

CMC 拉伸过程中导热系数演化原位测试技术方案

编制单位：西安鸢豚试验科技

日期：2026年6月25日

一、项目概述

为满足陶瓷基复合材料（CMC）在复杂服役载荷下热—力耦合性能评估需求，本方案提出“拉伸加载—损伤监测—热扩散率测量—导热系数反演—温度场分析”一体化技术路线。在单轴拉伸过程中，实时或分级获取材料有效热扩散率变化，并结合密度与比热反演有效导热系数，建立损伤演化与热物性退化之间的定量关系，进而分析损伤对温度场分布、温升速率、温度梯度及局部热集中的影响，为 CMC 热结构设计、寿命评估及试验验证提供依据。

本方案重点解决“拉伸过程引入的损伤如何改变材料热传输能力”这一问题。测试对象不宜简单理解为材料本征导热系数，而应定义为损伤状态下的有效导热系数或表观导热系数；其数值反映基体裂纹、界面脱粘、纤维断裂、孔隙扩展及热流路径变化后的综合传热能力。

二、方案目标

1. 建立 CMC 单轴拉伸过程中导热性能原位测试方法，实现热扩散率在线或分级测量。
2. 识别基体开裂、界面脱粘、纤维断裂及孔隙扩展等损伤对热传导能力的影响规律，形成损伤—导热退化关系。
3. 建立面向工程分析的导热系数退化模型，并将其输入温度场有限元分析，实现试验—模型闭环验证。
4. 形成可复制的试验系统配置建议、试样与夹具要求、测试流程和数据处理规范。
5. 输出适用于工程评估的参数数据库、误差分析说明和验收评价依据。

三、适用范围与技术边界

本方案适用于连续纤维增强陶瓷基复合材料、二维/三维编织 CMC、SiC/SiC 及同类热结构复合材料的室温或高温单轴拉伸原位测试场景，也可扩展用于材料筛选、工艺评价、损伤监测和服役性能研究。

由于 CMC 具有多相、多孔、各向异性和损伤渐进演化等特点，方案输出的导热系数应明确为指定加载状态、温度区间、热流方向和损伤水平下的有效值。若需获得轴向、横向和厚向导热差异，应分别设计相应热激励和温度响应采集路径。

四、理论基础

1. 热物性换算原理

对于损伤状态下的 CMC，导热系数可按 $k = \alpha \rho C_p$ 进行换算，其中 α 为热扩散率， ρ 为材料密度， C_p 为定压比热容。原位测试宜以热扩散率为核心测量量，密度和比热可通过基准试验或温度修正数据获得；在温度变化范围较大时，应建立 $C_p(T)$ 及 $\rho(T)$ 修正关系，以提高导热系数反演精度。

2. 损伤—导热耦合机理

拉伸过程中产生的基体裂纹、界面脱粘、纤维断裂及孔隙扩展，会削弱连续导热路径，改变热流传输方向，导致有效导热系数下降，并可能诱发显著的各向异性。对于二维或三维编织 CMC，还需关注经纬纤维方向、厚度方向及界面层损伤对热传导能力的差异化影响。

3. 温度场分析基础

将损伤相关导热系数 $k(D,T)$ 引入瞬态导热控制方程 $\rho C_p \partial T / \partial t = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q$ ，可分析损伤对温升速率、温度梯度、局部热集中及热应力分布的影响。若材料同时承受外部热流、边界对流和辐射换热，还应结合边界条件开展耦合分析。

4. 方法选择依据

与接触式导热测试相比，红外热像结合热波法或脉冲法具有非接触、响应快、便于与拉伸加载同步实施等优点，更适用于 CMC 拉伸损伤演化过程中的原位测试。为保证结果可靠性，应采用标准样品进行系统标定，并结合未损伤试样开展基准验证。

五、总体技术路线

总体路线按照“基准标定—原位加载—热响应采集—参数反演—温度场验证”展开。首先获取未损伤试样热物性和力学基准数据；随后在拉伸加载过程中同步采集载荷、位移、应变、红外温度场和损伤监测信号；再根据热响应反演热扩散率并换算导热系数；最后建立损伤相关导热退化模型并输入温度场分析。

