

# 声发射技术在热障涂层失效机理研究中的应用

张 辉<sup>1</sup>, 李树君<sup>1</sup>, 王伟平<sup>1</sup>, 田贺红<sup>1</sup>, 武铁军<sup>1</sup>, 方 涛<sup>2</sup>, 汪瑞军<sup>2</sup>, 张天剑<sup>2</sup>

(1. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083; 2. 北京金轮坤天特种机械有限公司, 北京 100083)

**摘 要:**模拟高温下的实际工况并研究高温下热障涂层的失效机理对热障涂层的研究具有积极意义。在自主研发的热循环试验机中引进声发射技术,对涂层高温性能进行了研究和试验,初步对声发射信号特征与涂层寿命之间的关系进行了探索性研究,实现了对裂纹的实时、动态监测,而且能够得到与理论上疲劳裂纹扩展速率曲线相似的结果。通过大量数据分析,证明利用声发射技术研究热障涂层失效机理是可行的。

**关键词:**声发射检测;热障涂层;失效机理;热循环试验

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2010)06-0409-03

## Application of Acoustic Emission Technology in Research of Failure Causation in Thermal Barrier Coatings

ZHANG Hui<sup>1</sup>, LI Shu-Jun<sup>1</sup>, WANG Wei-Ping<sup>1</sup>, TIAN He-Hong<sup>1</sup>, WU Tie-Jun<sup>1</sup>, FANG Tao<sup>2</sup>,  
WANG Rui-Jun<sup>2</sup>, ZHANG Tian-Jian<sup>2</sup>

(1. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China;

2. Beijing Goldai Wheel Special Machine Co Ltd, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Thermal barrier coatings (TBCs) are currently used in turbine engine components to protect substrate material from being exposed to high temperatures and corrosion, especially in protection of advanced turbine blade. How to simulate high temperature working condition and research of TBC failure mechanisms under high temperature has great significance. A thermal cycle test machine was developed by us through introducing acoustic emission technology. With test machine, test and research of TBC performance under high temperature was in progress. Relation between AE signal characteristic and TBC life prediction was studied initially. It realized dynamic monitoring the crack in real time, and was able to get similar expanding rate curve with theory. It was proved by large amount of data analysis that AE technology was feasible to research of failure causation in thermal barrier coatings.

**Keywords:** Acoustic emission testing; Thermal barrier coatings; Failure mechanisms; Thermal cycle test

热障涂层(TBC)主要用于防止基材合金受热及化学侵蚀,特别是应用在先进飞机发动机叶片的防护。飞机发动机叶片 TBC 涂层失效主要原因有<sup>[1]</sup>: 金属氧化物 TGO 的形成、陶瓷层的相变与烧结和

热膨胀系数失配及涂层中的材料固有性能。随着科技的进步,目前对 TBC 涂层失效研究手段也在逐步地得到改善,如利用电镜扫描技术、拉曼光谱扫描技术、CT 方法及数值模拟等手段,研究 TBC 破裂失稳全过程并分析各个热循环阶段的力学特征。TBC 失效过程是一个相当复杂积累损伤的动态过程,采用声发射检测技术对 TBC 涂层裂纹的产生、发展和断裂过程进行监测,与传统的裂纹检测相比,不仅能够实现裂纹的实时、动态监测,而且能够得到与理论

收稿日期: 2009-09-07

基金项目: 国防 973 资助项目(613112)

作者简介: 张 辉(1980—),男,工程师,博士研究生,主要从事检测与控制系统开发,目前致力于航空发动机涡轮叶片热障涂层性能检测方面工作。

上疲劳裂纹扩展速率曲线相似的结果。因此,采用声发射技术对 TBC 涂层破裂进行动态监测有很好的工程应用前景,在疲劳裂纹的预估和疲劳寿命的预测方面仍须更多的试验研究。

## 1 检测系统构成

### 1.1 声发射技术引入

由于声发射对缺陷起始和扩展的特有敏感性,以及其所具有动态检测强度和评估使用寿命的独特功能,近年来,复合材料无损检测与评价技术已经把重点转移到利用声发射技术检测材料缺陷(包括微观缺陷)、损伤的萌生与扩展,并据以评估缺陷的危害程度,测定结构强度和预期使用寿命。国外已有利用声发射技术监测 TBC 涂层破裂的研究,甚至利用 AE 信号分析进行 TBC 寿命预测评估。

通常,热膨胀失配是决定涂层应力状态的主要参数,但不能忽视长期服役中氧化作用对性能的影响,特别是由热生长氧化物(TGO)引起的化合物内部新应力分布。笔者采用声发射技术监测热循环过程的损坏累积,并由此找到一些可靠参数分析涂层失效机理,进而服务于先进涂层的制备<sup>[2-7]</sup>。

