

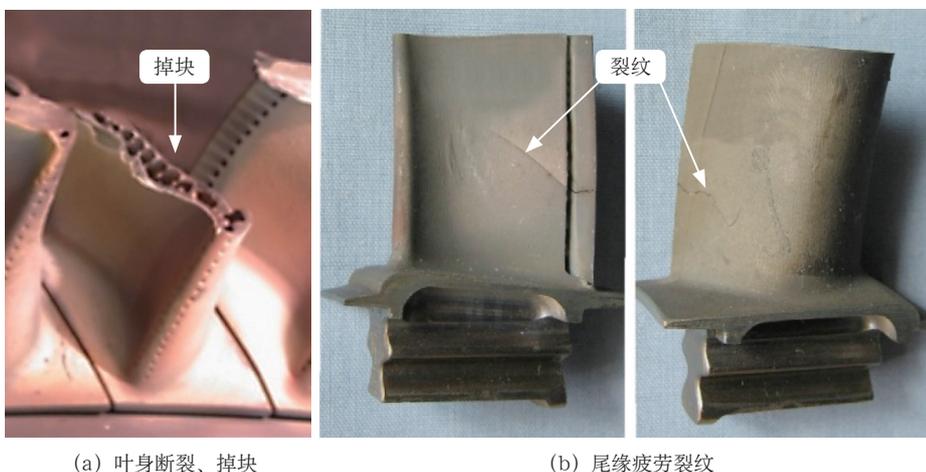
涡轮叶片应变 / 温度非接触同步测试技术分析

Non-Contact Synchronous Testing Technology for Turbine Blade Strain / Temperature

■ 荆甫雷 张常贤 王希影 贾真 唐诗白 刘金龙 吴长波 黄劲东 / 中国航发研究院
潘兵 / 北京航空航天大学 符泰然 / 清华大学

涡轮叶片应变、温度非接触测试技术克服了传统测试的干扰流场、破坏被测件等缺点，可以为热端部件结构设计及强度寿命评估提供更为可靠的技术支撑。

航空发动机涡轮叶片服役时承受着复杂交变的多场耦合载荷和环境作用，在强时变、大梯度的温度场与应力场耦合作用下极易产生疲劳裂纹、掉块等故障（如图1所示），造成整机/部件性能恶化，危及发动机的安全性和可靠性。对涡轮叶片应变场、温度场及其变化历程的精准刻画是认识材料损伤演化过程和结构寿命评估的基础。涡轮转子叶片除承受离心力、气动力、振动等交变机械载荷外，还有外部高温燃气和内部高压冷气共同作用产生的热应力，热应力与机械应力耦合造成叶片疲劳损伤累积乃至破坏（如图2所示）。目前传统的单点、单参数或峰值测量无法描述服役过程中叶片应变、温度场稳态和瞬态分布及二者的耦合作用，而基于光学原理的非接触测试技术则克服了接触式测试干扰流场、破坏被测件等缺点，具有很高的研究价值。



