

DOI: 10.19659/j.issn.1008-5300.2018.01.001

典型高温薄膜传感器的研究进展*

孙道恒, 崔在甫, 周颖锋, 周排弟, 易伟劲, 林晓龙, 王凌云

(厦门大学机电工程系, 福建 厦门 361005)

摘要: 随着航空发动机、燃气轮机、内燃机、石油化工设备等的设计、运行要求不断提高,对典型高温薄膜传感器如高温薄膜应变计、高温薄膜温度计、高温薄膜热流量计的需求越来越迫切。文中介绍了高温薄膜应变计、高温薄膜温度计、高温薄膜热流量计以及多功能集成高温薄膜传感器等典型高温薄膜传感器的研究现状,分析了它们在敏感材料、材料体系、制造工艺和信号传输方面存在的主要问题,可为应用于更严酷环境的高温薄膜传感器的技术研究提供参考。

关键词: 高温薄膜传感器; 应变计; 热电偶; 电阻温度检测器; 热流量计

中图分类号: TP212 文献标识码: A 文章编号: 1008-5300(2018)01-0001-07

Review on Typical Thin Film Sensors for High-temperature Environment

SUN Dao-heng, CUI Zai-fu, ZHOU Ying-feng, ZHOU Pai-di, YI Wei-jin, LIN Xiao-long, WANG Ling-yun

(Department of Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: With increase of requirements for design and operation of aeroengines, gas turbines, internal combustion engines, petrochemical equipment and so on, the need for typical high-temperature thin film sensors such as high-temperature thin film strain gauges, thermometers, heat flux gauges and thin film multi-function sensors is becoming increasingly urgent. The research status of typical high-temperature thin film sensors such as high-temperature thin film strain gauges, thermometers, heat flux gauges and thin film multi-function sensors is introduced. The existing main problems of high-temperature thin film sensors on aspects of sensitive materials, material system, manufacturing process and signal transmission are analyzed, which can provide guidance for study on the high-temperature thin film sensors for harsher environment.

Key words: high-temperature thin film sensor; strain gauge; thermocouple; resistance temperature detector; heat flux gauge

引言

航空航天用航空发动机、发电用燃气轮机、石油化工设备、内燃机等的高温区域部件工作环境恶劣,在高温、高压环境下承受着热应力、接触应力、氧化腐蚀等,特别是航空发动机高温区域的涡轮叶片,由于蠕变和发动机内壁的碰撞甚至断裂,有可能引发严重的航空事故^[1]。目前主流的航空发动机涡轮前温度超过 1 700 °C,转速大于 20 000 r/min^[2-3]。发电用的燃气轮机的燃气初温也达到了 1 600 °C^[4-5]。石油化工设备也承受着较高的温度和压力以及渗碳等腐蚀^[6]。

为了评估航空发动机高温部件材料或者研制新型高温部件以及验证计算模型^[7],需要测量其内部部件的

一些参数,如应变、表面温度、表面热流量等。此外,面向发动机的健康管理及智能化要求,在航空发动机工作过程中,需要对其内部部件或结构进行实时的健康监测,某些部件或者结构一旦达到维修或者报废的条件,就需及时维修或者更换以降低航空事故的发生概率。对于燃气轮机、内燃机和石油化工设备的高温区域,也需要研制新的部件,同时需要监测高温区域部件或者结构的一些参数如应变、壁面温度、热流量等。

薄膜传感器厚度仅为几百纳米至几十微米,制作简单,有利于实现结构/感知一体化制造,对被测结构或环境无干扰^[8],它可以直接喷涂在部件表面而不影响设备内部环境,用于测量航空发动机、燃气轮机、内

* 收稿日期: 2018-01-15

燃机、石油化工设备内部高温区域部件的表面温度、应变、热流量等。近年来,薄膜传感器受到发达国家的高度关注,如美国 NASA 面向航空发动机测试应用开展了一系列基础研究和应用验证,但离工程实际应用还有一段距离,仍有许多技术问题尚待解决。

1 典型高温薄膜传感器研究现状

高温薄膜传感器种类繁多,本文仅介绍典型的高温薄膜传感器:高温薄膜应变计、高温薄膜温度计、高温薄膜热流量计和多功能集成高温薄膜传感器。

1.1 高温薄膜应变计

高温薄膜应变计在初期采用合金薄膜作为敏感材料,由于材料特性以及制造工艺不同,由不同合金制成的薄膜应变计可承受的温度相差很大。如 NiCr 合金薄膜应变计可承受 600 °C 的测试温度^[9];PdCr 合金薄膜应变计最高使用温度可以达到 800 °C^[10-11],经过工艺参数优化后,能够在 1 100 °C 的温度下使用^[12];Ni-CrAlY 薄膜应变计能够承受 800 °C 的温度^[13]。

