

民用飞机超细干粉灭火 系统喷射试验研究

The Research on Discharge Performance of Civil Aircraft Fine Dry Powder Fire Extinguishing System

宣 扬 / Xuan Yang

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

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

摘 要:

NaHCO₃超细干粉灭火剂具有环保高效的优点,有可能替代现有民用飞机上常见的哈龙 1301 灭火剂,应用于未来民用飞机固定式灭火系统上。以某型民用飞机发动机灭火系统为基础,搭建了 NaHCO₃超细干粉灭火系统试验台,开展了该灭火系统的喷射性能试验研究。试验结果表明灭火系统平均流量较大,性能较好,但仍需要修改管网设计调整灭火剂在风扇舱和核心舱的分配比例。初步的灭火剂浓度分析也表明目前的管网设计可以达到舱内的灭火剂浓度要求。

关键词:民用飞机;灭火系统;超细干粉灭火剂;试验分析

中图分类号:V244.1+2

文献标识码:A

[Abstract] NaHCO₃ fine dry powder is an effective and green agent which is potential alternative of Halon 1301 used in current civil aircraft fire extinguishing system. In this paper, we built a fire extinguishing system for NaHCO₃ fine powder agent based on a certain civil aircraft engine fire extinguishing system and performed the discharge test on it. The test result shows that the average flow rate of agent in this system is high enough, but the modification of current system is required to adjust agent splitting ratio for better performance. Preliminary agent concentration calculation demonstrates that current pipe network design can meet the agent concentration requirement.

[Key words] civil aircraft; fire extinguishing system; fine dry powder; test analysis

0 引言

随着哈龙灭火剂被禁用,其使用范围在不断缩小。政府、适航当局、民用航空工业界都在积极努力地寻找哈龙灭火剂的替代产品。目前航空工业界比较关注 HFC-125、Novec1230、CF₃I 和 NaHCO₃超细干粉灭火剂,并开展了大量的研究^[1-4]。FAA 也已经对多种环保灭火剂、细水雾灭火系统^[5]、惰化气体抑制系统^[6]进行了多项研究。

NaHCO₃超细干粉灭火剂在发动机/APU 舱的使用是一个新的研究课题。这种灭火剂具有极高的灭火效率,每立方米的保护空间仅需要 100g ~ 200g 灭火剂,且完全环保。在对灭火剂添加了特殊

的添加剂之后,超细干粉灭火剂能表现出类似流体的状态,能够在固定式灭火管网系统中类似于液体一样的输送,并能在保护空间中随气流迅速扩散,通过发动机舱内的冷却气流来覆盖整个火区。美国的凯德航空和防务公司(Kidde Aerospace & Defense)专门研发了用于飞机发动机舱的 NaHCO₃灭火剂,并已与 FAA 合作进行了大量试验,包括灭火剂的最低性能试验、小尺寸发动机火灾模拟试验、高低通风量下的油雾火及油池火试验、全尺寸发动机模拟舱管网释放试验和波音 747 试验平台真实灭火试验。目前 FAA 初步评估该灭火剂的灭火标准为 125g/m³。

灭火系统的管网设计对灭火剂的喷射性能具

有决定性影响。由氮气加压和推动的 NaHCO_3 超细干粉灭火剂在管网内的流动是典型的气/固两相流动,流动情况复杂,难以通过理论分析或建模计算等手段对其性能进行分析,因此搭建基于民用飞机发动机灭火系统管网的超细干粉灭火系统的试验台,开展超细干粉灭火系统喷射试验,目的是对灭火系统的喷射性能进行试验评估和分析。本试验研究基于前期的超细干粉管内管流阻损失试验开展^[7]。

1 试验用超细干粉灭火剂物性指标

本文中试验用 NaHCO_3 超细干粉灭火剂的具体物性指标如表 1 所示。

表 1 超细干粉灭火剂物性指标

序号	物性指标	测试结果
1	松密度/g/ml	0.6
2	含水率/%	0.18
3	吸湿率/%	1.23
4	斥水性	无明显吸水,不结块
5	抗结块性(针入度)/mm	29.7
6	耐低温性/s	2.0
7	90% 粒度/ μm	16.1 μm

