

电阻应变计的技术要求、试验方法及应变电测方法的应用技术

*沈观林

(清华大学航天航空学院 北京 100084)

摘要: 本文首先介绍我国原国家标准《电阻应变计》GB/T13992-92 最近修订为国家标准《金属粘贴式电阻应变计》的情况,电阻应变计有灵敏系数、热输出、横向效应系数、蠕变、应变极限和疲劳寿命等多项工作特性;其次说明新标准规定用于应力分析的电阻应变计各项工作特性的技术要求技术指标单项技术指标分 A、B、C 三级,标准还规定了电阻应变计主要工作特性的试验方法,各种用途电阻应变计应测工作特性项目和评级工作特性项目;最后介绍应变电测方法用于结构应力分析的具体应用技术。

关键词: 电阻应变计; 工作特性; 技术指标; 应变电测;

1 引言

自二十世纪三十~五十年代发明和生产各种电阻应变计和相应测试仪器以来,几十年中已广泛应用于各种工程结构、机械设备的应力应变测量分析,同时制成了各种传感器也普遍用于测量力、荷重、压强、位移和加速度等物理量。对于电阻应变计,世界各国先后制订了技术标准:如美国宇航局《粘贴式电阻应变计》的技术规范 NAS 942,美国材料试验协会 ASTM E251-92 (2003):《金属粘贴式电阻应变地工作特性标准试验方法》,英国 DD6 标准,德国 VDE/VDI 2635 《金属粘贴式电阻应变计工作特性和试验条件》和国际计量法组织 OIML 建议 NO.62 《金属电阻应变计工作特性》。我国 1992 年发布 GB/T 13992-92 《电阻应变计》国家标准。2008 年修订了此标准,2009 年将发布国家标准名为《金属粘贴式电阻应变计》、新国家标准规定了电阻应变计各项工作特性的技术要求、试验方法和检验规则等。

实施标准可保证电阻应变计产品的质量,并提高使用电阻应变计的技术水平。

2 电阻应变计的各项工作特性和技术要求

2.1 电阻应变计的各项工作特性

电阻应变计主要用于测量结构或机械部件应力应变和作为传感器中的敏感元件,这两大类用途对电阻应变计的工作特性要求用所不同,电阻应变计具有多项工作特性,对于常温,中温,高温和低温不同工作温度范围使用的电阻应变计又有不同工作特性项目,这里单列出常温电阻应变计的工作特性项目:

- | | | | |
|--------------|-----------|----------|-----------|
| (1)灵敏系数 | (2)应变计电阻值 | (3)热输出 | (4)横向效应系数 |
| (5)灵敏系数的温度系数 | (6)漂移 | (7)蠕变 | (8)机械滞后 |
| (9)疲劳寿命 | (10)绝缘电阻 | (11)应变极限 | |

其中,最主要的工作特性是灵敏系数,热输出和横向效应系数等。

2.2 电阻应变计各项工作特性的技术要求

电阻应变计各单项工作特性应符合国家标准规定的技术要求指标,新修订的《金属粘贴式电阻应变计》

* 作者简介:沈观林(1935-),男,上海人,教授,主要从事实验固体力学和复合材料力学研究和教学。

国家标准规定单项工作特性分为 A, B, C 三级, 电阻应变计分静态和动态两种使用, 静态使用又分为两种, 一种用于应力分析, 另一种用于传感器作敏感元件, 下面表 1 列出用于应力分析的应变计单项技术指标, 表 2 列出用于传感器的应变计单项技术指标。

