

应变片与传感器技术丛书

高温/低温电阻 应变片及其应用

High/low Temperature Resistance Strain
Gauge Research and Application

尹福炎 王文瑞 闫晓强 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

应变片与传感器技术丛书

高温/低温电阻应变片及其应用

尹福炎 王文瑞 闫晓强 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书系统地介绍了高温/低温电阻应变片的工作原理、构成材料的性能、各种高温/低温电阻应变片制作方法及性能检定方法,并着重介绍了各种高温/低温电阻应变片的应用技术。最后,还系统介绍了作者在高温应变测量影响因素仿真研究和实验研究的工作。

本书可供从事高温/低温电阻应变片研究、制造及使用的技术人员以及从事工程结构试验和应变测量的工程技术人员参考。也可供各院校有关专业的师生作参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

高温/低温电阻应变片及其应用/尹福炎,王文瑞,闫晓强
编著. —北京:国防工业出版社, 2014. 9

(应变片与传感器技术丛书)

ISBN 978-7-118-09524-1

I. ①高… ①尹… ②王… ③闫… III. ①热电阻
IV. ①O441.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第221061号

※

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 19¼ 字数 343 千字

2014年9月第1版第1次印刷 印数 1—3000册 定价 69.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

应用电阻应变片测定结构或部件应变的电测技术是目前应用最为广泛的应变测量手段。对于实际应用来说,尽管目前对非破坏检查的方法进行了种种的研究,但是从测量精度、使用方便与否以及所用经费等各方面来看,任何一种方法都不及应用应变片的电测技术。由于电阻应变片不但适用于各种金属材料,而且也可方便地用于混凝土、木材、橡胶、塑料、复合材料、玻璃钢等各种非金属材料。因而目前已广泛用于航空航天、交通运输、建筑、机械、冶金、石油化工、电力及原子能等各个部门。对于各种特殊环境条件,如高温、低温、高压、真空、强磁场、原子辐射、水下、氧化气氛以及化学腐蚀等都能适应。另外,由电阻应变片制成的各种电阻应变式传感器,已成为实验室和工业自动控制的不可缺少的重要检测元件。

电阻应变片具有把结构或部件的应变变化量转换成电量输出的特点,它与其他形式的传感元件相比,具有以下优点:

- (1) 测量精度高,具有优良的线性和动态响应特性;
- (2) 应变片体积小、重量轻,对结构没有附加重量,因而不影响结构的动态响应;
- (3) 应变片不损坏结构的表面形状及应力分布;
- (4) 同时可进行多点测量,并与计算机相连,可及时进行测量数据的处理;
- (5) 不仅可进行远距离测量,也可进行无线遥测,数据同样可由计算机进行处理;
- (6) 使用温度范围很宽($-269\sim+1000^{\circ}\text{C}$);
- (7) 使用简便,操作人员稍加培训便可进行工作,试验成本低。

高温电阻应变片,在高温环境下的应变测量技术也是基于应变电测的基本原理。在 20 世纪 40 年代—50 年代,随着科学、工业技术的发展,特别是军工、交通、能源等工业部门动力机械的发展,许多承力构件的工作温度远远超出常温范围,从而产生了一系列由温度产生的热应力,引起结构或部件的损坏。为此,美、英及苏联等国都相继投入较大的力量,开展了高温应变片和高温应变测

量技术的研究。其中包括可以应用于高温条件的高温应变电阻合金、高温应变胶黏剂以及高温应变片的温度补偿形式和各种高温应变片的应用技术。其基本研究成果,收集在由美国航空结构实验室海空军材料中心于1957年编辑出版的《高温应变片论文集》中。为了解决600℃以上高温应变片的热输出大而不稳定的问题,20世纪70年代—80年代,国外对各类高温应变片都进行了系统的研究,特别是在20世纪90年代—21世纪初,适用于各种不同温度范围的各种高温应变片产品市场化、规范化程度更高,出现了各种品质比较稳定的典型产品,如粘贴式、焊接式及喷涂式高温应变片等,并且制造部门在产品使用方面可给予用户更多、更具体的技术支持,使高温应变片的使用成功率及高温应变测量的精度都有相应的提高。目前,用于250℃以下温度范围的高温应变片大都可用各种箔式高温应变片,而对于高于250℃温度范围的,则大都采用各种丝式高温应变片。因此,本书中所介绍的高温应变片,除特别说明外,一般都是指丝式高温应变片。

