

燃油喷嘴主要性能参数的影响因素及调试技术

Influencing Factor and Debugging Technology of Major Performance Parameter for Fuel Nozzle

中航工业南方航空工业(集团)有限公司 郑学著 黄袖清 陈艳芳 蒋万里

[摘要] 燃油喷嘴是航空发动机燃烧室的一个主要元件,它的主要功用是按照发动机不同的工作状态,供给燃烧室合适数量的、具有良好雾化质量的燃油。喷嘴的供油量是保证发动机推力要求、影响燃烧效率和性能的一个主要指标。根据燃油喷嘴的不同结构,对影响发动机燃烧室性能的流量、喷雾锥角和分布不均匀度等参数进行理论分析,并结合实际调试情况进行验证,解决了燃油喷嘴性能试验时流量、喷雾锥角和分布不均匀度调试困难的技术瓶颈,具有较大的指导意义和广阔的应用前景。

关键词: 燃油喷嘴 流量 喷雾锥角 分布不均匀度

[ABSTRACT] Fuel nozzle is a major component of engine combustion chamber, the main function of which is to supply fuel with suitable quantity and good atomization quality according with different working conditions. The fuel supply is the key parameter which could ensure the requirement of engine thrust and affect the efficiency of combustion chamber and the performance of engine. In this paper, the theoretical analysis is carried out for the parameters of flow, nozzle taper and uneven distribution which can affect the performance debugging of engine combustion chamber, based on the different structures of

fuel nozzle, and the analysis is verified in accord with testing results. The technological bottlenecks of debugging difficulty of flow, nozzle taper and uneven distribution are solved in fuel nozzle performance testing. The study results have significant guidance function and wide application prospects.

Keywords: Fuel nozzle Flow Spray Angle Uneven Distribution

燃油喷嘴有单油路和双油路、直流式和离心式、机械组合式和焊接式等多种结构,本文重点介绍单油路离心式喷嘴。以3种发动机喷嘴为例(如图1所示),工作时,来自总管的燃油经支管进入壳体,经油滤(滤网)过滤后进入喷嘴壳体的通道,然后经涡流器(涡流片)、喷口组成的雾化组件,最后由喷口喷出。喷口和涡流器(涡流片)是燃油喷嘴的核心零件。

1 燃油喷嘴主要性能参数的影响因素

燃油喷嘴包括流量、喷雾锥角和分布不均匀度3个主要性能参数。

1.1 燃油喷嘴流量的影响因素

1.1.1 几何特性对流量的影响

基本假设:

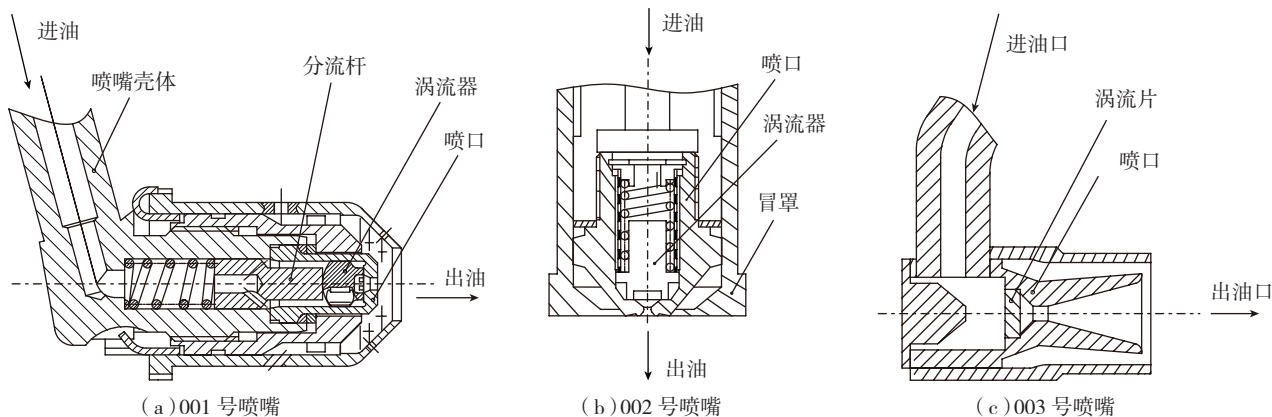


图1 发动机喷嘴实例

Fig.1 Examples of engine nozzle

- (1) 燃油为理想流体;
- (2) 不考虑摩擦;
- (3) 零件质量符合设计图纸要求。

由伯努力方程、动量矩守恒定律、连续方程以及做旋转运动的燃油质点上径向力的平衡关系,可得通过喷口的燃油容积流量为:

$$Q = \mu A_2 \sqrt{2g\Delta P/\rho} \quad (1)$$

式中, Q 为燃油容积流量; μ 为流量系数; A_2 为喷口中心孔面积 (πr_c^2); ρ 为燃油密度; g 为重力加速度; ΔP 为燃油压差。且有:

$$\frac{1}{\mu^2} = \frac{1}{K^2 X} + \frac{1}{(1-X)^2} \quad (2)$$

式中, K 为离心式喷嘴流量的几何特性系数,且 $K = A_s/\sqrt{A_1 A_2}$ (A_s 为进油通道总面积, A_1 为涡流室面积 πR^2); X 为中心孔中空气涡面积与中心孔面积之比,且 $X = a_2/A_2$ (a_2 为空气涡面积)。

因此,从理论上讲,流量系数 μ 仅为喷嘴流量几何特性系数 K 的函数,如图 2 所示。

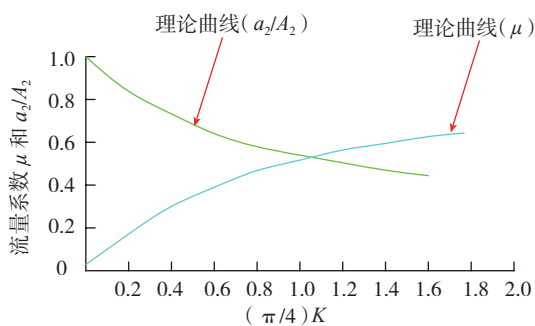


图2 流量系数及空气涡尺寸随流量几何特性系数的变化
Fig.2 Variation of flow coefficient and size of air eddy with flow geometric property coefficient

结合公式(1)、(2)可以看出:

(1) 进口通道面积 A_s 增加,喷嘴流量几何特性系数 K 增加(呈线性关系),从而使流量系数 μ 增加,流量增加;

(2) 涡流室面积 A_1 增加,喷嘴流量几何特性系数 K 减小(呈方根关系),从而使流量系数 μ 减小,流量减小;

(3) 喷口出口中心孔面积 A_2 增加,喷嘴流量几何特性系数 K 减小(呈方根关系),流量系数 μ 减小;但由公式(1)可知,流量与中心孔面积呈线性关系增加,因此最终流量仍将增加,不过不是呈线性关系。

1.1.2 喷口、涡流器加工形位误差对流量的影响

燃油经涡流器的 4 个切向槽进入圆形壁面内,如果涡流器与喷口配合的外圆与喷口配合的端面不垂直,那么涡流器与喷口就不能很好地贴合,此时燃油除从 4 个切向槽进入外,同时也从结合面进入,使进口通道面积

增大,流量值变大。

燃油在圆形壁面作用下产生旋转运动,然后从喷口中心孔喷出。如果喷口中心孔为椭圆,则 A_2 变大,流量值变大。

1.1.3 零件表面质量对流量的影响

当涡流器与喷口结合处表面有拉沟、划伤或有缺口时,燃油除从 4 个切向槽进入涡流室,同时也从拉沟、划伤或缺口处渗入,使进口通道面积增大,流量变大。

涡流器切向槽(孔)的表面质量对流量的影响也很大。受现有加工条件的约束,切向槽(孔)只能采用电火花加工,而电火花加工的表面不光滑,流量损失较大,流量值小。

1.4 喷嘴内局部状态对流量的影响

如图 3 所示,喷口 B 处的状态直接影响了燃油在喷嘴内流动时产生的局部损失的大小。由流体力学知识可知:当 B 处为锐边时,局部损失系数较大,因而流量较小;而 B 处呈光滑圆角时,局部损失系数较小,近似为零,流量增大。

