

组装式圆膜片压强传感器的有限元分析和性能研究

□徐国欣

【摘要】本文剖析了一款组装式圆膜片压强传感器内的应力应变状况，并介绍了在实际制作过程中出现的可能影响传感器性能的因素。

【关键词】圆膜片压强传感器；径向应力；切向应力；径向应变；切向应变

文献标识码：B

文章编号：1003-1870（2023）03-0027-03

概述

电阻应变式压强传感器是液气体压强测试中应用得最多的一种传感器，按结构分主要有圆筒式压强传感器^[1]和圆膜片压强传感器两种，本文结合笔者多年生产实践经验并通过有限元分析，对组装式圆膜片压强传感器进行理论分析与探讨。

1 组装式圆膜片压强传感器简介

圆膜片压强传感器是指用圆形薄膜片来感压检测压强的传感器。图1是常用的组装式圆膜片压强传感器的组成示意图。其核心部件为具有感压薄膜片的弹性体部件3，它通过O形圈4放入底座5，再通过压铁2由压盖1压紧固定，当部件3的膜片下平面受压时膜片的另一面上的圆膜应变计（应变花）感压产生电阻值的变化，通过惠斯登电桥转换成电信号。

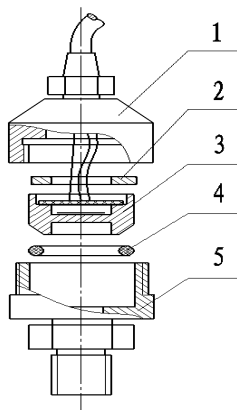


图1 组装式圆膜片压强传感器示意图

2 对一款量程为20MPa的圆膜片压强传感器的有限元分析

图2是量程为20MPa圆膜片压强传感器的弹性体示意图，在对它进行有限元分析后，取膜片的上平面过中心的路径L为研究对象，得到弹性体在受到20MPa均布压强时，圆膜片上贯穿中心的路径上的切向应力 σ_r 和径向应力 σ_t 的分布图如图3所示（图中 σ_r 为上面一条），得到切向应变 ε_r 和径向应变 ε_t 的分布图如图4所示（图中 ε_r 为上面一条）。由图3和图4可知，膜片中心是最大切向应力点达 285.8N/mm^2 ，该点最大切向应变为 $971\mu\varepsilon$ 。膜片直径20mm的圆周上的最大径向应力为 -286.7N/mm^2 ，该点的最大径向应变为 $-1310\mu\varepsilon$ 。进一步读取有限元分析值可得，在圆膜片直径 $2\sim 8\text{mm}$ 之间，圆环面积上的平均切向应变为 $899\mu\varepsilon$ ，在直径为 $14\sim 19\text{mm}$ 之间，圆环面积上的平均径向应变为 $-657\mu\varepsilon$ ，并查得径向应变为零的点距膜片中心 6.16mm 。这些数据说明此弹性体采用外径20mm的应变花是适宜的。

