航空科学技术
Aeronautical Science & Technology
Sep. 15 2018 Vol. 29 No.09 11-16

机载火焰抑制器流阻特性研究

王洋洋[1, 2, *]，潘俊[1, 2]，刘文怡[2]

1. 航空机电系统综合航空科技重点实验室，江苏 南京 211106

2. 航空工业南京机电液压工程研究中心，江苏 南京 211106

摘　要：通过试验和数值计算方法研究了六边形阻火单元结构火焰抑制器的流阻特性，分析了火焰抑制器结构参数对其流阻特性的影响。研究发现，随着六边形通道边长的减小，火焰抑制器的流阻急剧增大；随着六边形通道壁厚的增加，火焰抑制器的流阻呈增大趋势；阻火单元长度越长，火焰抑制器流阻越大。因此，在火焰抑制器设计过程中，在满足阻火、耐烧及结构强度等设计要求下，应选取较大的六边形通道边长、较小的六边形通道壁厚和阻火单元长度。

关键词：火焰抑制器；流阻特性；阻火单元；试验；数值计算

中图分类号：V228.7　　**文献标识码**：A　　DOI：10.19452/j.issn1007-5453.2018.09.011

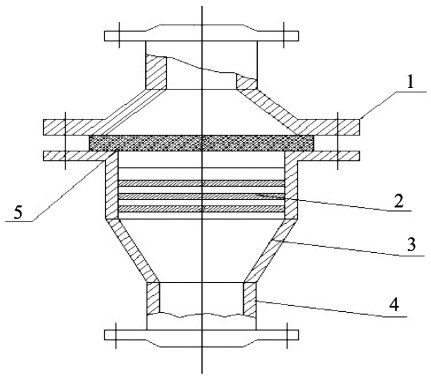
1980 年，美国航空防火抑爆委员会（SAFER）回顾了自 1960 年起全球运输类飞机发生的油箱爆炸事故，对能够延迟地面状态的火焰蔓延和随之而来的油箱爆炸事故的几种方法进行对比评估，如油箱惰化系统、通气口安装火焰抑制器及燃油箱抑爆系统等，SAFER 发现在油箱通气口安装火焰抑制器是当时最切实可用的方法[1~5]，并在其发布的总结性报告中明确了在油箱出口和通气管路上安装火焰抑制器的重要性。

SAFER 的结论极大地促进了机载火焰抑制器的研究与开发，目前火焰抑制器已广泛应用于各类飞机燃油箱通气系统之中，用于延迟地面火焰的蔓延和随后产生的爆炸，为全体乘员的安全疏散提供更多时间。在国外，机载火焰抑制器已是较为成熟的航空货架商品，获得了广泛应用；但在国内，由于民用飞机研制工作刚刚起步，国产机载火焰抑制器研究与应用较少。

因此，本文对火焰抑制器流阻特性进行了理论和试验研究，其研究结果可以为国产机载火焰抑制器的设计提供依据，满足国内飞机研制任务的迫切需要，对于民用飞机和军用飞机的发展都将起到积极的促进作用。

1 火焰抑制器结构形式及原理

自从 Humphry Davy 应用金属丝网结构解决 19 世纪经常发生的矿井爆炸事故以来，多种不同结构类型的火焰抑制器被提出并应用[6]，这些火焰抑制器都遵循了一个基本原理，即移除火焰中的热量使得火焰温度达到不能支持燃烧的温度，从而造成火焰淬熄[7]。机载火焰抑制器结构如图 1 所示，它由阻火单元和外壳组成，通过法兰与管道连接。外壳具有高强度高抗爆能力，可抵挡由于雷电所引发的爆燃或爆轰冲击；内部的阻火单元是机载火焰抑制器的核心，由多个特定尺寸的狭窄通道组成[8]。目前，六边形阻火单元结构是机载火焰抑制器应用最多的结构形式。



