

DOI: 10.19416/j.cnki.1674-9804.2024.02.019

民用飞机发动机舱灭火剂浓度测试研究

杜含杰* 顾俊鸣 寇鸿飞

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

摘 要: 国际民航史上曾因发动机舱着火而多次发生空难事故, 为确保飞行安全, 找出对发动机舱灭火剂浓度影响的各种因素、采用精准的改装手段以及建立有效的飞行测试方法就显得尤为重要。分析了通风流量、飞行速度、环境温度等因素对发动机舱灭火剂浓度的影响, 给出了测试设备、采样管敷设、采样点布置等改装方法, 提出了发动机舱灭火剂浓度测试的飞行试验方法, 对试验结果裕度进行了分析, 为其它民用飞机发动机舱灭火剂浓度测试合格审定试飞提供了参考。

关键词: 民用飞机; 发动机; 灭火剂浓度; 测试

中图分类号: V241.1+2

文献标识码: A

OSID:



0 引言

作为飞机的最重要部件之一, 航空发动机由许多子系统组成, 工作过程及其复杂^[1]。发动机是飞机的关键部件, 一旦失火会对飞行安全造成严重威胁, 若火焰窜出发动机短舱, 蔓延至机翼油箱, 会造成机毁人亡的重大事故^[2]。根据 FAR25、CCAR25 等适航规章要求, 灭火系统、灭火剂剂量、喷射速率和喷射分布必须足以灭火。必须通过真实的或模拟的飞行试验来表明, 在飞行中临界的气流条件下, 指定火区内灭火剂的喷射, 可提供能熄灭该火区内的着火并能使复燃的概率减至最小的灭火剂密集度^[3-4]。对于发动机舱常用的 Halon 1301 高速固定式灭火系统, 需所有采样点同时达到 6% 的体积浓度并至少持续 0.5 s, 适航当局才认为可接受^[5]。为确保民用飞机飞行安全, 需统筹分析各种因素对发动机舱灭火剂浓度的影响, 然后建立有效的试验流程和方法, 确立系统的灭火性能验证手段^[6]。

1 影响因素

1.1 通风质量流量

20 世纪 50 年代至今, FAA 对多种飞机发动机

灭火系统进行了测试, 试验结果表明发动机舱内灭火剂浓度分布受多种因素影响, 如通风质量流量、飞机飞行速度、发动机灭火瓶环境温度等^[7]。其中最大通风质量流量对发动机舱所需最小灭火剂量影响最大。

发动机舱所需最小灭火剂量计算如下^[8]:

1) 低速气流(巡航状态下通风流量 ≤ 1 lb/s)、粗糙短舱(舱内周向肋突出到短舱的高度 < 6 in)内部, 或无气流、光滑舱室(无突出肋)内部, 取公式(1)、公式(2)中较大者:

$$W = 0.05V \quad (1)$$

$$W = 0.02V + 0.25W_a \quad (2)$$

2) 高速气流(巡航状态下通风流量 > 1 lb/s)、粗糙短舱(舱内周向肋突出到短舱的高度 < 6 in)内部, 按公式(3)计算:

$$W = 3(0.02V + 0.25W_a) \quad (3)$$

3) 高速气流(巡航状态下通风流量 > 1 lb/s)、深框短舱(舱内周向肋突出到短舱的高度 ≥ 6 in)内部, 按公式(4)计算:

$$W = 0.16V + 0.56W_a \quad (4)$$

上述公式中: W 为发动机舱所需最小 Halon 1301 灭火剂重量, lb; V 为发动机舱净体积, ft^3 ; W_a

* 通信作者. E-mail: duhanjie@comac.cc

引用格式: 杜含杰, 顾俊鸣, 寇鸿飞. 民用飞机发动机舱灭火剂浓度测试研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2024(2):120-125. DU H J, GU J M, KOU H F. Research on engine fire extinguishing agent concentration test for civilian airplane[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2024(2):120-125(in Chinese).

