

变截面悬臂梁式光纤布拉格光栅压力传感器设计研究

潘越, 宋佳佳*, 王智冲, 孙春勇, 甘川

河北工程大学机械与装备工程学院, 河北 邯郸 056038

摘要 为满足煤矿井下复杂环境中围岩应力测量的实际需要,设计了一种变截面悬臂梁结构的光纤光栅压力传感器,并与等截面悬臂梁结构进行了对比。对其压力与光纤光栅漂移量的关系进行了推导;通过有限元方法分析了不同截面悬臂梁影响灵敏度大小的情况,确定了悬臂梁的尺寸;在此基础上应用数值分析和有限元分析探究了不同结构和材料参数对两种悬臂梁结构灵敏度的影响,同时与类似结构进行了对比分析。研究表明:设计时应选用固定端厚度相对较小、自由端厚度相对较大的变截面梁,最终选定的变截面悬臂梁厚度为固定端 0.5 mm、自由端 2 mm,传感器的压力灵敏度可达 893.45 pm/MPa,是裸光纤光栅的 294 倍。在改变结构及材料参数后,变截面悬臂梁结构的压力灵敏度依然优于等截面悬臂梁,验证了传感器结构的合理性,能够满足煤矿巷道监测所需,并且在量程范围内具有良好的线性。

关键词 光纤光学与光通信; 压力传感器; 变截面悬臂梁; 围岩监测; 灵敏度

中图分类号 TN29; TN247

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0106006

Design and Research on Variable Cross-section Cantilever Fiber Bragg Grating Pressure Sensor

Pan Yue, Song Jiajia*, Wang Zhichong, Sun Chunyong, Gan Chuan

School of Mechanical and Equipment Engineering, Hebei University of Engineering,
Handan, Hebei 056038, China

Abstract This study presents a fiber Bragg grating pressure sensor with a variable cross-section cantilever structure, which meets the needs of surrounding rock-stress measurements in the complex environment of a coal mine. The performances of the designed sensor and a sensor with a constant cross-section cantilever structure are compared, and the relationship between the pressure and fiber grating drift is derived. The cases affecting the sensitivity of different cross-section cantilever beams are analyzed using the finite element method, and the size of the cantilever beam is determined. The effects of different structures and material parameters on the sensitivities of the two cantilever structures are determined through a numerical and finite element analysis. The results are compared with the experimental results of a similar structure. The results showed that the variable cross-section beam should be designed with a relatively thin fixed end and a relatively thick free end. In the final variable cross-section cantilever beam, the thicknesses of the fixed and free ends were 0.5 mm and 2.0 mm, respectively. The sensitivity of the sensor reached 893.45 pm/MPa, which is 294 times that of the bare fiber grating. Even after changing the structure and material parameters, the sensitivity of the variable cross-section cantilever beam was greater than that of the constant cross-section cantilever beam. The sensor structure can meet the needs of coal mine roadway monitoring and exhibits good linearity in the operating range.

Key words fiber optics and optical communication; pressure sensor; variable cross section cantilever beam; surrounding rock monitoring; sensitivity

收稿日期: 2021-04-13; 修回日期: 2021-04-18; 录用日期: 2021-04-28

通信作者: *s15633966642@163.com

1 引言

我国煤矿的煤层赋存形式多样且条件复杂,灾害发生率较高。尤其是煤炭开采进入地底深部^[1]以后,随着深度增加,围岩自重应力和构造应力不断增强,顶板发生离层垮落、冒顶的概率会大大增加^[2-4],因此传感器能够准确及时地检测出围岩压力变化,就显得尤为重要。但传统的机械式或电气式压力传感器存在抗电磁干扰能力差、精度及稳定性差、充电操作困难、信号无法远程传输等技术局限性,这大大限制了传统压力传感器在煤矿井下恶劣环境中的应用^[5]。近年来,光纤布拉格光栅(FBG)传感技术的兴起,为煤矿巷道围岩监测提供了新思路和新方法。FBG 传感器具有体积小、耐腐蚀、抗电磁干扰、灵敏度高、无源、性能稳定、安全性能好等^[6-8]优点,能够很好地适应煤矿井下复杂的环境。

FBG 压力传感器的设计十分灵活,结构类型有很多,大体可以分为嵌入式^[9-11]、梁式^[12-15]、悬空式^[16-18]三种结构类型。其中梁式结构与其他两种相比,具有横向抗干扰能力强、稳定性高、结构简单的优点。但传统梁式结构由于光纤光栅直接粘贴在梁表面,导致其增敏效果有限,易产生啁啾或多峰现象,测量结果会受到影响。针对上述情况,本文设计了一种悬臂梁结构的光纤光栅压力传感器,它可以将悬臂梁自由端的位移量放大,这样相当于间接放大了所连接光纤光栅的应变变量,达到增敏的效果;光纤光栅采用悬空方式固定,有效避免了光纤光栅产生啁啾效应,同时设置温度补偿,消除了温度对光纤光栅的影响。

2 传感器结构

设计了一种光纤光栅压力传感器,如图 1 所示。由于围岩压力并不一定能够均匀地作用到膜片上,会使传感器的准确度受到影响,为解决这个问题,使受压顶盖与膜片之间的腔内充满流体,通过流体

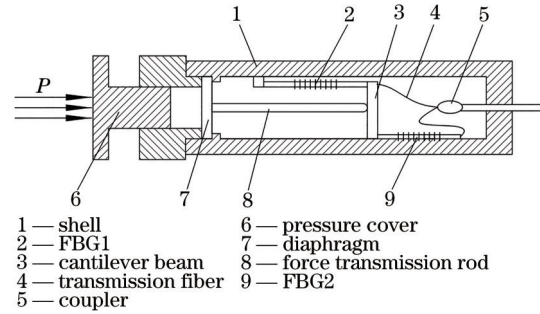


图 1 传感器结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of sensor

传递压力。传力杆与膜片、悬臂梁与外壳都通过焊接的方式连接。FBG1 通过聚氨酯封装并将其两端分别粘贴在壳体内部的小凸台和悬臂梁的自由端上,用于感知因压力。FBG2 作为压力敏感光栅的温度补偿光栅,粘贴在不受外力的壳体内,两个 FBG 通过光纤耦合器连接,信号传输光纤通过耦合器从传感器的一端输出。

