

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.04.004

电阻应变片敏感栅结构参数对应变传递的影响研究*

许艺青¹, 杨晓翔^{2,3*}, 韦铁平⁴, 姚进辉⁵

(1. 福州大学 石油化工学院, 福建 福州 350116; 2. 福州大学 机械工程及自动化学院, 福建 福州 350116;
3. 泉州师范学院, 福建 泉州 362000; 4. 福建工程学院 机械与汽车工程系, 福建 福州 350118;
5. 福建省计量科学研究院, 福建 福州 350003)

摘要: 针对电阻应变片引起的电阻应变式传感器应变传递误差问题, 对不同的电阻应变片敏感栅结构参数进行了研究。建立了传感器弹性体(等强度梁)、基底、敏感栅和覆盖层的三维模型, 利用 ANSYS 有限元软件, 采用设置接触的方式将传感器弹性体与应变片粘贴在一起, 分析对比了不同敏感栅材料、厚度、栅丝长宽比和栅丝间距时应变片应变分布情况, 确定了传感器应变传递误差的影响因素。研究表明: 敏感栅材料弹性模量越小、厚度越薄和栅丝长宽比越大, 应变过渡区和应变传递误差越小, 越有利于应变传递, 越能准确反映弹性体变形; 敏感栅栅丝间距存在最优值。研究结果给出了各结构参数下的相对误差, 为传感器电阻应变片的结构设计和应变片的选择提供了依据。

关键词: 电阻应变片; 敏感栅; 应变传递; 有限单元法

中图分类号: TH703.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2018)04-0352-06

Influence of structural parameters of resistance strain gauge on strain transfer

XU Yi-qing¹, YANG Xiao-xiang^{2,3*}, WEI Tie-ping⁴, YAO Jin-hui⁵

(1. School of Petrochemical Technology, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China; 2. School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China; 3. Quanzhou Normal University, Quanzhou 362000, China; 4. School of Mechanical and Automotive Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China; 5. Fujian Province Institute of Metrology, Fuzhou 350003, China)

Abstract: Aiming at the strain transfer error of the resistance strain sensor caused by the resistance strain gauge, the structure parameters of different resistance strain gauge were studied. A three-dimensional model of the sensor elastomer (equal strength beam), the base layer, the sensitive grid and the covering layer was established. In order to study the influence factors of sensor strain transfer error, the strain distribution of strain gauge was analyzed by ANSYS, which was different sensitive grid material, thickness, length-width ratio and the grid pitch. In addition, the sensor elastomer was attached to the strain gauge by means of setting contact. The results indicate that the smaller the elastic modulus and thickness and the greater the length-width ratio, the smaller the strain transfer error and strain transition zone, which is more favorable to strain transfer. Besides, there is an optimal value for the grid pitch. The relative error of the structural parameters is given, which provide a basis for the structural design of strain gauge and the selection of strain gauge.

Key words: resistance strain gauge; sensitive grid; strain transfer; finite element method(FEM)

收稿日期: 2017-09-08

基金项目: 福建省青年自然科学基金资助项目(2017J05071); 福建省教育厅科研资助项目(JAT160318)

作者简介: 许艺青(1991-), 女, 福建漳州人, 硕士研究生, 主要从事传感器结构设计及优化方面的研究。E-mail: 18120803717@163.com

通信联系人: 杨晓翔, 男, 教授, 博士生导师。E-mail: yangxx@fzu.cn

0 引言

因具有灵敏度高、测量精度高和稳定性强等特点,电阻应变式传感器被广泛应用于许多领域。电阻应变片作为敏感元件,是电阻应变式传感器的重要组成部分,其结构尺寸直接影响传感器的测量性能。

