

基于机器视觉的热障涂层内部裂纹在线检测方法 及传热特性研究

龙芸¹, 史历程², 王慧杰³, 王玉璋¹

(1. 上海交通大学机械与动力工程学院, 动力机械与工程教育部重点实验室, 上海 200240; 2. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240; 3. 中国船舶集团有限公司第七〇三研究所, 黑龙江 哈尔滨 150078)

摘要: 燃气轮机服役过程中, 热障涂层内部裂纹萌生和扩展是导致涂层失效的主要原因。通过数值重构方法获得了含不同长度裂纹的热障涂层(TBCs)微结构, 基于耦合双分布格子波兹曼方法(DDF-LBM)建立了热障涂层与冷却气膜流动传热模型, 研究了热障涂层内部和表面温度分布特性。结果表明: 出现裂纹会极大地改变涂层的温度分布情况, 增加涂层温度不均匀性, 造成局部烧结, 进一步产生应力集中, 极易导致涂层分层断裂, 从而影响涂层的耐久性。同时, 基于耦合检测算法(GEMSS)通过大量机器学习训练, 提出了热障涂层内裂纹定位和长度估算的在线检测评估方法。该方法能有效确定裂纹位置, 高精度估算裂纹长度, 为高温叶片在线健康度评估和寿命预测提供理论基础和技术支撑。

关键词: 热障涂层; 内部裂纹; 温度场; DDF-LBM; GEMSS

中图分类号: TK47 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16146/j.cnki.rndlge.2021.09.026

[引用本文格式] 龙芸, 史历程, 王慧杰, 等. 基于机器视觉的热障涂层内部裂纹在线检测方法及传热特性研究[J]. 热能动力工程, 2021, 36(9): 201-209. LONG Yun, SHI Li-cheng, WANG Hui-jie, et al. Study of internal crack detection method based on machine vision and heat transfer characteristics of thermal barrier coatings[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(9): 201-209.

Study of Internal Crack Detection Method Based on Machine Vision and Heat Transfer Characteristics of Thermal Barrier Coatings

LONG Yun¹, SHI Li-cheng², WANG Hui-jie³, WANG Yu-zhang¹

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China, Post Code: 200240; 2. School of Electronic Information and Electronic Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China, Post Code: 200240; 3. No. 703 Research Institute of CSSC, Harbin, China Post Code: 150078)

Abstract: Crack initiation and propagation inside the thermal barrier coating are decisive factors that dominates the failure under services. The numerical reconstruction models of TBCs with different crack lengths were obtained. The temperature distribution characteristics of the surface and internal thermal barrier coatings were studied based on the coupled flow and heat transfer model of thermal barrier coatings and cooling was established flow by using LBM-DDF method. The results show that the existence of cracks will greatly change the temperature distribution of the coating, resulting in increased temperature inhomogeneity and local sintering of the coating. This will lead to stress concentration, which can easily cause early layer fracture of the coating and affect the durability of the coating. At the same time, an on-line ori-

收稿日期: 2021-03-30; 修订日期: 2021-05-13

基金项目: 国家科技重大专项 (2017-I-0007-0008)

Fund-supported Project: National Science and Technology Major Project (2017-I-0007-0008)

作者简介: 龙芸 (1990-), 女, 四川乐山人, 上海交通大学博士研究生。

通讯作者: 王玉璋 (1973-), 男, 河北石家庄人, 上海交通大学副教授。

entation and length evaluation method for crack in thermal barrier coatings was proposed through a lot of trainings by machine learning based on GEMSS coupled detection method. This method can effectively determine the crack location and estimate the crack length with high accuracy. The results can provide theoretical basis and technical support for online health evaluation and life prediction of high temperature turbine blades.

Key words: thermal barrier coatings, internal crack, temperature filed, DDF-LBM, GEMSS

引 言

随着燃气轮机的发展,透平叶片耐高温能力的极限成为燃气效率提升的首要制约因素。目前国际先进重型燃气轮机透平入口的燃气温度已达 $1\,700\text{ }^{\circ}\text{C}$,而现役燃气轮机高温部件材料的许用温度均在 $1\,100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下^[1]。作为解决这一问题的核心技术,热障涂层和气膜冷却能有效保护涡轮叶片等关键部件在高温下正常运行,可以延长关键部件的使用寿命和可靠性^[2-5]。然而,由于长期处于高温燃气冲击等恶劣环境中,热障涂层往往在无法预知的情况下过早剥落失效,严重影响燃气轮机的安全运行。

