



“刚柔并济”薄膜热电偶温度传感及应用

田边^{1,2,3}, 李水敏¹, 张仲恺^{1*}, 刘兆钧^{1*}, 王楷¹, 刘江江¹, 陈伦涛¹, 史萌¹, 王清华¹

1. 西安交通大学机械工程学院, 精密微纳制造技术全国重点实验室, 西安 710049

2. 西安交通大学(烟台)智能传感技术与系统研究院, 西安 710049

3. 烟台先进材料与绿色制造山东省实验室, 烟台 265503

* E-mail: zhangzk@xjtu.edu.cn; lzj2024@xjtu.edu.cn

收稿日期: 2026-01-14; 接受日期: 2026-03-03; 网络版发表日期: 2026-03-27

2025年陕西省“三秦博创”人才支持项目(编号: 2025SQBC001)、陕西省重点研发计划项目(编号: 2025CG-GJHX-01)、国家自然科学基金(批准号: 52505633)、博士后创新人才支持计划(编号: BX20240278)和中国航空发动机集团产学研合作项目(编号: HFZL2023CXY011)资助

摘要 航空发动机关键热端部件、先进制造过程、高功率电子器件及可穿戴系统等应用场景对温度测量提出了高时空分辨率、强环境适应性与原位集成能力的迫切需求。薄膜热电偶(thin-film thermocouple, TFTC)凭借厚度薄、热容小、响应速度快、可阵列化及可原位制备等优势, 已成为极端与复杂工况下温度感知的重要技术手段。本文从“刚柔并济”的视角出发, 系统综述了刚性基与柔性基TFTC的测温原理、材料体系、结构设计及典型应用研究进展。针对刚性基TFTC, 重点总结了其在航空发动机热端部件、电池系统与切削加工测温等高温场景中的应用现状, 归纳了通过新型热电材料开发、保护层与过渡层设计以及热应力优化等手段提升测温上限与服役可靠性的研究进展。针对柔性基TFTC, 系统评述了其在可穿戴健康监测、电子皮肤及复杂曲面测温中的应用优势, 重点分析了柔性基底、结构与封装方式对器件稳定性和耐久性的影响, 并总结了高温柔性基TFTC在新型柔性耐高温基底与增材制造工艺方面的最新进展。在此基础上, 本文进一步梳理了TFTC在高温稳定性、界面可靠性、多场耦合服役及系统级集成等方面面临的关键挑战, 并对其未来在新型热电材料、刚柔复合结构、多参量集成与智能感知系统中的发展方向进行了展望。本文可为TFTC温度传感器的设计优化与工程应用提供参考。

关键词 薄膜热电偶, 温度传感, 刚性, 柔性, 原位测温

1 引言

薄膜热电偶(thin-film thermocouple, TFTC)是在微纳尺度下将两种热电材料沉积并集成形成的温度传感器, 其厚度通常为纳米至微米级, 具有热容小、热惯性小的优点, 可实现纳秒至微秒级动态响应, 适合瞬态、脉冲和快速升温过程的测量。通过微纳加工实现微米

级热结尺寸, 适合于局部热点、微小区域温度场精细测温。同时, 其具有可原位制备的特性, 可通过多种方式(如磁控溅射、丝网印刷、脉冲激光沉积、热蒸镀工艺、直写式打印等)直接制备在金属、陶瓷、半导体或柔性基底表面, 实现原位测温, 对被测系统热扰动小^[1-4]。传统方式有线热电偶进行温度监测时存在体积庞大、安装复杂的缺点, 且破坏结构件, 并对被测表面

引用格式: 田边, 李水敏, 张仲恺, 等. “刚柔并济”薄膜热电偶温度传感及应用. 中国科学: 技术科学, 2026, 56: 971-991

Tian B, Li S M, Zhang Z K, et al. Rigid-flexible thin-film thermocouple temperature sensing and applications (in Chinese). Sci Sin Tech, 2026, 56: 971-991, doi: 10.1360/SST-2026-0020

气流分布造成干扰. TFTC根据沉积的基底分为刚性基TFTC和柔性基TFTC. 刚性基TFTC具有高机械强度、抗振动和冲击, 常用在航空发动机的热端部件、机械加工过程温度测试、电池温度测试等领域^[5~11]; 柔性基TFTC具有可弯曲、可贴附、低热扰动的特点, 常用于复杂曲面的温度测试及可穿戴设备、电子皮肤等温度监测领域^[12~14]. 本文从“刚柔并济”的视角出发, 对刚性基与柔性基TFTC的材料体系、结构设计、制备工艺及典型应用进行系统综述, 旨在揭示二者在性能与应用层面的互补关系并为TFTC在极端与复杂工况下的协同发展与工程应用提供参考. 其中, “刚”强调结构稳定性、高温耐受性及长期服役可靠性, 适用于高温、高热流密度及强机械约束等极端工况; “柔”则突出顺应性、可贴附性与低热扰动特征, 适用于曲面结构、动态界面及多点分布式感知需求.

2 TFTC测温原理

TFTC的测温原理与传统的热电偶一致, 根据材料的热电效应实现温度测量. 当两种不同成分的电极A和B组成一个闭合回路, 并且两个接触点的温度不同时, 在热端和冷端间存在温度差时, 则在闭合回路中产生电流, 这个由温度差产生的电流称为热电流, 产生的电动势称为热电动势. 典型原理示意图如图1(a)所示. TFTC与传统热电偶的不同在于: TFTC需要载

体, 基底材料与敏感薄膜间需要绝缘, 实现电学隔离. 制备好的TFTC附着在绝缘的基底上, 其一般结构如图1(b)所示. TFTC的输出与材料的塞贝克系数相关. 输出公式见方程(1):

$$V = \int_{T_c}^{T_h} [(S_a - S_b) T] dT, \quad (1)$$

其中, S_a ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$)和 S_b ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$)是两种材料的塞贝克系数, T ($^\circ\text{C}$)是材料所处的温度, V (mV)是TFTC的输出电压. T_c ($^\circ\text{C}$)和 T_h ($^\circ\text{C}$)分别是TFTC冷端和热端所处的温度.

TFTC的塞贝克系数计算公式见方程(2):

$$S(T) = \Delta V / \Delta T, \quad (2)$$

其中, ΔV (mV)是TFTC的输出电压, ΔT ($^\circ\text{C}$)是冷端和热端之间的温差, $S(T)$ ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$)是TFTC的塞贝克系数.

TFTC的相对误差计算公式见方程(3):

$$\eta = |(\Delta T_1 - \Delta T) / T_u|, \quad (3)$$

其中, η 是相对误差, ΔT_1 ($^\circ\text{C}$)是由拟合公式计算得到的温差, ΔT ($^\circ\text{C}$)是实际温差, T_u 是测试温度上限.

TFTC的重复性计算公式见方程(4):

$$\delta_R = \sigma_{\max} / Y_{FS} \times 100\%, \quad (4)$$

其中, δ_R 是重复性误差, $\sigma_{\max}$ (mV)是最大标准偏差, Y_{FS} (mV)是满量程.

TFTC的高温温度漂移率计算公式见方程(5):

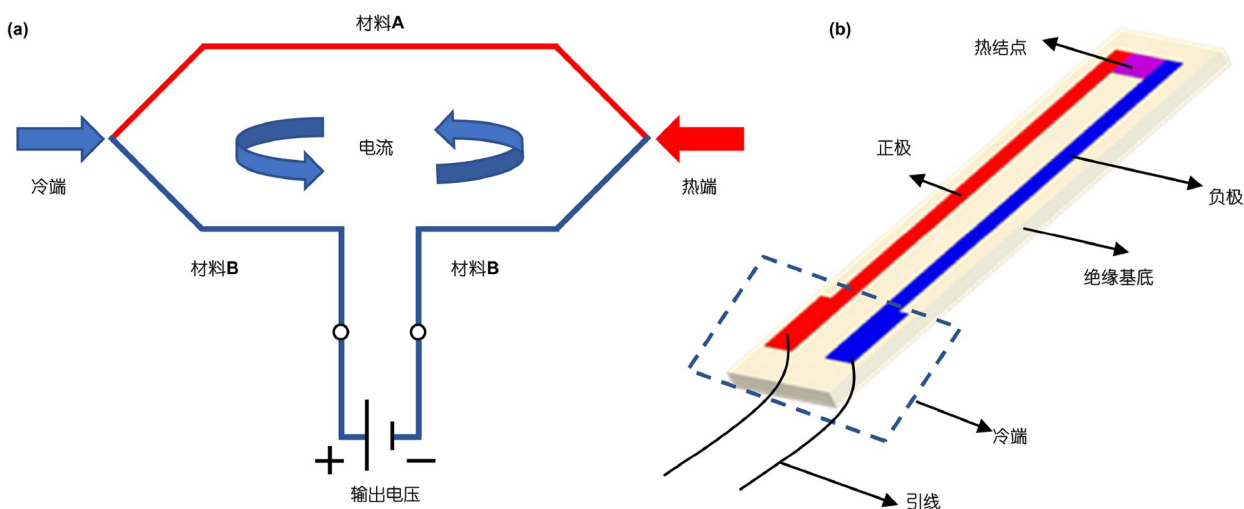


图1 (网络版彩图)TFTC原理示意图及基本结构. (a) TFTC测温原理; (b) TFTC基本结构

Figure 1 (Color online) Schematic diagram and basic structure of TFTC. (a) Temperature measurement principle of TFTC; (b) basic structure of TFTC.

$$DR(T) = (\Delta V(T) \cdot T_h) / (V(T)_{\text{ref}} \cdot \Delta t), \quad (5)$$

其中, $DR(T)$ ($^{\circ}\text{C}/\text{h}$)是温度漂移率, $\Delta V(T)$ (mV)是温度恒定时, TFTC的最大电压波动量, T_h ($^{\circ}\text{C}$)是热端恒定的温度, Δt (h)是温度恒定的时间, $V(T)_{\text{ref}}$ (mV)是参考电压。

根据基底是否具有柔性可将TFTC分为刚性基TFTC和柔性基TFTC。下文按照此分类进行介绍应用范围及相应研究进展。

3 刚性基TFTC

刚性基TFTC以高温稳定性和结构可靠性为优势, 是“刚柔并济”体系中承担极端环境测温的核心组成部分。因此刚性基TFTC一般主要用于航空航天或燃气轮机发动机的热端部件测温、电池测温、切削加工过程测温领域。下文按照应用领域对相关研究进展进行分类综述。

3.1 热端部件测温

提升航空航天系统的智能水平需要传感器来监控内部状态。关键部件如喷嘴导叶(nozzle guide vane, NGV)的表面温度若能被准确测量, 将为高温燃气参数调控与涡轮叶片冷却效果之间的动态平衡优化提供直接依据: 燃烧温度越高, 航空发动机效率越高; 但涡轮合金材料无法承受这种影响, 因此需要冷却。然而, 这种冷却反而降低了效率。因此, 为实现动态平衡, 需要准确测量部件表面温度, 以实现最优的高效运行^[15]。

一方面, 在NGV等热端部件的优化设计和可靠性评估中, 目前已有许多相关研究利用TFTC成功原位监测热端部件的表面温度。2017年, Satish等人^[16]考虑高温环境下的结构完整性和耐久性要求, 在镍基合金基底采用电子束蒸发工艺制备氧化铝(aluminum oxide, Al_2O_3)绝缘层、镍铬(chromel, NiCr)-镍硅(alumel, NiSi) K型TFTC传感器层和 Al_2O_3 保护层。在低压涡轮NGV的铂铝涂层上热生长了 Al_2O_3 绝缘层后又沉积了 Al_2O_3 绝缘层, 并采用电子束蒸发工艺沉积K型TFTC和 Al_2O_3 保护层。经验证, TFTC塞贝克系数为 $42 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$, 时间常数和温度漂移率分别为 1.12 ms 和 $0.4^{\circ}\text{C}/\text{h}$, 证明了该方法在航空燃气轮机发动机中的应用。2020年, Ji等人^[17]通过干膜光刻和磁控溅射技术将铂-铂铑13(Pt-Pt/Rh13%) R型TFTC原位集成在涡轮叶片表面, 该

TFTC在 800°C 下退火1 h后, 表现出良好的稳定性和一致性。该TFTC阵列能够捕捉叶片表面 1200°C 热焰引起的温度分布, 在动态热流下瞬态温度响应性至少可达到 $10 \mu\text{s}$ 。1 μm 厚的TFTC薄膜覆盖在叶片表面及布线路径, 可将引线连接引导至叶片边缘, 从而减少表面热流模式和结构调制。2021年, Duan等人^[18]在NGV表面采用微机电系统(micro-electro-mechanical systems, MEMS)技术制备Pt-Pt/Rh13% TFTC阵列用于NGV冷却性能测试。同样通过边缘表面延伸的薄膜建立传感器的电气连接, 以避免感温点的气流湍流。该TFTC测温阵列可以 $10 \mu\text{s}$ 的快速采样率检测 1000°C 范围内的表面温度分布。

采用传统的MEMS工艺制造TFTC不适合在复杂拓扑的表面应用, 也无法用于大型现场组件。2021年, Duan和Li^[19]提出了一种新的TFTC阵列构建方法, 即采用手绘绘画, 将稀释的Pt-Pt/Rh13%浆液涂在复杂且坚韧的表面上的特定点, 如涡轮盘根部。此方法突破了传统光刻、薄膜溅射和剥离工艺的局限, 可在涡轮叶片上任意位置和复杂表面制备TFTC阵列, 为未来智能航空发动机传感器制备提供了极大的灵活性。采用此方法在NGV锋利表面制备了TFTC阵列^[20], 并进行 800°C 退火及焊接后处理。此TFTC阵列经高温马弗炉 800°C 校准, 具有良好的线性度, 其测温精度优于99%, 经不同方向的火焰喷枪瞬态响应实验验证了其薄膜耐受瞬态高温热冲击的性能, 无薄膜脱落。

