

应变片与传感器技术丛书

金属箔式应变片 制作工艺原理

Principle of Metallic Foil Strain Gauge
Manufacturing Techniques

尹福炎 编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

应变片与传感器技术丛书

金属箔式应变片制作工艺原理

Principle of Metallic Foil Strain Gauge Manufacturing Techniques

尹福炎 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书系统而详细地介绍有关金属箔式应变片的设计原理、制作工艺等方面的基础知识和基本实践。全书共分7章,包括序言、电阻应变片及其应变传递机理、金属箔式应变片的构成材料、金属箔式应变片制版技术、箔式应变片的光刻(图形转印)工艺技术、应变片制造中的沾污控制、电阻应变片的工作特性及精度等级评定。

本书可作为从事金属箔式应变片、电阻应变式传感器研究、制造及生产的技术人员,从事工程结构或部件试验的应变测量的工程技术人员及大专院校相关专业师生的参考用书。

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 12 字数 217千字

2011年8月第1版第1次印刷 印数 1—3000册 定价 29.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

电阻应变片(也称电阻应变计)是工程结构或部件试验中应变测量和制作各种物理量(力、质量、压力、加速度、位移及扭矩等)传感器的重要敏感元件,目前,应用最为广泛的是以各种应变电阻合金箔为敏感栅的金属箔式应变片。长期以来,金属箔式应变片以制作方便、价格便宜、使用简便、测量可靠等特点而广泛用于工程结构或部件的应变测量及制造各种物理量传感器,特别是在测力、称重传感器和压力传感器等领域尤为明显。

长期以来,国内外没有系统介绍有关箔式应变片制作工艺方面的专著。本书根据国内外相关文献资料,系统而详细地介绍有关金属箔式应变片的设计原理、制作工艺等方面的基础知识和基本实践。全书共分7章,包括序言、电阻应变片及其应变传递机理、金属箔式应变片的构成材料、金属箔式应变片制版技术、箔式应变片的光刻(图形转印)工艺技术,应变片制造中的沾污控制、电阻应变片的工作特性及精度等级评定。本书既对以往工艺技术作一个简单总结,又为今后箔式应变片制作技术的创新开拓提供一定的理论基础,因而可以认为它既是工程技术人员入门的向导,又是深造的阶梯。

本书在编写过程中参考和引用了许多国内外专家、学者的文献,特别是近年来的相关著作和学者论文资料,使内容更加充实和系统,在此谨向原文献作者表示诚挚的敬意和感谢。

由于编著者的水平有限,书中不妥之处在所难免,恳请各位读者、同行和专家批评指正。

编著者

2010年12月

目 录

第 1 章 序言	1
1.1 电阻应变片技术的进展	1
1.2 箔式应变片的特点	2
1.3 箔式应变片应用前景	2
第 2 章 电阻应变片及应变传递机理	4
2.1 电阻应变片的基本结构	4
2.2 电阻应变片的种类	5
2.2.1 丝式应变片	5
2.2.2 箔式应变片	6
2.2.3 半导体应变片	7
2.2.4 薄膜应变片	8
2.2.5 厚膜应变片	9
2.3 电阻应变片的应变传递机理	9
2.3.1 电阻应变片的工作原理	9
2.3.2 应变片的灵敏系数	11
2.4 电阻应变片的温度自补偿	14
2.4.1 电阻应变片温度效应	14
2.4.2 应变片温度自补偿原理	16
第 3 章 金属箔式应变片的构成材料	20
3.1 应变电阻合金	20
3.1.1 各类应变电阻合金的特性	20
3.1.2 精密电阻合金箔的轧制及性能控制	24
3.2 应变胶黏剂及基底材料	37
3.2.1 应变胶黏剂胶黏机理	37

