

加力燃烧室典型结构件流阻特性研究

朱 贇,张哲衡,解 亮,王靖宇,吴 云
(中国航发沈阳发动机研究所,沈阳 110015)

摘要:为研究发动机加力燃烧室典型结构件在空气流场中的流阻特性,对不同种类试验件进行试验,分析了不同速度系数下的流场压力分布,获得了加力燃烧室典型杆件流阻系数的变化范围和速度系数对流场均匀性的影响规律。为减小杆件产生的流阻损失,优先选用单杆、光滑、堵塞比小的杆件。利用 Fluent 软件对流体流过试验件的过程进行数值模拟,结果表明:数值计算结果与试验结果得到的流阻系数相对误差在 2%以内。

关键词:流阻特性;流阻系数;雷诺数;堵塞比;加力燃烧室;航空发动机

中图分类号: V231.3

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2019.06.008

Study on Flow Resistance Characteristics of Typical Structure Parts of Afterburner

ZHU Yun, ZHANG Zhe-heng, XIE Liang, WANG Jing-yu, WU Yun
(AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: In order to study the flow resistance characteristics of typical structural parts of engine afterburner in air flow field, different kinds of test pieces were tested. The flow field pressure distribution under different velocity coefficients was analyzed. The variation range of flow resistance coefficient of typical rod in afterburner and the influence of velocity coefficient on the uniformity of flow field were obtained. In order to reduce the flow resistance loss caused by the rod, a single and smooth rod with smaller blockage ratio should be preferred. Fluent software was used to simulate the process of fluid flowing through the test piece. The results show that the relative error between the numerical results and the test results is within 2%.

Key words: flow resistance character; flow resistance coefficient; Reynolds number; blockage ratio; afterburner; aeroengine

0 引言

航空发动机加力燃烧室的进口总压和总温不断提高,对加力燃烧室的设计提出了更高要求。要求加力燃烧室的冷态压力损失尽量小,而放置在加力燃烧室中的喷油杆等不可避免形成堵塞,增加总压损失,总压损失与阻力系数和流体的动压有关^[1-5]。

加力燃烧室流阻损失是涡轮后高速燃气在混合、扩压及流经火焰稳定器、燃油总管、防振隔热屏、拉杆等构件过程中,因气体与构件表面摩擦和局部流动分离等原因造成的,使发动机推力减小,耗油率增加,在加力燃烧室设计时应尽量减小该流阻损失,为此在设计各阶段均需进行流阻损失计算,检查其与设计要求的差距。

国内外学者^[6-11]以水为介质对直管、弯管和变截面管的流动阻力特性进行相关研究,得到影响沿程阻力系数和局部阻力系数的变化规律;一些学者^[12-14]对管内流动进行相关数值计算,得到影响管路流阻系数的经验公式;Macagno、Hung 等^[15]对突扩管层流流动进行相关研究;李栋浩^[16]对突缩圆管局部阻力系数进行研究,得出突缩圆管局部阻力系数随进口雷诺数之间的计算关系式。但已有研究缺少对拉杆、加力燃油总管(含喷油杆)、测试受感部等构件详细的流阻特性分析,在流阻计算中,只计算由混合损失、扩压损失和因火焰稳定器引起的流阻损失,而忽略了加力燃油总管(含喷油杆)、内部连接拉杆、测试受感部等构件的流阻损失,存在一定的计算误差。

收稿日期:2018-10-08 基金项目:航空动力基础研究项目资助

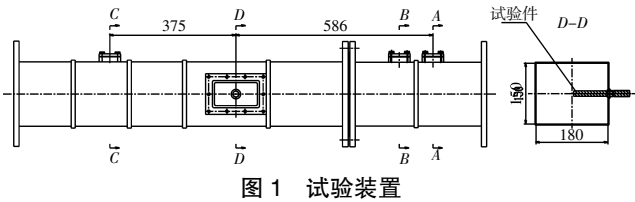
作者简介:朱贇(1988),男,硕士,工程师,主要从事加力燃烧试验研究工作;E-mail:zy8766@163.com。

引用格式:朱贇,张哲衡,解亮,等.加力燃烧室典型结构件流阻特性研究[J].航空发动机,2019,45(6):46-50. ZHU Yun, ZHANG Zheheng, XIE Liang, et al. Study on flow resistance characteristics of typical structure parts of afterburner [J]. Aeroengine, 2019, 45(6): 46-50.