测量时,当受压顶盖受到压力后,可以通过腔内流体将压力均匀地传递到膜片上,膜片在压力作用下发生挠度变形,通过传力杆传递到悬臂梁上,使悬臂梁也产生一定挠度,带动悬臂梁自由端连接的 FBG1 发生拉伸,导致 FBG1 的中心波长发生漂移。由于悬臂梁受力点在中间位置,所以可以通过悬臂梁的延伸将自由端的位移量放大,间接放大了所连接光纤光栅的应变变量。通过解调设备,可得到光纤光栅传感器的中心波长的变化情况,进而确定待测部位相应压力的变化。

光纤光栅应变变量大小主要是由悬臂梁产生的挠度大小和悬臂梁自由端延伸的长度决定的,而悬臂梁自由端延伸的长度受壳体结构的制约,因此只能通过改变悬臂梁截面改善其挠度来影响光纤光栅变量大小。针对上述问题,提出了变截面悬臂梁结构,并与等截面悬臂梁结构进行了对比。两种结构受力情况如图 2 所示。

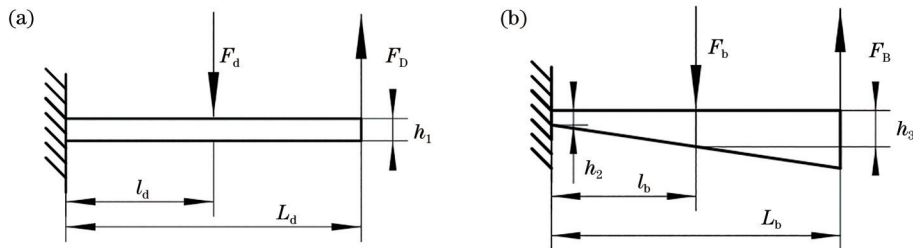


图 2 等截面和变截面悬臂梁结构受力示意图。(a)等截面悬臂梁;(b)变截面悬臂梁

Fig. 2 Stress diagram of cantilever beam with constant section and variable section. (a) Constant cross-section cantilever beam; (b) variable cross-section cantilever beam

3 理论分析

3.1 光纤光栅传感的原理

光纤光栅中心波长受其有效折射率和光栅周期影响。当外部环境温度、压力等影响因素发生变化时,光纤光栅沿轴向分布的应变以及纤芯对于中心反射波长的折射率会随之发生变化。光纤光栅的中心波长与其光栅周期和有效折射率之间的关系^[19]为:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (1)$$

式中: λ_B 为光纤光栅中心波长, n_{eff} 为有效折射率, Λ 为光栅周期。

光纤光栅应变与温度共同作用下的光纤光栅反射中心波长漂移如下:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\Delta\epsilon + (\alpha + \xi)\Delta T, \quad (2)$$

式中: $\Delta\lambda_B$ 为中心波长漂移量, p_e 为光纤有效弹光系数,对于传统纯熔融石英光纤来说, $p_e = 0.22$ 。 α 为光纤的热膨胀系数, ξ 为光纤的热光系数, $\Delta\epsilon$ 为光纤光栅的轴向应变。

FBG1和FBG2的中心波长变化分别为:

$$\frac{\Delta\lambda_{B1}}{\lambda_{B1}} = (1 - P_e)\Delta\epsilon_1 + (\alpha + \xi)\Delta T_1, \quad (3)$$

$$\frac{\Delta\lambda_{B2}}{\lambda_{B2}} = (\alpha + \xi)\Delta T_2, \quad (4)$$

式中: $\Delta\lambda_{B1}$ 、 $\Delta\lambda_{B2}$ 分别为FBG1和FBG2的中心波长漂移量; $\Delta\epsilon_1$ 为FBG1的轴向应变。 ΔT_1 、 ΔT_2 分别为FBG1和FBG2所处环境的温度变化量。由于两个光纤所在的工作环境温度相同,因此 $\Delta T_1 = \Delta T_2$ 。

温度补偿后的FBG1轴向应变单独引起的中心波长漂移可表示为:

$$\frac{\Delta\lambda_{B1}}{\lambda_{B1}} - \frac{\Delta\lambda_{B2}}{\lambda_{B2}} = (1 - P_e)\Delta\epsilon_1. \quad (5)$$

3.2 不同截面悬臂梁压力与波长漂移分析

传感器通过腔内流体作用在平面圆膜片上产生压力来进行监测,膜片受力如图3所示。根据小变形理论^[20],膜片在均匀压力 P 作用下产生的最大挠度 ω_p 、悬臂梁反作用力 F 作用下产生的最大挠度 ω_F ^[21]分别为:

$$\omega_p = P \times A_p, \quad (6)$$

$$\omega_F = F \times A_F, \quad (7)$$

式中: $A_p = \frac{3(1 - \mu^2)R^4}{16E_1h^3} \left(1 - \frac{r^4}{R^4} + 4\frac{r^2}{R^2} \ln \frac{r}{R} \right)$,

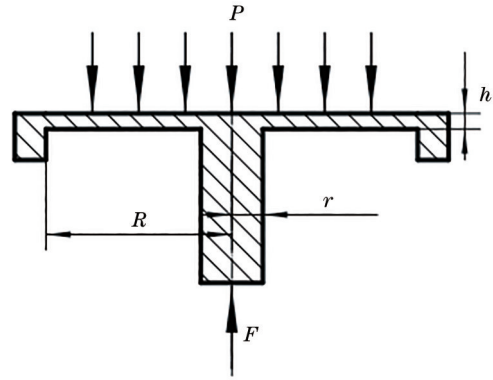


图3 膜片受力示意图

Fig. 3 Stress diagram of diaphragm

$$A_F = \frac{3(1 - \mu^2)R^2}{4\pi E_1 h^3} \left[1 - \left(\frac{r^2}{R^2} \right) \frac{1 - \frac{r^2}{R^2} + 4\frac{r^2}{R^2} \ln^2 \left(\frac{r}{R} \right)}{1 - \frac{r^2}{R^2}} \right].$$