针对涂层的开裂与失效问题,国内外学者展开了大量研究^[6-8]。研究表明,诱发热障涂层内部裂纹扩展的主要因素包括涂层各层材料热膨胀系数不匹配引起的热学和力学性能差异;复杂环境引起的涂层内部较大温度梯度。这将极大地影响涂层内部的温度分布并产生局部热应力。热应力在涂层内积累,进而引发裂纹萌生和扩展,最终导致涂层开裂失效。因此,开展服役中热障涂层内裂纹对热障涂层换热性能和温度分布特性的影响以及热障涂层裂纹在线定位和尺寸评估方法方面的研究,对于高温叶片在线健康度评估和寿命预测具有重要意义。Dong 等人^[9-10]采用梯度热循环试验和有限元模拟方法获得了涂层内部硬币型裂纹尺寸与涂层表面亮斑尺寸之间的关系。研究发现,随着裂纹直径($0.4\sim 4.0\text{ mm}$)的扩大,涂层表面温度升高,亮斑尺寸同比增大,这说明裂纹的存在会改变涂层的温度分布。实际上,当裂纹长度为 $260\text{ }\mu\text{m}$ 时,涂层剩余寿命分数已达 80% ^[11]。采用无损检测服役热障涂层小尺寸裂纹演化的过程,是揭示涂层失效过程、预测涂层

剥落的有效手段。

近年来,基于机器视觉的红外图像处理方法成为表征材料内部缺陷的热门方法。传统用于裂纹检测的红外图像处理方法通常通过图像降噪和增强来提高图像质量,并从图像中收集信息和特征,再将图像分为感兴趣区域(ROI)和背景,以此进行阈值特征的建立,或者通过图像梯度来实现边缘检测。传统红外图像处理方法往往适用于表面裂纹检测,或者是通过穿透成像设备直接拍摄物体内部来检测内部裂纹^[12-14]。但是,表面裂纹一般具有较为明显的线性边缘特征,而内部裂纹的特征则非常模糊。此外,涂层内部有大量的孔隙,其形状和特征与微裂纹相似,在检测过程中会与内部裂纹混淆,从而增加特征分类的难度。因此,需要改进传统红外图像处理方法,研究一种基于内部裂纹特征的图像分割技术。

本文通过对裂纹形貌进行特征参数提取,基于改进的四参数随机生长法(QSGS)数值重构了含不同长度裂纹的热障涂层系统样件。基于耦合双分布格子玻尔兹曼方法(DDF-LBM)建立了热障涂层与冷却气膜流动传热模型,并计算分析了热障涂层内部和表面的温度分布特性。同时,提出了一种基于灰度梯度空间直方图熵(GGSHE)、多阈值分割和堆栈限制玻尔兹曼机(SRBM)的耦合检测算法(GEMSS),通过已获得样件的表面温度分布数据来实现热障涂层内部裂纹的定位和长度检测。

1 涂层数值重构

1.1 裂纹特征参数提取

涂层内部单条裂纹实际形貌如图 1 所示。经过大量扫描电子显微镜(SEM)图像分析发现,裂纹 xz 截面形貌近似矩形, xy 截面形貌近似椭圆形。采用三维 X 射线显微镜结合图像处理技术获得的裂纹结构近似椭圆薄片。

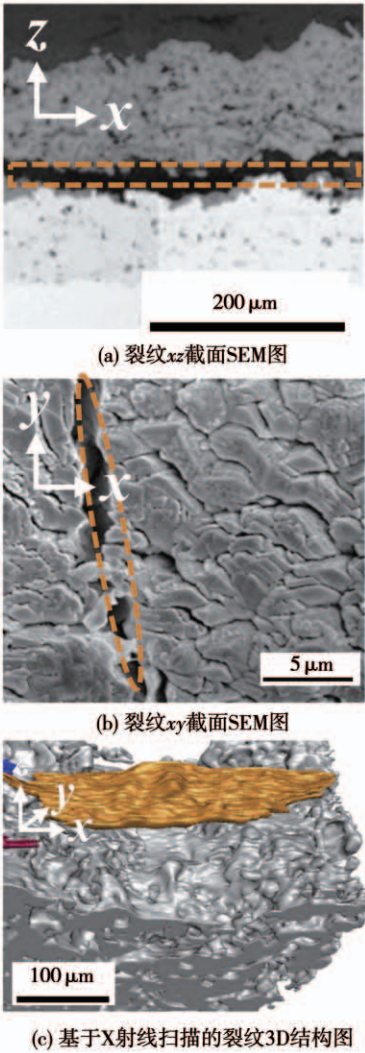


图 1 裂纹实际形貌特征^[15-17]

Fig. 1 Actual crack morphology characteristics^[15-17]

涂层内部裂纹可提取为椭圆柱结构,如图 2 所示。裂纹主要参数包括裂纹长度 L_x (椭圆长轴)、裂纹宽度 L_y (椭圆短轴) 和裂纹深度 L_z 和裂纹位置 H_z (裂纹底部离陶瓷层底部距离)。

1.2 涂层数值重构算法

由 Wang^[18-19] 提出的四参数随机生长法已广泛应用于多孔介质的数值建模中,并可用于表征热障涂层的孔隙结构。在此基础上,通过引入裂纹变形因子和采用集成嵌套策略,提出了一种含裂纹热障涂层系统的三维重构算法。重构模型不仅能反映涂层中真实的孔隙形态,并且能较准确地反映典型的裂纹特征。该模型可有效地用于服役热障涂层热物性的预测。

