

特约专栏

# 热障涂层失效的声发射实时表征技术研究进展

杨 丽<sup>1,2</sup>, 周益春<sup>2</sup>, 朱 旺<sup>2</sup>

(1. 西安电子科技大学先进材料与纳米科技学院, 陕西 西安 710126)

(2. 湘潭大学材料科学与工程学院, 湖南 湘潭 411105)

**摘 要:** 耐高温、高隔热的热障涂层能有效降低涡轮叶片金属基底工作温度, 从而提高发动机的热效率与性能, 被列为航空发动机的关键热防护技术。然而, 在燃气热冲击、冲蚀、腐蚀等恶劣环境中服役时, 热障涂层极易产生涂层裂纹、界面裂纹、变形等多种损伤, 并最终导致涂层剥落的形式失效。采用声发射技术实时无损检测服役环境下热障涂层裂纹萌生与演化的过程, 是表征涂层失效过程、揭示其机理进而预测最终剥落的有效手段。阐述了热障涂层裂纹演化的高温声发射检测方法, 并着重从损伤模式、定量评估方法及基于此的热障涂层失效机理等研究方面, 介绍了热障涂层失效的声发射实时表征技术的研究进展, 并对其发展趋势进行了展望。

**关键词:** 热障涂层; 裂纹演变; 声发射检测; 模式识别; 失效机理

**中图分类号:** V261.93<sup>+</sup>3; V23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2020)11-0878-19

## Research Progress in the Real-Time Acoustic Emission Characterization of Failure in Thermal Barrier Coatings

YANG Li<sup>1,2</sup>, ZHOU Yichun<sup>2</sup>, ZHU Wang<sup>2</sup>

(1. School of Advanced Materials and Nanotechnology, Xidian University, Xi'an 710126, China)

(2. School of Materials and Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

**Abstract:** Thermal barrier coatings (TBCs), with high temperature durability and excellent heat insulation, can effectively reduce the working temperature of metal base made for turbine blade, bringing about a significant improvement in both efficiency and performance of engines. Therefore, TBCs have been continually developed as a key thermal protection technique for aero-engines. However, TBCs are likely to be subject to serious damage like coating crack, interface crack, deformation and so on under serving at the complicated environment including gas shock, erosion, corrosion, etc., which finally will peel off and fail to function. Acoustic emission technology can real-time detect crack's initiation and evolution process in TBCs nondestructively, which is an effective method to supervise the failure process, discover the failure mechanism and predict the failure-time for TBCs. In this paper, research progress of the high temperature acoustic emission technology on detection of the failure for TBCs will be introduced, and the method itself, crack mode identification, quantitative damage evaluation and failure mechanisms of TBCs obtained based on the method will all be elaborated in detail.

**Key words:** TBCs; crack evolution; acoustic emission technology; crack mode identification; failure mechanisms

## 1 前 言

热障涂层 (thermal barrier coatings, TBCs) 是 1953 年

由美国国家航空航天局 (NASA) 提出的一种耐高温陶瓷涂层/金属基底体系<sup>[1]</sup>, 与单晶、气膜冷却并列列为“世界航空推进计划”的三大隔热防护技术。单晶高温合金正以每年 1~2 °C 的增速艰难地挑战材料极限<sup>[2]</sup>; 气膜冷却技术发展潜力也有限, 并已接近加工极限; 但应用厚度约 250 μm 的热障涂层能使基底温度降低 110~170 °C, 相当于过去 30 年发展高温合金的总和<sup>[1-3]</sup>。因此, 热障涂层被认为是目前提高发动机服役温度最切实可行的办法。早在 2002 年, 美国 Connecticut 大学 Padture 教授在 *Science* 的约稿中指出: 热障涂层是最急需应用在航空发动

收稿日期: 2020-07-27 修回日期: 2020-10-12

基金项目: 国家自然科学基金重大项目 (11890684, 51590891);  
国家自然科学基金面上项目 (51672233); 湖南省自然科学  
科学创新研究群体基金项目 (2020JJ1005)

第一作者: 杨 丽, 1980 年生, 女, 教授, 博士生导师,

Email: lyang@xtu.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202007034

机高温部件的热防护涂层<sup>[3]</sup>。2012 年, 美国工程院院士、哈佛大学 Clarke 教授在美国材料高峰论坛热障涂层的专集中进一步强调: 今后航空发动机热效率、推重比、可靠性的进步, 将极大程度上依赖于热障涂层技术的发展<sup>[4]</sup>。

热障涂层一般由隔热防护的陶瓷层、承受机械载荷的基底层、增强陶瓷与基底粘结力的中间过渡层以及在制备和服役过程中形成的氧化层组成, 各层之间界面结构复杂。在长时间燃气热冲击、颗粒冲蚀、气膜冷却、叶片(转速为 10 000~50 000 r/min)旋转离心力等极端环境下, 涂层经历以秒为单位瞬间达到上千度的急冷急热, 伴随界面氧化、CMAS(钙镁铝硅混合氧化物)腐蚀等化学反应, 极易发生不可预知的涂层剥落。美国 NASA、德国能源中心等研究机构以及著名学者 Padture、Hutchinson 多次强调和呼吁, 热障涂层是所有涂层系统中结构最复杂、服役环境最恶劣的涂层体系, 剥落问题是制约其应用的瓶颈和急需解决的关键问题<sup>[3, 5, 6]</sup>。如果能对其失效过程进行实时无损检测, 即直接“看”损伤在制备或服役过程中的形成、演化过程, 则能为失效行为的理解提供直接依据和指导。Padture 和 Hutchinson 都指出: 实时、原位、无损的测试方法将是研究热障涂层失效问题的可行方法和手段<sup>[3, 6]</sup>。近年来, X 射线衍射、 $\text{Cr}^{3+}$ 压电光谱、复阻抗谱、红外光谱、同步辐射扫描等多种检测方法, 已经应用于热障涂层应力场、界面氧化层、界面脱层、孔隙等损伤检测与测量的研究中<sup>[7-11]</sup>。

裂纹是涂层剥落前的重要失效形式, 对裂纹萌生与演化的过程进行实时检测是揭示剥落机制的有效手段。裂纹萌生与扩展都会释放出应变能, 产生声发射(acoustic emission, AE)信号。而且, 声发射信号会因为材料性质、裂纹模式、外载荷等的不同而表现出差异。因此, 声发射检测成为裂纹萌生与演化研究的一种重要手段。然而, 对热障涂层而言, 声发射检测存在 3 个巨大的挑战: ① 高温燃气等复杂环境下裂纹信号的检测; ② 如何识别复杂多样的裂纹模式; ③ 损伤程度的定量评估。本文主要总结了热障涂层裂纹演变的声发射实时表征研究进展, 包括高温复杂环境下的声发射检测方法、模式识别、定量评估方法以及基于声发射实时表征所揭示的热障涂层失效机理, 并分析了还需解决的关键问题及研究重点。

