# 预加张力对电容薄膜真空计感压膜片变形的影响

孟 岳<sup>1</sup>,陈叔平<sup>1\*</sup>,成永军<sup>2</sup>,孙雯君<sup>2</sup>,裴晓强<sup>2</sup>,贾春旺<sup>1</sup>,白彪坤<sup>1</sup>,金树峰<sup>1</sup> (1. 兰州理工大学石油化工学院,兰州 730050;2. 兰州空间技术物理研究所,兰州 730000)

摘要:针对电容薄膜真空计感压膜片在预加张力情况下的均布载荷-挠度特性,选择冯·卡门方程和 Beams 方程作为感压膜片理论模型,并结合 ANSYS Workbench 软件中的静力学模块进行非线性有限元仿真分析。结果表明:预加张力对感压膜片挠度的影响十分明显,膜片挠度随着预加张力的增加而下降;随着均布载荷和预加张力的增大,感压膜片挠度下降幅度减弱。同一均布载荷下,预加张力越大,其影响比例越大。当均布载荷不断增加、感压膜片挠度增大,预加张力引起的挠度变化在不断减弱,影响比例逐渐下降;感压膜片受 1 Pa 均布载荷发生初始变形时,13 MPa的预加张力对膜片挠度影响为 93%;当均布载荷超过 800 Pa 时,预加张力所带来的挠度影响不到整个感压膜片挠度变化的 35%;均布载荷为 1 000 Pa、预加张力为 7 MPa 时,其影响比例为 17.9%。利用实际电容薄膜真空计产品对仿真结果进行了初步验证。

关键词:电容薄膜真空计:感压膜片:预加张力;挠度特性

中图分类号:TB771

文献标志码:A

文章编号:1006-7086(2020)01-0031-06

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-7086.2020.01.005

## Effect of Pre-Tension on Deformation of Capacitive Diaphragm Vacuum Gauge

MENG Yue<sup>1</sup>, CHEN Shuping<sup>1\*</sup>, CHENG Yongjun<sup>2</sup>, SUN Wenjun<sup>2</sup>, PEI Xiaoqiang<sup>2</sup>,

JIA Chunwang<sup>1</sup>, BAI Biaokun<sup>1</sup>, JIN Shufeng<sup>1</sup>

(1. College of Petrochemical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China)

Abstract: According to the uniform load-deflection behavior of the pressure sensing diaphragm of capacitive diaphragm vacuum gauge under pre-tension conditions, Von Karman equation and the Beams equation are selected as the theoretical model of the pressure sensing diaphragm. And the nonlinear finite element simulation analysis is carried out in combination with the static module in ANSYS Workbench software. The results show that the pre-tension has a significant effect on the deflection of the pressure sensing diaphragm. The deflection of the diaphragm decreases with the increase of the pre-tension. With the increase of the uniform load and the pre-tension, the decrease of deflection of the pressure sensing diaphragm is weakened. Under the same uniform load, the greater the pre-tension, the greater the influence ratio. When the uniform load increases and the deflection of the pressure sensing diaphragm increases, the deflection caused by the pre-tension is decreasing, and the influence ratio is gradually decreased. When the pressure sensing diaphragm is initially deformed by the 1 Pa uniform load, the pre-tension of 13 MPa has a 93% influence on the deflection of the diaphragm; when the uniform load exceeds 800 Pa, the deflection caused by the pre-tension is less than 35% of the deflection of the entire pressure sensing diaphragm; The uniform load is 1 000 Pa, and the pre-stress is 7 MPa, the influence ratio is 17.9%. The simulation results are verified by using the real capacitive diaphragm vacuum gauge.

Key words: capacitive diaphragm vacuum gauge; pressure sensing diaphragm; pre-tension; deflection behavior

# 0 引言

真空度的测量主要由传感器及相应部件组成的真空测量装置完成。准确测量和控制真空度对生

产、生活、科学研究有着重要影响,对实验的成败和真空产品的质量起到关键的作用。真空测量技术在航空航天、电子工业、高能物理、核工业等领域得到了广泛应用[1],是真空技术的一个重要研究方向。