### 1.2 声发射热循环试验构成原理

试验机采用自行研制的热循环装置(图 1)。利用氧、丙烷燃气加热,压缩空气冷却方法对航空发动机热端部件工作环境进行模拟。试样正反面均装有高精度红外测温装置,实时监控温度变化情况。试样基体上焊有波导杆,末端装有声发射信号传感器,采集到的 AE 信号经放大送入计算机处理。

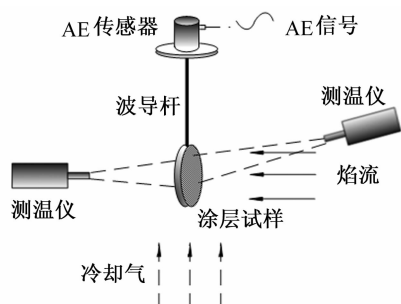


图 1 系统工作原理简图

声发射传感器用于接收材料内部的声发射信号,其性能对测试非常重要,试验机中采用 RLI50 型声发射专用传感器。其信号采集部分是压电陶瓷,可采集信号频率范围是 50~300 kHz。声发射传感器的电压输出信号非常弱,需要放大器放大后再传输。选用的前置放大器是一种通用放大器,可获得 20,40 和 60 dB 的增益。具有单端输入和差分

输入两种输入方式。选用 PCI 声发射卡对声发射特征参数和波形进行实时处理,具有 18 位 A/D 转换,3 kHz~3MHz 频率范围。计算机分析软件采用 AEwin TM。该实时声发射分析软件包括前端数字滤波、图解滤波、AE 特征提取、报警输出、各种定位功能、2D 和 3D 图形、多参数分析、聚类分析、波形处理及相关分析、HIT 数据线形显示、统计及重放功能等。

## 2 试验分析

热循环试验过程如下:将试样涂层面加热到 1 200 °C 并保持 5 min,然后用压缩空气冷却到 300 °C 以下,重复两个过程进行热循环试验,热循环温度曲线如图 2 所示,曲线为涂层试样正反面温度值。热循环的同时,连接在试样上的 AE 系统不断记录声发射数据并转换成点图、曲线等数据格式以供分析。

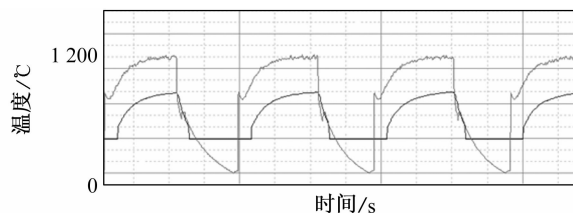


图 2 热循环温度曲线图

经计算机分析处理后系统给出的声发射参数主要有累积事件数、累积计数、累积能量、各事件的波幅峰值,如图 3 所示。

如图 3(a)和(b)所示,信号幅度和事件数随着热循环次数增加而增加,这是由于涂层中不断增多的微裂纹所致。在图 3(b)中,一个循环中  $t_1$  对应热循环中加热阶段, $t_2$  为冷却阶段,可以看出刚进入加热阶段与冷却阶段时会产生高声发射数量,说明温度的急升与陡降会导致涂层间的强应力,进而产生大量声发射信号。 $t_1$  区间内信号数从较高逐渐衰减到没有,对应热循环从升温到保温的过程,这是由于大多数声发射信号产生于温度变化的过程中,且温度变化快慢直接对应信号数量的多少,这与试验中涂层剥落发生在温度急升时的试验现象相吻合。从图中容易发现各周期分析试样内部产生作用力随循环次数增加越来越强烈,通过定量分析可以作为判断涂层性能和预测涂层寿命的依据。

图 3(c)是一块全新试片进行前几次热循环试验时的声发射信号数量图。 $T_1$  为第一个加热阶段与保温阶段, $T_2$  为第一个冷却阶段, $T_3$  为第二个加