陶瓷材料能承受的温度比合金更高,目前陶瓷薄膜应变计有锡铟氧化物(ITO, Indium Tin Oxide)和 TaN 2 种。ITO 薄膜应变计可在室温至 1 400 °C 的温度下工作^[14],但应变水平和温度对应变系数影响很大,主要是由 ITO 薄膜中的氧扩散造成的^[15]。TaN 薄膜应变计能够承受 400 °C 的温度^[16],工艺参数对 TaN 薄膜的微观结构以及薄膜应变计的电阻温度系数和应变系数的影响很大^[17]。

陶瓷和合金的电阻温度系数(TCR, Temperature Coefficient of Resistance)正负相反而可以相互抵消,目前已制作出由陶瓷和合金构成的多层薄膜应变计。TaN 在 500 °C 以上的空气中不稳定,因此 TaN/PdCr 多层应变计的使用温度不超过 500 °C^[18]。

以钛酸锶钡作为电容式薄膜应变计的敏感介质、PdCr 作为电极的高温薄膜应变计采用平板叉指结构,可以承受 500 °C 的高温^[19]。

1.2 高温薄膜温度计

高温薄膜温度计包含薄膜热电偶和薄膜电阻温度检测器(RTD, Resistance Temperature Detectors)。Pt/Pt-10Rh 薄膜热电偶可在 1 000 °C 的温度下使用^[20-23],但由于薄膜中铑的氧化,热电偶会发生漂移^[20],溅射一层氧化铝保护层可减轻铑的氧化^[24];Pt-13Rh/Pt 薄膜热电偶由于加工工艺不同,最高工作温度范围为 900 °C ~ 1 200 °C^[25-27];NiCr-NiMn 薄膜热电偶用于测量燃气涡轮发动机的低压涡轮导向器叶片上的温度,最高使用温度为 400 °C^[28];Ni-Cr/Ni-Si 薄膜

热电偶一般用于测量瞬态温度,最高工作温度可达 800 °C^[29-33];钨/铼薄膜热电偶在高温下需要保护层才可正常使用^[34-36],在保护层保护下能在 1 370 K 的温度下工作^[35];Ni/Ni-Cr 薄膜热电偶可以用来监测切削温度,能够在 890 K 以下工作^[37];Ni/Cr 和镍铝合金薄膜热电偶可监测制造过程的温度,在室温至 600 °C 温度范围内使用^[38];Pt/Pd 薄膜热电偶用于监测硅圆片的热处理温度,可在 850 °C 下存活 10~20 h^[39]。

ITO 陶瓷材料作为一种氧化物陶瓷,具有耐高温、抗氧化等特点,由不同电极材料构成的 ITO 陶瓷薄膜热电偶的可承受温度以及热输出相差很大。由 2 个 ITO 陶瓷热电极(带电载流子浓度不同)构成的薄膜热电偶,能够工作在 1 200 °C 以下^[40];在镍基合金基板上制作的 In₂O₃/ITO 薄膜热电偶可在 1 000 °C 的温度下工作^[41-42];由 In₂O₃:SnO₂(质量分数比为 95%:5%)和 In₂O₃ 构成的热电偶具有较大的热电输出,在室温至 1 300 °C 温度范围内有很好的稳定性、可重复性和耐久性,存活时间超过 50 h^[43];ITO/Pt 薄膜热电偶在室温至 1 200 °C 温度范围内的热电输出比较稳定^[44];在 ITO 中掺氮后,高温稳定性会有所提高^[45],掺氮的 ITO 和铂构成的热电偶可以承受 1 000 °C 的温度^[46],比 S 型热电偶有更大的热电输出,且在室温至 1 000 °C 温度范围具有更好的稳定性^[47];由 NiCoCrAlY/氧化铝纳米复合材料和掺氮的 ITO 构成的热电偶具有较大的热输出,且可在 1 200 °C 以下工作^[48]。

由其他陶瓷材料构成的薄膜热电偶可以承受的最高工作温度有限。CrSi₂/Pt 薄膜热电偶从室温到 650 °C 的热电输出数据呈线性,而 TaC/Pt 薄膜热电偶从室温到 450 °C 的热电输出数据呈线性^[49]。由 SiC(CMC)和铂构成的薄膜热电偶的塞贝克系数大,比 K 型线式热电偶高 2 个数量级,但温度高于 1 000 °C 时在 Pt 和 SiC 界面会形成硅化物,因此只能在 1 000 °C 以下使用^[50];TiC/TaC 薄膜热电偶能在真空中 1 350 K 温度下使用^[51]。