(a) 叶身断裂、掉块 (b) 尾缘疲劳裂纹

图1 涡轮叶片失效类型

应变非接触测量技术现状 高温环境下应变非接触测量技术概况

目前用于材料表面全场高温变形的非接触式光学测量方法主要有云纹干涉 (moire interferometry, MI)、电

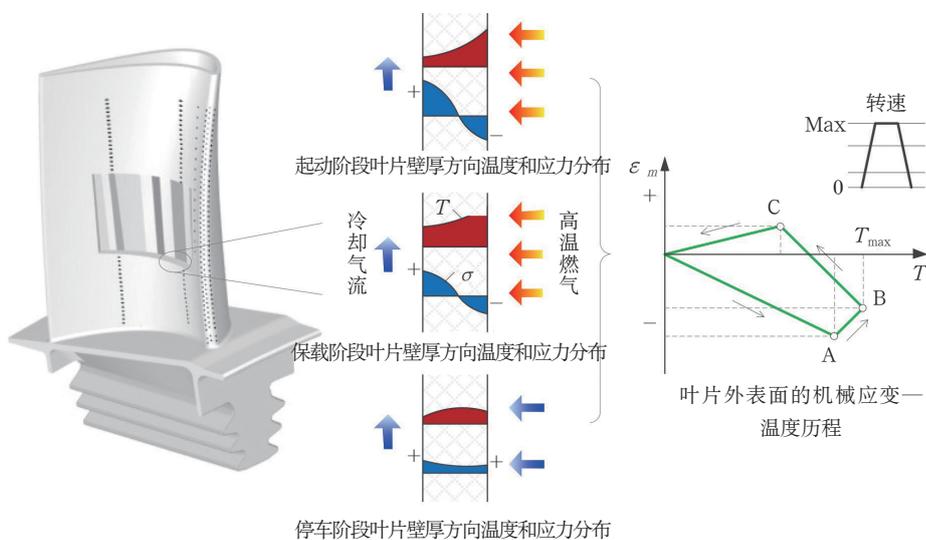


图2 发动机I类循环涡轮叶片上的热-机械耦合载荷示意

子散斑干涉 (electronic speckle pattern interferometry, ESPI) 和数字图像相关 (digital image correlation, DIC) 等方法。基于相干光波干涉原理的云纹和电子散斑干涉法的位移测量灵敏度非常高 (可达波长量级), 具有测量结果直观可视的优点, 缺点是需激光作为照明光源, 测量光路较复杂, 对被测试样表面和测量环境要求苛刻, 只能在实验室暗室中的光学隔振平台上进行, 很难在真实试验现场测量高温变形。数字图像相关方法更适合全场高温变形测量, 优势包括: 仅需一个或两个数字相机, 光路、试验设备和试验过程简单; 采用白光或单色光照明, 对测量环境和隔振要求较低, 可实现现场测量; 时间和空间分辨率可根据测试对象需求灵活调整。

数字图像相关方法原理

数字图像相关方法是基于数字图像处理 and 计算机视觉的非接触式、全场形貌变形光学测量方法, 测量过程中首先获取不同载荷下被测物体表面的数字图像, 然后基于区域灰度互相关计算的匹配算法进行图像分析, 定量提取材料、部件、结构或生物组织在载荷作用下的全场位移和应变信息。DIC 技术测量试验件表面变形主要包括三个步骤: 散斑制备, 被测试件表面必须有随机变化的灰度分布作为变形信息的载体; 数字图像采集, 通过一个相机 (2D-DIC) 或两个同步相机 (3D-DIC), 采集不同状态下被测试件表面的数字图像; 位移场和应变场的计算。

2D-DIC 方法在高温变形测量应用中的发展

1996 年, 美国南卡罗来纳大学的萨顿 (Sutton) 用 DIC 技术获得了

铬镍铁超合金材料 650°C 下的热膨胀系数和弹性模量, 发现 DIC 方法测量材料高温变形面临两个挑战: 热物体表面的热辐射将会导致相机采集的被测试样表面数字图像的亮度加强、对比度明显降低 (如图 3 所示), 产生所谓的“退相关”效应; 高温加热导致成像光路中的空气温度升高, 引起空气折射率变化和对流, 即所谓的“热雾” (heat haze), 这种热气流扰动会带来几百个甚至几千个微应变的测量误差。

针对以上挑战, 萨顿采用强光源或带通滤波片阻隔红外波段的热辐射, 在高温环境箱内安装风扇以使炉内温度保持均匀, 减少“热雾”影响。之后发现观察窗口用光学玻璃的质量对图像也有影响, 建议用光学级石英玻璃。此外, 散斑漆颗粒随着被测试样表面温度的升高发生氧化或烧蚀 (如图 4 所示), 也会