随着我国空间探测技术的发展,在人造卫星和载人航天工程的基础上进行深空探测,是逐步了解宇宙、太阳系和探求地球生命起源及演化过程的重要手段。由于火星独特的科学价值,近年来成为深空探测的首选目标,为实现我国对类地行星进行深入的探测活动,对真空压力的测量提出了新的要求<sup>[2]</sup>。在目前现有的真空计中,电容薄膜真空计具有结构紧凑、灵敏度高、稳定性好、测量值与气体成分无关、有较强的抗腐蚀性能及使用寿命长等优点,且作为低真空的参考标准被广泛应用于航天航空、科研、食药和核工业等领域<sup>[3-5]</sup>。其工作原理是:感压膜片在压差作用下产生位移,引起固定电极和膜片之间距离的变化,导致电容量发生改变,再将电容的变化转换成电流或电压的变化,生成输出信号,利用电学方法间接测量得到压力值<sup>[5-7]</sup>。

感压膜片作为电容薄膜真空计反应压力变化的敏感部件,其力学特性直接关系到真空计测量的准确性以及工作性能。预加张力的控制是感压膜片处理工艺中至关重要的一环,膜片采用自熔焊工艺焊接固定在膜片架上,预加张力的大小关系到膜片后续力学特性,其内部张力的均匀性和一致性也直接影响到测量的准确度和长期稳定性<sup>[8]</sup>。本文以电容薄膜真空计感压膜片为研究对象,结合圆薄板大挠度理论和 ANSYS Workbench 有限元分析软件,在考虑预加张力的情况下,对感压膜片进行理论建模与仿真分析,研究了预加张力对感压膜片挠度的影响,为后续的实验研究提供一定的参考。

#### 1 感压膜片大挠度理论分析

在均布载荷作用下,感压膜片挠度变形远大于 其厚度,膜片均布载荷-挠度特性表现为非线性,结 合目前主要的冯·卡门圆板大挠度模型和球壳模 型,对感压膜片大挠度特性进行理论分析。

## 1.1 冯·卡门圆板大挠度模型

冯·卡门于 1910 年建立了描述圆板几何非线性弯曲数学模型,将其用于均布载荷下周边固支的圆薄膜中心大挠度变形问题,奠定了圆薄板压强挠度分析的基础。式(1)为圆薄板轴对称大挠度非线性微分方程组<sup>[9]</sup>:

$$\begin{cases} D \nabla^4 \omega = t \left( \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} - 2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 \omega}{\partial x \partial y} \right) + q \\ \nabla^4 \phi = E \left[ \left( \frac{\partial^2 \omega}{\partial x \partial y} \right)^2 - \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right] \end{cases}$$

(1)

变换为极坐标:

$$\begin{cases}
D \frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} \left\{ r \frac{d}{dr} \left[ \frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} \left( r \frac{d\omega}{dr} \right) \right] \right\} - \frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} \left( r N_r \frac{d\omega}{dr} \right) = q \\
r \frac{d}{dr} \left[ \frac{1}{r} \frac{d}{dr} (r^2 N_r) \right] + \frac{Et}{2} \left( \frac{d\omega}{dr} \right)^2 = 0
\end{cases}$$

式中: $D = \frac{Et^3}{12(1-\mu^2)}$ 为薄膜抗弯刚度;E 为材料弹性模量;t 为薄膜厚度; $\mu$  为材料泊松比; $\nabla$ 为哈密顿算子; $\omega$  为薄膜中心挠度; $\phi$  为应力函数;q 为均布载

荷;r为圆薄膜半径;N,为中面内力。

对式(1)、式(2)求解非常困难,在实际应用中采取一些有效的近似,如利用变分法将非线性微分方程组化为非线性代数方程。应用 Ritz 法求解圆薄板问题时,通过调整函数中的待定常数获取逼近于真解的近似解,则感压膜片中心挠度  $\omega$  可进一步由式(3)求得,式中符号同式(2):

$$\frac{5.33\omega}{1-\mu^2} + \frac{2.83\omega^3}{(1-\mu^2)t^2} - \frac{qr^4}{Et^3} = 0$$
 (3)

