

# 航空发动机火焰筒浮动瓦片装配技术

伏建锋，刘即元，李壮，袁现虎，丁轲

中国航发动力股份有限公司 陕西西安 710021

**摘要：**基于航空发动机火焰筒浮动瓦片装配中存在的难点，对外环组件瓦片装配过程中影响间隙合格率的因素进行剖析，寻找主要因素并采取有效的解决方法，取得了良好的应用效果。

**关键词：**火焰筒；浮动瓦片；装配技术；间隙质量；航空；发动机



高级工程师 伏建锋

## 1 序言

航空发动机的燃烧室作为重要的热端部件，由于在工作中需要经受急热、高温条件，将雾化后的燃料和增压后的空气进行混合燃烧，温度高达1900℃以上，燃烧后的气体流向涡轮，推动发动机工作，因此燃烧室对零部件的结构、性能要求越来越高。近年来航空发动机燃烧室火焰筒已由三代机的纯气膜冷却发展为四代机的冲击、气膜及层板等多种冷却或多种冷却方式相结合的复合冷却方式，冷却结构也由最初的单层壁发展到双层壁、浮动壁等。其中浮动壁瓦片双层冷却结构是一种先进的冷却技术，将承力和承热件分开，外层为整体环件，承受气动和机械负荷；内层轴向和周向分成单独的瓦片安装在外层承力结构上<sup>[1]</sup>，承受热负荷，可明显改善火焰筒壁面的受热状况，大幅延长使用寿命，主要应用在四代机航空发动机上，设计和制造

水平较三代机有较大的提升。

## 2 零件情况介绍

火焰筒外环组件是航空发动机火焰筒中形成燃烧空间的承力件，主要由火焰筒外环（1件）、瓦片（60件）、垫片和自锁螺母组合而成，瓦片全部安装于火焰筒外环的内型面，形成876个瓦片间隙<sup>[2]</sup>。火焰筒外环组件如图1所示。

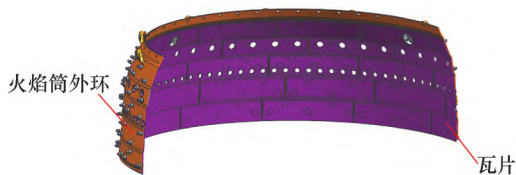


图1 火焰筒外环组件示意

火焰筒外环组件装配时，浮动壁瓦片上的螺柱穿过火焰筒外环上对应的瓦片装配螺栓孔，瓦片紧贴外环壁面再通过螺母固定，即每装配一片瓦片修配一片，测量所有相关所有间隙值且均满足设计图要求后锁紧，不再变动，进而装配第二片，以此类推装配完一层，再装配第二层、第三层……直到装配完成所有瓦片。浮动壁瓦片装配如图2所示。