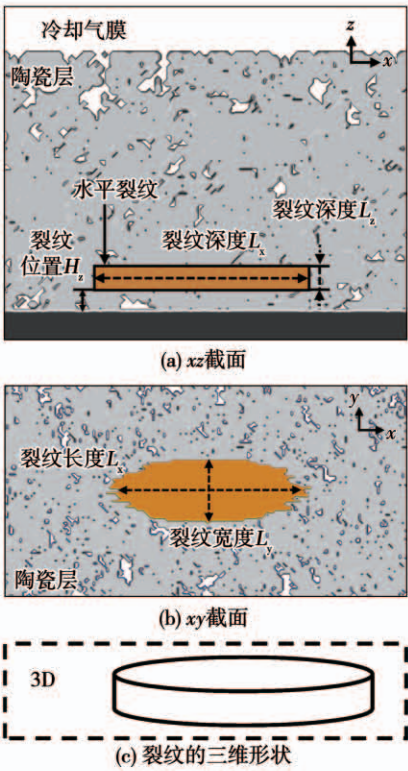


图 2 裂纹典型特征参数提取

Fig. 2 Extraction of typical characteristic parameters of crack

含裂纹热障涂层系统数值重构过程分为两个步骤:第一步是生成基础多孔热障涂层。设置重构模型大小,根据实际服役工况确定涂层系统功能层层数及内部孔隙结构参数;设定孔隙中气相为第一生长相,预设形核中心生成概率 P_c 、生长相体积分数 P_{pore} ($P_c < P_{pore}$) 以及第 i 个方向的生长概率 P_i ,根据 P_c 随机分布形核中心;生长核以 P_i 向相邻节点生长,重复以上步骤,直到陶瓷层孔隙率达到体积分数 P_{pore} ,陶瓷层生长完成;完成其他功能层的生长,如冷却气膜层、热生长氧化物(TGO)层等。至此,基础多孔热障涂层系统生长完成。第二步是在基础涂层系统中嵌套生成裂纹。确定裂纹形貌参数,如裂纹位置、长度和宽度等;设置裂纹生长初始点坐标 (x_0, y_0, z_0) ,在裂纹变形因子 F_c 调控下,初始点完成其在 $z = z_0$ 二维平面内的椭圆形状生长;位于 $z = z_0$ 平面的裂纹生长点沿 z 轴开始在垂直方向上生长,直到裂纹三维结构满足预设参数;至此,含裂纹热障涂层系统生长完成,输出其结构文件为:

$$N(x,y,z) = \begin{cases} 0, (x,y,z) \in \text{Air} \\ 1, (x,y,z) \in \text{8YSZ} \\ 2, (x,y,z) \in \text{TGO} \end{cases} \quad (1)$$

该结构文件由三维数字矩阵 $N(x,y,z)$ 构成。不同数字代表不同种类材料,如式(1)所示,并在可视化图像中呈现不同颜色。图3所示为气膜冷却下含裂纹热障涂层系统的数值重构模型。其中灰色部分代表气相成分,包括顶层冷却气膜以及陶瓷层内孔隙结构(用1表示)。白色部分为致密骨架材料,是8%氧化钇质量含量稳定的氧化锆(8YSZ)(用0表示),黑色部分为TGO层(用2表示)。整个模型生成过程逻辑严谨,模型与实际涂层有较高的匹配度,能够真实有效地表征涂层内部结构形貌特征,可以克服基于真实结构扫描图片进行涂层重构的成本较高等缺点,适合大批量的涂层研究。

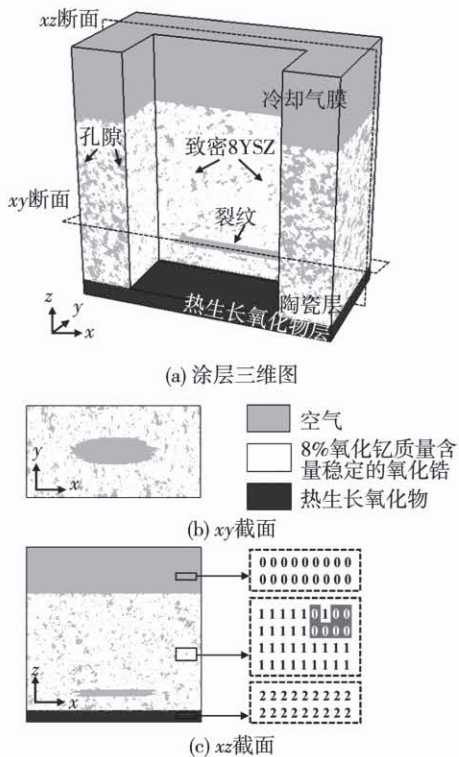


图3 含内部裂纹热障涂层数值重构

Fig.3 Numerical reconstructed model of TBCs with internal cracks

2 计算模型

2.1 基于DDF-LBM的流动传热模型

基于DDF-LBM仅用两个一阶偏微分方程替代复杂的宏观二阶对流换热方程组,具有计算逻辑简单、并行性好等优点,在处理多孔介质流动传热计算问题中具有较大优势,并得到了广泛应用^[20]。在耦合双分布模型中,密度分布函数和温度分布函数的