为发动机舱最大通风质量流量, lb/s 。

根据公式(1)至公式(4),发动机舱所需的最小灭火剂量受最大通风质量流量和净体积的影响。当净体积不变时,通风质量流量越大,灭火剂浓度越低。随着海拔高度的升高,空气密度不断下降,因此飞行高度越低,通风质量流量越大。通风质量流量对灭火剂浓度的影响对比见图1。

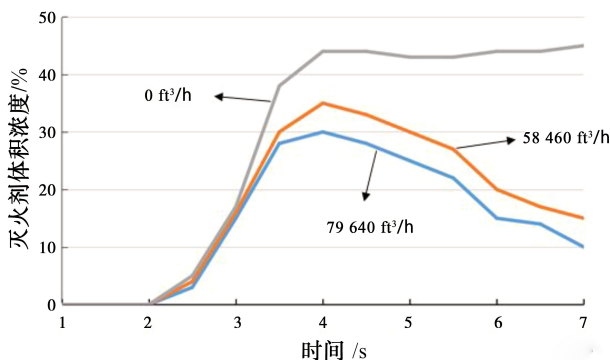


图1 通风质量流量对灭火剂浓度的影响对比示意图

一般来说,2 000~5 000 ft 空域具有较高的气流,是进行发动机舱灭火剂浓度测试最为合适的飞行高度^[7]。

1.2 飞行速度

发动机舱内气流为飞机外界冲压气流,所以飞行速度对舱内通风流量和分布有重要影响。一般来说,飞行速度越快,发动机舱内气流量越大,灭火剂扩散速度越快,发动机舱灭火性能下降越明显。飞行速度对灭火剂浓度的影响对比见图2。

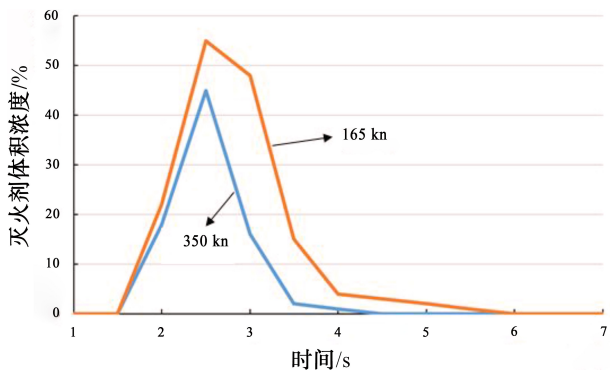


图2 飞行速度对灭火剂浓度的影响对比示意图

为达到临界气流条件,发动机舱灭火剂浓度测试一般选择试验高度下的最大使用速度 V_{M0} 作为试

验速度。

1.3 环境温度

FAA 研究表明温度是影响灭火剂浓度分布的重要因素^[9]。灭火瓶温度越低,压力越低,灭火瓶内压力下降加上灭火剂分配管路的压力损失,使灭火剂喷射时间增长^[10]。低温低压的环境条件不利于灭火剂的扩散,因此灭火瓶应在临界低温进行释放。环境温度对灭火剂浓度的影响对比见图3。

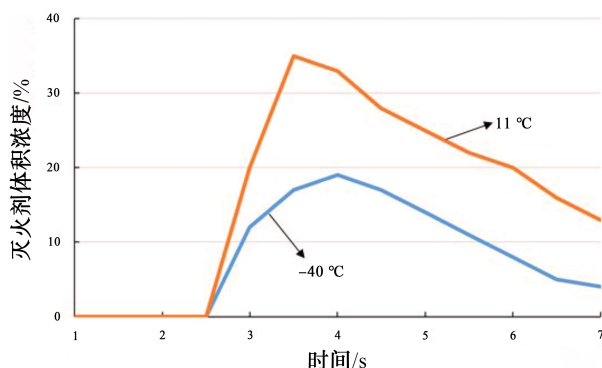


图3 环境温度对灭火剂浓度的影响对比示意图

灭火瓶释放温度的确定,可通过高寒试验数据修正的方式获得。一般先通过飞机高寒试验获得灭火瓶最低环境温度,然后将最低环境温度按试验场温1:1外推到包线温度,最后将修正后的灭火瓶最低环境温度作为发动机灭火瓶释放温度。

