

高灵敏热膜传感器制备与低雷诺数绕流测试研究

郭栋梁, 侯超, 黄怡卓, 徐艺轩, 黄永安*

华中科技大学 数字制造装备与技术国家重点实验室, 武汉 430074

通讯作者Email: yahuang@hust.edu.cn

摘要

热膜传感器作为风洞试验中测量壁面剪应力的有效手段, 在流动分离与转捩现象分析中发挥着重要作用。基于MEMS技术的超薄柔性热膜传感器, 具有超薄、易共形、热容小、响应快的特点。但是, 薄膜电极存在晶格缺陷与电子散射等问题, 电阻温度系数低于块体。退火能提升镍薄膜对温度的敏感性, 但依旧受限于聚酰亚胺基底400°C的玻璃化温度。本文提出一种热辅助激光剥离制备工艺, 突破基底耐受温度限制, 将传感器的退火温度提升至800°C, 通过高温退火产生热应力减弱金属与蓝宝石间的膜基结合力, 实现聚酰亚胺封装的薄膜传感器剥离, 电阻温度系数从初始的0.27% ppm/°C提升至0.61% ppm/°C。阵列化热膜传感器集成于NACA0012翼型柔性蒙皮, 完成了-25°~25° 变迎角风洞实验, 识别了分离点从机翼尾端移动到机翼前缘的所形成的“分离谷”, 以及超过15° 迎角后的失速过程。这项工作为低灵敏的温敏薄膜缺陷消除提供了一条新的制备思路, 制备的高灵敏热膜传感器有机会用于在低热模式下捕捉细微的气流变化。

关键词: 高灵敏; 热膜传感器; NACA0012; 分离点

引言

热膜传感器通过自发热后与流体对流换热测量流速/剪应力的传感器, 被广泛用于风洞实验^[1], 对飞行器的外形优化和安全控制有重要意义。

热膜传感器是一个自发热元件, 描述热膜传感器的热平衡方程为:

$$P=Q_1+Q_2+Q_3$$

Q_1 为基底传热, Q_2 为对流换热, Q_3 为辐射散热, 其中 Q_2 为主要部分。

在此基础上, Bellhouse和Schnltz^[2]将壁面剪应力传感器和对流换热之间的关系描述为:

$$P_1=Q_2=(A\tau^{1/3})\Delta T_a+B\Delta T_s$$

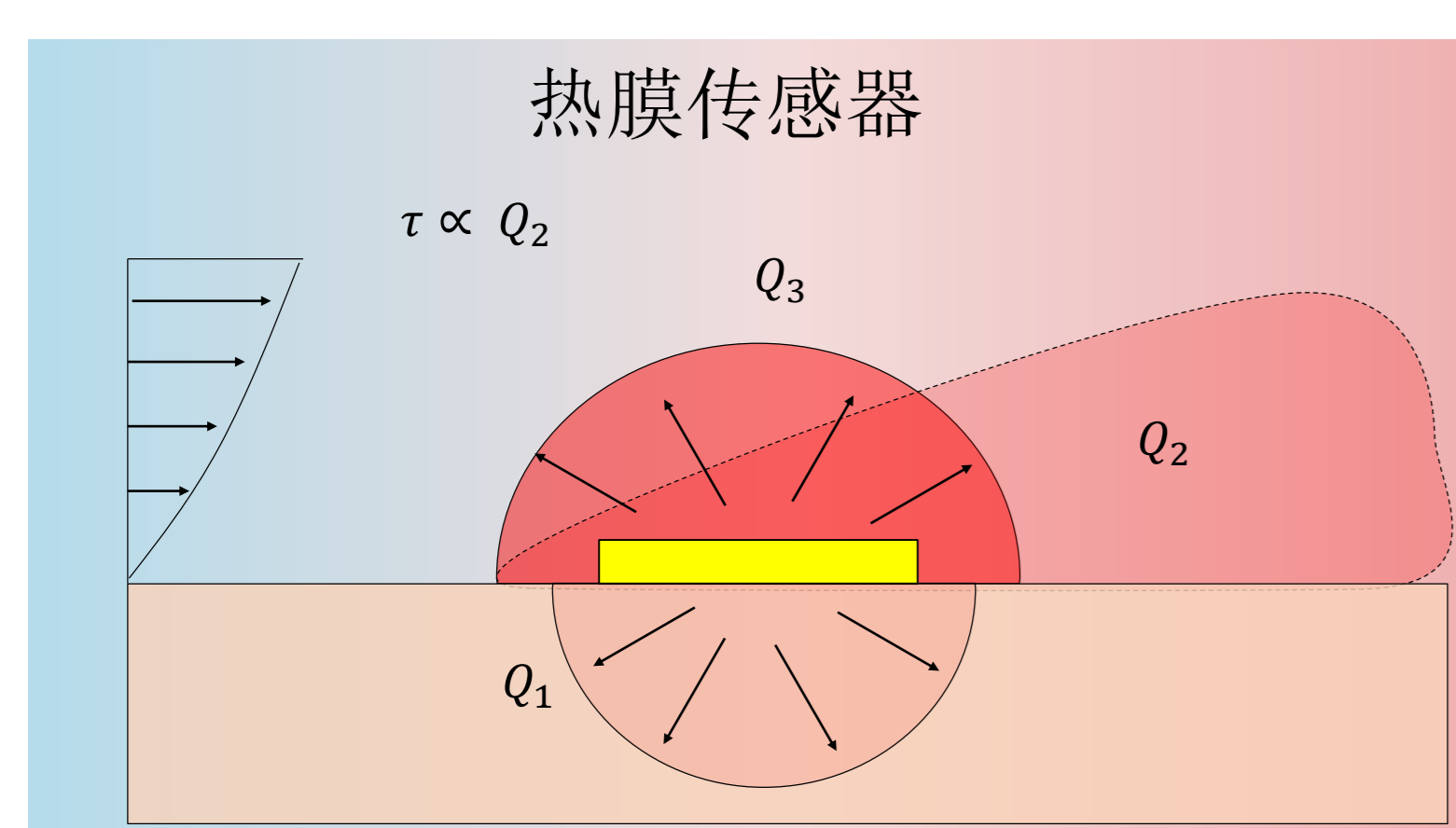


图1 柔性热膜传感器

热膜传感器本质上是一个温敏电阻, 镍金属以其高灵敏系数、稳定、超薄等特性被广泛用于热膜传感器。然而, 由于电子在金属薄膜中存在散射, 导致其电阻温度系数低于块体, 退火有助于消除散射提升薄膜的电阻温度系数^[3]。

方法与结果

图2 (a) 展示了传感器的制备工艺, 首先在蓝宝石基底上磁控溅射金属镍电极, 随后传感器置于800°C环境下高温退火6h, 退火后在上层旋涂聚酰亚胺溶液, 220°C亚胺化, 图2 (b) 显示了退火前后的效果, 未退火的传感器TCR仅为0.27% ppm/°C, 经过800°C退火后, 传感器TCR达到0.61% ppm/°C。