演化方程分别为:

$$\underbrace{f_i(r + e_i \delta t, t + \delta t)}_{\text{适移}} = \underbrace{-\tau_f^{-1} [f_i(r, t) - f_i^{eq}(r, t)]}_{\text{碰撞}} \quad (2)$$

$$\underbrace{T_i(r + e_i \delta t, t + \delta t) - T(r, t)}_{\text{适移}} = \underbrace{-\tau_T^{-1} [T_i(r, t) - T_i^{eq}(r, t)]}_{\text{碰撞}} \quad (3)$$

式中: $f_i(r, t)$ —与 i 方向相对应的密度分布函数; $f_i^{eq}(r, t)$ —平衡态密度分布函数; $T_i(r, t)$ —与 i 方向相对应的温度分布函数; $T_i^{eq}(r, t)$ —平衡态温度分布函数; r —坐标矢量, m ; e_i —离散速度的方向矢量; t —时间, s ; δt —时间步长; τ_f —流体无量纲松弛时间; τ_T —温度场的无量纲松弛时间。

三维速度场采用D3Q19离散速度模型,离散速度为:

$$e_i = \begin{cases} (0,0,0), & i = 0, \\ (\pm 1, 0, 0), (0, \pm 1, 0), (0, 0, \pm 1), & i = 1 \sim 6, \\ (\pm 1, \pm 1, 0), (\pm 1, 0, \pm 1), (0, \pm 1, \pm 1), & i = 7 \sim 18 \end{cases} \quad (4)$$

不可压缩条件下,密度平衡态分布函数和温度平衡态分布函数分别可近似为:

$$f_i^{eq} = \rho \omega_i \left[1 + \frac{e_i \cdot u}{c_s^2} + \frac{(e_i \cdot u)^2}{2c_s^4} - \frac{u^2}{2c_s^2} \right] \quad (5)$$

$$T_i^{eq} = \omega_i T \left(1 + \frac{e_i \cdot u}{c_s^2} \right) \quad (6)$$

式中: ω_i —权重系数; c_s —格子声速。在D3Q19模型中,有: $\omega_0 = \frac{1}{3}$, $\omega_{1 \sim 6} = \frac{1}{18}$, $\omega_{7 \sim 18} = \frac{1}{36}$, $c_s = \frac{1}{\sqrt{3}}$ 。

因此,宏观量温度 T 为:

$$T = \sum_i^{19} T_i \quad (7)$$

将重构的涂层系统模型矩阵文件导入Visual Studio 2010平台编写计算程序,对热障涂层与冷却气膜进行数值传热与流动分析。其数值计算可靠性已在本课题组前期相关研究中得到验证^[21-24]。

2.2 GEMSS裂纹耦合检测算法

为了开发高温叶片状态在线检测技术,利用帧差法来判断涂层是否产生裂纹,假设相机在 t_1 时刻获取的涂层表面红外图像的灰度值(经过灰度变换)为 I_{t_1} , t_0 时刻获取的红外图像的正常状态为 I_{t_0} 。则两幅红外图像的帧差为 $I = I_{t_1} - I_{t_0}$ 。为了更好地

提取和定位帧差中的特征,将 I 分割成 $M \times Q$ 的图像块。 $I_{i,j}$ 表示分割后的图像块 $i \times j$,则图像块 $i \times j$ 中灰度为 g ($0 \leq g \leq 255$) 的所有像素如下:

$$A_g^{i,j} = \{ (x^{i,j}, y^{i,j}) \mid (x^{i,j}, y^{i,j}) \in I^{i,j}, I^{i,j}(x^{i,j}, y^{i,j}) = g, 1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq Q \} \tag{8}$$

式中: M —图像垂直分割的块数; Q —图像水平分割的块数。

设 A_g 为 I 中所有灰度为 g 的像素数,则可求出图像块 $i \times j$ 中含灰度 g 的概率 $P_g^{i,j}$:

$$P_g^{i,j} = \frac{|A_g^{i,j}|}{|A_g|} \tag{9}$$

则图像 GGSHE 为^[25]:

$$E(I) = - \sum_{g=0}^{255} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^Q P_g^{i,j} \log_2(P_g^{i,j}) \tag{10}$$

GGSHE 可以作为图像信息的度量。设立一个标准阈值,用来初步判断图像是否存在裂纹。如果存在,则再利用多阈值分割法^[26]对图像进行分割,进一步判断裂纹的位置和程度。经过多阈值分割的图像将会被输入到 SRBM 网络^[27]中进行裂纹检测和长度估测。为了降低误差,需要建立数据库对网络进行训练,网络的损失函数定义为:

$$L_{\text{int}} = \frac{1}{Q_{\text{cls}}} \sum_u L_{\text{cls}}(P_u, P_u^*) + \lambda \frac{1}{Q_{\text{reg}}} \sum_u \sum_v P_u^* L_{\text{reg}}(d_{u,v}) \tag{11}$$

