

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2026.04.08

高温环境下长导线应变计应用误差修正方法研究

苗碧琪¹, 唐兆轩², 卓亮辉², 李振亚^{1*}, 何巍¹, 云浩¹, 赵凯峰³, 晏志鹏³

(1. 中核武汉核电运行技术股份有限公司, 湖北 武汉 430000; 2. 中核霞浦核电有限公司, 福建 宁德 355100;

3. 中航电测仪器(西安)有限公司, 陕西 汉中 723007)

摘要: 针对核电等高温场景远距离应变测试中耐高温长导线电阻及其温度变化引发的测量误差问题, 本文提出一种结合应变计测试数据、应变计电阻及导线电阻实测值的应变修正方法。分析长导线传输条件下应变测量误差的形成机理, 引入应变计与导线电阻参数, 建立测试应变统一修正模型, 对高温下测得的应变值进行修正, 并据此确定热输出曲线及灵敏系数。开展 350 °C 高温应变测试, 验证该方法的应用效果, 并与传统三线制、半桥补偿方法进行对比, 结果表明: 该方法可同时考虑导线电阻及其温度变化的耦合影响, 有效减小测量误差, 提升测试结果的准确性与稳定性, 为提高核电领域高温长导线应变测量精度提供重要技术支撑。

关键词: 应变计; 高温应变测量; 长导线; 导线电阻; 应变修正; 热输出; 灵敏系数; 误差补偿

中图分类号: TM623; TB9; TP212 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5795 (2026) 04-0116-13

Correction methods for application errors of long-lead strain gauges under high-temperature conditions

MIAO Biqi¹, TANG Zhaoxuan², ZHUO Lianghui², LI Zhenya^{1*}, HE Wei¹, YUN Hao¹, ZHAO Kaifeng³, YAN Zhipeng³

(1. China Nuclear Power Operation Technology Corporation, Ltd., Wuhan 430000, China; 2. CNNC Xiapu Nuclear Power Co., Ltd.,

Ningde 355100, China; 3. Zhonghang Electronic Measuring Instruments (Xi'an) Co., Ltd., Hanzhong 723007, China)

Abstract: Aiming at the measurement errors caused by the resistance of high-temperature long wires and their temperature variations in long-distance strain testing of high-temperature structures for nuclear power applications, this paper proposes a strain correction method integrating strain gauge test data, measured strain gauge resistance and wire resistance values. The formation mechanism of strain measurement errors under long-wire transmission conditions is analyzed. By introducing resistance parameters of strain gauges and connecting wires, a unified correction model for measured strain is established to calibrate strain readings acquired at high temperatures. Based on the model, the thermal output curves and gauge factors are determined. High-temperature strain tests at 350 °C were performed to verify the effectiveness of the proposed method, which is further compared with the traditional three-wire method and half-bridge compensation method. The results demonstrate that the proposed method can simultaneously account for the coupled effects of wire resistance and its temperature drift, substantially reduce measurement errors, and improve the accuracy and stability of test results. This work provides critical technical support for enhancing the precision of high-temperature long-wire strain

收稿日期: 2026-03-31; 修回日期: 2026-04-21; 录用日期: 2026-05-01; 发表日期: 2026-08-28

基金项目: 中国核电集中研发项目(K230508)

引用格式: 苗碧琪, 唐兆轩, 卓亮辉, 等. 高温环境下长导线应变计应用误差修正方法研究[J]. 计量技术, 2026, 46(4):116-128.

Citation: Miao Biqi, Tang Zhaoxuan, Zhuo Lianghui, et al. Correction methods for application errors of long-lead strain gauges under high-temperature conditions [J]. Metrology & Measurement Technology, 2026, 46(4):116-128.



measurement in the nuclear power industry.

Key words: strain gauge; high-temperature strain measurement; long wire; wire resistance; strain correction; thermal output; gauge factor; error compensation

0 引言

在核电领域,核岛内各类机械设备作为关键承压与传动部件,长期运行于高温、高压及强辐射等极端工况环境中。在服役过程中,受流体冲刷、结构振动、腐蚀以及热-辐照耦合作用等因素影响,设备存在不同程度的损伤与失效风险。一旦压力容器、主管道或主泵等关键部件发生性能退化,轻则导致设备损坏,重则可能引发机组停机甚至核安全事故。因此,对关键结构开展高精度应力/应变监测,对保障核电机组安全可靠运行具有重要意义^[1-3]。

应变计作为结构应力测试的核心手段,已广泛应用于核电管道及压力容器的状态监测领域。然而,在高温(300 ~ 350 °C)环境下,应变测量面临一系列复杂问题:①材料热膨胀引起的“视应变”与真实机械应变难以区分;②应变计电阻及灵敏系数随温度变化,导致测量结果产生系统误差;③为避免测试设备受高温及现场空间条件影响,测试仪器通常无法靠近被测结构布置,需要采用较长的耐高温导线将应变计信号引出至远端测试仪器,高温长导线不仅自身电阻较大,其电阻还会随温度变化而显著改变,从而影响测量桥路的等效电阻和应变计换算结果,进一步引入附加误差并降低测量精度^[4]。

在常温或短距离应变测试中,测试仪器通常可以布置在被测结构附近,导线长度较短,导线电阻相对于应变计电阻较小,其影响可通过三线制接法、半桥补偿或仪器调零等方式得到一定的抑制,因此多数常规应变测量研究中未将长导线误差作为重点问题进行讨论。但在核电高温结构应变测试中,受高温、辐照、空间布置及设备安全等因素限制,应变计往往需要通过数米级耐高温导线与测试仪器连接,导线电阻及其温度效应引入的误差不再是可忽略的量。因此,长导线误差修正是高温远距离应变测量中的特殊需求,也是提高核电现场应变测试可靠性的重要环节。

针对高温应变测量误差问题,国内外通常采用以下几类补偿方法:

1) 电桥补偿法,如三线制、半桥或全桥结构。通过桥路对称性抵消部分温度与导线电阻影响,但存在温度梯度或导线不匹配时仍会产生零点漂移与灵敏度误差。

2) 自补偿应变计法。通过匹配材料热膨胀系数减小热输出,但仅能部分抵消温度影响,残余误差仍需修正。

3) 热输出标定与经验修正法。通过实验获取热输出曲线进行修正,但通常未充分考虑导线电阻及其温度效应的耦合影响。

总体来看,现有方法在常规或中温条件下具有一定适用性,但在“高温+长导线”工况下仍存在以下不足:①难以同时考虑“应变计电阻-导线电阻-温度变化”之间的耦合影响;②部分修正方法主要依赖经验曲线或单一参数,面对导线材料、导线长度和温度状态变化时适应性有限;③针对核电现场等远距离测量场景下长导线引入的桥路等效电阻变化问题,仍缺乏结合实测电阻参数的修正方法与相应的试验验证^[5]。

