

力学参考资料(四)

固体力学测试技术

科学技术文献出版社重庆分社

固体力学测试技术 (力学参考资料四)

中国科学技术情报研究所重庆分所 编辑
科学技术文献出版社重庆分社

重庆市市中区胜利路91号

新 华 书 店 重 庆 发 行 所 发 行
重 庆 印 制 第 一 厂 印 刷

开本: 787×1092毫米 1/16 印张6.25 字数: 16万
1976年3月第1版 1976年3月第1次印刷
印数: 4300

统一书号: 13176·14

定价: 0.65元

毛主席语录

鼓足干劲，力争上游，多快好省地建设社会主义。

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

要抓革命，促生产，促工作，促战备，把各方面的工作做得更好。

要采用先进技术，必须发挥我国人民的聪明才智，大搞科学实验。外国一切好的经验，好的技术，都要吸收过来，为我所用。学习外国必须同独创精神相结合。

目 录

第一部分 译 文

(一) 用应变片测量高温应变的方法.....	(1)
(二) 用于高温和二向应变的电容式应变传感器的发展.....	(10)
(三) 在特殊环境下用应变片测定应力.....	(16)
(四) 散射光弹性应力分析法.....	(24)
(五) 散光光弹性设备的改进.....	(30)
(六) 应用全息多路系统分别记录等和线与等差线条纹图.....	(32)
(七) 声发射材料诊断技术.....	(36)
(八) 声发射测量在断裂力学中的应用.....	(41)
(九) 断裂力学中的超声表面波检测技术.....	(45)
(十) 一种监控动态裂纹的实验方法.....	(51)
(十一) 研究金属疲劳和断裂的 X 射线衍射法.....	(54)

第二部分 索 引

(一) 一般问题.....	(58)
(二) 高温应变片和高温应力电测技术.....	(59)
(三) 高温高压水下应力测试技术及应变无线电测试技术.....	(61)
(四) 三向光弹和激光全息光弹.....	(62)
(五) 断裂力学测试技术.....	(66)
(六) 疲劳测试技术.....	(78)
(七) 残余应力测试技术.....	(90)
(八) 振动测试技术.....	(94)
(九) 混凝土应力测试技术.....	(99)

第一部分 译文

用应变片测量高温应变的方法

江 川 幸 一

1. 前 言

热应力的实验分析方法有很多种,利用应变片的方法就是其中之一。这种方法可以直接测量具体机械和构件的应变,并具有因体积小重量轻而使用简便以及由于将测定值转化成电量表示而使测量和数据处理都很简单等一系列优点。因此在常温下的应变测量用的很普遍,可在现场对各种机械和构件进行测量。此种场合所测定的应变是由于构件材料中的应力产生的,所以测量应变值本身在设计上是有益的,并且在大多数情况下材料处于弹性范围之内,因此用纵向弹性系数乘以该应变值可求出应力,从而能够确定出被测物体的强度和安全系数。当被测物体处于高温或低温变化的情况下,在温度变化过程中(非定常温度场)以及温度变化后(定常温度场)求出应变即是高低温应变测量,其应变值等于由荷重和热应力所产生的应变乘以输出变化率与视应变之和。因此若不了解输出变化率和视应变二值时,是不能够求出由设计上需要的应力所产生的应变。此外,将应变片安装在测定物体上,在常温下几乎毫无问题,而在高温应变测量时则又是一个问题。这是由于为使应变片和其安装所用的材料耐高温并能正确地传递应变需在应变片安装时进行加热之故。

本文系处理上面所提出的问题,把如何进行测量并根据得出的应变测量值怎样求出高精度的热应力作为主要内容加以说明。同

时,对直到目前所发展的各种测量技术也加以介绍。

2. 应变片在被测物体上的安装方法及应变片的构造

为了用应变片测量高温应变,其安装方法有粘接、焊接和喷镀三种形式。粘接法的操作,是用粘着剂把应变片贴在被测物体上,进行加压之后,用加热炉或局部加热器使温度升高,在几个温度阶段内保持一定时间,使溶剂蒸发、基剂进行化学反应之后使粘着剂稳定。焊接法是用小型点焊机把应变片焊在被测物体上。喷镀法一般是用普通的大型喷镀装置作为洛卡特(ローカイド)喷镀系统,在应变片表面及其周围喷射氧化铝之类的高温熔融微粒。

对上述安装方法所不能适用的各种情况简述如下:

(1) 粘接法:对于不能在炉内处理的大型构件难于适用。对于怕因安装应变片的加热而产生永久变形和材料变质的某些情况不能适用。

(2) 焊接法:此法对于在铁合金和不锈钢上安装应变片是没有问题的,但在 Ag、Mg 合金上则需要有一定的焊接技术,对于铜和非金属材料不能用此法安装。

(3) 喷镀法:除了塑料及其以塑料为基质的复合材料之外几乎所有的材料都可以适用。然而由于在表面被喷镀的高温熔融微粒的温度影响以及在应变片及其周围的氧化

铝厚膜产生的加固效果从而发生问题的情况下，此法是难以适用的。

上述几种安装方法的优缺点如表1所示。

应变片由于安装方法不同，其构造有各种差别。粘接型的应变片与普通应变片的构造相同，把电阻丝或电阻箔夹在两片耐热绝缘薄板之中。焊接型应变片是将应变片电阻

丝粘贴在薄金属板上。喷镀型应变片是一般的结构，只有应变片电阻丝而没有片基。在表2中示出目前市场出售的高温应变片实例。最高使用温度：静测量为650°C；动测量为980°C。一般来说，如果给出测定物就会选出可能适用的安装方法，在此基础上考虑其它测量条件并选择应变片。

