



北京科技大学  
University of Science & Technology Beijing

# 高温应变检测技术在内燃机热端部件的应用

## Application of High Temperature Strain Detection Technology in Hot End Components of Internal Combustion Engines

---

北京科技大学

University of Science and Technology Beijing

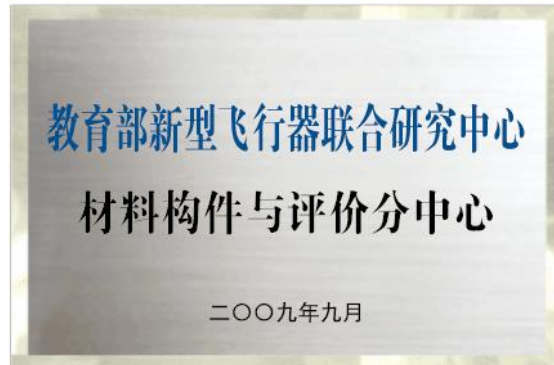
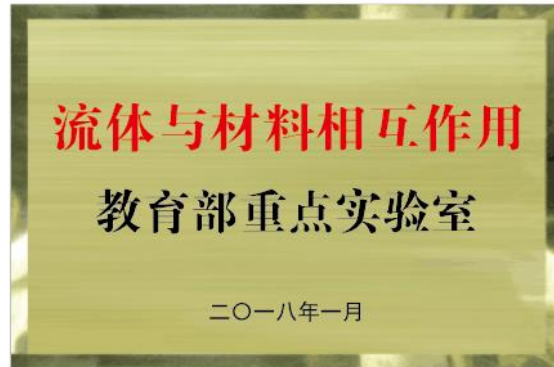
王文瑞

Wang Wenrui

2023/2/19



# 研究团队概况 Research Team Overview



## 北京科技大学极端环境材料\结构服役与安全团队

依托：“流体与材料相互作用”教育部重点实验室、

教育部新型飞行器联合研究中心、

北京科技大学新型飞行器技术研究中心，

从事：极端环境下应变测量与传感器技术研究、

结构动态疲劳破坏机理与寿命预测研究，

承担：科技部重大仪器设备开发专项，2项

国家重点研发计划重点专项，4项

国家自然科学基金项目，15项

北京市重点基金项目，1项

航空科学基金，2项

委托项目，80余项

奖励：教育部科技进步二等奖

中国产学研成果奖二等奖

2023中国科协“科创中国”先导技术榜

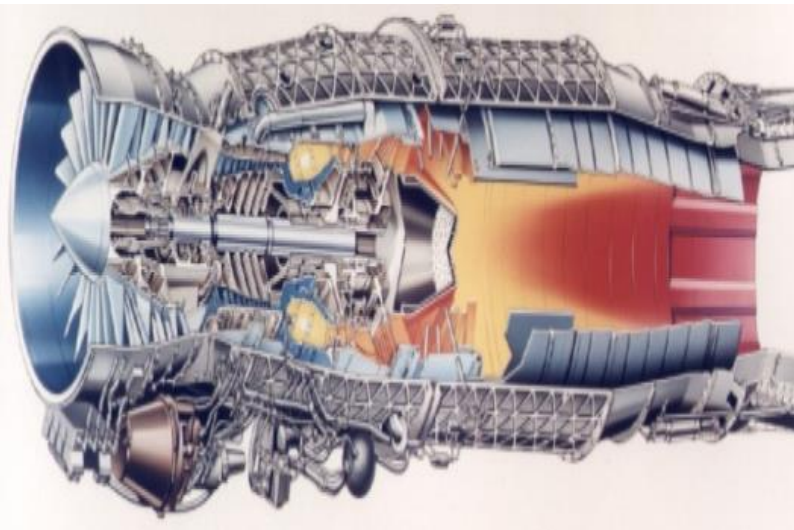
# 主要汇报内容 Report Contents

---



- 1 **研究现状及领域** Research status and field
  - 2 **关键技术与应用** Key technologies and applications
  - 3 **安装工艺的确定** Installation process introduction
  - 4 **实验数据的分析** Analysis of experimental data
-

# 1 研究现状及领域 Research status and field





# 1 研究现状及领域 Research status and field

---

- 美国：应变片 $900^{\circ}\text{C}$ ，最高 $1090^{\circ}\text{C}$
  - 日本：焊接式 $800^{\circ}\text{C}$ ，粘贴式 $500^{\circ}\text{C}$
  - 英国：粘贴式 $700^{\circ}\text{C}$
  - 俄罗斯：焊接片 $1000^{\circ}\text{C}$ ，4年未成功
  - 国内：应变片 $300\text{--}500^{\circ}\text{C}$ ， $800^{\circ}\text{C}\text{--}1000^{\circ}\text{C}$
-

# 2 关键技术与应用 Key technologies and applications

## 室温~1473K高温应变片制备-标定-检测-补偿全链条技术

### 关键技术：改良的高温应变电阻合金制备技术与高温应变片制备设备

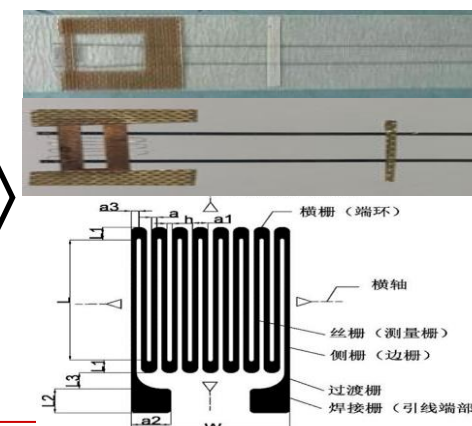
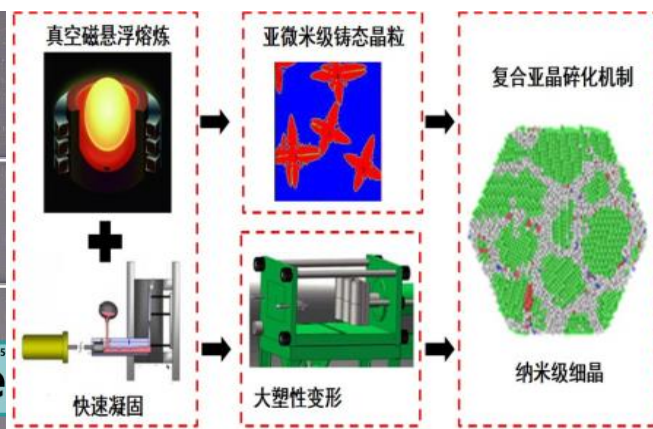
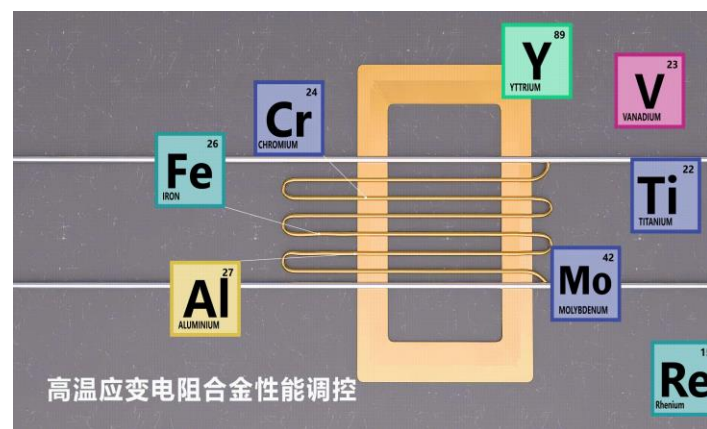
#### 技术难点

- 应变电阻合金温度 <math>< 1073\text{K}</math>
- 应变片一致性差，难以量产



#### 创新思路

- 稀土元素掺杂 + 真空磁悬浮感应熔炼 + 热处理提纯 + 表面能诱导再结晶，提高合金抗氧化性能
- 开发高温应变片制备设备，实现敏感栅长度、间距、张力等参数的精准调节



接触式高温应变测量原理

稀土元素掺杂+敏感栅细晶化处理

18道次拉拔成型+稳定性处理工艺

1473K高温应变计



## 2 关键技术与应用 Key technologies and applications

### 室温~1473K高温应变片制备-标定-检测-补偿全链条技术

**关键技术3.1：开发了改良的高温应变电阻合金制备技术与高温应变片制备设备**

**技术效果：利用本项目成果研制的高温应变片，在可耐受的最高温度及成本方面具有明显优势，且具有自主知识产权。**

对标产品	最高温度	电阻值	售价 (万元)
美国HPI	1311K	120Ω±1%	0.25~0.30
美国Vishay	1423K	120Ω±1%	0.20
日本TML	1073K	120Ω±1%	1.5~2.0
<b>本项目应变片</b>	<b>1473K</b>	<b>120Ω±1%</b>	<b>0.10</b>

# 2 关键技术与应用 Key technologies and applications

## 室温~1473K高温应变片制备-标定-检测-补偿全链条技术

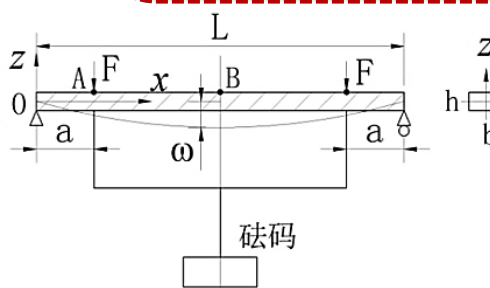
### 关键技术：自主设计开发的高温应变片参数标定校准装置与精度修正模型

#### 技术难点

- 标定精度低，特性参数不准确
- 难以实现高温应变数据在线修正

#### 创新思路

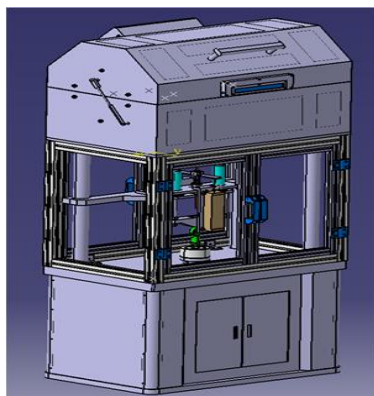
- 建立**四点弯等应变梁加载**模型，规避温度材料参数的影响，实现**恒应变加载**
- 建立**标定梁机械应变修正模型**，实现**精准加载**
- 建立**高温应变测量精度修正模型并嵌入软件系统**