1—法兰；2—阻火单元；3—壳体；4—接管；5—密封圈

图 1　火焰抑制器结构示意图

Fig.1　Schematic of the flame arrestor

收稿日期：2018-07-17；　退修日期：2018-07-24；　录用日期：2018-08-22

* 通信作者 . Tel.：025-51819742　E-mail：wang5370856@163.com

引用格式：Wang Yangyang, Pan Jun, Liu Wenyi. Research on the flow resistance performance of airborne flame arrestor[J]. Aeronautical Science & Technology, 2018, 29 (09)：11-16. 王洋洋，潘俊，刘文怡 . 机载火焰抑制器流阻特性研究 [J]. 航空科学技术，2018, 29 (09)：11-16.

2 火焰抑制器流阻数学模型

2.1 流通面积比

本节选取六边形阻火单元结构火焰抑制器为研究对象，在一定尺寸管道、通道壁厚及特征尺寸条件下，计算其流通面积比（流通面积 / 管道横截面积）。分析计算的基础条件为：六边形通道边长 L_n=0.866mm，六边形通道壁厚 w=0.1mm，所以六边形通道外边界的边长 L_w=0.924mm，外边界次对角线距离 D=1.6mm，方形通道截面长 A=88mm，方形通道截面宽 B=22mm，其结构原理如图 2 所示。

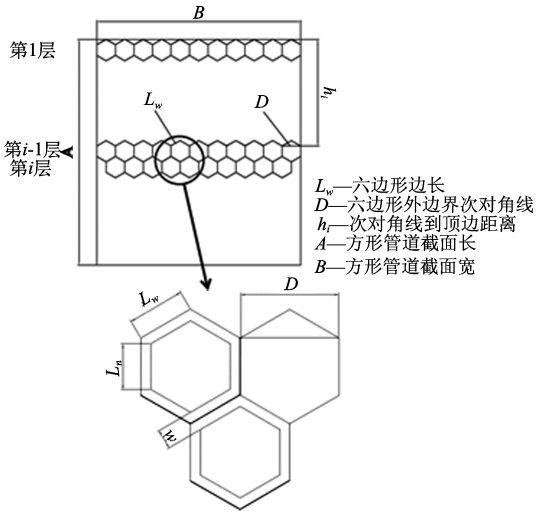


图 2 六边形阻火单元结构计算原理图

Fig.2 Schematic of the hexagonal flame arresting element

六边形通道外边界边长：

$$L_w = L_n + w/\sqrt{3} \tag{1}$$

六边形外边界次对角线长度：

$$D = \sqrt{3}L_w \tag{2}$$

对于第 i 层，六边形次对角线距离顶边的距离为：

$$h(i) = h(i-1) + 1.5L_w \tag{3}$$

对于奇数层：

$$m(i) = B \tag{4}$$

对于偶数层：

$$m(i) = B - D/2 \tag{5}$$

第 i 层六边形单元个数：

$$n(i) = m(i)/D \tag{6}$$

第 i 层流通面积：

$$S(i) = n(i) \cdot L_n \cdot L_n \cdot \sin(\pi/3) \cdot 3 \tag{7}$$

流通面积比：

$$R_a = \sum_{i=1}^{n} S(i)/(A \cdot B) \tag{8}$$

以上各式中的符号意义与图 1 一致。计算得到的流通面积比 R_a=82.6%。

2.2 流动阻力

流体流经火焰抑制器时，一般在阻火单元进口处发生流动收缩，而在出口处发生流动膨胀。这种突然的流动收缩和膨胀，都会引起附加的流体压力损失；此外，流体流经阻火单元时会有摩擦损失。这些损失的综合，就构成了流体的总压力损失，其大小标志着火焰抑制器的阻力特性[9]。

