

# 机载火焰抑制器设计要求研究

叶柯华\* 张锦 何昌升

(上海飞机设计研究院,上海 201210)

**摘要:** 火焰抑制器为保证飞机燃油系统安全的重要手段,可阻止外部火焰进入燃油箱内部。为满足我国大型民用飞机发展,对其性能和设计需求的研究日益增加。基于历史发展和以往研究,介绍了火焰抑制器基本原理,对机载环境下火焰抑制器结构特征和安装要求进行分析。再根据淬熄长度和淬熄直径研究结果,讨论火焰抑制器阻火单元尺寸设计准则。结合美国联邦航空局咨询通告 AC25.975 要求和美国汽车工程师学会设计规范 SAE ARP5776,提出火焰传播试验和火焰保持试验,为火焰抑制器性能论证方法提供参考。最终,对火焰抑制器压降性能要求和环境适应性性能要求进行简述。

**关键词:** 飞机;火焰抑制器;淬熄原理;火焰传播试验;火焰保持试验

中图分类号: V222

文献标识码: A

OSID:



## 0 引言

大型民用运输类飞机为满足航程要求,往往搭载十几吨乃至上百吨航空燃油。燃油系统爆燃对飞行安全具有不可忽视的重要影响。

1963年12月,美国泛美航空一架波音707飞机,因闪电点燃油箱通气口燃油蒸气,发生爆炸后在Elkton Maryland附近坠毁,致使机上81名旅客全部遇难。该事故也促使后续航空条例修改。采用恰当技术手段防止火焰在燃油系统中传播和避免引起爆燃是飞机设计的基本要求。

国外学者在波音707飞机失事以后,开始关注航空火焰抑制器的研究。Bolta和Friedman等<sup>[1]</sup>通过试验方法研究火焰抑制器对闪电引起燃油起火的抑制作用。Kuchta<sup>[2]</sup>重点研究了点火源能量与火焰温度关系,建立火焰抑制器淬熄长度经验公式。FAA<sup>[3]</sup>发布报告,分析了火焰抑制器对闪电造成高温高压火焰的阻燃效果。

1980年,特殊航空着火和爆炸减轻咨询委员会(Special Aviation Fire and Explosion Reduction,简称SAFER)通过分析调查1964年之后坠毁导致油箱爆

炸的空难事件后得出结论,采用合适的抑爆手段可有效避免部分爆炸发生<sup>[4]</sup>。SAFER指出,火焰抑制器相较燃油惰化系统和抑爆系统,为最简单有效防止油箱爆燃的措施。该方法可以延迟地面火焰引起油箱爆炸,为乘客和机组逃生赢得宝贵的时间。该研究极大地促进了火焰抑制器在民用航空领域的普及,使火焰抑制器成为燃油通气系统的重要安全性组件。

目前,以波音737和空客A320为代表的主流大型民用飞机均安装了火焰抑制器。以前,我国缺乏机载火焰抑制器方面的研究,但随着国产ARJ21-700飞机和C919飞机的发展,该领域研究受到日益广泛的重视。文献[5]针对航空联邦条例(Federal Aviation Regulation,简称FAR)第25.975(a)(7)条适航条例要求,研究了火焰抑制器符合性验证方法。文献[6]采用微元方法建立机载火焰抑制器耐烧数学模型,并将数值仿真结果与试验结果对比,建立了燃烧温度及阻火芯传热性能与耐烧能力关系。文献[7]从火焰抑制器原理、结构设计和标准规范等方面开展综述介绍。文献[8]和文献[9]对机载火焰抑制器流阻特性展开研究。

\* 通信作者. E-mail: yekehua@comac.cc

引用格式: 叶柯华,张锦,何昌升. 机载火焰抑制器设计要求研究[J]. 民用飞机设计与研究,2023(3):64-69. YE K H, ZHANG J, HE C S. Research on design requirements for aircraft flame arrestor[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2023(3):64-69(in Chinese).