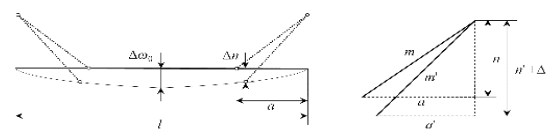
$$EI\omega(x) = \int [Fax + C']dx + D' = \frac{1}{2}Fax^2 + C'x + D'$$

$$\epsilon_0 = \frac{12h\omega}{3L^2 - 4a^2}$$

标定梁挠度与机械应变  
四点弯等应变力学模型



正反双向加载消除挠度  
测量非中性面误差



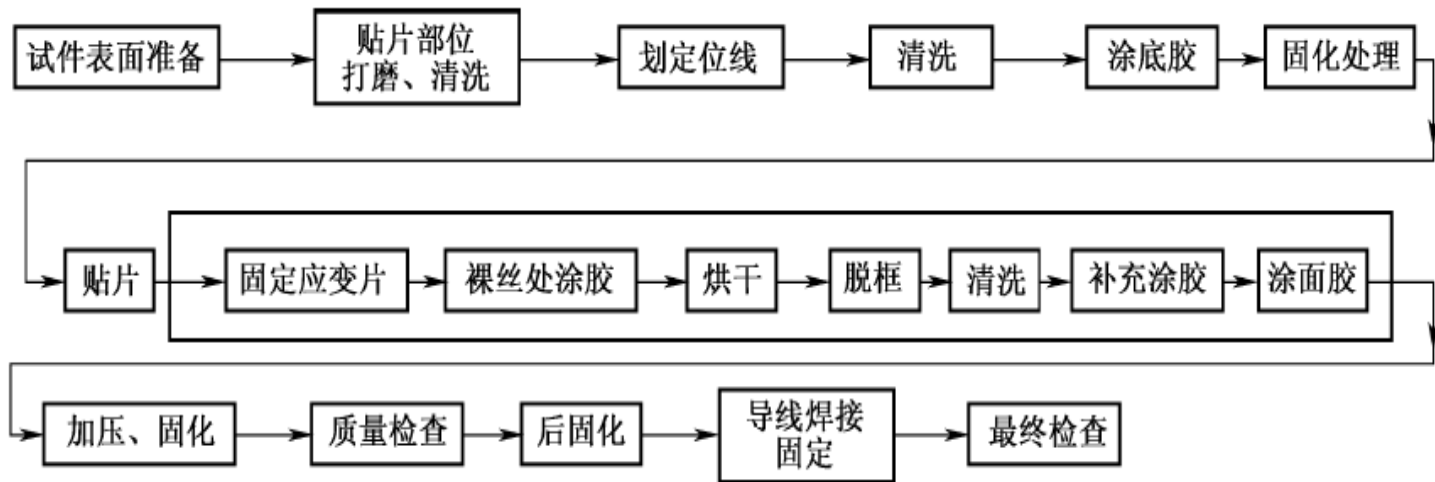
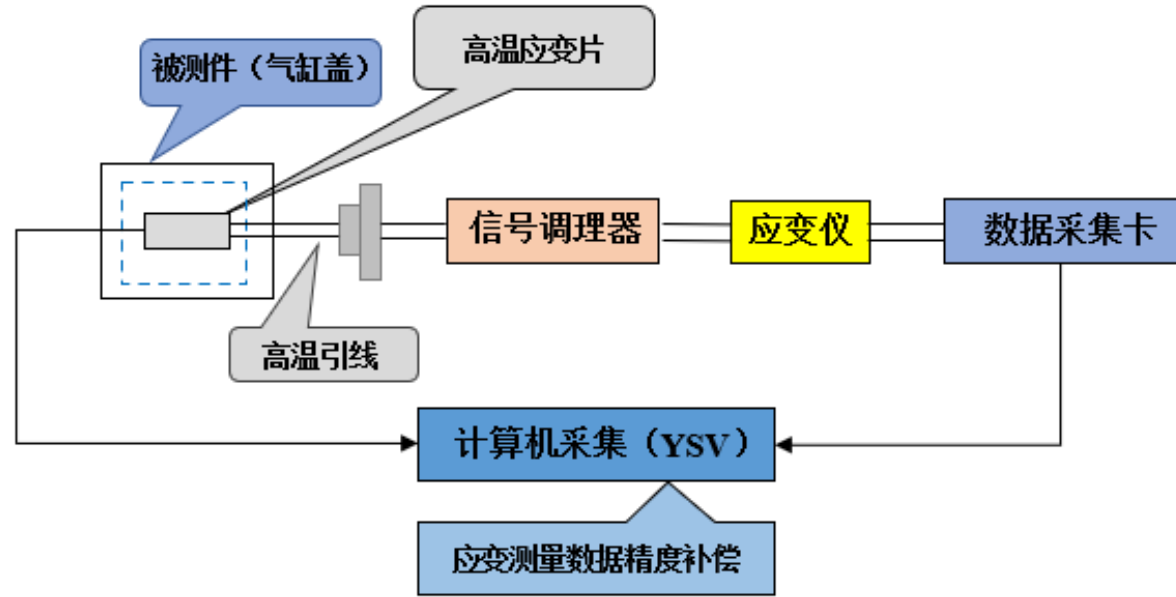
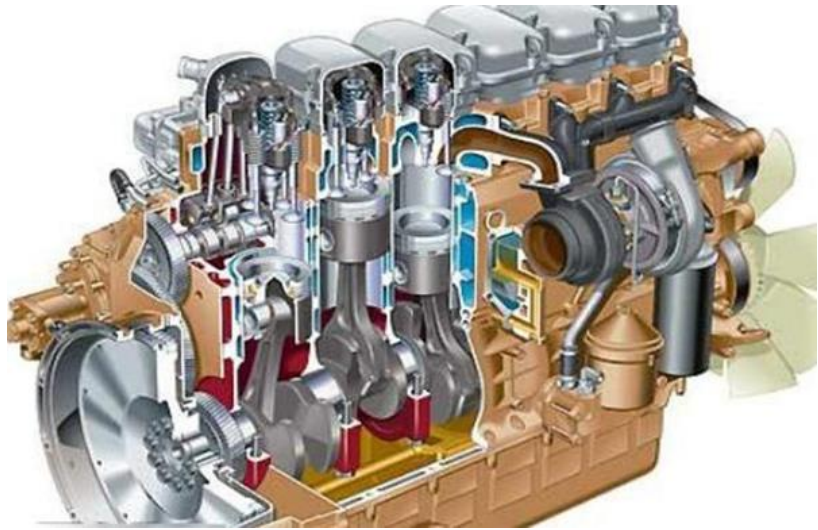
标定梁机械应变计算修正软件模块



自主开发的高温应变片参数标定装置



# 3 安装工艺的确 定 Installation process of high temperature strain gauge



### 3 安装工艺的确定 Installation process of high temperature strain gauge

高温应变片和热电偶是粘贴在缸盖表面的，所以在实验前需要先对气缸盖进行处理，保证后续实验可以正常进行。

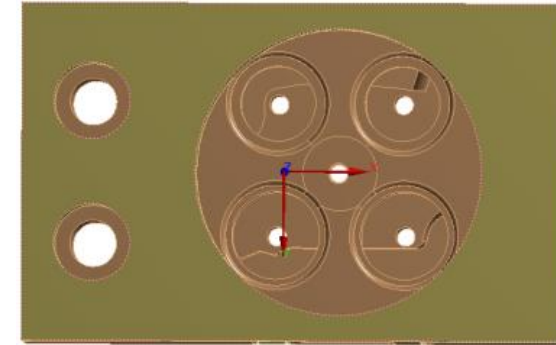


Normal - X Axis	-197.75 MPa
Normal - Y Axis	-3.5347 MPa
Normal - Z Axis	-2.5119 MPa
XY Shear	26.283 MPa
YZ Shear	1.0818 MPa
XZ Shear	-5.4639 MPa
Equivalent (von-Mises)	200.21 MPa
Maximum Principal	1.1535e-002 MPa
Middle Principal	-2.4089 MPa
Minimum Principal	-201.4 MPa
Intensity	201.41 MPa

测点1

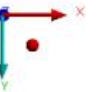
Normal - X Axis	-52.809 MPa
Normal - Y Axis	-122.39 MPa
Normal - Z Axis	-17.528 MPa
XY Shear	2.1841 MPa
YZ Shear	-7.127e-003 MPa
XZ Shear	-4.7499e-003 MPa
Equivalent (von-Mises)	92.496 MPa
Maximum Principal	-17.528 MPa
Middle Principal	-52.741 MPa
Minimum Principal	-122.46 MPa
Intensity	104.93 MPa

测点2



气缸盖火力面平面坐标系

0.00 50.00 100.00 (mm)