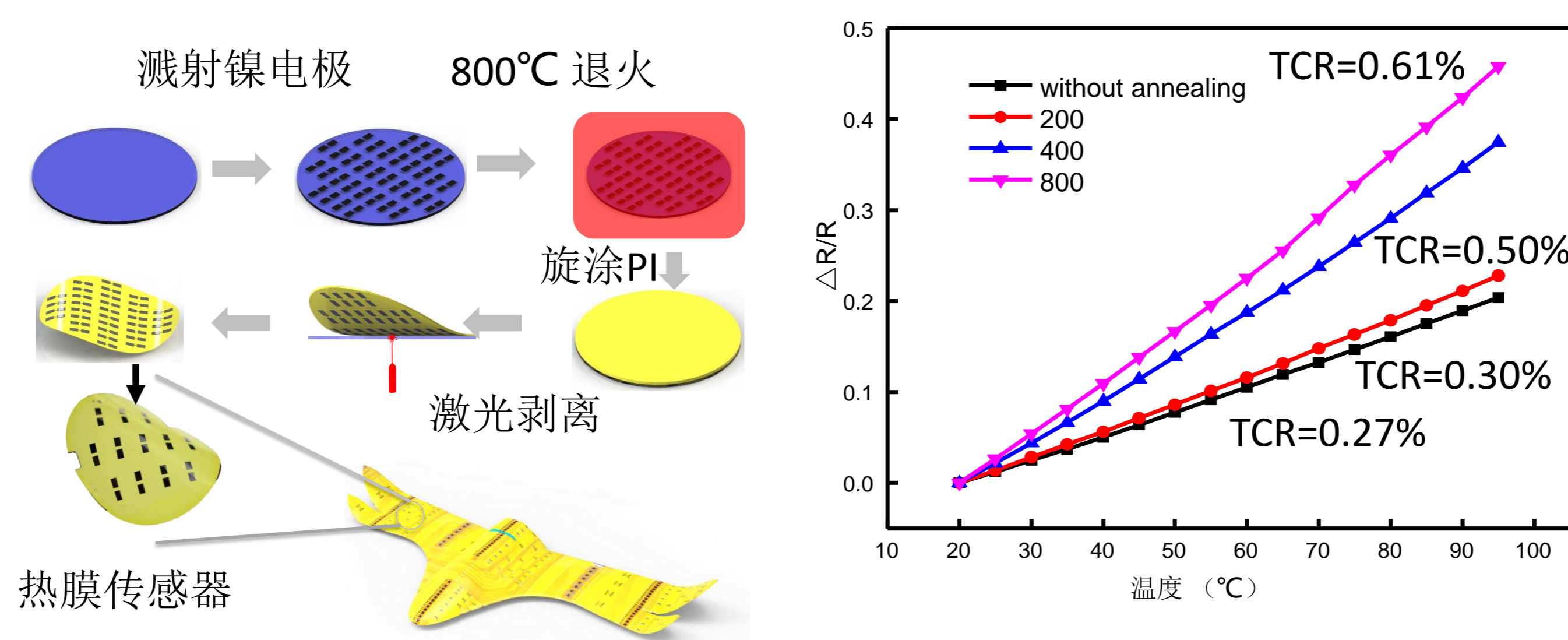


图2 (a) 热膜传感器制备工艺; (b) 热膜传感器TCR标定

传感器性能提升的主要原因是高温退火过程中金属镍的晶粒重新生长, 图3 (a) 表明随着退火温度提升, XRD的半峰高宽度变窄, 晶粒尺寸变小, 图 (g-f) 也显示了随退火温度升高, 晶粒形状发生变化, 晶粒间较大的缺陷明显减少。从原理上讲, 电流流过导体时, 电子从负极穿梭到正极, 电阻温度系数主要与电子在穿梭过程中与晶格碰撞有关, 由于缺陷的存在, 电子会在缺陷表面产生散射, 增大剩余电阻, 降低电阻温度敏感系数。在经过退火后由于晶粒增大, 晶界减少, 散射电子占比较少, 剩余电阻小, 电阻温度系数升高^[4]。