薄膜电阻温度检测器主要由一种金属或者陶瓷材料构成,结构比较简单。铂薄膜 RTD 一般在 20 °C ~ 700 °C 温度范围内工作^[52-53],金薄膜 RTD 可以测量 20 °C ~ 450 °C 的温度^[54],由 ITO 制作成的 RTD 则可以在 900 °C 以下使用^[55],由前驱体陶瓷(PDC, Polymer Derived Ceramics)材料 SiAlCN 制成的薄膜 RTD 可以在 1 400 °C 以下长期稳定地工作^[56]。

1.3 高温薄膜热流量计

高温薄膜热流量计一般由热阻层及其上下面的薄膜温度计层组成。热阻层通常采用热导率较小的材料,以使两侧的温度计获得较大的温度差,从而获得较

强的信号及较高的灵敏度。薄膜温度计层一般为薄膜热电偶或者电阻温度检测器。聚酰亚胺的热阻较高,机械性能较好^[57]。作为热阻层的薄膜热流量计可以在 400 °C 以下使用^[58-60]。二氧化硅热导率很低^[61],且机械性能良好,因而作为大部分高温薄膜热流量计的热阻层材料,这种热流量计能够在 900 °C 的温度下使用^[62-63]。

高温薄膜流量计可采用前驱体陶瓷材料作为 RTD 和热阻层。文献[56]用前驱体陶瓷制作了用于航空发动机环境的高温热流量计,图 1 为其结构示意图,上下两层 RTD 为 10 μm 的 SiAlCN,中间热阻层为 250 μm 的 SiCN。该热流量计可以在 1 400 °C 左右的温度下使用。

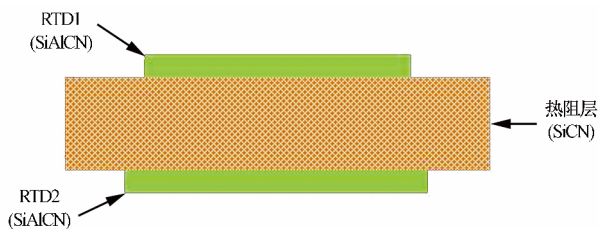


图 1 由前驱体陶瓷制成的热流量计横截面示意图^[56]

1.4 多功能集成高温薄膜传感器

将高温薄膜应变计、温度计和热流量计三者集成起来具有一定的挑战性,因为三者的传感原理不同,结构不同,尺寸大小也不同。文献[64]设计了多功能集成高温薄膜传感器,可同时测量应变、温度和热流量,其中 Pt 应变计测量应变,Pt-13Rh/Pt 热电偶测量温度,由 2 层厚度不同的氧化铝热阻层和 40 对 Pt-13Rh/Pt 热电偶构成的热电堆型热流量计测量热流量。

为了突破合金材料的工作温度极限,NASA 进一步开发了 TaN 陶瓷材料的多功能集成高温薄膜传感器^[65]。该传感器采用剥离工艺进行图案化,其应变系数为 3.9,TCR 为 $-93 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$,电阻率为 259 $\mu\Omega\text{cm}$,表观应变灵敏度为 $-24 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。

陶瓷材料和合金的 TCR 正负相反,NASA 开发了陶瓷和合金的多功能高温薄膜传感器^[66],图 2 为其剖面结构示意图。该传感器包含了高温薄膜应变计、高温薄膜热电偶和高温薄膜热流量计。由于 TaN 的 TCR 为负^[67],Pd-13Cr 的 TCR 为正^[12],两者共同构成功能层使得 TCR 正负抵消一部分,降低了整体的 TCR,从而提高了灵敏度^[66]。该多功能薄膜传感器存在层裂和扩散问题、剥离工艺的兼容性问题以及高温膨胀问题^[65]。

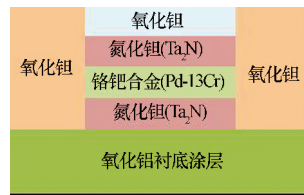


图 2 多功能高温薄膜传感器的剖面示意图^[66]

2 存在的问题与挑战

高温薄膜传感器的构成材料、结构、工艺参数和使用环境影响其性能。评价其性能的主要要素有灵敏系数、是否耐高温、是否易于成形、长期稳定性等,它们与敏感材料、材料体系、制造工艺和信号传输有着密切的联系。本文从敏感材料、材料体系、制造工艺和信号传输等方面介绍了典型高温薄膜传感器存在的问题和挑战。