导致数据失效。

2009 年, 格兰特 (Grant) 等研究人员采用蓝光光源和窄带通滤波片来克服高温热辐射, 在 800°C 的环境下测量了高温合金 RR1000 的杨氏模量和热膨胀系数。超过 800°C 时, 样品表面被快速氧化导致散斑变化, 测量失败, 建议用真空环境可保持不被氧化表面散斑图案, 以减少“热雾”带来的误差。近年来, 北京航空航天大学 的潘兵、美国的佐克 (Zok)、法国的勒普莱 (Leplay) 等用蓝光光源和窄带通滤波片, 即蓝光 DIC 与高温炉、辐射、激光和感应加热等设备相结合, 实现了最高达 1550°C 的高温变形测量。为克服热辐射影响, 有研究者搭建了基于紫外成像的高温变形系统, 测量了 1400°C 下氧化铝陶瓷的二维全场变形。帕德博恩大学的托马斯 (Thomas) 等人用 2D-DIC 技术对第三代铝钛合

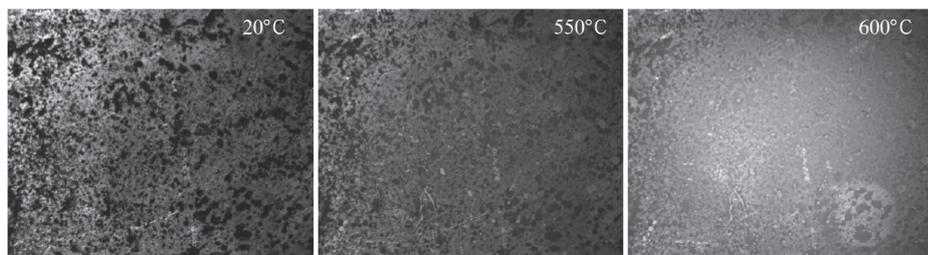


图3 “图像退相关”现象

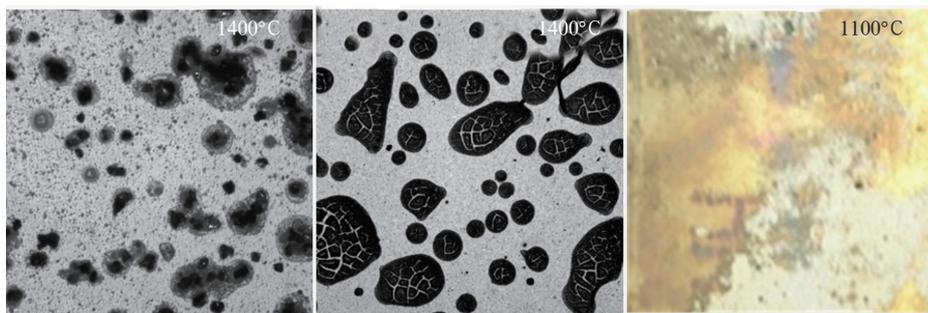


图4 高温下散斑被氧化, 与基底热膨胀欠匹配产生裂纹不稳定现象

金 700℃ 有氧环境下疲劳诱导的损伤积累进行了演化监测，成功地探测到裂纹萌生点。

3D-DIC 方法在高温变形测量应用中的发展

2012 年，有研究者发展了基于单色光照明和光学带通滤波器成像的新型主动成像 3D-DIC 系统，克服了高温热辐射引起的“图像退相关”效应，实现了铬镍奥氏体不锈钢板材 1200℃ 下的全场热变形测量。但基于同步双相机的测试系统结构复杂、尺寸大，以及客观存在的几何差异、光强差异，因此双相机同步触发装置和技术十分复杂，而发展一种基于单高速相机的 3D-DIC 方法成为较为可行的解决途径。

近年来单相机测量系统研究工作已见文献，例如，基于条纹投影和 2D-DIC 的三维位移测量方法；利用投影仪将不同颜色的散斑和条纹同时投影到物体表面，然后从采集到的彩色图像中分离出散斑图和条纹图，最后用 2D-DIC 和条纹分析方法分别处理散斑图像和条纹图像以获得物体表面的面内位移和离面位移；基于 2D-DIC 和投影散斑的三维变形测量方法，通过投影和喷涂技术分别在试样表面上投影和制作两

