

小流量旋流喷嘴喷雾性能影响因素的试验研究

邹小珂¹, 吕田², 顾根香², 高深¹, 张武高¹

(1. 上海交通大学动力机械与工程教育部重点实验室, 上海 200240;

2. 上海齐耀动力技术有限公司, 上海 201203)

摘要: 在超高压燃油喷雾试验台上测试分析了不同环境背压及喷射流量对适用于斯特林发动机的小流量压力旋流喷嘴燃料喷射性能的影响。结果表明: 喷嘴的喷雾形态受燃烧室背压的影响最明显, 背压升高, 喷雾锥角减小; 喷射流量的影响受背压的限制, 中高背压下, 流量增大到一定程度后锥角开始变小, 流量继续增大, 雾化效果变差。喷嘴设计流量的影响为: 增大设计流量, 相同工况下的喷雾锥角有增大的趋势, 但有效雾化的最小临界流量值变大; 设计锥角的影响和设计流量类似: 较大喷射流量工况下, 大设计锥角喷嘴对高背压的适应性较好。研究认为: 小流量工况只能采用小设计流量的喷嘴, 且对高背压的适应性较差; 在大流量工况下, 设计流量和设计锥角均较大的喷嘴对高背压工况具有更好的适应性。

关键词: 旋流喷嘴; 喷雾锥角; 背压; 流量

中图分类号: TK433.8⁺4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2019)06-0022-06

Experimental Study on the Influencing Factors of Spray Performance of Small Flow Centrifugal Swirl Nozzle

Zou Xiaoke¹, Lyu Tian², Gu Genxiang², Gao Shen¹, Zhang Wugao¹

(1. Key Laboratory for Power Machinery and Engineering of the Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240; 2. Shanghai Micropowers Ltd., Shanghai 201203)

Abstract: The effect of ambient pressure and spray flow on fuel injection performance of small flow centrifugal swirl nozzle was investigated on an ultra-high pressure fuel spray test bench. The results show that the shape of spray is mostly affected by ambient pressure, the increase of ambient pressure leads to the decrease of spray cone angle; the effect of spray flow is restricted by ambient pressure, when under medium or high ambient pressure, increase of spray flow leads to a drop in spray angle, as the spray flow keep increasing, the atomization effect would get worse. The effect of nominal spray flow is: larger nominal spray flow may lead to the increase of cone angle under the same working condition, while its critical spray flow also grows larger; the effect of nominal cone angle is similar with that of nominal spray flow, and a larger nominal cone angle leads to a better adaptation to high ambient pressure with large spray flow. The research shows that with small spray flow, nozzles with small nominal spray flow are recommended; at large spray flow working conditions, nozzles with large nominal spray flow and cone angle are recommended, with a better adaptation to high ambient pressure.

Key words: swirl nozzle; fuel spray cone angle; ambient pressure; flow

收稿日期: 2019-01-11; 修回日期: 2019-06-04

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFB0103501), 基础加强计划 (2017JCJCZD)。

作者简介: 邹小珂(1995-), 女, 研究生, 主要研究方向为内燃机燃烧与排放控制, zouxiaoke@sjtu.edu.cn。

0 引言

压力旋流喷嘴在高背压下的燃料喷射与雾化性能是影响特殊用途斯特林发动机高效清洁稳定运行的关键因素。改善压力旋流喷嘴在高背压下的燃油破碎与雾化性能，有利于促进燃油和空气的混合，实现更高效稳定的燃烧^[1-3]。

已有的研究表明：燃烧室背压、喷嘴流量及其内部结构对喷雾特性影响明显。针对大型燃气轮机用压力涡流喷嘴的燃料喷射与雾化，De Corso 和 Kemeny 对燃烧室背压以及喷嘴压降对喷雾锥角与燃油空间分布的关系进行了系统的试验研究，提出了喷雾锥角与 $\Delta P\rho^{1.6}$ 之间的相关性，并对喷雾形成的机理进行了初步解释^[4]。Ortman 进一步通过试验方法研究了旋流喷嘴在低背压下形成的喷雾形态及燃油的空间分布^[5]。Kim 通过试验研究了燃烧室空气密度对喷雾特征的影响^[6]。采用新型燃料时旋流喷嘴的表现也引起了部分学者的兴趣，并对此进行了试验研究^[7-8]。国内的相关研究相对更多地集中在数值模拟计算方面，例如通过仿真建模分析喷嘴内液相燃料的流场^[9-10]，分析喷嘴设计参数及工况对外部流场的影响^[11-13]，对燃料的破碎过程和机理进行动态计算与讨论^[14-15]等；以水作工质、对压力旋流喷嘴在常压及低压下的喷雾特性的实验研究也有了一定的积累^[16-18]。目前，对于用于斯特林发动机的小流量压力旋流喷嘴的燃料喷射与雾化性能的试验研究还不够充分，特别是小流量工况及高背压条件下的相关研究还须进一步加深。

