

模拟服役环境下热障涂层损伤趋势 的红外原位检测技术

何 箐, 吴 鹏, 汪瑞军, 王伟平

(中国农业机械化科学研究院 表面工程技术研究所, 北京 100083)

摘 要: 热障涂层会显著提高航空发动机和燃气轮机的运行温度和热效率,其服役工况复杂,一旦失效后会严重影响热端部件的服役性能,甚至引发事故,因而对热障涂层内部损伤进行无损检测是十分必要的。文中利用红外热成像技术,在燃气加热、高温梯度循环和冷热交替循环的模拟服役环境下对多组热障涂层的损伤趋势进行了原位检测,提出了利用红外辐射差异水平参数 Δ_{TR} 表征了热障涂层内部缺陷的扩展趋势的方法。涂层内部缺陷的寿命周期可分为稳定阶段($<50\% \sim 60\%$ 热循环寿命)、热异常扩展阶段和加速失稳阶段($>80\% \sim 90\%$ 热循环寿命),在热异常扩展阶段可预判失效区域和剩余寿命,而加速失稳阶段可确定缺陷区域即将剥离失效。

关键词: 红外热成像; 热障涂层; 热循环; 原位检测; 失效预判

中图分类号: TG174.44; TG115 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9289(2013)04-0019-08

Infrared Thermography In-situ Inspection for Damage Trend of TBCs in Simulated Service Environment

HE Qing, WU Peng, WANG Rui-jun, WANG Wei-ping

(Surface Engineering Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083)

Abstract: Thermal barrier coatings (TBCs) can increase the operating temperature and efficiency for aero engine and gas turbine, which are used under complex service conditions, and the failure of coating may result in serious damage for hot section parts. A non-destructive method for damage determination is necessary for TBCs. Damage trend for TBCs is in-situ inspected by infrared thermography in simulated service environment with high thermal gradient and heating-cooling cycle. The parameter of diversity factor of infrared radiation (Δ_{TR}) is used to characterize the expansion trend of internal defects of TBCs. Thermal cycle life of defects in coating consists of steady stage ($<50\% \sim 60\%$ total cycles), thermal anomaly extend stage and acceleration unstable stage ($>80\% \sim 90\%$ total cycles). During the period of 50-60% cycle life of defect, the spallation area and remaining life can be predicted. Acceleration unstable stage can be determined to be stripped of the area with defects.

Key words: infrared thermography; thermal barrier coating; thermal cycling; in-situ inspection; failure prediction

0 引 言

热障涂层被广泛应用于航空发动机、舰船燃气轮机和工业燃气轮机涡轮热端部件表面,其具

有良好的隔热、抗高温腐蚀和氧化性能,会显著提高热端部件服役温度和服役寿命,进而提高燃气轮机热效率和航空发动机推重比^[1]。目前应用最

收稿日期: 2013-05-08; 修回日期: 2013-06-20

作者简介: 何箐(1983—),男(汉),湖北黄冈人,工程师,博士生;研究方向:热障涂层材料、涂层性能表征评价

网络出版日期: 2013-07-01 13:22; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20130701.1322.012.html>

引文格式: 何箐, 吴鹏, 汪瑞军, 等. 模拟服役环境下热障涂层损伤趋势的红外原位检测技术 [J]. 中国表面工程, 2013, 26(4): 19

为广泛的热障涂层系统是由高温合金基体、MCrAlY 金属粘结层(Bond coat, BC)、氧化铝和尖晶石相组成的热生长氧化物层(TGO)和 7YSZ ($\text{ZrO}_2-7\% \text{Y}_2\text{O}_3$) 陶瓷隔热层(Top coat, TC)所组成,热障涂层通常服役在高温燃气加热、径向和轴向高温梯度、腐蚀介质作用和外来颗粒冲刷的多耦合环境下,在转动部件表面应用时还存在复杂应力场耦合作用,是航空发动机各类涂层中结构和服役工况最为复杂的涂层体系。涂层在长时间服役过程中失效后会产生连续的剥离,会对热端部件的使用温度和寿命造成较大的影响,严重的情况下甚至会引起事故发生。目前热障涂层的性能分析和评价多依靠金相、力学性能等破坏性测试方法,对热障涂层制备态涂层和失效后涂层进行分析和评价,缺少对涂层服役寿命周期内损伤状态的无损检测和分析方法。

针对以上的问题和需求,近年来国内外利用光谱法、声发射法、交流阻抗谱、超声法、红外热成像等方法对涂层内部损伤及裂纹扩展趋势进行了研究。由于在热梯度的环境下,热障涂层的失效主要表现为热不匹配应力、TGO 生长导致的界面应力和陶瓷层烧结应力耦合作用下陶瓷层内部开裂和逐层剥离^[2],因而针对热障涂层的无损检测主要集中在 TGO 层厚度、陶瓷层分层开裂、涂层内部应力状态和陶瓷层剩余厚度等方面。对用于热障涂层不同的无损检测方法进行了对比^[2-5]: 频率扫描涡流技术可用于陶瓷层厚度和 TGO 中 $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$ 层厚度的测量,表征涂层剩余厚度,从而定性分析涂层的状态;光致光谱技术依靠激光照射条件下,对 TGO 中 Cr^{3+} 的光谱差异来表征 TGO 界面损伤及 TGO 界面残余应力;交流阻抗谱技术可将涂层中不同组元等效为电阻,利用所建立的等效电路及不同检测信号变化定性表征陶瓷层微观结构、TGO 层厚度等信息;声发射技术可应用于实验室热载荷或热、力载荷条件下,研究陶瓷层或界面开裂的声信号演变规律,从而获得涂层起始开裂或分层的信息。

