

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2019.04.11

高温灵敏系数标定影响因素分析

晏志鹏

(中航电测仪器股份有限公司, 陕西 汉中 723000)

摘要: 高温应变计是高温结构强度测试、疲劳测试和寿命评估的主要测量传感器, 其灵敏系数测试的准确性影响高温应变测试中应变修正数据的真实性。对应变计灵敏系数原理进行分析, 明确灵敏系数是应变计输出与应变之间的关系, 对砝码加载四点式简支梁结构和纯弯矩钢架梁结构灵敏系数测量模型进行分析, 确定产生标准应变的影响因素。常温灵敏系数标定的影响因素有试验梁尺寸、试验梁轴向力, 实际灵敏系数测试结果表明简支梁灵敏系数略大, 分散明显较大。高温下应变计的输出与载荷应变、应变计热输出、试验梁尺寸变化、弹性模量变化和摩擦力变化有关, 对热输出消除方法进行探讨, 理论上明确温度下简支梁尺寸变化、弹性模量变化误差高达 22%, 钢架梁的刚性封闭静态力学平衡系统的温度影响误差较小。利用自研框架式高温裸栅应变计、高温陶瓷胶, 进一步用简支梁、钢架梁实际测试灵敏系数随温度变化验证了理论分析的正确性。

关键词: 砝码; 简支梁; 钢架梁; 高温应变计; 灵敏系数; 应变; 误差

中图分类号: TB9

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2019)04-0085-08

Analysis of Influence Factors for High Temperature Sensitivity Calibration

YAN Zhipeng

(Zhonghang Electronic Measuring Instruments Co., Ltd. Hanzhong 723000, China)

Abstract: High temperature strain gauge is the main measurement sensor for high temperature structure strength test, fatigue test and life evaluation. The accuracy of gage factor affects the authenticity of strain correction data in high temperature strain test. Based on the analysis of the principle of the gage factor, it is clear that the gage factor is the relationship between the output of the strain gauge and the strain. The influence factors of standard strain were determined through the model analysis that uses the four-point simply supported beam and pure bending moment steel beam to test gage factor. The influencing factors of gage factor calibration at normal temperature include the test beam size and the axial force of test beam. The test results of practical gage factor show that the factor of simple beam is slightly larger and the dispersion is obviously larger. The output of strain gauge at high temperature is related to the load strain, the thermal output of strain gauge, the size change of test beam, the change of elastic modulus and the change of friction force. The method of eliminating thermal output is discussed. Theoretically, the dimensional change and elastic modulus change of the simply supported beam at certain temperature can cause error as high as 22%. The temperature influence error is very small for the steel beam because it is a rigid and closed static mechanical balance system. Using self-developed free frame high temperature bare grid strain gauge and high temperature ceramic adhesive, the theoretical analysis is verified by testing the change of the gage factor of the simply supported beam and steel beam with temperature.

Key words: weights; simply supported beam; steel beam; high temperature strain gages; gage factor; strain; error

0 引言

高温应变计是高温结构强度测试、疲劳测试、应力分析和寿命评估等测试实验的主要测量传感器^[1], 广泛应用于航空、航天、化工、能源等领域。高温结构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题。利用高温应变计可以实现多点和大面积高温应变测量, 高温应变计的精准测量是研究高温结构力学性能影响问题的必要手段^[1-2]。

高温应变计测量原理简单, 可靠性高, 一直是高温应变测量的主要手段^[3-4]。高温应变计的特性参数是随温度变化的, 由于高温环境的影响, 应变计的指示应变往往与实际相差甚远, 甚至不能确定指示应变曲线的真实性^[4-5]。灵敏系数表征应变计的电阻变化与应变变形之间的关系, 这一应变计特性参数的准确性, 会对真实应变修正带来影响, 甚至引入较大的误差。究其原因是高温应变计的标定参数问题尚未完全解决, 灵敏系数标定的影响因素未能明确, 从而影响

到高温应变测试的准确度^[2,4]。

本文利用砝码加载的四点式弯矩简支梁检定装置和 SK-1 钢架梁结构装置, 分别从原理和实际测试数据对比两方面, 对高温下的灵敏系数标定误差影响因素进行分析, 为高温应变计的标定和高温测试研究提供重要参考。

1 高温应变计工作原理

高温应变计与普通应变计基本结构大体一致, 均采用金属丝或金属箔栅作为测量体, 只不过普通应变计以带有高分子材料的基底作为载体和应变传递层, 高温应变计工作温度超过 300 ℃, 甚至高达 1000 ℃ 以上, 高分子材料在这样的温度下会发生碳化和升华, 无法再作为载体传递应变。常用的康铜、卡玛合金等金属材料在高温下会发生相变, 材料自身特性发生剧烈变化, 也无法正常使用, 因此, 采用高温特性较为优异的 FeCrAl, PtW 等材料作为敏感栅或敏感丝裸栅, 带有熔接的引出裸线, 玻璃丝布增强特氟龙胶带作为固定框架, 形成框架式自由裸栅或裸丝高温应变计。在使用时采用磷酸盐陶瓷胶固定粘贴或火焰喷涂或等离子喷涂实现应变计与高温结构体安装, 进行高温应变测试。