其中 R 为膜片半径, h 为膜片厚度, r 为传力杆半径, E_1 为膜片的杨氏模量, μ 为膜片的泊松比。

因此,在均匀压力 P 和集中力 F 共同作用下膜片的实际最大挠度 ω_{max} 为:

$$\omega_{\text{max}} = \omega_p - \omega_{F_0} \quad (8)$$

等截面悬臂梁受力情况如图2(a)所示。等截面悬臂梁的反作用力与传力杆作用力相等为 F_d ,等截面悬臂梁的反作用力包括梁产生挠度的反作用力和光纤光栅拉力对悬臂梁中间产生的反作用力,分别用 F_1 和 F_2 表示。

$$F_d = F_1 + F_2, \quad (9)$$

$$F_2 = \frac{F_D L_d}{l_d}, \quad (10)$$

$$F_D = E_2 S \epsilon_d, \quad (11)$$

式中: F_D 、 E_2 、 S 分别为等截面悬臂梁中光纤光栅产生的拉力、弹性模量和横截面积, ϵ_d 为等截面悬臂梁带动光纤光栅的应变,量, L_d 为等截面悬臂梁的长度, l_d 为等截面悬臂梁到受力处的长度。

膜片实际最大挠度 ω_{max} 与等截面悬臂梁中间受到作用力 F_1 产生的挠度 $\omega_{\text{max}1}$ 相等, $\omega_{\text{max}1}$ 可以表示为:

$$\omega_{\text{max}1} = \frac{4F_1 l_d^3}{E_1 b h_1^3}, \quad (12)$$

式中: b 为等截面悬臂梁自由端的宽度, h_1 为等截面悬臂梁厚度, E_1 为等截面悬臂梁杨氏模量。

光纤光栅产生的拉力 F_D 会使等截面悬臂梁自由端向上产生挠度 $\omega_{\text{max}D}$:

$$\omega_{\text{max}D} = \frac{4F_D (L_d - l_d)^3}{E_1 b h_1^3}. \quad (13)$$

光纤光栅应变变量 ϵ_d 通过等截面悬臂梁等比放大后与膜片实际最大挠度 ω_{\max} 之间的关系为:

$$\omega_{\max} = \frac{l_d(\omega_{\max D} + x\epsilon_d)}{L_d}, \quad (14)$$

其中 x 为等截面悬臂梁中光纤光栅的有效受拉长度。

由(6)~(14)式可得应变变量 ϵ_d 与压力 P 之间的关系:

$$P = \frac{\left[\frac{4E_2 S(L_d - l_d)^3}{E_1 b h_1^3} + x \right] \frac{l_d}{L_d} + \frac{4E_2 S(L_d - l_d)^3 + xE_1 b h_1^3 + 4l_d L_d E_2 S}{4L_d l_d^2}}{A_p} \times A_F \epsilon_d. \quad (15)$$

由(5)式和(15)式可得等截面悬臂梁被测压力 P 和光纤光栅漂移量 $\Delta\lambda_B$ 之间的关系为:

$$\frac{\Delta\lambda_{B1}}{\lambda_{B1}} - \frac{\Delta\lambda_{B2}}{\lambda_{B2}} = \frac{(1 - p_e) \times A_p}{\left[\frac{4E_2 S(L_d - l_d)^3}{E_1 b h_1^3} + x \right] \frac{l_d}{L_d} + \frac{4E_2 S(L_d - l_d)^3 + xE_1 b h_1^3 + 4l_d L_d E_2 S}{4L_d l_d^2}} \times A_F} P. \quad (16)$$

变截面悬臂梁的受力情况如图 2(b) 所示。其受力情况与等截面悬臂梁结构相同, 变截面悬臂梁的反作用力与传力杆作用力相等为 F_b , 变截面悬臂梁的反作用力包括梁产生挠度的反作用力和光纤光栅拉力对悬臂梁中间产生的反作用力, 分别用 F_3 和 F_4 表示。

$$F_b = F_3 + F_4, \quad (17)$$

$$F_4 = \frac{F_b L_b}{l_b}, \quad (18)$$

$$F_b = E_2 S \epsilon_b, \quad (19)$$

式中: F_b 、 ϵ_b 分别为变截面悬臂梁中光纤光栅产生的拉力、应变变量, L_b 为变截面悬臂梁的长度, l_b 为变截面悬臂梁到受力处的长度。

膜片实际最大挠度 ω_{\max} 与变截面悬臂梁受作用力 F_3 产生的挠度 $\omega_{\max 3}$ ^[22] 相等, $\omega_{\max 3}$ 可以表示为:

$$\omega_{\max 3} = \xi_{m,F} \frac{4F_3 l_b^3}{b h_3^3 E_1} \beta, \quad (20)$$

式中: $\beta = 1 + \frac{0.3E_1}{G} \left(\frac{h_2}{l_b} \right)^2$, $\xi_{m,F} = 3 \left(\frac{h_2}{h_2 - h_3} \right)$ ·

$\left[\ln \frac{h_2}{h_3} - \left(\frac{h_2}{h_2 - h_3} \right) - \frac{(h_2 - h_3)^2}{2h_2^2} \right]$, h_2 为变截面悬臂梁

固定端的厚度, h_3 为变截面悬臂梁中间受力部位的厚度, G 为剪变模量, $G = 0.384E_1$ 。

变截面悬臂梁中光纤光栅产生的拉力 F_b 使变截面悬臂梁向上产生挠度 $\omega_{\max B}$:

$$\omega_{\max B} = \xi_{m,F1} \frac{4F_3 (L_b - l_b)^3}{b h_3^3 E_1} \beta_1, \quad (21)$$

式中: $\beta_1 = 1 + \frac{0.3E_1}{G} \left(\frac{h_3}{L_b - l_b} \right)^2$, $\xi_{m,F1} = 3 \left(\frac{h_3}{h_3 - h_4} \right)$ ·

