

应变温度补偿方法的改进

滑广军¹, 王建强², 徐东喜², 刘奇龙¹

(1. 湖南工业大学 包装与印刷学院, 湖南 株洲 412008;
2. 上海宝钢工业检测公司, 上海 201900)

摘要: 从提高应变测试的精度出发, 对应变测试温度补偿的必要性, 温度补偿的原理进行了分析。在对应变计的温度补偿原理进行分析的基础上, 设计了一种便携式的温度补偿装置, 该装置安装方便, 可多次使用, 既提高了效率, 又可节约材料的消耗。

关键词: 应变电测技术; 温度补偿方法; 便携式

中图分类号: TP391.76

文献标识码: A

文章编号: 1673-9833(2008)02-0074-04

Improvement of the Temperature Compensating Method in Strain Gage Measurement

Hua Guangjun¹, Wang Jianqiang², Xu Dongxi², Liu Qilong¹

(1. School of Packaging & Printing, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412008, China;
2. Shanghai Baosteel Industry Inspection corp., Shanghai 201900, China)

Abstract: From the point of improving the precision of the strain gage measurement, the necessity of the temperature compensating method in strain gage measurement and the theory of the temperature compensating method are analyzed. On the basis of the analysis, a portable temperature compensating device is designed. The device can be fixed easily and used repeatedly. This device can save the consuming of the material and improve the test precision.

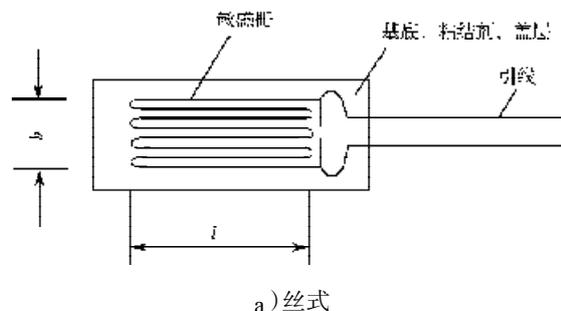
Key words: strain gage technology; temperature compensating method; portable

1 背景知识

应变测试因其具有使用方便、测试范围广、测试精度高、稳定可靠等优点, 在力学测试方面得到了广泛使用。在应变测试过程中, 温度是影响测试精度的一个非常关键的因素, 因此在应变测试时针对不同的精度要求及温度环境, 往往通过一定的技术方法进行处理^[1]。

应变电测技术的基本原理是将构件的变形量转变成应变计丝栅电阻的变化, 通过应变计丝栅电阻的变化来获得构件的应变。电阻应变计的基本构造如图1中的a)所示, 由敏感栅、基底、粘结剂、盖层、引线组成。早期的应变计敏感栅由金属细丝绕成栅形, 敏

感栅材料常用的有康铜(铜镍合金)、镍铬合金等^[1]。后来发展的箔式电阻应变计, 基本构造如图1中的b)所示, 敏感栅用金属箔, 厚度在0.003~0.006 mm间, 栅形由光刻制成, 图形可很复杂且精细, 栅的尺寸可很小, 栅长最小可至0.2 mm^[2]。



收稿日期: 2007-12-28

作者简介: 滑广军(1975-), 男, 河南长垣人, 湖南工业大学工程师, 工学硕士, 主要研究方向为运输包装技术, 测试与故障诊断技术, 结构动力学。

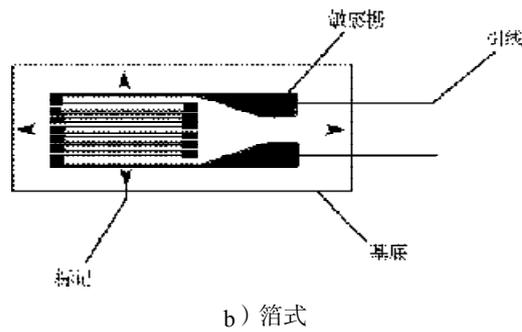


图1 电阻应变计基本构造示意图

Fig. 1 Basic structure diagram of the strain gauges

影响电阻应变计电阻变化的因素, 不是单一的构件应变变化。温度的变化也会引起应变计电阻的变化, 进而引起应变测试数据的变化, 由温度引起的应变测试数据叫做热输出。因此指示应变值是机械应变与热输出之和, 见公式(1)。

$$\varepsilon_i = \varepsilon_m + \varepsilon_t \quad (1)$$

式(1)中:

ε_i 为指示应变值, 是由应变计测得的值;

ε_m 为机械应变, 是由试件中应力引起的应变;

ε_t 为热输出, 是由温度变化引起的指示应变。

另外, 应变计在不同的温度下其灵敏度系数也是变化的, 即在同样的机械应变下, 温度不同, 灵敏度也不同, 进而使得测试应变值也不同。因此, 在温度变化较大、同时对测试精度要求比较高的场合进行应变测试时, 减小温度对测试精度的影响非常重要^[2]。

2 应变测试温度补偿原理

热应变是当应变计安装在具有某线膨胀系数的试件上, 如试件可自由膨胀并不受外力作用, 在缓慢升(或降)温的均匀温度场内, 由温度变化引起的指示应变。因此, 热输出是试件的热应变和温度变化对应变片的综合作用引起的, 用 ε_t 表示。

当温度变化 ΔT 时, 一个未粘贴的应变片的敏感栅受温度的影响而发生变化, 其电阻变化率为:

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_f = \gamma_f \Delta T \quad (2)$$

式(2)中: γ_f 为应变合金的电阻温度系数。

同时, 当敏感栅受温度的影响发生变形(膨胀或收缩)时, 它的长度变化率为:

$$\left(\frac{\Delta L}{L}\right)_f = \alpha_f \Delta T \quad (3)$$

式(3)中: α_f 为应变合金的线膨胀系数, 或称为热膨胀系数。

当试件温度变化了 ΔT 时, 试件的长度变化率(热

应变)为:

$$\left(\frac{\Delta L}{L}\right)_s = \alpha_s \Delta T \quad (4)$$

式(4)中: α_s 为试件的线膨胀系数。

如应变片在温度变化前已粘贴到试件上, 因为应变片的刚度比试件的刚度小得多(这是必须的, 否则会影响到测试的精度), 所以当温度变化后, 敏感栅不能自由膨胀或收缩, 而只能随着试件变形。如 $(\Delta L/L)_f \neq (\Delta L/L)_s$, 敏感栅受到附加的拉伸或压缩, 其应变值为:

$$\varepsilon_i = \left(\frac{\Delta L}{L}\right)_s - \left(\frac{\Delta L}{L}\right)_f = (\alpha_s - \alpha_f) \Delta T \quad (5)$$

此机械应变使应变片发生的电阻变化率为:

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_i = K \varepsilon_i = K (\alpha_s - \alpha_f) \Delta T \quad (6)$$

应变片因温度变化而发生的总电阻变化率为:

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_t = \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_f + \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_i = [\gamma_f + K(\alpha_s - \alpha_f)] \Delta T \quad (7)$$

应变片的热输出为:

$$\varepsilon_t = \frac{1}{K} \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_t = \frac{1}{K} \gamma_f \Delta T + (\alpha_s - \alpha_f) \Delta T \quad (8)$$

可见, 因为温度变化而产生的电阻变化与 γ_f 、 α_f 、 α_s 、 K 有关。如果这几个参数合理搭配, 在一定温度范围内有可能使 $(\Delta R/R)_t = 0$, 也就是 $\varepsilon_t = 0$, 这就是温度自补偿应变片的原理。

如果将应变片的灵敏度系数在高温下发生变化的因素考虑在内, 则指示应变为:

$$\varepsilon_i = \left(\frac{K_t}{K}\right) \varepsilon_w + \varepsilon_t \quad (9)$$

式(9)中: K_t 为试件在温度为 T 时的灵敏度系数;

K 为试件在室温时的灵敏度系数。

实际上温度对应变片的影响还要复杂, 通过调整 γ_f 、 α_f 、 α_s 、 K 参数值, 精确地使 $(\Delta R/R)_t = 0$, 也就是 $\varepsilon_t = 0$, 技术上还很难达到。因此, 一般的高温应变计都会给出热输出-温度特性曲线^[2], 而常温应变计一般没有该曲线提供。

3 常用的温度补偿方法

既然温度变化会影响应变测试结果, 因此, 在测试时为了保证测试精度, 需要采取温度补偿的方法消除温度变化对测量值的影响。

温度补偿大体可分为3种方法: 1) 电路补偿法: 包括补偿片法, 热敏电阻法(又可分为电阻元件法或热电偶法); 2) 自补偿法: 对敏感栅处理法和双金属

线栅法；3) 温度修正法。

对上述3种方法，一般情况下根据测试环境中温度的变化情况以及测试精度要求，可以采用一种方法或几种方法的组合来使用。比如，在常温下且温度变化较小、较慢的工况下，一般采用温度自补偿应变计就行了；如果常温下温度变化较大，同时变化速度较快，则需要在选用温度自补偿应变计的同时，还要采用电路补偿法进一步补偿；在高温环境下，除了选用温度自补偿应变计、电路补偿，还要测试温度变化，以便消除由放大系数引起的误差^[3]。