## 2 热障涂层高温声发射实时检测方法

高温热循环、燃气热冲击、高温氧化、高温 CMAS 腐蚀、热-力联合、热-力-化耦合等高温复杂环境, 是热障涂层不可避免的服役载荷, 因而实现这些复杂环境下

的声发射信号检测, 是理解其失效过程与失效机制的必然要求。要实现高温等复杂环境下声发射信号的检测, 存在两大难题, 一是信号的传输, 二是噪音信号的处理。

### 2.1 基于波导杆/丝传输的高温声发射信号检测方法

(1) 波导杆技术。利用声波传输性能优异的耐高温金属棒, 将样品中的裂纹声发射信号传输至声发射传感器的同时, 避免声发射传感器与高温接触。采用波导杆传输时, 是将波导杆的一端与样品通过密封剂和机械装置紧密连接, 尽可能使样品与波导杆紧密接触, 另一端与声发射传感器耦合。采用波导杆连接实验样品和传感器, 避免了传感器与高温样品直接接触。一般来说, 波导杆为声阻抗小、耐高温的金属棒, 如直径为 5 mm 的不锈钢管。2000 年, 新加坡 Fu 等成功利用波导杆技术实现了热障涂层高温热循环时冷却阶段损伤信号的声发射检测<sup>[12]</sup>。基于这一思想, 中国科学院上海硅酸盐研究所王亮也提出了采用与热障涂层陶瓷层材料性质相同的氧化锆基陶瓷波导杆, 通过弹簧加固装置保证与热障涂层紧密接触, 以此实现了燃气热冲击下热障涂层失效过程的声发射检测<sup>[13]</sup>。

(2) 波导丝技术。对热障涂层, 尤其是具有复杂曲面结构的涡轮叶片热障涂层, 理想的波导丝应满足: ① 有较好的柔软性, 能跟随热障涂层样品的移动而方便地移动, 自身不产生振动或应力波从而避免形成多余的声发射源; ② 能快速、低衰减地传递应力波, 避免丢失微弱的声发射信号; ③ 尽可能小的波形失真, 实际上由于波导丝的材料、几何尺寸与样品不同, 会使得声发射信号在波导丝的传播过程中发生波型转变, 应尽可能地选择波形失真小的波导丝; ④ 有较高的熔点, 能保证波导丝在高温炉中不被熔化。基于此, 作者提出了波导丝传输技术<sup>[14]</sup>, 即采用可自由移动且声波传输性能好的高熔点金属丝进行信号采集。如图 1 所示的热障涂层高温热循环实验示意图<sup>[14]</sup>, 采用铂丝、镍丝等, 将其一端与热障涂层基底自由面点焊、或是通过密封剂和机械装置紧

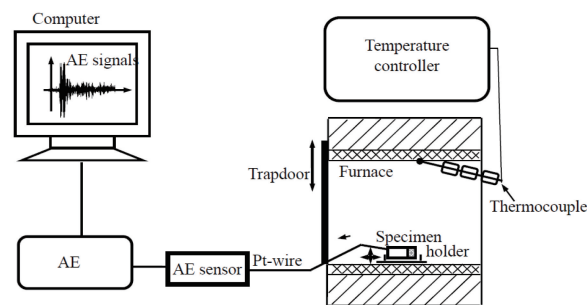


图 1 热障涂层热疲劳失效的声发射检测方法<sup>[14]</sup>

Fig. 1 AE test method on detection of thermal fatigue failure for TBCs<sup>[14]</sup>

密连接, 保证良好接触, 另一端与声发射传感器耦合, 以此实现高温等复杂环境下热障涂层失效全过程的声发射信号检测。

## 2.2 声发射信号除噪方法

复杂环境下的噪声问题, 一直是困扰声发射检测的难题。为此, 作者提出了一种基于区域信号选择的除噪方法<sup>[15]</sup>, 基本的思想是根据声波在样品中的传输速度来设置声发射信号的最长和最短响应时间, 以此来获得所感兴趣区域的声发射信号, 从而将其他区域, 如来自于加载设备与环境中的噪声排除。

以一维热障涂层杆件为例, 将传感器 A 和 B 分别放置于长度为  $L$  的热障涂层试样两端, 则 A 和 B 接收损伤声发射源信号的最远距离为  $L$ 。假设热障涂层声波传输速度为  $v$ , 则传感器 A 和 B 接收的损伤声发射源信号的最大响应时间均为式(1):

$$t_{\max} = \frac{L}{v} \quad (1)$$

因此, 可设置信号到达传感器 A、B 的时间都不大于  $t_{\max}$  时为有效信号, 否则为噪音信号, 予以屏蔽。

对涡轮叶片结构这样复杂的部件, 虽不能简化成一维结构, 也很难设计探头并准确计算最大响应时间, 但依然可以根据叶片三维方向的最大尺寸来设置最大响应时间, 从而屏蔽样品区域以外的大部分噪音。而因为响应时间不准确导致采集的机械噪声、电磁干扰等声发射信号, 可以通过声发射信号特性如频率、能量等信号分析手段来进一步排除, 将在第 3 部分予以阐述。

## 3 裂纹模式识别的关键参数分析

### 3.1 热障涂层典型失效模式

大量研究表明, 热障涂层在热、机械载荷及其联合作用下会出现 4 种失效模式, 即表面裂纹、剪切型界面裂纹、张开型界面裂纹和基底塑性变形<sup>[13, 14, 16-20]</sup>。如图 2 所示, 表面裂纹指陶瓷涂层中垂直于界面的裂纹, 通常由各层之间热失配引起的陶瓷层内拉应力  $\sigma_{11}$  所致; 剪切型界面裂纹指陶瓷层/粘结层界面处由剪应力  $\sigma_{21}$  所致的裂纹形式; 陶瓷层与粘结层界面处拉应力  $\sigma_{22}$  是导致陶瓷层剥离即产生张开型界面裂纹的主要机制, 通常  $\sigma_{22}$  是由于在粗糙界面处生长不均匀热生长氧化物所致; 在热应力、拉应力与压应力下都可以产生基底塑性变形。

### 3.2 基于特征频率的热障涂层失效模式识别

尽管 Ma 等<sup>[21]</sup>指出表面垂直裂纹与界面裂纹在波形上会显示出纵波、横波先后顺序的不同。但这些差异在实际中极难分辨。用声发射信号的时域波形进行模式识别十分困难, 这是因为信号会随传播距离、环境噪声以

及测量系统的改变而变化, 甚至发生波型转变。既然对声发射信号在时域空间即物理空间无法分辨出损伤模式, 是否可以换一个空间即在像空间来进行分析呢?