本文为改进加力燃烧室流阻计算方法,提高计算精度,开展了加力燃油总管、拉杆、测试受感部流阻特性研究。

1 试验设备及测量方案

试验在加力燃烧室部件试验器矩形管道上进行,试验段的横截面为 2 元矩形截面。本次试验为冷态试验,来气温度即为试验件进口温度。试验件进口气流压力和进、出口气流压差参数采用压力和压差扫描阀进行测量,试验件进口气流温度参数采用多点热电偶测量。试验装置如图 1 所示,在前测量段 A-A 截面布置 1 支 5 点总压受感部、2 点壁面静压受感部;在 B-B 截面布置 1 支 5 点总温热电偶,测量试验件进口状态参数;在 C-C 截面布置 1 支 5 点总压受感部,测量试验件出口状态参数。上述测量数据均通过相应的传感器线路与计算机相连,由计算机采集和处理试验数据。



试验中空气流量参数采用流量孔板测量,采用流量法计算速度系数。

2 试验原理

在 D-D 截面安装试验件,流阻损失包括沿程损失和局部损失

$$\Delta P=P_{16}-P_{17}$$
$$P_{16}=\rho R_g T_{16}$$
$$q_a=\rho S V$$

(1)

(2)

(3)

流阻系数 $C_d^{[1]}$ 为

$$C_d=\frac{\Delta P}{1/2\rho V^2}=\frac{2(P_{16}-P_{17})S^2P_{16}}{R_gq_a^2T_{16}}$$

(4)

式中: ΔP 为流体流过试验件时的压差, Pa; P_{16} 为试验件入口总压, 通过在 A-A 截面布置的总压受感部测量, Pa, 测量精度为 $\pm 0.3\%$; P_{17} 为试验件出口总压, 通过在 C-C 截面布置的总压受感部测量, Pa, 测量精度为 $\pm 0.3\%$; T_{16} 为试验件进口总温, 通过在 B-B 截面布置的总温热电偶测量, K, 测量精度为 $\pm 1\%$; q_a 为试验件进口空气流量, 通过流量孔板测量, kg/s, 测量精度

为 $\pm 1\%$; ρ 为流体密度, kg/m^3 ; V 为流体流速, m/s ; S 为试验管道内截面面积, m^2 ; R_g 为气体常数, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。

3 试验项目与试验状态

3.1 试验项目

在试验中,将发动机加力燃烧室中 1 个截面上的所有杆件简化为 1 个试验件进行统计,结果显示堵塞比为 0.0049~0.0240,为此设置 5 种堵塞比试验件。为了研究试验件分布形式和外形光滑程度对流阻系数的影响,设置不同布局和粗糙度试验件。试验件外形为圆柱形(图 1),具体试验项目如下:

- (1)空管道流阻系数测量;
- (2)在相同堵塞比下不同布局试验件流阻系数测量,包括单杆试验件和前后 2 个杆串联试验件;
- (3)不同堵塞比试验件流阻系数测量,堵塞比分别为 0.005、0.010、0.015、0.020 和 0.025;
- (4)在相同堵塞比下,不同粗糙度试验件流阻系数测量,表面粗糙度分别为 1.6、6.3 和 12.5。

3.2 试验状态

根据加力燃烧室中杆件实际的工作环境,选取 5 个速度系数状态点进行试验,各状态的设备进口速度系数见表 1,温度、压力和流量参数保持恒定。

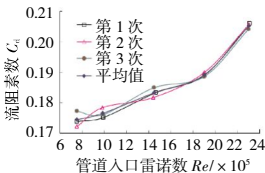
表 1 试验状态速度系数

状态编号	1	2	3	4	5
速度系数 λ	0.15	0.20	0.30	0.40	0.50

4 试验结果与分析

4.1 试验管道流阻系数

为了测量由试验件自身引起的阻力损失,需要对空管道所引起的阻力损失进行测量。在不装试验件时,在表 1 各状态下,进行 3 次空管道流阻系数测量试验,其结果如图 2 所示。