式中: L_{int} —联合损失; Q_{cls} 和 Q_{reg} —最小批量训练样本数和每个训练批次的真实锚框数; λ —为分类和回归任务之间的调和参数; $L_{\text{cls}}(P_u, P_u^*)$ —裂纹判断的误差,其中 P_u 是锚框被判定为裂纹的概率, P_u^* 是锚框的真实类别,使用 softmax 函数对锚框进行分类;通过 l_1 -smooth 回归模块进行长度估测, $L_{\text{reg}}(d_{u,v})$ 为第 v 个样本第 u 个锚框的预测裂纹坐标与真实坐标的误差。通过训练,将损失函数进行收敛后,即可进行裂纹的存在判定以及裂纹的定位和长度估测。

2.3 模型参数选取

重构获得的热障涂层系统样件均为 $300 \mu\text{m} \times 160 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$ 的立方体,其中气膜层厚 $90 \mu\text{m}$,陶瓷层厚 $200 \mu\text{m}$,TGO 层厚 $10 \mu\text{m}$ 。陶瓷层内裂纹结构参数如表 1 所示。其中样件 L_0 为对比无裂纹涂层,样件 $L_1 \sim L_5$ 为不同裂纹长度涂层。涂层系统中陶瓷层孔隙率均为 15% ,且裂纹变形因子 F_c 均为 0.1 。计算工况如表 2 所示,在速度场模拟中,上边

界采用非平衡外推格式,将流动区域的其余边界条件设置为周期性边界条件,固体边界采用标准反弹格式。在温度场模拟中,上下边界采用非平衡外推格式,其余边界设置为绝热边界条件。

表 1 样件裂纹结构参数
Tab. 1 Sample crack structure parameters

样件	裂纹位置 $H_z/\mu\text{m}$	裂纹长度 $L_x/\mu\text{m}$	裂纹宽度 $L_y/\mu\text{m}$	裂纹深度 $L_z/\mu\text{m}$
L_0	—	—	—	—
L_1	24	100	48	18
L_2	24	140	48	18
L_3	24	180	48	18
L_4	24	220	48	18
L_5	24	260	48	18

表 2 计算工况
Tab. 2 Calculation conditions

参 数	数 值
空气热导率/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	0.080 7
8YSZ 热导率/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	2.43
气膜顶层温度/ $^{\circ}\text{C}$	1 212
TGO 底部温度/ $^{\circ}\text{C}$	844
上边界流体水平方向速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	23

3 计算结果及分析

3.1 涂层内部温度分布特性

图 4(a)所示为无裂纹涂层 xz ($y = 80 \mu\text{m}$) 截面的微结构与温度分布。可以看出,陶瓷层内随机分布着许多大小不一、形状各异的孔隙,由于这些不规则孔隙的存在,等温线呈非直线状,有一定曲折度。当涂层内部无裂纹时,涂层内部温度分布较均匀,沿 z 方向的平均温度梯度变化很小。如图 4(b)所示,当涂层有裂纹时,裂纹区域的等温线密集且呈内凹状。裂纹上下表面中心点的温差 $\Delta T_{A'B'}$ 约为 12°C ,而无裂纹涂层在相同位置的温差 ΔT_{AB} 较小,仅为 4°C 左右。同时发现,裂纹附近区域也产生了较大温度梯度(如矩形虚线框内区域)。裂纹内空气的导热系数仅为骨架材料 8YSZ 的 3% ,静止的空气对热流传递起重要的阻碍作用,这将导致沿涂层厚度方向的温度梯度增大。与无裂纹涂层相比,较大尺寸裂纹的出现使涂层微结构在各个方向特征差异增

大,改变了裂纹内部及附近的局部传热特性,从而加剧了整个涂层的温度不均匀性。

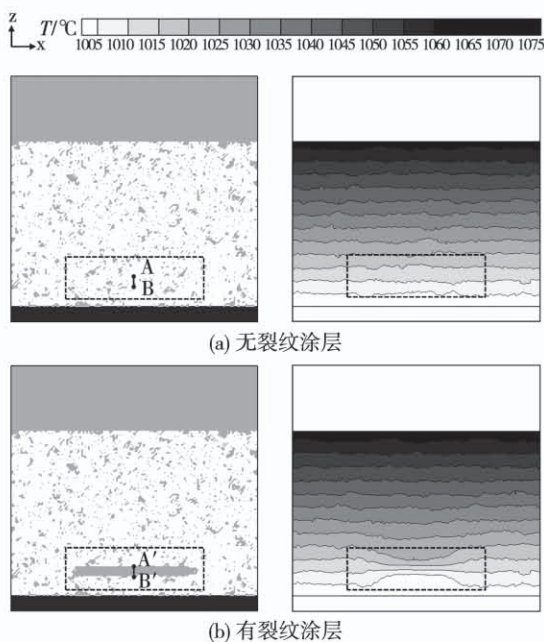


图 4 涂层内部温度分布云图

Fig. 4 Temperature distributions inside the coating

采用无量纲温度非均匀系数 $\hat{T}$ 对涂层-气膜系统内部温度分布不均匀性进行量化分析与评价。

$$SDT_{\Omega_{xy,plane}}(T_{z=k}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} (T(i,j,k) - \bar{T}_z(k))^2}{N_x \cdot N_y}} \quad (8)$$

$$\hat{T}_{\Omega_{xz,plane}}(z=k) = \frac{SDT_{\Omega_{xy,plane}}(T_{z=k})}{\bar{T}_z(k)} \quad (9)$$

