航空科学技术
Aeronautical Science & Technology
Apr. 25 2019 Vol. 30 No.04 50-55

飞机材料防火试验用Sonic油燃烧器的发展和应用

陈元*，王玉琢，李志强
中国民用航空总局第二研究所，四川 成都 610041

摘 要：随着民用航空客舱和动力装置等材料或结构的防火耐火性能要求提高，防火试验方法越来越严格和细化。其中防火试验用油燃烧器已从原来简易的油气一体式油燃烧器等发展至Sonic油燃烧器。本文主要叙述了Sonic油燃烧器的历史背景、主要用途、结构组成、与原油燃烧器试验对比等内容。从火焰特性而言，Sonic油燃烧器的燃油、空气及结构控制严格，火焰特性更加稳定也易于维持。在结构上，也方便技术更新和改进，更有效地符合民航规章标准及防火试验要求。

关键词：民用航空；防火试验；Sonic 油燃烧器；火焰特性

中图分类号：X949 **文献标识码**：A DOI：10.19452/j.issn1007-5453.2019.04.009

飞机材料防火试验用油燃烧器最早应用于20世纪50年代，通过试验模型模拟飞机发生火灾状况，主要用于评估飞机动力组件，如金属部件、防火墙、软管等的防火性能。如果一种油燃烧器温度和热流密度能够达到飞机防火要求，则该油燃烧器适用于在试验阶段验证飞机材料的防火性能。随着新材料特别是高分子材料和复合材料在飞机上的大量应用，飞机材料的防火安全引起了人们的广泛关注[1]。为保证飞机的防火安全性，美国联邦航空局(FAA)于20世纪80年代在联邦航空法规中提出飞机货舱衬板和座椅垫均须满足油燃烧器防火试验的适航规章[2,3]；而1998年瑞士航空111号班机空难发生后，FAA于2003年颁布了隔热隔声材料应满足油燃烧器耐烧穿试验的适航规章[4]。随着隔热隔声材料的发展和规章的更新，原试验方法要求使用的Park DPL 3400油燃烧器已停产。在油燃烧器长期的研究和改进背景下，FAA研制出了Sonic油燃烧器(又称Next-Generation Oil Burner[5])进行替代，避免了老一代油燃烧器的参数难控制和火焰不均匀等缺点。本文主要介绍了Sonic油燃烧器的历史背景、发展应用和结构组成等，并从与老一代油燃烧器火焰特性和试验比对上，验证了两代油燃烧器的等效性，有助于掌握Sonic油燃烧器的关键技术和应用特点，提高飞机材料结构适航符合性验证试验的准确性。

1 Sonic油燃烧器的产生背景和应用

飞机材料防火试验用油燃烧器主要包含Park Model DPL 3400, Lennox Model OB-32, Carlin Model 200 CRD和Sonic油燃烧器等。其原理均为燃油和空气在油燃烧器枪体内混合后，在锥形燃烧筒点燃产生火焰，从而模拟实际飞机火灾火焰特性。其中Park Model DPL 3400、Lennox Model OB-32和Carlin Model 200 CRD油燃烧器产品较老旧，且均已停产。这些油燃烧器的空气由枪体配置的风机供给，燃油通过外部油箱供给，空气、燃油的温度和压力等参数因实验室的条件而异，火焰特性和稳定性较难维持。

Sonic油燃烧器的设计来自于FAA工程技术中心，原理与Park DPL 3400油燃烧器类似，并参考Park油燃烧器枪体结构和出口参数进行设计，不同之处在于其空气和燃油通过外部空压机和加压油箱供给而不是老一代油燃烧器油气一体式结构。Sonic油燃烧器的结构设计简洁，操作方便、火焰容易维持并稳定。随着控制技术的改进，Sonic油燃烧器在空气和燃油上进行了分离控制，并要求供给燃油温度

收稿日期：2019-02-27；退修日期：2019-03-10；录用日期：2019-03-19
*通信作者. Tel.：028-64456028 E-mail：chenyuan@fccc.org.cn
引用格式：Chen Yuan, Wang Yuzhuo, Li Zhiqiang. Development and application of sonic oil burner used for aircraft materials fire test[J]. Aeronautical Science & Technology, 2019, 30(04): 50-55. 陈元，王玉琢，李志强. 飞机材料防火试验用Sonic油燃烧器的发展和应用[J]. 航空科学技术，2019，30(04)：50-55.

