

文章编号: 1001-4888(2024)03-0278-09

法向压力影响电阻应变片测量结果的机制研究*

杜振兴, 周士潮, 马少鹏

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

摘要: 电阻应变片因具有可靠性高、测量成本低的特点而被广泛应用于工程装备变形测量领域。传统的测量场景中, 应变片粘贴于构件自由表面, 仅传递切向变形而不承受法向压力, 现有应变片测量理论均基于此种情况推导建立。在一些特殊的测量场景中, 如深海装备的应变测量, 或者基于嵌入式应变片(如将应变片与复合材料一体化成型后嵌入构件内部)的应变测量等情况, 应变片同时承受切向变形和法向压力作用, 法向压力会导致应变片测量结果与常规场景不同。为此, 需要研究法向压力对应变片测量的影响规律, 厘清其影响机制, 以保障这些特殊情况下测量结果的有效性。本文实验研究了不同加载历程法向压力对应变片测量结果的影响, 并结合力学仿真方法分析了影响的机制。实验结果和分析表明: 法向压力对应变片测量结果存在明显的影响; 对于当代制备工艺生产的应变片, 其影响是被测物构件的泊松效应和力学边界条件综合作用的结果, 即应变片测得的结果是该点在泊松效应和力学边界条件综合作用下的真实应变。

关键词: 应变测量; 电阻应变片; 法向压力; 泊松效应; 边界条件

中图分类号: TB22 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-23-263

0 引言

基于电阻应变片的应变测量技术是一种测量精度高、工程应用广泛的变形测量手段^[1]。该技术通过贴在被测物表面的电阻应变片(下文简称应变片)感知被测物沿应变片电阻丝轴线方向的变形, 基于电阻应变效应, 以电阻值变化来反映待测点位的应变情况^[2]。绝大多数情况下, 因粘贴于被测物表面, 应变片不承受压应力, 现有的测量理论和数据分析方法均基于此种情况推导和设计^[3-4]。但是, 在一些特殊的实际工程应用^[5-6]中, 如深海潜水器观察窗应变测量^[7-8]、基于嵌入式应变片(将应变片与复合材料一体化成型后嵌入构件内部)的复材构件应变测量^[9-10]、超高压容器内壁应变测量^[11]等场景, 应变片在测试过程中除承受轴向载荷外, 还会经面外法向压力作用, 此种情况下应变片的输出结果与常规的无正压力情况有明显的区别^[12]。由于缺乏对影响机制的正确认识, 工程上处理数据时, 一方面感到困惑, 对数据做出不合理的解释; 另一方面, 经常粗暴地采用对测量结果乘以系数等手段加以修正。为了解决这一难题, 需要深入研究法向压力对应变片测量结果的影响规律, 并弄清其影响机制。

针对法向压力影响电阻应变片测量结果的问题, 目前已有相关文献。吴云华等^[13]在超高压容器电测实验中发现, 超高压下纸基应变片的测量值与理论应变值存在着不可忽略的测量偏差。MILLIGAN^[14-16]实验发现箔式应变片的指示应变与所承受的压力具有线性响应规律, 法向压力越大, 指示应变越大。他们还进一步分析了法向压力影响应变测量的机制, 发现指示应变大小与试件材料性质相关。

* 收稿日期: 2023-12-08; 修回日期: 2024-02-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(12102257); 上海交通大学深蓝计划(SL2022ZD101); 电子元器件可靠性物理及其应用技术重点实验室开放基金项目(ZHD202104)

通信作者: 马少鹏(1974-), 男, 博士, 教授。主要研究领域: 实验力学及其应用。Email: mashaopeng@sjtu.edu.cn

另有一些学者^[17-19]通过研究指出在高压环境下,除了压力导致的结构变形引起应变片电阻值变化外,还存在法向压力对应变片基底和敏感栅的附加作用引起的电阻值改变,即“压力效应”,这同样也可导致指示应变增大,继而还提出了一些针对处于高压环境下的电阻应变测量修正的理论计算公式。而对于工程中更多数的低压环境下的电阻应变测量是否存在类似的影响机制,有待深入研究。除此之外,自应变片出现以来,其制备工艺一直在发展和改进,前述一些研究分别是针对当时制备工艺下的应变片而开展的,其实验数据和规律是否还适用于当前制备工艺下的应变片,有待进一步研究。综上,研究法向压力对当前主流工艺制备应变片测量的影响规律及影响机制非常必要,对于一些特殊工程中准确评估结构装备的力学性能至关重要。