针对上述问题,本文以350 °C耐高温长导线应变计为研究对象,开展面向核电高温远距离应变测试应用的误差修正方法研究。利用已有高温应变补偿和电桥测量理论基础,针对高温远距离测试中导线电阻及其温度变化不可忽略的问题,提出一种基于测试数据与电阻实测值耦合修正的高温应变计算方法,通过引入应变计测试数据、应变计电阻及导线电阻实测参数,对高温长导线条件下的测量结果进行修正,以降低导线电阻及其温度效应对测试结果的影响,提高高温环境下应变测试结果的可靠性。

1 应变测量方法

在高温环境下,电阻应变计的输出不仅与被测结构的机械应变有关,还受温度变化、材料性能参数及测量系统结构等因素的影响。实际测量

中,应变计输出可视为真实机械应变与各类附加误差的叠加。

对于高温长导线测量场景,应变测量误差主要来源于以下三个方面:①温度变化引起的应变计热输出误差;②温度影响材料弹性模量导致的灵敏度误差;③长导线电阻及其温度效应引入的测量误差。

1.1 温度对应变计热输出影响原理分析

安装在被测材料上的应变计进行应力测量时,应变计电阻值 R 不仅受机械应力影响,同时环境温度也导致其发生变化^[6],即

$$R = f(\varepsilon, T) \quad (1)$$

式中: f 为函数符号, ε 为应变, T 为环境温度。

当被测材料同时受到机械应力和温度变化影响时,应变计的电阻变化 ΔR 可以表示为

$$\Delta R = \left(\frac{\partial R}{\partial T} \right)_{\varepsilon} \Delta T + \left(\frac{\partial R}{\partial \varepsilon} \right)_T \Delta \varepsilon \quad (2)$$

式中: ΔT 为温度变化量; $\Delta \varepsilon$ 为应变变化量。

电阻变化率为

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{(\partial R / \partial T)_{\varepsilon} \Delta T}{R} + \frac{(\partial R / \partial \varepsilon)_T \Delta \varepsilon}{R} \quad (3)$$

令

$$\frac{(\partial R / \partial T)_{\varepsilon} \Delta T}{R} = \alpha \frac{(\partial R / \partial \varepsilon)_T \Delta \varepsilon}{R} = K \quad (4)$$

式中: α 为温度系数, K 为应变计的灵敏系数。

可得

$$\frac{\Delta R}{R} = \alpha \Delta T + K \Delta \varepsilon \quad (5)$$

高温应变计与被测件保持良好粘接,保证二者具有一致的变形协调关系。假设应变计敏感栅丝的长度为 l_0 ,当温度变化 ΔT 时,敏感栅丝长度的变化为 l_{t1} 。 β_g 为电阻应变计应变栅的线膨胀系数,则

$$l_{t1} = l_0 (1 + \beta_g \Delta T) = l_0 + l_0 \beta_g \Delta T \quad (6)$$

$$\Delta l_{t1} = l_{t1} - l_0 = l_0 \beta_g \Delta T \quad (7)$$

式中: Δl_{t1} 为自由膨胀下应变计敏感栅丝的伸长量。受温度影响导致被测件长度变为 l_{t2} ,计算公式为

$$l_{t2} = l_0 (1 + \beta_g \Delta T) = l_0 + l_0 \beta_g \Delta T \quad (8)$$

$$\Delta l_{t2} = l_{t2} - l_0 = l_0 \beta_g \Delta T \quad (9)$$

式中: Δl_{t2} 为自由膨胀下被测件的伸长量。当应变计敏感栅丝和被测件变形不协调时,由于被测件

与电阻丝紧贴在一起,紧贴作用使得电阻丝伸长量从 l_{t1} 被拉长至 l_{t2} ,于是电阻丝出现附加变形 $\Delta l_{t\beta}$,计算公式为

$$\Delta l_{t\beta} = \Delta l_{t2} - \Delta l_{t1} = (\beta_s - \beta_g) l_0 \Delta T \quad (10)$$

折算成应变 $\varepsilon_{t\beta}$ 为

$$\varepsilon_{t\beta} = \frac{\Delta l_{t\beta}}{l_0} = (\beta_s - \beta_g) \Delta T \quad (11)$$

外载荷引起的真实应变记为 ε_σ ,则此时应变计的应变 $\Delta \varepsilon$ 的值为

$$\Delta \varepsilon = (\beta_m - \beta_g) \Delta T + \varepsilon_\sigma \quad (12)$$

式中: β_m 为被测材料的线膨胀系数。

将式(12)代入式(5)得

$$\frac{\Delta R}{R} = \alpha \Delta T + K [(\beta_m - \beta_g) \Delta T + \varepsilon_\sigma] \quad (13)$$

又因 $\frac{\Delta R}{R} = K \varepsilon$ 为外载荷与温度变化引起的总应变值,则推导得到

$$\varepsilon = \frac{\alpha}{K} \Delta T + (\beta_m - \beta_g) \Delta T + \varepsilon_\sigma \quad (14)$$

令示值应变 $\varepsilon_i = \frac{\alpha \Delta R}{K} \Delta T + (\beta_m - \beta_g) \Delta T$,推导可得

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta T}{K} [\alpha \Delta R + K(\beta_m - \beta_g)] \quad (15)$$

则

$$\varepsilon = \varepsilon_\sigma + \varepsilon_i \quad (16)$$

ε_i 与被测材料的真实应变无关,它是电阻应变计因温度变化而引起的热输出,是造成测量误差的主要因素^[7]。

从式(14)可以看出,示值应变 ε_i 不仅与电阻应变计应变栅的 $\alpha \Delta R$ 有关,而且与 β_m 和 β_g 之差以及 K 有关。若使示值应变即热输出为零,必须满足

$$\alpha \Delta R + K(\beta_m - \beta_g) = 0 \quad (17)$$

即

$$\alpha \Delta R = -K(\beta_m - \beta_g) = K(\beta_g - \beta_m) \quad (18)$$

由以上分析可以得出,在制造温度自补偿电阻应变计时,使 $\alpha \Delta R$ 、 β_g 和 β_m 满足式(17)的条件,即可实现温度自补偿^[8]。但在实际应变计生产中,受材料、工艺和应用环境限制,仍不能完全实现温度自补偿。