表 1 用于应力分析的应变计单项技术指标

序号	工作特性	说 明			级 别		
					A	B	C
1	应变计电阻	对平均值的允差	单栅	±%	0.3	0.5	0.8
			双栅		0.7	1.0	1.5
			多栅		0.8	1.0	1.5
		对标称值的偏差		±%	1.0	1.5	2.0
2	灵敏系数	对平均值的分散		±%	1	2	3
3	机械滞后	室温下的机械滞后		μ m/m	3	5	8
		极限工作温度下的机械滞后		μ m/m	10	20	30
4	蠕变	室温下的蠕变		μ m/m	3	5	10
		极限工作温度下的蠕变		μ m/m	20	30	50
5	横向效应系数	室温下的横向效应系数		±%	0.5	1	2
6	灵敏系数的温度系数	工作温度范围内的平均变化		±%/100℃	1	2	3
		每一温度下灵敏系数对平均值的分散		±%	3	4	6
7	热输出	平均热输出系数		μ m/m/℃	1.5	2	4
		对平均热输出的分散		± μ m/m	60	100	200
8	漂移	室温下的漂移		μ m/m	1	3	5
		极限工作温度下的漂移		μ m/m	10	25	50
9	热滞后	每一工作温度下		μ m/m	15	30	50
10	绝缘电阻	室温下的绝缘电阻		MΩ	10 ⁴	2×10 ³	10 ³
		极限工作温度下的绝缘电阻		MΩ	10	5	2
11	应变极限	室温下的应变极限		μ m/m	2×10 ⁴	10 ⁴	8×10 ³
		极限工作温度下的应变极限		μ m/m	8×10 ³	5×10 ³	3×10 ³
12	疲劳寿命	室温下的疲劳寿命		循环次数	10 ⁷	10 ⁶	10 ⁵
		极限工作温度下的疲劳寿命					

表 2 用于传感器的应变计单项技术指标

序号	工作特性	说 明			级 别		
					A	B	C
1	应变计电阻	对平均值的允差	单栅	±%	0.2	0.3	0.6
			双栅		0.7	1.0	1.5
			多栅		0.8	1.0	1.5
		对标称值的偏差		±%	0.5	0.8	1.5
2	灵敏系数	对平均值的分散		±%	1	2	3
3	机械滞后	室温下的机械滞后		μ m/m	3	5	8
		极限工作温度下的机械滞后		μ m/m	10	20	30

序号	工作特性	说明		级别		
				A	B	C
4	蠕变	蠕变对平均值的分散	$\pm \mu \text{ m/m}$	3	5	10
		极限工作温度下的蠕变	$\mu \text{ m/m}$	无	30	50
5	灵敏系数的温度系数	工作温度范围内的平均变化	$\pm\%/100^\circ\text{C}$	1	2	3
		每一温度下灵敏系数对平均值的分散	$\pm\%$	3	4	6
6	热输出	平均热输出系数	$\mu \text{ m/m}/^\circ\text{C}$	1.5	2	4
		对平均热输出的分散	$\pm \mu \text{ m/m}$	30	100	200
7	漂移	室温下的漂移	$\mu \text{ m/m}$	1	3	5
		极限工作温度下	$\mu \text{ m/m}$	10	25	50
8	疲劳寿命	室温下的疲劳寿命	循环次数	10^6	10^5	10^4

对于用于应力分析的常温应变计应测试多项工作特性，其中有灵敏系数、蠕变、热输出，应变计电阻四项作为评定等级项目，确定应变计技术等级为 A、B、C 等级。

3 电阻应变计的试验方法

国家标准规定电阻应变计各项工作特性的试验方法，这里只介绍两项。

3.1 灵敏系数

灵敏系数是安装在单向应力试件上的应变计在其轴向受到单向应力时引起的电阻相对变化 $\Delta R/R$ 与由此单向应力引起试件表面轴向应变 ε_x 之比即

$$K = \Delta R / R / \varepsilon_x \quad (1)$$

K 为应变计灵敏系数，由于应变计安装(粘贴)后不能取下再用，因此由厂家采用抽样方法在专门的检定装置(等强度梁或刚架梁等)上试验测定每批应变计的灵敏系数，其中 $\Delta R/R$ 由专门精密应变测试仪器测量， ε_x 另由专门仪器测量，将抽样检定各应变计 K_i 的平均值 \bar{K} 及其分散度 δ_k ，作为表征该批应变计的灵敏系数特性。

$$\bar{K} = \frac{\sum_{i=1}^n K_i}{n}, \quad S_k = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (K_i - \bar{K})^2}{n-1}}, \quad \delta_k = t_p \cdot \frac{S_k}{\bar{K}} \times 100\% \quad (2)$$

式中 S_k 为灵敏系数标准偏差， t_p 为置信水平为 p 的 t 分布临界值，置信水平 p 一般取 95%， t_p 与被测应变计总数 n 有关(可查表略)，试验检定 K 时加载应变水平为 $1000 \mu\text{m/m}$ ，加卸载 3 次取平均值，厂家把该批应变计灵敏系数及其分散度打印在应变计包装盒上供客户使用，举例： K 及其分散度为 $2.18 \pm 1\%$ 。