本文通过法向压力下的电阻应变测量实验,获得了不同加载历程下法向压力影响应变测量的实验数据,归纳了法向压力对应变片变形测量的影响规律。同时,开展了新/旧工艺应变片、有/无法向压力、不同边界条件(自由、固支)试验件的应变测量对比实验,并结合理论和模拟结果,分析了应变测量影响规律产生的原因,给出了法向压力对电阻应变测量的影响机制。本研究可为复杂法向压力载荷下应变测量结果的可解释性提供了实验和理论参考。

1 法向压力下的电阻应变测量实验研究

1.1 实验布置

考虑法向压力的电阻应变测量实验布置如图1所示。在一个标定部分为 $50\text{mm}\times 5\text{mm}\times 5\text{mm}$ 的聚碳酸酯(PC)标准拉伸试件侧面贴1枚箔式电阻应变片(型号:BFH120-3AA-D150,应变片基底尺寸 $6.9\text{mm}\times 3.9\text{mm}$,丝栅尺寸 $3.0\text{mm}\times 2.0\text{mm}$),利用原位双轴力学试验机(IPBF-500,下文称试验机)对试件施加拉伸载荷(x 轴加载)、压缩载荷(y 轴加载),以满足单轴拉伸、单轴压缩和双轴拉压等多种载荷加载历程。在加载过程中,利用DEWESOFT应变采集仪以 20Hz 的采样频率对应变片的应变值进行记录。

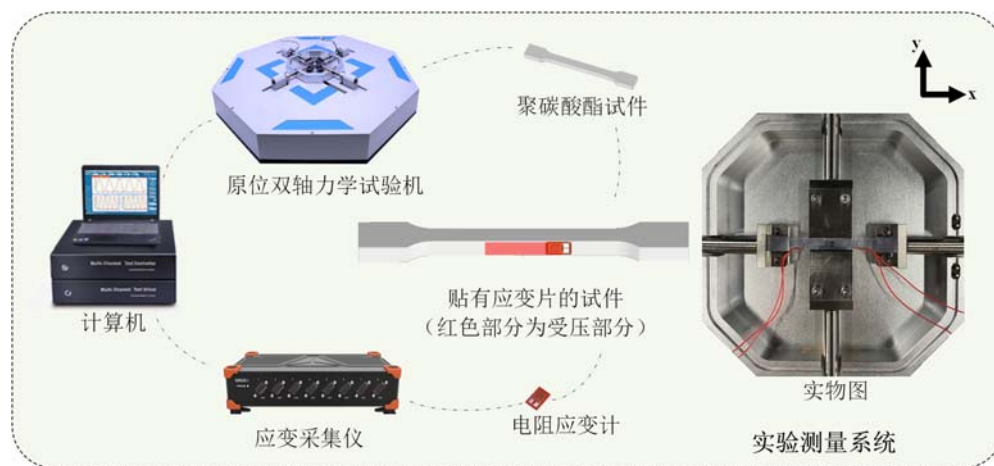


图1 实验测量系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental measurement system

实验布置中的注意事项如下:(1)为避免局部应力过大对应变片造成破坏,使压力均匀分布在应变片的表面,在压缩夹具的前端面贴 $30\text{mm}\times 10\text{mm}\times 0.5\text{mm}$ 的软橡胶(试件的法向受压面积为 $30\text{mm}\times 5\text{mm}$)。(2)为避免应变片焊点处电阻值对实验结果的影响,应变片仅敏感栅部位承受压力载荷。(3)试验机和数据采集仪需提前打开、预热,保证无载荷作用下应变测量结果稳定。(4)为保证试件的中心轴线与试验机 x 轴方向的力轴重合,避免 y 轴方向的某一侧压缩夹具先接触到试件而造成压弯现象,采用先 y 轴预加载再固定 x 轴夹具的方式。(5)为了消除试件和拉伸夹具的间隙,试件固定后在 x 轴方向进行3次以上循环加卸载,并保证最大载荷不能使试件发生塑性变形。文中所有实验均在试件的弹性阶段内进行。