3.2.2	箔式应变片用胶黏剂及其特征	38
3.2.3	基底材料	44
3.2.4	应变胶黏剂的若干特性	45
3.3	引出线材料	46
第4章	箔式应变片几何图形的制版技术	48
4.1	箔式应变片图形结构的有限元研究	48
4.1.1	用三角柱单元的三维分析	49
4.1.2	单丝应变片的应变分布特征	49
4.1.3	箔式应变片各组成部分的特性分析	52
4.1.4	圆弧端环对应变片灵敏系数的影响分析	57
4.2	箔式应变片图形结构设计原理	61
4.2.1	箔式应变片的原图设计	61
4.2.2	传感器用箔式应变片图形设计	70
4.2.3	粘贴式补偿(调整)电阻片的图形设计	90
4.3	箔式应变片的刻图、制版技术	95
4.3.1	箔式应变片制版技术的演变	95
4.3.2	光绘工艺技术	102
第5章	箔式应变片的光刻(图形转印)工艺技术	105
5.1	箔式应变片基底的制备	105
5.1.1	箔材的裁剪与清洗	105
5.1.2	基底的制备	107
5.2	光刻工艺技术	113
5.2.1	光致抗蚀剂	115
5.2.2	光刻工艺	123
5.2.3	光刻工艺中一些弊病的讨论	153
第6章	应变片制作中的沾污控制	157
6.1	生产环境的净化要求	157
6.2	对生产用水的净化	161
6.3	对加工用的化学药品、试剂和设备的净化要求	163
6.4	对工作人员的清洁要求	165

第 7 章 箔式应变片的工作特性及等级评定	167
7.1 电阻应变片的命名规则	167
7.2 电阻应变片的工作特性	169
7.3 电阻应变片精度等级及评定原则	177
7.4 应变片的包装与储存	183
参考文献	185

第 1 章 序 言

1.1 电阻应变片技术的进展

自从美国西蒙斯(E. Simmons)和鲁奇(A. Ruge)于 1938 年发明了由金属电阻丝组成的电阻应变片(也称电阻应变计,简称应变片或应变计)以后,给各种工程结构的应力测量和结构应力分析带来了极大的方便。与此同时,人们也开拓了采用电阻应变片作为敏感元件,制作用于测量力、质量、压力、位移及加速度的各种物理量传感器。

1953 年,英国的杰克逊(Jackson)发表了以环氧树脂系胶黏剂为基底的,以金属箔代替金属丝制成金属箔式应变片(简称箔式应变片),使应变片的生产工艺技术有了根本性的改变,无论是生产效率、产品质量都有了明显的提高。特别是由于现代科学技术的发展,采用现代光刻技术,应变片的形状和几何尺寸都可以更为优化,现在可以制作微型箔式应变片的最小基长为 0.2mm。箔式应变片的品种、规格有上万种之多。从 20 世纪 70 年代开始,箔式应变片已开始逐渐取代丝式应变片了。

1954 年,史密斯(Smith)发表了硅、锗等半导体材料的压阻效应,而后,贝尔电话实验室的麦逊(Mason)等人于 1957 年制成体型半导体应变片,由于半导体应变片的灵敏系数比金属应变片高 25 倍~100 倍,因此,可以测量微小应变和制作高灵敏度的应变传感器。为了改善半导体应变片电阻温度系数大的缺点,人们利用半导体集成电路的平面工艺,开发了扩散型半导体应变片、外延型半导体应变片等,使半导体应变片的温度特性有了很大的改善。

1966 年,出现了采用溅射技术制成的薄膜应变片,由于制成元件间没有有机物的黏结层,因而蠕变、滞后小到可以忽略的程度,因而有利于制作各种传感器。

1982 年,用金属或金属氧化物作浆料,采用丝网印制技术制成厚膜应变片,它具有价格低、产量高及适用范围广等特点,为传感器的制作提供了廉价的敏感元件。

1.2 箔式应变片的特点

箔式应变片是利用光化学技术把金属电阻箔蚀刻成各种敏感栅,常用的箔材厚度为 $3\mu\text{m}$,最薄的箔材厚度可达 $1\mu\text{m}$ 。由此组成的各种应变片与上述各类应变片相比,具有以下的特点:

(1)形状的多样化。由于箔式应变片是采用照相制版、采用光刻技术进行图形转移,因而应变片的尺寸正确、一致性好,而且尺寸可以做到很小。根据不同的用途,可采用最适宜的结构形状(如单轴片、应变花、半桥式片或全桥片等)。无论是何等复杂的结构形状都可用相同的工艺制造,目前,箔式应变片的结构形状有成千上万种,其最小基长为 0.2mm 。

(2)允许电流大。由于箔式应变片的电阻栅丝是矩形截面,由于其表面积大,散热效率高,因此它比丝式应变片能承受更大的允许电流。

(3)柔性好。箔式应变片的基底薄,一般为 $20\mu\text{m}\sim 40\mu\text{m}$,而敏感栅电阻体本身也很薄,一般为 $3\mu\text{m}\sim 5\mu\text{m}$ 。因此整个应变片的柔性比较好,不仅可粘贴于平面试件,也可粘贴在具有一定曲率半径的弯曲试件表面。

(4)耐疲劳寿命高、承受大变形能力强。由于应变片引出端采用了合理的结构形状,避免了力学上强度的不连续性,并且敏感栅结构形成耐剪切的形状,因此其疲劳寿命和耐大变形性能好。

(5)横向效应小。箔式应变片的栅丝回折端环部分的截面积大,因而这部分的电阻值小,所以,其横向效应比丝式应变片明显减小,有利于提高应变测量精度。

(6)蠕变特性好。应变片的蠕变特性,通常与敏感栅的长度和栅丝回折端环部位的有效黏结面积有关。箔式应变片比丝式应变片具有大的黏结面积,因而其蠕变特性好。另外,通过对应变片结构的有限元分析发现,调整箔式应变片栅丝宽度与应变片回折端环长度之比,就可以调整应变片的蠕变特性,可以由负蠕变与正蠕变之间变换,由此,可以制成各种蠕变自补偿应变片。

(7)成本低、效率高。由于采用光刻、腐蚀技术,生产过程可实现半自动化,通常产品成品率高,所以价格也较便宜。

1.3 箔式应变片应用前景

自从 20 世纪 50 年代箔式应变片问世以来,不仅其工艺技术不断完善,其

应用范围也不断扩大,除了广泛用于各种环境条件下的应变测量外,还在力、压力、位移及加速度等物理量传感器方面获得了广泛的应用。特别是20世纪70年代以来,随着电子衡器和自动称量技术发展,由各种箔式应变片制成的各种称重传感器,作为电子衡器和自动称量技术的核心元件,有了前所未有的发展。自90年代以来,特别是通过改革开放和引进国外先进技术,制作称重传感器用的高精度箔式应变片由进口到自给,箔式应变片产品质量不断提高,产品数量不断增长,应用范围不断扩大。据有关资料的统计,2009年全国共生产各种应变片达上亿片,出口的应变片和各种称重传感器,产值达几百万之多。

但是,长期以来由于国内外对箔式应变片的生产工艺方面的公开资料比较少,因此,人们往往缺乏对应变片工艺技术方面的系统认识,从而一定程度上也限制了技术开发和创新精神的发挥。为了不断总结经验,本书以1984年5月在上海应变片技术和应用交流会上发表的《电阻应变片制作和性能检定》(讲义资料)为基础,根据自身的实践和国内外在应变片技术研究方面近几十年的新成就编写而成,这是国内首部有关箔式应变片制作工艺技术的专著,比较系统地介绍了有关金属箔式应变片制造工艺及相关的知识,并附有大量的图、表及曲线,更有助于对应变片工艺技术的理解。

第 2 章 电阻应变片及应变传递机理

2.1 电阻应变片的基本结构

目前尽管应变片的形式很多,结构各异,但归纳起来各种应变片大都是由应变敏感栅(丝或箔)、胶黏剂、基底、覆盖层和引线等部分组成的,如图 2-1 所示。其各部分的作用如下:

(1)敏感栅。是把应变量转换成电阻变化量的敏感部分。通常是金属或半导体材料,有丝、箔或薄膜等形式。

(2)基底。支持应变片的敏感栅和引出线,保持其几何形状和相对位置,并具有良好的绝缘性能。

(3)覆盖层。用来保护敏感栅不受机械损伤和外部环境的影响而覆盖在上面的绝缘层。

(4)胶黏剂。用于把敏感栅牢固地固定在基底和覆盖层之间,具有良好绝缘性能的材料。

(5)引线。用以从敏感栅引出电信号的丝状或带状的导线。

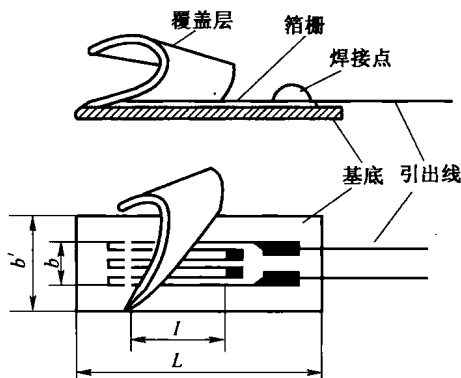


图 2-1 箔式应变片基本结构

2.2 电阻应变片的种类

电阻应变片的种类很多,分类的方法也很多。以敏感栅材料分类,分为金属、半导体及金属或金属氧化物浆料等三类。而金属电阻应变片又分为金属丝式应变片(简称丝式应变片)、金属箔式应变片(简称箔式应变片)和金属薄膜应变片;半导体应变片中则分为体型、扩散型、薄膜型和PN结等(图2-2)。

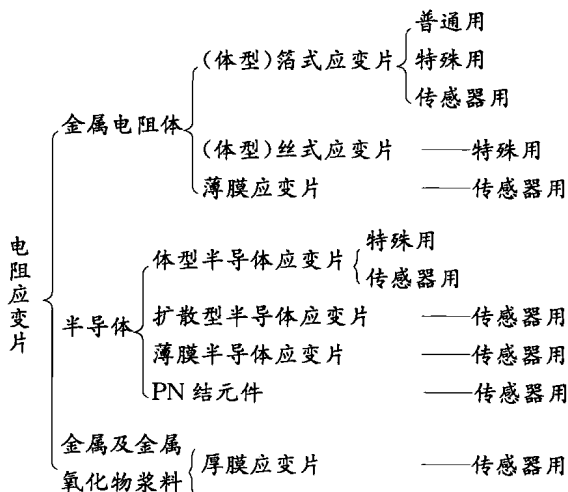


图2-2 电阻应变片的种类

2.2.1 丝式应变片

丝式应变片是用直径为 $0.015\text{mm}\sim 0.03\text{mm}$ 的金属电阻丝作敏感栅制成的应变片。它是把电阻丝直接绕制在各种绝缘基底上,如纸、胶膜、金属薄板上,通常由于基底材料很薄,一般为 $0.02\text{mm}\sim 0.05\text{mm}$,即使是金属基底,底板的厚度也在 $0.15\text{mm}\sim 0.20\text{mm}$ 。因而与试件粘贴后,能把试件变形忠实地传递到电阻丝上。根据选择相应的基底材料、胶黏剂和电阻合金丝,可以制成各种不同用途的应变片,如高温应变片、低温应变片、水下应变片及抗磁性应变片等。

目前,丝式应变片用得最多的有两种形式,即丝绕式和短接式(图2-3)。两者的差别,在于制造方法不同,丝绕式应变片是把电阻丝连续绕制在基底上的,丝栅端部呈圆弧状。短接式应变片是把一组电阻丝平行安置,在两端部用比电阻丝直径大5倍~10倍的镀银铜丝交叉焊接而成,因而其端部是平直的。由于前者敏感栅端部呈圆弧状的,因而在平面应变场内,圆弧部分不仅感受轴向应