Fuyu 等^[1]设计出 20 t 的柱式传感器,并推导出了传感器非线性误差的计算公式。基于弹性力学理论求解了柱式负荷传感器长径比为 0.6 ~ 1.0 弹性体的应变值分布规律,韦铁平等^[2]发现长径比对端部效应的灵敏度有重大影响。雷一鸣^[3]讨论了应变片灵敏系数的变化对测量结果的影响,并给出了降低此影响的方法。Weymouth 等^[4]对各种金属电阻应变片进行介绍,并对应变片粘贴提出建议。Younis 等^[5]针对被测试件的高应变区域提出钻孔法使其应力集中,对该区域应变片选择提出了建议。Sarangi 等^[6]针对有边缘裂纹的试样,利用 DS 技术得出应变片的最佳贴片位置。段然等^[7]通过拉伸试验研究影响应变片测试精度的因素,提出了提高应变片测量精度的措施。Tang K 等^[8]研制了一种 PID 温度控制系统的实验装置,完成了箔式应变片在 77 K ~ 293 K 的温度范围内的敏感系数修正。张佳明等^[9]建立了应变片标定系统,在 20 °C ~ 800 °C 范围内对应变片的灵敏度、滞后和蠕变进行了标定,证明了高温应变片在 800 °C 时具有良好的性能。Zike 等^[10]建立了电阻应变式传感器弹性体和应变片的三维模型,利用有限元法研究发现基底弹性模量对测量结果影响很大,并对其进行了修正。王彪等^[11]等通过建立电阻应变计的二维应变传递模型,对其应变传递机理进行了分析,研究表明胶接层横向宽度越宽、厚度越薄、弹性模量越大,应变传递过渡区越小,平均应变传递率越大。王文瑞等^[12]和胡玉梅^[13]建立了简支梁、胶层和栅丝的三维模型,研究丝式应变片的应变分布,结果表明敏感栅越细、胶层厚度和弹性模量越小,测量精度越高,栅丝间距和长度具有最优值,并通过实验进行了验证。Larry Burrow^[14]通过有限元分析了箔式应变片的基底、箔材的厚度和材料及应变片端环尺寸对应变片性能的影响。

综上所述,目前对于电阻应变式传感器的研究主要集中在传感器的静态特性、端部效应、应变片的粘贴工艺、应变传递原理、温度和结构参数对丝式电阻应变片性能的影响上,对箔式电阻应变片敏感栅几何参数

对应变传递的影响研究则较少。

本研究通过建立三维简化模型,利用 ANSYS 有限元软件对不同敏感栅结构进行模拟,揭示其对应变片性能和电阻应变式传感器的应变传递误差影响。

1 电阻应变片工作原理及结构

电阻应变片是一种用途广泛的高精度力学传感元件,主要由敏感栅、基底、覆盖层及引出线所组成^[15]。

敏感栅是应变片最重要的组成部分,常用材料有康铜、镍铬合金、铁铬铝合金、铂合金等。敏感栅结构主要由边栅、横栅、测量栅、过渡栅和焊接栅组成,如图 1 所示。

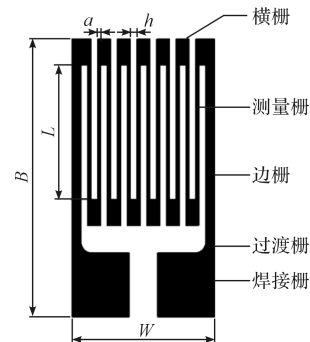


图 1 敏感栅的典型结构

B —敏感栅全长; L —敏感栅基长; W —栅宽; a —单栅丝宽度; h —栅丝间距

2 有限元模型建立及其验证

为研究传感器在测量状态下的应变分布,本研究建立了“等强度梁—基底—敏感栅—覆盖层”的有限元结构模型,各部分材料的力学性能^[16]和几何参数如表 1 所示。

网格划分时对等强度梁与应变片基底交界处进行网格加密划分,有限元网格模型如图 2 所示。

表 1 各部分力学性能和几何尺寸

组成部分	材料	弹性模量/GPa	泊松比	几何尺寸/ mm
等强度梁	Q345	210	0.3	250 × 30 × 4
敏感栅	康铜	169	0.3	3 × 2.44 × 0.003
基底	酚醛树脂	4.82	0.4	6.6 × 3.4 × 0.02
覆盖层	酚醛树脂	4.82	0.4	6.6 × 3.4 × 0.01