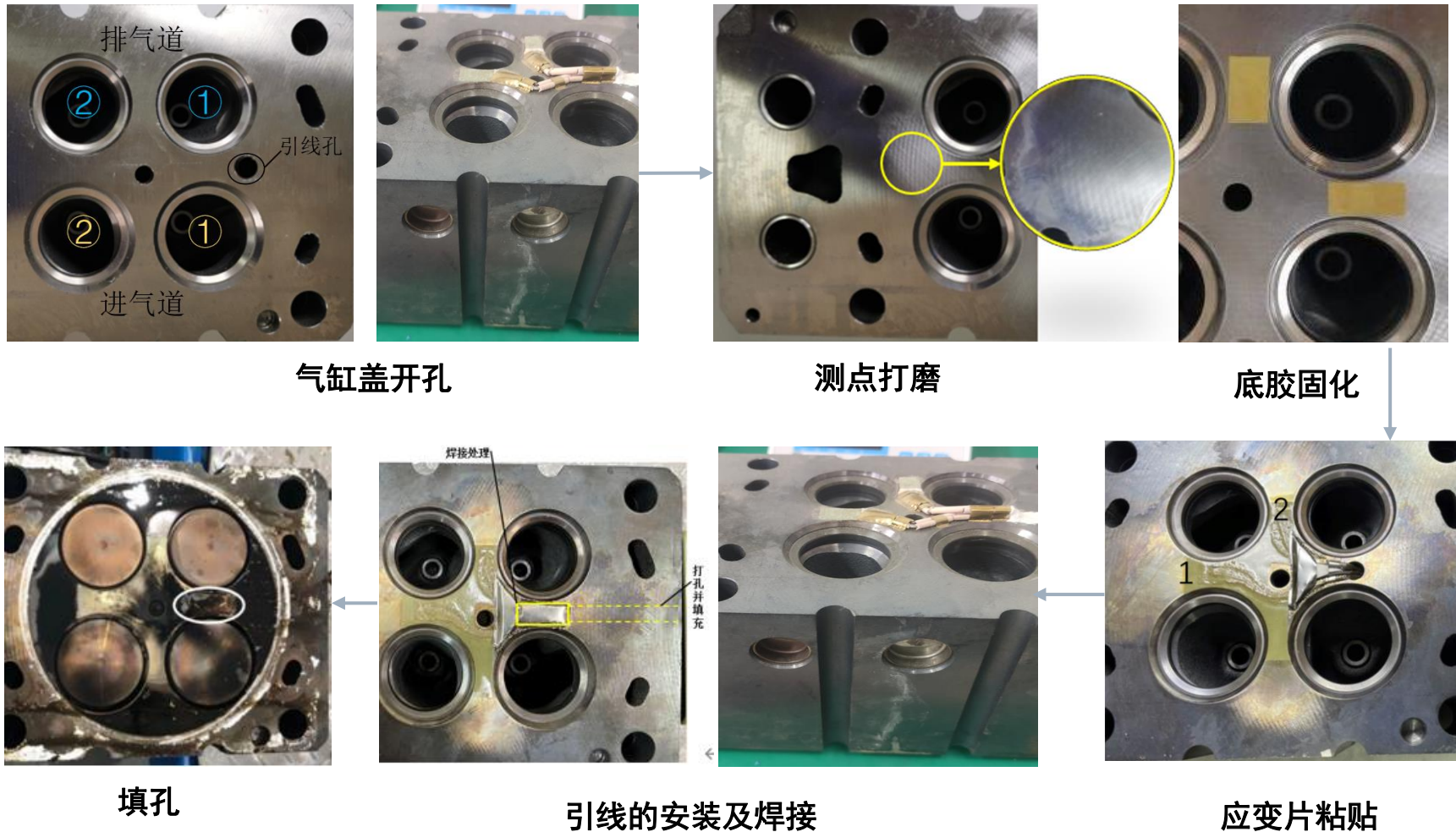


主平面方向计算公式： $\tan 2\alpha_0 = -\frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y}$  计算得测点1的角度为 $-43.68^\circ$ ，测点2的角度为 $-3.54^\circ$

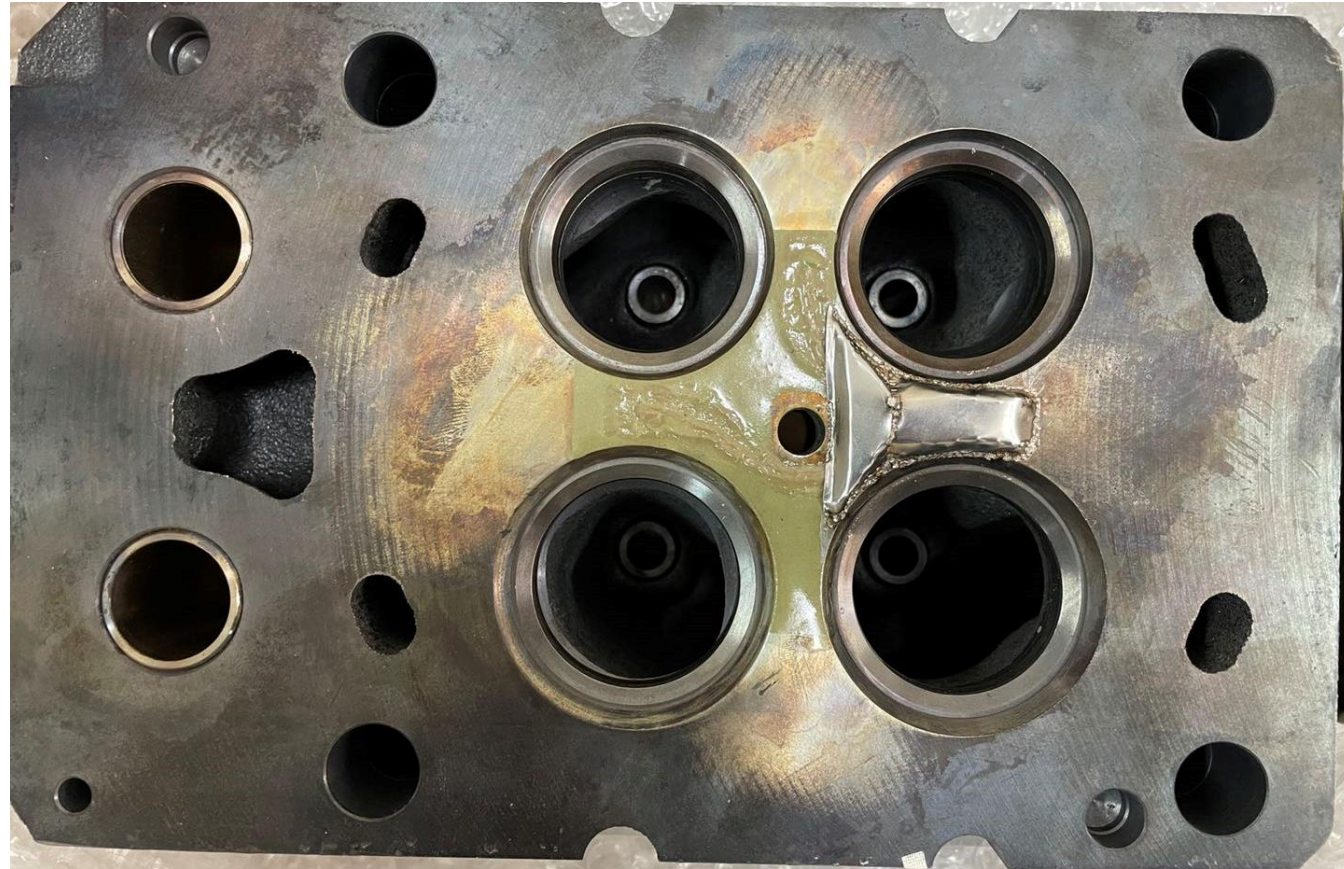
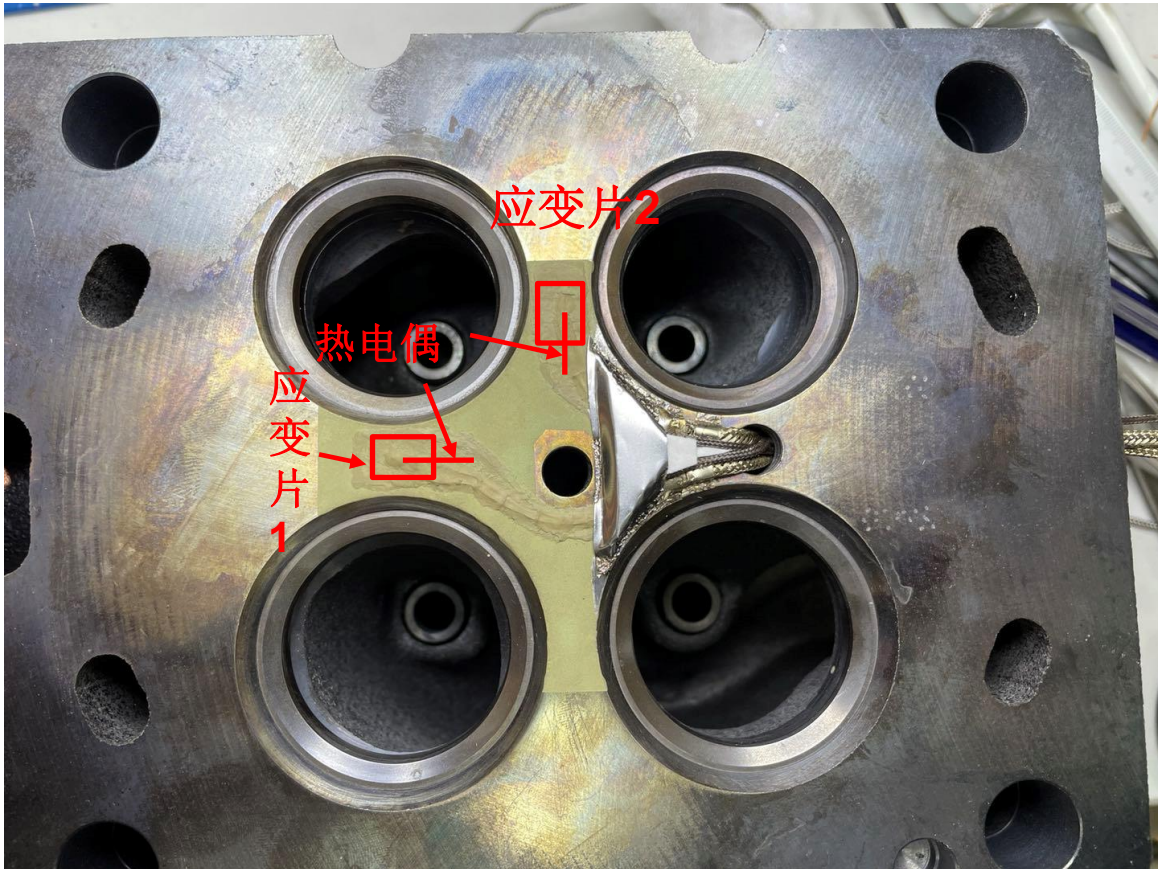
热机耦合工况下气缸盖火力面测点应力值

