

第 5 篇 实验应力分析

主 编 梁世昌 董本涵
黄培清
编写人 梁世昌 董本涵
袁振明 郝 兵
黄培清 宋锦良

第 1 版

实验应力分析

主 编 傅梦莲 梁世昌
董本涵
编写人 傅梦莲 吴宗垚
宋锦良 戴福隆
袁振明 黄培清
梁世昌 董本涵
徐 灏

第1章 概 论

实验应力分析与结构强度、振动的理论分析是解决机械工程、水利工程、航空航天工程、核工程、超大型运输工程等安全、可靠性问题的两个不可偏废的重要手段和方法。前者是以实验为基础,具有很强的实践性和具有更高可靠性。理论计算与分析方面,由于高速超高速大容量计算机的普遍应用,并发展了一大批高可靠性的计算方法和程序,在工程研究与开发中都发挥了重要作用。我国的实验力学工作者在为解决我国各种工程建设、国防建设^[2]等重大问题中贡献了聪明才智,作出了重大贡献,发展了实验应力分析技术,有些领域已跨入了世界的先进行列。面临科技飞速发展的今天既是挑战也是机遇,同时也为实验力学工作者提供了新技术和手段。如电子学的发展促进了应变计技术的广泛应用;激光技术的发展形成了全息干涉法、散斑干涉法、云纹干涉法等为主要内容的现代光测力学研究和应用领域;由于高速、大容量计算机(含高速高精度高稳定性的大容量硬盘)和大规模集成电路的飞速发展才促进了电测、光测技术的数据采集、分析以及图像处理判读技术向自动化、高速化、微型化的方向迅猛发展。

当今面临科学技术飞速发展,迫切需要力学工作者解决所面临的重大难题,如我国的特大型三峡水利枢纽工程,航天卫星,航空的高推重比、高可靠性的飞机发动机工程,超大型运输船舰,高速运输车(高速火车、汽车)和道桥工程,超高层建筑,地震及泥石流自然灾害的预防工程以及微重力条件下的测试技术,微电子、微机械与微传感技术,生物活体组织与其力学行为,复合材料研究及应用等等,都向实验力学工作者提出了大量难以解决的课题。这些研究对象具有大(如地球、巨轮、特大型三峡水利、高速桥梁。××万立方米的油罐等)、高(高温、高转速、高辐射、高真空、高压等),难(解决这些技术普遍具有高难度,靠计算很难解决或不把握的问题,要靠试验测试解决问题,大多为初次实践,缺少经验)特点,这些对实践者来讲确是挑战也是机遇。科学技术飞速发展即对实验力学工作者提出迫切要解决的难题,又为其提供新技术和手段。实验应力分析在我国应用广泛,它是业已形成的成熟应用的基础科学和应用科学,新的方法和学科分枝不断出现,现在最常用的有应变电测法、光学方法、声学方法。本篇共7章,第1章是概论,简要介绍各种实验应力分析方法的特点及其应用;第2章电阻应变计测

量技术^{1-12]},将较详细介绍各种应变计、应变粘结剂、防护涂料等特点及其应用,应变测试仪器,静态应变测量,动态应变测量,旋转件应变测量,无线电遥测应变,高低温应变测量,高压液下应变测量,残余应力测量,核辐射及磁场条件下的应变测量,电阻应变计式传感器;第3章光弹性法^[1],将较详细介绍普遍采用而又成熟的普通光弹性方法的原理、应用(如二维、三维光弹、散光法、贴片法等);第4章其他光学方法,将重点介绍近期发展起来的全息干涉法、散斑干涉法、云纹干涉法、焦散线法、自动网格法(新增内容)等光学应力分析方法及其应用;第5章应变测量误差与数据处理,本章是新增内容,将对应变电测法产生的误差源、数据处理方法,可疑数据剔除准则及误差合成等作介绍;第6章声学检测,本章主要介绍超声波检测、声振检测和声发射检测。在机械工程、材料工程的研究与应用中,如内部缺陷的深度、大小,晶粒大小,球墨铸铁质量的检测、焊接质量的控制和压力容器安全性评估等都需要声学检测技术,声学技术被广泛应用于无损检测,并且将声层分析技术应用于应力测量;第7章模型试验。本章将介绍相似模型的建立、相似原理、相似条件、基本量纲及导出量纲、相似模型的设计等相似论的基本理论。

为便于选用各种应力分析方法时比较,把常用的应力分析方法的主要特点列于表5.1.1中。

大量的实验应力分析的实践表明,这些方法不仅被广泛应用于航空航天、纺织、石油化工、冶金矿山、水利电力、交通运输等机械工程,而且被广泛用于管理工程以及生物力学、岩石力学、断裂力学等科学研究和领域。从低温到高温,从真空状态至几百兆帕的高压,从静态至高频振动,以及水下、强磁场、强辐射和化学腐蚀等各种特殊和恶劣环境下的应变测量。在解决工程问题中,往往都不是仅使用一种方法,而是两种以至两种以上方法同时使用解决一个问题。实验应力分析技术常用来解决的工程问题主要有:结构设计方案的优选;产品研制、机械运行中的安全监控;失效零件的故障分析;结构疲劳寿命试验及其试验中的载荷测定和控制;结构设计、试验规范与某些技术标准中的理论计算方法和程序的验证研究;产品鉴定和可靠性分析;设备改造挖潜、节约能源等进行的应力分析和载荷测定;验证新开发的计算方法、程序和理论的正确性等。