在发动机实际试车应用过程中, 高温高速燃气、冷却气膜、叶片异形结构等对涡轮叶片表面的测温有影响。冷效试验是检验气膜冷却涡轮叶片冷却效果设计优劣的主要方法, 也是为避免叶片超温提供基础的设计数据。2025年, 田青云等人^[21]在不破坏涡轮叶片结构、性能和流场环境的条件下, 采用磁控溅射工艺在带有热障涂层的涡轮叶片表面制备了 Al_2O_3 绝缘层、贵金属铂(Pt)-铱(Ir)TFTC和 Al_2O_3 保护层, 采用高温合金蒙皮压接工艺在冷端连接补偿导线。 $200^{\circ}\text{C}\sim 900^{\circ}\text{C}$ 范围内的标定结果表明, TFTC具有优异的稳定性和测温精度(误差 $<1\%$)。并在高温高压流场环境下进行气膜冷效试验, 准确获取了涡轮叶片表面温度, 该应用将为涡轮叶片的冷效正向设计优化、寿命预测、失效分析等提供关键数据支撑。

另一方面, 随着热端部件工作温度的持续升高, 经气膜及热障涂层冷却后的金属叶片耐受范围依然有

限, 经1200°C温度冲击后, 合金叶片已严重氧化且其上的热障涂层也随之剥落^[22]。因此, 含有连续纤维韧化碳化硅的新型陶瓷基复合材料(ceramic matrix composites, CMC)耐受温度更高, 且重量更轻, 将成为下一代飞机发动机材料。2020年, Ji等人^[22]在CMC叶片表面采用丝网印刷法构建Pt-Pt/Rh13% TFTC, 并通过高温循环测试分析其高温特性。该TFTC能够测量最高1500°C的高温, 测量误差小于 $\pm 0.2\%$, 且具有良好的重复性。温度循环和热冲击测试验证了薄膜附着在高温热应力下的可靠性。瞬态测试证明其响应时间少于10 μs 。在CMC表面集成TFTC为下一代智能航空发动机的表面温度特性准确测定提供了良好机会。

另外, 受限于金属薄膜在高温下的热氧化等, 研究人员常采用半导体材料氧化铟锡(indium tin oxide, ITO)及氧化铟(indium oxide, In_2O_3)薄膜作为热电极, 并展开了系列研究^[23]。例如, 2025年, Liu等人^[24]用镍钴铬铝钇(nickel-cobalt-chromium-aluminum-yttrium, NiCoCrAlY)合金作为过渡层, Al_2O_3 作为绝缘层材料。将ITO- In_2O_3 TFTC直接沉积在航空发动机涡轮叶片表面(图2)。在900°C退火后该TFTC塞贝克系数为64.30 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$, 室温至850°C的5次升降温循环中重复性为96.9%, 在激光下的动态响应时间为11.69 μs 。在900°C高温气流条件下, TFTC保持了出色的热电输出性能和温度测量能力, 且可承受1174.7°C的多次火焰冲击, 具备在涡轮叶片上进行原位温度监测的应用能力。

Zhao等人^[25]通过磁控溅射技术在导向叶片上原位制备ITO- In_2O_3 TFTC, 并制备了微晶玻璃保护层, 利用激光诱导热传递进行温度测量, 在激光强度为20%、35%和50%时, TFTC温度为417°C、723°C和1040°C。该TFTC可在50%激光功率下进行20个循环的测试, 具备长期监测能力。其抗热冲刷的能力采用丁烷火焰枪评估, 导叶温度可达1136°C, 说明该TFTC可在短时间内耐受高温火焰冲刷。

TFTC已在航空发动机热端部件表面温度原位测量中展现出显著优势, 并逐步从实验室验证走向真实发动机工况应用。TFTC已在NGV、涡轮叶片及CMC等新型高温结构表面实现对局部热点和瞬态温度分布的测量。针对复杂曲面与现场应用需求, 研究工作逐渐突破传统光刻与溅射工艺在形貌适应性方面的限制, 发展出直写、手绘及印刷等更具灵活性的制备策略, 为大尺寸、复杂拓扑构件的原位集成提供了新的技术

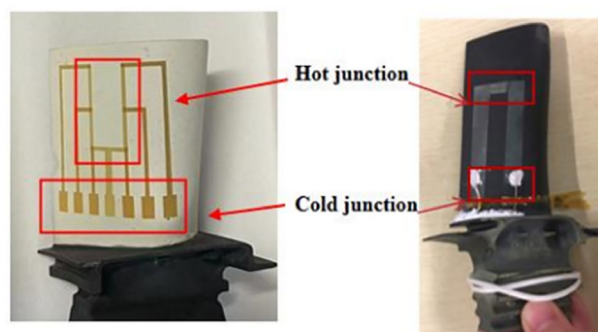


图2 (网络版彩图)合金涡轮叶片上的ITO- In_2O_3 TFTC及TFTC阵列(经IEEE许可, 转载自参考文献[24])

Figure 2 (Color online) ITO- In_2O_3 TFTC on alloy turbine blades and TFTC array. (Reproduced from ref. [24] with permission from IEEE).

路径。在材料体系方面, 除传统贵金属热电材料外, 氧化物半导体TFTC在抗氧化性、耐高温火焰冲刷及高温稳定性方面展现出良好潜力, 进一步拓展了TFTC在超高温环境下的应用边界。这些研究为实现航空发动机关键热端部件的高精度、快响应与长期可靠温度监测奠定了重要基础。

3.1.1 材料优化

同时, 随着新一代航空发动机的不断发展, 其燃烧室工作温度在不断提高, 其余热端部件温度随之上升。因此研究人员也在不断开发新材料用于高温TFTC测试, 提升热电材料的高温稳定性。目前, 常采用的ITO- In_2O_3 热电材料在高温下会受到ITO薄膜中锡挥发性的限制, 导致ITO薄膜相变并失效, 限制了测温上限。因此, 目前多数研究通过替换ITO薄膜实现更高温度的测试。

2018年, Liu等人^[26]采用磁控溅射方法制备了铬酸锶镧(strontium-doped lanthanum chromite, $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{CrO}_3$)- In_2O_3 TFTC, 具有较大的塞贝克系数(305.8 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$), 且可在1100°C持续10 h测温。2020年, Tian等人^[27]成功制备钨铼(WRe26)- In_2O_3 TFTC, 在700°C下输出电压为93.7 mV, 塞贝克系数为165.5 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$, 钨铼TFTC可在1500°C工作10 h, ITO- In_2O_3 可在1250°C正常工作, 因此该WRe26- In_2O_3 TFTCs有望用于超过1200°C的高温环境。此外, 该组研究人员还探究了退火对该TFTC热电性能的影响^[28], 最优退火程序为在1000°C的空气氛围下退火8 h, 塞贝克系数提升至201.6 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$, 并可在1000 K高温下工作20 min。尽管前述方法制备的TFTC

工作温度有所上升, 但仍低于1200°C.

2022年, Zhang等人^[29]在 In_2O_3 中引入氧化锌(zinc oxide, ZnO)纳米粉末, 并进行退火处理, 通过丝网印刷方法在氧化铝基板上制备了铟掺杂氧化锌(indium-doped zinc oxide, $\text{In}_{1.35}\text{ZnO}_{2.11}$)- In_2O_3 TFTC, 可在1500°C下表现出优异的热电性能, 平均塞贝克系数为39.8 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$, 并在1000°C、1马赫的发动机气体测试中实现测温. 此外, 2024年, Fan等人^[30]通过在 In_2O_3 中掺杂锌(zinc, Zn)元素, 获得Zn掺杂氧化铟(Zn-doped In_2O_3 , IZO)薄膜, 避免了薄膜在高温下的挥发, 并通过丝网印刷技术成功制备 In_2O_3 -IZO高温TFTC, 可在1200°C下稳定工作5 h, 最大热电势平均为23.57 mV, 塞贝克系数为25.8 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$, 并成功应用于1323°C的发动机尾焰温度测温中. 2025年, 该研究人员还通过掺杂氧化锆(zirconium oxide, ZrO_2)获得 $\text{In}_{1.7}\text{ZrO}_{3.55}$ 薄膜^[31], 进一步提升 In_2O_3 - $\text{In}_{1.7}\text{ZrO}_{3.55}$ 高温TFTC的测温上限, 可实现1600°C温度测试, 输出电压为75.72 mV, 塞贝克系数为48.95 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$. 同样地, 2024年, Liu等

人^[32]在 In_2O_3 薄膜掺杂 Al_2O_3 获得了 $\text{Al}_{0.1}\text{In}_2\text{O}_{3.15}$ 薄膜, 并与 In_2O_3 薄膜组成TFTC, 其热电输出相对较低, 但使用温度也可提高到1500°C. 进一步地, 2025年, Wang等人^[33]通过第一性原理和多物理场模拟评估了 In_2O_3 中掺杂钇稳定氧化锆(yttria-stabilized zirconia, YSZ)的可行性, 并通过丝网印刷技术成功制备 In_2O_3 (YSZ)/ In_2O_3 超高温TFTC传感器, 掺杂比为 In_2O_3 :YSZ92=9:1的TFTC在1850°C的最大热电输出电压为258.5 mV, 塞贝克系数可达180.9 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ (图3), 实现了工作温度的较大提升. 同时, 在没有 Al_2O_3 保护层的情况下, TFTC实现了97.13%的重复性. 在覆盖丝网印刷 Al_2O_3 保护层后, 重复性提升至99.29%. 传感器在动态测试实验中的响应时间为2.8 ms, In_2O_3 (YSZ)新型材料为超高温测量提供了实用方法.

该部分研究重点转向通过材料替代与成分调控提升TFTC的高温稳定性与可用温度范围. 一方面, 通过引入高熔点金属或稳定氧化物电极材料(如WRe26、 $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{CrO}_3$ 等), 实现了超过1000°C条件下的稳定测

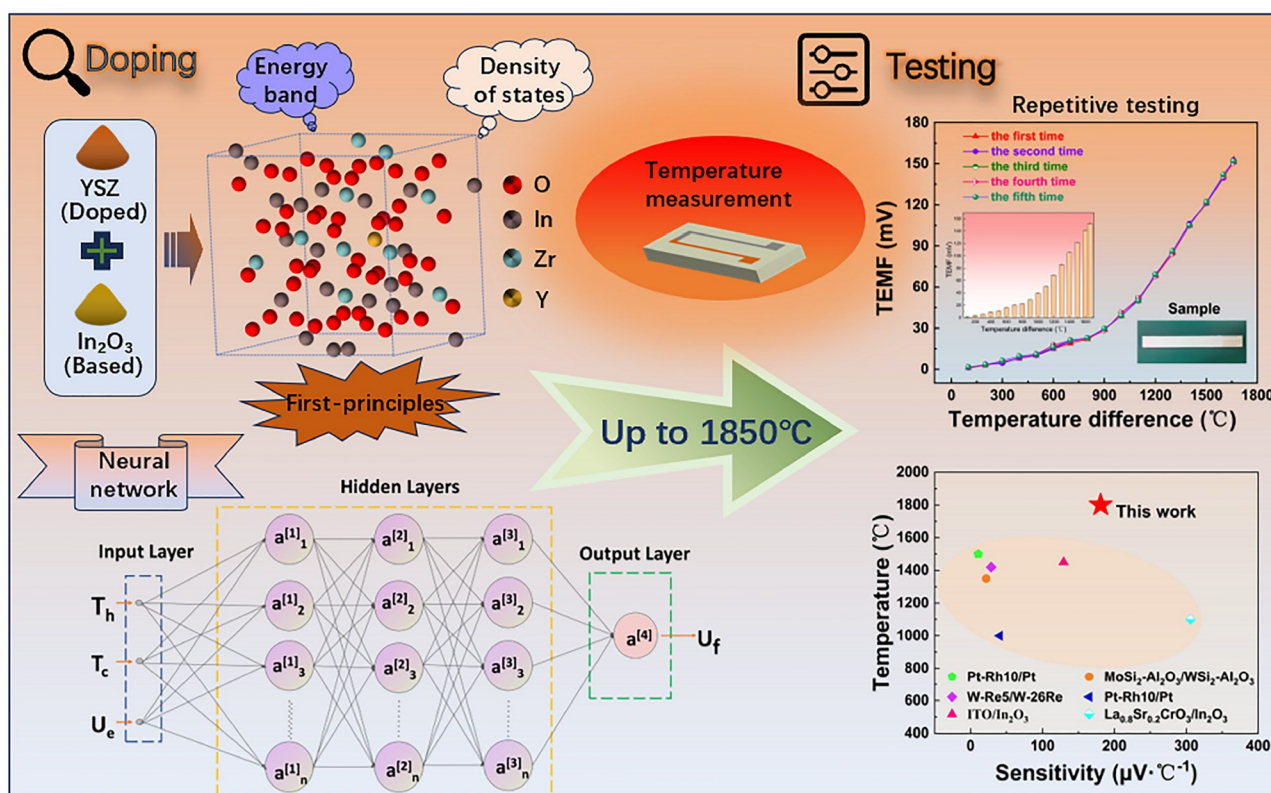


图3 (网络版彩图) In_2O_3 (YSZ)/ In_2O_3 超高温TFTC传感器(根据CC BY 4.0许可, 转载自参考文献[33])

Figure 3 (Color online) In_2O_3 (YSZ)/ In_2O_3 ultra-high temperature TFTC sensor. (Reproduced from ref. [33], licensed under CC BY 4.0).