在实际测量时, 结构试件发生变形, 应变计跟随变形, 构件表面应变通过高温陶瓷胶或喷涂陶瓷传递到应变计敏感栅上, 应变计敏感栅将变形转换为电阻变化, 根据欧姆定律应变计的电阻为

$$R = \rho \frac{nL}{nS} = \rho \frac{L}{S} \quad (1)$$

式中: R 为应变计敏感栅的电阻; ρ 为应变计敏感栅的电阻率; n 为敏感栅的栅根数; L 为单根敏感栅长度; S 为单根敏感栅截面积。

当应变计跟随试件的应变 ε 变形时, 应变计的敏感栅电阻也发生变化, 即对式(1)全微分。

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (2)$$

$$\text{其中, } \frac{\Delta L}{L} = \varepsilon, \frac{\Delta S}{S} = \frac{2\Delta r}{r} = -2\mu \frac{\Delta L}{L} = -2\mu\varepsilon$$

则

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\mu)\varepsilon + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (3)$$

式中: ε 为试件理论应变变量; μ 为试件的泊松系数。从而得出变形与电阻变化之间的关系, 即灵敏系数

$$k = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon} = 1 + 2\mu + \frac{\frac{\Delta \rho}{\rho}}{\varepsilon} \quad (4)$$

只需要测量应变计的电阻变化, 就可以得到结构试件的变形。电阻变化量较小, 可以通过惠斯顿电桥将其变为电压信号, 以利于测量。应变计测量的指示应变会通过灵敏系数修正得到真实机械变形应变。

因此, 应变计的灵敏系数的真实性和准确性对应变测量而言十分重要^[6]。

2 高温应变计灵敏系数测量模型原理

高温应变计灵敏系数标定常用的标准机械载荷变形试验原理模型有砝码加载四点式简支梁结构原理(因国内目前还未见位移加载四点式简支梁, 故本文不做分析)和钢架纯弯梁结构原理, 在此, 分别对其原理模型和计算进行分析。

2.1 砝码加载四点式简支梁结构

砝码加载的四点式简支梁结构采用两端支点支撑, 中间两点加载^[4,7], 中心点采用百分表或挠度计测量位移挠度, 其受力简图见图 1。

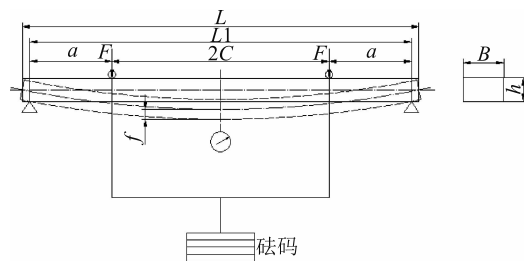


图 1 砝码加载四点式简支梁加载模型示意图

根据图 1, 加载砝码重量为 G 时, 支点反作用力 $F = 1/2G$, 属于绝对挠度弯矩测量法, 梁上任一点的弯矩为

$$M = Fx - \frac{G}{2}(x - a) = \frac{G}{2}a \quad (5)$$

根据胡克定律得

$$\varepsilon = \frac{\delta}{E} = \frac{M}{W} = \frac{6Fa}{EBh^2} = \frac{3Ga}{EBh^2} \quad (6)$$

式中: δ 为试验梁弯曲应力; E 为试验梁弹性模量; W 为试验梁抗弯截面系数, 试验梁为矩形截面, $W = Bh^2/6$; B 为试验梁宽度; h 为试验梁厚度; a 为力臂长度。

根据材料力学挠度曲线公式可知弯矩梁中心位置挠度为

$$f = \frac{4Fa^3 - 3FaL_1^2}{2EBh^3} \quad (7)$$

由式(6)、式(7)可得应变与挠度的近似关系

$$\varepsilon = \frac{12h}{3L_1^2 - 4a^3} \cdot f \quad (8)$$

式中: h 为试验梁的厚度; f 为试验梁中间点的挠度值; L_1 为试验梁有效长度(即两支点之间距离)。

由式(8)得知, 试验梁表面应变与试验梁尺寸、加载点位置、支点之间的试验梁有效长度、挠度值有关, 但如果是砝码加载, 无法做到挠度控制加载(相对挠度), 因此挠度还与弹性模量、砝码重量有关, 即弹性模量、砝码重量也会影响试验梁表面应变。从试验梁加载示意图可以看出, 砝码加载四点式简支梁结构只存在试验梁单向加载, 微观上凸、凹应变会不一致, 且多次加载易产生疲劳, 在加载过程中, 载荷通过手轮转动加载, 加载速度较慢, 测量值中易引入蠕变, 加载过程中还存在砝码冲击的问题。

2.2 纯弯矩钢架梁结构

纯弯矩钢架梁采用两端高刚度力臂开合带动试验梁弯曲变形, 中心点采用高精度三点挠度计(拉线)测量位移挠度, 并控制力臂开合度, 以保证试验梁中心点挠度达到准确值^[7-8]。其受力简图见图2。