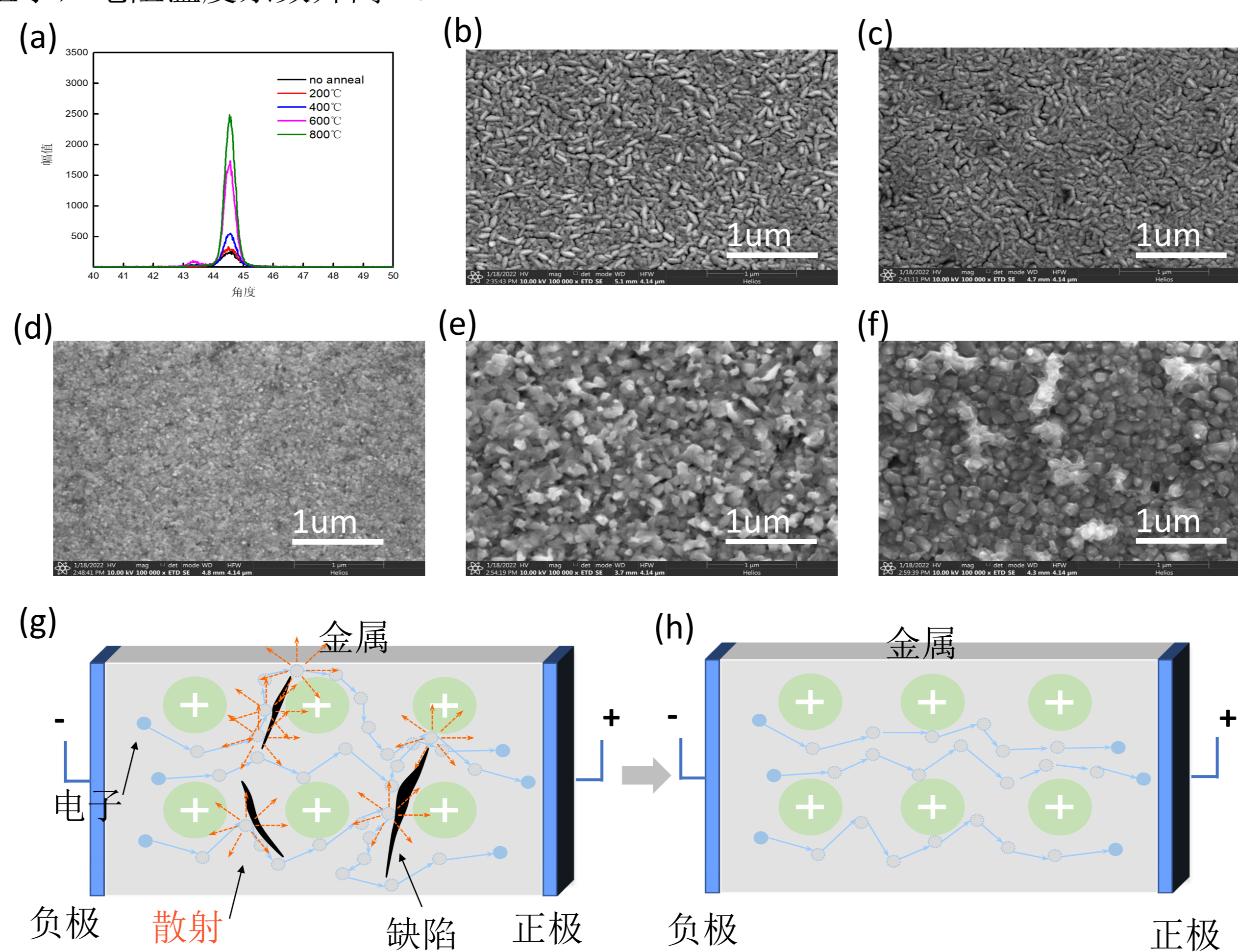


图3 传感器退火影响 (a) XRD, (b-f) SEM图像, (g-h) 镍膜TCR提升机理

热膜传感器常用来测量剪应力的变化或者流体的波动, 主要关注壁面剪应力的动态响应特性, 从而反应出的流体的动态响应特征。传感器通过恒功率电路采集放大后传输给上位机, 最终反馈给计算机的数据处理中心, 如图4 (a) 所示。在NACA0012缩比模型上进行变迎角试验, 热膜传感器由前向后布置, 如图4 (b) 可看出随着迎角的变化, 翼型上表面形成分离涡; 迎角继续抬升, 分离涡前移; 分离涡的移动过程反应在传感器信号上出现一条明显的“分离谷”, 随后分离涡脱落, 15° 迎角后机翼开始抖动失速。