测点	等效应力 (MPa)	主应力 (MPa)
测点1	200.65	-201.4
测点2	92.5	-102.46

### 3 安装工艺的确定 Installation process of high temperature strain gauge



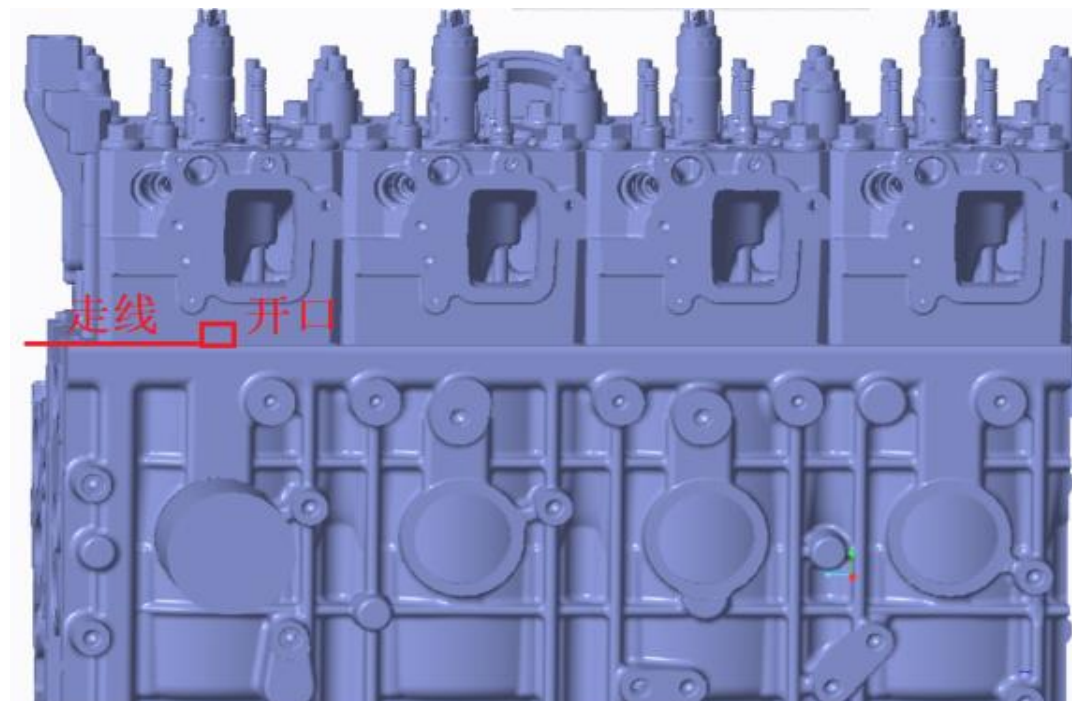
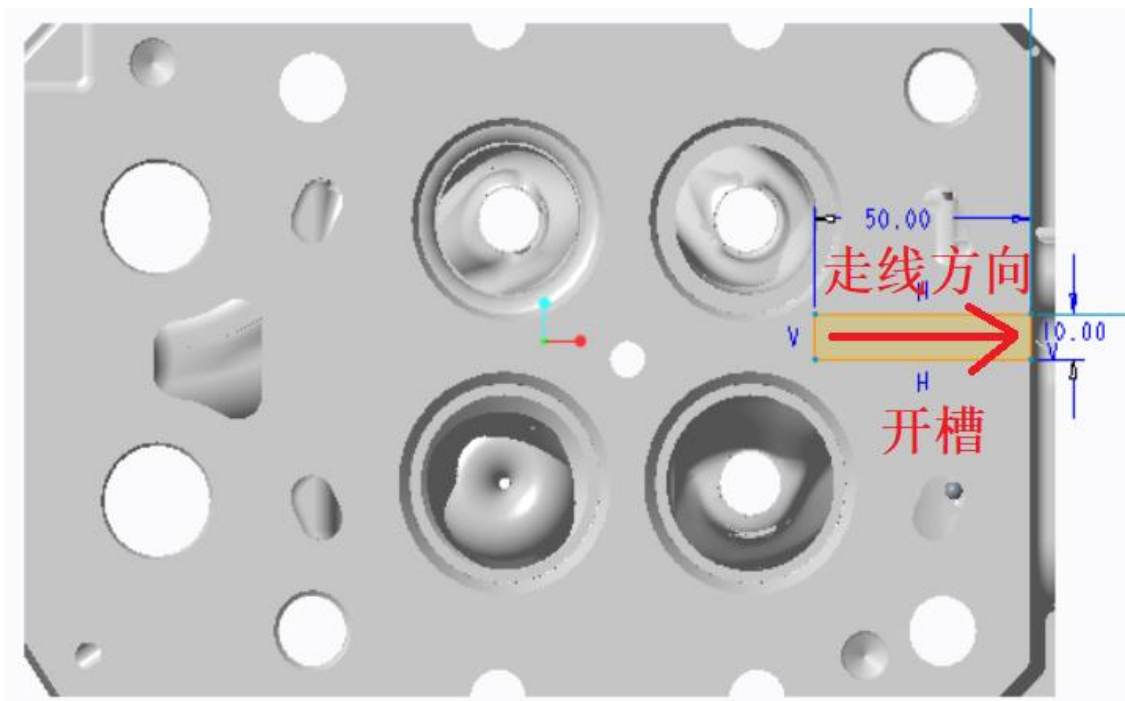
### 3 安装工艺的确定 Installation process of high temperature strain gauge



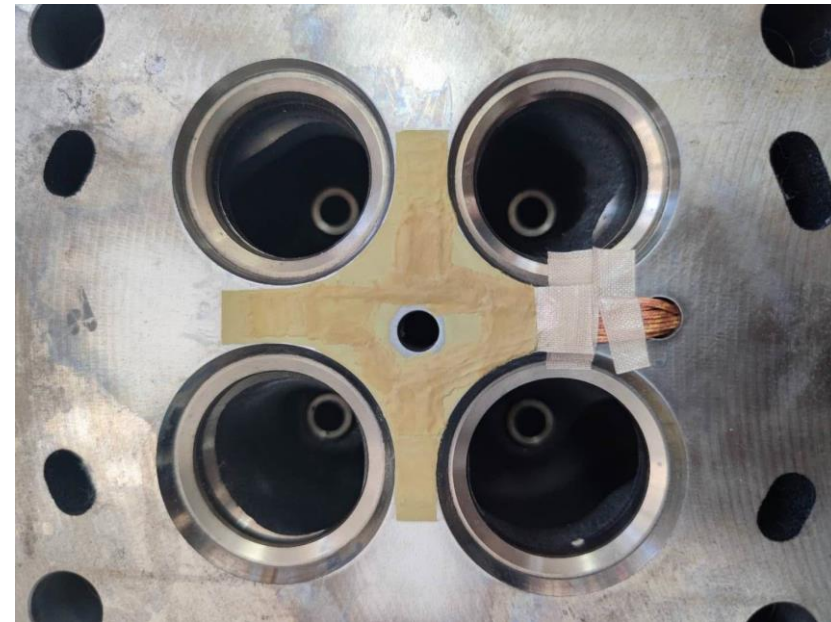
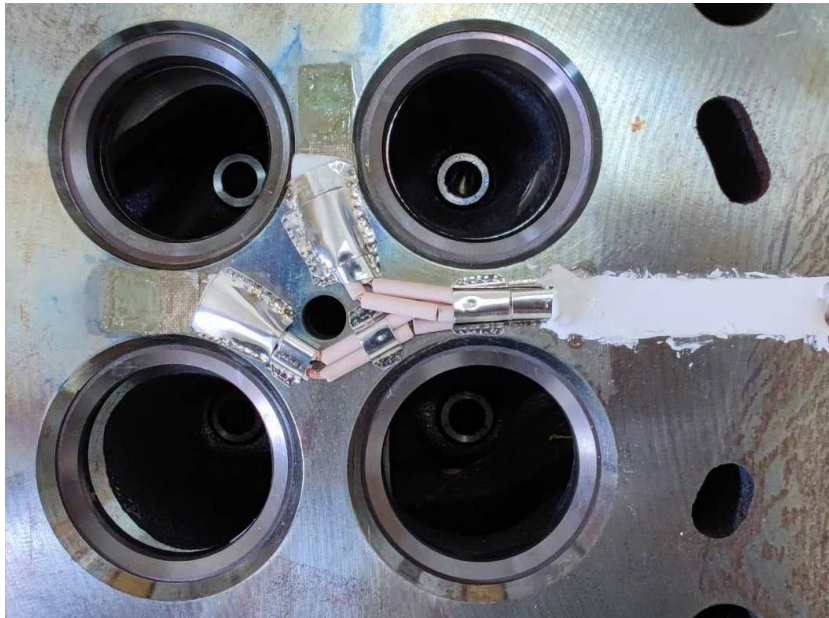
### 3 安装工艺的确定 Installation process of high temperature strain gauge

#### ➤ 高温导线传输路径设计

高温应变片布置在内燃机缸盖火力面，在汽缸中处于相对封闭的状态，应变信号需要通过高温导线传输至信号调理与采集系统，因此本项目采用在缸盖火力面开槽，打通至侧壁，将高温导线引出，线槽方案示意图如下图所示。

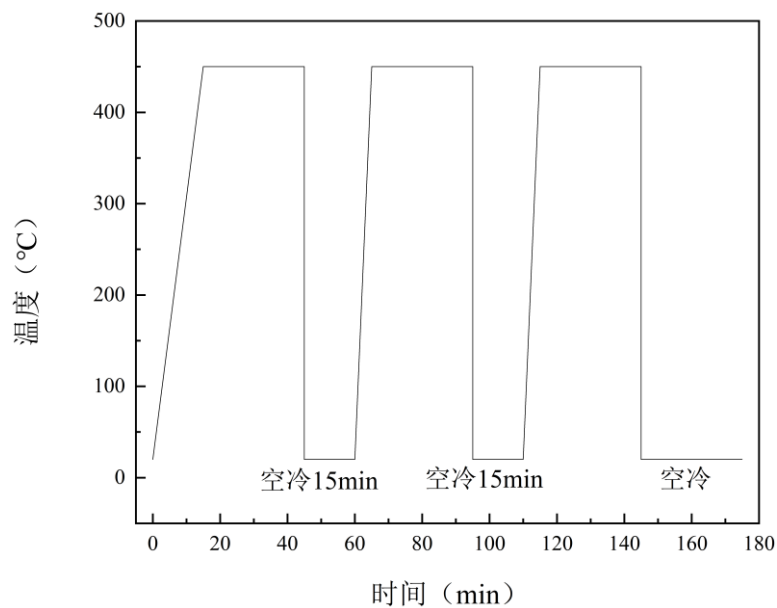


### 3 安装工艺的确定 Installation process of high temperature strain gauge



内燃机缸盖高温应变片固定

### 3 安装工艺的确定 Installation process of high temperature strain gauge



胶层强度考核温度加载图

完成高温应变片热强度考核后，将处理好的缸盖装到发动机试验台，开展高温应变测量实验。



热强度校核实验实物图



发动机试验台



试验台装配的气缸盖

### 3 安装工艺的确定 Installation process of high temperature strain gauge

- 自由框架临时基底高温应变片安装可靠性考核

#### 发动机台架考核试验



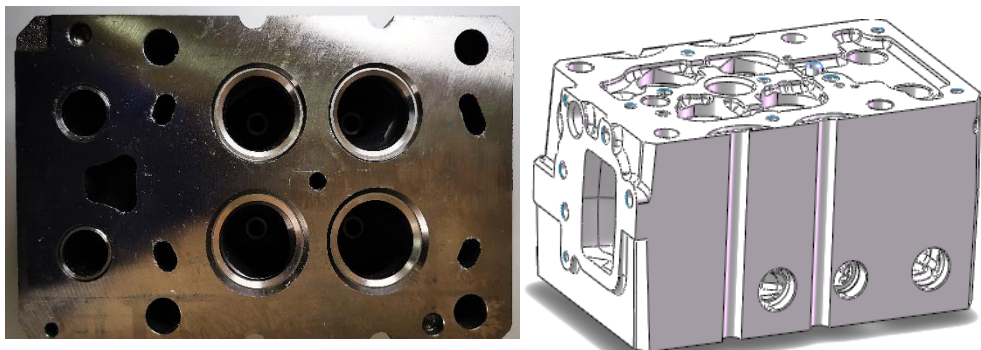
在发动机台架试验中，应变片安装未发生脱落，**粘接固化工艺能够实现在内燃机缸盖表面的可靠粘接。**