各部分均采用八节点六面体实体单元 solid185,模拟时将三者设置绑定约束使其粘接起来,等强度梁的左端全约束,在右端施加载荷 50 kN 的力值。

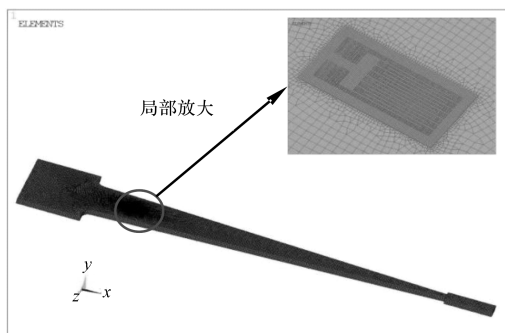


图 2 有限元网格模型

根据材料力学知识可知,等强度梁贴片位置沿 x 轴方向的应变 ε_s 和自由端的挠度 f 为:

$$\varepsilon_s = \frac{\sigma}{E_s} = \frac{6Fx}{E_s b_s t_s^2} = 7.08 \times 10^{-4} \quad (1)$$

$$f = \frac{6FL_s^3}{E_s b_s t_s^3} = 12.19 \text{ mm} \quad (2)$$

式中: E_s —等强度梁弹性模量,MPa; F —等强度梁端部的外荷载,N; x —应变片中点与加载点的距离,mm; b_s —等强度梁贴片位置的宽度,mm; t_s —等强度梁的厚度,mm; L_s —等强度梁全长,mm。