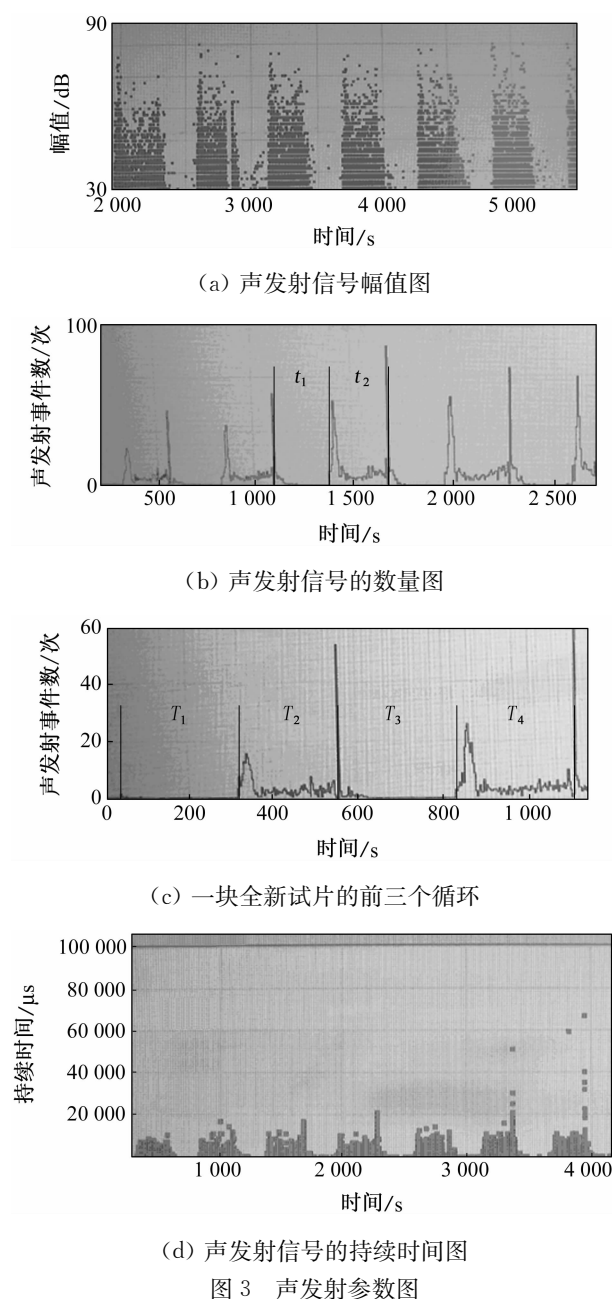


图3 声发射参数图

热与保温阶段,  $T_4$  为第二个冷却阶段。第一个加热阶段由于来自结合层弹性变形及氧化的比例较少, TGO 界面层应力未达到材料所受的最大先期应力, 所以没有明显的声发射出现。而在第二个加热阶段, 产生了大量声发射信号, 这是由于热氧化生长层 TGO 在热循环过程中的疲劳与涂层内应力的综合作用结果, TGO 的生长使得应力超过过去的最大值时, 声发射速率明显增加。该特征性的增加, 说明热障涂层应力也具有 Kaiser 效应。

图 3(d) 中可以发现, 从 4 000 s 后, 温度急升过程中会产生高持续时间的声发射信号。根据在线工业 CCD 捕捉到的照片(图 4), 可以发现试样涂层有

轻微的剥落。图 3(d) 中, 当 AE 信号均为高持续时间(100 000 s), 出现了大量中间信号(持续时间在 20 000~100 000 s), 同时发生涂层剥离的现象。多次试验验证这些信号是由于涂层剥落所产生的 AE 信号。

### 3 结论

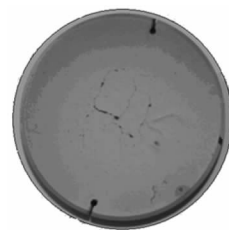
试验结果表明, 涂层在热循环过程中产生了大量 AE 信号, 包括频率、振幅、数量以及持续时间等, 这些信号的特征与涂层失效存在着必然联系, 且声发射信号能够反映

TBC 裂纹动态演化过程。声发射事件主要是由于裂纹扩展产生的, 并随温度-应力变化表现出不同的特征: 在初始加载阶段至初始裂纹出现之前, 其声发射活动不很明显; 一旦 TBC 出现初始裂纹, 在相应应力点声发射事件明显增多; 在微裂纹扩展的非稳定阶段至涂层破坏瞬间, 声发射活动变得异常活跃, 声发射事件变化率最大。

声发射疲劳裂纹监测的主要困难在于疲劳试验过程中的大幅度机械噪声干扰, 如焰流冲击、机械震动以及冷却冲击所产生的噪声, 其幅度大, 频率分布广, 使得微弱的疲劳裂纹萌生和扩展产生的声发射信号被湮没。下一步可以通过更多试验与更优的信号处理方法, 建立数学模型, 对涂层性能及寿命进行有效评估。

### 参考文献:

- [1] 徐惠彬, 宫声凯, 陈立强, 等. 热、力耦合作用下热障涂层的失效机制[J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(10): 919-924.
- [2] 廖传军, 李学军, 何宽芳. 基于声发射的旋转机械在线检测系统设计[J]. 机床与液压, 2007, 35(5): 229.
- [3] Bordyugov D M, Erminson A L. Acoustic emission energy in process of concrete collapse[J]. Defektoskopiya, 1992, 9(2): 27-31.
- [4] 刘怀喜, 张恒. 人工神经网络在碳/环氧复合材料声发射检测中的应用[J]. 无损检测, 2004, 26(12): 628.
- [5] 耿荣生, 沈功田, 刘时风. 声发射信号处理和分析技术[J]. 无损检测, 2002, 24(1): 23-28.
- [6] 李建保, 周益春. 新材料科学与实用技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 476-479.
- [7] 李耀东, 黄成祥, 侯力, 等. 疲劳裂纹的声发射信号检测技术[J]. 自动化测试, 2004(6): 504-506.

图4 4 000 S时刻  
样片涂层剥离状态