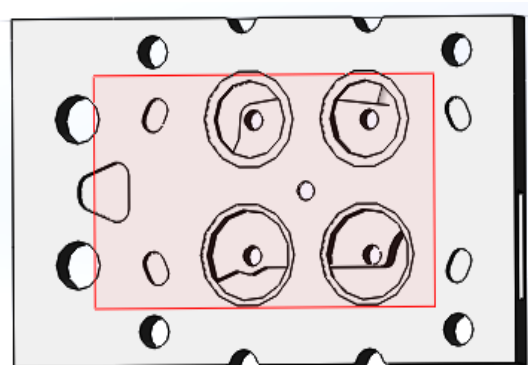
# 4 实验数据的分析 Analysis of experimental data



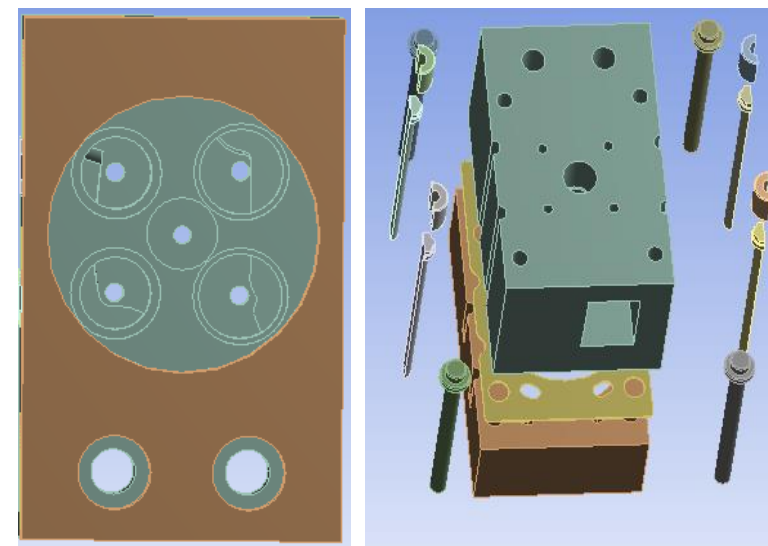
## ➤ 缸盖热机耦合有限元模拟



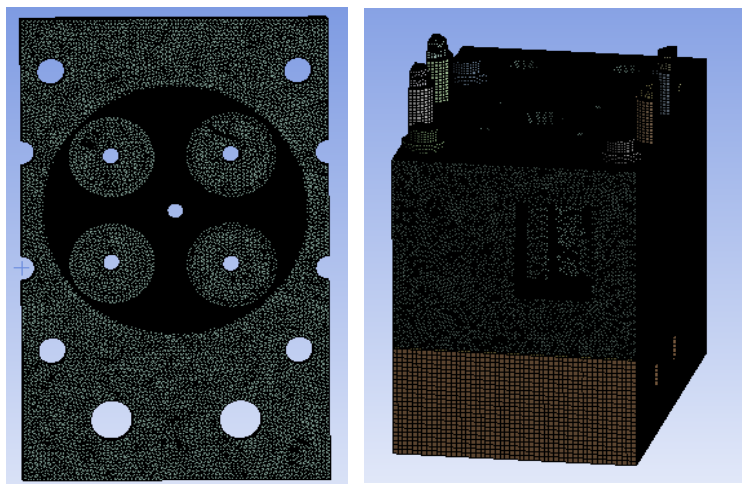
原模型



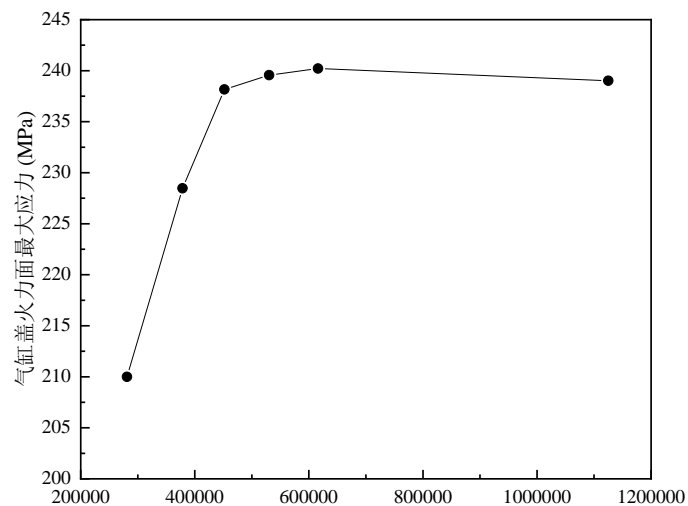
简化模型



导入有限元的三维模型



网格



网格无关性验证

网格尺寸1mm，网格的数量616172，通过了网格无关性验证。

# 4 实验数据的分析 Analysis of experimental data

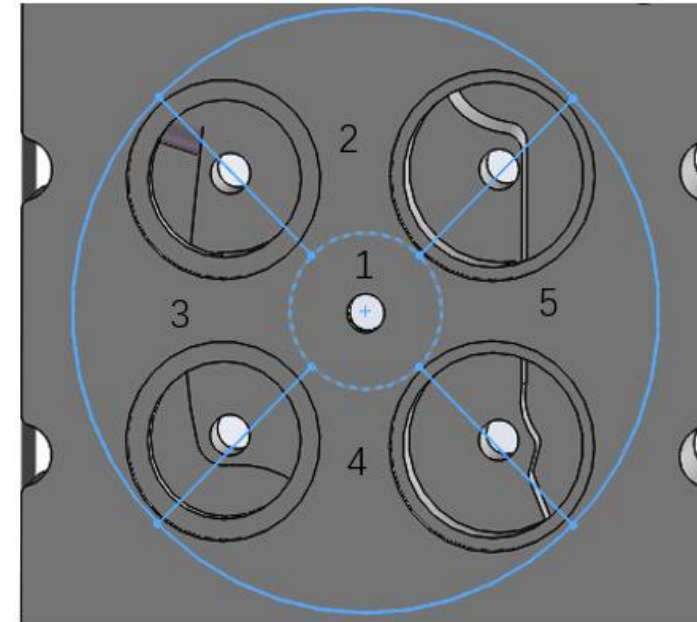
## ➤ 缸盖热机耦合有限元模拟

材料物性参数

温度 (°C)	密度 (Kg/m <sup>3</sup> )	弹性模量 (GPa)	热膨胀系数 *10 <sup>-5</sup> (1/K)	泊松 比
20		117.0	1.00	0.26
50		115.2	1.04	0.26
100		114.6	1.08	0.26
150		114.0	1.12	0.26
200		113.4	1.16	0.26
250	7120	113	1.20	0.26
300		112.6	1.24	0.26
350		111.6	1.28	0.26
400		110	1.32	0.26
450		105	1.36	0.26
500		98	1.40	0.26

气缸盖火力面各区对流系数及温度

火力面区域	对流换热系数 (W/ (m <sup>2</sup> ·K) )	温度 (° C)
1	700	730
2	800	760
3	910	800
4	750	780
5	650	700



缸盖火力面分区

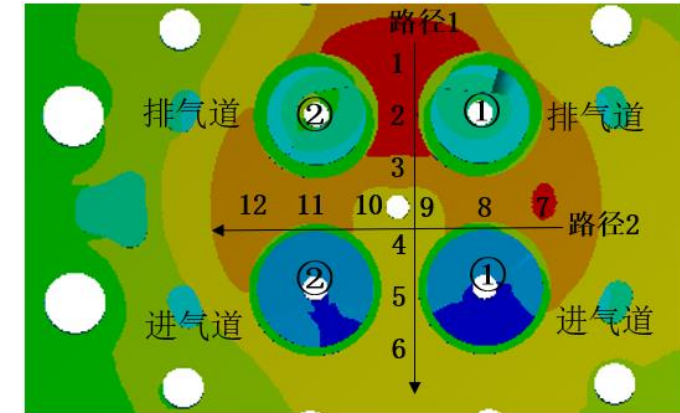
缸盖材料热力学参数

温度(k)	密度(kg/m <sup>3</sup> )	比热容 kJ/(kg·K)	导热率 (W/m·K)
290	7120	450	49
370	7120	450	47
470	7120	450	44
570	7120	450	42
670	7120	450	39
770	7120	450	37

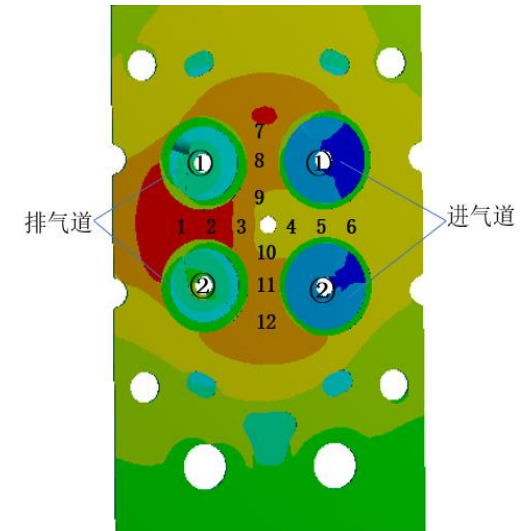
# 4 实验数据的分析 Analysis of experimental data

气缸盖温度场仿真与温度测试实验结果

测点	仿真温度 (°C)	实验温度 (°C)	相对误差
1	389.39	394.2	1.2%
2	384.09	375.8	2.2%
3	310.27	297.8	4.1%
4	187.3	174.4	7.3%
5	286.98	270.3	5.8%
6	275.97	260.6	5.7%
7	310.17	290.5	6.8%
8	307.19	285.2	7.7%
9	293.07	278.3	5.3%
10	290.27	270	7.5%
11	311.39	290.5	7.2%
12	335.73	353	4.9%



气缸盖火力面温度测点分布



仿真温度与测温实验测点的温度误差最大误差为7.7%，验证结果准确性。

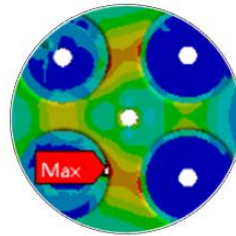
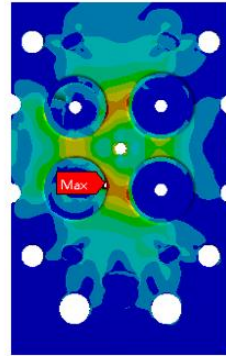
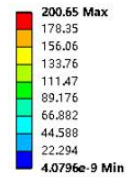
测温实验在发动机转速为1000r/min，额定功率为405kW，最大爆发压力为17.5MPa工况下开展并测取。