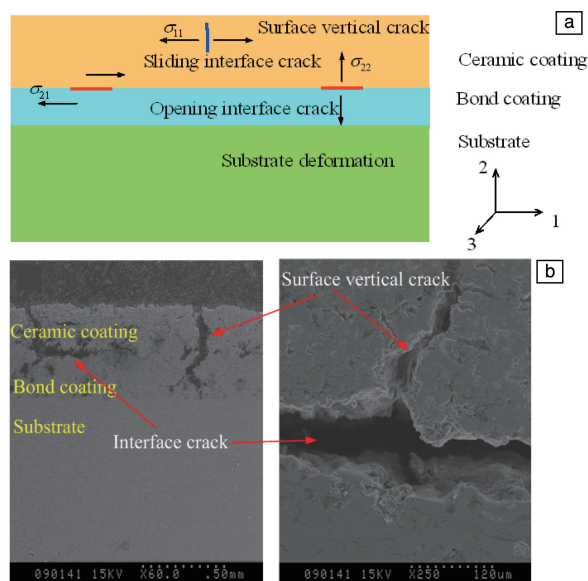


图 2 表面裂纹、剪切型界面裂纹、张开型界面裂纹和基底塑性变形 4 类损伤机制 (a); 表面裂纹和界面裂纹的 SEM 照片 (b)<sup>[14, 15]</sup>

Fig. 2 Four damage mechanisms: surface crack, shear interface crack, opening interface crack and substrate plastic deformation (a); SEM images for surface crack and interface crack (b)<sup>[14, 15]</sup>

傅里叶变换表明: 任何连续信号, 都可表示为不同频率正弦波信号的无限叠加, 即对直接测量的原始信号, 以积分方式来计算该信号中不同正弦波信号的频率、振幅和相位。从物理角度理解傅里叶变换是以一组特殊的函数(三角函数)为正交基, 对原函数进行线性变换, 其物理意义是原函数在各组基函数上的投影。其基本变换见式(2):

$$F(\omega) = F[f(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt \quad (2)$$

式中,  $\omega$  代表频率,  $t$  代表时间,  $e^{-i\omega t}$  为复变函数。

开展热障涂层拉伸与压缩实验, 并结合扫描电镜对涂层微结构进行观察。结果发现, 在拉伸载荷作用下, 早期的裂纹来源于涂层表面裂纹, 随后在界面处形成错开型界面裂纹。当拉应力达到基体材料屈服强度时, 基体出现塑性变形。压缩实验时, 根据泊松比效应, 界面会出现张开型界面裂纹。为此, 对各阶段的声发射信号进行了大量的统计分析, 作者发现了一个重要现象<sup>[15]</sup>: 拉伸时早期的声发射信号(图 3a), 其频率集中在 0.21 MHz(图 3b); 当表面裂纹饱和, 出现大量界面裂纹时, 大量声发射信号(图 3c)的频率在 0.29 MHz

(图 3d); 而基体塑性变形声发射信号(图 3e)的频率为 0.14 MHz(图 3f)。压缩实验时,除了拉伸载荷下的 3 种频率,还出现了第 4 种频率,即 0.44 MHz(图 3h)。尽管各种模式声发射信号的频率会在各自的集中频率附近波动,但各种模式之间表现出显著差异。为此,作者得出结论:热障涂层不同类型裂纹或变形的声发射信号与频率有关<sup>[22]</sup>。同年,英国伦敦大学的 Benson 等在 *Science*

上也指出:火山结构中的地震活动所发出的声发射信号会因震源模式的不同而出现不同的频谱特征<sup>[23]</sup>。颗粒增强金属基复合材料的声发射检测结果也显示,信号频谱只与破坏形式有关,而与裂纹尺寸及载荷大小无关<sup>[24]</sup>。因此,频率是识别热障涂层失效模式的关键参数,但这一参数是否唯一,机理是什么,仍需要进一步分析和证明。

