

# 航空发动机高温薄膜热电偶研究概况\*

周颖锋, 崔在甫, 李鑫, 周排弟, 李雅莉, 陈沁楠, 孙道恒

(厦门大学航空航天学院, 厦门 361102)

**[摘要]** 高温薄膜热电偶被认为是解决航空发动机涡轮叶片、燃烧室内壁、高温燃气进出口等极端环境下测温的有效方法。介绍了航空发动机高温薄膜热电偶的研究历史与现状,从薄膜材料、器件性能及其应用等方面总结薄膜热电偶的研究发展趋势;分析了当前薄膜热电偶在敏感材料的高温稳定性、导电基底上多层薄膜材料体系的构建和曲面上传感薄膜制备工艺等面临的挑战;并指出薄膜热电偶未来在使用材料和薄膜制备工艺上可能的发展方向。

**关键词:** 航空发动机; 薄膜热电偶; 高温稳定性; 材料体系; 制备工艺

## Review on High Temperature Thin Film Thermocouple for Aero-Engine

ZHOU Yingfeng, CUI Zaifu, LI Xin, ZHOU Paidi, LI Yali, CHEN Qinnan, SUN Daoheng

(School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361102, China)

**[ABSTRACT]** High temperature film thermocouple is considered as an effective method to measure temperature in extreme environment such as turbine blade, combustion chamber wall and inlet and outlet gas temperature of aero-engine. This paper introduces the research history and current situation of high temperature thin film thermocouple for aero-engine, and summarizes the trends of thin film thermocouple from the thin film material, device performance and applications. The challenges of the current thin film thermocouple in the high temperature stability of sensitive materials, the process of multilayer thin film material system on conductive substrate and the fabrication of sensing thin film on curved surface are analyzed. It also points out the development direction of thin film thermocouple in the future.

**Keywords:** Aero-engine; Thin film thermocouple; High temperature stability; Material system; Preparation technology

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2020.06.082

航空发动机作为航空飞行器的“心脏”,为飞行器飞行提供动力。航空发动机涡轮叶片受到高温(> 1700℃)、高压(> 50bar)、高转速(> 20000r/min)<sup>[1-2]</sup>恶劣环境的作用,极易发生蠕变、烧蚀、疲劳断裂等失效行为。高温是航空发动机涡轮叶片最主要的工作环境特征,叶片的疲劳断裂与其密切相关<sup>[3-4]</sup>。我国空军现役飞行事故大多与发动机叶片疲劳断裂失效有关。可见,涡轮叶片工作状态的在线实时获取一直是航空飞行器发展亟待解决的难题。

航空发动机涡轮叶片温度测取是其工作状态监测、健康管理的重要依据。多种测试方法和手段被尝试,但难以解决问题。如通过在涡轮叶片表面开孔,将温度传感器直接安装在涡轮叶片上获取温度参数的方法,对涡轮叶片本身造成伤害,同时造成开孔处应力集中,降低

涡轮叶片的使用寿命<sup>[5]</sup>;在涡轮叶片表面黏贴片式传感器的方法会对气流造成干扰,黏贴胶在高温下工作一段时间后黏贴效果下降,叶片和片式传感器贴合不紧密,甚至脱落,使测温数据结果不可靠<sup>[6]</sup>;示温漆法测温精度较低,且不具备实时性<sup>[7]</sup>;红外热成像法<sup>[8]</sup>、热敏液晶显示法<sup>[9]</sup>、光电法等<sup>[10]</sup>,由于叶片实际的狭小工作环境和测温系统的复杂性,均不适用于涡轮叶片上温度的测量。

为了解决航空发动机涡轮叶片、燃烧室内壁等狭小空间范围的测温难题,结合薄膜制备技术,出现了微纳尺度的薄膜传感器。相比较传统的块体式温度传感器,薄膜传感器空间尺度小、热容量小、响应速度快,能适应不同场合的测温需要<sup>[11]</sup>;采用薄膜技术在被测零部件上直接制备薄膜传感器,对工作气流无干扰,且具有高机械强度,抗振动和冲击,实现薄膜传感器与被测件的结构一体化<sup>[12]</sup>;响应时间为毫秒、微秒级,对工作温度能实时响应<sup>[13]</sup>。在航空发动机上制备的薄膜温度传感

\* 基金项目:中央高校基本科研业务费专项(20720190020);现代精密测量与激光无损检测福建省高校重点实验室开放课题(2018XKA009)。

器有薄膜 RTD (Resistance Temperature Detector)<sup>[14]</sup> 和薄膜热电偶<sup>[15]</sup>,如图 1 所示。本文主要介绍薄膜热电偶研究进展及其在航空发动机上的应用。

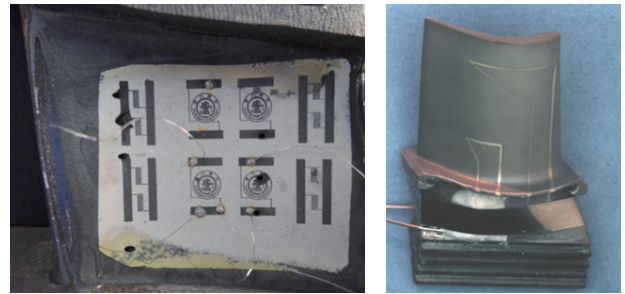
## 1 国内外研究现状

### 1.1 国外研究现状

薄膜热电偶诞生于第二次世界大战期间。早期的研究采用铜、康铜、镍、镍铬合金、镍铝合金等普通廉价金属<sup>[16]</sup>。但受限于传感器的灵敏度、测温量程等,很少实际应用,研究者开始关注稀有金属。NASA 的路易斯研究中心的 Grant 等<sup>[17]</sup> 研制了 Pt/Pt10Rh 薄膜热电偶,并在 1250K 下进行测试,整体结构如图 2 所示,结果表明,这种薄膜热电偶的平均失效时间为 47h,但是由于高温下薄膜中铑元素的氧化,会加大薄膜热电偶的漂移率。随后, Kreider<sup>[18]</sup> 对 Pt/Pt10Rh 薄膜热电偶中的氧化机理做了研究,并研制了用于内燃机燃烧室内壁测温的 Pt/Pt10Rh 薄膜热电偶,试验结果表明 Pt/Pt10Rh 中的铑元素在 700~800°C 时产生氧化,表面制备氧化铝保护层可以减轻氧化问题。可见,金属薄膜热电偶的高温稳定性依赖于表面氧化保护层。