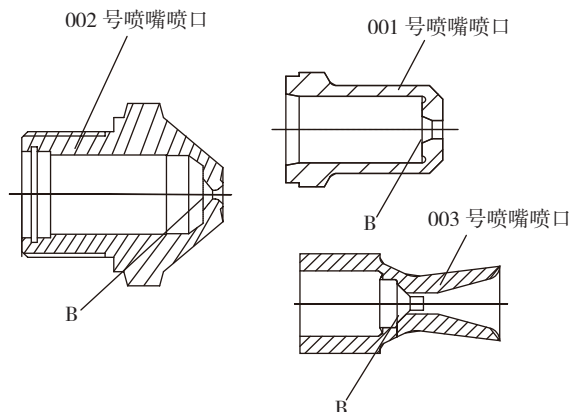


图3 喷口局部状态对流量的影响
Fig.3 Influence of nozzle local condition on flow

1.2 燃油喷嘴喷雾锥角的影响因素

基本假设:

- (1) 燃油为理想流体;
- (2) 不考虑摩擦;
- (3) 零件质量符合设计图纸要求。

由伯努力方程、动量矩守恒定律、连续方程以及做旋转运动的燃油质点上径向力的平衡关系,可得喷口喷雾锥角:

$$\sin \alpha = G \times \frac{2u}{(1-\sqrt{X})} \quad (3)$$

式中, α 为喷雾锥角, u 为流量系数, G 为离心喷嘴喷雾锥角几何特性系数, $G = \sqrt{A_1 A_2} \times \cos \beta / A_s$, β 为切向槽(孔)进入旋流室的夹角。

喷雾锥角几何特性系数 G 与喷雾锥角的关系如表

表1 喷雾锥角几何特性系数 G 与喷雾锥角 α 的关系

G	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0
α	44°20'	62°02'	72°54'	80°35'	90°46'	97°37'	102°58'	107°06'	110°18'
G	8.0	9.0	10.0	12.0	15.0	20.0	25.0	30.0	
α	113°06'	115°34'	117°38'	121°02'	124°56'	129°52'	133°30'	135°40'	

1所示。

1.3 燃油喷嘴分布不均匀度的影响因素

(1) 喷口、涡流器(涡流片)的加工误差。

喷口中心孔存在棱度或椭圆度,则喷雾锥产生畸变。单个涡流器(涡流片)槽(孔)的尺寸不均匀,使各槽(孔)的进油量不一致,造成分布不均匀度不合格。

(2) 喷口中心与涡流器(涡流片)的中心同轴度。

如果喷口中心与涡流器(涡流片)中心不同轴,使燃油在涡流室中汇合不均匀,从而破坏正常的喷雾情况。

(3) 喷口中心与涡流器(涡流片)的表面粗糙度。

喷口内锥面和中心孔、涡流器(涡流片)切向槽(孔)等流道表面质量不好,有拉沟、划伤等缺陷,会导致某些燃油质点在缺陷处受阻,不能良好雾化,使喷雾中产生射流。同理,喷口出口边缘倒角不均匀或具有缺陷或毛刺,也会使得喷雾局部密集,使分布不均匀度不合格。

2 燃油喷嘴性能调试

2.1 流量的调试

2.1.1 流量偏大时的调试

当燃油喷嘴流量超出设计规定的范围时,通过修研涡流器端面,使切向槽的深度 H 减小,则切向进口通道面积 A_s 随之也减小,则流量系数 μ 减小,因此喷嘴的流量 Q 降低。表2是001号喷嘴进行调试时得到的一组数据。

表2 流量为1340mL/min的001号喷嘴修研涡流器端面后数据

喷嘴序号	修研量/mm	修研后流量减少量/(mL·min ⁻¹)
1	0.01	30
2	0.02	58
3	0.03	89

002号喷嘴流量偏大时的修理方法与001号喷嘴相同,修研涡流器端面0.02mm,流量可减少约15mL/min;而003号喷嘴由于涡流片是孔不是槽,故流量偏大时只能更换孔径较小的涡流片,当更换孔径小0.02mm的涡流片时,流量可减少约23mL/min。