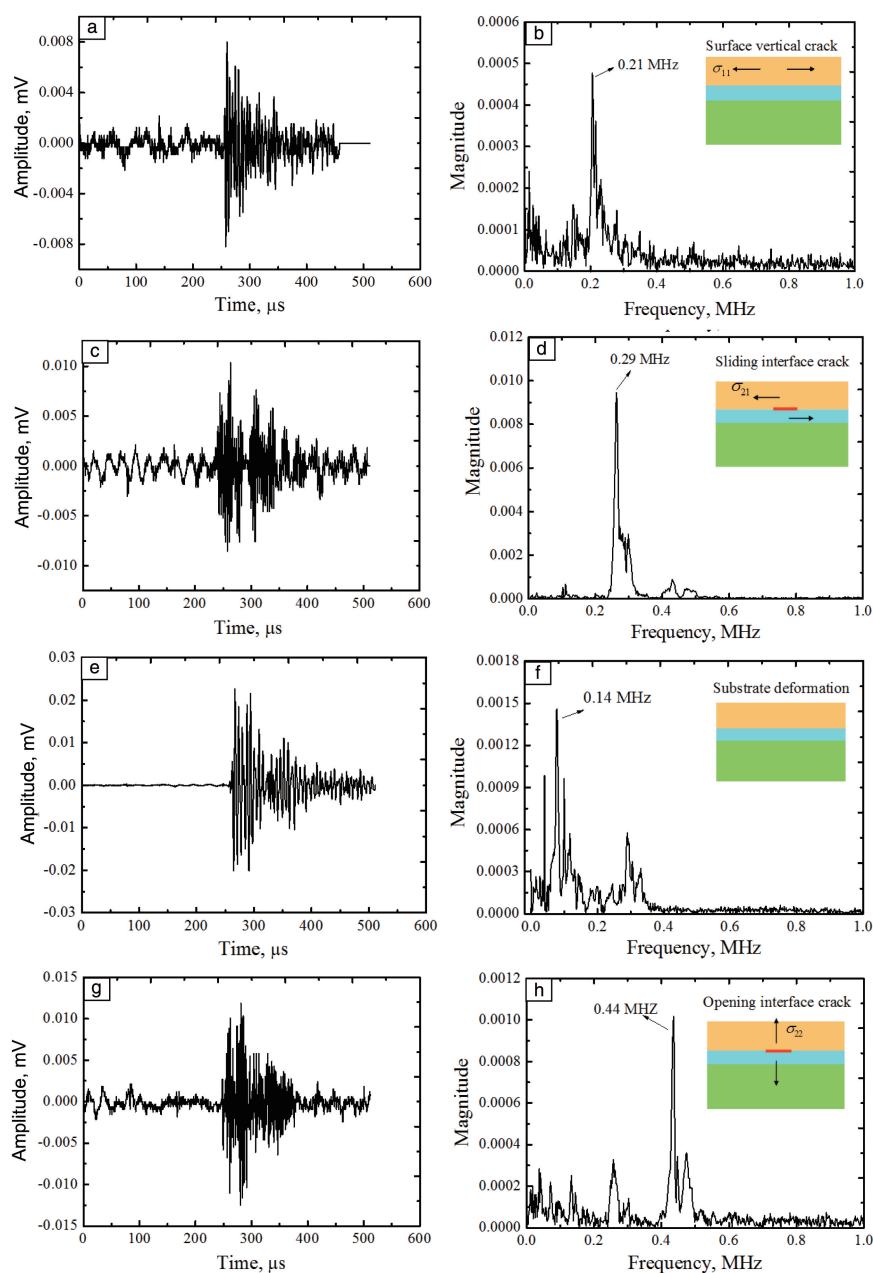


图 3 热障涂层的典型声发射信号<sup>[15]</sup>: (a, b)表面垂直裂纹, (c, d)滑开型界面裂纹, (e, f)基底变形, (g, h)张开型界面裂纹

Fig. 3 Typical signals obtained from AE method for TBCs<sup>[15]</sup>: (a, b) surface vertical crack, (c, d) sliding interface crack, (e, f) substrate deformation, (g, h) opening interface crack



### 3.3 基于聚类分析的模式识别特征参数提取

为证明频率是热障涂层裂纹模式识别的参数,作者基于聚类分析这一无监督模式识别方法<sup>[25]</sup>,提出了热障涂层声发射信号模式识别的  $k$ -均值算法。其过程可以概述为:首先通过声发射仪采集试样损伤声发射信号;然后提取声发射信号波形简化的特征参数;随后根据相似性测度、 $k$ -均值聚类方法与准则对各种特征参数进行聚类分析,把类别相同或相似的声发射信号分成一类;最后,根据聚类分析结果,建立损伤类别与声发射信号特征参数之间的关系,找出最能表征不同损伤模式的声发射信号。

$k$ -均值算法的基本原理是<sup>[26]</sup>:首先预定义分类数  $k$ ,并随机或按一定原则选取  $k$  个样品作为初始聚类中心;然后按照就近的原则将其余的样品进行归类,得出一个初始的分类方案,并计算各类别的均值来更新聚类中心;再根据新的聚类中心对样品进行重新分类,反复循环此过程,直到聚类中心收敛为止,聚类结束。

对于模式种类  $k$  的确定,一般根据轮廓值  $s$  (silhouette value) 来分析<sup>[26, 27]</sup>:

$$s(k) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{[\min(b(i, k) - a(i))]}{\max[a(i), \min(b(i, k))]} \quad (3)$$

其中,  $n$  为声发射信号的总数,  $b(i, k)$  表示第  $i$  个信号点与  $k$  个聚类中心的平均距离,  $a(i)$  是第  $i$  个信号点与同类信号其他点之间的平均距离。 $k$  不同,  $s$  将不同,  $s$  值越

大说明类与类之间分得越开,即聚类效果越好。一般认为  $s$  大于 0.6, 聚类非常有效,此时所对应的  $k$  也被认为是合理的类别数。

对声发射信号,可选取最具代表性的参数:幅值、峰频、能量、上升时间、持续时间作为聚类变量。可以看出,这 5 个参量量纲不同,数值之间也无从比较,需对聚类变量进行归一化,即把所有的参数都转化为  $[0, 1]$  之间的数。采用平均数方差标准化可将数据变换到均值为 0、标准差为 1 的标准正态分布变换,具体到某一参数,如幅值,假设有  $n$  个声发射信号,可求出这  $n$  个信号幅值的平均值和标准差,则第  $i$  个信号归一化的幅值为<sup>[28, 29]</sup>:

$$\bar{A}_i = \frac{A_i - A_\mu}{A_\sigma} \quad (4)$$

式中,  $A_i$  与  $\bar{A}_i$  分别为信号的幅值及其标准化后的幅值,  $A_\mu$  与  $A_\sigma$  分别为  $n$  个信号的幅值均值与标准差。

#### (1) 拉伸时热障涂层失效模式识别与特征参数提取

利用这一方法对热障涂层拉伸过程中的声发射信号,采用幅值、峰频、能量、上升时间、持续时间作为聚类变量对其进行聚类分析<sup>[30]</sup>。首先根据轮廓值  $s$  确定模式类别数  $k$ , 如图 4a 所示的  $s$ - $k$  曲线, 当将声发射信号分为 4 类时, 其  $s$  最大且大于 0.6, 说明拉伸时热障涂层损伤声发射信号可分为 4 类。图 4b 为拉伸试样损伤声发射信号聚类后幅值与峰频分布情况, 从图可知 A、B、C 3 类

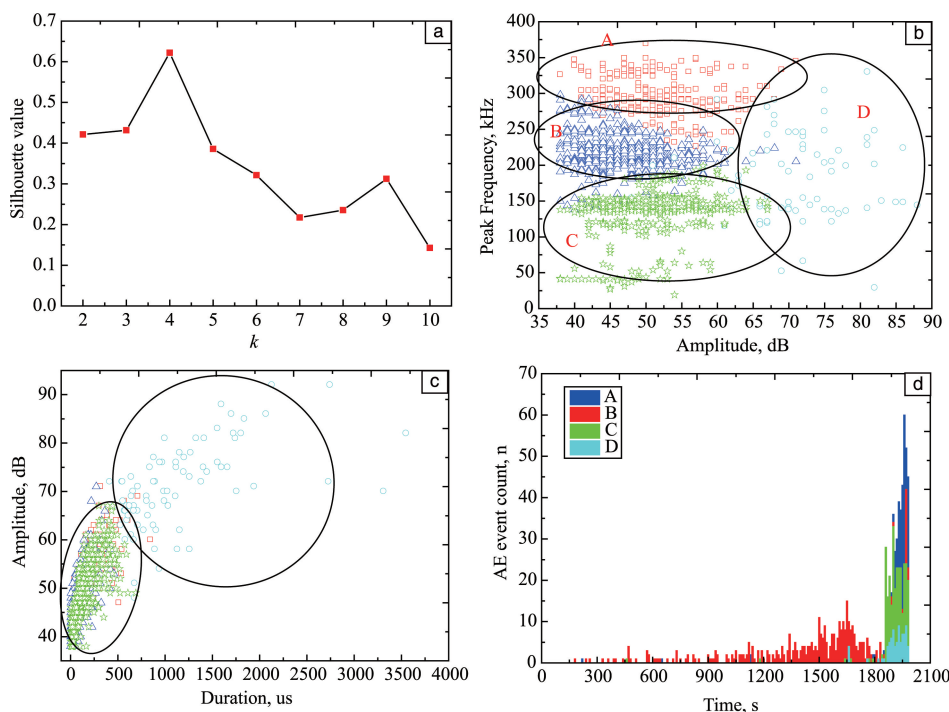


图 4 热障涂层拉伸失效声发射信号的聚类分析<sup>[30]</sup>: (a)  $s$ - $k$  曲线, (b) 幅值与峰频, (c) 幅值与持续时间, (d) 失效模式与时间的分布