为0～5℃，供给空气温度为5～15℃。这种构造精确地控制了燃油和空气参数，有助于油燃烧器在试验过程中稳定火焰形状和温度。FAA经过十余年的研发，验证了Sonic油燃烧器火焰特性具有良好的重复性和再现性[6]。目前，Sonic油燃烧器能够适应多种规章要求试验，并已写入FAA航空器材料燃烧试验手册第7章，座椅垫燃烧试验；第8章，货舱衬板的油燃烧器试验；第24章，隔热隔声材料耐烧穿试验和第25章，镁合金座椅结构可燃性试验[7～9]。

相对于老一代油燃烧器，Sonic油燃烧器主要针对燃油、空气供给和空气分配结构做了技术改进。老一代油燃烧器空气的分配是较难控制和稳定的，因为空气的分布和流向较难测量，且油燃烧器通风管内还包含燃油导管、点火电线等附属设备，只能通过火焰特性验证。Sonic油燃烧器空气分配的改进主要有以下结构形式，如图1所示。燃烧器将内部点火电极去除，通过燃烧筒上的火花塞进行打火，避免了空气在燃烧器通风管内的流向紊乱。在Park油燃烧器的基础上，使用定片和湍流器的组合形式，其火焰形状和7支热电偶火焰温度值更加均匀。

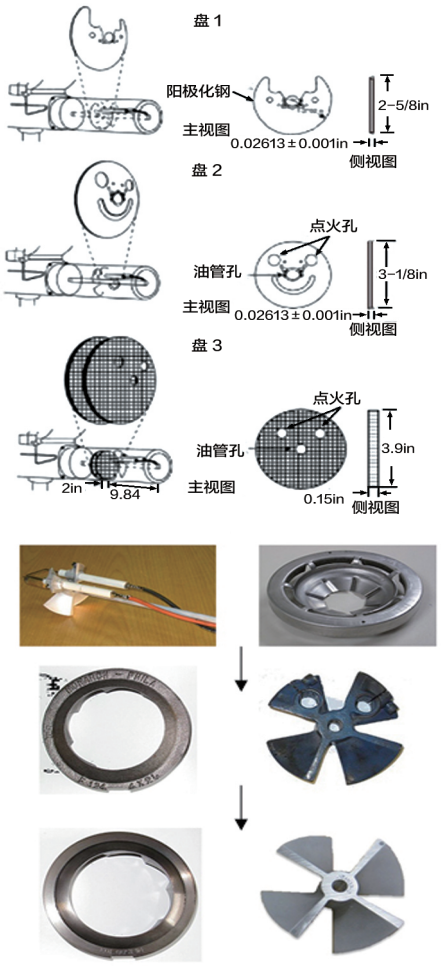


图1 油燃烧器的空气分配结构发展演变

Fig.1 Progress of structure in air distribution of oil burners

2 Sonic油燃烧器结构

2.1 枪体结构

Sonic油燃烧器枪体结构如图2所示，主要由气压调节阀、声速节流器、通风管、定片、湍流器和燃烧筒等构成。其工作原理为燃油经过加压、雾化，与空气结合，在锥形燃烧筒点火燃烧产生火焰。