图 3 表示火焰抑制器内部流动情况，流体由截面 1—1 流入截面 a—a 时的压力损失由两部分组成：(1) 由于面积收缩，流体的动能增加引起的压力损失，是流体压力能与动能之间的能量转换。这种压力变化是可逆的。(2) 由于突缩段不可逆自由膨胀引起的压力降低。流体经过收缩断面产生边界层分离，随着收缩断面下游速度分布的变化，动量速率也发生变化，从而引起相应的压力变化[9]。一般情况下，流体流经火焰抑制器的密度变化很小，通常可作常密度处理。假设截面 1—1，a—a，b—b，2—2 处的流体速度分别为 u_1，u_a，u_b，u_2。

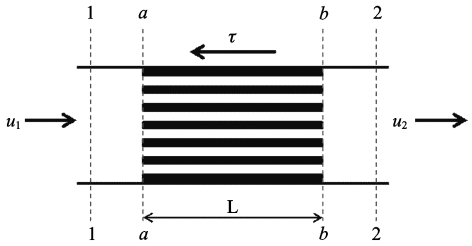


图 3 火焰抑制器内部流动示意图

Fig.3 Schematic of internal flow of the flame arrestor

由质量守恒可得：

$$u_1 = u_2 \tag{9}$$

$$u_a = u_b \tag{10}$$

$$Q = \rho \cdot u_1 \cdot A = \rho \cdot u_a \cdot A \cdot R_a \tag{11}$$

入口处流体动能增加量为：

$$\frac{\rho(u_1^2 - u_a^2)}{2} = \frac{\rho u_a^2}{2}\left[1 - \left(\frac{u_1}{u_a}\right)^2\right] = \frac{\rho u_a^2}{2}[1 - (R_a)^2] \tag{12}$$

则进口压力损失可以表示为：

$$\Delta p_1 = \frac{\rho u_a^2}{2}[1 - (R_a)^2] + K_1 \frac{\rho u_a^2}{2} \tag{13}$$

式中：ρ 为流体密度，单位为 kg/m^3；R_a 为火焰抑制器流通面积比；A 为火焰抑制器入口截面积，单位为 m^3；Q 为流体的质量流量，单位为 kg/s；K_1 为进口压力损失系数。

同样，流体由截面 b—b 到截面 2—2 的出口压力回升分成两部分：(1) 由于流动截面积变化引起的压力升高，不

考虑摩擦，其表达形式与入口压力损失相同；(2) 由于突扩段不可逆自由膨胀和动量变化引起的压力损失[9]。则出口压力回升表示为：

$$\Delta p_2 = \frac{\rho u_a^2}{2}[1-(R_a)^2] - K_2\frac{\rho u_a^2}{2} \tag{14}$$

式中：K_2 为出口压力损失系数。

火焰抑制器阻火单元内的压力损失主要由流体与壁面之间的黏性摩擦损失引起的。对单个阻火单元通道的截面 a—a 到截面 b—b 的控制面应用动量定理，可得：

$$p_a S - p_b S - \int_0^L 6\tau L_n \mathrm{d}L = Q_i(u_b - u_a) \tag{15}$$

$$\tau = \frac{f\rho u_a^2}{2} \tag{16}$$

$$S = 3 \cdot L_n^2 \cdot \sin(\pi/3) \tag{17}$$

式中：S 为单个阻火通道横截面积，单位为 m^2；L_n 为六边形通道边长，单位为 m；f 为摩擦因子；Q_i 为单个通道的流量，单位为 kg/s。

则流体流过阻火单元的压力降可以表示为：

$$\Delta P_3 = \frac{1}{S}\int_0^L 6\frac{f\rho u_a^2}{2}L_n \mathrm{d}L \tag{18}$$