表1 应变片安装方法的比较

	粘 接 法	焊 接 法	喷 镀 法
高温处理	需 要	不 需 要	不 需 要
操作工艺	困 难	容 易	作表面喷注
安装在曲率大的部位	可 能	困 难	可 能
对薄板构造的适用性		有 问 题	
在急速加热的情况下	有产生温差的可能性	产生温差的可能性大	有产生温差的可能性
在金属材料上安装	可 能	Ag、Mg合金要一定技术	可 能
在非金属材料上安装	可 能	不 可 能	在塑料上安装有困难
需要的设备	电炉、局部加热器	点 焊 机	喷 镀 器
安装费用	成 本 低	成 本 低	成 本 高

表2 市场出售的高温应变片及其最高使用温度

制 造 单 位	型 号	安 装 方 法	最 高 使 用 温 度		备 注
			静测量	动测量	
共和电业公司	KA	粘 接	300°C		自身温度补偿型
"	KH	焊接、粘接	500°C		
新兴通信公司	H	粘 接	400°C		
东京测器公司	K·N	粘 接	400°C		自身温度补偿型
鲍德温公司	FNWFB	焊 接	650°C		
"	HT	喷 镀	650°C	815°C	
"	FNO-E	粘 接	455°C		自身温度补偿型
米克罗多特公司	SG-420	焊 接	510°C	980°C	自身温度补偿型
米克罗测量公司	WK	粘 接	370°C		

3. 输出变化和视应变与温度的关系

例如用一悬臂梁式的试验台，在室温下给试件一定的挠度 δ ，由应变片测出 ε_0 应变值，随着该试验台温度升高，因挠度 δ 而产生的应变值则变化到 ε_1 、 ε_2 ……，因此可以观

察到应变片的输出变化与温度的关系。图1示出输出变化的一个例子。这里使用粘接型应变片，在贴片后的第一次加热时，产生如细线所示的大的输出变化。在第三次加热时输出变化已大体上稳定。在定常状态下的输出变化在此种情况下为-2%，一般认为在±5%以内。

其次，在这里所用的平板试件上，不使

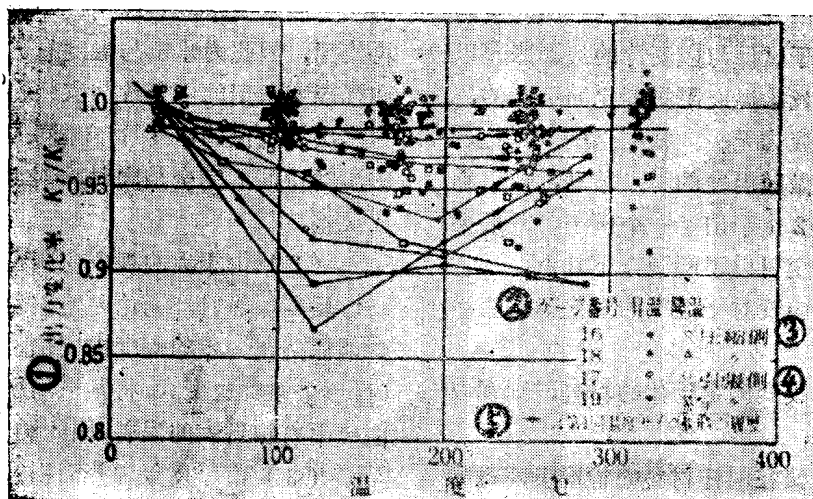


图1 应变片的输出变化与温度的关系 (图中①为输出变化率; ②为应变片号数; ③为受压边; ④为受拉边; ⑤为→表示第1次温度周期时的过程)

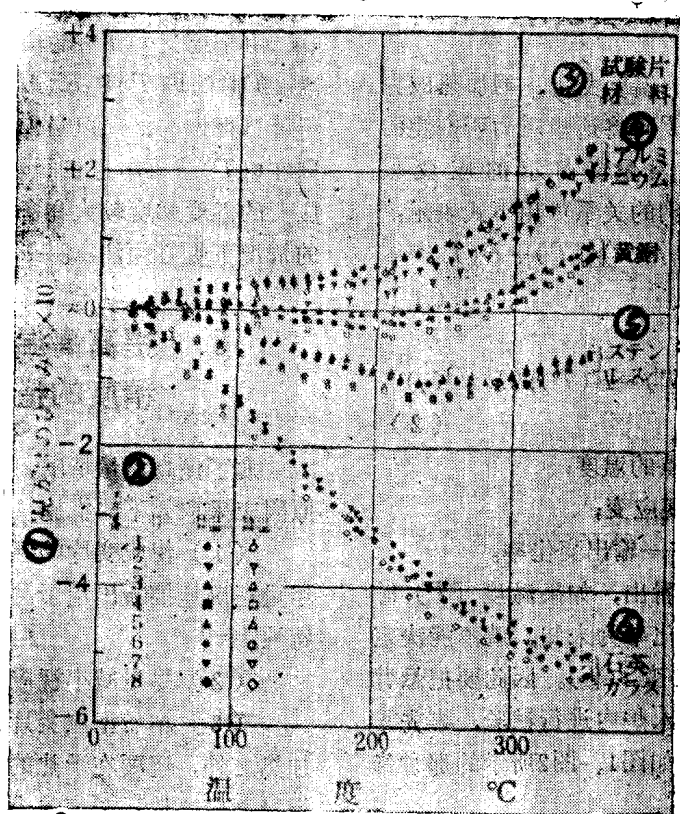


图2 视应变与温度的关系 (图中: ①为视应变; ②应变片号数; ③试件材料; ④铅; ⑤不锈钢; ⑥石英玻璃)