## 1.2 球壳模型

1959年,Beams<sup>[10]</sup>最早提出通过鼓泡试验测量薄膜的力学性能,提出相应的球壳模型,即当圆薄膜受均布载荷时薄膜会发生均匀对称的膨胀。预加张力影响感压膜片弯曲变化,而弯曲曲率半径与薄膜材料性质、几何尺寸密切相关,因此感压膜片力学行为直接影响传感器性能。当考虑预加张力的影响时,其挠度特性可由式(4)确定:

$$q = \frac{8Et}{3(1-\mu)r^4}\omega^3 + \frac{4\sigma_0 t}{r^2}\omega$$
 (4)

式中: $\sigma_0$ 为预加于感压膜片的张力。

#### 2 数值计算

## 2.1 静力学分析方法及几何非线性问题

# (1)静力学分析方法

根据经典力学理论,物体的动力学通用方程为:  $[M]\{x''\} + [C]\{x'\} + [K]\{x\} = \{F(t)\} (5)$ 式中: [M]为质量矩阵; [C]为阻尼矩阵, [K]为刚度矩阵;  $\{x\}$ 为位移矢量;  $\{F(t)\}$ 为力矢量;  $\{x'\}$ 为速度矢量;  $\{x''\}$ 为加速度矢量。

在线性结构分析中,与时间 t 相关的量都被忽略,式(5)简化为:

$$[K] \{x\} = \{F\} \tag{6}$$

## (2) 几何非线性问题

许多工程问题中结构的刚度是变化的,必须用 非线性理论解决,而几何非线性问题就是非线性理 论中的一类。几何非线性理论的核心是结构的几何 形状或位置发生改变引起结构刚度矩阵变化,结构 的平衡方程须建立在变形后的位置上。由于感压膜片所选材料的弹性模量值很大,在均布载荷作用下发生大位移时不会出现很大的应变,因此感压膜片的几何非线性问题是大位移小应变问题。从有限元理论来讲,结点坐标随载荷的增加发生较大变化,各个单元的长度和倾角等几何特性也变化较大,刚度矩阵成为几何变形的函数,平衡方程式(6)不再是线性关系。运用位移理论,记入结构位移的影响,在变形后的几何位置上给出平衡条件,载荷和位移将不再是线性关系。对于这种由于大位移引起的几何非线性问题,可以采用带动坐标的混合法对结构的几何位置进行修正。得到式(7):

$$\lceil K(x) \rceil \{x\} = \{F(t)\} \tag{7}$$

式(7)说明单元刚度矩阵 [K] 是单元结点位移列阵的函数。单元结点力  $\{F\}$  与时间相关,且可以用节点位移来表达。

# 2.2 几何模型

以一款实际电容薄膜真空计产品为例,编号为 CDG-1,其测量上限为 133 Pa,感压膜片直径为 42 mm,厚度为 35 μm。膜片材料为进口的镍基合金 (InconelX-750),该材料具有良好的耐腐蚀性、抗氧化性、延展性和强度,在低温、室温及高温环境下都具备很好的机械性能<sup>[11]</sup>,可以制成足够薄的薄片。材料的弹性模量为 214 GPa,泊松比为 0.29,屈服强度为 515 MPa,仿真过程中假设材料各向同性。

感压膜片形状规则,且具有高度的空间轴对称特征,但其微米级的厚度也导致了膜片具有很大的宽厚比。为提高数值模型计算的收敛性,适应网格程序要求以缩短求解运行时间,考虑软件精度及计算机运算性能等一系列因素,通过 Design Modeler建模软件对膜片进行二维几何建模,将模型切分为四个部分后再将其合并,以提高网格质量。使用自动网格划分,单元质量总体分布于 0.836~0.967内,其中绝大部分区域单元质量为 0.955,通过统计得到平均单元质量为 0.952,说明网格划分合理。网格单元数为 10 289,节点数为 10 414。感压膜片网格划分模型如图 1 所示。

#### 2.3 边界条件

针对图 1 的网格划分模型,应用 ANSYS 软件静力学模块进行大挠度分析,并启用 Large Deflection命令以优化非线性求解计算的准确性。选取膜片侧面施加固定约束,在膜片两侧施加均布载荷,一面为参考腔压力  $10^{-4}$  Pa,另一面为待测压力。为膜片定义局部坐标系,指定 Type 为 Cylindrical,调整 Z 轴沿轴心方向,X 轴沿薄膜径向,施加径向载荷为感压膜片预加张力。