据报道,贵金属薄膜热电偶的最高使用温度为 1200°C<sup>[15]</sup>。而航空发动机涡轮前温度已经达到 1700°C<sup>[19]</sup>,贵金属薄膜热电偶难以适应。为提高薄膜热电偶对高温恶劣环境的适用性,必须寻找新的耐高温材料。陶瓷材料因其熔点高,且在高温下具有良好的稳定性,被大量研究<sup>[20]</sup>。Wrbanek 等<sup>[21]</sup> 采用 CrSi<sub>2</sub>、TaC、Pt13Rh 和 Pt 等材料制备薄膜热电偶,如图 3 所示。其中 TaC 和铂构成的薄膜热电偶在 900°C 内具有良好的线性输出,塞贝克系数为 102μV/°C,而 CrSi<sub>2</sub> 和铂构成的薄膜热电偶在 600°C 下线性输出仅为 -4.3μV/°C。两种热电偶在测温范围内均存在一定的线性偏差,推测这是由于材料氧化造成的。Bhatt 等<sup>[22]</sup> 采用射频溅射制备 TiC/TaC 薄膜热电偶,研究溅射功率、气压和基底温度等工艺参数对 TiC、TaC 薄膜方阻的影响,发现通过减小薄膜方阻,可以提升热电偶的灵敏度。TiC/TaC 薄膜热电偶可以在 1350K 的高温环境中开展试验测试,但输出信号较小,不超过 5mV,如图 4 所示,实际难以应用。

薄膜热电偶灵敏度的提升与薄膜制备工艺密切相关。调整薄膜制备工艺,改变薄膜热电偶材料的载流子浓度及迁移率,可获得不同灵敏度的薄膜热电偶。Kreider<sup>[23]</sup> 采用不同工艺参数制备了 ITO/Pt 和 ATO/Pt 薄膜热电偶,测试结果显示,不同制备工艺参数下的 ITO、ATO 薄膜电阻率不同,导致 ITO、ATO 薄膜塞贝克系数在 12~80μV/°C 的范围内变化。在致力于耐高温高



(a) 涡轮叶片上制备薄膜 RTD

(b) 涡轮叶片上制备薄膜热电偶

图1 航空发动机涡轮叶片上制备薄膜温度传感器

Fig.1 Thin film temperature sensors prepared on turbine blade of aero-engine

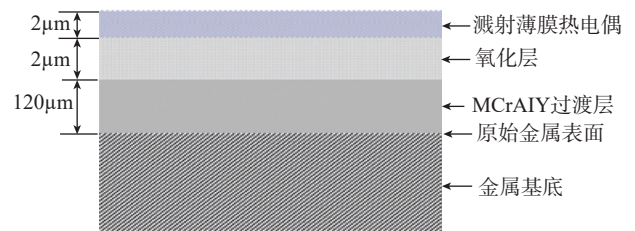


图2 Pt/Pt10Rh薄膜热电偶结构示意图

Fig.2 Structure diagram of Pt/Pt10Rh thin film thermocouple

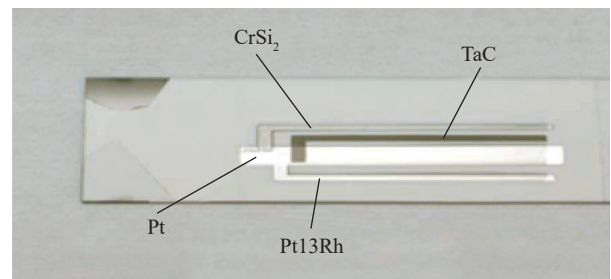


图3 CrSi<sub>2</sub>、TaC、Pt13Rh和Pt组成的薄膜热电偶

Fig.3 Thin film thermocouples composed of CrSi<sub>2</sub>, TaC, Pt13Rh and Pt

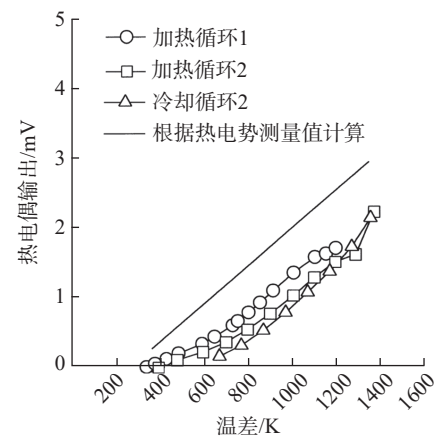


图4 TiC/TaC薄膜热电偶的热电输出

Fig.4 Thermoelectric output of TiC/TaC thin film thermocouple

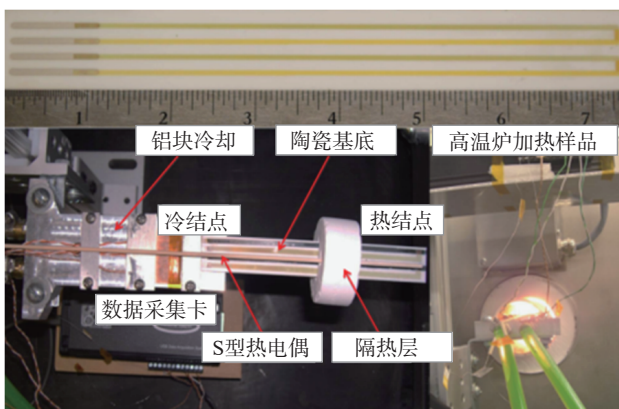
灵敏度的薄膜热电偶的研制中, Gregory 等<sup>[24]</sup>取得了突破性成就,研究了由氮掺杂 ITO、氧掺杂 ITO、氧化铝掺杂 ZnO 等构成的薄膜热电偶,其中,由氮掺杂 ITO 和氧掺杂 ITO 在 1200°C 测试温度范围内具有良好的稳定性和重复性,但灵敏度只有 6μV/°C,与普通金属相差无几;氧化铝掺杂 ZnO 和 ITO 构成的薄膜热电偶在低温下输出较大,但缺乏高温稳定性。Chen 等<sup>[25]</sup>对此进行更深入探究,采用射频溅射制备双陶瓷薄膜热电偶并进行性能测试,其测试系统如图 5 (a)所示,通过对比不同组分的 ITO (In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:SnO<sub>2</sub>=95%:5% 和 In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:SnO<sub>2</sub>=90%:10%) 和 In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 构成热电偶的测试结果,发现这两种双陶瓷热电偶在 1275°C 下 3 次循环测试都具有良好的输出重复性,且平均塞贝克系数均超过 160μV/°C,且 ITO (In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:SnO<sub>2</sub>=95%:5%) 和 In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 构成的热电偶比 ITO (In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:SnO<sub>2</sub>=90%:10%) 和 In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 构成的热电偶的灵敏度大,如图 5 (b)所示,同时指出根本原因在于载流子浓度的差异,3 种材料载流子浓度由高到低顺序如下: ITO (In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:SnO<sub>2</sub>=95%:5%) > ITO (In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:SnO<sub>2</sub>=90%:10%) > In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 因此 ITO (In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:SnO<sub>2</sub>=95%:5%) 和 In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 构成的薄膜热电偶塞贝克系数更大。自此, ITO、In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等陶瓷材料成为当前薄膜热电偶的热点材料。