步骤	工作内容	主要输入	主要输出
1	试样制备与基准标定	试样尺寸、密度、比热、未损伤热扩散率、基准拉伸曲线	未损伤热物性参数、基准力学性能
2	原位拉伸与同步监测	载荷、位移、应变、DIC、声发射、红外温度场	损伤起始点、损伤阶段划分、同步数据
3	热激励与响应采集	脉冲热源或周期热源、红外热像响应	温度响应曲线、相位/幅值数据
4	参数反演与模型构建	热响应数据、 ρ 、 C_p 、损伤变量 D	$\alpha(D,T)$ 、 $k(D,T)$ 、 k/k_0 — D 关系
5	温度场分析与验证	导热退化模型、边界条件、有限元模型	损伤前后温度场对比、敏感性结论

六、实现方式

1. 试验系统组成

- (1) 加载系统：电子万能试验机或高温力学试验机，配套开窗夹具或开放式热环境结构，满足单轴拉伸及原位测量需要。
- (2) 热激励系统：激光、卤素灯或脉冲闪光热源，可根据试样尺寸、加热均匀性、激励频率和温升控制要求进行选择。

- (3) 测温系统：中波/长波红外热像仪，用于获取试样表面温度场及瞬态响应过程；高温环境下需考虑红外窗口透过率和辐射背景修正。
- (4) 损伤监测系统：DIC、声发射及应变测量单元，用于识别裂纹萌生、扩展、局部化及刚度退化过程。
- (5) 数据同步系统：统一时钟采集与控制软件，实现载荷、温度、位移、应变和损伤信号同步记录。

子系统	配置建议	关键要求
加载系统	电子万能试验机/高温力学试验机；开窗夹具	标距段无遮挡；加载稳定；可与热源、红外相机同步
热激励系统	调制激光、卤素灯或脉冲闪光热源	温升小、可重复、激励区域可控
红外测温系统	中波或长波红外热像仪	帧频满足热响应采样；需完成发射率标定
损伤监测系统	DIC、声发射、应变片或引伸计	能定位裂纹起始与扩展；能与热数据同步
数据系统	统一触发、统一时间戳、同步采集软件	采集频率匹配；保证载荷—温度—损伤数据对应

2. 试样与夹具要求

试样宜采用标准矩形拉伸试样或项目指定结构试样，标距区应保证表面平整、无遮挡、便于红外测量。夹具应兼顾加载稳定性与光路通畅性，避免夹持区域热扰动对标距段测量结果造成干扰；高温测试时，应预留热环境窗口并考虑热辐射防护。

对于需要开展 DIC 同步测量的试样，可在试样表面制备高温散斑；对于红外测温区域，应喷涂或制备稳定高发射率涂层，并在测试前完成发射率标定。若二者同时使用，应进行涂层兼容性验证，避免散斑和红外涂层相互影响。

3. 推荐实施模式

- (1) 分级保载模式：在 0%、20%、40%、60%、80% 极限载荷或关键损伤节点处保载，实施一次热波或锁相测量，适用于方法建立、参数标定和重复性评估。
- (2) 连续加载模式：在连续拉伸过程中施加小幅周期热激励，通过温度波相位和幅值变化获得热扩散率连续演化曲线，适用于损伤实时跟踪。

(3) 卸载复测模式：在指定损伤阶段卸载至低载或零载后复测热扩散率，用于区分可逆热弹效应与不可逆损伤导致的导热退化。

测试模式	实施特点	适用阶段	优点	注意事项
分级保载	加载至目标应力/应变后短时保载并测量	方法建立、参数标定	稳定性好、误差易控制	需控制保载时间和蠕变影响
连续加载	拉伸过程中连续施加小幅周期热激励	实时损伤跟踪	可获得连续退化曲线	对同步、信噪比和热扰动控制要求高
卸载复测	损伤后卸载并复测热物性	机理辨识、交叉验证	便于识别不可逆损伤贡献	不能完全代表载荷保持状态

七、热激励与测量要求

1. 热激励控制

为避免附加热损伤，热激励温升宜控制在 5 K 以内。周期热激励应根据试样厚度、热扩散率范围和红外相机帧频选择合适频率，使温度波在标距段内具有可识别的相位滞后和幅值衰减；脉冲热激励应保证脉冲宽度短、能量稳定、照射区域一致。

