

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2017.03.06

空气冷却器在航空发动机上的应用及流动传热试验分析技术研究

于霄, 吕多, 李洪莲, 姜楠, 赵孟, 张筱喆, 张树林, 周建军, 王振华
(中国航发沈阳发动机研究所, 辽宁 沈阳 110015)

摘要: 综合分析了空气冷却器(换热器)在航空发动机上的应用方向, 明确指出紧凑高效是航空发动机用空气冷却器的主要技术特点。为实现紧凑高效的设计需求, 必须应用有效地流动传热试验方法及分析技术。温度变化和压力损失是衡量空气冷却器的直接技术指标, 应用常规测量技术可以获得, 同时也需要借助 PIV 和 MRI 等先进测试手段开展流动和传热优化设计。在分析技术的研究中发现: 热动力曲线和传热有效度分析方法可以更直观地表征空气冷却器的换热性能, 有利于工程应用。

关键词: 空气冷却器; 紧凑; 高效; 流动传热

中图分类号: TB942

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2017)03-0034-05

Measurements of the Flow and Heat Transfer Research in an Aeroengine Heat Exchanger

YU Xiao, LV Duo, LI Honglian, JIANG Nan, ZHAO Meng,

ZHANG Xiaozhe, ZHANG Shulin, ZHOU Jianjun, WANG Zhenhua

(Shenyang Aeroengine Research Institute, Aero Engine Corporation of China, Shenyang 110015, China)

Abstract: The application of an aeroengine heat exchanger is studied in this paper, and it is clear that high efficiency and compactness are the main features for an aeroengine heat exchanger. To realize the design requirements of high efficiency and compactness, we must use effective flow and heat transfer experiments and analysis techniques. Temperature change and pressure loss are the direct technical indexes for evaluating an heat exchanger and should be obtained with ordinary measurement technologies. And meanwhile such advanced measurement methods as PIV and MRI are also necessary for optimize the flow and heat transfer design. The study and analysis results show that the thermodynamic curves and heat transfer efficiency analysis method can visually display the heat transfer performance of heat exchangers and are of benefit to engineer application.

Key words: heat exchanger; compactness; high efficiency; flow and heat transfer

0 引言

工程中将某种流体的热量以一定的传热方式传递给他种流体的设备称为换热器。作为工业生产过程中热量交换和传递不可缺少的设备^[1], 换热器在石油化工、能源交通、空凋制冷等领域有着非常广泛的应用。

随着现代航空发动机对推重比的不断追求, 部件热防护和系统热管理技术对热量交换提出了更高的要求, 换热器开始应用于航空发动机中以提高航空发动机的整体性能, 换热器的应用对于提高发动机冷却空气品质以及热能的利用率有着重要意义, 是高性能航空发

动机设计的重要技术基础。由于换热器在航空发动机上的主要应用方向是冷却空气, 所以通常被称为空气冷却器, 所以本文中涉及的换热器统一称为空气冷却器。

1 空气冷却器在航空发动机上的应用

航空发动机性能的大幅提高, 实现更高的推重比、降低油耗主要是通过提高涡轮前温度以及在此基础上提高压气机压缩比来实现的。随着航空发动机设计技术的逐渐发展, 涡轮前温度从上世纪五十年代的 1100K 发展到现今的 1800K, 预期到 2010 年提升到 2100K 以上, 将远超出同期材料的耐热能力, 所以必须依靠高效冷却技术来实现航空发动机的高性能。

为了满足冷却需求, 势必要求从压气机出口引出更多的冷却空气, 然而过量的冷却空气会降低总体的性能, 将会抵消涡轮前温度和增压比提升带来的利益。

收稿日期: 2017-05-07

作者简介: 于霄(1972-), 男, 自然科学研究员, 博士, 主要研究方向为航空发动机热管理。

从传热学的角度看,在冷气用量和冷却结构无法大幅变化的前提下,最有效的出路就是降低冷却空气本身的温度,提高冷气本身品质。这种技术被称为 CCA (Cooled Cooling Air) 技术^[2-4],即在发动机上安装空气冷却器,使用冷源(外涵冷气或燃油)对冷却空气(用来冷却高温部件)预先冷却,从而提高冷却空气品质。