2.1.2 流量偏小时的调试

从理论上讲,当燃油喷嘴流量未达到设计要求时,

增大涡流器切向槽深度 H 和宽度 B ,或者增大喷口中心孔直径,均可使喷嘴流量增大。但在实际工作中,涡流器切向槽是采用电火花加工,不具备修研条件,

所以一般采用砂轮片将切向槽砂光,这样流量值可提高(50~100)mL/min。涡流片虽是圆孔,但是仅厚0.9mm,且为45°斜孔,手工研磨孔径时容易破坏尺寸和角度,所以通常采用更换孔径较大的涡流片以增大流量。

另一种增大流量的方法是修研喷口中心孔。喷口中心孔的位置公差要求很高,修研时必须选用合适的研磨棒(稍带紧度)研磨。表3是修研001号喷口中心孔时得到的一组数据。修研002号喷口中心孔0.02mm后,流量可增大约25mL/min;修研003号喷口中心孔0.02mm后,流量可增大约12mL/min。

表3 流量为1210mL/min的001号喷嘴修研喷口中心孔后数据

喷嘴序号	修研量/mm	修研后流量增量/(mL·min ⁻¹)
1	0.01	15
2	0.02	22
3	0.03	30

第三种增大流量值的方法是将喷口转接处用细金相砂纸抛修成光滑圆角。当对流量为1210mL/min的001号喷嘴修研喷口B处后,流量可达到1270mL/min;对002号喷嘴修研喷口B处后,流量可增大20~30mL/min;对003号喷嘴修研喷口B处后,流量可增大30~50mL/min。

2.1.3 流量值出现异常时的调试

若每分钟比合格流量大几百毫升,则需将喷嘴分解,目视检查涡流器与喷口结合表面的质量,表面如果有拉沟、划伤或缺口等,则必须研磨涡流器或喷口的结合面;如果没有,则可能是涡流器未装到底引起,重新装到底即可;如果确信已装到底,则可能是涡流器端面与大外圆不垂直造成,则必须更换涡流器。

2.2 喷雾锥角的调试

2.2.1 喷雾锥角偏小时

在流量允许的情况下,换上切向槽(孔)较小的涡流器(涡流片),通常更换槽宽或槽深小于0.02mm的涡流器或孔径小于0.02mm的涡流片,角度增大约1°;或用稍带紧度的研磨棒研磨喷口中心孔,使喷口中心孔孔

(下转第160页)

能包括磨料压力远程控制,磨料缸活塞位置实时监控,自动和手动模式,一个位移计数器,一个循环计数器和一个循环计时器。机床加工参数可通过终端操作界面进行预设,也可于自动模式启动后通过终端进行控制。液压系统的主要构成部件有:一个液压单元,两个磨料液压缸,两个夹紧缸和一个气/油泵。

3.2 加工介质

加工介质是由易趋宏公司提供的拥有专利技术的磨料。磨料由载体和磨砂组成:载体有软硬之分,软的类似液体,硬的类似固体。

磨砂按材料来分有:氧化铝、碳化硅、金刚砂和立方氮化硼;按粒度来分有粗细之分,从8目($5\mu\text{m}$)到1000目($4000\mu\text{m}$)。在加工时它就像三维流动的“砂纸”,不同的磨料会产生不同的加工效果。

3.3 加工工艺

共轨管零件主要加工目的为内腔去毛刺、倒圆角和抛光,所以应采用较低粘度的磨粒流介质和较低的系统压力。根据以上分析选择磨料为软、细类的加工磨料。确定挤压行程为400mm,每个支路挤压3次,然后调换加工支路。