2 测试改装

2.1 灭火剂浓度测试设备

灭火剂浓度测试设备包括灭火剂浓度分析仪、采样管、真空泵、温度控制器、记录仪等。其工作原理是通过真空泵抽取发动机舱内的灭火剂,通过等长的采样管以同样的流速抽送至灭火剂浓度分析仪。我国及美国的主流机型在开展灭火剂浓度测试时,一般采用的是 Statham GA. 5 型灭火剂浓度分析仪。每个灭火剂浓度分析仪由4个分析室组成,每个分析室中的传感器产生一个压降信号,信号传送到记录仪中用于指示灭火剂浓度。压降信号由灭火剂通过分析仪内部的多孔金属塞时产生,对应气体粘度与流速的函数关系^[11]。在客舱内需设置一个与测试设备相匹配的交流电源(115 V, 60 Hz)^[12],灭火剂浓度测试设备的典型安装形式示意图如图4所示。

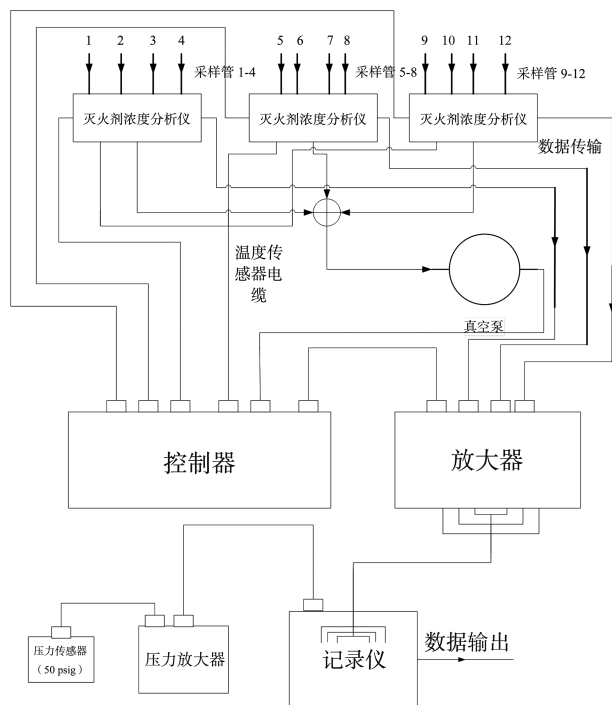


图 4 灭火剂浓度测试设备的典型安装

2.2 采样管敷设

FAA 推荐采用抽样分析法测量发动机舱内的灭火剂浓度,在火区内的临界位置上布置 12 个采样探头抽吸灭火剂进行测试^[7]。以某翼吊发动机飞机型号为例,为顺利开展测试,灭火剂浓度测试设备安装在客舱设备基板上,12 根发动机采样铜管在发动机风扇舱及核心舱 12 个采样点位置固定后,从吊挂垂直防火墙和底部防火墙处沿吊挂内部穿过吊挂,进入机翼,从机翼专用孔穿至飞机机身结构,再沿飞机侧壁经回风格栅进入客舱,最后再敷设至灭火剂浓度测试设备。为避免发动机舱火区与客舱直接相通,客舱内的 12 根采样管在未与灭火剂浓度测试设备连接的时候应使用堵头密封。采样管布置示意图见图 5。

2.3 采样点布置及安装

如果短舱较长,采样点可以按四个环进行布置,每个采样环上各安装三个采样点,并沿发动机径向以 120° 进行安排,相对于前一个采样环后一个环上的各个采样点应旋转 60° (如图 6 所示)。对于较短的短舱,按三个环布置,每个采样环有四个采样点,每个环上的采样点以 90° 分隔,每个后续环相对于前环应移相 45° (如图 7 所示)。也可以对上述的布局作某些变动以便考察某些特定的火灾危