变,而且也反应横向应变,这就是应变片的横向效应,由于该种应变片横向效应大,容易引起测量误差。另外,应变计端部圆弧形状不易保证,从而造成应变片性能的分散。对于短接式应变片,其横向效应小,但是由于其敏感栅部分焊点比较多,则疲劳寿命比较低。

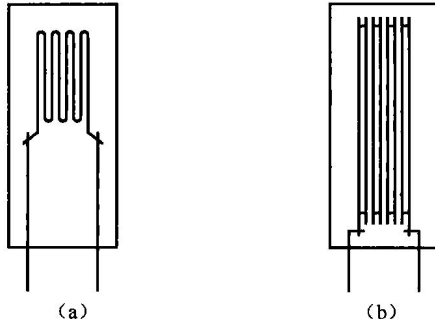


图 2-3 丝式应变片

(a)丝绕式应变片;(b)短接式应变片。

由于丝式应变片具有较大的横向效应,基长也不能做得太小(最小基长为1mm),制作各种应变花也比较困难,为此,目前,除了特殊用途的应变片外,基本上都由箔式应变片所取代了。

2.2.2 箔式应变片

箔式应变片是沿用印制术中的制版工艺和半导体集成电路的平面工艺中光化学原理制成的,因此不仅应变片的尺寸正确,而且,任何复杂的形状都可用相同的工艺制造,典型的箔式应变片如图 2-4 所示。箔式应变片的特点性能稳

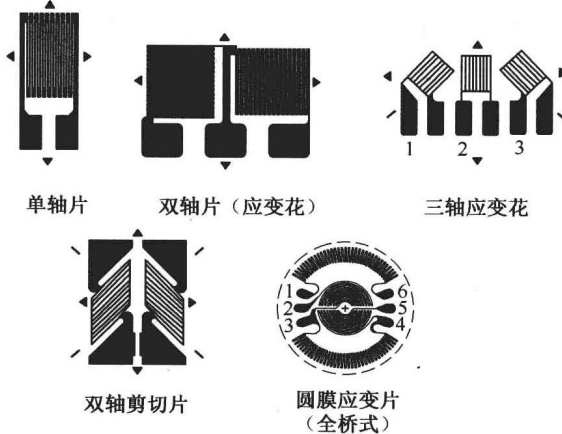


图 2-4 箔式应变片

定;适用温度范围宽,可用于 $-269^{\circ}\text{C}\sim+250^{\circ}\text{C}$ 的温度范围;不仅可用于各种工程结构或部件的应力测量,而且还可用于制作各种力学量传感器,特别是测力/称重传感器和压力传感器等。尽管目前应变片的种类很多,但在测力/称重传感器领域,有 $80\%\sim 90\%$ 都采用箔式应变片。

2.2.3 半导体应变片

半导体应变片是利用半导体单晶(如硅、锗等)作为敏感栅元件制成的,即体型半导体应变片(图 2-5)。由于其电阻变化与所受的应力有关,即

$$\frac{\Delta\rho}{\rho}=\pi_L\sigma=\pi_L Y\varepsilon \quad (2-1)$$

式中 π_L —— 半导体材料的压阻系数;
 Y —— 半导体材料的弹性模量;
 ρ —— 半导体材料的电阻率;
 $\Delta\rho$ —— 经受应力后的电阻率变化;
 σ —— 经受的应力;
 ε —— 经受的应变。