$\left[\ln \frac{h_3}{h_4} - \left(\frac{h_3}{h_3 - h_4} \right) - \frac{(h_3 - h_4)^2}{2h_3^2} \right]$, h_4 为变截面悬臂

梁自由端的厚度。

变截面悬臂梁中光纤光栅应变变量 ϵ_b 通过悬臂梁等比放大后与膜片实际最大挠度 ω_{\max} 之间的关系为:

$$\omega_{\max} = \frac{l_b(\omega_{\max B} + x\epsilon_b)}{L_b}, \quad (22)$$

通过(6)~(8)式和(17)~(22)式, 可得到变截面悬臂梁中光纤光栅应变变量 ϵ_b 与压力 P 之间的关系:

$$P = \frac{\left[\frac{\xi_{m,F1} 4E_2 S(L_b - l_b)^3}{E_1 b h_3^3} \beta_1 + x \right] \frac{l_b}{L_b} + \left\{ \frac{\left[\frac{\xi_{m,F1} 4E_2 S(L_b - l_b)^3}{E_1 b h_3^3} \beta_1 + x \right] \frac{l_b}{L_b} E_1 b h_2^3}{\xi_{m,F} 4l_b^3 \beta} + \frac{E_2 S L_b}{l_b} \right\}}{A_p} \times A_F \epsilon_b. \quad (23)$$

由(5)式、(23)式, 可得变截面悬臂梁被测压力和光纤光栅漂移量之间的关系为:

$$\frac{\Delta\lambda_{B1}}{\lambda_{B1}} - \frac{\Delta\lambda_{B2}}{\lambda_{B2}} = \frac{(1-\rho_e)A_p}{\left[\frac{\xi_{m,F1}4E_2S(L_b-l_b)^3}{E_1bh_3^3}\beta_1+x \right] \frac{l_b}{L_b} + \left\{ \frac{\xi_{m,F1}4E_2S(L_b-l_b)^3}{E_1bh_3^3}\beta_1+x \right\} \frac{l_b}{L_b} E_1bh_2^3 + \frac{E_2SL_b}{l_b}}{P} \times A_F \quad (24)$$

4 等截面悬臂梁与变截面悬臂梁的有限元分析

为了验证提出结构的合理性及确定悬臂梁的结构尺寸,应用 ANSYS 软件对传感器整体结构进行了有限元分析。分别分析了悬臂梁固定端截面厚度为 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.25 mm 时,自由端分别加厚 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.25, 1.5 mm 的变截面悬臂梁和等截面悬臂梁在膜片受到 1 MPa 压力下,悬臂梁自由端产生位移的情况,如图 4 所示。结构及材料参数如表 1 所示。

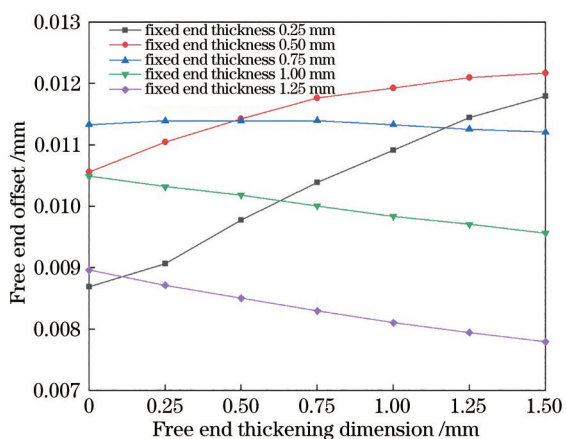


图 4 不同厚度悬臂梁随自由端厚度增大的自由端位移图
Fig. 4 Free end offset of cantilever beam with different thickness increasing with free end thickness

可以看出,当悬臂梁固定端厚度为 0.25 mm 和 0.5 mm 时,等截面悬臂梁的自由端位移分别为 0.0086935 mm 和 0.010563 mm,与固定端厚度为 0.25 mm 和 0.5 mm 的变截面悬臂梁相比,自由端位移量相对较小。且随着悬臂梁自由端厚度的增加,自由端的位移呈增大趋势,其原因是:当悬臂梁为厚度较薄的等截面梁时,抗弯刚度较小,但由于其自由端受光纤光栅拉力的影响,自由端位移量会相对较小,如图 5 所示;但随着悬臂梁自由端厚度的增加,梁体中间抗弯刚度增大,光纤光栅拉力的影响逐渐变小,自由端位移的幅度呈增大趋

表 1 FBG 传感器的结构及材料参数

Table 1 Structure and material parameters of FBG sensor

Name	Symbol	Value
Radius of diaphragm	R	6 mm
Diaphragm thickness	h	0.5 mm
Elastic modulus of diaphragm	E_1	1.93×10^{11} Pa
Poisson's ratio of diaphragm	μ	0.31
Radius of dowel bar	r	1 mm
Cantilever beam width	b	4 mm
Elastic modulus of cantilever beam	E_1	1.93×10^{11} Pa
Length of constant section cantilever beam	L_d	10 mm
Length from fixed end of constant section cantilever beam to stress point	l_d	5 mm
Length of variable section cantilever beam	L_b	10 mm
Length from fixed end of variable section cantilever beam to stress point	l_b	5 mm
Effective length of fiber grating	x	15 mm
Cross sectional area of fiber grating	S	2 mm^2
Elastic modulus of fiber grating	E_2	3.15×10^5 Pa
FBG1 Central wavelength	λ_{B1}	1550 nm
FBG2 Central wavelength	λ_{B2}	1550 nm

势;当固定端超过 0.75 mm 后,等截面悬臂梁厚度为 1 mm 和 1.25 mm 时,自由端位移分别为 0.010495 mm 和 0.0089618 mm,与固定端厚度为 1 mm 和 1.25 mm 的变截面悬臂梁相比,其自由端位移量相对较大。随着自由端厚度的增加,自由端的位移明显减小,其原因是:当悬臂梁为厚度较大的等截面梁时,虽然悬臂梁自由端受光纤光栅拉力的影响较小,但截面越大,抗弯刚度越大,挠度和自由端位移越小。因此,随着变截面悬臂梁自由端厚度的增加,梁体中间抗弯刚度增大,自由端位移的幅度比等截面悬臂梁自由端产生的位移小。