### 1.2 国内研究现状

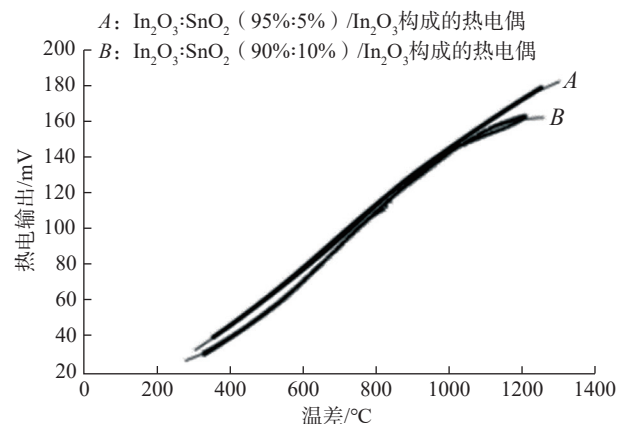
国内对于薄膜热电偶的研究起步较晚,但也有一些成果。在高温对薄膜作用机制研究方面,王超杰等<sup>[26]</sup>对薄膜热电偶在高温下的氧化机理做了探究,指出金属薄膜氧化速度随着温度升高呈指数关系递增。通过在 NiCr/NiSi 薄膜热电偶表面制备 SiO<sub>2</sub> 和 SiO<sub>x</sub>N<sub>y</sub> 薄膜,降低氧在金属薄膜中的扩散速度,提升薄膜传感器的高温抗氧化性。Zhao 等<sup>[27]</sup>对比了经过不同退火工艺处理

的 ITO/In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜性能,发现由于经过氮气和空气分步退火后生成氮氧化物薄膜 ITON/InON 具有更高的结合能和高温稳定性。Liu 等<sup>[28]</sup>通过对比有无添加 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜保护层的 ITO/In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜热电偶,在 1250°C 保温不同时长后的微观表面形貌和薄膜厚度变化,发现 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜保护层抑制了 ITO/In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜在高温下的分解挥发,大大降低薄膜热电偶的漂移率,使制得的薄膜热电偶在 1250°C 下稳定输出 10h。

国内研究者采用薄膜热电偶在航空发动机测温方面也进行了一些尝试。Jin 等<sup>[29]</sup>在氧化铝基底上制备 ITO/In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜热电偶,并将其用于发动机燃烧试验动态内壁温度测量,如图 6 (a)所示为超燃冲压发动机壁面温度测量的热电偶安装图,对 2 马赫的气体流速、燃烧时间少于 300ms 的整个燃烧阶段进行温度监测,结果如图 6 (b)所示,薄膜热电偶能够迅速响应不同的点火燃烧阶段温度变化。安保合<sup>[30]</sup>采用真空镀膜的方法在涡轮叶片表面制作铂铑 10-铂薄膜热电偶。虽然实现了薄膜热电偶与叶片基底一体化结构,但经过测试,发现存在诸多问题,如薄膜热电偶断裂、膜与细丝引线开焊、测量膜与基底短路等,热电偶的损坏率达到 40%,性能上测量误差达到 ±3%,累计使用寿命不超过 10h 等。陈寅之<sup>[6]</sup>在镍基合金表面制备 ITO/Pt 热电偶,标定结果显示其塞贝克系数为 78.32μV/°C,并在涡轮叶片表面制备 ITO、Pt、PtRh、NiCr、NiSi 薄膜进行冷效试验,对其在涡轮叶片上的附着性能测试,结果见图 7,可见 ITO 薄膜在冷效试验前后与涡轮叶片附着性能良好,保持着良好的附着性能。Deng 等<sup>[31]</sup>直接在涡轮叶片上制备薄膜热电偶,并采用通孔引线连接的方式采集薄膜热电偶输出电压,如图 8 (a)所示。采用图 8 (b)的测试系统,经过 1000°C 循环测试,获得稳定输出信号,实现涡轮叶



(a) In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ITO 薄膜热电偶测试系统



(b) ITO 和 In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜热电偶的热电输出

图5 In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ITO薄膜热电偶测试系统及测试结果

Fig.5 In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ITO thin film thermocouple test system and test results

