

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.05.007

## 飞机火焰抑制器阻火测试中 混合气体的适用性研究

胡静<sup>1</sup>, 刘勇<sup>1</sup>, 杨国凯<sup>2,3,4</sup>, 李志宝<sup>2,3,4</sup>, 束伟伟<sup>2,3,4</sup>, 司晓亮<sup>2,3,4</sup>

(1. 中国民航大学航空工程学院, 天津 300300; 2. 安徽省飞机雷电防护省级重点实验室, 安徽 合肥 230031; 3. 强电磁环境防护技术航空科技重点实验室, 安徽 合肥 230031; 4. 合肥航太电物理技术有限公司, 安徽 合肥 230031)

**摘要:**文章对典型民用飞机油箱通气口飞机火焰抑制器火焰传播特性开展试验研究。根据 SAE ARP5416 中规定的 H<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>、Ar 3 种混合气体的燃爆方案, 借鉴 ISO 16852 标准下的试验方法, 自建燃爆试验台, 并分别在不同 H<sub>2</sub> 体积分数、阻火芯体内部孔径和芯体长度的情况下开展系列试验, 并与现行商用阻火器特性进行对比, 同时使用高速摄像机获得爆燃阻火现象及规律并开展仿真对比。试验结果表明, 使用体积分数为 5.0%~10.0% 的 H<sub>2</sub> 进行飞机火焰抑制器火焰传播试验时, 试验阻火成功率极低, 并得到 H<sub>2</sub> 体积分数升高对火焰传播速度的影响规律。研究表明, H<sub>2</sub> 与航空煤油蒸气的特性差异是阻火失效的关键因素。该文对此次试验的混合气体局限性进行分析, 试验结果也为 H<sub>2</sub> 类阻火器的研究提供一定的参考。

**关键词:**飞机火焰抑制器; 混合气体; 燃爆过程; 阻火测试; 气体适用性

**中图分类号:** V264.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-5060(2024)05-0620-08

### Study on the applicability of mixture gas in flame suppression test of aircraft flame arrestor

HU Jing<sup>1</sup>, LIU Yong<sup>1</sup>, YANG Guokai<sup>2,3,4</sup>, LI Zhibao<sup>2,3,4</sup>, SHU Weiwei<sup>2,3,4</sup>, SI Xiaoliang<sup>2,3,4</sup>

(1. School of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China; 2. Anhui Province Key Laboratory of Aircraft Lightning Protection, Hefei 230031, China; 3. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on High Intensity Electromagnetic Environment Protection, Hefei 230031, China; 4. Hefei Hangtai Electrophysics Technology Co., Ltd., Hefei 230031, China)

**Abstract:** The flame propagation characteristics of flame arrestor for typical civil aircraft fuel tank vent were studied. According to the combustion and explosion scheme of mixture gas of H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> and Ar stipulated in SAE ARP5416, and referring to the test method under ISO 16852 standard, the combustion and explosion test platform was built, and a series of tests were carried out under the conditions of different H<sub>2</sub> concentration ratios, internal apertures and lengths of flame suppression core. The characteristics of the flame arrestor were compared with those of current commercial flame arrestor. The phenomenon and law of deflagration flame arrestor were also obtained by using high-speed camera and the simulation was carried out. The results show that the flame propagation test of aircraft flame arrestor using H<sub>2</sub> with a concentration ratio of 5.0%~10.0% has a very low success rate of flame suppression, and the influence rule of increasing H<sub>2</sub> concentration on the flame propagation velocity is obtained. The results show that the difference between H<sub>2</sub> and aviation kerosene vapor is the key factor in the failure of flame suppression. The limitations of mixture gas in this test were explained. The test results can provide reference for the research on H<sub>2</sub>-type flame arrestor.

收稿日期: 2023-03-30; 修回日期: 2023-04-23

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(J2019-Ⅷ-0009-0170)

作者简介: 胡静(1972—), 女, 江西高安人, 中国民航大学教授, 硕士生导师;

司晓亮(1985—), 男, 吉林长春人, 博士, 安徽省飞机雷电防护省级重点实验室副研究员, 硕士生导师, 通信作者, E-mail: chinae3@126.com.

**Key words:** aircraft flame arrestor; mixture gas; combustion and explosion process; flame suppression test; gas applicability

## 0 引 言

飞机火焰抑制器是一种用以防止雷电等外部火源对飞机燃油系统侵袭的安全防护装置,并作为一种特殊类型阻火器已被广泛应用于各类飞机的通气系统及汽化器蒸气排放系统中。如火焰在通过火焰抑制器时,火焰抑制器可防止爆燃的传播和继而引发的油箱燃烧、爆炸等灾难性后果<sup>[1-2]</sup>。火焰抑制器的工作机制是在火焰通过狭小通道时,狭小通道吸收火焰的热量及火焰受到狭缝淬熄原理的作用,从而达到使火焰熄灭的目的<sup>[3-4]</sup>。在火焰抑制器设计研制所使用的气体类型方面,Parker 公司生产的飞机火焰抑制器使用 FAA AC25.975-1 所推荐使用的正己烷(C<sub>6</sub>H<sub>14</sub>)、丙烷(C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>)为测试气体<sup>[5-6]</sup>,Enardo 公司研制的 EN-7 系列阻火器使用的气体组为 ISO 16852 标准下的 II A、II B3 类气体组<sup>[7-8]</sup>。