Fig. 4 The clustering analysis of AE signals for TBCs subjected to tension failure<sup>[30]</sup>: (a)  $s$ - $k$  curve, (b) amplitude and peak frequency, (c) amplitude and duration time, (d) distribution of failure mode and loading time

信号在频率分布上存在 3 个明显不同的频率段, 分别为 250~350 kHz, 170~250 kHz, 40~150 kHz。但如图 4c 所示, 3 类信号在幅值和持续时间上没有区别。这说明, 频率是识别信号的有效参数。对 D 类信号而言, 幅值较 A、B、C 大, 但频率较为分散, 可认为 D 类是区别于 A、B、C 类的其他信号, 可结合失效特征进一步分析。图 4d 为拉伸过程中声发射信号的类型与拉伸时间的演变关系。从图可知, 拉伸失效过程中最先出现的为 B 类信号, 其后主要为 A 类信号, C 类与 D 类信号为相对较少的信号类型。研究表明<sup>[13, 14, 16~20]</sup>, 在拉伸加载过程中, 由于陶瓷层的应变容限差, 在早期阶段主要产生表面裂纹。由于陶瓷层较低的抗拉伸变形能力, 使得表面裂纹向陶瓷层/粘结层的界面迅速扩展。当表面裂纹到达界面处时, 裂纹将会沿着陶瓷层/粘结层的界面生长与扩展。A 类信号频率范围为 0.26~0.30 MHz, B 类信号频率范围为 0.20~0.23 MHz, 由此可以判断 B 类信号为表面裂纹信号, A 类信号为剪切型界面裂纹信号。C 类信号频率范围为 0.13~0.16 MHz, 其主要为基底塑性变形信号与一些噪声信号。D 类信号为幅值与能量都相当高的信号, 一般认为是高能量的宏观裂纹<sup>[18]</sup>。

## (2) 压缩时热障涂层失效模式识别与特征参数提取

为进一步明确失效模式识别及其频率特征参数的有效性, 对热障涂层压缩载荷作用下失效过程的声发射信

号, 用同样的方法对其进行聚类分析<sup>[30]</sup>。图 5a 为压缩载荷下声发射信号聚类  $s-k$  曲线, 当损伤声发射信号分成 5 类时,  $s$  取最大值 0.6512, 说明压缩载荷下损伤声发射信号可以分为 5 类。图 5b 为压缩试样损伤声发射信号聚类后幅值与峰频分布情况, 从图可以看出 A'、B'、C' 与 E' 4 类信号在幅值上基本相同, 分布范围都为 38~55 dB, 说明从幅值上不能将这 4 类信号区分开来, 但在频率上存在 4 个明显的频段, A' 类: 250~350 kHz, B' 类: 170~250 kHz, C' 类: 0~150 kHz, E' 类: 400~450 kHz。其中, A'、B'、C' 与拉伸失效过程的 A、B、C 信号频率相同, 说明它们的损伤模式相同, 也说明裂纹声发射信号的模式与加载方式无关。图 5c 是压缩时热障涂层损伤声发射信号聚类后幅值与持续时间的分布关系, 可以看出, A'、B'、C' 与 E' 4 类信号在幅值与持续时间分布上都存在很大的重叠, 很难进行分类, D' 类信号为幅值与持续时间相对较大的信号。图 5d 为压缩失效过程声发射信号的类型随着拉伸时间的分布, 从图中可知压缩失效过程中最先出现的为 E' 类信号, 其后主要为 A' 与 C' 类信号, B' 与 D' 类为相对较少的信号类型。研究表明<sup>[31]</sup>, 在压缩载荷下涂层在压应变小于 0.37% 时, 界面开裂以张开裂型界面裂纹为主; 而在涂层内压应变大于 0.37% 时, 界面开裂以剪切型界面裂纹为主。E' 类信号频率范围为 0.4~0.5 MHz, A' 类信号频率范围为 0.26~0.30 MHz, C' 类信

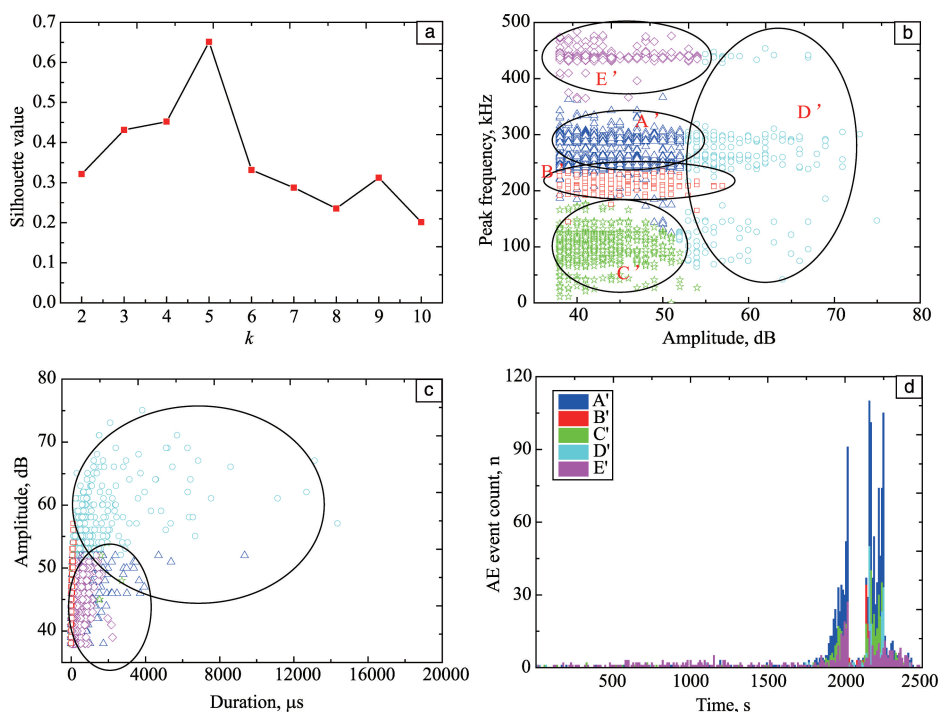


图 5 热障涂层压缩失效声发射信号的聚类分析<sup>[30]</sup>: (a)  $s-k$  曲线, (b) 幅值与峰频, (c) 幅值与持续时间, (d) 失效模式与时间的分布