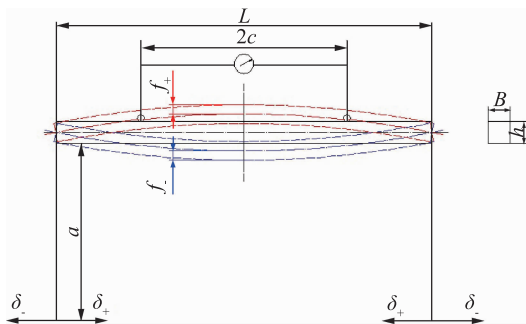


图2 纯弯矩钢架梁受力示意图

根据图2, 刚性力臂端头施加 δ 力值(δ_+ , δ_-), 试验梁两端的弯矩属于纯弯矩, 梁上任一点的弯矩为:

$$M = Qa \quad (9)$$

与简支梁一致, 根据胡克定律, 可得纯弯矩梁表面的应变大小为

$$\varepsilon_{\pm} = \frac{\delta}{E} = \frac{M}{E} = \frac{6Qa}{EBh^2} \quad (10)$$

式中: $\varepsilon_{\pm}$ 为试验梁理论应变值; Q 为试验梁弯曲应力。在实际状况下, 试验梁还受一对非常小的轴向力的影响, 在实际应用中一并考虑, 因此, 试验梁表面的凸、

凹面的真实应变为

凹面

$$\varepsilon_{\text{凹}} = \left(1 + \frac{h}{6a}\right) \times \frac{6Qa}{EBh^2} = \left(1 + \frac{h}{6a}\right) \times \varepsilon_{\pm} \quad (11)$$

凸面

$$\varepsilon_{\text{凸}} = \left(1 - \frac{h}{6a}\right) \times \frac{6Qa}{EBh^2} = \left(1 - \frac{h}{6a}\right) \times \varepsilon_{\pm} \quad (12)$$

根据三点式挠度法测得的纯弯梁凹变形和凸变形精确应变与试验梁中心位置的挠度 f 之间的关系为

$$\varepsilon_{+} = \frac{h}{\frac{c^2}{f_{+}} + f_{+} - h - \frac{1}{3}\mu h} \quad (13)$$

$$\varepsilon_{-} = \frac{h}{\frac{c^2}{f_{-}} + f_{-} + h + \frac{1}{3}\mu h} \quad (14)$$

式中: c 为三点挠度计安装支点距离的一半。

采用三点挠度计挠度值控制试验梁的加载, 试验梁的表面挠度只与试验梁的厚度、三点挠度计安装支点的距离、泊松系数和应变值有关, 当应变值、试验梁厚度、三点挠度计支点距离确定, 其挠度值也就确定了, 与试验梁的弹性模量无关, 与加载力的大小无关。纯弯矩钢架梁可以产生凸凹交变加载应变计, 载荷可以连续迅速加载, 加载到位可以迅速读取数据, 测量值中不易引入蠕变, 且加载也不存在任何冲击。

3 不同测量方式对灵敏系数标定的影响因素分析和验证

高温应变计的灵敏系数测试, 分为常温灵敏系数测试和高温灵敏系数测试。分别分析砝码加载四点式简支梁加载装置和 SK-1 纯弯矩钢架梁加载装置随温度变化的指标, 常温、高温下对灵敏系数测试的影响。

3.1 常温灵敏系数测试

通过前面的分析, 可知应变计的灵敏系数为

$$K = \frac{dR/R}{\varepsilon} \quad (15)$$

在实际测试中, 应变计的指示应变在应变以上设定的灵敏系数为2, 应变计实际计算的灵敏系数 K 为

$$K = \frac{2\varepsilon_s}{\varepsilon_j} \quad (16)$$

式中: ε_s 为应变计测试中应变计的指示应变; ε_j 为试验梁加载的标准机械应变, 标准为 $1000 \mu\text{m/m}$ 。

3.1.1 试验梁影响误差

试验梁截面是矩形, 理论上受纯弯矩量表面变形形成圆柱体面, 得到均匀的等应变场, 梁的横截面形状对梁表面应变均匀性产生影响, 影响量为

$$\omega_s = \frac{1}{2} \mu s^2 \varepsilon \quad (17)$$

式中: $s = B/h$, 梁宽和梁厚之比; μ 为试验梁泊松比; ε 为标准载荷应变, 一般为 $1000 \mu\text{m}/\text{m}$ 。

对于砝码加载的四点简支梁, 试验梁宽度 $B = 30 \text{ mm}$, 试验梁厚度 $h = 6 \text{ mm}$, $s = 30/6 = 5$, 试验梁泊松比 $\mu = 0.3$, 则

$$\omega_s = \frac{1}{2} \times 0.3 \times 5^2 \times 0.001 = 0.375\% \quad (18)$$

对于钢架梁, 试验梁宽度 B 为 25.5 mm , 试验梁厚度 $h = 25.5 \text{ mm}$, $s = 25.5/25.5 = 1$, 试验梁泊松比 $\mu = 0.3$, 则

$$\omega_s = \frac{1}{2} \times 0.3 \times 1^2 \times 0.001 = 0.15\% \quad (19)$$