我国对高温应变片和高温应变测量技术的研究,始于20世纪50年代末。基于我国国防、机械、电力、石油化工、冶金等工业部门发展的需要,开展了高温应变片和高温应变测量技术的研究和应用实践。在20世纪70年代—90年代,我国的高温应变片技术研究工作达到了顶盛时期。在此期间,研制成功了用于不同温度领域的高温应变电阻合金,如卡玛合金(镍铬铝合金)等镍铬改良型合金、镍钼合金、铁铬铝、铂钨合金及钽铬合金等;研制成功了应用于400℃、600℃及800℃的各种高温应变胶黏剂。并且高温应变片在各个领域内的应用也十分广泛,各种学术交流活动也很普遍。

但是,由于高温应变片不仅对原材料(高温应变电阻合金及高温胶黏剂等)要求很高,而且制作和使用技术复杂。并且一般每次测量时用量不大,这样高温应变片的研制和生产受到了极大的抑制。目前,除了少数单位为了满足自家需要而继续研制外,国内还没有国产的市售产品。而国外高温应变片产品的价格又相当昂贵,从而也抑制了我国高温环境下应变测量技术的发展。长期以来没有系统的高温应变片制作和应用技术方面的专著,为了便于今后人们继承和发展高温应变片和高温应变测量技术,根据国内外的有关文献资料,并结合自身的实践,编写此书。本书系统介绍了国内外高温应变片的发展与现状、高温应变片的温度效应及温度补偿、各种不同类型高温应变片的制作技术、高温应变片的热输出及预测方法以及各种高温应变片的应用技巧等。书中对适用于低温及深低温环境条件的各种低温应变片的一些基本知识也作了简要的介绍。

本书在编写过程中,引用和参考了很多国内外从事高温应变片及高温应变测量技术的专家、学者及工程技术人员的研究成果,在此向他们致以崇高的敬意和感谢。

本书受北京市高校青年英才计划基金(YETP 0368)及国家重大科学仪器设备开发专项(2011YQ14014507)资助,在此一并表示感谢。

本书在完成过程中,硕士研究生张佳明、聂帅、赵雪静、王晓亮等进行了大量的核对、仿真、实验工作等人员,一并表示感谢。

对于书中的不足之处,敬请批评指正。

编著者
2014年2月

目 录

第 1 章	高温电阻应变片的现状与展望	1
1.1	电阻应变片的基本结构及其进展	3
1.2	高温电阻应变片种类	5
第 2 章	高温电阻应变片的构成材料及其性能	12
2.1	高温应变电阻合金	12
2.1.1	应变片电阻合金的一般性能	12
2.1.2	高温应变电阻合金在高温下的行为	16
2.2	高温应变胶黏剂	38
2.2.1	应变胶黏剂及其应变传递特性	38
2.2.2	应变胶黏剂的性能要求及种类	40
2.2.3	应变胶黏剂对应变片性能的影响	54
2.2.4	影响胶黏剂黏结强度的若干因素	56
2.2.5	应变片与试件之间粘贴质量的检查	60
2.3	应变片基底材料	62
2.4	引出线材料	63
第 3 章	高温电阻应变片的温度效应及补偿	64
3.1	高温电阻应变片的温度特性	64
3.1.1	电阻应变片的应变—电阻效应	64
3.1.2	温度变化引起应变片的热输出	65
3.1.3	瞬态温升条件下的应变片的瞬时热输出	67
3.1.4	应变片灵敏系数随温度的变化	73
3.2	高温应变片的温度补偿与温度自补偿	74
3.2.1	工作片—补偿块(补偿片)法	75
3.2.2	温度系数组合式温度补偿应变片	75

