

航空发动机高温传感器的应用

The Application of High Temperature Sensors of Aero Engine

■ 杨博闻 / 中国航发研究院

随着航空发动机技术的发展，发动机的推重比、涡轮前温度和总增压比等性能参数得到显著提升。其中，涡轮前温度不但是航空发动机的重要性能参数，还关系到涡轮叶片表面温度、涡轮冷却、延寿控制等各个方面，极大地影响到航空发动机工作的可靠性。实现对涡轮前温度进行直接准确测量是满足上述技术要求的前提条件，而研制适用于航空发动机的大量程、高精度、高稳定性的温度传感器是具体的实现途径。

高温传感器的工作原理和分类

温度传感器是能感受温度信号并按一定传感原理转换成可用电信号的器件或装置，通常包含敏感元件和转换元件。根据测量原理性质的不同，温度传感器可分为接触式测温和非接触式测温两类（如图1所示）。

接触式测温是指温度传感器的敏感元件与被测对象直接接触，通过热传导的方式达到热平衡状态，用敏感元件的温度代表被测对象的实际温度并进行测量。在航空发动机中正在使用或探索使用的接触式传感器包括热电偶温度传感器、示温漆、晶体高温传感器和光纤高温传感器等。

非接触式测温是指温度传感器的敏感元件与被测对象不发生直接接触，而是通过获取被测对象的热辐射信息，根据与温度的对应关系计算出被测对象的温度信息，实现对被测对象的温度测量。在航空发动机中正在使用或探索使用中的非接触式传感器主要是辐射式高温传感器。

接触式高温传感器

热电偶温度传感器

热电偶是航空发动机中最为常

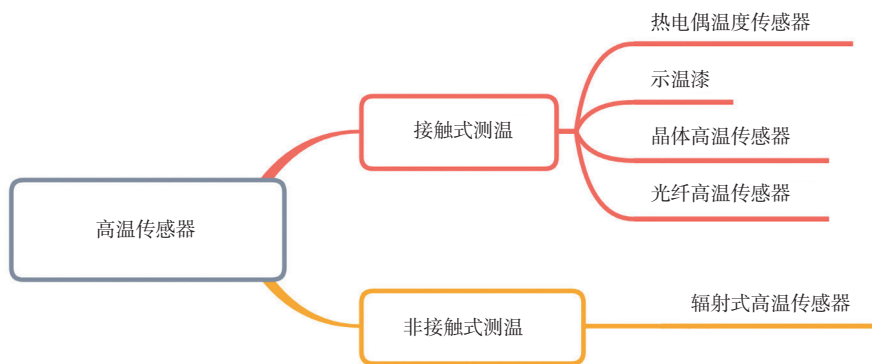


图1 航空发动机高温传感器分类

用的温度传感器，具有结构简单、可靠性高、技术成熟的优点。热电偶的敏感元件是由两根不同材质的金属丝焊接而成的，称为工作端或热端，两根金属丝的另一端称为自由端或冷端，通过连接补偿导线和测量仪表构成回路。其测温原理称为塞贝克效应（Seebeck effect），即在热电偶的热端和冷端存在温度差时，两金属丝之间会产生热电势并在回路中形成电流，通过测量热电势的大小并进行冷端温度补偿即可计算出热电偶工作端的温度值。不同材质的热电偶具有不同的测温范围，可用于航空发动机涡轮前温度测量的热电偶为铂铑30-铂铑6热电偶（分度号B），长期使用最高温度

为1873K，短期使用最高温度可达2073K。

热电偶在发动机中的安装方式主要包括埋入式、火焰喷涂式和薄膜式3种。埋入式热电偶是指预先在被测对象表面开槽，将铠装热电偶埋入槽中后通过等离子喷涂固定，这种方法对热电偶的制作工艺要求较低，然而破坏了被测对象的表面结构，影响了被测对象的强度；火焰喷涂式热电偶是通过火焰喷涂涂层的方法将热电偶丝固定在被测对象表面，这种方法避免了对被测对象结构上的破坏，但产生了对表面流场的干扰；薄膜式热电偶是通过电镀、真空蒸镀、真空溅射等技术，令金属和绝缘材料分层附着在被测