1.2 温度对弹性模量影响引起的应变计灵敏度误差

温度变化还会通过影响被测材料弹性模量,

间接改变应变测量结果。随着温度升高,材料弹性模量降低,在相同应力条件下产生更大应变,从而表现为应变计灵敏度的变化,即灵敏度温度误差。在高温应变测量过程中,被测对象多为合金钢或不锈钢,其弹性模量具有负温度系数特性。随着温度升高,材料刚度下降,导致相同应力条件下产生更大的应变响应,从而表现为应变计灵敏度的提升,该变化即构成灵敏度温度误差,通常约为 $0.03\% \sim 0.05\% \text{ FS}/^{\circ}\text{C}^{[9]}$ 。即在应变计实际应用中,被测设备温度每变化 10°C ,灵敏度就变化 $0.3\% \sim 0.5\%^{[10]}$ 。

被测材料的弹性模量 $E(T)$ 和温度 T 之间的关系可表示为

$$E(T) = E_0(1 - \alpha T) \quad (19)$$

式中: E_0 为材料在室温下的弹性模量。

镍铬合金的室温弹性模量为 200 GPa ,温度系数为 $2.5 \times 10^{-4} ^{\circ}\text{C}^{-1}$,在 350°C 时,镍铬合金的弹性模量为 182.5 GPa 。316L不锈钢室温弹性模量为 193 GPa ,温度系数为 $1.7 \times 10^{-4} ^{\circ}\text{C}^{-1}$,在 350°C 时,316L不锈钢的弹性模量为 181.1 GPa 。由式(20)所示的应力-应变转关系可知,当应力 σ 一定时,弹性模量 E 降低,则应变 ε 增大,即应力变化一定时,应变计的灵敏度增大。与此同时,应变计敏感栅材料的电阻应变效应、基底与被测件之间的应变传递状态以及测量桥路参数也会随温度发生变化,从而使应变计输出与实际机械应变之间的比例关系发生改变,本文将该类影响归入温度相关灵敏系数修正范畴,并通过高温加载试验获得不同温度下的灵敏系数。

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (20)$$

1.3 长导线引起的应变计误差分析

在高温测量中,应变计通过长导线连接测量系统。导线电阻及其随温度变化的特性会改变电桥平衡状态,并引入附加误差,从而响应变测量结果。图1为长导线应变计连接电桥原理图,图2为长导线应变计连接等效电路图。

图2中, r 为长导线电阻,采用应变计测试应变时, $2r$ 不超过 $\pm 10\%R$;短导线连接时, r 值较小,所以不影响桥路平衡。

应变和电阻变化的关系为

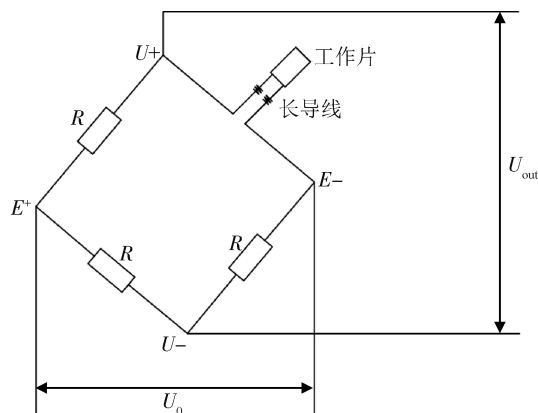


图1 长导线应变计连接电桥原理图

Fig.1 Schematic diagram of strain gauge bridge with long connecting wires

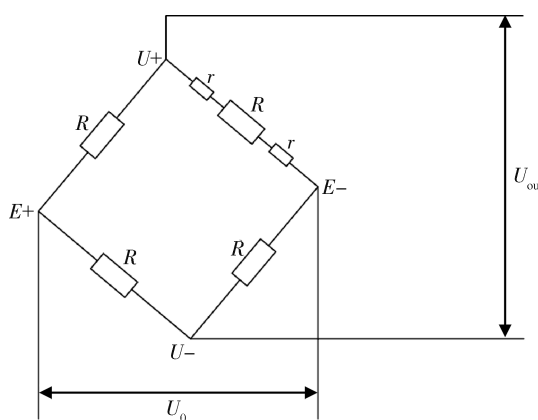


图2 长导线应变计连接等效电路图

Fig.2 Equivalent circuit diagram of long-wire strain gauge connection

$$\frac{\Delta R}{R + 2r} = K\varepsilon \quad (21)$$

从式(21)可以看出,短导线连接时, $r \approx 0 \Omega$,随着导线长度的增加,采用单臂桥接法,导线电阻超过桥臂电阻的10%时,桥路无法平衡^[11]。

耐高温的纯镍导线、铜镍导线、镍铬合金导线的特性参数见表1。

在高温应变测量时,所使用的导线一般为 5 m 甚至更长,导线的电阻较大,表1中,纯镍导线电阻为 2.5Ω ,导线电阻温度系数为 $6900 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$,在高温应变计测量时,导线的电阻会随温度升高增大;铜镍导线和镍铬导线相对电阻温度系数较小,但导线单位电阻比较大。由于导线电阻大,影响应变电桥平衡,常温测试时,一般会优选1/4桥单臂桥、应变计三线制的接法。三线制用于平

表1 常见耐高温导线特性参数

Tab. 1 Parameters of common high-temperature resistant wires

序号	种类	直径/mm	耐温等级/℃	电阻/Ω	电阻温度系数/(10 ⁻⁶ /℃)
1	纯镍导线	0.2	-20 ~ 800	2.5	6 900
2	铜镍导线	0.2	-20 ~ 400	14.7	101
3	镍铬导线	0.2	-20 ~ 400	34.7	400

衡导线长度引起的桥路平衡，但由于长导线电阻变大，会造成测试应变和实际应变偏差较大。在高温应变测量时，除了考虑长导线应变电桥平衡，还要考虑高温引起的热应变、导线电阻变化引起的应变，所以一般采用补偿桥路进行高温应变测量。补偿桥路接线如图3所示。

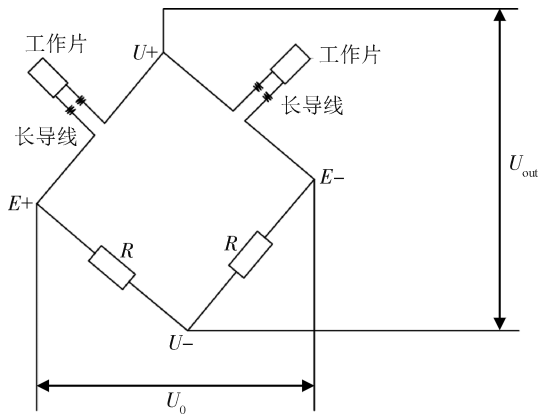


图3 半桥补偿电路图

Fig.3 Half-bridge compensation circuit diagram

图3中的补偿片为同批次和与导线长度相同的应变计，在高温测试时，补偿片和工作片处于同一温度场，只产生热变形，不产生受力变形，起到温度补偿的作用。但在实际测试时需要另粘贴补偿块，同时补偿块和工作片位置之间也会存在温度差异，温度补偿的效果相对较差。针对此问题，通常采用零应变补偿的半桥应变计进行应变测量，其结构如图4所示。