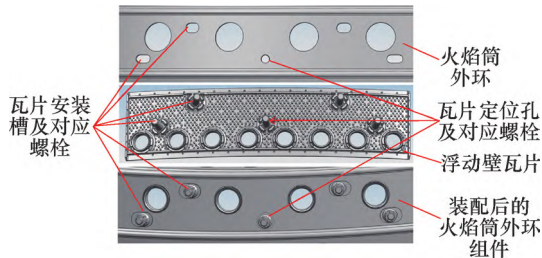


图2 浮动壁瓦片装配示意

瓦片之间、壁面和掺混孔之间形成的间隙对火焰筒气流流动和换热特性起重要作用，直接影响燃烧室的壁温及冷却效果。火焰筒外环组件瓦片装配间隙如图3所示。

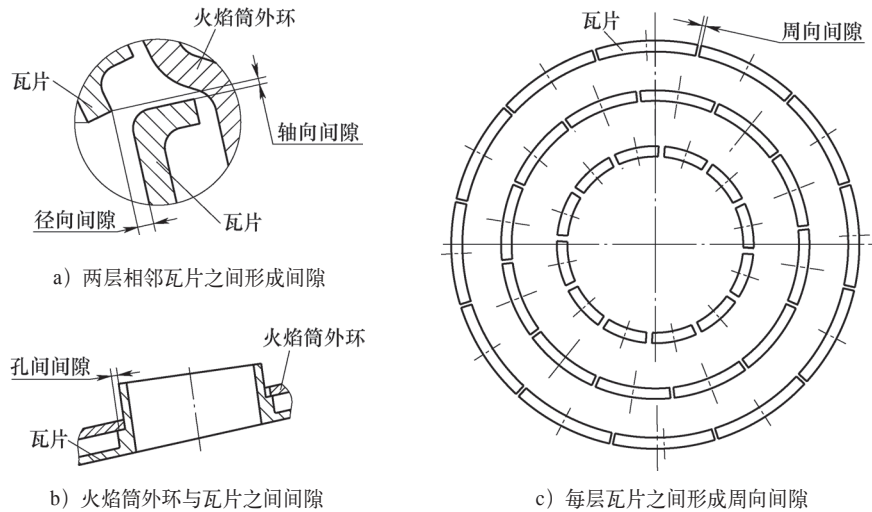


图3 火焰筒外环组件瓦片装配间隙

表1 超差特性统计（平均值）

| 超差项目     | 间隙超差数/处 | 百分比 (%) | 累计百分比 (%) | 尺寸超差率 (%) |
|----------|---------|---------|-----------|-----------|
| 孔间隙576处  | 512     | 83.1    | 83.1      | 88.9      |
| 周向间隙60处  | 60      | 9.7     | 92.8      | 100       |
| 径向间隙60处  | 24      | 4       | 96.8      | 40        |
| 轴向间隙60处  | 20      | 3.2     | 100       | 33.3      |
| 其他间隙120处 | 0       | 0       | 100       | 0         |
| 间隙合计876处 | 616     | —       | 100       | —         |

### 3 工艺难点分析

根据火焰筒外环组件瓦片间隙的统计数据进行分析，孔间隙超差占超差总数的83.1%；周向间隙超差占超差总数的9.7%；径向间隙超差占超差总数的4%；轴向间隙超差占超差总数的3.2%。

围绕检测方法、工人技能及尺寸异常等方面现场实际调查，并绘制关联图，发现造成火焰筒外环组件瓦片装配孔间隙、周向间隙及径向间隙等超差的原因主要体现在测量方法和瓦片变形等因素，如图4所示。

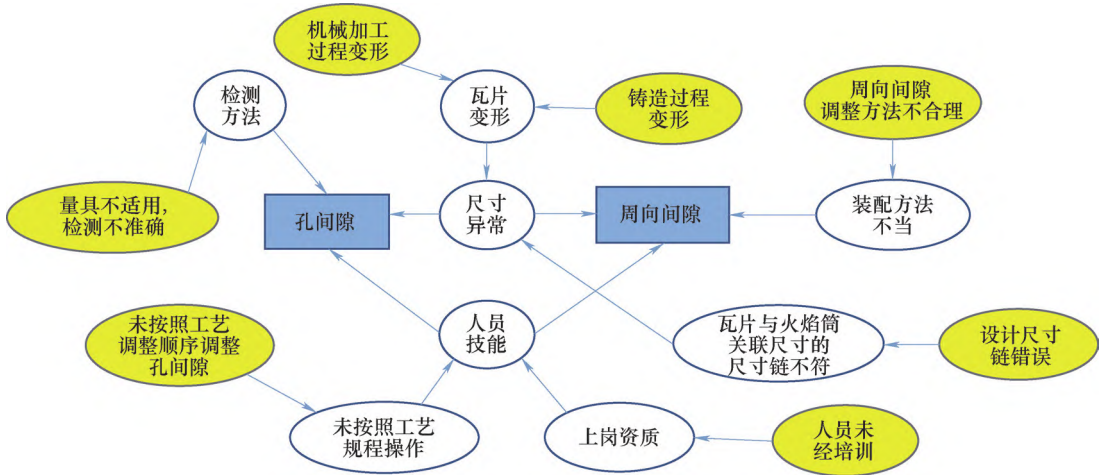


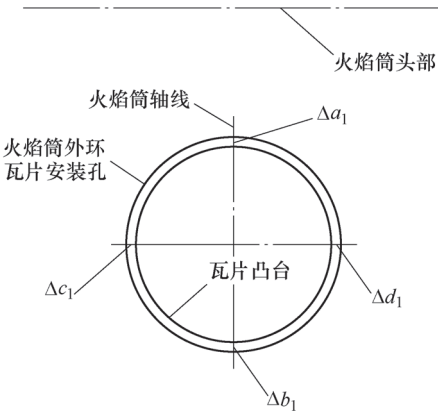
图4 关联图

3.1 孔间隙测量准确性不高造成间隙不合格

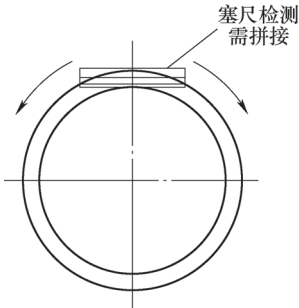
由4位操作人员分别对孔间隙进行检测，现场使用的检测方法为塞尺检测，对检测结果进行统计分析，发现同一位置的间隙尺寸检测结果均无全部一致的情况，以某处孔间隙的检测结果为例，每位检验员分别编号为1、2、3和4，检测结果见表2，检验员的检测结果不一致，且部分误差较大，可达0.2mm。孔间隙特性及检测如图5所示。通过图示可知采用塞尺的检测方法与被测间隙尺寸特性不匹配，无法准确检测该尺寸，同时孔间隙超差数量最大，远远超过其他间隙的超差数量及比例。由此可

