

中国航空学会

第二届飞机防火系统学术研讨会

论文集

Proceedings of CSAA Symposium on Aircraft
Fire Protection System
(2nd SAFPS 2015)

主编 张和平 副主编 陆松 程旭东



中国科学技术大学出版社

中国航空学会

第二届飞机防火系统学术研讨会

论文集

Proceedings of CSAA Symposium on Aircraft
Fire Protection System

(2nd SAFPS 2015)

主编 一张和平 副主编 一陆松 程旭东



内 容 简 介

本书为中国航空学会第二届飞机防火系统学术研讨会的论文集,共收录论文 42 篇,围绕飞机防火基础理论、先进飞机火灾探测技术、清洁高效飞机灭火技术、飞机火灾模拟仿真、飞机防火系统试验验证技术、飞机火灾人员疏散及应急、飞机材料燃烧特性与阻燃技术等方面进行了研究和探讨。

本书可供全国消防科技工作者学习、交流。

图书在版编目(CIP)数据

中国航空学会第二届飞机防火系统学术研讨会论文集/张和平主编. —合肥:中国科学技术大学出版社,2017. 1

ISBN 978-7-312-04044-3

I. 中… II. 张… III. 飞机防火—学术会议—文集 IV. TU998. 1-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 189017 号

出版 中国科学技术大学出版社
安徽省合肥市金寨路 96 号,230026
网址: <http://press.ustc.edu.cn>
印刷 合肥市宏基印刷有限公司
发行 中国科学技术大学出版社
经销 全国新华书店
开本 710 mm×1000 mm 1/16
印张 16.75
字数 342 千
版次 2017 年 1 月第 1 版
印次 2017 年 1 月第 1 次印刷
定价 48.00 元

前 言

为推动我国飞机防火科学技术的发展,扩大各单位间的学术交流,提高学术交流水平,2015年11月19~20日在合肥召开了“中国航空学会第二届飞机防火系统学术研讨会”。本次会议共征集论文42篇,全部编入《中国航空学会第二届飞机防火系统学术研讨会论文集》,供全国消防科技工作者学习、交流。

本次会议以“先进与环保”为主题,聚集了国内航空企业、高等院校、科研院所的专家学者,围绕飞机防火基础理论、先进飞机火灾探测技术、清洁高效飞机灭火技术、飞机火灾模拟仿真、飞机防火系统试验验证技术、飞机火灾人员疏散及应急、飞机材料燃烧特性与阻燃技术等方面进行了研究和探讨,取得了一些可喜的成果。

本次会议由中国科学技术大学、中航工业天津航空机电有限公司、中国航空学会航空机电、人体与环境分会、中国航空学会飞机防火系统专业委员会主办,由中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室、中航工业天津航空机电有限公司承办,在此对上述单位表示感谢。本书审稿过程中还得到了汪箭、张永明、秦俊、余达恒、陈龙、纪杰、赵建华、张瑞芳、李开源、程旭东、陆松、周勇、杨晖、龚伦伦等老师的支持,在此表示感谢。

目 录

前言	(i)
环境压力对飞机货舱火灾烟气特性作用的数值模拟研究	(1)
低气压下火焰视频图像特征研究	(8)
多因素下飞机客舱人员安全疏散效率分析	(15)
飞机电气防火技术浅析	(22)
飞机发动机舱灭火剂用量计算、验证与优化设计	(28)
飞机发动机舱失火仿真研究	(33)
飞机防火试验中的燃烧反应动力学模型研究	(42)
飞机火警探测系统技术综述	(48)
飞机火警误报警研究与对策分析	(53)
飞机火警系统虚警故障处理	(63)
飞机货舱低气压环境对火灾探测参量影响的研究	(66)
飞机货舱烟雾探测系统布置优化技术及平台开发	(72)
复合抛物面聚光器在光电感烟探测器的应用研究	(79)
高温碟形双金属片动作响应特性技术研究	(85)
固定式航空灭火瓶设计和试验技术	(90)
光学迷宫对飞机货舱感烟探测器响应性能的影响	(98)
焊接技术对航空灭火气瓶质量的影响	(104)
航空发动机防火试验的对流和辐射传热计算	(113)
航空活塞发动机点火强度均衡性测试及防火研究	(119)
航空灭火器 O 型圈密封设计探讨	(127)
航空灭火系统适航审定解析	(132)
航空手提式灭火瓶泄漏故障分析及改进设计	(140)
火灾情况下金属药筒装药的热安全性实验研究	(145)
基于电容传感器的飞机灭火管网两相流空隙率测量方法	(150)
基于红外吸收法的哈龙替代灭火剂 HFC-125 的浓度监测技术	(155)
基于耦合火灾影响疏散模拟的民航客机火灾疏散安全评价	(160)
军用飞机机载防火系统试验厂房设计	(167)
军用无人机防火系统适航性要求设计和验证浅析	(171)