种不同颜色的散斑，然后通过分离彩色图像获得不同通道子图像用于面内和离面位移的计算。

以上几种方法适用范围较小、数据处理较为复杂，在实际测量中并不普遍。目前常见的单相机三维变形测量技术主要包括基于光栅衍射、棱镜折射以及平面镜反射的单相机三维数字图像相关方法，构建虚拟双目立体视觉系统来实现三维变形测量。即在传统 2D-DIC 系统中的相机和被测物体之间放置一个光学元件（如衍射光栅、双棱镜和平面镜组，这三种方法优缺点见表 1），原有的成像光路被分成两条光路。物体表面发出的光线通过这两条不同光路到达相机靶面，形成两个互不重叠的子图像。通过分析这两个子图像获得物体表面的三维形貌、位移和应变信息。

温度非接触测量技术现状

非接触辐射测温技术主要分为被动式和主动式两大类：基于目标自发热辐射强度的被动式辐射测温技术；通过外部光源作用下的目标激发光谱主动式辐射测温技术。

辐射测温技术的方法原理

被动式辐射测温技术发展初期

为单光谱（单色测温法）技术，通过单个光谱（波段或波长）的热辐射强度测量，获得目标温度。双光谱（双色/比色测温法）辐射测温技术主要针对目标表面发射率变化或未知，或测量光路中存在灰尘、部分遮挡等测量环境，具有很强的目标与环境适应性。比色测温采用信号比值的处理方式，测量灵敏度要小于单色测温的灵敏度，此外，随着测量光谱扩展至长波红外时，比色测温的灵敏度也会显著降低，因此比色测温技术多采用 0.7~2.5 μm 近红外光谱，适用于 300℃ 以上的中高温测量。多光谱辐射测温技术通过多个光谱下的辐射强度测量，结合特定的光谱发射率函数，构建多波长辐射测量方程，实现温度测量。多波长的优化选择可避免辐射测量中的干扰谱线，具有更好的适应性。

主动式辐射测温技术以荧光测温技术为主，优点在于荧光信号与温度强相关，不依赖于目标表面的发射率以及绝对辐射强度，不受相关环境因素干扰，一定程度上避免了热辐射光学测温的局限性问题，测温范围宽、重复性好、精度极高，不干扰被测表面温度场，具有灵敏的发射光谱、空间分辨率和高效发光特性，已成为新型传感器技术的重要手段。

辐射测温技术在应用中的发展

对于主动式辐射测温技术，河北工程大学、中北大学、上海交通大学等国内科研机构在中低温量程的荧光测温技术方面开展了相关研究工作，尚未实现涡轮叶片上的工程应用。罗罗公司研制了采用 266nm 高功率脉冲激光器测量涡轮

表 1 基于平面镜反射、双棱镜折射和光栅衍射的立体视觉技术优缺点

单相机立体成像技术	优点	缺点
基于平面镜反射	<ul style="list-style-type: none"> ● 视场调节灵活 ● 图像畸变 ● 传统 3D-DIC 方法可适用 	<ul style="list-style-type: none"> ● 系统不够紧凑
基于双棱镜折射	<ul style="list-style-type: none"> ● 系统紧凑 	<ul style="list-style-type: none"> ● 图像畸变较大 ● 计算较为复杂 ● 视场调节不便
基于光栅衍射	<ul style="list-style-type: none"> ● 能够测量较小的物体 ● 简单标定 	<ul style="list-style-type: none"> ● 测量范围有限 ● 对光强要求较高

叶片表面温度的荧光测温系统。普惠公司在发动机试验台上对荧光测温技术进行了验证。美国橡树岭国家实验室和洛斯阿拉莫斯国家实验室联合研制了基于光纤传输的荧光测温系统，实现了燃烧环境下1200℃静子叶片温度测量。艾利逊公司研制了基于266nm激光激励下的Y2O3:Eu荧光衰减寿命的涡轮叶片光纤传感测温系统，温度测量范围200~1000℃。美国国家航空航天局(NASA)格伦研究中心开展了GAP:Cr、GdAlO3:Cr、YAG:Tm等多种类荧光的衰减寿命测温试验研究，基于355nm激光激发YAG:Tm荧光所产生的365nm和456nm荧光发射光谱测温上限达到1400℃。英国帝国理工大学开展了高温荧光材料体系应用于涡轮叶片高温测量性能研究。

