

DOI: 10.19416/j.cnki.1674-9804.2016.04.020

大型民用飞机货舱哈龙替代品抑制 及灭火系统研究

Research on the Replacements of Halon Fire Suppression and Extinguishing System in Large Scale Civil Aircraft Cargo Compartment

贺元骅 应炳松 陈现涛 孙 强 / HE Yuanhua YING Bingsong CHEN Xiantao SUN Qiang

(中国民用航空飞行学院, 广汉 618307)

(Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China)

摘 要:

基于美国联邦航空局休斯研究中心环保型飞机货舱哈龙替代品抑制及灭火的研究,阐释了飞机货舱哈龙替代品抑制及灭火系统最低性能标准,总结了氮气、气溶胶、细水雾等三种机载灭火系统最新研究成果,剖析了大型民用飞机货舱哈龙替代品抑制及灭火系统的最新发展趋势,分析了三种哈龙替代品抑制及灭火系统用于飞机货舱的可行性,旨在为我国大型民用飞机货舱哈龙替代品抑制及灭火系统研究提供工程技术参考。

关键词:大型民用飞机;货舱;哈龙替代品抑制及灭火系统;最低性能标准

中图分类号:V228

文献标识码:A

[Abstract] The Federal Aviation Administration William J. Hughes Technical Center has researched the environment friendly fire suppression system in aircraft cargo compartment for decades. This paper is based on the research and unscrambles the minimum performance standard for aircraft cargo compartment halon replacement fire suppression and extinguishing systems, which is developed by international aircraft system fire protection working group. This paper also summaries the latest research results of three fire extinguishing systems in aircraft that are nitrogen extinguishing system, aerosol fire extinguishing system and water mist fire extinguishing system. With an analysis on the current trend of the replacements of halon fire suppression and extinguishing system in large scale civil aircraft cargo compartment, it analyzes the feasibilities that if the three fire extinguishing systems are suitable for aircraft cargo compartment. This paper is aimed at providing reference for engineering technology of the replacements of halon fire suppression and extinguishing system in large scale civil aircraft cargo compartment.

[Keywords] large scale civil aircraft; cargo compartment; replacements of halon fire suppression and extinguishing system; minimum performance standard

0 前言

由于哈龙灭火剂严重破坏大气臭氧,1989年联合国环境规划署通过了《关于消耗臭氧层物质的蒙

特利尔议定书》及其修正案,限制及禁止哈龙灭火剂的生产和使用。由此,世界民航研究科研院所开启了寻找环保、经济的哈龙替代灭火剂的征程。1993年,美国联邦航空局(Federal Aviation Adminis-

[基金项目]中国民用航空局科技创新重大专项:高高原航空燃油火灾机理及灭火有效性研究,项目编号:MHRD20130103。

tration,简称FAA)携航空强国相关研究机构建立国际哈龙替代工作组(International Halon Replacement Working Group, IHRWG),2000年更名为国际航空器火灾防护系统工作组(International Aircraft System Fire Protection Working Group,简称IASFPWG)。该工作组旨在研发四大类机载火灾防护系统,参与成员有航空强国民航行政管理部门、国家科研部门、飞机制造商、航空公司、工业协会、灭火装备制造及供应商^[1]。自1993年始,国际航空器火灾防护系统工作组大力推进机载哈龙替代品灭火系统研制工程,在每年5月和11月举行两次国际会议,总结研究进展和确定未来研究工作。本世纪初以来,该组织先后研制出四部机载哈龙替代品抑制及灭火系统最低性能标准(Minimum Performance Standard,简称MPS)和测试方法,以指引货舱、发动机短舱、客舱和盥洗室哈龙替代品灭火系统研发方向。在未来民机市场需求以及国际机载哈龙替代品抑制及灭火系统研发趋势下,该研究有益于提升民航绿色环保水平。

1 飞机货舱哈龙替代品抑制及灭火系统最低性能标准

2003年,美国联邦航空局与国际航空器火灾防护系统工作组制定飞机货舱哈龙替代灭火系统最低性能标准(Minimum Performance Standard for Aircraft Cargo Compartment Halon Replacement Fire Suppression Systems,以下简称“货舱MPS”),货舱MPS是飞机货舱哈龙替代品抑制及灭火系统必须满足的技术标准,此标准为气体和非气体灭火系统规定了4类全尺寸火灾测试标准,以鉴定3种新型灭火系统是否满足飞机货舱火灾防护要求及碳氢化合物爆炸灭火浓度抑制要求。2005年和2012年美国联邦航空局又两次修正气溶胶罐爆炸模拟装置参数、可行标准和气溶胶罐爆炸测试程序。2012版的货舱MPS明确要求测试应在 $56.6 \pm 2.8\text{m}^3$ 的模拟货舱里进行,每种火灾环境至少重复5次,应将收集的新型灭火系统的数据与标准进行对比分析,以判断新型灭火系统是否满足货舱MPS测试标准。