3.2.3	热电偶补偿式应变片	76
3.2.4	热敏电阻组合补偿式应变片	78
3.2.5	半桥焊接式温度补偿应变片	81
3.2.6	全桥焊接式温度补偿应变片	85
3.3	温度自补偿高温应变片	86
第4章	高温电阻应变片的制作技术	92
4.1	高温应变片制片的工艺设备	92
4.1.1	手工绕制设备及其应用	92
4.1.2	RW型半自动绕丝机	97
4.2	各种典型高温应变片的制作技术	108
4.2.1	胶膜基底高温应变片的制作程序	109
4.2.2	玻璃布浸胶基底应变片的制作程序	112
4.2.3	金属基底应变片的制作技术	116
4.2.4	自由丝应变片的制作技术	129
第5章	高温电阻应变片温度特性及标定方法	131
5.1	电阻应变片及高温应变片性能评定标准	131
5.2	电阻应变片型号的命名规则	134
5.3	电阻应变片工作特性术语	137
5.4	高温应变片温度特性及其测定方法	141
5.4.1	高温应变片在高温环境下的特性	141
5.4.2	高温应变片主要温度特性的测定	146
第6章	高温电阻应变片热输出特性预测方法	159
6.1	高温应变片的热输出及其推测方法	159
6.2	高温应变片热输出的预测方法	162
6.2.1	夹持式预测热输出方法	163
6.2.2	转贴式应变片	163
6.2.3	焊接应变片热输出的预测法	165
6.2.4	用电阻应变片测量材料线膨胀系数的方法	167
第7章	高温电阻应变片的应用技术	175
7.1	粘贴式高温应变片的使用技术	176

7.1.1	胶膜基底和增强基底高温应变片的粘贴方法	176
7.1.2	临时基底应变片的安装方法	184
7.2	喷涂法安装临时基底应变片的方法	187
7.2.1	安装应变片的喷涂装置	187
7.2.2	喷涂法安装应变片的方法	188
7.3	焊接式高温应变片的安装技术	191
第 8 章	高温电阻应变片应用中的若干问题	199
8.1	应变测量精度与环境条件及使用者的关系	200
8.2	高温应变片与高温应变传感器	201
8.3	正确测量高温应变片的热特性	208
8.3.1	高温应变片热输出的测定	208
8.3.2	瞬态加热条件下温度应变误差的修正方法	211
8.3.3	膜盒式高温应变片在不同试件材料的热输出	214
8.4	高温应变测量的数据处理及误差分析	217
8.4.1	高温应变测量的数据处理	217
8.4.2	应变—应力换算	220
8.5	高温应变测量误差的估算	224
第 9 章	低温电阻应变片及其应用	225
9.1	低温应变测量技术的发展背景	225
9.2	低温电阻应变片	226
9.2.1	应变片敏感栅材料	227
9.2.2	应变胶黏剂	231
9.2.3	低温防护剂	232
9.3	低温应变片的温度效应及磁阻效应	233
9.3.1	低温应变片的温度效应及补偿	234
9.3.2	低温强磁场环境下的应变测量	236
9.4	低温应变片的性能测定	240
9.4.1	低温介质的贮存、传输和转注	240
9.4.2	低温应变片性能测定	246
9.5	低温应变片的应用技术	251
9.5.1	低温应变片的粘贴工艺技术	251
9.5.2	低温电阻应变式传感器	257