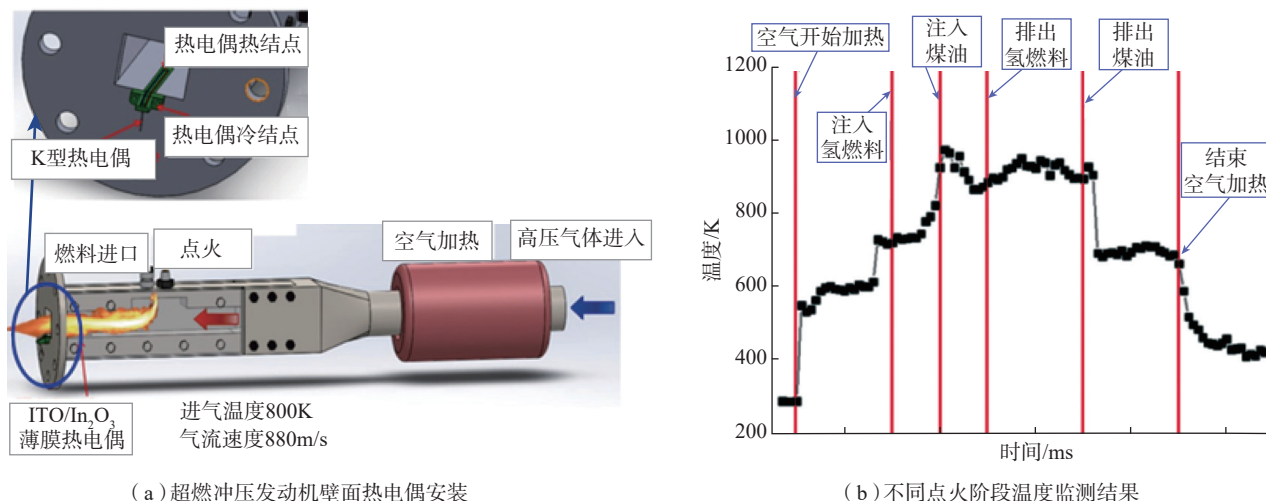


图6 超燃冲压发动机燃烧试验及其壁面温度监测  
Fig.6 Scramjet combustion test and wall temperature monitoring

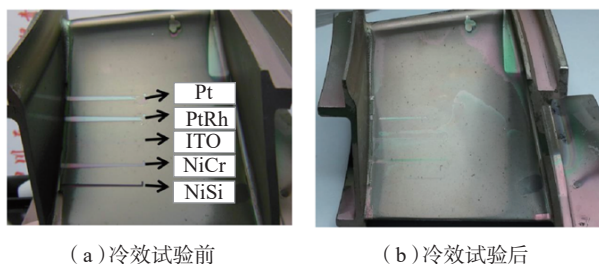


图7 在叶片表面制备ITO、Pt、PtRh、NiCr、NiSi薄膜  
并进行冷效试验  
Fig.7 Preparation of ITO, Pt, PtRh, NiCr and NiSi films on  
turbine blade and cold effect test

片传感薄膜一体化。

## 2 发展趋势

### 2.1 薄膜制备工艺改进

薄膜热电偶的制备分为两个步骤：薄膜沉积和图案化。传统镀膜方法主要包括物理气相沉积、化学气相沉积、丝网印刷、电镀、电解、阳极氧化等<sup>[32-36]</sup>。采用不同的薄膜制备工艺获得的薄膜热电偶性能不同，在微观上主要表现为薄膜形貌、物相、晶相等差异。由于溅射镀膜工艺适用于广大材料的薄膜化，且成膜速度快、对膜层损伤小、薄膜与基底粘附性好等优点，被广泛应用于薄膜传感器的制备<sup>[37-38]</sup>。但是，传统溅射工艺难以保证曲面上镀膜厚度的均匀性。如图9所示，上海交通大学Duan等<sup>[39]</sup>采用软光刻和溅射工艺成功在涡轮叶片上制备的薄膜RTD。但是对于薄膜热电偶，制备过程中需要结点搭接，涉及标记对准，在曲面上获得微纳尺度薄膜热电偶较为困难。

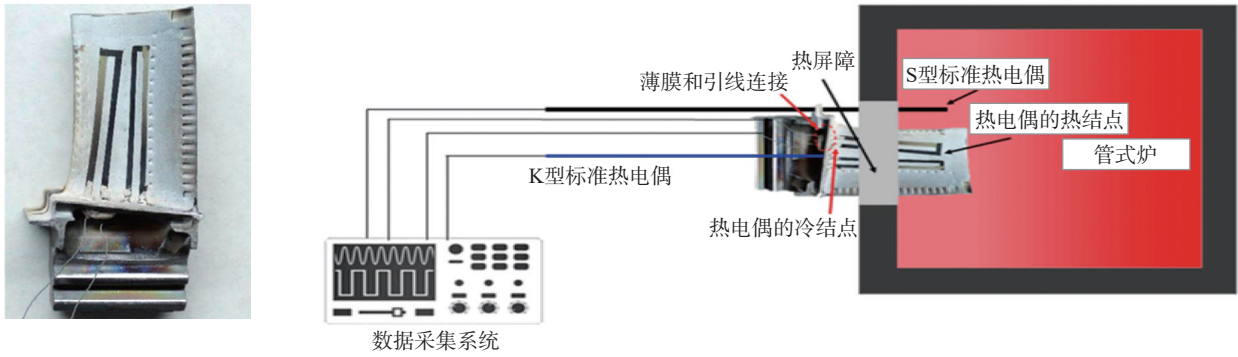
针对在曲面镀膜厚度均匀性较差，影响制得的传感

器性能的难题，有研究者提出机器人系统结合传统溅射镀膜的方式制备薄膜，采用示教再现或输入数字地图的方式带动靶材的移动溅射，保证曲面镀膜的均匀性，获得稳定性能的薄膜热电偶<sup>[40-42]</sup>。此外，也可以考虑采用溶胶凝胶法、直写或喷印敏感材料溶液的方法制备薄膜传感器，实现曲面部件和薄膜传感器一体化<sup>[43-45]</sup>。

### 2.2 薄膜热电偶灵敏度、稳定性提升

敏感层是薄膜热电偶实现温度测量的感知层，是热电偶测温的核心，其高温稳定性、温度敏感性决定了传感器的性能优劣。金属薄膜热电偶灵敏度较低，且高温下容易被氧化；陶瓷材料性能稳定，灵敏度远高于金属薄膜热电偶。薄膜热电偶的灵敏度主要由敏感层两种薄膜材料载流子浓度及其浓度差、迁移率等决定<sup>[46]</sup>。研究者大多是通过掺杂工艺提升正极薄膜材料载流子浓度或增大正负极材料的浓度差，但薄膜热电偶的灵敏度并没有得到显著提高。此外，高温会氧化金属薄膜材料，也会使陶瓷薄膜材料分解和挥发，增大薄膜热电偶测温漂移率<sup>[47]</sup>。添加保护层增强薄膜材料的抗氧化、抗分解效果有限，还会延长薄膜热电偶的响应时间。可见，强高温稳定性、高灵敏输出的敏感层制备还面临诸多挑战。

