

# 石英压电谐振式力学传感芯片

## ——芯片组装与推力测试实验

巫晟逸<sup>1</sup>, 张盼<sup>1</sup>, 李坤<sup>1</sup>, 刘秋实<sup>1</sup>, 丁岗寅<sup>1</sup>, 梁佳辉<sup>1,2</sup>, 陈庆盈<sup>3</sup>, 赵长春<sup>4</sup>, 赵岷江<sup>1</sup>

<sup>1</sup>台晶(宁波)电子有限公司, 浙江 宁波

<sup>2</sup>宁波大学机械工程与力学学院, 压电器件技术实验室, 浙江 宁波

<sup>3</sup>中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 先进制造技术研究所, 浙江 宁波

<sup>4</sup>北京航空航天大学宁波创新研究院, 浙江省先进无人飞行系统重点实验室, 浙江 宁波

收稿日期: 2026年1月19日; 录用日期: 2026年2月20日; 发布日期: 2026年2月28日

### 摘要

本实验测试石英力学传感芯片(QCR)在不同组成胶材与金属膜条件下, 对于压力与推力测试结果的讨论, 压力测试结果与胶材固化条件有高相关性, 推力测试结果发现其金属镀膜的存在可提高推力上限值, 达到了5.641 kgf, 对于整体传感器性能的优化有极大帮助。

### 关键词

石英压电晶体, 谐振式, 力学传感器, 推力测试

# Quartz Piezoelectric Resonant Force Sensor Chip

## —Chip Assembly and Thrust Test Experiments

Chengyi Wu<sup>1</sup>, Pan zhang<sup>1</sup>, Kun Li<sup>1</sup>, Qiushi Liu<sup>1</sup>, Gangyin Ding<sup>1</sup>, Jiahui Liang<sup>1,2</sup>, Qingyin Chen<sup>3</sup>, Changchun Zhao<sup>4</sup>, Minjiang Zhao<sup>1</sup>

<sup>1</sup>TXC (Ningbo) Corporation, Ningbo Zhejiang

<sup>2</sup>Piezoelectric Device Laboratory, School of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo Zhejiang

<sup>3</sup>Institute of Advanced Manufacturing Technology, Ningbo Institute of Material Technology and Engineering, Ningbo Zhejiang

<sup>4</sup>Key Laboratory of Advanced Unmanned Aerial Systems of Zhejiang Province, Ningbo Institute of Technology, Beihang University, Ningbo Zhejiang

Received: January 19, 2026; accepted: February 20, 2026; published: February 28, 2026

文章引用: 巫晟逸, 张盼, 李坤, 刘秋实, 丁岗寅, 梁佳辉, 陈庆盈, 赵长春, 赵岷江. 石英压电谐振式力学传感芯片[J]. 传感器技术与应用, 2026, 14(2): 269-277. DOI: 10.12677/jsta.2026.142027

## Abstract

This study examines the pressure and thrust response of a quartz mechanical sensing chip (QCR) under varying adhesive formulations and metal coating conditions. The pressure test outcomes are closely tied to the curing parameters of the adhesive material. In thrust testing, the presence of a metal coating was found to increase the maximum thrust capacity to 5.641 kgf, demonstrating a substantial benefit for overall sensor performance enhancement.