随着近年来我国民机事业快速发展,民航产业对火焰抑制器研究和设计存在迫切需求。本文通过梳理以往研究,分析该设备在阻燃性能和环境适应性性能的设计要求,旨在为生产设计和理论研究提供参考。

## 1 机载火焰抑制器简述

### 1.1 机载火焰抑制器结构与安装

目前,大型民用飞机通常采用开式油箱布局。燃油箱通气系统与外界大气连通,以保证压差在结构承受范围内。火焰抑制器安装在油箱通气口上,用于防止外界火焰直接窜入通气系统,引起燃油箱爆燃。

机载火焰抑制器除满足阻燃性能外,还需同时兼备低流阻特点,从而确保燃油箱压力不超过设计要求。

目前,阻燃芯结构通常采用蜂窝结构和波纹板结构。

#### 1) 蜂窝结构

该类型如图1所示。其由均匀的六边形通道排列组成。美国Parker公司生产的火焰抑制器多采用该类型的阻燃芯。其具有结构强度高,抗结冰性能好的特点。

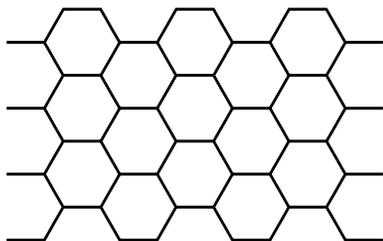


图1 蜂窝阻火芯

#### 2) 波纹板结构

该类型如图2所示,通过波纹板缠绕组成。其特点是孔隙率大,流通性能优异,自由面积可达80%~90%。

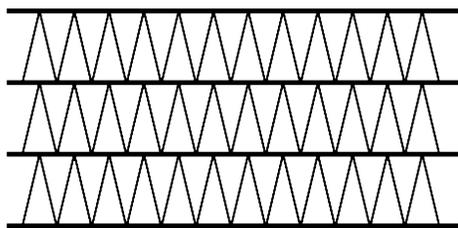


图2 波纹板阻火芯

部分机型火焰抑制器还设置有旁通释压阀。当阻火芯堵塞时,空气可以顶开释压阀,自由进出燃油箱,从而提高预防燃油箱超压的安全裕度。

### 1.2 火焰抑制器原理

19世纪前叶,Davy发现金属网具有隔绝甲烷火焰的能力,以此发明了安全矿工灯,成为火焰抑制器雏形<sup>[10]</sup>。Payman和Wheeler<sup>[11]</sup>在后续研究中得出细小通道对火焰的熄灭能力直接由传播速度决定。Holm<sup>[12]</sup>通过烧嘴法研究预混火焰时,首次明确了淬熄直径的概念,并指出淬熄性能首先由通道直径决定,再受侧壁导热性能影响。Philips<sup>[13]</sup>提出的热点火理论模型分析了火焰在窄缝传播距离的影响因素。在此基础上,Maekawa<sup>[14]</sup>通过试验验证火焰穿过窄缝能力,得出了淬熄直径和淬熄长度计算公式,但其研究忽略了传播速度和温度等影响因素。我国学者周凯元<sup>[15-17]</sup>等在国内较早地开展了火焰淬熄研究,分析了丙烷-空气预混火焰在平行窄缝间淬熄效应,并进一步得到了淬熄直径、淬熄长度和传播速度间的关系。王鲁庆和马宏昊<sup>[18]</sup>等通过试验方法,得到波纹性火焰抑制器阻燃性能与扩张比、淬熄长度和通道形状间的关系。

火焰抑制器淬熄原理主要为冷壁效应和器壁效应。

#### 1) 冷壁效应

火焰抑制器阻火芯普遍为密布的孔隙通道或金属丝网构成。以上结构将在火焰穿过时,将其分割为众多火焰束,并导致散热面积急剧增加。当热量大量流失,不足支持燃烧,则火焰熄灭。但Philip<sup>[13]</sup>对比玻璃管和铜管时发现,当传热系数提高460倍时,淬熄直径仅改变2.6%。由此可见,冷壁效应不足以完全接受淬熄原理。

#### 2) 器壁效应

器壁效应是基于燃烧链式反应自由基理论。燃烧中自由基和其它分子作用,形成新的产物和更多自由基。当新产生的自由基数量大于消耗数量时,燃烧持续进行。火焰抑制器阻火芯的隔断结构,极大地减少了自由基和其它分子反应的概率,且通道越小,概率越低。

Raimondeau和Norton等<sup>[19]</sup>在进行甲烷-空气预混气体在微通道中的燃烧发现,热量流失和自由基均为导致淬熄的主要原因。Fernandez-Pello<sup>[20]</sup>研究发现淬熄主要由燃烧通道尺寸减少,表面积和体积