考虑到飞机火焰抑制器在实际工作中交互作用的气体都是以航空煤油蒸气为主,且由于在实际试验中对于定量燃油蒸气的获取及使用较为困难,因此在试验测试中主要以其他具有相似代表性特征的燃料气体来替代。如在 SAE ARP5416 标准中,燃油系统引燃混合气体的方法考虑到 H<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>、Ar 混合气体符合在规定条件下的引燃概率,并且由于其具有较低的能量释放,有利于提高试验的安全性及燃烧过程易被相机捕捉的特点<sup>[9]</sup>,因此混合气体常被用作燃油系统试验气体。因为燃油系统试验气体属于燃油系统安全试验的重要组成部分,所以验证 H<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>、Ar 混合气体作为替代品是否具有可行性很有必要,且具有重要的工程实际意义。

事实上,H<sub>2</sub> 作为清洁无碳燃料可以取代传统的化石燃料并减少其相关的碳排放,并且具备能量密度高(相当于航空煤油的 3 倍)的优势<sup>[10-11]</sup>,因此 H<sub>2</sub> 作为测试气体对飞机燃油系统进行测试也可为飞机火焰抑制器的研究提供一定的边界。

关于 H<sub>2</sub> 混合气体的火焰燃烧淬熄研究方面,文献[12]以 H<sub>2</sub> 体积分数、穿孔板长度、火焰速度和爆炸压力等参数变化规律为主,探索 H<sub>2</sub> 空气混合物在火焰通过穿孔板时的传播和熄灭问题,研究结果观察到 3 种火焰现象并找到其与压

力峰值的关系;文献[13]采用金属丝网揭示其在不同当量比下对预混 H<sub>2</sub>、空气混合物的火焰熄灭行为和压力特性的影响,研究结果表明金属丝网体积对火焰淬熄有较大的影响;文献[14]通过使用相同横截面和不同厚度的穿孔板,研究其对不同等效比和初始压力的 H<sub>2</sub> 空气混合物中火焰传播的几何影响,结果表明,火焰经历的“去”和“淬火”2 种传播模式的界限取决于穿孔板的几何尺寸和混合物的初始条件;文献[15]在填充氧化铝球形珠的通道内研究多孔介质中高速火焰传播的加速问题,并通过电离探头和压电压力传感器获得 H<sub>2</sub>、空气混合物火焰的到达时间和压力时间,研究结果表明混合火焰具有极高加速度,火焰传播机制转变。

尽管在常规油气管路等阻火器研究方面国内外已有不少报道,但飞机燃油箱通气口火焰抑制器相关技术仍被国外垄断,国内研究较少。因此,为研究 H<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>、Ar 混合气体在飞机火焰抑制器测试方面的适用性问题,本文以 SAE ARP5416 标准中规定的 H<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>、Ar 3 种混合气体的爆燃方案为主,借鉴 ISO 16852 标准下的试验方法自建爆燃试验台。对混合气体中 H<sub>2</sub> 体积分数、阻火芯孔径及芯体长度对火焰传播的影响进行试验测试,并对试验结果进行分析。试验可为国内自主研发飞机火焰抑制器的工程设计及试验边界提供参照,也可为 H<sub>2</sub> 类阻火器的研究提供参考。

## 1 试验装置和方法

### 1.1 试验装置

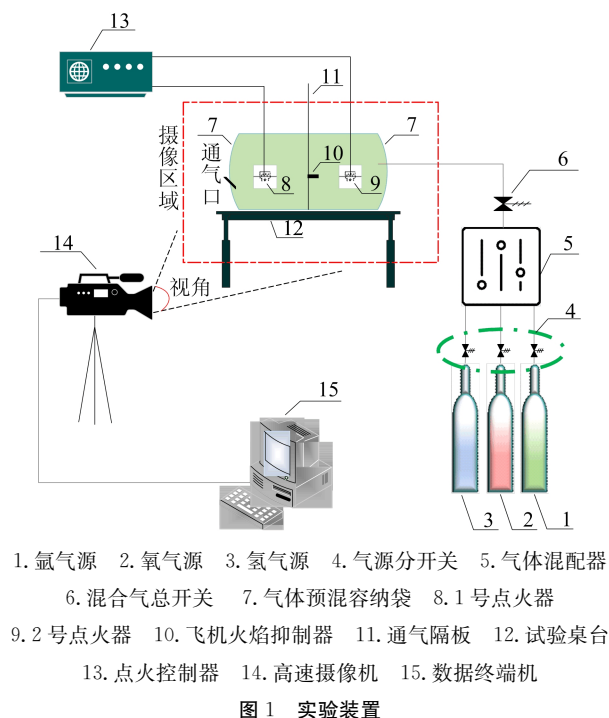
本试验使用的混合气体初始比例及增加比例按照 SAE ARP5416 标准,见表 1 所列。

表 1 H<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>、Ar 混合气体试验组分 %

项目	$\varphi(\text{H}_2)$	$\varphi(\text{O}_2)$	$\varphi(\text{Ar})$
最初混合气体	5.0	12.0	83.0
增加 1% H <sub>2</sub>	6.0	14.4	79.6
增加 2% H <sub>2</sub>	7.0	16.8	76.2
增加 3% H <sub>2</sub>	8.0	19.2	72.8
增加 4% H <sub>2</sub>	9.0	21.6	69.4
增加 5% H <sub>2</sub>	10.0	24.0	66.0