零应变补偿应变计的补偿栅，由横栅和竖栅组合而成，按照一定比例的电阻匹配设计，在受力变形时，横栅产生负应变，竖栅产生正应变，两者相互抵消。补偿栅受力时将无应变输出，补偿栅和工作栅形成半桥，抵消温度变化引起的温度漂移，达到半桥温度补偿的功能。

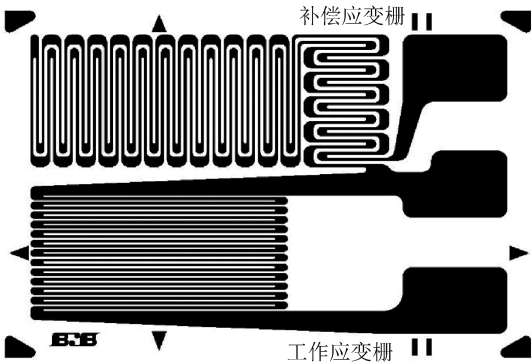


图4 零应变补偿应变计

Fig.4 Zero-strain compensation strain gauge

采用三线制电桥或半桥补偿电桥，可以消除长导线引起的电桥不平衡问题^[12]，但长导线应变计导线电阻较大，实际测量时，测试得到的应变会小于实际应变，产生较大的测试误差。以350 Ω应变计为例，导线长度为5 m、加载量为1 000 με时，采用半桥接法在常温下进行测试，计算不同材料导线的理论测试应变与测试应变误差，结果如表2所示。

从表2可以看出，当采用5 m耐高温导线连接350 Ω应变计时，即使在常温条件下，导线电阻也会使应变计显示值低于理论加载应变，不同导线材料对应的理论误差可达3.4% ~ 33.0%。在高温环境下，导线电阻还会随温度变化，误差将进一步受导线材料、温度分布和接线方式的影响，因此，与常规短导线应变测试不同，高温长导线测试中的导线电阻误差已成为必须修正的重要误差来源。

综上所述，温度变化对应变计测量精度的影响主要体现在三个方面^[13]：一是温度变化引起应变计产生热输出，导致应变测量出现零点漂移，该部分误差可通过温度补偿或零点校准方法进行修正；二是高温环境下材料弹性模量变化会影响

表2 不同长导线应变计测试误差

Tab.2 Measurement errors of strain gauges for different long wires

序号	导线种类	直径/mm	单位电阻/ Ω	长度/m	导线总电阻/ Ω	应变计电阻/ Ω	应变计+导线电阻/ Ω	应变计灵敏系数	加载量/ $\mu\epsilon$	理论实际应变/ $\mu\epsilon$	电阻变化量/ Ω	计算测试应变/ $\mu\epsilon$	测试误差/%
1	纯镍导线	0.2	2.5	5	12.5	350	362.5	2	1 000	1 000	0.7	966	-3.4
2	铜镍导线	0.2	14.7	5	73.5	351	424.5	2	1 000	1 000	0.702	827	-17.3
3	镍铬导线	0.2	34.7	5	173.5	352	525.5	2	1 000	1 000	0.704	670	-33.0

应变计灵敏系数，引入测量灵敏度误差，本研究通过计算不同温度下的灵敏系数对该误差进行分析与修正；三是长导线会引入额外电阻，使桥路电阻发生变化，从而影响应变测量结果，该部分误差可通过导线电阻修正公式进行补偿。

2 长导线应变计导线测试应变误差修正

在高温长导线应变测量中，应变计显示值受到热输出、灵敏系数变化以及长导线电阻等因素的共同影响。传统三线制或半桥补偿方法可以改善桥路平衡，并在一定程度上抑制温度漂移，但对于长导线串联电阻导致的应变换算比例偏差，仍需结合实际导线电阻进行修正。因此本文在不改变现有半桥测量电路结构的基础上，引入应变计电阻和导线电阻实测值，对测试应变进行数据修正^[14]。

针对长导线高温应变测量的特点，应变修正主要从以下三个方面展开：首先，温度变化会使应变计产生热输出，在无外加载荷条件下产生附加应变信号，因此需要对测试结果进行热输出修正；其次，高温环境下应变计敏感栅材料及基底材料的力学性能会发生变化，导致应变计灵敏系数随温度变化，从而产生灵敏度误差，因此需要对应变计灵敏系数进行修正；最后，长导线在桥路中会引入额外电阻，使桥臂电阻发生变化，从而影响应变测量结果，因此需要考虑导线电阻对应变测量的影响并进行修正。

基于上述分析，本文分别从热输出修正、灵敏系数修正及导线电阻修正三个方面建立高温应变测量修正方法，并通过实例对修正方法进行验证，以评估其在高温应变测量中的应用效果。

2.1 热输出修正

前文从原理角度分析了温度变化对应变计热输出的影响、温度对应变计灵敏系数的影响以及长导线引入的电阻对测量结果的影响。这些因素均会导致应变计测得的应变与实际机械应变之间存在一定偏差，因此，在进行高温应变测量数据处理时，需要对应变测试结果进行相应修正，以获得更加准确的真实应变值^[15]。应变计测得的应变 $\epsilon_{i测}$ 为

$$\epsilon_{i测} = \epsilon_{机械} + \epsilon_{热} \tag{22}$$

式中： $\epsilon_{机械}$ 为实际机械应变， $\epsilon_{热}$ 为温度变化引起的热输出应变。

在高温应变测试过程中，可通过高温标定实验获得不同温度条件下的热输出值，对应变计测得的应变进行修正后得到 $\epsilon_{修正1}$ ，即

$$\epsilon_{修正1} = \epsilon_{i测} - \epsilon_{热} \tag{23}$$

卸载状态下长导线应变计显示的热输出同样受到导线电阻及其温度变化的影响。本文在确定热输出曲线时，先根据导线电阻修正关系对卸载状态测试值进行修正，再将修正后的卸载应变作为该温度下的热输出值，通过“扣除”热输出对应变测量结果的影响，可获得更加接近真实机械应变的修正应变。