4 新型磁座式温度补偿块的设计及应用

在生产实践中，多数设备是在常温下工作的，因此采用温度自补偿应变计和电路补偿两种方法可满足大多数的应变测试需要。

如果采用现场安装温度补偿片的方法，工作量是很大的，现场安装一个补偿片与安装一个测试片的工作量是一样的。同时补偿片的选点也会让人为难，理论上，补偿片应装在与测点温度变化一致且不受力的地方，这样补偿精度才是最高的，但是在现场如何确定这样的点？如果将补偿点选择在构件本体上测试点附近，可近似地实现温度变化一致，但这样一来很难保证补偿片贴片位置不受力；在远离测试构件的地方可以找到不受力的构件，但又无法保证温度变化的一致性，同时温度补偿应变计与测试应变计离的太远也会因为信号线路的不同影响补偿效果。因此，在现场安装温度补偿应变计不仅费时费力，如何选择温度补偿计的安装位置也是常常令技术人员头疼的问题。

笔者结合长期的应变测试及分析的经验，在对通用大型设备工作温度环境条件、受载应力水平及常用钢材线膨胀系数及补偿精度进行分析的基础上，设计了一种便携式的温度补偿装置。相对于以前常用的温度补偿方法，现行方法进行了如下改进：

a) 该温度补偿装置底板基本材料选择A3钢，可以同时安装多种应变计，可以满足不同种应变测试的要求；

b) 底座上装有永磁条，磁座式便携式的温度补偿装置在现场安装方便，利用磁吸的原理可以快速安装到离测点最近的部位；

c) 应变计安装到底座上后用钢质盖板进行保护，然后用硅胶等对盖板与底板的结合部位及其它空隙处进行密封，可达到机械防护及防潮防水的作用；

d) 使用前在实验室实现温度补偿应变计的安装和防护，实验室良好的工作条件使得温度补偿应变计

的粘贴、焊接、防护、引线的焊接质量都得到了较好地控制，降低了因温度补偿应变计的安装不当引起的测试误差；同时节省了大量现场安装时间和停机时间，提高了工作效率；温度补偿应变计可重复使用，节约了成本；

e) 由于是通过磁吸的方式进行安装，该温度补偿装置并没有与测点同时受力，只是在温度上同步变化，因此补偿精度也较高；

f) 将以前需要在现场完成的工作转移到了实验室，改善了施工人员的工作条件，与现阶段所提倡的“和谐社会，以人为本”的宗旨是相符的^[4]。

5 温度补偿块的补偿精度分析

机械设计手册中常用钢材的线膨胀系数 a 见表1^[3]， $a=(表内数值)*10^{-6}/^{\circ}C$ 。图2、图3中所示的温度补偿块底板为A3钢^[4]，A3钢在各个温度范围内的线膨胀系数如果按普通碳钢线膨胀系数的中间值计算，则可以计算出用该温度补偿块对其它钢材的测试对象进行应变测试时每变化 $1^{\circ}C$ 时的误差，每摄氏度的补偿误差 b 见表2， $b=(表内数值)*10^{-6}/^{\circ}C$ 。