等强度梁挠度云图和 x 方向应变云图分别如图 3、图 4 所示。

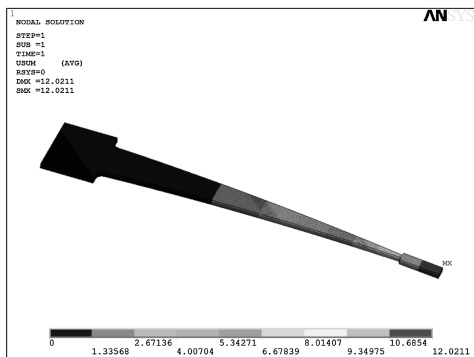


图 3 等强度梁挠度云图

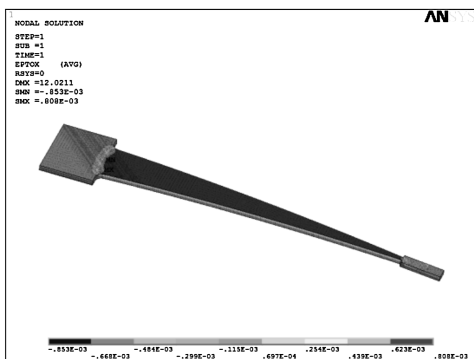


图 4 等强度梁 x 方向应变云图

从图中可以看出,等强度梁自由端的挠度为 12.021 1 mm,与理论值偏差为 1.39%,贴片位置的应

变 ε_s 为 6.90×10^{-4} ,与理论值偏差为 2.54%,仿真结果与理论值计算基本一致。

应变片整体 x 方向应变云图如图 5 所示。

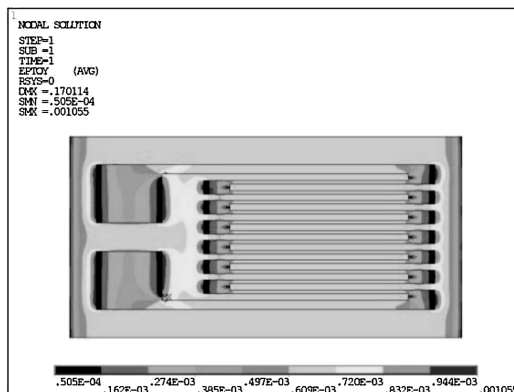


图 5 应变片 x 方向应变云图

本研究将所有节点 x 方向的应变提取出来做平均值,绘制的应变分布图如图 6 所示。

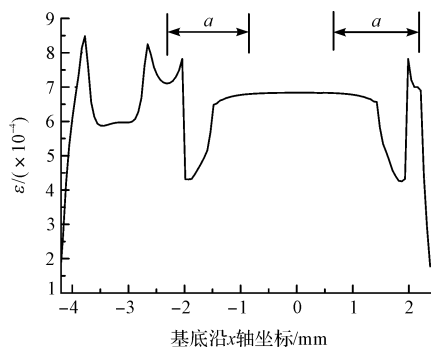


图 6 应变片 x 方向应变分布

从图 6 可知,等强度梁向应变片传递应变时,基底与敏感栅之间存在应变过渡区,即图中 a 区域,该规律与 Zike^[10] 研究结果一致。从图 5 中可以看出,应变片的两端不受力的作用,传感器受到外力作用产生的应变,是由各层之间的剪切应变传递给应变片敏感栅的,应力突变区域越小,越有利于应变传递。

取应变片测量栅中间 20 个节点 x 方向应变的平均值,作为应变片的测量值,则从传感器弹性体到敏感栅的应变传递率 α 为:

$$\alpha = \frac{\varepsilon_h}{\varepsilon_s} \times 100\% = \frac{6.84 \times 10^{-4}}{6.90 \times 10^{-4}} \times 100\% = 99.1\% \quad (3)$$

式中: ε_h —敏感栅 x 方向的应变。

3 应变片结构参数对应变传递的影响

影响传感器性能的主要因素之一是应变片敏感栅的结构参数,如其敏感栅材料、栅丝横截面积、栅丝间距、栅丝长度等。因此,本文基于有限单元法,重点分

析这几个参数对应变片应变分布规律和应变传递误差的影响。敏感栅的焊接栅的截面积远大于栅丝截面积,由上述有限元结果可知焊接栅上的应变很小,故下述分析忽略焊接栅的影响。

3.1 敏感栅材料

应变片和等强度梁几何参数一定时,模拟康铜、铁铬铝合金、镍铬铝合金、铂铱合金 4 种合金下应变片敏感栅和基底的应变分布如图 7、图 8 所示。

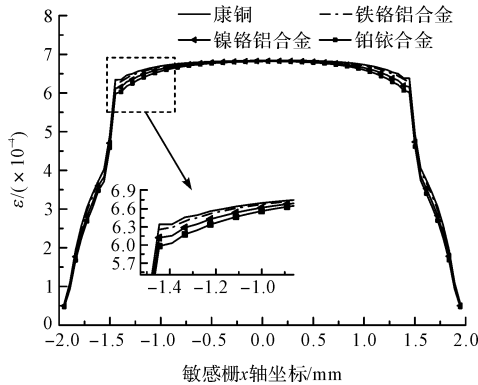


图 7 不同敏感栅材料敏感栅 x 方向应变分布

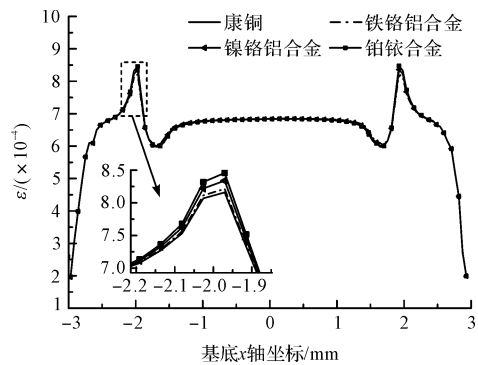


图 8 不同敏感栅材料基底 x 方向应变分布

从图上可以看出,敏感栅材料弹性模量越小,敏感栅的应变分布越均匀,基底在应变突变区的 x 方向应变越小,即应变过渡区越小。

不同敏感栅材料应变传递误差如表 2 所示。

表 2 不同敏感栅材料力学性能和应变传递误差

材料	弹性模量/ GPa	等强度梁 应变值/ ($\times 10^{-4}$)	敏感栅 应变值/ ($\times 10^{-4}$)	误差/ (%)
康铜	169	6.90	6.84	0.87
铁铬铝合金	180	6.90	6.83	1.01
镍铬铝合金	206	6.90	6.82	1.16
铂铱合金	232	6.90	6.81	1.3