本研究在超高压燃油喷雾试验台上，重点测试分析了用于斯特林发动机的一组不同设计流量与设计喷雾锥角的旋流喷嘴，在不同环境背压及喷射流量工况下的喷雾形态及喷雾锥角。试验背压从常压到最高 6.5 MPa。总结分析了喷雾形态与喷雾分散性能随喷嘴流量与燃烧室背压变化的规律，为斯特林发动机高背压下稳定工作提供依据。

1 试验设备与方案

图 1 所示为试验采用的超高压燃油喷雾试验台，由喷雾压力容器、试验台支架、供油系统、供气系统、监控系统及恒温油箱组成。

试验中须控制的两个关键变量分别为喷雾的环境背压和燃油流量。其中，背压通过向压力容器内充入高压氮气获得，充气过程的开始与停止由电磁阀控制，压力容器内的压力通过压力传感器监测；燃油流量由电控油泵转速控制，通过质量流量计监

测。喷雾形态由电感耦合（Charge Coupled Device，CCD）高速相机记录。试验中主要设备的型号如表 1 所示。

表 1 试验设备与型号

CCD 相机	Photron FASTCAM-APX 120KC
燃油质量流量计	CMFS010P
压力传感器	DST-10-250

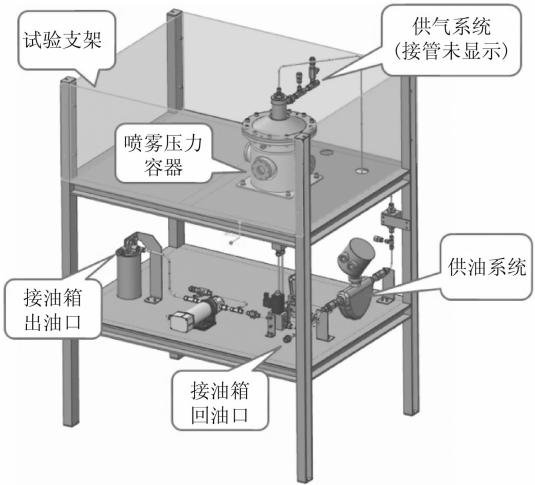


图 1 超高压燃油喷雾试验台结构示意图

试验中采用的燃油为无硫柴油，其理化特性如表 2 所示。采用的喷嘴为用于斯特林发动机的小流量压力旋流喷嘴，其设计参数如表 3 所示。试验在冷态条件下进行，主要测试了小流量喷嘴 A 的燃料喷射与雾化性能，同时也测量了其它几种喷嘴的燃料雾化性能作为对比。试验采用的燃烧室背压分别为 0、0.2、0.6、1.0、1.4、1.8、2.2、2.5、4.0 和 6.5 MPa，喷嘴流量分别为 2、2.5、3、4 和 5 ($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$)。

表 2 试验用无硫柴油理化特性

分子式	$\text{C}_{10} \sim \text{C}_{21}$
沸点/ $^{\circ}\text{C}$	180 ~ 360
十六烷值	54
运动黏度 (25 $^{\circ}\text{C}$) / ($\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	5.64
密度/ $\times 10^3$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	0.84

表 3 喷嘴设计参数

编号	A	B	C	D	E	F
设计流量/ ($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$)	1.71	1.87	2.02	2.18	2.18	2.18
设计锥角/ $^{\circ}$	90	90	90	70	80	90

