

文章编号:1674-8190(2020)05-746-06

# 专用灭火剂浓度测试设备研制及其应用

吴燕燕<sup>1</sup>, 杨小龙<sup>1</sup>, 李海涛<sup>2</sup>, 罗铁苟<sup>1</sup>, 郑友兰<sup>1</sup>, 闵兴明<sup>1</sup>

(1. 中国直升机设计研究所 机电系统部, 景德镇 333001)

(2. 湖南苍树航天科技有限公司, 长沙 410201)

**摘要:** 直升机(飞机)动力舱灭火系统进行试验时需要准确测量灭火剂浓度随时间变化情况。利用空气中不同百分比的灭火剂流经多孔塞产生不同流阻的原理, 研究并标定流阻与灭火剂浓度的关系; 研制灭火剂浓度测试设备, 并将该设备应用于多个型号的地面试验。结果表明: 该设备响应灵敏, 能实时反应动力舱内灭火剂浓度的变化情况, 满足直升机(飞机)动力舱灭火系统地面模拟试验要求。

**关键词:** 直升机; 专用灭火剂浓度测试设备; 灭火剂浓度; 地面模拟试验; 动力舱

中图分类号: V244.1<sup>+</sup>2

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2020.05.019

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Development and Application of Special Extinguishing Agent Concentration Measurement

WU Yanyan<sup>1</sup>, YANG Xiaolong<sup>1</sup>, LI Haitao<sup>2</sup>, LUO Tiegou<sup>1</sup>,

ZHENG Youlan<sup>1</sup>, MIN Xingming<sup>1</sup>

(1. Electro-mechanism System Department, China Helicopter Research and Development Institute, Jingdezhen 333001, China)

(2. Hunan Cangshu Aerospace Technology Co., Ltd., Changsha 410201, China)

**Abstract:** It is necessary to measure the situation of extinguishing agent concentration along with time in the ground simulation test of helicopter/airplane powerplant. The principle that the different percentage of agent in the air has different flow resistances when these agents passing through some porous plug is used, the relation of agent concentration and flow resistance is researched and confirmed by the calibration. The special extinguishing agent concentration measurement is developed, and used in the ground simulation test of several helicopters. The results show that, the measurement has sensitive response, can reflect the varying situation of extinguishing agent concentration in real-time, and satisfy the requirement of ground simulation test in the fire extinguisher system of helicopter/airplane powerplant.

**Key words:** helicopter; special extinguishing agent concentration measurement; extinguishing agent concentration; ground simulation test; powerplant

收稿日期:2019-11-09; 修回日期:2020-01-05

通信作者:吴燕燕,2958702706@qq.com

引用格式:吴燕燕, 杨小龙, 李海涛, 等. 专用灭火剂浓度测试设备研制及其应用[J]. 航空工程进展, 2020, 11(5): 746-751.

WU Yanyan, YANG Xiaolong, LI Haitao, et al. Development and application of special extinguishing agent concentration measurement[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(5): 746-751. (in Chinese)

## 0 引言

按照 CAAC 适航条例<sup>[1-2]</sup>,国军标<sup>[3]</sup>和 AC20-100<sup>[4]</sup>的要求,灭火系统的有效性必须用动力舱灭火系统试验进行验证。要求规定,灭火系统满足灭火要求的条件是试验中所有灭火剂采样点体积浓度同时大于 6%且维持时间不小于 0.5 s。因此,专用灭火剂浓度测试设备成为灭火系统试验中极其关键的测试设备,其准确性和响应时间直接影响到灭火系统性能指标的判断。

目前,欧美飞机动力舱内灭火剂浓度测试技术处于国际领先水平。20 世纪 60 年代,国外开始关于飞机动力舱内灭火剂浓度测试技术研究,E. P. Klueg 等<sup>[5]</sup>、S. S. Lee 等<sup>[6]</sup>、D. A. Ingerson<sup>[7]</sup>对飞行试验和地面试验的灭火剂浓度测试技术进行讨论和总结,并形成了动力舱灭火系统试验的通用要求(航空器灭火剂浓度记录仪的安装与使用准则 FAA-DS-70-3<sup>[8]</sup>和咨询通告 AC20-100),这两份通用要求一直指导灭火系统浓度测试工作。与此同时,灭火系统供应商研制出了配套的灭火剂浓度测试设备,HALONYZER-II 型气体分析仪和 GA 型气体分析仪已被 FAA 认可,法国 L'HOTEL LIER 公司的灭火剂浓度专用气体分析仪已被欧洲适航局 EASA 认可,这些设备既可用于地面验证试验,又可用于飞行适航取证试验。