险区的灭火剂浓度^[5]。

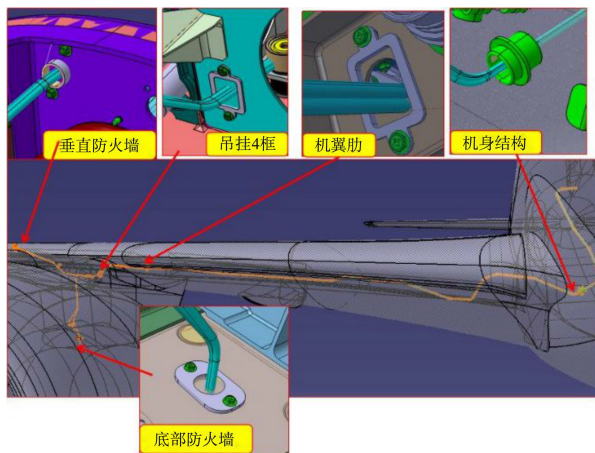


图 5 采样管布置示意图

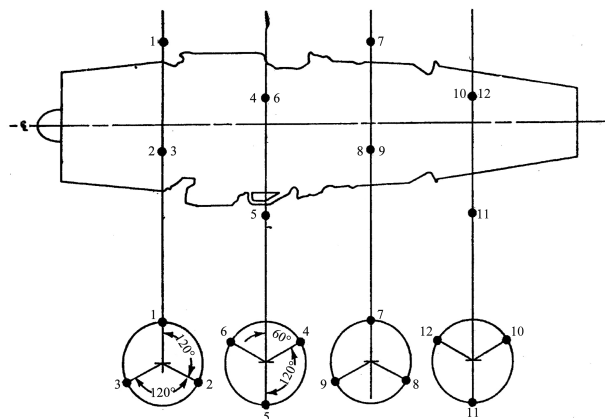


图 6 四环采样点的典型布置图^[5]

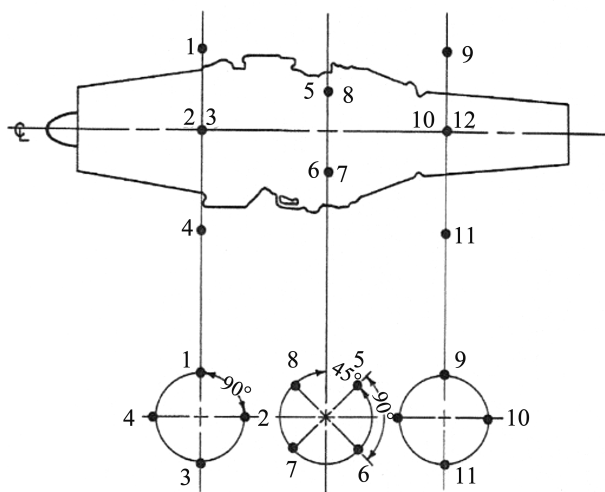


图 7 三环采样点的典型布置图^[5]

为考察某些特定的火灾危险区的灭火剂浓度,测试采样点应布置在下列区域:

- 1) 燃油源和点火源均存在的区域;
- 2) 部件或附件的存在或气流可能有碍于足够的灭火剂覆盖的区域;
- 3) 接近热空气导管的区域;
- 4) 易燃物可能聚集的短舱下部区域^[7]。

为了更好地识别灭火剂较难到达的区域,应对发动机风扇舱及核心舱开展流场分析。以某型号为例,风扇舱左、右两侧各有一处区域受涡流影响,灭火剂较难到达。发动机核心舱最低流速区域主要集中在核心舱进气口、排气口附近。

结合发动机风扇舱和核心舱流场分析结果,综合燃油源、点火源区域、热空气导管区域、易燃物可能聚集的短舱下部区域等区域,参考较短短舱的三环采样点的典型布置图,最终选取了12个采样点,其中风扇舱4个,核心舱8个。各采样点布置位置见图8,发动机的环向定义为:从发动机后部向前看,顺时针方向为正向,使用时钟钟点数值表示相应的安装位置。