2. 红外测温控制

测试前应完成红外相机标定、试样表面发射率标定、环境背景温度测量及热源稳定性校核。高温环境下应对红外窗口透过率、炉体辐射背景、试样表面氧化和涂层稳定性进行修正，确保温度响应曲线可用于热扩散率反演。

3. 测试方向设置

若项目重点关注拉伸方向损伤对导热能力的影响，可优先采用轴向温度波传播测试；若重点关注隔热或厚向传热，则应采用正面激励—背面响应或同侧瞬态响应方案反演厚向热扩散率。对于编织 CMC，建议在条件允许时分别获取轴向、横向和厚向有效热传输参数。

八、测试实施流程

序号	流程环节	实施内容
1	试样准备	完成试样编号、尺寸测量、质量测量、表面状态检查和标距段确认。

2	基准热物性测试	测量未损伤状态热扩散率、密度和比热，形成 k_0 、 α_0 、 $C_p(T)$ 基准数据。
3	系统联调	完成加载系统、热源、红外相机、DIC、声发射和同步采集系统联调。
4	原位加载测试	按照分级保载或连续加载模式施加载荷并同步采集温度和损伤信号。
5	参数反演	根据温度响应数据反演热扩散率，换算有效导热系数。
6	损伤关联	结合刚度退化、DIC 裂纹密度、声发射能量等指标建立损伤变量 D 。
7	模型输入	将 $k(D,T)$ 模型输入有限元温度场分析并完成对比验证。

九、数据处理与模型构建

1. 热扩散率反演

基于温度波传播相位差、幅值衰减或脉冲响应曲线反演热扩散率 α 。对于不同测量模式，应分别建立相应的数据处理程序，并对噪声滤波、基线漂移、边界效应、热损失和红外测温误差进行修正。

2. 导热系数计算

根据 $k = \alpha \cdot \rho \cdot C_p$ 计算有效导热系数。当试样存在明显损伤、温度梯度或方向性传热差异时，应采用分阶段或分区参数处理方式，以提高导热系数估算的物理合理性。

3. 损伤变量定义

可结合刚度退化、声发射累计能量、DIC 裂纹密度、残余应变或显微观察结果构建损伤变量 D ，并建立 k/k_0 — D 或 $k(D,T)$ 关系模型。必要时可区分基体损伤变量、界面损伤变量及综合损伤变量。

数据类型	来源	处理方式	输出参数
力学数据	试验机、引伸计、DIC	应力—应变曲线、刚度退化分析	σ 、 ε 、 E/E_0 、损伤阶段
温度数据	红外热像仪	滤波、背景扣除、相位/幅值提取	$T(x,t)$ 、相位差、温度响应曲线
热物性数据	热扩散率反演、	$k = \alpha \cdot \rho \cdot C_p$ 换算、温度修正	$\alpha(D,T)$ 、 $k(D,T)$

	ρ 、 C_p		
损伤数据	声发射、DIC、 显微观察	累计能量、裂纹密度、损伤变 量定义	D、裂纹起始点、损伤演化 曲线
仿真数据	有限元温度场模 型	边界条件输入、参数敏感性分 析	温度分布、温度梯度、局部 热集中

十、温度场分析方案

温度场分析应至少建立两类模型：一类为未损伤热物性模型，采用 k_0 或 $k_0(T)$ 作为输入；另一类为损伤相关模型，采用 $k(D,T)$ 或各向异性导热张量作为输入。通过对比两类模型，可识别损伤导致的温升、温度梯度、局部热集中和热应力风险变化。

有限元分析中应明确热边界条件，包括外部热流密度、对流换热系数、环境温度、辐射发射率和结构接触边界。对于拉伸损伤显著的区域，可根据 DIC 或显微观察结果进行局部区域赋值，从而反映损伤空间分布对温度场的影响。

分析项目	对比内容	评价指标
损伤前后温度场对比	k_0 模型与 $k(D,T)$ 模型结果对比	最高温度、平均温度、温升速率
温度梯度分析	标距段、裂纹区域及厚度方向梯度对比	$\partial T/\partial x$ 、 $\partial T/\partial y$ 、 $\partial T/\partial z$
局部热集中分析	损伤集中区域与非损伤区域对比	热点位置、热点面积、峰值温差
敏感性分析	导热系数退化幅度、边界条件变化对结果影响	温度场变化率、关键参数敏感度