从式(18)、式(19)结果来看, 钢架梁应变误差不到四点简支梁的一半。四点简支梁属于薄矩形梁, 宽厚差异较大, 易出现梁厚均匀性问题, 而影响试验梁的应变误差, 且梁越薄误差越大。钢架梁属于矩形梁, 宽度厚度一致, 梁的均匀性易保证, 加工难度相应降低。

试验梁在使用过程中, 经常贴片、打磨, 会对梁厚产生影响, 进而对试验梁的应变误差产生影响, 梁越薄这种影响就越大。

3.1.2 试验梁上轴向力带来的挠度影响误差

采用砝码加载的简支纯弯矩梁在加载时, 其标定梁表面与两砝码加载点、两支点之间的相对运动会产生摩擦力, 从而带来误差, 由于摩擦系数 f_m 的不稳定性, 该误差为不确定的误差, 可达 $0.2\% \sim 2\%$, 不易消除且影响较大, 误差计算式为

$$\omega_m = \frac{f_m h}{3a} \quad (20)$$

式中: f_m 为摩擦系数; h 为梁厚, 6 mm ; a 为支点和相邻加载点之间的距离, 100 mm 。

钢架梁的加载力作用点离标定梁的距离为 a , 带来的影响误差纯属理论误差, 由结构尺寸决定, 前述的钢架梁精确应变公式中已经对这一影响进行了修正, 可以消除这一误差影响, 此误差计算式为

$$\omega_\delta = \frac{h}{6a} \quad (21)$$

综合来看钢架梁已经对轴向力的影响进行了修正, 而简支梁摩擦力的影响最大可达 2% 。

当然, 常温灵敏系数在标定试验中还存在很多其它因素的影响, 如砝码加载试验梁只能产生单向应变, 凸凹变形应变变量会存在加大差异, 灵敏系数分散相对

较大; 砝码只能阶梯加载, 不能连续变化, 应变变量不能保证长期准确。

3.1.3 不同标定装置测试常温灵敏系数误差验证

实验梁均采用 GH4099 高温合金材料, 弹性模量为 198 GPa , 泊松系数 μ 为 0.3 , 线膨胀系数 $11.9 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。砝码加载四点式简支梁装置的试验梁尺寸为 $420 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$, SK-1 钢架梁装置的试验梁尺寸为 $780 \text{ mm} \times 25.076 \text{ mm} \times 25.076 \text{ mm}$, 使用同一批 ZEMIC 自主研发的 TG350-3AA-800-YF50 框架式裸栅应变计(如图 3 所示), 采用 X-602 胶液固定贴片, 进行对比测试, 结果如表 1。



(a) 框架式裸栅应变计1 (b) 框架式裸栅应变计2

图 3 TG 系列箔式框架式裸栅 FeCrAl 高温应变计

表 1 不同装置标定的常温灵敏系数列表

序号	简支梁			钢架梁		
	挠度	ε	K	挠度	$\frac{ \varepsilon_{+} + \varepsilon_{-} }{2}$	K
1	$f = 2.7474$ $\varepsilon = 1052$ $\mu\text{m}/\text{m}$	1365	2.595	$f = 2.4924$ $\varepsilon = 1000$ $\mu\text{m}/\text{m}$	1283.5	2.567
2		1394.4	2.651		1285.5	2.571
3		1360.2	2.586		1286.0	2.572
4		1395.5	2.653		1283.5	2.567
5		1361.8	2.589		1287.5	2.575
6		1380.8	2.625		1284.0	2.568
平均值		1376.5	2.617	—	1285.0	2.57
分散		—	2.81%	—	—	0.29%

从测试结果来看, 常温下砝码加载的简支梁检测的灵敏系数比纯弯矩钢架梁大约 1.8% , 这也和前述分析的影响因素、误差相关。灵敏系数分散明显大于钢架梁, 一方面是由于误差因素带来的影响, 另一方面是由于简支梁的试验梁厚度较薄, 加工难度大, 同截面厚度误差也会比较大, 从而使测试数据分散偏大。

3.2 高温下灵敏系数测试

高温应变计粘贴在试验梁上, 在高温下对试验梁加载测试灵敏系数时, 应变计通过应变仪读取的指示应变为

$$\varepsilon_s = \frac{K_t}{2} \varepsilon_{jt} + \varepsilon_{ut} + \varepsilon_{\theta t} \quad (22)$$

式中: ε_s 为温度 t 时的高温应变计应变仪指示应变; ε_{jt} 为温度 t 时的机械应变(含热应力产生的机械变形); ε_{ut} 为温度 t 时的热漂移, 即应变计热输出; $\varepsilon_{\theta t}$ 为温度 t 时的部分蠕变。