表 5.1-1 各种应力分析方法的特点

方法类别	分类名称	灵敏度、误差	主要特点,应用范围 ^{[1][2][20]}
电测法	电阻应变计测量法 ^{[1][2][8]} (第 2 章)	灵敏度 $1\mu\text{m}/\text{m}$ 常温误差 1%~3% 中温误差 5%~20% 传感器误差可优于 0.1%~0.05% 高低温误差 10%~30%	<ol style="list-style-type: none"> 1. 可用于 $-270\sim 1000\text{C}$, 静 (800C) 动态应变测量, 真空至数百兆帕的高压及液下; 小应变至大变形 (20%~50%); 强磁场, 辐射场, 各种旋转等条件下的应变测量; 应用遥测不仅可进行近距测量, 也可进行远距离测量和控制^[1]。 2. 可测单向应变、平面应变场的动、静态应变, 适于金属、非金属结构, 并推广应用于生物力学等 3. 历史悠久, 经验成熟, 测试系统广泛推广应用电子计算机为核心的测试系统, 测试精度高, 速度快, 数据处理、分析易于实现自动化 4. 可制成压力、振动、位移、速度、加速度、扭矩力、称重等传感器, 与计算机联用, 不仅用于测量, 而且广泛用于管理工程和安全控制 5. 使用广泛, 经济可靠, 可制各种专用和特殊应变计^{[1][2]}
	电容应变计测量法	短时间可达 5%	<ol style="list-style-type: none"> 1. 长期使用稳定性好, 零漂小; 使用温度高, 最高可达 960C; 最大应变范围士 ($20000\sim 80000$) $\mu\text{m}/\text{m}$^[14] 2. 与电阻应变计比较外形尺寸大, 微电容测量比微电阻变化的测量困难, 测试仪器比较复杂; 多用长期监控, 不用于应力测量
光测法	光弹性法 ^{[15][16]} (第 3 章) 含光弹涂层法 (又称光贴片法) 散光法 动态光弹法	灵敏度 $10\mu\text{m}/\text{m}$ 利用补偿器误差可达 $15\mu\text{m}/\text{m}$	<ol style="list-style-type: none"> 1. 可用表面应力分析和二维应力测量, 给出结构 (含各种复杂结构) 内部应变场的全场数据 2. 用于各种工程结构的优化设计, 方案选优, 应力集中系数测定, 并可用于断裂力学、岩石力学、生物力学 3. 数据采集与分析已广泛采用计算机为中心的图像处理分析系统 4. 通过干涉条纹直接测量应力大小, 直观性强, 能提供高应力区位置 and 大小, 并能指出没有发挥材质作用的低应力区的位置和大小 5. 光弹性法是模型试验, 消耗少, 技术又是成熟的方法, 又具有良好的经济性, 应用广泛 6. 涂层法: <ol style="list-style-type: none"> a. 可用现场结构应力分析, 室温 $\sim 150\text{C}$, 但精度较低。 b. 可用于动、静态应力测量 (与图像消转技术或高速相机联用, 可进行动态应变测量) 7. 散光法是解决三维光弹应力分析的另一种方法, 应力分析模型不需要破坏, 模型不用冻结, 模型可以多次使用, 避免了冻结法由于材料泊松比变化带来的实验误差, 有效地解决了轴对称问题和扭转问题。 8. 动态光弹法, 在动态载荷作用下, 构件的应力是应力波的形式传播, 每点的应力都是时间的函数, 瞬态条纹的记录可用高速照相或高速录相系统, 不但可测动态应力、动态应力集中, 应力波传播的过程和传播规律以及裂纹的产生, 传播和止裂规律
	其他光学方法	激光全息干涉法及脉冲全息干涉法 (第 4 章)	位移灵敏度 $0.2\mu\text{m}$

(续)

方法类别	分类名称	灵敏度、误差	主要特点、应用范围(1)(2)(3)(4)
其他光学方法	散斑干涉法: 单光束散斑干涉法 双光束散斑干涉法 错位散斑干涉法 白光散斑干涉法 (第4章)		<ol style="list-style-type: none"> 1. 用于平板变形等表面的平、斜位移、振动、孔边应力集中、蜂窝夹层板的变形、断裂力学位移测量、无损检验等 2. 采用无相干光照明,设备简单,可在较大范围内调节灵敏度,通过调照相景深,对三维表面进行层次照相,可用于曲面变形测量 3. 现代电子散斑干涉仪,可实时、快速地显示相关条纹,可存储信息,联机进行数据处理 4. 近几年在我国应用较广泛,如采用数字照相系统,用于复合材料无损检测,散斑干涉法与有限元结合进行应力分析、曲面三维应力分析、细观裂纹尖端位移场测量等
	云纹法与云纹干涉法 (第4章)	灵敏度 μm 级经过倍增的灵敏度可达 $0.25\mu\text{m}$	<ol style="list-style-type: none"> 1. 是80年代发展起来的高灵敏度、高分辨率,全场测量的面内变化的现代光学测试方法,近年来发展应用较广泛,倍受人们重视 2. 云纹法分为面内云纹法和离面云纹法,前者用面内位移和变形测量,后者用于物表面的等高线,离面位移场以及率曲问题的斜率和曲率测量 3. 云纹干涉法是用高密度光栅,本方法不同于传统云纹法,它是一种波前干涉方法,基本理论和试验装置与全息干涉法、双光束散斑干涉法类同,其灵敏度为半波长,比传统云纹法高15~60倍,在复合材料、断裂力学、应力分析、残余应力测量、细观力学研究、小变形研究、应力集中测试、云纹法还与有限元计算等结合应用 4. 是最近几年发展较快的技术
	焦散线法 (第4章)		<p>用于测量动、静态断裂力学强度因子,确定裂纹前端位置、塑性区大小,张开裂纹位移;对动态断裂问题还可测裂纹扩展速率,应变能释放以及它们随时间或载荷的变化规律,研究起裂、加速、减速、分叉和止裂等,还可用于研究接触问题</p> <p>方法简单、精度高、还可用于研究应力梯度高的部位如开孔、缺口等应力集中问题</p>
其它方法	热弹性效应应力分析法 ⁽¹⁾		<ol style="list-style-type: none"> 1. 适用线膨胀系数不为零的各种金属(铝合金、钢、铬钢、铬镍和铬镍钛钢、黄铜、青铜),非金属(环氧树脂、塑料、有机玻璃)等各种复杂结构的应力分析,无损检验,焊接件应力分析 2. 适用动、静态应力分析,0~20000Hz,常温至800℃,能获得单点和多点数据,如120点数据在1min获得,全场12000个应力点,可在30min获得,目前用于航空发动机、民用汽车、船用发动机、导弹壳体、飞机骨架以及工程研究等 3. 有用热弹性效应原理制成的分析仪如SPATE9000,装有振动模式图像(VPI)软件,处理全场数据,产生全色速度图,以彩色图像在SPATE监视屏幕上显示,并通过标定给出定量结果
	脆性涂层法(或称脆漆法)	>10% 误差大于10%	<ol style="list-style-type: none"> 1. 可测定室温至370℃各种构件的主应力大小和方向,可提供全场资料,方法简单,适用性强 2. 多数直接用于真实构件,因而不需做载荷模拟,甚至不需要了解载荷性质 3. 这种方法对温度和湿度敏感,试验中要严格控制,否则对结果影响较大,涂料溶剂一般有一定的毒性,使用中应注意
声学方法	超声波检测法 声发射检测法		<ol style="list-style-type: none"> 1. 利用超声波在介质中的传播特性,不仅可以作材料和构件的无损检测如检查材料晶粒大小、壁厚测量、球铁质量检查,内部孔隙含量和缺陷测量,而且可快速、简便、无损的对螺拴应力检测,弹性模量测量等 2. 利用声发射技术,可以用来研究材料的塑性变形、评价表面化学处理渗层的脆性、断裂分析和压力容器的安全性评价等

我国无论电测还是光测实验应力分析方法,近几年都有了很大发展。改革开放以来,经济发展很快,建造和开发了一系列大型工程^[26]、科研项目,在解决工程建设的一系列难题中都发挥了重要作用,保证了工程的可靠性和安全性,也发展了测试技术自身。特别是随着激光技术和电子计算机的日新月异发展,各种光测方法倍受重视,人们把电测与光测方法结合,各种以激光为基础的光测方法相互补充,实验方法与有限元