从表 2 中可以看出,康铜、铁铬铝合金、镍铬铝合金、铂铱合金的应变传递误差分别为 0.87%、1.01%、1.16%、1.3%,弹性模量从 169 GPa 增加到 232 GPa 时,误差增加了 0.43%,即随着敏感栅材料

弹性模量的增大,应变传递误差也随之增大,但影响幅度不大。

3.2 敏感栅厚度

本研究保持其他参数不变,选取敏感栅厚度 t 为 0.003 mm、0.005 mm、0.01 mm 3 种情况进行模拟。不同敏感栅厚度时敏感栅和基底的应变分布如图 9、图 10 所示。

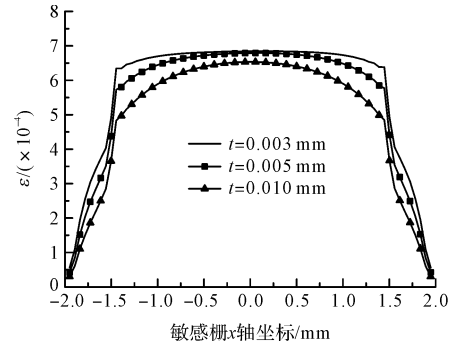


图 9 不同敏感栅厚度敏感栅 x 方向应变分布

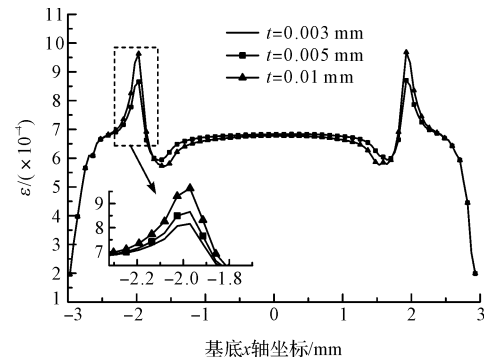


图 10 不同敏感栅厚度基底 x 方向应变分布

从图上可以看出,敏感栅厚度对应变片应变分布影响很明显,敏感栅厚度越薄,栅丝上的应变分布越均匀,基底在应变突变区的 x 方向应变越小,即应变过渡区越小。

不同敏感栅厚度的应变传递误差如表 3 所示。

表 3 不同敏感栅厚度的应变传递及误差

箔材厚度 /mm	等强度梁应 变值($\times 10^{-4}$)	敏感栅应 变值($\times 10^{-4}$)	误差(%)
0.003	6.90	6.84	0.87
0.005	6.90	6.79	1.59
0.01	6.90	6.52	5.51

从表 3 中可以看出,箔材厚度为 0.003 mm、0.005 mm、0.01 mm 时应变传递误差分别为 0.87%、1.59%、5.51%,厚度从 0.003 mm 增加到 0.01 mm,误差增大了 4.64%,应变传递误差随箔材厚度增加而增加,即敏感栅越薄越有利于应变传递。但是,由实际经验可知,应变片敏感栅越薄越容易损坏,因此应根据实

际情况选择敏感栅厚度。

3.3 敏感栅栅丝长宽比

敏感栅栅丝长度和宽度决定了栅丝数目和应变片几何尺寸,为此本研究模拟了栅丝长宽比为:20:1、50:1和70:1三种情况。不同敏感栅栅丝长宽比时敏感栅和基底的应变分布图如图11、图12所示。

