

高温应变片关键参数标定方法

王文瑞^{1 2)}✉, 张佳明¹⁾, 闫晓强¹⁾, 孙志辉¹⁾

1) 北京科技大学机械工程学院, 北京 100083 2) 北京科技大学新型飞行器技术研究中心, 北京 100083
✉ 通信作者, E-mail: gmbitwrw@ustb.edu.cn

摘要 针对自主研发的自由框架丝栅式高温应变片, 建立高温应变片参数高精度标定装置, 提出适合可行的标定方法, 确定影响高温应变片测量结果的关键参数。根据提出的关键参数标定方法, 可以得到高温应变片的灵敏度系数、热输出、零漂和蠕变特性随温度变化的曲线, 建立应变测量的精度补偿模型, 最终通过应变测量补偿验证并取得可信的结果, 表明提出的标定方法准确可行, 并可推广到其他形式的高温应变片参数测量中。

关键词 应变片; 高温环境; 参数; 标定方法; 灵敏度; 蠕变
分类号 TH823+.3; O348.5

Calibration method for the core parameters of high temperature strain gauges

WANG Wen-rui^{1 2)}✉, ZHANG Jia-ming¹⁾, YAN Xiao-qiang¹⁾, SUN Zhi-hui¹⁾

1) School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China
2) Research Center for Aerospace Vehicles Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China
✉ Corresponding author, E-mail: gmbitwrw@ustb.edu.cn

ABSTRACT A high-precision calibration device was established for self-developed free frame wire high temperature strain gauges, a feasible calibration method was introduced, and some important parameters which affect the measuring results were determined. The change curves of sensitivity coefficient, thermal output, zero-drift and creep with temperature were obtained according to the calibration method, and a compensation model was proposed for strain measurement. Verification test results prove that the calibration method is feasible and correct and can be promoted to other forms of high temperature strain gauge parameter measurements.

KEY WORDS strain gauges; high temperature environments; parameters; calibration methods; sensitivity; creep

极端高温环境下结构的高温强度、寿命、可靠性等直接关系到部件结构安全服役性能^[1]。高温环境下, 结构的力学性能发生改变, 形成热梯度应变、热疲劳等问题。目前, 热弹塑性理论对许多平面问题还不能完全解决, 更无法解决较复杂的工程热应变问题^[2-3]。结构高温强度是科研人员研究的热点, 高温应变测量也是迫切需要解决的难点问题。利用高温应变片可以实现多点和大面积高温应变测量, 通过高温应变片的精准测量成为研究高温对结构力学性能影响的问题必要手段。

接触式高温应变测量由于其测量原理简单, 可靠性高, 一直是高温应变测量的主要途径^[4-5]。然而, 高温应变片的特性参数是随温度变化的, 国外商用应变片只提供常温电阻值与灵敏度系数两个参数, 直接用于高温测量结果必然不够准确^[6]。有文献表明, 由于应变片特性参数缺失而引入的误差, 往往达到甚至超过被测应变本身^[7]。所以, 提出适用于高温应变片关键参数标定的方法, 对于应变测量精度有重要意义; 基于应变片参数标定曲线, 建立高温应变片关键参数精度补偿模型, 对高温应变测量结果的进一步分析有着

收稿日期: 2014-10-09

基金项目: 北京市高校青年英才计划资助项目(YETP0368); 航空科学重点实验室基金资助项目(20145674004); 国家重大科学仪器设备开发专项资助项目(2011YQ14014507)

极其重要的价值

本文结合高温应变片自身特性,提出高温应变片的参数标定方法,并设计高温应变片的参数标定装置,通过建立的标定方法对高温应变片在不同温度下各个特性参数进行测定,找到各参数随温度变化曲线,利用数字信号分析手段建立应变结果测量的补偿模型,以此提高结构在高温下的应变测量精度,为构件的热强度寿命等研究提供必要的实验手段。

1 关键特性参数的确定

针对接触式高温应变测量,北京科技大学研制了具有自主知识产权的自由框架丝栅式高温应变片,如图1所示,该应变片由基底、敏感栅与引线组成。基底采用铜合金箔片制成,起到支撑敏感栅,使其保持敏感栅几何形状的作用;敏感栅材料为三相应变合金,它把被测结构部件的变形转换成敏感栅的电阻变化,通过电桥电路变化成电压量输出;引线是为了便于敏感栅与外部测量导线固连而设计的专用扁带,有利于保护焊点,避免应力集中。自由框架丝式高温应变片体积小,分散度低,具有良好的电阻温度系数,可对室温至1273 K的构件应变进行测量。应变片基本参数如表1所示。