试验装置由待测火焰抑制器、气体预混容纳袋、供气系统、气源调节系统、点火系统和数据采

集系统 6 个主要部分组成,如图 1 所示。



待测火焰抑制器由合肥航太电物理技术有限公司研发,型号为 HY-1、HY-1n,如图 2 所示。总流通截面面积为  $7.1628 \text{ cm} \times 2.0828 \text{ cm}$ ;箔片厚度为  $0.01016 \text{ cm}$ ,芯孔内切圆直径分别为  $1.6、0.8 \text{ mm}$ (具有不同孔隙率);阻火芯长度相应为 4 组, $1.6 \text{ mm}$  直径对应长度为  $50、60、80 \text{ mm}$ , $0.8 \text{ mm}$  直径对应长度为  $40、50 \text{ mm}$ 。试验时可根据需要更换芯体到火焰抑制器外壳内。现行商用飞机火焰抑制器如图 3 所示。

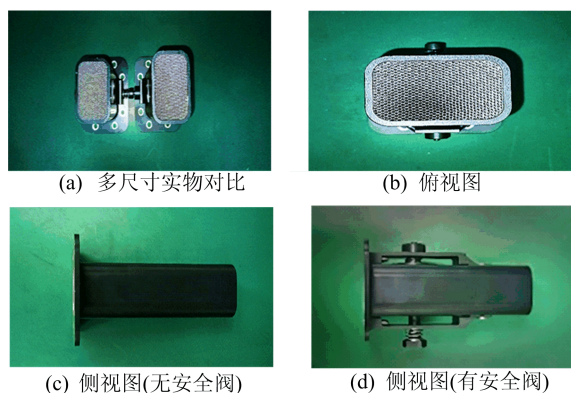


图 2 待测飞机火焰抑制器

气体预混容纳袋根据 ISO 16852 端口火焰抑制器测试标准使用薄膜塑料袋,考虑到安全性和待测火焰抑制器的实际大小,本次试验参考 ISO

16852 测试标准,依据阻火器与气体预混容纳袋的实际尺寸,暂选定薄膜塑料袋长  $8 \text{ cm}$ ,充气后直径  $4 \text{ cm}$ ,厚度  $0.05 \text{ mm}$ 。

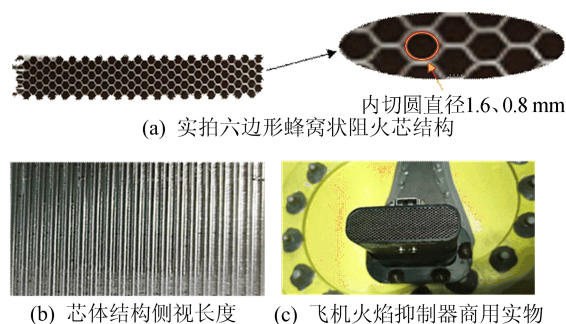


图 3 商用飞机火焰抑制器

供气系统分别由标准  $\text{H}_2、\text{O}_2、\text{Ar}$  气瓶提供,气源调节系统和点火系统由实验室爆燃试验统一设备。其中点火控制器点火能量可控,并且其控制的点火器分别为用于试验点火的 1 号点火器和用于阻火成功后右侧气体可燃性检测的 2 号点火器,其中 1 号点火器中心点火位置距离右侧隔板  $30 \text{ cm}$ 。

数据采集系统使用高速摄像机(phantom, v2512)以  $10000 \text{ 帧/s}$  和  $1024 \times 768$  像素工作并连接至数据终端电脑。

辅助试验工装为通气隔板和试验桌台。通气隔板模拟蒙皮,并且在火焰抑制器连接后进行硅胶密封。

## 1.2 试验步骤及环境

将试验桌台和夹持装置完全固定,然后在右边薄膜塑料袋合适位置开  $10 \text{ cm}$  切口用于排气。将输气管从左边薄膜塑料袋左侧伸入  $10 \text{ cm}$ ,1、2 号点火器分别放入袋内轴线指定位置(点火器中心分别距离左右薄膜塑料袋端口两侧  $15 \text{ cm}$ ),然后分别在薄膜塑料袋两端的点火器和输气管连接处密封。

使用气体混配器开始充气,充气顺序和操作如下:首先充入  $\text{Ar}$ ,待  $\text{Ar}$  流量计值显示稳定后再充入  $\text{O}_2$ (此时充入气体为  $\text{Ar}$  和  $\text{O}_2$ ),待  $\text{O}_2$  流量计值显示稳定后再充入  $\text{H}_2$ (此时充入气体为  $\text{Ar}、\text{O}_2、\text{H}_2$ ),待  $\text{H}_2$  流量计值显示稳定后,即认为充入 3 种试验气体流量已经稳定;然后将 3 种气体稳定充气计时  $8 \text{ min}$ ;最后关闭气源,将右侧薄膜塑料袋切口密封,准备点火。

试验时  $\text{H}_2$  体积分数从  $5.0\%$  开始,每组试验重复做 4 次,每次在将  $\text{H}_2$  体积分数增加  $1.0\%$ ,