实际上, 高温下应变计的指示应变量不止这些变量, 这是因为: 高温下, 应变计在熔接部位存在接触热电势, 温度越高热电势越大, 加之电子干扰、绝缘强度下降等, 会带来相应的零点漂移; 高温下, 金属的晶体结构会发生变化, 500 °C 左右金属材料的晶格磁性会发生变化, 存在相应的“K”状态, 其线胀系数、弹性模量、电阻率、滞弹效应等均会发生较大变化, 从而对应变计的输出和试验梁的机械变形产生较大影响。下面从不同层面对这些影响因素进行分析和研究。

3.2.1 应变计热输出的影响误差

应变计的热输出是指应变计粘贴在试件表面, 不受任何外力, 在一定温度下的输出。应变计的热输出主要受敏感栅线膨胀系数、敏感栅电阻温度系数和试件线胀系数的影响, 在所有的测试装置中均会存在。

$$\varepsilon_u = \left[\frac{\alpha_R}{K} + (\beta_s - \beta_R) \right] \Delta t \quad (23)$$

式中: ε_u 为应变计的热输出; α_R 为应变计敏感栅的电阻温度系数; β_s 为试件或试验梁的线膨胀系数; β_R 为应变计敏感栅的线膨胀系数; Δt 为环境温度差; K 为应变计的灵敏系数。

以 TG350-3AA 应变计为例, 敏感栅采用 FeCrAl 材料, 其线膨胀系数 $14.0 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, 电阻温度系数 $28 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, 常温灵敏系数 $K = 2.57$, 试验梁采用 GH128 线膨胀系数 $15.2 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, 如果温差 Δt 为 780 °C, 则热输出约为

$$\begin{aligned} \varepsilon_u &= \left[\frac{28}{2.57} + (15.2 - 11.9) \right] \times 10^{-6} \times 780 \\ &= 11072.1 \times 10^{-6} \end{aligned} \quad (24)$$

从理论计算的结果来看, 800 °C 时, 粘贴到 GH128 试验梁上的高温应变计热输出数值较大, 如果不做修正会严重影响应变计的输出信号, 实际标定的热输出数值也较大, 800 °C 时, 热输出可达 11700 $\mu\text{m}/\text{m}$, 详见图 4。

从实测曲线来看, 高温应变计的热输出值较大, 如果不予消除, 将严重影响应变计的灵敏系数测试。为了消除热输出影响, 可以在灵敏系数测试前, 将应变计的输出置零, 或将每一温度台阶下的热输出进行

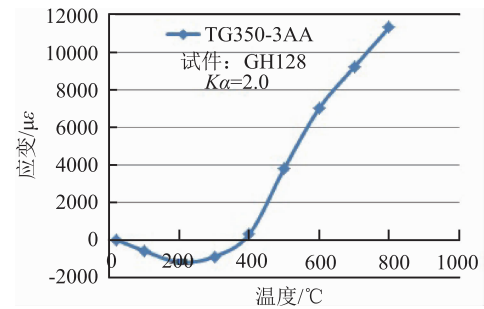


图4 TG350-3AA 高温应变计热输出测试曲线

减除, 也可以采取同一批次应变计, 在同一温度下粘贴在相同不受力试件上, 用半桥补偿方式消除热输出影响。

当然, 高温下导线的电阻变化点带来的影响也会比较大, 可以采取半桥方式或三线制将导线电阻的温度影响予以消除。

3.2.2 高温下试验梁载荷应变对灵敏系数测试的影响

高温下, 采用砝码加载的四点式简支梁对灵敏系数进行测试时, 试验梁的变形应变大小与弹性模量 E 和试验梁外形尺寸变化相关。根据简支梁力学模型

$$\varepsilon = \frac{6Fa}{EBh^2} = \frac{3Ga}{EBh^2} \quad (25)$$

实验梁形状和弹性模量引起的误差相当于对式(25)进行全微分, 即

$$\omega_{\mu} = \sqrt{\left(\frac{VG}{G}\right)^2 + \left(\frac{Va}{a}\right)^2 + \left(\frac{VB}{B}\right)^2 + 4\left(\frac{Vh}{h}\right)^2 + \left(\frac{VE}{E}\right)^2} \quad (26)$$

式中: a 为砝码加载点与支点之间最近距离; B 为试验梁宽度; h 为试验梁厚度; E 为试验梁弹性模量; G 为砝码重量; Va 为高温下砝码加载点和支点之间距离的变化量; VB 为高温下试验梁宽度的变化量; Vh 为高温下试验梁厚度的变化量; VE 为试验梁弹性模量高温下的变化量; VG 为砝码加载力的变化。

将高温应变计用自研的高温陶瓷胶 G-900 粘贴到砝码加载四点式 GH128 高温合金简支试验梁上测试灵敏系数, 试验梁的弹性模量、外形尺寸会发生变化, 会对应变计的输出产生较大影响。当温度为 800 °C 时, 通过表 2、表 3 可知, 试验梁的线膨胀系数从 $11.3 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 变化到 $15.2 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, 变化量为 $3.9 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$; 弹性模量从 208 GPa 变化到 162 GPa, 变化量为 -46 GPa; 试验梁泊松 $\mu = 0.3$; 砝码在外部加载, 质量不会发生变化, 温度带来的试验梁尺寸变化会使加载点微量偏移, 也带来加载杆与试验梁之间微小的角度误差, 砝码力值会发生微小变化, 由于影响甚微, 暂