# 4 实验数据的分析 Analysis of experimental data



在施加螺栓的预紧力作用以及气体的爆压载荷作用下，再对缸盖施加热载荷。

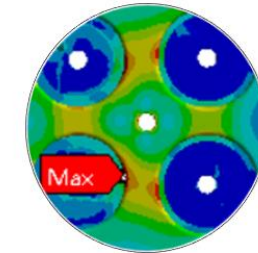
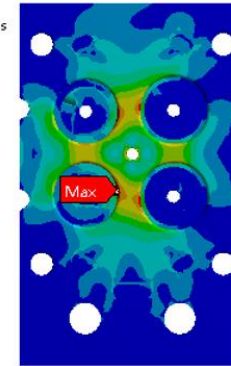
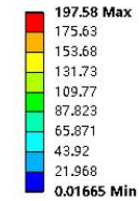
Equivalent Stress 2  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: MPa  
Time: 1



火力面局部放大图

气缸盖稳态应力分布云图

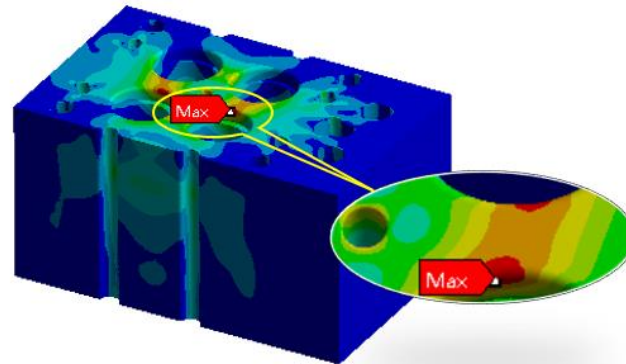
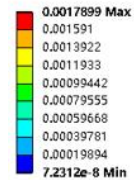
Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: MPa  
Time: 0.54



火力面局部放大图

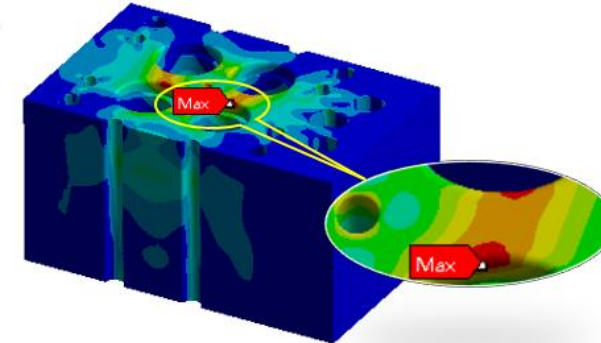
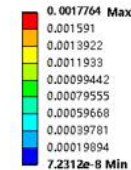
气缸盖瞬态应力分布云图

Equivalent Elastic Strain  
Type: Equivalent Elastic Strain  
Unit: mm/mm  
Time: 1



气缸盖稳态应变分布

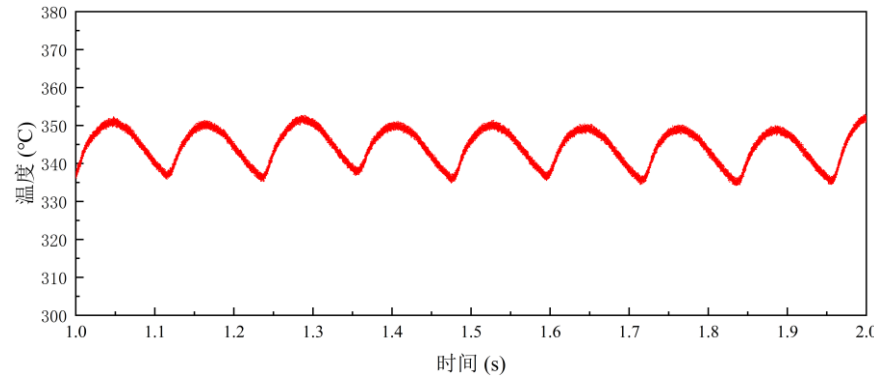
Equivalent Elastic Strain  
Type: Equivalent Elastic Strain  
Unit: mm/mm



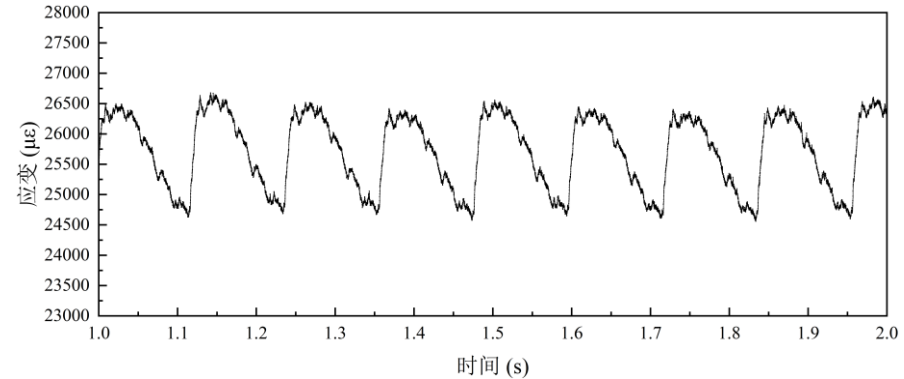
气缸盖瞬态应变分布

热机耦合工况下，稳态与瞬态分析最大应力应变位置均位于进气道与排气道鼻梁区；稳态下最大应变为 $1789.9\mu\epsilon$ ，最大热应力值为 $200.65\text{MPa}$ ；瞬态下最大应变为 $1776.4\mu\epsilon$ ，最大热应力值为 $197.58\text{MPa}$

# 4 实验数据的分析 Analysis of experimental data



温度测量局部数据



应变测量局部数据

## 测量数据修正模型的误差分析计算

温度 (°C)	加载次数	实际输出值 (με)	修正输出值 (με)	修正平均值 (με)	耦合应变值 (με)	误差 (%)
355.6402	1	26333.31	1818.817			2.73%
354.9752	2	26289.54	1821.634			2.89%
355.6197	3	26330.36	1815.907	1818.53	1789.9	2.56%
354.9437	4	26284.82	1815.251			2.53%
355.5439	5	26327.91	1821.057			2.86%

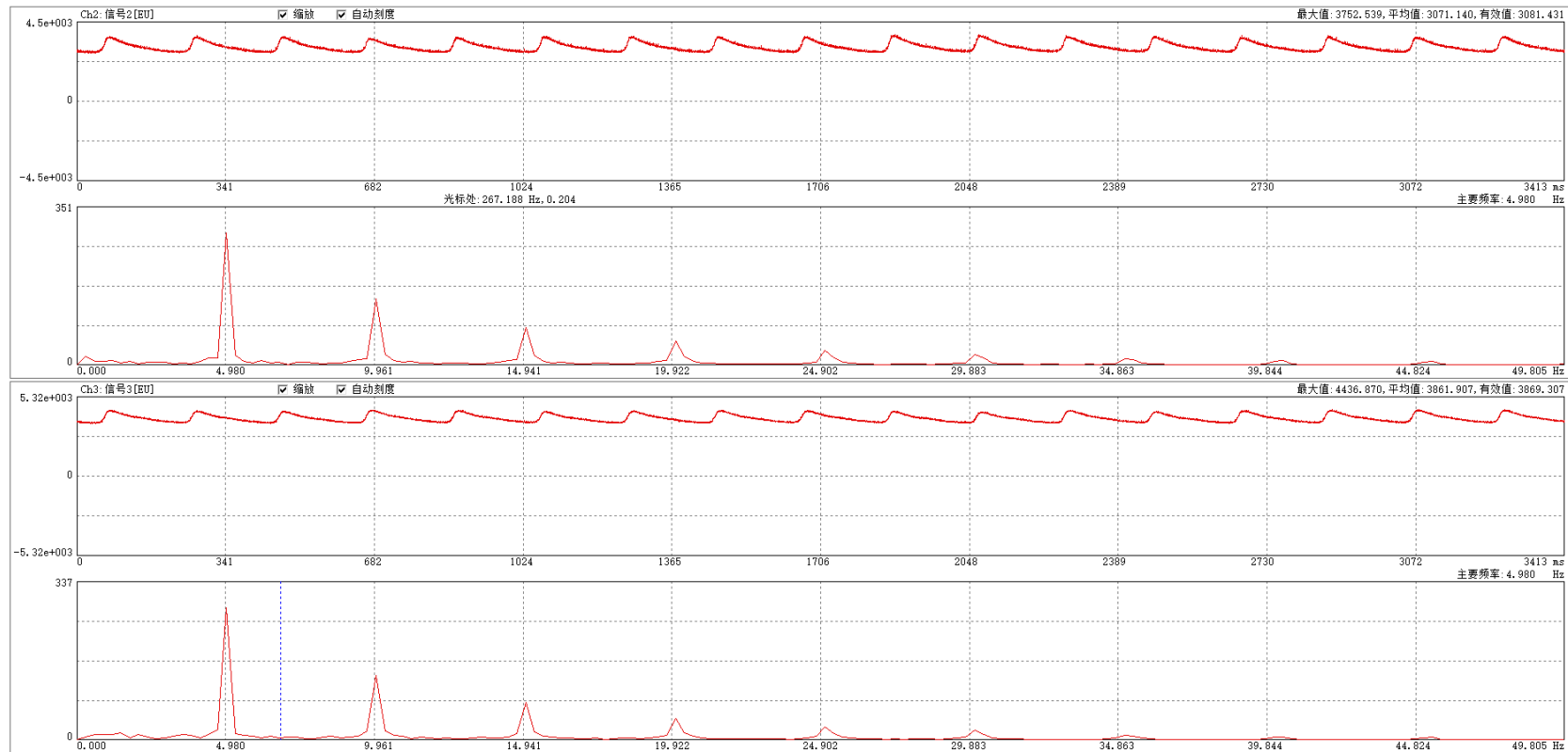
将修正平均值代入式中  $\sigma = E \times \varepsilon_{\text{实}} = 201.86 \text{MPa}$



# 4 实验数据的分析 Analysis of experimental data

600rpm, 0Nm工况下, 应变信号主频为4.98Hz, 与发动机转频10Hz相匹配。

燃烧室爆发压力导致的指示应变为816 $\mu\epsilon$ 和824 $\mu\epsilon$ , 修正后的应变为610 $\mu\epsilon$ 和640 $\mu\epsilon$