2 试验方法

2.1 试验台及试验设备

本试验台中所使用的设备包括灭火瓶、瓶头阀、瓶头阀启动装置、被测管路和数据采集系统。灭火瓶用于高压存储灭火剂,瓶头阀用于控制灭火剂的释放。瓶头阀启动装置由高压气体瓶、电磁阀和气动装置组成,可快速开启瓶头阀,以模拟实际中使用爆炸帽释放灭火剂的情况。数据采集系统通过布置在被测管网中的压力传感器采集管内流动的压力数据。试验台示意图如图 1 所示,主要设备如图 2 所示。

2.2 试验管网

本试验中所使用的导管材料为不锈钢,内径 16mm,壁厚 1mm,采用角钢安装支撑。管网走向和布局与某型飞机的左发动机灭火系统管网一致,接头数量相同,并考虑了管网扬程变化。试验管网上共布置了 3 个压力传感器,分别安装在灭火瓶出口、核心舱出口和风扇舱出口,采集喷射过程中这几处

的压力变化情况,判断压损和喷射时间。这三个采样点压力数据具有代表性。管网安装如图 3 所示。

本试验管网约 16m,试验灭火剂 9kg。

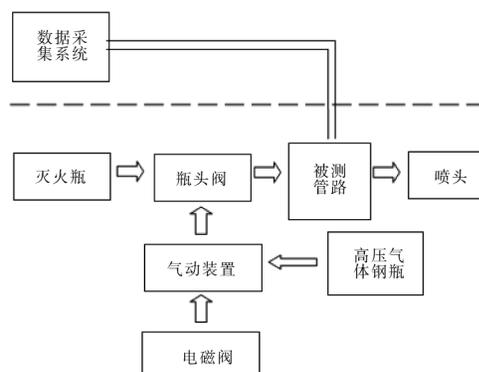


图 1 超细干粉灭火系统试验台示意图



(a) 灭火瓶



(b) 压力数据采集系统

图 2 主要的试验设备

2.3 试验前准备及方法

- (1) 打开数据采集与图像采集记录系统,待系统稳定;
- (2) 按连接被测管路,将灭火瓶安装于机架;
- (3) 依次将瓶头阀、启动装置、被测管路、测试

仪器等相关部件接入试验系统;

(4) 检查管路系统密封性;

(5) 将准确称量的灭火剂充入灭火瓶,并充装至试验压力;

(6) 检查试验装置是否正确安装;

(7) 打开启动装置,释放灭火剂,同时实时测量3个典型位置的的压力数据,并绘制“压力—时间”曲线;

(8) 灭火剂释放完毕后,断开被测管路,卸下启动装置和瓶头阀,保存采集的数据;

(9) 用高压气体冲洗灭火瓶和被测管路;