式中, $\bar{T}_z(k)$ — $z=k$ 时涂层-气膜系统 xy 截面的平均温度, $^{\circ}\text{C}$; $SDT_{\Omega_{xy,plane}}(T_{z=k})$ — 温度均方差。

陶瓷层及部分气膜层内温度非均匀性分布特性曲线如图 5 所示。从图中可以看到,在陶瓷层与冷却气膜交界面处($z=220$ 截面),温度非均匀系数 $\hat{T}$ 急剧升高,出现峰值。这是因为涂层表面为粗糙表面,存在微小的凸起或凹坑,影响了该截面换热性能,且粗糙表面与冷却气膜间存在界面热阻,会造成该截面温度分布存在差异,从而导致该截面上温度非均匀系数增大,呈现波峰分布。而在涂层内部($z=200$ 以下区域),无裂纹的 L_0 样件的涂层内部温度分布比较均匀,沿厚度方向各 xy 截面的 $\hat{T}$ 范围为 $4.03 \times 10^{-4} \sim 5.14 \times 10^{-4}$ 。

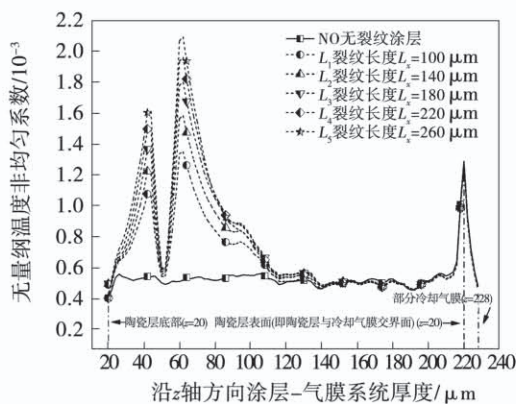


图 5 涂层-气膜内部温度非均匀性分布特性曲线

Fig. 5 Characteristic curve of temperature inhomogeneity distribution in coating and gas film

对于含不同长度裂纹的涂层,在 $z=44 \mu\text{m}$ 和 $z=62 \mu\text{m}$ 处,每条温度非均匀系数曲线($L_1 \sim L_5$)都有两个明显的峰值。可以看出这两个峰值之间的间隔为 $18 \mu\text{m}$,正好是裂纹深度。结果表明,裂纹上表面与下表面所在截面的温度非均匀系数最高,可达到无裂纹涂层内部平均温度非均匀系数的 40 倍。裂纹的特征尺寸远大于孔隙的特征尺寸,这意味着裂纹的存在会极大地改变涂层的热性能(如导热系数)和温度分布(温度不均匀性增加和局部烧结)进而产生应力集中的现象,极易导致涂层提前分层断裂,从而影响涂层的耐久性。

3.2 涂层表面温度分布特性

裂纹不仅会对其附近区域温度产生影响,还会造成涂层表面一定程度的温度突变。涂层表面温度分布云图如图 6 所示。由图 6 可知,含裂纹涂层的表面温度整体比无裂纹涂层表面温度高。图 7 为含裂纹涂层表面温度随裂纹长度变化分布规律。由图 7 可知,随裂纹长度增加,涂层表面最大、平均和最小温度均上升。当裂纹长度为 $260 \mu\text{m}$ 时,涂层表面最大、平均和最小温度分别为 1074.7 、 1068.1 和 $1066.8 ^{\circ}\text{C}$,与无裂纹涂层表面温度相比,差值达到 5.2 、 4.6 和 $4.9 ^{\circ}\text{C}$ 。在长期高温服役环境下,陶瓷层会发生显著烧结现象,热应力集中易使水平裂纹继续横向扩展,引起涂层微结构改变。服役中陶瓷层微结构的演化引起热导率、弹性模量等性能也随之不断变化,严重影响了涂层的抗热震性和服役安全性。值得注意的是,图 6(b)中椭圆虚线框展示了陶瓷层内裂纹的轮廓,裂纹上表面距涂层表面 $158 \mu\text{m}$ 。可以发现,与无裂纹涂层相比,裂纹区域所对

