

结构-功能一体化热电涂层测温技术

Thermoelectric Coating Temperature Measurement Technique of Integrated Structure-Function

徐毅 刘先富 李杨 赵帅 程新琦 彭晋 程亮 郭光辉 / 中国航发涡轮院

热电涂层测温技术是一种采用喷涂工艺将热敏材料与热端部件一体化集成，实现热端部件表面温度实时监控与精确测量的新型测温技术。该技术已成功应用于高温、高转速、复杂的气动激振力及大离心载荷下的多型发动机全工况涡轮叶片表面温度测量，为发动机涡轮叶片热分析和结构改进设计提供试验数据支撑。

涡轮叶片在复杂的气动、热力及离心负荷的恶劣环境下，其工作的安全性和可靠性受到严重影响，研制过程中容易出现局部烧蚀、断裂等现象。通过测量涡轮叶片表面温度，能够知悉叶片热应力水平，优化冷却结构设计，延长叶片寿命。但是，测量涡轮叶片的温度也面临高温、高压、振动、高速旋转等恶劣环境。涡轮叶片常规测温方法主要依赖“埋入式”测量技术，在叶片表面开槽，将铠装热电偶埋入沟槽内进行测量，该方法存在破坏试验件、干扰流场、热障涂层及薄壁结构无法埋设等缺点。而其他测温技术也存在相应不足，例如，示温漆只能显示试验过程的最高温度，红外辐射测温由于发射率难以准确获取导致测量精度不高。中国航发涡轮院的创新团队针对发动机研制过程中对温度测量的迫切需求及现有技术的局限性，提出结构-功能一体化热电涂层测温技术，即通过热喷涂工艺，将温度敏感材料以涂层的形式沉积在涡轮叶片表面，构建由绝缘层、温感功能层及防护层组成的“渐变缓冲