国外研究灭火剂浓度测试方法采用的主要原理有三种:利用气体进入某种装置的进口、出口压力不同的压差原理,利用热线/热膜进行测量的热线/热膜原理和红外光谱的吸收原理。W. M. Pitts 等<sup>[9]</sup>对灭火剂浓度测量的原理进行了详细描述。从热线/热膜工作原理可知,凡是影响换热的系统因素(环境温度变化,热丝上的漩涡脱落等)和非系统因素(污染,探针振动等)都会影响测量精度,例如污染物或细小颗粒吸附在热线/热膜上,改变了传热特性,从而引起探针特性偏离;而红外吸收原理最大的缺点是温度和待测气体的气流对光源、探测器和元件的影响比较大,直接造成在某些浓度范围的测量误差很大;相比之下,由于压差原理的测试设备对环境温度变化、环境压力变化不敏感,在低压低温的环境下测量精度不受影响,因而

适用于飞机飞行试验的灭火剂浓度测量,同时该方法具有通过系统标定来提高测量精度的和对多种气体灭火剂的浓度进行探测的优点。

目前欧美灭火系统试验主要采用基于压差原理的灭火剂浓度测试设备,并对产品不断地进行更新换代,如美国太平洋公司并购了 Statham 研究的 GA 型灭火剂浓度测试设备后,通过 HALONYZER 和 GA 进行技术融合,将 HALONYZER 升级到 HALONYZER-V。

国内在飞机动力舱灭火系统验证技术的研究工作起步较晚,王志超<sup>[10]</sup>对民用飞机防火系统进行研究;吴燕燕等<sup>[11]</sup>对直升机动力舱灭火系统地面模拟试验技术研究;李丽等<sup>[12-15]</sup>对国产多种型号的运输机动力装置舱灭火系统试验技术进行了研究,同时对试验中采用国外灭火剂浓度测试设备的原理和系统组成进行详细介绍。目前灭火剂浓度测试设备的研制仍处于起步阶段,西安飞机设计研究所委托中国科学技术大学研制了一台基于红外吸收原理的灭火剂浓度测试设备,该设备适用范围较窄。随着直升机(飞机)应用市场的不断扩大,高精度、快速响应的灭火剂浓度测试设备研制迫在眉睫。

本文介绍专用灭火剂浓度测试设备的研制过程、工作原理及系统结构,并进行多个型号直升机灭火系统的地面模拟验证。

## 1 专用灭火剂浓度测试设备

### 1.1 测试设备组成及原理

测试设备由专用灭火剂浓度测量仪,测量插箱,专用数据采集和处理软件等组成,如图 1 所示。

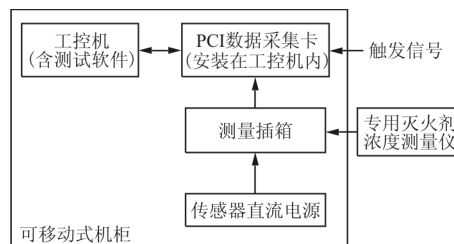


图 1 系统组成示意图

Fig. 1 System components diagram

专用灭火剂浓度测试设备的原理主要是指专

用灭火剂浓度测量仪原理,根据国外资料公布的压差原理<sup>[4,8-9]</sup>进行研制,属于地面设备测试设备。

根据 AC200-100 和 FAA-DS-70-3 公布的资料,如果纯空气压力降为  $\Delta P_a$ ,对于 100% Halon1301 的压力降则为  $k\Delta P_a$ , $k$  是一个常数(对于 Halon1301, $k=0.401$ ),如果测得一个压力降为  $\Delta P$ ,则 Halon1301 浓度为

$$c = \frac{\Delta P_a - \Delta P}{\Delta P_a - k \cdot \Delta P_a} = \frac{1 - \Delta P / \Delta P_a}{1 - k} \quad (1)$$