Fig. 5 The clustering analysis of AE signals for TBCs subjected to compression failure<sup>[30]</sup>: (a)  $s-k$  curve, (b) amplitude and peak frequency,

(c) amplitude and duration time, (d) distribution of failure mode and loading time

号频率范围为 0.13~0.16 MHz。由此可以判断, E'类信号为张开型界面裂纹信号, A'类为剪切型界面裂纹信号, C'类为基底塑性变形信号以及一些低频噪声信号。B'类信号频率范围为 0.20~0.23 MHz, 所以 B'类信号为表面裂纹信号。D'类信号为幅值与能量都相当高的信号, 即高能量的宏观裂纹引起的声发射信号。

由上述聚类分析可以得出声发射信号峰频最能表征热障涂层损伤声发射信号模式类别, 而其他参数在分类上存在很大的重叠, 无法对声发射信号进行分类。因此, 频率是识别热障涂层裂纹模式的关键参数。与此同时, 通过对声发射信号频谱分析表明(结合图 4 和图 5), 表面裂纹信号频率范围为 0.20~0.23 MHz, 主频为 0.21 MHz; 剪切型界面裂纹信号频率范围为 0.26~0.30 MHz, 主频为 0.29 MHz; 张开型界面裂纹信号频率范围为 0.42~0.46 MHz, 主频为 0.44 MHz; 基底塑性变形信号频率范围为 0.13~0.16 MHz, 主频为 0.15 MHz。

#### 4 基于小波与神经网络的裂纹模式智能识别方法

从上面的分析可知, 频率是裂纹模式识别的特征参数, 但也可以看出每一种失效模式的频率并不是固定的, 而是在一定范围内变化。同时, 热障涂层失效过程中会产生成千上万的声发射信号, 对每一个信号进行频率变化并一一识别, 工作量巨大。如能有效提取声发射信号特征频段, 并实现智能模式识别, 则可大大提高效率。小波变换是一种信号的时间-尺度(频率)分析方法, 在时频两域都具有表现局部特征的能力; 神经网络是从信息处理角度模拟生物神经网络建立的一种数学方法, 通过已知模式的信号训练, 形成算法, 并以此为依据识别其他未知信号, 是大数据智能分析的一种有效手段。如能利用小波变换提取模式识别的关键参数如特征频段信息, 并以此建立神经网络训练算法, 则有可能实现声发射信号的智能模式识别。为此, 作者提出了基于小波变换与神经网络结合的裂纹模式智能识别方法<sup>[32]</sup>。

##### 4.1 小波与小波包变换

小波变换是指利用一系列具有不同频率窗口和时间分辨率的振荡函数, 也称为小波基函数或小波序列, 将信号在不同的频率窗口上进行分解, 展示其时域与频率空间的特征信息<sup>[33-35]</sup>。小波变换的特征在于, 将信号在频率空间进行逐层分解, 进一步分解时, 如果只对低频再进行分解, 称为小波变换; 如果同时也对高频进行分解, 则称为小波包变换。

声发射信号一般都是离散化的数据, 一般采用离散的二进制小波序列, 如式(5):

$$\psi_{j,k}^n(t) = 2^{\frac{j}{2}} \psi^n(2^{-j}t - k) \quad (5)$$

式中,  $j$  为尺度因子,  $n$  为振荡参数,  $k$  为平移因子。其中,  $n=1, 2, 3, \dots, 2^j$  也称为小波或小波包变换的分解水平数。分解尺度  $j$  的最大值决定于采样频率与各种失效模式频率的间隔。假设热障涂层失效过程中的声发射采样频率为 2 MHz(其分辨率为 1 MHz), 则一阶小波包分解是将信号分为 0~0.5 MHz 和 0.5~1 MHz 两部分; 二阶小波包分解是 0~0.25 MHz、0.25~0.5 MHz、0.25~0.75 MHz 和 0.75~1 MHz 4 部分, 以此类推。考虑到热障涂层 4 种失效模式的频率分别是表面裂纹 0.20~0.23 MHz、剪切型界面裂纹 0.26~0.30 MHz、张开型界面裂纹 0.42~0.46 MHz、基底塑性变形 0.13~0.16 MHz, 则需要将信号分解为 4 阶。

小波包分解时, 第  $j+1$  级尺度上低频和高频部分的小波函数分别为:

$$\psi_{j+1,k}^{2n-1}(t) = \sqrt{2} \sum_{l \in \mathbb{Z}} h(l-2k) \psi_{j,l}^n(2t-l) \quad (6)$$

$$\psi_{j+1,k}^{2n}(t) = \sqrt{2} \sum_{l \in \mathbb{Z}} g(l-2k) \psi_{j,l}^n(2t-l) \quad (7)$$

其中,  $h(l)$  与  $g(l)$  为与尺度和小波序列相关的镜像滤波器。对于一给定声发射信号  $f(t)$ , 其小波包变换系数  $d_{j,k}^n$  可以通过式(8)得到:

$$d_{j,k}^n = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{j,k}^n(t) dt \quad (8)$$

则信号经过  $j$  级小波包分解后, 在第  $n$  尺度(对应各个频率段的第  $n$  段)的信号可以通过式(9)重构:

$$f_j^n(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_{j,k}^n \psi_{j,k}^n(t) \quad (9)$$

式中, 尺度  $j$ 、振荡参数  $n$  是特定的参数, 尽管出现两次, 但不做求和运算。

图 6 为 4 层小波包分解结构图, 可以看出, 尺度  $j=4$  (即 4 层)时, 一个有效采样频率为  $f_s$  (一般为信号采样频率的 1/2)的信号  $f(t)$  (用  $S$  表示), 被分解成  $2^j = 16$  个不同频率段的子信号, 其每一段的频率范围为:

$$\left[ \frac{(n-1)f_s}{2^j}, \frac{nf_s}{2^j} \right], \quad n = 1, 2, \dots, 2^j \quad (10)$$