直至 10.0%。阻火芯体内切圆直径从 1.6 mm 开始测试,再测试 0.8 mm 内切圆直径的芯体。

以上所有试验都在大气条件 101.325 kPa,环境温度(300±5) K 条件下进行。

## 2 试验数据及讨论

### 2.1 试验现象及结果

试验以火焰是否穿过火焰抑制器,使未点火侧薄膜塑料袋内气体引燃为结果来判定是否成功阻火。阻火失效试验代表性过程如图 4 所示。

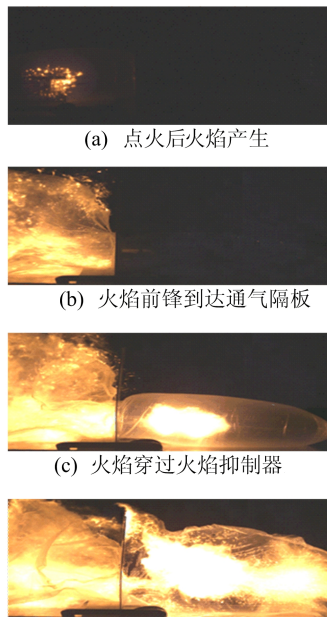


图 4 阻火失效试验过程

试验从体积分数 5.0% 的 H<sub>2</sub> 开始进行 H<sub>2</sub> 阻火试验,并尝试在试验成功阻火的情况下探寻其阻火阈值,试验结果见表 2 所列。表 2 中:*d* 为内切圆直径,单位 mm;*L* 为阻火芯体长度,单位 mm;∅表示仅有 1/2 次数成功阻火;X 表示 4 次试验均未成功阻火。

表 2 阻火试验结果

$\varphi(\text{H}_2)/\%$	<i>d</i> =1.6			<i>d</i> =0.8	
	<i>L</i> =50	<i>L</i> =60	<i>L</i> =80	<i>L</i> =40	<i>L</i> =50
5.0	X	X	X	X	X
6.0	X	X	X	X	X
7.0	∅	X	X	X	X
8.0	X	X	X	X	X
9.0	X	X	X	X	X
10.0	X	X	X	X	X

由于本次试验结果出现了极低的阻火成功率,为使试验具有对比说明性,于是与现行商用飞机火焰抑制器进行对比试验,结果如图 5 所示。



(a) 试验布置现场



(b) 试验器件

图 5 现行商用飞机火焰抑制器对比试验

此次对比试验使用的现行商用飞机火焰抑制器结构参数如下:内切圆直径为 1.6 mm,芯体长度为 50 mm,总流通截面面积为 7.162 8 cm×2.082 8 cm。

对商用飞机火焰抑制器实体进行 H<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>、Ar 混合气测试时,试验 H<sub>2</sub> 的体积分数为 5.0%~10.0%,所有试验结果全为阻火失败。

### 2.2 H<sub>2</sub> 体积分数对火焰速度的影响

以目前商用飞机火焰抑制器参数为标准,其他试验环境不变,选取阻火芯内切圆直径为 1.6 mm,芯体长度为 50 mm 的火焰抑制器试验数据进行分析讨论。将 H<sub>2</sub> 体积分数从 5.0% 开始,以每次 1.0% 的占比增加到 10.0%,探究 H<sub>2</sub> 体积分数与火焰速度对火焰淬熄的影响。之前的研究表明,当 H<sub>2</sub> 体积分数在一定范围内时,其燃烧的最终温度、压力会随体积分数的升高而升高<sup>[16]</sup>,并且火焰传播速度也随 H<sub>2</sub> 体积分数的增大而增大<sup>[17]</sup>,同时火焰传播速度也是阻火成败的关键<sup>[18-19]</sup>。

在同一点火位置、不同 H<sub>2</sub> 体积分数情况下,火焰的传播过程如图 6 所示。

以 5.0%、7.0%、10.0% H<sub>2</sub> 体积分数试验为代表并进行对比后发现,当 H<sub>2</sub> 在规定的 H<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>、Ar 混合气体中的占比越高时,对于点火反应时间也越短,同时左侧塑料袋内火焰到达通气隔板的时间也越短,并且火焰整体反应更剧烈,虽然 H<sub>2</sub>、O<sub>2</sub> 摩尔比保持不变,但在混合气中燃料和氧化物的总量占比相比较之前增加。