2.1 敏感材料

敏感材料是高温薄膜传感器的核心组成部分,其化学、电学稳定性对薄膜传感器能否应用于恶劣环境影响很大。敏感材料的种类、敏感材料自身的晶体结构等微观结构以及所带自由载流子的属性决定了制成的薄膜传感器的灵敏系数^[68]。一般情况下,合金薄膜应变计的应变系数最低,其次是由陶瓷材料制成的薄膜应变计,最高的是半导体薄膜应变计。

2.1.1 灵敏系数

高温薄膜应变计的应变系数、高温薄膜热电偶的塞贝克系数和薄膜 RTD 的电阻温度系数越高,灵敏度就越高,测量信号也越容易,然而由不同敏感材料制成的高温薄膜传感器的灵敏系数差异很大。由高温合金制成的高温薄膜应变计的应变系数一般为 1 ~ 3^[9,11,13,69],而普通陶瓷应变计的应变系数稍微高一些,可以达到 3 ~ 9^[14,16,40,70],但相对于掺杂半导体的应变计的应变系数(100 ~ 200),仍旧不够高。由合金制成的薄膜热电偶的塞贝克系数较低,而由陶瓷构成的薄膜热电偶的塞贝克系数稍高。

2.1.2 耐高温性能

敏感材料承担着产生信号的任务,可承受的温度有限。当超过一定温度时,敏感材料会产生相变甚至开裂,从而影响电学性能,最终导致薄膜传感器失效。目前合金的可承受温度为 1 100 °C,陶瓷的可承受温度为 1 500 °C。在温度较高的应用场合(如航空发动机的高温区域),温度已经超过了 1 700 °C,现在的高温薄膜传感器已经无法承受,需要选择更耐高温的材料和工艺制作可承受更高温度的薄膜传感器。

2.1.3 创新敏感材料制作工艺

前驱体陶瓷作为敏感材料,具有耐高温、抗氧化的

特点 其初始状态为液体 经过光固化或者在 90 °C ~ 150 °C 左右的温度下热固化成形后 再在 300 °C ~ 600 °C 左右的温度下进行交联 最后在 1 000 °C 左右的温度下热解即可得到前驱体陶瓷^[71]。前驱体陶瓷稳定工作在 1 400 °C 以上的温度下 但是在交联和热解过程中会收缩 一般收缩 30% 左右 添加填充剂可以减小收缩量^[71]。采用前驱体陶瓷制作体部件有成熟的工艺^[72-74] 但是关于其薄膜图案化工艺的报道较少 没有文献报道镍基合金上 PDC 薄膜图案化工艺 因此采用前驱体陶瓷制作高温薄膜传感器 需要解决收缩问题和图案化工艺问题。

选择合适的材料可以提高高温薄膜传感器的灵敏系数 通过掺杂、采用多层敏感材料等改变敏感材料的构成也可以提高高温薄膜传感器的灵敏系数^[11 48]。

2.2 材料体系

典型的用于合金表面的高温薄膜应变计和温度计一般由多层材料构成 合金基底上面依次是过渡层、绝缘层、功能层和保护层 如图 3 所示。过渡层可以增强绝缘层和合金基底的结合力;绝缘层是为了使功能层和合金基底之间形成良好的绝缘;功能层一般为合金或者陶瓷 属于敏感材料层 用于感知应变或者温度的变化;保护层是为了提高功能层的抗高温氧化能力 提高传感器的寿命和稳定性^[11 13]。

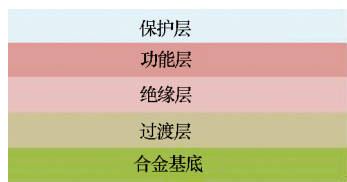


图 3 薄膜应变计或温度计的结构示意图

如图 4 所示 高温薄膜热流量计一般由热阻层和温度计层组成^[63]。2 种厚度不同的热阻层材料的导热率均为 k 一层的厚度为 x_1 另一层的厚度为 x_2 当有热流量时 在热阻层下面产生的温度分别为 T_1 和 T_2 。

