

# 燃气轮机动力涡轮 排气管导流板的热应力测量

祝祖宏 王淑霞

〔提要〕 针对机组动力涡轮排气管导流板发生翘曲、裂纹及掉块现象，通过对原结构及改进方案的几次热应力测量反映两型涡轮排气管结构在各种运行工况下的应力及温度的分布值。焊接式半桥自补偿高温应变片的应用，为确保机组高效率、长寿命的特性提供必要的依据。

**关键词：** 动力涡轮 高温应变片 热应力测量 排气管导流板

## 一、前 言

排气管是舰用燃气轮机装置的重要部件之一。它的结构形式是薄板焊接件，中间设有为了提高机组热效率的导流板。机组燃气排气温度在400—500℃左右，在此条件下，结构承受下列几种载荷：

1. 由温度引起的结构热应力。
2. 起动、停车造成的低周热疲劳。
3. 强烈的气流转向使导流板背气流侧产生脱流，导流板正反面的交变压差迫使导流板产生强烈的振动。

航空改装机的涡轮排气管，经短时间运行后，发生裂纹及掉块现象，先在排气管长导流板与两侧相联接的焊缝处产生裂纹，逐渐发展成掉块。在采取局部加强措施后，仍在100小时运行后发生导流板飞出烟道的故障。

为查明事故原因，确保各型机组的安全运行，决定对现用的I型薄壁焊接结构及时装有四支柱弹性补偿结构的II型排气管，进行高温应力实测。试验结合机组起动、运行等各种状态同时测量各测点的温度热应力及交变热应力值。

## 二、测 试 方 法

### 1. 一次元件的选取

(1) 温度测量所用的一次元件为热电偶及铂丝测温片。

热电偶的优点是工艺简单，测量方便，但它存在时间响应差的缺点，在变工况测量特别是快速升温降温时，温度值会造成较大误差，为此，除采用热电偶测量导流支板各点的温度分布外，在所有的应力测量处都采用 $\phi 0.07$ mm铂丝绕制成应变片形式的测温片。测量其表面温度，经标定它的温度与电阻改变率成正比。按应变桥路接线，串联电阻通过动态电阻应变仪即可准确测量温度。很明显，铂丝测量片的应用，必然能提高变工况下热应力测量的精度。

(2) 应变测量元件采用焊接式半桥自补偿高温应变片。

根据设计部门提供的各型机组排气管的工作，温度大致在400—500℃左右。我们选用φ0.03m/m铁铬铝丝和φ0.07m/m铂丝，经过分选及适当的配组试验，组成焊接式双丝自补偿高温应变计。高温胶使用英国V-529胶，其快速升温条件下，热输出特性曲线见图1。

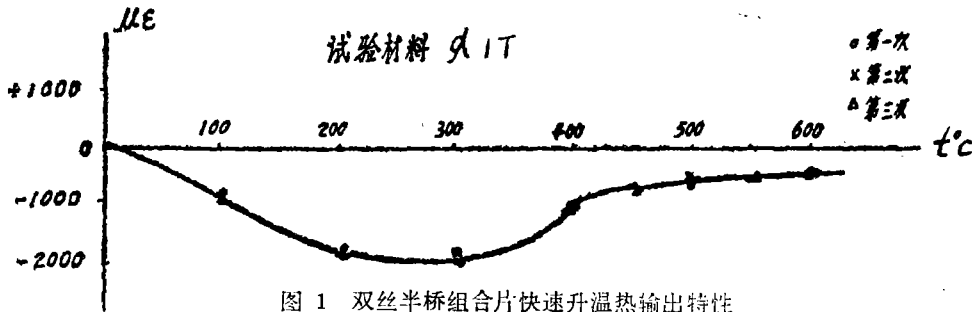


图1 双丝半桥组合片快速升温热输出特性

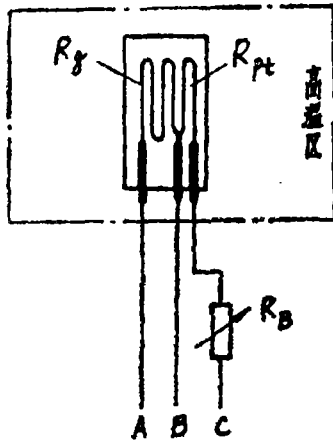


图2 双丝自补偿高温片应变桥路接线图

## 2. 测试线路

### (1) 应变桥路及其标定

应变片接线桥路如图2所示

这时：工作桥臂  $R_{AB} = R_g + R_L$

补偿桥臂  $R_B = R_{pt} + R_B + R_L$

桥路平衡  $R_g = R_{pt} + R_B$

$R_L$ 为联接导线

根据应变片工作的基本原理

$$\frac{\Delta R_g}{R_g + R_L} = K \epsilon$$

在此桥路中，利用可调电阻  $R_B$  进行测量前的标定，标定时，示波器上的输出幅值  $H$  为：

$$H = \frac{\Delta R_B}{R_{pt} + R_B + R_L} = \frac{\Delta R_{pt}}{R_{pt} + R_B + R_L}$$