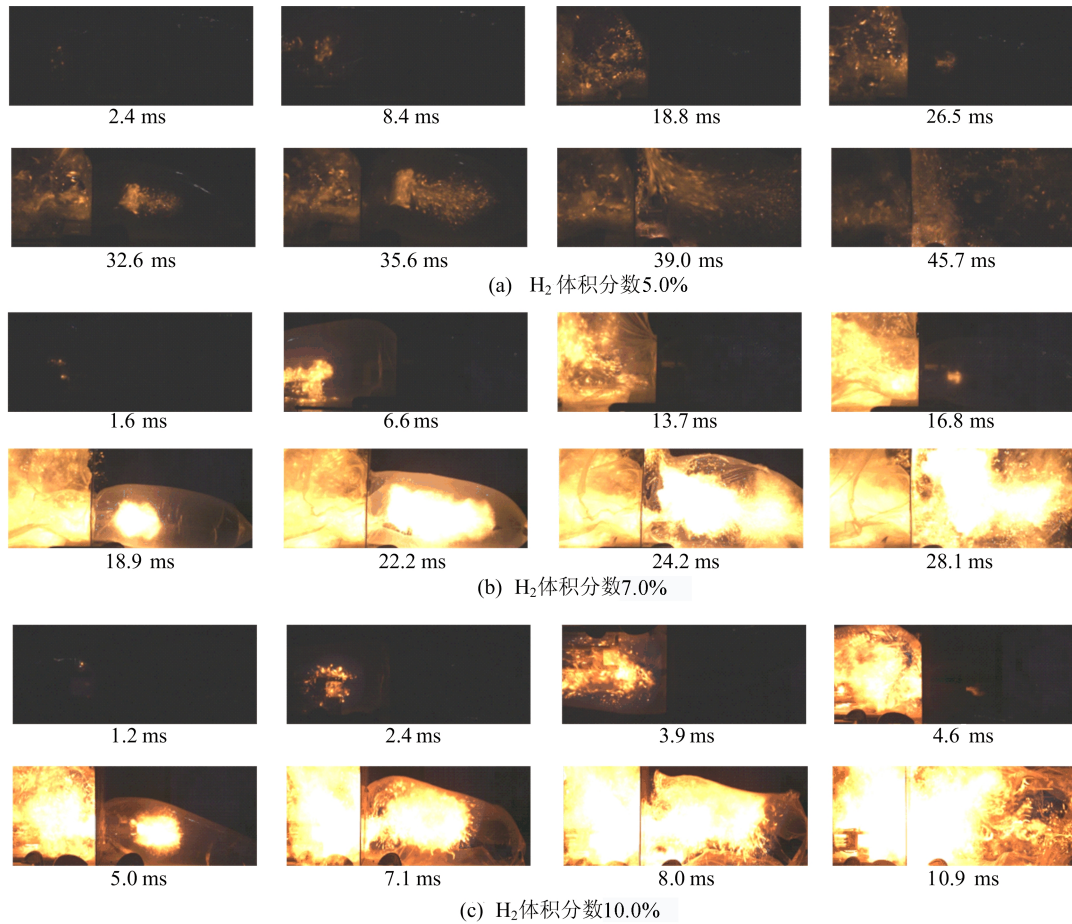


图 6 不同 H<sub>2</sub> 体积分数点火后特定位置火焰现象

不同体积分数下的监测点位置及平均速度如图 7、图 8 所示。

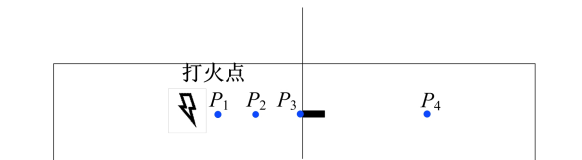


图 7 各监测点位置分布示意图

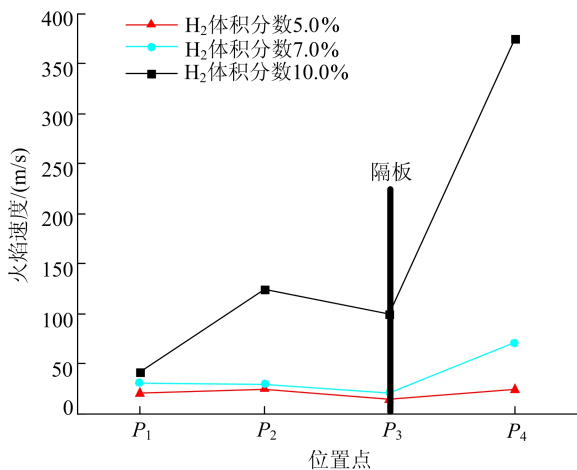


图 8 不同 H<sub>2</sub> 体积分数下各特定位置点平均速度

图 7 中:  $P_1$ 、 $P_2$  距离左侧打火点位置分别为 1、2 cm;  $P_3$  为通气隔板火焰抑制器进口中心位置;  $P_4$  距离左侧隔板 40 cm(即右边袋内轴向中心位置)。此平均速度估值是通过比例放大单位时间火焰前锋行进的距离对行进时间的导数, 并取平均值获得。从实验结果来看, 试验验证了当 H<sub>2</sub> 体积分数分别为 5.0%、7.0%、10.0% 时, 火焰速度相应增加, 并且呈非线性形式。但在  $P_3$  点时, 速度出现下降, 这可以认为主要是由于火焰前锋在  $P_3$  点处受到了来自隔板及阻火芯反射压力波的作用所导致<sup>[18]</sup>。

### 2.3 H<sub>2</sub> 与航空煤油蒸气的适用性对比分析

本文选择通过 ANSYS FLUENT 进行气体爆燃同尺寸建模仿真辅助分析两者不同的变化趋势。基于具体仿真条件, 使用与试验相同当量比与体积分数的混合气, 航空煤油蒸气使用 FLUENT 数据库中 Jet A1 vapor (C<sub>12</sub>H<sub>23</sub>)。此处将 H<sub>2</sub> 体积分数为 5.0% 的混合气与 1.5% 煤油蒸气混合气爆燃仿真过程进行对比, 从打火点至连接火焰抑制器通气隔板开口处反应进度的仿真结果如图 9 所示。