## Keywords

Quartz Piezoelectric Crystal, Resonant, Force Sensors, Thrust Test

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

石英压电谐振式力学传感器(Quartz Crystal Piezoelectric Resonant Force Sensor, QCR)作为高精度测量的核心敏感组件,其整体性能除了敏感芯片(Sensor Head)本身所影响以外,也与其外部接口的力学能量传递效率有关,如敏感芯片与弹性体之间的连接界面,直接影响了力学传递路径的耦合程度,在传统力学传感器的组装技术中,称之为安装工艺[1]-[3]。安装工艺中主要角色是粘贴层。粘贴层的质量直接决定了整体传感器测量精度、频响特性、灵敏度、长期稳定性和可靠性等性能。不当的粘贴方式会导致额外的机械阻抗,造成信号衰减、基线漂移甚至传感器完全失效。理想的粘贴层可达到低能量损耗,弹性体承受的力与应变可成为线性传递,在刚性与弹性之间取得优化比例。如粘贴层的厚度控制不当,或是刚性与弹性程度未能优化,则会导致力学能量的非线性传递,造成信号衰减与精度、灵敏度等功能下降。举例来说,粘贴层通常为环氧树脂胶体材料,利用胶体的沾粘特性,将不同物体连接,形成一界面,其具备高弹性模量,可维持高刚性与力学能量传递效率。除了胶体外,可连接两种物体的方法包括螺丝紧固、卯钉紧固与焊接等方式。因螺丝与卯钉紧固方式仍然会造成不连续的微小缝隙,对于力学能量传递效率有影响,在力学传感器的安装工艺方面较少使用。举出几个近期的贴装技术,包括:Seiichi Takamatsu 等人使用真空吸附贴片机实现超薄膜(5  $\mu\text{m}$ )压阻式 MEMS 应变传感器的转移与贴装,提高贴装成功率[4]。Axel Schumacher 等人使用反应性多层系统(RMS)进行连接,与传统环氧树脂胶膜对比,RMS 连接的传感器灵敏度提升约 2.5 倍[5]。Yang Zhao 等人针对工业机器人中复杂曲面,在上方用光刻胶制作的模板作为复合薄膜应变计,可成为低温度系数结构,减少应力影响[6]。前面叙述几种技术,是基于压阻式应变片的力学敏感单元进行贴装技术开发,材料可为塑料基板或是半导体类型材料,进行金属焊接的措施来加强与弹性体之间的连接,是比较困难的技术,Ki Beom Kim 等人用玻璃粉浆料代替传统胶材,直接将应变片(硅基半导体)固定在弹性体上,为玻璃微熔技术(Glass Frit Bonding/Micro-Frit Bonding),具备热稳定性、可靠性、信号传递效率高,适用于高温、高可靠性或微机电系统(MEMS)等场景[7],可解决非金属材料焊接的问题,但敏感单元需要使用抗高温封装材料来应对,在成本与封装技术上也是属于高难度技术,本篇论文使用金属封焊技术(Metal Sealing Technology),使用金属材料连接弹性体,实现高可靠性密封与一体化设计,金属封焊技术可分为几种方式,包括激光焊接[8]、电子束焊接[9]、电阻焊接[10]等工艺,

电阻焊是相对低成本的方式，可进行传感器的金属封焊技术发展，其利用电流通过金属接合处，同时因电阻增加而产生电阻热，并施加压力完成焊接，属于固态焊接，也可不需填充其他材料，在本实验中，类似于施加电阻并加热焊接，直接加压加热的方式，将金属材料熔融后并迅速降温，可将力学传感器芯片与弹性体直接链接，并形成一体化结构，可减少力学能量在传递过程中损耗的缺点，也减少了力学传感器的迟滞现象，优化粘贴工艺与改进其连接界面是确保传感器性能的关键因素之一，在进行连接后也必须考虑其贴附力的影响，在力学传感器使用过程中，考虑其可靠度与避免断裂面产生，需要加强其贴附能力，除了贴附力外，其性能与组装工艺密不可分，其构建了一个精准、稳定的力学信号传递路径的核心过程，从微观角度看，外部施加的推力必须通过传感器的机械结构，无失真地传导至内部的芯片，这一过程的任何偏差都将在处理电路的号中展现[11]。因此设计了力学传感器的组装与推力测试实验，可验证其传感器在弹性体上的贴附程度与力学在芯片内部的传递效率，最终建立此产品的验证规范。

## 2. 石英压电谐振式力学传感芯片

### 2.1. 石英芯片组装测试 - 样品制作

在组装测试中，设计一款矩形金属铁镍合金框体架，如图 1(a)所示。针对 QCR 芯片所设计的金属框，在框架中心为挖空区域，上下有 QCR 芯片载台，金属外框尺寸为  $7\text{ mm} \times 5.52\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 。内框六边形长边的长度为  $3.86\text{ mm}$ ，两长边间距为  $3.52\text{ mm}$ ，两短边夹角为  $130^\circ$ ，内框六边形长轴线距离长边为  $1.76\text{ mm}$ 。QCR 芯片载台尺寸为  $2.20\text{ mm} \times 0.6\text{ mm} \times 0.55\text{ mm}$ 。在其特定区域上镀上金属膜，如图 1(b)所示，在金属膜上涂布导电黏着剂。如图 1(c)，将 QCR 石英芯片放置于挖空区域内，石英芯片尺寸为  $3.5\text{ mm} \times 1.9\text{ mm} \times 0.7\text{ mm}$ ，黏着剂干燥固化后可稳定黏住 QCR 石英芯片。再次镀上黄金电极，QCR 石英芯片上镀有黄金电极，可提高芯片导电可靠度，避免如银电极氧化等问题，如图 1(d)。