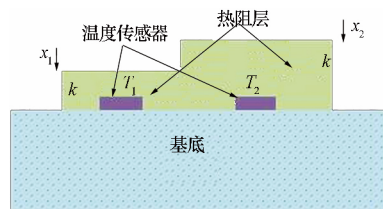


图 4 高温薄膜热流量计的结构示意图

高温薄膜传感器的各层材料之间的热膨胀系数不同 在升温或者降温过程中可能会产生热应力 从而使不同材料层开裂 开裂后敏感材料有可能发生氧化、断裂 进而使薄膜传感器失效^[16]。高温薄膜应变计需要经常拉伸 因各层材料的抗拉能力不同 因此 工作时

层与层之间可能会出现应力集中、裂纹等现象 最终使应变计产生测量误差甚至失效^[11 13]。

在设计薄膜传感器时 要考虑各层材料之间的热膨胀系数 甚至弹性模量等 使相邻两层的参数尽量接近 从而减小热不匹配度和拉伸应力。

2.3 制造工艺

制造工艺往往影响高温薄膜应变计的性能。退火、掺杂、氛围、溅射气压、温度等工艺参数对高温薄膜传感器的灵敏系数、可承受温度和稳定性的影响较大。这些工艺参数往往影响材料的致密度、晶体结构等 使材料特性发生一定程度的变化 最终影响高温薄膜传感器的性能参数。选择合适的工艺参数 对制造性能较好的薄膜传感器至关重要。例如 在高温大气下退火对 PdCr 薄膜应变计的薄膜结构、方块电阻均有影响 可使薄膜表面生成铬氧化物 从而更好地保护应变计 同时还能降低薄膜的电阻率^[75]。

2.3.1 曲面上的图案化

传统制造工艺一般采用磁控溅射的方法生成高温薄膜传感器的各个材料层 当所需测温部件或结构为曲面时 掩模版制作比较困难。此外 高温薄膜传感器线宽较小 而且为多层薄膜 因而对准较为困难 特别是制作多功能集成高温薄膜传感器时 由于各个功能模块的厚度、图案不一样 在曲面上制作就更加困难^[64-66 76]。

2.3.2 高温工艺

采用不同工艺制作的薄膜的致密度、微观结构不同 获得的特性也可能不同^[11]。工作在更高温度场合的薄膜传感器对制作工艺的要求提高后 许多工艺参数需要重新优化。例如 当制作合金薄膜应变计而沉积氧化铝绝缘层时 为了弥补应变计在高温使用时氧化铝层的应力 需要在沉积氧化铝时加热衬底。当加热温度达到 800 °C ~ 900 °C 时 制得的氧化铝薄膜才可以在 1 100 °C 的温度下使用^[77] 在超过 1 100 °C 的环境下应用时 衬底温度需要重新优化。

2.4 信号传输

信号传输是指将高温薄膜传感器制作在部件或者结构上后 采用何种方式供电、取电从而将应变、温度等信号测量出来。高温区域往往伴随着高压、氧化、腐蚀等恶劣环境 例如 航空发动机涡轮叶片所处环境在 1 700 °C 以上 而且要承受较大的压强和由高转速引起的离心力 因而引出信号十分困难。

NASA 研制的薄膜热电偶用一种耐高温陶瓷粘结剂将铂丝连接到涡轮叶片焊盘上 从而测量涡轮叶片表面的温度^[7] 信号由焊接在涡轮叶片叶根部位的铂

丝导线引出,如图 5 所示。该方法虽然不影响表面气流和热分布,但在高温高速旋转下,接点不稳定,测试结果表明,大部分失效来自薄膜和导线的连接处^[7]。

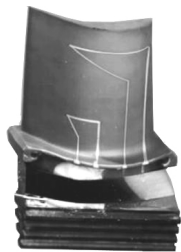


图 5 薄膜热电偶测量涡轮叶片温度^[78]

3 结束语

随着大数据时代以及人工智能时代的到来,越来越多的地方需要收集数据,特别是石油化工、航空航天、发电等高温场合对传感器的要求很高,对高温薄膜传感器的需求将越来越多。我国研制的高温薄膜传感器在灵敏度、耐高温、稳定性等方面与国外还有一定的差距。高温薄膜传感器涉及到材料、工艺、微电子等诸多方面,但随着对材料、工艺研究的不断重视,我国将在高温薄膜传感器方面不断取得突破。

