

# 某型发动机涡轮前后温度分布的研究\*

张洪滨 李光中

(空军第一研究所, 北京, 100076)

**摘 要:** 阐述了在某型涡喷发动机上测量涡轮前、后温度分布的方法, 并对测量结果进行了分析, 得出“涡轮后温度分布不能代替燃烧室出口(涡轮前)温度分布”的结论。

**主题词:** 燃烧室, 涡轮进口总温, 涡轮排气总温, 温度分布

**分类号:** V235.113

## AN INVESTIGATION OF TEMPERATURE PROFILE BEFORE AND AFTER TURBINE IN A TYPE OF ENGINE

Zhang Hongbin Li Guangzhong

(The First Inst., Air Force, Beijing, 100076)

**Abstract:** The temperature profile quality at engine combustor exit (before turbine) is a important technical index, which concern operational reliability and life of engine's thermal component, thus measuring temperature profile at the combustor exit (before turbine) in a engine is very important. The method of measuring temperature profile before and after turbine in a type turbojet is presented and the measured results is analysed. It can be concluded that the after temperature profile turbine differs from the one before turbine.

**Subject terms:** Combustion chamber, Turbine inlet total temperature, Turbine discharge total temperature, Temperature distribution

### 1 引言

航空发动机热部件故障是经常遇到的多发性故障, 在分析、研究涡轮部件故障时, 发现燃烧室出口(涡轮前)温度分布质量是一个根本性的原因。现代高性能的航空发动机向着涡轮前高燃气温度、高增压比和高推重比的方向发展。随着涡轮进口温度的提高, 发动机热部件的工作条件更加恶劣。为了保证发动机热部件的使用可靠性, 对燃烧室出口(涡轮前)温度分布质量(最高热点的温值、平均径向温度和周向温度分布)提出了更高的要求<sup>[1]</sup>。因此, 提出了在整机上测量涡轮前、后温度分布的问题。

### 2 整机测量燃烧室出口(涡轮前)温度分布质量的方法

由于燃烧室出口燃气温度很高, 测量电偶距火焰又近, 燃烧室产生的水蒸汽、二氧化碳和炭粒子对电偶产生很多的辐射热; 涡轮前空间狭小, 在整机上测量燃烧室出口(涡轮前)温

\* 收稿日期: 19961102, 修回日期: 19970314, 本文为中国航空学会第十届燃烧及传热传质学术讨论会论文

度分布难度很大。我们在试车台架上实现了测量某型发动机燃烧室出口（涡轮前）144点温度分布<sup>[2]</sup>。该型发动机 I 级导向器有36个导向叶片，在每个叶片内设置4支热电偶，可测出燃烧室出口（涡轮前）144点温度。热电偶材料为镍铬-镍硅，可在1300℃长期工作。偶丝直径为0.8mm，每支热电偶在 I 级导向器叶片前缘伸出2mm。热电偶壳体是用厚度为0.8mm的不锈钢片焊在 I 导叶片的空腔中，偶丝套上瓷管装入 I 导叶片前缘预制的  $\Phi 3$  孔内，灌上耐热水泥加温固化。热电偶的引出部分是通过 I 级导向器外环上相应位置开孔穿出，其外套直径为12mm、长度为30mm的不锈钢管。导管内灌注耐热水泥加固密封。将144个测点的144根正极引线分成三组，共用48根正极补偿导线。负极线为4根共用线，引至记录仪表。用继电器转换3次，便可在计算机上将144点温度值记录下来。由于偶丝装在 I 导叶片空腔内，伸出导向叶片2mm，对 I 导叶片外形没有明显影响。另外 I 导叶片空腔虽然被热电偶和耐热水泥堵死，没有空气进入冷却 I 导叶片，但因测量时间较短，导向叶片不会烧坏。

同时在试车台架上还测量了涡轮后240点温度分布。其具体测量方法如下：将3支直径为 $\Phi 10$ 的热电偶，沿圆周120°均布，固定在一个圆盘上，圆盘的轴上有齿轮传动机构，固定在发动机扩散段下部的 YP-7M 电机通过传动机构带动圆盘转动。每测量一次，操纵电机使圆盘转动6°。每支热电偶上有4个测点（进气孔为 $\Phi 4$ ），3支热电偶每次能测量12个点。操纵电机使圆盘转动20次，就测出了涡轮后240点温度分布。