相对以上方法而言,红外热成像技术可以实现在线原位检测和非接触式检测,是有望应用于服役环境下的一种无损检测/监测手段。红外热成像技术是利用材料内部缺陷对热传导差异进行缺陷评价的技术,可以直观地获得涂层内部损伤状态信息,已经在热障涂层领域获得了关注。Bi-

son 等人^[6]研究了在厚度方向和平面方向涂层的热扩散系数变化,利用红外热成像系统建立了涂层热扩散系数衰减与剩余循环寿命之间关系;Newaz^[7]、Franke^[8]等人利用红外热波系统研究了涂层的累积损伤过程,利用闪光灯进行激励,在不同积分时间下获得不同高温时间后涂层表面热图,表征涂层中累积损伤状态,利用热响应状况来表征陶瓷层内部组织结构变化和涂层内部分层开裂情况。

从热障涂层失效机理的研究来看,获得热障涂层的失效机理是反馈涂层材料、结构和性能优化的基础,而真实服役环境运行昂贵,失效样品的支撑数量有限且仅能体现失效后的状态,难以获得过程信息,因而通常依靠模拟服役环境试验平台进行不同热载荷、高温停留时间、热循环衰减时间等条件下涂层失效分析研究。文中利用课题组前期搭建的热障涂层模拟服役环境试验平台,在燃气加热、热梯度和冷热交替条件下,利用红外热成像技术对热障涂层热循环寿命周期内的热图信号进行了原位捕捉,分析了涂层表面红外辐射异常区域的辐射差异水平,获得了涂层内部缺陷扩展损伤趋势与红外热像无损检测信号之间关系,并提出了利用红外辐射差异水平参数进行热障涂层损伤趋势及失效预先判断的方法。

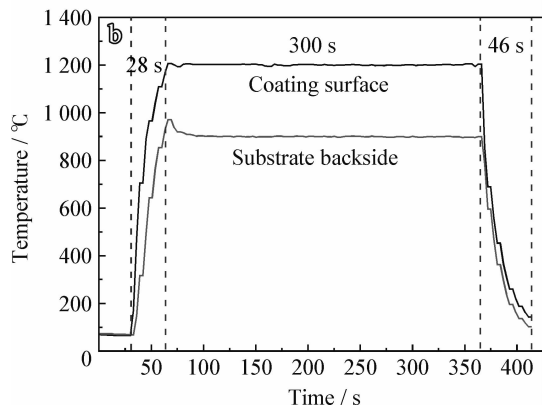
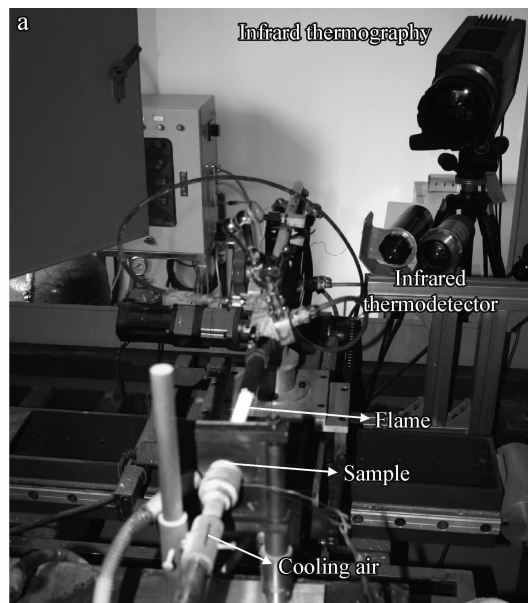
1 试验平台

试验平台及典型的热循环曲线如图 1 所示。文中使用热障涂层自动热循环试验平台(图 1(a))进行涂层的冷热交替热循环过程模拟,平台使用氧-丙烷燃气加热,使用压缩空气提供背冷以保持加热过程中涂层表面/基体背面的高温梯度,同时压缩空气也用于冷却阶段样品的强制冷却。涂层正面的温度测量采用双色红外测温仪,坡度值设定为 0.999,基体背面温度测量使用 NiCr/NiSi 热电偶,热电偶采用点焊的方式固定在基体背面。