1.2 法向压力对电阻应变测量影响的验证实验研究

采用单轴压缩(仅 y 轴加载, x 轴方向为自由边界条件)应变片的实验,来验证法向压力对电阻应变测量的影响。实验具体实施方案为:(1)将试件放置在试验机上,设置试验机 y 轴压缩载荷为 1N,以避免夹具突然接触应变片引起测量值突变。(2)试验机 y 轴加载速度为 4N/s,加载至 400N。(3)加载过程中同步记录工作应变片测量数据。(4)重复进行 3 组实验。实验结果如图 2 所示,应变片的测量值会随着法向压应力的增加而逐渐增大,两者大致呈线性关系,当达到峰值压应力 2.67MPa 时,3 组实验的应变片平均测量值为 $282\mu\epsilon$ 。实验结果表明,法向压力会对应变片的面内变形测量产生影响。

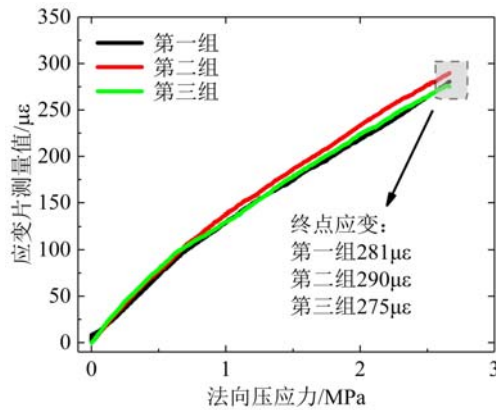


图 2 法向压力对电阻应变测量影响的实验结果

Fig. 2 Experimental results of influence of normal pressure on resistance strain measurement

1.3 法向压力加载历程对电阻应变测量影响规律的实验研究

采用对照组和实验组,系统研究法向压力加载历程对电阻应变测量的影响规律。其中,对照组设置为单轴拉伸(x 轴加载),以研究未受法向压力下的应变测量结果;实验组设置为拉压不同次序加载、不同分段加载的系列实验,以研究法向压力下的电阻应变测量结果。对照组:试验机 x 轴加载速度为 1N/s,加载至 100N,重复进行 3 组实验。对照组工作应变片的应变信息如图 3 所示,应变片测量值随着拉力(面内切向载荷)的增加而线性增长,当拉力为 100N(对应的拉应力为 4MPa)时,3 组实验的应变测量值分别为 $1310\mu\epsilon$ 、 $1295\mu\epsilon$ 、 $1296\mu\epsilon$,平均应变约为 $1300\mu\epsilon$ 。

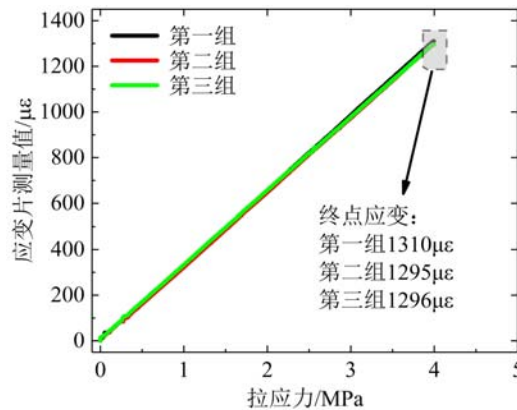


图 3 对照组的实验结果

Fig. 3 Experimental results of the control group

实验组分为拉压不同加载次序和拉压不同分段加载两类。拉压不同加载次序实验设置为:(1)同时加载轴向拉力与法向压力。(2)先加载轴向拉力,后加载法向压力。(3)先加载法向压力,后加载轴向拉力,具体加载设置见表 1。不同加载次序下的工作应变片测量结果如图 4 所示。“同时拉压”时,应变片测量值随拉压载荷的增长而增大,应变值与载荷呈线性增长关系,当拉力和压力达到最大载荷时,终点应变为 $1521\mu\epsilon$;“先拉后压”时,应变片测量值先随着拉力的增加而线性增长至 $1300\mu\epsilon$ 左右,之后在法

向压力的作用下,应变片测量值继续增大,当压力达到最大载荷时,最终测量值为 $1510\mu\epsilon$;"先压后拉"时,应变片测量值先随法向压力的增加而增大,当压力达到 400N 时,应变片测量值增大至约 $210\mu\epsilon$,之后在拉力作用下,应变片测量值增长至 $1490\mu\epsilon$ 。由实验结果可知,在考虑上述 3 个实验测量误差的情况下,拉压不同载荷加载次序对最终的应变片测量结果无影响。