民用飞机防火区域划分 (182)

民用飞机烟雾探测器研究 (186)

膜制氮技术在民用飞机油箱防火防爆上的应用与发展 (192)

某型飞机 APU 舱灭火系统设计 (199)

某型机副翼结构防火设计研究 (205)

声弛豫吸收谱线峰值点在一氧化碳气体探测中的应用 (212)

双波长气溶胶粒径传感方法及其火灾烟雾探测器 (217)

烟源温度对飞机货舱烟雾扩散的影响研究 (222)

液态 1211 灭火剂中氮气溶解度的计算 (230)

一种航空用多支耳高压灭火气瓶的一体成型优化设计及工艺研究 (236)

直升机固定式灭火系统技术要求分析 (240)

智能化建模及仿真技术在防火产品研发中的应用 (245)

超薄环保阻燃涂层在飞机指定火区的防火应用研究 (251)

光纤传感系统应用于飞机货舱火灾探测的前景浅析 (256)

环境压力对飞机货舱火灾烟气特性作用的数值模拟研究

曹承阳,陆松,刘长城,管雨,张和平

(中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室,安徽 合肥 230026)

摘要:飞机货舱火灾是飞机火灾预防工作的重心。本文针对飞机货舱油池火灾,基于STAR-CCM+流体动力学软件,通过对数值模拟结果与实验结果进行对比和分析,对飞机货舱火灾中烟气分布、扩散和运动规律进行了研究。分析了不同环境压力下烟气层的流动扩散规律,温度分布状态以及烟气中 CO_2 气体浓度的分布规律。研究表明,环境压力对烟气层分布、烟气层温度以及烟气层中 CO_2 浓度有着很大的影响,低压下顶棚处烟气聚集后温度更高。通过与实验数据进行对比,可见STAR-CCM+软件在飞机货舱火灾烟气特性数值模拟方面能够提供可靠的结果。

关键词:压力;飞机货舱;烟气特性;数值模拟;STAR-CCM+

中图分类号:X936;X932

文献标识码:A

0 引言

火灾预防是飞机安全飞行的重要因素,如果飞机飞行过程中发生火灾而没有得到及时的处理,就可能导致飞机的坠毁,造成严重的人员伤亡与财产损失。飞机飞行过程中,货舱内压力随飞行高度增加而降低,当飞机在平流层中平稳飞行时,加压后的货舱内环境压力为80 kPa。飞机货舱由于舱内环境条件的特殊性以及火灾探测系统的局限性,往往是飞机火灾发生的根源,一直被认为是飞机防火的重要区域。

针对环境压力与可燃物的燃烧特

征以及烟气特性之间的关系,国内外一些学者做了一系列的研究。美国国家航空宇航局(NASA)的Dirsh, Hshien等人^[1]研究了国际空间站内的低压低氧火灾和阴燃燃烧,其主要目的是分析采用二氧化碳(CO_2)灭火时对于氧气浓度的影响,从而研究火灾对空间站内氧气资源的消耗。杨满江^[2]研究了高原环境下压力对气体燃烧的特征及烟气特性,结果表明随着环境压力的降低,火焰高度减小,燃烧反应速率减慢,火焰温度降低。王洁^[3]对低压环境下货舱内火灾的热力学特征进行了研究,结果表明顶棚最高温升随压力的降低而增加,并建立了适用于低压情况下的



顶棚最高温升预测公式。Papa, Ramon 等人^[4]在 2015 年将计算流体力学 (CFD) 软件引入货舱火灾数值模拟领域, 结果表明基于雷诺平均-纳维-斯托克斯方程和标准 $k-\epsilon$ 湍流方程的 CFD 软件在预测货舱顶棚处烟气分布与温度分布方面有着较高的可靠度。

近年来, CD-adapco 公司开发的新一代 CFD 求解软件 STAR-CCM+ 在精密流体力学数值模拟应用研究中逐渐得到应用^[5-7], 其特有的多面体网格划分功能较好地改善了数值模拟计算结果的精度。笔者以该软件为基础, 壁面函数选用 High Y+ Wall Treatment 模型, 采用有限速率涡耗散 (EBU) 紊流模型计算燃烧速率, 采用拉格朗日模型计模拟计算域内的流体运动, 通过调整不同环境压力研究环境压力对烟气特性的影响。

1 火灾模型

本文火灾模型中舱体尺寸依照波音 737-700 前货舱尺寸设计, 内部尺寸为 4 670 mm, 高为 1 120 mm, 底部宽为 1 220 mm, 顶部宽为 3 000 mm, 火源正上方及顶棚出布置有温度探测点及气体探测点, 如图 1 所示。