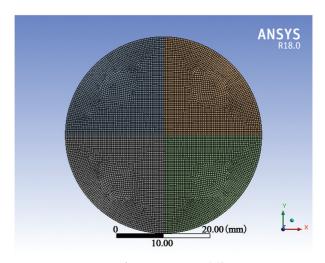


图 1 感压膜片网格划分模型

Fig. 1 Meshing model of pressure sensing diaphragm

# 3 计算结果分析

为便于仿真计算,设该感压膜片被测端真空压力为1~1000 Pa,在此范围内以1 Pa 为起点,选取200 Pa、400 Pa、600 Pa、800 Pa、1000 Pa 共6组均布载荷分别施加于感压膜片进行计算,并依次利用Ritz 法和式(4)对所述的感压膜片进行不同均布载荷下变形特性解析,与 ANSYS 软件求解的仿真值进行对比验证。

# 3.1 无预加张力情况下感压膜片挠度特性分析

图 2 为无预加张力时的感压膜片挠度分布云图,可以直观清晰地反映感压膜片挠度的分布特征。由图 2 可知,从膜片边缘沿半径方向至膜片圆心,随着约束端距离的增加,挠度逐渐增大;由于圆形感压膜片中心沿半径方向的约束端距离相等,云图上显示出了较为均匀的挠度分布。

图 3 为不同均布载荷下感压膜片截面挠度分布图,挠度最大处位于感压膜片圆心位置;膜片边缘存在固定约束,因此挠度最小。

在无预加张力的情况下,将六组不同均布载荷下仿真得到的中心挠度值( $\omega$ ')与由式(3)求得的理论挠度值( $\omega$ )进行比较,得到相对误差( $\delta$ ),如表 1 所列。

从表1可知,仿真值与理论计算值基本一致,匹配良好,建立的数值模型具有一定的可靠性。

# 3.2 有预加张力情况下感压膜片挠度特性分析

在6组均布载荷下,对感压膜片分别施加7 MPa、9 MPa、11 MPa、13 MPa 的预加张力仿真得到的中心挠度值( $\omega_1',\omega_2',\omega_3',\omega_4'$ )与由式(4)求得的理论挠度值( $\omega_1,\omega_2,\omega_3,\omega_4$ )比较得到相对误差( $\delta$ ),如表2所列。

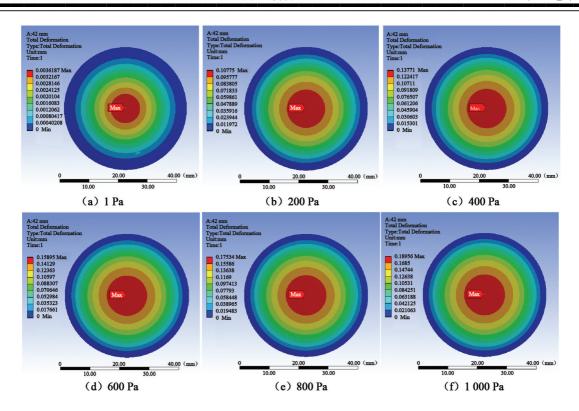


图 2 无预加张力时感压膜片挠度分布云图

Fig. 2 The deflection distribution nephogram of pressure sensitive film without pretension

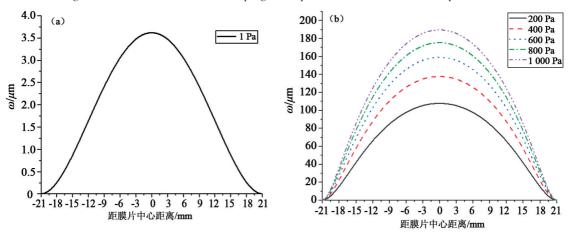


图 3 不同均布载荷下感压膜片截面挠度分布曲线

Fig. 3 The deflection distribution of pressure sensing diaphragm section under different uniform loads

表 1 无预加张力时感压膜片挠度比较

Tab. 1 Comparison of deflection of pressure sensing diaphragm without pre-tension

均布载荷/Pa	$\omega/\mu\mathrm{m}$	$\omega'/\mu\mathrm{m}$	δ/%
1	3.622	3.619	0.083
200	112.433	107.75	4.165
400	144.666	137.71	4.808
600	166.992	158.95	4.816
800	184.659	175.34	5.047
1000	199.525	189.56	4.994