原始信号  $f(t)$  可以描述为小波包  $j$  级分解后各频段子信号的和, 即:

$$f(t) = \sum_{n=1}^{2^j} f_j^n(t) \quad (11)$$

其每一尺度下节点能量计算公式为:

$$E_j^n(t) = \sum_{\tau=t_0}^t (f_j^n(\tau))^2 \quad (12)$$

其信号总能量计算公式为<sup>[35]</sup>:

$$E(t) = \sum_{n=1}^{2^j} E_j^n(t) \quad (13)$$

定义各小波尺度下声发射信号的节点能量与总能量的比值为小波能谱系数:

$$R_n = \frac{E_j^n}{E(t)}, \quad n = 1, 2 \cdots 2^j \quad (14)$$

小波能谱系数最大值的小波尺度为信号特征尺度, 相应频段为信号的特征频段。其相应的特征向量  $\mathbf{R}$  可表示为:

$$\mathbf{R} = [R_1, R_2, \cdots R_{16}] \quad (15)$$

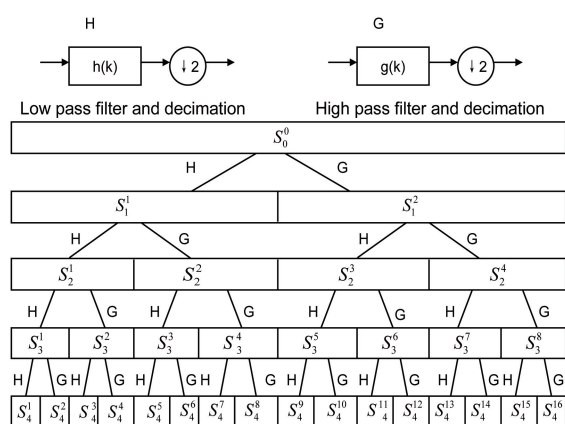


图 6 4 层小波包分解树结构图<sup>[30]</sup>

Fig. 6 The tree structure diagram for wavelet packet decomposition with four levels<sup>[30]</sup>

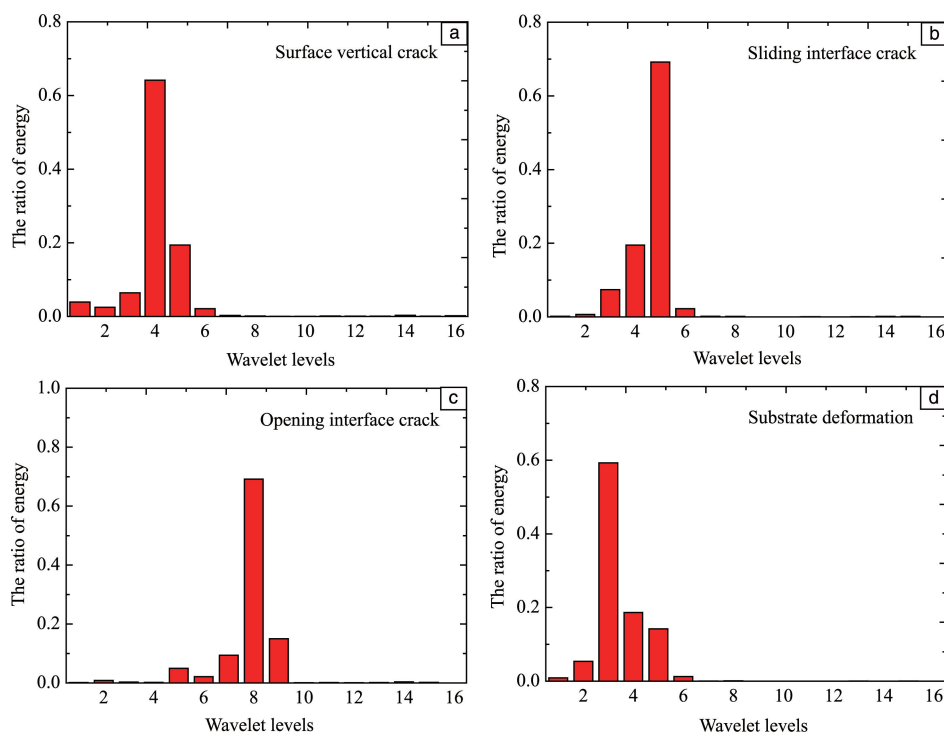


图 7 小波能谱系数分布情况<sup>[30]</sup>: (a) 表面裂纹, (b) 剪切型界面裂纹, (c) 张开型界面裂纹, (d) 基底塑性变形

Fig. 7 Typical distribution histograms of energy coefficients for different wavelet levels<sup>[30]</sup>: (a) surface vertical crack, (b) sliding interface crack, (c) opening interface crack, (d) substrate plastic deformation

选用 Daubechies 小波中的“db8”小波<sup>[32]</sup>, 对热障涂层损伤声发射信号进行了 4 层小波包变换, 信号被分解成 16 个子信号, 每个子信号间的频率宽度为 0.0625 MHz。根据式(14)提取小波能谱系数, 可得到如式(15)所示的特征向量为  $\mathbf{R}$ 。由此获得热障涂层表面裂纹信号、剪切型界面裂纹信号、张开型界面裂纹信号以及基底塑性变形的特征向量, 如图 7a~7d 所示<sup>[30]</sup>。从图中可以看出, 表面裂纹信号能量主要集中在第 4 尺度, 对应频率段为 0.1875~0.2500 MHz; 剪切型界面裂纹信号能量主要集中在第 5 尺度, 对应频段为 0.2500~0.3125 MHz; 张开型界面裂纹信号能量主要集中在第 8 尺度, 对应频率段为 0.4375~0.5000 MHz; 基底塑性变形信号能量主要集中在第 3 尺度, 对应频率段为 0.1250~0.1875 MHz。图 7 直观地给出了信号在不同频率段上的分布情况, 意味着将小波能谱系数作为声发射信号的特征向量, 能够很好地对声发射信号进行模式分类与识别。因此, 可以将小波能谱系数作为后续神经网络模式识别的输入向量对信号进行智能识别。

#### 4.2 基于神经网络的声发射信号模式智能识别方法

人工神经网络是以数学与物理的方法从信息处理角度模拟生物神经网络建立的一种数学模型, 以其自学习、自组织和自适应性等能力, 广泛应用于模式识别、图像处理、智能控制等领域。反向传播(back propagation, BP)



网络由一个输入层 (input layer)、一个或多个隐含层 (hide layer) 与一个输出层 (output layer) 组成。基于 BP 网络来进行热障涂层模式识别 (图 8): 输入为包含  $n$  个神经元的输入向量  $\mathbf{R}$  (小波能谱系数特征向量); 输出为包含  $l$  种失效模式的输出向量, 如 4 种模式时  $l=4$ ; 隐含层  $\mathbf{P}$  是影响训练结果的核心。

