

# 点焊薄片应变传感器的数值分析与实验研究

徐永君<sup>1</sup>, 唐俊武<sup>2</sup>, 赵清清<sup>1</sup>, 王晓博<sup>1</sup>

(1.中国科学院力学研究所工程科学部,北京 100190 2.北京科技大学,北京 100083)

**摘要:**工程实际中,许多现场环境不适合应变片的粘贴、密封、养护以及工期要求等,需要将应变片粘贴、养护及密封工作提前到实验室进行。点焊薄片应变传感器能够保证焊接过程中不产生引起应变片损坏的热量。通过对电阻点焊和氩弧点焊两种薄片应变传感器进行试验研究和数值分析,证明了点焊薄片应变传感器具有很好的传递性能和疲劳性能,可以应用于复杂环境情况下的应变测量。

**关键词:**应变传感器;点焊;传递性能

中图分类号:TP212.1;TM930.114

文献标识码:A

文章编号:1674-5124(2009)01-0090-04

## Experimental studies and numerical analyses on spot welding flake strain sensors

XU Yong-jun<sup>1</sup>, TANG Jun-wu<sup>2</sup>, ZHAO Qing-qing<sup>1</sup>, WANG Xiao-bo<sup>1</sup>

(1.Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2.Beijing University of Science & Technology, Beijing 100083, China)

**Abstract:** For the disadvantage of adhering the strain gauge in practice, it is difficult for the gauges in adhering, curing and post curing, as well as the brevity of time limit for a project. Some pre-works, such as adhering, curing and post curing, and some primary seal, can be brought into laboratory with flake strain gauge/sensor technology. Then, it is only needed to weld the flake to the matrix in the field. Spot welding, TIG (Tungsten Inert Gas arc) and electrical resistance spot welding can transfer the stress with a certain scale very well, meanwhile, there is not any damage on the strain gauges. In this paper, a series of experimental studies were carried out and the FEM (Finite Element Method) calculation was carried out on the so-called spot welding flake strain sensors jointed on a matrix. All these investigations will provide a theoretical basis for the practical applications of these kinds of slice sensor.

**Key words:** Strain sensor; Spot welds; Stress transfer performance

## 1 引言

利用应变片进行应力、应变测量是一种传统的电测技术,是许多传感器的基础<sup>[1]</sup>。长期以来,得到工程实际中的广泛应用。对于许多工程实际中的应变测量,现场环境可能不适合应变片的养护、需要密封而造成打磨、粘贴困难以及工期要求比较紧而无法直接在现场粘贴养护,给应变片的粘贴等工作带来比较大的困难,特别是在潮湿环境、高温环境、海洋工程等需要进行特殊处理。如水下结构应力应变测量<sup>[2]</sup>,应变片的密封一直都是一个难点,特别是深水高压情况下,压力大,密封难。主要难点是两个部位的密封,一是密封装置与母材之间的密封;二是

密封体向外引线的密封防护。在密封两大难点解决之后,对于实际操作而言,同样有两个难点,第一是如何作好密封盒内的预保护,特别是预保护密封盒内的填塞胶的选择<sup>[3-4]</sup>;第二是应变片的粘贴技术,由于应变片粘贴过程中操作空间等限制,工作效率特别低,并且直接粘贴养护非常困难且要求操作人员技术高、责任心强、细心等。本文为了能够将应变片粘贴工作搬进实验室,进行了一系列薄片应变传感器试验研究工作。在实验室内将应变片粘贴在一个尺寸合适的薄钢片上,到现场利用氩弧点焊技术焊接在母材上(保证焊接过程中不产生能引起应变片损坏的热量)<sup>[5]</sup>。需要进行深入研究的是尺寸、焊接方式、传递函数,特别是压应变的传递函数及其预压应变后对测量的影响、疲劳环境中的耐久性及其传递性能与工作时间的变化关系等。文献[6]和文献[7]分别对电阻点焊和氩弧点焊薄片应变传感

收稿日期:2008-09-06;收到修改稿日期:2008-10-09

作者简介:徐永君(1964-),男,河北蔚县人,副研究员,博士后,主要从事海洋工程、疲劳断裂、结构力学、计算力学及实验力学等研究工作。

器技术的传递性能和疲劳性能进行了研究,文献[8]利用有限元对点焊薄片应变传感器进行了模拟研究,给出了 ANSYS 中点焊单元模拟下的应力传递函数。基于文献[6-8]的试验和数值分析结果,本文对电阻点焊和氩弧点焊薄片应变传感器技术的传递性能和疲劳性能进行了比较,并对试验结果与数值分析结果进行了比较研究,为薄片传感器的选取及实际应用提供了实验和理论依据。