十一、关键难点与对策

关键难点	对策
发射率变化	喷涂稳定高发射率涂层并开展标定，必要时进行温度分段发射率修正。
光路遮挡	采用开窗夹具和开放式热环境结构，保证标距段红外视场完整。
热扰动影响	控制热激励温升不超过 5 K，避免热激励引入额外热损伤或热应力。
各向异性影响	必要时分别测试轴向、横向和厚向热传输参数，避免用单一标量替代导热张量。
同步误差	采用统一触发和时间戳校准，确保载荷、应变、温度和损伤信号一一

	对应。
参数耦合误差	通过基准样验证、重复试验和不确定度分析提高结果可信度。
高温环境干扰	对炉体辐射、窗口透过率、表面氧化和涂层稳定性进行修正。

十二、质量控制与验收要求

应开展不少于 3 组重复试验，对关键结果进行重复性评估；应保留基准试样和损伤试样测试记录；应形成完整的参数来源说明、误差分析说明及模型适用范围说明。验收内容包括测试系统联调记录、原位测试结果、导热退化模型、温度场分析结果及正式技术报告。

1. 测试记录应包含试样编号、几何尺寸、材料批次、表面处理、加载制度、热激励参数、红外相机参数和环境条件。
2. 结果文件应包含原始数据、处理后数据、热扩散率反演过程、导热系数计算过程和损伤变量定义依据。
3. 模型文件应说明适用温度范围、适用损伤范围、参数来源、误差范围和不适用边界。

十三、预期成果与交付内容

1. CMC 拉伸过程原位导热测试方案及操作规程。
2. 热扩散率、导热系数与损伤变量的演化曲线。
3. 损伤—导热退化模型与参数数据库。
4. 基于退化导热系数的温度场有限元分析报告。
5. 试验夹具配置建议、数据处理流程及评价模板。
6. 原始试验数据、同步采集记录及分析说明文件。

十四、实施进度建议

阶段	周期	主要工作	阶段成果
第一阶段	第 1—2 周	试样准备、基准热物性测试及系统联调	基准参数与联调记录
第二阶段	第 3—5 周	分级保载原位测试与方法校核	分级测试数据与方法确认
第三阶段	第 6—8 周	连续加载测试、数据反演与模型拟合	热扩散率/导热系数演化

			曲线
第四阶段	第 9—10 周	温度场仿真分析与敏感性评估	有限元分析结果
第五阶段	第 11—12 周	结果验证、报告编制及成果交付	正式技术报告与交付资料

十五、结论

本方案以“原位拉伸 + 热扩散率测量 + 导热系数反演 + 温度场分析”为主线，技术路径清晰，实施条件明确，可有效支撑 CMC 材料损伤状态下热传输特性的定量评估。方案兼顾理论基础、测试实现、参数反演、模型构建和工程验证，具备良好的工程适用性和推广价值。

十六、参考文献

- [1] ASTM E1461-13(2022), Standard Test Method for Thermal Diffusivity by the Flash Method.
- [2] ASTM C1275-18(2025), Standard Test Method for Monotonic Tensile Behavior of Continuous Fiber-Reinforced Advanced Ceramics at Ambient Temperatures.
- [3] ASTM C1359-18(2025), Standard Test Method for Monotonic Tensile Strength Testing of Continuous Fiber-Reinforced Advanced Ceramics at Elevated Temperatures.
- [4] ISO 22007-2:2022, Plastics—Determination of thermal conductivity and thermal diffusivity—Part 2: Transient plane heat source method.
- [5] El Yagoubi J., et al. Experimental assessment of damage-thermal diffusivity relationship in unidirectional fibre-reinforced composite under axial tensile test. *Acta Materialia*, 2019.
- [6] Boccaccio A., et al. Infrared thermography and thermal-wave methods for thermophysical characterization and damage assessment of composite materials. *Composites Science and Technology*, 2010.
- [7] Lamouroux F., et al. Model of the influence of damage on the thermal properties of ceramic matrix composites. *Journal of the American Ceramic Society*, 2009.