它弯曲而只有温度变化时,试件自由膨胀不产生热应力,但是在测量仪上表示出应变的输出。这是由于试件与应变片的线膨胀差以及应变片电阻丝的温度阻抗变化而引起的,因此与试件的应力无关。根据这一点,把这种应变输出叫做随温度的零点移动,或者称为视应变。图2上示出了一个例子。一般来说,关于视应变可以了解到以下几点:

(1) 视应变对于温度的变化不是直线关系;

(2) 如改变测定物体的材料,则视应变的大小不同;

(3) 即使在同样材料的情况下,每个应变片的视应变也不完全相同。

温度的输出变化和视应变称为应变片的温度特性。

4. 根据测量值求热应变的方法及其误差

随着被测物体的温度变化,增加热应力和外力时,在温度 T 时将这些应力所产生的应变以 $\varepsilon(T)$ 表示,测量仪指示的应变以 $\varepsilon_{app}(T)$ 表示,则它们的关系可用下式表示:

$$\varepsilon_{app}(T) = (K_T/K_0)\varepsilon(T) + F(T) \quad (1)$$

从而求出热应变为:

$$\varepsilon(T) = \{\varepsilon_{app}(T) - F(T)\}(K_0/K_T) \quad (2)$$

式中 T ——测定点的温度;

$F(T)$ ——视应变;

(K_T/K_0) ——输出变化率。

从上式清楚的看出,如果温度 (T) 时的视应变和输出变化率为未知,就不能决定由热应力产生的应变 $\varepsilon(T)$ 。因此要把悬臂梁之类的试验台放入炉内进行试验,事先求出上述二值,作出如图1、图2所示的那种修正曲线。

下面就这种作法求出的热应变中所包涵的误差进行探讨。

(1) 应变片的均一性

一般来说,应变片用过一次之后就不能再使用,因此为求出与温度有关的输出变化和视应变所用的应变片与安装在被测物体上为求出测定值的应变片不是同一个,若两者的温度特性不完全相同时,则它们之差就造成误差。

(2) 由于大的视应变所产生的误差

反复加热时,无论是输出变化还是视应变都保持在一定的幅度内变化。当视应变大时,这个幅度也变大,将其平均所求出的修正曲线中有相当大的误差,因此测量精度不高。

(3) 由于反复加热而引起温度特性的改变

反复加热时输出变化和视应变也都改变,并慢慢的稳定。为此,必须对应变片和粘着剂进行充分予热,使特性稳定后再进行测量。

(4) 温度测量误差

由于应变 $\varepsilon(T)$ 是由修正曲线求得测定温度 T 时的 $F(T)$ 和 K_0/K_T 值用(2)式进行计算得出的,所以当温度测量有误差时,则在 $\varepsilon(T)$ 结果中也包涵着误差。特别在视应变的温度梯度较大和急速加热、急速冷却的情况下更必须注意。

5. 提高高温应变测量精度的措施

为了提高测量精度,对上述产生误差的原因应采取如下的措施:

(1) 使应变片的温度特性均一,或者尽量正确地推断出用于测量的应变片的温度特性。

(2) 尽量减小视应变。

(3) 粘着型应变片除了粘贴应变片时加热之外,还要在予热的试验条件下使用。焊接型应变片,是把单个应变片在炉内进行充分加热后使用。用喷镀型刚性构造的应变片,可以整体予热,而对于喷镀金属没有加

热的必要, 这个问题在文献^[1]中已有报告。

(4) 在进行急速加热和冷却的非定常温度场中, 应变片与被测物表面的温度一般认为是不相同的, 在这种情况下需给应变片装上热电偶或使用与应变片结构相同的温度计。

应变片的温度特性中, 根据最高试验温度反复三次加热至某高温时就能稳定温度的输出变化, 这个变化值最多也只有5%左右。为此, 最近关于高温应变测量的研究, 大部分都是针对关于视应变的上述措施(1)、

(2) 项内容进行的。关于这个问题在下面的6、7节中介绍。

6. 提高视应变均一性的方法

6.1 平均法或三片应变片组合法

市场出售的应变片是取每批制造的应变片电阻值相同的5—10片作为一组, 如把它们按图3所示的方法组合起来, 即丝或应变片情况是将以电阻丝连接的三片应变片A、B、C作为一组, 箔式应变片情况是将在箔