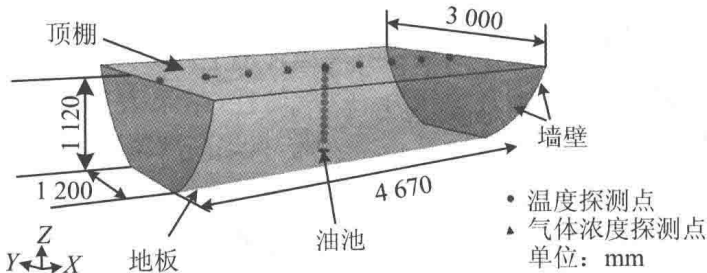


图 1 波音 737-700 前货舱模型

舱内火源设置为边长 10 mm × 10 mm, 高度 2 mm, 模拟采用的正庚烷油池火火源功率依照实验采集数据进行数值拟合得到, 可通过式 (1.1) 求得

$$Q' = \varphi \cdot m' \cdot \Delta H = \varphi \cdot m'^n \cdot A \cdot \Delta H \tag{1.1}$$

其中, φ 表示正庚烷燃烧效率, 一般默认为 90%; A 表示燃料表面面积, 本文中为 0.01 m²; m' 表示质量损失速率 (MLR), 由实验测得; m'^n 表示单位面积的质量损失速率; ΔH 表示正庚烷燃烧热, 可查得为 4 806.6 kJ/mol。图 2 为常压下不同火源位置时测得的质量损失速率 (MLR)。表 1 为燃烧稳定阶段火源质量损失速率。

表 1 燃烧稳定阶段火源质量损失速率

相对压力 (kPa)	100	90	80	70
中央火	0.127	0.120	0.111	0.106

此次数值模拟主要针对货舱内正庚烷油池火持续燃烧, 生成的烟气在浮力驱动下与顶棚碰撞, 形成顶棚射流后沿顶棚扩散运动的过程, 在合适位置布置温度、气体浓度探测点采集数据。火源采用有限速率涡耗散 (EBU) 紊流模型, 将高温烟气的流动过程视为一个非定常的三维流体流动及传热传质过程。假设舱内气体为理想气体, 通过雷诺平

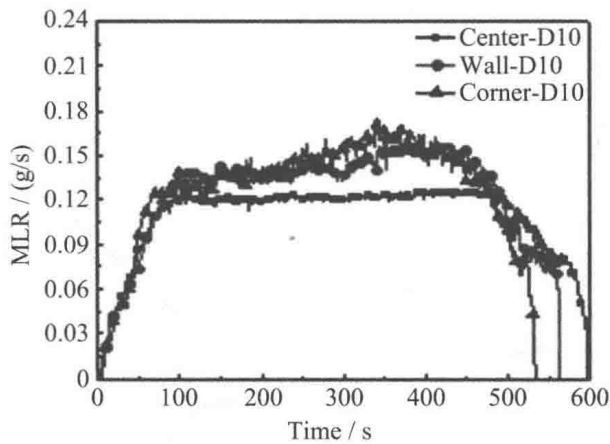


图 2 不同火源位置下质量损失速率随时间变化

均-纳维亚斯托克斯方程与能量方程联立来捕捉火源燃烧产物的运动。运动过程中还应遵循动量平衡及物质守恒原则,即:连续性方程、动量方程和组分方程。

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho V_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1.2)$$

动量方程:

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu_t + \mu) \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (1.3)$$

组分质量守恒方程:

$$\frac{\partial (\rho Y_s)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho V_j Y_s)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_s \frac{\partial (\rho Y_s)}{\partial x_j} \right] - w_s$$

采用 STAR-CCM+ 软件特有的多面体网格划分功能对模型进行网格划分,并于火源处进行局部加密,效果如图 3 所示。



图 3 网格划分结果

2 结果与讨论

2.1 压力对烟气温度的影响

压力对烟气温度的影响主要是由于压力对烟气羽流产生影响进而导致了烟气温度的变化,本文采用模型中火源置于舱体中心处,其烟气羽流的发展符合轴对称羽流的特性,故本文分析皆基于轴对称羽流假设。前人^[8,9]研究结果表明,影响不同压力下烟气温度的主要因素是空气密度和氧气分压,空气密度的变化将导致羽流卷吸空气的质量流量,氧气分压的变化将导致燃烧反应总体燃烧速率的变化。Heskestad 模型^[10]将卷吸进烟气羽流中的空气量视为烟气生成量,可用于估算烟羽流在烟



层以下的空气卷吸量。

弱浮力羽流的质量流量(kg/s)为

$$m_e = 0.24 \left(\frac{g \rho_\infty}{c_p T_\infty} \right) Q_c^{\frac{1}{3}} (z - z_0)^{5/3} \tag{2.1}$$

式中, ρ_∞ 是环境空气的密度(kg/m³); T_∞ 是环境空气的温度(K); c_p 是空气比热(kJ/kg/K); g 是重力加速度(m/s²); Q_c 是热释放速率中对流热(kW); z 是距离货源高度(m); z_0 是羽流虚点源的位置。