参考文献

- [1] FRALICK G C, WRBANEK J D. Thin film ceramic strain sensor development for harsh environments [R]. Cleveland: NASA Glenn Research Center, 2007.
- [2] YAMAWAKI S. Verifying heat transfer analysis of high pressure cooled turbine blades and disk [J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 2010, 934(1): 505-512.
- [3] MERSINLIGIL M, DESSET J, BROUCKAERT J F. High-temperature high-frequency turbine exit flow field measurements in a military engine with a cooled unsteady total pressure probe [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A Journal of Power & Energy, 2011, 225(7): 954-963.
- [4] YURI M, MASADA J, TSUKAGOSHI K, et al. Development of 1 600 °C-class high-efficiency gas turbine for power generation applying J-type technology [J]. Technical Review-Mitsubishi Heavy Industries, 2013, 50(3): 1-10.
- [5] 王铁军, 范学领, 孙永乐, 等. 重型燃气轮机高温透平叶片热障涂层系统中的应力和裂纹问题研究进展 [J]. 固体力学学报, 2016, 37(6): 477-517.
- [6] 盛长松, 贾鹏林, 王维宗. 石油化工设备腐蚀的防护与监测 [J]. 石油化工腐蚀与防护, 2005, 22(6): 1-6.
- [7] LEI J F, MARTIN L C, WILL H A. Advances in thin film sensor technologies for engine applications [C]//ASME 1997 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition, 1997: 1-6.

- [8] 傅德中. 薄膜应变计概述 [J]. 功能材料, 1982(1): 20-30.
- [9] GRANT H P, PRZYBYSZEWSKI J S, ANDERSON W L, et al. Thin film strain gauge development program [R]. East Hartford: Pratt and Whitney Aircraft Group, 1983.
- [10] LEI J F. A resistance strain gauge with repeatable and cancelable apparent strain for use to 1 500 °F [C]// 1990 SEM Spring Conference on Experimental Mechanics, 1990: 1-10.
- [11] 杨晓东. PdCr 高温薄膜应变计的研制 [D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
- [12] LEI J F, WILL H A. Thin-film thermocouples and strain-gauge technologies for engine applications [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 1998, 65(2): 187-193.
- [13] 张洁. NiCrAlY 薄膜应变计的研制 [D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
- [14] LUO Q. Indium-tin-oxide thin film strain gauges for use at elevated temperatures [D]. Kingston: University of Rhode Island, 2001.
- [15] GREGORY O J, CHEN X, CRISMAN E E. Strain and temperature effects in indium-tin-oxide sensors [J]. Thin Solid Films, 2010, 518(19): 5622-5625.
- [16] 李超. 涡轮叶片应变测量用 TaN 薄膜应变计的研制 [D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
- [17] 刘斐然, 刘兴钊. TaN 薄膜应变计 [C]// 2009 航空试验测试技术学术交流会, 2009: 262-265.
- [18] WRBANEK J D, FRALICK G C, GONZALEZ J M, et al. Thin film ceramic strain sensor development for high temperature environments [C]// Aging Aircraft 2008, 2008: 1-14.
- [19] 任帅. 电容式薄膜应变计的研制 [D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [20] GRANT H P, PRZYBYSZEWSKI J S, CLAING R G. Turbine blade temperature measurements using thin film temperature sensors [R]. East Hartford: Pratt and Whitney Aircraft Group, 1981.
- [21] KREIDER K G. Thin film thermocouples for internal combustion engines [J]. Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum Surfaces & Films, 1986, 4(6): 2618-2623.
- [22] 王亦然. 镍基高温合金上 S 型薄膜热电偶的制备及性能研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [23] CHEN Y, JIANG H, ZHAO W, et al. Fabrication and calibration of Pt-10% Rh/Pt thin film thermocouples [J]. Measurement, 2014, 48(Supplement C): 248-251.
- [24] KREIDER K G. Sputtered high temperature thin film thermocouples [J]. Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum Surfaces & Films, 1993, 11(4): 1401-1405.
- [25] HOLANDA R. Development of thin film thermocouples on ceramic materials for advanced propulsion system applications [C]//Temperature: Its Measurement and Control in Science and Industry, 1992: 1-17.