不考虑此误差影响。因此其综合误差为

表 2 GH128 高温合金试验梁线膨胀系数表

温度	线膨胀系数/ $^{\circ}\text{C}^{-1}$
100	11.3×10^{-6}
200	11.9×10^{-6}
300	12.7×10^{-6}
400	12.8×10^{-6}
500	13.4×10^{-6}
600	13.7×10^{-6}
700	14.5×10^{-6}
800	15.2×10^{-6}
900	15.7×10^{-6}

表 3 GH128 高温合金试验梁弹性模量列表

温度/ $^{\circ}\text{C}$	弹性模量/GPa
20	208
100	205
200	202
300	198
400	191
500	189
600	187
700	175
800	162
900	152
1000	144

$$\begin{aligned}\omega_{\mu} &= \sqrt{0 + (780 \times 15.2 \times 10^{-6})^2 + 5 \times (0.3 \times 780 \times 15.2 \times 10^{-6})^2 + (0.2212)^2} \\ &= \sqrt{0 + (0.01186)^2 + 5 \times (0.003557)^2 + (0.2212)^2} = 22.15\%\end{aligned}\quad (27)$$

由式(27)可知,最大的误差源由弹性模量的变化引起,占总误差的99%以上。

如果砝码加载 150 kg 载荷,常温下对四点简支梁加载,梁表面应变量为

$$\varepsilon = \frac{3Ga}{EBh^2} = \frac{3 \times 150 \times 5}{208 \times 10^4 \times 3 \times 0.6^2} = 1002 \times 10^{-6} \quad (28)$$

高温 800 $^{\circ}\text{C}$ 时,试验梁加载点与支点间距 a 从 5 cm 变化为 $5 \times (1 + 15.2 \times 10^{-6} \times 780) = 5.0593$ (cm); 梁厚 h 从 0.6 cm 变化为 $0.6 \times (1 - 0.3 \times 15.2 \times 10^{-6} \times 780) = 0.5979$ cm, 梁宽 B 从 3 cm 变化为梁表面的应变,即 $3 \times (1 - 0.3 \times 15.2 \times 10^{-6} \times 780) = 2.9893$ cm; 梁的弹性模量为 162 GPa, 则 800 $^{\circ}\text{C}$ 下砝码加载的应变量为

$$\begin{aligned}\varepsilon_{800^{\circ}\text{C}} &= \frac{3Ga}{EBh^2} = \frac{3 \times 150 \times 5.0593}{162 \times 10^4 \times 2.9893 \times 0.5979^2} \\ &= 1315 \times 10^{-6}\end{aligned}\quad (29)$$

理论机械载荷应变变量就会增加 313 $\mu\text{m}/\text{m}$, 如果仍按照标准 1002 $\mu\text{m}/\text{m}$ 计算,显然计算后的 800 $^{\circ}\text{C}$ 灵敏系数会偏大一些,但如果按照 1315 $\mu\text{m}/\text{m}$ 计算,可能和实际又会有差异,具体数据不好计算。

对于钢架梁结构,其应变变量与挠度、三点挠度计刀口间距、试验梁厚度和力臂长度有关,但力臂长度在温箱外部,室温对力臂变化影响有限,主要是刀口间距 c 、梁厚 h 高温下尺寸变化的影响,其精确应变计算公式为

$$\varepsilon_{\text{凸}} = \left(1 - \frac{h}{6a}\right) \times \frac{h}{\frac{c^2}{f_+} + f_+ + h + \frac{1}{3}\mu h} \quad (30)$$

$$\varepsilon_{\text{凹}} = \left(1 + \frac{h}{6a}\right) \times \frac{h}{\frac{c^2}{f_+} + f_+ - h - \frac{1}{3}\mu h} \quad (31)$$

根据误差计算,钢架梁的影响约为

$$\begin{aligned}\omega_{\mu} &= \sqrt{(780 \times 15.2 \times 10^{-6})^2 + (0.3 \times 780 \times 15.2 \times 10^{-6})^2} \\ &= 1.2\%\end{aligned}\quad (32)$$

钢架梁试验梁采用标准应变 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$ 和挠度值 f 相适应来控制试验梁的变形,因此,试验梁尺寸变化和挠度 f 相适应,使机械载荷应变变量恒定不变。凸面挠度与应变关系计算式为

$$f_{\text{凸}} = \frac{-b_+ - \sqrt{b_+^2 - 4\varepsilon_+^2 c^2}}{2\varepsilon_+} \quad (33)$$

其中,

$$b_+ = -\left[\varepsilon_+ h + \varepsilon_+ \frac{1}{3}\mu h + \left(1 + \frac{h}{6a}\right)h\right] \quad (34)$$