在这一方案中,空气冷却器是最为核心的部件,航空发动机系统中的空气冷却器,按要达成的目标可以分成两类:一类是以改善航空发动机热效率为目的的空气冷却器,如高低压压气机之间的间冷器等;另一类是以防止发动机关键部件过热为目的的空气冷却器,如保护热端部件用的外涵空气冷却器等(当然燃滑油冷却器也是一种,但不在本文的讨论范围之内),这些空气冷却器对航空发动机来说极为重要,如图 1 所示。

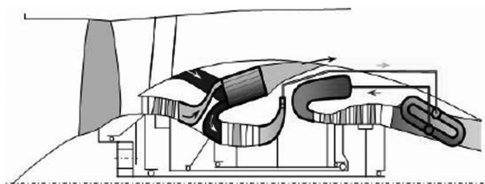


图 1 间冷回热流动循环示意图

1) 间冷回热循环发动机系统,包括间冷器和回热器

间冷回热循环^[5-7](如图 1 所示)即利用空冷式间冷器冷却即将进入高压压气机的空气流,以减少高压压气机的压缩功,同时利用气-气回热器加热即将进入燃烧室的空气流,以提高燃烧效率,从而改善发动机的热效率。间冷器和回热器在发动机上的布置情况如图 2 所示。

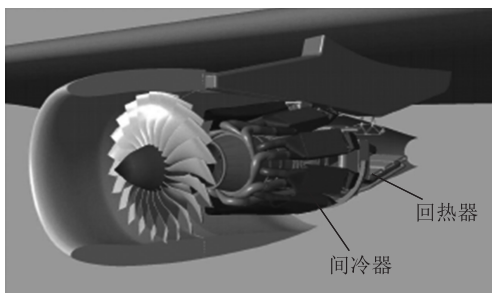


图 2 间冷器回热器位置示意图

2) 冷却热端部件的空气冷却器

典型地应用空气冷却器实现冷却冷却空气(Cooled Cooling Air)功能的系统流动如图 3 所示,从高压压气机引出的冷却空气在空气冷却器中被再次冷却,然后去冷却热端部件,空气冷却器是 CCA 系统中的核心部件。

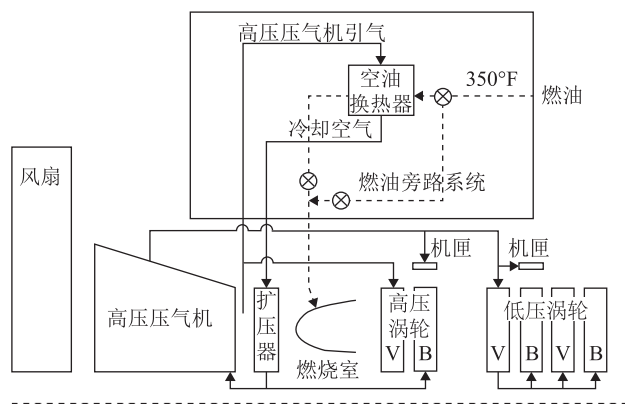


图 3 CCA 系统空气冷却器示意图

俄罗斯 AL-31F 发动机成功在外涵通道内应用了空气冷却器^[8],可使冷却空气降温 125~210K,从而对涡轮叶片进行有效冷却。其空气冷却器具有换热效率高、压力损失低、跨流管簇式、结构紧凑的特点。AL-31F 发动机如图 4 所示。

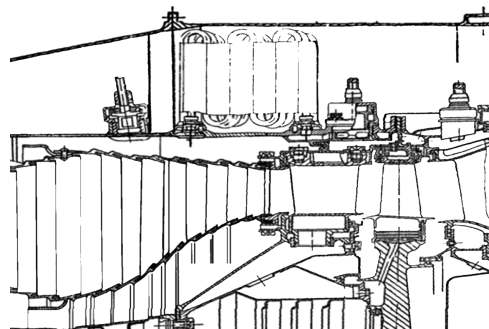


图 4 AL-31F 发动机

3 航空发动机用空气冷却器特点

航空发动机的使用环境对空气冷却器提出了特殊的使用要求^[9-11],首先要保证发动机的正常工作,其次是其本身的良好运转,在此基础上要追求尺寸小、质量轻以及能耗低,并以最优化的方式来实现动力传动整体结构和性能要求。所以在空气冷却器设计时,应从结构、能耗、运行以及工艺等方面对其进行要求:

- 1) 空气冷却器结构紧凑、尺寸小、重量轻;
- 2) 空气冷却器在系统中布置合理,便于安装、拆卸和监测;
- 3) 结构符合系统及飞行器整体要求;
- 4) 在所有可能出现的负荷及外部条件下,空气冷却器都能可靠地工作并达到发动机工作要求;
- 5) 应保证空气冷却器在清洁环境下工作,防止受到污染;

6)空气冷却器应该易于在发动机甚至飞行器上布置,并且换热性能良好,空气动力学性能良好。

4 流动传热测试方法

4.1 常规测试方法

空气冷却器是换热器的一种,换热器的流动传热测试方法都可以应用于空气冷却器,以分析其流动传热特性。温度变化和压力损失是衡量空气冷却器的直接技术指标^[12-15],主要的测试方法是应用热电偶测量温度,压差计等测量压力,并对不同工况下的数据进行分析,得出所需的性能参数,典型的试验系统如图5

所示,测试装置如图6所示。

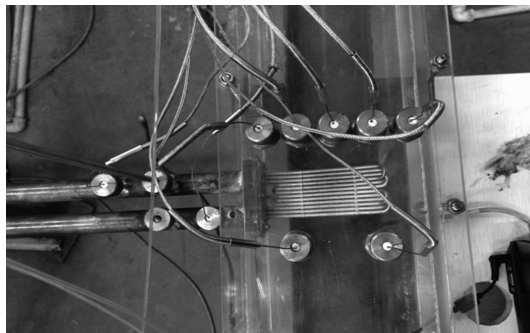


图6 测试装置图

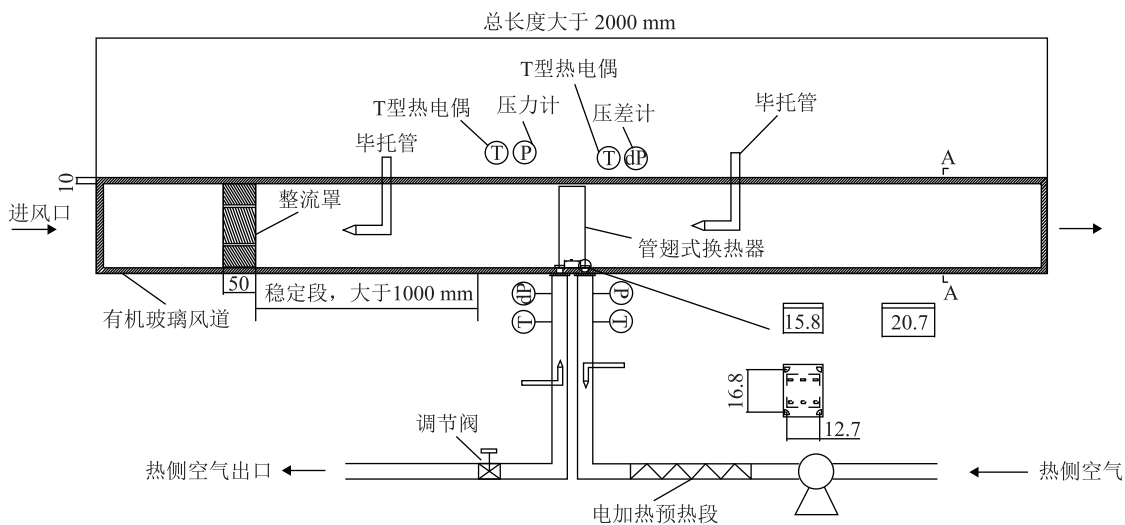


图5 试验系统示意图

热侧(管内)气源为活塞式压缩机。空气经由压缩机加压后,流过采用电加热的预热段加热,达到入口要求后,进入管式空气冷却器热侧通道,与冷空气换热后,流出实验段。管式空气冷却器热侧进出口的流体温度均采用铠装T型热电偶进行测量。其入口压力采用压力变送器进行测量,两端压差采用压差变送器进行测量。此外,在其进出口分别配有一个毕托管流量计,在测量流量的同时,也可通过测量数据对比较验实验系统的密闭性。进入空气冷却器热侧的空气参数中,进口温度可以通过调节预热段加热功率来改变,而入口流量则可以通过设置在出口的调节阀进行调节。