表 1 拉压不同加载次序的具体方案

Tab.1 The concrete scheme of different loading order of tension and pressure

实验名称	加载速度	加载阶段内容
同时拉压		同时轴向拉力 100N ,法向压力 400N
先拉后压	轴向拉力 1N/s	先轴向拉力 100N ,再法向压力 400N
先压后拉	法向压力 4N/s	先法向压力 400N ,再轴向拉力 100N

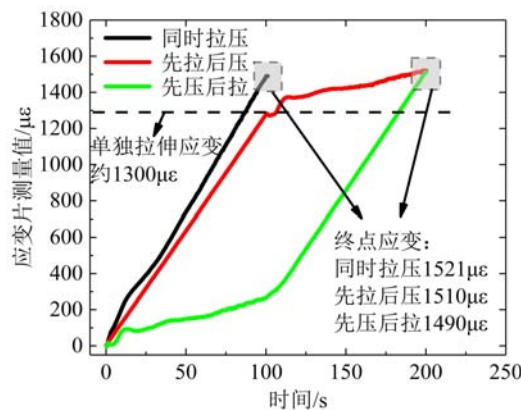


图 4 不同次序加载的实验结果对比

Fig. 4 Comparison of experimental results of different order of loading

在保证初始和终止加载载荷相同的情况下,将一次拉力和一次法向压力作为一个加载阶段,本文进一步开展了拉压不同分段加载下的应变片测量实验研究。不同分段加载的实验设置见表 2。不同分段加载下,工作应变片的应变测量结果如图 5 所示,在一个分段内,应变片测量值与图 4 中的“先拉后压”应变曲线类似,在整个实验过程中,拉力和压力引起的应变变化交替出现。同时,3 个实验的最终应变测量值分别为 $1507\mu\epsilon$ 、 $1483\mu\epsilon$ 、 $1456\mu\epsilon$,与上述拉压不同加载次序时的最终应变值相近。

表 2 拉压不同分段加载的具体方案

Tab.2 The concrete scheme of different section loading of tension and pressure

实验名称	加载速度	单个加载阶段内容
2 分段		轴向拉力 50N ,法向压力 200N
5 分段	轴向拉力 1N/s	轴向拉力 25N ,法向压力 100N
10 分段	法向压力 4N/s	轴向拉力 10N ,法向压力 40N

综上所述,从对照组和实验组的对比中可以发现,相较于仅有拉力载荷的应变测量结果,不同加载历程的法向压力都会导致应变片测量值增大,该增加量与法向压力的大小有关,法向压力越大,增加量越大。同时,在初始和终止法向压力载荷相同的情况下,不同的法向压力加载历程不影响最终的应变测量结果。

2 法向压力对电阻应变测量影响机制研究

2.1 影响机制分析

根据第 1 节实验现象可知,法向压力对应变片测量值存在影响。结合前人研究^[17-19],这种影响可能是两部分因素造成的,一部分是法向压力使试件发生变形,从而引起应变片电阻值变化;另一部分是

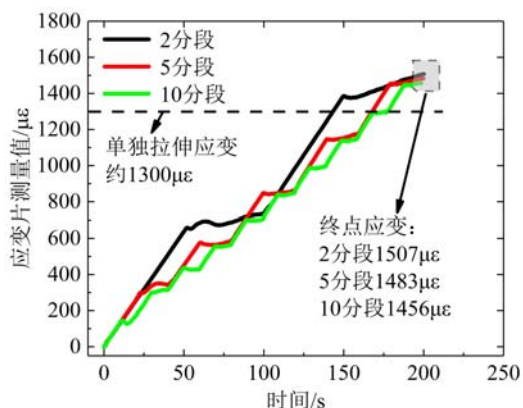


图5 不同分段加载的实验结果对比

Fig. 5 Comparison of experimental results with different segmental loading

法向压力对敏感栅电阻丝的附加作用,引起电阻值变化(称为应变片“压力效应”)。由此可知,“压力效应”引起的应变片电阻值变化为误差项,需要考虑校正。实际上,“压力效应”与应变片制备工艺相关,如本文所用应变片型号为BFH120-3AA-D15,其关键制备工艺是光刻(图形转印)工艺技术,即对金属箔材进行光刻形成敏感栅。目前的应变片制备全部采用光刻工艺,旧式应变片采用电阻丝铺设工艺制备,两种工艺方式有较大差异。相关文献^[17-19]提到的“压力效应”对测量的影响机制均针对旧式工艺制备的应变片,对于当前工艺制备的应变片是否适用,尚需系统研究。