### 2 试验设计

如图 1 所示,将应变片先粘贴在薄钢片上并养护制作成薄片应变传感器,薄片应变传感器点焊在被测母体上,再进行整体密封防水保护。

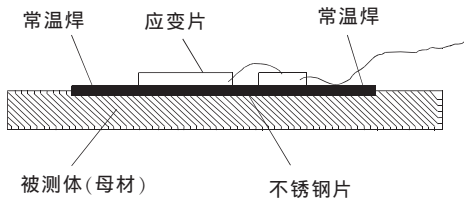
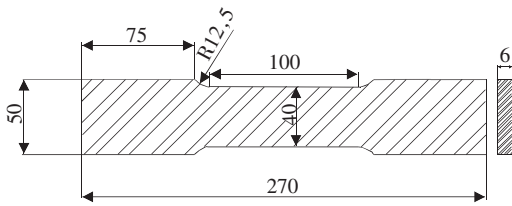
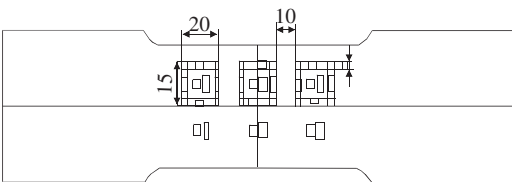


图 1 薄片应变传感器示意图



(a) 试验用试件形状及尺寸



(b) 薄片应变传感器焊接示意图及尺寸

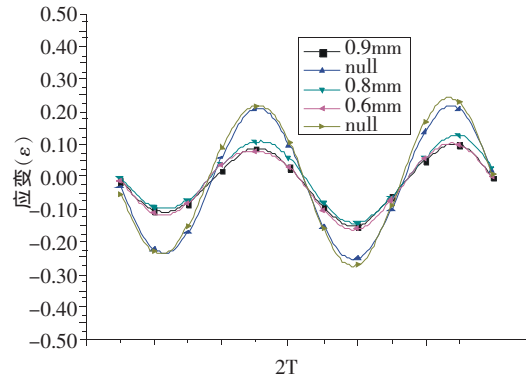
图 2 薄片应变传感器试样设计图

### 3 试验方案(根据某被测平台设计)

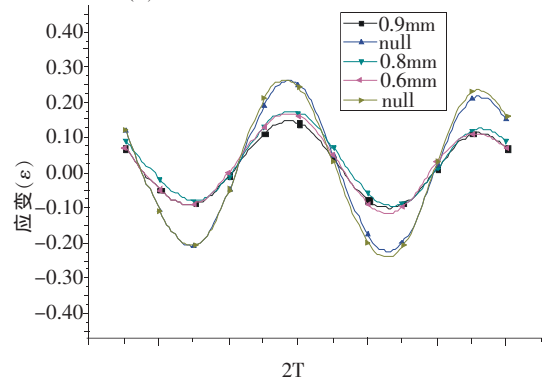
- (a) 对比不同厚度的不锈钢片 0.6 mm、0.8 mm、0.9 mm,正反对称贴。钢片尺寸为 20 mm×15 mm。
- (b) 静载试验:  $-600 \mu\epsilon \sim 600 \mu\epsilon$  (30.24 kN)。
- (c) 疲劳试验:采用正弦波加载,应力水平:  $-370 \mu\epsilon$  (18.65 kN),幅值  $250 \mu\epsilon$  (12.6 kN)。
- (d) 根据某被测海平台所处海域 5 年寿命疲劳试验设计,疲劳次数  $2.3e7$  次。
- (e) 将试件拉压到  $\pm 30$  kN 两次,并记录应变测量值,回到 0 应力状态。拉到 30 kN 开始试验,每减 10 kN 记录一次直到  $-30$  kN(两次)。