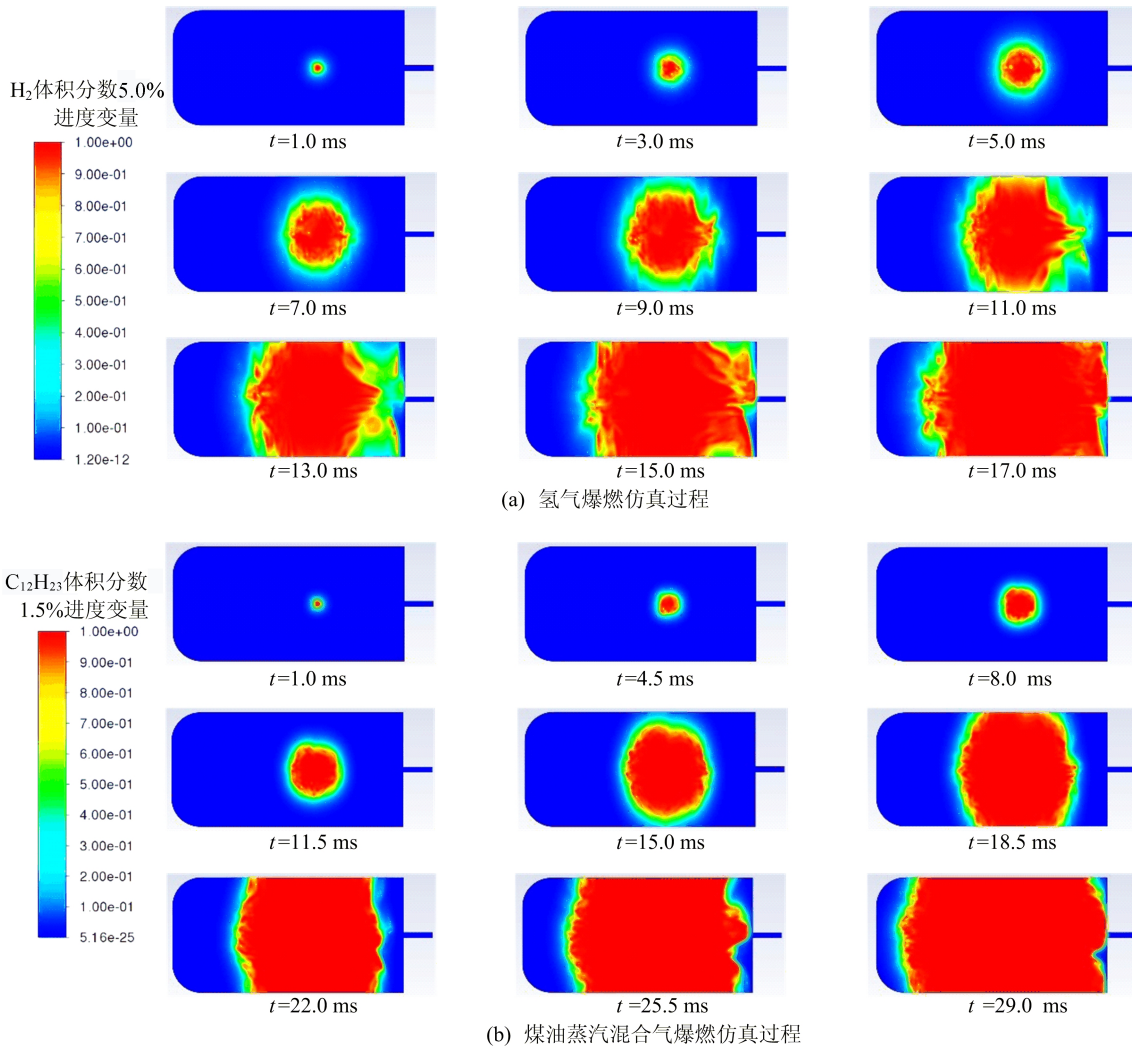


图 9 2 种混合气燃烧进度变量分布

在仿真对比结果中,从点火后 1.0 ms 时开始取样,直到 2 种对比爆燃的火焰前锋到达右侧通气隔板开口处为止,可以明显看出  $H_2$  混合物相比煤油蒸气混合物具有更快的进度变量,并且火焰面的变形和整体拉伸速度也更快,同时,在  $t = 17.0$  ms 时,  $H_2$  混合物质的火焰面前锋已抵达右侧通气隔板入口,而煤油蒸气混合物燃烧火焰面前锋在  $t = 29.0$  ms 时才抵达,因此在体积分数 5.0% 下  $H_2$  混合物爆燃剧烈程度要高于体积分数 1.5% 的煤油蒸气混合物,而这就会造成在通气隔板连接火焰抑制器口处的火焰在进入阻火芯时拥有更高的速度和压力。

当阻火芯结构参数(孔径和长度)一定时,进入阻火器的火焰传播速度和爆炸压力越大,阻火失效的概率就越大<sup>[20]</sup>。

航空煤油蒸气混合物的爆炸极限在 1.4%~7.5%<sup>[21]</sup>之间,且由于不同种类航空煤油的成分不同,其值也稍有差异,因此在对比仿真分析中,

为方便研究,将煤油蒸气混合物的体积分数定为从 1.5% 开始,  $H_2$ 、航空煤油蒸气的体积分数见表 3 所列。

$\varphi(H_2)$	$\varphi(C_{12}H_{23})$	%
5.0	1.5	
6.0	2.5	
7.0	3.5	
8.0	4.5	
9.0	5.5	
10.0	6.5	
	7.5	

表 3 中:  $\varphi(H_2)$  指  $H_2$  体积占  $H_2$ 、 $O_2$ 、Ar 混合气体积的比例;  $\varphi(C_{12}H_{23})$  指  $C_{12}H_{23}$  体积占  $C_{12}H_{23}$ 、空气混合气体积的比例。