对 Heskestad 模型进一步推导出羽流中心线上温度

$$T_e = 9.1 \left(\frac{T_\infty}{g c_p \rho_\infty^2} \right) Q_c^{2/3} (z - z_0)^{-5/3} \tag{2.2}$$

式中, T_e 是羽流中心线上温度相对于环境温度(T_∞)的升高(K)。

所以,随着压力的降低,环境中的空气密度相应减小,根据式(2.1),羽流中卷吸的空气质量流量也减少;根据式(2.2),羽流中心线上温度升高,即烟气温度与压力呈反比。

图 4 是环境压力为 100 kPa 和 80 kPa 时货舱内不同位置探测点的烟气

温度图。由图 4 可看出,各探测点经历了燃烧刚开始时的快速增长过程后,在燃烧的初始阶段,随着燃料质量损失速率的增加,温度呈线性增长。当燃烧时间达到 100 s 时,由于火源燃料质量损失速率趋于稳定,燃料达到稳定燃烧,各探测点温度的上升趋势也趋于平缓,达到一个较为稳定的值,此时烟气层厚度维持一个稳定值,烟气温度的在一定范围内波动。且当环境压力降低时,温度都有不同幅度的上升,当环境压力为 90 kPa 和 70 kPa 时模拟实验结果也符合上述规律,这也与理论预测得的顶棚温升规律一致。

同时,我们也可从图 4 中发现,当环境压力降低,火源稳定燃烧时,探测点烟气温度测量值波动较大,这是因为当环境压力下降时,由于烟气温度的增加,烟气蔓延速率有所增大,与空气之间的热交换以及相互之间的紊流流动增强,进而导致了温度的较大幅度波动。

2.2 压力对烟气温度分布的影响

在烟气的研究中,常以烟气温度作

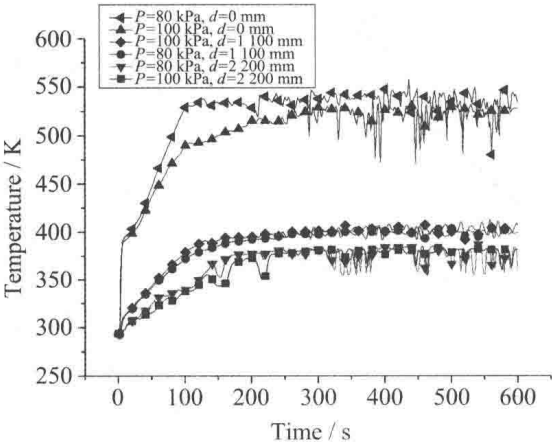


图 4 100 kPa 和 80 kPa 时不同位置探测点的温度曲线



为烟气分布的表征。图 5 是环境压力为 100 kPa 和 80 kPa 时舱内横截面处烟气温度分布图。从图中可以看出,燃烧时间分别为 180 s 及 300 s 时,环境压力为 100 kPa 时烟气层较厚,但烟气温度较低。随着压力的下降,烟气沉降速度更为缓慢,烟气层厚度降低。产生这些现象的原因是环境压力降低时,空气密度变小,火焰卷吸的空气量减少,驱动火羽流向上流动的浮力更强,从而使烟气沉降变缓,但烟气沿顶棚流动速率增加。这与王洁^[3]等人实验测得的结论一致。

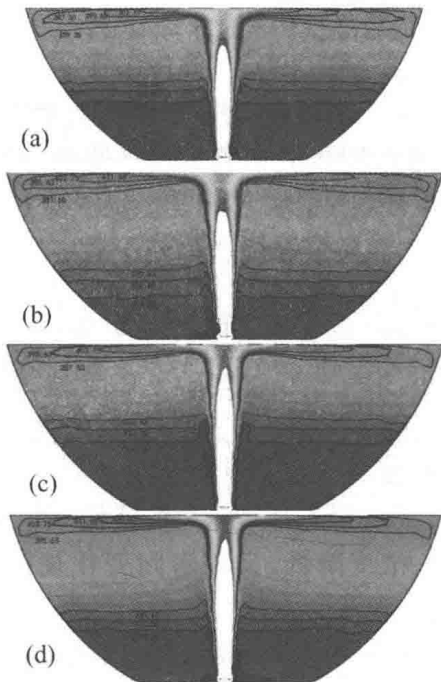


图 5 不同条件下货舱横截面处
烟气温度分布图

- (a) $t=180\text{ s}, P=100\text{ kPa}$;
- (b) $t=300\text{ s}, P=100\text{ kPa}$;
- (c) $t=180\text{ s}, P=80\text{ kPa}$;
- (d) $t=300\text{ s}, P=80\text{ kPa}$