### 4 试验数据分析

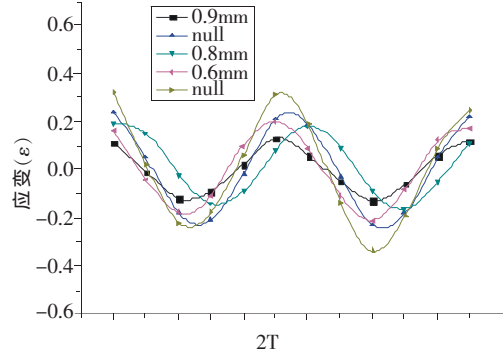
图 3 为试验中间采样结果中的 2 个完整波形。实验结果显示,两种点焊薄片应变传感器进行了  $2.3e7$  次,可以满足疲劳时间要求。



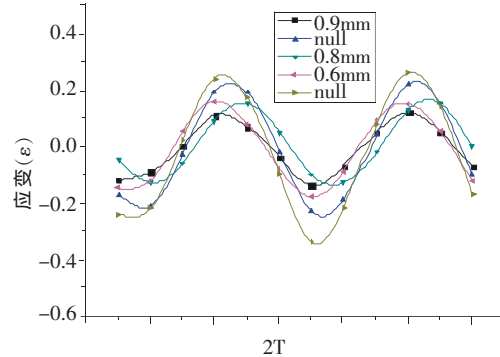
(a) 氩弧点焊疲劳试验 64 万次时采样



(b) 氩弧点焊疲劳试验 1281.6 万次时采样



(c) 电阻点焊疲劳试验 64 万次采样

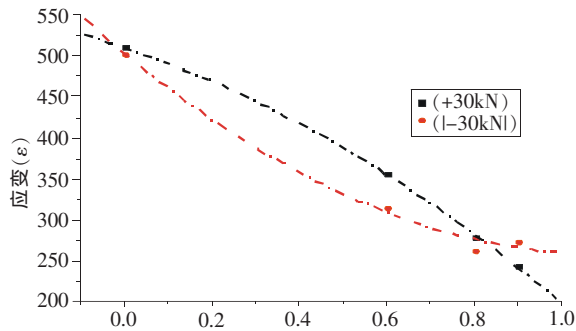


(d) 电阻点焊疲劳试验 961.2 万次采样

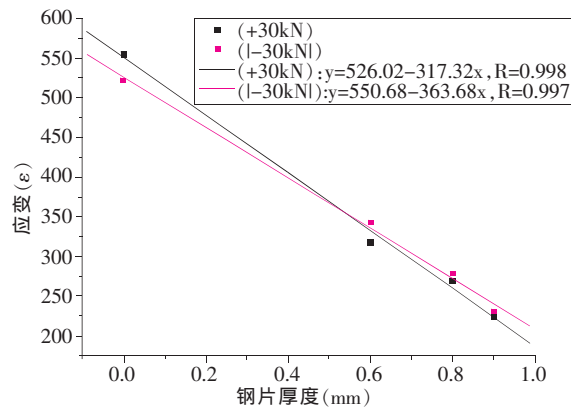
图 3 疲劳试验动态采样

表1 静态传递系数统计结果(2.0×1.5)

P(kN)	氩弧点焊			电阻点焊		
30	0.659 62	0.531 92	0.490 57	0.564 56	0.477 29	0.402 49
20	0.654 25	0.532 27	0.463 27	0.551 18	0.472 44	0.398 95
10	0.645 73	0.488 28	0.459 7	0.502 51	0.447 24	0.376 88
-10	0.777 83	0.6	0.745 44	0.845 66	0.643 09	0.501 61
-20	0.698 38	0.557 17	0.635 23	0.711 08	0.568 86	0.455 09
-30	0.664 98	0.540 67	0.605 24	0.663 12	0.534 37	0.445 3



(a) 氩弧点焊(20×15, ±30kN)



(b) 电阻点焊(20×15, ±30kN)