热循环试验过程中单次热循环条件为:快速将涂层样品升温至试验温度(通常为 $1\ 200\ ^\circ\text{C}$, $20\sim 40\ \text{s}$),保温 $5\ \text{min}$ 后,将样品降温至 $100\ ^\circ\text{C}$ (时间为 $40\sim 60\ \text{s}$, 图 1(b))。所采用样品的基体材料为 GH3030 高温合金, $\Phi\ 30\ \text{mm}\times 3\ \text{mm}$ 。金属粘结层为 NiCrAlY,使用超音速火焰喷涂工艺制备,厚度为 $0.08\sim 0.12\ \text{mm}$;陶瓷隔热层为 $0.25\sim$

0.30 mm 厚的纳米 7YSZ。

选择 JADE 中波型热像仪(波长:3~5 μm)用于原位检测,热像仪内 CCD 由宽度为 320 像素,高度为 240 像素的阵列所构成,整个采集系统由 Antair 软件进行控制,同时也用于红外热图的分析。经过系统优化后,热像仪选用 3% 衰减片,设定的采集频率为 5 Hz,积分时间为 10 μs 。由于整个试验过程为高温试验,热像仪采集涂层整个寿命周期内的热图信号,因而设定采集距离为 1 m(图 1(a))。平台配套 Mikron 315 黑体箱对红外热像仪进行标定,标定温度为 100 $^{\circ}\text{C}$ 和 600 $^{\circ}\text{C}$,从而提高热像仪对被测温度测量精度和信号差异的捕捉精度,将像素矩阵中不均匀点进行均匀化处理。



(a) Test setup (b) Thermal cycling curves

图 1 热循环试验平台及典型的热循环曲线

Fig. 1 Thermal cycling test setup and typical thermal cycling curves

2 试验原理及验证

2.1 试验原理

由于在燃气加热循环过程中,存在燃气燃烧对红外热成像信号的影响,因此选择了对降温过程的红外热图信号进行了系统分析。红外热像的基本原理是捕捉被测目标表面温度差异,这种温度差异表现为红外辐射强度差异,而涂层中内部缺陷会影响降温过程中热量的传导,从而影响涂层表面的温度分布。首先对热循环后失效样品进行分析,确定了热障涂层热循环条件下的损伤模式。

图 2 为样品经过图 1(b)所示热循环曲线循环失效后的典型截面形貌。图 2(a)为典型的陶瓷层内部分层开裂区域,此区域中存在垂直与基体的裂纹,及横向微裂纹扩展连接后形成的分层开裂区域;图 2(b)为剥离区域周边翘起、即将剥离位置的典型形貌,此区域涂层的损伤程度大于图 2(a)中,陶瓷层表现为开裂剥离现象,在此更进一步的热循环后,陶瓷层会出现局部剥离,这是热循环过程中涂层常见失效情况。剥离位置下方陶瓷层中产生了一定量横向裂纹,同时少量区域出现了 TGO 界面开裂。

热循环保温过程中,涂层表面热量稳定传递至基体背面,形成一个稳定的温度梯度(图 1(b))。在降温过程中,涂层正面和基体背面同时进行压缩空气强冷,此时热量在整个热障涂层系统中进行传递,主要存在两个方向:(不考虑样品与夹持工装径向热交换)向基体背面和陶瓷层表面轴向热量传递(图 1(a))。

Bison 等人^[6,9]推导了平面方向(径向)和厚度方向(轴向)涂层热扩散系数随损伤程度增大的变化规律,当然纵向裂纹(轴向)对轴向热扩散存在影响,但不影响热扩散系数总体增大规律,其主要影响为横向裂纹缺陷(径向)。测试过程中的基本原理是将涂层中径向存在的横向裂纹或分层缺陷等效为空气层,而对涂层中不同组元热导率大小排序:高温合金基体>金属粘结界>TGO>陶瓷层>空气层。出现空气层的缺陷处,空气层的存在导致涂层降温阶段会出现热传导的异常。这种异常反馈到涂层表面的温度差异,横向裂纹密度越大,此位置等效的空气层体积越大,导致降温过程中此位置对应的涂层表面温度下降速率相对