2.3 压力对生成物 CO_2 浓度的影响

许多研究者在压力对气体浓度的影响方面做了许多的研究^[4,11,12]。Heskestad 无量纲分析结果为这些研究提供了理论基础,其中气体产物质量浓度定量表达关系式如下:

$$C_{(m)} \propto \left(\frac{g}{c_p T_0 \rho_0}\right)^{-1/3} \dot{m} \dot{Q}_c^{-1/3} Z^{-5/3} Y_g \tag{2.3}$$

式中, $C_{(m)}$ 是火羽流中心线高度 Z 处的燃烧气体产物质量浓度, Y_g 是燃烧气体生成率; $\dot{Q}_c = (1 - \chi_r) \dot{m} \Delta H_c$, ΔH_c 是燃烧热,由燃料和燃烧产物的化学组成决定,与压力无关,因此 $\dot{Q}_c \propto \dot{m}$, 方程 (2.3) 可表达为

$$C_{(m)} \propto \left(\frac{g}{c_p T_0 \rho_0}\right)^{-1/3} \dot{m}^{2/3} Z^{-5/3} Y_g \tag{2.4}$$

对于理论气体来说, c_p 与压力无关。将理想气体方程 $PM = \rho RT$ 带入上式,得到

$$C_{(m)} \propto \left(\frac{Rg}{PM}\right)^{-1/3} \dot{m}^{2/3} Z^{-5/3} Y_g \tag{2.5}$$

同时,实验中对不同环境压力下火源功率的研究可知: $\dot{m} \propto P^x$, 将其代入式 (2.5), 则在火羽流中心线高度 Z 处

$$C_{(m)} P^{\frac{1}{3} + \frac{2}{3}x} \tag{2.6}$$

上述理论分析表明气体质量浓度与压力有关,随着压力的降低而降低。

图 6 是不同环境压力下 CO_2 浓度随时间变化曲线。在整个燃烧过程中 CO_2 浓度的变化趋势呈线性,随着环境压力的降低, CO_2 浓度的增长速率减

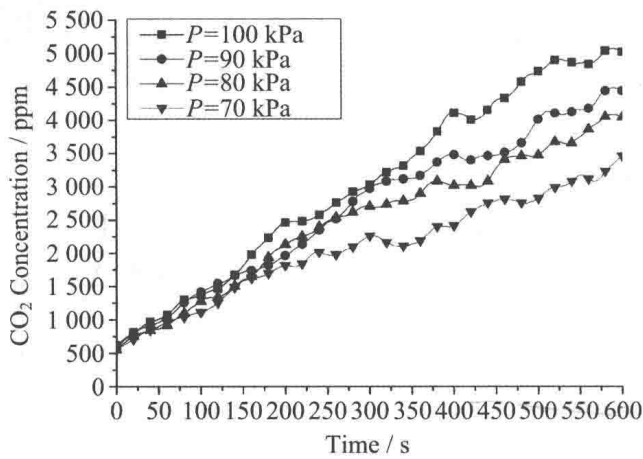


图 6 不同环境压力下 CO₂ 浓度变化

慢,这与低压环境下火源热释放速率的降低有关。表 2 是 120 s 时不同压力下数值模拟测得的 CO₂ 增长速率与实验测得的 CO₂ 增长速率的对比,当环境压力从大气压下降到 70 kPa 时,模拟结果显示 CO₂ 增长速率下降了 4.73 ppm/s,而实验结果显示其下降了 2.41 ppm/s。导致这种误差的可能原因主要有:气体浓度探测器质量的不同、气体浓度探测器所处位置的不同以及气体浓度探测器普遍存在的数据采集滞后性。

表 2 不同压力下 120 s 时 CO₂ 增长速率
(单位:ppm/s)

	100 kPa	90 kPa	80 kPa	70 kPa
数值模拟	10.47	8.54	7.56	5.74
实验	8.66	7.68	7.14	6.25

3 结论

- (1) 随着环境压力下降,火源质量燃烧速率减小,热释放速率降低,同一高度处烟气温度的下降,当燃烧持续 100 s 后,火源质量燃烧速率趋于稳定,烟气温度呈线性增长。
- (2) 随着环境压力下降,空气密度减小,烟气卷吸空气质量降低,驱动火羽流向上升的浮力增强,烟气沉降速度减缓。
- (3) 随着环境压力的降低,烟气中 CO₂ 浓度降低,且两者间变化规律呈线性。
- (4) 本文多数结果呈现了与实验数据间的一致性,这表明 CFD 软件在货舱火灾烟气特征数值模拟领域是合适的。

参 考 文 献

[1] HIRSCH D, HSHIEH F Y, BEESON H, et al. Carbon dioxide fire suppressant concentration needs for international space station environments[J]. Journal of Fire Sciences, 2002, 20(5): 391-399.