比增加产生的热量损失加剧和自由基作用减弱引发。

## 2 阻火性能设计要求

### 2.1 淬熄长度和淬熄直径

火焰抑制器性能主要由淬熄直径和淬熄长度决定。其中,淬熄直径表示能够确保火焰完全熄灭的最小间隙直径,淬熄长度表示最短阻火芯长度。

Wilson 和 Flessner<sup>[21]</sup>通过试验确定层流火焰和湍流火焰间临界速度为 18 m/s,提出层流火焰淬熄直径为:

$$d_{cr} < 30\alpha/v_u \quad (1)$$

式中: $d_{cr}$  为淬熄直径; $\alpha$  为气体扩散系数; $v_u$  为燃烧速度。

Mendoza<sup>[22]</sup>研究发现狭窄通道淬熄直径和常数有关:

$$N_{Pe,Cr} = \text{Constant} = v_u d_{cr} / \alpha \quad (2)$$

式中: $N_{Pe,Cr}$  为 Peclet 常数。

湍流火焰因传播速度更高,在狭窄通道内压力更大,因此更难熄灭。Wilson 和 Attalah<sup>[23]</sup>提出湍流火焰狭缝通道淬熄长度满足:

$$L_q > 2v_u d_{cr}^2 \quad (3)$$

式中: $L_q$  为淬熄长度。

Piotrowski<sup>[24]</sup>基于公式(4),提出波纹板火焰抑制器淬熄长度:

$$L_q = (v_u d_H^2) / 100\gamma \quad (4)$$

式中: $d_H$  为水力直径; $\gamma$  为气体运动黏度。

### 2.2 火焰抑制试验

机外火焰主要由两种途径导致油箱内部起火,分别为火焰经火焰抑制器传播进入油箱和在火焰抑制器机体外侧形成稳定燃烧,持续加热后导致温度超过燃油蒸气点燃温度。

根据 AC25.975,火焰抑制器分别通过火焰传播试验和火焰保持试验,验证其阻止火焰传播进入油箱的能力和承受长时间燃烧的能力<sup>[4]</sup>。

#### 2.2.1 试验要求

在机载火焰抑制器试验装置设计中需充分考虑实际装机环境。火焰传播速度对阻燃性能具有至关重要的影响。火焰会沿管道持续加速。如果火焰抑制器安装位置前存在管道,则试验装置中应配置相同长度的管路。

火焰抑制器安装位置同样对试验结果具有

一定影响。水平安装的火焰抑制器能够在火焰保持试验中承受更长时间的燃烧。因此,火焰抑制器在试验装置中应和实际机上安装方向保持一致。

正己烷自燃温度约为 222.8 °C,接近主要燃油自燃温度(Jet A 自燃温度为 223.9 °C,JP-4 自燃温度为 229.4 °C)。试验可采用正己烷( $C_6H_{14}$ )模拟燃油蒸气。正己烷沸点为 69 °C,常温状态为液体。因此,试验装置应保证正己烷在进入试验腔体下游时完全气化。

图 3 为正己烷化学计量比与燃烧温度间的关系。在各气流速度下,正己烷化学计量比为 1.15 附近时,燃烧温度达到最大<sup>[4]</sup>。

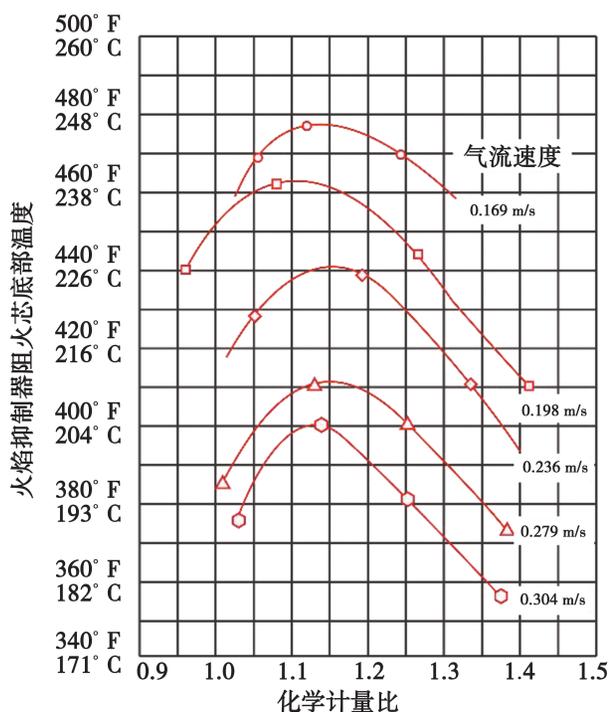


图 3 正己烷燃烧温度曲线

#### 2.2.2 试验装置

图 4 为试验装置设计方案,由试验上游腔体、试验下游腔体、切断阀、蒸发器、正己烷流量计、正己烷泵、正己烷罐、空气流量计、空气泵、热电偶、光电传感器和电火花点火器组成。正己烷和空气通过流量计精确控制,保证化学计量比为 1.15。混合可燃气体进入蒸发器后完全气化。在试验腔体上下游和分管路因有隔热棉和加热棒或加热条,内部温度保持在 80 °C 附近,可避免正己烷液化。温度通过腔体内部热电偶进行监测。