由表 2 可知,当预加张力一定、感压膜片受较小均布载荷时,挠度变化很小,此时仿真值与理论值相对误差较大。随着均布载荷增加,挠度增大,相对误差逐渐减小。当感压膜片挠度变化很小时,相对误差很大的主要原因是计算机精度和仿真计算中网格划分数量有限所带来的累积误差。

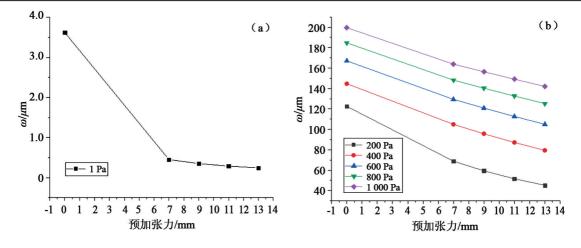
图 4 为感压膜片在不同均布载荷下受不同预加 张力挠度变化曲线。由图 4 可知,预加张力对感压 膜片挠度影响十分明显,在同一均布载荷下,随着预加张力增加,感压膜片挠度呈下降趋势。随着均布

载荷和预加张力的增大,膜片挠度变化率减小、下降 幅度也减小。当膜片受 1 Pa 均布载荷时,施加预张 力使其挠度出现陡降,之后随着预加张力的增大趋 于平缓,挠度变化很小。

		表 2	月	坝加!	张刀时!	愍	斤挠	度は	纹纹	
		_			_					

Tab	•	Commonicon of	deflection	of management	aamaima	dianhuaam	with pre-tension	_
ran.	4	Comparison of	aenecuon	orbressure	sensing	ulabiiragiii	with pre-tension	1

均布载荷	预加张力7 MPa		预加张力 9 MPa		预加张力 11 MPa			预加张力 13 MPa				
/Pa	$\omega_1/\mu\mathrm{m}$	$\omega_1^{\;\prime}/\mu\mathrm{m}$	δ/%	$\omega_2/\mu\mathrm{m}$	$\omega_2'/\mu\mathrm{m}$	δ/%	$\omega_3/\mu$ m	$\omega_3'/\mu\mathrm{m}$	δ/%	$\omega_4/\mu\mathrm{m}$	$\omega_4^{\;\prime}/\mu\mathrm{m}$	δ/%
1	0.450	0.3636	19.21	0.350	0.2915	16.71	0.2863	0.2436	14.91	0.2423	0.209	13.74
200	68.801	62.079	9.77	59.393	53.008	10.75	51.586	46.004	10.82	45.220	40.178	11.15
400	104.89	99.362	5.27	95.669	89.584	6.36	87.138	80.82	7.25	79.387	73.115	7.90
600	129.30	124.87	3.43	120.79	115.69	4.22	112.63	107.12	4.89	104.91	98.983	5.65
800	148.19	144.74	2.33	140.27	136.03	3.02	132.57	127.77	3.62	125.15	119.89	4.20
1000	163.82	160.87	1.80	156.38	152.31	2.60	149.09	144.99	2.75	141.98	137.38	3.24

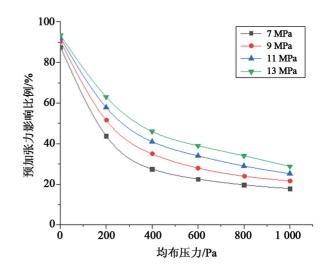


不同预加张力下感压膜片挠度变化曲线 Fig. 4 The deflection of the pressure sensing diaphragm under different pre-tension

图 5 为预加张力对感压膜片挠度影响比例趋势 图。随着均布载荷的不断增加,膜片挠度在增大的 同时,因预加张力引起的挠度变化在不断减小,预加 张力影响比例逐渐下降。同一均布载荷下,预加张 力越大,则其影响比例越大。感压膜片受 1 Pa 均布 载荷发生初始变形时,7 MPa、9 MPa、11 MPa、 13 MPa预加张力对膜片挠度影响分别为 87.58%、 90.34%、92.1%、93%, 预加张力的牵拉使得膜片挠 度较小时更难发生形变。当均布载荷超过 800 Pa 时,预加张力所带来的挠度影响不足整个感压膜片 挠度变化的35%;均布载荷为1000 Pa、预加张力为 7 MPa 时,其影响比例为 17.9%。