因此设计时应选用固定端厚度相对较小,自由

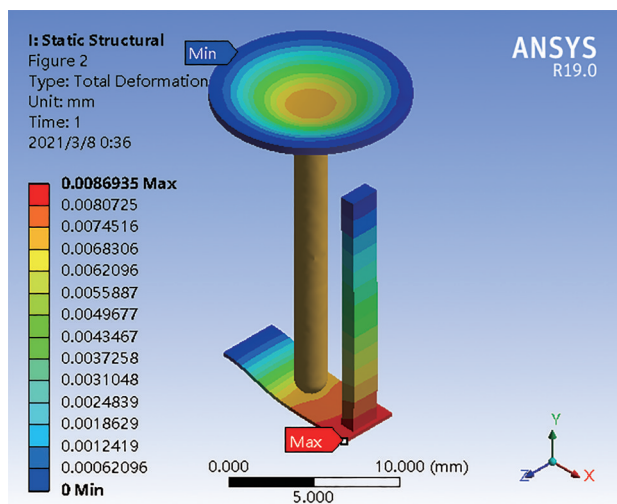


图 5 1 MPa 压力下 0.25 mm 等截面悬臂梁自由端位移云图
Fig. 5 Free end offset nephogram of 0.25 mm cantilever beam under 1 MPa pressure

端厚度相对较大的变截面梁。受力时既可以产生较大的挠度,又可以减小受到光纤光栅拉力的影响。结合图 4 最终选定固定端厚度为 0.5 mm、自由端厚度为 2 mm 的变截面悬臂梁。

根据表 1 的传感器结构及材料参数,通过(16)式

和(24)式得出,悬臂梁为固定端厚度 0.5 mm 的等截面时,压力灵敏度为 1102.4 pm/MPa;悬臂梁为固定端厚度 0.5 mm、自由端厚度 2 mm 的变截面时,压力灵敏度为 1152.7 pm/MPa。相比之下变截面梁的灵敏度较高。

通过有限元分析,得到固定端和自由端厚度分别为 0.5, 2 mm 的变截面梁及固定端厚度为 0.5 mm 的等截面梁的整体结构位移云图,如图 6 所示。可以看出,变截面梁和等截面梁中心位移引起的整段光纤光栅伸长变化量分别为 0.011085 mm 和 0.009884 mm,光纤光栅有效受拉长度为 15 mm。经仿真分析,等截面梁压力敏感光栅中心波长漂移量为 796.62 pm,即压力灵敏度为 796.62 pm/MPa;变截面梁压力敏感光栅中心波长漂移量为 893.45 pm,即压力灵敏度为 893.45 pm/MPa。而传统的梁式结构光纤光栅传感器^[6]灵敏度为 339.96 pm/MPa,本文设计的等截面悬臂梁传感器结构相较于传统结构灵敏度提升了 134.33%,变截面悬臂梁传感器结构灵敏度相较于等截面悬臂梁结构提升了 12.16%,是裸光纤光栅压力灵敏度(约为 3.04 pm/MPa)的 294 倍。

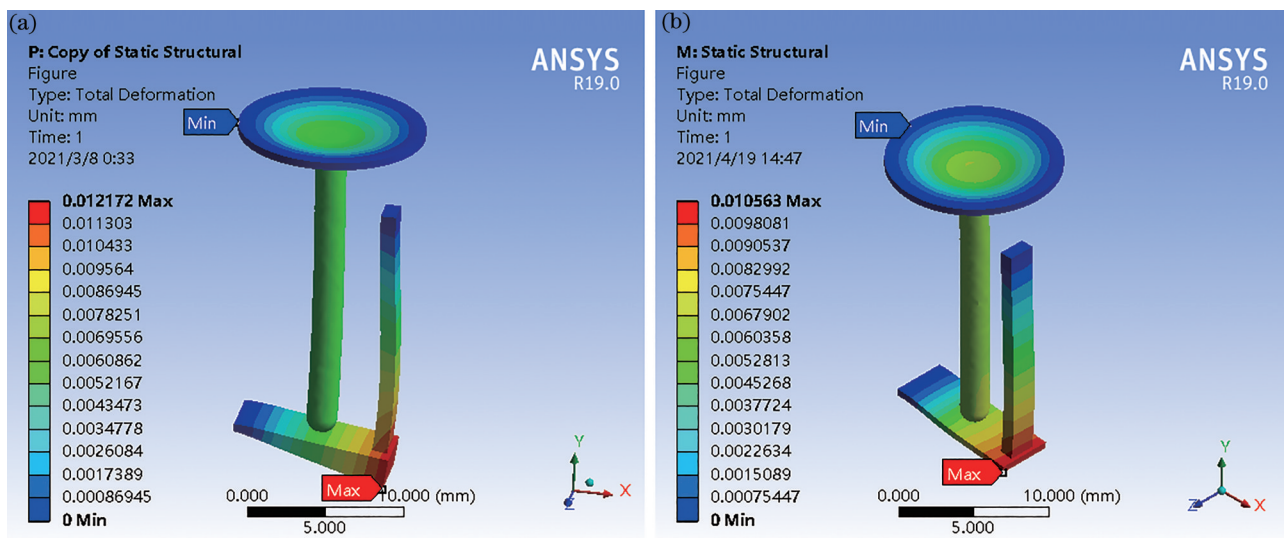


图 6 悬臂梁结构有限元分析。(a)变截面梁结构;(b)等截面梁结构

Fig. 6 Finite element analysis of cantilever beam structure. (a) Variable cross-section beam structure; (b) constant cross-section beam structure

通过对比有限元和理论分析结果,可知有限元分析结果的灵敏度值较小,其原因是通过有限元分析得到的是光纤光栅的伸长变化量,仿真时消除了光纤光栅拉力的影响;而理论分析的结果是悬臂梁自由端的位移量,所以会有一定误差。总体来说理论模型和有限元分析结果基本吻合。

