利用实验仪器测量火焰内部的各种参数(如压力、电荷、温度等)间接获取火焰的几何参数。该方法测量精度较高,数据真实可信,但对仪器设备的要求较高,并且设备容易对流场造成干扰。图像测量法,就是通过对拍摄获取的火焰图像进行分析,间接测量火焰的几何参数。与其他方法相比,它能很好地反映火焰的结构,具有实现简单、成本低、测量准确等优点^[14]。文献^[14]也提到可以考虑应用这一方法测量火焰的浮起高度(脱火距离),但未作深入研究。本文通过脱火图像研究火焰的脱开距离,进而分析不同工况扰流的脱火效能,这是图像测量法的一种实际应用和发展完善,它不仅易于准确测量火焰的几何参数,而且不会对流场造成干扰,更便于分析扰流的脱火效能。

为实现这一技术思想,特从图像处理和数学模型的建立两个方面进行研究。

1.2 图像处理

由于火焰根部边缘与燃料喷口的距离各不相同,且实验发现其最小距离与扰动气流的位置及宽度等固定参数有关,为有效表征扰流的脱火效能,特选择火焰在扰流方向上脱开的最远距离作为研究对象,并对相关参数作如下假设:火焰根部边缘与燃料喷口边缘在扰流方向上的最大投影距离为 $L_{\max}$,其所占像素个数为 n_L ;实验采用的扰流喷管外径为 d_A ,其所占像素个数为 n_A 。

获取脱火图像后,需要从中逐一获取 n_A 和 n_L 。因 d_A 已知,得到所需的参数后,即可通过建立的数学模型求出表征扰流脱火效能的 $L_{\max}$ 。为此,特将 n_A 和 n_L 的求取方法设计如下。

求解设计基础:脱火图像可表示为灰度从0到255取值的像素集合,故可通过对像素进行灰度判别来统计扰流喷管外径和火焰脱开距离所占像素点的个数。

n_A 的求解思路:首先将脱火图像转换为灰度图像,再根据扰流喷管边缘的灰度值确定相应阈

值 a , 将灰度图像转换为二值图像 1, 然后从图像的喷管侧开始按列遍历各像素, 并分别对各列白色像素点个数进行统计(如果该列的统计值为零, 则表明遍历已达喷管边缘), 所得的最大值即为 n_A 。

n_L 的求解思路: 根据火焰根部边缘的灰度值确定相应阈值 b , 将已有灰度图像转换为二值图像 2, 然后从喷管的列边缘(求解 n_A 时已获取)开始向火焰侧按行遍历各像素, 对各行的像素点进行判断, 记录第一个白色像素点(火焰根部边缘)与燃料喷管边缘的距离, 所得的最大值即为 n_L 。

1.3 数学模型的建立

获取上述参数后即可对 $L_{\max}$ 进行求解。下面对图像二值化阈值和 $L_{\max}$ 的计算模型分述如下:

1) 阈值的计算

图像参数的获取需要对像素进行灰度判别, 而判别的关键则在于图像二值化阈值。以阈值 a 的计算为例, 已知像素点的灰度从 0 到 255 取值, 图像二值化函数“im2bw”根据阈值 a 得出介于 0 ~ 255 之间的门限值 a' , 再将像素点按灰度二值化为 0(黑色, 低于门限)或 1(白色, 高于门限)。借助 Matlab 图像浏览器(“imview(~)”)的像素区域工具, 根据喷管边缘各像素点的灰度值确定门限值 a' , 则阈值 a 的计算如下:

$$a = a' / 225 \quad (1)$$

2) $L_{\max}$ 的计算

在采集的脱火图像中, 火焰和喷管具有相同的放大/缩小倍数, 因此有:

$$\frac{n_A}{d_A} = \frac{n_L}{L_{\max}} \quad (2)$$

由于 d_A 已知, n_A 和 n_L 已经求得, 对(2)式进行变换, 即可得到火焰根部边缘与燃料喷口边缘在扰流方向上的最大投影距离:

$$L_{\max} = d_A \times \frac{n_L}{n_A} \quad (3)$$

2 实验研究

为验证扰流脱火效能图像分析技术的可行性, 并为后续的理论研究及相关工程实现提供实验依据, 特设计制作了相交射流扰动脱火的原理性实验装置, 并进行了可行性验证实验。