降低,与其它位置相比会形成低红外辐射水平区域,对应红外热图中较暗的低像素值区域。

根据文献[6]和[9]所推导的理论模型,建立

了如图 3 所示的样品降温过程中的热传递示意图,其中主要以轴向传递为主,分层和剥离位置周边位置考虑了径向热流传导。

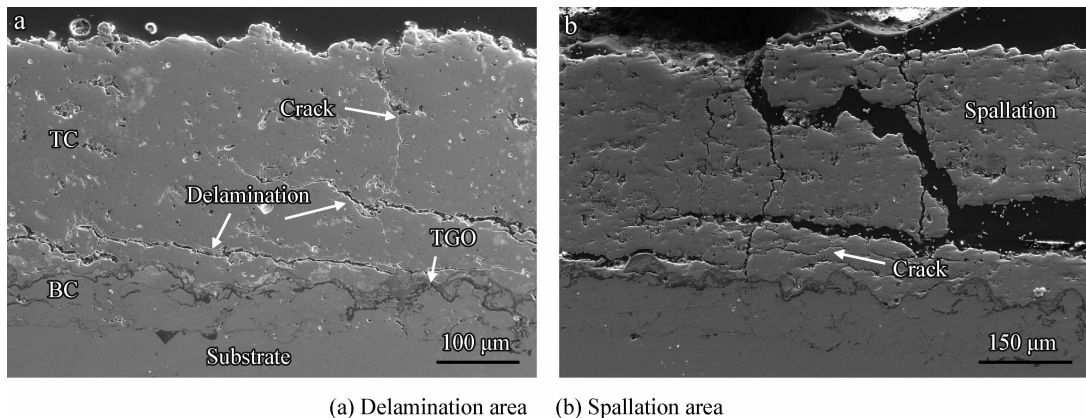


图 2 样品热循环失效后典型截面形貌

Fig. 2 Typical cross-section micrographs of failure sample after thermal cycling

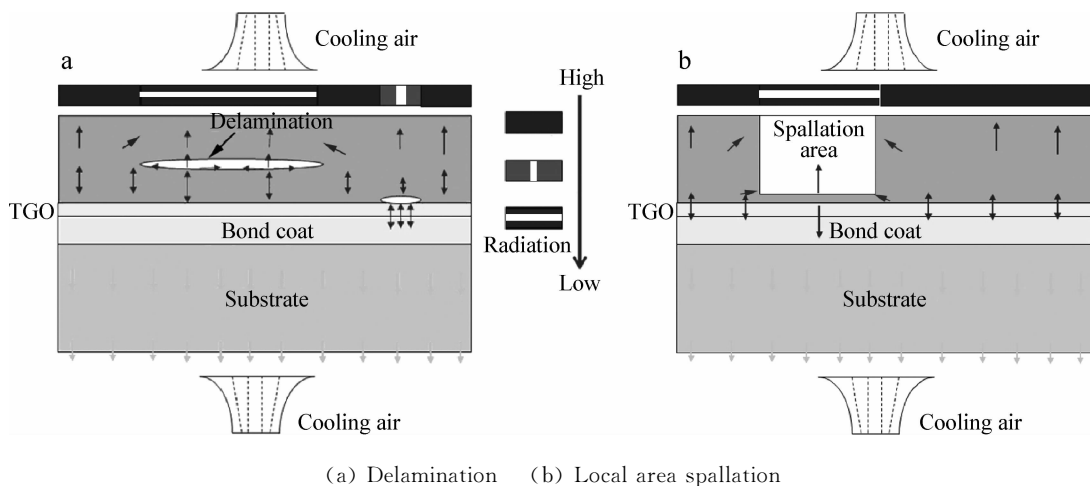


图 3 涂层中缺陷对降温过程中热量传导的影响

Fig. 3 Effects on the heat conduction of coating defects during cooling process

对于横向分层开裂区域,由于开裂区域的空气层会改变热流传播途径,使热量沿分层区域上下壁面传递,同时空气层具有较低的热导率,对热传导形成了障碍。在热循环冷却阶段约 $20 \sim 25 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 的快速降温过程中,会导致陶瓷层分层开裂区域上方积聚的热量在涂层表面强冷过程中快速向表面传递,同时横向开裂区域上方的垂直裂纹会提供快速的降温通道,导致横向开裂区域上方涂层表面形成快速降温区域,相对陶瓷层完整区域在同一时刻可确定为低红外辐射区域(图 3(a));此时基体自身温度较低,同时降温速率高于陶瓷层表面(图 1(b)),会导致空气层下方的热量部分向基体内部传递;而 TGO 界面开裂的涂层由于

陶瓷层仍保持相对完整厚度,此时对涂层表面红外热辐射影响相对较小。图 3(b)中分析了涂层局部剥离的热量传递情况,降温过程中,剥离区域陶瓷层厚度有限,此处的热量在与压缩空气的热交换过程中快速损耗,形成低辐射水平区域。另外,无论是内部分层开裂区域还是局部剥离区域,当此处降温速率较快时,会导致其周边陶瓷层内部,甚至 TGO 界面位置的热量向此位置聚集,表现为涂层表面其它区域由于散热较慢,热量向快速散热区域汇聚现象。

2.2 试验原理验证

通过涂层表面的温度差异反应内部缺陷的方

法是红外热成像技术的基础,这种温度差异通过红外辐射差异反馈至电信号,转化成电荷后进一步转变为可识别的像素差异,所采集热图的像素矩阵绘制成图像会形成具有明、暗(低红外辐射)不同程度的灰度图,红外热图中红外辐射值差异主要反馈为灰度值差值(对应图中不同位置像素值差异)。