对式(1)进行理论分析和试验验证,最终得出该测试设备的原理:利用真空泵抽取被测气体;气体经过加热稳定到一个合适的温度;恒温气体经过微压差产生装置,产生一定的压降;测试前后端的气体压差,并通过经验公式换算为气体浓度,原理图如图 2 所示。

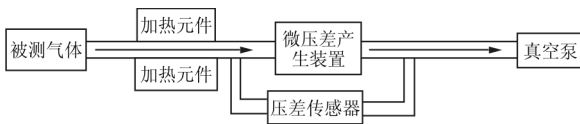


图 2 灭火剂浓度测量仪原理框图

Fig. 2 Principle sketch of extinguishing agent measurement

## 1.2 测量设备的关键技术

专用灭火剂浓度测试设备研制涉及的关键技术如下:

- (1) 灭火剂浓度计算公式及关键技术参数;
- (2) 气体快速加热技术;
- (3) 压差生成技术;
- (4) 多通道同步控制技术;
- (5) 试验与检定技术。

这 5 个关键技术是互相关联的,直接关系到设备的最终性能。

## 1.3 测量设备主要技术参数及特点

专用灭火剂浓度测试设备主要技术指标为:

- (1) 工作原理:压差原理灭火剂浓度测量;
- (2) 分析方式:在线实时分析灭火剂浓度;
- (3) 测量介质:Halon1301( $\text{CF}_3\text{Br}$ )、 $\text{CO}_2$ ;
- (4) 测量误差:不大于 0.5% V/V(Halon1301 的绝对体积浓度);
- (5) 响应时间:不大于 20 ms;

- (6) 测量通道数:12 通道;
- (7) 测量量程:0~100% V/V(百分比体积浓度);
- (8) 采样频率:不小于 50 Hz;
- (9) 专用数据采集和分析软件。

由于 AC20-100 指定灭火剂浓度测量值是百分比体积浓度值,所以本文所指的浓度均为体积浓度,单位为 V/V,%V/V 是指百分比体积浓度。

该设备具有系统响应速度快(小于 20 ms)、系统测量精度高(体积浓度绝对值小于 0.5%)、设备体积小、系统结构模块化、对环境适应能力强等特点,还具有便于安装、运输、操作简单等优点。

专用采集软件利用 LabVIEW 作为开发平台,在运用虚拟仪器技术同时还采用数据库管理、报表生成以及通用测试软件设计方法等技术,具有人机界面友好、容错能力强、良好的数据管理、稳定可靠、操作向导简单明了等特点。采集软件功能示意图如图 3 所示。

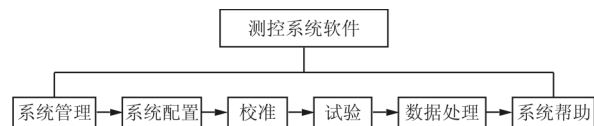


图 3 采集软件功能示意图

Fig. 3 Function diagram of acquisition software

## 1.4 测试设备系统性能检定

测试设备的两个关键参数是响应时间和测量误差(系统精度),因此交付过程需要进行检定,确保设备的系统性能满足研制要求。

### (1) 响应时间检定

用于考核前端压力变化时,后端测量单元的响应时间,通道 12 的响应时间如表 1 所示,响应时间满足要求。

### (2) 测量误差标定

考虑到测量设备的扩展性,测量量程为 0~100%,但 Halon1301 灭火系统的试验中只关注 6%左右的浓度值,因此从实际需要和试验成本出发,只对 20%以内的浓度值进行标定(国外设备只对 0%,6%,12%三个浓度值进行标定)。

系统标定是确定系统测量误差的有效方法。

系统标定的基本思路是首先配置不同浓度点的灭火剂标准样气(必须保证灭火剂是气态),然后通过专用标定设备对测试设备 12 个通道同时进行标定,将测试设备采集的浓度值与标准灭火剂浓度值进行比较。为了确定结果的重复性进行多轮次标定,得出系统的误差,系统标定结果如表 2 所示,可以看出:单个浓度点下的测量误差最大值为 0.43%,12 个测量单元所有浓度点平均测量误差最大值为 0.28%,均方误差最大值为 0.18%,测量误差满足研制要求。