温;另一方面,通过在 In_2O_3 中引入Zn、Zr、 Al_2O_3 及YSZ等掺杂或复合组分,有效抑制了高温挥发与结构失稳,显著拓展了刚性基TFTC的工作温度上限。

3.1.2 保护层提升测温上限

TFTC在高温下使用时,部分薄膜电极会发生热氧化、挥发或元素扩散导致TFTC失效^[34]。因此,针对TFTC高温测试需求,添加保护层也是一种有效避免TFTC失效的措施。

较多的研究通过添加 Al_2O_3 保护层实现了性能提升^[35]。2018年,Liu等人^[36]通过磁控溅射法为 $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{-CrO}_3/\text{Pt}$ TFTC添加 Al_2O_3 保护层,抑制了 $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{CrO}_3$ 薄膜的挥发,提升TFTC测温上限至 1280°C ,比未添加保护层的TFTC高 130°C 。2025年,Guo等人^[37]在航空发动机镍基合金上直接磁控溅射沉积镍铬铝钇(nickel chromium aluminum yttrium, NiCrAlY)薄膜过渡层,同时利用氧气退火生长了 Al_2O_3 薄膜绝缘层,再通过直流磁控溅射制造了铂-铂90铑10(Pt-Pt90%/Rh10%)S型薄膜敏感层,采用电子束蒸发和射频磁控溅射法制备了 Al_2O_3 薄膜保护层,可以保护敏感薄膜免受机械损伤、氧化和腐蚀。该TFTC传感器可工作至 1100°C ,塞贝克系数为 $8.16\ \mu\text{V}/^\circ\text{C}$,使用寿命超20 h。该传感器能够抵御航空发动机的恶劣环境,显著提升局部温度测量的准确性,并为涡轮叶片寿命预测和冷却设计提供了宝贵支撑。

只添加 Al_2O_3 保护层,TFTC的工作温度提升有限,为进一步提升TFTC热电性能,研究人员展开了复合保护层的研究。2019年,Zhao等人^[38]在氧化铝基板上制造并校准了Pt-Pt/Rh13% TFTC,并采用反应磁控管溅射技术制备夹层结构 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{氮化锆硼-碳氮化硅}(\text{zirconium boron nitride-silicon carbonitride}, \text{ZrBN-SiCN})/\text{Al}_2\text{O}_3$ 复合薄膜作为保护层,退火后复合薄膜内形成硅酸铝(aluminum silicate, Al_2SiO_5)晶体相和Zr-B-C非晶相,显著抑制了氧扩散。采用 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrBN-SiCN}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 复合薄膜作为保护层的TFTC在 1000°C 范围内展现出更优的稳定性和寿命,且TFTC的测试误差(0.49%)比只采用 Al_2O_3 保护层的TFTC(0.94%)降低48%,证明了该复合薄膜具有优异的抗氧化性能。2022年,Liu等人^[39]开发了适用于Pt-Pt90%/Rh10%热电偶的氧化铝/氮化硅(silicon nitride, Si_3N_4)/钇铝氧化物(yttrium aluminum oxide, YAlO),即 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{YAlO}$ 复合保护层,

在 1300°C 氮退火后,分别在 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}_3\text{N}_4$ 和 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{YAlO}$ 界面形成硅铝氧氮陶瓷材料(silicon aluminum oxynitride, $\alpha\text{-SiAlON}$)和钇掺杂 α -氮化硅铝固溶体(yttrium-doped $\alpha\text{-SiAlON}$)界面,具有较好的抗氧化性。只添加 Al_2O_3 保护层的TFTC在 1350°C 失效,具备 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{YAlO}$ 复合保护层的TFTC在 1500°C 失效,因此该复合保护层具有良好的抗氧化和抗冲击性。2025年,张朋等人^[40]开发了一种前驱陶瓷封装ITO/ In_2O_3 TFTC。以SiCN作为前驱溶液,以 Al_2O_3 纳米粉末为改性填充材料,通过丝网印刷工艺制备保护层,可以抑制敏感层的热挥发。制备保护层的TFTC可在短期内承受 1500°C ,可在 1400°C 以内稳定输出,有效提升ITO- In_2O_3 测温上限。同年,Ma等人^[41]采用脉冲激光沉积法在 Al_2O_3 基板上制造了 In_2O_3 -7 wt%铪掺杂 In_2O_3 (7 wt% hafnium-doped In_2O_3 , IHFO) TFTC,并通过丝网印刷和喷涂技术添加 Al_2O_3 和纳米二氧化硅(silicon dioxide, SiO_2)复合保护层。纳米 SiO_2 具有较高的密度,与高稳定性的 Al_2O_3 一起抑制了敏感薄膜在高温下的挥发。该传感器最高工作温度达到 1550°C ,比未加保护层的TFTC高 200°C 。在 $100^\circ\text{C}\sim 1300^\circ\text{C}$ 热循环测试中重复性小于2.4%,且在 1100°C 下持续9 h测试中展现出惊人的稳定性,漂移率为 $5^\circ\text{C}/\text{h}$ 。该复合保护层为薄膜在极端环境中应用提供了实用方法。

Al_2O_3 保护层因其优良的热稳定性、绝缘性能及工艺成熟度,被广泛用于高温TFTC的表面防护,可在一定程度上抑制敏感薄膜的氧化与挥发,提升测温上限与使用寿命。然而,单一 Al_2O_3 保护层在超高温与强热冲击条件下的防护能力仍存在一定局限。为进一步提升TFTC在极端工况下的可靠性,近年来研究重点逐渐转向多层与复合保护层设计。通过引入 Si_3N_4 、ZrBN-SiCN、YAlO、纳米 SiO_2 及前驱陶瓷等功能组分,复合保护层在抑制氧扩散、降低高温挥发等方面表现出明显优势,使TFTC的稳定工作温度由约 1200°C 提升至 1500°C 以上,同时显著改善了测温重复性与长期稳定性。基于多层结构与功能梯度设计的复合保护层正成为高温与超高温TFTC的重要发展方向,为其在航空发动机等极端环境中的工程应用提供了关键支撑。

3.1.3 热应力优化

目前TFTC失效的另一大原因主要是高温下多层

异质薄膜热膨胀系数差异引起的热应力不匹配, 导致薄膜开裂、脱落、剥离或分层。同时, 随着热端部件温度的提升, 薄膜所受热应力相应增加。因此, 为保证 TFTC 在高温下的正常使用, 展开热应力优化研究也是十分必要的。

2021 年, Liu 等人^[42]研究了基底表面粗糙度对多层结构中薄膜应力缓解的影响。研究人员在高温应力测试下分别比较了平滑和粗糙表面的薄膜样品, 粗糙表面的薄膜与基底的附着力更好, 而光滑表面的样品则因热应力较大导致薄膜剥落。粗糙表面对该多层结构中的薄膜应力具有一定的缓冲作用。

对于直接制造在涡轮叶片等热端部件表面的 TFTC, 由于大多数航空发动机热端部件基底通常为合金类的导电结构, 因此需在热端部件表面构建高温绝缘层, 并且为了保证热应力匹配, 有时也需要进行过渡层的设计。同时, 绝缘层上下存在一定的测温误差, 因此其厚度应足够薄以避免上述测温偏差, 又足够厚以确保高温下的电绝缘性能。2021 年, Xie 等人^[43]在铂铝(Pt-aluminide, PtAl)新型涡轮叶片基材上氧化生长厚度仅 3 μm 的 Al_2O_3 薄膜, 其与基底的热匹配友好, 在约 1000 $^\circ\text{C}$ 下表现出良好的电绝缘性能, 为构建智能薄膜传感器涡轮叶片表面提供可靠的基底。

然而, 陶瓷材料的电绝缘特性在高温下会退化, 从而影响 TFTC 热电特性。此前合金叶片较多使用物理气相沉积(physical vapor deposition, PVD)工艺沉积的 Al_2O_3 薄膜作为高温绝缘层, 陶瓷薄膜与金属基底间存在热应力不匹配, 易在更高温度测试中剥落。采用热阻隔涂层(thermal barrier coating, TBC)作为绝缘层可改善热应力不匹配的问题^[44], 但高温下 TBC 存在绝缘性下降的问题。2020 年, Weng 等人^[45]通过添加一定量的 Al_2O_3 陶瓷材料改进 YSZ TBC 配方, 以提升其高温下的绝缘性能。在改良 TBC 表面制造了 Pt-Pt/Rh13% 热电偶, 并研究了改良 TBC 在高温下的电绝缘性能。结果显示, 添加 50% Al_2O_3 , 在 800 $^\circ\text{C}$ 下的电气绝缘性达 $10^7 \Omega$, 满足在涂覆涡轮叶片金属的 TBC 表面上构建可靠薄膜传感器的要求。该 TBC 层可承受 40g, 10~2000 Hz 的振动和 100g 的冲击环境不发生脱落。将带有 TBC 的涡轮叶片安装在高温发动机燃烧室, 经 2 次 1200 $^\circ\text{C}$ /0.5 MPa 高温燃气循环后, TFTC 依旧存活, 输出正常。2021 年, 为研究界面扩散对 TFTC 在高温环境下的可靠性的影响, Lei 等人^[46]以涡轮叶片上的 TFTC 为研究对象, 基于

菲克定律提出了多层 TFTC 的并行扩散模型, 并在并联扩散模型基础上建立保护层、敏感层和绝缘层的可靠性模型。根据 TFTC 多层薄膜之间的逻辑相关性, 给出了 TFTC 的可靠性模型。最后, 基于多层扩散的可靠性模型, 采用蒙特卡罗方法模拟, 展示了该方法和模型的可行性。同时, 该组工作人员还研究了 ITO- In_2O_3 TFTC 多层膜结构在高温和随机振动下的机械可靠性^[47]。基于有限元模拟方法的弹性塑性模型, 系统分析多层薄膜材料热不匹配和振动引起的应力和应变分布模式, 并表征可能导致致命可靠性问题的应力集中和应变积累区域分布。当施加 1000 $^\circ\text{C}$ 的热载荷时, 结构的保护层容易受到严重的应力环境影响。此外, 塑性变形发生在功能层相邻层, 使其成为较弱的可靠性区域。振动载荷产生的应力远小于热应力, 热应力主要发生在结构的根部, 长时间载荷可能导致结构疲劳失效。

另外, 对于喷墨打印制备的 TFTC, 需要烧结以增强颗粒间结合力, 从而提升电导率、黏附强度以及整体的电气和机械性能。激光烧结具有高能量密度, 其烧结路径对薄膜表面的黏附性也有影响。2025 年, Han 等人^[48]在陶瓷基材上打印沉积 In_2O_3 薄膜, 并系统性研究激光烧结路径(X 方向、X-45 $^\circ$ 方向、Y 方向)对薄膜-基材附着强度的影响。对薄膜的表面形态和内部微观结构进行表征, 同时进行了纳米凹陷和刮痕测试以评估界面黏附强度。X 方向路径的平均黏附能达到 10.75 mJ/mm^2 , 而 X-45 $^\circ$ 方向路径和 Y 方向路径分别为 8.5 和 7.25 mJ/mm^2 。X 方向烧结路径使薄膜能够达到更高的烧结温度并保持更长的保存时间, 且烧结过程中承受的最大热应力即残余应力低, 从温度和应力分布的角度阐明了烧结路径、微观结构演化与界面黏附强度之间的关系, 为优化喷墨打印 TFTC 的制造工艺提供新见解。

高温 TFTC 的可靠性受热应力、薄膜-基底界面设计、电绝缘性能及制备工艺影响。通过优化基底粗糙度、绝缘层设计、TBC 改良、多层薄膜可靠性建模以及薄膜烧结路径控制, 可显著提高刚性基 TFTC 在高温和复杂环境下的可靠性和长期稳定性。

因此针对航空发动机热端部件高温测量, 刚性基 TFTC 已展现出高精度、快响应和原位测温优势。通过材料优化与成分调控可显著提高 TFTC 的高温稳定性及工作温度上限; 引入复合保护层进一步抑制薄膜氧扩散、高温挥发; 优化基底粗糙度、绝缘层设计及进

行热阻隔层改良等措施可提升TFTC在复杂曲面与极端环境下的附着力、电绝缘性及整体可靠性。综上,多维度的材料与工艺优化为热端部件表面瞬态高温的稳定测试提供保障,为TFTC在航空发动机等极端工况下的工程应用奠定坚实基础。

3.2 电池测温

TFTC可以直接沉积在电池极片表面、隔膜附件、电池壳体内壁等位置,具有较快的响应速度,可原位快速监测电池温度,具有较高的空间分辨率,可及时捕捉局部快速温升,防止电池发生热失控,为电池失效早期主动预警提供可行性。

具体地,对于质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cells, PEMFCs),温度在影响电化学反应速率、膜电导率、水和热管理以及整体系统性能方面起着关键作用。运行温度过高或过低可能导致膜降解、催化剂活性降低或反应不稳定,从而影响燃料电池的寿命和运行安全。PEMFCs内温度分布的准确实时监测对于优化热管理方式、提升系统可靠性和评估安全裕度至关重要^[49]。Liu等人^[50]在聚酰亚胺基底上制备了NiCr-NiSi TFTC,经校准:在10°C~150°C范围内具有高度线性和优异的重复性,且具有15 μs的响应时间,可在5000 μs内精确监测燃料电池板高达100°C的快速温升,这对于维持燃料电池的安全高效运行至关重要。同样地,TFTC可用于PEMFCs气体通道内部温度测量^[51],在PEMFCs上制备的NiCr-NiSi TFTC厚度仅3.6 μm,不会对封装或内部气体循环造成影响,响应时间快至2.9 μs。研究人员还探究了热结点尺寸对采用TFTC测量PEMFCs温度的影响^[52]。当PEMFCs配备不同热结尺寸的内置NiCr-NiSi TFTC时,系统达到稳态所需的时间会随热结大小变化,较小的热结尺寸更快达到稳态。在500 h连续运行测试中,NiCr-NiSi TFTC的失效率也因热结尺寸而异。无论是较小还是较大的热结尺寸,失效率相对较高,而中等尺寸的结点失效率较低。这些重复比较实验为PEMFCs内运行的TFTC尺寸设计提供了重要参考价值。