在模型右侧通气隔板入口处监测当火焰前锋到达时,2 种混合气在不同体积分数下的速度、压力及温度监测量如图 10 所示。

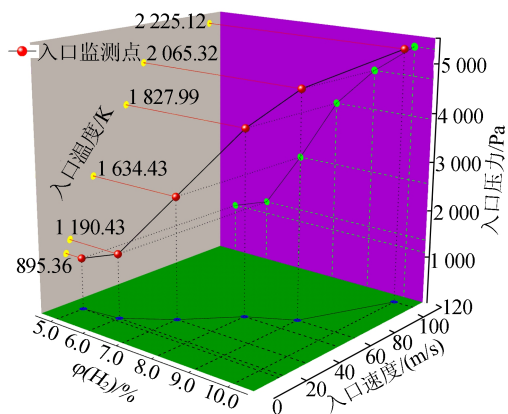
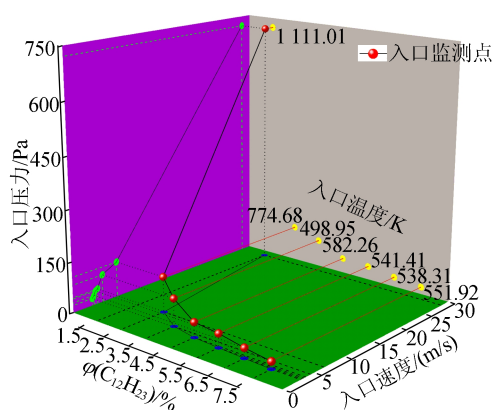
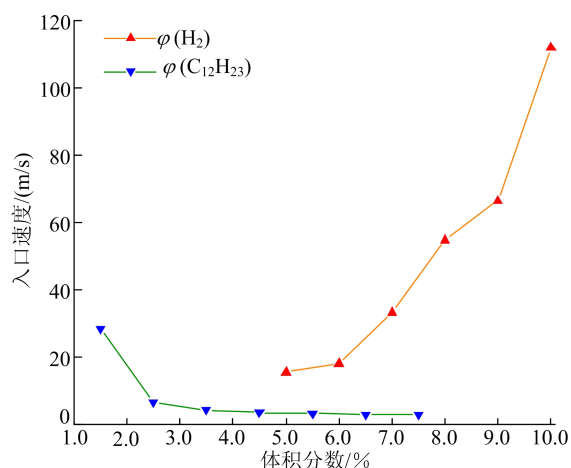
(a)  $\varphi(\text{H}_2)$ (b)  $\varphi(\text{C}_{12}\text{H}_{23})$ 

图 10 2 种混合气监测点数值

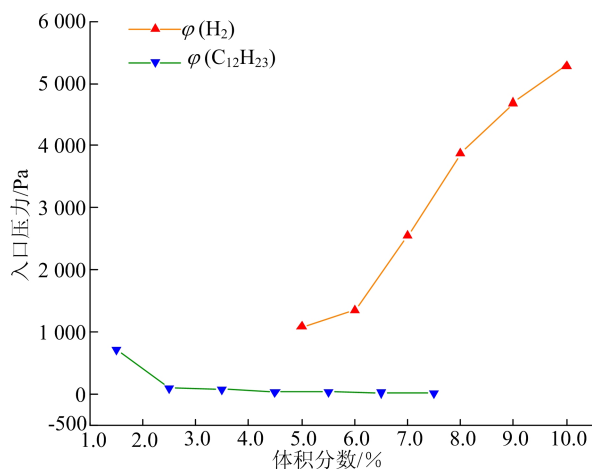
H<sub>2</sub> 体积分数在 5.0%~10.0% 的过程中,火焰前锋到达相应位置处的各监测量都为上升趋势,而煤油蒸气体积分数在 1.5%~7.5% 的过程中,其相应值基本趋势都为下降,并且煤油蒸气体积分数在 1.5%~2.5% 的过程中,各监测量下降趋势显著。2 种混合气相应各监测量的对比如图 11 所示。

在煤油蒸气体积分数为 1.5% 时,其入口速度与入口温度都要稍高于 5.0% 体积分数 H<sub>2</sub> 的监测值,仅入口压力稍低,可以说明 2 种混合气体在此相应体积分数时,由于这 3 个监测值较为相近,当这 3 个量可以作为燃料替代的表征参数时,体积分数 5.0% H<sub>2</sub> 附近的混合气可以较好地替代在一定体积分数范围内的煤油蒸气进行相应试验。但随着 2 种混合气体体积分数的增加,其趋势走向开始相反,在 H<sub>2</sub> 体积分数从 5.0% 逐渐增加时,相较于 2.5% 体积分数及以下的煤油蒸气已经开始出现较大的压力、温度及速度表征参数的不符合。同时,由于煤油蒸气体积分数为 1.5% 之后的趋势为逐渐下降,而 H<sub>2</sub> 体积分数在 5.0%

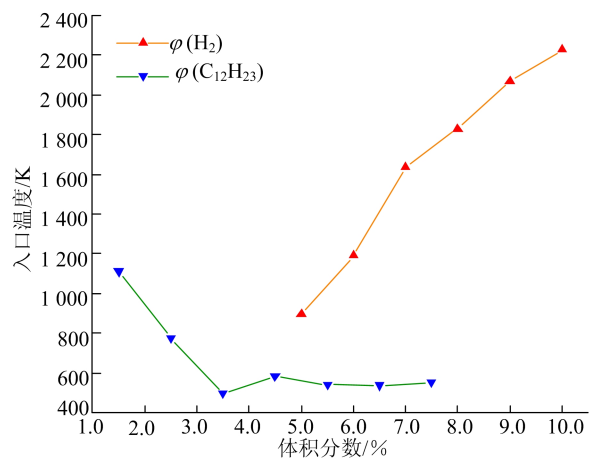
后的趋势为逐渐上升,两者在此相应体积分数点处 3 种监测值都较为相近,且 H<sub>2</sub> 在此体积分数时为其所测体积分数值内的所有监测值最低点,而煤油蒸气在 1.5% 时已为其所测体积分数值内的所有监测值的最高点,甚至 H<sub>2</sub> 入口压力已稍高于煤油蒸气混合物监测值,因此,若使用其他体积分数再进行爆燃进程比对,其意义不大。