应变标定灵敏度  $S_s = \frac{\Delta R}{H} \Omega/\text{mm}$

### (2) 温度测量桥路及其标定

测量时铂丝测温片接成温度测量桥路电桥二桥臂各串接一电阻箱，用来调整测温片的灵敏度，温度的电阻变量通过动态应变仪将讯号放大接到示波记录器，由记录纸直接显示。测温片桥路接线图见图3。

工作桥臂： $R_{AB} = R_1 + R_{pt} + R_L$

补偿桥臂： $R_{BC} = R_2 + R_L$

电桥平衡时  $R_2 = R_1 + R_{pt}$

同理，用  $R_1$  标定在示波器上的输出幅值  $H_1$  为：

$$H_1 = \frac{\Delta R_1}{R_1 + R_{pt} + R_L} = \frac{\Delta R_{pt}}{R_1 + R_{pt} + R_L}$$

则标定灵敏度  $S_{\rho_1} = \frac{\Delta R_1}{H} \Omega/\text{mm}$

### 3. 测点布置:

#### (1) I型结构——薄壁焊接结构

在测点布局上,初次测量既考虑到裂纹断裂处,也照顾到面上的分布,应力测点六处,温度测点八处,测点位置见图4。引线按三线法接出。

测点位置见下面图4。

#### (2) II型结构——四支柱弹性补偿接头及出气边加固铆接结构,采取下列改进措施。

- 导流板与两侧壁采用铆接和螺钉连接方式,以螺钉孔径差进行热胀补偿。
- 导流板上中部加四根支承柱,增加板的刚性,其支承柱与外臂采用弹性补偿接头。
- 长短导流板出气边铆接加固薄板,增加刚性。