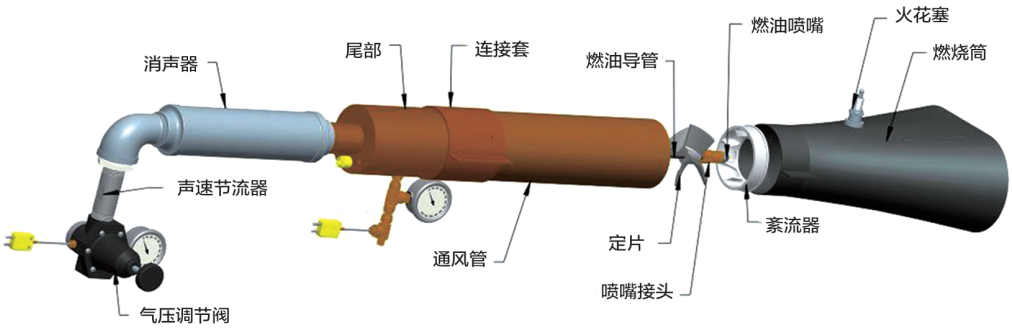


图2 Sonic油燃烧器结构

Fig.2 Schematic of the Sonic burner

Sonic油燃烧器使用气压调节阀和声速节流器控制进口空气流量，在声速节流器末端设计消声器，用于减少空气在声速节流器喉部扩散时产生的高频噪声，声速节流器如图3所示。通过调节声速节流器前端的空气压力产生恒定的空气流量，且空气流量不受声速节流器出口端压力波动带来的影响。压缩空气入口压力越稳定，得到的空气流量

就越稳定。空气流量根据下列公式计算[8]：

$$m = 0.89p_i + 12.43$$

式中：m为空气流量；p_i为空气入口压力。

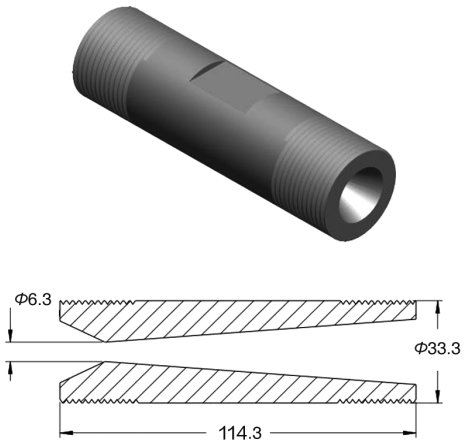


图3 声速节流器(单位：mm)

Fig.3 Schematic of the Sonic nozzle(unit: mm)

定片和湍流器用于偏转和分散气流。湍流器安装在通风管末端，标识片安装在6点钟方向，定片的前表面到湍流器出口端距离应为68.3mm±0.5mm。定片和湍流器及其安装位置关系如图4所示。

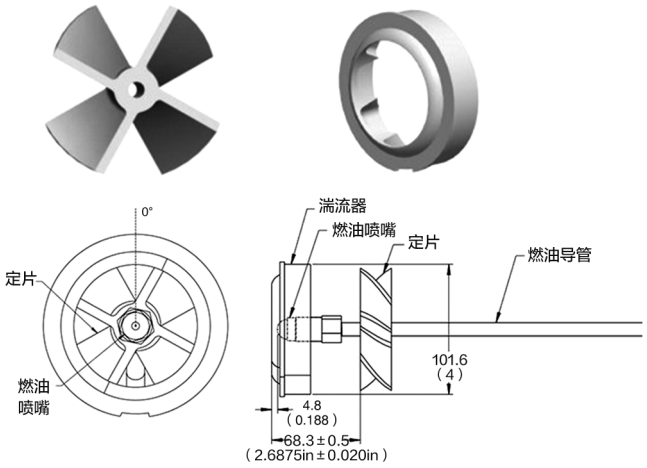


图4 定片和湍流器及其安装位置关系(单位：mm)

Fig.4 Stator, turbulator and their locations(unit: mm)

锥形燃烧筒安装在通风管端部，壳体上安装火花塞。火花塞输出电压为10 kV，通过衬套焊接在燃烧筒上。火花塞的导线长度和排列方式应防止在火焰校准和试验过程中受热损坏。导线布局应防止接触到燃烧筒及其他热表面，应使用耐热材料包覆进行热保护处理，防止被油燃烧器火焰的热量损坏。