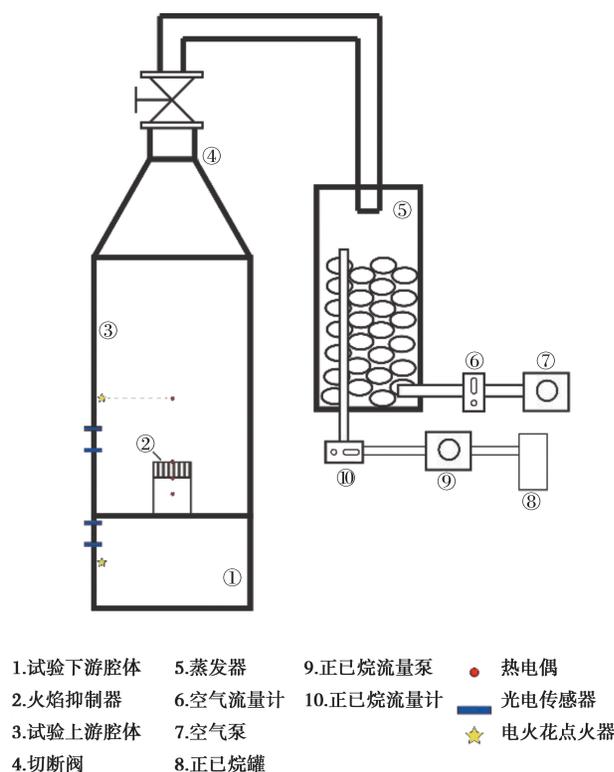


图4 火焰抑制试验装置示意图

热电偶布置在火焰抑制器阻火芯上游面和上游空间以及下游面和下游空间。试验装置热电偶需具有足够灵敏度,建议采用陶瓷封装型和铬铝型。

在靠近火焰抑制器阻火芯上游处和下游出口位置分别布置两对光电传感器,在探测火焰光信号同时,监测火焰传播速度。

### 2.2.3 火焰传播试验

火焰以一定传播速度穿过阻火芯时,因密布的间隙结构能够发挥散热作用,若耗散能量大于燃烧产生能量,即不再具备支持燃烧的条件时,火焰将会熄灭。

火焰传播试验验证火焰抑制器具有阻止外部火焰传播时穿越阻火芯的能力。该试验主要模拟一般地面场景,即外部出现火源。

试验要求表如1所示。

表1 火焰传播试验要求

技术要求	指标
化学计量比	1.15±0.05
气流速度	静态
试验温度	80℃以上(高于正己烷沸点)

试验步骤如下:

- 1) 将试验腔体加热至80℃;
- 2) 打开图4中切断阀,持续通入化学计量比为1.15的可燃混合气体1min,保证试验上下游腔体完全充满可燃气体;
- 3) 关闭切断阀,停止通入可燃气体并保证试验腔体与外部隔绝;
- 4) 通过下游腔体内点火器点燃可燃气体,观察热电偶和光电传感器的反馈信号;
- 5) 通过上游腔体内点火器点燃可燃气体,并观察热电偶和光电传感器的反馈信号。

试验合格判定为:

- 1) 点燃下游可燃气体后,上游热电偶和光电传感器均未探测到火焰发生信号;
- 2) 点燃上游可燃气体后,上游热电偶和光电传感器探测到火焰信号,证明气体可燃;
- 3) 重复试验5次,均满足要求1)和2)。

### 2.2.4 火焰保持试验

当火焰抑制器端口持续存在火焰,即使不穿过阻火芯,因结构被持续加热,面向燃油箱内部的部位温度将不断提高,直至点燃燃油蒸汽。

根据FAR 25.975要求,火焰抑制器应能承受2.5min以上的持续燃烧,通过火焰保持试验(亦称为火焰耐烧试验)验证。

火焰保持试验主要模拟压力加油场景,可燃气体持续从油箱通气口溢出。

试验要求如表2所示。

表2 火焰保持试验要求

技术要求	指标
化学计量比	1.15±0.05
气流速度	0.23~0.38 m/s (0.75~1.25 ft/s)
试验温度	80℃以上(高于正己烷沸点)