等方法结合应用于解决工程问题,已取得了一批可喜的科技成果。我国的实验应力分析方法在许多方面是具有独到之处的,如高温应变计、激光散斑干涉、云纹干涉法等,近些年许多科研单位、大学和工程技术开发公司,发展一些具有先进功能的自动数据采集、分析和图像处理系统,为实验应力分析技术的自动化、高速化、微型化和推广应用以及发展创造了极好条件。

第 2 章 电阻应变计测量技术

1 电阻应变计

1.1 电阻应变计的工作原理

电阻应变计(习称应变片)是一种把被测试件的应变转换为电阻变化量的传感元件。当这种元件的敏感部分用金属材料制成时,应变计即利用金属材料的电阻应变效应工作;当它的敏感部分用半导体材料制成时,应变计即利用半导体的压阻效应工作。

1.1.1 金属材料的电阻应变效应

由物理学知,金属丝的电阻 R 与长度 L 、电阻率 ρ 成正比,与截面积 F 成反比,即

$$R = \rho \frac{L}{F} \quad (5.2-1)$$

当金属丝沿轴线方向受力而产生变形时,其电阻值也随之发生变化,这一物理现象称为金属丝的应变-电阻效应。为了说明产生这一效应的原因,对式(5.2-1)取对数进行微分得

$$\frac{dR}{R} = \frac{dL}{L} - \frac{dF}{F} + \frac{d\rho}{\rho} \quad (5.2-2)$$

式中 dL/L ——金属丝长度的相对变化,称为应变 ϵ , $\epsilon = dL/L$;

dF/F ——金属丝截面积的相对变化,对直径为 D 的丝, $dF/F = -\frac{\pi D dD}{2} / \frac{\pi D^2}{4} = \frac{2dD}{D}$

$$= -2\mu \frac{dL}{L} = -2\mu\epsilon \quad (\mu \text{ 为金属丝的泊松比});$$

$d\rho/\rho$ ——金属丝电阻率相对变化,它与体积的相对变化有下列关系

$$\begin{aligned} \frac{d\rho}{\rho} &= C \frac{dV}{V} = C \left(\frac{dL}{L} + \frac{dF}{F} \right) \\ &= C(1 - 2\mu)\epsilon \end{aligned} \quad (5.2-3)$$

式中 C ——对于一定的金属材料和加工方法是常数。

将上述 $\frac{dL}{L}$, $\frac{dF}{F}$, $\frac{d\rho}{\rho}$ 各值代入式(5.2-2)

整理得

$$\frac{dR}{R} = [1 + 2\mu + C(1 - 2\mu)]\epsilon \quad (5.2-4)$$

设 $K_0 = 1 + 2\mu + C(1 - 2\mu)$, 则

$$\frac{dR}{R} = K_0\epsilon \quad (5.2-5)$$

由此可见,金属丝的电阻相对变化与它的线应变

成正比,其比例系数 K_0 通称为金属丝的灵敏系数。它的物理意义是金属丝的单位应变所引起的电阻相对变化。这就是电阻应变计的工作原理。

1.1.2 半导体应变计的工作原理

对于单晶半导体材料,外力沿其某一轴向作用时,它的电阻率将发生很大变化,因而它的电阻发生很大变化。半导体材料的电阻率相对变化与轴向应力 σ 有下列关系

$$\frac{d\rho}{\rho} = \pi_L \sigma \quad (5.2-6)$$

式中 π_L ——为半导体材料的轴向压阻系数。

$$\sigma = E\epsilon \quad (5.2-7)$$

式中 E ——为半导体材料的弹性模量;

ϵ ——为由轴向应力引起的半导体材料的应变。

当半导体材料由于外力作用而发生变形时,它的电阻也随之发生变化,其相对变化和 ϵ 的关系与式(5.2-4)相同,即

$$\begin{aligned} \frac{dR}{R} &= (1 + 2\mu)\epsilon + \frac{d\rho}{\rho} \\ &= (1 + 2\mu)\epsilon + \pi_L E\epsilon \end{aligned} \quad (5.2-8)$$

式中右端前项为受力后由于半导体材料的几何尺寸变化引起的电阻相对变化;后项为压阻效应引起的电阻相对变化。由于 $\pi_L E \gg (1 + 2\mu)$, 式中前项可忽略,并设 $K_s = \pi_L E$, 则有

$$\epsilon = \frac{dR/R}{K_s} \quad (5.2-9)$$

式中 K_s ——半导体的灵敏系数。其大小取决于半导体材料的种类、纯度和受力方向。也与应变计的构造型式、制造工艺和材料及粘贴工艺等有关。

由此可知,当应变计粘贴到构件表面,构件受力而变形时,应变计电阻随之发生变化,只要测得电阻相对变化,并事先标定得到应变计的 K_s , 即可求得构件的应变 ϵ 。

1.2 电阻应变计的基本构造及分类

1.2.1 电阻应变计的基本构造

电阻应变计的构造型式很多,但主要组成部分大致相同,图 5.2-1a、b 中列举了三类常见的应变计构造型式,其基本构造由下列各部分组成:

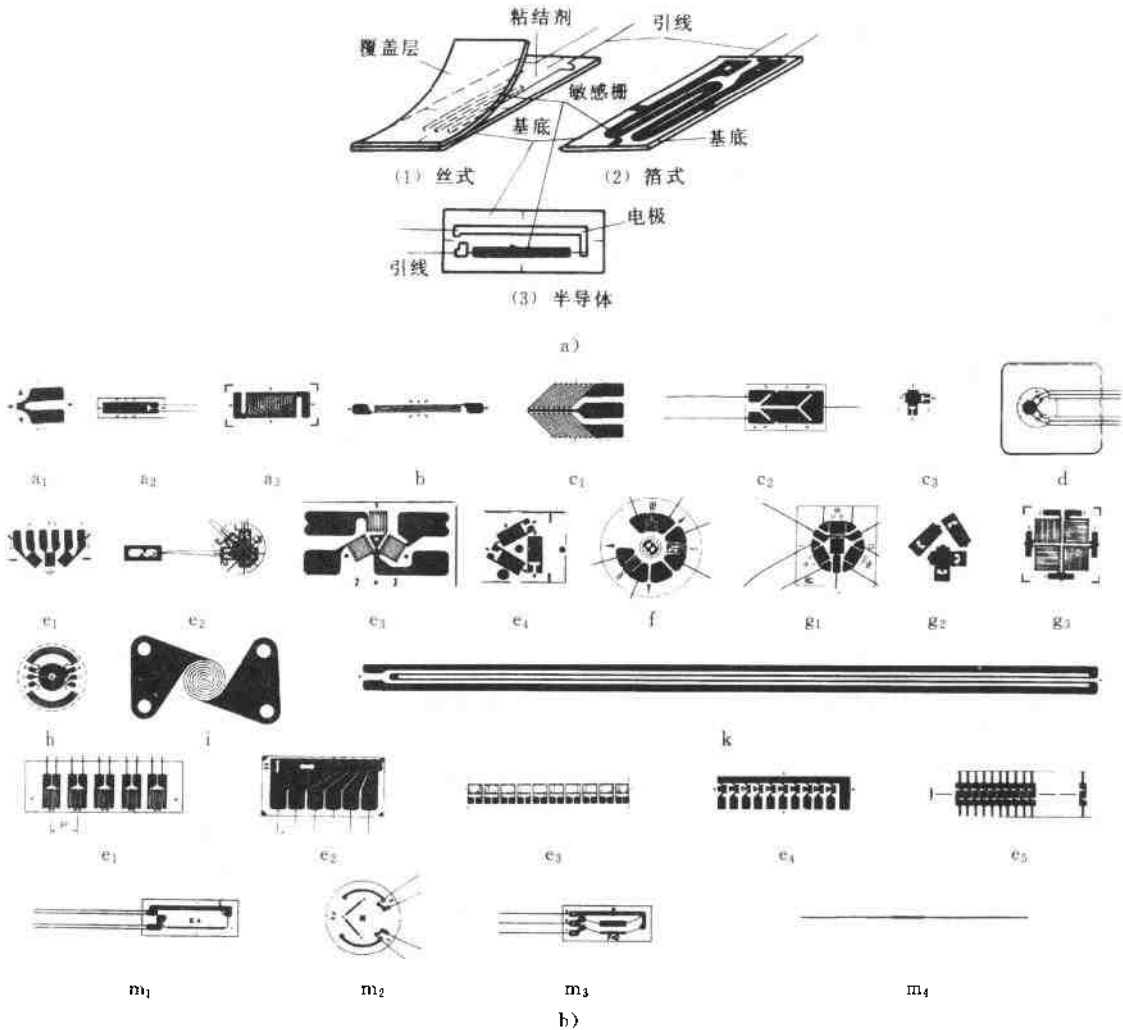


图 5.2-1 电阻应变计的构造及结构型式

a) 电阻应变计的构造 b) 各种应变计的结构型式

a₁、a₂、a₃、b—单轴应变计 c₁、c₂—双轴测扭计 c₃—双轴应变花 d—防水应变计 e₁、e₂、e₃、e₄—三轴应变花

f—残余应力应变计 g₁、g₂、g₃—四轴应变花 h—测压圆膜计 i—螺旋栅测压计 k—混凝土应变计

c₁、c₂、c₃、e₄、e₅—应力集中应变计 m₁、m₂、m₃、m₄—半导体应变计

1) 敏感栅 它是应变计将应变转换成电阻变化量的电阻体。金属应变计的敏感栅主要有三种：其中箔式应变计是用厚为 0.002~0.005mm 的箔经光刻、腐蚀加工而成的；丝式应变计是用 $\phi 0.015\sim 0.05\text{mm}$ 的金属丝绕制成的；金属薄膜应变计是用真空蒸镀、沉积或溅射的方法将金属材料在绝缘基底上制成一定形状的薄膜而成敏感栅。

2) 基底 应变计敏感栅通常是用粘结剂固定在基底上。基底是用来保持敏感栅和引线的几何形状及其相对位置的膜状或板状载体。

3) 引线 它是将敏感栅电阻变化量传输到与测试

仪器相连的导线中的金属丝或金属箔带。

4) 覆盖层 指覆盖在敏感栅上面，以防止敏感栅遭受机械损伤、受潮、受腐蚀的保护覆层。

5) 粘结剂 它是在制造和使用应变计时，将应变计敏感栅(或基底)粘贴于基底(或试件)上的材料。

1.2.2 电阻应变计的分类

电阻应变计按其结构、材料、制造工艺、使用温度、用途等可分为许多种类，主要分类方法见表 5.2-1。电阻应变计型号的组成表示方法，见图 5.2-2 和表 5.2-2。

表 5.2-1 电阻应变计的分类

分类	结构类型	名称	分类	结构类型	名称
金属应变计	敏感栅结构	单轴应变计 多轴应变计 复合栅应变计	金属应变计	用途	一般用途应变计 特殊应变计(防水应变计、大变形应变计、测温计、裂纹扩展计、疲劳寿命计、抗磁型应变计、残余应力测量应变计、表面热膜、系列锰铜压阻片)复合材料、塑料测量应变计,应力集中测量用应变计
	基底材料	纸基应变计 胶基应变计 金属基应变计 浸胶基应变计			高低温自补偿应变计(一般补偿应变计、组合式自补偿应变计(蠕变自补偿、弹模自补偿应变计等)半桥自补偿应变计、热电偶补偿应变计、半桥焊接自补偿应变计、全桥焊接补偿应变计)
	制栅工艺	丝绕式应变计 短接式应变计 箔式应变计 薄膜式应变计 临时基底型应变计			使用温度
	安装方式	粘贴式应变计 焊接式应变计 喷涂式应变计(陶瓷喷涂、等离子喷涂) 埋入应变计	半导体应变计	制造工艺	体型半导体应变计 扩散型(包括外延型)半导体应变计 薄膜型半导体应变计 N-P 元件半导体型应变计