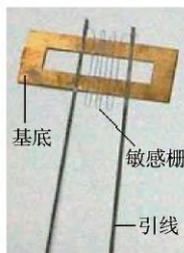


图1 自由框架丝栅式高温应变片

Fig.1 Free frame wire high temperature strain gauge

表1 高温应变片基本参数

Table 1 Basic parameters of high temperature strain gauge

| 栅丝直径/mm | 室温阻值/ Ω | 室温灵敏度系数 |
|---------|----------------|---------------|
| 0.03 | 120 \pm 1 | 2.17 \pm 5% |

高温应变片通过无机磷酸盐粘接剂经高温烘烤固定在被测试件上。热力耦合环境下,应变片所承载荷由构件的力载荷与温度载荷组成,应变片将所承载荷综合表现为敏感栅电阻值的变化。测量时,应变片的输出信号,即应变片的指示应变,主要由被测试件的机械应变、热应变以及应变片所受温度载荷引起的输出组成,如图2所示。其中 ε_{wt} 为敏感栅的热应变, ε_{at} 为高温粘接剂的热应变, ε 为被测体的真值应变, ε_t 为被测体的热应变。在长时间测量时,应变敏感栅还会产生零漂 ε_{zd} 和蠕变输出 ε_c ,共同构成应变片测量指示应变。上述应变组分对于测量数据的精确性造成极大影

响,需要找到它们随温度的变化规律,建立补偿模型对测量数据进行修正,提高测量精度。

测量时的指示应变 ε' 可由式(1)给出:

$$\varepsilon' = \varepsilon \frac{K_s}{K_T} + \varepsilon_{t0} + \varepsilon_{zd} + \varepsilon_c \quad (1)$$

式中 ε_{t0} 为整体结构产生的热输出应变,且 $\varepsilon_{t0} = \varepsilon_{wt} + \varepsilon_{at} + \varepsilon_t$; K_T 为高温应变片在对应温度下 T 下的灵敏度系数; K_s 为测量时系统初始设定灵敏度系数,一般取 $K_s = 2$ 。

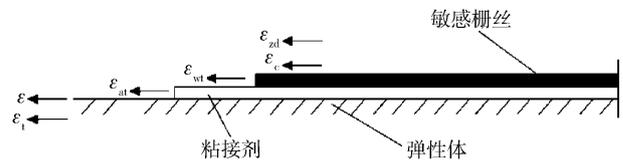


图2 高温应变片输出信号组成

Fig.2 Components of high temperature strain gauge output signal

相比于常温应变测量,高温应变测量最显著的差别是应变测量过程受到温度的影响,被测体、胶层以及敏感栅丝都会产生热应变,由于三者固定在一起,它们的综合作用决定了敏感栅实际的热应变,再结合敏感栅材料电阻值随温度的变化,共同表现为应变片热输出特性^[8]。

2 标定装置设计

2.1 结构介绍

根据高温应变片结构与工作特性,建立了高温应变片标定装置,为标定提供均匀的热力环境,如图3所示。标定装置由加热装置、夹具及加载装置、测量装置以及固定架组成。三根热电偶沿标定梁长度方向固定在标定炉内,分别采集炉内左中右三段的温度,可编程控制加热、降温及保温过程,炉内温度误差不超过2 K。千分表固定在简支梁正下方,通过石英棒测量简支梁中点处的挠度值。高温标定装置主要技术参数见表2。

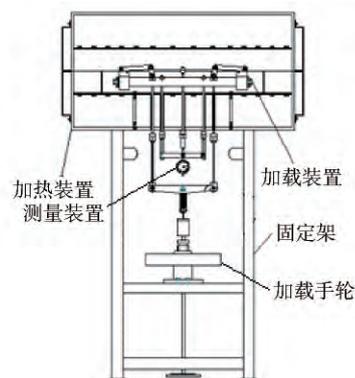


图3 高温标定装置示意图

Fig.3 Schematic illustration of the high temperature calibration device

表 2 高温标定装置主要技术参数

Table 2 Primary technical parameters of the high temperature calibration device

| 最高工作温度/K | 炉腔尺寸/(mm × mm) | 恒温控制精度/K | 均热带温差/K | 电炉轴向均热带长/mm | 热电偶规格 | 电子千分表量程/mm | 电子千分表测量误差/% |
|----------|----------------|----------|---------|-------------|-----------------------|------------|-------------|
| 1273 | φ150 × 600 | ±2 | ≤2 | 250 | 3支K型热电偶 (精度 ±0.3%) | 25 | ±0.2 |