5 传感器结构的数值分析和有限元仿真

5.1 数值分析

为了更好地研究变截面悬臂梁传感器结构,结合上述选定的悬臂梁尺寸,通过改变结构及材

料参数来观察其灵敏度的变化特性,并与等截面悬臂梁结构进行对比。利用 MATLAB 软件对两种悬臂梁结构的灵敏度进行数值分析,得到灵敏度与结构及材料参数之间的关系曲线,如图 7 所示。

由图 7 可知,在改变结构及材料参数后,变截面悬臂梁结构的灵敏度均高于等截面悬臂梁,但变截

面和等截面悬臂梁结构的曲线变化趋势基本一致:灵敏度与光纤光栅有效长度、泊松比、弹性模量、传力杆半径和膜片厚度参数呈反比例函数的减小趋势,与膜片半径、固定端到受力点长度参数呈正相关增大趋势。其中当弹性模量或膜片半径或膜片厚度发生变化时,灵敏度变化较为明显,说明这三个是影响灵敏度的主要因素。

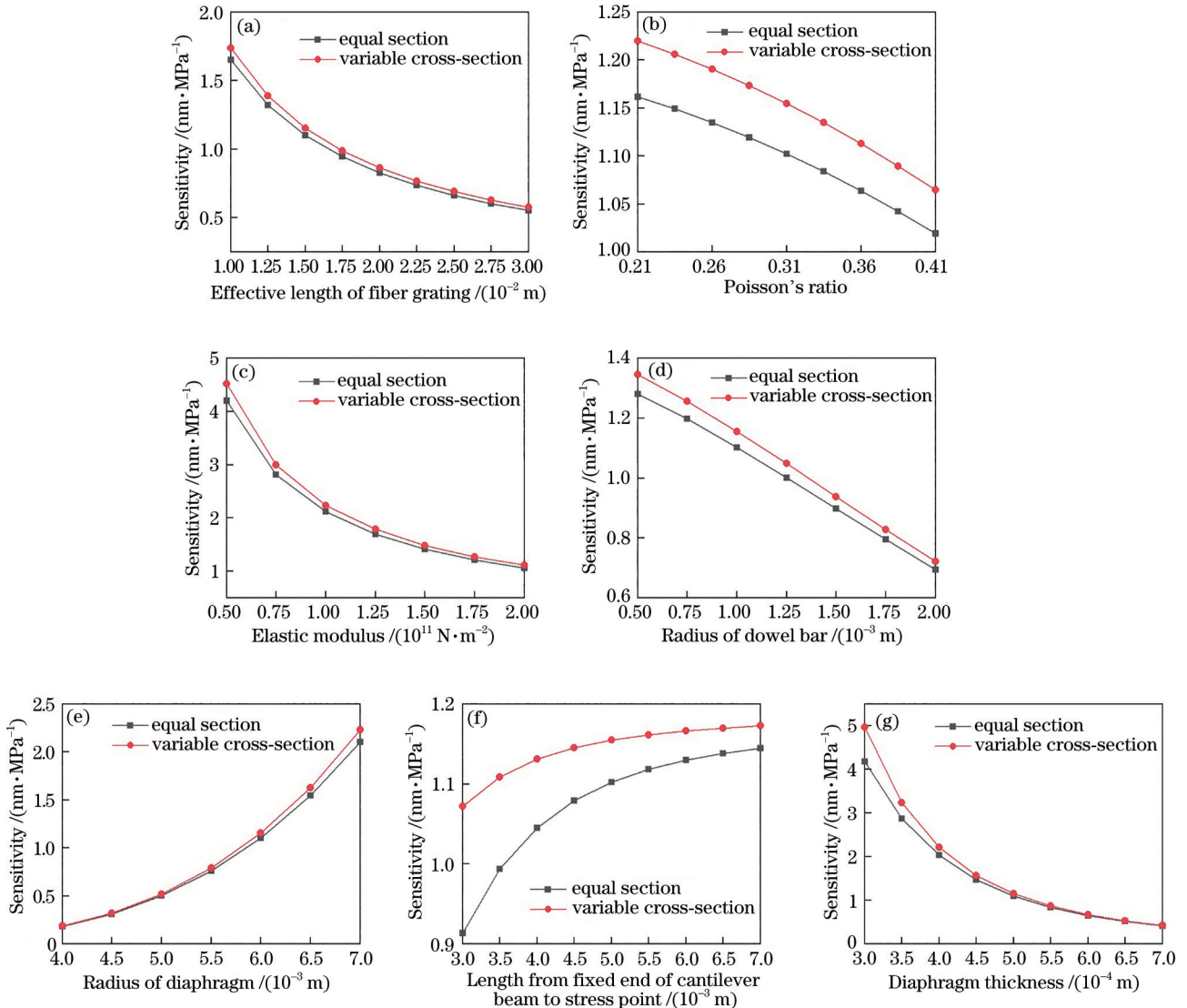


图 7 不同结构及材料参数与灵敏度的关系曲线。(a)光纤光栅有效长度;(b)泊松比;(c)弹性模量;(d)传力杆半径;(e)膜片半径;(f)固定端到受力点长度;(g)膜片厚度

Fig. 7 Relationship between sensitivity and parameters of different structures and materials. (a) Effective length of fiber Bragg grating; (b) Poisson's ratio; (c) elastic modulus; (d) radius of dowel; (e) radius of diaphragm; (f) length from fixed end to stressed point; (g) diaphragm thickness