在表 1 中各状态下,即管道入口雷诺数(特征尺寸为管道当量直径)为 $7.5 \times 10^5 \sim 2.3 \times 10^6$ 时,3 次试验测量计算得到的空管道流阻系数的平均值随着管道入口雷诺数的增大而增大。由于试验管道内壁面比较粗糙,黏性底层的厚度很薄,此时流动状态应处于紊流粗糙管区,管壁的粗糙突起部分暴露在紊流区,紊流区中的流体流过管壁粗糙突出部分时将引起旋

涡,造成附加的能量损失。雷诺数越大,近壁面处黏性底层的厚度越薄,造成附加的能量损失越大。因此,在上述雷诺数范围内,流阻系数随着入口雷诺数的增大而增大。

在进口总压为 200 kPa、不同速度系数下,矩形试验流场出口 5 点总压不均度分布见表 2,5 点总压测点在矩形管道中等间距分布。不均度定义为每点总压与平均值的相对误差,不均度越大,说明流场的均匀性越差。

表 2 矩形试验流场总压的不均匀度

速度系数	不均度 /%				
	1	2	3	4	5
0.15	-0.09	0.08	0.18	0.08	-0.25
0.20	-0.12	0.12	0.32	0.13	-0.45
0.30	-0.32	0.19	0.76	0.39	-1.03
0.40	-0.48	0.28	1.45	0.67	-1.93
0.50	-0.64	0.33	2.30	1.23	-3.23

从表中可见,5 点总压不均度随着速度系数的增大而增大,当速度系数低于 0.20 时,5 点总压分布较为均匀,不均度在 0.5% 以下;当速度系数增大到 0.30 时,靠近壁面的总压测点不均度超过 1%;当速度系数为 0.50 时,靠近壁面的总压测点不均度超过 3%。从表中还可见,第 3、5 点总压不均度较大,由于测量的是空管道流阻系数,不安装试验件,流场的不均匀度主要是进口 A-A、B-B 截面布置的受感部和管道本身的不平整情况引起的,造成下游流场局部不均度增大。

在某型加力燃烧室全尺寸试验中,对流场 5 点总压的均匀性进行分析,5 点总压测点在环形管道中按等环面分布,流场总压的不均匀度分布情况见表 3。

表 3 全尺寸试验流场总压的不均匀度

速度系数	不均度 /%				
	1	2	3	4	5
0.15	0.10	0.14	0.07	-0.12	-0.19
0.26	0.85	0.79	0.81	0.06	-0.89
0.32	0.85	1.13	1.09	0.14	-1.42
0.37	0.50	1.41	1.12	-0.29	-2.73

从表中可见,当速度系数低于 0.3 时,流场不均度在 1% 以下;当速度系数增大到 0.3 以上时,流场不均度超过 1%,这与矩形试验流场的不均匀度具

有相同的变化趋势。

4.2 不同布局试验件流阻系数试验结果

在相同堵塞比($\varepsilon=0.06$)、不同布局试验件流阻系数随着雷诺数的变化曲线如图 3 所示。试验件流阻系数为减去空管道后的流阻系数。A1 为单杆试验件,A2 为前后 2 个杆串联试验件。

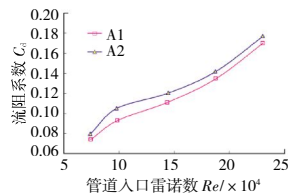


图 3 不同布局试验件流阻系数随雷诺数的变化曲线

从图中可见,在表 1 各状态下,对应试验件雷诺数(特征尺寸为试验件最大横截面当量直径)为 $7.4 \times 10^4 \sim 2.3 \times 10^5$ 时,A1 和 A2 的流阻系数都随着雷诺数的增大而增大。