2.2 原理

图 4 为标定装置的简支梁加载结构原理图. 标定装置采用简支等弯梁作为研究对象, 将砝码加载到简支梁上. 根据标定梁的加载方式可知, 梁上任一点的弯矩 M 为

$$M = F_{RA}x - \frac{G}{2}(x - a_1). \quad (2)$$

式中 x 为简支梁上任一位置到左支点的距离, a_1 为力的加载位置到同侧支撑点的距离. 由受力分析知, 支反力 $F_{RA} = F_{RB} = G/2$, 所以等应变段的弯矩为 $M = Ga_1/2$.

根据应力应变公式可以得到,

$$\varepsilon_0 = \frac{\sigma}{E} = \frac{M/W}{E} = \frac{6Fa_1}{Ebh^2}. \quad (3)$$

式中 ε_0 为标定装置的理论应变, 通过计算得到, 作为系统的理论真实值; σ 为标定简支梁的弯曲应力; E 为标定梁的弹性模量; W 为标定梁的抗弯截面系数, 且如图 4 矩形截面, 其抗弯截面系数 $W = \frac{bh^2}{6}$.

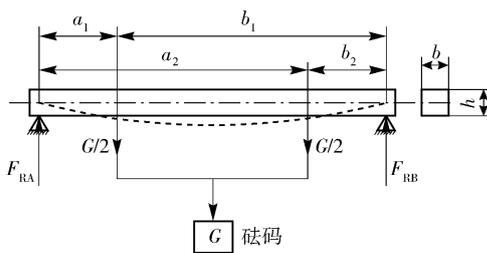


图 4 简支梁加载方式示意图

Fig. 4 Loading scheme of the simply supported beam

标定梁在加载点之间为等应变段, 便于多片安装和同时标定, 以了解应变片的一致性.

通过材料力学挠度曲线方程可知简支梁中点处的挠度为^[8],

$$\omega = \frac{\frac{1}{6}Fa_1^3 - \frac{1}{8}Fa_1l^2}{EI} = \frac{4Fa_1^3 - 3Fa_1l^2}{2Ebh^3}. \quad (4)$$

式中 I 为标定梁的截面惯性矩, 且如图 4 矩形截面, 其惯性矩 $I = \frac{bh^3}{12}$.

由式 (3) 和式 (4) 可得应变与挠度的关系为

$$\varepsilon_0 = \frac{12h\omega}{3l^2 - 4a_1^2}. \quad (5)$$

式中 h 为标定梁的厚度, ω 为标定梁中间位置产生的

挠度 l 为梁有效段的长度.

由式 (5) 可知, 标定梁表面的应变只与挠度、标定梁尺寸及加载位置有关. 在高温标定时, 转动加载手轮并配合千分表测量标定梁中点的挠度值, 可直接计算出理论应变值, 而与标定梁的材料性质无关. 该标定装置避免了由于标定梁材料弹性模量随温度变化导致的标定误差, 提高了装置理论应变值的计算精度.

3 参数标定

高温应变测试系统主要包括传感器(电阻应变计和热电偶)、信号调理器(测量电桥和应变放大器)、数据采集卡和计算机采集系统, 如图 5 所示. 测量系统将被测构件的变形转换为电信号, 通过测量电桥输出电压信号, 并由应变仪对其进行放大及滤波等处理, 数据采集卡将调理后的信号进行采样、量化和编码, 将模拟信号转化为数字信号送入计算机, 由采集软件对其进行分析处理, 并可对采集数据进行保存、重放等操作. 采集软件具有补偿模块, 可在模块中输入应变片特性参数随温度变化曲线, 软件根据热电偶测得的温度信号对测量数据进行实时补偿, 直接输出修正后的测试信号.