因此，火焰抑制器的总压降为：

$$\Delta P = \Delta P_1 - \Delta P_2 + \Delta P_3 \tag{19}$$

3 流阻特性试验系统

在国际上，火焰抑制器的性能检测属于垄断技术，欧美国家已经建立了相对完善的理论体系和技术规范；然而国内在该领域的研究开展较晚，在一些基础问题和关键技术方面仍存在很多缺陷，目前国内尚未有火焰抑制器性能测试的专业试验机构及完整的测试系统，而且性能测试标准大多参考的国外相关标准，更新周期长，体系不完善。目前国内外关于火焰抑制器的相关标准有欧洲标准 EN-12874、国际标准 ISO-16852、美国民航局适航标准 AC 25.975、中国石油天然气行业标准 SH/T3413—1999、国家标准 GB 5908—2005 和国家标准 GB/T 13347—2010 等。本文流阻特性试验以国家标准 GB/T 13347—2010 中提到的压力损失、通气量试验为基准，同时参考美国民航局适航标准 AC 25.975[5]、PARKER 公司阻火器测试报告[10] 中的流通性能测试方法，考虑到通过机载火焰抑制器的流动介质为空气和航空燃油，因此，在压力损失方面要分为对这两种介质进行测定。

3.1 空气流通试验

将火焰抑制器安装在空气流通测试装置上，测试原理如图 4 所示。

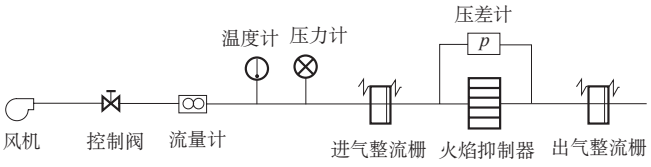


图 4 试验系统原理图

Fig.4 Schematic of experiment system

从火焰抑制器入口端通入试验介质，在进气口附近用压力计、温度计测定空气状态。试验介质所用空气状态为：绝对压力 0.1MPa，温度 20 ℃，相对湿度 50%，密度 1.2kg/m^3。

起动风机，调节阀实现流量的调节，试验起初的空气体积流量为 0.2832m^3/min，然后流量依次增加 0.1419m^3/min，直至增加到体积流量为 2.1238m^3/min 为止。记录每个流量下的火焰抑制器压降值。

3.2 燃油流通试验

将火焰抑制器安装在燃油流通测试装置上，测试原理如图 5 所示。

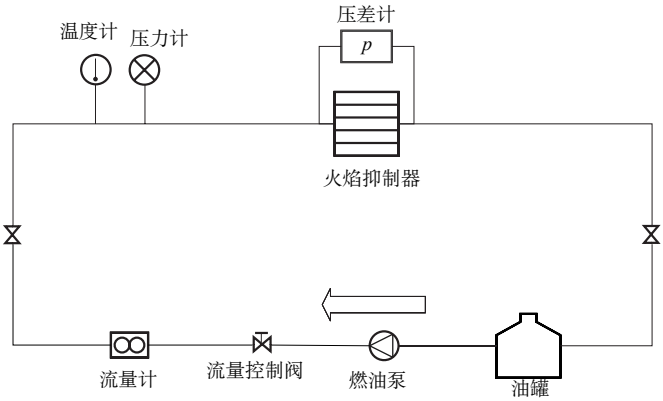


图 5 试验系统原理图

Fig.5 Schematic of experiment system

从火焰抑制器入口端通入燃油，在进气口附近用压力计、温度计和流量计测定燃油状态，试验所用燃油状态为：温度范围为 15~27℃，密度为 0.803~0.810。

通过调节流量控制阀实现燃油的流量控制，试验起初通过火焰抑制器的燃油体积流量为 0.0379m^3/min，然后流量依次增加 0.0379m^3/min，直至增加到体积流量为 0.4542m^3/min 为止。记录每个流量下的压降值。

在试验中发现，空气流过火焰抑制器的流阻很小（小于 1kPa），受压差计误差影响太大，因此测得的流阻数据没有参考价值，所以仅将燃油流通试验结果与参考文献 [10] 中的试验结果及本文计算结果进行对比，结果如图 6 所示。