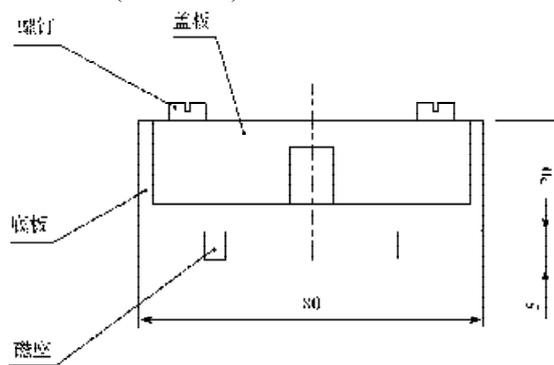


图2 温度补偿块结构图

Fig. 2 Temperature compensation block structure map

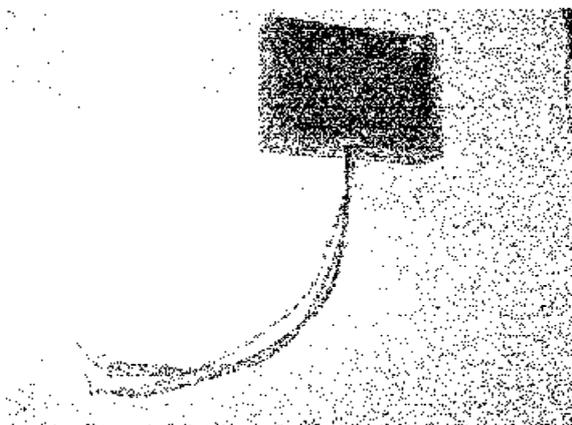


图3 温度补偿块实物图

Fig. 3 Temperature compensation block map

表1 部分常用钢材的线膨胀系数
Table 1 Linear expansion coefficient of some commonly used steel

材料	温度范围 / °C			
	20 ~ 100	20 ~ 200	20 ~ 300	20 ~ 400
碳钢	10.6 ~ 12.2	11.3 ~ 13	12.1 ~ 13.5	12.9 ~ 13.9
铬钢	11.2	11.8	12.4	13
40GrSi	11.7	/	/	/
30GrMnSiA	11	/	/	/
3Gr13	10.2	11.1	11.6	11.9

注: 表中“/”表示手册中缺乏该项数据, 以下类同。

表2 补偿块对常用钢材的理论补偿误差

Table 2 The theoretical compensation error of compensation block to the commonly used steel

材料	温度范围 / °C			
	20 ~ 100	20 ~ 200	20 ~ 300	20 ~ 400
碳钢	-0.8 ~ 0.8	-0.85 ~ 0.85	-0.7 ~ 0.7	-0.5 ~ 0.5
铬钢	-0.2	-0.35	-0.4	-0.4
40GrSi	0.3	/	/	/
30GrMnSiA	-0.4	/	/	/
3Gr13	-1.2	-1.05	-1.2	-1.5

由表2中的数据可知, 如果选用的应变计是普通应变计(不带温度补偿功能), 那么在温度补偿片与测试片温度同步变化的情况下, 选用A3钢作为温度补偿块对常用钢材进行温度补偿时, 因材料的线膨胀系数因素引起的单位温度的应变误差在 $\pm 1.5 \times 10^{-6}$ 以内。对于一般的测试精度要求, 该误差是可以接受的(如果对测试精度要求非常高, 测试对象本身的应变又比较小, 最理想的方法是用与测试对象完全相同的材料进行温度补偿)。如果测试片和补偿片均采用温度自补偿应变计, 则实际的应变误差还要小^[5-7]。

6 结语

进行应变测试时, 温度补偿要考虑的因素是非常多的, 如测试对象的材料、测试对象的温度变化、测点部位的温度梯度情况(如果测点部位的温度梯度越大, 会导致补偿的误差越大), 因此, 每次进行应变测试前一定要对这些环境因素进行充分的认知, 对环境因素引起的误差进行分析, 并采取必要的措施, 才能保证测试满足需要^[8-10]。

参考文献:

- [1] 张如一, 沈观林, 李朝弟. 应变电测与传感器[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999: 25-34.
- [2] 机械工业部农业机械科学研究院. 应变片电测技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1978: 30-46.
- [3] 刘 晗. 应变电测技术在状态测试及评估中的应用研究[J]. 宝钢技术, 2004(6): 3-6.
- [4] 滑广军. 一种便携式的温度补偿装置[P]. 中国专利: 200620049316.0, 2007-09-10.
- [5] 吴宗泽. 机械设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [6] 杨伯源, 白嘉楠. 一种工程结构的有限元分析与应变电测分析[J]. 合肥工业大学学报, 2002(6): 1159-1162.
- [7] 罗宜端. 100 m火炬塔架预应力腹杆的测试[J]. 石油工程建设, 2000(6): 54-55.
- [8] 吴东云, 杨树标, 安新正. 钢结构工作应力测定试验研究[J]. 煤矿设计, 2000(6): 27-28.
- [9] 肖春平. 复杂环境下动态应变测试的若干问题研究[J]. 钢结构, 2006(6): 36-39.
- [10] 陆敏恂, 粟 亮, 刘晓东, 等. 高温应变测试方法与测试系统开发[J]. 微传感器系统, 2006(6): 39-42.

(责任编辑: 廖友媛)