2.2 燃油系统

燃油通过加压输送到喷嘴产生连续的雾化点火燃烧，燃油喷嘴构型为拧入式，80°锥形喷雾。Sonic油燃烧器推荐使用Delavan喷嘴，以使燃烧器产生符合要求的火焰形状，Delavan喷嘴如图5所示。

图5 Delavan喷嘴

Fig.5 Delavan oil nozzle

2.3 热交换系统

热交换系统用于调节Sonic油燃烧器的入口空气温度和燃油温度，热交换系统原理图如图6所示。在试验期间，要求空气温度为5～15℃，燃油温度为0～5℃。

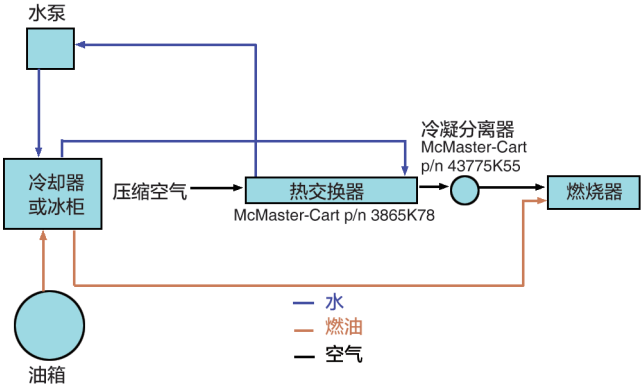


图6 热交换系统

Fig.6 Air/Fuel heat exchange system

2.4 入口参数的测量要求

由于流体在管道中流动，其压力会产生沿程损失和局部损失。为了使Sonic油燃烧器火焰得到更好的再现性和重复性，燃油、空气的压力和温度测量位置应尽量靠近油燃烧器的入口。为了减少气流中断的影响，入口空气温度应在声速节流器前端测量，热电偶应安装在声速节流器的上

游。此外，还应保护所有入口空气管路，保持空气温度的稳定性。燃油和空气温度采用K型（镍–铬）热电偶测量，热电偶直径为Φ3.2，陶瓷填料，310不锈钢护套，用24美标线规（AWG）电线或等效电线接地。在某些测试场所，火焰的辐射可能造成燃油温度升高或者软管爆裂。应保护燃油管路，保持燃油温度的稳定性。

3 Sonic油燃烧器与Park油燃烧器的对比

3.1 火焰校准

按照规章要求，油燃烧器必须在试验前进行火焰热流密度和温度校准。油燃烧器火焰的热流校准采用圆箔式Gardon热流计进行测量。Gardon热流计为温差式传感器，通过其表面涂层辐射传导，用不同的热电偶堆测量薄圆箔盘片中心和边缘的温度差来确定目标的热通量。油燃烧器产生的火焰区域对流强度很大，圆箔表面涂层吸热不均匀会导致误差较大，故而Gardon式热流计测量的是火焰中很小一个点的瞬时值，其设计仅适用于测量强热辐射环境，不适用于Sonic油燃烧器的火焰环境。因此，FAA取消了在试验前对Sonic油燃烧器热流计的校正程序，仅对火焰温度提出了要求，具体见表1。

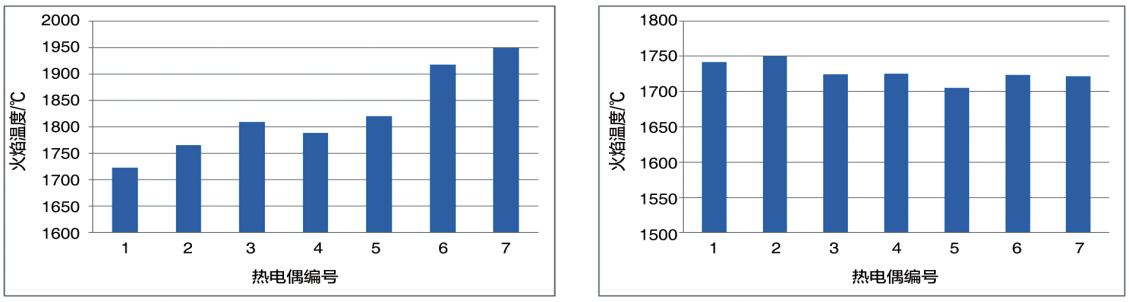
Sonic油燃烧器与Park油燃烧器在2GPH和6GPH燃油流量下典型的火焰温度校正结果如图7和图8所示。