3.2 热输出

应变计是利用应变电阻效应由电阻变化测量应变的。但敏感栅材料的电阻率受温度影响，应变计安

装在某构件上，由于环境温度变化引起构件温度变化 ΔT ，所产生的电阻相对变化称为应变计温度效应，用热输出来表示，它定义为应变计安装在某种线膨胀系数的试件上，试件可自由膨胀，并不受外力作用，在缓慢升(降)温的均匀温度场内，由温度变化引起的指示应变，热输出用 ε_T 表示为下式

$$\varepsilon_T = \frac{\alpha_T}{K} \Delta T + (\beta_e - \beta_g) \Delta T \quad (3)$$

式中 β_e 是试件材料线膨胀系数， β_g 是应变计敏感栅材料线膨胀系数， α_T 是敏感栅的电阻温度系数，实际上应变计的热输出表示为随温度变化的曲线。

由于应变计主要用于测量应变，希望应变计的热输出尽可能小，即要求电阻应变计是温度自补偿应变计，由式(3)可知，热输出与应变计所安装的试件材料线膨胀系数有关，因此厂家生产出对于不同线膨胀系数材料配合的各种温度自补偿应变计：例如分别配合低碳钢、不锈钢、铝合金的电阻应变计(型号FLA-X-11, FLA-X-17, FLA-X-23等)，供用户选用。

每批应变计抽样检测若干枚安装(粘贴)在某种线膨胀系数的试件上，置于均匀缓慢升温环境中，在试件上安装一热电偶测温度，环境升温过程中，一边测量各应变计热输出 ε_{Ti} ，同时测试件温度，取各应变计热输出平均值随温度变化的曲线，并计算各应变计热输出的分散度，厂家应提供该批电阻应变计热输出曲线及其分散度。

其它工作特性试验方法可参考国家标准及相关技术资料。

4 应变电测方法的应用技术

4.1 应变电测方法用于测量结构应力应变，需要使用电阻应变计和应变测量仪器。

电阻应变计安装在结构表面或内部，把结构应变转换为应变计电阻相对变化，应变测量仪器常称为电阻应变仪，它实际上是测量应变计电阻相对变化，其中通过测量电路把电阻相对变化转换为电压或电流变化，并经过放大、滤波，显示为应变，现在应变测量仪器已发展成为数据采集仪，它可测量应变，温度，电压等静态信号，并可多通道高速自动采集、显示、打印、存储和数据处理分析，得到较高精度的测量结果。

4.2 电阻应变计的应用技术

应变测量工作中除使用测量仪器外主要的是正确选择和应用电阻应变计：

(1)必须采用质量好的电阻应变计，国内有不少厂家生产电阻应变计，但有的产品质量不能保证，因此用户应对电阻应变计进行抽样检测，这要用专门检测装置试验检测应变计的灵敏系数，应与厂家在包装上标明的灵敏系数值相符。

(2)应根据结构应力分布梯度选择应变计栅长，对应力集中部位应用小栅长应变计，为准确测量应变，应选用应变花，减小因贴片方向不准带来的误差。

(3)应尽量使用与结构材料(线膨胀系数)匹配的温度自补偿应变计。

(4)常温应变计通常用快干胶粘贴，快干胶有质量问题和贮存期，还需冷藏保存，否则不能保证应变计粘贴牢靠，准确传递和测量应变，如需长期测量应变，应用高质量的粘结剂粘贴应变计并严格防护。

参考文献

- [1] 张如一，沈观林，李朝弟. 应变电测与传感器[M]清华大学出版社 1999
- [2] 中华人民共和国国家标准 GB/T 1399-92 电阻应变计[M]国家技术监督局 1992
- [3] 沈观林 电阻应变计 (国家标准介绍)[J]传感器世界 1996.4
- [4] 沈观林 应变电测与传感器技术的发展及其在各种工程结构试验中的应用[J]工程力学 2004 增刊 I 164-179
- [5] 沈观林，李松林. 应变电测技术的新发展及其在各种工程结构试验中的应用[J]中国测试技术 2008.增刊 5-7