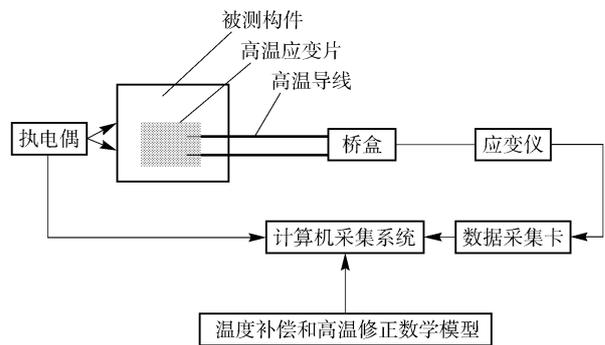


图 5 高温应变测量系统原理图

Fig. 5 Schematic diagram of the high temperature strain measurement system

如图 6 所示, 在标定梁等应变段均匀布置三个高温应变片, 应变片栅丝轴线沿标定梁主应变方向分布, 高温粘接剂经多次烘烤固化将高温应变片固定在标定梁表面. 在炉内高温区域使用套有高温陶瓷套管的高温导线, 用电焊机将其与应变片引线连接起来, 在炉外常温区使用普通导线连入采集系统, 降低导线电阻.



图 6 应变测量实验图

Fig. 6 Picture of the strain measurement experiment

3.1 灵敏度参数

灵敏度系数是指安装在被测试件上的应变片，在其轴向受到单向应力时引起的电阻相对变化，与由此单向应力引起的试件表面轴向应变之比，以 K_T 表示：

$$K_T = \frac{\Delta R / R}{\Delta L / L} = \frac{\Delta R}{R} / \varepsilon. \quad (6)$$

式中 $\Delta L / L$ 为试件表面上的轴向应变 $\Delta R / R$ 为由 $\Delta L / L$ 所引起的电阻的相对变化。随着环境温度的升高或降低，应变栅材料的灵敏系数、基底和粘接剂的弹性模量和泊松比的变化不可忽略，应变片的灵敏系数也随之变化。因此在高温测量时，也必须进行应变片的灵敏系数标定和修正^[9-10]。

根据式(6)可知，设定不同的灵敏度系数，会得到不同的指示应变，可化为

$$K_T \varepsilon_0 = K_s \varepsilon_s, \quad (7)$$

$$K_T = K_s \varepsilon_s / \varepsilon_0. \quad (8)$$

式中 ε_s 为加载某一载荷时应变仪输出应变值。启动加热装置，当标定装置内温度稳定后对标定梁加载，使其产生 10^{-3} 的应变，待稳定 1 min 后记录千分表读数 ω 和应变仪输出应变 ε_s ，通过式(8)计算得到应变片的灵敏系数 K_T ，计算得到应变片的灵敏系数 K_T ，采集系统记录这一加载、卸载过程的数据见图 7。

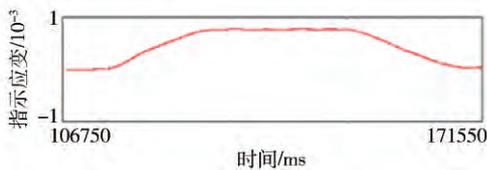


图 7 采集系统信号图

Fig. 7 Signal figure of the acquisition system

采用上述方法对美国 HPI 公司 PAS660H 型号应变片进行标定，得到其常温灵敏度系数为 2.25，与该型号应变片给定的灵敏度系数 2.32 相差 3.0%，证明本文标定方法的正确性与标定结果的精确性。

对多组自制应变片的灵敏度系数进行标定并拟合，得到灵敏度系数随温度变化曲线，如图 8 所示。

自制高温应变片灵敏度系数随温度升高逐渐降低，这一规律符合高温应变片灵敏度变化趋势^[8]。当温度达到 1073 K 时，灵敏度系数仍有 1.75 左右，可根

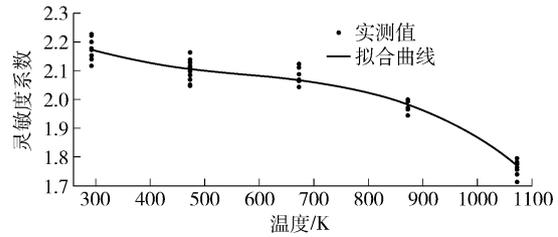


图 8 不同温度下灵敏度系数及拟合曲线

Fig. 8 Sensitivity coefficients at different temperatures and fitting curve

据该曲线对测量数据的灵敏度进行补偿，如式(9)所示：

$$\varepsilon = \varepsilon' \frac{K_T}{K_s}. \quad (9)$$

3.2 热输出参数

应变片是利用应变电阻效应测量应变的，当环境温度变化时，固定在构件上的应变片也会感受到温度的改变而产生电阻的变化，即为应变片的温度效应，用热输出应变这一工作特性度量该效应。应变片的热输出应变不仅与电阻温度系数和敏感栅材料的热膨胀系数有关，还与试件材料的热膨胀系数有关。