II型结构及测点分布见图5、图6、图7

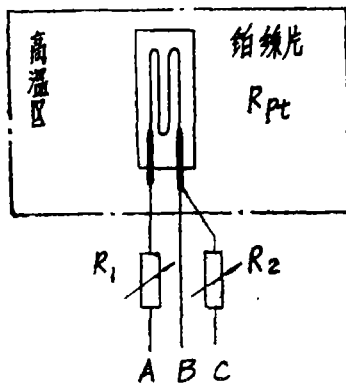


图3 测温片桥路接线图

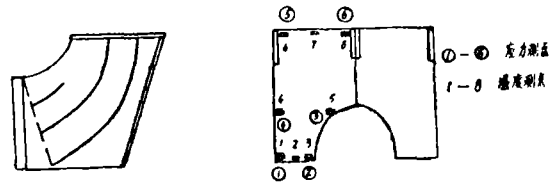


图4 I型排气管结构及测点位置图

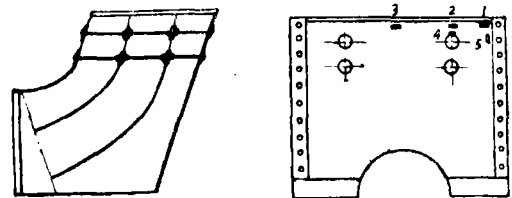


图5 II型排气管结构图

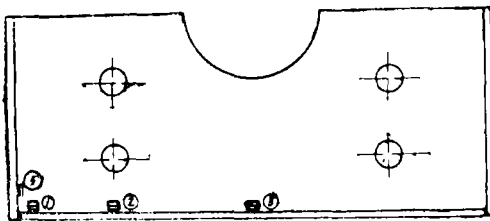


图6 II型排气管长导流板应力和温度测点图

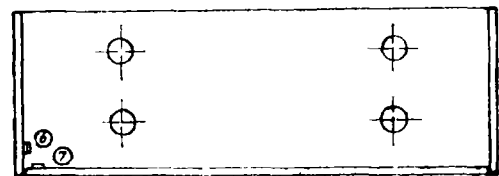


图7 短导流板应力和温度测点布置图

## 三、试验结果及分析

### (一) I型排气管实测结果:

表 1 长导流板热应力实测结果

kg/cm<sup>2</sup>

| 应变片编号 | 工 况                           |                               |                               |                               |                               |
|-------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
|       | n <sub>1</sub> 87%<br>1869rpm | n <sub>1</sub> 90%<br>1945rpm | n <sub>1</sub> 92%<br>1992rpm | n <sub>1</sub> 94%<br>2028rpm | n <sub>1</sub> 96%<br>2083rpm |
|       | n <sub>2</sub> 1373rpm        | n <sub>2</sub> 1945rpm        | n <sub>2</sub> 1700rpm        | n <sub>2</sub> 1870rpm        | n <sub>2</sub> 2478rpm        |
| (1)   | + 455                         | + 378                         | + 886                         | + 551                         | + 367                         |
| (2)   | - 140                         | + 32                          | + 261                         | + 270                         | + 587                         |
| (3)   | - 369                         | - 432                         | - 475                         | - 570                         | - 333                         |
| (4)   | - 121                         | - 219                         | - 276                         | - 510                         | - 743                         |
| (5)   | - 319                         | - 467                         | - 406                         | - 551                         | - 638                         |
| (6)   | - 422                         | - 571                         | - 514                         | - 666                         | - 582                         |

表 2 长导流板各测点的动应力(峰~峰值)实测结果

kg/cm<sup>2</sup>

| 编 号 | 工 况                |                    |                    |                    |                    |
|-----|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|     | n <sub>1</sub> 87% | n <sub>1</sub> 92% | n <sub>1</sub> 92% | n <sub>1</sub> 94% | n <sub>1</sub> 96% |
| (1) | 226                | 139                | 160                | 182                | 182                |
| (2) | 100                | 149                | 68                 | 90                 | 99                 |
| (3) | 190                | 186                | 95                 | 95                 | 95                 |
| (4) | 143                | 141                | 122                | 268                | 173                |
| (5) | 357                | 487                | 735                | 855                | 610                |
| (6) | 582                | 775                | 930                | 961                | 722                |

表 3 长导流板温度实测结果 (1~8)

℃

| 工况<br>编号 | n <sub>1,87%</sub> | n <sub>1,90%</sub> | n <sub>1,92%</sub> | n <sub>1,94%</sub> | n <sub>1,96%</sub> |
|----------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 1        | 282                | 337                | 328                | 353                | 345                |
| 2        | 180                | 275                | 270                | 287                | 303                |
| 3        | 160                | 173                | 193                | 193                | 223                |
| 4        | 255                | 297                | 303                | 325                | 340                |
| 5        | 227                | 282                | 290                | 303                | 292                |
| 6        | 282                | 337                | 340                | 353                | 365                |
| 7        | 282                | 325                | 328                | 340                | 345                |
| 8        | 285                | 332                | 337                | 357                | 362                |

表 4 启动至慢车各瞬态位置温度值

℃

| 瞬 间<br>测点编号 | I   | II  | III | VI  | V   |
|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1           | 90  | 140 | 185 | 205 | 225 |
| 3           | 70  | 115 | 155 | 175 | 185 |
| 4           | 105 | 130 | 180 | 200 | 225 |
| 5           | 85  | 120 | 150 | 175 | 190 |
| 6           | 70  | 125 | 185 | 220 | 245 |
| 8           | 90  | 140 | 195 | 225 | 245 |

表 5 启动至慢车各瞬态位置相应的热应力值

kg/cm<sup>2</sup>

| 瞬 间<br>应力测点 | I    | II   | III  | VI   | V    |
|-------------|------|------|------|------|------|
| (1)         | -106 | -178 | -187 | -234 | -149 |
| (2)         | +92  | +132 | +141 | +80  | -62  |
| (3)         | +376 | +269 | -135 | -259 | -351 |
| (4)         | +270 | +296 | +234 | +103 | -45  |
| (5)         | -120 | -81  | -84  | -103 | -219 |
| (6)         | -192 | -94  | -320 | -460 | -450 |

表 6 II型排气管导流板热应力实测结果

kg/cm<sup>2</sup>

| 测点  | 1    | 2    | 3    | 7    |
|-----|------|------|------|------|
| 0.5 | -538 | -329 | -354 | -510 |
| 0.7 | -621 | -434 | -358 | -632 |
| 0.8 | -827 | -550 | -366 | —    |
| 1.0 | -858 | -611 | -571 | —    |