为了尽可能排除法向受压试件的变形对“压力效应”研究的干扰,本文选用弹性模量较大(弹性模量为300GPa~400GPa)的氧化铝陶瓷试件为被测物,来研究法向压力下新旧应变片测量响应。选用目前市场主流的新式应变片(型号:BFH120-3AA-D150)和旧式应变片(型号:2.8×15纸基应变片,1979年2月出厂,华东电子仪器厂)为研究对象,采用图1实验系统,对贴在氧化铝陶瓷试件表面的新旧应变片施加法向压力,设置加载速度为4N/s,加载至400N。实验结果如图6所示,新式应变片测量值基本在小范围内波动,最终示数为2.6με;旧式应变片测量值发生明显增长,最终示数为14.1με。根据广义胡克定律^[20],氧化铝陶瓷本身在法向受压下会产生轴向变形,可表述为

$$\epsilon_x = \frac{1}{E}[\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)] \quad (1)$$

式中: σ_x 、 σ_y 、 σ_z 分别为x、y、z方向的应力; ϵ_x 为x方向的应变;E为弹性模量; μ 为泊松比。其中 $\sigma_x=0$, $\sigma_y \approx -2.67\text{MPa}$, $\sigma_z=0$,根据式(1)计算可以得到 $\epsilon_x \approx 2\mu\epsilon$ 。

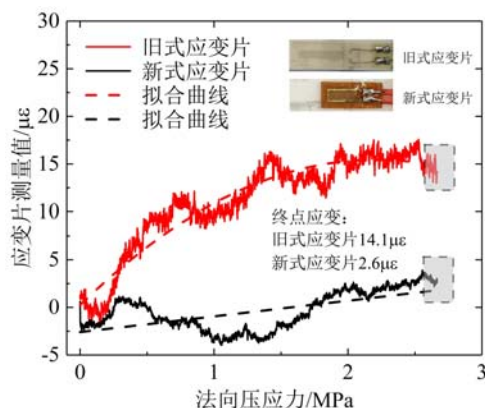


图6 新旧应变片的实验结果

Fig. 6 Experimental results of new and old strain gauges

经过计算可知,氧化铝陶瓷材料本身产生的轴向变形仅 $2\mu\epsilon$ 左右,其中旧式应变片测量值远大于 $2\mu\epsilon$,这表明旧式应变片除了感知材料变形外,还存在压力效应。而新式应变片测量值与材料本身发生的轴向应变值相近,表明新式应变片的压力效应可以忽略不计。因此,本文后续不再将“压力效应”作为

影响机制因素研究。

为进一步探究法向压力对新式电阻应变片测量的影响机制,在PC标准拉伸试件侧面贴2枚箔式电阻应变片,分别记为工作应变片 and 对比应变片,其中工作应变片法向表面受压,对比应变片法向表面不受压。依据实验情况,现将自由边界与固支边界下两者的结果进行对比,进一步讨论法向压力对电阻应变测量结果的影响机制。试件为自由边界时,工作应变片和对比应变片的测量结果如图7(a)所示,随着法向压应力逐渐增大,工作应变片测量值大致呈线性增长至 $290\mu\epsilon$,而对比应变片测量值仅仅增长至 $49\mu\epsilon$;试件为完全固支边界时,工作应变片和对比应变片的测量结果如图7(b)所示,随着法向压应力逐渐增大,工作应变片测量值大致呈线性增长至 $271\mu\epsilon$,而对比应变片测量值持续下降至 $-268\mu\epsilon$ 。实验结果表明,边界条件是影响法向压力下应变测量的重要因素之一。

进一步分析实验结果,当试件为自由边界时,试件的中心部分受压,由于材料的泊松效应,其轴线方向有微小的伸长变形。依据广义胡克定律, x 方向的应变由式(1)计算。由 $\sigma_x=0, \sigma_y \approx -2.67\text{MPa}, \sigma_z=0$,得到 $\epsilon_x \approx 295\mu\epsilon$ 。实验中工作应变片测量值达到了 $290\mu\epsilon$,两者的结果基本吻合。不受法向压力部分仅发生刚体位移而非变形,所以该情况下对比应变片的应变测量值理论上为0。对比应变片存在微小值是由于距离法向受压位置较近,受局部应力集中的影响所致。