测量应变片热输出应变时，待测量环境温度稳定 15 min 后开始测量，同时记录温度与指示应变值，直至最高温度。对多组应变片的热输出应变数据进行拟合，得到一条热输出应变随温度变化曲线，如图 9 所示。

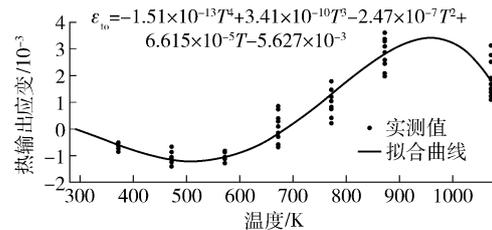


图 9 不同温度下热输出应变数据及拟合曲线

Fig. 9 Strain data at different temperatures and fitting curve

自制应变片热输出应变值随温度有非常明显的变化，呈现先负后正的变化规律，在高温下测量时可根据测量温度减掉对应的热输出应变值，如式(10)所示。

$$\varepsilon = \varepsilon' - \varepsilon_{10}. \quad (10)$$

3.3 零漂参数

电阻应变片的零漂是指应变片粘贴在试件表面后，在试件无载荷下，并在恒定温度的环境中，指示应变随时间而变化的特性参数，零漂的影响因素主要包括应变片自身质量、安装工艺、外界影响等。

在标定时待测量环境温度稳定后，不施加机械载荷直接进行数据采集，每隔 10 min 记录一次数据，总共记录 1 h，将每次应变记录值与第一次应变记录值作差，作为该温度该时间下的零漂值。对多组应变片零漂特性进行标定，得到零漂随温度与时间的变化规律，

如图 10 所示。

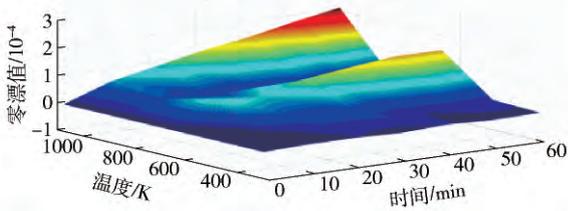


图 10 不同温度及时间下零漂数据及拟合图

Fig. 10 Fitting picture of zero-drift values at different temperatures and time

零漂数据虽然波动水平较大,但总体数值较小,在数据处理时根据温度以及测量时间对其进行补偿,如式(11)所示:

$$\varepsilon = \varepsilon' - \varepsilon_{zd} \quad (11)$$

3.4 蠕变参数

已安装的应变片,在承受恒定机械应变情况下,温

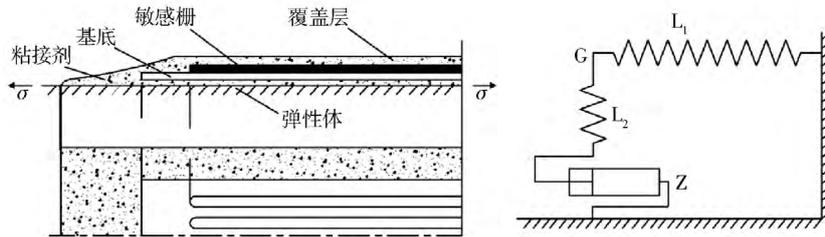


图 11 应变传递层及应变片蠕变模型图

Fig. 11 Strain transfer layer and creep model diagram of the strain gauge

在标定时待环境温度稳定后,在 15 s 内将标定梁采用位移加载方式,加载到产生 10^{-3} 应变时保持恒定,加载 1 min 之内测量,然后每隔 10 min 记录一次数据,总共记录 1 h,将每次应变记录值与第一次应变记录值作差,作为该温度该时间下的蠕变值。对多组应变片蠕变特性进行标定,得到蠕变随温度、时间的变化规律,如图 12 所示。