- [26] 张建国. 快速响应薄膜温度传感器技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008.
- [27] 张建国, 颜秀文. 热处理对 Pt-PtRh13 薄膜热电偶绝缘层性能的影响及机理分析[J]. 航空发动机, 2015, 41(4): 84-87.
- [28] 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 [J]. *Experimental Techniques*, 2017, 41(2): 131-138.
- [29] 贾颖. 基于磁控溅射技术的薄膜热电偶测温系统[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- [30] 朱亚民. 薄膜温度传感器的研制[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
- [31] 赵家慧. 柴油机活塞表面瞬态温度测试用薄膜传感器的研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2015.
- [32] 杨德顺. 基于多层复合薄膜热电偶的瞬态切削温度测试技术的研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2010.
- [33] ZHAO X H, WANG Y R, CHEN Y Z, et al. Enhanced thermoelectric property and stability of NiCr-NiSi thin film thermocouple on superalloy substrate [J]. *Rare Metals*, 2017, 36(6): 512-516.
- [34] TIAN B, ZHANG Z, SHI P, et al. Tungsten-rhenium thin film thermocouples for SiC-based ceramic matrix composites [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2017, 88(1): 015007.
- [35] ZHANG Z, TIAN B, YU Q, et al. A protected tungsten-rhenium thin film thermocouples sensor [C]// IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, 2017: 796-799.
- [36] ZHANG Z, TIAN B, YU Q, et al. Range analysis of thermal stress and optimal design for tungsten-rhenium thin film thermocouples based on ceramic substrates [J]. *Sensors*, 2017, 17(4): 857.
- [37] BASTI A, OBIKAWA T, SHINOZUKA J. Tools with built-in thin film thermocouple sensors for monitoring cutting temperature [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007, 47(5): 793-798.
- [38] CHOI H, DATTA A, CHENG X, et al. Microfabrication and characterization of metal-embedded thin-film thermo-mechanical microsensors for applications in hostile manufacturing environments [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2006, 15(2): 322-329.
- [39] KREIDER K G, DIMEO F. Platinum/palladium thin-film thermocouples for temperature measurements on silicon wafers [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1998, 69(1): 46-52.
- [40] GREGORY O J, TAO Y. Ceramic temperature sensors for harsh environments [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2005, 5(5): 833-838.
- [41] 刘海军. In₂O₃/ITO 集成薄膜热电偶的制备及性能研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
- [42] 杨柯. In₂O₃/ITO 高温陶瓷薄膜热电偶的制备与性能研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [43] CHEN X, GREGORY O J, AMANI M. Thin-film thermocouples based on the system In₂O₃:SnO₂ [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2011, 94(3): 854-860.
- [44] ZHANG Y, CHENG P, YU K, et al. ITO film prepared by ion beam sputtering and its application in high-temperature thermocouple [J]. *Vacuum*, 2017, 146: 31-34.
- [45] GREGORY O J, AMANI M, TOUGAS I M, et al. Stability and microstructure of indium tin oxynitride thin films [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2012, 95(2): 705-710.
- [46] 陈寅之. 在镍基高温合金上制备薄膜热电偶及其相关技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
- [47] ZHAO X, LI H, CHEN Y, et al. Preparation and thermoelectric characteristics of ITO/Pt thin film thermocouples on Ni-based superalloy substrate [J]. *Vacuum*, 2017, 140 (Supplement C): 116-120.
- [48] GREGORY O J, BUSCH E, FRALICK G C, et al. Preparation and characterization of ceramic thin film thermocouples [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2010, 518(21): 6093-6098.
- [49] WRBANEK J D, FRALICK G C, FARMER S C. Development of thin film ceramic thermocouples for high temperature environments [C]//40th Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2004: 1-9.
- [50] RIVERA K, MUTH T, RHOAT J, et al. Novel temperature sensors for SiC-SiC CMC engine components [J]. *Journal of Materials Research*, 2017, 32(17): 3319-3325.
- [51] BHATT H D, VEDULA R, DESU S B, et al. Thin film TiC/TaC thermocouples [J]. *Thin Solid Films*, 1999, 342(1): 214-220.
- [52] CHUNG G S, KIM C H. RTD characteristics for micro-thermal sensors [J]. *Microelectronics Journal*, 2008, 39(12): 1560-1563.
- [53] KIM J, KIM J, SHIN Y, et al. A study on the fabrication of an RTD (resistance temperature detector) by using Pt thin film [J]. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2001, 18(1): 61-66.
- [54] AHN C H, PARK H W, KIM H H, et al. Direct fabrication of thin film gold resistance temperature detection sensors on a curved surface using a flexible dry film photoresist and their calibration up to 450 °C [J]. *Journal of Micromechanics & Microengineering*, 2013, 23(6): 065031.
- [55] WANG Y, ZHANG C, LI J, et al. Fabrication and charac-