表1 Handbook参考文献中Sonic油燃烧器的试验参数要求

Table 1 Test requirement of Sonic burner in Handbook

试验名称 参数要求	座椅垫耐火试验	镁合金可燃性试验	货舱衬板抗火焰烧穿试验	隔热隔声材料抗火焰耐烧穿试验
燃油流量	(2.0±0.1)GPH	(2.0±0.1)GPH	(2.0±0.1)GPH	(6.0±0.1)GPH
空气压力	(45±1) psi①	(45±1) psi	(45±1) psi	(60±1) psi
火焰温度推荐值	(1700±100) °F②	(1700±100) °F	(1700±100) °F	(1900±100) °F

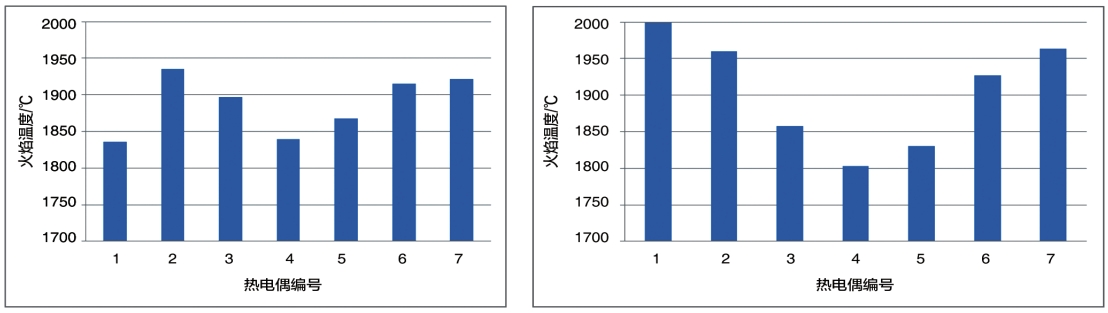
① 1psi=1lbf/in²=6.895kPa；② t_F(°F)=32+1.8t(°C)



（a） Park油燃烧器　　（b） Sonic油燃烧器

图7 Sonic油燃烧器与Park油燃烧器在2GPH下的典型火焰温度值对比

Fig.7 Typical flame temperature contrasts between Sonic burner and Park burner on flow rate of 2GPH



（a） Park油燃烧器　　（b） Sonic油燃烧器

图8 Sonic油燃烧器与Park油燃烧器在6GPH下的典型火焰温度值对比

Fig.8 Typical flame temperature contrasts between Sonic burner and Park burner on flow rate of 6GPH

从图7和图8的7支热电偶温度数据可以看出，老一代油燃烧器火焰分布不规则，且高温区略偏向于一侧。Sonic油燃烧器火焰略为两侧对称，特别是在6GPH流量下火焰形状明显较宽，中间温度较低。这是Sonic油燃烧器由于经

过空气分配改造后，产生的火焰更宽和饱满，两侧分布的空气点火产生的温度更高。相比之下，经过技术改进后的Sonic油燃烧器产生的火焰温度更为均匀，且所有入口参数和内部结构尺寸和位置均已约束，火焰状态更为稳定。而且，Sonic油燃烧器结构件更容易制作和技术更替，也为以后开展研究和更新做好了技术铺垫。

3.2 试验对比

为了验证Sonic油燃烧器和原油燃烧器的一致性，FAA技术中心对Sonic油燃烧器基础研究和测试之后，组织了行业内多家试验机构进行对比试验。所有试验均按FAA规定的方法进行，所有的试验设备、试样和试验程序尽可能一致，以下对隔热隔声材料耐烧穿试验、货舱衬板抗火焰烧穿试验和座椅垫耐火试验进行了对比分析。