2.2 灵敏系数修正

在高温条件下，应变计敏感栅材料及基底材料的力学性能会随温度变化而发生改变，尤其是弹性模量变化会影响应变传递效率，从而导致应变计灵敏系数发生变化。而应变计内部设置的灵敏系数为固定值，因此在高温环境下，应变计换算得到的应变值与真实应变之间可能存在一定偏差。

为了获得不同温度条件下应变计的真实灵敏

系数, 可通过加载已知标准应变的方法进行标定。当前温度条件下应变计灵敏系数 K_t 计算公式为

$$K_t = \frac{\varepsilon_1}{1\,000\mu\varepsilon} \cdot K_{\text{仪}} \quad (24)$$

式中: ε_1 为修正后的加载应变; $K_{\text{仪}}$ 为应变计设置的灵敏系数, 本试验取 $K_{\text{仪}}=2.0$ 。

获得不同温度条件下的灵敏系数后, 可进一步对应变测量结果进行灵敏系数修正, 从而减小高温环境下灵敏系数变化对应变测量结果的影响, 公式为

$$\varepsilon_{\text{修正2}} = \varepsilon_{\text{修正1}} \frac{K_{\text{仪}}}{K_t} \quad (25)$$

式中: $\varepsilon_{\text{修正2}}$ 为进行灵敏系数修正后的应变值。

2.3 长导线电阻修正

为了获取长导线应变计在高温测试时的真实应变, 需要对测试应变进行修正, 具体方法:

① 采用应变计测量得到不同温度下的测试应变 $\varepsilon_{t\text{测}}$; ② 使用电阻表测试得到应变计导线的电阻 $2r$; ③ 使用电阻表测试得到应变计电阻 R , 可以计算出 ΔR 为

$$\Delta R = K_{\text{仪}} \varepsilon_{t\text{测}} (R + 2r) \quad (26)$$

采用三线制、半桥接线方式, 导线电阻值为单根导线的电阻, 采用式(5)计算电阻变化量, $K_{\text{仪}}$ 为测试应变计的灵敏系数, 一般为2.0。

根据电阻变化量, 可以计算出真实应变 $\varepsilon_{\text{真}}$, 如式(27)所示, 本修正方式仅适用半桥接线方式。

$$\varepsilon_{\text{真}} = \varepsilon_{t\text{测}} \frac{K_{\text{仪}}}{K_g} \left(1 + \frac{2r}{R}\right) \quad (27)$$

综合考虑热输出、灵敏系数变化及导线电阻等因素, 可对应变测试结果进行系统修正, 从而获得更加准确的高温真实应变值。

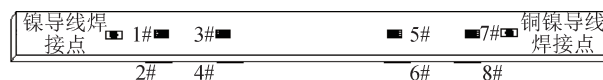
3 长导线应变计热输出和灵敏系数测试验证

结合实际测试案例进行测试验证, 应变计为标称电阻 $350\,\Omega$ 半桥应变计, 导线1为直径 $0.2\,\text{mm}$ 纯镍导线, 导线2为直径 $0.2\,\text{mm}$ 铜镍合金导线, 导线长度均为 $5.3\,\text{m}$ 。导线技术参数见表1。

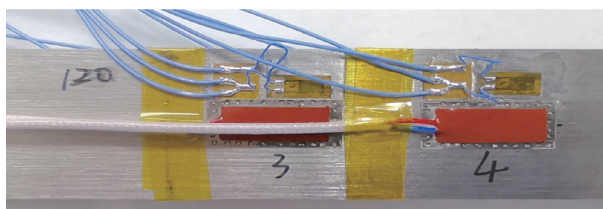
3.1 应变计安装

试验选用HZG3-350型应变计, 应变计基底材质为316L不锈钢, 试验基材采用同规格316L不锈钢简支梁。分别将纯镍导线式应变计、铜镍合金

导线式应变计通过点焊工艺固定于简支梁表面, 焊点间距设置为 $2\,\text{mm}$, 同时点焊焊接与应变计引线等长的纯镍导线、铜镍合金补偿导线。试样安装布置如图5所示, 1#、2#、3#、4#安装 $5.3\,\text{m}$ 纯镍导线半桥应变计, 相邻点焊接安装 $5.3\,\text{m}$ 纯镍导线; 5#、6#、7#、8#安装 $5.3\,\text{m}$ 铜镍半桥导线应变计, 相邻点焊接安装 $5.3\,\text{m}$ 铜镍导线。



(a) 不同导线材料应变计安装示意图
(a) Schematic of strain gauge mounting with different lead wire materials



(b) 不同导线应变计安装实物图
(b) Physical images of mounted strain gauges with different lead wires

图5 试样安装布置

Fig.5 Sample installation and arrangement

3.2 测试梁安装

将测试梁安装在高温加载炉的测试位置, 放置在高温加载炉内的应变计导线和焊接安装的导线长度保持一致。导线和应变计按照半桥接线方式进行连接, 导线连接后, 开启应变计并进行调试, 确认测试数据正常。若数据不正常查找原因, 并排除故障。调试完成后, 关闭加载炉盖。

3.3 应变测量

1) 对测试梁进行3次预加载, 加载量 $1\,000\,\mu\varepsilon$, 并卸载清零。

2) 将加载炉温度设置为 $20\,^{\circ}\text{C}$, 温度达到设置值后保温 $25\,\text{min}$, 之后将应变清零并记录读数。按照加载→卸载→加载→卸载→加载→卸载的顺序, 各采集3次应变计数据。

3) 顺次将温度调整为 100 、 150 、 200 、 250 、 275 、 300 、 325 、 350 、 $370\,^{\circ}\text{C}$, 测试各温度下热输出产生的应变和固定加载的测试应变。开展每个温度段测试时, 升温到设置值后保温 $25\,\text{min}$, 采集3次热输出数据, 再按照加载→卸载→加载→卸载→加载→卸载的顺序, 各采集3次应变计数据。测

试后的应变值减去测试前的热输出应变值，即加载产生的应变值。

3.4 电阻测量

- 1) 每一温度台阶，测量焊接的纯镍导线和铜镍导线电阻。
- 2) 每一温度台阶，从应变计接线端，测量加载前后的应变计导线端的电阻。每一温度台阶下

应变计的电阻为应变计导线端电阻减去导线电阻。

3.5 测试数据处理

本次试验简支梁采用四点弯曲加载方式，简支梁上表面应变计处于受压状态，应变数据取负值；下表面应变计处于受拉状态，应变数据取正值。不同温度台阶下，加载前后的测试应变如表3所示。