应涂层表面区域的等温线分布有差异,但是无法通过观察判定涂层内部是否有裂纹产生。

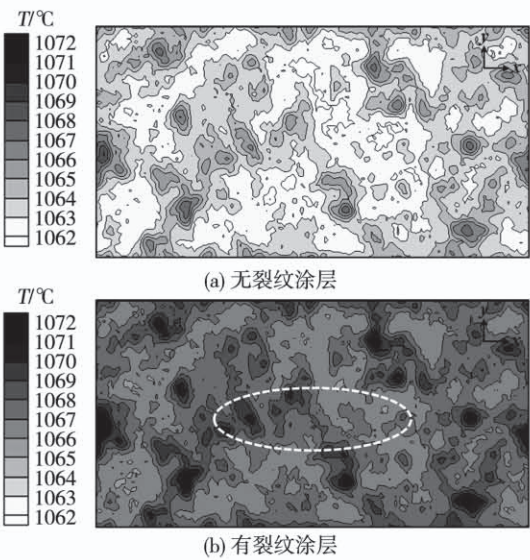


图 6 涂层表面温度分布云图
Fig. 6 Temperature distributions of the coating surfaces

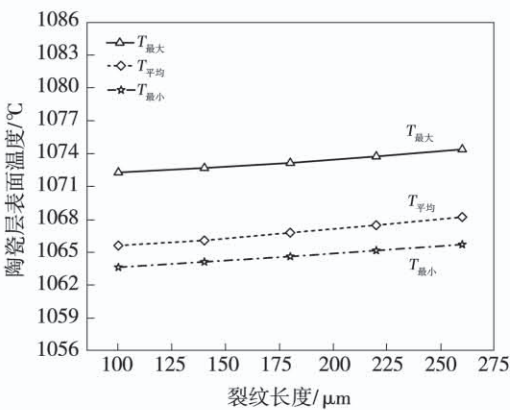


图 7 涂层表面最大/最小/平均温度随裂纹长度变化分布规律
Fig. 7 The distribution of the maximum/average/minimum temperatures on the coating surface with the crack length

3.3 裂纹检测结果分析

图 8 为不同内部裂纹长度的涂层样件检测结果。

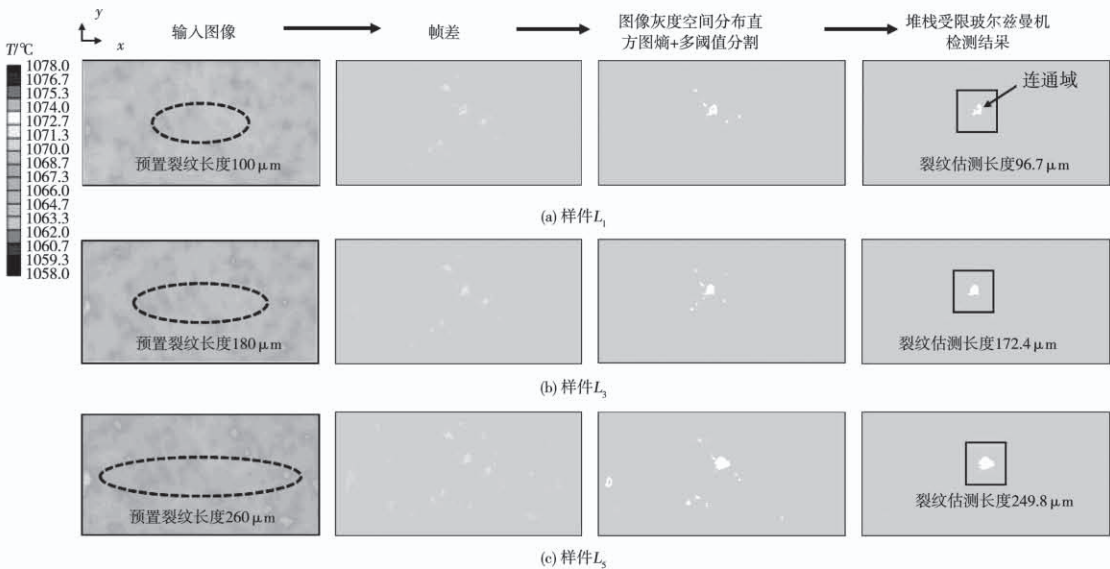


图 8 基于 GEMSS 算法的不同长度裂纹检测过程

Fig. 8 The process of internal crack detection under different crack lengths based on GEMSS algorithm

通过计算输入图像与正常图像的帧差,再利用 GGSHE 结合多阈值分割将图像进行降噪和边缘提取,获得裂纹区域的信息,最后使用 SRBM 对可疑的裂纹区域进行判断。从图中可以看到,所有裂纹均得到了准确检测。白色方框区域即表示该涂层样件内有裂纹存在。随着裂纹长度的增加,其温度变化范围扩大,这种扩大的特征可由图 8(a) ~ (c) 中连

通域的面积体现(连通域明显变大)。将该扩展区域输入到 l_1 - smooth 长度回归模块中即可估算出裂纹的长度,长度估测误差均在 5% 以内。

4 结 论

通过数值重构方法获得了含不同长度裂纹的热障涂层微结构,基于 DDF-LBM 热障涂层与冷却气

膜流动传热模型,研究了热障涂层内部和表面温度分布特性。并基于 GEMSS 耦合检测算法,通过大量机器学习训练,获得了热障涂层内裂纹定位和长度估算的在线检测评估方法。主要结论如下:

(1) 通过引入裂纹变形因子和采用集成嵌套策略,提出了含裂纹热障涂层系统的三维重构算法。重构模型不仅能反映涂层中真实的孔隙形态,而且能较准确地反映典型的裂纹特征。