2 试验结果与分析

借助 CCD 相机采集旋流喷嘴在不同流量、不同燃烧室背压下的喷雾图片，经图像处理后台计算得

到相应试验条件下的喷雾锥角。本研究中, 喷雾锥角 α 定义为: 喷嘴出口至下游距离和喷嘴直径相等处, 喷嘴中心轴两侧的喷雾边缘形成的夹角, 如图 2 所示。

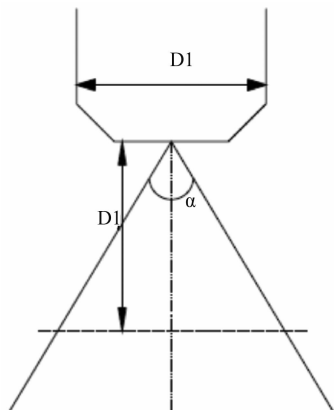


图 2 喷雾锥角测量示意图

2.1 不同工况下的喷雾形态

典型小流量喷嘴 A 在不同喷射流量与燃烧室背压下形成的部分喷雾图如表 4 所示。

表 4 喷嘴 A 在各背压与流量下形成的部分喷雾形态图

流量/ ($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$)	2.5	4	5
0 MPa			
1.0 MPa			
4.0 MPa			
6.5 MPa			

由表 4 可见: 燃烧室背压是影响喷雾分散的最关键因素。燃烧室背压较低时, 喷雾能较好地保持其空心锥的形态; 随着燃烧室背压逐渐升高, 雾束收窄, 从空心锥形逐渐变成钟形, 这种变化在燃烧室背压超过 1.0 MPa 后变得明显。原因在于: 随着

背压升高, 环境气体密度增大, 液雾受环境气体的碰撞与挤压增强^[3], 燃油自身携带动能引起的环境气体卷吸作用变弱, 动量传递变弱, 宏观上表现为雾束逐渐收紧, 在压力达到 6.5 MPa 后, 燃料喷射在各种流量下都不再能有效破碎分散, 更不能均布在整个燃烧室空间, 基本呈带状液流流入燃烧室内。

从表 4 还可以看出: 喷雾形态也受喷射流量的影响。低背压下, 燃油雾化在各种喷射流量下的分散性都比较好; 但背压超过 1.0 MPa 后, 随着流量的增大, 喷雾分散现象有收缩的趋势, 雾束整体变窄, 液雾或液滴空间分布更为集中在中部, 空间均匀性下降。原因在于: 压力涡流喷嘴的喷雾是压力控制的, 流量增大时对应的速度大, 动量大, 动能也大, 低背压环境下卷吸和破碎能力增强; 但随着背压升高, 环境流体密度快速增大, 液滴带入的动量不足以分散到较大区域, 表现为液束形态。

2.2 燃烧室背压对喷雾锥角的影响

典型小流量喷嘴 A 在不同流量、不同背压下形成的喷雾锥角的测量值如图 3 所示。

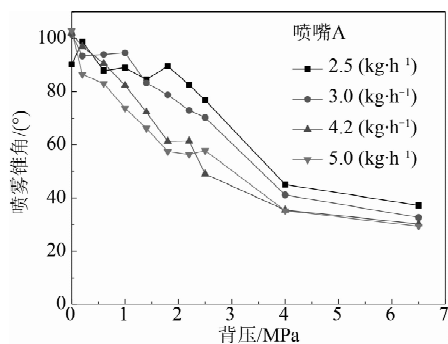


图 3 喷嘴 A 不同流量下喷雾锥角随背压的变化

观察图 3 可以发现: 在背压较低时, 喷雾锥角随背压的升高而迅速降低: 在喷射流量保持为 3.0 ($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$) 不变, 燃烧室背压从 0 MPa 升高至 4 MPa 的过程中, 喷雾锥角从 102° 下降至 41°; 但当背压超过 4.0 MPa 后, 喷雾锥角变化随背压的升高减缓: 在保持喷射流量同样为 3.0 ($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$), 燃烧室背压从 4.0 MPa 进一步上升至 6.5 MPa 后, 喷雾锥角则从 41° 减小到 33°。原因是燃烧室背压升高会使燃料与空气间的气动阻力增大, 导致燃料破碎受阻; 气流还会将喷雾锥外侧的小液滴在碰撞作用下卷入喷雾锥的中间, 使喷雾进一步变窄。

图 3 中的喷嘴所形成的喷雾锥角在燃烧室背压上升至一定数值 (本试验中此阈值为 4.0 MPa) 后便趋于稳定, 受燃烧室背压变化影响变小。这一现象在之前的文献中也被提到^[6]。本研究中, 背压超过 4.0 MPa 后, 实际喷雾锥角已经严重偏离设计