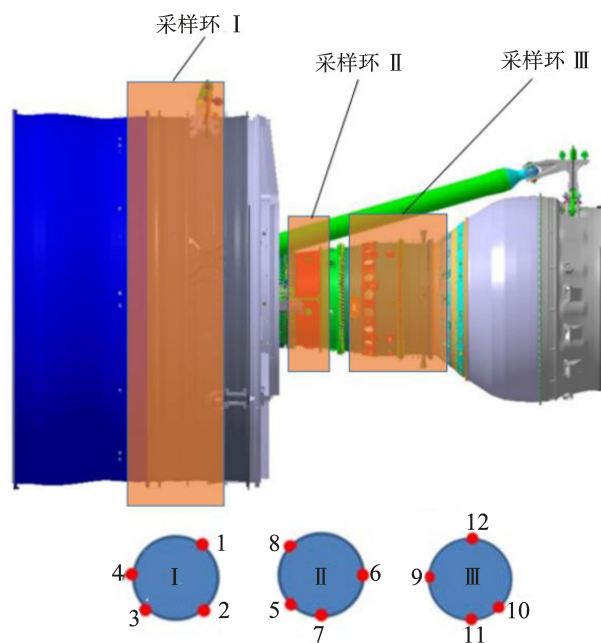


图8 某型号采样环布置示意图

此外,采样管的安装过程也至关重要,根据型号经验,安装质量的好坏会对测试结果产生直接影响。12根采样管在安装时应注意:

- a) 采样管与其他结构之间的距离至少为

50 mm;

- b) 采样管应垂直于气流方向进行安装,且采样管口尽量朝向发动机的外侧;

- c) 采样管在完成安装后,需要在每个采样管口进行打毛刺,然后用高压氮气进行吹洗;

- d) 采样管安装后需裁剪至相同长度;

- e) 安装完成后应对采样管的位置进行照片或者视频记录,并明确出相应的编号;

- f) 采样管的弯曲半径至少为38 mm^[6]。

3 测试过程

以某型号为例,为达到临界气流条件,选取了所在试验机场的最低飞行高度5 000 ft,最大飞行速度 $V_{M0}=350$ kn。为得到灭火瓶最低释放温度,在进行灭火剂浓度测试前开展了高寒试验,测得发动机灭火瓶最低环境温度出现在冷浸透结束双发启动后至起飞前的阶段,将最低环境温度按试验场温1:1外推到包线温度得到修正后最低环境温度。为达到灭火剂释放时的温度边界,还需叠加温度传感器精度,并为灭火操作预留一定的操作余量,最终得到灭火瓶最低释放温度。

为保证测试结果的有效性,涉及到发动机舱灭火剂浓度测试的飞机构型应为取证构型,对于非取证构型应开展构型偏离评估,确保对测试结果无影响。客舱内加装的灭火剂浓度测试设备应尽量靠近试验发动机位置。加装的灭火剂浓度测试采样管、灭火瓶表面温度传感器、灭火瓶保温装置等均应满足经局方认可的技术要求。在开展测试前,应开展制造符合性检查,检查发动机、短舱、发动机灭火系统安装满足构型要求,检查试验灭火瓶填充压力在正常范围,检查灭火剂浓度测试设备及测试采样管安装满足改装要求。

为了保证飞行高度、飞行速度、灭火瓶释放温度达到试验要求,同时为防止灭火瓶过快升温,所有步骤应快速完成。试验前将带有保温装置的发动机灭火瓶放在低温箱中冷浸透。飞机上电后对灭火剂浓度测试设备进行预热。将冷浸透后的发动机灭火瓶从低温箱取出并装机,按正常程序启动双发,飞机迅速起飞。飞机爬升到5 000 ft(允差-500 ft),以 V_{M0} (允差-5 kn)速度稳定平飞,当灭火瓶表面温度升高到最低释放温度时,关闭右侧发动机,预位右侧发动机灭火系统开关,10 s后释放灭火