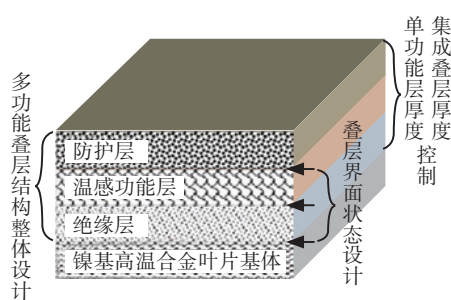


图1 热电涂层结构组成示意图

层”结构（见图1），制备结构-功能一体化热电涂层温度传感器。

总体方案

结构-功能一体化热电涂层测温技术分为集成敏感涂层沉积、制造与标定、应用验证等三个方面。总体方案如图2所示。

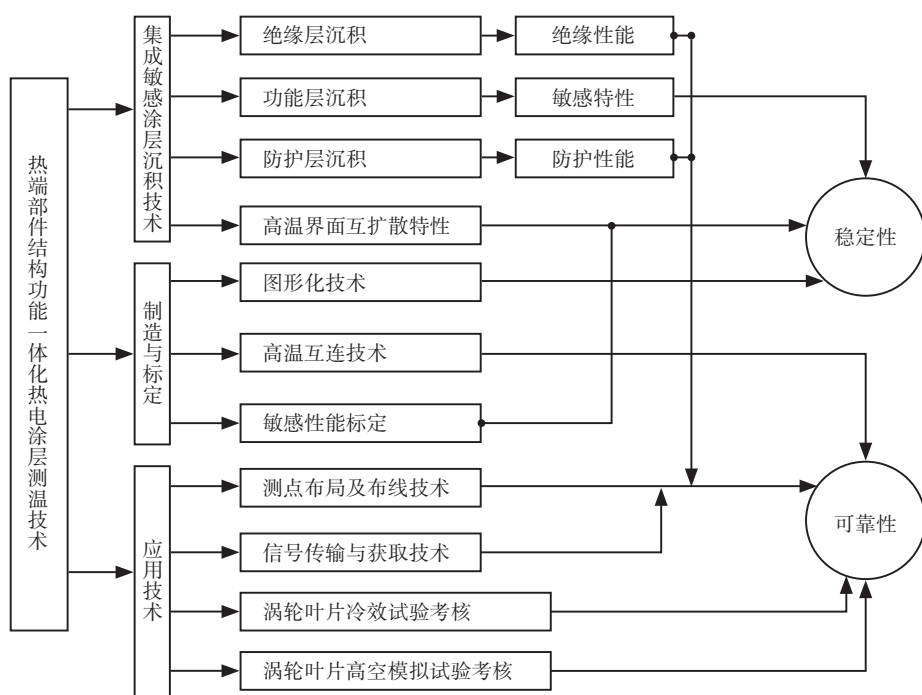


图2 热电涂层测温技术方案

集成敏感涂层沉积技术

集成敏感涂层沉积技术包括试验件表面预处理、绝缘层制备、功能层沉积、防护层高温防护及制备、多涂层厚度均匀性控制和界面高温互扩散特性研究等几个方面。

试验件表面预处理

为了提高热电涂层附着性能和存活率，经过多轮试制及验证，确定了由多种方法相结合的预处理方法，主要分为喷砂处理和表面清洗两部分。

喷砂处理是选用主要成分为 Al_2O_3 的白刚玉，颗粒度为20~60目，按SDZ01.1的规范执行，处理后基底表面应达到GB8923规定Sa级要求。

表面清洗是首先依次使用丙酮、无水乙醇和去离子水，进行10 min超声清洗；然后使用热风枪吹干试验件表面；最后使用吹净枪对试验件清洁处理，吹净残留砂粒。

绝缘层制备技术

绝缘层是提供温感材料与高温合金基片之间电学隔离的涂层，其绝缘性能及高温性能直接影响到热电涂层器件的工作状态及结构强度。通过多种常见绝缘材料物理参数对

比分析，确定了以氧化铝作为最佳绝缘材料。根据使用要求，确定了电子束蒸发法、空气喷涂及火焰喷涂等制备方法。为确定最优制备方法，进行了模拟加温试验考核、绝缘性能测试、样品高温微观形貌检测性能考核试验。结果表明：用火焰喷涂制备的涂层经过不同温度循环测试后，表面形貌无明显变化，未出现明显缺陷或裂纹，附着牢靠、高温下绝缘电阻能满足试验需求。

功能层沉积工艺

为满足发动机测温范围的试验要求，选择NiCr/NiSi作为温感涂层材料。该类合金材料在温度范围内组织结构稳定、无相变，电阻温度系数稳定，重复性好。根据技术方案，确定了两种功能层沉积技术方案。

一是丝材型，采用平行焊接工艺将直径为 $100\mu m$ 的I级标准热电偶裸丝测量端焊接在试验件表面测点处；其后端用宽度为窄带状的高温胶带固定，使其紧密贴合；采用火焰（或等离子）进行喷涂固定，厚度为 $120\sim 150\mu m$ （见图3）。

二是涂层型，为减小涂层总厚度，增强可靠性，利用热喷涂技术直接沉积温感材料于绝缘层表面，

使温感材料以涂层化形式沉积。通过研究喷涂系统给进速率、气压、温度等工艺条件对涂层成分、微观结构、电阻率、塞贝克（Seebeck）系数、电阻温度系数等性能的影响规律，优化制备工艺参数，制备样品如图4所示。

防护层高温防护机制及制备技术

高温防护层直接影响高温高速强氧化气流环境下热电涂层的工作可靠性和寿命。采用与绝缘层相同的材料，可有效避免不同涂层间因材料热膨胀系数不同而导致的涂层开裂，实现与功能层之间的良好界面匹配，提高附着力，防护层制备完成情况如图5所示。

多涂层厚度均匀性控制及界面高温互扩散特性

在涂层制备过程中，采用膜厚仪对涂层厚度进行实时监控，分析多涂层界面结构特征，以及界面高温互扩散行为与涂层功能特性的关系。通过调控界面状态提高异质材料叠层间结合强度，形成热电涂层异质材料叠层间热/力最优匹配。掌握工艺条件对多涂层集成后的界面结构、附着强度、绝缘特性、敏感特性和防护性能的影响规律，在工艺和多个涂层综合