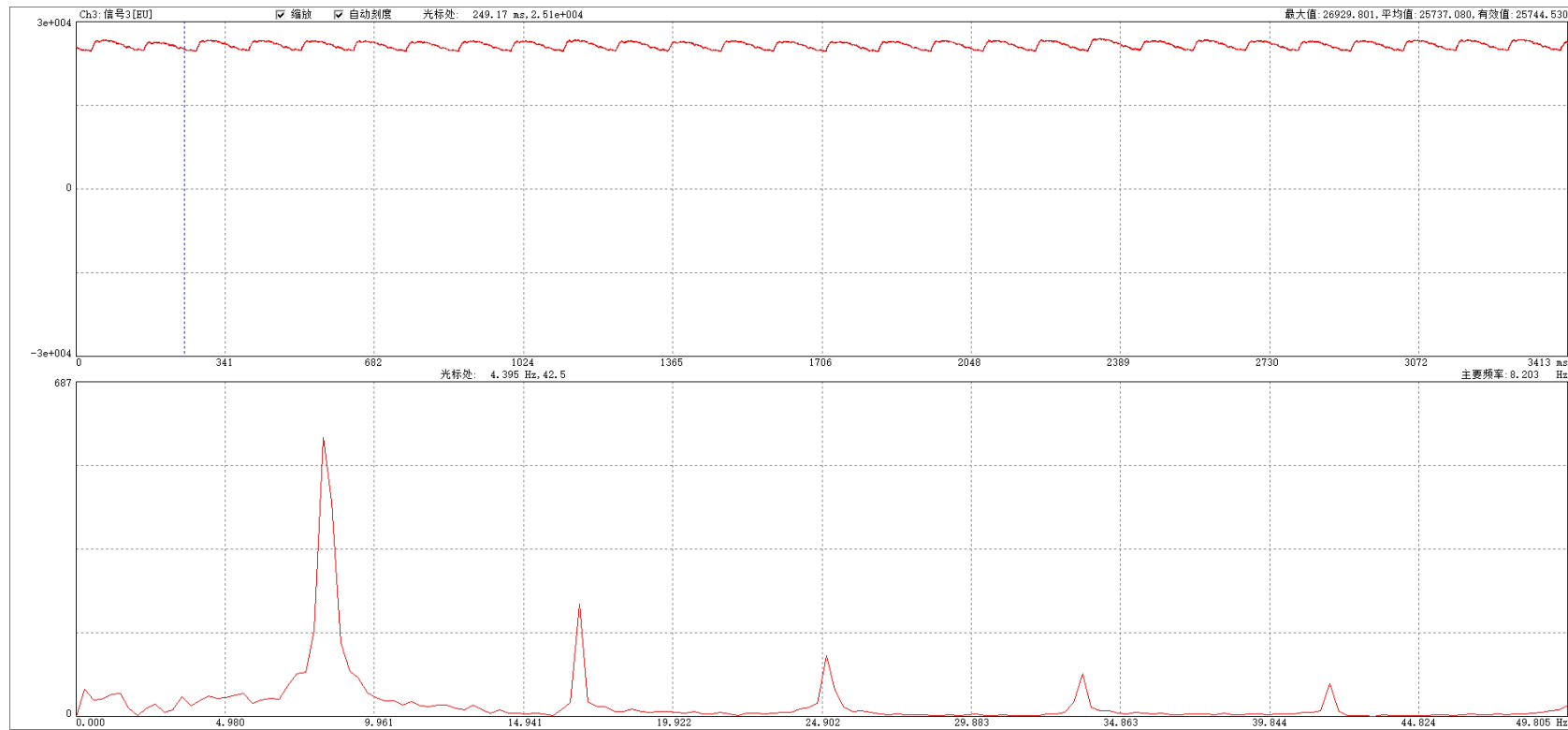


# 4 实验数据的分析 Analysis of experimental data



1000rpm, 1200Nm工况下, 应变信号主频为8.2Hz, 与发动机转频16.6Hz相匹配。

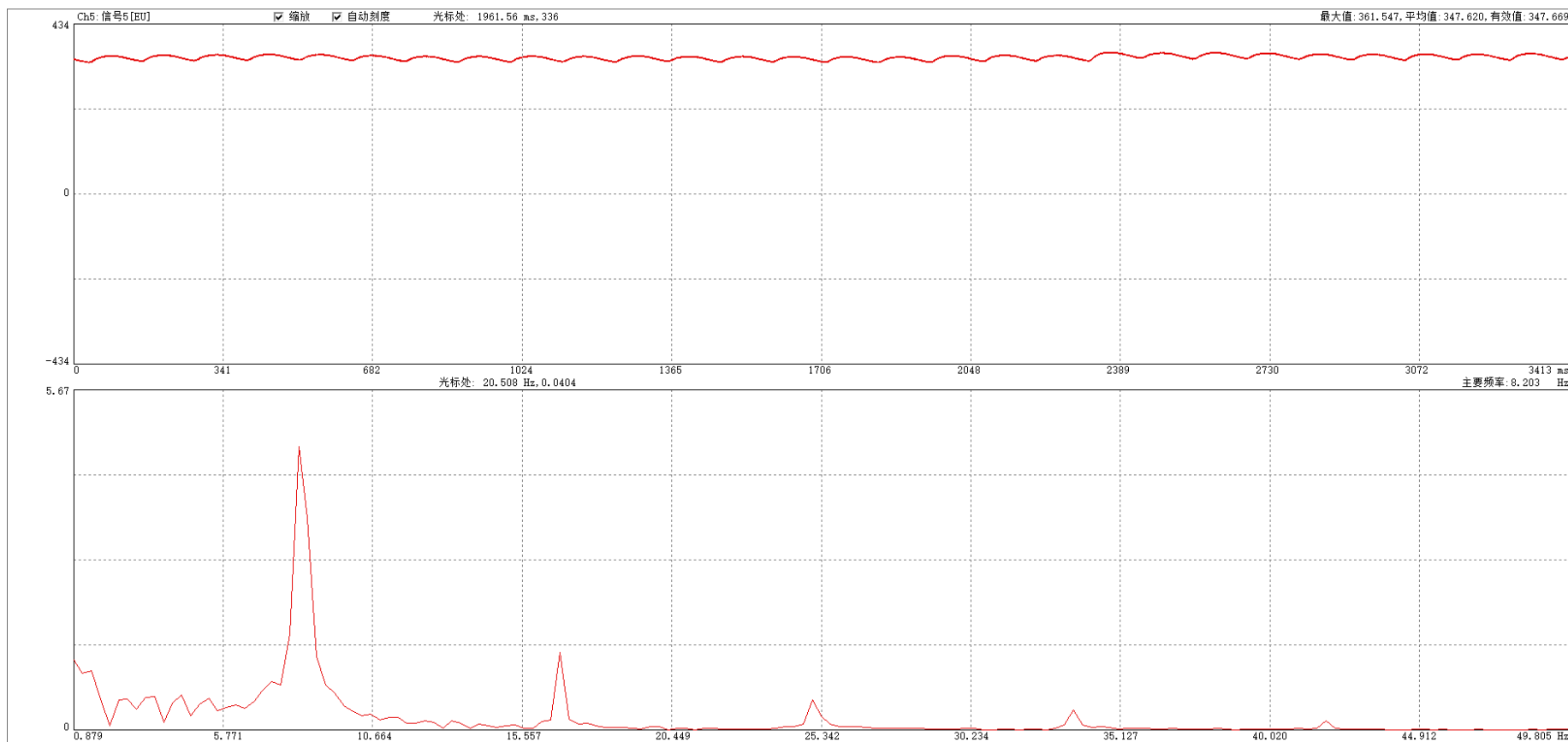
燃烧室爆发压力导致的2号指示应变为2002 $\mu\epsilon$ , 修正后的应变为1435 $\mu\epsilon$ , 应力为126MPa。