式中: ε_+ 为试验梁标准机械应变; c 为挠度计刀口距离的一半; h 为试验梁厚度; a 为力臂长度。

从式(31)可以看到,若挠度 f 与应变 ε 相适应,则尺寸变化的影响可以消除,如果不考虑尺寸影响,误差约为 1.2%,远远小于砝码加载四点式简支梁结构。

如果挠度不变,仅考虑梁尺寸变化,则试验梁常温下和 800 $^{\circ}\text{C}$ 高温下的表面应变为

$$\varepsilon = \left(1 + \frac{h}{6a}\right) \times \frac{h}{\frac{c^2}{f_+} + f_+ - h - \frac{1}{3}\mu h} = \left(1 + \frac{9.6664}{6 \times 700}\right) \times \frac{9.6664}{\frac{150^2}{2.3203} + 2.3203 - 9.6664 - \frac{1}{3} \times 0.3 \times 9.6664} = 1000.4 \times 10^{-6} \quad (35)$$

高温 800 °C 时, 试验梁厚度变化 $9.6664 \times (1 - 0.3 \times 15.2 \times 10^{-6} \times 780) = 9.6320$ (mm); 挠度计刀口变化

$150 \times (1 + 15.2 \times 10^{-6} \times 780) = 151.7784$ (mm); a 和 f 不变, 高温 800 °C 试验梁表面机械应变为

$$\varepsilon = \left(1 + \frac{9.6320}{6 \times 700}\right) \times \frac{9.6320}{\frac{151.7784^2}{2.3203} + 2.3203 - 9.6320 - \frac{1}{3} \times 0.3 \times 9.6320} = 973.2 \times 10^{-6} \quad (36)$$

如果挠度 f 不变, 800 °C 下理论机械应变变化减少 31 $\mu\text{m}/\text{m}$, 较为接近常温标准机械应变, 误差约为 3%, 也远远小于简支梁结构, 而通过挠度值 f 和机械应变补偿可以将这一影响降到最低, 甚至可以忽略。

3.2.3 高温下试验梁加载过程中摩擦力的影响

砝码加载的四点式简支梁, 由于两加载力点与两支承点都属于滚动支座或刀口支座, 只能限制一个方向的运动, 属一个自由度结构, 加载时或加热时与标定梁表面之间不能自锁, 都存在相对位移和外延, 失散能量, 对标定梁变形有一定的补偿作用, 还会产生摩擦力。相对运动产生的摩擦力使四点纯弯梁无法构成刚性封闭的静态力学平衡系统, 无法计算出它的对应准确结果, 而高温下摩擦力变化更大, 摩擦系数最大可达 4%^[6]。摩擦系数随温度和加载变化而变化, 具有极大的不稳定性, 形成的轴向力也会不断变化, 带来较大的偶然误差。这种摩擦力成为平衡系统的组成部分, 还会随梁表面的光洁度和材料的硬度变化, 影响因素极多, 所以无法用数学公式或理论推导准确表达。四支点的摩擦力形成的轴向力对梁两表面的应变作用, 使一面应变变大, 使另一面应变变小, 摩擦力在应变理论中的计算公式难以推导, 因此在实际应用中均采用完全忽略的方式, 这也成为工程实践中无法真正实现四点纯弯矩梁理论的原因。

钢架梁结构是刚性封闭的静态力学平衡系统, 它是由刚性件和弹性件组成的封闭系统, 靠方向相反、绝对相等的杠杆原理产生两个力的位移变化, 实现试验梁的机械应变变形, 在结构上形成了真正纯弯梁的原理要求。因位移加载停止后, 能构成一个刚性封闭的平面静力学平衡系统, 则两力位移不变, 梁上的应变变量就不变, 而且加载速度快且平稳。钢架梁的任意平面运动是靠带油的钢球纯滚动支撑实现, 摩擦系数

极小, 这些机构处于室温中, 不受温度影响, 润滑纯滚动钢球支承的钢性力臂, 上下结构的摩擦力非常小, 对于高强度钢性力臂误差可忽略不计, 确保加载过程中钢架梁结构处于无任何约束的任意平面运动状态。钢架梁加载后, 整体构成刚性封闭平面静力学平衡系统, 确保实现纯弯矩钢架梁力学原理。

因此, 四点式简支梁架构的摩擦力影响不可消除, 高温下影响会更大, 误差甚至高达 4%, 而纯弯矩钢架梁从结构上已经考虑消除摩擦力影响, 形成封闭平面静力学平衡系统, 摩擦力误差影响可以忽略。

高温下, 试验梁加载到标准载荷应变的时间(含稳定时间), 会影响试验梁载荷中含有的蠕变大小, 时间越长, 蠕变越大, 砝码加载的简支梁加载时间和稳定时间较长, 大约 1 ~ 2 min, 在这一过程中已经有相当一部分蠕变引入。钢架梁匀速加载到位后稳定时间很短, 基本上在 5 s 内就可读数, 蠕变基本可以忽略。同时, 简支梁只能同一方向加载, 高温下多次加载容易产生累积正蠕变和疲劳, 蠕变也相对较大, 长期状况下, 甚至会出现试验梁单向变形。而钢架梁可以凸凹正负向加载, 在加载过程中可以恢复, 对蠕变影响很小。