货舱MPS规定了四种火灾测试环境包括散装货物火灾、集装货物火灾、表面火火灾和气溶胶罐爆炸火灾。(1)散装货物火灾环境应将切碎的纸松散地放在硬纸箱内模拟易燃火灾载荷,纸箱尺寸为 $45.7\text{cm} \times 45.7\text{cm} \times 45.7\text{cm}$,碎纸总重量为1.1kg。测试模拟舱内分两层总共放置178个纸箱,占模拟

货舱体积30%。实验测试共开展5次,取5次最高温度其算数平均不得超过 377°C ,且5次平均时间-温度曲线面积不得超过 $4\,974^\circ\text{C}\cdot\text{min}$,该平均时间-温度曲线面积是系统喷放30min,并取启动2min后的28min时间-温度曲线段面积;(2)集装货物火灾环境使用与散装货物火灾环境中相同的纸箱模拟易燃火灾载荷,纸箱放在一个 $1.95\text{m} \times 1.52\text{m} \times 1.63\text{m}$ 的LD-3集装箱内,另外放置两个空的LD-3集装箱。取5次最高温度其算数平均不得超过 343°C ,且5次平均时间-温度曲线面积不得超过 $7\,569^\circ\text{C}\cdot\text{min}$,该平均时间-温度曲线面积是系统喷放30min,并取启动2min后的28min时间-温度曲线段面积;(3)表面火火灾环境应使用1.89L的jet-A燃油,放在 $61\text{cm} \times 61\text{cm} \times 10.2\text{cm}$ 的油盘中,油盘底层为9.5L的水,用385ml汽油引燃,取5次最高温度其算数平均不得超过 293°C ,且5次平均时间-温度曲线面积不得超过 $608^\circ\text{C}\cdot\text{min}$,该平均时间-温度曲线面积是系统喷放5min,并取启动2min后的3min时间-温度曲线段面积;(4)气溶胶罐爆炸火灾环境使用气溶胶罐模拟装置,模拟装置使用丙烷、酒精和水等可燃爆混合物以模拟气溶胶,测试中,如舱内无过压、燃爆等爆炸现象,则表示灭火系统通过气溶胶罐爆炸火灾测试,当灭火剂浓度低于惰化浓度时,爆炸强度和最高压力不能高于舱内无灭火剂时爆炸的强度和压力值^[2]。

2 民用飞机货舱新型灭火系统

美国联邦航空局休斯研究中心开展了大量 N_2 、气溶胶、细水雾等哈龙替代品灭火系统的研究和测试。

2.1 N_2 灭火系统

氮气灭火系统的原材料氮气取自大气层,既可从空气中随时获取,也可在灭火后直接排入大气。喷放之后无残余,对生态无害,因而系统具有明显稳定性。 N_2 灭火系统中使用的氮气具有化学惰性。在灭火过程中,随着氮气淹没火焰区,火焰区的氧气浓度大幅度下降从而扑灭火焰。由于 N_2 和空气的重量相近,喷放气体进行淹没式灭火时,可以与周围的空气很好地进行混合。在喷放后的较长时间可以保证火区的温度稳定,维持火区的温度变化率极低^[3-4]。

2011年,美国休斯研究中心在货舱抑制及灭火试验中测试了不同速率、不同含氧量及含水量下的氮气灭火效果,测试矩阵见表1。

表 1 氮气测试表

速率(L/min)	O ₂ 含量(%)	O ₂ 含量(%) + 水(L/min)
424.8	3.9	6.1
509.7	5.5	7.7
566.3	6.7	8.8

实验数据表明,温度和氧浓度的变化曲线是相似的。在氮气速率为 424.8L/min,氧含量为 6.1% 时,灭火效果最差;在氮气灭火剂中加入水可以增强灭火系统的灭火性能。图 1 和图 2 所示为在氮气速率为 424.8L/min、O₂ 浓度分别为 3.9%、6.1% 和 6.3%,水含量为 3.86L 灭火实验测试中的天花板温度和舱内氧浓度变化。图 3 和图 4 所示为在氮气速率为 509.7L/min、O₂ 浓度分别为 5.5%、7.7% 和 7.7%,水含量为 3.86L 灭火实验测试中的天花板温度和舱内氧浓度变化。图 5 和图 6 为在氮气速率为 566.3L/min、O₂ 浓度分别为 6.7%、8.8% 和 8.7%,水含量为 3.86L 灭火实验测试中的天花板温度和舱内氧浓度变化。实验表明加入水可以增强 N₂ 灭火系统的灭火效能^[5]。