对象表面形成热电偶^[1]，薄膜式热电偶的膜层厚度可以低至数微米，将对被测对象结构强度和表面流场的影响降至最低，然而在高温环境下容易受热应力的影响而产生脱落。

示温漆

示温漆测温是一种非干涉式测温方法。作为一种颜色随温度发生变化的功能性涂料，示温漆具有不破坏被测对象表面形貌、不改变气流状态、无须测量引线、无须测量窗口、结果直观等优点^[2]。根据涂料颜色随温度发生变化后再回到变色前的温度环境下是否恢复原色，示温漆可分为可逆与不可逆两类，航空发动机测温中一般使用不可逆的示温漆^[3]。而根据涂料随温度上升发生的变色次数，示温漆又可以分为单色和多色示温漆，单色示温漆随温度升高只产生一种颜色变化，多用于超温警示功能；多色示温漆随温度升高会产生多次变色，变色次数越多，每一种颜色指示的温度变化范围越小，测温结果精度越高。因此，航空发动机测试应用中一般使用多变色不可逆示温漆。

得益于非干涉、无须测量引线及窗口的特性，示温漆特别适宜在旋转部件和复杂结构件的表面进行测温，此类部件往往受到安装方式和测量引线的制约而难以应用其他温度传感器进行温度测量。同时，示温漆可以在被测对象表面进行大面积涂覆而不影响表面形貌与气流状态，适宜测量被测对象表面温度分布。示温漆的测量特性在带来便利性的同时，还带来了相应的局限性：示温漆受到加热速度、加热时间、环境污染等使用条件的影响较大；需要通过颜色比对读取温度数值，因此测

量的主观误差较大；需要将被测对象拆卸后才能进行温度数值读取，因此只适宜进行发动机测试时使用，无法进行在线监测等。

综合上述特征，示温漆测温常用于航空发动机测试中对燃烧室和涡轮部件表面温度分布的测量。目前对多色不可逆示温漆的研究主要集中于提高示温漆温度值的判读精度、增大示温漆的涂层强度和使用范围等方面，今后仍有广阔的发展前景。

晶体高温传感器

晶体高温传感器是利用晶体辐照缺陷热稳定性来进行温度测量的传感器。当碳化硅晶体受到中子辐照时，由于电离、离位等效应的作用，晶格内部产生大量如间隙原子、空位等缺陷，破坏了晶体原子排列的周期性^[4]。而经过中子辐照的碳化硅晶体所产生的热稳定性缺陷会在高温环境下被修复，其修复程度与晶体的退火温度存在对应关系。因此，利用X射线衍射（XRD）检测出晶体辐照缺陷的修复状态，参照预先标定的温度对应曲线，便可计算出晶体的退火温度，即被测对象所经历的最高温度。

晶体测温方法具有尺寸小、精

度高、可分布式测量和不需要引线等优点，美国LG Tech-Link公司开发的UCTS测温晶体体积仅有 $0.20\text{mm} \times 0.20\text{mm} \times 0.38\text{mm}$ ，可实现测温范围为 $423 \sim 1703\text{K}$ ，且测温精度为 $\pm 3.3\text{K}$ 。晶体测温在测试方法上和示温漆测温具有一定的相似性，例如，晶体测温与示温漆测温无须测量引线和测量窗口；可以用于测量被测对象表面温度分布；只能测量被测对象表面所经历的最高温度，适合在发动机测试阶段使用，无法进行在线监测。晶体测温方法与示温漆测温的最重要区别在于采用XRD检测方法对晶体的辐照缺陷进行精确表征，极大地提高了温度测量精度，然而测温晶体的安装往往需要侵入被测对象内部或黏附在被测对象表面（如图2所示），对被测对象的结构强度或表面气流具有一定影响。