表 1 通道 12 的响应时间

Table 1 Response time of 12<sup>#</sup> channel

前端压力/kPa	后端测量单元压力/kPa	上升段时间差/ms	下降段时间差/ms
97.2	94.2	-32	+10
98.1	95.7	-30	-15
100.0	96.2	-31	-15
101.9	97.1	-40	-6
102.1	98.2	-41	+9
104.2	99.1	-43	-2

表 2 系统标定结果

Table 2 System calibration results

通道	误差/%					最大误差/%	平均误差/%	均方误差/%	标定结果
	0%浓度	2%浓度	6%浓度	10%浓度	20%浓度				
01 通道	0.01	0.03	0.08	0.05	0.23	0.23	0.08	0.09	合格
02 通道	0.07	0.01	0.01	0.17	0.26	0.26	0.10	0.11	合格
03 通道	0.21	0.25	0.04	0.22	0.24	0.25	0.22	0.09	合格
04 通道	0.25	0.43	0.04	0.28	0.42	0.43	0.28	0.16	合格
05 通道	0.24	0.26	0.01	0.22	0.18	0.26	0.18	0.10	合格
06 通道	0.21	0.35	0.01	0.02	0.41	0.41	0.20	0.18	合格
07 通道	0.14	0.21	0.01	0.13	0.20	0.21	0.14	0.08	合格
08 通道	0.25	0.30	0.08	0.17	0.33	0.33	0.23	0.10	合格
09 通道	0.14	0.23	0.01	0.11	0.39	0.39	0.18	0.14	合格
10 通道	0.16	0.34	0.09	0.12	0.36	0.36	0.21	0.13	合格
11 通道	0.21	0.28	0.02	0.15	0.15	0.28	0.20	0.10	合格
12 通道	0.01	0.08	0.09	0.24	0.18	0.24	0.10	0.10	合格

## 2 试验应用

直升机灭火系统地面模拟试验测试方法如下:

### (1) 试验前检查

①检查压力、温度、流量传感器等传感器的安装情况;

②检查飞行通风量模拟系统的工作情况;

③检查动力舱内采集点布置情况,确保采集点安装位置符合测点布置图要求;

④检查采样管路在动力舱内固定是否牢固,确保所有取样管无折弯且长度相同。

### (2) 试验步骤

①安装好排气管,便于采样气体能从设备中排出,启动灭火剂浓度测试设备的温度控制系统,温度控制系统的温度稳定后,启动真空泵;

②启动飞行通风量模拟系统,控制飞行模拟通风量为试验给定值;

③启动专用数据采集系统和专用灭火剂浓度测试仪,观察采集的数据是否正常,如果正常则进入准备试验状态,否则需要进入排故状态;

④通风量稳定 10 min 左右后,由专业试验人员通过引爆系统引爆灭火瓶上的电起爆器,于此同时开始记录各测试点灭火剂体积浓度,记录时间不少于 30 s;

⑤试验持续 30 s 后,关闭飞行通风量模拟系统的风机,为了设备内的灭火剂气体被完全排出需要真空泵继续工作一段时间(20 min)。

## 3 结果分析

利用该设备进行多个型号直升机灭火系统地



面模拟试验,在试验过程中主要试验条件为动力舱内通风量,灭火剂填充压力,灭火瓶温度,灭火剂填充量,发动机的体积和外形,发动机舱的体积和外形。试验时在同一试验条件下进行三次喷射,以验证试验数据的重复性。

本文列举具有代表性的试验数据进行分析说明,详细的试验条件如表 3 所示,模拟高速气流流动室温环境和低温环境情况的试验曲线分别如图 4~图 5 所示。

表 3 试验条件  
Table 3 Test conditions

试验	通风量/ ( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ )	灭火剂填充 压力/MPa	灭火瓶 温度/ $^{\circ}\text{C}$	灭火剂 填充量/kg
试验 1	0.85	4.2	20	1.5
试验 2	0.85	4.2	-40	1.5