(10) 重复3~9步骤三次,分别记录试验数据。

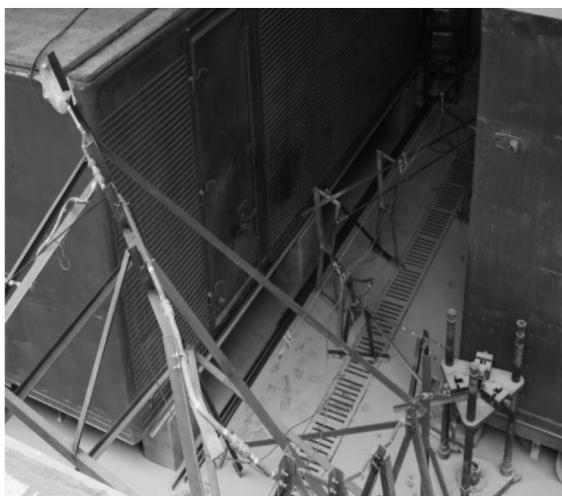


图3 试验管网的实际安装

3 试验结果与分析

3.1 试验结果

图4是连续3次中一次试验的压力随时间的变化曲线。三次试验数据保持了良好的一致性。

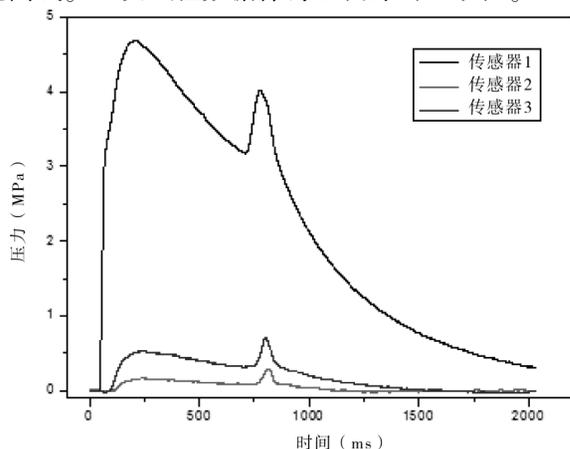


图4 试验所测“压力—时间”曲线图

从压力变化曲线可看出,随时间变化,管路中会出现两次压力峰值,这是由于固体灭火剂和氮气两相流动的特点形成的,基本表征了灭火剂到达传感器的时间和后续瓶内高压氮气达到传感器的时间,这种特征也同样出现在直管沿程损失试验之中。

由于充装压力很高,气/固两相流体在管路中的流动非常迅速,三个传感器压力峰值的出现时间几乎相同。在两个压力峰值之间的压力几乎为线性变化,这段时间内传感器位置处工质主要为固体灭火剂,氮气混合在固体灭火剂颗粒的间隙中,持续时间约为0.5s,该段也可以看作灭火剂的稳定流动阶段。而第二个峰值之后压力呈二次曲线变化,主要为氮气的膨胀降压过程,并混合有部分固体灭火剂,持续时间约为0.75s。根据曲线可以判断出整个管网的喷射时间约为1.5s(下降至两个出口处压力为0的时间),平均流量为6kg/s。

管网进口处的压力变化较两个出口位置的变化更为显著,且明显高于两个出口处的压力值,这主要是由两个原因造成的:(1)管路长度较长,管网内体积较大,高压氮气能在其中完成一定的膨胀降压;(2)管网形状较复杂,管接头和管路弯曲多并有一段上升管路,沿程和高程压损都较大。这对整个管网的喷射是不利的。

在稳定流动阶段末期,进口处与风扇舱出口处和核心舱出口处的压力差(静压)分别约为2.8Mpa和3.1Mpa,绝对压力值约为0.4Mpa和0.1Mpa。可见通往核心舱灭火喷嘴的导管流阻更大,这主要因为在三通接头之后,流向风扇舱导管形状比流向核心舱的导管简单。同时连接风扇舱导管的三通接头出口与入口为直线,而与连接核心舱导管的出口呈90°弯曲,这样导致灭火剂更容易流向风扇舱。

根据喷嘴流量公式(见式(1),其中 q 为流量, k 为喷嘴的流量系数, p 为喷嘴处的压力)可知,在喷嘴几何特征及流动介质相同的情况下,各喷嘴处的流量与该处压力的平方根成正比。

$$q = k\sqrt{10p} \quad (1)$$

经计算可得,风扇舱喷嘴处的流量与核心舱喷嘴处的流量之比约为2:1,在同时释放的情况下,喷入风扇舱的灭火剂约为75%,喷入核心舱的灭火剂约为25%。

根据该型飞机发动机风扇舱和核心舱灭火

剂的剂量分配计算,风扇舱需要约 71% 的灭火剂,而剩下的 29% 则需要输送至核心舱。可见按照目前的管网设计,输送至风扇舱的灭火剂量较为富余而核心舱灭火剂稍有不足,但与设计目标差距较小,可修改优化管网调整至目标舱的灭火剂比例。

3.2 灭火剂浓度初步分析

在飞机上的实际使用中,高压灭火系统会高速将灭火剂喷入发动机舱内,同时舱内的通风冷却气流又会带走一部分灭火剂。当灭火剂喷入发动机舱内后会随着气流迅速扩散,覆盖整个发动机舱。只有当灭火剂浓度高于标准灭火浓度值时才能确保扑灭火灾,因此维持一定浓度的灭火剂是灭火系统扑灭火灾的关键。本文基于试验结果,初步对灭火剂浓度进行估算。舱内的灭火剂平均体积浓度计算见式(2)~式(4),其中 M 为舱内的灭火剂质量, \dot{m}_m 为灭火剂喷入舱内的平均质量流量, \dot{m}_{out} 为被通风冷却气流带走的灭火剂质量流量, C 为舱内的灭火剂平均体积浓度, V 为舱内体积, \dot{m}_{vent} 为舱内通风冷却气流质量流量, ρ_{air} 为当地空气密度。计算条件为飞机处于海平面,最低环境温度下,基于某型大涵道比涡扇发动机的分舱和通风冷却设计。