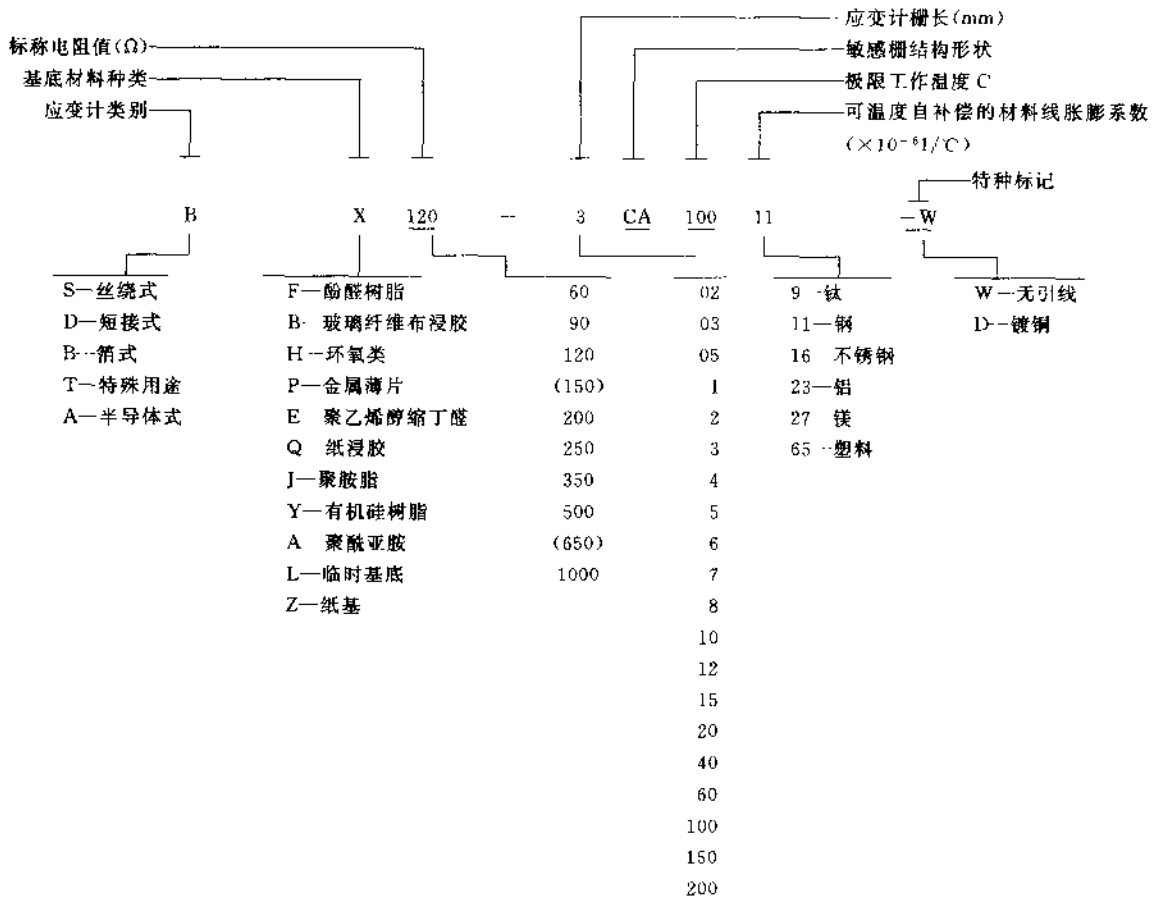









图 5.2-2 应变计型号组成的表示方法

表 5.2-2 应变计敏感栅结构形状说明

序号	敏感栅的结构形状代表字母	敏感栅结构型式代表符号	敏感栅结构说明
1	AA		单轴
2	BA		二轴 90°
3	BB		二轴 90°
4	BC		二轴 90°重叠
5	CA		三轴 45°/90°
6	CB		三轴 45°重叠
7	CC		三轴 60°
8	CD		三轴 120°
9	DA		四轴 60°/90°
10	DB		四轴 45°/90°
11	EA		二轴四栅 45°
12	EB		二轴四栅 90°
13	FB		平行轴二栅
14	FC		平行轴三栅
15	FD		平行轴四栅,可制更多栅 如 10 栅
16	GB		同轴二栅
17	GC		同轴三栅
18	GD		同轴四栅,可制更多栅 如 10 栅
19	HA		二轴二栅 45°
20	HB		二轴四栅 45°
21	HC		二轴六栅 45°
22	HD		二轴八栅 45°,可制更多栅 如 10 栅
23	JA		螺旋栅
24	KA		圆膜栅

1.3 电阻应变计的工作特性

为了适应各种测试工作需要,电阻应变计应具备以下工作特性:

1) 应变计电阻 R 指应变计在没有安装,也不受外力的情况下,室温时测定的电阻。

2) 灵敏系数 K 指安装在被测试件的应变计,在其轴向受到单向应力时引起的电阻相对变化与由此单向应力引起的试件表面轴向应变之比。

$$K = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} \quad (5.2-10)$$

式中 $\Delta L/L$ 试件表面上的轴向应变;

$\Delta R/R$ ——由 $\Delta L/L$ 引起的应变计电阻的相对变化。

3) 零点漂移 p 指对已安装的应变计,在温度恒定、试件不受应力的条件下,指示应变随时间的变化。

4) 蠕变 θ 指对已安装的应变计,在承受恒定的真实应变情况下,温度恒定时指示应变随时间的变化。

5) 机械滞后 Z_i 对于已安装的应变计,在温度恒定时,增加或减少机械应变过程中同一机械应变量下指示应变的差数。

6) 应变极限 ϵ_{lim} 对于已安装的应变计,在温度恒定时,指示应变和真实应变的相对误差不超过规定数值时的真实应变值。

7) 绝缘电阻 R_{in} 已安装的应变计的敏感栅及引线与被测试件之间的电阻值。

8) 横向效应系数 H 在同一轴向应变作用下,垂直于单向应变方向安装的应变计的指示应变与平行于单向应变方向安装的同批应变计的指示应变之比。亦即在同一单向应变作用下,应变计的横向灵敏度与纵向灵敏度之比,用百分数表示。

9) 疲劳寿命 N 已安装的应变计在恒定幅值的交变应力作用下,连续工作到产生疲劳损坏时的循环次数。(一般要求应变计在室温或极限工作温度下的疲劳寿命达 $10^5 \sim 10^7$ 次)。

有下列情况之一者即为达到疲劳寿命。

- ① 应变计断路。
- ② 应变计输出幅值变化 10%。
- ③ 应变计输出波形出现穗状尖峰。
- ④ 应变计室温零点变化超过 $100\mu m/m$ 。

10) 热输出 ϵ_t 应变计安装在具有某一线膨胀系数的试件上,试件可以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,由温度引起的指示应变。

11) 热滞后 E_t 对于已安装的应变计,试件可以自由膨胀并不受外力作用,在室温与极限工作温度之间升温或降温时,同一温度下指示应变的差数。

12) 瞬时热输出 ϵ_{in} 当应变计安装在某一线膨胀系数的试件上,试件可以自由膨胀并不受外力作用,以一定的速率快速升(或降)温时,由温度变化引起的指示应变。

13) 平均热输出系数 应变计在极限工作温度范围内, 平均热输出的最大值与最小值之差除以最高工作温度与某一规定工作温度之差, 它表示应变计的温度自补偿程度。

14) 最大工作电流 I_{max} 对于已安装的应变计, 允许通过敏感栅而不影响其工作特性的最大电流值。

15) 极限工作温度 应变计在规定的条件下, 能保持其工作特性不变或在允许范围内变化的最高工作温度或最低工作温度。

以上是各类应变计的主要工作特性, 不同用途的应变计, 对其工作特性的要求也有所不同。在国家专业标准 GB/T 13992—92《电阻应变计》中, 对于丝式及箔式的常温、中温、高温和低温的电阻应变计单项工作特性的精度等级, 各精度等级的指标以及单项工作特性的检定方法作了明确的规定。应变计单项工作特性的精度等级分为 A、B、C、D 级, 各精度等级的指标规定见表 5.2-3。它们只代表某种型或某批应变计的各个单项工作特性所达到的精度。