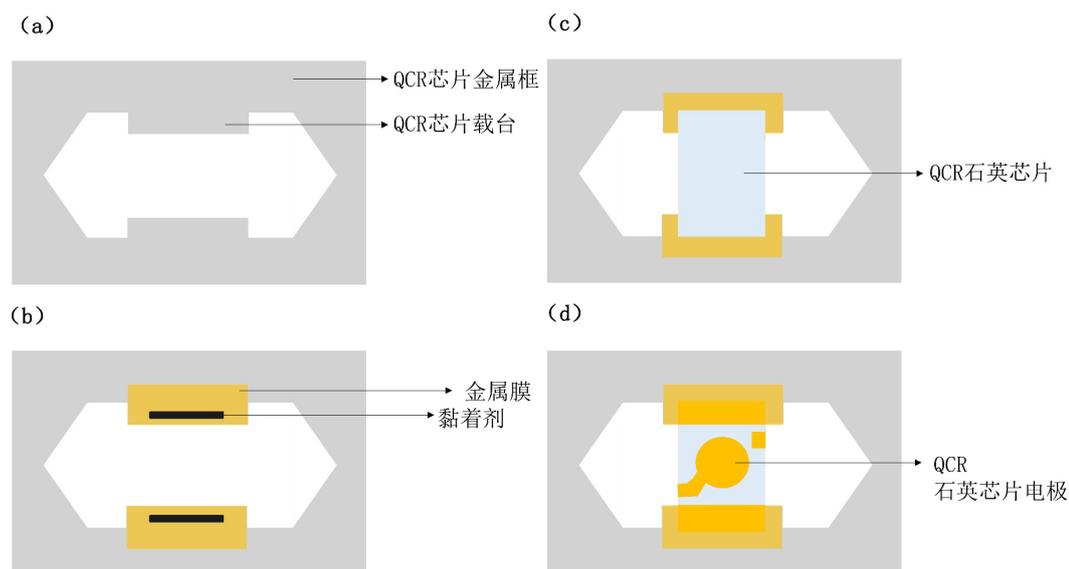


Figure 1. Production process of quartz chip (QCR) samples

图 1. 石英芯片(QCR)样品制作过程

图 2 为 QCR 石英芯片实际样品图，图 2(a)对应了图 1(b)结构，图 2(b)对应了图 1(d)结构，其中图 2(a)中黑色部分为涂胶区域。

首先设计涂布导电黏着剂实验，提出四种测试方案，如表 1 所示，方案一与方案二分别测试银胶与

锡膏涂布在金属膜上的差异性,使用单涂布的方式(只在金属膜上涂布),如图 1(b)所示,方案三与方案四皆使用锡膏导电黏着剂,使用双涂布的方式(在金属膜与镀完电极的石英芯片上涂布),设计不同的涂布位置,如图 3 所示,图 3(a)为方案一与方案二代表图,图 3(b)与图 3(c)分别为不同涂布区域,包含芯片两端电极脚中心与芯片电极脚外边缘。如图 4,在测试结果方面,使用银胶作为 QCR 芯片与金属框的粘合剂,在喷涂与后续贴片制程上可以满足,同时银胶不会外溢至芯片上方。使用锡膏作为 QCR 芯片与金属框的粘合剂,在喷涂与后续贴片制程上皆顺利完成,但在回流焊过程中,存在锡膏外溢至芯片上方的现象,同时爬锡不均匀导致芯片歪斜的问题,需要精密控制锡膏涂量,如图 4(a)与图 4(b)。