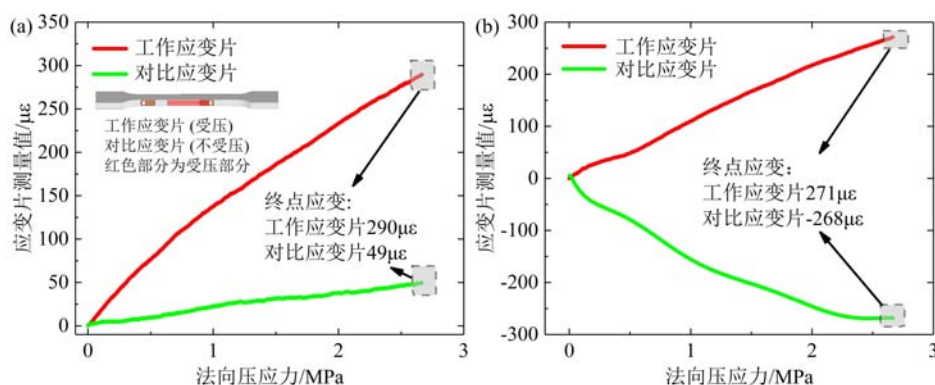


图7 实验结果:(a)自由边界;(b)固支边界

Fig. 7 Experimental results: (a) free boundary; (b) fixed boundary

当试件是完全固支边界时,试件的中心部分受压,由于材料的泊松效应,其轴线方向有微小的伸长变形,但因为其边界是固支的,(中心部分)会受到反作用力(即 $\sigma_x \neq 0$),依据式(1),其应变要小于自由边界的情况,不受法向压力部分由于两端固支会发生压缩变形。实验中工作应变片测量值为 $271\mu\epsilon$,小于自由边界测量结果,对比应变片测量值为 $-268\mu\epsilon$,印证了上述分析。

通过工作应变片和对比应变片的实验结果比较,并结合理论分析,发现法向压力导致应变片测量值的增加量恰好是试件受压部分沿轴线方向的应变,因此表明法向压力对应变片测量的影响是泊松效应和边界条件共同作用的结果。

2.2 影响机制验证

采用有限元分析方法对试件实际的受力状态进行仿真计算,并保证试件的边界条件与实验一致,以验证本文提出法向压力对应变测量的影响机制。本节将开展试件自由边界法向加压、完全固支法向加压2种状态的仿真分析。将试件中相应位置的应变结果绘制如图8所示,自由边界法向加压时,试件位置1(对应工作应变片的位置)的应变随着法向压应力的增加而增大,法向压应力为 2.67MPa 时,终点应变为 $305\mu\epsilon$,试件位置2(对应对比应变片的位置)的终点应变为 $53\mu\epsilon$;完全固支法向加压时,试件位置1的应变随着法向压应力的增加而增大,终点应变为 $261\mu\epsilon$,试件位置2的终点应变为 $-255\mu\epsilon$ 。仿真结果与实验得到的应变片测量值结果基本吻合,进一步证实了法向压力导致应变片测量值的增加量恰好是试件受压部分沿轴线方向的应变。综合实验、理论、模拟结果(表3),验证了法向压力载荷历程对电阻应变测量的影响机制归于材料的泊松效应和边界条件共同作用的结论。

表3 实验、理论和模拟的应变值汇总(单位: $\mu\epsilon$)
Tab.3 Summary of experimental, theoretical and simulated strain values(unit: $\mu\epsilon$)

	自由边界工况		固支边界工况	
	工作应变片 (试件位置 1)	对比应变片 (试件位置 2)	工作应变片 (试件位置 1)	对比应变片 (试件位置 2)
实验值	290	49	271	-268
模拟值	305	53	261	-255
理论值	295	—	<295	—