瓶。观察并记录灭火剂浓度参数,待所有采样点灭火剂浓度低于 1% 时,试验结束。发动机舱灭火剂浓度测试流程如图 9 所示。

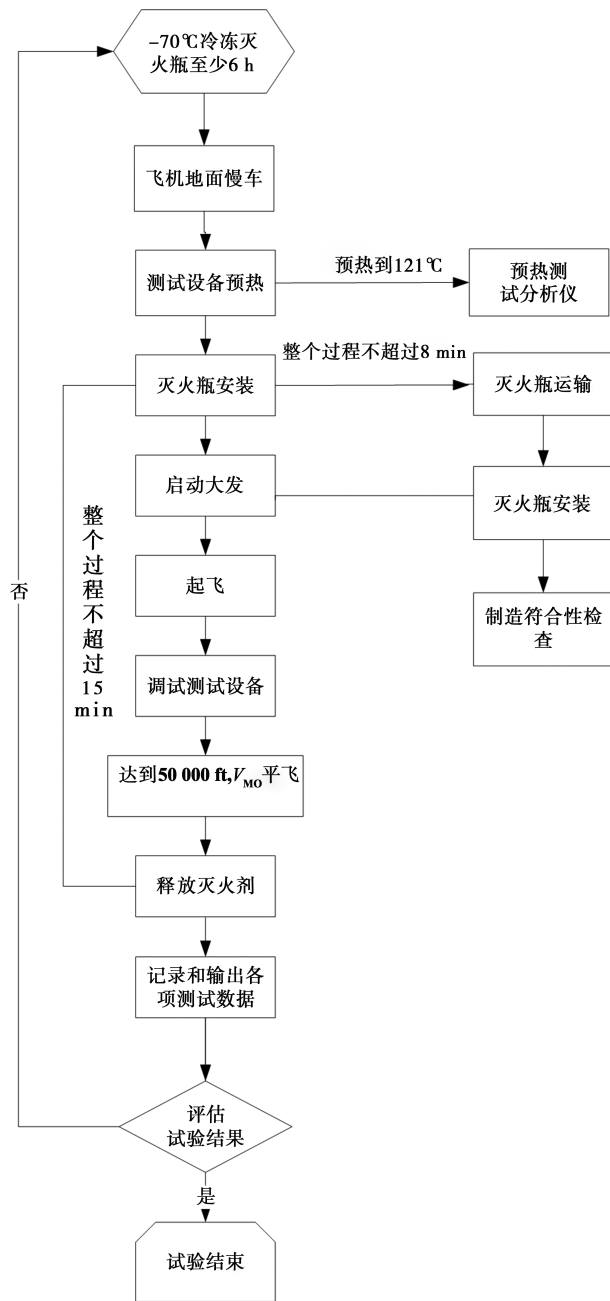


图 9 测试程序

4 试验结果裕度

根据典型燃料/空气与灭火剂的可燃性极限曲线(图 10),当 Halon1301(CF₃Br)的体积比超过 6% 时,燃料与空气混合物是不可燃的^[7]。

相较于高峰值、短时的浓度分布,建议系统设

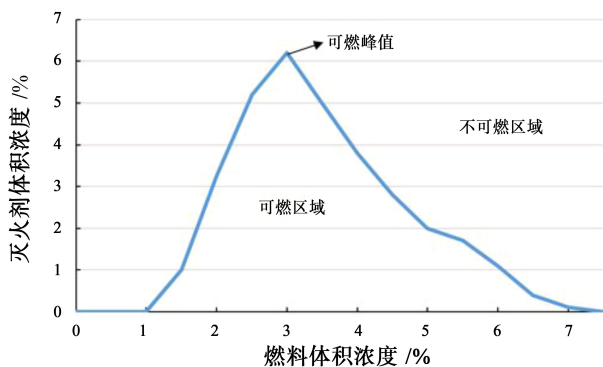


图 10 典型燃料/空气与灭火剂的可燃性极限曲线

计成超过最低浓度标准、长时的浓度分布。这样不会对灭火剂的灭火能力产生不利影响,但可以延长最低浓度持续时间,延长持续时间将有助于防止热表面上的可燃物复燃。

以某型号为例,在飞机临界气流条件及灭火瓶最低环境温度条件下开展了飞行试验,试验结果显示 12 个采样点的灭火剂浓度均超过 6% 体积浓度的持续时间,满足 0.5 s 的适航要求,且时间裕度充足。证明该机型发动机灭火功能满足安全要求,且具有一定的安全裕度。