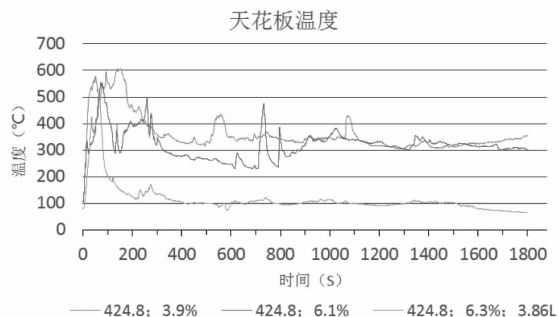


图 1 424.8L/min 氮气测试温度

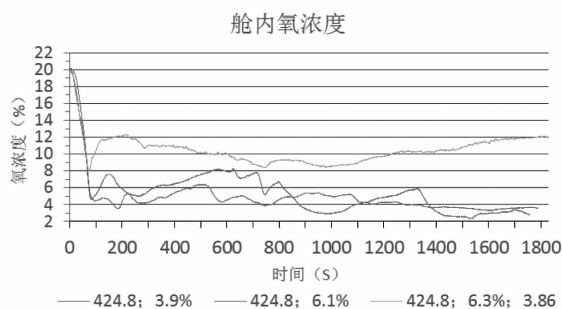


图 2 424.8L/min 氮气测试氧浓度

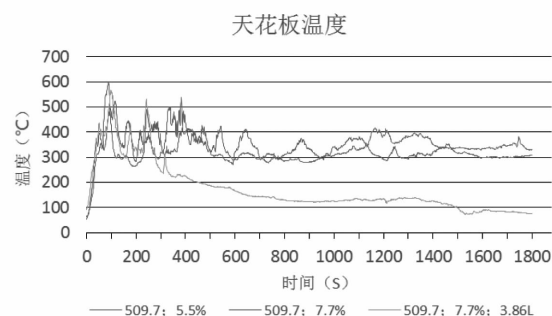


图 3 509.7L/min 氮气测试温度

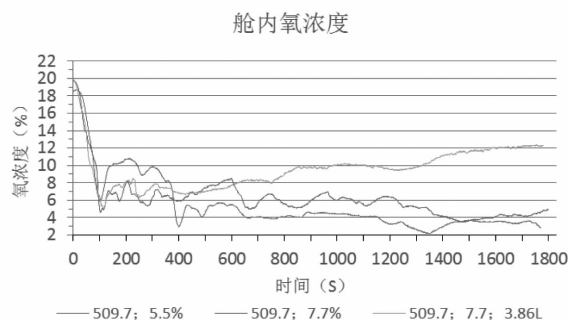


图 4 509.7L/min 氮气测试氧浓度

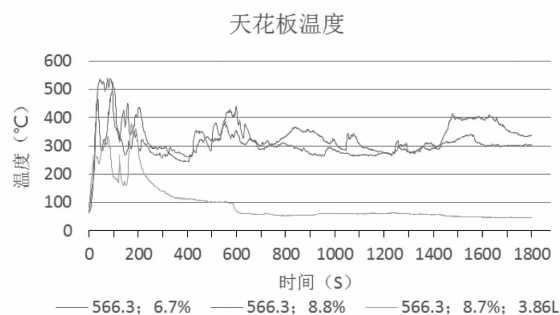


图 5 566.3L/min 氮气测试温度

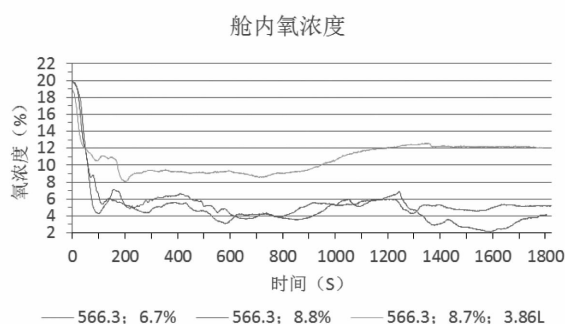


图 6 566.3L/min 氮气测试氧浓度

2.2 气溶胶灭火系统

气溶胶灭火系统是近几十年来发展迅速的一种哈龙替代灭火剂,本身无灭火作用,启动之后所释放的产物即经过燃烧反应之后释放钾、铯氧化物固体颗粒和 N_2 、 CO_2 、水蒸气等物质的物理降温 and 化学反应抑制作用具有灭火作用。由于气溶胶微粒是微米级,使得气溶胶可以在空间内长时间悬浮,并且能够绕开障碍物。这种特性使其成为哈龙全淹没式灭火系统的热门候选替代品之一^[6]。20 世纪 90 年代中期北京理工大学研制开发出了 EBM 热气溶胶灭火剂^[4]。EBM 灭火剂在点火燃烧时形成的气溶胶能迅速向四周扩散,该气溶胶微粒对燃烧过程有强烈的抑制作用,可以迅速终止燃烧反应。这些微粒的粒径小于 $1\mu m$,成为具有灭火作用的活性质点,有很大的表面积,对燃烧过程的链式反应具有很强的负催化作用,能很快降低燃烧的反应速率^[7]。当气溶胶喷口处的温度大于 $600^\circ C$,固体生成物占到 90% 以上时,灭火效率高;当喷口处温度在 $200^\circ C \sim 400^\circ C$ 时,灭火效率略有下降;当喷口温度低于 $100^\circ C$,固体生成物比例明显下降,灭火效率低^[8]。