表3 不同温度下测试应变
Tab.3 Measured strain at different temperatures

温度 / °C	应变计状态	纯镍导线测试应变 / $\mu\epsilon$			铜镍导线测试应变 / $\mu\epsilon$		
		样品 1	样品 2	样品 3	样品 4	样品 5	样品 6
20	卸载	-1	0	1	1	0	0
	加载	-887	-935	897	800	-760	779
100	卸载	18	70	87	47	75	77
	加载	-880	-930	889	798	-766	778
150	卸载	39	127	150	75	100	151
	加载	-859	-870	928	809	-726	815
200	卸载	67	194	207	123	151	216
	加载	-865	-901	863	773	-756	755
250	卸载	177	348	357	275	263	335
	加载	-851	-884	861	769	-745	753
300	卸载	503	763	740	667	518	611
	加载	-839	-863	833	753	-737	736
325	卸载	666	1 012	975	894	699	782
	加载	-817	-836	808	725	-712	713
350	卸载	810	1 276	1 208	1 097	1 002	850
	加载	-803	-812	773	714	-694	697
370	卸载	885	1 322	1263	1 142	1 085	858
	加载	-815	-815	779	722	-698	705

不同温度台阶下，加载前后的应变计电阻和导线电阻如表4所示。表4中，导线电阻为两根导线电阻和 $2r$ ，应变计和导线电阻和为 $R + 2r$ 。采用半桥接线方式，计算真实应变时，导线电阻为单根导线电阻。

根据式(26)和式(27)，对每一温度台阶下的卸载状态测试应变 $\epsilon_{i测}$ 进行修正，得到卸载状态应

变计的真实应变 ϵ ，即热输出。修正后，不同温度台阶下热输出如表5所示。

根据式(5)和式(6)，对每一温度台阶下的加载状态测试应变 $\epsilon_{i测}$ 进行修正，得到加载状态应变计的真实应变 ϵ ，用加载状态下的应变减去卸载状态下的应变(热输出)，即可得到加载时产生的真实应变。修正后，不同温度台阶下加载真实应变

如表6所示。

为定量评估修正效果,以20℃加载应变为基准,对比分析修正前后各温度点的测量误差(由于简支梁上、下表面应变计分别处于受压和受拉状态,加载应变符号相反。为比较不同温度下应变响应幅值并计算灵敏系数,后续统计分析中取加载应变的绝对值)。结果表明:未修正时,高温条件下误差随温度升高明显增大,在350~370℃条件下约为18%~26%;经修正后,纯镍导线应变计最大误差约为10.7%,铜镍导线应变计最大误差约为9.7%,误差降低约40%~60%,说明该方法能够有效削弱导线电阻及温度变化带来的影响,提高高温长导线条件下的测量精度。

在此基础上,利用修正后的加载应变数据,按照式(24),可计算出每一温度台阶下的应变计灵敏

系数 K_t ,按照式(29),可计算出相对灵敏系数 $K_{相对}$ 。

$$K_{相对} = \frac{K_t}{K_0} \times 100\% \tag{29}$$

式中: K_0 为常温20℃下的应变计灵敏系数。

不同温度下,纯镍导线应变计灵敏系数如表7所示,铜镍导线应变计灵敏系数如表8所示。

分析可知:随着温度升高,应变计灵敏系数整体呈下降趋势。表7中,在370℃时,相对于20℃状态,灵敏系数下降约10%。其中370℃平均灵敏系数为1.67,较350℃的1.66略有小幅回升,出现局部小幅波动。该异常偏差数值极小,主要由高温段炉内温场波动、构件残余应力微量释放、高温下线路接触电阻变化及测试系统随机误差共同导致,属于高温试验正常现象,单点波动未改变灵敏度整体衰减趋势,试验数据整体规

表4 不同温度下应变计电阻和导线电阻
Tab.4 Strain gauge resistance and wire resistance at different temperatures

温度/℃	状态	纯镍导线应变计及导线总电阻/Ω			铜镍导线应变计及导线总电阻/Ω			镍导线电阻/Ω	铜镍导线电阻/Ω
		样品1	样品2	样品3	样品4	样品5	样品6		
20	卸载	376.68	376.40	376.41	507.15	508.46	507.76	26.06	156.57
	加载	376.07	375.76	377.09	507.82	507.83	508.41	26.06	156.63
100	卸载	376.99	376.79	376.78	507.02	508.38	507.70	26.44	156.68
	加载	376.35	376.08	377.39	507.68	507.75	508.31	26.42	156.48
150	卸载	377.21	377.01	376.97	506.93	508.33	507.64	26.67	156.48
	加载	376.59	376.36	377.63	507.57	507.69	508.25	26.68	156.49
200	卸载	377.50	377.35	377.28	506.81	508.23	507.57	27.03	156.43
	加载	376.78	376.55	377.79	507.47	507.60	508.21	26.84	156.43
250	卸载	377.63	377.50	377.43	506.73	508.16	507.51	27.24	156.42
	加载	377.13	376.87	378.04	507.39	507.54	508.14	27.25	156.43
300	卸载	378.10	377.94	377.89	506.68	508.10	507.47	27.70	156.44
	加载	377.54	377.39	378.56	507.26	507.48	508.08	27.72	156.45
325	卸载	378.36	378.26	378.21	506.59	508.05	507.41	27.99	156.45
	加载	377.80	377.67	378.80	507.19	507.46	507.98	27.99	156.45
350	卸载	378.66	378.58	378.49	506.59	508.05	507.39	28.27	156.46
	加载	378.10	378.02	379.02	507.17	507.51	507.93	28.31	156.45
370	卸载	378.71	378.60	378.59	506.59	508.03	507.33	28.24	156.43
	加载	378.16	378.08	379.19	507.18	507.46	507.88	28.34	156.44

表5 不同温度台阶下应变计热输出
Tab.5 Thermal output of strain gauge at different temperature steps

温度 /℃	纯镍导线应变计热输出 / $\mu\epsilon$			纯镍导线应变计平均 热输出 / $\mu\epsilon$	铜镍导线应变计热输出 / $\mu\epsilon$			铜镍导线应变计平均 热输出 / $\mu\epsilon$
	样品 1	样品 2	样品 3		样品 4	样品 5	样品 6	
20	-1	0	1	0	1	-1	1	0
100	18	73	90	60	58	92	94	81
150	40	131	155	109	91	122	185	133
200	70	201	215	162	150	184	264	199
250	184	361	371	305	336	322	410	356
300	523	794	769	695	815	633	747	732
325	692	1 052	1 014	920	1 094	855	956	968
350	843	1 327	1 257	1 142	1 343	1 225	1 039	1 202
370	921	1 376	1 314	1 203	1 397	1 326	1 050	1 258

表6 不同温度台阶下应变计加载真实应变
Tab.6 Loaded actual strain of strain gauge at different temperature steps