角，将引起燃油在燃烧室内分布不均匀，导致燃烧温度不均匀，温度峰值急剧上升，对发动机可靠性和有效热效率造成严重的负面影响。

2.3 喷射流量对喷雾锥角的影响

典型设计喷雾锥角为 90° 的小流量喷嘴 A 在不同背压、不同流量工况下的喷雾锥角如图 4 所示。

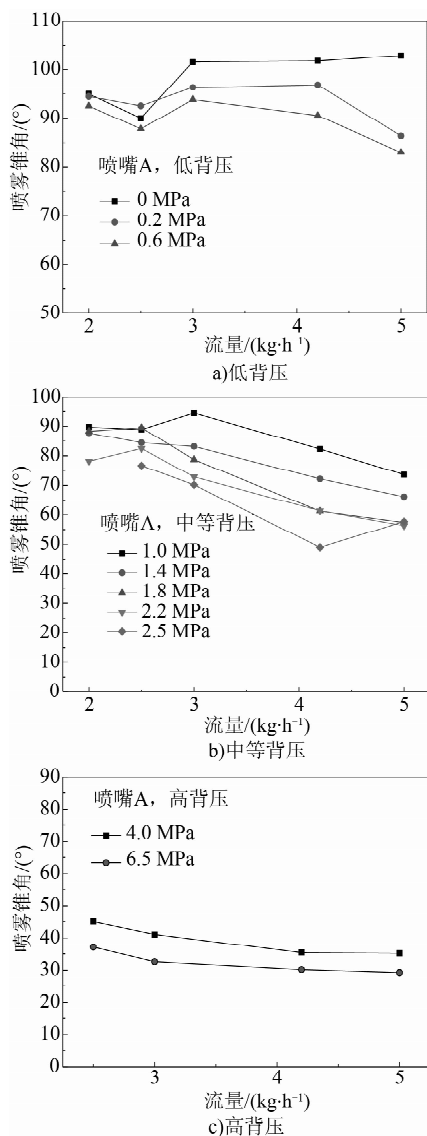


图 4 不同背压下喷嘴 A 喷雾锥角随流量的变化

从图 4a) 可以明显看到：喷嘴 A 在常压（如 0 MPa）、流量较小（小于 $3 \text{ (kg} \cdot \text{h}^{-1})$ ），即设计流量的 1.75 倍）时，喷雾锥角开始随流量的增大而下降；而当喷射流量超过一定值（如 $3 \text{ (kg} \cdot \text{h}^{-1})$ ）后，喷雾锥角趋于稳定，喷射流量与喷雾锥角基本不再相关，且喷雾锥角都能在设计锥角 90° 上下波动。

从图 4b) 可见：中等背压条件下，喷射流量对喷雾锥角的影响表现为：随着流量的增大，喷雾锥角逐渐减小。背压达到 2.5 MPa 后，流量低于

$2.5 \text{ (kg} \cdot \text{h}^{-1})$ 时燃料喷射不能形成雾锥，因此图中没有流量低于 $2.5 \text{ (kg} \cdot \text{h}^{-1})$ 时的喷雾锥角数据。

从图 4c) 可见：高背压下，喷雾锥角远小于设计锥角，喷雾被局限在狭小的空间，喷雾在空间分布的均匀性急剧恶化，但锥角随流量的增大变化不再显著。同样，背压不低于 4.0 MPa 后，流量低于 $2.5 \text{ (kg} \cdot \text{h}^{-1})$ 时，燃料喷射不能形成有效的喷雾。