对 274 次热循环失效后样品降温过程不同区域红外辐射强度差异水平进行了分析,如图 4 所示。样品 260 次循环时仍然保持完整,在 270 次后逐步观察到了明显开裂现象。274 次循环降温阶段,红外热图与涂层失效外观对应良好,在开裂区域出现了明显的低辐射值水平的“黑斑”。样品 260 次循环后,在与 274 次循环后剥离失效位置相同区域出现红外辐射水平较低的现象。对图 4 红外热图中标注的位置 1、2 和 3 的降温过程中红外辐射水平(对应灰度图的像素值 DL 差异)变化曲线进行了分析,发现最终失效区域(位置 1)红外辐射水平下降最快,与图 3 中分层缺陷区域降温速率分析结果一致;远离失效区域(位置 3)降温速率最慢,红外辐射与多数区域一致,处于正常水平;剥离失效区域边缘(位置 2),红外辐射水平也相对较低,降温的前期(温度较高)辐射值高于位置 1,低于位置 3,参考图 2(b),发现这种剥离区域周边的热异常是由于内部横向裂纹所导致的。热循环次数增加会是涂层内部缺陷进一步扩展,在降温过程中会表现热辐射差异水平增大,同时在降温过程中持续时间增长(图 4),这与降温

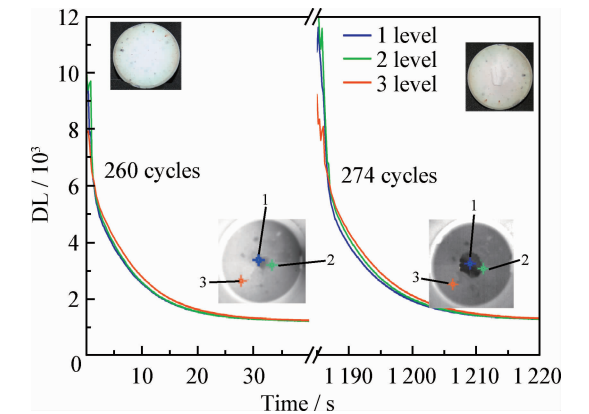


图 4 260 次和 274 次热循环降温过程中涂层不同位置降温速率

Fig. 4 Curves of cooling rate of coatings in different positions during cooling process after 260 and 274 times of thermal cycling times

过程中热量传递的分析结果是一致,空气层体积越大,对散热过程中影响越大,分层开裂区域上方陶瓷层向表面热流扩散和热交换速度越快。

根据图 4 中位置 1、2 和 3 的分析,计算了降温过程中位置 1 和 2 与位置 3 像素值差异,从而表征辐射差异变化规律,结果如图 5 所示。150 次循环后,发现了红外热图中出现了少量低辐射区域(轻微暗斑),且在最终 274 次开裂后的低辐射区域范围内。通过与红外辐射正常均匀位置 3 进行差值对比,发现降温过程中某个阶段,辐射值下降出现漏斗状并达到最低值,而这一现象会随循环次数的增加而逐步在更短的降温时间出现,同时差异值随循环次数逐步增大。涂层 274 次循环后明显的开裂区域(位置 1)相对其周围可能存在横向微裂纹区域(位置 2)与完好区域(位置 3)的差异值更大($\Delta(DL1-DL3) > \Delta(DL2-DL3)$),因而这种辐射差异被验证可以作为陶瓷层损伤程度的表征参量。

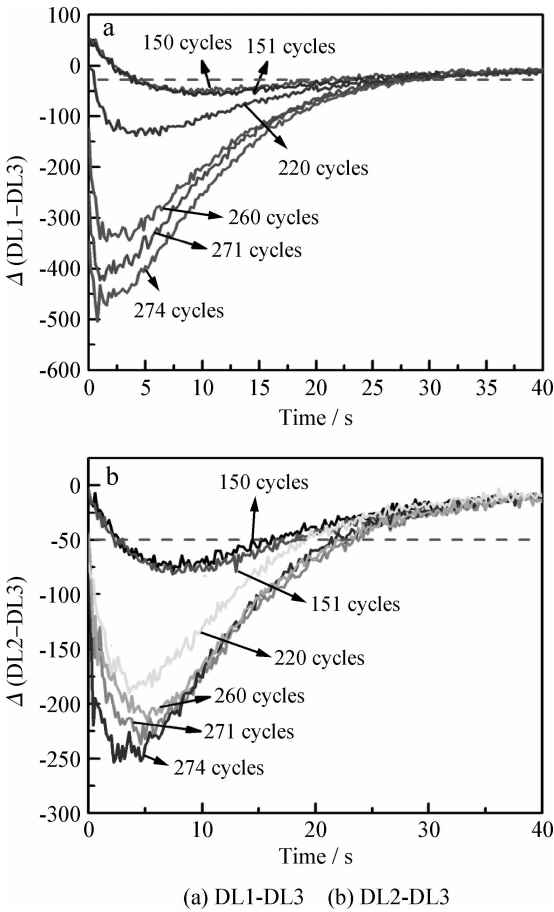


图 5 不同区域辐射差异随循环次数变化规律

Fig. 5 Relationship between radiation difference in various areas and thermal cycling times

为了减少噪声对无损检测信号的影响,同时确定每个循环降温过程分析时间,根据图 5 确定了在 5~10 s 内分析红外辐射差异水平,同时认为较低的差异水平程度可能是由于未知噪声或其它因素所导致的,认为在一定的差异水平之上为涂层内部缺陷扩展或缺陷密度增大。通过以上对最终开裂失效区域红外热辐射信号进行反推的方法验证了红外热像技术原位在线检测的原理,确认了辐射差异水平是表征涂层内部缺陷及缺陷扩展的关键参量。