表2 不同操作人员检测同一位置尺寸的实测记录  
(单位: mm)

| 检测项目 | 要求值     | 检验员1<br>测量值 | 检验员2<br>测量值 | 检验员3<br>测量值 | 检验员4<br>测量值 |
|------|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 孔间隙1 | 0.6~1.2 | 0.7         | 0.85        | 0.7         | 0.75        |
| 孔间隙2 | 0.2~0.5 | 0.3         | 0.4         | 0.4         | 0.2         |
| 孔间隙3 | 0.5~1.1 | 0.8         | 0.95        | 0.8         | 0.8         |
| 孔间隙4 | 0.5~1.1 | 0.9         | 0.9         | 0.95        | 0.95        |



a) 火焰筒大孔与瓦片凸台间隙周向图



b) 塞尺检测

图5 孔间隙特性及检测示意

知，孔间隙检测准确性不高是导致火焰筒外环组件瓦片装配间隙合格率低的主要因素。

3.2 瓦片变形造成间隙不合格

针对装配浮动壁瓦片时间隙无法保证问题，随机在现场挑选了4块共2组（2块毛料、2块喷涂）后进行对比分析。毛料及喷涂在各自工序状态下尺寸比较稳定，就工艺路线中的各工序而言，工序质量稳定可控。将毛料状态和喷涂后的瓦片进行对比后发现，喷涂后瓦片弦高变小（ $\Delta h \approx 3\text{mm}$ ），造成弦长增加（ $\Delta L \approx 1\text{mm}$ ）。喷涂后对瓦片弦长及型面检测未提出复检要求，使喷涂后瓦片弦高变短，弦长变大，致使装配时同段瓦片之间间隙变小。

机械加工阶段喷涂后导致弧度变大、弦长增长，导致了瓦片的变形，对火焰筒瓦片装配间隙尺寸超差带来了严重影响。利用三维检测软件对喷涂后的瓦片成型扫描，并与毛料状态和数据库瓦片理论状态数据进行对比<sup>[3]</sup>，对上述推断进行验证。喷涂前后瓦片对比如图6所示。喷涂后瓦片与理论状态瓦片（毛料状态瓦片）对比的偏差值沿瓦片长度方向由中间向两侧依次减小，边缘偏差 $>1\text{mm}$ ，与理论尺寸偏离较远，质量差。

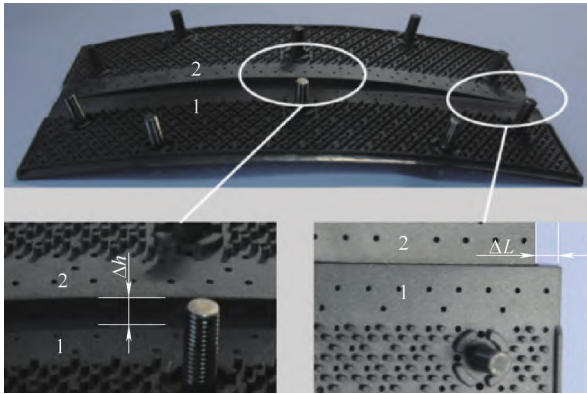


图6 喷涂前后瓦片对比（瓦片1为喷涂前，瓦片2为喷涂后）

4 解决方案

4.1 孔间隙的分组检测方法

针对采用塞尺检测浮动瓦片间隙测量准确度低的问题，从间隙检测特点入手，根据不同的尺寸要求采用针状间隙检测工具（简称“塞针”）进行检测，并按照0.05mm的间距进行分组，如图7所示，分组尺寸见表3。

根据间隙值范围制作不同组别塞针，显著提高了浮动瓦片装配间隙检测效率，降低了人工成本，

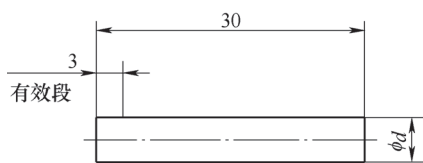


图7 分组塞针

表3 塞针分组尺寸 (单位: mm)

| 直径 $d$ | 0.25       | 0.3 | 0.35 | 0.4 | 0.45 | 0.5 | 1.3 | 1.35 | 1.4 | 1.45 | 1.5 | 1.55 | 1.6 |
|--------|------------|-----|------|-----|------|-----|-----|------|-----|------|-----|------|-----|
| 公差     | $\pm 0.01$ |     |      |     |      |     |     |      |     |      |     |      |     |