光纤高温传感器

光纤高温传感器利用光纤，构成基于光学原理的测量结构，实现温度测量。光纤本身既构成传感器的敏感元件，也起到传输信号光的作用。在待测温度超过 1273K 的高温时，传统的石英光纤材质已无法满足要求，需要更换熔点为 2323K

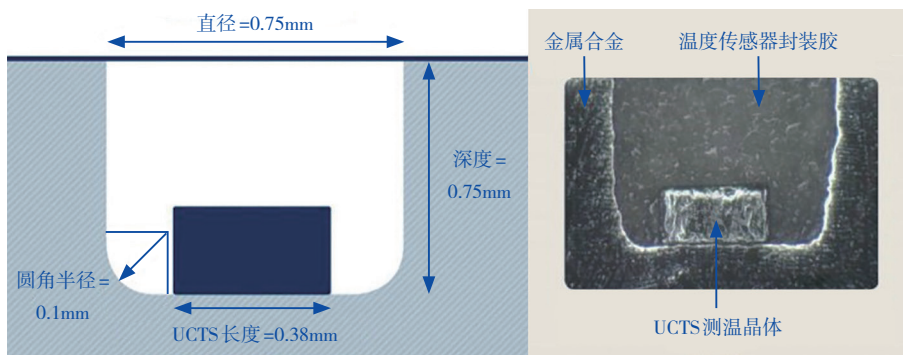


图2 碳化硅晶体测温的安装示意图和实际剖面图

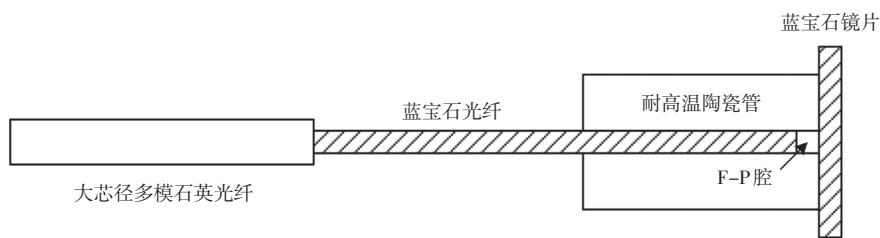


图3 基于蓝宝石光纤的F-P干涉型高温传感器结构图

的蓝宝石光纤，构成蓝宝石光纤高温传感器。根据传感原理的不同，蓝宝石光纤高温传感器可以分为蓝宝石光纤法珀（F-P）干涉传感器、蓝宝石光纤光栅传感器以及蓝宝石光纤辐射式高温传感器，其中辐射式高温传感器中蓝宝石光纤主要起传输信号光的作用，本身不构成敏感元件，因此可将其归为辐射式测温方法。

蓝宝石光纤F-P干涉高温传感器利用蓝宝石光纤和蓝宝石镜片构建了F-P腔（如图3所示），F-P腔作为高温传感器的敏感元件，在待测温度发生变化时，其长度会受到陶瓷管热膨胀效应的影响而发生变化，进而影响输出的干涉光谱，对输出的干涉光谱进行信号解调即可得到待测温度。美国弗吉尼亚理工大学的Z.Y. Huang基于该结构实现了最高1873K的高温传感，精度达到全量程误差小于 $\pm 0.2\%$ ^[5]。

蓝宝石光纤光栅高温传感器利用飞秒激光器对光纤进行周期性折射率调制（如图4所示），此时光纤内正向传输模与反射模会发生干涉并形成尖锐的干涉峰。当外界环境温度发生变化时，蓝宝石光纤光栅的干涉峰将随之发生平移，利用预先标定的温度对应关系对干涉峰波长进行解算即可实现高温传感。加拿大国家通信研究中心的D. Grobnic