温度 /℃	纯镍导线应变计加载应变 / $\mu\epsilon$			纯镍导线应变计 平均加载应变 / $\mu\epsilon$	铜镍导线应变计加载应变 / $\mu\epsilon$			铜镍导线应变计 平均加载应变 / $\mu\epsilon$
	样品 1	样品 2	样品 3		样品 4	样品 5	样品 6	
20	-920	-970	930	979	-929	953	-920	-970
100	-913	-965	922	975	-936	951	-913	-965
150	-891	-903	963	989	-887	996	-891	-903
200	-898	-936	896	946	-924	923	-898	-936
250	-884	-919	894	940	-911	920	-884	-919
300	-873	-897	866	921	-901	899	-873	-897
325	-850	-870	840	887	-871	871	-850	-870
350	-836	-845	804	874	-848	852	-836	-845
370	-848	-848	811	883	-854	862	-848	-848

律可靠。修正后纯镍导线与铜镍导线的变化趋势基本一致，说明本文提出的方法能够有效降低导线材料差异带来的影响。

根据表5修正后的热输出，得到应变计热输出曲线，如图6所示。两类导线修正后的热输出曲线变化趋势较为接近，说明导线电阻修正后，导线材料差异对热输出评价结果的影响有所降低。

根据表7和表8修正后的应变灵敏系数，得到纯镍导线应变计和铜镍导线应变计平均灵敏系数

曲线，如图7所示，其中，N-K表示镍导线应变计灵敏系数，NC-K表示铜镍导线应变计灵敏系数。修正后两类导线应变计的灵敏系数变化趋势较为一致，说明本文方法能够在一定程度上削弱导线电阻差异对应变测量结果的影响。

图8为修正后镍导线应变计热输出和 $K_{相对}$ 。图9为修正后铜镍导线应变计热输出和 $K_{相对}$ 。修正后的纯镍导线应变计和铜镍导线应变计平均灵敏系数基本一致。

表7 不同温度下纯镍导线应变计灵敏系数
Tab.7 Gauge factor of nickel wire strain gauge at different temperatures

温度 / °C	应变计灵敏系数			平均灵敏系数	$K_{\text{相对}}$
	样品 1	样品 2	样品 3		
20	1.84	1.94	1.86	1.88	1.00
100	1.83	1.93	1.84	1.87	0.99
150	1.78	1.81	1.93	1.84	0.98
200	1.80	1.87	1.79	1.82	0.97
250	1.77	1.84	1.79	1.80	0.96
300	1.75	1.79	1.73	1.76	0.93
325	1.70	1.74	1.68	1.71	0.91
350	1.67	1.69	1.61	1.66	0.88
370	1.70	1.70	1.62	1.67	0.89

表8 不同温度下铜镍导线应变计灵敏系数
Tab.8 Gauge factor of copper-nickel wire strain gauge at different temperatures

温度 / °C	应变计灵敏系数			平均灵敏系数	$K_{\text{相对}}$
	样品 4	样品 5	样品 6		
20	1.96	1.86	1.91	1.91	1.00
100	1.95	1.87	1.90	1.91	1.00
150	1.98	1.77	1.99	1.91	1.00
200	1.89	1.85	1.85	1.86	0.98
250	1.88	1.82	1.84	1.85	0.97
300	1.84	1.80	1.80	1.81	0.95
325	1.77	1.74	1.74	1.75	0.92
350	1.75	1.70	1.70	1.72	0.90
370	1.77	1.71	1.72	1.73	0.91

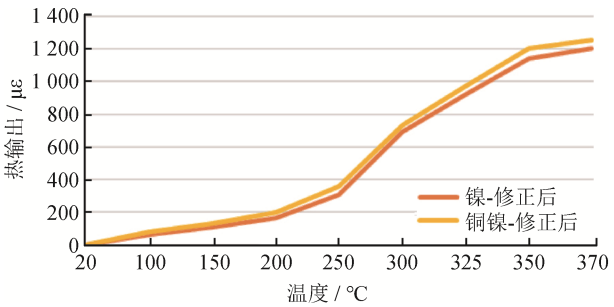


图6 纯镍导线应变计和铜镍导线应变计平均热输出曲线
Fig.6 Average thermal output curves of nickel wire strain gauge and copper-nickel wire strain gauge

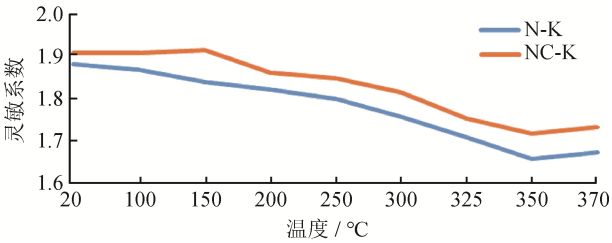


图7 纯镍导线应变计和铜镍导线应变计灵敏系数
Fig.7 Sensitivity coefficients of nickel wire strain gauge and copper-nickel wire strain gauge

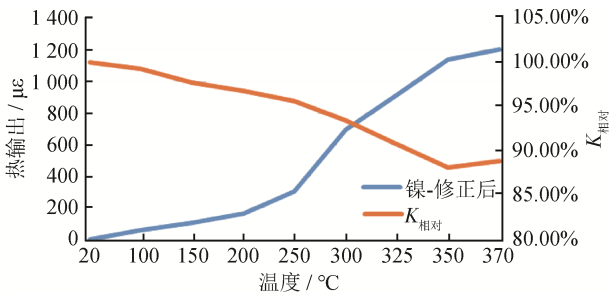


图8 纯镍导线应变计热输出和 $K_{\text{相对}}$
Fig.8 Thermal output and relative K of nickel wire strain gauge

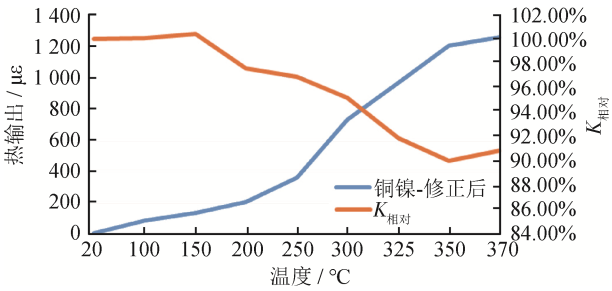


图9 铜镍导线应变计热输出和 $K_{\text{相对}}$
Fig.9 Thermal output and relative K of copper-nickel wire strain gauge