表 7 II型排气管导流板动应力实测结果 (峰-峰值)

kg/cm<sup>2</sup>

| 测点  | 1   | 2   | 3   | 7   |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| 0.5 | 186 | 182 | 216 | 153 |
| 0.7 | 230 | 218 | 266 | 178 |
| 0.8 | 223 | 218 | 231 | 116 |
| 1.0 | 294 | 218 | 266 | 205 |

表 8 II型排气管导流板测温片各测点温度结果整理

℃

| 测点  | 1   | 2   | 3   | 5   | 6   |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 0.5 | 359 | 359 | 374 | 286 | 231 |
| 0.7 | 409 | 401 | 411 | 313 | 228 |
| 0.8 | 411 | 410 | 414 | 344 | 303 |
| 1.0 | 444 | 439 | 444 | 372 | 344 |

(二) 各工况下录取的静动态应力讯号值见图 8 ~13

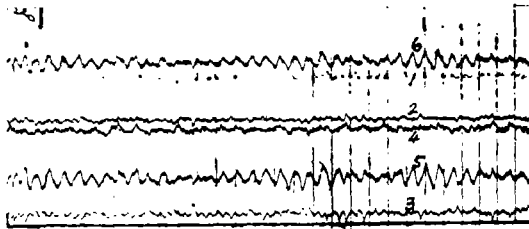


图 8 在n<sub>1</sub>87%1869, n<sub>2</sub>1373工况下录取的应力讯号值

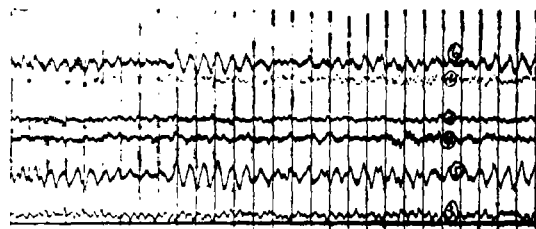


图 9 在n<sub>1</sub>90%1945, n<sub>2</sub>1630工况下录取的应力讯号值

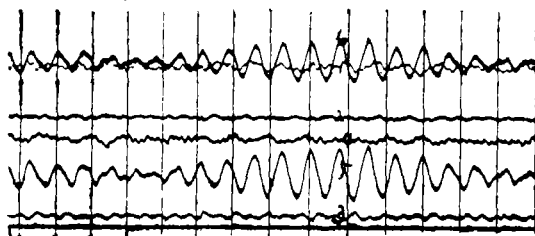


图 10 在n<sub>1</sub>92%1992, n<sub>2</sub>1700工况下录取的应力讯号值

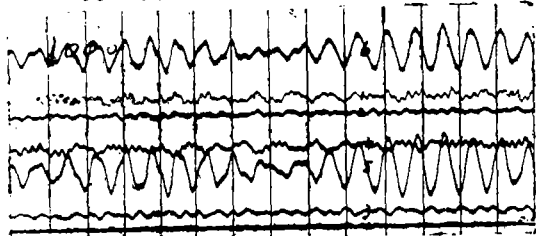


图 11 在n<sub>1</sub>94%2028, n<sub>2</sub>1870工况下录取的应力讯号值



图 12 在 $n_1=96\%$ 2083, $n_2=2478$ 工况下录取的应力讯号值

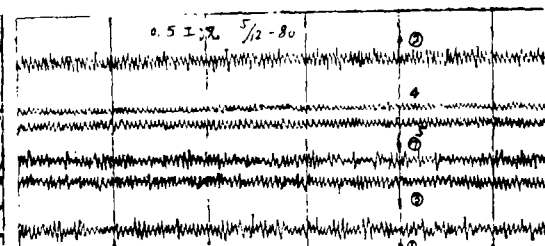


图 13 II型结构在0.5工况下应变测点实测讯号

### (三) 结果分析:

#### 1. 排气管导流板破坏的主要原因是振动疲劳破坏。

I型排气管实测表明,出气边测点的动应力值,随工况改变有明显的变化, $n_1=94\%$ 。 $n_2=1870\text{rpm}$ 工况时,测点(5)、(6)的热应力值为: $-551\text{kg/cm}^2$ 及 $-666\text{kg/cm}^2$ ,其交变应力(峰-峰值)为 $855\text{kg/cm}^2$ 及 $961\text{kg/cm}^2$ 。导流板出边处于非对称循环,其 $\sigma_{m.c.r} = -1146\text{kg/cm}^2$ ,高工况下,导流板危险截面在出气边两侧。导流板自振频率为 $137\text{Hz}$ 。