国外对气溶胶灭火剂的使用和气溶胶灭火剂在飞机上使用的研究相对国内要成熟。在 2012 年 5 月美国休斯研究中心已经在 E 类货舱抑制及灭火研究中在 $13.3m^3$ 镀锌测试箱内做气溶胶灭火实验。实验表明气溶胶的初始灭火很有效,并且在灭火之后的 4h 内,能维持箱内的温度在 $94^\circ C$ 以下。又在 10 月的试验中规定了测试程序:点火箱放在测试箱的左前角(模拟最坏的火灾环境);当顶棚温度达到 $94^\circ C$ 时,启动气溶胶灭火剂;持续检测顶棚温度和箱内氧浓度 4 个小时。并且在镀锌测试箱和一种复合材料箱中做对比试验。实验结果显示气溶胶灭火系统工作之后,能在 1min 之内使顶棚温度从 $540^\circ C$ 降低到 $121^\circ C$,并且顶棚温度维持在 $121^\circ C$ 以下 4h。氧浓度的数据表明,在气溶胶灭火系统工作之后,氧浓度在 1min 之内降低到 9% 以下。在镀锌测试箱中,4h 之后,氧浓度才缓慢回升到 14.5%;在复合材料箱中,氧浓度在 4h 之后,氧浓度才接近 10%。在进一步的探索研究中,镀锌测试箱和复合材料箱在气溶胶灭火之后一直保持惰性环境,在实验结束后,出现复燃的次数大大降低^[9-10]。

2.3 细水雾灭火系统

细水雾灭火技术在消防方面的应用始于 1940 年,在哈龙灭火剂的应用被联合国限制和禁止生产之后,细水雾由于其清洁、高效、稳定、对环境友好等优点成为最有前途的哈龙替代物,也是唯一完全符合 FAA 货舱 MPS 的哈龙替代灭火剂,并且在全球范围内得到广泛关注和研究^[1]。细水雾灭火系统能否完全替代哈龙灭火系统的难点在于对障碍物遮挡的火焰的扑灭效果。美国 NIST 等研究机构进行了细水雾扑灭计算机箱深位火焰的实验研究,发现在细水雾工作压力低于 $1MPa$ 的情况下,很难扑灭机箱内部的深位火灾。在进行有遮挡的细水雾灭火实验中,以 $0.85m \times 0.75m \times 0.75m$ 的铁皮桌子作为遮挡物,使用直径为 $0.16m$ 的圆形油盘,深度 $0.01m$,细水雾喷头距离地面为 $4.5m$ 。实验发现对于有障碍物火焰,在完全遮挡的情况下,普通细水雾很难快速有效扑灭火焰;在火焰被局部遮挡的情况下,会有较多的细水雾进入到火焰区域,增大细水雾工作压力可以缩短灭火时间,降低细水雾喷头的高度也会缩短细水雾灭火所需的时间^[11]。