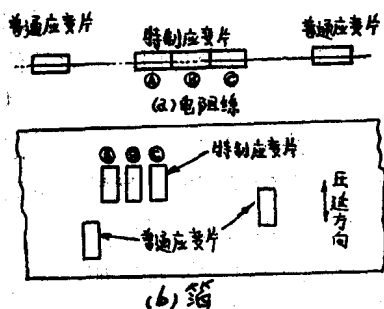


图3 三片连接的特制应变片

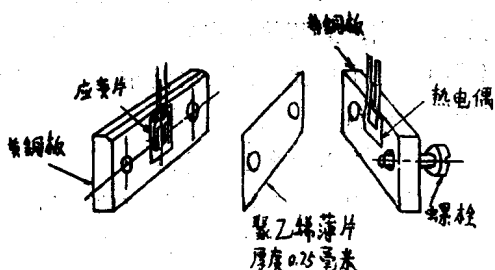


图4 夹片法

的压延方向或垂直方向邻接的三片应变片A、B、C作为一组, 则其温度特性的均一性会有显著提高。用B应变片测量时, 则A、C应变片的视应变平均值大体可以表示B应变片的视应变, 并用该平均值进行修正, 此方法即为平均法或三片应变片组合法^[2]。另外, 在测定多数点的情况下, 不是以三片为一组, 而以11—13片为一组, 用同样的方法测量安装管道的热应力得到良好的结果^[3]。并且在不能加热也不能焊接的条件下安装应变片进行应变测量时, 在达80°C的温度范围之内此种方法也非常实用^[4]。

6.2 夹片法

此法是将应变片插在与被测物体材料相同的两片平板之间, 并用厚度为0.25毫米的聚乙烯薄膜将两片平板隔开(如图4所示), 用适当方法使整体温度升高, 求出视应变之后松开螺栓, 取出应变片在测量中使用^[5]。此时在预知的视应变中完全没有粘着剂的影响, 但是在从室温至温差40°C的范围内的试验中, 预知的视应变对温度的斜度与实际粘接应变片视应变对温度的斜度表示出良好的一致^[5]。

6.3 带有垫片的应变片法

此法如图5所示, 即把应变片粘接在长和宽都比其约大3毫米, 厚为0.05毫米的金属片(垫片)上, 进行热处理后, 在垫片的四周把应变片点焊在与被测物体材料相同的试片上, 并在炉内充分加热, 待特性稳定后求出视应变和输出变化。然后用适当的工具把应变片与垫片切离, 用应变片周边残留的垫片将其再焊接在被测物体上进行测量^[6]。利用此法, 选用视应变小的应变片测量内部加热的厚壁筒的热应变, 得到良好的结果^[6]。

7. 减小视应变的方法

由于温度的改变而不产生视应变的这种

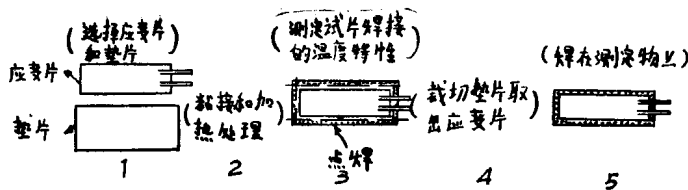


图5 使用垫片的焊接型应变片

所谓温度补偿应变片的研究和试制工作，已在日本国内外蓬勃地开展起来了。然而，由于视应变对于温度的变化不成直线关系，把这种变化完全作为零是不可能的。在测量温度范围宽的情况下，补偿后残留的视应变必然变大。

7.1 改变应变片电阻丝温度系数的方法

把视应变近似为折线，令各直线段中对温度的斜度为 α_T 时，则视应变为：

$$F(T) = \alpha_T \Delta T = \{(\alpha_R - \alpha_g)/K + (\alpha_m - \alpha_g)\} \Delta T \quad (3)$$

式中 α_R ——应变片电阻丝的电 阻 温 度 系 数；

α_g ——应变片电阻丝的线膨胀系数；

α_m ——被测物体的线膨胀系数；

K ——常温下的应变片灵敏度系数^[7]。

应变片的铜、镍合金材料，由于组成成分和热处理的不同，其电阻温度系数有显著的变化，所以对于线膨胀系数为 α_m 的材料，根据 (3) 式如果用具有能使 $\alpha_T = 0$ 的 α_R 的应变片电阻丝制造应变片时，则这种应变片就成为对于线膨胀系数为 α_m 的材料的视应变极小的自身温度补偿应变片。

这种应变片的优点在于不需要附加其它线路等，仪器本身就可以进行简便的温度补偿，但是，对于每一种测定材料都需要变换应变片。目前日本的制造单位一般在市场上出售的应变片完全是自身温度补偿应变片，所适用的材料为钢铁、不锈钢、铝合金、镁

合金及其它多种材料，最高使用温度为150—180°C，而高温用的应变片也有能够使用到300°C的^[8]。

7.2 加入补偿元件的方法

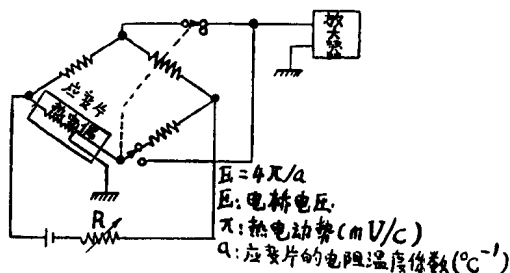


图6 加入热电偶的自身温度补偿应变片的线路图

此法是将可产生与视应变相反的极性输出的元件组合到应变片中，将此元件插在测量应变用的桥式电路的一侧，用以补偿视应变。这个方法也扩大了温度的补偿范围，经过调整线路之后对所有的材料都能适用。

(1) 加入热电偶的方法

此种方法是在应变片中加入热电偶，并适当调整电桥的电压，使全部材料的视应变和热电偶的输出相抵消。图6示出此种应变片及其线路图的一个例子。此法为了利用热电偶的输出，必须使用直流电桥。在文献[9]中报道了用此法测量火箭重返时隔热用的碳复合材料的应变。