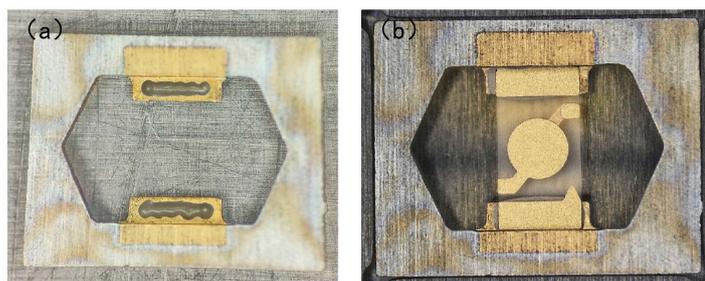


Figure 2. Actual quartz chip (QCR) samples  
图 2. 实际 QCR 石英芯片样品

Table 1. Four testing schemes  
表 1. 四种测试方案

测试方案	导电黏着剂	喷涂方式	双涂布条件
一	银胶	单涂布喷胶	-
二	锡膏	单涂布喷锡	-
三	锡膏	双涂布喷锡	芯片两端电极脚中心
四	锡膏	双涂布喷锡	芯片电极脚外边缘

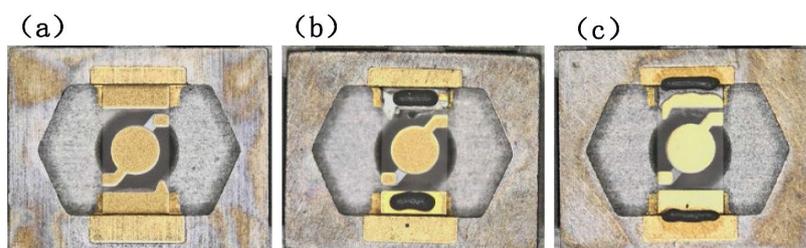


Figure 3. Illustration of four testing schemes  
图 3. 四种测试方案代表图

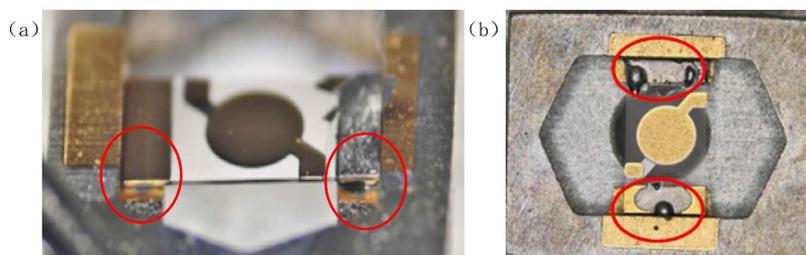


Figure 4. Observation diagram of uneven solder paste climbing  
图 4. 锡膏爬锡不均匀观察图

## 2.2. 石英芯片组装测试 - 力学检测

在力学测试中,使用上下加压方式进行力学检测,将 QCR 芯片直接放置与上下夹具中,如图 5 所示。图 5(a)中逐步施力,并由 0 N 增加至 20 N。过程中接近 20 N 时,造成 QCR 芯片直接剥离飞片,代表银胶的贴附力不足。在力学传感器应用过程中导致可靠度问题,如图 5(b)红色框所示。锡膏除了外溢问题外,则无飞片问题产生,初步判断锡膏具备较好的贴附性能。

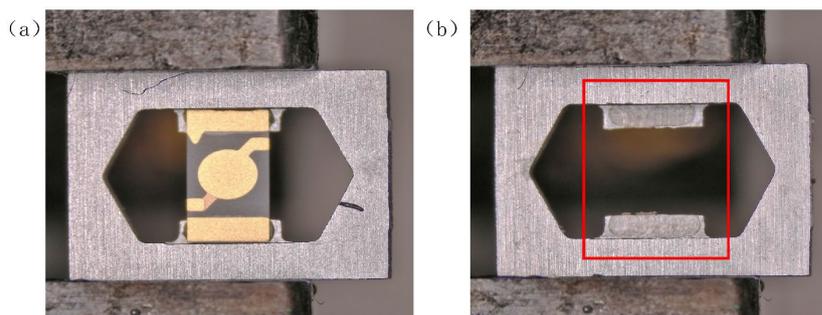


Figure 5. QCR chip direct peeling and flying off  
图 5. QCR 芯片直接剥离飞片

力学测试中,已经确认银胶的贴附力不足,因此需要探讨其实际固化所需要的条件,前述实验的条件是在室温底下的自然干燥与固化,因此认定银胶需要精准掌控固化温度与时间,表 2 叙述了银胶固化优化测试内容,测试方案一使用两阶段加热,使用第一阶段 200°C 温度加热 60 分钟,第二阶段再使用 250°C 温度加热 60 分钟,升温速率与降温速率分别为+5°C/minutes 与-2°C/minutes。