2002 年美国主导的机载细水雾灭火系统通过初步测试,并针对货舱细水雾抑制及灭火系统制定了评估报告。目前空客公司等主导的机载细水雾灭火系统已全部通过 MPS 测试^[12]。2010 年,FAA 休斯研究中心构建了 $13.3m^3$ 的测试箱对 $1.83mm$ 、 $1.1mm$ 孔径细水雾喷头进行测试,测试结果可以初步得出细水雾的降温效果很好^[13]。2012 年,休斯研究中心用 DC-10 喷气式客机货舱模拟真实的货舱实验环境^[9]。2013 年,FAA 休斯研究中心测定舱内空气置换率,规定在区域细水雾系统试验中,当天花板温度达到 $200^\circ F (93.3^\circ C)$ 时,启动细水雾灭火系统。用水量的多少判定灭火的有效性^[14]。2014 年,FAA 休斯研究中心测试 AOA 细水雾灭火系统在 E 类舱中灭全/半载荷 A 类火和油盘火的性能^[15]。实验设置如图 7、8、9。数据表明细水雾系统能扑灭 E 类货舱环境的火灾。图 10 所示为 2014 年 8 月的细水雾灭油盘火试验中舱内天花板温度变化趋势。图 11 所示为舱内氧浓度的变化趋势。2015 年,休斯研究中心测试无添加剂和含盐细水雾系统灭全/半载荷

A 类火和 B 类火的灭火性能。细水雾灭 A 类火的测试标准:烟雾探测器启动细水雾系统,细水雾系统喷射 10min,天花板温度维持在 94℃,有无添加剂作对比试验。具体数据如图 12 和图 13 所示。可以看出天花板温度基本维持在 25℃ 以下。实验表明加入盐可以增加 AOA 细水雾灭火系统的灭火性能^[16-17]。B 类火的测试标准为:烟雾探测器启动细水雾系统,细水雾系统喷射 5min,5cm×5cm 油盘,使用 jet-8 航空煤油,油盘垫水,使用庚烷引燃^[8]。实验设置如图 9 所示。具体数据如图 14 和图 15。从数据可以看出 AOA 细水雾灭火系统完全能够扑灭油盘火灾。而且加盐可以增加细水雾系统的灭火性能。