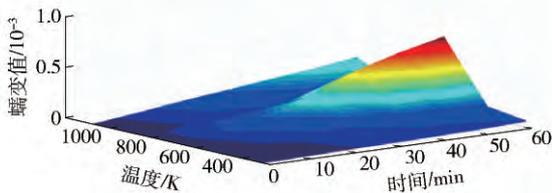


图 12 不同温度和时间内蠕变数据及拟合图

Fig. 12 Fitting picture of creep values at different temperatures and time

在进行蠕变的标定实验时发现,蠕变数据在指定温度下有着基本恒定且随时间线性变化的特征,在数据处理时可根据温度与时间对蠕变值进行补偿,如式(13)所示:

$$\varepsilon = \varepsilon' - \varepsilon_c \quad (13)$$

度恒定时指示应变随时间变化,称为应变片蠕变。研究表明,蠕变误差是严重影响应变测试精度及长期稳定性的一个不能忽略的因素。

应变片的蠕变可归咎于粘接剂和应变片基底所构成的应变传递层的流变学特性。如图 11 所示,假设应变片承受的拉伸应力为 σ ,则受拉伸的敏感栅相当于一个被张紧的弹簧,而粘接剂和应变片基底材料受到一个相反的松弛力,使敏感栅往回缩短,产生一个负的蠕变误差。假设应变片的敏感栅用具有弹性常数 A 的拉伸弹簧 L_1 表示,粘接剂和基底材料的弹性特性用具有弹性常数 B 的剪切弹簧 L_2 表示,粘接剂和基底材料的蠕变用具有摩擦系数 R 的阻尼元件 Z 表示。通过分析拉伸弹簧 L_1 和剪切弹簧 L_2 的交点 G 的状态,可以得到相对蠕变为

$$\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} = 1 - e^{-\frac{Bt}{R(1+B/A)}} \quad (12)$$

式中 $\Delta\varepsilon/\varepsilon$ 为相对蠕变, t 为时间。

4 实验算例

进行高温应变测量实验,验证误差修正模型的补偿精度。测试环境温度为常温至 1273 K,对简支梁定位移加载,产生 10^{-3} 的真值,测试系统的指示应变值如图 13 所示。

按照式(1)对测量的指示应变进行修正,将高温指示应变及其补偿结果列于表 3。由表中数据可知,基于高温应变片关键参数的取得与精度补偿模型的建立,使 1273 K 时的平均测量误差降低到 13.02%。

5 结论

针对自行研制的自由框架丝式高温应变片,建立高精度高温应变片参数标定装置,提出适合可行的标定方法,确定影响应变片测量结果的关键参数。根据提出的关键参数标定方法,开展了一系列标定实验,得到高温应变片的灵敏度系数、热输出、零漂、蠕变特性参数随温度变化曲线,并建立了测量的补偿模型,使 1273 K 时的平均测量误差降低到 13.02%,表明提出的标定方法准确可行,并可推广到其他形式的高温应变片参数测量中。

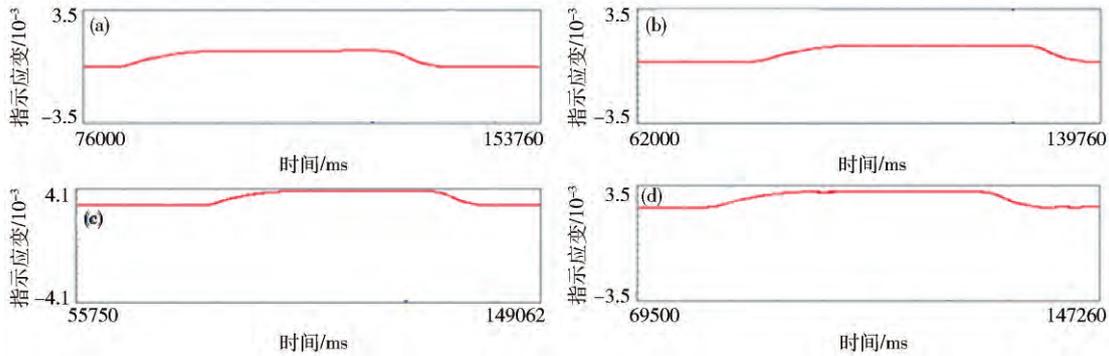


图 13 不同温度下测量实验的采集系统信号图. (a) 293 K; (b) 873 K; (c) 1073 K; (d) 1273 K

Fig. 13 Testing experiment signal figure of the acquisition system at different temperatures: (a) 293 K; (b) 873 K; (c) 1073 K; (d) 1273 K