当前，高熔点、强稳定性的陶瓷材料在高温环境测温需求上具有广阔的应用前景<sup>[48-50]</sup>。目前人们关注的陶瓷材料有ITO、ATO、ZnO、AZO等<sup>[51-56]</sup>，对其制备工艺、电学特性、高温稳定性等方面均进行了大量的研究，但成功用于航空发动机涡轮叶片上的报道却屈指可数。未来可能有更适合用于制备薄膜传感器的新材料出现。图10热重分析结果表明，先驱体陶瓷(Precursor-derived Ceramics, PDC)材料可以在超过1400°C下稳定



(a) 涡轮叶片上通孔引线连接薄膜热电偶

(b) 高温测试图

图8 涡轮叶片上通孔引线连接薄膜热电偶及其测试系统

Fig.8 Thin film thermocouple connected by through-hole lead wire on turbine blade and its test system



图9 在涡轮叶片上制备的薄膜RTD

Fig.9 Thin film RTD prepared on turbine blade

工作。部分前驱体材料甚至可以在 2000°C 下稳定存在，且前驱体陶瓷热电偶具有高灵敏度，如图 11 所示材料，有可能成为航空发动机测温应用的新材料<sup>[57-58]</sup>。目前，前驱体陶瓷材料大多被制备成块体式传感器，并不适合于涡轮叶片测温。前驱体陶瓷可以经过固化、交联、热解等过程，将其制备成薄膜传感器，但其薄膜化过程中需要解决薄膜的收缩、开裂和图案化等难题<sup>[59]</sup>。

### 2.3 材料体系构建及完善

在不同基底上制备薄膜传感器需要构建不同的材料体系。如图 12<sup>[60]</sup>所示是由 NASA 路易斯研究中心提出的在不同基底上构建不同的材料体系。其中，在导电基底上制备薄膜热电偶的材料体系最为复杂。在薄膜热电偶和导电基底中间需要沉积绝缘层以准确收集输出电信号。由于导电合金基底材料和绝缘层材料的热膨胀系数相差较大，会导致高温下绝缘层薄膜的脱落<sup>[61]</sup>。此时需要在合金基底和绝缘层中间沉积过渡层以解决两者之间由于高温下热膨胀系数不匹配导致的薄膜伸缩开裂问题。图 12 中，过渡层材料 MCrAlY 化合物中的

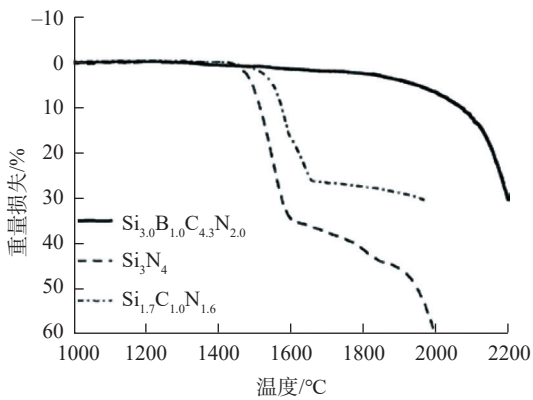


图10 SiCN、SiBCN和Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>的热重分析

Fig.10 Thermogravimetric analysis of SiCN, SiBCN and Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>

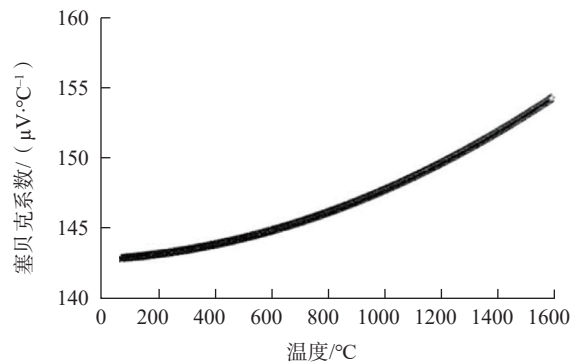


图11 (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-B<sub>4</sub>C)-(Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-SiC)/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>热电偶的塞贝克系数  
Fig.11 Seebeck coefficient of (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-B<sub>4</sub>C)-(Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-SiC)/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> thermocouple

M 元素根据合金基底材质不同选择不同的元素,如 Fe、Co、Ni 等。在过渡层上制备绝缘层,通常采用氧化铝或其他绝缘陶瓷材料。如图 13 (a)、(b) 所示,分别为不同成分的 YSZ<sup>[62]</sup> 和氧化铝<sup>[63]</sup> 作为绝缘层(组成为质量分数),其绝缘电阻随着温度升高而减小。相对于金属薄膜传感器,绝缘层电阻值大敏感层电阻值几个数量级,能满足绝缘要求。但对于陶瓷薄膜传感器,其电阻

值与绝缘层接近,绝缘效果是否能够满足测试要求还有待探究。此外,Wrbanek 等<sup>[64]</sup> 指出,各连接层间材料的热膨胀系数差不能超过 30%,否则可能导致高温下薄膜的脱落,这是在导电基底上构建材料体系时首要考虑的问题。此外,还需要考虑层间各层薄膜的粘附效果,当相互接触的两层薄膜材料有相同元素时,由于层间材料同元素的扩散,会提升层间薄膜粘附力<sup>[6,65-66]</sup>。

保护层		
敏感层	保护层	
溅射氧化铝	敏感层	
热生长氧化铝	溅射氧化铝	保护层
MCrAlY 合金过渡层	热生长二氧化硅	敏感层
合金基底	碳化硅基底	氮化硅基底

图12 不同基底上制备薄膜传感器的材料体系构建

Fig.12 Material system construction of thin film sensors prepared on different substrates

### 3 结论

随着工业机器大发展,航空发动机涡轮叶片、燃烧室内壁、喷嘴出口、高超声速飞行器表面等均有测温需要,薄膜热电偶已经成为当前传感结构一体化研究的热点。国内外开展了大量的相关研究工作,提升了薄膜热电偶分立元件的灵敏度、测温量程、使用寿命等性能,但在实际应用上仍存在诸多挑战。兼具高温稳定性和高灵敏度的敏感层薄膜制备、多层材料体系的热适配问题、复杂曲面均匀薄膜沉积仍制约着薄膜热电偶在航空发动机上的应用。不断发掘新材料、新薄膜制备工艺和信号采集方法,航空发动机薄膜热电偶终将取得重大突破。

### 参考文献

[1] MERSINLIGIL M, DESSET J, BROUCKAERT J. 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 and Energy, 2011, 225(7): 954-963.