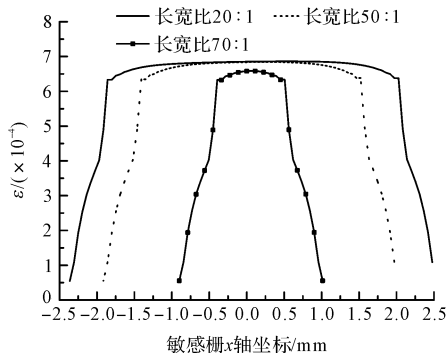


图 11 不同栅丝长宽比敏感栅 x 方向应变分布

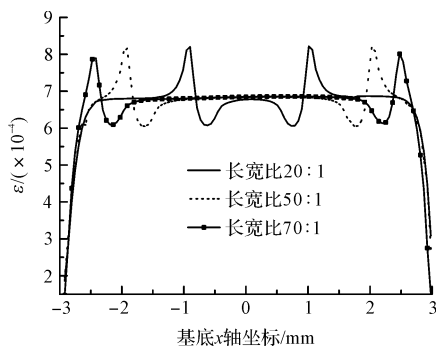


图 12 不同栅丝长宽比基底 x 方向应变分布

从图上可以看出,长宽比越大,栅丝的应变分布越均匀,应变传递率越大。

不同栅丝长宽比时应变传递误差如表4所示。

表 4 不同栅丝长宽比的应变传递及误差

栅丝长宽比	等强度梁应变值($\times 10^{-4}$)	敏感栅应变值($\times 10^{-4}$)	误差/(%)
20:1	6.90	6.57	4.78
50:1	6.90	6.84	0.87
70:1	6.90	6.85	0.72

从表4中可以看出,栅丝长宽比为20:1、50:1和70:1时,应变传递误差分别为4.78%、0.87%、0.72%。长宽比从20:1增加到70:1时,误差减小了4.02%,在一定范围内,应变传递误差随长宽比增加而减少。该分析结果与文献[12]实验结果相一致。

3.4 敏感栅栅丝间距

当应变片栅丝长度一定时,栅丝间距越大,则敏感

栅栅宽越宽。取栅丝间距 h 为 0.056 mm、0.112 mm 和 0.28 mm,不同栅丝间距时敏感栅和基底的应变分布如图13、图14所示。

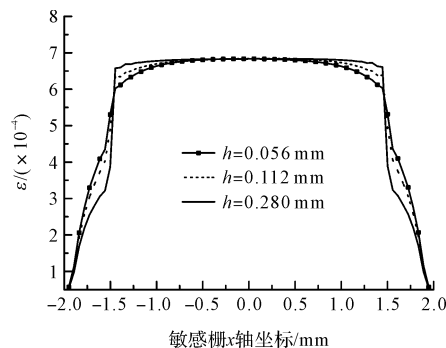


图 13 不同栅丝间距敏感栅 x 方向应变分布

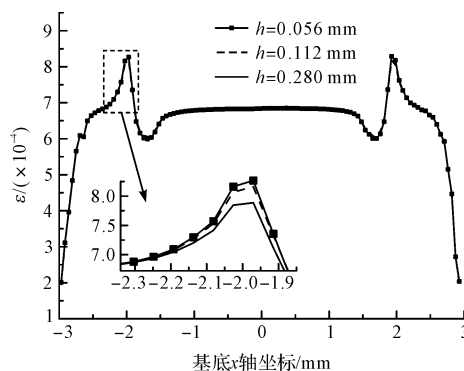


图 14 不同栅丝间距基底 x 方向应变分布

从图上可以看出,栅丝间距越大,栅丝上的应变分布越均匀,基底应变突变区的 x 方向应变越小,即应变过渡区越小。

不同栅丝间距时应变传递误差如表5所示。

表 5 不同栅丝间距的应变传递及误差

栅丝间距/mm	等强度梁应变值($\times 10^{-4}$)	敏感栅应变值($\times 10^{-4}$)	误差/(%)
0.056	6.9	6.82	1.16
0.112	6.9	6.84	0.89
0.28	6.9	6.83	1.01

由表5可见,栅丝间距为0.056 mm、0.112 mm和0.28 mm时,应变传递误差分别为1.16%、0.89%、1.01%,栅丝间距从0.056 mm增大到0.112 mm时,应变传递误差减小了0.27%,而从0.112 mm增大到0.28 mm时,应变传递误差增加了0.12%,这说明栅丝间距存在最优值,该仿真结果与文献[12]实验结果相一致。

4 结束语

(1)本研究建立了等强度梁和应变片三维模型,通过有限元法模拟出的应变传递率达99.1%,可见该

模型能正确地反映传感器的应变传递。从有限元结果可知,敏感栅的主要受力部位在测量栅中间位置,每根栅丝受力较均匀,并向两端逐渐递减至零。在应变传递过程中,基底与敏感栅之间存在应变过渡区;