### 3 测量结果分析

#### 3.1 燃烧室出口（涡轮前）144点温度分布

在试车台发动机上，换装上带有热电偶的测量段进行试车。在发动机的最大状态（转速调到11120r/min，喷口直径455mm），稳定1min后，测量记录燃烧室出口（涡轮前）144点温度，在同一台发动机上，换装3件不同型式的火焰筒，测出3种燃烧室出口（涡轮前）144点温度分布。数据整理后如表1所示。涡轮前温度沿叶高的分布曲线如图1所示。

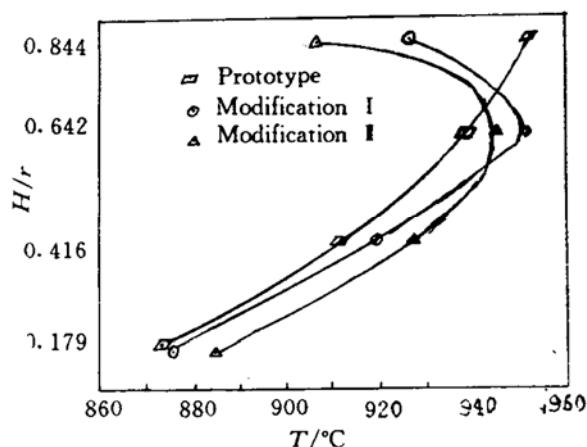


Fig. 1 Temperature profile curve before turbine along blade-height

Table 1 144 Points temperature profile parameters of combustor exit (before turbine)

| Measured parameters                    | Prototype | Modification I | Modification II |
|----------------------------------------|-----------|----------------|-----------------|
| $T_{3max}^* / ^\circ\text{C}$          | 1195      | 1259           | 1149            |
| $T_{144cp}^* / ^\circ\text{C}$         | 918.2     | 916.1          | 917.7           |
| $T_i^* / ^\circ\text{C}$               | 952       | 906.6          | 925.7           |
| $T_{ii}^* / ^\circ\text{C}$            | 939       | 945.6          | 950.6           |
| $T_{ii}^* / ^\circ\text{C}$            | 911.9     | 927.5          | 919.5           |
| $T_{ii}^* / ^\circ\text{C}$            | 872.5     | 884.9          | 874.9           |
| Hot points numbers above 1000°C, unity | 22        | 28             | 25              |
| $\delta$                               | 30%       | 37.4%          | 25.2%           |

Mark indication in table:

$T_{3\max}^*$ : Most hot points temperature values in 144 points temperature of combustor export;

$T_{144cp}^*$ : Arithmetical average values of 144 points temperature of combustor export;

$T_{\bar{1}}^* - T_{\bar{N}}^*$ : Arithmetical average values of 36 points temperature on measurable each annulus;

$\delta = \frac{T_{3\max}^* - T_{144cp}^*}{T_{144cp}^*}$ : Temperature profile coefficient.

从表1和图1表明: 改型 I 火焰筒的高温热点数量最多 (28个), 而且最高热点温值最高 (1259℃), 温度分布不均匀系数最大 (37.4%)。说明该型火焰筒出口温度分布最不均匀。原型火焰筒径向最高温度在叶高84.4%处, 改型 I 和改型 II 火焰筒径向最高温度均在叶高64.2%处, 这说明改型火焰筒沿叶高的温度分布曲线更符合沿叶高的理想温度分布。

3.2 涡轮后240点温度分布

在试车台发动机上, 换装上带有热电偶的测量段试车, 在发动机最大状态 (转速调到11120r/min, 喷口直径456mm) 下稳定1min后, 测量、记录涡轮后240点温度。在同一台发动机上, 换装3个厂组装的同一型式的火焰筒, 测出3种涡轮后240点温度分布, 数据整理后如表2所示。

Table 2 240 Points temperature profile parameters after turbine

| Measured parameters                                           | Modification I (1) | Modification I (2) | Modification I (3) |
|---------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| $T_{4\max}^*/^{\circ}\text{C}$                                | 791                | 768                | 735                |
| $T_{240cp}^*/^{\circ}\text{C}$                                | 628                | 612.8              | 619.9              |
| $T_{4\min}^*/^{\circ}\text{C}$                                | 489                | 480                | 511                |
| $\delta$                                                      | 26.0%              | 25.3%              | 18.6%              |
| $T_{4\text{monitoring}}^*/^{\circ}\text{C}$                   | 615                | 616.5              | 634                |
| $[T_{240cp}^* - T_{4\text{monitoring}}^*] / ^{\circ}\text{C}$ | 13                 | 3.7                | 14.1               |
| Hot points numbers above 700℃, unity                          | 35                 | 21                 | 15                 |