[2] YAMAWARI 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] 宋健. 航空发动机转子碎片冲击破损失效特征研究 [D]. 天津: 中国民航大学, 2015.

SONG Jian. Research on impact failure characteristics of rotor fragments of aero-engine[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2015.

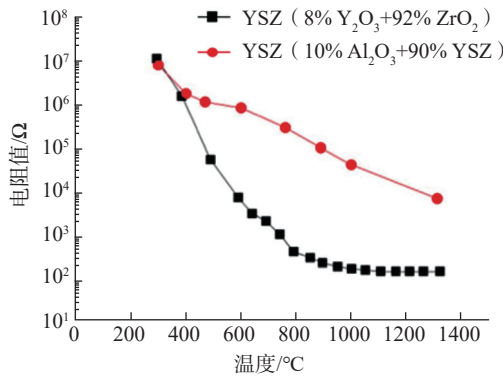
[4] 吴学岗. 航空发动机涡轮叶片动应力测量技术研究 [D]. 西安: 电子科技大学, 2018.

WU Xuegang. Research on dynamic stress measurement technology of aero-engine turbine blade[D]. Xi'an: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.

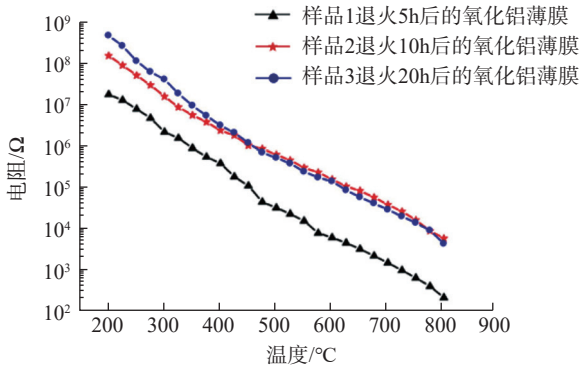
[5] 李超. 涡轮叶片应变测量用 TaN 薄膜应变计的研制 [D]. 西安: 电子科技大学, 2014.

LI Chao. Development of TaN thin film strain gauge for turbine blade strain measurement[D]. Xi'an: University of Electronic Science and Technology of China, 2014.

[6] 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]. 西安: 电子科技大学, 2014.



(a) 不同组分的 YSZ 薄膜电阻随温度变化



(b) 不同条件处理后的氧化铝薄膜电阻随温度变化

图13 YSZ和氧化铝薄膜电阻随温度的变化情况

Fig.13 Variation of YSZ and alumina film resistance with temperature

- CHEN Yinzhi. Research on preparation of thin film thermocouple on nickel-based superalloy and related technologies[D]. Xi'an: University of Electronic Science and Technology of China, 2014.
- [7] CHOUDHURY R, NEELY A. Calibration of thermal paints for surface temperature measurement of HIFiRE-0 Flight[C]//18th AIAA/3AF International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference. 2012: 5899.
- [8] 李宏祺. 红外热成像技术应用研究[J]. 科教导刊(上旬刊), 2017(10): 49-50.
- LI Hongqi. Application research of infrared thermal imaging technology[J]. The Guide of Science & Education, 2017(10): 49-50.
- [9] 范玮. 热敏液晶测温标定及误差分析[J]. 航空发动机, 2009(1): 50-52.
- FAN Wei. Thermal liquid crystal temperature measurement and error analysis[J]. Aeroengine, 2009(1): 50-52.
- [10] 宋迎军. 涡轮叶片温度分布新式测量技术[J]. 航空发动机, 2004, 30(2): 25-27.
- SONG Yingjun. New measurement technology of turbine blade temperature distribution[J]. Aeroengine, 2004, 30(2): 25-27.
- [11] ZHAO X H, YANG K, WANG Y R, et al. Stability and thermoelectric properties of ITON: Pt thin film thermocouples[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2016, 27(2): 1725-1729.
- [12] 邵靖, 段力, 胡铭楷, 等. MEMS 原位集成传感器振动冲击试验研究[J]. 振动、测试与诊断, 2018, 38(3): 126-130.
- SHAO Jing, DUAN Li, HU Mingkai, et al. Vibration impact test of MEMS in-situ integrated sensor[J]. Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis, 2018, 38(3): 126-130.
- [13] LIMB S J. HEAT Sensor: harsh environment adaptable thermionic sensor[R]. Palo Alto: Palo Alto Research Center, CA, 2016.
- [14] DUAN F L, LI J, GAO J, et al. Integrated fabrication of high-temperature microelectromechanical system sensor on aeroengine turbine blade[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2018, 32(3): 828-830.
- [15] WRBANEK J D, FRALICK G C. Novel thin film sensor technology for turbine engine hot section components[R]. Cleveland: NASA Glenn Research Center, 2007.
- [16] MARSHALL R, ATLAS L, PUTNER T. The preparation and performance of thin film thermocouples[J]. Journal of Scientific Instruments, 1966, 43(3): 144-149.
- [17] 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.
- [18] KREIDER K G. Thin film thermocouples for internal combustion engines[J]. Journal of Vacuum Science & Technology A, 1986, 4(6): 2618-2623.
- [19] SINGH S K, YADAV M K, KHANDEKAR S. Measurement issues associated with surface mounting of thermopile heat flux sensors[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 114(S): 1105-1113.
- [20] 袁源. 耐高温陶瓷材料的研究现状[J]. 中国科技信息, 2007(18): 104-106.
- YUAN yuan. Research status of high-temperature ceramic materials[J]. China Science and Technology Information, 2007(18): 104-106.
- [21] 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.
- [22] BHATT H D, VEDULA R, DESU S B, et al. Thin film TiC/TaC thermocouples[J]. Thin Solid Films, 1999, 342(1-2): 214-220.
- [23] KREIDER K G. Thin-film transparent thermocouples[C]//Inprocessing of International Conference on Solid-state Sensors & Actuators. IEEE, 1992.
- [24] 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.
- [25] CHEN X, GREGORY O J, AMANI M. Thin-film thermocouples based on the system  $In_2O_3-SnO_2$ [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2011, 94(3): 854-860.
- [26] 王超杰, 陈鹏, 袁广民, 等. 薄膜热电偶在高温下的抗氧化机理[J]. 材料研究学报, 2017(2): 123-128.
- WANG Chaojie, CHEN Peng, YUAN Guangmin, et al. Oxidation prevention mechanism of thin film thermocouple at high temperature[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2017, 31(2): 123-128.
- [27] ZHAO X H, LI H T, YANG K, et al. Annealing effects in ITO based ceramic thin film thermocouples[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2017, 68: 147-151.
- [28] LIU Y T, REN W, SHI P, et al. Preparation and thermal volatility characteristics of  $In_2O_3/ITO$  thin film thermocouple by RF magnetron sputtering[J]. AIP Advances, 2017, 7(11): 115025.
- [29] JIN X H, MA B H, QIU T, et al. ITO thin film thermocouple for transient high temperature measurement in scramjet combustor[C]//2017 19th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS), 2017.
- [30] 安保合. 薄膜温度传感器的研制及应用[J]. 推进技术, 1992, 13(1): 63-67.
- AN baohe. Development and application of thin film temperature sensor[J]. Journal of Propulsion Technology, 1992, 13(1): 63-67.
- [31] DENG J, WANG W, HUI L, et al. A through-hole lead connection method for thin-film thermocouples on turbine blades[J]. Sensors, 2019, 19(5): 1155-1167.
- [32] BALAKRISHNAN V, PHAN H P, DINH T, et al. Thermal flow sensors for harsh environments[J]. Sensors, 2017, 17(9): 2061-2092.
- [33] FU T, ZONG A, ZHANG Y, et al. A method to measure heat flux in convection using Gardon gauge[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 108: 1357-1361.
- [34] 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.
- [35] LI L, LI B, EHMANN K F, et al. A thermo-mechanical model of dry orthogonal cutting and its experimental validation through