表 5.2-3 应变计精度等级指标规定

工作特性	说 明	级 别			
		A	B	C	D
应变计电阻	对标称值的偏差 (±%)	0.5	2	5	10
	对平均值的公差 (±%)	0.1	0.2	0.4	0.8
灵敏系数	对平均值的分数 (%)	1	2	3	5
机械滞后	室温下 $/\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$	3	5	10	20
	极限工作温度下 $/\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$	10	20	30	40
蠕变	室温下 1h $/\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$	3	5	10	20
	极限工作温度下 1h $/\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$	20	30	50	100
应变极限	室温下 $/\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$	20000	10000	8000	6000
	极限工作温度下 $/\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$	8000	5000	3000	2000
绝缘电阻	室温下(测量电压 15~100V) /MΩ	10 ⁴	2k	1k	0.5k
	极限工作温度下(温度波动 < ±5℃) /MΩ	10	5	2	0.5
横向效应系数	室温下 (±%)	0.5	1	2	5
疲劳寿命	室温或极限工作温度下的循环次数	10 ⁷	10 ⁶	10 ⁵	10 ⁴
灵敏系数随温度变化	工作温度范围内每 100℃ 变化 (±%)/100℃	1	2	3	4
	每一温度下对平均值的分数 (±%)	3	4	6	10
热输出	平均热输出 $/\mu\text{m}/\text{m} \cdot \text{C}^{-1}$	1	2	3	5
	对平均热输出的标准误差(2σ) $/\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$	60	100	200	500
零点漂移	室温下 1h $/\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$	1	3	5	10
	极限工作温度 1h $/\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$	10	25	50	150
热滞后	每一工作温度下 $/\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$	15	30	50	100
瞬时热输出	平均热输出系数 $/\mu\text{m} \cdot \text{m} \cdot \text{C}^{-1}$	1	2	3	5
	对平均热输出的分散 $/\pm\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$	60	100	200	500

1.4 各种应变计的特点和适用范围

1.4.1 金属应变计

(1) 丝绕式电阻应变计

其敏感栅两端有圆弧部分, 在平面应变场中使用, 圆弧部分会感受与敏感栅轴线垂直方向的应变, 因而有比较大的横向效应。对于测量精度较高的场合, 应对测量应变值进行横向效应修正。这种应变计尺寸较大, 很难制成小尺寸的。

为了减少横向效应的影响, 丝绕式应变计可制成

短接式应变计, 但它的疲劳寿命较低。

丝式应变计除高、中温和特殊应变计外, 其用量在减少, 国内外部分高温应变计的主要性能见表 5.2-4(GB1101C152C163C33)。

(2) 箔式应变计

其敏感栅截面呈长方形, 其表面积对截面积之比圆丝要大的多, 故传递试件表面上的变形较金属丝敏感栅要好, 散热能力强, 工作电流可增大, 故输出信号可增大; 丝栅薄而软, 便于胶粘在弯曲表面上, 因而有较高的测试精度; 横栅部分的宽度可制成比纵向部分大, 以减少横向效应; 蠕变和机械滞后均较小; 易于

制成各种型式的应变花(如双轴 90°花、45°三轴花、60°三轴花、120°三轴花、各种四轴花和残余应力测量花等),制成极小尺寸的(如栅长 0.15~0.2mm)和栅长 150mm 的大尺寸的应变计;易于实现大批量生产,因而价格低、质量高。基于上述特点,应用广泛,逐渐取代了丝绕式应变计。部分国内外箔式应变计见表 5.2-3。

(3) 温度自补偿型应变计

在环境温度低于 -30℃ 的低温和高于 60℃ 的中、高温静应变测量中,胶粘在无外力、无约束试件上的应变计,当环境温度变化时,由于敏感栅材料具有的电阻温度系数及敏感栅材料与试件材料的线膨胀系数不同,将引起应变计电阻发生变化,即热输出。此种现象称为温度效应,由于温度效应引起的电阻相对变化为

$$\left| \frac{\Delta R}{R} \right| = \alpha \cdot \Delta t + (\beta_x - \beta_m) K \cdot \Delta t \quad (5.2-11)$$

以应变表示为

$$\epsilon_t = \left[\frac{\alpha}{K} + (\beta_x - \beta_m) \right] \Delta t \quad (5.2-12)$$

式中 α 敏感栅材料的电阻温度系数;

β_x 试件材料的线膨胀系数;

β_m 敏感栅的线膨胀系数;

Δt 环境温度变化量。

某些应变计(如镍铬合金制成的应变计)当温度变化时,热输出很大,甚至比欲测的机械应变大几倍乃至几十倍。因此必须设法予以减少。方法之一是采用温度自补偿应变计,它是采用特殊设计和工艺方法制造的,使其温度引起的热输出很小或者接近于零。

1) 单臂温度自补偿应变计 制片所用应变合金(丝材、箔材)经过预先选择、组合和处理,使应变计对某种膨胀系数试件的热输出正好接近于零。通常有单丝栅型和组合丝栅型两种,后者是将电阻温度系数不同的两种合金丝串联制成。针对不同结构材料制出不同的单臂应变计,用这种应变计时,连接导线需要用“三线法”,以消除和减少导线热输出的影响。

2) 半桥或全桥自补偿应变计 该应变计大都做成金属薄片为底基的焊接式应变计,半桥式是在基底上粘贴两个敏感栅,一为工作栅,一为补偿栅见图 5.2-3;全桥式是四个敏感栅,有两个工作栅二个补偿栅。其结构见图 5.2-4。这种应变计使用比较简单。

3) 串联铂电阻的半桥自补偿应变计 其原理见图 5.2-5,其工作桥臂 R_1 的热输出被补偿臂 R_2 (铂或铂铱)的热输出所抵消。调节与之串联的电阻 R_3 适应不同的结构材料。此种应变计线路比较复杂, R_3 的数值要求调节得比较精确。

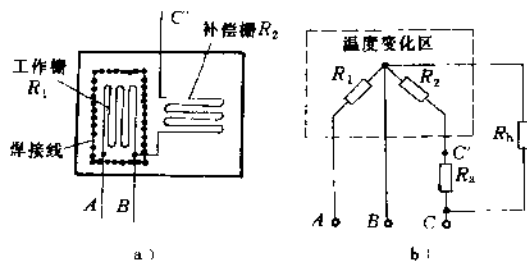


图 5.2-3 半桥焊接式温度自补偿应变计
a) 应变计结构 b) 接线方法

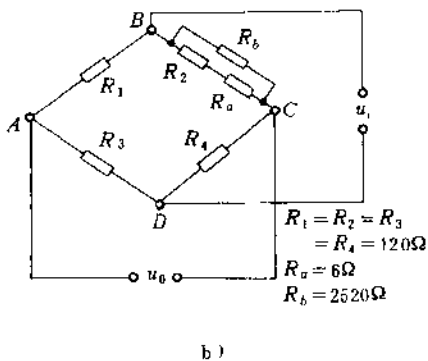
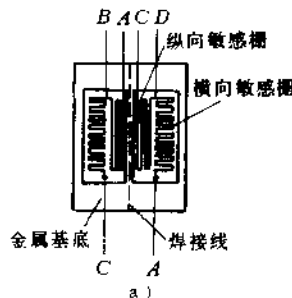