(2) 加入白金丝的方法

此法是鲍德温公司试制的方法，如图7所示在应变片中加入白金丝，并与电桥相接，经适当调整平稳电阻后来补偿全部材料的视应变。

7.3 组合应变片的方法

(1) 用二个有效应变片的自身温度补偿法

如图8(a)所示,在长方形的薄板上,粘贴1、2两片互相垂直的应变片,将板的两端焊接在被测物体上。按图8(b)所示的线路使1、2应变片与电桥相接,在此板的X方向上作用的热应力为 σ_x 时,则1、2应变片的输出为:

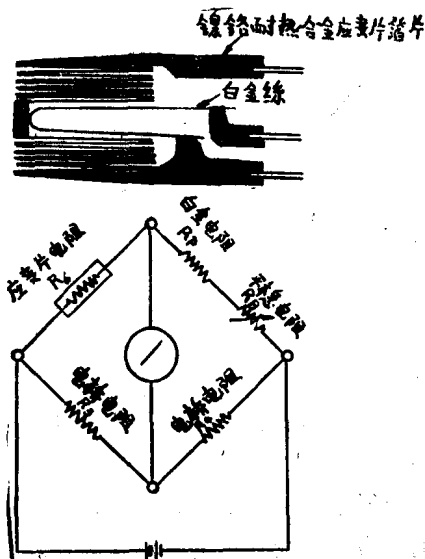


图7 加入白金丝的自身温度补偿应变片及其线路图

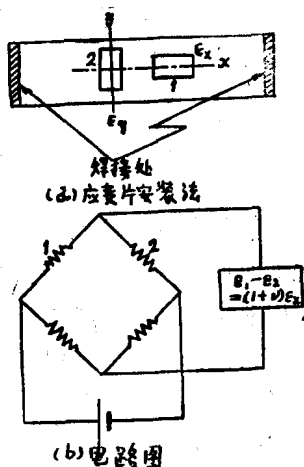


图8 用两个有效应变片的自身温度补偿法

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_1 &= (\sigma_x/E) + F_1(T) = \varepsilon_x + F_1(T) \\ \varepsilon_2 &= (-\nu\sigma_x/E) + F_2(T) = \varepsilon_y + F_2(T) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

根据上式得该电桥的输出为:

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = (1 + \nu)\varepsilon_x + \{F_1(T) - F_2(T)\} \quad (7)$$

如果选出同类型而特性相似的应变仪时,就可以使 $\{F_1(T) - F_2(T)\}$ 一项减到很小。

(2) 加入灵敏度为零的补偿应变片的方法

在图9中示出美国米克罗多特公司研制的应变片^[11]。把应变片元件封在不锈钢的细管中,再把细管焊在不锈钢薄板上(焊缝为一条直线),这只是作为测检应变片长轴方向的应变的结构。所以在对长轴方向的应变的灵敏度为零的角度上,把应变丝缠成了螺旋形的第二个元件也封在此细管中作为补偿应变片,如果把它放在图8示出的(2)的位置上组成电桥线路时,则由于补偿元件的作用,视应变几乎全部被消除。

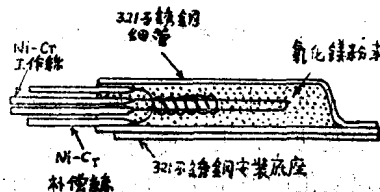


图9 加入应变灵敏度为零的补偿丝的应变片

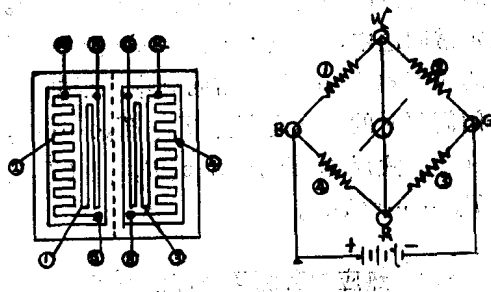


图10 全桥式自身温度补偿应变片及其线路图

图10为鲍德温公司研制的应变片及其线路图。图中的虚线位置为点焊线,所以在焊接线方向上产生的应变情况,用元件(1)、(3)测检,元件(2)、(4)作为视应变的补偿。

8. 利用应变片测量高温应变

实际上测量高温应变时,必须首先考虑如下三个问题。

8.1 静态测量与动态测量问题

例如测量振动应变的场合,在常温下产生以平均应变为基准的上下应变振幅,当温度变化时,则在测出的应变中包含有视应变,为此作为基准的平均应变将随视应变的变化而一起移动。所谓在高温应变测量中的动态测量,认为与基准的移动无关,只测量其振幅;而静态测量则认为根据(2)式扣除视应变后,测量各温度下的平均应变和最大应变。

在静态测量中,由于视应变的大小影响测量精度,所以应变片的使用上限温度比动态测量时的要低。

8.2 定常问题与非定常问题

在实际机械中,如象汽轮机和动力反应堆等开始发动时,大都要进行温度和热应力都在急速变化的非定常温度场情况下的测定。用应变片测量高温应变,对定常和非定常的任何情况都具有测量方法简单的优点。在定常问题中,用(2)式计算出温度 T_s 时的应变 $\varepsilon(T_s)$;非定常问题中,根据适当时间间隔时的各温度 T_1 、 T_2 、 T_3 …… T_n ,按(2)式反复计算出 $\varepsilon(T_1)$ 、 $\varepsilon(T_2)$ 、 $\varepsilon(T_3)$ …… $\varepsilon(T_n)$ 。