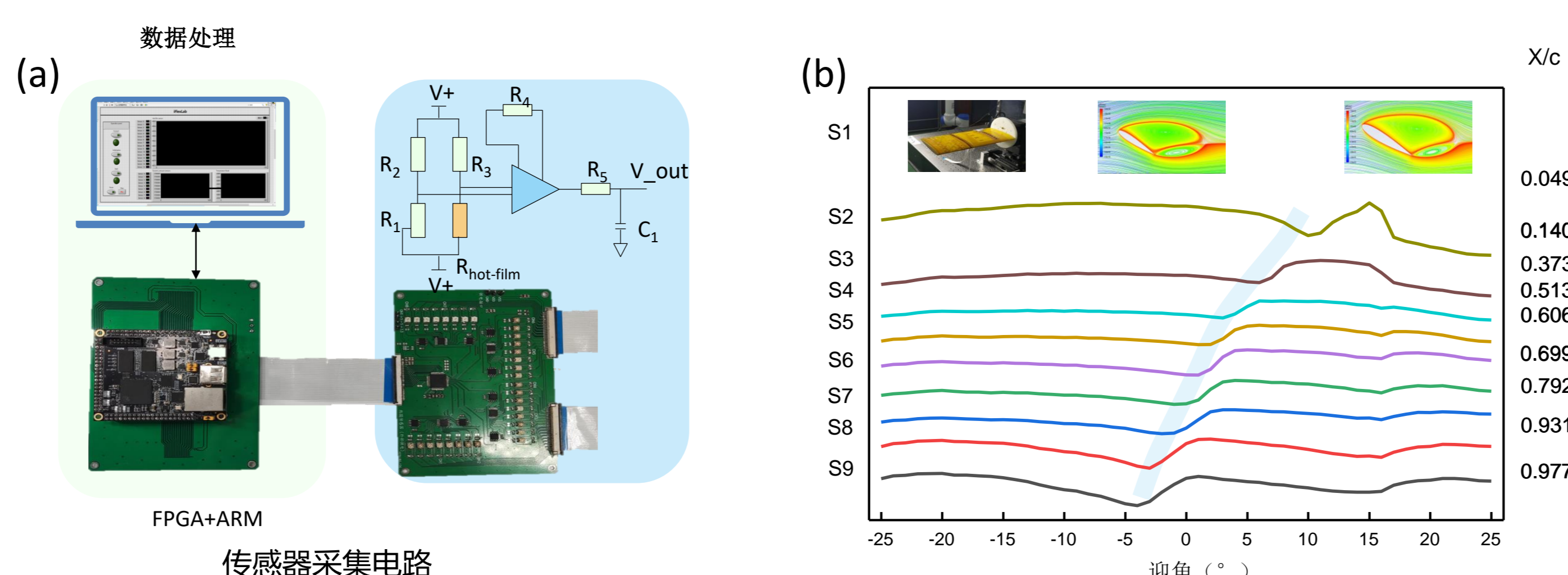


图4 (a) 热膜传感器采集电路, (b) 变迎角实验

结论

为提高热膜传感器的灵敏, 开发了一套基于高温退火和激光剥离的新型制备工艺, 并使用制备的柔性热膜传感器对NACA0012翼型进行风洞实验, 得到以下结论:

- 1) 热膜传感器温敏金属镍的退火温度提升至800°C, 高于柔性聚酰亚胺基底的玻璃化温度400°C。
- 2) 经过厚度和退火调节, 镍膜传感器的电阻温度系数从开始的0.27% ppm/°C提升至0.61% ppm/°C。
- 3) 热膜传感器在NACA0012翼型的变迎角实验中, 结果显示成功识别了分离点的移动以及脱落。

致谢

本工作由国家自然科学基金 (资助号: No.51925503) 和国家重点研发计划 (资助号: No.2020YFA0405700) 共同资助。

本工作实验及表征设备由华中科技大学机械科学与工程学院数字制造装备与技术国家重点实验室提供。

引文

- [1] Mehmood Z, Haneef I, Ali S Z, et al. Sensitivity enhancement of silicon-on-insulator CMOS MEMS thermal hot-film flow sensors by minimizing membrane conductive heat losses[J]. Sensors, 2019, 19(8): 1860.
- [2] Bellhouse B J, Schultz D L. Determination of mean and dynamic skin friction, separation and transition in low-speed flow with a thin-film heated element[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1966, 24(2): 379-400.
- [3] Sun B, Ma B, Wang P, et al. High sensitive flexible hot-film sensor for measurement of unsteady boundary layer flow[J]. Smart Materials and Structures, 2020, 29(3): 035023.
- [4] Wang J J, Hu H, Shang C H. Effect of annealing on the performance of nickel thermistor on polyimide substrate[J]. Thin Solid Films, 2017, 632: 28-34.