同样地,锂离子电池(lithium-ion batteries, LIBs)的大多数失效模式也与温度变化相关^[53],其可接受温度为-20°C~60°C^[54],最佳温度范围为15°C~35°C^[55]。一旦温度过高,LIBs性能会迅速退化^[56]。2025年,Liu和Mao^[57]采用NiCr-NiSi TFTC测量LIBs系统温度,并进

行了外部短路和穿刺测试。电池中心温度在外部短路后180 s内升至116°C,负极温度可达158°C,穿刺时温度可达122°C,为防止热失控,有效监测中心和负极温度变化至关重要。TFTC可为电池热失控早期预警提供可行性且已在PEMFCs和LIBs内得到应用验证。但是TFTC在电池温度监测中的应用仍面临诸多局限性与挑战。首先,TFTC通常测量的是电池表面或局部界面的温度信息,而电池内部存在复杂且高度非均匀的热生成与传热过程,因此测得温度与电芯内部真实温度之间可能存在一定偏差。其次,TFTC对界面热接触状态高度敏感。在电池充放电循环过程中,由于极片膨胀、结构应力变化及电解液渗透等因素,传感器与被测对象之间的接触热阻可能发生变化,从而引入测量不确定性及信号漂移问题。此外,电池工作环境中的化学活性和热应力可能引起薄膜热电材料及保护层材料的性能退化。与此同时,TFTC输出信号幅值较低,在大电流充放电条件下易受电磁干扰。针对以上局限性,可从传感器布设、结构设计及系统集成等方面进行改进。通过多点布设并结合电池热模型,可在一定程度上弥补局部表面测温对电芯内部温度表征不足的问题。在结构与材料方面,优化薄膜厚度及界面过渡层设计,并引入耐化学腐蚀的保护层,有助于提高测量稳定性和长期可靠性。此外,针对输出信号幅值较低的问题,可采用差分测量与电磁屏蔽等手段以提升抗干扰能力。

3.3 切削刀具测温

在机械加工领域,同样需要TFTC测温,比如针对刀具-切屑-工件接触区等狭小空间快速温度变化的场景,切削温度过高会导致刀具表面产生磨损,致使刀具寿命缩短或刀具断裂等危险情况发生^[58]。

刀具磨损高度依赖温度。因此,2021年,Li等人^[59]在多晶立方氮化硼(polycrystalline cubic boron nitride, PCBN)切削工具中嵌入NiCr-NiSi TFTC,用于硬化工具钢切割过程中的刀具磨损实时监测。2024年,Kim等人^[60]在切削刀具表面上制造了TFTC传感器,优化薄膜沉积条件以提升薄膜在刀具上的黏附力,防止切割过程中TFTC薄膜的脱落造成失效。同时,考虑到切削过程中的强烈摩擦和压缩会对TFTC造成磨损,需要添加保护层防止敏感薄膜破损。2025年,Zhang等人^[61]在碳化钨基板上制备SiO₂绝缘层及功能性NiCr-NiSi薄膜

后, 添加了类金刚石碳(diamond-like carbon, DLC)保护层后, 仍具有 $1.2\ \mu\text{s}$ 的响应速度, 最终可用于车刀测温. 同年, Zhou等人^[62]在碳化钨硬质合金刀具上采用非定比氮化硅(silicon nitride, SiN_x)薄膜涂层进行电气隔离, 制备NiCr-NiSi TFTC后, 并制备了耐磨的氮化铝钛(titanium aluminium nitride, TiAlN)涂层进行保护. 研究了保护层热障效应对TFTC切割热传递的影响, 发现TiAlN涂层减少了对TFTC的切割热传递, 刀具的TFTC-TiAlN界面温度比刀具-切削界面低约4%. 最终, 利用TFTC测量了车削切割玻璃纤维增强塑料时的刀具-切屑界面温度, 发现切割速度显著影响了TFTC的服役寿命, 热结点的磨损面积随切削速度及长度增加而增大.

同时, 针对高速旋转工况下的测量系统也展开了相关研究. 2024年, Chen等人^[63]将无线温度测量系统集成到嵌入式TFTC刀具中, 具体的: 采用等离子体增强化学气相沉积法在硬质合金上获得 SiO_2 绝缘薄膜后制备NiCr-NiSi TFTC, 使用导电银胶将NiCr-NiSi补偿丝与切削工具结合, 补偿线连接高精度数据采集卡, 通过无线数据传输连接电脑完成测试电路布置, 在切削实验中, 进给速度增加, 切削温度梯度和峰值会显著增加.

但是, 传统的引线连接方式(如导电银胶)存在结合强度低, 容易松动或脱落的缺陷, 不适合高速旋转环境测温信号引出, 并且有线温度测量系统存在复杂的线路和电磁干扰问题, 而无线系统则存在信号不稳定和传输距离有限的问题. 因此, 2025年, 为进一步提升刀具表面薄膜到采集设备的稳定信号传输, Yin等人^[64]在碳化合金铣削刀片上制备 SiO_2 绝缘薄膜后, 制备了NiCr-NiSi TFTC传感器和 SiO_2 保护薄膜, 采用弹簧销连接装置与导电滑环系统进行信号传输. 具体的: 利用弹簧探针作为中间导体, 将薄膜与导线连接, 从而分离传感和信号传输功能, 允许快速更换承载TFTC的铣刀插入件. 弹簧探针尾连接补偿线. 铣刀插入件、弹簧探针连接器和刀具夹具通过螺栓固定, 以确保弹簧探针与温度传感器薄膜牢固接触. 补偿线从弹簧探针尾部穿过刀具夹具, 连接到滑环转子上的相应导线. 转子通过螺栓固定在工具柄上的预加工槽中, 并与主轴高速旋转. 随后, 信号通过定子引线传输到多通道信号采集装置. 最后, 在铣削镍基合金的实验中发现: 切削速度和深度分别通过热源强度和接触载荷影响刀

具磨损, 而进给速率则起次要作用. 虽然针对切削刀具的测温已展开许多研究, 但是现有研究仍主要集中于特定材料和工况, 未来的研究应扩展到更广泛的加工场景——如多样化的切削材料, 润滑条件下的磨损行为, 以验证其在制造任务中的通用性. 此外, 刀具运行、夹具引起的振动和环境热波动等不确定性会影响热场演化和磨损传播. 还应探讨各种切削工艺、刀具材料和磨损机制之间的相互作用, 从而为高效且准确的刀具寿命预测和加工优化提供全面的理论和技术支持.

3.4 其余应用

另外, 刚性基TFTC可用于新能源汽车发动机的精确温度测量与动力系统热管理优化研究中^[65,66], 可用于磁控溅射时薄膜生长表面与基底表面的温度梯度测量^[67], 可用于骨钻过程中骨-工具界面的实时温度监测^[68], 可用于可变摩擦摆轴承的摩擦加热测温^[69]. 说明TFTC具有广阔的应用领域.

另一方面, TFTC可采用MEMS工艺进行制备, 可进一步与半导体工艺结合, 具备与微电子、集成电路、无线通信模块兼容集成的优势, 适用于在半导体器件和微纳芯片上构建多参数、分布式温度测量系统, 具有简单制造优势, 其工艺成熟适合大规模生产, 且尺寸可扩展到微米和纳米尺度. Xiang等人^[70]探究了TFTC在新能源电驱动系统中绝缘栅双极晶体管温度测量的可行性和性能. 同时, 由氮化镓(gallium nitride, GaN)制成的高电子迁移率晶体管(high electron mobility transistors, HEMTs)在高功率和高频应用中至关重要, 并且能够承受高温. 然而, HEMTs在高功率时可能会出现自发热效应, 导致电流崩溃和性能下降, 影响设备性能及可靠性. 氮化镓器件的准确温度监测对于保持性能和避免故障至关重要. Irshad Bhatti等人^[71]展示了TFTC与GaN HEMTs的集成: 采用三氯化硼/氯气(boron trichloride/chlorine, BCl_3/Cl_2)等离子体反应离子刻蚀来形成台面, 从而实现器件隔离. 在沉积源极和漏极电极之前, 使用稀盐酸溶液去除氮化铝镓(aluminum gallium nitride, AlGaIn)/GaN外延晶片表面的原生氧化层. 源极和漏极接触采用钛(25 nm)/铝(120 nm)/钛(45 nm)/金(100 nm)金属堆叠和剥离工艺形成, 并在氮气气氛中于 875°C 退火50 s. 采用电子束蒸发和溅射法分别制造了双层镍(35 nm)/金(100 nm)

薄膜. 该GaN HEMT的源极和漏极距离为25 μm , 栅极长度为3 μm , 栅极宽度为200 μm . 为了提高器件的耐久性, 分别采用原子层沉积和等离子体增强化学气相沉积法在器件结构上沉积了由 Al_2O_3 (10 nm)/ SiO_2 (300 nm)组成的钝化层. 采用直接激光写入技术对微型TFTC(结点宽2 μm)图案进行光刻. 采用溅射法沉积厚度均为100 nm的铂和铬薄膜. 为了提高附着力, 在沉积铂之前沉积了一层薄薄的钛(10 nm). 图4为器件的截面视图, 图5为器件的顶部视图, 展示了漏极与栅极之间的微型TFTC热结点位置. 经校准, 该TFTC线性测试温度达200 $^{\circ}\text{C}$, 其塞贝克系数为 $(19.23 \pm 0.405) \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$. 这使得能够实时精确监测氮化镓HEMT通道(通道宽度=200 μm)温度, 测量温度为 $(68.54 \pm 0.16)^{\circ}\text{C}$, 凸显了该技术在半导体器件热测试中的有效性. 上述研究进一步展示了TFTC在先进制造、功率电子与微纳器件

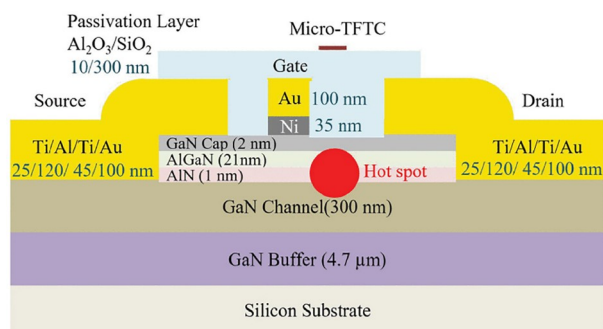


图4 (网络版彩图)器件截面示意图(根据CC BY 4.0许可, 转载自参考文献[71])

Figure 4 (Color online) Device cross-section schematic diagram. (Reproduced from ref. [71], licensed under CC BY 4.0).

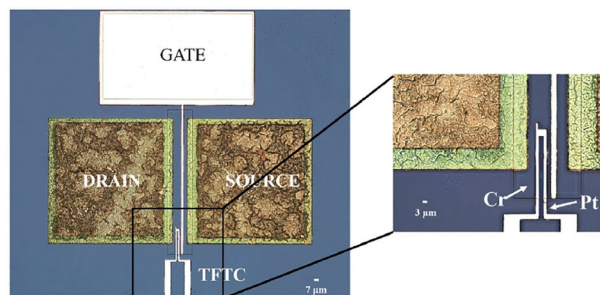


图5 (网络版彩图)器件顶部视图(内嵌显示了TFTC在漏极与栅极之间的位置)(根据CC BY 4.0许可, 转载自参考文献[71])

Figure 5 (Color online) Top view of the device (embedded view showing the position of the TFTC between the drain and gate). (Reproduced from ref. [71], licensed under CC BY 4.0).

热管理中的重要应用前景.

4 柔性基TFTC

相比之下, 柔性基TFTC侧重机械顺应性与界面贴合能力, 是“刚柔并济”理念在复杂曲面与动态服役环境中的重要延展. 柔性基TFTC通常以聚酰亚胺(polyimide, PI)、热塑性聚氨酯(thermoplastic polyurethane, TPU)、聚二甲基硅氧烷(polydimethylsiloxane, PDMS)、水性聚氨酯(waterborne polyurethane, WPU)、云母片等柔性基底为载体, 通过溅射或蒸镀方式制备铜-康铜等热电薄膜^[72-75]. 相比刚性基底, 柔性基TFTC具有可弯曲、可贴合、可嵌入复杂曲面的特点, 可实现大面积阵列与多点分布式测温, 适合用于非平整曲面或动态接触界面的瞬态传热测量^[76,77]. 柔性基TFTC根据应用温度分为低温柔性基TFTC和高温柔性基TFTC温度传感.