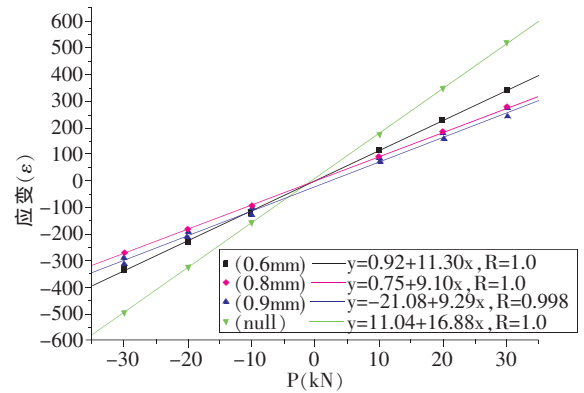
图4 静态拉压应变与钢片厚度的传递关系

从实验结果中可以看出：

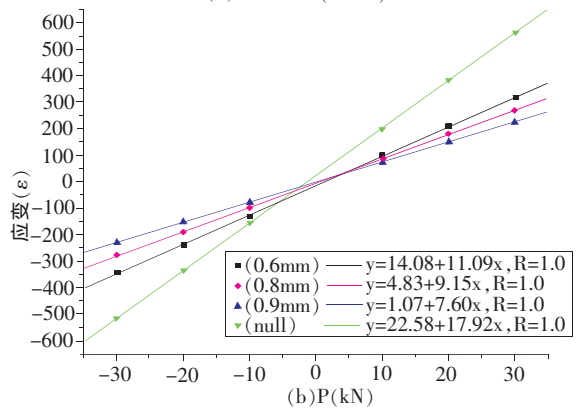
- (a)两种焊接方式均能满足时间要求；
- (b)氩弧点焊的动态结果比较好；
- (c)氩弧点焊的传递系数略大于脉冲点焊的传递系数；
- (d)脉冲点焊测量结果与薄片厚度的线性关系好于氩弧点焊。

### 5 数值分析

如图6所示,为1/4试件有限元模型,中间为薄片应变传感器。在处理薄钢片与母体的焊接关系时,利用了ANSYS软件10.0版本新增加的spot welds单元,非常简便地解决了它们之间的连接关系,并且使得考虑焊点大小和数量对结果的影响成为可能。点焊单元可以随便地放置在任何要连接的位置,而不考虑网格的形状和节点的位置。



(a) 氩弧点焊(20×15)



(b) P(kN)

图5 静态拉压的力-应变关系

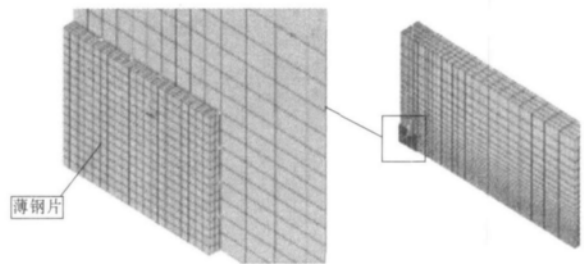


图6 有限元计算模型

对长边点焊数的数值分析结果显示,长边点焊数几乎不影响传递性能。

文献[8]给出了保证点焊个数和质量前提下传递系数的计算公式：

$$S_f = 1.127 \ 9 - 0.257 \ 5h - 0.348\delta \quad (1)$$

其中  $h$  为薄片厚度  $0.1 \text{ mm} \leq h \leq 1 \text{ mm}$   $\delta$  为间隙,  $0.025 \text{ mm} \leq \delta \leq 0.4 \text{ mm}$ 。根据试验统计结果比较,实际应用中最好乘一系数  $k=0.9\sim 0.95$ 。

数值分析结果显示：

- (a)薄片厚度选取 0.4 mm 时较为接近实际值；
- (b)应保证薄片与母体间隙尽量小,避免焊接过程中的变形产生间隙；
- (c)只要保证点焊的密度和强度,使用这种方