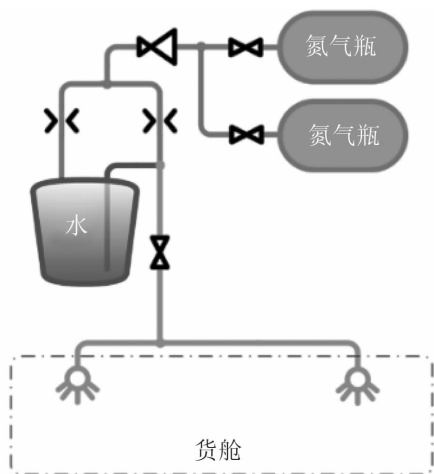


图 7 AOA 细水雾灭火系统

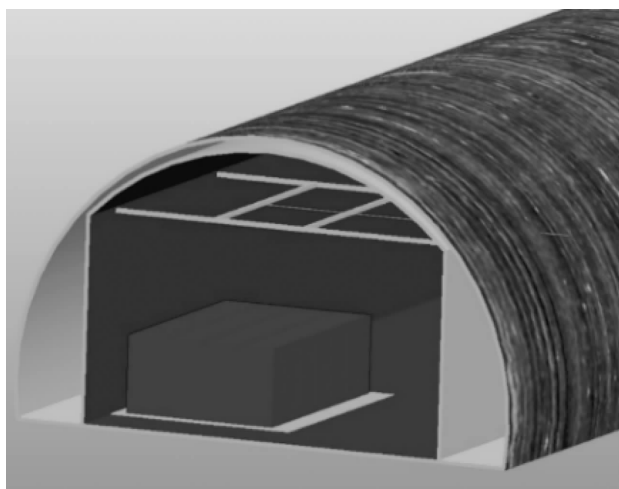


图 8 A 灭火测试平台

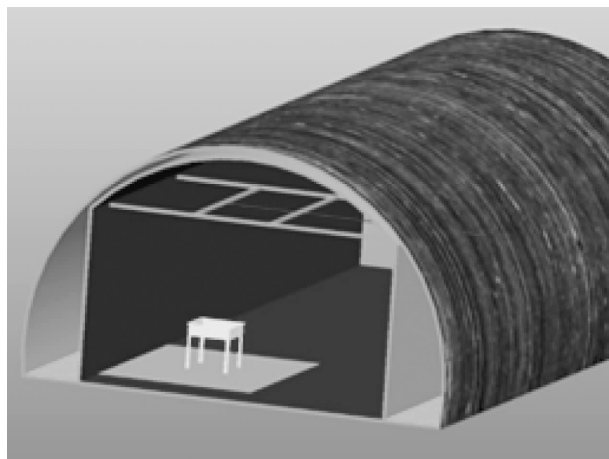


图 9 B 灭火测试平台

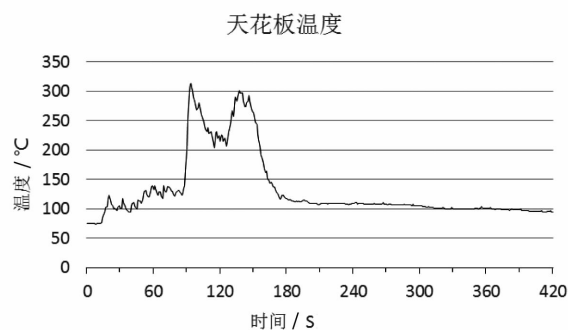


图 10 2014 年细水雾灭油盘火温度

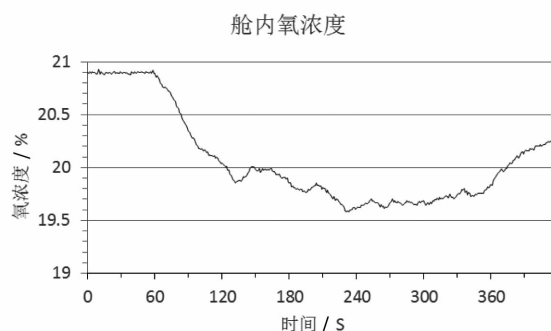


图 11 2014 年细水雾灭油盘火氧浓度

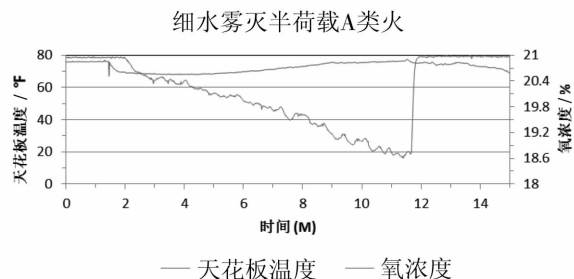


图 12 2015 年细水雾灭半荷载 A 类火温度

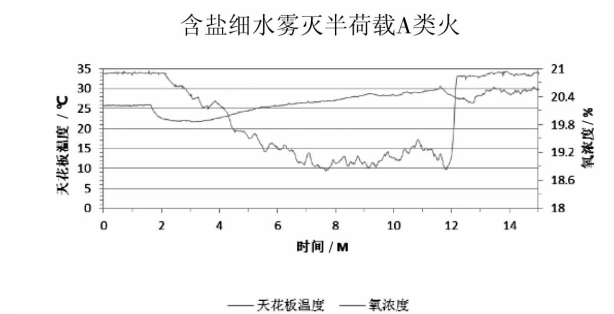


图 13 2015 年含盐细水雾灭半荷载 A 类火温度

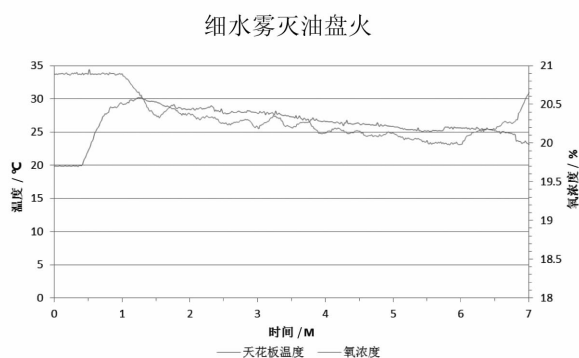


图 14 2015 年细水雾灭油盘火温度

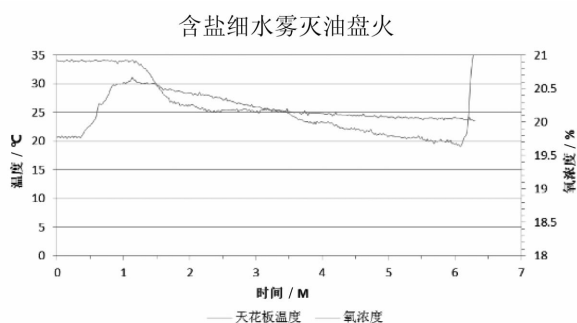


图 15 2015 年细水雾灭油盘火温度

3 结论

综上所述,美国联邦航空局制定的飞机货舱哈龙替代品抑制及灭火系统最低性能标准对民机新型灭火系统研发具有一定的参考价值,欧美国家研发的环保型双流体灭火系统已通过了该标准规定的测试。美国休斯研究中心完成的实验表明,拟定的氮气、气溶胶、细水雾三种哈龙替代品灭火系统灭火效果优良。随着大型机载制氮系统性能的改进,氮气灭火系统可更好地与机载制氮系统兼容,从而较好地解决飞机空重增大问题,因此具有良好