3.2.1 隔热隔声材料耐烧穿试验对比

(1)烧穿时间试验对比

试验选取两种不同密度(16 oz/yd^{2}和9 oz/yd^2，yd为码≈0.914m，oz为盎司≈28.350g)聚丙烯腈纤维布作为试样，安装在FAA设计的试验夹具上进行测试。试验烧穿时间结果表明，所有实验室之间的数据一致性非常好，所有实验室和油燃烧器标准偏差均小于5%，不同实验室及两种油燃烧器的试验结果均具有较好的再现性。

(2)背部热流值试验对比

为了对比材料背火面的热流值，各实验室按照上述试验夹具，选用3M陶瓷纤维纸(单层，不含隔热棉和膜)进行测试，并使用相同热流计进行数据采集。对比试验结果表明，所有的试验结果均相似，热流值约为2.8 Btu/ft^2·s(Btu为英制热单位≈1.055kJ，ft为英尺≈0.3048m)。FAA技术中心组织隔热隔声材料用于之前的试验夹具进行测试，以论证试验结果和Park油燃烧器区别。其对比试验结果显示Sonic油燃烧器在两种试验夹具上表现出了很好的一致性，且和Park油燃烧器几乎一致，因此证实Sonic油燃烧器适用于按14CFR 25.856(b)进行隔热隔声材料耐烧穿试验。2008年7月29日，FAA将Sonic油燃烧器补充在AC 25.856−2A附录2中，于2018年9月写入Handbook第24章。

3.2.2 货舱衬板耐烧穿试验对比

(1)背部温度对比

试验选取两种差异性厚度玻璃纤维聚酯板材作为测试对象，组织5个不同实验室，按照货舱衬板耐烧穿试验测试5min，并测试其背部102mm处温度数据。对比试验结果表明，大部分标准偏差均低于可接受的10%准则。

(2)烧穿时间对比

试验分别选取0.125in和0.25in玻璃纤维板材作为测试对象，测试火焰明显烧穿试样的时间。对比试验结果显示烧穿时间均相对恒定，实验室间结果相似，重复性较好。由于每个试验环境的差异，会导致试验结果产生一定的差异，但大多数实验室标准偏差均低于可接受的10%准则，说明Sonic油燃烧器具有较好的重复性，适用于货舱衬板耐烧穿试验。2016年7月12日，FAA将Sonic油燃烧器写入Handbook第8章。

3.2.3 座椅垫耐火试验对比

试验选取了三类泡沫芯，其中为两类防火硬质泡沫(Fire Hardened Foam)和一类带挡火层泡沫(Fire Blocked Foam)，所有试验件使用相同的织物面罩、搭扣和接缝进行装配。对比试验结果的实际标准偏差表明，大多数失重率均低于接受准则10%，但Sonic油燃烧器对试验结果也有轻微的影响，这与各个实验室的环境条件有一定关系。

本试验另外选取了4类座椅垫进行失重率的比对测试，试验件结构组分均一致。两组用于Park油燃烧器，两组用于Sonic油燃烧器。对比试验结果表明，两类油燃烧器对试验件平均失重率有轻微的差异，但结果近似，FAA认定两类油燃烧器等效。2016年6月21日，FAA将Sonic油燃烧器写入Handbook第7章。

4 结束语

FAA组织的实验室间的对比试验结果证明，Sonic油燃烧器与老一代油燃烧器具有等效性，并已被写入FAA航空器材料燃烧试验手册第7、8、24和25章。相比老一代油燃烧器，Sonic油燃烧器主要有以下特点：(1)空气系统使用Sonic节流器和压力调节阀进行控制，使油燃烧器入口空气流量保持恒定；(2)通过油燃烧器内部空气结构的改进，使用湍流器和定片结合，其火焰形状更饱满，温度分布更均匀；(3)省去了火焰热流值的校准；(4)对空气温度和燃油温度进行了规范，使Sonic油燃烧器具有较好的再现性。