- [2] 杨满江. 高原环境下压力影响气体燃烧特征和烟气特性的实验与模拟研究 [D]. 中国科学技术大学, 2011.
- [3] WANG J, LU S, HU Y, et al. Early stage of elevated fires in an aircraft cargo compartment: A full scale experimental investigation[J]. Fire Technology, 2015: 1-19.
- [4] PAPA R, ANDRADE CR, ZZPAROLI E L, et al. CFD analysis of smoke transport inside an aircraft cargo compartment[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2015: 1-8.
- [5] CHOI B, WOO S M. Numerical analysis of the optimum heating pipe to melt frozen urea-water-solution of a diesel urea-SCR system[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 89: 860-870.
- [6] KONG M, ZHANG J, WANG J. Air and air contaminant flows in office cubicles with and without personal ventilation: A CFD modeling and simulation study[J]. Building Simulation, 2015,8(4): 1-12.
- [7] 孟庆林, 尹明德, 朱朝霞. 基于 STAR-CCM+ 的发动机冷却风扇 CFD 仿真分析[J]. 机械工程与自动化, 2015(3): 64-66.
- [8] BENTO D S, THOMSON K A, GÜLDER Ö L. Soot formation and temperature field structure in laminar propane-air diffusion flames at elevated pressures[J]. Combustion and Flame, 2006,145(4): 765-778.
- [9] THOMSON K A, GÜLDER Ö L, WECKMAN E J, et al. Soot concentration and temperature measurements in co-annular, nonpremixed CH_4 air laminar flames at pressures up to 4 MPa[J]. Combustion and Flame, 2005,140(3): 222-232.
- [10] DINENNO P J. SFPE handbook of fire protection engineering[M]. SFPE, 2008.
- [11] KANG K. A smoke model and its application for smoke management in an underground mass transit station[J]. Fire safety journal, 2007,42(3): 218-231.
- [12] BLAKE D, Suo-Anttila J. Aircraft cargo compartment fire detection and smoke transport modeling[J]. Fire safety journal, 2008,43(8): 576-582.

低气压下火焰视频图像特征研究

贾阳,林高华,王进军,方俊,张启兴,张永明

(中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室,安徽 合肥 230026)

摘要:为了进行非密封飞机机舱内视频火灾探测技术的研究,借助中国科学技术大学QR0-12步入式环境低气压试验舱开展低气压下(100 kPa, 90 kPa, 70 kPa, 50 kPa和30 kPa)火焰视频图像特征研究。在实验舱中用正庚烷作为可燃物进行点火实验,拍摄火焰视频,研究低气压环境下火焰的颜色、空间变化、运动、相对稳定性、边缘粗糙度、相邻帧火焰区域面积变化率、面积重叠率、相关性特征。实验结果表明,火焰的颜色、空间变化特征不会随气压变化而变化;而火焰动态特征等都会因气压的不同而发生变化。因此,火焰的颜色和空间变化特征在低气压环境中仍可以用于火焰区域分割和识别,而其他动态特征会随着气压发生变化,不能用常压下的方法来训练分类模型,但仍可以用以区别火焰和静止的疑似区域。

关键词:低压环境;正庚烷火焰;图像特征;视频火灾探测

中图分类号:TP391

文献标识码:A

0 引言

随着民航事业高速发展,飞机作为一种快速、安全、可靠、经济、舒适的交通工具,成为连接世界各地的重要交通工具。然而,航空事业的发展,使得航空运输量的涨幅明显,带动经济迅速发展是我们所乐见的,但增长的航空运输量与当前我们能够控制的事故率意味着增长的故事量,而故事量的不断增长却是我们无法接受的。火灾是引发飞机事故最危险的威胁之一。飞机上可燃、易燃物品聚集,而且具有特有的内部环境和飞行环境,发生火灾地点不

定,一旦起火火势往往发展迅猛,疏散和扑救都比较困难,易造成严重伤亡和重大经济损失。因此发展在飞机舱室这种特殊环境下特殊火灾的专用火灾探测技术成为关键。目前飞机上使用较多的火灾探测设备是传统的感烟、感温火灾探测器,但是这些传统的探测器本身存在一些客观或原理上的缺陷:探测器必须安装在起火点附近,否则无法有效地探测到热灾害的发生;气体传感器长期处于粉尘等恶劣环境,传感器容易失效;由于烟雾传播和温度上升均需要时间,基于烟雾接触和热温接触的探测器具有不可避免的时间延迟。而飞机舱内存在着较为完善的摄像监控设