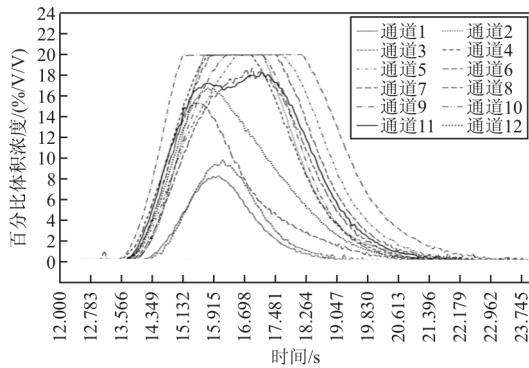


图 4 20 °C 风量 0.85 kg/s 时浓度测量曲线

Fig. 4 Curve diagram of agent measuring at 20 °C, 0.85 kg/s

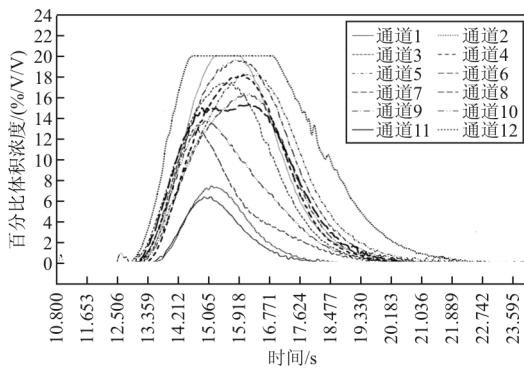


图 5 -40 °C 风量 0.85 kg/s 时浓度测量曲线

Fig. 5 Curve diagram of agent measuring at -40 °C, 0.85 kg/s

通过上述结果得到以下结论:

(1) 测量误差对试验结果的影响。通过试验数据分析表明设备的误差对试验结果影响很大,例如在设备最大误差为 0.43% 浓度情况下,图 4 和图 5 的共同维持 6% 浓度值分别是 1.151 s 和 0.722 s;而在设备均方误差为 0.16% 浓度情况下,图 4 和图 5 的共同维持 6% 浓度值分别是 2.536 s 和 1.722 s。

(2) 数据连续性好,测试结果也与分析一致。通道 1 和通道 3 均布置在发动机附件机匣端的底部,是灭火剂不易扩散到达的部位,所以浓度值偏低;通道 9 布置在自由涡轮附件,自由涡轮附件由于有灭火喷嘴,灭火剂扩散很容易到达,所以通道 9 的浓度明显高于其他通道。

(3) 该试验能准确反映不同试验条件下动力舱内浓度变化情况。灭火瓶温度越低,灭火剂喷射速度和喷射流速均变小,喷射时间变短。因此图 4 最大浓度值和浓度的维持时间均优于图 5。

## 4 结 论

(1) 专用灭火剂浓度测试设备响应速度快、精度高,满足直升机动力舱灭火系统地面模拟试验要求,准确反映了动力舱内各测点灭火剂浓度随时间的变化情况。

(2) 设备安装方便快捷,操作简单,数据所见即所得,易于搬运,可用在不同环境下的地面试验。

(3) 本设备不能满足机上飞行试验测试要求,主要表现为重量、体积、功耗、电磁干扰、自身抗干扰、防振等方面,需在以后的实践中不断改进。

## 参考文献

- [1] 中国民用航空局. 运输类飞机适航标准: CCAR-25-R4[R]. 北京: 中国民用航空总局, 2011. CAAC. Transport category aircraft airworthiness standards: CCAR-25-R4 [S]. Beijing: CAAC, 2011. (in Chinese)
- [2] 中国民用航空局. 运输类旋翼航空器适航规定: CCAR-29-R2[S]. 北京: 中国民用航空总局, 2017. CAAC. Transport category rotorcraft airworthiness standards: CCAR-29-R2 [S]. Beijing: CAAC, 2017. (in Chinese)
- [3] 严彤, 郭敏骁, 彭跃春, 等. 飞机灭火系统安装和试验要求: GJB 3275-1998[S]. 北京: 中国航空综合技术研究