- terization of ITO thin film resistance temperature detector [J]. *Vacuum*, 2017, 140(Supplement C): 121–125.
- [56] NAGAI A H, KAPAT J S, AN L, et al. Novel polymer derived ceramic-high temperature heat flux sensor for gas turbine environment [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2006, 34(1): 458.
- [57] 徐多, 谷筋华, 吴松. 柔性基底瞬态热流率测量传感器的研制及其应用[J]. *科学通报*, 2009, 54(4): 414–419.
- [58] EPSTEIN A H, GUENETTE G R, NORTON R J G, et al. High-frequency response heat-flux gauge [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1986, 57(4): 639–649.
- [59] PICCINI E, GUO S M, JONES T V. The development of a new direct-heat-flux gauge for heat-transfer facilities [J]. *Measurement Science & Technology*, 2000, 11(4): 342–349.
- [60] JERROD E, ANDREW G, DAVID H, et al. A direct-measurement thin-film heat flux sensor array [J]. *Measurement Science and Technology*, 2010, 21(10): 105201.
- [61] 方昆凡. *工程材料手册* [M]. 北京: 北京出版社, 2002.
- [62] 杨素君. 微型瞬态薄膜热流计的研制 [D]. 北京: 北京工业大学, 2001.
- [63] 肖友文, 谢贵久, 何峰, 等. 薄膜高温热流测量技术研究 [J]. *微处理机*, 2012, 33(5): 1–3.
- [64] WRBANEK J, FRALICK G, MARTIN L, et al. A thin film multifunction sensor for harsh environments [C]// 37th Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2001: 1–10.
- [65] WRBANEK J D, FRALICK G C. Novel thin film sensor technology for turbine engine hot section components [R]. Cleveland: NASA Glenn Research Center, 2007.
- [66] WRBANEK J, FRALICK G, GONZALEZ J. Developing multilayer thin film strain sensors with high thermal stability [C]// 42nd Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2006: 1–9.
- [67] AYERDI I, CASTA O E, GARCIA-ALONSO A, et al. Ceramic pressure sensor based on tantalum thin film [J]. *Sensors & Actuators A: Physical*, 1994, 42(1–3): 435–438.
- [68] TELLIER C R, TOSSER A J. Grain size dependence of the gauge factor of thin metallic films [J]. *Active & Passive Electronic Components*, 1977, 4(1): 9–17.
- [69] 周勇. 涡轮叶片应变测量用 NiCr 薄膜应变计的研制 [D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
- [70] CHUNG G S. Characteristics of tantalum nitride thin film strain gauges for harsh environments [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2007, 135(2): 355–359.
- [71] HILL A H. Production of bulk ceramic shapes from polymer derived ceramics [D]. Orlando: University of Central Florida, 2008.
- [72] LIEW L A, ZHANG W, BRIGHT V M, et al. Fabrication of SiCN ceramic MEMS using injectable polymer-precursor technique [J]. *Sensors & Actuators A: Physical*, 2001, 89(1): 64–70.
- [73] LIEW L A, LIU Y, LUO R, et al. Fabrication of SiCN MEMS by photopolymerization of pre-ceramic polymer [J]. *Sensors & Actuators A: Physical*, 2002, 95(2–3): 120–134.
- [74] BRIGHT V M, RAJ R, DUNN M L, et al. Injectable ceramic microcast silicon carbonitride (SiCN) microelectromechanical system (MEMS) for extreme temperature environments with extension: micro packages for nano-devices [R]. Boulder: University of Colorado, 2004.
- [75] 周勇, 李超, 宋阳, 等. Pd-Cr 薄膜应变计的研制 [J]. *仪表技术与传感器*, 2014(10): 105–107.
- [76] LEI J F, FRALICK G C, KRASOWSKI M J. Microfabricated multifunction strain-temperature gauge: US, 5979243 [P]. 1999-11-09 [2017-12-10].
- [77] KAYSER P, GODEFROY J C, LECA L. High-temperature thin-film strain gauges [J]. *Sensors & Actuators A: Physical*, 1993, 37–38, 328–332.
- [78] MATUS L G. Instrumentation for aerospace applications: electronic-based technologies [J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2013, 26(2): 409–421.

专家介绍



孙道恒(1965-),男,厦门大学特聘教授,博士生导师,厦门大学航空航天学院副院长。兼任中国微米纳米技术学会理事,中国机械工程学会机械设计分会理事,中国电子学会电子机械工程分会委员,《振动、测试与诊断》、《电子机械工程》编委,IEEE NEMS 组委会主席、指导委员会委员及程序委员会委员,IEEE Sensors 程序委员会委员, SPIE Photonics Asia 程序委员会委员等职。主持与完成了国家自然科学基金项目、863 计划项目、教育部重大项目、校企合作项目等多项科研项目,拥有国家授权发明专利 70 余项,发表论文 220 余篇。研究领域包括微纳机电系统(MEMS/NEMS)、聚合物纳米结构及其应用、柔性电子制造技术、纳米纤维制造及应用、微纳 3D 打印技术等。