2.3 试验方法

为了确定损伤趋势,在以上分析的基础上,定义辐射差异水平参数 Δ_{TR} ,如式(1)和图 6 中红外热图(区域 1、区域 2)所示。相对图 4 和图 5 中原理验证性分析,利用异常区域和整个涂层表面区域的平均像素值表征平均辐射水平,建立两者之间差异水平表征参量 Δ_{TR} ,其优点进一步降低噪声信号、涂层表面不均匀性等对信号捕捉的影响,使整个分析结果的可信度进一步提高。

$$\Delta_{TR} = \frac{\text{样品表面平均像素值} - \text{异常区域平均像素值}}{\text{样品表面平均像素值}} \times 100\% \quad (1)$$

对不同样品进行了系统的分析,样品个体存在差异,但厚度范围和涂层材料均一致。其中重点分析了在 1 200 °C 和 900 °C 试验条件下,热循环 573 次的样品。使用 Hitachi S3400 扫描电镜分析了样品失效后的截面形貌分析。

3 结果分析及讨论

573 次热循环失效后样品的辐射差异水平参数 Δ_{TR} 随热循环次数的关系如图 6 所示,样品 573 次循环后,表面出现了局部的剥离、开裂和翘起现象,560 次循环后,从涂层外观来看,无任何明显的剥离现象。从红外热像仪捕捉的热图分析,在 200 次循环降温阶段,涂层表面降温均匀,无明显的热辐射异常区域(暗斑区域),同时热辐射差异水平极低,可以认为是表征误差所导致的。自 340 次循环后,样品表面开始出现暗斑,同时出现的位置与最终涂层剥离失效区域一致,直至 540 次热循环区间范围内,异常区域辐射水平相对整个表面平均值降低 1%~3%,并呈现出缓慢上升的趋势;其中 350~450 次循环之间,辐射差异水平参数出现了波动,是由于燃气中杂质喷射到涂

层表面导致局部区域出现辐射值较高的亮斑所导致的,图 5 和图 7 中均可发现这一对应现象,450 次循环后,喷射杂质烧蚀脱落,曲线变化正常。

540 次循环至涂层剥离失效后,异常区域(区域 1)的辐射水平显著降低,表现为暗斑颜色的加深和区域的不断扩大,此时辐射差异水平参数由 2.8% 升高至 565 次循环后的 3.9%,直至 573 次涂层剥离失效,辐射值差异水平提高至 6.4%。此阶段表现为辐射差异水平参数的快速升高,在发现这一规律 23 次循环后,涂层剥离失效。说明此阶段,涂层中横向裂纹快速扩展、分层的区域和面积不断扩大,最终在热梯度和冷热交替循环作用下,使涂层剥离的弯曲力矩增大,导致涂层剥离。

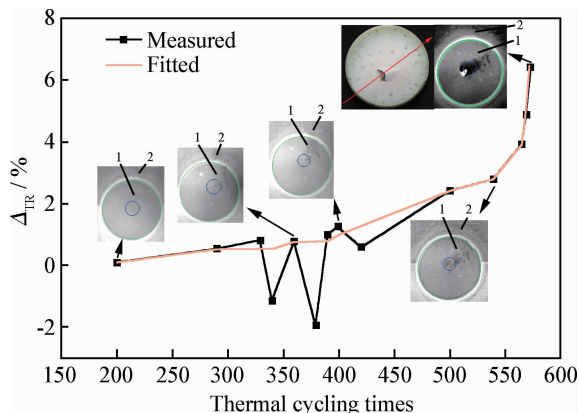
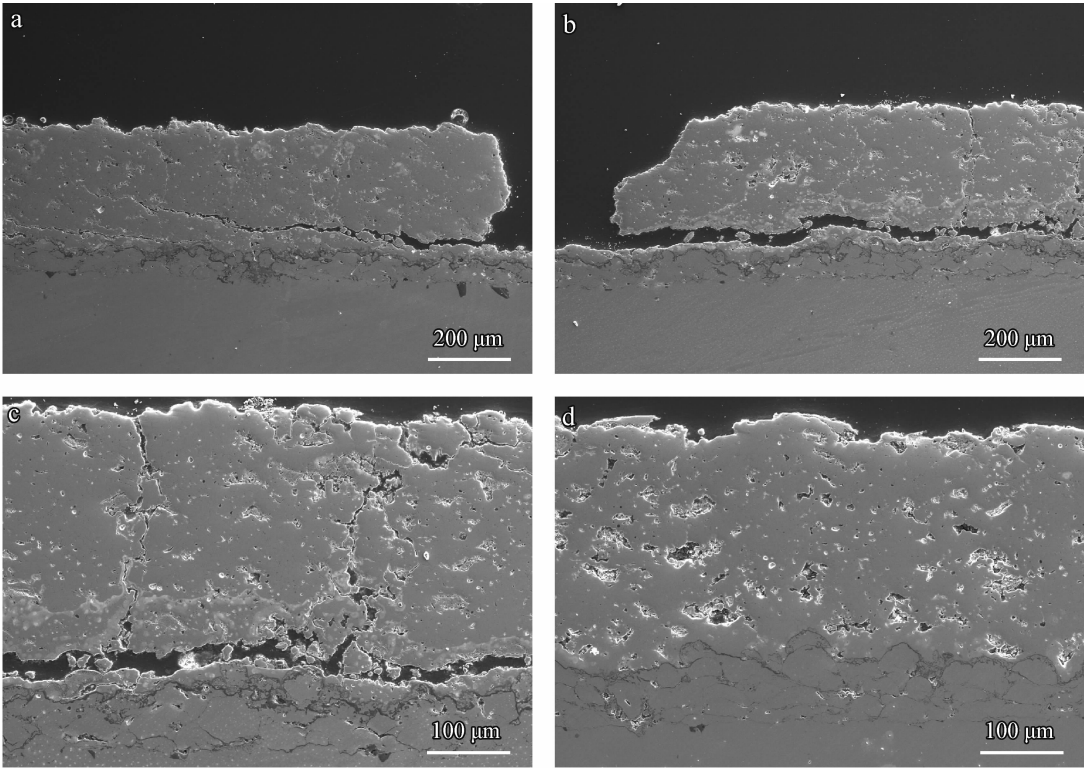