第 10 章	高温应变测量影响因素仿真研究与实验研究	263
10.1	高温应变测量影响因素仿真研究	263
10.2	含应变片的标定梁的模型建立与验证	264
10.3	含应变片的标定梁模型的结构参数研究	269
10.3.1	黏接剂厚度对测量精度的影响	269
10.3.2	栅丝直径对测量精度的影响	271
10.3.3	栅丝间距大小对测量精度的影响	272
10.3.4	栅丝长度对测量精度的影响	273
10.3.5	应变片安装角度误差对测量精度的影响	275
10.4	高温应变测量标定系统的设计	276
10.4.1	高温应变测量系统的构成与系统集成	276
10.4.2	数据采集、分析软件系统的研制	279
10.4.3	高温应变片标定装置设计	281
10.5	高温应变片参数标定实验研究	283
10.5.1	温度校核实验	284
10.5.2	灵敏度数据实验测定	285
10.5.3	热输出标定的数据处理	289
10.5.4	蠕变零漂综合值的数据处理	292
10.6	高温应变片测量实验	293
参考文献		297

第 1 章 高温电阻应变片的现状与展望

随着科学技术的发展,各种航空、航天飞行器经历的环境条件越来越复杂,各种工业设备的工作状态和工作环境也发生了急剧的变化。飞行器、工业及工程设备的可靠性和安全性,更加引起人们的重视,其中温度环境对飞行器、工业设备或装置的运行安全,无论在设计部门,还是制造部门以及运行部门,都非常关切。因而,高温电阻应变片的研究开发以及高温下应变测量技术的推广应用,都是提高各种飞行器及工业产品质量,确保飞行器及工业设备或装置的安全运行的重要保证。目前,在各个不同工业部门及各种不同结构经受的温度范围如表 1-1 所列。

表 1-1 各种工业设备或装置的环境温度一览表

温度	100℃	350℃	650℃	950℃	1000~2200℃
产业部门、结构部件或装置	火力发电厂的锅炉多水泵;成套设备的各种管道;船舶结构(在海水);汽车车体(在寒冷地带);汽车的吸气压缩机;钢筋结构物海水中试验等	原子能成套设备的冷却管道(纯水);燃气轮机的燃烧器;汽车汽缸盖;汽车的活塞等	原子能反应堆周壁;火力发电厂热交换器;原子能反应堆冷却水用管道(钠);原子能燃料棒;锅炉;蒸汽轮机;核燃料的高速增殖炉;炼铁高炉的周壁;汽车排气阀;汽车排气管;汽车排气涡轮机;汽车排气消声器;钢筋结构物耐火试验等	高温燃气涡轮机动、静叶片;高温气体炉;石油化工反应装置;热处理炉;淬火炉;航空发动机喷管;喷气式发动机;发动机;涡轮机;船舶用燃气轮机	高速飞行飞机;火箭、导弹及宇航飞行器

随着计算机及有限元等各种数值计算方法的发展,对于各种结构或部件在高温下的热应力,人们可以通过建立数学模型,确定相宜的边界条件等各种数值计算获得一定的有益数据。但是,对于各种复杂结构或复杂的环境条件下的部件,使用数值计算方法则显得有一定的困难。特别是,即使是数值计算比较

精确,但它也还需要由实际试验来做进一步的验证。在高温条件下结构或部件的应变测量,尽管有热光弹性法、云纹法、电容法、应变电测法及激光散斑等各种方法,但现今最有效、方便、测量精度较高及成本较低的还是应用各种高温电阻应变片的高温应变电测方法。

电阻应变片的使用温度范围,通常是由应变片的基底材料、敏感栅材料、胶黏剂种类以及安装方法等因素所决定的。在国外应变片技术领域,人们一般把应变片使用温度范围划分为以下几种:

深低温(Cryogenic temperature)为 -200°C 以下;

低温(Low temperature)为 $-200\sim-10^{\circ}\text{C}$;

常温(Room temperature)为 $-10\sim+50^{\circ}\text{C}$;

中温(Medium temperature)为 $+50\sim300^{\circ}\text{C}$;

准高温(Medium high temperature)为 $300\sim500^{\circ}\text{C}$;

高温(High temperature; Elevated temperature)为 500°C 以上。

由上述温度分界,不同的温度范围,将有最佳适用的应变片。但是,从电阻应变片实际工程测试和研究中,所谓的“高温”有两个方面的含义:

(1)从试验部件材料角度。对于金属材料而言,高温是指金属或合金基体金属熔点大约 $1/4$ 以上的温度范围内,不是指一个固定的温度界值,它随材料种类而异(表1-2)。据研究表明,由于在基体金属熔点的 $35\%\sim70\%$ 的温度范围内,蠕变变得相当明显,这对结构或部件的工作性能的影响很大,因而需要确定这个高温范围。所以,在相当广泛的温度范围内,对各种材料都要考虑高温效应问题。

表 1-2 各种材料的高温范围

材料	熔点/ $^{\circ}\text{C}$	高温范围起点/ $^{\circ}\text{C}$
铝合金	660	165
钢	1400	350
不锈钢	1450	370
铁	1540	385
钒	1710	430
钛	1795	450
碳化硼	2450	610
碳化钨	2867	720
碳化钨	3887	970

(2) 从电阻应变片方面。目前,国内应变片技术业界大都以 $300\sim 350^{\circ}\text{C}$ 以上的温度定为“高温”,这是从应变片制作元件的应变电阻合金及高温胶黏剂的实际情况出发,现今的有机胶黏剂的最高使用温度大致为 $300\sim 350^{\circ}\text{C}$ 。温度再高时,则需使用无机胶黏剂或喷涂氧化物等方法。对于各种应变电阻合金(无论是丝材或箔材),有不少材料在 400°C 以上除了出现表面氧化外,还将出现金相结构的异常变化,引起热输出的反常及不规则的变化,造成应变片在高温下的不稳定,这些都会给应变片的制作和使用带来很多问题。此外,在高温下,构件材料产生的蠕变也会影响实测工作和数据处理,诸如热输出、零漂及蠕变等,从而更增加了高温应变测量的复杂性。温度变化引起电阻应变片性能的变化,这是所有电阻应变片的共同特征,如何合理地解决温度影响也是应变测量的共同问题。只是对于高温应变片及高温应变测量而言,这个问题将更为突出。为此,为了叙述的方便,本书中将用于 300°C 以上的电阻应变片都笼统地称为“高温电阻应变片”。

1.1 电阻应变片的基本结构及其进展

传统的电阻应变片,常常作为常温条件下结构或部件的试验应力测量及制作各种力学量传感器的最主要的敏感元件,其基本结构如图 1-1 所示。其基本构成元件有敏感栅丝(或箔栅)、基底、胶黏剂、引出线(或称引线)及覆盖层等。