embedded micro-scale thin film thermocouple arrays in PCBN tooling[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2013, 70(4): 70–87.

[36] 田民波, 刘德令. 薄膜科学与技术手册(上册)[M]. 北京: 机械工业出版社, 1991: 263–593.

TIAN Minbo, LIU Deling. Handbook of thin film science and technology (I) [M]. Beijing: China Machine Press, 1991: 263–593.

[37] SINGH R, SINGH S P. Development of a low cost wireless temperature monitoring system for industrial & research application[J]. 2015, 5: 355–361.

[38] LEE M, MORIMOTO K, SUZUKI Y. Development of MEMS wireless wall temperature sensor for combustion studies[J]. Measurement Science & Technology, 2017, 28(3): 35–101.

[39] DUAN F L, LIN Y. Development of accurate and robust high temperature sensor on aero-engine turbine blade surface[C]//2018 Joint Propulsion Conference, 2018: 4622.

[40] 马东来. 机器人系统在溅射镀膜设备中的应用[J]. 真空, 2008(6): 66–69.

MA Donglai. Application of robot system in sputtering coating equipment[J]. Vacuum, 2008(6): 66–69.

[41] 王锡哲, 白学普. 对真空环境镀膜机器人技术条件的分析[J]. 制造业自动化, 2005, 27(3): 73–75.

WANG Xizhe, BAI Xuepu. Analysis of the technical conditions of coating robot in vacuum environment[J]. Manufacturing Automation, 2005, 27(3): 73–75.

[42] 孟萌, 武文革, 张勇, 等. 基于响应曲面法的溅射沉积薄膜工艺参数优化[J]. 工具技术, 2017, 51(7): 24–27.

MENG Meng, WU Wenwen, ZHANG Yong, et al. Parameter optimization of sputtering deposition thin films based on response surface method [J]. Tool Engineering, 2017, 51(7): 24–27.

[43] LIU J X, WANG D, ZHANG N, et al. Effect of surfactants on the structure and photoelectric properties of ITO films by sol-gel method[J]. Rare Metals, 2010, 29(2): 143–148.

[44] LUO Y H, WU D Z, ZHAO Y, et al. Direct write of a flexible high-sensitivity pressure sensor with fast response for electronic skins[J]. Organic Electronics, 2019, 67: 10–18.

[45] WANG S, MEI X, CAO J, et al. The preparation of graphene/polyethylene oxide/sodium dodecyl sulfate composite humidity sensor via electrohydrodynamic direct-writing[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2019, 52(17): 175–307.

[46] 黄泽铄. 热电偶原理及其检定[M]. 北京: 中国计量出版社, 1993: 1–28.

HUANG Zexi. Thermocouple principle and verification[M]. Beijing: China Metrology Press, 1993: 1–28.

[47] LIU Y T, REN W, SHI P, et al. A highly thermostable  $\text{In}_2\text{O}_3/\text{ITO}$  thin film thermocouple prepared via screen printing for high temperature measurements[J]. Sensors (Basel), 2018, 18(4): 958–967.

[48] LEI M I, MEHREGANY M. Characterization of thermoelectric properties of heavily doped  $n$ -type polycrystalline silicon carbide thin films[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2013, 60(1): 513–517.

[49] SCARDELLETTI M C, JORDAN J L, MEREDITH R D, et al. Demonstration of a packaged capacitive pressure sensor system suitable for jet turbofan engine health monitoring[C]//IEEE Electronic Components and Technology Conference, 2016: 877–888.

[50] AIAA. Design and operation of a fast, thin-film thermocouple probe on a turbine engine[C]//AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, 2014: 3923.

[51] MITRA P, CHATTERJEE A P, MAITI H S. ZnO thin film sensor[J]. Materials Letters, 1998, 35(1–2): 33–38.

[52] NAVAMATHAVAN R, CHI K C, YANG E J, et al. Fabrication and characterizations of ZnO thin film transistors prepared by using radio frequency magnetron sputtering[J]. Solid State Electronics, 2008, 52(5): 813–816.

[53] CAO M, LI Y D, YANG J, et al. Study for double-layered AZO/ATO transparent conducting thin film[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2013, 419: 12–22.

[54] CHI L, ZHI C. High-temperature resistive hydrogen sensor based on thin nanoporous rutile  $\text{TiO}_2$  film on anodic aluminum oxide[J]. Sensors & Actuators B Chemical, 2009, 140(1): 109–115.

[55] GREGORY O J, BUSCH E, FRALICK G C, et al. Preparation and characterization of ceramic thin film thermocouples[J]. Thin Solid Films, 2010, 518(21): 6093–6098.