的发展前景;气溶胶灭火系统灭火效能优良,使用后能持续维持舱内低于 94℃。但是,其本身含能材料会产生高达 600℃ 的高温且严重降低能见度,因而需要对气溶胶的低温生成、增强可见度进行优化;现在低压细水雾系统利用机载供水、供氮系统,因而可避免增加飞机空重,该系统具有极优的灭火效果且无任何环保问题,是最具潜力的哈龙替代品。但是,其强化抑灭火效果的添加剂会腐蚀飞机结构,因此需要进一步寻找无损害飞机机载系统的细水雾添加剂。此外,美国联邦航空局的标准以及依据此标准开展的研究测试,都是在平原地区常压工况条件下开展的,至于低压、变压环境下的测试则有待进一步展开,故不能完全通过灭火系统在民机飞行中验证灭火效能的测试。因此,未来机载货舱哈龙替代品研究工作,需开展在高海拔条件及机舱变压条件下替代品灭火系统灭火效能的测试和研究。

参考文献:

- [1] Sarkos C. Improvements in Aircraft Fire Safety Derived from FAA Research Over the Last Decade[J]. Aircraft Structural Components, 2011.
- [2] Reinhardt J W. Minimum Performance Standard for Aircraft Cargo Compartment Halon Replacement Fire Suppression Systems (2012 Update)[J]. Cargo Compartments, 2012.
- [3] 赵俊. 氮气灭火系统及其在我国的应用现状和发展[J]. 给水排水, 2015(7):143-146.
- [4] 刘静, 赵乘寿, 冒龚玉, 等. 我国哈龙替代灭火技术的现状及发展趋势[J]. 中国西部科技, 2010, 9(34):8-10.
- [5] Dave Blake. Class E Cargo Compartment Fire Suppression[R]. New jersey:FAA Technical Center, 2011. 5.
- [6] 余明高, 廖光煊. 哈龙替代产品的研究现状及发展趋势[J]. 火灾科学, 2002, 11(2):108-112.
- [7] 白利生. EBM 气溶胶自动灭火装置[J]. 消防技术与产品信息, 1998, 4:25-26.
- [8] 白利生. EBM 气溶胶灭火技术的研究和应用[J]. 科技情报开发与经济, 2000, 10(3):71-73.
- [9] Dave Blake. Class E Cargo Compartment Fire Suppression[R]. London, UK:FAA Technical Center, 2012. 5.
- [10] Dave Blake. Class E Cargo Compartment Fire Suppression[R]. London, UK:FAA Technical Center, 2012. 11.
- [11] 房玉东, 刘江虹, 廖光煊, 等. 细水雾抑制熄灭障碍物油池火的有效性研究[J]. 中国工程科学, 2006, 8(2):

75-79.

[12] 宣扬, 银未宏. 民用飞机哈龙替代灭火技术应用及发展趋势[J]. 科技信息, 2011, (22): 709-710.

[13] Dave Blake. Class E Cargo Compartment Fire Suppression [R]. London, UK: FAA Technical Center, 2010. 5.

[14] Dave Blake. Class E Cargo Compartment Fire Suppression [R]. New jersey: FAA Technical Center, 2013. 5.

[15] Dave Blake. Class E Cargo Compartment Fire Suppression [R]. Atlantic City: FAA Technical Center, 2014. 10.

[16] Dave Blake. Class E Cargo Compartment Fire Suppression [R]. Dresden, Germany: FAA Technical Center, 2015. 5.

[17] Dave Blake. Class E Cargo Compartment Fire Suppression [R]. New jersey: FAA Technical Center, 2015. 10.