Table 2. Silver paste curing optimization test  
表 2. 银胶固化优化测试

测试方案	加热温度 1	加热温度 2	升温速率	降温速率
一	200°C/60 minutes	250°C/60 minutes	+5°C/minutes	-2°C/minutes
二	200°C/90 minutes	-	+5°C/minutes	-2°C/minutes

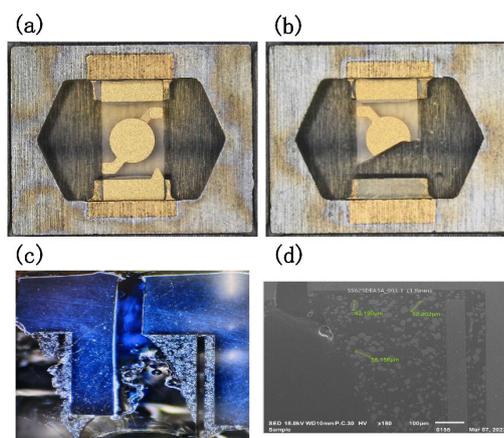


Figure 6. Comparison of chip breakage between the two solutions and peeling observation diagram  
图 6. 两种方案中芯片破损情况比对与剥离观察图

测试方案二使用一阶段加热,为 200°C 温度加热 90 分钟,升温速率与降温速率分别为+5°C/minutes

与 $-2^{\circ}\text{C}/\text{minutes}$ 。测试结果发现两个方案皆能改善力学测试结果，在力学测试后，无飞片情况产生，且方案一中(图 6(a))，芯片比方案二(图 6(b))中破损的现象更少，初步认为方案一是比较适合的制程条件。图 6(c)与图 6(d)分别为 100 倍光学显微镜与电子显微镜观察图。观察图 6(c)中芯片与胶材产生剥离现象，与爬锡不均匀的两个现象间接导致造成芯片歪斜，进而触碰其他物体产生破裂。再进一步将图 6(c)样品使用电子显微镜观察，发现在剥离的区域有大量气泡产生。判断剥离现象原因，为胶材固化过程中产生的气泡影响了贴合程度。此问题的解决办法，可在制造过程中，将其放置于真空环境中，进而减少气泡产生，改善贴合力不够的问题。如图 6(c)中所示，其中比例尺长度为 100  $\mu\text{m}$ 。

### 3. 推力测试

在本实验的推力测试中，使用 Dage 4000 Plus 设备，如图 7(a)，作为主要测试方法之一，其设备常用于测试半导体产业中，芯片焊点、引线等焊接强度，包含剪切力、拉力和推力，可评估机械可靠性。推力测试中需要定义弹性体的材质，本实验选取市场上常用的不锈钢作为基板材料，如图 7(b)。为了使芯片能够具备较好的贴附性，在不锈钢表面镀上金属薄膜，厚度约为 4  $\mu\text{m}$ ，如图 7(c)。

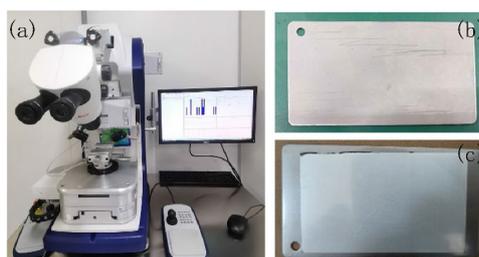


Figure 7. Thrust equipment and substrate  
图 7. 推力设备与基板

#### 3.1. 蝴蝶式结构芯片与推力测试样品制备



Figure 8. Preparation process for thrust test samples  
图 8. 推力测试样品制备流程

为了产品化与测试方便性,将 QCR 芯片的金属框体修正为蝴蝶式结构,如图 8(d)所示,其蝴蝶式结构已完成产品与可靠度验证,推力测试实验中,只需要对金属框体进行测试,无需完成整体芯片组装[1]。图 8 为推力测试样品制备流程,如图 8(a),首先将图 7(c)的镀完全金属膜后的基板放入加热炉中进行 310℃ 加热至 6 小时,图 8(b)中将烘烤完成的基板进行焊道标示,方便后续样品制作,图 8(c)中在焊道上手动涂上焊锡膏,图 8(d)中将蝴蝶式结构芯片手动放置于焊锡膏上,再将之放入 Reflow 炉中进行贴附,如图 8(e),最后得到完成贴装的芯片样品,如图 8(f)。