#### 2. 导流板温度场的测定

由于高速燃气流在导流板进气侧存在死区,造成在不到 $200\text{m/m}$ 进气边的两侧,温度相差 $164^\circ\text{C}$ ,在稳定工况下,两侧温差为 $122^\circ\text{C}$ ,温差引起排气管内壁不同的膨胀量,使导流板在进气侧承受拉应力。

#### 3. 起动过程温度热应力的测定

起动至慢车五个瞬间所整理的实测结果表明,所有测点在起动过程中的热应力,均小于 $460\text{kg/cm}^2$ ,因此,多次起动所造成的低周热疲劳,对导流板结构的破坏影响不大。

#### 4. 多支点结构,从根本上改善了构件的应力分布。

实测结果表明,II型结构出气边各测点的热应力值1.0工况最大为 $-858\text{kg/cm}^2$ ,交变应力为 $\pm 147\text{kg/cm}^2$ ,而交变应力的明显下降,是保证机组长时间安全运行的一个有效的措施。

5. II型结构导流板测点(2)与测点(1)(3)(7)动态波形,发现它们之间相位差 $180^\circ$ ,这种现象反映II型结构在机组运行时,导流板出气边在作横向波动,在整个长度至少有两个振动节点。节点增加,振幅必然降低。

## 结 束 语

机组结构的破坏,关键在于静动应力的综合值,通过对II型排气管导流板的温度热应力测量,证明采用应变桥、动态应变仪、示波记录器这套测试方法,用于机组构件静动应力测量是行之有效的。实测结果说明,高温焊接片在一般情况下,能反映机组动态讯号的真实状态,这在实际应用上是很有意义的。

## 参 考 文 献

- [1] 《应变合金译文集》北京冶金研究所 1976
- [2] 王淑霞《401机涡轮排气管导流支板热应力测量》703所研究报告 1981年
- [3] 吴宗岱 陶宝琪 主编《应变电测原理及技术》国防工业出版社 1982年
- [4] S铁摩辛柯·J盖尔《材料力学》科学出版社 1978年
- [5] BE盖脱伍德 《热应力》机械工业出版社 1964年

# JOURNAL OF ENGINEERING FOR THERMAL ENERGY AND POWER

No.2 1986

## CONTENTS

### GAS TURBINE EXPERIMENTAL RESEARCH

1. An experimntal study of a blade-type total-pressure probe  
.....*Sun Jihu, Liu Zhanmin*( 1 )

#### Synopsis

A monographic study was carried out of a blade-type total-pressure probe. Through tests, characteristic curves under various regimes ranging from low velocities to high ones were obtained. Analysis was made of factors influencing probe measurement accuracy. Performance comparison of three kinds of blade-type probes was made and its result discussed. The study results have been used by the 703 Research Institue in its research work concerned with the measurement of compressor interstage aerodynamic parameters. Our practice has shown that blade-type probes are not only usable, but are highly effective.

2. Thermal stress measurements of flow deflectors in a power turbine exhaust duct.....*Zhu Zhuhong, Wang Shuxia*( 9 )

#### Synopsis

In an effort to solve the problem of warping, cracks and splintering being found on the flow deflector of a power turbine exhaust duct, several thermal stress measurements were made in the original and the improved version of the exhaust duct to obtain their respective stress and temperature distribution patterns under various operating conditions. The use of the welded half-bridge self-compensating high temperature strain gauges has provided a firm basis for ensuring a high efficiency and a long life feature for the power unit.

### MEASUREMENT AND TESTING TECHNIQUES

3. A study of bridge forms of double-element half-bridge resistance strain gauges  
.....*Lu Wenfa, Li Chunlan*(16)

#### Synopsis

This paper studies measuring circuits of double-element halfbridge self-compensaing resistance strain gauges and describes a four-line measuring circuit on the basis of the three-line connecting circuit. It can be seen from the results of analysis that the effect of the connecting wire resistance change with temperature on the compensation results has been significantly reduced, and the overall error has also been reduced accordingly. It is pointed out that, whichever bridge form is used, the wire resistance change with temperature can not be completely compensated and therefore a connecting wire with low resistance-temperature coefficient and a shortest possible wiring length in the high-temperature area must be used.