冷侧(管外)流体通道采用厚度为10 mm的有机玻璃板制成,为了实现通道内流场的充分发展,通道总长度大于2000 mm,其中冷空气进入空气冷却器之前的稳定段大于1000 mm。冷空气源也采用活塞式压缩机。在冷空气稳定段之前设置有一个整流罩,以实现冷空气在进入稳定段之前能够在通道横断面上均匀分配。冷空

气在流经空气冷却器之前和之后的温度采用铠装T型热电偶测量,压力和压差分别采用压力变送器和压差变送器进行测量。冷空气流量则采用毕托管进行测量。

4.2 先进测试方法

为实现空气冷却器紧凑高效的设计需求,多孔介质冷却器(如图7)和微小尺度仿生冷却器(如图8)开始

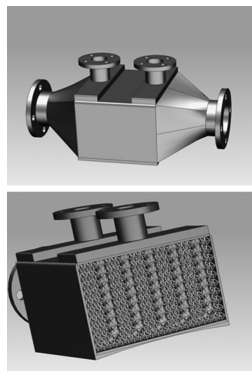


图7 多孔介质冷却器

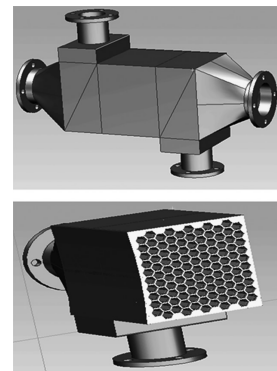


图8 微小尺度仿生冷却器

应用于航空发动机，现有的流动传热测试方法已经不能满足以上空气冷却器的设计优化，必须开发新型流动传热测试技术。

PIV(粒子图像测速)和MRI(磁共振成像)是最具有应用前景的流场分析技术。

PIV方法是应用激光照射流场内的示踪例子，拍照其位置图像，进而获得流场速度分布的方法，如图9和图10所示，形象直观，流场信息完整。

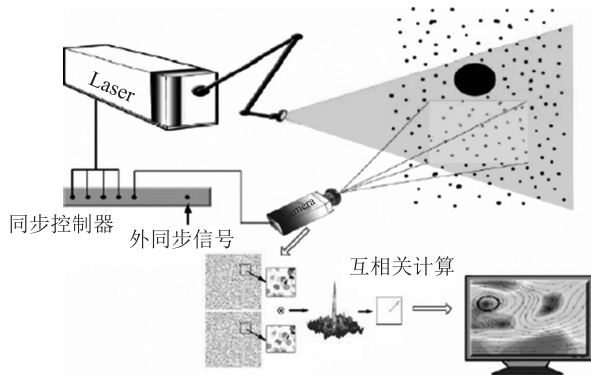


图9 PIV原理图

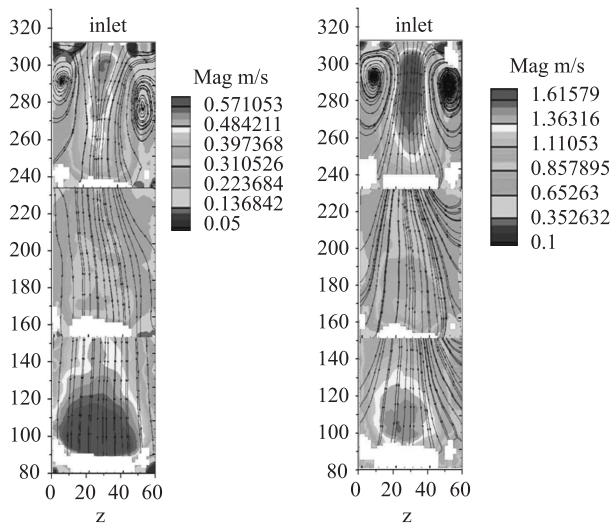


图10 PIV测试的流场图

MRI通过原子核的振动获得微观流场的完整信息，在多孔介质空气冷却器等微观流动和传热研究上有不可替代的优点，MRI系统如图11所示，流动传热测试结果显示在图12中。