4.1 低温柔性基TFTC温度传感

低温柔性基TFTC多用于可穿戴设备中, 追踪人体呼吸运动、实时动作、肌肉收缩和伤口监测, 特别是针对老年人、儿童和运动员进行全面的健康监测非常重要. 2022年, Miao等人^[78]在柔性PI基底上通过磁控溅射工艺制备了T型铜-康铜TFTC阵列, 用于监测呼吸过程中的温度变化. 呼吸测量结果显示, 呼吸暂停时峰值电压比正常呼吸下降了90%. 该传感器在可穿戴式睡眠呼吸暂停低通气综合征检测方面具有应用潜力. 伤口温度和愈合阶段相关, 伤口部位温度升高可能是感染、炎症或充血的症状并且是早期预测伤口慢性化的因素. 相反, 伤口温度相对于身体其他部位的下降可能是胶原蛋白沉积减少、晚期“再生”炎症细胞以及成纤维细胞减少的信号. 因此, 2022年, Jose等人^[79]基于高度可拉伸的TPU基底, 通过丝网印刷的方式制备导电聚合物聚3,4-乙氧基噻吩: 乙烯二氧噻吩(poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrene sulfonate), PEDOT:PSS)薄膜和温度传感器. 一个结点设在被监测的皮肤(伤口)相关区域, 另一个结点设在健康皮肤(距离伤口几厘米), 监测伤口与正常皮肤之间的相对温度 ΔT 产生的热电电压. 该方案已在小鼠伤口愈合模型中得到验证, 为开发临床应用的智能创伤敷料提供了方案.

对于柔性基TFTC, 机械变形导致热电性能波动, 如弯折、拉伸会引起薄膜应力集中, 导致薄膜内产生微裂纹, 最终引起热电系数变化或信号飘移, 在动态或长期加载工况下尤为明显. 2025年, Xiong等人^[80]在柔性PI基底上通过物理气相沉积工艺制备了T型TFTC阵列, 探究了薄膜厚度与电阻的关系, 薄膜过厚导致薄膜电阻大幅增加且会影响其柔韧性, 最终确定工艺参数后, 所制备的TFTC测温偏差小于等于 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$, 且经过50次卷曲后, 薄膜电阻无显著变化. 此外, 还可以通过设置缓冲层(如 SiO_2 、钛、铬、 SiN_x), 缓解应力集中, 提高循环稳定性. Shi等人^[81]为PI基ITO- In_2O_3 TFTC添加 SiO_2 缓冲层提升了薄膜在弯曲下的稳定性.

或者通过优化电极结构、基底结构以减小应力. Liu等人^[82]设计了柔性TFTC热电层中的弯曲电极图案替代传统的直电极(图6(a)), 同时采用电感耦合等离子体技术用氧离子刻蚀PI基底表面, 制备波浪状微观结构进行修饰(图6(b)~(e)), 柔性基TFTC对变形和损伤的抵抗力大大提升. Jeon等人^[83]用PDMS作为TFTC的柔性基底. PDMS微通道的顶层和铂电极底层在光学显微镜下被精确对齐形成电解质通道, 并通过每层表面羟基的脱水缩合组装而成. 这些TFTC表现出良好的抗变形能力, 尽管受到高达23%(接近断裂应变)的外部拉伸应变影响, 温度测量无显著降解. 也可以通过掺杂改善热电薄膜抵抗变形的能力. Liu等人^[84]优化薄膜结构设

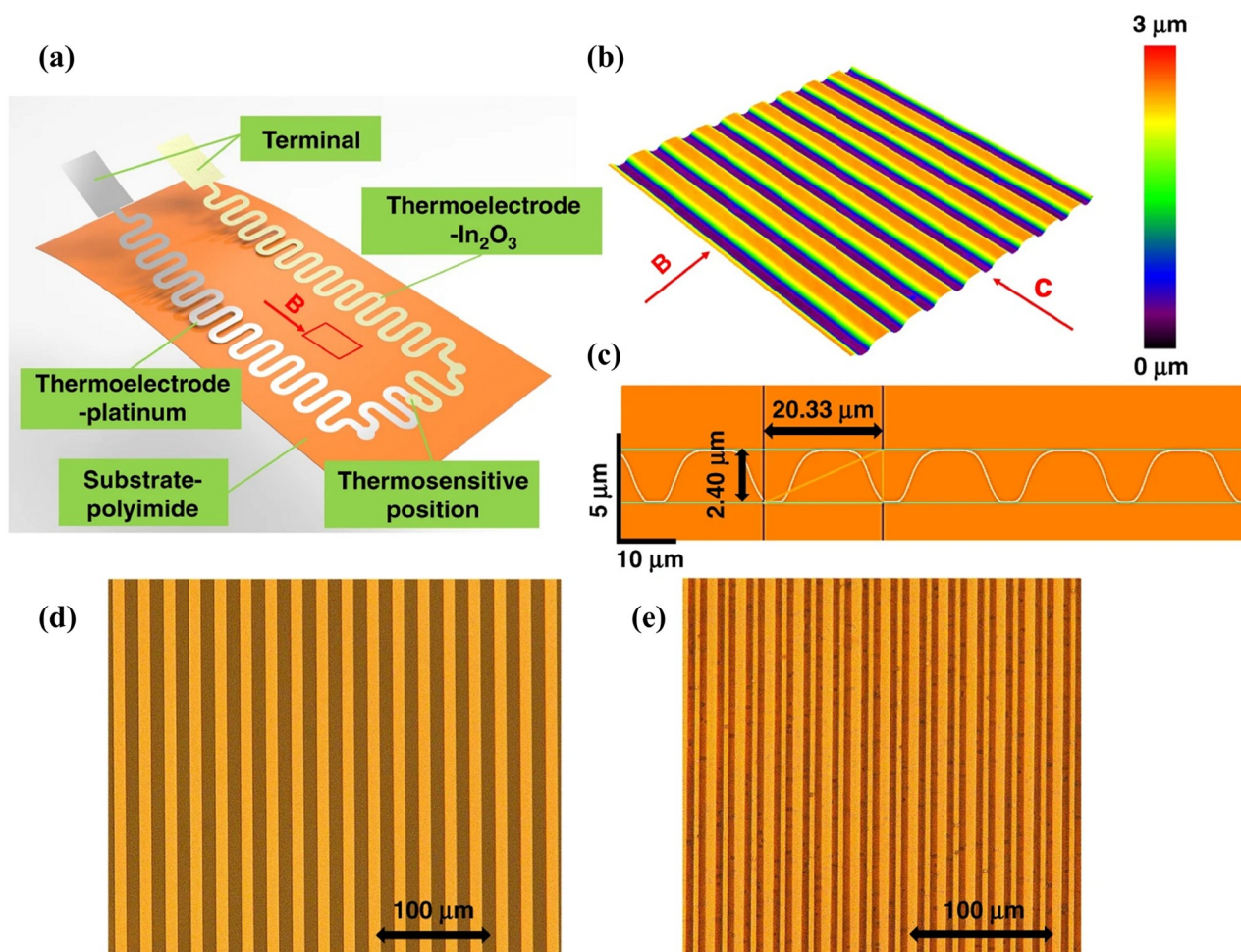


图 6 (网络版彩图) (a) 一种用于测量温度的柔性微三维传感器. (b) 基底的微观结构. (c) 基底微观结构的横截面. (d), (e) 通过光学显微镜观察获得的光刻掩膜和聚酰亚胺基板(根据CC BY 4.0许可, 转载自参考文献[82])

Figure 6 (Color online) (a) A flexible micro-3D sensor for temperature measurement. (b) Microstructure of the substrate. (c) Cross-section of the substrate microstructure. (d), (e) Photolithographic mask and polyimide substrate obtained by optical microscopy. (Reproduced from ref. [82], licensed under CC BY 4.0).

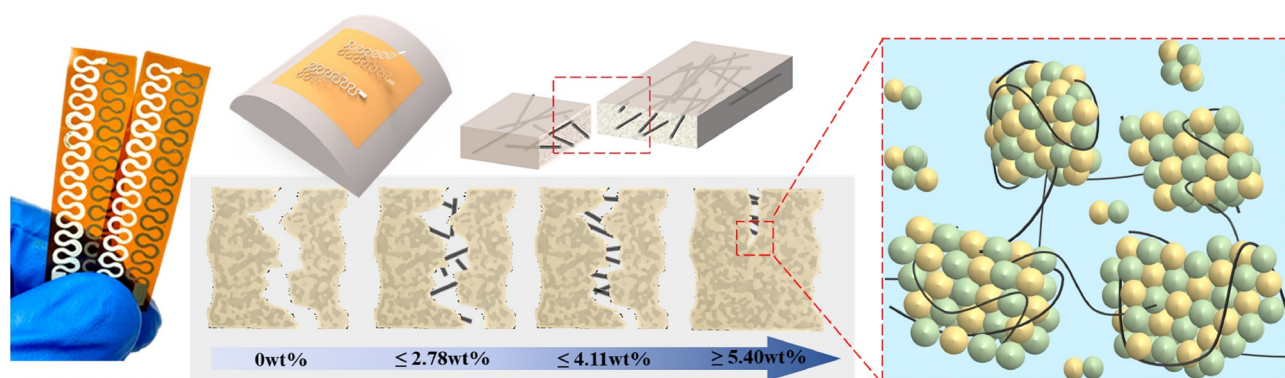


图7 (网络版彩图)采用Peano结构的柔性TFTC温度传感器(根据CC BY 4.0许可, 改编自文献[84])

Figure 7 (Color online) Flexible TFTC temperature sensor with Peano structure. (Adapted from ref. [84], licensed under CC BY 4.0).

计, 采用弧度 270° 结构而非传统线性结构作为薄膜形状(图7), 并将多壁碳纳米管(multi-walled carbon nanotubes, MWCNT)掺杂于热电材料 In_2O_3 中, 构建粉末-纤维错列黏附薄膜微观结构, 有效改善 In_2O_3 薄膜的韧性差、易断裂和不稳定的问题, 最终丝网印刷制备的高可靠性TFTC在整个拉伸和弯曲测试中保持稳定且连续的温度测量能力, 并可用于呼吸监测. 通过优化薄膜厚度、引入缓冲层、设计柔性电极与波浪状基底结构、采用高延展性基底材料及掺杂碳纳米管等方式, 有效提升了柔性TFTC在循环弯曲和大应变条件下的结构完整性与测温稳定性.

此外, 每个区域还可以布置多个温度测量传感器阵列, 实现零件表面的温度场检测^[76]. 或者与其他物理量测试传感器进行集成, 同时获取多参量变化. Jung等人^[85]利用喷墨打印法在纸张平面开发了柔性TFTC. 使用PEDOT:PSS和银纳米颗粒在柔性纸质上形成热电偶. TFTC的最高测量温度为 150°C . 此外, 阵列TFTC与阵列压力传感器集成(图8), 实现特定区域的温度和压力检测, 展示了电子皮肤应用的巨大潜力. 此外, 用PDMS封装传感器赋予了其优异的弯曲性能, 器件在多达1000+弯曲循环后仍能保持初始性能.

Xu等人^[86]开发了一套可同步测试温度及应变的多功能传感器, 具有结构灵活可伸缩的优点. 将碳纳米线圈、WPU、PEDOT:PSS的复合薄膜制备在两个PDMS薄膜中间, 获得温度-应变多功能传感器. 其中, 应变传感器表现出0~50%的宽应变检测范围. 温度传感器表现出 $13\ \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 的塞贝克系数. 多功能传感器直接连接到人体皮肤上, 不仅能检测到细微的人体运动

和应变刺激, 还能通过温度信号的差异区分不同的刺激, 比如温暖或寒冷的物体. Xin等人^[87]制造了包含20个阵列的TFTC温度传感器, 并集成17个该温度模块, 应用于机械手表面实现了人工皮肤的功能(图9(a)和(b)), 该模块具有拉伸特性(图9(c)), 能够监测手部表面温度分布. 实验中, 当手指接触阵列模块时(图9(d)), 生成了温度图(图9(e)). 温度分布与触摸温度传感器阵列的手指方向一致. 在表面放置冰块(图9(f)), 测得冰的最低温度为 1.25°C (图9(g)), 这与冰水混合物的温度一致. 这些实验演示验证了柔性TFTC能够满足软机器人、机械手及其他人工皮肤应用的需求, 具有广阔的

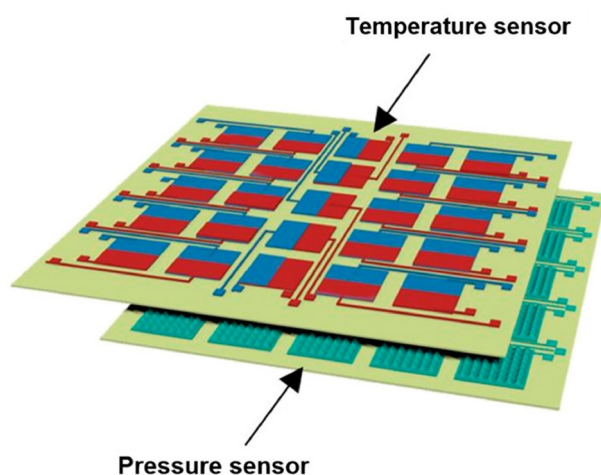


图8 (网络版彩图)电子皮肤应用的温度-压力复合柔性传感器(经ACS出版社许可, 转载自参考文献[85])

Figure 8 (Color online) Temperature-pressure composite flexible sensor for electronic skin applications. (Reproduced from ref. [85] with permission from ACS Publications).