试验步骤如下:

- 1) 将试验腔体加热至80℃;
- 2) 打开图4中切断阀,持续通入化学计量比为1.15的可燃混合气体1min,保证试验上下游腔体完全充满可燃气体;
- 3) 以0.23~0.38 m/s速度继续向试验腔体内通入可燃气体;
- 4) 通过下游腔体内点火器点燃可燃气体,保证火焰抑制器下游端口形成稳定燃烧的火焰;
- 5) 维持火焰持续燃烧不少于2.5min;观察热

电偶和光电传感器反馈信号。

试验合格判据为:

1) 在持续燃烧的 2.5 min 内,上游热电偶和光电传感器均未探测到火焰发生信号,且上游热电偶温度不超过 371 ℃;

2) 重复试验 5 次,均满足要求 1)。

### 3 火焰抑制器性能设计要求

#### 3.1 压降性能要求

火焰抑制器安装通气口盖上,应保证燃油箱具有良好气体流通性能,压力不超过设计要求,以及在压力加油切断失效场景下,不妨碍燃油及时排出。

在大型民用飞机运输类设计中,为提高安全裕度,除火焰抑制器作为燃油箱换气和溢油通路外,还要求额外设置备用释压装置。常用方法为在通气油箱下壁板或火焰抑制器壳体上集成额外释压阀。

当火焰抑制器携带释压阀时,其进行压降性能试验时应考虑仅阀作为通路时换气和溢油性能。

#### 3.2 环境适应性要求

火焰抑制器工作中可能存在受到温度变化、振动、盐雾和沙尘等因素影响,可依据 RTCA DO-160 验证环境适应能力<sup>[25]</sup>。

#### 3.3 闪电防护要求

火焰抑制器和油箱通气口组合体应避免位于闪电 1 区和 2 区,尽可能设计在闪电 3 区。

根据 ARP5776,仅安装于 1 区和 2 区的火焰抑制器需通过试验验证闪电防护性能<sup>[26]</sup>。

## 4 结论

在通气油箱内安装火焰抑制器是保证飞机不因外部火焰发生燃油箱起火最有效和最经济的方法。本文针对火焰抑制器开发中关键问题,梳理阻燃性能、压降性能和环境适应性要求,结合 AC25.975 提出火焰功能试验装置设计方案和试验要求,以期为我国未来大型客机防爆安全性提供参考。

#### 参考文献:

[ 1 ] BOLTA C C, FRIEDMAN R, GRINER G M, et al. Lightning protection measures for aircraft fuel system, Phase II [ R ]. Washington D. C. : Atlantic Research Corporation with Lightning and Transients Research In-

stitution for Federal Aviation Agency, 1964.