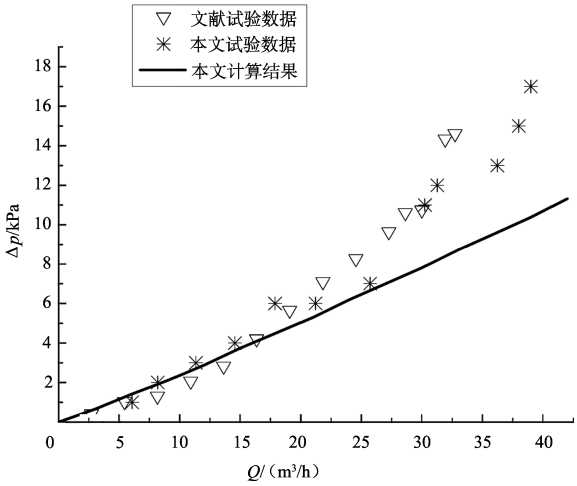


图 6 试验结果与计算结果对比图

Fig.6 Comparison between experimental results and calculation results

从试验结果可以看出，流过火焰抑制器的流阻随流量增加呈增大趋势，本文计算结果和两组试验数据在小流量情况下比较吻合，在大流量情况下偏差较大，这是因为试验过程中，整个试验夹具放置在一个大油箱内，油箱内燃油积累到一定程度时再开启循环油泵抽走油箱内的燃油。在流量较大时，油箱内的燃油不能及时抽走，致使油面超过了火焰抑制器出口，所以使得读数偏大。因此可认为本文所推导的数学模型基本正确，能够用于后续工程设计计算。

4 结构参数对流阻的影响

在火焰抑制器设计过程中，主要的结构参数有：六边形通道边长 L_n、六边形通道壁厚 w 和阻火单元长度 L。本节应用本文建立的数学模型，在一定的管道尺寸下，计算了不同六边形通道边长、六边形通道壁厚和阻火单元长度下的火焰抑制器流阻特性，结果如图 7~ 图 9 所示。

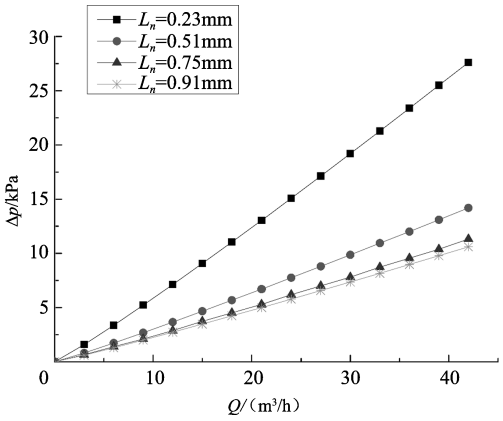


图 7 六边形通道边长对流阻特性的影响

Fig.7 The influence of the side length of hexagonal channel on the flow performance

图 7 选取了 4 种不同的六边形通道边长，得到了火焰抑制器的 p—Q 曲线，从图中可知，随着六边形通道边长的减小，火焰抑制器的流阻急剧增大，而且当六边形通道边长达到 0.75mm 时，增加六边形通道边长带来的流阻降低不明显。六边形通道尺寸决定着火焰抑制器是否能够使火焰有效淬熄，因此，在火焰抑制器设计时，为寻求最小的流通阻力，应在阻火能力范围内选取最大的六边形通道边长，因此，根据火焰抑制器阻火要求，针对不同等级气体的六边形通道边长选型结果见表 1。

表 1 六边形通道边长选型结果

Table 1 The result of the side length of hexagonal channel

NEC 气体等级	A	B	C	D	G.M
IEC 气体等级	IIC	IIC	IIB	IIA	I
代表气体	乙炔	氢气	乙烯	丙烯	甲烷
MESG 值	0.25	0.28	0.65	0.9	1.12
通道边长	0.20	0.23	0.53	0.73	0.91