# 实验验证

结合上述仿真结果,在静态膨胀真空校准装置 上对选取的电容薄膜真空计(CDG-1)进行了测试。



预加张力对感压膜片挠度的影响曲线

Fig. 5 The effect of pre-tension on the deflection of the pressure sensing diaphragm

调整 CDG-1 电控单元,设定当感压膜片与固定电极接触时仪表显示单元的数据不发生示值变化。根据生产厂家提供的相关参数,得知电容薄膜真空计 CDG-1 感压膜片的预加张紧力为11 MPa,感压膜片与固定电极的名义间距为 50  $\mu$ m,即感压膜片两侧无压差时膜片与固定电极间的距离约为 50  $\mu$ m。如图 6 所示,当 CDG-1 被测端压力达到 198.6 Pa 时,继续升高被测端压力,发现仪表显示数值不再发生变化,可知此时 CDG-1 的感压膜片已经与固定电极接触,膜片中心挠度约为 50  $\mu$ m。由表 2 中的数据可知,当被测端压力为 200 Pa 时,感压膜片仿真挠度为 46.004  $\mu$ m,这一结果与实际测试结果基本吻合,验证了仿真计算的正确性。



图 6 电容薄膜真空计产品测试图
Fig. 6 Schematic diagram of product test ofcapacitive
diaphragm vacuum gauge

#### 5 结论

本文以电容薄膜真空计感压膜片为研究对象, 对金属感压膜片的均布载荷-挠度特性开展分析研究。依据弹性力学薄膜理论,分析感压膜片在受预加张力时的几何非线性问题,建立了电容薄膜真空计感压膜片有限元模型,并对其进行仿真分析,取得了如下结论:

(1)运用 ANSYS Workbench 软件能对电容薄膜 真空计感压膜片的非线性行为进行有效分析,仿真 所得的均布载荷-挠度特性与理论计算结果基本相符。

- (2)预加张力对感压膜片挠度的影响十分明显,膜片挠度随着预加张力的增加而下降;随着均布载荷和预加张力的增大,膜片挠度变化率减小、下降幅度也减小。
- (3)在同一均布载荷下,预加张力越大,其影响比例越大,但随着均布载荷的不断增加、膜片挠度的增大,预加张力引起的挠度变化在不断减小,影响比例逐渐下降。
- (4)通过实际产品测试,初步验证了仿真结果的可靠性以及与实际工况的一致性,仿真计算对实际产品的设计具有一定的理论指导和借鉴作用。

#### 参考文献:

- [1]卢耀文,陈旭,李得天,等. 便携式真空计校准装置[J]. 真空科学与技术学报, 2013, 33(5): 462-467.
- [2]王凡,崔宏敏,宗义仲,等. 电容式薄膜真空压力传感器设计[J]. 传感器与微系统, 2017, 36(3): 84-86, 90.
- [3]杨春林,闫金锁. 数字式电容薄膜绝对压力变送器的设计研发[J]. 真空,2017,54(5):19-21.
- [4]丁基敏. 电容薄膜式绝对压力变送器的发展[J]. 真空, 2001,38(4): 8-10.
- [5]李得天, 孙雯君, 成永军, 等. MEMS 型电容薄膜真空计研究进展[J]. 真空与低温, 2017, 23(2): 63-67.
- [6]李琦, 冯驹先, 董中林, 等. 适应复杂环境的真空计[J]. 真空科学与技术学报, 2016, 36(11): 1316-1319.
- [7] NALLATHAMBI A, SHANMUGANANTHAM T. Design of Diaphragm Based MEMS Pressure Sensor with Sensitivity Analysis for Environmental Applications [J]. Sensors & Transducers, 2015, 188(5):48.
- [8] BISWAS P V, KIM H Y, AHN J H. The effect on deflection of steel diaphragm of pressure sensor due to change in boundary condition in the welded region[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2017, 31 (4): 1921 1925.
- [9]徐芝纶. 弹性力学[M]. 下册.北京: 高等教育出版社, 2006.
- [ 10 ] BEAMS J W. The structure and properties of thin film [ M ]. New York Wiley and Sons, 1959.
- [11] 孙雯君, 冯焱, 马奔, 等. 小型电容薄膜真空规的设计 [J]. 真空与低温, 2012, 18(4): 232-234.