5.2 材料参数的理论推导与有限元分析对比

为验证 5.1 节中数值分析的合理性,选取对传感器灵敏度影响较大的因素—膜片半径和膜片厚度,通过有限元方法分析这两个因素对灵敏度影

响,并与 5.1 节中数值分析结果进行了对比,如图 8 所示。从图中可以看出,当这两个结构参数变化时,有限元分析和数值分析的结果变化趋势基本一致。

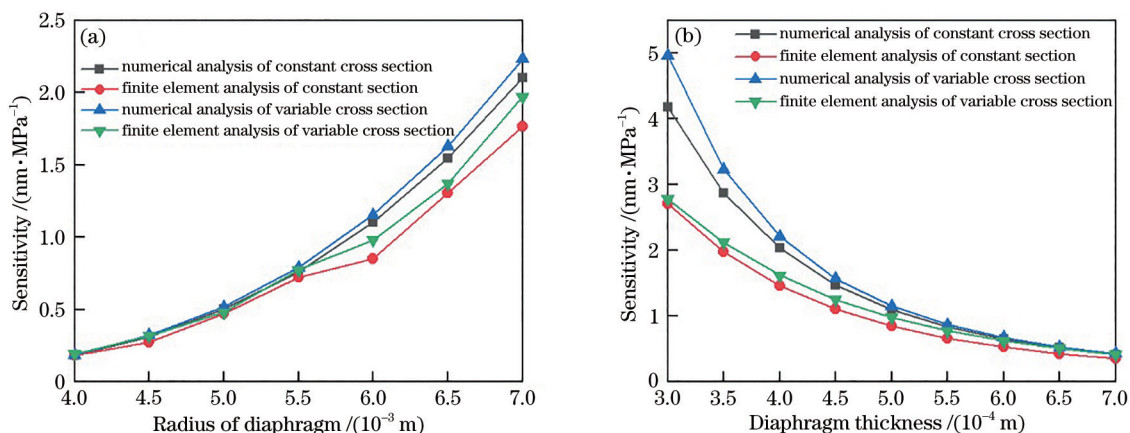


图 8 数值分析和有限元分析不同材料参数对灵敏度的影响曲线图。(a)膜片半径;(b)膜片厚度

Fig. 8 Comparison of influence curves of material parameters on sensitivity between numerical analysis and finite element analysis. (a) Radius of diaphragm; (b) diaphragm thickness

6 实验对比

所设计的结构中的光纤光栅使用聚合物氯丁橡胶进行封装,膜片、传力杆及悬臂梁使用不锈钢材料。变截面悬臂梁固定端较薄,所产生的弯矩较小;自由端较厚,且氯丁橡胶的弹性模量远小于不锈钢,因此受拉力影响较小,悬臂梁整体受力情况与杠杆结构类似,文献[23]研究了基于杠杆原理的光纤光栅压力传感器的实验分析。由于两者结构相似,因此通过有限元对两结构拟合结果进行了对比分析,如图 9 所示。

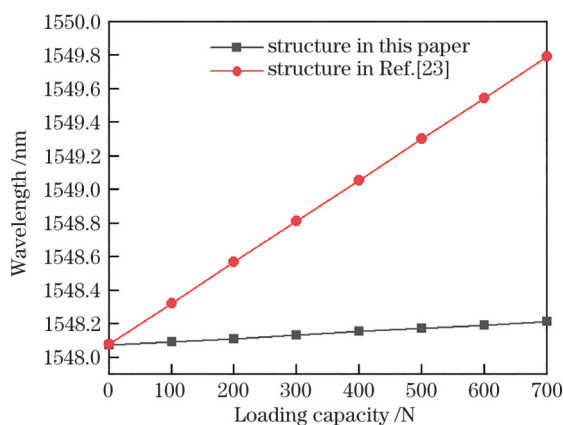


图 9 不同结构的力与波长拟合曲线对比图

Fig. 9 Comparison of force and wavelength fitting curves of different structures

由图 9 可知,在施加相同大小的力时,传感器灵敏度相对较高。在相同压力下时,文献[23]的传感器灵敏度为 2.239 nm/MPa,量程约为 15 MPa;传感器结构灵敏度 893.45 pm/MPa,量程是 35 MPa。本文设计的传感器量程较大。由于煤矿巷道初次

来压的判据为 35 MPa^[24],能够符合煤矿巷道监测所需量程。

仿真中施加的最大压力是 35 MPa。由图 10 可知,在量程范围内被测压力和光纤光栅的形变具有良好的线性,满足光纤光栅压力传感器的设计需求。

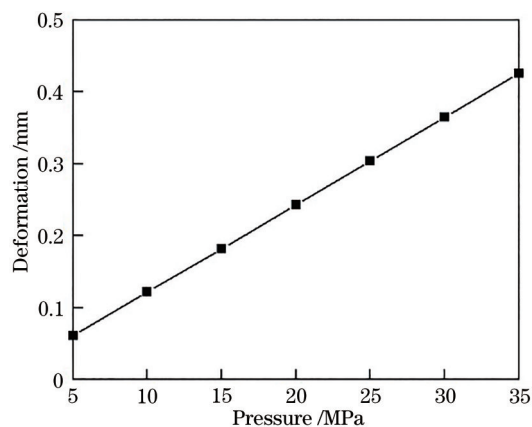


图 10 光纤光栅在不同压力下形变量曲线图

Fig. 10 Curve of fiber grating deformation under different pressures

7 结 论

设计了一种可以应用于煤矿下复杂环境的变截面悬臂梁式光纤光栅压力传感器,该传感器通过悬臂梁将光纤光栅的应变放大,通过有限元分析和理论推导得出,设计时应选用固定端厚度相对较小,自由端厚度相对较大的变截面梁结构。最终选定的变截面悬臂梁结构为固定端厚度为 0.5 mm,自由端厚度为 2 mm。传感器的灵敏度可达 893.45 pm/MPa,是裸光纤光栅压力灵敏度的 294 倍。应用数值分析

和有限元分析探究了不同结构及材料参数对两种不同悬臂梁结构灵敏度的影响。分析结果表明,在改变结构及材料参数后,变截面悬臂梁结构的灵敏度依然优于等截面悬臂梁。通过有限元分析与类似结构的对比,验证了本文传感器结构的合理性。