3.2.4 高温下不同试验梁结构标定灵敏系数随温度变化的实际数据

根据前述分析, 采用高温应变计 TG350-3AA 和 G-900 高温陶瓷胶粘贴, 试验梁采用 GH128 高温合金, 分别测试砝码加载的四点式简支梁结构和 SK-1 纯弯矩钢架梁结构随温度变化的灵敏系数, 具体数据如表 4, 测试曲线示意图如图 5。

通过以上数据和曲线, 结合前述分析, 高温应变计灵敏系数随温度变化测试均会存在测试误差, 虽然数据和曲线趋势相似, 但相对而言, 纯弯矩钢架梁结构测量误差最小, 也最接近于真实数据。

表 4 简支梁结构和钢架梁结构灵敏系数
随温度变化测试数据表

温度/℃	简支梁		钢架梁	
	$\varepsilon_{ji}/\mu\varepsilon$	灵敏系数/%	$\varepsilon_{ji}/\mu\varepsilon$	灵敏系数/%
20	1360.5	100	1284.5	100
100	1428.5	105	1310.2	102
200	1619.0	119	1361.6	106
300	1904.7	140	1515.7	118
400	1931.9	142	1502.9	117
500	1605.4	118	1361.6	106
600	1387.7	102	1284.5	100
700	1224.5	90	1220.3	95
800	1156.4	85	1181.7	92

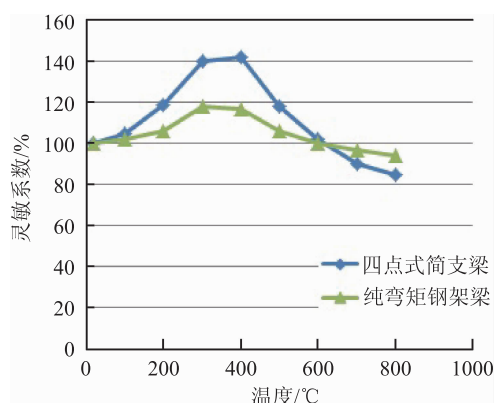


图 5 不同测试机构灵敏系数随温度变化测试曲线图

4 结论

通过理论分析和实际测试,确定了高温应变计灵敏系数标定中的主要误差源,并对误差源进行了分析。对比了砝码加载四点式简支梁结构和纯弯矩钢架梁结构常温及高温下灵敏系数的误差源大小,分析出各自的优势和缺点,验证了钢架梁在灵敏系数测试和灵敏系数随温度变化测试中的误差最小,为高温应变计性能的标定给出较优方案,降低性能标定误差,提升高温应变计性能标定的准确度,为高温应变测试提供更准确的高温灵敏系数修正参数。

结果表明,砝码加载简支梁常温下灵敏系数测试

数据与钢架梁接近,误差为 1.8%,但分散明显高于钢架梁;高温下,简支梁弹性模量、试验梁尺寸变化引起的测量误差高达 22%,灵敏系数随温度变化曲线明显偏离,在灵敏系数实际标定中应予以重视。

参考文献

- [1] 尹福炎. 瞬态加热条件下高温应变计测量误差的修成方法[J]. 强度与环境, 2005, 32(1): 36-42.
- [2] 王文瑞, 张佳明, 聂帅. 高温应变接触式测量精度影响因素研究[J]. 固体火箭技术, 2015, 38(3): 439-444.
- [3] 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[J]. 导弹与航天运载技术, 2012(6): 30-33.
- [4] 王文瑞, 张佳明, 闫晓强, 等. 高温应变片关键参数标定方法[J]. 工程科学学报, 2015, 37(12): 1645-1650.
- [5] 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[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2013, 30(2): 27-30.
- [6] 邓足斌. 电阻应变计灵敏系数 K_t 及其应变值 ε_t 计算公式的分析[J]. 传感器技术, 1986(1): 49-54, 8.
- [7] 邓足斌. 纯弯矩梁型应变计灵敏系数测定装置的误差分析和精度评定方法[J]. 传感器技术, 1999(7): 10-12, 1999(8): 8-13.
- [8] 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[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.

作者简介



晏志鹏(1974-),男,高级工程师,硕士,研究领域包括合金箔技术、应变计、应变式传感器和应变电测。

中航电测仪器股份有限公司技术专家,曾担任美国国家实验力学学会(National Society for Experimental Mechanics,简称SEM)会员,电阻应变计标准化技术委员会委员,国家标准 GB/T13992-2010 主起草人,行业技术带头人。

1996年毕业于西安航空工业技术高等专科学校电气系,后就读西北工业大学自动化学院,同年进入中航电测仪器股份有限公司工作至今。承担多项中航工业集团公司项目,主持研发的箔式精密电阻、高温箔式应变计填补国内空白;主持研制的新型电阻应变计打破国外垄断,与国际标杆企业相媲美。先后获得省部级科技奖4项,省部级科技成果2项,获得中航工业科技之星、汉中市青年科技奖,陕西省汉中市“优秀人才”。授权发明专利20余项,发表论文7篇。