4 结论

本文通过实际测试案例,对纯镍长导线应变计和铜镍长导线应变计在高温条件下的应变与电阻变化进行了对比测试,并基于测试应变、应变计电阻及导线电阻实测值对应变结果进行了修正,获得了不同温度下更接近真实值的热输出应变和加载应变。分析结果表明:本方法能够有效修正长导线应变计在高温环境中因导线电阻及其温度变化所引起的测量误差,修正后纯镍长导线应变计与铜镍长导线应变计的热输出、灵敏系数及 $K_{\text{相对}}$ 变化规律基本一致,说明该方法能够较好地削弱

不同导线材料及其温度效应带来的影响。

本法适用于 20 ~ 370 °C 温度区间内长导线高温应变测试场景, 尤其适用于核电设备及其他高温结构远距离应变测量场合, 但需要指出的是, 本文修正模型及相关计算过程是基于半桥接线方式建立的, 因此目前主要适用于半桥测量电路, 对单臂桥、全桥等其他桥路形式仍需进一步推导相应修正关系。与此同时, 长导线电阻与处于高温区域内的导线长度密切相关, 对于温度电阻系数较大的镍导线, 进入高温炉内的导线越长, 其电阻变化及对应变测量精度的影响越显著。本方法无需改变现有测量电路结构, 仅需在现有测试系统基础上结合实测电阻参数进行数据处理即可实现修正, 具有较好的工程可实施性和现场应用价值。后续还可进一步围绕不同桥路形式、瞬态温度场与温度梯度条件、不同导线材料及长度范围以及更高温区间下的修正模型开展研究, 并结合在线测温与自动化数据处理方法, 进一步提高该方法在复杂工程环境中的适用性、实时性和准确性。

参考文献

- [1] 王高, 梁海坚, 魏艳龙, 等. 超高温极端环境下的超声测温技术研究进展[J]. 计测技术, 2024, 44(5): 1-13.
Wang Gao, Liang Haijian, Wei Yanlong, et al. Research progress of ultrasonic temperature measurement technology in ultra-high temperature extreme environments[J]. Metrology & Measurement Technology, 2024, 44(5): 1-13.
- [2] 刘梓才, 喻丹萍, 卢琰琰, 等. 高温应变片热输出测试[J]. 核动力工程, 2011, 32(增刊1): 166-168.
Liu Zicai, Yu Danping, Lu Yanyan, et al. Thermal output test of high temperature strain gauge[J]. Nuclear Power Engineering, 2011, 32(S1): 166-168.
- [3] 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.
Wang Wenrui, Zhang Jiaming, Nie Shuai. Simulation and experiment on influence factor of contact high temperature strain measurement accuracy[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2015, 38(3): 439-444.
- [4] 尹福炎. 瞬态加热条件下高温应变计测量误差的修正方法[J]. 强度与环境, 2005, 32(1): 36-42.
Yin Fuyan. Correction technique for high temperature strain gage under transient heating conditions[J]. Structure & Environment Engineering, 2005, 32(1): 36-42.
- [5] 张炳安. 导线电阻引起测试结果误差的简便修正方法[J]. 工程机械, 1992, 23(7): 28-29.
Zhang Bing'an. A simple and convenient method to correct the error of test results caused by conductor resistance[J]. Construction Machinery and Equipment, 1992, 23(7): 28-29.
- [6] 王文瑞, 温晓东, 胡挺. 高温应变片关键参数标定方法[J]. 工程科学学报, 2015, 37(12): 1667-1673.
Wang Wenrui, Wen Xiaodong, Hu Ting. Calibration method for key parameters of high-temperature strain gauges[J]. Chinese Journal of Engineering, 2015, 37(12), 1667-1673.
- [7] 王文瑞, 温晓东, 胡挺, 等. 高温应变片的热输出耦合特性[J]. 工程科学学报, 2018, 40(9): 1131-1137.
Wang Wenrui, Wen Xiaodong, Hu Ting, et al. Thermal output coupling characteristics of high-temperature strain gauges[J]. Chinese Journal of Engineering, 2018, 40(9): 1131-1137.
- [8] Henneke E G, Stinchcomb W W. High-temperature strain gage measurement techniques for temperatures above 800 °C: a review[J]. Experimental Mechanics, 1986, 26(4): 323-332.
- [9] Strain sensing technology for high temperature applications: NASA - TM - 106662 [R]. Washington: NASA, 1995.
- [10] 艾延廷, 刘明, 张凤玲, 等. 提升高温应变计寿命及精度的结构优化方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(6): 151-161.
Ai Yanting, Liu Ming, Zhang Fengling, et al. Research on the structural optimization method to improve the service life and accuracy of high temperature strain gauge[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(6): 151-161.
- [11] 李粉娥, 马新营, 晏志鹏. 对测量金属粘贴式电阻应变计电阻的误差分析[J]. 计量与测试技术, 2013, 40(1): 45-47.
Li Fene, Ma Xinying, Yan Zhipeng. An analysis of the er-

- ror source in the measurement of resistance value of resistance strain gauges [J]. Metrology & Measurement Technique, 2013, 40(1): 45-47.
- [12] ASTM E1319 - 98 Standard guide for high - temperature static strain measurement [S]. West Conshohocken, PA: ASTM International, 1998.
- [13] 杨庆旭, 夏俊元, 江泉. 高温服役钢结构应力测试技术研究[J]. 焊接技术, 2020(11): 78-80.
- Yang Qingxu, Xia Junyuan, Jiang Quan. Research on stress testing technology of steel structures under high-temperature service conditions [J]. Welding Technology, 2020(11): 78-80.
- [14] 郝庆瑞, 姜亚军. 瞬态热强度试验中高温电阻应变计瞬时热输出的校准及修正技术研究[J]. 结构强度研究, 2012(4): 33-36.
- Hao Qingrui, Jiang Yajun. Research on calibration and correction technology of instantaneous thermal output of high-temperature resistance strain gauges in transient thermal strength tests [J]. Structural Strength Research, 2012 (4): 33-36.
- [15] 胡挺, 王文瑞, 尹曰雷, 等. 高温应变片参数标定系统的设计与实验研究[J]. 传感技术学报, 2015, 28(9): 1341-1346.

Hu Ting, Wang Wenrui, Yin Yuelei, et al. Design and experimental study on parameter calibration system of high-temperature strain gauges [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2015, 28(9): 1341-1346.

(本文编辑: 刘圣晨 李成成)



第一作者: 苗碧琪(1983—), 男, 陕西咸阳人, 高级工程师, 硕士, 主要从事核电厂结构疲劳监测, 疲劳损伤检测与评估。



通信作者: 李振亚(1995—), 男, 安徽阜阳人, 工程师, 硕士, 主要从事核电厂高温环境应变测量、误差分析与修正研究。作为项目负责人主持相关课题5项, 发表论文十余篇。