2.1 实验装置与方法

实验装置由机械部分和硬件部分构成, 如图 2 所示, 其主要设备: 1 燃料气源(C_4H_{10}); 2 扰流气

源(空气); 3、4 阀门; 5、6 流量计; 7 燃料喷管; 8 扰流喷管; 9 数码相机; 10 计算机。图 3 中, 燃料喷管竖直放置, 扰流喷管水平放置(垂直高度 h 为 0.8 mm, 水平距离 d 为 0.4 mm, 即两喷口边缘相抵), 喷口相对且轴线相交(夹角 θ 为 90°), 其外径 d_F 和 d_A 分别为 0.8 mm 和 1.6 mm, 两者底端均有进气孔与气源连接; 数码相机为佳能 A710, 以 2592×1944 像素分辨率, 极精细品质, 垂直于燃料喷口横截面拍摄。实验时整套装置处于无外界气流扰动的相对封闭空间。

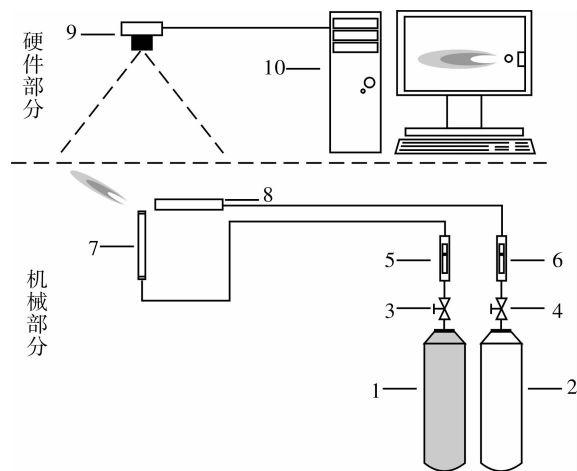


图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Experimental setup

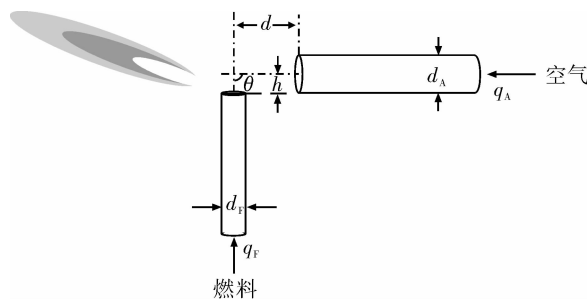


图 3 实验装置喷口部分细节

Fig. 3 Detail about nozzles of the experimental facility

实验的具体步骤如下:

第一步, 设备调整。打开阀门 3 并点燃喷射燃料, 观察火焰状态, 调节日门 3 使火焰驻定在燃料喷口处正常燃烧, 记录燃料流量 q_F 。在无气流扰动的情况下, 火焰始终驻定在燃料喷口处稳定燃烧, 火焰根部与喷口紧密接触。

第二步, 数据采集。打开阀门 4 使喷管 8 喷射气体, 此时射流的燃烧将受到气流的扰动, 观察火焰状态, 调节日门 4 控制扰流流量, 使火焰脱离喷口燃烧, 营造脱火现象。记录扰流流量 q_A 并拍摄脱火图像。重复此步骤以获取多幅脱火图像。

第三步,数据处理。从采集的数据中挑选出火焰根部边缘清晰、明显的脱火图像作为分析样本,导入 Matlab 的工作目录,即可按前述方法获得表征扰流脱火效能的 $L_{\max}$ 。

2.2 实验结果与数据处理

在实验步骤二中,当扰流达到一定强度时即可出现类似图 4 所示火焰根部凹陷明显的脱火效果。图中, $L_{\max}$ 为火焰根部边缘与燃料喷口边缘在扰流方向上的最大投影距离, $L_{\min}$ 为最小距离。已开展的探索性实验发现 $L_{\min}$ 与扰流喷管的位置及外径等固定参数有关,因仅为验证本技术的可行性,故只测定某一扰流流量 q_A 时的 $L_{\max}$ 值(其他参数: $d_F=0.8\text{ mm}$; $d_A=1.6\text{ mm}$; $q_F=0.39\text{ mL/s}$; $h=0.8\text{ mm}$; $d=0.4\text{ mm}$)。

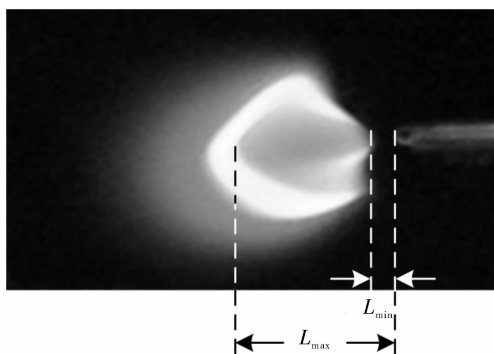


图 4 扰动脱火示意图

Fig. 4 The lift-off flame caused by the disturbing jet flow

实验数据及处理:

1) 按照前述程序对样本图像(图 4)进行处理,可得灰度图像(图 5)。借助 Matlab 图像浏览器的像素区域工具观察喷管边缘和火焰根部边缘的灰度值,确定门限值分别为 26 和 227,根据(1)式计算可得阈值 a 、 b 分别为 0.10 和 0.89;

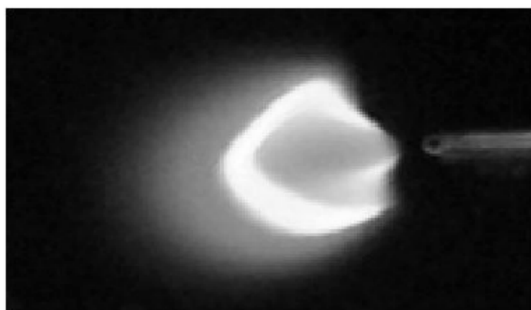


图 5 扰动脱火的灰度图像

Fig. 5 The gray level image of lift-off flame

2) 利用前述程序,可将灰度图像(图 5)按照阈值 a 、 b 分别转换为二值图像 1、2(图 6、7),并可求得 n_A 和 n_L (如表 1 所示)。

3) 按照公式(3)对已获取的 n_A 和 n_L 等参数进行计算,可求得表征扰动气流脱火效能的 $L_{\max}$ (如表 1 所示)。



图 6 阈值为 0.10 的扰动脱火二值图像

Fig. 6 The binary image with threshold value 0.10

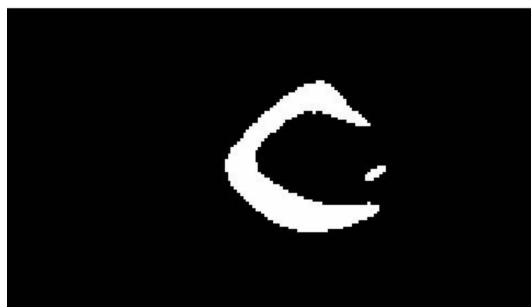


图 7 阈值为 0.89 的扰动脱火二值图像

Fig. 7 The binary image with threshold value 0.89

表 1 图像处理获取的相关数值

Table 1 Parameters of the sample image

实验相关参数	对应数值
图像对应扰流流量 $q_A/\text{mL} \cdot \text{s}^{-1}$	3.98
扰流喷管外径 d_A/mm	1.6
扰流喷管外径所占像素个数 n_A	13
$L_{\max}$ 所占像素个数 n_L	66
脱火效能 $L_{\max}/\text{mm}$	8.12

2.3 实验结果分析与结论

由表 1 可知,流量为 3.98 mL/s 的扰动气流可将火焰吹脱 8.12 mm,这一结果是否合理显然有待于进一步分析。下面特以 2 个简单实验来加以初步说明,基本思路是:在前述实验装置的基础上,通过加装标尺和分规截取两种方法便于操作的近似方法,测量相同实验条件下火焰根部边缘与燃料喷口边缘在扰流方向上的最大投影距离,再与本文方法求得的 $L_{\max}$ 进行比较,分析其合理性。具体内容如下:

1) 在靠近燃料喷口但不影响实验流场的区域水平放置一标尺,要求与扰流喷管同高且平行,

并在数码相机的拍摄范围之内。重做实验步骤一、二(为使结果具有可比性,令 q_F 为 0.39mL/s、 q_A 为 3.98mL/s),并从采集的数据中挑选出火焰根部边缘清晰、明显的脱火图像作为分析样本(如图 8 所示),通过 Photoshop 的标尺功能,量取火焰脱开距离并与图像中的标尺进行比对,得出本方法的测量结果(如表 2 所示)。



图 8 带标尺的脱火图像

Fig. 8 The lift-off flame with ruler

2) 移除方法一中加装的标尺,重做实验步骤一、二(要求同方法一,但不需拍摄图片),当火焰呈现类似图 8 的脱火效果时,直接用分规水平地在火焰上截取燃料喷口边缘与火焰根部边缘的最大距离并迅速撤走(注意动作迅速,避免分规尖端对实验流场造成较大干扰),再用标尺测量分规截取的距离,得出本方法的测量结果(如表 2 所示)。

为便于分析比较,特将所得有关数据列于表 2。

表 2 不同方法测量结果比较

Table 2 Comparison among different measurements

测量方法	$L_{\max}/\text{mm}$ 测量结果
图像分析技术	8.12
标尺图像法	8.2
分规截取法	8.4

表 2 的数据显示,相同实验条件下,3 种分析方法的测量结果相近,最大差值为 0.28 mm(相差在 4%以内)。由此可见,图像分析技术求得的火焰根部边缘与燃料喷口边缘在扰流方向上的最大投影距离可认为是合理的,这进而说明本文设计