备,也建立了较为系统的监控中心,因此,在飞机中引入视频火灾探测技术,不仅是对现有设备价值的开发及利用价值的提高,更是对飞机火灾探测技术的革新。

飞机在高空气压比地面低,因此需要在低压环境中进行相关研究。前人也做了一些低压下燃烧特性的相关研究^[1-6],但主要是从燃烧理论和火灾动力学的角度对燃料的燃烧特性进行研究,揭示低气压环境对燃料的燃烧速率、烟气组分、火焰温度、燃烧速率等的影响规律。涂然^[7]结合流体力学和热力学理论,揭示气压对火焰图像如高度、色彩、脉动频率等的影响规律,但只有合肥、拉萨两地的数据。曾怡^[5]对火焰颜色、高度、宽度、亮度以及结构等火焰形貌特征进行了研究,得出了这些特征和气压的相关关系,但这些特征并不是视频火灾探测中的主要特征。因此,本文从图像处理的角度对火焰的颜色、空间差异、动态特征、无序特征进行分析研究,旨在为低气压下的视频火灾探测技术的研究提供理论依据。目前,常用的地面火灾视频探测方法按照火焰分割、特征提取、特征识别的步骤进行。分割常用颜色分割和运动分割^[8-10]等方法,常用的特征有火焰振荡、空间差异、混乱特征等^[11]。极低气压环境中的火焰运动变得非常缓慢,因此,常用的运动分割、火焰动态特征等在低压条件下可能失去效用。本文首先在 QR0-12 步入式环境低气压试验舱开展了模拟实验,模拟不同海拔高度时非密封飞机机舱内部环境。拍摄低压环境下的火焰视频,然后对视频进行火焰颜色、

空间变化、运动、相对稳定性、边缘粗糙度、相邻帧火焰区域面积变化率、面积重叠率、相关性特征等特征进行了统计分析,对特征数据进行分析,为飞机机舱低气压下火灾探测提供依据。

1 不同气压下火焰特征分析

实验在非密闭受限空间内进行,低压舱为体积为 $3\text{ m}\times 2\text{ m}\times 2\text{ m}$ 的可密闭舱室,低压舱结构示意图和实验设备布局如图 1 所示。低压舱系统由进气系统、抽气系统、管路系统和控制系统组成。舱体为密封低压舱,由进气系统进气,抽气系统抽气,造成舱内压力减小,达到低压效果。抽气设备主要是真

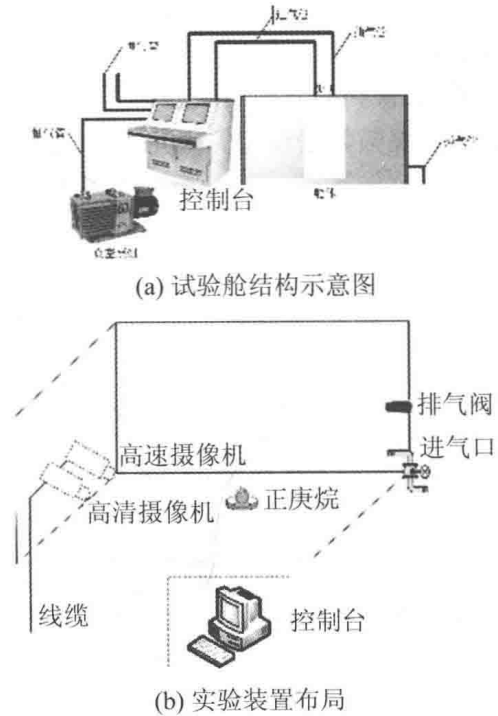


图 1 QR0-12 步入式环境低气压试验舱结构示意图和布局图



空泵,由变频器控制抽气速率。不管是进气系统,还是抽气系统都由控制台来控制,通过控制进气速率与真空泵的频率来改变抽气速率,使舱内的压力达到预设值。

实验中,气压需要和飞机所处环境基本保持一致。低压试验舱的气压选择 100 kPa、90 kPa、70 kPa、50 kPa、30 kPa五个点进行模拟实验,分别对应海拔 0 m、3 000 m、4 000 m、6 000 m、9 000 m 左右的大气气压。在调节好气压后,用高清摄像机拍摄正庚烷燃烧火焰,作为视频分析的原始数据。

1.1 火焰颜色特征

颜色是火焰重要特征之一^[12-14]。通过人眼观察,火焰颜色在不同气压下变化不大。本文用基于 YUV 颜色空间的颜色模型^[15]进行不同气压下的火焰分割,得到的分割结果如图 2 所示。

从视频数据和相关研究来看,正庚

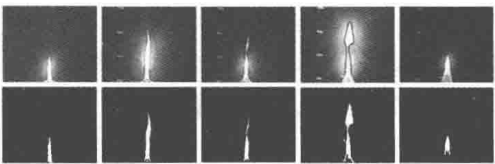


图 2 不同气压下火焰的颜色分割结果

第一行为原图,第二行为分割结果
从左到右依次是 100 kPa、90 kPa、70 kPa、50 kPa、30 kPa 下的正庚烷火焰,火盆为直径 4 cm 的铝制圆柱形火盆

烷燃料的火焰亮度较高,上述分割结果效果较好。根据式(1)对分割出的火焰区域亮度和颜色分量进行统计分析,

$$X_{\text{mean}} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K f(x_i, y_i) \tag{1}$$