2.4 喷嘴设计参数对喷雾锥角的影响

本试验测量了设计流量与设计锥角各不相同的六个喷嘴，在不同燃烧室背压与喷射流量下形成的喷雾锥角。

2.4.1 喷嘴设计流量对喷雾锥角的影响

图 5 给出了相同设计锥角，不同设计流量的喷嘴 A、B、C 在不同背压区间，喷雾锥角随喷射流量的变化。

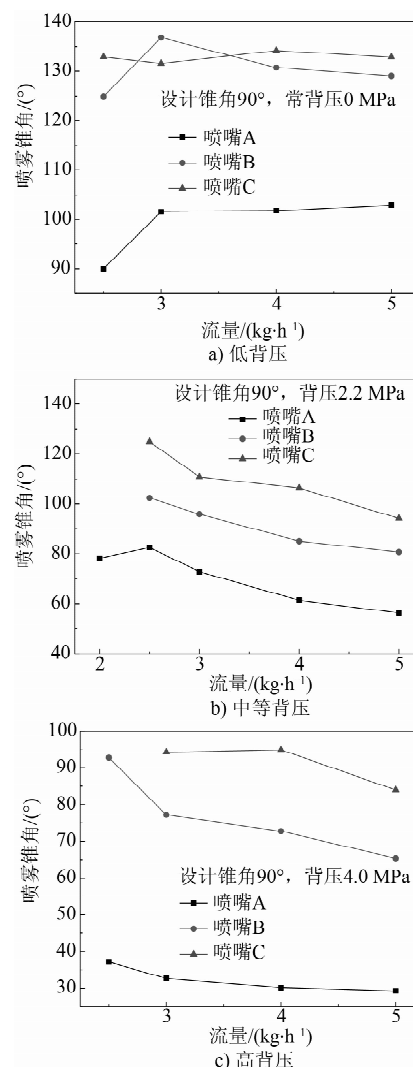


图 5 不同设计流量喷嘴喷雾锥角随喷射流量的变化

研究发现：设计流量较大的喷嘴，在各背压下能有效形成雾锥的最小喷射流量——临界小流量都相对较高，且该临界流量随着背压的升高逐渐增大。也就是说，各背压下，只有喷射流量达到一定程度后，设计流量大的喷嘴才能有效形成喷雾。

由图 5 可见：设计流量更大的喷嘴 B 和 C，在能有效形成雾锥的条件下，相同喷射流量工况，各背压下的喷雾锥角都远大于小流量喷嘴 A。其次，各喷嘴的喷雾性能受背压和喷射流量的影响规律和小流量喷嘴类似，如图 5a) 所示，低背压 (0 MPa) 时喷雾分散性能好，喷雾锥角大，且大设计流量喷嘴的实际喷雾锥角远大于理论设计锥角；如图 5b)、5c)，随着背压的增大，各喷嘴的喷雾分散性变差，且随着喷射流量的增大，喷雾锥角进一步减小。

可见设计流量强烈影响高背压下的喷雾性能，在较高喷射流量工况下，采用设计流量偏大的喷嘴能有效抵消高背压引起的喷雾收缩现象。可以认为：喷射流量低的工况下，须采用低设计流量的喷嘴，但其对高背压工况的适应性较差；适当提高喷嘴的设计流量，在高背压环境下能获得较好的喷雾分散性能。

2.4.2 喷嘴设计锥角对喷雾性能的影响

图 6 给出了设计流量同为 $2.18 \text{ (kg} \cdot \text{h}^{-1})$ ，设计喷雾锥角分别为 70° 、 80° 、 90° 的喷嘴在不同喷射流量和背压下的喷雾锥角。

研究发现：在低背压工况下，大设计锥角喷嘴喷射形成的锥角远大于小设计锥角喷嘴，且与设计流量对喷雾性能的影响类似：大设计锥角喷嘴的临界小流量随设计锥角的增大而相应增大，且在喷射流量较大的工况下，大设计锥角喷嘴对高背压的适应性较好。

如图 6a) 所示：设计锥角为 90° 的 F 喷嘴，低背压下的喷射分散性能远优于设计锥角为 70° 的喷嘴 D 和 80° 的喷嘴 E。从图 6b) 和图 6c) 可以看出：中高背压下，随着喷嘴喷射流量的增大，喷雾分散性能变差，喷雾锥角变大；大设计锥角的喷嘴 F，在较大喷射流量工况下，实际喷雾锥角随背压增大及喷射流量增大减小的幅度远远小于小设计锥角的喷嘴 D、E；但大设计喷雾锥角的喷嘴在小流量工况下较难形成有效的雾锥，背压越高，能形成雾锥的临界小流量值越大。