[56] WRBANEK J D, FRALICK G C, ZHU D. Ceramic thin film thermocouples for SiC-based ceramic matrix composites[J]. Thin Solid Films, 2012, 520(17): 5801–5806.

[57] SHAO G. Development of polymer derived sialcn ceramic and its applications for high-temperature sensors[D]. Orlando: University of Central Florida, 2013.

[58] 冯立超, 刘晓燕, 于雷梅, 等. 层压式整体陶瓷热电偶传感器制备及其性能[J]. 仪表技术与传感器, 2018, 430(11): 37–41.

FENG Lichao, LIU Xiaoyan, YU Xuemei, et al. Fabrication and performance of laminated monolithic ceramic thermocouple sensor [J]. Instrumentation Technology and Sensor, 2018, 430(11): 37–41.

[59] BONHAM C, THORPE S J, ERLUND M N, et al. Stagnation temperature measurement using thin-film platinum resistance sensors[J]. Measurement Science & Technology, 2014, 25(1): 015101.

[60] 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.

[61] 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.

XIAO Youwen, XIE Guijiu, HE Feng, et al. Research on high temperature heat flow measurement technology of thin film[J]. Microprocessors, 2012, 33(5): 1–3.

[62] GAO J, DUAN F L, YU C, et al. Electrical insulation of ceramic thin film on metallic aero-engine blade for high temperature sensor applications[J]. Ceramics International, 2016, 42(16): 19269–19275.

[63] NIU D, WANG Q, ZHANG C C, et al. Preparation, characterization and application of high-temperature  $\text{Al}_2\text{O}_3$  insulating film[J]. Surface & Coatings Technology, 2016, 291: 318–324.

(下转第102页)

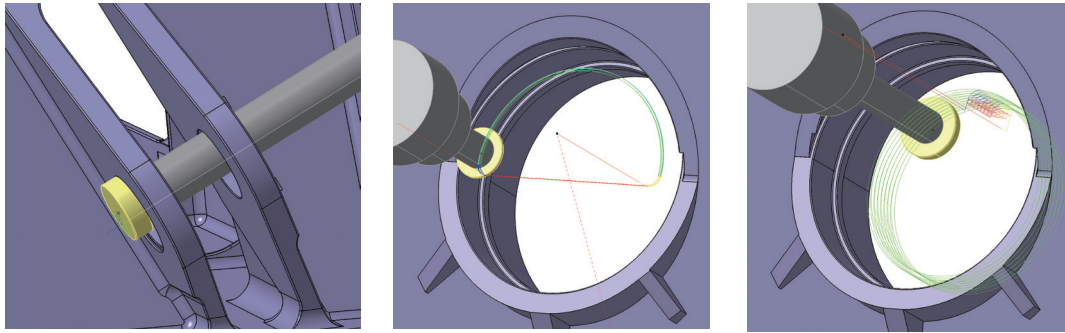


图12 槽铣刀及走刀轨迹示意图  
Fig.12 Slot milling cutter and the feeding path diagram

### 参考文献

- [1] 宋智勇, 牟文平. 钛合金航空结构件的高效数控加工[J]. 航空制造技术, 2009, 52(19): 40-45.
- SONG Zhiyong, MOU Wenping. High-performance NC machining of Ti-alloy aircraft structure part[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009, 52(19): 40-45.
- [2] 王红红, 刘振军. 钛合金铸件的应用及发展[J]. 新材料产业, 2009(11): 25-30.
- WANG Honghong, LIU Zhenjun. Application and development of titanium casting components[J]. Advanced Materials Industry, 2009(11): 25-30.
- [3] 王金海, 张伟. 框架式钛合金铸件加工技术探析[J]. 装备制造技术, 2012, 46(5): 145-150.
- WANG Jinhai, ZHANG Wei. Study on processing technology of frame titanium alloy castings[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2012, 46(5): 145-150.
- [4] 熊青春, 宋戈. 钛合金飞机结构件切削技术发展趋势[J]. 航空制造技术, 2013, 56(14): 40-47.
- XIONG Qingchun, SONG Ge. Cutting technology development of titanium alloy aircraft structural part[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(14): 40-47.
- [5] 宋戈. 基于切削力精确建模的钛合金薄壁件让刀变形预测研究[D]. 济南: 山东大学, 2012.
- SONG Ge. Research on surface error prediction in milling process of thin wall part based on accurate cutting force modeling[D]. Jinan: Shandong University, 2012.
- [6] 周文东, 尹佳. 航空钛合金结构件的加工刀具选型及铣削方法[J]. 航空精密制造技术, 2018, 61(5): 57-60.
- ZHOU Wendong, YIN Jia. Research on tool-selection & milling strategy of titanium-alloy aircraft structure part[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2018, 54(5): 57-60.
- [7] 王志龙, 王宏睿. 不规则台阶孔加工方法的研究[J]. 精密制造与自动化, 2005(1): 29-31.
- WANG Zhilong, WANG Hongrui. Research on machining method of irregular step hole[J]. Precise Manufacturing & Automation, 2005(1): 29-31.
- [8] 鲁康平, 姜增辉. 基于快走刀层铣的 TC4 钛合金高效开槽加工[J]. 制造技术与机床, 2016(2): 115-118.
- LU Kangping, JIANG Zenghui. High-efficiency slotting TC4 titanium alloy based on fast-feed layer milling[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2016(2): 115-118.
- 通讯作者: 刘元吉, 研究方向为数控加工工艺技术、数字化装配工艺技术, E-mail: 2490045410@qq.com。
- (责编 大漠)
- 
- (上接第89页)
- [64] WRBANEK J, FRALICK G, HUNTER G, et al. Thin film heat flux sensor development for ceramic matrix composite (CMC) Systems[C]//45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2010: 50-66.
- [65] 刘海军. In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ITO集成薄膜热电偶的制备及性能研究[D]. 北京: 电子科技大学, 2015.
- LIU Haijun. Preparation and performance study of In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ITO integrated thin film thermocouple [D]. Beijing: University of Electronic Science and Technology of China, 2015.
- [66] MATUS L G. Instrumentation for aerospace applications: electronic-based technologies[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2013, 26(2): 409-421.
- 通讯作者: 孙道恒, 教授, 博士生导师, 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, E-mail: sundh@xmu.edu.cn。
- (责编 大漠)