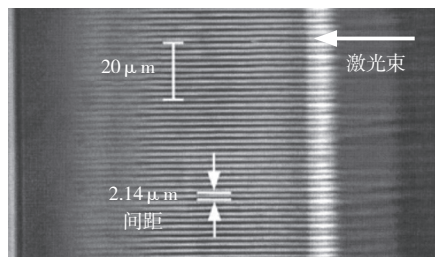


图4 基于蓝宝石光纤的布拉格光栅显微图

基于该结构制作的蓝宝石光纤光栅高温传感器^[6]，最高可测量温度达到1773K，并在试验中没有观察到任何光栅衰减现象。德国莱布尼茨光子技术研究所的T. Habisreuther等人制备的蓝宝石光纤光栅高温传感器，最高可测量温度达到2173K，分辨率为 $\pm 2\text{K}$ ^[7]。

光纤高温传感器具有体积小、精度高、耐腐蚀、抗电磁干扰、可进行实时温度监测等优点，在性能

参数上具有替代传统热电偶高温传感器的潜力，然而光纤高温传感作为新兴的传感技术，大部分技术仍停留在实验室阶段，在具体的工业应用中仍存在技术成熟度较低的问题。因此，为了实现光纤高温传感器在航空发动机中的长期应用，需要对封装结构、安装方式、布线方式和解调设备做进一步探索。

非接触式高温传感器

辐射式高温传感器是最典型也是最常用的非接触式温度传感器，其传感原理基于黑体辐射定律，即一切高于绝对零度的物体都会向周围空间辐射能量，辐射强度与黑体的绝对温度和辐射波长有关，因此通过收集被测对象的热辐射信号，并已知被测对象的发射率，即可计算出待测温度（如图5所示）。该方法理论上可以测量任意高的温度，但由于标定用黑体腔的温度限制，无法准确测量3273K以上的温度。

根据对被测对象辐射光谱的利用方式，可以将辐射式高温传感器分为亮度（单色）高温计、比色（双色）高温计和多波长高温计等^[8]。亮度高

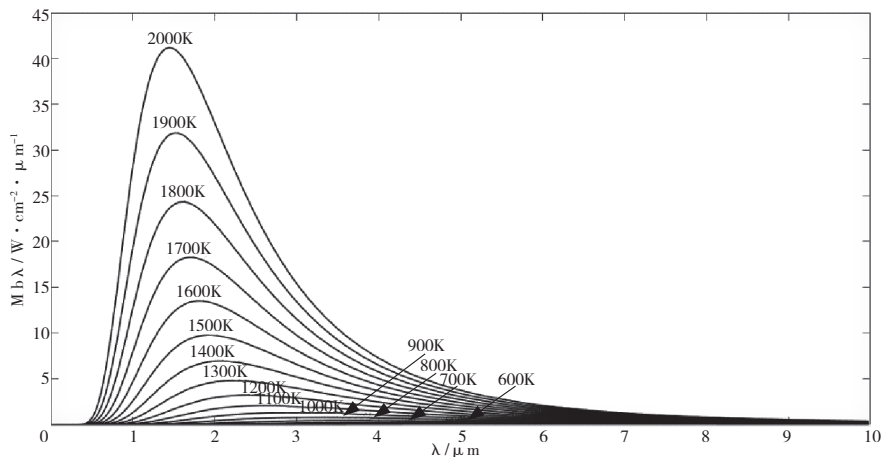


图5 黑体辐射光谱

温计是选用单一波长（一般为0.656 μm ）进行被测对象的温度计算，是发展历史最长的辐射式高温传感器，至今仍是辐射测温基准，也是标准温度计唯一采用的测温方法。但在工程实际测量中，被测对象的发射率往往难以准确测量，进而影响亮度高温计的测量精度。

为了减小被测对象发射率对测量结果的影响，比色高温计被提出并得到了广泛关注。比色高温计利用两个相邻波长辐射强度的比值与温度的对应关系计算待测温度。由于两相邻波长的发射率可以近似认为相等，计算相邻波长辐射强度的比值可以消除发射率对测量结果的影响，因此比色高温计具有更高的测温精度，但在工程实际中，测量两个相邻波长的辐射强度对光学系统的要求较高。

多波长高温计是通过同时选取多个波长，测量多通道的辐射值，建立辐射强度与波长的数学模型，最终计算得到被测对象的发射率和实际温度。多波长高温计具有发射率和温度测量精度高的优点，同时系统结构也更加复杂，是当前辐射式高温传感器研究的热点。