(上接第 52 页)

Z-支杆的叶片部分对气流的阻塞作用很小, 支杆本身又离模型较远, 因此对阻力系数的干扰量较小, 约为直支杆干扰量的一半。

2.3 俯仰力矩系数干扰量

图 9 和图 10 分别给出了全机和无尾两种状态下支杆对俯仰力矩系数干扰量的试验结果, 图中纵轴采用逆序坐标, 即支架对模型力矩系数的干扰量为负值。支杆对力矩系数的干扰量随迎角也同样呈线性变化。平尾部件是俯仰力矩的主要贡献, 平尾存在时, 直支杆会对模型带来较大的力矩系数干扰量, Z-支杆相对较小, 这主要是因为直支杆对平尾带来较

大的升力增量, 从而增加了模型低头力矩。Z-支杆对模型平尾影响较小, 带来的低头力矩系数增量也较小。尾翼去掉之后, 两种支撑形式对力矩的干扰量均较小。

3 结论

通过风洞试验, 研究和分析了直支杆与 Z-支杆两种支撑形式对高速风洞试验数据的影响, 结果表明: 支架对模型气动特性的干扰不可忽略; 在本期试验迎角范围内, 两种支撑形式对升力、阻力和俯仰力矩系数的影响随迎角基本上呈线性变化; 尾部直支杆对平尾的直接影响较大, 对模型气动特性的干扰量较大, 而 Z-支杆由于离模型尾部的距离较远, 对气动特性的干扰量相对较小, 且无尾状态下与全机状态下的干扰量较为接近。建议在其它条件相同的情况下, 尽量采用 Z-支杆进行高速风洞试验。

参考文献:

- [1] 李周复. 风洞试验手册[M]. 北京: 航空工业出版社, 2015.
- [2] J. Quest, M. C. N. Wright, S. Rolston. Investigation of a Modern Transonic Transport Aircraft Configuration over a Large Range of Reynolds Numbers[R]. AIAA-2002-0422.
- [3] 熊能, 林俊, 贺中, 等. 大飞机布局模型跨声速风洞实验尾支撑干扰研究[J]. 实验流体力学, 2012, 26(2): 51-55.
- [4] 陈万华, 王超琪, 谢国栋, 等. FL-26 风洞模型支撑系统动态仿真分析[J]. 中国机械工程, 2012, 23(2): 161-166.
- [5] 章荣平, 王勋年, 李真旭, 等. 低速风洞尾撑支杆干扰研究[J]. 实验流体力学, 2006, 20(3): 33-38.
- [6] 贾玉红, 吴星, 魏思亮. 高速风洞气体支撑的性能分析计算[J]. 长沙交通学院学报, 2005, 21(4): 62-67.
- [7] 杨立芝, 李俊甫, 董军. 高速风洞支架干扰数值修正研究[J]. 流体力学实验与测量, 2001, 15(3): 84-88.
- [8] J. F. Pait, N. Esteve. Recent Experiments with New Twin-Sting Supports in ONERA's Large Wind Tunnels[R]. AIAA-2002-2921.

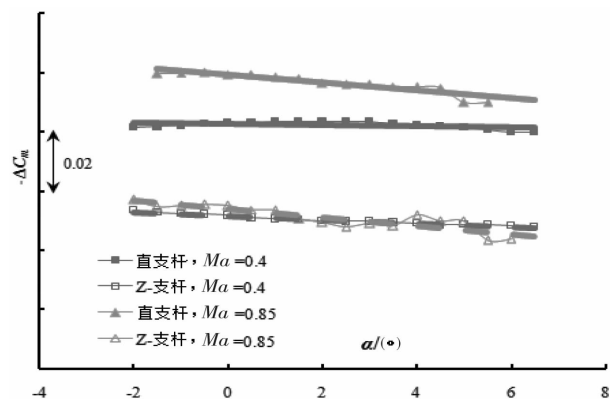


图 9 俯仰力矩干扰量(全机状态)

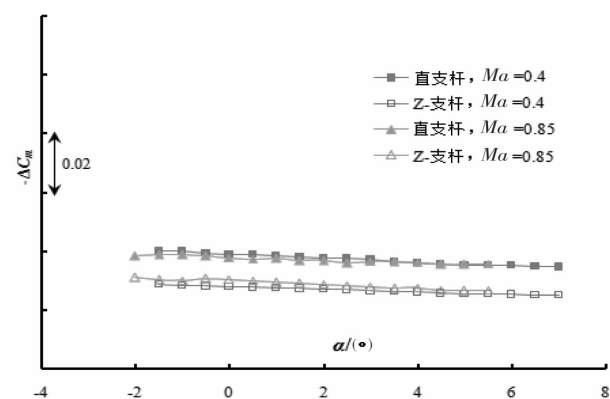


图 10 俯仰力矩干扰量(无尾状态)