式中, f 为火焰区域, K 为火焰区域像素总数, X 表示亮度和红、绿、蓝分量。表 1 中的数值均为按照图 4 获得的火焰区域各颜色分量的像素统计平均结果。测试视频每个气压值有三段视频,视频帧速率为 25 帧/秒,视频时长 1 分钟。总共有 22 500 帧视频。

表 1 不同气压下的火焰颜色统计数据

	100 kPa	90 kPa	70 kPa	50 kPa	30 kPa
亮度均值	226	226	225	224	223
红色分量均值	245	245	245	243	242
绿色分量均值	244	245	244	243	242
蓝色分量均值	238	246	245	244	245
绿色分量标准差	14	12	10	11	11

表 1 中各颜色分量在不同气压下均无太大变化,表明火焰颜色模型在多种气压条件下都适用,颜色特征可以用来进行低压环境中的火灾探测。

1.2 火焰空间差异特征

Qi, Ebert 在文献[1]中提出绿色

分量较之红色和蓝色分量更能表达火焰区域的颜色和背景区域的差异。因此,绿色分量的标准差被作为火焰的一个特征。

绿色分量标准差值表明火焰的空间变化基本不会随着气压的变化而变化,高压下的空间变化略高于低气



压,因此该特征也适于多气压下的火焰探测。

1.3 火焰动态特征

文献[2-4]揭示了气压越高,火焰振荡的幅度就越大的规律。在气压极

$$v = |A_{i+1} - A_i| / A_{i+1} \tag{2}$$

$$\rho = \frac{\sum \sum [S_i(x,y) - \bar{S}_i][S_{i+1}(x,y) - \bar{S}_{i+1}]}{\sqrt{\sum \sum [S_i(x,y) - \bar{S}_i]^2} \sqrt{\sum \sum [S_{i+1}(x,y) - \bar{S}_{i+1}]^2}} \tag{3}$$

$$\theta = (A_i \cap A_{i+1}) / (A_i \cup A_{i+1}) \tag{4}$$

A 表示亮度图像中的疑似火焰区域面积;i 是帧编号;S(x,y)表示火焰区域(x,y)处的像素亮度值。

根据颜色模型对火焰部分进行颜色分割,计算出火焰特征参数,如图 3 所示。从图 3 可以看出,火焰动态特征分布范围都随着气压发生变化。在 30 kPa 和 100 kPa 条件下的火焰,变化率接近零值,而相关性和重叠率接近 1,但数值在不断变化,表明火焰振荡微弱,但仍然在不断振荡:30 kPa 和 100 kPa 时,火焰振幅均值分别为 0.005 4 和 0.006,频率均约为 5.3 Hz;在 70 kPa 和 90 kPa 条件下的火焰出现一定程度的振荡,频率约为 6.0 Hz;50 kPa 时火焰振荡最强,振幅均值为 0.19,频率约为 6.0 Hz。

上述数据表明,即使低气压下火焰振荡微弱,但仍保持不断的振荡,而且频率变化不大,而振幅出现较大变化。故振荡频率特征对于区分固定安装的灯和火焰仍然有效。

由于在极低的气压下,火焰运动微弱,若使用背景差分,火焰区域容易因为运动不明显而融入背景。帧间差分

低时,火焰振荡幅度非常小。实验中,在 0.3 个大气压时肉眼几乎难以发现火焰振荡。式(2)~(4)是文献[5]中三个表示火焰动态特征的参量:相邻帧火焰区域的变化率 v,相邻帧火焰区域的相关性 ρ,相邻帧火焰区域的重叠度 θ。

也会因运动过于微弱而检测不到目标。因此在该环境中运动前景目标检测也不适用。

1.4 火焰无序特征

火焰由于气流的作用会表现出无序性,用火焰的形心坐标^[5]、边缘粗糙度^[6]来表示这种不规则性,特征如式(5)~(7)所示。

$$R = 4\pi/d^2 \tag{5}$$

$$\begin{cases} o_x = \sum_{(i,j)=1} i / \sum_{(i,j)=1} 1 \\ o_y = \sum_{(i,j)=1} j / \sum_{(i,j)=1} 1 \end{cases} \quad (i,j) \in X \tag{6}$$

$$\begin{cases} d_x = |o_x - o_{x-1}| \\ d_y = |o_y - o_{y-1}| \end{cases} \tag{7}$$

R 表示火焰区域粗糙度;d 表示火焰区域的等效直径;(o_{x-1}, o_{y-1}), (o_x, o_y)表示相邻两帧同一疑似区域的形心坐标;(d_x, d_y)表示相邻两帧疑似区域的形心位移。图 4 为不同气压条件下的火焰边缘粗糙度和形心坐标值。

图 4(a)表明在 100 kPa 和 30 kPa 条件下,火焰振荡极小,燃烧稳定,整体波动非常小,形心会在连续数帧均保持同一位置,如在 30 kPa 条件下 10 到 20