但在Handbook第11章动力软管防火试验和第12章动力装置防火试验要求中，Sonic油燃烧器的火焰温度还不能满足要求(平均温度不低于1093℃)，目前仍使用原油燃烧器进行改造使用。但随着技术的研究和改进，相信Sonic油燃烧器会逐渐完全替代原有油燃烧器，并写入民航相关适航规章，为飞机材料结构防火试验提供准确可靠的试验数据，需更严格地按照标准方法考察飞机材料防火特性。

AST

参考文献

[1] 李志强，陈元，于新华．飞机防火试验用油燃烧器的应用及特点介绍[J]. 工程与试验, 2016(4)：81-85.
Li Zhiqiang, Chen Yuan, Yu Xinhua. Application and characteristics of the oil burner used in aircraft fire test[J]. Engineering & Test, 2016(4):81-85. (in Chinese)

[2] Federal Aviation Administration. DOT / FAA / AR-00 / 12 Aircraft materials fire test handbook, Chapter 7, Oil Burner Test for Seat Cushions[S]. Federal Aviation Administration, 2017.

[3] Federal Aviation Administration. DOT / FAA / AR-00 / 12 Aircraft materials fire test handbook, Chapter 8, Oil Burner Test for Cargo Liners[S]. Federal Aviation Administration, 2017.

[4] Federal Aviation Administration. DOT / FAA / AR-TN09 / 23 Development of a next-generation burner for use in testing thermal acoustic insulation burnthrough resistance[S]. Federal Aviation Administration, 2009.

[5] Yi-Huan Kao, Tambe S B , Ochs R , et al. Experimental study of the burner for FAA fire test: NexGen burner[J]. Financial Accountability and Management, 2017, 41(7):10.

[6] Federal Aviation Administration. DOT / FAA / AR-00 / 12 Aircraft Materials Fire Test Handbook, Chapter 24, Determination of Burn Through Resistance Characteristics of Thermal / Acoustic Insulation Materials[S]. Federal Aviation Administration, 2018.

[7] Federal Aviation Administration. DOT / FAA / AR-00 / 12 Aircraft materials fire test handbook, Chapter 25, Oil Burner Flammability Test for Magnesium Alloy Seat Structure[S]. Federal Aviation Administration, 2017.

[8] Federal Aviation Administration. DOT / FAA / TC-13 / 52 Development of a laboratory - scale flammability test for magnesium alloys used in aircraft seat construction[S]. Federal Aviation Administration, 2014.

作者简介

陈元(1984—) 男，学士，助理研究员。主要研究方向：飞机舱内材料阻燃测试及研究。

Tel:028-64456028

E-mail:chenyuan@fccc.org.cn

Development and Application of Sonic Oil Burner Used for Aircraft Materials Fire Test

Chen Yuan*, Wang Yuzhuo, Li Zhiqiang

The second Research Institute of CAAC, Chengdu 610041, China

Abstract: With the improved requirement of fire-proof and fire-resistant performance of materials or structures in cabins and powerplant devices, the fire test methods are becoming more and more strict and specified. The oil burners for fire test have been developed from the original simple oil-gas integrated to the Sonic oil burner. This paper focuses on the background, main application, structure and components of the Sonic oil burner, makes comparison with the old oil burner. For the flame characteristics, the Sonic burner is more stable and easier to maintain than the old oil burners. Because the profiles of fuel, air and interior structure are strictly controlled. It is also convenient for technical updating and improvement for Sonic burner, and would meet the requirements of civil aviation regulations and standards of fire test more efficiently.

Key Words: civil aviation; fire test; Sonic oil burner; flame characteristics

Received: 2019-02-27； **Revised:** 2019-03-10； **Accepted:** 2019-03-19

***Corresponding author. Tel. :** 028-64456028 **E-mail:** chenyuan@fccc.org.cn