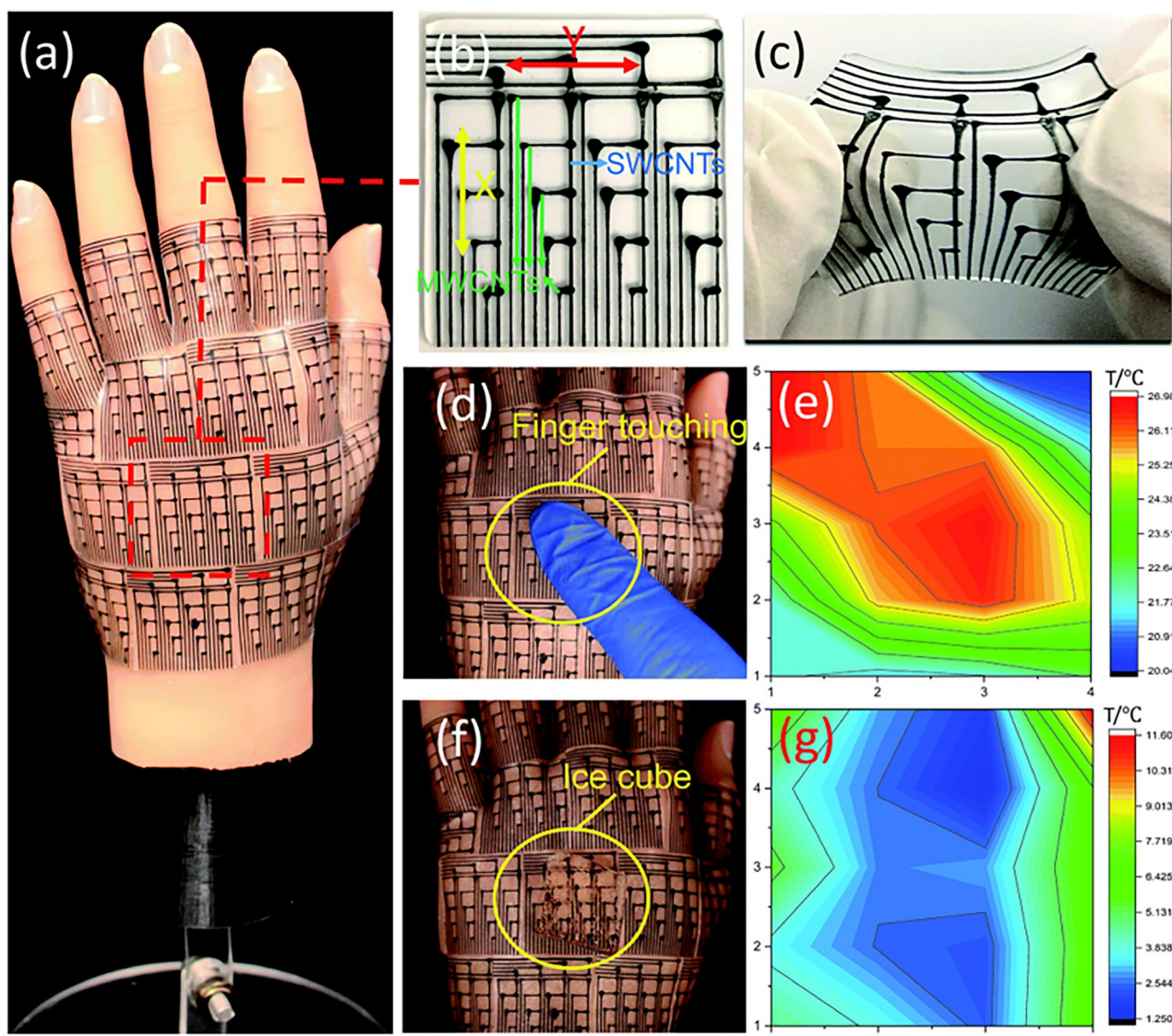


图 9 (网络版彩图) 电子皮肤应用的温度柔性复合传感器检测软机械臂表面的温度分布. (a) 打印出来的温度传感器阵列被黏贴在柔软的机器人表面上, 作为人工皮肤. (b) 温度传感器阵列结构, 20 个阵列在 PDMS 基板上图案化. (c) 温度传感器阵列在 Y 方向的拉伸. (d), (f) 通过用 (d) 手指和 (f) 冰块触摸温度传感器阵列进行温度感应测试. (e), (g) 由温度传感器阵列测量得到的 (e) 手指和 (g) 冰块的温度分布 (遵循知识共享署名-非商业性使用 3.0 未本地化版本许可协议 (CC BY-NC 3.0), 摘自参考文献 [87])

Figure 9 (Color online) A flexible composite temperature sensor for electronic skin applications detects the temperature distribution on the surface of a soft robotic arm. (a) A printed temperature sensor array is glued to the soft surface of the robot as artificial skin. (b) The structure of the temperature sensor array, with 20 arrays patterned on a PDMS substrate. (c) Stretching of the temperature sensor array in the Y direction. (d), (f) Temperature sensing tests performed by touching the temperature sensor array with (d) a finger and (f) an ice cube. (e), (g) Temperature distributions of (e) the finger and (g) ice cube, respectively, measured by the temperature sensor array. (Reproduced from ref. [87] under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported Licence (CC BY-NC 3.0)).

应用前景.

因此, 通过阵列化设计及与压力、应变等传感器的集成, 柔性 TFTC 可实现多参数、分布式温度感知, 在电子皮肤、软体机器人及人机交互等领域表现出广

阔应用前景.

4.2 高温柔性基 TFTC 温度传感

常见的柔性基底耐受温度较低, 在高温发生碳化

后脆性变大,例如PI薄膜最高长期使用温度为300°C,在高温摩擦或强辐射热环境应用受限,因此不少研究人员展开高温柔性基底的创新研发,如气凝胶垫、纳米纤维垫和云母^[88,89],并制备TFTC用于高温测试。

2022年, Liu等人^[90]使用气凝胶垫作为柔性基底,为了克服柔性基底表面的粗糙性,使用有机聚合物作为溶剂混合 In_2O_3 和ITO热电粉末。通过丝网印刷技术将热电薄膜沉积在基底表面,该TFTC在-190°C~1200°C的温度范围内展现出卓越的温度测量能力,其塞贝克系数达到226.7 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 。该TFTC被集成到环保透明面罩上,同样可用于呼吸监测。利用该材料和工艺制备阵列式柔性温度传感器,可安装到机械灵巧手上实现对烧杯中热水温度的监测,大面积阵列温度传感器具有极佳的温度分辨率。除去日常生活的温度监测,该TFTC可用于高温环境,这些环境伴随高频振动和高加速度冲击。经验证,该传感器可承受100g冲击加速度和2000 Hz的高频振动,并验证了TFTC在各种极端环境中的应用。在模型飞机发动机尾部安装该柔性TFTC传感器用于实时监测尾部气流温度。测试结果显示,柔性TFTC测得的气流温度最高可达860.1°C。该柔性TFTC还可通过测量温度,应用于冶金过程的控制。通过电磁感应加热方式熔化了1 mm×1 mm×1 mm的铝块,待其熔化后放置在坩埚中自然冷却,柔性TFTC的温度感应部分放置在坩埚内,记录了铝块加热和冷却过程中的实时温度。经测试,坩埚温度最高可达600°C。该柔性TFTC在冶金工程的温度测量中展现出巨大潜力。2023年,该组研究人员^[91]基于静电纺丝,通过优化制备工艺参数获得了具有优异高温机械性能的柔性氧化铝-硅氧化物(alumina-silicon oxide composite nanofiber, Al_2SiO_5)纳米纤维垫(图10),其在室温至970°C范围内具有良好的机械性能,最大抗拉强度为3.09 MPa。 In_2O_3 和ITO图案化热电薄膜通过磁控溅射技术(图10(a))、真空气相沉积技术(图10(b))、喷墨打印技术(图10(c))制备在柔性 Al_2SiO_5 纳米纤维垫上。同时,充分利用静电纺丝技术(图10(d)和(e))制备的纳米纤维膜工艺特性,将纺丝纤维覆盖在柔性高温TFTC表面,形成连续包裹的保护层(图10(d₁)和(e₁)),大大减少了热电薄膜层的损伤可能性,实现高温柔性传感器的柔性封装,封装的柔性TFTC测试温度最高可达700°C(图10(e₂)),传感器始终保持正常工作。基于静电纺丝制备的多功能纳米纤维垫在未来柔性传感器领域的基

底及封装领域的应用前景巨大。2025年, Tian等人^[92]采用柔性云母片作为基底,通过喷墨打印工艺配位化学调控实现了稳定前驱体墨水的长期存储与打印稳定性,并制备了ITO/ In_2O_3 TFTC,该柔性TFTC具有均匀结构,测温范围可达-196°C~848°C,塞贝克系数高达130 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$,性能稳定且可重复,在弯曲变形、拉伸载荷和长达100 h的热循环(高达800°C)条件下保持稳定的温度输出。该喷墨打印方法不要求真空环境,不需要靶材、掩膜,常压环境即可打印敏感薄膜,具有磁控溅射等昂贵的真空设备不具备的优点,其可大面积制造,打印结构具有多样化,可以在曲面、大尺寸、不可进入的腔体结构表面制备蛇形、直线形等形状的微小尺寸的敏感薄膜。喷墨打印不存在等离子体轰击与高能粒子沉积,对在柔性基底上制备薄膜的内应力更友好,减少薄膜开裂、起皱问题的出现。因此,在柔性表面上快捷制备敏感薄膜方面具有广阔的应用前景。

总体来看,针对传统柔性基底耐温能力不足的问题,近年来通过引入气凝胶垫、纳米纤维垫及云母等新型高温柔性基底,并结合低应力薄膜制备与柔性封装策略,显著拓展了柔性TFTC的可用温度范围与服役可靠性。这类柔性TFTC不仅在数百至近千摄氏度范围内保持稳定的热电响应,还能够承受高频振动、大加速度冲击及复杂曲面贴合条件,成功实现了在发动机尾流、冶金过程等热端部件中的原位测温应用。高温柔性基底与可扩展制备工艺的协同发展,为TFTC在复杂结构与极端工况下的工程化应用提供了新的技术路径。

5 总结与展望

本文围绕“刚柔并济”TFTC温度传感技术,对刚性基与柔性基TFTC的研究进展及应用现状进行了系统梳理。从整体发展趋势来看,刚性基TFTC凭借优异的高温稳定性、结构可靠性(如高结构强度及抗冲刷能力),在航空航天、能源与高温装备测温等极端环境中仍占据主导地位,已在航空发动机热端部件、电池系统及切削加工等场景中实现原位、高时空分辨率测温。围绕高温服役需求,研究重点逐步从传统贵金属体系扩展至氧化物、复合半导体及掺杂调控材料体系,并通过引入多层复合保护层、过渡层与热应力匹配设计,有效提升了测温上限、长期稳定性与结构可靠性,

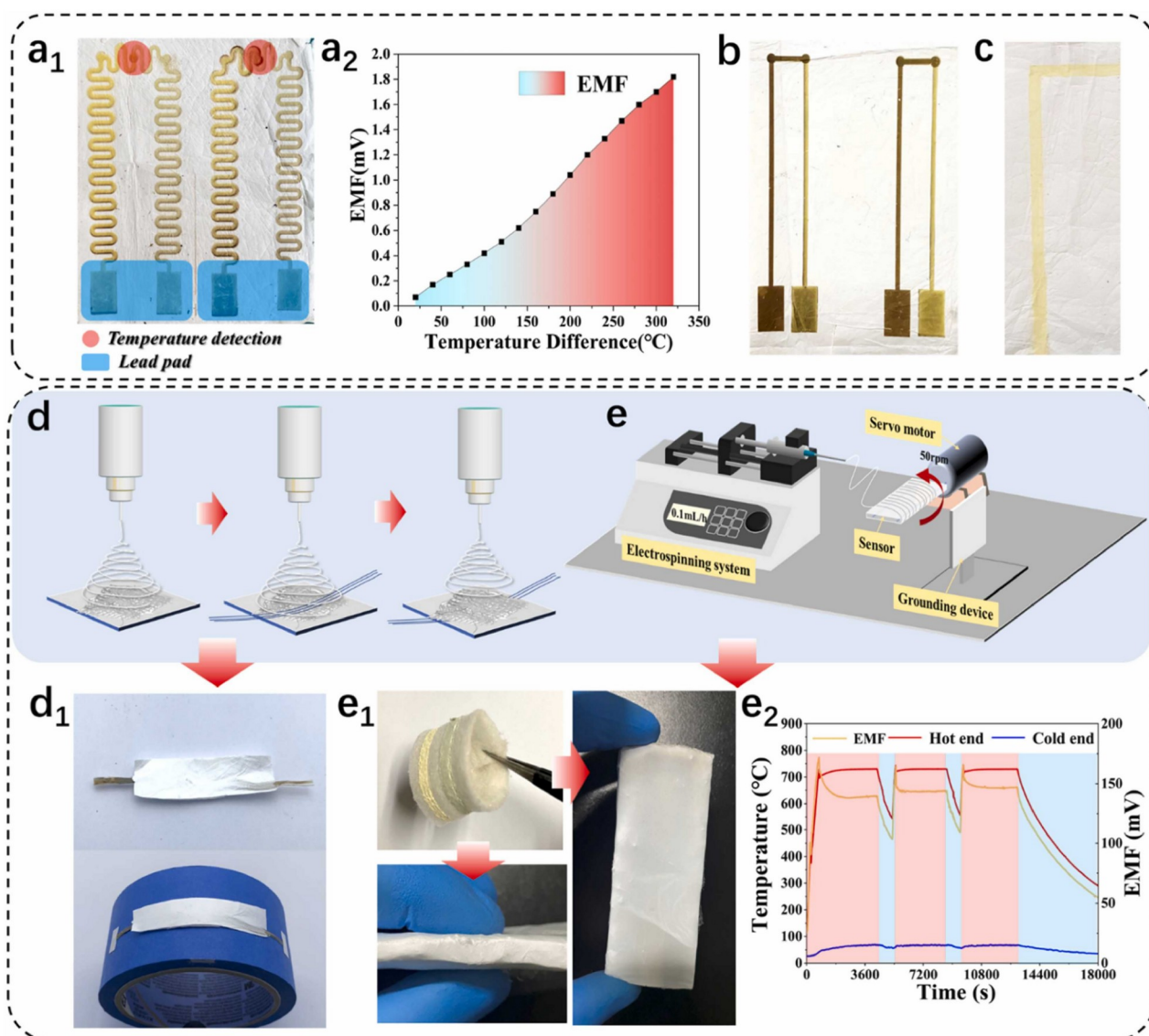


图 10 (网络版彩图) 纳米纤维垫的多功能应用. (a₁) 利用磁控溅射技术在纳米纤维垫上制备热电薄膜. (a₂) 柔性TFTEC的特性曲线. (b) 利用真空气相沉积技术在纳米纤维垫上制备热电薄膜. (c) 通过喷墨打印技术制备热电薄膜. (d) 充分利用静电纺丝工艺特性, 实现“汉堡”式封装. (d₁) 将多条铝硅酸盐纤维封装在一体化的纳米纤维垫中. (e) 利用伺服电机的旋转将柔性高温TFTEC的外部封装. (e₁) 用纳米纤维薄膜包裹封装后的柔性高温TFTEC. (e₂) 带有保护层的柔性高温传感器的响应特性(经ELSEVIER许可, 转载自参考文献[91])