8.3 热应力和测量温度的范围

最高测量温度在 1200°C 的情况下可以使用的应变片,在市场上还没有出售(参看表2),所以乍一看,认为这样高的温度是不可能用这种仪器测量应变的。但是,如果测量温度范围在 $800\sim 1200^{\circ}\text{C}$ 时,则热应力的大小一般与所给出的温差成正比,据此,

对测定材料的特性值的变化作另外的修正后,将该温度范围变换成由常温至 420°C 时就能够进行测量了。

如果定出测定的种类、温度场及测量温度范围时,则实际测量可按如下程序进行(参阅图11)。

(1) 选择应变片及其安装方法

根据被测物体的预计最高温度,选用的减小视应变的方法以及被测物体的材料、构造和大小选择应变片(参照表1.2)。同时也应考虑提高视应变均一性的方法。

(2) 选择引线及其接线方法

引线以及应变片和引线的连接部位由于在试验时处于高温环境中,因此其机、电特性必须是稳定的。对于点焊、电阻焊、钎焊等都使用市场出售的小型专门焊接机进行焊接。此外为了在高温部位固定引线,可用点焊小金属片、用高温粘接剂固定其一部分、或用洛卡特(ローカイト)涂料固定等方法。

(3) 测量被测物体表面温度 T 和应变片的温度 θ

当 T 与 θ 不一致的情况下,选择应变片时也要考虑应变片温度的测量方法。

(4) 预热应变片和粘接剂

温度特性充分预加热到稳定为止。

(5) 测量视应变和输出变化

在产生一定挠度的悬臂梁试验台上进行这种测量是很方便的。

(6) 测量

在测量时间内要连续求出温度和应变值。

(7) 计算热应变和热应力

首先把时间作为参数,结合温度和应变的数据求出对于温度变化时的应变测量值的变化。其次用预先求出的各温度下的视应变和输出变化率,依据(2)式算出热应变,再通过热应变,用各温度下的材料特性值决定出热应力。

用于高温和二向应变的电容式应变传感器的发展

L. M. Yeakley, U. S. Lindholm

前 言

本文叙述(美)西南研究所六年多来在研制用于特殊材料试验的电容式伸长计方面所完成的工作。这项工作继续发展的总目标已进一步扩展到包括以下几个方面:

1. 继续发展一种具有足够大的动态范围以便能够连续地分辨小的弹性应变和比较大的塑性应变的单一伸长计。如果伸长计是用作闭合环路试验系统中的主动反馈元件的话,这种单个的伸长计正是所需要的。

2. 发展一种具有用于动态液压机或电动机的高速试验性能的伸长计。使用这类机械,试件受到可观的加速度作用,因而伸长计必须有相当高的共振频率以避免试验过程中不希望出现的振荡。

3. 继续发展能用于高温状态试验的伸长计。

4. 继续发展能测定二向应变状态的伸长计。例如用于拉伸一扭转联合作用下薄壁管试验的伸长计。

现有的大多数测定应变的仪器都不能同时满足以上四项要求。粘贴的电阻应变片在温度和应变范围上都是有限的。机械类传感器,甚至包括具有电子传感元件的这类仪器(例如LVDT的),通常都很笨重,而且对于高应变速度试验的频率响应特性很差。市售的光学目标跟踪装置虽能满足以上大部分要求,但用于多信道的应变测量又显得太不经济。因此,用于单向和双向应变测定的,采用电容式传感元件的若干小型的伸长计有了发展。通过对传感元件的强制水冷已能用

于温度达 2000°F 的高温范围。下面将叙述几种典型的伸长计,内容包括电容片的几何图形和大的应变范围内获得线性变换所需要的电子线路图。同时也将说明其若干典型运用。

单向电容伸长计

为用于圆柱形拉伸试件,研制了一种平行极板电容伸长计。机械上,这种伸长计是由单独地安装在试件测定截面上的两片极板元件所组成,如图1所示。伸长计的每一半部都用三颗定位螺丝安装在试件上。两个极板片间的初始间距亦即测定长度(定位螺丝间距离)用一薄的聚脂垫片来确定。对于图1所示的伸长计,测定长度为9.5毫米。

伸长计由不锈钢壳和用环氧树脂粘结绝缘的黄铜电容极板组成。伸长计的一半是驱动电容极板,另一半是传感极板。驱动极板[图1(b)左]的面积较大并和传感极板相重叠1.27毫米。这两个电容极板的式样见图1(b)。导流冷却水的不锈钢管是用充铜环氧树脂粘结在每一块极板的背面上的。冷却水管及电线由图1可见。由于水冷却,这种伸长计已用在温度达 2000°F 的电阻加热试件上。

这种伸长计机械上的优点是它的共振频率高。它的两半部分实质上是刚体,这就消除了与挠曲、柔度型式、仪表夹具等有关的机械共振。因此,这种伸长计可用于高速(或加速度)和高温的场合。