(1) 基底的作用是支撑栅丝,使其保持一定的几何形状,并使栅丝与被粘贴构件表面之间具有高的电绝缘。

(2) 敏感栅丝是一种敏感元件,它把结构部件的变形转换成敏感栅丝的电阻变化(构件的变形与栅丝电阻变化之间呈线性关系),通过电桥电路变换成电压量输出。

(3) 胶黏剂是把应变片粘贴结构部件上,通过它把构件的变形传递到应变片的敏感栅丝上。

(4) 引出线是为了便于敏感栅丝与外部测量导线可靠地相连接而设置的连接细线。有利于保护焊点,避免应力集中,提高应变片本身的安全和寿命。

(5) 覆盖层主要是保护栅丝免受外力冲击等的机械损伤,提高应变片的稳定性。

高温电阻应变片也有类似的结构,只是需要根据最高使用温度环境、应力状态等来选择高温应变片结构及组成材料,其各组成部分的功能也与上述基本相同。

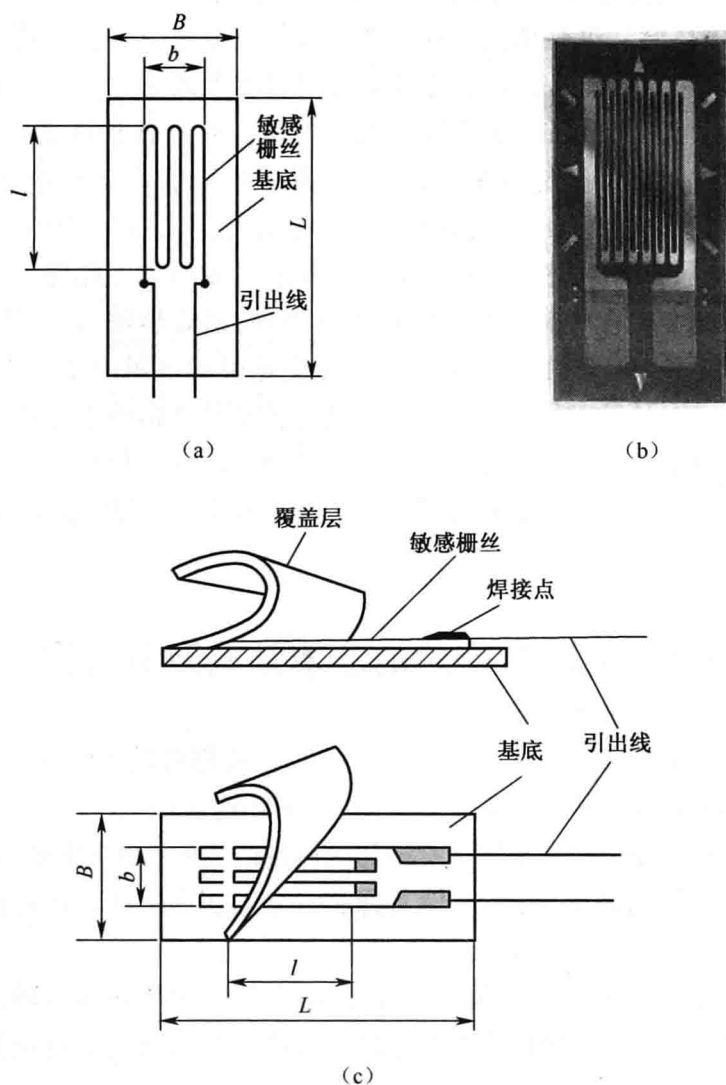


图 1-1 电阻应变片的基本结构
(a)丝式应变片;(b)箔式应变片;(c)应变片基本结构。

电阻应变片技术的发展与其他各种学科一样,都是伴随着科学技术的发展而进步的。1938年,美国加利福尼亚理工学院教授西蒙斯(E. E. Simmons)和麻省理工学院教授鲁奇(A. C. Ruge),在同一时期研制出同样形式的粘贴式电阻丝应变片。后来由美国鲍尔温公司(Baldwin-Lima-Hamilton Corp.)取得了该项目专利权,产品以西蒙斯和鲁奇两人名字的字头及各自两名助手,命名为SR-4。这使鲍尔温公司成为世界上首家电阻应变片的专业生产公司,并垄断了产品市场。

1953年,英国的杰克逊(P. Jackson)发表了以环氧为基底采用印制电路技

术生产的箔式应变片,由于其性能明显优于丝式应变片而很快得到普及,从而使应变片技术进入一个新的时代。

1954年,美国史密斯(C. S. Smith)发现了硅、锗半导体材料的压阻效应,尔后贝尔电话实验室的麦逊(Mason)等人于1957年制成压阻半导体应变片。由于它是由硅、锗条制成敏感电阻体,因而把此称为体型半导体应变片,1960年作为商品市售。由于半导体应变片的灵敏系数是金属应变片的25~100倍,因而被用于测量微小应变和制作高灵敏度传感器。而半导体应变片的最大缺点是其电阻温度系数大,因而,受温度变化的影响也很大。为了改善体型半导体应变片电阻温度系数大的缺点,在20世纪60年代,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,它大大地改善了半导体应变片的温度特性。随着集成电路工艺技术的发展,而后,利用在绝缘物外延硅法(Silicon On Insulator, SOI)和由异质外延方法在蓝宝石衬底上定向外延硅单晶薄膜工艺(Silicon On Sapphire, SOS),使半导体应变片和压阻传感器的性能有了更大的提高,也使半导体应变片和压阻传感器也有了更大的应用空间。近十几年来,以微电子和微机械加工技术为基础,研制成功各种微型传感器。由于半导体应变片工艺与集成电路工艺互相兼容,使半导体传感器的小型化、集成化以及智能化成为现实。但是,由于半导体应变片受温度影响比较大,因此,除了某些特殊情况下用于测量结构应变外,一般都用于制作各种力学量传感器。