传统的辐射式高温传感器在工程应用中往往需要较大的空间来容纳光路结构，不利于安装在航空发动机中进行温度实时监测。光纤技术的发展为解决这一问题提出了新的解决方案，一种基于蓝宝石光纤的辐射式高温传感器一经提出便得到了广泛关注。该传感器是在蓝宝石光纤的一端溅射金属薄膜或安装陶瓷空腔形成黑体腔，黑体腔与被测对象达到热平衡后向蓝宝石光纤中传播热辐射，在蓝宝石光纤的另

一端接收热辐射并进行解算得到被测对象的真实温度。蓝宝石光纤辐射式高温传感器虽然是基于辐射式传感原理构建的，然而根据温度测量方式应该归类为接触式温度传感器，这一结构有效地避免了热辐射暴露在燃气中而受到散射、吸收等效应的衰减作用，提高了温度测量的稳定性，但同时这也使传感器的最大测量温度受到黑体腔和蓝宝石光纤耐高温能力的限制。

结束语

通过上述分析可知，热电偶温度传感器具有测温精度高、技术发展成熟、安装方式多样的优点，其缺点在于难以在超过1873K的环境中长期工作。示温漆相比热电偶具有不破坏被测表面形貌、不影响表面气流状态、无须测量引线和窗口、可以进行温度分布测量的优势，但测温精度低、无法进行实时监测的缺陷导致其只能应用在发动机测试过程中。晶体高温传感器与示温漆具有相似的测温特点，二者均不需要测量引线和窗口，均可以测量表面温度分布，并且晶体高温传感器相比示温漆进一步提高了测温精度，然而其安装方式往往会对被测对象表面形貌或表面气流状态造成影响。光纤高温传感器作为新兴传感器，具有体积小、精度高、耐腐蚀、抗电磁干扰、可进行实时温度监测的优点，并且在结合蓝宝石光纤后将测温上限提高到2173K，但在航空发动机中的应用还处于探索阶段，包括安装方式、布线方式、解调方式等工程应用环节仍需要优化调整。辐射式高温传感器作为最典型和最常用的非接触式传感器，具有测温上限高、

测温精度高、无须与被测表面接触的优点，结合蓝宝石光纤后可以进一步降低测温环境对热辐射的衰减干扰。以上几种高温传感器在涡轮前温度和涡轮叶片表面温度分布测量中都具有极大发展潜力，可以为未来提升航空发动机的性能与可靠性做出贡献。

航空动力

（杨博闻，中国航发研究院，助理工程师，主要从事发动机健康管理与控制技术研究）

参考文献

- [1] 黄春峰, 蒋明夫, 毛茂华. 国外航空发动机薄膜热电偶技术研究[J]. 航空发动机, 2011, 37(6).
- [2] 周峰, 杨灿, 孙力, 等. 示温漆测温技术温度判读方法研究[J]. 数字通信世界, 2015.
- [3] 李杨, 陈洪敏, 熊庆荣. 不可逆示温涂料的发展及应用[J]. 中国涂料, 2010, 25(5).
- [4] 陈敬. 中子辐照6H-SiC晶体的电学性能及其退火研究[D]. 天津: 天津大学, 2013.
- [5] ZHU Y Z, HUANG Z Y, SHEN F B, et al. Sapphire-fiber-based white-light interferometric sensor for high-temperature measurements[J]. Optics Letters, 2005, 30(7): 711-713.
- [6] GROBNIC D, MIHAILOV S J, SMELSER C W, et al. Sapphire fiber Bragg grating sensor made using femtosecond laser radiation for ultrahigh temperature applications[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(11): 2505-2507.
- [7] HABISREUTHER T, ELSMANN T, PAN Z, et al. Sapphire fiber Bragg gratings for high temperature and dynamic temperature diagnostics[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 91: 860-865.
- [8] 戴景民. 辐射测温的发展现状与展望[J]. 自动化技术与应用, 2004, 23(3).