Figure 10 (Color online) Multifunctional applications of nanofiber mats. (a₁) Preparation of thermoelectric thin film on nanofiber mats using magnetron sputtering technology. (a₂) Characteristic curves of the prepared flexible TFTEC sensor. (b) Preparation of thermoelectric thin film on nanofiber mats using vacuum vapor deposition technology. (c) Preparation of thermoelectric thin film by ink jet printing technology. (d) Making full use of the characteristics of the electrostatic spinning process to achieve a “hamburger”-type encapsulation structure. (d₁) Encapsulation of multiple aluminosilicate fibers in an integrally prepared nanofiber mat. (e) Using the rotation of a servo motor to encapsulate the exterior of a flexible high-temperature TFTEC. (e₁) Flexible high-temperature sensor after the package, wrapping a nanofiber film around the sensor. (e₂) Response characteristics of the flexible high-temperature sensor with the protective layer. (Reproduced from ref. [91] with permission from ELSEVIER).

为超高温与极端工况下的热参数获取提供了重要技术支撑.

相比之下, 柔性基TFTEC则依托其可弯曲的机械顺

应性、良好的界面贴合能力及低热扰动特性, 在复杂曲面、动态接触界面、可穿戴与健康监测领域及新型装备测温领域展现出独特优势. 通过柔性基底选择、

结构优化与阵列化设计,柔性基TFTC能够实现多点分布式、快速响应的温度感知,适用于复杂热场的精细表征。然而,其在高温稳定性、界面可靠性及长期服役一致性方面仍面临挑战,亟需在耐高温柔性基底、功能薄膜与封装保护协同设计等方面实现进一步突破。

总体而言,刚性基与柔性基TFTC在应用场景、结构设计及性能侧重点上形成互补。未来研究应在新型高温热电材料、柔性-刚性复合结构、热-力-电多场耦合可靠性以及系统级集成与数据融合等方向持续深入,以推动TFTC从“单点测温器件”向“高可靠、多参数、智能感知系统”发展,为航空航天、高端制造、能源装备、可穿戴设备的热安全与性能优化提供更加坚实的技术支撑。

面向未来高温、强耦合与复杂服役环境的发展需求,TFTC温度传感技术仍需在材料体系、结构设计、制备工艺及系统集成等多个层面协同推进。在材料方面,应进一步发展具有更高热稳定性与抗挥发能力的新型热电材料体系,如多元掺杂氧化物、复合半导体及纳米结构调控材料,并结合第一性原理计算与多物理场模拟,实现热电性能与高温可靠性的协同优化。同时,针对高温下界面扩散、氧化及相变等失效机理,

亟需构建更加系统的材料演化与寿命预测模型。

在结构与工艺层面,未来TFTC的发展将从“单一传感结构”向“多层功能协同结构”转变。通过引入梯度过渡层、刚-柔复合结构及先进封装策略,有望进一步缓解多层薄膜间的热应力失配问题并提升器件在热循环、振动与冲击等复杂载荷下的服役可靠性。同时,喷墨打印、激光烧结及低温可控烧结等增材制造技术的进一步成熟,将为大面积、曲面化及现场原位制备TFTC提供更具工程实用性的解决方案。

在应用与系统集成方面,TFTC将逐步由“温度测量单元”向“多参量感知节点”演进。通过与薄膜热流、应变、压力及微电子电路的协同集成,可构建分布式、多尺度的热-力-电综合感知系统,为航空发动机、能源装备及高功率电子器件的健康监测与智能控制提供数据基础。此外,结合无线传输、边缘计算与数字孪生技术,有望实现高温结构的实时状态感知与预测性维护。

总体来看,TFTC正处于由实验室研究向工程化、系统化应用加速过渡的关键阶段。随着材料、工艺与系统集成能力的持续提升,其在极端环境热测量及智能装备中的应用深度与广度将进一步拓展。

参考文献

- Li S, Zhang Z, Wang K, et al. Enhanced temperature sensing performance of T-type TFTCs with SiC encapsulation layer from liquid nitrogen to 900°C. *Measurement*, 2025, 251: 117300
- Abdul-Wahed A M, Roy A L, Takahata K. Microplasma drawing of thermocouple sensors. In: Proceedings of the 2016 IEEE Sensors. Orlando, 2016. 1-3
- Li S, Zhang Z, Lei J, et al. Screen printing silver shielded ITO-In₂O₃ thin-film thermocouples for electromagnetic interference reduction. *IEEE Sens Lett*, 2024, 8: 1-4
- Cruz S, Azevedo G, Cano-Raya C, et al. Thermoelectric response of a screen printed silver-nickel thermocouple. *Mater Sci Eng-B*, 2021, 264: 114929
- Rivera K, Ricci M, Gregory O J. Embedded thermocouples for CMC engine components. In: Proceedings of the 2017 IEEE Sensors. Glasgow, 2017. 1-3
- Yang D, Pankov V, Zhao L, et al. Laser deposited high temperature thin film sensors for gas turbines. *Aircr Eng Aerosp Technol*, 2020, 92: 2-7
- Rivera K, Ricci M, Gregory O. Diffusion barrier coatings for CMC thermocouples. *Surf Coat Tech*, 2018, 336: 17-21
- Liu T, Dong H, Wang H, et al. Nano cone ITO thin films prepared by pulsed laser deposition for surface measurement of high-temperature components. *J Alloys Compd*, 2023, 959: 170538
- Tang Y Q, Fang W Z, Lin H, et al. Thin film thermocouple fabrication and its application for real-time temperature measurement inside PEMFC. *Int J Heat Mass Transfer*, 2019, 141: 1152-1158
- Hou H, Huang Q, Liu G, et al. Enhanced performances of CMOS-MEMS thermopile infrared detectors using novel thin film stacks. *Infrared Phys Tech*, 2019, 102: 103058
- Zhang Z K, Li S M, Liu Z J, et al. Numerical study of high temperature thin-film thermocouple based on the reverse model of engine turbine

- blades (in Chinese). *Gas Turb Exp Res*, 2025, 38: 58–66 [张仲恺, 李水敏, 刘兆钧, 等. 基于发动机涡轮叶片逆向模型的高温薄膜热电偶数值研究. *燃气涡轮试验与研究*, 2025, 38: 58–66]
- 12 Liu H, Sun W, Chen Q, et al. Thin-film thermocouple array for time-resolved local temperature mapping. *IEEE Electron Device Lett*, 2011, 32: 1606–1608
 - 13 Konishi S, Hirata A. Flexible temperature sensor integrated with soft pneumatic microactuators for functional microfingers. *Sci Rep*, 2019, 9: 15634
 - 14 Rahman M T, Cheng C Y, Karagoz B, et al. High performance flexible temperature sensors via nanoparticle printing. *ACS Appl Nano Mater*, 2019, 2: 3280–3291
 - 15 Duan F L, Liu S Q, Xie Z Y, et al. The various MEMS methods to build TFTC sensors for related Aero-/Astro-applications. In: *Proceedings of the AIAA Scitech 2021 Forum*. 2021. 1399
 - 16 Satish T N, Rakesh K P, Uma G, et al. Functional validation of K-type (NiCr-NiMn) thin film thermocouple on low pressure turbine nozzle guide vane (LPT NGV) of gas turbine engine. *Exp Tech*, 2017, 41: 131–138
 - 17 Ji Z, Duan F L, Xie Z. Transient measurement of temperature distribution using thin film thermocouple array on turbine blade surface. *IEEE Sens J*, 2021, 21: 207–212
 - 18 Duan F L, Liu S, Xie Z, et al. Application of thin film thermocouples on nozzle guide vane's cooling performance tests. In: *Proceedings of the AIAA Aviation 2021 Forum*. 2021. 3140
 - 19 Duan F L, Li X C. A novel design of embedded thin film smart sensors for high temperature measurement on complex aero-engine surface. In: *Proceedings of the AIAA Propulsion and Energy 2021 Forum*. 2021. 3224
 - 20 Xie Z Y, Duan F L, Ji Z L, et al. A new method of making thin-film thermocouples at sharp surfaces of aero-engine hot component. In: *Proceedings of the AIAA Propulsion and Energy 2020 Forum*. 2020. 3511
 - 21 Tian Q Y, Cao L L, Xu Y, et al. Temperature measurement of thin-film thermocouple on turbine blade surface in the cooling effect test (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2024, 55: 309–321 [田青云, 曹丽莉, 徐毅, 等. 冷效试验中涡轮叶片表面薄膜热电偶测温技术研究. *中国科学: 技术科学*, 2025, 55: 309–321]
 - 22 Ji Z L, Duan F L, Hong Z L, et al. Thin film thermocouple sensors on CMC capable of measuring 1500°C high surface temperatures. In: *Proceedings of the AIAA Propulsion and Energy 2020 Forum*. 2020. 3510
 - 23 Tougas I, Amani M, Gregory O. Metallic and ceramic thin film thermocouples for gas turbine engines. *Sensors*, 2013, 13: 15324–15347
 - 24 Liu J, Zhang Z, Tian B, et al. Integration of ITO-In₂O₃ thin-film thermocouples on NiCoCrAlY coating for *in situ* aeroengine alloy blades temperature monitoring. *IEEE Sens J*, 2025, 25: 32146–32156
 - 25 Zhao F, Zhang P, Qiang D, et al. Thin-film thermocouple with microcrystalline glass encapsulation for high-temperature applications. *IEEE Sens J*, 2025, 25: 23653–23660
 - 26 Liu D, Shi P, Ren W, et al. Fabrication and characterization of La_{0.8}Sr_{0.2}CrO₃/In₂O₃ thin film thermocouple for high temperature sensing. *Sens Actuat A-Phys*, 2018, 280: 459–465
 - 27 Tian B, Liu Y, Zhang Z, et al. WRe26-In₂O₃ probe-type thin film thermocouples applied to high temperature measurement. *Rev Sci Instrum*, 2020, 91: 074901
 - 28 Tian B, Liu Y, Zhang Z, et al. Effect of annealing on the thermoelectricity properties of the WRe26-In₂O₃ thin film thermocouples. *Micromachines*, 2020, 11: 664
 - 29 Zhang Z, Tian B, Li L, et al. Thermoelectricity and antivibration properties of screen-printed nanodoped In_{1.35}ZnO_{2.11}/In₂O₃ thin-film thermocouples on alumina substrates. *Ceram Int*, 2022, 48: 25747–25755
 - 30 Fan X, Tian B, Shi M, et al. Sandwich probe temperature sensor based on In₂O₃-IZO thin film for ultra-high temperatures. *Int J Extrem Manuf*, 2024, 6: 055504
 - 31 Fan X, Tian B, Zhang Z, et al. Indium oxide doped with zirconium oxide thin film thermocouple with a temperature upper limit of 1600°C. *Ceram Int*, 2025, 51: 39328–39336
 - 32 Liu J, Tian B, Lu N, et al. Study on aluminium oxide doping modification of indium oxide and thermoelectric properties. *Ceram Int*, 2024, 50: 52027–52035
 - 33 Wang M, Zhang Z, Lei J, et al. Performance evaluation and correction of Al₂O₃ and YSZ-doped In₂O₃/In₂O₃ multilayer heterogeneous thin-film thermocouples up to 1850°C. *J Adv Ceram*, 2025, 14: 9221071