图3 标准微细偶丝型样品



图4 涂层型样品

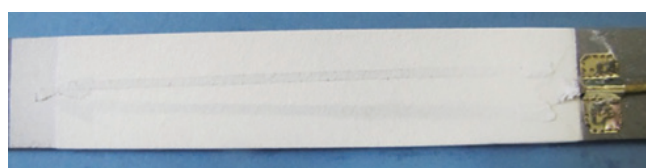


图5 防护层制备完成图

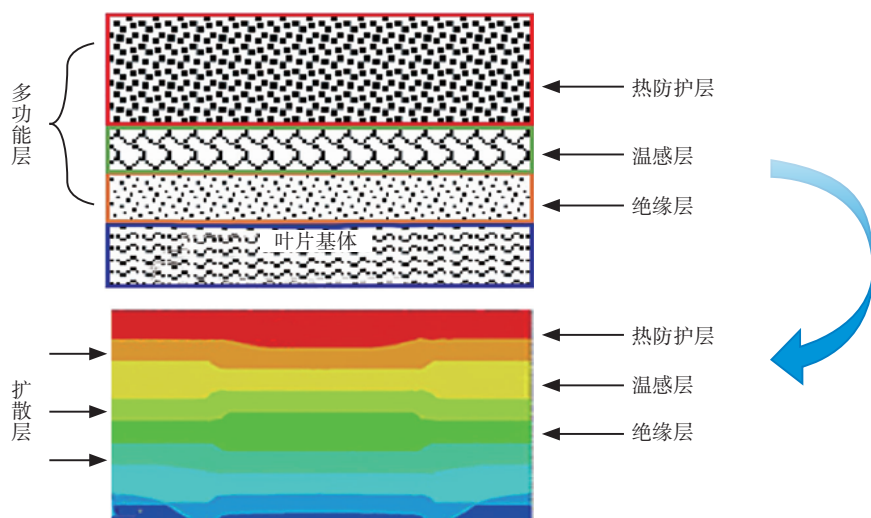


图6 多涂层界面高温互扩散特性研究

性能间取得平衡（见图6）。

热电涂层制造技术及性能标定

热电涂层图形化技术研究

采用金属掩模图形化工艺对热电涂层进行图形化，并采用激光修调方法进行高精度尺寸和阻值控制，在叶片表面制备出与叶片同形的热电涂层图形，根据测试部件的不同，设计了非碰底型和碰底型两种图形化结构，其中非碰底型适用于热障涂层等非金属材料，碰底型适用于高温合金材料。

热电涂层与信号引出线的连接技术研究

采用平行微隙焊接工艺完成涂层与后端高温导线的连接，利用热喷涂氧化铝将外接高温引线和热电涂层焊盘牢固连接，实现温感信号可靠引出。先制备氧化物缓冲层，在其上再制备信号引出线，既有利于改善绝缘性，也可提高附着强度，改善耐冲刷能力。

热电涂层敏感性能标定

采用静态标定法考核热电涂层

热电性能和试验温度的关系，研究数据精度修正方法，获得其Seebeck系数、灵敏度系数等性能参数。

丝材型热电涂层由于采用I级标准热电偶丝，经静态标定，满足I级热电偶允差等级。涂层型采用热喷涂工艺制备，由于在制备中温感材料成分会在高温中部分氧化导致成分偏析，经对比标定发现，Seebeck系数低于标准铠装热电偶，但重复性较好。通过3次样条插值拟合，修正后测量误差不超过1%。

涂层影响因素分析

热电涂层总厚度不超过 $150\mu\text{m}$ ，为了评估涂层结构对测试结果的影响，基于瞬态热/流耦合理论，采用有限元/边界元方法，对不同类型的直板叶片进行瞬态热冲击数值仿真，针对涂层叶片和光滑叶片在同样边界条件下展开测点温度变化研究，分析气动、涂层及叶片结构对测点温度的影响。由分析结果可知，当进行瞬态测试时，热电涂层测量结果会略低于实际叶片表面温度。当试验件达到热平衡后没有差别，不同叶片测量结果相同。

试验验证

所研制的热电涂层通过大量的试验考核，包括耐高温绝缘材料试验、涂覆性能试验、模拟加温试验、高速轮盘旋转试验、高温燃气冲击试验等，达到以下技术指标：测温范围为 $25\sim 1200\text{℃}$ ；测量不确定度为 $\pm 1\%\text{FS}$ ；存活率 $\geq 90\%$ ；适用叶片表面 $Ra \leq 10\mu\text{m}$ ；热电特性一致性为分散度 $\leq 10\%$ ；可靠性为当 1200℃ 燃气冲击20次以上时不脱落。

进而将热电涂层测试技术应用于涡轮叶片冷效试验及发动机高空模拟试验，成功获取了涡轮转子叶片叶盆、前缘及伸根的表面全工况温度数据，为排故工作及部件改进设计提供了有效数据。

结束语

创新团队提出的热电涂层测温技术，通过将温感材料与被测试件的一体化集成，实现了航空发动机热端部件表面的在线精确测量。该技术的成功应用可为发动机涡轮叶片表面温度评估、发动机叶片热分析和结构改进设计提供强大的试验数据支撑。该技术不仅可应用于航空发动机的涡轮叶片、热障涂层、燃烧室火焰筒、燃烧室冷却试验件、燃烧室机匣、涡轮机匣、涡轮盘表面温度精确测量，还可以应用于其他军民民用高温、高速旋转件和薄壁件，复杂构件及铠装热电偶不易安装位置的表面温度测试，具有极大的工程应用价值，这一技术的推广使用将产生良好的经济效益。

航空动力

（徐毅，中国航发涡轮院，工程师，主要从事航空发动机特种测试技术研究）