上述 2 种布局的试验件流阻系数在 0.07 ~ 0.18 范围变化,由于气流流经 A2 后端的喷杆时产生额外的阻力损失,因此 A2 的流阻系数大于 A1 的。

4.3 不同堵塞比试验件流阻系数试验结果

5 种试验件 B1、B2、B3、B4 和 B5 的堵塞比分别为 0.005、0.010、0.015、0.020 和 0.025。不同堵塞比试验件的流阻系数随着雷诺数的变化曲线如图 4 所示,试验件流阻系数为减去空管道后的流阻系数。

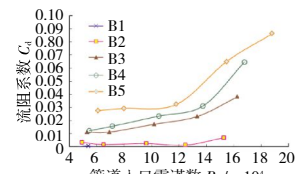


图 4 不同堵塞比试验件流阻系数随雷诺数的变化曲线

从图中可见,在表 1 各状态下,试验件堵塞比为 0.005~0.025 时,试验件的流阻系数不大于 0.09。

对于试验件 B1,其雷诺数为 $4.1 \times 10^4 \sim 1.2 \times 10^5$ 时,其流阻系数约为 0,且出现了负值,说明试验件 B1 的流阻系数很小,由于试验中的测试仪器(总压扫描阀)在工作过程中存在一定的波动(电噪声),气流流经试验件产生的阻力变化小于这种幅值造成,此时试验件的流阻系数已经超出了试验测量精度范围。

试验件雷诺数为 $6.1 \times 10^4 \sim 1.6 \times 10^5$ 时,试验件 B3、B4 和 B5 的流阻系数均随雷诺数的增大而增大;试验件雷诺数为 $6.1 \times 10^4 \sim 1.5 \times 10^5$ 时,对于试验件 B2、B3、B4 和 B5,随着试验件堵塞比的增大(0.010 增至 0.025),试验件的流阻系数也逐渐变大。这是由于在其它条件相同时,试验件堵塞比越大,气流流经试验件时产生的扰动越大,即旋涡区域越大,产生的流阻损失越大,因此试验件的流阻系数随着其堵塞比的

增大而增大。

4.4 不同粗糙度试验件流阻系数试验结果

在相同堵塞比为 0.143,不同表面粗糙度试验件 C1、C2 和 C3 的流阻系数与试验件雷诺数的关系曲线如图 5 所示,试验件流阻系数为减去空

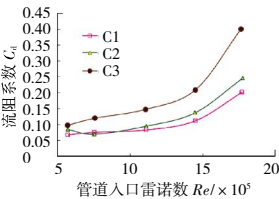


图 5 不同粗糙度试验件流阻系数随雷诺数的变化曲线

管道后的流阻系数。从图中可见,在表 1 各状态下,对应试验件雷诺数(特征尺寸为试验件最大横截面当量直径)为 $5.7 \times 10^5 \sim 1.7 \times 10^6$ 时,总体来看,试验件 C1(粗糙度为 1.6)、C2(粗糙度为 6.3)和 C3(粗糙度为 12.5)的流阻系数均随雷诺数的增大而增大,随表面粗糙度的增大而增大。

5 数值模拟结果

以试验件 A1 为例,利用 Fluent 软件对气体流过试验件的过程进行数值模拟,试验件进口总压测量截面为入口截面,出口阀门中心所在截面为出口截面;矩形管道内壁面为边界,以出口截面为计算出口。湍流模型选用标准 k-epsilon 湍流模型,近壁面处选用标准壁面函数,进口选用压力进口、出口选用压力出口为边界条件。

入口总压为 200 kPa、速度系数为 0.3。入口总温为 373 K 时流体流过试验件时的速度矢量、速度和压力如图 6~9 所示。入口总温分别为 373、331 和 307 K 时,模拟计算结果与试验结果的对比见表 4。