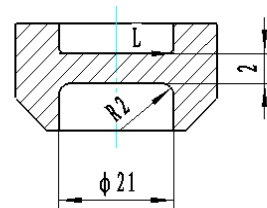


图2 20MPa传感器弹性体示意图

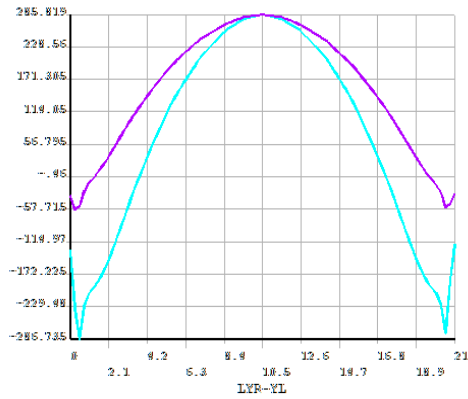


图3 路径L- σ_τ 和 σ_r 的分布图

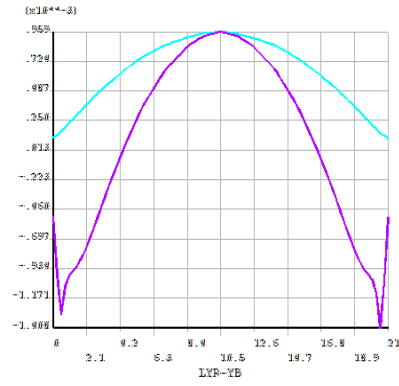


图4 路径L- ϵ_τ 和 ϵ_r 分布图

3 圆膜片中应力应变的理论计算

据参考文献^[2]，当弹性体膜片半径为 R ，膜片厚为 h ，载荷为 P 时，圆膜片中心最大切（径）向应力为

$$\sigma_\tau = \sigma_r = \frac{3R^2(1+\mu)P}{8h^2} = \frac{3 \times 10.5^2(1+0.3) \times 20}{8 \times 2^2} = 268.7 \text{ N/mm}^2$$

最大切（径）向应变为

$$\epsilon_\tau = \epsilon_r = \frac{3R^2(1-\mu^2)P}{8Eh^2} = \frac{3 \times 10.5^2(1-0.3^2) \times 20}{8 \times 206000 \times 2^2} = 913.2 \mu\epsilon$$

膜片上距中心为 $r=10$ 的点的径向应力

$$\sigma_r = \frac{3[R^2(1+\mu)-r^2(3+\mu)]P}{8h^2} = \frac{3 \times [10.5^2(1+0.3) - 10^2(3+0.3)] \times 20}{8 \times 2^2} = -350 \text{ N/mm}^2$$

该点的径向应变为

$$\epsilon_r = \frac{3(1-\mu^2)(R^2-3r^2)P}{8Eh^2} = \frac{3 \times (1-0.3^2) \times (10.5^2 - 3 \times 10^2) \times 20}{8 \times 206000 \times 2^2} = -1572 \mu\epsilon$$

径向应变为零的点到中心的理论距离 $r=R/\sqrt{3}$ ，
由 $R=10.5$ 得 $r=6.06\text{mm}$

上述理论计算值和有限元分析所得的值汇总于表1。由表1可知，有限元分析所得的最大径向应力和应变的绝对值明显小于按参考文献^[2]的理论计算值，其原因是作为一个实际的传感器，为防止应力集中在图2中加了 $R=2\text{mm}$ 的圆角，使得在明显减缓膜片外周径向应力尖峰值的同时减小了靠近外周的径向应力。研究发现，当膜片与圆环折角处加上圆弧后既明显减小膜片外周边的径向应力，同时又能增加膜片中心的应力值，相当于把这条倒U形曲线上移，但膜片中心所增加的应力值要小于膜片边缘所减少的应力值。

表1 文献^[2]的理论计算值和有限元分析所得的值汇总表

项目	参考文献 ^[2] 理论值	有限元值
最大切向应力 σ_τ (N/mm ²)	268.7	285.8
最大切向应变 ϵ_τ ($\mu\epsilon$)	913.2	971
最大径向应力 σ_r (N/mm ²)	-350	-286.7
最大径向应变 ϵ_r ($\mu\epsilon$)	-1572	-1310
径向应变为零点与圆心距离	6.06	6.16