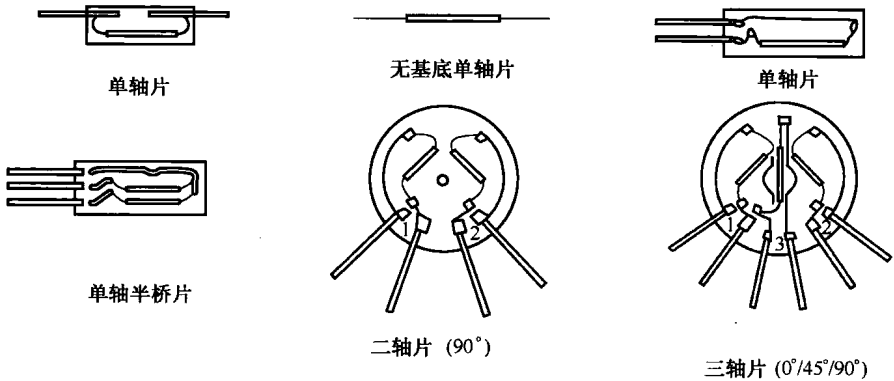


图 2-5 体型半导体应变片

半导体材料的灵敏系数为

$$K_s = \frac{\Delta R}{R} / \varepsilon = 1 + 2\mu + \pi_L Y \approx \pi_L Y \quad (2-2)$$

式(2-2)中右边 $(1+2\mu)$ 项表示材料的体积变化, $\pi_L Y$ 项为材料物理性能的变化。半导体材料其应变灵敏系数主要取决于材料的压阻系数 π_L 和弹性模量 Y , $\pi_L Y$ 项数值通常在 $50\sim 200$ 范围。由于半导体材料是各向异性的,各晶向物

理常数都不尽相同,因而必须根据要求选用。典型的半导体应变片与金属应变片的性能比较列于表 2-1。由表中可见,半导体应变片的最大优点是有大的应变灵敏系数,而其缺点是性能受温度变化的影响大。为了改善体型半导体应变片中的性能,人们利用半导体集成工艺制成扩散型半导体应变片,它是采用向硅基片中扩散不同浓度的杂质,以获得所需特性的应变片。由于扩散型应变片不用胶黏剂粘贴,因而传感元件没有蠕变和滞后。根据相应的晶向结构扩散适当的杂质浓度,构成半桥或全桥线路,不仅可以提高灵敏度,而且又可相互补偿温度影响。目前,广泛用于压力和加速度传感器中,并有小型、高精度的特点。

表 2-1 典型的半导体应变片与金属应变片的性能比较

性 能		种 类	半导体应变片 P-Si(111)	金属应变片 (康铜)
电 学 性 能	应变灵敏度系数 K		125	2.0
	电阻率/ $(\times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm})$		2000	5
	电阻温度系数/ $(\%/10^\circ\text{C})$		1.5	0.2
	应变灵敏系数随温度变化/ $(\%/10^\circ\text{C})$		1.5	0.015
	电阻/ Ω		100~5000	100~1000
	0.1%时非线性/%		1	0.1
力 学 性 能	弹性模量 Y/GPa		190	150
	线膨胀系数 $(100^\circ\text{C})/(\times 10^{-6}/^\circ\text{C})$		0.27	15
	最大弹性应变/%		0.3	10
	在 0.1%时的疲劳寿命/次		$>10^7$	$>10^7$

2.2.4 薄膜应变片

薄膜应变片是采用真空沉积和溅射方法把金属或半导体材料直接沉积在基片上制成的应变片。根据组成敏感栅材料的不同又分为金属薄膜应变片和半导体薄膜应变片。

薄膜应变片与体型应变片相比,由于导电机理不同,应变灵敏系数随膜厚而变化的。一般来说厚度为数埃(\AA)的薄膜应变片其灵敏系数比较高,大约为几十左右。对于膜厚为 1000\AA 以上的薄膜应变片,其灵敏系数与体型应变片相似。金属薄膜应变片的典型结构如图 2-6 所示,薄膜应变片敏感栅材料一般有金属、合金及半导体材料。而半导体材料除单晶硅、锗外,还有多晶硅、多晶锗及微晶硅等。基底材料可以是金属、胶膜、玻璃及陶瓷等。