可见，采用设计锥角较大的喷嘴，其高背压工况下的喷雾分散性能可得到有效改善，但对应的临界小流量升高。

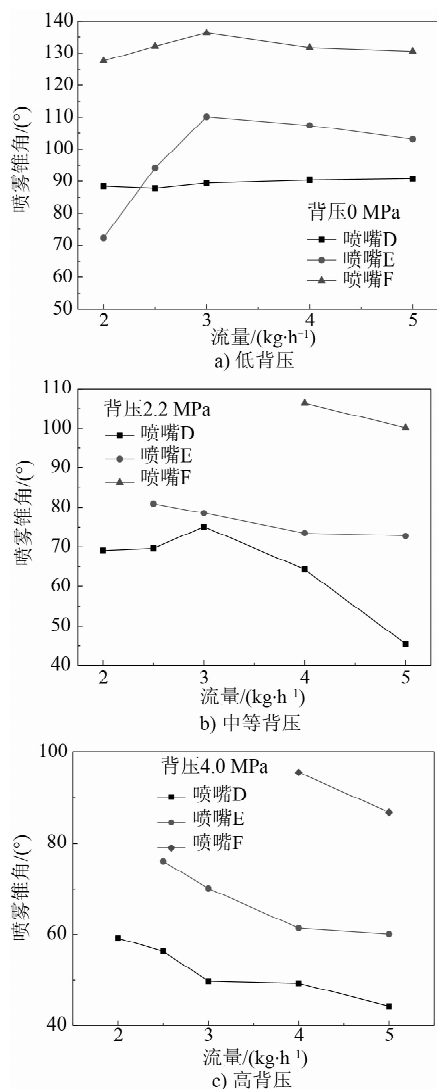


图 6 不同设计锥角喷嘴喷雾锥角随流量的变化

2.4.3 各喷嘴大流量工况下的喷雾性能

图 7 给出了流量为 $5 \text{ (kg} \cdot \text{h}^{-1})$ 时，不同型号的喷嘴形成的喷雾锥角测量值随燃烧室背压变化的关系；同时，对喷嘴 F 在更高背压下形成的喷雾锥角进行了预测（虚线）。考虑实际应用中发动机稳定工作的需求，以实际喷雾锥角不小于 70° 作为判断喷嘴形成的雾锥是否有效的标准，对应的最高背压称为可用临界背压，对大流量下各喷嘴对应的可用临界背压进行测量。表 5 给出了相同设计锥角 (90°) 不同设计流量下的可用临界背压值；表 6 给出了相同设计流量 ($2.18 \text{ (kg} \cdot \text{h}^{-1})$)、不同设计锥角下的可用临界背压值。

表 5 大流量工况 ($5 \text{ (kg} \cdot \text{h}^{-1})$) 下各设计流量喷嘴对应的可用临界背压

编号-设计流量	A-1.71	B-1.87	C-2.02
可用临界背压/MPa	1.0	1.8	6.5

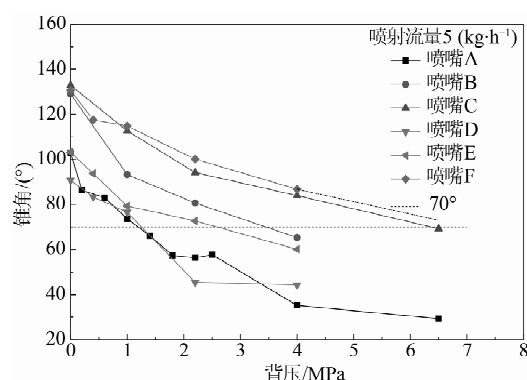


图 7 不同型号喷嘴形成的喷雾锥角随背压的变化

表 6 大流量工况 ($5 \text{ (kg} \cdot \text{h}^{-1})$) 下各设计锥角喷嘴对应的可用临界背压

编号-设计锥角	D-70	E-80	F-90
可用临界背压/MPa	1.2	2.2	>6.5

从表 5 中可发现：设计流量大的喷嘴在大流量工况下的可用临界背压远大于设计流量小的喷嘴，设计流量为 $2.02 \text{ (kg} \cdot \text{h}^{-1})$ 的喷嘴 C，甚至在背压高达 6.5 MPa 的情况下也能保证喷雾锥角不小于 70° 。对比表 5 和表 6 发现：设计锥角对喷嘴在大流量工况下的可用临界背压的影响与设计流量相似：设计锥角大的喷嘴在大流量工况下的可用临界背压远大于设计流量小的喷嘴，其中设计锥角最大的喷嘴 F 在试验测量范围内都能保证较好的雾化效果，大流量下的设计背压比台架最高许用背压 6.5 MPa 更高。

3 结论

(1) 斯特林机采用的小流量压力旋流喷嘴的喷雾形态受燃烧室背压的影响最明显。燃烧室背压较低时，喷雾能保持较好的空心锥形；背压增大后，液雾与气体环境的碰撞与挤压增强，雾锥逐渐收窄为实心钟形，空间分散性大幅下降，在背压增大为 6.5 MPa 时，试验中采用的小设计流量喷嘴基本无法有效形成喷雾破碎，燃料呈带状液流进入燃烧室内。