图 8 选取了三种不同的六边形通道壁厚，得到了火焰抑制器的 p—Q 曲线，从图中可知，随着六边形通道壁厚的增加，火焰抑制器的流阻急剧增大，同时六边形通道壁厚影响着整个火焰抑制器的结构强度，因此，在火焰抑制器设计过程中，应折中考虑结构强度与流动阻力，选取最优的六边形通道壁厚。工程应用中，火焰抑制器要求的破损压力达 137.90kPa，火焰抑制器阻火芯的材料为 321 不锈钢，因此，推荐选用的最优六边形通道壁厚为 0.1mm。

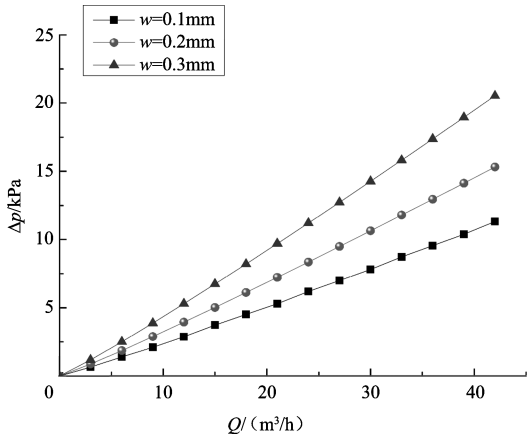


图 8 六边形通道壁厚对流阻特性的影响

Fig.8 The influence of the wall thickness of hexagonal channel on the flow performance

图 9 选取了 4 种不同的阻火单元长度，得到了火焰抑制器的 p—Q 曲线，从图中可知，阻火单元长度越长，火焰抑制器流阻越大；同时阻火单元越长，火焰抑制器的耐烧性能

越好，因此在火焰抑制器设计过程中，应在保证设计要求的耐烧能力下，选取最小的阻火单元长度。根据 AC25.975 要求，火焰抑制器应能够达到 2.5min 的耐烧时间要求，且燃油流量为 24m^3/h 时，燃油通过火焰抑制器时产生的压降不能超过 17.24kPa，因此推荐选用的阻火单元长度为 50mm。

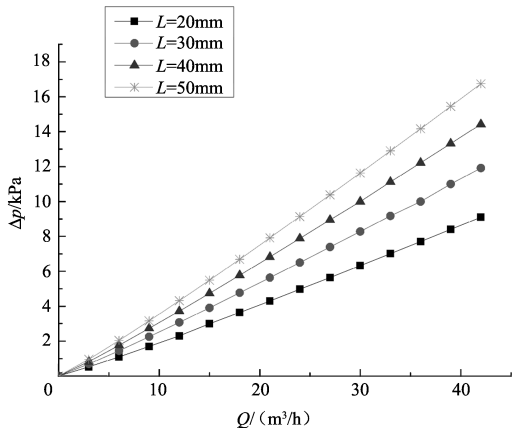


图 9　阻火单元长度对流阻特性的影响

Fig.9　The influence of the length of flame arresting element on the flow performance

5 结论

通过分析，可以得出以下结论：

（1）本文建立的六边形阻火单元火焰抑制器流阻特性数学模型具有较好的准确性，可以扩展到其他类型火焰抑制器及相似结构装置的流阻特性计算中，如耗氧型惰化系统催化反应器、膜分离惰化系统臭氧转换器等，具有较强的工程应用背景。

（2）火焰抑制器的结构参数对其流阻特性的影响较大，火焰抑制器的流阻与六边形通道边长成反比，与六边形通道壁厚及阻火单元长度成正比。

（3）设计过程中，应综合考虑耐烧、阻火、结构强度和流阻性能，在满足其他几项性能条件下，为了保证良好的流阻特性，火焰抑制器六边形通道边长应尽量大，六边形通道壁厚和阻火单元长度应尽量小。