5 结论

本文分析了影响发动机舱灭火剂浓度分布的原因,确定了试验条件的选取方法,给出了测试设备的改装方法,提出了合适的测试程序,最终通过试验验证了某机型发动机灭火系统的功能可以满足相关适航要求,且具有一定的安全裕度,为后续民用飞机灭火系统设计及验证提供了重要参考。

参考文献:

- [1] 刘剑,任和. 航空发动机滑油系统故障诊断技术研究进展[J]. 应用技术学报,2023,23(4):349-357.
- [2] 李丽. 民用飞机发动机短舱灭火适航验证试验研究[J]. 航空科学技术,2015,26(10):28-32.
- [3] Federal Aviation Administration. Airworthiness standards: transport category airplanes: FAR-25[S]. Washington D. C.: Federal Aviation Administration, 2003.
- [4] 中国民用航空局. 中国民用航空规章第 25 部: 运输类飞机适航标准: CCAR-25-R4[S]. 北京: 中国民用航空局, 2011.
- [5] Federal Aviation Administration. General guidelines for measuring fire-extinguishing agent concentrations in pow-

- erplant compartments: AC20-100 [S]. Washington D. C.: Federal Aviation Administration, 1977.
- [6] 寇鸿飞. 基于临界低温释放民机发动机舱灭火剂浓度测试[J]. 测控技术, 2018, 37(11): 16-19, 23.
- [7] Federal Aviation Administration. Criteria for aircraft installation and utilization of an extinguishing agent concentration recorder: FAA-DS-70-3 [R]. Atlantic City, New Jersey: Department of Transportation Federal Aviation Administration, National Aviation Facilities Experimental Center, 1970.
- [8] Bureau of Naval Weapons, Department of the Navy. Military specification, extinguishing system, fire, aircraft, high-rate-discharge type, installation and test of: MIL-E-22285(AS) [S]. [S. l.: s. n.], 1959.
- [9] Federal Aviation Administration. An investigation of in-flight fire protection with a turbofan powerplant installation: NA-69-26 (DS-68-26) [R]. Atlantic City, New Jersey: Department of Transportation Federal Aviation Administration, National Aviation Facilities Experimental Center, 1969.
- [10] 李丽. 动力装置舱灭火系统试飞技术研究[J]. 测控技术, 2010, 29(增刊): 157-160.
- [11] LEE S S, FRICK S K, LAMB S M. In-flight engine fire extinguishing agent concentration tests for commercial airplanes[C]//Aircraft Engineering, Technology, and Operations Congress, September 19-21, 1995. [S. l.]: American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc., 1995.
- [12] Federal Aviation Administration. Aircraft installation and operation of an extinguishing-agent concentration recorder: No. 403 [R]. Atlantic City, New Jersey: Department of Transportation Federal Aviation Administration, National Aviation Facilities Experimental Center, 1959.

作者简介

杜含杰 男, 硕士, 工程师。主要研究方向: 民用飞机防火系统。E-mail: duhanjie@comac.cc

顾俊鸣 男, 硕士, 高级工程师。主要研究方向: 民用飞机防火系统。E-mail: gujunming@comac.cc

寇鸿飞 男, 硕士, 研究员。主要研究方向: 民用飞机防火系统。E-mail: kouhongfei@comac.cc

Research on engine fire extinguishing agent concentration test for civilian airplane

DU Hanjie* GU Junming KOU Hongfei

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

Abstract: In the history of international civil aviation, there have been many air crashes caused by engine compartment fires. In order to ensure flight safety, finding out various factors that affect the concentration of fire extinguishing agent in the engine compartment, adopting precise modification methods, and establishing effective flight testing methods is particularly important. This paper analyzes the influence of ventilation flow, flight speed, ambient temperature and other factors on the concentration of fire extinguishing agent in the engine compartment. It gives the test equipment, sampling pipe laying, sampling point layout and other modification methods. It puts forward the flight test method of the concentration test of fire extinguishing agent in the engine compartment, analyzes the margin of the test results, and provides a reference for the test of the concentration test of fire extinguishing agent in the engine compartment of other civil aircraft.

Keywords: civilian airplane; engine; agent concentration; test

* Corresponding author. E-mail: duhanjie@comac.cc