图 5.2-4 全桥焊接式温度自补偿应变计
a) 应变计结构 b) 接线方法

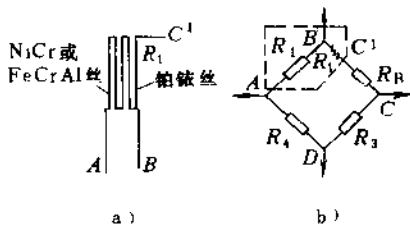


图 5.2-5 串联铂电阻半桥自补偿应变计
a) 丝栅结构 b) 测量电路

4) 弹性模量温度补偿应变计及可调蠕变应变计 金属材料具有不同的弹性模量而且随温度变化而变化。有些应变合金如改良型卡玛合金,采用不同热处理规范可改变灵敏系数的温度系数,如果应变计的灵敏

表 5.2-4 国内外部分丝式高温应变计

主要性能指标 型号	敏感栅尺寸 (长×宽) /mm×mm	基底尺寸 (长×宽) /mm×mm	标称电阻值 /Ω	室温灵敏 系数 K	最高使用 温度 /℃	使用胶粘剂	安装 方法	适用元件材 料的线膨胀 系数 /(10 ⁻⁶ ℃)	生产单位 (研制)	备 注
KJ-350B	9×2		120	2.03	350		粘贴	11	中航总公司 623 所	
KJ-350C	10×2		120	2.05	350		粘贴	16	中航总公司 623 所	
KJ-350D	9×2		120	1.99	400		粘贴	9	中航总公司 623 所	
Bu7 400	7×3		120	1.99	400		粘贴		沈阳航空发动机研究所	可制成焊接式
SL120-8AA400	8×2	15×6	120	2.39	400		粘贴			
HZ-400-11		18×8	120	1.88	400		焊接	11	华东电子仪器厂	温度自补偿
HZ-400-14		18×8	120	1.88	400		焊接	14		温度自补偿
673-10 型高温应变计					450		胶粘		7 院 703 所	利用热输出曲线修正
450℃ 半桥焊接片	6×2	18×18			450		焊接		郑州机械研究所 北京建材研究院	半桥自补偿
JDGH 550 型焊接片	7×2	13×7.5	100~120	1.68	550	LN-3 LN-4	焊接		成都科技大学	
JDGN-750	7×2	13×6.5		1.54						
SP120-8AA700(15)	8×3	18×8	120	2.55	700	磷酸盐类	焊接	15	沈阳航空发动机研究所	
SB120-7AA700(15)	7×3	13×5	120	2.71	700	磷酸盐类	粘贴	15	沈阳航空发动机研究所	
SL120 10AA800(15)	10×4		120	2.44	≥800	喷涂高纯度 Al ₂ O ₃	喷涂	15	沈阳航空发动机研究所	
SB-550	8		100		550	G-55 磷酸盐粘剂	复合材料		清华大学	
BHP-12AA700(14~17)	12×2	16×7		2.65/1.98						热输出系数 ≈ 3pm/m(℃), 灵敏度系数随温度变化 3%/100℃ 铁铬铝合金丝
6	6×3	10×8	120	2.56/1.99	700	P12-2	粘接	根据 用户要求	北京航空航天大学	
4	4×4	8×8		2.16/1.75						
BHP-12AA800(14~17)	12×3	16×7		2.72/1.96						热输出及灵敏度系数变向 上铁铬铝合金丝
6	6×4	10×8	110	2.68/1.94	800	P12-2	粘接	根据 用户要求	北京航空航天大学	
4	4×4	8×8		2.3/1.67						
SL120 8AA400(11~17)	8×2	15×6	120	2.39/2.12	400	F18-2	粘接	11~17	北京航空航天大学	铁铬铝合金丝
JHMT-8-400				常温 1.9	400				俄罗斯 MM 格罗莫夫 飞行研究院	
JHMT-16-300	10±1	6×25	200	常温 2.05	300	BK-54M	粘接	8~9 15~16		
动态用高温应变计	5×4		58		800~1000	al65~32A	粘接		俄罗斯斯马法发 动机联合体	沈阳航空发动机研究所 已引进生产
LF30	3×2 6×1.3	15×10		(-200)~650(静态) (230)~760(动态)		CR~760	粘接		德国 HBM 公司	上海 HBM 代销处
KHC-10-120-G7-11C2M	10	165×5	120		550		焊接		日本共和 (kyowa)	高温、高压水中测试适 用最曲率半径 R20mm
KHC-10-120-G7-16C2M									日本共和 (kyowa)	适于最小曲率半径 R25mm
KHC-20-120 G7 16C2M	20	30×5	120		550		焊接		日本共和 (kyowa)	最小曲率半径 R15mm 高温高压动态应变测试
KHC-20-120-G7-16C2M										
KHCD-5-200-G11C2M	5	10×3	200		动态 800		焊接		日本共和 (kyowa)	

(续)

产品型号	产品敏感栅 结构表示符号	敏感栅尺寸(长× 宽)/mm×mm	基底尺寸(长×宽) /mm×mm	使用温度 /℃	粘剂	主要用途	生产厂家	备 注
BA120-02AA(**)	—	0.2×2.0	3.4×38	-75~150	H-610	一般测量	中航应变计厂	还可制成栅长1~10mm各种应变计
BA120-05AA(**)	—	0.52×1.2	3.0×2.6					
BA120-4AA(**)	—	4.2×1.7	8.8×4.0					
BA650-4AA(**)	—	4.2×4.2	9.0×6.0					
BH120-2HA-A(**)	<	2.0×3.0	7.4×7.1			应力测试	中航应变计厂	温度自补偿应变计 * * — 温度补偿代 号如 09,11,16,23 等
BH120-2HA(**)	<	2.0×3.0	7.4×7.1					
BH350-2HA(**)	<	2.0×4.2	8.8×5.6					
BH350-4HA(**)	<	4.0×3.3	8.2×8.2					
BH350-6HA(**)	<	6.0×4.7	11.0×11.3					
CEA-XX-187UV-120	<			-75~205	AE-10	通用应变计,	美国 M. M. 公司	
CEA-XX-187UV-350	<				AE-15	一般应力测量		
CEA-XX-015UW-120	—			-75~205	AE-10	通用应变计,	美国 M. M. 公司	
					AE-15	一般应力测量		
WA-XX-060WR-120	∠			-75~205	600		美国 M. M. 公司	
					Δ10			
					AE-15			
KFG-10-120-D17-11 L3M3S	∠	10×3	φ21			应力测量	日本 KYOWA	L3M3S—表示引线 种类 L—乙烯 3M—3M 长 3—表示3线期 S—引线色别
KFG-5-120-D17-11 L3M3S	∠	5×1.4	φ11					
KFG-3-120-D17-11 L5M3S	∠	3×1.3	φ10					
KFG-1-120-D17-11 L3M3S	∠	1×1.2	φ5					
BE120-2CA(**)	∠	2.0×1.5	9.3×9.3			应力测量	中航应变计厂	温度自补偿应变计
BE120-3CA(**)	∠	3.1×1.8	11.1×11.1	-30~60	H-610			
BE120-4CA(**)	∠	3.6×1.7	11.7×11.7		H-611			
BE120-6CA(**)	∠	5.9×3.1	15.4×15.4		X-602			
BE120-2CA(**)	∠	2.0×1.5	9.3×9.3					
BE120-4CA(**)	∠	3.6×1.7	11.7×11.7	-75~156	H-610			
BE120-6CA(**)	∠	5.9×3.1	15.4×15.4					
RXC120-5CA-16	∠	5×3	18×21					
RXC120-5BB	∠	5×10	12×11			应力测量	北京红星应变计厂	生产各种规格的应 变计
RXC120-2CD	∠	2×2	11×11					
MHP25-5A	—	3.0×5.0	6.0×14			低温应力测量	北京红星应变计厂	锰铜压阻法
MHP60-5BD-36	—	φ5	12×46	-269~60				
BBDP20-3AA-16	—	3.0×2.0	11×6.0					