伸长计对于两个电容极板间距离的变化是敏感的。由于两个平行极板间的电容和它

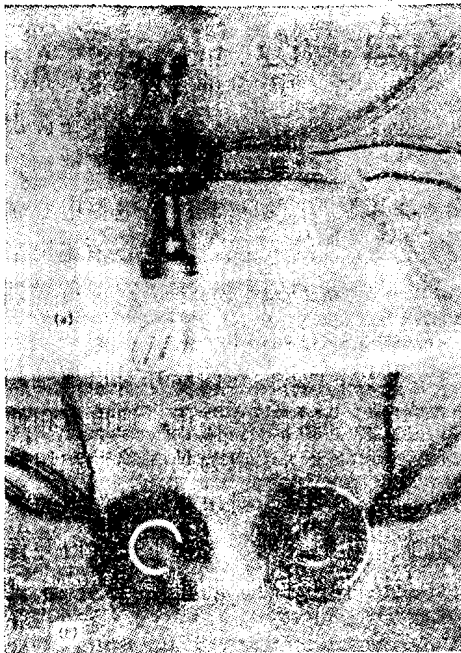


图1 (a)安装在试件上的单向电容伸长计;
(b)极板的结构情况

们之间的距离成反比,一般说来这两个极板形成一个非线性传感元件。但因负载放大器的增益是反比于它的反馈电容器的,所以,如果把伸长计作为负载放大器的反馈电容器就可以把伸长计的输线性化。用伸长计作为负载放大器的反馈元件,用一固定电容器

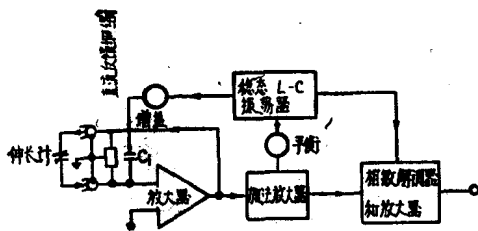


图2 单向伸长计线路示意图

C_1 作为载波信号的输入元件,放大器的输出就变为振幅和伸长计两极板间距离成正比的一个载波信号。系统的电路图示意如图2所示。通过改变输入端载波信号调整增益。负载放大器的输出与一个固定的载波信号相加以平衡零位移极板的间距的影响。然后用一个相敏解调器产生正比于两电容极板间距的

模拟信号。

适当地调整增益并对边缘进行补偿调整,这种伸长计可以测定两极板的间距约为6.35毫米,对于9.5毫米的测定长度,就30%左右的应变范围内确定的应变校准常数为2.6%/伏特。

对于铍试件的高速试验中运用这种伸长计的典型实例如图3所示。上图的示波器记录给出了两个不同的增益($\epsilon_2 = 10\epsilon_1$)下试验机的十字头位移(X)、加载盒输出(σ)和电容伸长计的输出(ϵ_1 和 ϵ_2)随时间的变化情况。铍试件大约在10毫秒内单调加载到破坏,在头3毫秒内,应力应变曲线的非弹性部分,应变加速率接近于常数。图3下图的示波器记录表示两种应变放大率下的应力-应变曲线。这说明伸长计分辨应力-应变曲线上小应变部分或弹性应变部分和直到试件破坏的总应变(在这种情况下仅为3%左右)的能力。

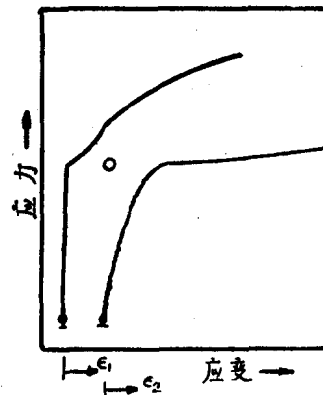
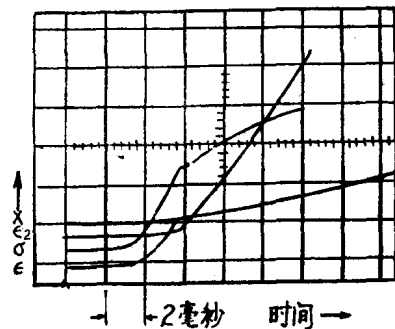


图3 10秒^{-1} 的平均应变速度下铍拉伸试验的示波器记录

二向线性扭转伸长计

对于轴向拉伸（压缩）和扭转联合作用下的薄壁管试件的试验，也是运用可变电容元件发展了一种二向应变伸长计。这种伸长计如图4所示。伸长计是安装在管试件和夹具的里面，高温试验时也是采用水冷却。这种伸长计测定变形是通过改变相应的一组电容极板之间的面积来传感，而不是象单向伸长计那样靠改变两电容极板之间的距离来传感的。

该二向伸长计是由包含一组电容极板的电枢（转子）和包含第二组电容极板的一个同心圆柱壳（定子）所组成。伸长计靠六个弹性加荷基准支架支承在空心管试件里面的轴上，每个加荷基准支架底端有刀口和试件的内壁接触，其中有三个支架用来支承电枢轴，通常定位在试件中央以上6.35毫米，其余三个支架则是支承伸长计的定子壳，定位在试件中央以下6.35毫米。所以，伸长计的测定长度一般为12.7毫米。然而，电枢是靠摩擦作用支承在中心轴上的，其位置可以改变，从而给出1—6毫米的可变测定长度。这种摩擦装配在加荷应变过程中还可提供一

种滑动离合作用，因而对伸长计也是一种保护。

电枢中心轴和基准附着支架都是由两根同心的不锈钢管所组成的。试件在高温情况下受试时，冷却水就流过这个不锈钢管，电枢基准支架的冷却水是经过电枢中心轴流入基准支架，然后又经电枢中心轴流出来。定子壳的每一边也都嵌有不锈钢管负责供给定子壳及其支架的冷却水。