图 6 573 次热循环失效后样品 Δ_{TR} 随热循环次数变化规律

Fig. 6 Relationship between Δ_{TR} and thermal cycling times of failure sample after 573 times of thermal cycles

对 573 次循环失效后样品进行了截面形貌分析,样品切割位置如图 6 中 573 次循环后样品表面横线,陶瓷层发生了明显的剥离,剥离区域从涂层外观和红外热图中均可发现,热图中表现为高辐射值的亮斑。图 7(a)(b)为失效剥离区域截面形貌,发现剥离区域已接近 TGO 界面,这是由于在 570 次左右涂层中开始出现剥离区域,后续的几个循环造成了涂层在深度和广度方向上剥离区域的进一步扩大,剥离至 TGO 界面后,无陶瓷层隔热作用,导致其它部位聚集的热量会在快速向此区域扩散,导致降温过程中始终处于相对高温的高辐射水平;在明显翘起区域的周边,陶瓷层中也发生了明显的分层开裂现象,如图 7(c)所示,进一步验证和说明了涂层的失效时累积过程,也可对应为涂层在热循环过程中裂纹逐步萌生、扩



(a) Failure and spallation area (b) Failure and spallation area (c) Area around spallation area (d) Area away from failure

图 7 573 次循环失效后样品截面形貌

Fig. 7 Cross-section micrographs of failure samples after 573 times of thermal cycling

展,直至连接,会造成低辐射异常区域(暗斑)和辐射差异水平参数逐步增大。在远离涂层失效区域(无暗斑区域),涂层保持了良好的结构完整性,陶瓷层内部未见明显的分层开裂。

基于以上分析,验证了热障涂层在热循环过程中失效区域累积扩展过程,基本上可以划分为3个阶段:① 340 次热循环前,降温过程中缺陷对热传导影响极低,红外热图中无明显差异,认为此阶段基本无热异常,或涂层内部缺陷尺度较小,所引起热异常使用该热像仪无法捕捉;② 340 次至 540 次热循环间,涂层的热异常逐步增大,表现为暗斑颜色缓慢加深和辐射差异水平参数缓慢增大,说明该区域缺陷尺寸、数量或密度引起了降温过程中热传导的差异,导致了这一现象,且缺陷在缓慢扩展;③ 540 次至涂层失效,热异常快速增多,暗斑区域颜色明显变暗,辐射差异水平参数显著增大,说明此时涂层内部空气层的体积明显增大,涂层内部缺陷已经扩展和连接至一定程度,已经产生了明显的分层现象,但此阶段多数循环次数下通过肉眼观察涂层外观无法识别。

对多个样品热循环失效后涂层表面不同缺陷

的寿命周期及辐射异常水平参数进行了分析,结果如图 8 所示。针对 5 个样品中 7 个最终剥离失效的缺陷位置进行了辐射差异水平的分析,总体规律呈现在 50%~60%缺陷寿命周期之前,通过红外热像信号的分析,此阶段热图均匀无异常辐射,辐射差异水平较低,通常低于 2%(不同涂层存在差异),可认为此阶段涂层内部无明显红外热像可捕捉的缺陷,定义为涂层稳定阶段;在缺陷 50%~60%至 80%~90%寿命周期内,红外热图中出现了可见的低辐射区域(暗斑),表面涂层内部缺陷对热传导影响达到红外热像仪可捕捉的阶段,表现为辐射差异水平参数缓慢升高,即对应涂层内部横向微裂纹含量增大或空气层体积缓慢增大,将此阶段定义为热异常扩展阶段;80%~90%缺陷周期之后,热异常区域产生急剧变化,表现为暗斑颜色显著加深、区域增大,同时该区域中暗斑出现了连接现象(图 6),同时辐射差异水平参数急剧增大,直至该区域肉眼可见剥离失效,说明此阶段涂层内部微裂纹产生了较快的扩展和连接现象,冷热交替过程中此区域产生了明显的分层现象,将此阶段定义为该区域的加速失稳阶段。