表 3 高温应变片实测和补偿数据

Table 3 Testing and compensation data of the high temperature strain gauge

| 温度/K | 加载次数 | 实测应变值/ 10^{-3} | 修正应变值/ 10^{-3} | 真实应变值/ 10^{-3} | 相对误差/% | 平均误差/% |
|------|------|------------------|------------------|------------------|--------|--------|
| 293 | 1 | 1.072 | 0.969 | 1.0 | 3.15 | 3.15 |
| | 2 | 1.068 | 0.961 | | | |
| | 3 | 1.087 | 0.977 | | | |
| 873 | 1 | 1.309 | 1.070 | 1.0 | 7.02 | 6.62 |
| | 2 | 1.295 | 1.058 | | | |
| | 3 | 1.309 | 1.070 | | | |
| 1073 | 1 | 4.003 | 0.869 | 1.0 | 13.09 | 13.60 |
| | 2 | 3.997 | 0.864 | | | |
| | 3 | 3.991 | 0.859 | | | |
| 1273 | 1 | 2.964 | 0.852 | 1.0 | 14.83 | 13.02 |
| | 2 | 2.995 | 0.879 | | | |
| | 3 | 2.995 | 0.879 | | | |

参 考 文 献

[1] Yin F Y. Structural model of foil strain gage and finite element analysis. *Weigh Instrum*, 2009, 38(5): 47
(尹福炎. 箔式应变片结构模型与有限元分析. *衡器*, 2009, 38(5): 47)

[2] Rajan G, Semenova Y, Mathew J, et al. Experimental analysis and demonstration of a low cost fibre optic temperature sensor system for engineering applications. *Sens Actuators A*, 2010, 163(1): 88

[3] Torres B, Payá-Zaforteza I, Calderón P A, et al. Analysis of the strain transfer in a new FBG sensor for structural health monitoring. *Eng Struct*, 2011, 33(2): 539.

[4] Yin F Y. Correction technique for high temperature strain gage under transient heating conditions. *Struct Environ Eng*, 2005, 32(1): 36
(尹福炎. 瞬态加热条件下高温应变计测量误差的修正方法. *强度与环境*, 2005, 32(1): 36)

[5] Wu D, Chen D J, Zhang S H, et al. High temperature strain measurement of typical components in hypersonic vehicle. *Missiles Space Veh*, 2012(6): 30
(吴东, 陈德江, 张松贺, 等. 高超声速飞行器典型部位高温应变测量. *导弹与航天运载技术*, 2012(6): 30)

[6] Wang X, Jiang C J, Hui S J, et al. Fire resistance behavior of the inorganically post-installed rebar connection. *J Sichuan Univ Eng Sci Ed*, 2013, 4: 27
(王欣, 姜常玖, 惠守江, 等. 无机胶植筋式后锚固连接的抗火性能研究. *四川大学学报: 工程科学版*, 2013, 4: 27)

[7] Ye Y X, Sun T H, Ai Y Y. Simulation study of temperature influence on testing precision of strain gauge. *J Shenyang Aerosp Univ*, 2013, 30(2): 27
(叶迎西, 孙天贺, 艾延延. 温度对电阻应变片测量精度影响的仿真研究. *沈阳航空航天大学学报*, 2013, 30(2): 27)

[8] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, People's Republic of China. GB/T13992—2010 *Metallic Bonded Resistance Strain Gauges*. Beijing: Standards Press of China, 2010
(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T13992—2010 金属粘贴式电阻应变计. 北京: 中国标准出版社, 2010)

[9] Xu S F. The error analyse of static strain measurement. *Helicopter Tech*, 2010(1): 47
(徐顺飞. 静态应变测量的误差分析. *直升机技术* 2010(1): 47)

[10] Schultes G, Frey P, Goettel D, et al. Strain sensitivity of nickel-containing amorphous hydrogenated carbon (Ni: a-C: H) thin films prepared by r. f. sputtering using substrate bias conditions. *Diamond Relat Mater*, 2006, 15(1): 80