5 分析方法

1) 传热分析

根据实验结果，可以绘制不同热气进口温度下空气冷却器总传热系数随冷侧空气变化曲线，如图13所示

示，图13中热气进口温度为53℃。

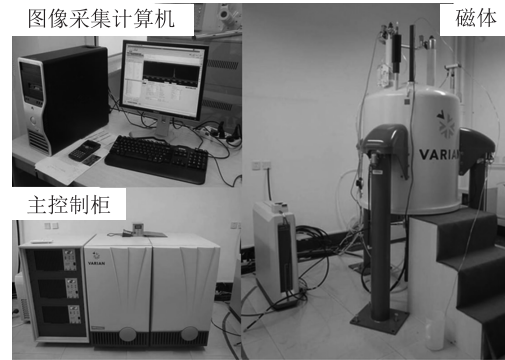


图11 MRI系统图

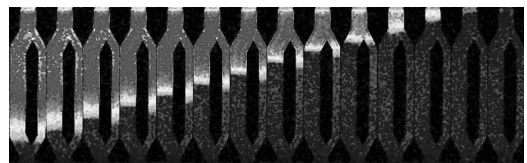


图12 MRI测试的瞬态流场图

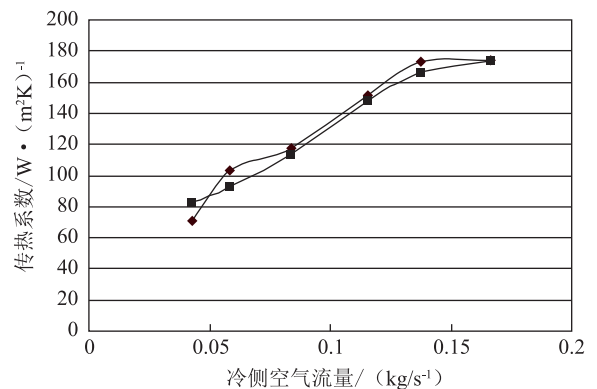


图13 空气冷却器传热系数对比图

同时根据实验数据整理了不同热侧流量下空气冷却器单位传热量随冷侧空气流量变化的曲线，并可以拟和出不同状态下热动力曲线随冷却流量变化的关联式，如图14所示，热侧流量0.0048kg/s，可应用于空气冷却器设计及校核计算中。