被动式辐射测温技术可分为逐点和全场温度测量。逐点温度测量采用单像元的光电或热电传感器，适用于动态温度的在线监测，在高速/超高速辐射测温中有很好的应用优势。比色与多光谱测温一般为点目标辐射测量，适用于航空发动机、燃气轮机、高速飞行器等的高温部件测温。全场温度测量一般采用红外热像仪，是一种面成像辐射测温仪，主要分为制冷/非制冷、中波/长波、高/低分辨率、显微/常规成像等各种规格。对于曲面目标或者三维目标温度场测量，面成像测温仪需考虑方向发射率的辐射校准以及空间投影的几何校准。

总之，具有多光谱与场测量功能的辐射测温仪是辐射测温技术的发展方向，兼顾了光谱与空间测量需求，具有比色/多光谱测温仪、面

成像测温仪的优点，可实现未知发射率目标的温度场测量。

应变/温度同步测试工程实现的技术挑战

实现应变场和温度场的同步测试包括获取涡轮叶片应变、温度分布及变化历程和反映涡轮叶片热应力与机械应力的耦合作用等目标，达成上述目标面临以下几个方面的技术挑战。

同步技术

同步测试技术是获得涡轮叶片表面温度场、应力场及其变化历程的关键，也是开展进一步仿真验证和寿命评估的基础。

一是散斑漆对温度场测量的影响分析和修正技术。应变场测量时在被测目标上喷涂的散斑漆改变了目标本身的表面状态，影响了发射率和辐射测温结果。不同类型、不同颜色散斑漆的发射率不同，不同的温度、工作环境和烧蚀状态下也有一定差异，必须分析散斑漆对温度场测量的影响，建立修正方法对测量结果修正。

二是发动机涡轮叶片的机械应变解耦技术。叶片工作时承受着热、离心和气动载荷的耦合作用。首先通过计算将热应变从总应变场中分离，然后针对叶片由离心力及气动应力产生的应变试验测量的解耦问题开展叶片机械应变试验测量解耦研究，通过不确定度理论去除应变测量结果中由测量误差引入的抖动，基于修正后的应变测量结果提出离心和气动应变的解耦模型。

环境适应性

高温环境会造成散斑热氧化，致使散斑漆的原始灰度或形貌发生

变化，制备抗高温氧化且有较强稳定性的高温散斑漆是一个挑战。为保证高质量试验图像获取，实验过程中散斑颗粒应稳定附着在涡轮叶片表面，不能发生滑动或脱落，获取高强度黏结力的高温散斑材料是一个巨大挑战。

数据实时处理

应力和温度高速相机用于测试数据的全采样工况，采样频率高达20000帧/s，数据量可达80GB/s，连续采样时间5min，总数据量可达24TB，数据规模对数据存储和后续计算压力过大；而应变计算模块单机处理能力只有10000帧/h，对数据进行解算的时长难于满足试验分析要求。因此，降低存储数据量和提升应力采样的解算速率是非接触测量过程的一个难点问题。

结束语

综上所述，为实现在涡轮叶片上的工程应用，应针对非接触应变/温度场同步测试技术开展特征模拟件实验室工况和真实构件典型工况的逐级、多层次、充分、有效的验证。根据涡轮叶片的气动外形，设计专用试验装置和专用测试窗口，结合接触式测试和仿真结果对比分析，验证系统对强时变、大梯度应力/温度场的测试精度，以及高温高速燃气干扰、强背景辐射和目标叶片高速旋转、振动等发动机工作条件的适应性和有效性，对热端部件多场耦合仿真分析方法进行多层次验证/修正，为热端部件结构设计与强度寿命评估提供支撑。

航空动力

(荆甫雷，中国航发研究院，高级工程师，主要从事航空发动机热端部件设计工作)