### 3.2. 推力测试结果

图 9(a)为推力测试装置放大图,设备推刀放置于 QCR 芯片的其中一侧,并施加推力。图 9(b)为方便推力测试所设计的层状结构,在金属基板上镀上金属薄膜后,其上方继续涂上锡膏,取用蝴蝶式金属框体,在其上方也镀上一层金属薄膜,之后将两者贴附进行 Reflow 炉的处理流程。需要注意的一个关键点,当蝴蝶式结构金属框体表面处理完善时,有清洁且无脏污,则金属框体可与金属薄膜完美结合,如图 9(c)所示,否则会造成其表面鼓包与薄膜脱落,如图 9(d)。

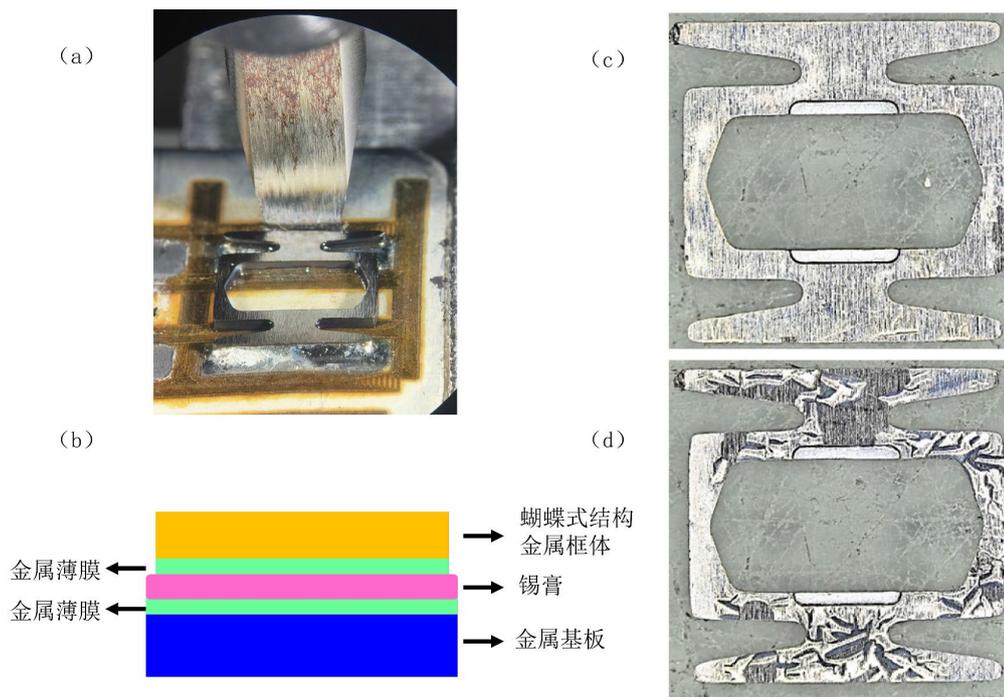
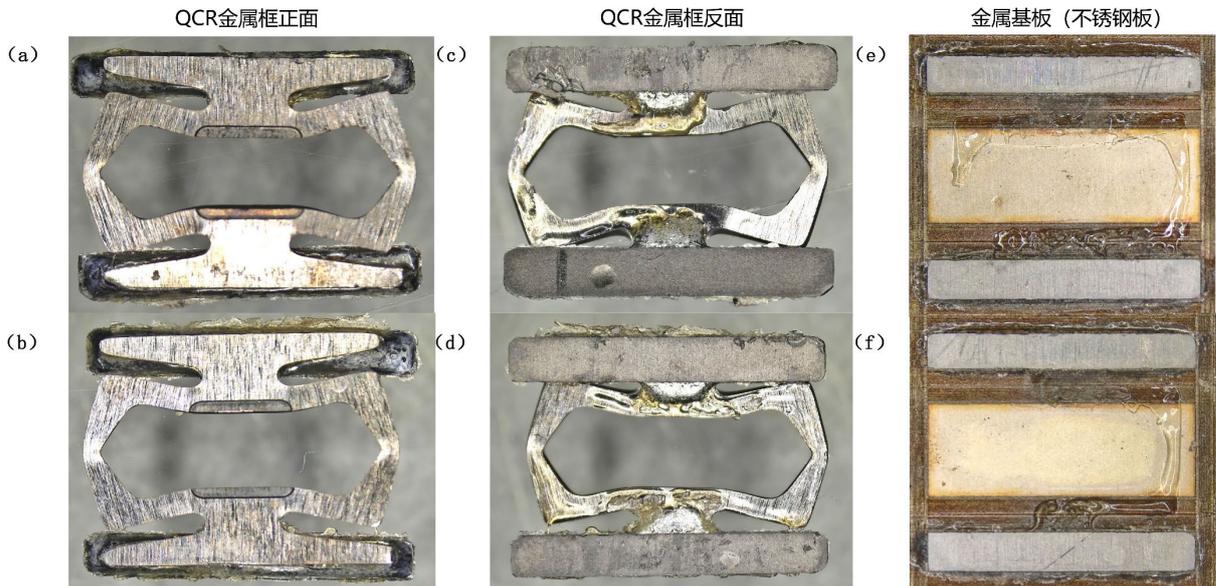