- 34 Ruan Y, Xue M, Teng J, et al. Horizontal oxidation diffusion behavior of MEMS-based tungsten-rhenium thin film thermocouples. *Materials*, 2022, 15: 5071
- 35 Zhao X, Li H, Chen Y, et al. Preparation and thermoelectric characteristics of ITO/Pt thin film thermocouples on Ni-based superalloy substrate. *Vacuum*, 2017, 140: 116–120
- 36 Liu D, Shi P, Ren W, et al. Enhanced $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{CrO}_3/\text{Pt}$ thin film thermocouple with Al_2O_3 coating layer for high temperature sensing. *Ceram Int*, 2018, 44: S233–S237
- 37 Guo K, Lu Y, Liu Z, et al. High-temperature thin-film thermocouple for aero-engines. *PLoS One*, 2025, 20: e0329462
- 38 Zhao X, Yan S, Wang H, et al. Fabrication and microstructure evolution of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrBN-SiCN}/\text{Al}_2\text{O}_3$ high-temperature oxidation-resistant composite coating. *Ceram Int*, 2019, 45: 247–251
- 39 Liu Y, Jiang H, Zhao X, et al. High temperature protection performance of sandwich structure $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{YAIO}$ multilayer films for Pt-Pt10% Rh thin film thermocouples. *Ceram Int*, 2022, 48: 33943–33948
- 40 Zhang P, Chen Q N, Xu Y, et al. Packaging and performance study of polymer derived ceramics thin-film thermocouples (in Chinese). *J Telemetry, Track Command*, 2025, 46: 63–69 [张朋, 陈沁楠, 徐毅, 等. 先驱体陶瓷薄膜热电偶的封装及性能研究. *遥测遥控*, 2025, 46: 63–69]
- 41 Ma J, Dong H, Miao Y, et al. Enhanced high temperature thermal stability of In_2O_3 -IHFO thin film thermocouples using composite protective layers. *J Eur Ceram Soc*, 2025, 45: 117428
- 42 Liu S Q, Duan F L, Ji Z L, et al. Thermal stress relief effect of surface roughness for robust thin film sensors embedded on turbine blade surface. In: *Proceedings of the AIAA Aviation 2021 Forum*. 2021. 3162
- 43 Xie Z Y, Duan F L, Qian L Y, et al. Fabrications of the smart thin film sensors on the very thin oxidized alumina of PtAl substrate. In: *Proceedings of the AIAA Aviation 2021 Forum*. 2021. 3159
- 44 Gleeson B. Thermal barrier coatings for aeroengine applications. *J Propul Power*, 2006, 22: 375–383
- 45 Weng H, Duan F L, Ji Z, et al. Electrical insulation improvements of ceramic coating for high temperature sensors embedded on aeroengine turbine blade. *Ceram Int*, 2020, 46: 3600–3605
- 46 Lei D Y, Sun Y F, Xue Y Q, et al. Research on interfacial diffusion reliability model of thin film thermocouple. *Key Eng Mater*, 2021, 881: 77–85
- 47 Xi Y Y, Sun Y F, Hu T C, et al. Thermal and vibration mechanical reliability of multicoat compound thin-film thermocouple. *Key Eng Mater*, 2021, 881: 57–63
- 48 Han L, Qiu L, Deng L, et al. Laser sintering path effects on interfacial adhesion of inkjet-printed In_2O_3 films for thin-film thermocouples. *Opt Laser Tech*, 2026, 193: 114253
- 49 Guo H, Liu Z, Li X, et al. Effect of flow length on pressure and measurement of PEMFC temperature by using thin-film thermocouples. *Micromachines*, 2025, 16: 535
- 50 Liu Z, Chang B, Li J, et al. Preliminary monitoring and observation of fuel cell temperature characteristics by using NiCr-NiSi thin-film thermocouple. *Micromachines*, 2025, 16: 639
- 51 Liu Z, Chang B, Guo J, et al. Preparation of NiCr/NiSi thin film thermocouple sensors for internal temperature measurement in proton exchange membrane fuel cell gas channels. *Sens Actuat A-Phys*, 2025, 398: 117348
- 52 Guo H, Liu Z, Guo T, et al. Effect of hot junction size on the temperature measurement of proton exchange membrane fuel cells using NiCr/NiSi thin-film thermocouple sensors. *Micromachines*, 2024, 15: 1375
- 53 Xiao Z, Liu C, Zhao T, et al. Review—Online monitoring of internal temperature in lithium-ion batteries. *J Electrochem Soc*, 2023, 170: 057517
- 54 Ji Y, Zhang Y, Wang C Y. Li-ion cell operation at low temperatures. *J Electrochem Soc*, 2013, 160: A636–A649
- 55 Ma S, Jiang M, Tao P, et al. Temperature effect and thermal impact in lithium-ion batteries: A review. *Prog Nat Sci-Mater Int*, 2018, 28: 653–666
- 56 Kisseler N, Hoheisel F, Offermanns C, et al. Monitoring of thermal runaway in commercial prismatic high-energy lithium-ion battery cells via internal temperature sensing. *Batteries*, 2024, 10: 41
- 57 Liu X, Mao Y. Advanced NiCr/NiSi thin-film thermocouples for precise temperature sensing in lithium-ion battery systems. *Sensors*, 2025, 25: 3438
- 58 Werschmoeller D, Li X. Measurement of tool internal temperatures in the tool-chip contact region by embedded micro thin film thermocouples. *J Manuf Processes*, 2011, 13: 147–152
- 59 Li T, Shi T, Tang Z, et al. Real-time tool wear monitoring using thin-film thermocouple. *J Mater Process Tech*, 2021, 288: 116901

- 60 Kim D M, Kwak H J, Shin D Y, et al. Optimal fabrication of a thin-film thermocouple (TFTC) using AlumeI/chromel junctions. *Heliyon*, 2024, 10: e26128
- 61 Zhang H, Wang H, Hou J, et al. Performance study and application of thin film thermocouple based on diamond-like carbon protective coating. *J Phys-Conf Ser*, 2025, 3097: 012003
- 62 Zhou D, Huang L, Yuan J. Temperature measurement of the tool-chip interface for cemented carbide tools using thin-film thermocouples in cutting of glass fiber-reinforced plastic. *Int J Refract Met Hard Mater*, 2025, 133: 107403
- 63 Chen J, Lin Y, Zhao D, et al. Integrated design and fabricate of high sensitivity built-in thin-film thermocouple temperature measurement tool. *J Mech*, 2024, 40: 110–120
- 64 Yin J, Li Y, Deng S, et al. Monitoring temperature signals from thin-film thermocouple array to construct the relationship between temperature and tool wear in milling processes. *Measurement*, 2026, 260: 119880
- 65 Chen Y, Chen Q, Yin Y H Y, et al. Accurate temperature measurement of new energy vehicle engine by using NiCr-NiSi thin film thermocouple. *J Mech Sci Technol*, 2025, 39: 1469–1476
- 66 Zhao G, Li X, Liu Z. Research on precise temperature monitoring and thermal management optimization of automobile engines based on high-precision thin-film thermocouple technology. *Micromachines*, 2025, 16: 249
- 67 Liu Z, Yang Y, Sun Y, et al. Measurement and analysis of surface temperature gradients on magnetron sputtered thin film growth studied using NiCr/NiSi thin film thermocouples. *Small*, 2025, 21: 2404829
- 68 Wang H, Cui Y, Ma F, et al. A smart cutting tool integrated with wireless thin-film thermocouple sensor for real-time temperature measurement and prediction in bone drilling process. *Measurement*, 2025, 257: 118909
- 69 Li J, Yang K, Xiang Y, et al. Experimental investigation of frictional heating in variable friction pendulum bearings using thin-film thermocouples. *Tribol Int*, 2025, 212: 110982
- 70 Xiang B, Li G, Liu Z. The feasibility and performance of thin-film thermocouples in measuring insulated gate bipolar transistor temperatures in new energy electric drives. *Micromachines*, 2025, 16: 465
- 71 Irshad Bhatti H, Yuvaraja S, Wang C, et al. Monolithic integrated micro-thin-film thermocouples for on-chip temperature measurement of GaN HEMTs. *IEEE Trans Electron Devices*, 2024, 71: 7734–7739
- 72 Liu Z, Tian B, Zhang B, et al. High-performance temperature sensor by employing screen printing technology. *Micromachines*, 2021, 12: 924
- 73 Liu Z, Tian B, Fan X, et al. Study on the characteristics of thermo-electrodes of various deposition parameters for the flexible temperature sensor. *Rev Sci Instrum*, 2020, 91: 125004
- 74 Liu Z, Tian B, Fan X, et al. A temperature sensor based on flexible substrate with ultra-high sensitivity for low temperature measurement. *Sens Actuat A-Phys*, 2020, 315: 112341
- 75 Liu Z, Tian B, Liu J, et al. Influences of annealing temperature on the thermoelectric properties of thin film thermocouples based on a flexible substrate by RF magnetron sputtering. *Meas Sci Technol*, 2020, 31: 095101
- 76 Tian B, Liu Z, Wang C, et al. Flexible four-point conjugate thin film thermocouples with high reliability and sensitivity. *Rev Sci Instrum*, 2020, 91: 045004
- 77 Zhang Z, Liu Z, Lei J, et al. Flexible thin film thermocouples: From structure, material, fabrication to application. *iScience*, 2023, 26: 107303
- 78 Miao X, Gao X, Su K, et al. A flexible thermocouple film sensor for respiratory monitoring. *Micromachines*, 2022, 13: 1873
- 79 Jose M, Bronckaers A, Kumar R S N, et al. Stretchable printed device for the simultaneous sensing of temperature and strain validated in a mouse wound healing model. *Sci Rep*, 2022, 12: 10138
- 80 Xiong Z, Ling Y, Yao L, et al. Principle and application of fabricating flexible film thermocouple by physical vapor deposition (PVD). *J Phys-Conf Ser*, 2025, 3019: 012015
- 81 Shi Z, Zhang J, Wang W, et al. Effect of SiO₂ buffer layer on thermoelectric response of In₂O₃/ITO thin film thermocouples. *J Alloys Compd*, 2022, 902: 163838
- 82 Liu Z, Tian B, Zhang B, et al. A thin-film temperature sensor based on a flexible electrode and substrate. *Microsyst Nanoeng*, 2021, 7: 42
- 83 Jeon J G, Kim H J, Shin G, et al. High-precision ionic thermocouples fabricated using potassium ferri/ferrocyanide and iron perchlorate. *Adv Elect Mater*, 2022, 8: 2100693
- 84 Liu Z, Tian B, Liu B, et al. High-stability flexible thin-film temperature sensor using MWCNTs-toughened Peano structure. *Microsyst Nanoeng*, 2025, 11: 192

- 85 Jung M, Kim K, Kim B, et al. Paper-based bimodal sensor for electronic skin applications. [ACS Appl Mater Interfaces](#), 2017, 9: 26974–26982
- 86 Xu S, Fan Z, Yang S, et al. Flexible, self-powered and multi-functional strain sensors comprising a hybrid of carbon nanocoils and conducting polymers. [Chem Eng J](#), 2021, 404: 126064
- 87 Xin Y, Zhou J, Lubineau G. A highly stretchable strain-insensitive temperature sensor exploits the Seebeck effect in nanoparticle-based printed circuits. [J Mater Chem A](#), 2019, 7: 24493–24501
- 88 Li G, Zhu M, Gong W, et al. Boron nitride aerogels with super-flexibility ranging from liquid nitrogen temperature to 1000°C. [Adv Funct Mater](#), 2019, 29: 1900188
- 89 Zhao S, Siqueira G, Drdova S, et al. Additive manufacturing of silica aerogels. [Nature](#), 2020, 584: 387–392
- 90 Liu Z, Tian B, Jiang Z, et al. Flexible temperature sensor with high sensitivity ranging from liquid nitrogen temperature to 1200°C. [Int J Extrem Manuf](#), 2022, 5: 015601
- 91 Liu Z, Tian B, Liu X, et al. Multifunctional nanofiber mat for high temperature flexible sensors based on electrospinning. [J Alloys Compd](#), 2023, 941: 168959
- 92 Tian B, Lei J, Zhang Z, et al. Stable precursor-ink strategy for inkjet-printed high-temperature oxide films: Towards scalable ITO/In₂O₃ fabrication. [Chem Eng J](#), 2025, 524: 169211

Rigid-flexible thin-film thermocouple temperature sensing and applications

TIAN Bian^{1,2,3}, LI ShuiMin¹, ZHANG ZhongKai¹, LIU ZhaoJun¹, WANG Kai¹, LIU JiangJiang¹, CHEN LunTao¹, SHI Meng¹ & WANG QingHua¹

¹ State Key Laboratory for Mechanical Manufacturing Systems Engineering, School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

² Xi'an Jiaotong University (Yantai) Research Institute for Intelligent Sensing Technology and System, Xi'an 710049, China

³ Shandong Laboratory of Yantai Advanced Materials and Green Manufacturing, Yantai 265503, China

Applications in key hot-end components of aero-engines, advanced manufacturing processes, high-power electronic devices, and wearable systems have created an urgent need for temperature measurement with high spatiotemporal resolution, strong environmental adaptability, and *in-situ* integration capabilities. Thin-film thermocouples (TFTCs), with their advantages of thinness, small heat capacity, fast response speed, arrayability, and *in-situ* fabrication, have become an important technological means for temperature sensing under extreme and complex operating conditions. This review systematically reviews the research progress on the temperature measurement principles, material systems, structural design, and typical applications of rigid and flexible TFTCs from a “rigid-flexible” perspective. For rigid TFTCs, the review focuses on their current application status in high-temperature scenarios such as hot-end components of aero-engines, battery systems, and machining temperature measurement. It summarizes the research progress in improving the upper limit of temperature measurement and service reliability through the development of new thermoelectric materials, the design of protective and transition layers, and thermal stress optimization. For flexible TFTCs, the review systematically focuses on their advantages in wearable health monitoring, electronic skin, and temperature measurement of complex curved surfaces. This review focuses on analyzing the impact of flexible substrates, structural design, and packaging methods on the stability and durability of TFTCs, and summarizes the latest progress in novel flexible high-temperature resistant substrates and additive manufacturing processes. Building upon this foundation, the paper further outlines the key challenges faced by TFTCs in high-temperature stability, interface reliability, multi-field coupling operation, and system-level integration, and provides an outlook on their future development in novel thermoelectric materials, rigid-flexible composite structures, multi-parameter integration, and intelligent sensing systems. This paper can provide a reference for the design optimization and engineering application of TFTC temperature sensors.

thin-film thermocouples, temperature sensing, rigid, flexible, *in-situ* temperature measurement

doi: [10.1360/SST-2026-0020](https://doi.org/10.1360/SST-2026-0020)