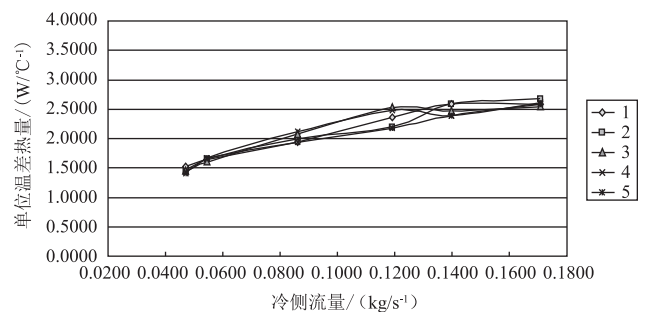


图14 热动力曲线分析图

2) 流动分析

根据实验数据可以整理不同热侧进口压力条件下的冷侧进出口压差随冷侧空气流量变化曲线,如图15所示,热侧进口压力0.11MPa。

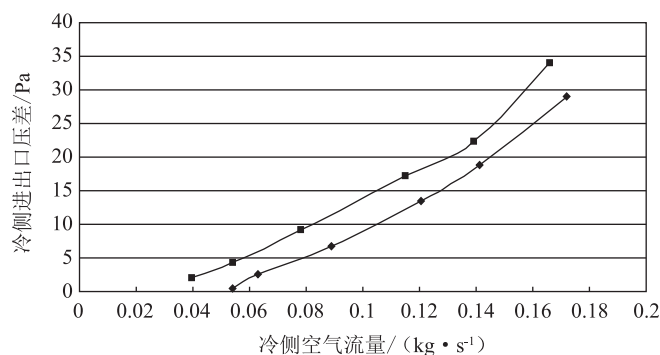


图15 空气冷却器阻力损失对比图

6 结论与展望

1) 试验分析方法

在试验中,由于冷侧为不可压缩流体,因此在保证气侧压力达到发动机状态的水平情况下,采用换热系数和热动力曲线的方式可以相对方便的描述空气冷却器全状态下的换热特性,但对于冷、热侧流体均为可压缩流体的空气冷却器,采用热动力曲线的方式已不再适合,对于此类空气冷却器,应当采用效能-传热单元数曲线描述不同状态点下的空气冷却器性能,即

通过空气冷却器效能 $\varepsilon = \frac{T'_1 - T''_1}{T'_1 - T'_2}$ 以及传热单元数 NTU 来描述。

$$NTU = \frac{KF}{W_{\min}}$$

2) 新测试方法

现代电子技术的飞速发展,尤其是光学技术手段的应用,必然会提高航空发动机用空气冷却器的设计和应用水平,为新型航空发动机

的设计生产提供扎实的技术基础。

参考文献

- [1] 曹玉璋. 航空发动机传热学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005.
- [2] Min JK, Jeong JH, Ha MY, et al. High temperature heat exchanger studies for applications to gas turbines. Heat Mass Transfer, 2009 46: 175 - 186.
- [3] Missirlis D, Donnerhack S, Seite O, et al. Numerical development of a heat transfer and pressure drop porosity model for a heat exchanger for aero engine applications. Applied Thermal Engineering, 2010, 30: 1341-1350.
- [4] D. Missirlis, K. Yakinthos, A. Palikaras, et al. Experimental and numerical investigation of the flow field through a heat exchanger for aero engine applications, Int. J. Heat Fluid Flow 2005, 26: 440-458.
- [5] K. Yakinthos, D. Missirlis, A. Palikaras, et al. Optimization of the design of recuperative heat exchangers in the exhaust nozzle of an aero engine. Applied Mathematical Modelling 2007, 31: 2524-2541.
- [6] A. A. 茹卡乌斯卡斯, 换热器内的对流传热[M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- [7] F. Parasons, R. Meenaksh, S. Murthy, N. B., Three - Fluid Fuel-Air Heat Exchanger ISABE 99-7204.
- [8] Yves Ribaud, Palaiseau, France. Compact Heat Exchanger Fitted to Engines of The Inverted Type. ISABE: 93-7120.
- [9] Arash Saidi, Bengt Sunden, Daniel Eriksson. Intercoolers in Gas Turbine Systems and Combi-Processes for Production of Electricity. ASME: 2000-GT-0234.
- [10] T. Yoshida, M. Taki, F. Mimura, et al. A New Cooling System for Ultra High Temperature Turbines. ISABE: 93-7073.
- [11] Tilemachos Papadopoulos, Pericles Pilidis. Introduction of Intercooling in a High Bypass Jet Engine. ASME: 2000-GT-150.
- [12] 王晓鲁. 飞机用紧凑换热器及强化换热研究[M]. 北京: 清华大学, 2004.
- [13] 曹玉璋. 实验传热学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1987.

(上接第58页)

参考文献

- [1] 李培玉, 谭大鹏, 刘端阳, 等. 六分量力传感器及其校准系统[J]. 中国机械工程, 2005, 17(16): 1523-1526.
- [2] 秦海峰, 王磊, 田峰, 等. 多分量测力仪及其校准技术的研究[C]//第三届中国航空学会青年科技论坛文集, 北京: 航空工业出版社, 2008: 399-404.

- [3] 秦海峰, 曹亦庆. 多分量测力仪的研究[J]. 新技术新仪器, 2007, 27(1): 14-16.
- [4] 刘海斌, 元文学, 孟昭莉. 多分量压电晶体测力平台静态标定与CoP验证研究[J]. 吉林体育学院学报, 2009, 25(5): 82-84.
- [5] 毕毓秀, 李有朴, 赵广复, 等. YDT-6461型六分量压电晶体生物力学测力平台的研制与应用[C]//全国运动生物力学学术会议, 1983.