参考文献

[1] 孙安宏，方耀申 . 直升机闪电防护符合性验证的几个问题 [J]. 中国民用航空，1996（5）：50-52.
Sun Anhong，Fang Yaoshen. Several problems in the verification of helicopter lightning protection compliance [J]. China Civil Aviation，1996（5）：50-52.（in Chinese）

[2] 王天顺，雷虹，李锋，等 . 飞机雷电防护设计与鉴定试验 [J]. 飞机设计，2009，29（5）：54-59.
Wang Tianshun，Lei Hong，Li Feng，et al. Aircraft lightning protection design and qualification test [J]. Aerocraft Design，2009，29（5）：54-59.（in Chinese）

[3] 罗台福 . 雷击对飞行安全的危害 [J]. 中国民航飞行学院学报，1998（4）：41-42.
Luo Taifu. Lightning damage to flight safety [J]. Journal of Civil Aviation Flight University of China，1998（4）：41-42.（in Chinese）

[4] Goodloe C C. Lightning protection guidelines for aerospace vehicles[R]. NASA/TM-1999-209734，1999.

[5] FAA Draft AC 25-975　Fuel tank vents and carburetor vapor vents[S].FAA，2016.

[6] Edwards K L，Norris M J. Materials and constructions used in devices to prevent the spread of flames in pipelines and vessels[J]. Materials & Design，1999，20（5）：245-252.

[7] Stanley S Grossel. Deflagration and detonation flame arresters[M]. New York：Guidelines for Engineering for Process Design Safety，2010.

[8] 李征宇 . 机载火焰抑制器设计与性能分析 [D]. 南京：南京航空航天大学，2016：12-13.
Li Zhengyu. Design and performance analysis of onboard flame arresters [D]. Nanjing：Nanjing University of Aeronautics and Astronautics，2016：12-13.（in Chinese）

[9] 余建祖 . 换热器原理与设计 [M]. 北京：北京航空航天大学出版社，2006.
Yu Jianzu. Principle and design of heat exchanger [M]. Beijing：Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press，2006.（in Chinese）

[10] Parker. Qualification test report for the flame arrestor[R].Irvine，California：Parker Air & Fuel Division，2007.

作者简介

王洋洋（1992- ）男，硕士，工程师。主要研究方向：飞机燃油系统。
Tel：025-51819742
E-mail：wang5370856@163.com
潘俊（1981- ）男，硕士，高级工程师。主要研究方向：飞机燃油系统。

Tel：025-51819745
E-mail：jay-pan@163.com
刘文怡（1992- ） 女，工程师。主要研究方向：机械机电系统情报研究。
Tel：025-51819510
E-mail：liuwy@neias.cn

Research on the Flow Resistance Performance of Airborne Flame Arrestor

Wang Yangyang [1,2,*], Pan Jun [1,2], Liu Wenyi [2]

1. The Aviation Electromechanical System Integration of Aviation Science and Technology Key Laboratory, Nanjing 211106, China

2. AVIC Nanjing Engineering Institute of Aircraft Systems, Nanjing 211106, China

Abstract: The flow performance of airborne flame arrestors was studied by experimental and numerical methods, and the influence of the design parameters of flame arrestors on the flow performance was analyzed. It is found that the flow resistance of the flame arrestor increases with the decrease of the side length of hexagonal channel, the increase of the wall thickness of hexagonal channel and the increase of the length of flame arrestor element. Therefore, in the process of flame arrestor design, in order to meet the quenching performance and structural strengh, it should select the larger hexagonal channel length, the smaller hexagonal channel wall thickness and the smaller flame arrestor element length should be selected.

Key Words: flame arrestor; flow resistance performance; flame arresting element; experiment; numerical calculate

Received: 2018-07-17； **Revised:** 2018-07-24； **Accepted:** 2018-08-22

***Corresponding author.Tel.:** 025-51819742 **E-mail:** wang5370856@163.com