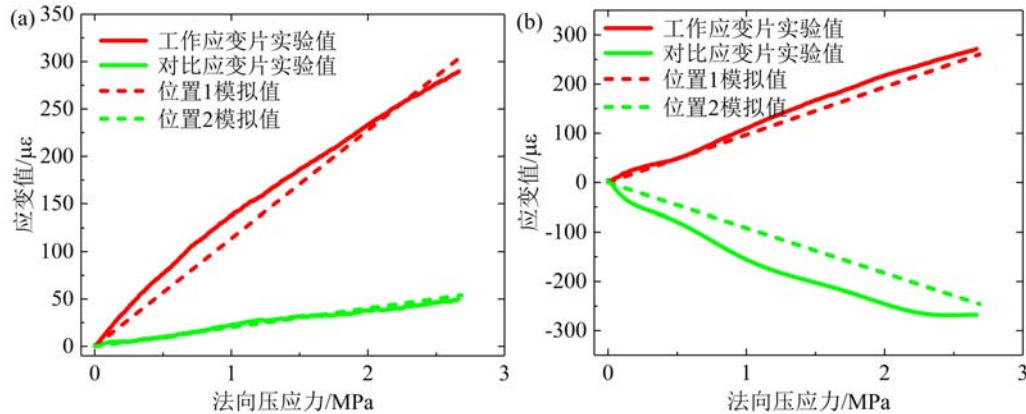


图8 实验和有限元结果对比:(a)自由边界;(b)固支边界

Fig.8 Experimental and finite element results: (a) free boundary; (b) fixed boundary

3 结论

本文通过实验研究了法向压力对电阻应变片测量结果的影响,并对其影响规律和影响机制进行了分析,结论如下:

(1)法向压力会导致应变片测量值增大,该增加量与法向压力的大小相关,法向压力越大,增加量越大。

(2)法向压力对应变片测量的影响是试件的泊松效应和力学边界条件共同作用的结果,在初始和终止法向压力载荷相同的情况下,法向压力加载历程的不同不影响最终的应变测量结果。

(3)当代工艺制备的应变片在低压下由“压力效应”引起的应变测量误差可以忽略。本文研究的结果可以解释一些特殊情况下,如深海装备测量,或者嵌入式应变片测量等测量场景中结果“偏差”的问题,也可为上述场景的实验设计和实验数据处理提供参考。

参考文献:

- [1] 张如一,沈观林,李朝弟. 应变电测与传感器[M]. 北京:清华大学出版社,1999:1-5 (ZHANG Ruyi, SHEN Guanlin, LI Zhaodi. Electrical strain measurement and sensors[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1999:1-5 (in Chinese))
- [2] 吴宗岱,陶宝祺. 应变电测原理及技术[M]. 北京:国防工业出版社,1982:571-580 (WU Zongdai, TAO Baoqi. Principle and technique of electrical strain measurement[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1982:571-580 (in Chinese))
- [3] 李盼菲. 电阻应变测量中提高精度的方法研究[J]. 计量与测试技术, 2019, 46(12):62-64 (LI Panfei. Research on method of improving accuracy in resistance strain measurement technique[J]. Metrology & Measurement Technique, 2019, 46(12):62-64 (in Chinese))
- [4] 吴北民,辛灿杰,关明智,等. 金属压力囊与应变测量技术在异型超导磁体结构装配过程中的应用研究[J]. 实