$$\frac{dM}{dt} = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} \quad (2)$$

$$M = C \cdot V \quad (3)$$

$$\dot{m}_{out} = C \cdot \dot{m}_{vent} / \rho_{air} \quad (4)$$

风扇舱和核心舱灭火剂浓度随时间的变化曲线如图 5 所示。通过估算可以看出两个舱内的灭火剂浓度基本呈线性变化。风扇舱灭火剂浓度的

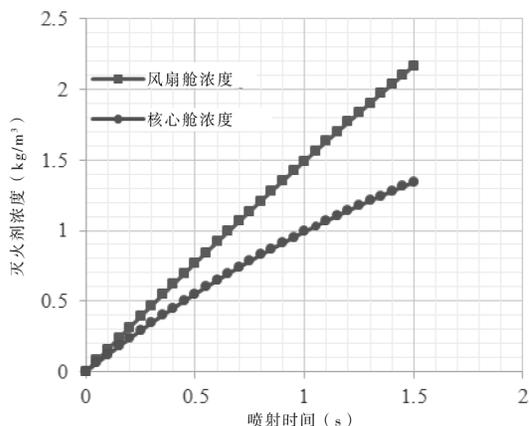


图 5 估算的灭火剂浓度随时间变化曲线

增加速度明显高于核心舱灭火剂浓度。当灭火剂喷射结束时,风扇舱内的灭火剂浓度约为 2.2 kg/m^3 ,核心舱内灭火剂浓度为 1.34 kg/m^3 ,远高于标准灭火浓度 125 g/m^3 。在实际应用中,舱内的灭火剂浓度分布是不够均匀的,而且扩散过程需要一定时间,因此真实的灭火剂浓度应低于本文的计算值。

4 结论

本文以某型飞机发动机灭火系统管网为基础,搭建了一套 NaHCO_3 超细干粉灭火系统试验台,并在该试验台上进行 3 次试验。试验结果初步表明灭火系统的喷射流量能够满足灭火系统设计的要求,经计算出的灭火剂在舱内的浓度也高于标准 NaHCO_3 超细干粉灭火剂浓度,初步验证了该灭火系统的喷射性能。利用飞机上现有灭火系统管网可以较方便的替换为超细干粉灭火剂就能满足灭火系统性能,随着超细干粉灭火剂的研究深入和改进,将有可能应用于民用飞机固定式灭火系统中。本文所使用的计算模型仅用于支持系统初步性能分析,灭火系统的实际性能仍需要通过试飞试验进行验证。

参考文献:

- [1] Thomas G. Cleary, Jiann C. Yang. Pipe Flow Characteristics of Alternative Agents for Engine Nacelle Fire Protection [C]. Proceedings of HOTWC, 1995.
- [2] W. C. McCain and J. Macko. Toxicity Review for Iodotrifluoromethane (CF_3I) [C]. Proceedings of HOTWC, 1999.
- [3] Jiann C. Yang, Samuel L. Manzello, and Marc R. Nyden. Discharge of CF_3I In a Cold Simulated Aircraft Engine Nacelle [C]. Proceedings of HOTWC 2002, April 2002.
- [4] Doug Ingerson. Aircraft Powerplant Halon Replacement [C]. Proceedings of IASFPWG 2014, October 2014.
- [5] Timothy R. Marker, John W. Reinhardt. Water Spray as a Fire Suppression Agent for Aircraft Cargo Compartment Fires [R]. DOT/FAA/AR-TN01/1, 2001.
- [6] William Cavage. Cargo Bay Suppression Using a Fuel Tank Inerting System [C]. International Fire and Cabin Safety Research Conference. Atlantic City, 2007.
- [7] 胡博, 宣扬. 管路长度对 BC 超细干粉灭火剂管内流动阻力影响的试验研究 [J]. 工程与试验, 2014, 54(2): 26-29.