1966年,出现了采用阴极溅射技术制成的金属薄膜应变片,由于制成元件之间应用氧化铝或氧化硅等无机物作绝缘层,没有胶黏剂等有机物层,所以其蠕变、滞后小到可以忽略的程度。而且,这类应变片具有良好的温度稳定性和较高的应变灵敏系数,因而常用于高温条件下的应力测量和制作各种传感器。

薄膜应变片除了利用真空蒸涂和溅射工艺制作金属和合金薄膜外,20世纪70年代以来,还利用化学淀积和等离子气相淀积等方法制作单晶硅、多晶硅及微晶硅等半导体薄膜应变片,使传感器的使用部门有了更大的选择余地。

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。它首先是由意大利FIA公司为研究控制发动机燃烧时压力的测量而开发的,于1982年在美国取得专利。该类应变片具有较高的灵敏系数,并且具有价格低、产量高、适用范围广等特点。

1.2 高温电阻应变片种类

高温应变电测技术是与20世纪40年代美、英等国为发展航空、火箭、原子

能、汽轮机以及石油化工等工业而发展起来的。然而,各种常温应变片及其应用技术的发展,为高温应变片研究和高温应变测量技术的进展提供了良好的基础。1944年,夏伯铁克用自制高温应变片进行高温下应变测量以来,无论在高温电阻应变片的研究,还是高温环境下的应变测试技术,都引起了人们的重视。1957年12月,由美国海军航空材料中心飞行结构实验室主持召开了一次全国性的高温应变片会议,并出版了论文集,这对促进高温应变片及高温应变测量技术的研究,起了很好的推动作用。从组成高温电阻应变片的基本材料(应变电阻合金及高温胶黏剂)研究出发,研制成高温丝(或箔式)、薄膜型以及厚膜型各种不同形态的高温应变片。特别是在20世纪90年代—21世纪初,适用于各种不同温度范围的各种高温应变片产品市场化、规范化程度更高,出现了各种品质比较稳定的典型产品,如粘贴式、焊接式及喷涂式高温应变片等,并且制造部门在产品使用方面可给予用户更多、更具体的技术支持,使高温应变片的使用成功率及高温应变测量的成功率都有相应的提高。

目前,高温电阻应变片的种类很多,若按其敏感栅材料的形式,可分为丝式高温应变片、箔式高温应变片、薄膜式高温应变片及厚膜式高温应变片;若按其基底材料种类,可分为胶膜基底(如聚酰亚胺膜)、玻璃纤维增强基底、石棉基底、金属基底及临时基底(国外常称为自由丝应变片)等;若按应变片的安装方式,则可分为粘贴式、焊接式及陶瓷喷涂式等。下面就各类高温应变片的结构特点与其使用温度范围等加以简要说明。

1. 粘贴式高温电阻应变片

所谓粘贴式高温应变片,它是借助于各种高温胶黏剂把应变片直接粘贴在试验结构或部件上,用以测量结构或部件的变形。粘贴式高温电阻应变片的基本结构形式如图1-2所示,就其基底的形式有胶膜基底(酚醛基底、环氧—酚醛基底及聚酰亚胺基底等)、玻璃纤维增强型基底和临时基底(也称自由丝片)(图1-2(c));就其敏感栅材料而言,有丝式片、箔式片之分(图1-2(a)、(b))。应变片的最高使用温度主要取决于敏感栅材料或基底材料或贴片胶。目前粘贴式高温应变片主要是以由卡玛箔或伊文箔制成的箔式应变片;基底常用玻璃纤维增强基底或聚酰亚胺基底,一般使用温度为200℃其最高使用温度为250℃。由玻璃纤维浸有机硅胶为基底的卡玛丝制成的高温应变片,最高使用温度可达350~400℃。更应指出的是,此类应变片都采用卡玛合金制成的,其温度特性可由热处理温度和时间来调节的,因而由此制成的各种自补偿高温应变片,自补偿程度高,温度特性好,并且使用操作简便,测量精度高。