Figure 9. The thrust test  
图 9. 推力测试

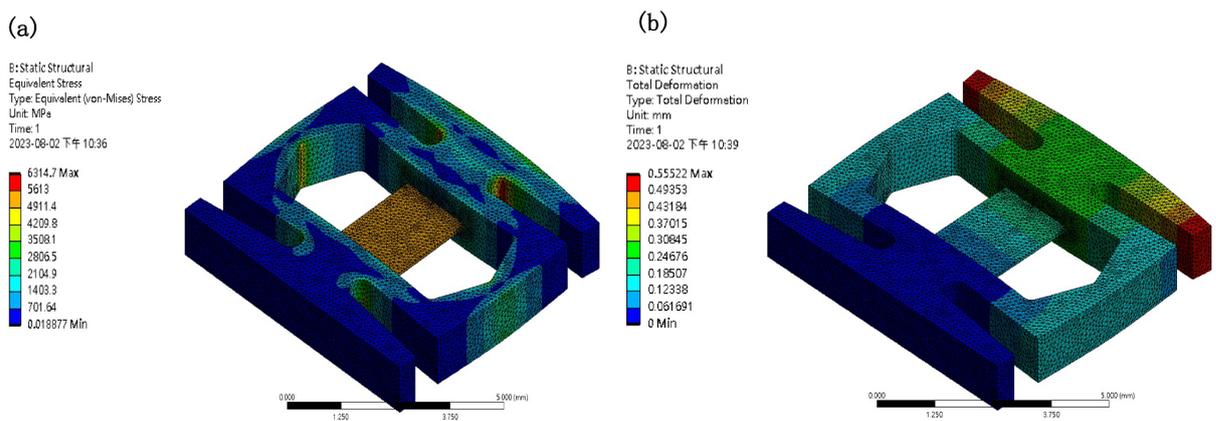
图 10(a)与图 10(b)为蝴蝶式结构金属框体有镀金属膜与没有镀金属膜的推力测试结果外观,其推力超过承力上限时会造成金属框体瞬间变形并且损坏,图 10(c)与图 10(d)为其有镀金属膜与没有镀金属膜的金属框体背面图,10(e)与图 10(f)为其两者脱离后的不锈钢金属基板情况。图 11 为使用有限元方式进行蝴蝶式结构金属框体与芯片的力学分布仿真,图 11(a)显示了传感器头部的应力分布结果,应力通过外部源传递至石英芯片,展示了石英芯片上的应力分布,应力能量均匀分布在芯片表面,并覆盖电极区域内的振荡区域。图 11(b)显示了传感器头部的变形量结果,石英芯片呈现出有序的变形变化。