同时大大提高了瓦片与孔间隙检测的准确性,改进前后瓦片与孔间隙检测如图8所示。采用塞尺测量时需要不断选用不同规格塞尺进行拼接、试塞,在塞入孔间隙时还需向两边弯折塞尺,检测出来的数值不准确,通常测得间隙值偏大;采用塞针能够准确检测孔间隙,不存在塞尺检测的干涉问题,孔间隙的检测准确性达到100%,避免尺寸的误判,从而显著提高产品质量。

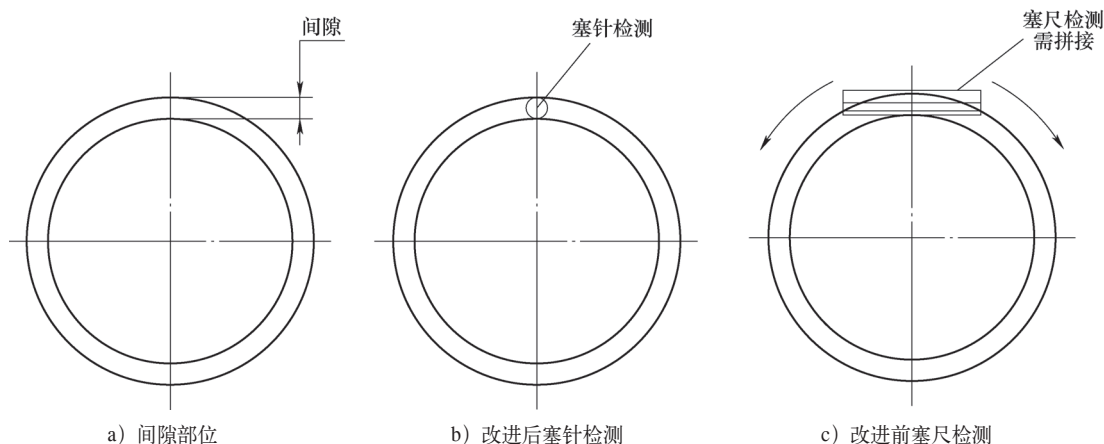


图8 改进前后瓦片与孔间隙检测

#### 4.2 瓦片变形控制方法

为防止瓦片变形,在喷涂时使用喷涂夹具(见图9),将瓦片固定在夹具上,可以有效地控制瓦片受热型面产生塑性变形,并对喷涂后瓦片现场进行测量,与喷涂前瓦片弦长相比基本无变化,偏差 $\leq 0.1\text{mm}$ ,其弦高及边缘偏差等关联尺寸均无明显变化,瓦片变形得到控制。瓦片弦长检测如图10所示。

通过喷涂夹具的使用,有效抑制了瓦片的变形量,使装配后的轴向间隙、径向间隙合格率显著提高。



图9 瓦片喷涂装夹示意

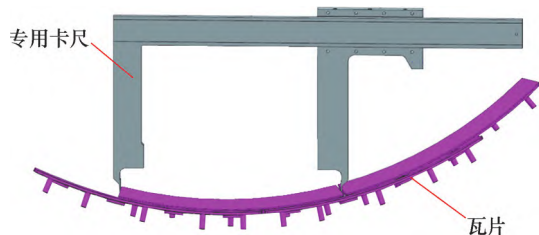


图10 瓦片喷涂后弦长检测示意

高至98.7%以上。

#### 5 结束语

本文针对航空发动机火焰筒浮动瓦片装配中影响间隙合格率的因素,进行剖析并采取有效的解决方法,通过孔间隙分组测具的应用,建立了瓦片间隙的检测标准和检测方法,解决了瓦片间隙在检测过程中因检测标准和检测方法不唯一而造成的检测误差问题。通过浮动壁瓦片喷涂变形控制技术和装配间隙整体调整技术的应用,解决了浮动壁瓦片在装配过程中因高温喷涂引起瓦片曲面变化而导致瓦片弦长变长、周向装配间隙超差的问题。

#### 参考文献:

- [1] 黎武. 浮动壁燃烧室关键结构设计研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2011.
- [2] 杨秀娟, 张炳海, 邵天巍, 等. 第七届沈阳科学学术年会暨浑南高新技术产业发展论坛文集[C]. 沈阳: 沈阳市科学技术协会, 2010.
- [3] 高建辉, 温卫东, 崔海涛. 火焰筒浮动瓦块的热-流-结构耦合数值分析[J]. 机械科学与技术, 2012, 31(7): 1196-1200, 1204.