- 所, 1998.
- YAN Tong, GUO Minxiao, PENG Yuechun, et al. Installation and test requirement of aircraft extinguishing fire system: GJB 3275—1998[S]. Beijing: China Aero Polytechnology Establishment, 1998. (in Chinese)
- [4] FAA. General guidelines for measuring fire-extinguishing agent concentration in power plant compartments: AC20-100[S]. American: FAA, 1977.
- [5] KLUEG E P, DEMAREE J E. An investigation of in-flight fire protection with a turbofan powerplant installation[R]. American: FAA, 1969.
- [6] LEE S S, FRICK S K, LAMB S M. In-flight engine extinguishing agent concentration tests for commercial airplanes [R]. Los Angeles: AIAA Air Engineering, Technology, and Operations Congress, 1995.
- [7] INGERSON D A. Simulating the distribution of Halon1301 in an aircraft engine nacelle with HFC-125[R]. American: Fire Safety Section Federal Aviation Administration, 1999.
- [8] CHAMBERLAIN G. Criteria for aircraft installation and utilization of an extinguishing agent concentration recorder: FAA-DS-70-3[S]. American: FAA, 1970.
- [9] PITTS W M, MULHOLLAND G W, BREUEL B D, et al. Real-time suppressant concentration measurement [R]. [S. l.]: NIST, 1955.
- [10] 王志超. 民用飞机防火系统研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2011(3): 11-13, 27.
- WANG Zhichao. Research of fire protection system in civil aircraft[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2011(3): 11-13, 27. (in Chinese)
- [11] 吴燕燕, 孙斐, 罗铁苟. 直升机动力舱灭火系统地面模拟试验技术[J]. 直升机技术, 2016(3): 52-55.
- WU Yanyan, SUN Fei, LUO Tiegou. Ground simulation test technology about helicopter powerplant fire extinguishing system[J]. Helicopter Technique, 2016(3): 52-55. (in Chinese)
- [12] 李丽. 飞机发动机舱灭火剂浓度测量[J]. 测控技术, 2008, 27(s): 151-153.
- LI Li. Engine nacelle fire extinguishing agent concentration tests[J]. Measurement & Control Technology, 2008, 27(s): 151-153. (in Chinese)
- [13] 李丽. 动力装置舱灭火系统试飞技术研究[C]// 2010年航空试验测试技术峰会. 上海: 中国航空学会, 2010: 149-152.
- LI Li. Flight test technology research on powerplant nacelle fire extinguishing system[C]// 2010 Aviation Test Technology Summit. Shanghai: CSAA, 2010: 149-152. (in Chinese)
- [14] 李丽. 某飞机 APU 舱灭火系统试飞方案研究[C]// 第5届中国航空学会青年科技论坛. 南昌: 中国航空学会, 2012: 622-625.
- LI Li. Research on test method of APU compartment fire extinguishing system[C]// The 5th CSAA Young Scientist Forum. Nanchang: CSAA, 2012: 622-625. (in Chinese)
- [15] 李丽, 王玉梅, 陈战斌. 民用飞机货舱灭火系统适航符合性验证试验方法研究[J]. 航空科学技术, 2015(8): 61-66.
- LI Li, WANG Yumei, CHEN Zhanbin. Research on a civil aircraft cargo fire extinguishing system test[J]. Aeronautical Science & Technology, 2015(8): 61-66. (in Chinese)

#### 作者简介:

吴燕燕(1976—),女,学士,高级工程师。主要研究方向:直升机机械系统(灭火,燃油,滑油)试验测控技术和系统仿真。

杨小龙(1971—),男,博士,研究员。主要研究方向:机电系统信息化。

李海涛(1977—),男,博士,副教授。主要研究方向:火箭发动机地面试验测试技术研究与应用。

罗铁苟(1968—),男,硕士,研究员。主要研究方向:直升机机械系统(灭火,燃油,滑油)试验。

郑友兰(1971—),女,学士,研究员。主要研究方向:直升机动力舱防火。

闵兴明(1981—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:飞机燃油系统设计、试验和仿真。

(编辑:丛艳娟)