Mark indication in table:

$T_{4\max}^*$ : Most hot points temperature values in 240 points temperature After turbine;

$T_{240cp}^*$ : Arithmetical average values of 240 points temperature after turbine;

$T_{4\min}^*$ : Minimum cold points temperature values in 240 points temperature after turbine;

$\delta = \frac{T_{4\max}^* - T_{240cp}^*}{T_{240cp}^*}$ : Temperature profile coefficient;

$T_{4\text{monitoring}}^*$ : Monitoring temperature of four points thermocouple after turbine.

从表2中的数据表明: 改型 II (3) 火焰筒高温热点数量最少 (15个), 而且最高热点温值最低 (735℃), 温度分布不均匀系数最小 (18.6%), 这间接说明该厂生产的火焰筒出口温度分布最均匀。改型 II (2) 火焰筒, 240点温度平均值与4点热电偶监视温度差值最小 (3.7℃), 同时也不超温, 说明该型发动机按四点监视热电偶温度指示, 能充分发挥发动机的能力。

4 涡轮后温度分布同燃烧室出口 (涡轮前) 温度分布的关系

由于燃气在发动机涡轮中膨胀做功过程中参数变化的复杂性, 从理论上导出涡轮后温度

分布与燃烧室出口(涡轮前)温度分布的关系式也是难以实现的。涡轮后的温度分布质量不能代替燃烧室出口(涡轮前)的温度分布质量,具体理由如下:

(1) 燃烧室出口(涡轮前)温度比涡轮后温度高得多,燃烧室出口(涡轮前)平均温度比涡轮后平均温度高 $250^{\circ}\text{C}$ 左右,燃烧室出口(涡轮前)温度中最高热点温度比涡轮后温度中最高热点温度高 $380^{\circ}\text{C}$ 左右。

(2) 燃烧室出口(涡轮前)温度分布高温点位置同 I 级导向器叶片烧伤故障有对应关系,因此,燃烧室出口(涡轮前)温度场高温点分布规律是分析 I 级导向器叶片烧伤故障的根据。但是,涡轮前的燃气经过两级涡轮膨胀做功后,不仅高温点的数值降低,而且高温点的位置也发生了变化,因而涡轮后的高温点位置和 I 级导向器叶片烧伤故障不存在对应关系。

(3) 燃烧室出口(涡轮前)温度分布可判断沿叶高径向温度分布是否合理,燃烧室出口(涡轮前)温度分布测出后,可计算出沿叶高的径向温度分布规律,通过和理想的径向温度分布曲线加以比较,可以查明燃烧室出口(涡轮前)温度分布质量的优劣。而根据涡轮后的温度分布就无法判断沿叶高径向温度分布是否合理。因此,涡轮后的温度分布质量不能代替燃烧室出口(涡轮前)的温度分布质量。但涡轮后温度分布在某种程度上可间接地反映燃烧室出口(涡轮前)温度分布,因此在某些情况下测量涡轮后温度分布也是有意义的。整机上在燃烧室出口(涡轮前)温度分布测量无法实现时,测量涡轮后温度分布也可对燃烧室出口(涡轮前)温度分布的均匀性有一个粗略了解。对改型发动机研制,可用涡轮后温度分布对比与原型机的差别;对批产发动机,可用涡轮后温度分布对比检查各批零、部件加工、装配质量的优劣。但是,对于新研制发动机燃烧部件调试阶段,因为发动机整机还未组装出来,只能在部件燃烧试验器上测量燃烧室出口温度分布,进行调试燃烧室。

## 5 结 论

(1) 在整机上测量燃烧室出口(涡轮前)温度分布是必要的,涡轮后温度分布不能代替燃烧室出口(涡轮前)温度分布。

(2) 在整机上测量燃烧室出口(涡轮前)温度分布难度很大,但是通过 I 级导向器空心叶片中设置热电偶可以实现。该测量方法不适应对先进发动机高温燃烧室出口燃气温度情况。

(3) 在某些情况下测量涡轮后温度分布具有实际意义。

## 参 考 文 献

- 1 金如山. 喷气燃烧室出口温度分布的几个问题. 北京: 北京航空学院出版社, 1977
- 2 张洪滨, 甘晓华. 涡轮喷气发动机燃油雾化与燃烧. 北京: 北京航空工程技术研究中心出版社, 1989