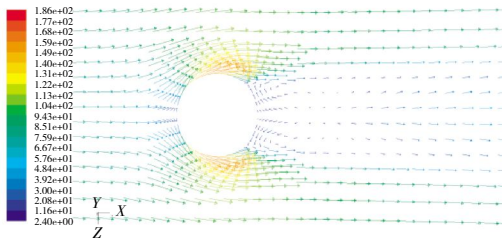


图 6 流体流过试验件时的速度矢量(XZ 截面)



图 7 流体流过试验件时的速度(XZ 截面)

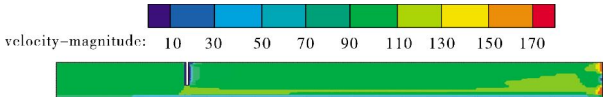


图 8 流体流过试验件时的速度(XY 截面)

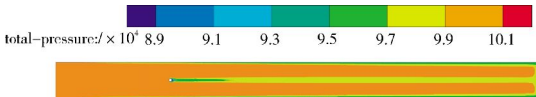


图 9 流体流过试验件时的压力(XY 截面)

从图 6~9 中可见,当气流流经圆柱形试验件时,由于试验件的阻挡作用,在试验件的后端形成漩涡,流体在试验件前端处速度几乎为 0,在柱体前半部分是减速增压流动,在后半部分由于漩涡作用,压力和速度大幅降低,之后气流逐渐趋向均匀。在管道出口处,由于出口阀门的阻挡作用,对出口压力场和速度场产生一定影响。数值计算得到的速度场和压力场符合实际情况。

表 4 计算结果与试验结果对比

	计算结果	试验结果	误差 /%
入口总压 /kPa	200	199.8	-0.10
入口流量 kg/s	5.135	5.126	-0.18
入口总温 /K	373	373.2	0.05
速度系数	0.299	0.299	0
试验件雷诺数	143678	143387	-0.20
流阻系数	0.113	0.113	0

	计算结果	试验结果	误差 /%
入口总压 /kPa	200	200.3	0.15
入口流量 kg/s	5.452	5.488	0.66
入口总温 /K	331	331	0
速度系数	0.299	0.301	0.67
试验件雷诺数	166705	167857	0.69
流阻系数	0.112	0.114	1.79

	计算结果	试验结果	误差 /%
入口总压 /kPa	200	199.8	-0.10
入口流量 kg/s	5.661	5.645	-0.28
入口总温 /K	307	307	0
速度系数	0.299	0.299	0
试验件雷诺数	183302	182403	-0.49
流阻系数	0.112	0.11	-1.79

表 4 中试验温度和压力参数通过布置在流场中的受感部测得,并对各测点进行加权平均得到,数值计算中的温度和压力等参数是对整个流场进行加权平均得到,进而计算出流阻系数。从表中可见,数值计算结果与试验结果得到的流阻系数的相对误差均在 2%以内,同时考虑数值计算数据和试验数据提取方式不同,说明数值计算结果在一定程度上是可信的,可以使用该方法计算模拟试验件的流阻系数。

6 结论

(1)空管道流阻系数随着管道入口雷诺数的增大而增大,流场不均匀度随着速度系数的增大而增大,

当速度系数低于 0.3 时,流场不均匀度在 1% 以下,当速度系数增大到 0.3 以上时,流场不均匀度超过 1%;

(2) 加力燃烧室中不同堵塞比(0.0049~0.024)典型杆件的流阻系数不大于 0.09;

(3) 加力燃烧室中的杆件应优先选用单杆、光滑、堵塞比小的,以减小其产生的流阻损失;

(4) 数值计算结果与试验结果得到的流阻系数相对误差在 2% 以内,表明数值模拟方法可以较为真实地模拟流体流经试验件时产生的阻力。

参考文献:

- [1] 廉筱纯, 吴虎. 航空发动机原理[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2005: 134-139.
LIAN Xiaochun, WU Hu. Aeroengine principle [M]. Xi 'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2005: 134-139. (in Chinese)
- [2] 陈翔. 凹腔与支板稳定组合加力燃烧室冷态流场特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
CHEN Xiang. An investigation on cold flow characteristic of afterburner with cavity/strut hybrid flameholders [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013. (in Chinese)
- [3] 王军. 基于水力摩阻经验公式的外涵道流阻计算方法[J]. 航空发动机, 2013, 39(1): 43-46.
WANG Jun. Calculation method of bypass flow resistance based on hydraulic friction formula[J]. Aeroengine, 2013, 39(1): 43-46. (in Chinese)
- [4] 潘锦珊. 气体动力学基础[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1995: 111-134.
PAN Jinshan. Fundamentals of aerodynamics [M]. Xi 'an: Northwestern Polytechnical University Press, 1995: 111-134. (in Chinese)
- [5] Fried E, Idelchik I E. Flow resistance: a design guide for engineers[M]. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1976: 25-27.
- [6] Sudo K. Experimental investigation on turbulent flow in a circular sectioned 90 degree bend[J]. Experiments in Fluids, 1998(25) : 42-49.
- [7] Bassett M D, Pearson R J, Winterbone D E, et al. Steady-flow loss-coefficient estimation for exhaust manifold pulse-converter type junctions [J]. SAE Technical Papers, 1999, 213(1): 283-297.
- [8] 尹则高, 张土乔. 连续突扩管流的数值模拟[J]. 流体机械, 2005, 33(8): 24-27.
YIN Zegao, ZHANG Tuqiao. Numerical simulation of serial sudden expansions pipe flow[J]. Fluid Machinery, 2005, 33(8): 24-27. (in Chinese)
- [9] 王常斌, 陈皖. 低雷诺数下突扩管流的 CFD 数值计算[J]. 管道技术与设备, 2009(4): 13-15.
WANG Changbin, CHEN Wan. CFD numerical calculation of sudden-expansion pipe flow of low Reynolds number[J]. Pipeline Technology and Equipment, 2009(4): 13-15. (in Chinese)
- [10] 周承富, 陈小榆, 刘德生, 等. 三通管二维湍流数值模拟[J]. 石油化工设备, 2008(2): 37-39.
ZHOU Chengfu, CHEN Xiaoyu, LIU Desheng, et al. Numerical simulation of two-dimensional turbulence in three-way pipe[J]. Petrochemical equipment, 2008(2): 37-39. (in Chinese)
- [11] 华绍曾. 实用流体阻力手册 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1985: 15-21.
HUA Shaozeng. Practical fluid resistance manual[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1985: 15-21. (in Chinese)
- [12] 李玲, 李玉梁, 黄继汤. 叉管内水流流动的数值模拟与实验研究[J]. 水利学报, 2001, 32(3): 49-52.
LI Ling, LI Yuliang, HUANG Jitang. Numerical simulation and experimental study on water flow in Y-type tube [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 32(3): 49-52. (in Chinese)
- [13] 杨湘隆, 黄社华, 熊渊. 圆管弯道内部流动数值模拟及湍流模式比较研究[J]. 西安理工大学学报, 2010(1): 116-120.
YANG Xianglong, HUANG Shehua, XIONG Yuan. A comparative study of numerical simulation of turbulent flow in bending duct of circular-section and turbulence models[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2010(1): 116-120. (in Chinese)
- [14] 刘晶. 混合弯管湍流的数值模拟[J]. 鞍山科技大学学报, 2006(4): 395-398.
LIU Jing. Numerical simulation of turbulent flow in mixed elbow[J]. Journal of Anshan University of Science and Technology, 2006(4): 395-398. (in Chinese)
- [15] Macagno E O, Hung T K. Computational and experimental study of a captive annular eddy[J]. Fluid Mech, 1967, 28(1): 43-64.
- [16] 李栋浩, 王文娥, 葛茂生, 等. 突然缩小圆管局部水头损失系数试验研究[J]. 水力与建筑工程学报, 2011(4): 22-24.
LI Donghao, WANG Wen'e, GE Maosheng, et al. Study on local drag parameter of subcontract tube [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2011(4): 22-24. (in Chinese)

(编辑: 刘 亮)