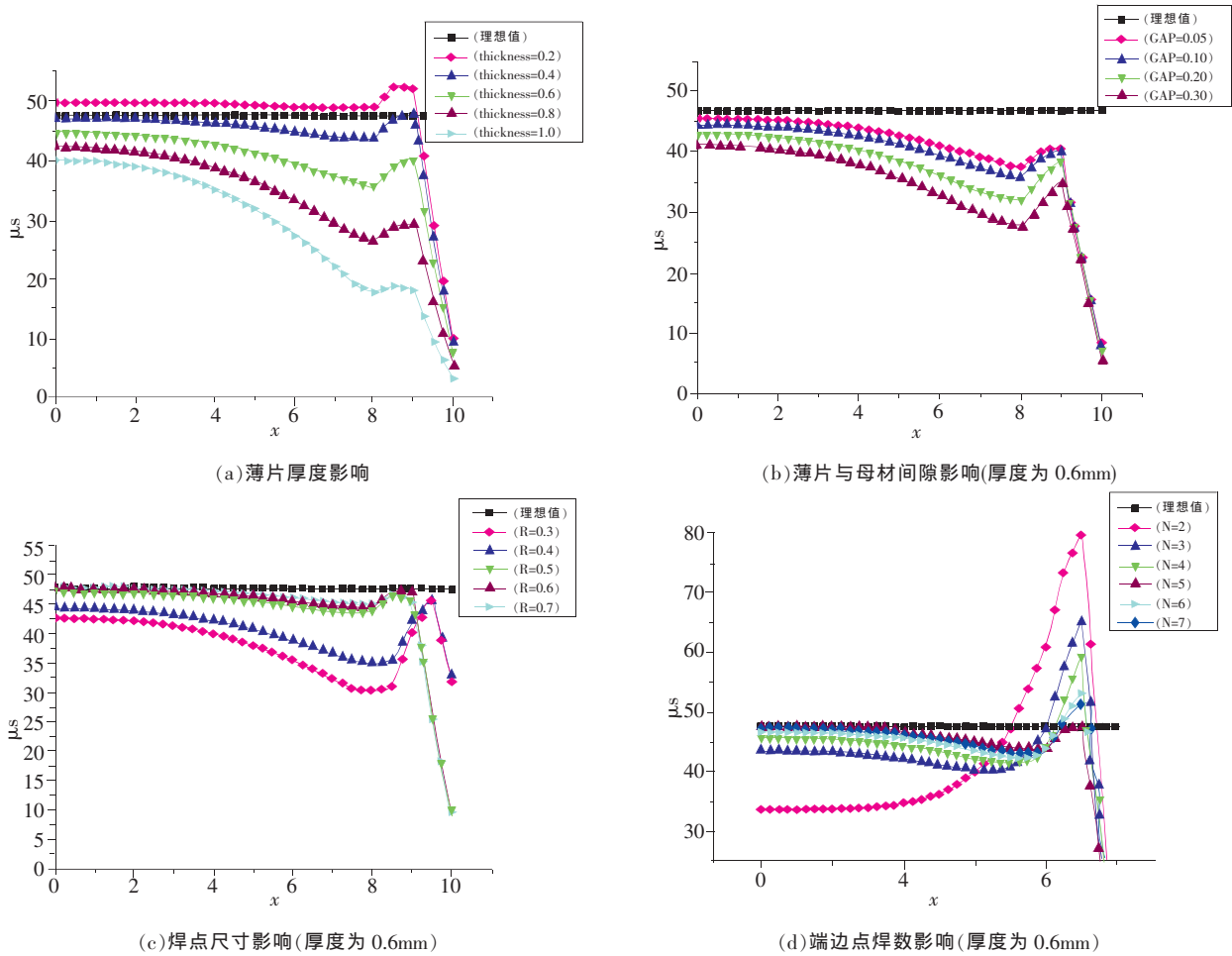


图 7 Y=0 微应变随 X 坐标的变化曲线

法测得的应变值是可以用于实际工程现场应变测量。

### 6 结束语

试验研究和数值分析结果表明,两种点焊薄片应变传感器都具有应用与生产实际工程中的潜力,能够满足实际测量的疲劳性能要求。氩弧点焊薄片应变传感器动态性能好,电阻点焊静态性能好。实际应用中传递系数应根据实验统计结果确定。

#### 参考文献

[1] Window A L, Holister G S. Strain gauge technology[M]. Applied Science Publishers, London & Newjersey, 1982.  
 [2] 柳春图, 王维明. 海洋石油平台结构的安全性监测与评估技术的若干进展[C]. 现代力学与科技进步, 1997(8): 397-400.

[3] Blance M J, Crohas H. Pressio-detection for permanent jacket structure monitoring [C]. (OTC 5043), 17<sup>th</sup> annual offshore technology conference, Texas, may, 1985: 207-210.  
 [4] 穆荣, 顾特真. 应变片防护剂的选用和测试[J]. 粘接, 2002, 23(4): 38-39.  
 [5] 武传松, 陈定华, 吴林. 钨极氩弧点焊熔池中流体流动及传热过程的数值模拟 [J]. 金属科学与工艺, 1989, 8(1): 98-103.  
 [6] 徐永君. 电阻点焊薄片应变传感器传递及疲劳性能试验研究[J]. 冶金分析, 2006, 26(a): 56-59.  
 [7] 徐永君. 氩弧点焊薄片应变传感器性能实验研究[J]. 力学与实践, 2008, 30(4): 47-49.  
 [8] Xu Y J, Tang J, Zhan S. Numerical analysis on the mechanics characteristic of spot-welding-flake-strain-sensor[J]. IACTM 2008, Adelaide, Australia.