2. 焊接式高温电阻应变片

也称金属基底应变片,它是把栅丝或箔栅直接制作在金属基底上,使用时

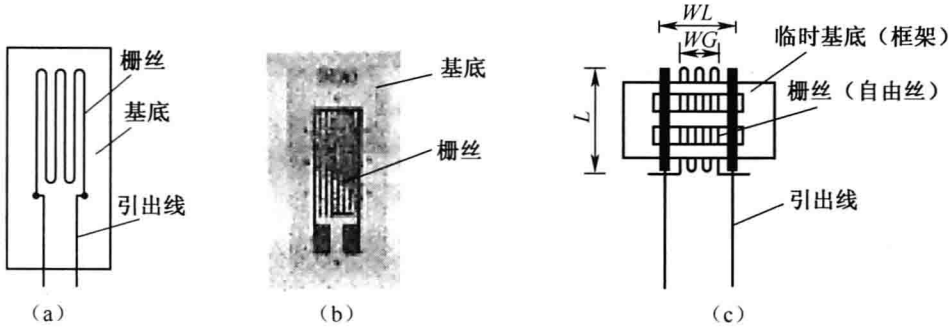


图 1-2 粘贴式高温电阻应变片

(a) 丝式片; (b) 箔式片; (c) 自由丝式应变片(临时基底)。

把金属基底用小型储能点焊机直接焊接在试验结构或部件上,由此来进行应变测量的,其基本结构形式如图 1-3 所示。金属基底通常采用厚度为 0.14mm 的卡玛薄板或不锈钢薄板,其基本形式有薄板型与网格薄板型两种。网格基底可焊接安装也可用胶黏剂粘贴安装;另外一种形式是所谓的膜盒型高温焊接式应变片也称管式高温应变片(图 1-3(e)),它是把敏感栅丝置于不锈钢管内,用氧化镁粉末填充绝缘,有单元件和双元件(半桥式)两种形式。

通常,粘贴式高温应变片当用胶黏剂粘贴在试验部件上后,胶黏剂必须经受高温固化或后固化处理。但在应用中,由于结构部件尺寸的限制,没有相应的加热设备,不能进行高温处理。或某些试件或部件材料根本不允许进行高温处理,或不能超过使用温度进行稳定化处理等。种种的条件限制,不能很好实现胶黏剂固化条件的要求,从而,不能使胶黏剂充分固化,使应变片的性能随温度循环的影响很大,温度特性的分散度加大。而焊接式应变片可以在应变片未安装之前,预先对胶黏剂进行固化和后固化处理,使应变片和胶黏剂性能完全稳定。但是,焊接式应变片的缺点是,一般只适用于钢及不锈钢试件材料,另外由于使用金属基底,焊接以后对试验部件有局部的加强效应。因而,不适用于各种薄壁结构或部件的应力测量。

焊接式应变片的最高使用温度,主要是由栅丝和胶黏剂及结构形式决定的。通常由有机胶和卡玛丝(或箔)制成的焊接式应变片,最高使用温度为 200~250℃;由带填料的有机硅胶黏剂制成的焊接式应变片,最高使用温度为 350~400℃;对于膜盒式(也称胶囊型)焊接式应变片,最高使用温度取决于栅丝材料,镍铬及镍铬改良型合金的应变片,其最高使用温度为 350~400℃;铁铬铝合金制的应变片,最高使用温度为 600~700℃;由铂钨合金制成的应变片,其最高使用温度为 800~1000℃。目前,膜盒型双元件(半桥式)焊接式高温片,测量精度比较高,应用也较广。