(2)本研究分析了敏感栅材料、厚度、栅丝长宽比、栅丝间距变化时应变片应变分布规律及应变传递误差。研究表明:敏感栅材料弹性模量越小、厚度越薄,敏感栅的应变分布越均匀,基底在应变突变区的 x 向应变和切应变越小,即应变过渡区越小;栅丝长宽比越大,栅丝的应变分布越均匀。箔材弹性模量越小、厚度越薄和栅丝宽比越大,应变传递误差越小,越有利于应变传递,越能准确反映弹性体变形;敏感栅栅丝间距存在最优值;

(3)本文计算结果给出了敏感栅各结构参数对应变片应变分布和传递误差的影响,为电阻应变式传感器应变片的结构设计和应变片的选择提供了依据。

参考文献 (References):

- [1] FUYU W, FANG M. Factors influencing output non-linearity error of a high-precision load sensor and the error calculation[J]. *Finite Elements in Analysis & Design*, 2001, 37(4):341-347.
- [2] 韦铁平,杨晓翔,姚进辉,等.柱式负荷传感器的长径比对端部效应的影响[J]. *应用力学学报*, 2015, 32(6):1038-1043.
- [3] 雷一鸣.电阻应变计应变传递研究及误差分析[J]. *科学技术与工程*, 2011(32):8096-8100.
- [4] WEYMOUTH L J, STARR J, DORSEY J. Bonded resistance strain gauges[J]. *Experimental Mechanics*, 1979, 19(3):112-120.
- [5] YOUNIS N T, KANG B. Averaging effects of a strain gage [J]. *Journal of Mechanical Science & Technology*, 2011, 25(1):163-169.
- [6] SARANGI H, MURTHY K S R K, CHAKRABORTY D. Experimental verification of optimal strain gage locations for the accurate determination of mode I stress intensity factors [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2013, 110(1):189-200.
- [7] 段然,肖立峰.材料拉伸试验中影响应变片测量精度的因素分析[J]. *机械设计*, 2013, 30(12):76-80.
- [8] TANG K, SHA L, LI Y J, et al. Measurement of thermal expansion at low temperatures using the strain gage method [J]. *Journal of Zhejiang University A*, 2014, 15(5):323-330.
- [9] 张佳明,王文瑞,聂帅.高温电阻应变片特性参数标定实验研究[J]. *中国测试*, 2014, 40(5):25-28.
- [10] ZIKE S, MIKKELSEN L P. Correction of gauge factor for strain gauges used in polymer composite testing [J]. *Experimental Mechanics*, 2014, 54(3):393-403.
- [11] 王彪,刘腾,徐敬龙,等.金属粘贴式电阻应变计应变传递分析[J]. *中国测试*, 2016, 42(8):1-6.
- [12] 王文瑞,张佳明,聂帅.高温应变接触式测量精度影响因素研究[J]. *固体火箭技术*, 2015(3):439-444.
- [13] 胡玉梅,张方建,邵毅敏,等.应变片敏感栅结构参数对测量精度的影响[J]. *重庆大学学报:自然科学版*, 2013, 36(12):21-27.
- [14] 尹福炎.箔式应变片结构模型与有限元分析[J]. *衡器*, 2009, 38(5):47-50.
- [15] STEIN P. Strain gage history and the end of the twentieth century [J]. *Experimental Techniques*, 2010, 25(2):15-16.
- [16] 耿汉生.应变胶性能与应变计的工作特性[J]. *传感器应用技术*, 1990(4):43-46.

[编辑:张豪]

本文引用格式:

许艺青,杨晓翔,韦铁平,等.电阻应变片敏感栅结构参数对应变传递的影响研究[J]. *机电工程*, 2018, 35(4):352-357.

XV Yi-qing, YANG Xiao-xiang, WEI Tie-ping, et al. Influence of structural parameters of resistance strain gauge on strain transfer [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2018, 35(4):352-357.

《机电工程》杂志; <http://www.meem.com.cn>