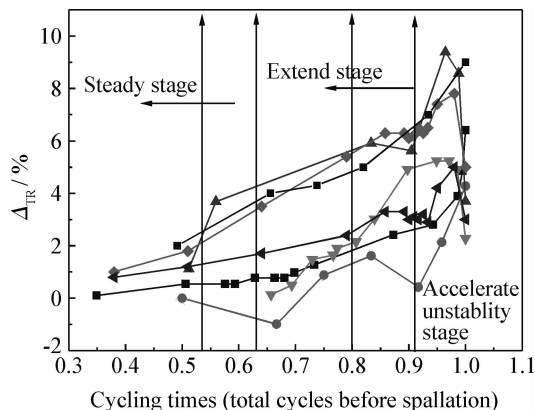


图 8 不同样品最终失效剥离区域 Δ_{TR} 在缺陷寿命周期内变化规律

Fig. 8 Δ_{TR} of final sapllation area change within life cycle of defects in various samples

与 573 次剥离失效后样品存在差异的是,部分样品在加速失稳阶段出现了辐射差异水平的降低,经分析,发现导致这一现象的原因是较大剥离之前的几个循环,涂层已发生了剥离,随后导致陶瓷层逐步剥离至 TGO 界面,陶瓷层隔热作用丧失,导致其它区域热量在降温过程中向此区域汇聚,形成相对高辐射区域。

4 结 论

利用红外热成像系统实现了模拟服役环境下热障涂层热循环过程中的原位检测,验证了陶瓷层内部缺陷导致的降温过程中不同区域热量传导差异引起缺陷区域表面辐射水平降低的测试表征原理,发现最终剥离失效区域与辐射水平正常区域的红外辐射值(利用像素值表征)差异随热循环次数增多而逐步增大,同时剥离区域边缘在一定的循环次数后也与正常区域表现出明显的差异,为涂层内部的缺陷扩展和表面的热异常变化分析奠定了良好的基础。

确定了降温过程中的最佳分析时间范围,并提出了以辐射差异水平参数 Δ_{TR} 来表征涂层内部损伤趋势。通过系统的研究,利用辐射差异水平参数 Δ_{TR} 可将热障涂层的内部损伤划分为 3 个阶段:① 稳定阶段,缺陷寿命周期 50%~60%之前的热循环阶段,无对热异常产生或涂层局部剥离失效影响的缺陷产生;② 热异常扩展阶段,50%~60%至 80%~90%寿命范围内,此阶段可实现最

终缺陷剥离位置及剩余循环次数的预判;③ 加速失稳阶段(80%~90%寿命周期后),此阶段涂层内部分层开裂情况显著增大,可预测较短的循环次数后缺陷区域将剥离失效。

参考文献

- [1] Miller R A. Thermal barrier coatings for aircraft engines: history and directions [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 1997, 6(1): 35-42.
- [2] Evans A G, Hutchinson J W. The mechanics of coating delamination in thermal gradients [J]. Surface and Coating Technology, 2007, 201(18): 7905-16.
- [3] Kempshall B W, Sohna Y H, Jhaa S K, et al. A micro-structural observation of near-failure thermal barrier coating: a study by photo-stimulated luminescence spectroscopy and transmission electron microscopy [J]. Thin Solid Films, 2004, 466: 128-136.
- [4] Zhang C X, Zhou C G, Gong S K, et al. Evaluation of thermal barrier coating exposed to different oxygen partial pressure environments by impedance spectroscopy [J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 201(1/2): 446-451.
- [5] Tolpygo V K, Clarke D R, Murphy K S. Evaluation of interface degradation during cyclic oxidation of EB-PVD thermal barrier coatings and correlation with TGO luminescence [J]. Surface and Coatings Technology, 2004, 188-189: 62-70.
- [6] Bison P, Cernuschi F, Grinzato E. In-depth and in-plane thermal diffusivity measurements of thermal barrier coatings by IR camera: evaluation of ageing [J]. International Journal of Thermophysical, 2008, 29(6): 2149-61.
- [7] Newaz Golam, Chen X Q. Progressive damage assessment in thermal barrier coatings using thermal wave imaging technique [J]. Surface and Coatings Technology, 2005, 190(1/2/3): 7-14.
- [8] Franke B, Sohn Y H, Chen X, et al. Monitoring damage evolution in thermal barrier coatings with thermal wave imaging [J]. Surface and Coatings Technology, 2005, 200(5/6): 1292-7.
- [9] Perkowski Z. A thermal diffusivity determination method using thermography: theoretical background and verification [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2011, 54(9/10): 2126-35.

作者地址: 北京德胜门外北沙滩一号 49 号信箱 100083
中国农业机械科学研究院表面工程技术研究所
Tel: (010) 6488 3291
E-mail: heqing68@gmail.com