表 3 为金属框体有镀金属膜与无镀金属膜两种类型实验对比,总共测试了 12 个样品,在金属框体有镀上金属膜的推力测试结果,发现推力大于平均值 5.641 kgf 时会产生形变与破坏,在金属框体无镀上金

属膜的推力测试结果, 其推力平均值为 4.497 kgf, 数据显示金属框体镀上金属薄膜对于推力有改善作用。



**Figure 10.** The thrust test for butterfly-type structural metal frame  
**图 10.** 蝴蝶式结构金属框体推力测试



**Figure 11.** Finite element mechanical distribution simulation of butterfly-type structures  
**图 11.** 蝴蝶式结构的有限元力学分布仿真

**Table 3.** Thrust test data  
**表 3.** 推力测试数据

测试样品编号	金属框体有镀膜(kgf)	金属框体无镀膜(kgf)
1	4.766	4.887
2	5.492	4.212
3	6.164	4.171
4	5.508	4.287
5	6.277	4.927
平均值	5.641	4.497

## 4. 结论

力学实验证明石英压电谐振式力学传感器(QCR)的性能不仅取决于敏感芯片,更受其本身组装、封装与弹性体间连接界面的安装工艺影响,粘贴层的质量直接决定了传感器的精度、频响、稳定性等关键指标,包含了组装用胶材的固化参数,其需要高温处理,增加金属膜对于推力改善等,QCR在不锈钢金属板上的推力可达 5.641 kgf。

## 参考文献

- [1] 巫晟逸, 梁佳辉, 刘秋实, 丁岗寅, 陈庆盈, 等. 石英压电晶体谐振式力学传感器[J]. 传感器技术与应用, 2025, 13(3): 551-559.
- [2] 唐俐, 王军, 马文慧. 仿真燃料组件导向管上应变计的粘贴工艺研究[J]. 核动力工程, 2018, 39(3): 48-50.
- [3] 陈潘布衣, 颜幸尧, 邓俊文, 聂德明. 应变片力传感器对端子压接状态感知效果的研究[J]. 传感技术学报, 2025, 38(11): 1931-1939.
- [4] Takamatsu, S., Goto, S., Yamamoto, M., Yamashita, T., Kobayashi, T. and Itoh, T. (2019) Plastic-Scale-Model Assembly of Ultrathin Film MEMS Piezoresistive Strain Sensor with Conventional Vacuum-Suction Chip Mounter. *Scientific Reports*, **9**, Article No. 1893. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-39364-2>
- [5] Schumacher, A., Shah, V., Steckemetz, S., Dietrich, G., Pflug, E., Hehn, T., et al. (2021) Improved Mounting of Strain Sensors by Reactive Bonding. *Journal of Materials Engineering and Performance*, **30**, 7796-7804. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-05993-w>
- [6] Zhao, Y., Wang, W., Zhang, S., Liu, J., Ying, Y., Chen, H., et al. (2024) Fabrication of Composite Thin-Film Strain Gauge on Flexspline by Photoresist Stencil Lithography. *IEEE Sensors Journal*, **24**, 25439-25447. <https://doi.org/10.1109/jsen.2024.3421999>
- [7] Kim, K.B., Kim, J., Park, C.W., Kim, J.H. and Min, N.K. (2018) Glass-Frit Bonding of Silicon Strain Gages on Large Thermal-Expansion-Mismatched Metallic Substrates. *Sensors and Actuators A: Physical*, **282**, 230-236. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.09.041>
- [8] Kang, S., Kang, M., Hoon Jang, Y. and Kim, C. (2024) Spectrometer as a Quantitative Sensor for Predicting the Weld Depth in Laser Welding. *Optics & Laser Technology*, **175**, Article 110855. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2024.110855>
- [9] 王宇, 曹聪帅, 苗海峰, 刘硕. 扫描振幅对 CuCrZr 合金块/箔带软连接电子束焊接接头[J]. 机械工程材料, 2025, 49(6): 52-57.
- [10] 路向琨, 赵中秋, 刘峰, 郑伟. 基于压电传感器的电阻焊压力采集系统设计[J]. 仪表技术与传感器, 2021(5): 87-90.
- [11] 许艺青, 杨晓翔, 韦铁平, 姚进辉. 电阻应变式传感器应变传递影响因素分析[J]. 中国测试, 2018, 44(1): 136-142.