(续)

产品型号	产品敏感部 结构表示符号	敏感栅尺寸(长× 宽)/mm×mm	基底尺寸(长×宽) /mm×mm	使用温度 /℃	粘剂	主要用途	生产厂家	备注
BFH400-2HA		2.0×4.2	6.0×6.0			高精度传感器	中国气动力研究与 发展中心测试研究所 (四川安县134信箱)	
BFH300-1-4HA	<	1.4×6.0	4.0×7.0					
BFH500 0.9HA		0.9×2.0	2.5×2.5					
BFH500-1-4HA		1.4×6.0	4.0×7.0					
BFH300-3AA		3.0×2.0	6.0×3.0					
BFH350 4AA		4.0×2.5	7.0×4.0					
BFH600 3AA		3.0×2.0	6.0×3.0					
BFH600-6AA		6.0×4.2	10×6.0					
BFH200-1-2AA		1.2×1.0	3.0×2.0					
BFH1000-6AA		6.0×4.2	10×6.0					
BE120-2CE(**)	∨	2.0×2.4	8.0×8.0	-30~60	H-610	一般应力测量	中航应变计厂	
BE120-3CE(**)		3.0×3.4	11.0×11.0					
BF120-2GJ	+++++	1.0×1.0	5×15				浙江黄岩测试仪器厂	应力集中应变花
BE120-2BC(**)	+	2.0×2.0	6.6×6.6					
BE120-3BC(**)		2.8×1.7	7.7×7.7					
BE120 4BC(**)		4.2×1.7	9.4×9.4		H-610			
BE120-6BC(**)		6.0×2.7	12.0×12.0	粘剂不同使用 温度不同 (H-610使用 269~288℃)	X-602 H-611 (常温)	应力测量	中航应变计厂	
BE120 2CB	※	2.0×2.0	6.6×6.6					
3CB		2.8×1.7	7.7×7.7					
4CB		4.2×1.7	9.4×9.4					
6CB		6.0×2.7	12.0×12.0					
KFG-10-120 D17-11 N15C2	※	10×3.0	φ21					
KFG-10-120-D17-11 L1M2S		10×3.0	φ21					
KFG-5-120-D17-11 N30C2		5.0×1.4	φ11					
KFG-3-120-D17-11 L5M2S		3.0×1.3	φ10					
KFG-2-120-D17-11 N30C2		2.0×1.3	φ8	10~100	PC-6 CC-33A	一般应力测量	日本 KYOWA	引线长 0.15~5M 可选
KFG-2-120-D17 11 L5M2S		2.0×1.3	φ8					
KFG-1 120-D17-11 N15C2		1.0×1.2	φ5					
KFG-1-120-D17-11 L5M2S		1.0×1.2	φ5					
KFG-0.5-120-D9 11 N10C2	+	0.15×3.34	6×3					
KFG-1-120-D9-11 N10C2		1.0×1.4	12×4	10~100	PC-6 CC-33A	应力集中域测量	日本 KYOWA	可选
KFG-2-120-D9 11 N10C2	+	2.0×2.2	17×5					

(续)

产品型号	产品敏感栅 结构表示符号	敏感栅尺寸(长× 宽)/mm×mm	基底尺寸(长×宽) /mm×mm	使用温度 /°C	粘剂	主要用途	生产厂家	备注
BE120-2FD(**)		4.0×1.8	8.0×11.0			应力集中域测量	中航应变计厂 浙江黄岩测试仪器厂 北京红星应变计厂	
BF120-2FD		2.0×2.0	6.0×12.0					
BXC120-2FE		2.0×2.0	7.0×25					
BE120-2GD		2.0×2.2	15.3×6.2		H-610	应力集中域测量	中原 521 厂 浙江黄岩测试仪器厂	
BE350-2GD		2.0×3.8	2.0×5.0		H-611			
BF120-3GD		2.0×2.0	6.0×12.0					
KFR 015-120 D9-11 M10C2		0.15×0.34	6.0×3.0	-196~180	PC-6			
KFR-015 120-D9 16 N10C2					CC 33A	应力集中域测试	日本共和(KYOWA)	德国 HBM 公司制 成 11 栅, 13 栅的组片
KFR-015 120-D9-23 N10C2		1.0×1.4	12×1	-196~120	P1 32			
KFG-1-120-D9 11 N10C2				-196~180				
16								
23								
27								
BE120-1CC	△	1.0×1.0	6.7×6.7	-30~60	H-610	一般应力测量	中原 521 厂	
BE120-2CC		2.0×1.4	7.0×7.0		H-611		中航总应变计厂	
BF120-1CC		1.0×1.0	6.0×6.0			应力测量	浙江黄岩测试仪器厂	
BF120-2CC		2.0×1.0	7.0×7.0					
BF120-5CC		5.0×3.0	13×13					
BE120-6KA(**)		φ5.0	φ6.0					
BE120-10KA(**)		φ9.0	φ10		X 602	传感器	中航应变计厂	
BE120 15KA(**)		φ14	φ15		11 610			
BA120-6KA(**)		φ5	φ6					
BA350-20KA(**)		φ19	φ20					
BB120 3A A250(**)		3.0×2.6	6.6×10					
BB120 4A A250(**)		3.9×2.6	8.0×4.1					
BB120 5A A250(**)		4.8×2.6	8.8×8.4	250	F-601	应力测试	中航应变计厂	蠕变 ≤ 30 μm/m 热输出 1 μm·m ⁻¹ /°C K ≤ 1(1%/100°C)
BB350-5A A250(**)		5.0×4.1	9.8×5.7					
BB120 2FB250(**)		2.0×2.4	6.0×5.6	250	F 601	应力测试	中航应变计厂	蠕变 ≤ 30 μm/m 热输出 1 μm·m ⁻¹ /°C K ≤ 1(1%/100°C)
BB120 4FB250(**)		3.9×2.6	7.5×6.9					
BB120-2BB250(**)		2.0×2.1	6.4×6.5	250	F-601	应力测试	中航应变计厂	热输出 1 μm·m ⁻¹ /°C K ≤ 1(1%/100°C)
BB120 3BB250(**)		3.0×3.0	8.0×6.1					