- 验力学, 2020, 35(1):127-134 (WU Beimin, XIN Canjie, GUAN Mingzhi, et al. Pressurized bladders and strain measurements technology for allotype superconducting magnet structure during an assembly [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2020, 35(1):127-134 (in Chinese))
- [5] 许德虎. 深海玻璃结构电阻应变测试中的压力效应研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2021 (XU Dehu. Pressure effect analysis of deep-sea glass structures in electric-resistance strain measurement [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2021 (in Chinese))
- [6] 张海龙, 钟国睿, 朱志伟. 深海装备的静水压力试验技术[J]. 船舶与海洋工程, 2019, 35(5):14-19 (ZHANG Hailong, ZHONG Guorui, ZHU Zhiwei. Hydrostatic pressure test technology for deep-sea equipment [J]. Naval Architecture and Ocean Engineering, 2019, 35(5):14-19 (in Chinese))
- [7] DU Q H, HU Y, CUI W C. Safety assessment of the acrylic conical frustum viewport structure for a deep-sea manned submersible [J]. Ships and Offshore Structures, 2017, 12:S221-S229.
- [8] 杜青海, 高睿, 崔维成. 全海深载人潜水器厚观察窗结构的强度研究[J]. 中国造船, 2019, 60(2):1-12 (DU Qinghai, GAO Rui, CUI Weicheng. Strength analysis of thick conical window for full ocean deep manned submersible [J]. Shipbuilding of China, 2019, 60(2):1-12 (in Chinese))
- [9] 雷智洋, 王春旭, 吴崇建, 等. 预埋光纤光栅传感器的碳纤维复合材料螺旋桨水下动应变在线测试 [J]. 中国舰船研究, 2022, 17(2):183-189 (LEI Zhiyang, WANG Chunxu, WU Chongjian, et al. Underwater online dynamic strain test of CFRP propeller with embedded FBG sensors [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2022, 17(2):183-189 (in Chinese))
- [10] 张鹏年, 滕青芳, 关明智. 埋入式光纤布拉格光栅传感器低温力学传感性能的基础实验研究 [J]. 实验力学, 2022, 37(5):745-754 (ZHANG Pengnian, TENG Qingfang, GUAN Mingzhi. Basic experimental study on low temperature mechanical sensing performance of embedded fiber Bragg grating sensor [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2022, 37(5):745-754 (in Chinese))
- [11] 肖飏, 杨斌, 胡超杰, 等. 基于埋入式应变片的纤维缠绕压力容器的健康监测 [J]. 高压物理学报, 2019, 33(4):56-62 (XIAO Biao, YANG Bin, HU Chaojie, et al. Structural health monitoring of filament wound pressure vessel by embedded strain gauges [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2019, 33(4):56-62 (in Chinese))
- [12] JANSEN K M B. Effect of pressure on electrical resistance strain gages [J]. Experimental Mechanics, 1997, 37(3):245-249.
- [13] 吴云华, 李荣筠, 周仁德, 等. 1000 巴超高压容器电测实验研究 [J]. 力学学报, 1985, 17(6):561-569 (WU Yunhua, LI Rongjun, ZHOU Rende, et al. A study of electrical measuring experiment on a ultra-high pressure vessel at 10 KBS of internal pressure [J]. Acta Mechanica Sinica, 1985, 17(6):561-569 (in Chinese))
- [14] MILLIGAN R V. The effects of high pressure on foil strain gages [J]. Experimental Mechanics, 1964, 4(2):25-36.
- [15] MILLIGAN R V. The effects of high pressure on foil strain gages on convex and concave surfaces [J]. Experimental Mechanics, 1965, 5(2):59-64.
- [16] MILLIGAN R V. The gross hydrostatic-pressure effect as related to foil and wire strain gages [J]. Experimental Mechanics, 1967, 7(2):67-74.
- [17] GERDEEN J C. Effects of pressure on small foil strain gages [J]. Experimental Mechanics, 1963, 3(3):73-80.
- [18] BRACE W F. Effect of pressure on electric resistance strain gages [J]. Experimental Mechanics, 1964, 4(7):212-216.
- [19] 钟汉通. 超高液压下应变片的压力效应 [J]. 华南工学院学报, 1983(1):82-91 (ZHONG Hantong. Pressure effects of strain gauges under ultra-high hydraulic pressure [J]. Journal of South China University of Technology, 1983(1):82-91 (in Chinese))
- [20] 刘鸿文. 材料力学 I [M]. 6 版. 北京: 高等教育出版社, 2017:221-265 (LIU Hongwen. Mechanics of materials I [M]. 6th ed. Beijing: Higher Education Press, 2017:221-265 (in Chinese))

Research on the mechanism of the effect of normal pressure on resistance strain gauge measurement

DU Zhenxing, ZHOU Shichao, MA Shaopeng

(School of Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Resistance strain gauges are widely used in the field of deformation measurement of engineering equipment because of their high reliability and low measurement cost. In the traditional measurement scenario, the strain gauges are pasted on the free surface of the components and only transmit tangential deformation without bearing normal pressure. The existing strain gauge measurement theories are all based on the situation. However, in some special measurement scenarios, such as the strain measurement of deep-sea equipment, or the strain measurement based on embedded strain gauges (e. g. , the strain gauges are embedded inside the components after integrated molding with composite materials), the strain gauges are subjected to both tangential deformation and normal pressure at the same time. As a result, the normal pressure causes strain gauge measurements to differ from those in conventional scenarios. Therefore, it is necessary to study the influence law of normal pressure on strain gauge measurement and clarify its influence mechanism in order to guarantee the validity of the measurement results in these special cases. This paper experimentally investigates the influence of normal pressure on the strain gauge measurement results under different loading history and analyzes the mechanism of the influence by combining it with the mechanical simulation method. The experimental results and analysis show that there is an obvious influence of normal pressure on the strain gauge measurement results. For the strain gauges produced by the contemporary preparation process, the influence is the combined effect of Poisson effect and mechanical boundary conditions of the measured components. In other words, the results measured by the strain gauges represent the real strains of the point under the combined effect of Poisson effect and mechanical boundary conditions.

Keywords: strain measurement; resistance strain gauges; normal pressure; Poisson effect; boundary condition