(2) 燃烧室背压对喷雾锥角的影响规律：在燃烧室背压较小时，喷雾锥角随背压的升高而快速下降。当背压升高至一定程度后，锥角大小趋于稳定，受背压变化的影响较小。

(3) 喷射流量对喷雾锥角的影响在不同背压下体现出不同的趋势：燃烧室背压低时，喷射流量基本不影响喷雾锥角；喷射流量增大至一定程度后，锥角开始下降；流量继续增大，雾化效果变差，喷雾锥角趋于稳定到某一不可用值，受喷射流量变化的影响变小。

(4) 喷嘴设计流量的影响体现为：相同喷射流量工况下，设计流量大的喷嘴形成的喷雾锥角更大。相同背压下，设计流量大的喷嘴能形成有效雾锥的临界小流量变大，背压增大时此临界流量快速升高；高背压下，小设计流量喷嘴形成的雾锥质量差，而大设计流量喷嘴能保持较好的雾锥质量和喷雾锥角。也就是说，喷射流量较高的工况下，大设计流量喷嘴对高背压工况具有更好的适应性。

(5) 设计锥角对喷雾性能的影响与设计流量类似：低背压工况下，大设计锥角喷嘴喷射形成的喷雾锥角远大于小设计锥角喷嘴；大设计锥角的喷嘴能有效形成雾锥的临界小流量随设计锥角的增大相应增大。喷射流量较大的工况下，大设计锥角喷嘴对大背压的适应性较好。

研究认为，在大流量工况下，设计流量较大、设计锥角较大的喷嘴的可用临界背压远大于设计流量和设计锥角均较小的喷嘴所对应的可用临界背压，在高背压、大流量的工况下能较好地保证喷雾效果。

参考文献

- [1] 张武高, 陈晓玲, 刘涛涛, 等. 引射空气对压力旋流喷嘴喷雾特性的影响 [J]. 上海交通大学学报, 2013, 47 (11): 1723-1727.
- [2] 段冬霞. 低旋流喷嘴预混燃烧特性的数值和实验研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
- [3] 张群, 黄希桥. 航空发动机燃烧学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.
- [4] DECORSO S M. Effect of ambient and fuel pressure on nozzle spray angle [J]. Trans. of ASME, 1957, 79 (3): 607-615.
- [5] LEFEBVRE A H, ORTMAN J. Fuel distributions from pressure-swirl atomizers [J]. Journal of Propulsion and Power, 1985, 1 (1): 11-15.
- [6] KIM D, IM J H, KOH H, et al. Effect of ambient gas density on spray characteristics of swirling liquid sheets [J]. Journal of Propulsion and Power, 2007, 23 (3): 603-611.
- [7] SIVAKUMAR D, SAKTHIKUMAR R, RAGHUNANDAN B N, et al. Atomization characteristics of camelina-based alternative aviation fuels discharging from dual-orifice injector [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2015, 137 (8): 081503.
- [8] KANNAIYAN K, ANOOP K, SADR R. Effect of nanoparticles on the fuel properties and spray performance of aviation turbine fuel [J]. Journal of Energy Resources Technology, 2017, 139 (3): 032201.

(下转第 33 页)

扭矩时, 螺栓残余变形量比较稳定 (基本无变化), 平均变形量约为 $0.01 \sim 0.03 \text{ mm}$; 而采用 $80 (\text{N} \cdot \text{m}) + 90^\circ$ 紧固扭矩时, 残余变形量约为 0.14 mm , 且变形量较大。因此, 初步选定 $80 (\text{N} \cdot \text{m}) + 30^\circ$ 为本次试验合装参数。