4 弹性体结构对力学特性的影响

为研究弹性体结构对力学特性的影响，笔者建立了在弹性体非承压面无附加圆环的NY、加4mm高的圆环的LY和加12mm高的圆环的HY三种模块（见图5），分别进行有限元分析后得到膜片中心切向应力和外周边径向应力的数据汇于表2。由表2数据可知，弹性体上部从无圆环的平面到逐步加上增高圆环时，膜片中心的切向应力逐渐减小，膜片外周边的径向应力的绝对值快速增加，把整条倒U字形曲线向下拉，径向应变为零的点与中心的距离逐渐减小，与理论计算值逐渐逼近。上部无外加圆环的NY形弹性体的优点是机加工方便，可在平面贴应变片易于打磨，但非线性严重一般并不采用。在其上加4mm高的圆环时性能已大为提高，此后再增高，虽仍有效果，但渐趋不明显，只要达到膜片上下圆环刚度相匹配就行。进一步的研究发现，当把图2弹性体中的倒圆半径从2mm减至0.5mm时，其最大径向应力从 -286N/mm^2 变为 -445N/mm^2 （见图6），增加比例超过1.5倍。过大的应力集中会造成传感器的不稳定性甚至损坏，可见过渡圆弧在传感器设计中十分重要。过渡圆弧 R 值增加同时，也会降低应变花所检测到的应变值。当倒圆半径 R 从0.5mm增至2mm时，分别计算这二种弹性体有限元分析中应变花检测部位的平均应变值下降达7%~9%FS。

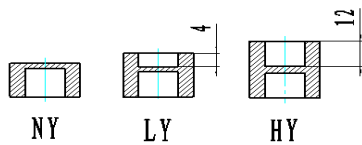


图5 三种模块示意图

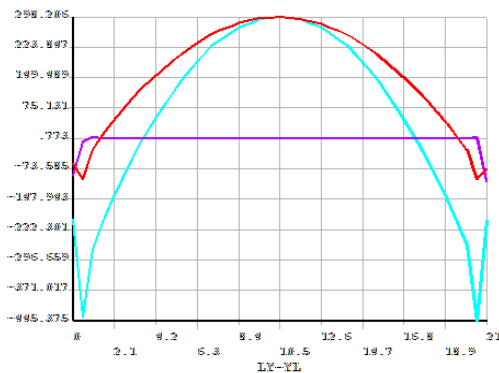


图6 倒圆半径0.5mm的弹性体路径L- σ_t 和 σ_r 的分布图

表2 三种模块有限元值汇总表

项目	NY	LY	HY
膜片中心切向应力	306.8	285.8	276.9
膜片外周径向应力	-171	-286.7	-311.1
径向应变为零点与圆心距离	6.46	6.16	6.07

5 弹性体固置条件变化对力学性能的影响

为防止泄漏，弹性体与底座之间需用橡胶密封。笔者曾试用平橡胶片密封，结果出现仪表显示反应很慢且不稳定，还产生严重的滞后现象。最终选择在弹性体下部加外倒角用O形圈密封的办法。在压紧弹性体时压铁对弹性体受力点变化会对传感器输出产生影响，笔者有意让压铁对弹性体的压紧点从弹性体圆环的外周逐步移向内周。实测发现，传感器灵敏度变化可达2%~3%FS以上，同时零点输出也发生变化。压紧力值的变化也会使传感器灵敏度发生变化，同时对线性和滞后都有影响。这些试验说明，组装式圆膜片压强传感器必须用规定的力矩组装，组装后不宜随便拆装。但是由于环境温度或被测介质的温度以及振动等因素，都会影响传感器在组装时的夹紧力。因此，这种组装式圆膜片压强传感器的实际使用精度必定低于出厂标定精度。

6 结束语

本文通过对一款组装式圆膜片压强传感器中的弹性体进行的有限元分析，揭示了弹性体内真实的应力分布，为这类传感器的设计提供了有效的依据。这种传感器由于结构简单，加工方便，很适宜批量生产。本文又通过实测数据，揭示了这种传感器的结构缺陷，因此必须有严格的组装工艺和规范的工装，才能保证传感器的综合性能。

参考文献

- [1] 徐国欣. 圆筒式压强传感器的有限元分析[J]. 衡器, 2022.12.
- [2] 陶宝祺, 王妮. 电阻应变式传感器[J]. 北京: 国防工业出版社, 1993.

作者简介

徐国欣, 男, 汉族, 浙江余姚, 工程师, 机械专业毕业。曾任余姚传感器厂技术科长, 长期从事电阻应变式传感器和智能仪表的设计制造工作。