(2) 裂纹的出现进一步强化涂层的各向异性特性,改变了裂纹附近温度分布,加剧了涂层的温度不均匀性。裂纹上下表面中心点温差 $\Delta T_{A'B'}$ 较相同位置无裂纹涂层增大了 $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。裂纹上下表面所在 xy 截面的温度非均匀系数较相同位置无裂纹涂层增大了 40 倍。

(3) 裂纹的出现也会影响涂层表面温度分布。与无裂纹涂层相比,随着裂纹长度增加,涂层表面最大、平均和最小温度均上升 $5.2, 4.6$ 和 $4.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(4) 通过引入灰度梯度空间直方图熵提取图像颜色和空间特征,再利用多阈值分割对裂缝和背景进行初步分割,最后将处理后的图像输入到堆栈受限 Boltzmann 模型中,可以成功对涂层内部裂纹进行定位,并对其尺寸进行定量表征。

参考文献:

- [1] ABDELMAKSOU D R, WANG T. Simulation of air/mist cooling in a conjugate, 3-D gas turbine vane with internal passage and external film cooling[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 160: 120197.
- [2] 薛召露, 郭洪波, 宫声凯, 等. 新型热障涂层陶瓷隔热层材料[J]. 航空材料学报, 2018, 38(2): 10-20.
XUE Zhao-lu, GUO Hong-bo, GONG Sheng-kai, et al. Novel Ceramic Materials for Thermal Barrier Coatings[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2018, 38(2): 10-20.
- [3] ZHANG X Q, YANG Q L, CHEN L, et al. Fabrication and characterization of 8YSZ ceramic based abradable seal coatings by atmospheric plasma spraying[J]. Ceramic International, 2020, 46(17): 26530-26538.
- [4] 陈华梅, 陈 榴, 戴 韧. 叶片热障涂层结构内的非定常传热效应[J]. 热能动力工程, 2017, 32(011): 26-32.
CHEN Hua-mei, CHEN Liu, DAI Ren. Unsteady heat transfer in thermal barrier coatings on gas turbine blade[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2017, 32(011): 26-32.
- [5] 吉桂明. 等离子喷涂热障涂层有潜力用于 1500°C [J]. 热能动

力工程, 2019, 34(6): 189.

Ji Gui-ming. Plasma sprayed thermal barrier coatings have the potential to be used at $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2019, 34(6): 189.

- [6] XIAO B J, ROBERTSON T, XIAO H, et al. Fracture performance and crack growth prediction of SPS TBCs in isothermal experiments by crack numbering density[J]. Ceramic International, 2020, 46(3): 2682-2692.
- [7] WENG W H, ZHENG Z H, LI Q. Cracking evolution of atmospheric plasma-sprayed YSZ thermal barrier coatings subjected to isothermal heat treatment[J]. Surface Coating and Technology, 2020, 402: 125924.
- [8] ABUBAKAR A A, ARIF A F M, AKHTAR S S. Evolution of internal cracks and residual stress during deposition of TBC[J]. Ceramic International, 2020, 46(17): 26731-26753.
- [9] DONG H, YAO J T, LI X, et al. The sintering behavior of plasma-sprayed YSZ coating over the delamination crack in low temperature environment[J]. Ceramic International, 2018, 44(3): 3326-3332.
- [10] 董 会, 李 霄, 周 勇, 等. 不同裂纹扩展位置时热障涂层温度场分布特征研究[J]. 热加工工艺, 2017, 478(24): 183-185.
DONG Hui, LI Xiao, ZHOU Yong, et al. Research on temperature distribution characteristics of thermal barrier coatings under different crack propagation position[J]. Hot Working Technology, 2017, 478(24): 183-185.
- [11] AHMADIAN A, JORDAN E H. Explanation of the effect of rapid cycling on oxidation, rumpling, microcracking and lifetime of air plasma sprayed thermal barrier coatings[J]. Surface Coating and Technology, 2014, 244: 109-116.
- [12] JIN C, KONG X G, et al. Internal crack detection of castings: a study based on relief algorithm and Adaboost-SVM[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 108(9-10): 3313-3322.
- [13] DOAEI M, TAVALLALI M S. Intelligent screening of electrofusion-polyethylene joints based on a thermal NDT method, [J]. Infrared Physics Technology, 2018, 90: 1-7.
- [14] LOPEZ F, IBARRA-CASTANEDO C, NICOLAU V D P, et al. Optimization of pulsed thermography inspection by partial least-squares regression[J]. NDT&E international, 2014, 66: 128-138.
- [15] DONG H, YANG G J, et al. The influence of temperature gradient across YSZ on thermal cyclic lifetime of plasma-sprayed thermal barrier coatings [J]. Ceramic International, 2015, 41(9): 11046-11056.
- [16] FU Y G, SHAO C C, CAI C Y, et al. Temperature induced structure degradation of yttria-stabilized zirconia thermal barrier coatings[J]. Surface Coating and Technology, 2018, 351: 21-28.