4 结论

从磨粒流加工共轨管小孔流道的数值模拟结果可以看出,利用磨粒流加工技术对小孔零件进行精抛加工是一种有效的加工方法。

通过对不同磨粒流加工工艺分析可知,采用磨粒流单独加工共轨管单一支路,逐个加工的工艺方法较好,有利于加工的一致性。

从数值模拟结果可知,共轨管小孔流道内的压强差越大,磨粒流流速、湍流强度及湍流动能越大,磨粒的切削能力越强,加工精度也将越好。由于磨粒流的挤压研磨作用,在交叉孔处较大的湍流动能和速度会产生较大的圆角,能有效降低高脉冲产生的疲劳应力,改善疲劳强度。用磨粒流加工方法能获得理想的表面质量,可增强零件可靠性,延长使用寿命。

参考文献

- [1] Li J Y, Liu W N, Yang L F, et al. The development of nozzle micro-hole abrasive flow machining equipment. Applied Mechanics and Materials, 2011 (44-47): 251-255.
- [2] 李俊焯. 微小孔磨粒流抛光装置的研制与工艺研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2011.
- [3] 付曙光, 卢云丹, 程翔. 基于Fluent的除鳞喷嘴内部流场数值模拟. 制造业自动化, 2010, 32(2): 89-92.
- [4] 冯国增, 马哲树. 柴油机气缸套三维温度场数值计算与分析. 机械设计与制造, 2008(9): 1-3.

(责编 小城)

(上接第157页)

径增大0.02mm,角度增大约 0.5° 。

2.2.2 喷雾锥角偏大时

在流量允许的情况下,可以用砂轮片修磨涡流器的切向槽或更换孔径较大的涡流片,或换上半径较小的喷口或涡流片。

2.3 分布不均匀度的调试

2.3.1 液面呈较圆滑的弧峰形或较规则的斜峰形

斜峰形液面主要是由喷口中心孔椭圆、喷口出口边缘倒角不均匀、涡流器(涡流片)槽(孔)的尺寸不均匀、喷口中心与涡流器(涡流片)中心不同轴等原因造成的。调整时,如果流量值偏小,可先用稍带紧度的研磨棒研磨喷口;研磨后仍无法满足要求时可逐次变动涡流器(涡流片)与喷口的相对位置;如果经3次变动后仍无显著效果,则应检查涡流器(涡流片)的切向槽(孔)尺寸,并用砂轮片修磨最小的槽或更换涡流片。

2.3.2 液面呈无规则的排列

无规则排列液面主要是由喷口中心孔存在棱度,喷口内锥面和中心孔、涡流器(涡流片)切向槽(孔)等流油表面质量不好,有拉沟,划伤等缺陷造成的,但有时也与零件的相对位置有关。调整的方法是抛光喷口的内锥面和中心孔、涡流器的切向槽,根据现场经验,有时将喷口和涡流器(涡流片)互转一下位置($\leq 90^\circ$)也能得到良好效果。

2.3.3 液面呈“烛峰”或“烛谷”形

峰谷形液面主要是由喷口出口边缘具有缺陷或毛刺,使喷雾锥体上有一条过浓或过稀的燃油柱(射线)造成的。调整的方法是抛光喷口的中心孔或分解喷嘴冲洗。

3 燃油喷嘴综合调试

通过上述分析,涡流器切向槽的宽度 B 、深度 H ,涡流片的切向孔孔径 r ,喷口的涡流室半径 R 、中心孔半径 r_c ,涡流器和喷口的形状(圆度)位置(同轴度、垂直度等)误差、表面粗糙度等都直接影响喷嘴的性能调试。但是由于喷口和涡流器的某一个尺寸常控制多个性能参数,在调试过程中需熟练掌握各个性能参数随有关几何尺寸的变化规律。

经理论分析与试验验证,各性能参数的最佳调试顺序为:喷雾锥角 \rightarrow 流量 \rightarrow 分布不均匀度。但调试锥角时应尽量兼顾流量和锥角,调试流量时不要破坏锥角,且尽可能改善喷雾锥角的分布不均匀度;而调试分布不均匀度时,不要影响已经基本调试合格的锥角和流量。调试时,合理运用该调试技术将获得事半功倍的效果。

(责编 叶枫)