通过位于定子壳两端并对电枢轴起作用的聚四氟乙烯衬套的作用，把电枢和伸长计本体之间的运动约束为轴向移动和扭转方向的转动两个部分。对电枢轴起作用的第三个聚四氟乙烯衬套则安装在下夹具内并保持伸长计在试件中对准以防止定子壳与试件接触。

伸长计剖面视图见图5(a)。电枢包含一组四个主动电容极板，每个电容极板长15.2毫米，占45°弧长。电枢其余部分接地，这样既能使电容极板绝缘又隔断了边缘效应。电枢的总尺寸为：长度25.4毫米，直径7.97毫米。电枢上的各主动电容极板相互联在一起，再与经过定子壳下端槽口引进伸长计的一个小屏蔽电缆的中心导线联结。这个电缆屏蔽又为电枢接地提供了条件。电枢电容极



图4 测定轴向和扭转应变的水冷却二向电容伸长计

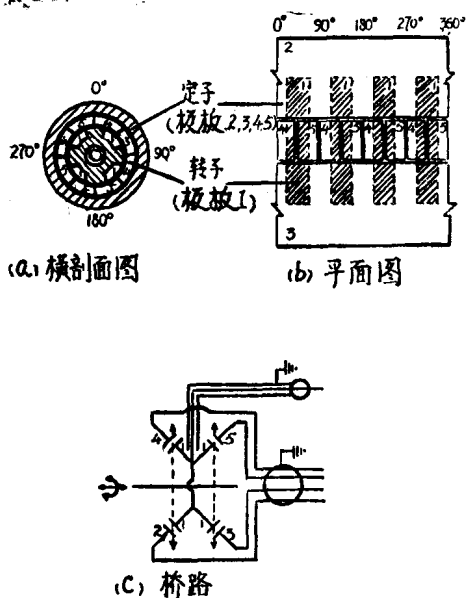


图5 二向电容伸长计的机械及电路图

板用一常幅载波信号驱动，对轴向移动和扭转转动它都能起到一个驱动元件的作用。

伸长计外壳包含互相分离的十个电容极板。其中有八个极板是柱面弓形极板，每个长为5.1毫米，几乎都占45°弧长，各极板内径为8.48毫米，位于长为10.2毫米的两个连续圆环的中间。定子壳的这两个外环〔见图5(b)的2,3〕顺着电枢形成仅传感轴向应变的电容半桥的两个桥臂。外环内的八个弓形极板(4和5)交叉联接，形成了两个输出电容元件以测量转动。沿着电枢的电容极板(1)，它们又组成扭转应变半桥的两个桥臂。为了对所有输出电容极板提供一保护元件，使伸长计定子壳接地。

伸长计电容极板排列的展开图如图5(b)所示。电容极板(1)在电枢上，和定子壳的电容极板隔离一层薄的空气间隙，当电枢相对于定子壳电容极板向上移动时，电容 C_{12} 增大， C_{13} 减小，而 C_{14} 、 C_{15} 保持不变；另一方面，当电枢相对于外壳作顺时针方向的转动时， C_{14} 减小， C_{15} 增大，而 C_{12} 、 C_{13} 则保持不变。图5(c)为电容电桥电路。

由于电子仪器的发展使这种伸长计的设

计运用成为可能。伸长计的总电容变化低(轴向应变时约为10微微法，扭转应变时约为5微微法)，其分辨能力可期望获得满度的 10^{-5} ，此外，在单个伸长计内有两个半桥，这意味着串音干扰须保持为最小，电缆电容的影响也必须降低到最低限度。信号条件线路的方框图如图6所示。

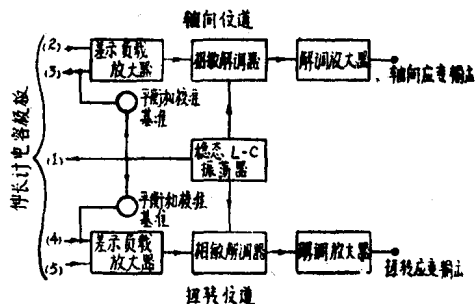


图6 二向伸长计线路方块图

这个伸长计采用前置放大器以消除串声干扰和电缆噪声问题。前置放大器实质上就是一个差示负载放大器。这样，每一个输入在运算放大线路*中都是一个和结，所以每一个输入都是虚接地的。也就是伸长计的输入电容极板和输出导线保持接地电位(除可以忽略的零电压外)。所以，伸长计各元件间的电容和分流对地电容对于放大器的输出来说实际上没有影响。正因为与分流电容无关，就能够使用相当长的屏蔽电缆，四条输出导线也能包含在一个屏蔽之内。

负载放大器产生一个与接地位下为维持传感器输出而供给的负载大小成正比的信号。对于电容传感器来说，供给的负载(电荷)等于电容和载波电压的乘积。附加的电容平衡和分流校准电路是为放大器的输入端提供的。差示负载放大器的输出是一个幅度上与伸长计两个元件之间的电容差与平衡及校准电容之和成正比的一个载波信号。

*一般性的报导见 Operational Amplifiers: Design and Applications, Ed. by J. Graeme, G. Tobey and L. Huelsman, McGraw Hill Inc., N. Y., 1971.