的利用图像分析技术研究火焰周边不同工况扰流的脱火效能是可行的。并且,该图像分析技术可以获得更好的测量精度,不干扰实验流场,不存在操作误差,不受测者主观影响,具有装置简易、使用方便、处理快捷等优点。

3 结束语

火焰周边扰动气流的脱火效能是喷射火灾脱火法施救技术等实际应用研究的重要基础。文中提出并较为深入地研究了火焰周边扰流脱火效能的图像分析技术,其可行性得到了相应实验的初步验证。由于本文研究中作了相应简化,比如采用火焰根部边缘与燃料喷口边缘在扰流方向上的最大投影距离来表征扰流的脱火效能,仅与简单的实验方法比较测量合理性,缺乏理论推导计算等。因此,火焰脱开距离的精确测量,火焰根部轮廓的完整提取,扰动气流不同角度、高度、温度和组分等条件所带来的影响等诸多问题,亟待后续深入研究。

参考文献

- [1] 王文俊,郭福民.科威特的井喷已成为历史[J].国外油田工程,1992(3):64-66.
WANG Wen-jun, GUO Fu-min. The blowout of Kuwait is over[J]. Engineering of Foreign Oilfield, 1992(3): 64-66. (in Chinese with an English abstract)
- [2] 张建伟,宋君.临危不惧降火魔——山东滕州输油站管道破裂火灾事故扑救纪实[J].山东消防,2003(6):32-33.
ZHANG Jian-wei, SONG Jun. The record about extinguishing against Tengzhou oil pipe break fire[J]. Shandong Firefighting, 2003(6): 32-33. (in Chinese with an English abstract)
- [3] PALACIOS A, MUÑOZ M, CASAL J. Jet fires: an experimental study of the main geometrical features of the flame in subsonic and sonic regimes[J]. Environmental and Energy Engineering, 2008, 55(1): 256-263.
- [4] 陈志斌,胡隆华,霍然,等.基于图像亮度统计分析火焰高度特征[J].燃烧科学与技术,2008,14(6):557-561.
CHEN Zhi-bin, HU Long-hua, HUO Ran, et al. Flame height characteristics based on image lumi-

- nance[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2008, 14(6): 557-561. (in Chinese with an English abstract)
- [5] BRISLEY P M, LU G, YAN Y, CORNWELL S. Three-dimensional temperature measurement of combustion flames using a single monochromatic CCD camera[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2005, 54(4): 1417-1421.
- [6] HENDRICKS A G, VANDSBURGER U, SAUNDERS W R, A et al. The use of tunable diode laser absorption spectroscopy for the measurement of flame dynamics[J]. Measurement Science and Technology, 2006, 17(1): 139-144.
- [7] 赵建荣, 陈立红, 俞刚, 等. 平面激光诱导荧光显示火焰中 OH 的分布图像[J]. 流体力学实验与测量, 2000, 14(2): 67-71.
- ZHAO Jian-rong, CHEN Li-hong, YU Gang, et al. Planar laser induced fluorescence imaging of OH distribution in flames[J]. Experiments and Measurements in Fluid Mechanics, 2000, 14(2): 67-71. (in Chinese with an English abstract)
- [8] KIRAN D Y, MISHRA D P. Experimental studies of flame stability and emission characteristics of simple LPG jet diffusion flame[J]. Fuel, 2007, 86(10/11): 1545-1551.
- [9] 郭伯伟. 工程燃烧原理讲座[J]. 冶金能源, 1985, 4(2): 59-65.
- GUO Bo-wei. Engineering Combustion Theory[J]. Metallurgy Energy, 1985, 4(2): 59-65. (in Chinese with an English abstract)
- [10] American Petroleum Institute Recommended Practice 521. Guide for pressure-relieving and depressuring systems[M]. 4th ed. Washington, D. C.: American Petroleum Institute, 1997: 39-44.
- [11] CHEATHAM S A, ORAN E S. An analysis of lift-off in laminar diffusion flames[R]. Washington, D. C.: Naval Research Lab, 2001.
- [12] 霍然, 胡源, 李元洲. 建筑火灾安全工程导论[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1999.
- HUO Ran, HU Yuan, LI Yuan-zhou. The safety engineering of structure fire[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1999. (in Chinese)
- [13] KARLSSON B, QUINTIERE J G. Enclosure fire dynamics[M]. Florida: CRC Press, 2000.
- [14] 王勇, 段志轩, 蒋利桥, 等. 基于数字图像处理的微火焰测量技术[J]. 应用光学, 2009, 30(4): 631-634.
- WANG Yong, DUAN Zhi-xuan, JIANG Li-qiao, et al. Measurement of micro-scale flame based on digital image processing[J]. Journal of Applied Optic, 2009, 30(4): 631-634. (in Chinese with an English abstract)