参 考 文 献

- [1] Lan H, Chen D K, Mao D B. Current status of deep mining and disaster prevention in China[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(1): 39-46.
蓝航, 陈东科, 毛德兵. 我国煤矿深部开采现状及灾害防治分析[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(1): 39-46.
- [2] Liang M F. Intelligent sensing theory and key technologies of multi-parameter fiber Bragg grating in coal mining[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
梁敏富. 煤矿开采多参量光纤光栅智能感知理论及关键技术[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- [3] Hao D Y, Cui Q L, He J, et al. Deformation characteristics and separation monitoring of layered roof roadway supported with bolts and cables[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(S1): 43-50.
郝登云, 崔千里, 何杰, 等. 锚杆锚索支护巷道层状顶板变形特征及离层监测研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(S1): 43-50.
- [4] Zhao Q F, Zhang N, Peng R, et al. Similarity simulation experimental study on abrupt collapse of roof separation in large cross-section argillaceous roadway[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(6): 1107-1114.
赵启峰, 张农, 彭瑞, 等. 大断面泥质巷道顶板离层突变垮冒演化相似模拟实验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(6): 1107-1114.
- [5] Mihailov S J. Fiber Bragg grating sensors for harsh environments[J]. Sensors, 2012, 12(2): 1898-1918.
- [6] Liang M F, Fang X Q, Wu G, et al. A fiber Bragg grating pressure sensor with temperature compensation based on diaphragm-cantilever structure[J]. Optik, 2017, 145: 503-512.
- [7] Zeng Y J, Wang J, Yang H Y, et al. Fiber Bragg grating accelerometer based on L-shaped rigid beam and elastic diaphragm for low-frequency vibration measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(12): 1206005.
曾宇杰, 王俊, 杨华勇, 等. 基于L形刚性梁与弹性膜片结构的低频光纤光栅加速度传感器[J]. 光学学报, 2015, 35(12): 1206005.
- [8] Zhao Y, He W Z, Tang Y C. Fiber Bragg grating multi-level strain sensor based on the structure of extendable rod[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2018, 39(8): 1065-1068, 1079.
赵勇, 何文正, 汤永超. 基于伸缩杆结构的光纤光栅多级应变传感器[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2018, 39(8): 1065-1068, 1079.
- [9] Berkoff T A, Kersey A D. Experimental demonstration of a fiber Bragg grating accelerometer[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1996, 8(12): 1677-1679.
- [10] Meng L, Jiang M S, Sui Q M, et al. Optical fiber grating temperature and pressure sensors in oil well measuring[J]. Optical Communication Technology, 2008, 32(11): 29-32.
孟玲, 姜明顺, 隋青美, 等. 石油测井光纤光栅温度压力传感器[J]. 光通信技术, 2008, 32(11): 29-32.
- [11] Wang X J, Zeng J, Liang D K, et al. Fiber Bragg grating pressure sensor for load monitoring of asphalt pavement[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2011, 22(2): 197-200.
王晓洁, 曾捷, 梁大开, 等. 用于沥青路面载荷监测的光纤光栅压力传感器[J]. 光电子·激光, 2011, 22(2): 197-200.
- [12] Zhao Y, Liao Y B, Lai S R. Simultaneous measurement of down-hole high pressure and temperature with a bulk-modulus and FBG sensor[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2002, 14(11): 1584-1586.
- [13] Zhao L, Jiang L, Li L Q. An optical fiber grating pressure sensor with composition structure[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2017, 39(1): 60-62, 66.
赵林, 姜龙, 李连庆. 一种组合结构光纤光栅压力传感器[J]. 压电与声光, 2017, 39(1): 60-62, 66.
- [14] Vorathin E, Hafizi Z M, Aizzuddin A M, et al. A highly sensitive multiplexed FBG pressure transducer based on natural rubber diaphragm and ultrathin aluminium sheet[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 106: 177-181.
- [15] Manuvinakurake M, Gandhi U, Mangalanathan U, et al. Design, fabrication and testing of fiber Bragg grating based fixed guided beam pressure sensor[J]. Optik, 2018, 158: 1063-1072.
- [16] Huang J, Zhou Z D, Tan Y G, et al. Design and experimental study of a Fiber Bragg grating pressure sensor[C] // Proceedings of the 2014 International Conference on Innovative Design and Manufacturing (ICIDM), August 13-15, 2014, Montreal, QC,

- Canada. New York: IEEE Press, 2014: 217-221.
- [17] Pachava V R, Kamineni S, Madhuvarasu S S, et al. A high sensitive FBG pressure sensor using thin metal diaphragm[J]. *Journal of Optics*, 2014, 43(2): 117-121.
- [18] Jiang S C, Cao Y Q, Sui Q M, et al. Research on the micro and high-precision fiber Bragg grating soil pressure sensor[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(4): 0405002.
蒋善超, 曹玉强, 隋青美, 等. 微型高精度光纤布拉格光栅土压力传感器研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(4): 0405002.
- [19] Leal A, Jr, Frizera A, Marques C. A fiber Bragg gratings pair embedded in a polyurethane diaphragm: Towards a temperature-insensitive pressure sensor [J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 131: 106440.
- [20] Zhang H T, Song W P, Wang Z L, et al. Numerical and experimental studies of high-sensitivity plug-in pressure sensor based on fiber Bragg gratings[J]. *Optical Engineering*, 2016, 55(9): 096104.
- [21] Liang L, Feng K, Zhu Z H, et al. A diaphragm FBG pressure sensor based on L-shaped cantilever structure [J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2018, 29(9): 938-943.
梁磊, 冯坤, 朱振华, 等. 基于 L 型悬臂梁的膜片式 FBG 压力传感器[J]. *光电子·激光*, 2018, 29(9): 938-943.
- [22] Wang L P. Method of deflection calculation of cantilever beam with variable cross section[J]. *Henan Science and Technology*, 2018(22): 122-124.
王利平. 一种变截面悬臂梁挠度计算方法研究[J]. *河南科技*, 2018(22): 122-124.
- [23] Sun L Y, Zhang M, Li C, et al. High sensitivity fiber Bragg grating pressure sensor experiment based on the principle of leverage[J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*, 2016, 32(1): 80-86.
孙立晔, 张嫚, 李闯, 等. 基于杠杆原理的高灵敏度光纤光栅压力传感器实验[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2016, 32(1): 80-86.
- [24] Zhai Z B. Research on the law of underground pressure behavior in 1303 (upper) fully mechanized face of Hudi coal mine[J]. *煤*, 2021, 30(3): 58-60.
翟子波. 胡底煤矿 1303(上)综采工作面矿压显现规律研究[J]. *Coal*, 2021, 30(3): 58-60.