# 4 实验数据的分析 Analysis of experimental data



1000rpm, 1200Nm工况下, 2号测点温度为347°C左右, 温度信号主频同样为8.2Hz, 与发动机转频16.6Hz相匹配。

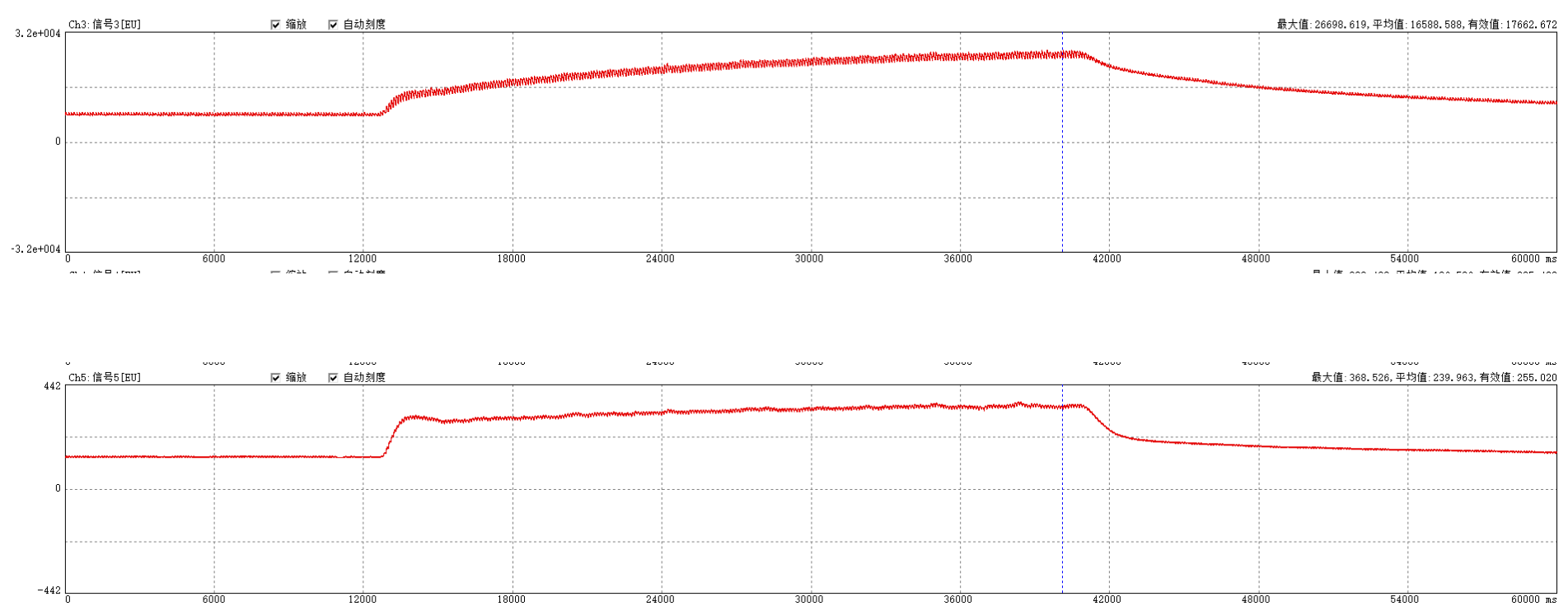




# 4 实验数据的分析 Analysis of experimental data



1100rpm, 负载按照0Nm-1200Nm-0Nm变化, 可以看到2号测点应变和温度有着相同的变化趋势。温度最大值为360°C。

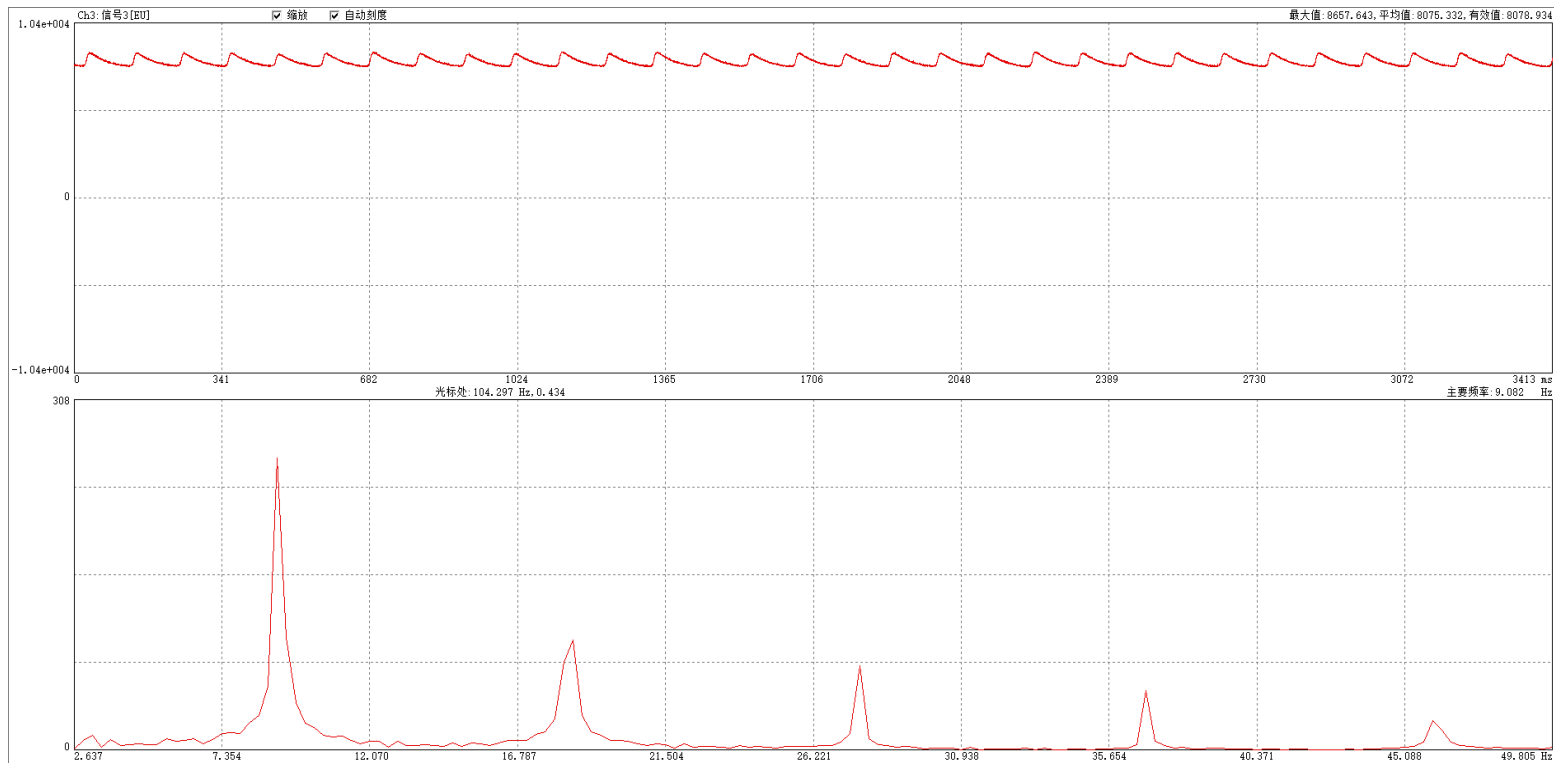


# 4 实验数据的分析 Analysis of experimental data

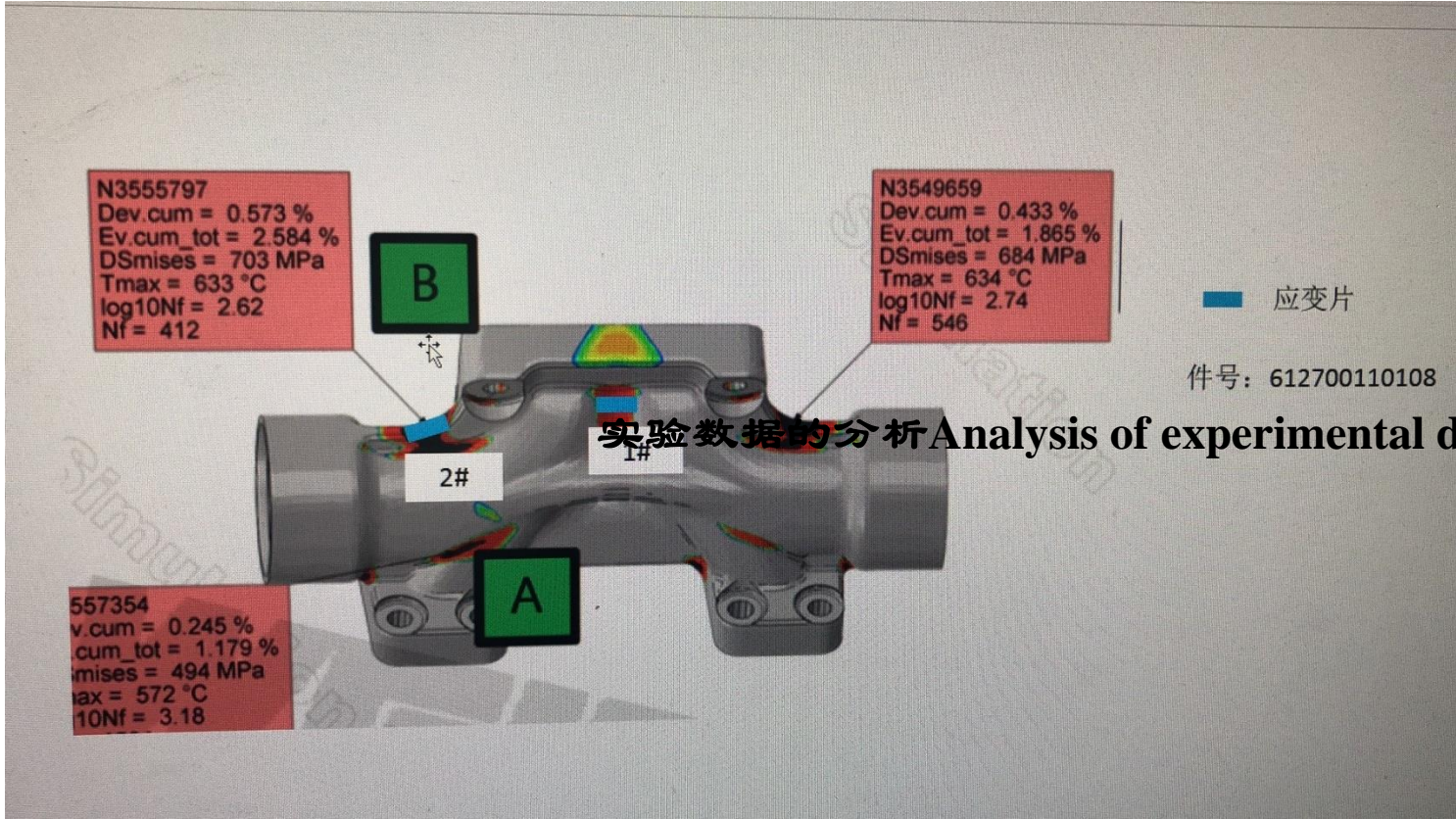


1100rpm, 负载1200Nm工况下, 2号测点应变主频为9.08Hz, 与转频18.3Hz相匹配。

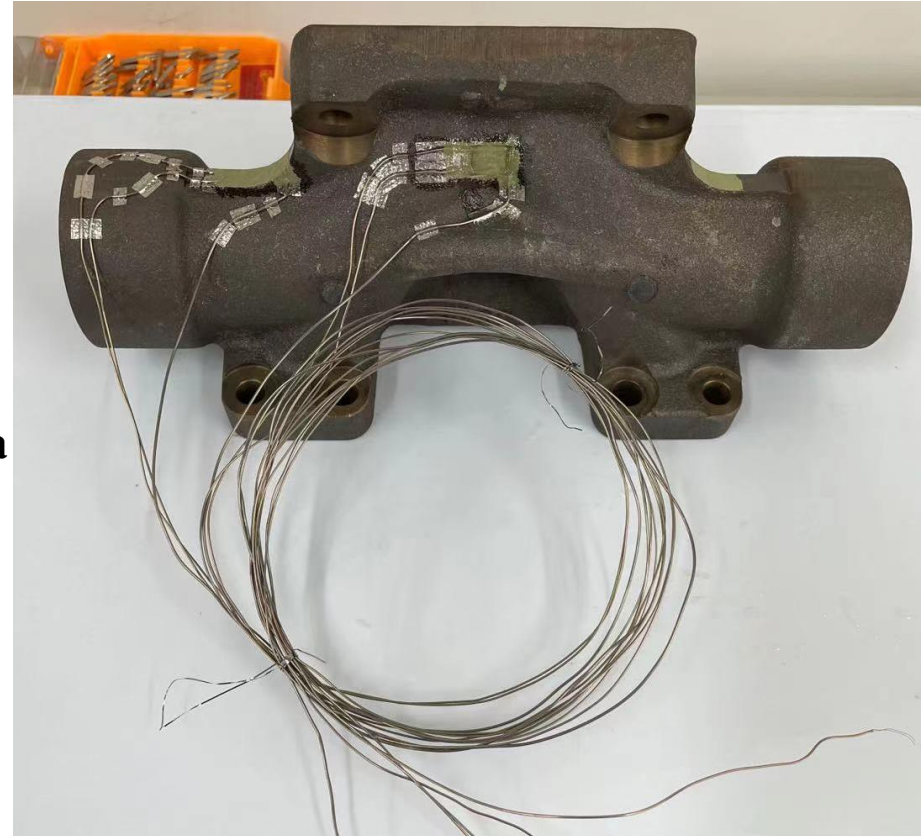
燃烧室爆发压力导致的2号指示应变为2481 $\mu\epsilon$ , 修正后的应变为1818 $\mu\epsilon$ 。



# 4 实验数据的分析 Analysis of experimental data



实验数据的分析 Analysis of experimental data





---

感谢各位，  
欢迎联系！  
[gmbitwrw@ustb.edu.cn](mailto:gmbitwrw@ustb.edu.cn)

Thank you for listening!  
Welcome to contact