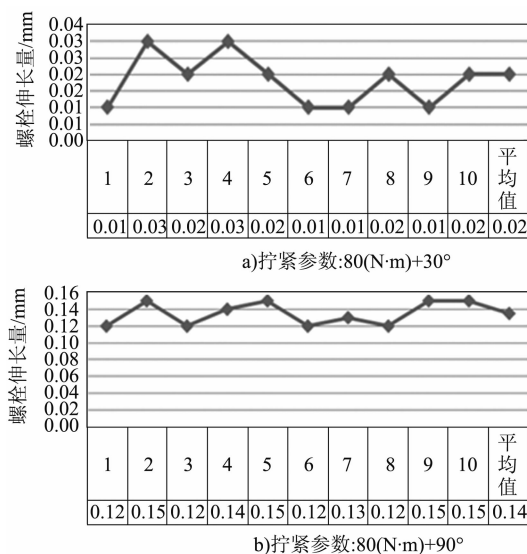


图5 螺栓残余变形量

2.5 连杆加工验证及分析

将连杆粗加工工序中螺栓合装参数 $80 (\text{N} \cdot \text{m}) + 225^\circ$ 调整为 $80 (\text{N} \cdot \text{m}) + 30^\circ$, 其他工序合装参数不变。对 4 件精镗完工后的连杆大头轴承进行测量; 松开连杆螺栓, 再次重复合装连杆大头轴承, 进行测量。连杆轴承孔两次测量 (测量位置见图 6) 数据如表 1 所示。

以上数据表明: 将连杆粗加工工序螺栓合装参数调整为弹性区使用, 半精加工、精加工合装参数不变, 连杆大头轴承二次合装与精镗完工测量数据基本一致, 满足图纸设计要求 ($\Phi 160_{0}^{+0.25}$)。

(上接第 27 页)

- [9] 吴高杨, 郑刚, 聂万胜, 等. 螺旋离心式喷嘴内部流动过程数值仿真研究 [J]. 火箭推进, 2015 (4): 13-18.
- [10] 范华, 杨刚, 李冰. 压力旋流喷嘴内流场特性模拟研究 [J]. 机电工程, 2018, 35 (8): 838-842.
- [11] 周晴晴, 薛新宇, 杨风波, 等. 离心喷嘴雾滴运动轨迹与沉积分布特性 [J]. 江苏大学学报 (自然科学版), 2017, 38 (1): 18-23.
- [12] 邱庆刚, 贾丹丹, 朱晓静, 等. 结构参数对离心喷嘴出口液膜厚度的影响 [J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2015, 36 (3): 271-275.
- [13] 王瑾, 郝惠娣, 曹乔乔. 基于 CFD 的旋流喷嘴内部流

表 1 连杆轴承孔两次测量数据

序列	精镗后测量			二次合装复测		
	A-A	B-B	C-C	A-A	B-B	C-C
1	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01
2	0.01	0.005	0.01	0.02	0.005	0
	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01
3	0	0	0	0.01	0	0
	0	0	0	0	0	0
4	0.01	0	0.05	0	0	0.01
	0.01	0	0.005	0	0	0.01

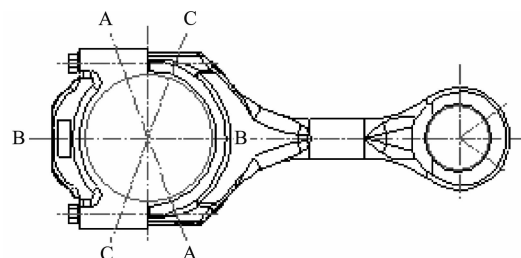


图6 连杆轴承孔测量位置

3 结论

为了提高屈服点控制螺栓在零件加工过程中的使用次数, 通过合理优化部分工序螺栓合装参数, 将螺栓控制在弹性区使用, 不仅能够保证零件加工精度, 同时也提高了螺栓使用次数。采用该工艺生产一台发动机, 螺栓由原先两套减少为一套, 大大提高了螺栓利用率, 降低了生产成本。

参考文献

- [1] 国家标准紧固件机械性能宣贯工作组. 国家标准紧固件机械性能宣贯资料 (三) [R]. 1983.
- 场模拟研究 [J]. 现代化工, 2015 (3): 159-161.
- [14] 陈晨, 杨样, 高宏力, 等. 敞口式离心喷嘴液膜动态填充及打开过程研究 [J]. 推进技术, 2017, 38 (6): 1352-1358.
- [15] 张雨树, 薛雷平. 液滴二次雾化破碎模式数值模拟 [J]. 力学季刊, 2015, 36 (4): 574-585.
- [16] 李承凯, 张德远. 离心旋流式喷嘴雾化特性实验研究 [J]. 装备环境工程, 2016, 13 (6): 47-51.
- [17] 张亮. 背压环境下压力旋流喷嘴雾化特性实验研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2016.
- [18] 聂涛, 高贵军. 压力旋流喷嘴雾化特性的实验研究 [J]. 科学技术与工程, 2016, 16 (7): 162-164.