由于薄膜应变片不用胶黏剂粘贴的,因而应变元件无滞后和蠕变,是传感

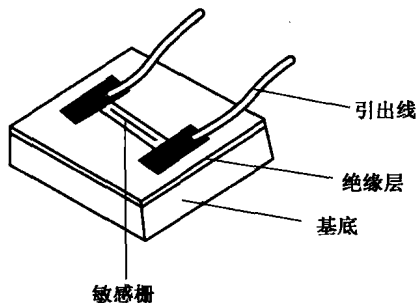


图 2-6 薄膜应变片

器技术中很有前途的敏感元件。

2.2.5 厚膜应变片

厚膜应变片是基于厚膜电阻器的压阻效应的一种敏感元件，它是以金属或非金属的氧化物制成的浆料，采用丝网印制技术，把敏感栅形状印制在金属或陶瓷基底上，经高温烧结而成的，一种焊接式厚膜应变片的典型结构如图 2-7 所示。由于它具有耐高温、耐腐蚀，集成化程度高，适于批量生产及价格低廉等特点，目前主要用于制作压力和力传感器。

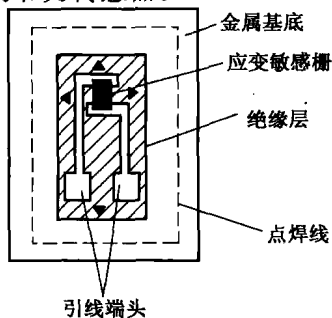


图 2-7 焊接式厚膜应变片

2.3 电阻应变片的应变传递机理

2.3.1 电阻应变片的工作原理

电阻应变片有用电阻丝作为敏感元件，也有用金属箔和半导体材料的，而其根本的原理是以金属电阻丝为基础的，现以使用金属电阻丝及箔的金属电阻应变片为对象加以说明。

由物理学可知，具有均匀截面的金属导体的电阻为

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2-3)$$

式中 R ——金属导体的电阻(Ω);
 ρ ——金属导体的电阻率($\mu\Omega \cdot \text{cm}$);
 L ——金属导体的长度(mm);
 A ——金属导体的截面积(mm^2)。

如果金属导体受到变形 ϵ 和温度 T 作用时,其电阻 R 将发生变化,即

$$\frac{dR}{R} = \left(\frac{dR}{R}\right)\epsilon + \left(\frac{dR}{R}\right)T \quad (2-4)$$

将式(2-4)取对数进行微分,得

$$\frac{dR}{R} = \left(\frac{1}{L} \frac{\partial L}{\partial \epsilon} - \frac{1}{A} \frac{\partial A}{\partial \epsilon} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial \epsilon}\right) d\epsilon + \left(\frac{1}{L} \frac{\partial L}{\partial T} - \frac{1}{A} \frac{\partial A}{\partial T} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T}\right) dT \quad (2-5)$$

式(2-5)右边第一项表示应变的影响;第二项表示温度的影响。

当温度不变时,即 $dT=0$ 时,式(2-5)可简化为

$$\frac{dR}{R} = \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A} + \frac{d\rho}{\rho} \quad (2-6)$$

金属导体在单向拉伸或压缩时,其长度将会发生伸长或缩短,对于用作应变敏感栅的,都是圆形或矩形截面,因此,若把式中的 $\frac{dL}{L}$ 作为金属导体的相对变化,用应变 ϵ 表示,即

$$\epsilon = dL/L$$

对于圆形截面(图 2-8),其截面积为

$$A = \frac{\pi}{4} d^2$$

对于用箔材的应变片,其矩形截面积为

$$A = b \times t$$

式中 b ——横截面积的宽度;

t ——箔材的厚度。

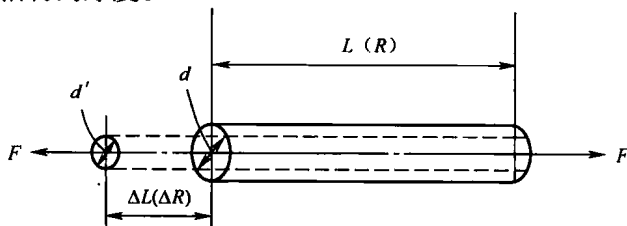


图 2-8 金属导体的变形