- [ 2 ] KUCHTA J M, CLODFELTER R G. Aircraft mishap fire pattern investigations [ R ]. Pennsylvania: Aero Propulsion Laboratory, 1985.
- [ 3 ] FAA. Aircraft lightning protection handbook [ R ]. Washington D. C. : Federal Aviation Administration, 1989.
- [ 4 ] FAA. Fuel vent fire protection: AC 25.975-1 [ R ]. Washington D. C. : Federal Aviation Administration, 2016.
- [ 5 ] 毛文懿,李涛. 运输类飞机适航标准第 25.975 条(a)(7)项要求及符合性验证研究 [ J ]. 民用飞机设计与研究, 2017(4): 103-106.
- [ 6 ] 李征宇,刘卫华,潘俊,等. 机载火焰抑制器传热特性影响因素研究 [ J ]. 航空兵器, 2016(2): 66-70.
- [ 7 ] 刘明辉,刘卫华,潘俊,等. 机载火焰抑制器研究现状与发展 [ J ]. 中国民航飞行学院学报, 2015, 26(5): 10-14.
- [ 8 ] 刘明辉,王玖,陈晓峰,等. 机载火焰抑制器流通性能研究 [ J ]. 航空工程进展, 2018, 9(3): 396-404.
- [ 9 ] 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(9): 11-16.
- [ 10 ] DAVY H. On the fire-damp of coal mines, and on methods of lighting the mines so as to prevent its explosion [ J ]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1816: 1-22.
- [ 11 ] PAYMAN W, WHEELER R V. The propagation of flame through tubes of small diameter [ J ]. Journal of the Chemical Society, Transaction, 1918, 113: 36-45.
- [ 12 ] HOLM J M. On the initiation of gaseous explosions by small flames [ J ]. Philosophical Magazine, 1932, 14(89): 18-56.
- [ 13 ] PHILLIPS H. The use of a thermal model of ignition to explain aspects of flameproof enclosure [ J ]. Combustion and Flame, 1973, 20(1): 121-126.
- [ 14 ] MAEKAWA M. Flame quenching by rectangular channels as a function of channel length for methane-air mixture [ J ]. Combustion Science and Technology, 1975, 11(3-4): 141-145.
- [ 15 ] 周凯元,李宗芬,周自金. 波纹板阻火器对爆燃火焰淬熄作用的实验研究 [ J ]. 中国科学技术大学学报, 1997, 27(4): 449-454.
- [ 16 ] 周凯元. 气体爆燃火焰在狭缝中的淬熄 [ J ]. 火灾科学, 1999, 8(1): 22-33.
- [ 17 ] 周凯元,李宗芬. 丙烷-空气爆燃波的火焰面在直管道中的加速运动 [ J ]. 爆炸与冲击, 2000, 20(2): 137-142.
- [ 18 ] 王鲁庆,马宏昊,沈兆武,等. 波纹板阻爆燃型阻火器对丙烷-空气预混火焰的淬熄研究 [ J ]. 爆炸与冲击,

- 2017,37(4):766-772.
- [19] RAIMONDEAU S, NORTON D, VLACHOS D G, et al. Modeling of high-temperature microburners[J]. Proceeding of the Combustion Institute, 2002, 29(1): 901-907.
- [20] FERNANDEZ-PELLO A C. Micropower generation using combustion: issues and approaches[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2002, 29(1): 883-899.
- [21] WILSON R P, FLESSNER M. Design criteria for flame arrestors[C]//Proceedings of the American Institute of Chemical Engineers 84th National Meeting. U. S. : [s. n. ], 1978.
- [22] MENDOZA V A, SMOLENSKY V G, STRAITZ J F III. Don't detonate-arrest that flame[J]. Chemical Engineering, 1996, 103(5): 139-142.
- [23] WILSON R P, ATTALAH S. Design criteria for flame control devices for cargo venting system[R]. Washington D. C. : Department of Transportation, 1975.
- [24] PIOTROWSKI T C. Specification of flame arresting devices for manifolded low pressure storage tanks [J]. Plant/Operations Progress, 1991, 10(2): 102-106.
- [25] RTCA. Environment conditions test procedures for airborne equipment;RTCA/DO-160G[S]. Washington D. C. : Radio Technical Commission for Aeronautics, 2010.
- [26] SAE. Aircraft flame arrestor installation guidelines and test methods;SAE ARP5776-2021[S]. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 2021.

#### 作者简介

叶柯华 男,博士,工程师。主要研究方向:民用飞机燃油系统设计。E-mail:yekehua@comac.cc

张锦 男,硕士,高级工程师。主要研究方向:民用飞机燃油系统设计。E-mail:zhangjin1@comac.cc

何昌升 男,硕士,助理工程师。主要研究方向:民用飞机燃油系统设计。E-mail:hechangsheng@comac.cc

## Research on design requirements for aircraft flame arrestor

YE Kehua\* ZHANG Jin HE Changsheng

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

**Abstract:** The flame arrestor is an critical mean to ensure the safety of fuel system for aircraft, which can prevent the external flame from propagating into the fuel tank. In order to meet the development of large civil aircraft in China, the demand for its performance research and design is increasing day by day. Therefore, based on the historical development and previous research, this paper introduces the basic principles of flame arrestors, and analyzes the structural characteristics and installation requirement of flame arrestors in airborne environment. Then, on the basic of research results of quenching length and quenching diameter, the design criteria of element size was discussed. Based on the Federal Aviation Administration Advisory Circular AC25.975 and the Society of Automotive Engineers(SAE) Design Specification ARP5776, the solutions of flame propagation test and flame holding test were presented to provide reference for the performance demonstration method of flame arrestors. Finally, the pressure drop requirement and environmental adaptation requirement were stated briefly.

**Keywords:** aircraft; flame arrestor; quenching; flame propagation test; flame holding test

\* Corresponding author. E-mail: yekehua@comac.cc