(a) 体积分数-速度曲线



(b) 体积分数-压力曲线



(c) 体积分数-温度曲线

图 11 2 种混合气各监测量对比

由于现行商用飞机火焰抑制器中的试验全为阻火失败,对比分析得出以下原因:

1) 入口压力有可能相比入口速度和入口温度对于阻火失效有更强的作用。如果  $H_2$  在爆燃阻火试验中可以作为煤油蒸气的表征性燃料,那么在使用现行商用飞机火焰抑制器进行 5.0%  $H_2$  体积分数试验时也应该成功阻火,但结果却是阻火失败,且仅有入口压力监测值高于煤油蒸气体积分数在 1.5% 时所对应的值。

2) 可能在爆燃阻火试验介质的选择方面,除了在爆燃速度、压力和温度之外还存在其他关键性表征参数。

从最终试验结果来看,在火焰抑制器产品测试气体的选用上,  $H_2$ 、 $O_2$ 、Ar 混合气体对航空煤油蒸汽的试验代替并不具备表征适用性,填补了飞机雷电防护工程空白。同时,本次试验为  $H_2$  类对阻火器的研究提供一定参考。

### 3 结 论

在  $H_2$  体积分数为 5.0%、7.0%、10.0% 下,体积分数的升高会使火焰传播速度呈非线性增加。在阻火芯内切圆孔径 1.6 mm、长度 5 mm 时,不会对火焰淬熄产生影响,体积分数在此范围内的升高反而使火焰越不容易被淬熄。按照 SAE ARP5416 标准中指定的  $H_2$ 、 $O_2$ 、Ar 3 种混合气体的燃油箱,引燃源检测燃爆方案测试飞机火焰抑制器的火焰传播试验可能会存在局限性。本试验对气体适用性进行研究,后续工作需要研究对淬熄机理、点火能量、影响阻火关键因素的相互作用规律等方面展开详细讨论。

### [参 考 文 献]

- [1] AIRBUS. Aircraft characteristics airport and maintenance planning[M]. Blagnac Cedex; Airbus SAS Customer Services Technical Data Support and Services, 2012; 255-259.
- [2] SAE International Group. Aircraft flame arrestor installation guidelines and test methods; SAE ARP 5776—2021[S]. Warrendale; SAE International, 2021; 1-3.
- [3] HOLM J M. II. On the initiation of gaseous explosions by small flames[J]. Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 1932, 14(89): 18-56.
- [4] LAURENCE G B. Using maximum experimental safe gap to select flame arrestors[J]. Process Safety Progress, 2000, 19(3): 140-145.
- [5] Federal Aviation Administration. Fuel vent fire protection; AC 25. 971—1[S]. Washington D C; U S Department of Transportation, 2016; 4-15.
- [6] Parker Hannifin Corporation. Fuel vent flame arrestor | product series[EB/OL]. [2023-03-15]. <https://ph.parker.com/cn/zh/fuel-vent-flame-arrestor>.
- [7] Emerson Process Management Regulator Technologies. Enardo EN-7 series flame arrestor[Z]. Saint Louis; Emerson Process Management, 2020; 1-3.
- [8] International Organization for Standardization. Flame arrestors-performance requirements, test methods and limits for use; ISO 16852—2016[S]. Switzerland; ISO Copyright Office, 2016; 8-11.
- [9] SAE Internatoinal Group. Aircraft lightning test methods; SAE ARP 5416[S]. Warrendale; SAE International, 2005; 128-129.
- [10] CAPURSO T, STEFANIZZI M, TORRESI M, et al. Perspective of the role of hydrogen in the 21st century energy transition[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 251: 114898.
- [11] 曹冠杰, 王业辉, 孙小金. 氢能航空发展现状分析[J]. 航空动力, 2022(2): 29-33.
- [12] WAN Y, WANG C, LI Q, et al. Experimental study of premixed hydrogen-air flame quenching in a channel with the perforated plate[J]. Fuel, 2020, 263: 116733.
- [13] JIN K, WANG Q, DUAN Q, et al. Effect of metal wire mesh on premixed  $H_2$ /air flame quenching behaviors in a closed tube[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2021, 146: 770-778.
- [14] LI Q, SUN X, WANG X, et al. Geometric influence of perforated plate on premixed hydrogen-air flame propagation [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43(46): 21572-21581.
- [15] CICCARELLI G, JOHANSEN C, PARRAVANI M. Transition in the propagation mechanism during flame acceleration in porous media[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33(2): 2273-2278.
- [16] 李咏蔚, 元一单, 杨小明. 安全壳内  $H_2$  燃烧特性数值研究[J]. 核科学与工程, 2022, 42(1): 106-111.
- [17] 路长, 李毅, 潘荣铨. 管道  $H_2$ -空气预混气体爆炸特征的试验研究[J]. 安全与环境学报, 2016, 16(3): 38-42.
- [18] 孙少辰, 毕明树, 丁春辉, 等. 波纹管阻火器内火焰传播的实验与数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(2): 353-364.
- [19] 孙昱, 崔晋恺, 苏永升, 等. 丙烷-空气预混火焰在三角形狭缝内传播特性[J]. 消防科学与技术, 2021, 40(8): 1169-1173.
- [20] LIN C, CAO X, WANG Z, et al. Research on quenching performance and multi-factor influence law of hydrogen crimped-ribbon flame arrestor using response surface methodology[J]. Fuel, 2022, 326: 124911.
- [21] 房军玲, 侯德强, 王茜. 某飞机左发失火原因分析[C]//第六届中国航空学会青年科技论坛论文集: 下册. 北京: 中国航空学会, 2014: 1136-1139.

(责任编辑 张 镛)