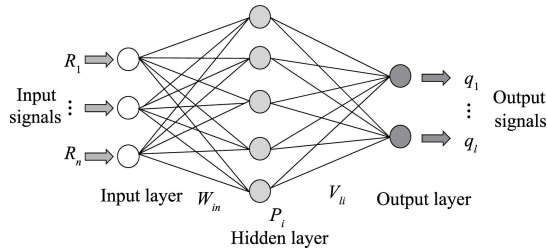


图 8 3 层 BP 网络拓扑结构图<sup>[30]</sup>

Fig. 8 A three layer BP network topological structure<sup>[30]</sup>

BP 算法过程可以分为两个部分: 一为信号的正向传递过程, 二为误差的反向传播过程。在信号的正向传递过程中, 通过逐层计算每一层中神经元的输出值, 并将输出值传递给输出层神经元, 其中每一层中的神经元的状态值会影响下一层神经元的状态。如果输出层没有达到网络初始设定的期望值, 则计算输出层的误差值, 将会通过误差的反向传播来修改网络的权值与阈值。

信息正向传递过程中, 其隐含层第  $i$  个神经元的输出  $p_i$  可通过式 (16) 得到:

$$p_i = g\left(\sum_{n=1}^N w_{in} R_n\right) \quad (16)$$

输出层第  $l$  个神经元的输出  $q_l$  可表示为式 (17):

$$q_l = g\left(\sum_{i=1}^I v_{li} p_i\right) \quad (17)$$

其中  $\mathbf{R}$  为输入向量,  $\mathbf{W}$  与  $\mathbf{V}$  分别为隐含层与输出层的权值矩阵,  $N$  为输入层节点数,  $I$  为隐含层节点数。  $g(x)$  为传递函数:

$$g(x) = \frac{1}{1 + \exp(-x)} \quad (18)$$

具体到热障涂层失效模式识别, 输入层神经元为含有 16 个分量的小波能谱系数特征向量, 即  $N=16$ ; 采用一个隐含层, 其节点数为<sup>[35-39]</sup>:

$$I = \sqrt{N+L} + a \quad (19)$$

$a$  为 1~10 之间的常数。  $I$  一般通过试凑法预设, 并通过网络误差具体获得。其误差函数定义如下:

$$e = \frac{1}{2} \sum_{l=1}^L (Q_l - q_l)^2 \quad (20)$$

其中,  $\mathbf{q}$  是通过网络训练得到的输出向量,  $\mathbf{Q}$  为期望输出样本即已知失效模式的向量,  $L$  为  $\mathbf{q}$  和  $\mathbf{Q}$  向量的元个数。对热障涂层而言, 有 4 种失效模式, 即  $L=4$ , 设定

$[1\ 0\ 0\ 0]$ 、 $[0\ 1\ 0\ 0]$ 、 $[0\ 0\ 1\ 0]$ 、 $[0\ 0\ 0\ 1]$  分别代表涂层垂直裂纹、错开型界面裂纹、张开型界面裂纹和基底变形。

当式 (20) 的误差超过允许值, 可根据梯度下降法来对输出与输入权值进行调整和修正<sup>[39, 40]</sup>:

$$\Delta w'_{in}(m) = \Delta w_{in}(m) + \beta[w_{in}(m) - w_{in}(m-1)] \quad (21)$$

$$\Delta v'_{li}(m) = \Delta v_{li}(m) + \beta[v_{li}(m) - v_{li}(m-1)] \quad (22)$$

式中,  $m$  为网络迭代次数,  $\beta$  为惯性因子,  $\Delta w_{in}(m)$ 、 $\Delta v_{li}(m)$  分别为:

$$\begin{aligned} \Delta w_{in} &= -\eta \frac{\partial e}{\partial w_{in}} = -\eta \frac{\partial e}{\partial q_l} \cdot \frac{\partial q_l}{\partial p_i} \cdot \frac{\partial p_i}{\partial w_{in}} \\ &= \eta p_i (1 - p_i) \sum_l q_l (1 - q_l) (Q_l - q_l) v_{li} R_n \end{aligned} \quad (23)$$

$$\Delta v_{li} = -\eta \frac{\partial e}{\partial v_{li}} = -\eta \frac{\partial e}{\partial q_l} \cdot \frac{\partial q_l}{\partial v_{li}} = \eta q_l (1 - q_l) (Q_l - q_l) p_i \quad (24)$$

式中,  $\eta$  为学习因子。BP 网络就是通过不断地调整输入、输出层的网络权值, 直到误差达到标准或是达到迭代终止条件, 网络训练结束。

设置初始权值为 -1 到 1 之间的随机数<sup>[36, 41]</sup>、学习因子  $\eta$  为 0.8、惯性因子  $\beta$  为 0.95、网络最大迭代次数为 5000 次、期望误差值为 0.001 等, 以已知信号模式的 400 个声发射信号为样本进行网络训练与识别, 其中表面裂纹信号、剪切型界面裂纹信号、张开型界面裂纹信号和基底塑性变形信号各 100 个。按照 60%、20% 和 20% 的比例随机分成训练集、测试集与验证集, 训练集负责对神经网络的训练并调整网络的权值; 验证集参与网络训练, 并监控网络误差; 测试集不参与训练, 用来考察神经网络对未知声发射信号的识别效果<sup>[42]</sup>。具体可根据 BP 网络训练误差的稳定值来训练和优化。表 1 为训练后 BP 网络对声发射信号的识别效果, 从表中可以看出网络对 4 种声发射信号的识别率都达到了 98% 以上。由此可得, 该神经网络能够达到自动识别热障涂层损伤声发射信号的目标, 可以用于未知信号的模式识别。

表 1 基于 BP 网络的热障涂层声发射信号的识别结果

Table 1 Identification results analyzed from AE signals based on BP network for TBCs

| Crack mode               | Signal | Discrimination number | Discrimination rate |
|--------------------------|--------|-----------------------|---------------------|
| Surface vertical cracks  | 100    | 98                    | 98%                 |
| Sliding interface cracks | 100    | 99                    | 99%                 |
| Opening interface cracks | 100    | 99                    | 99%                 |
| Substrate deformation    | 100    | 100                   | 100%                |

图 9a 给出了拉伸时 BP 网络识别的失效模式随加载时间的演化关系, 加载的前 1000 s 热障涂层损伤裂纹模式主要为表面裂纹<sup>[22]</sup>, 并在 1600~1800 s 时表面裂纹趋于饱和。在 1850 s 时, 剪切型界面裂纹开始出现并迅速增长。与表面裂纹和界面裂纹相比, 基底塑性变形信号非常少, 这说明涂层抗拉变形能力较差。同时也可以看到, 张开型界面裂纹信号较少, 这说明拉伸时涂层剥落是由界面剪应力引起的<sup>[30]</sup>。图 9b 给出了压缩时失效模式随时间的演化, 损伤模式主要是表面裂纹、剪切型界面裂纹与张开型界面裂纹。与拉伸加载一样, 基底塑性变形信号基本可以忽略。在压缩加载 2000 s 前, 主要是张开型界面裂纹; 在 2000 s 后, 剪切型界面裂纹信号迅速增加, 而其他类型的声发射信号在 2000 s 后增加缓慢。

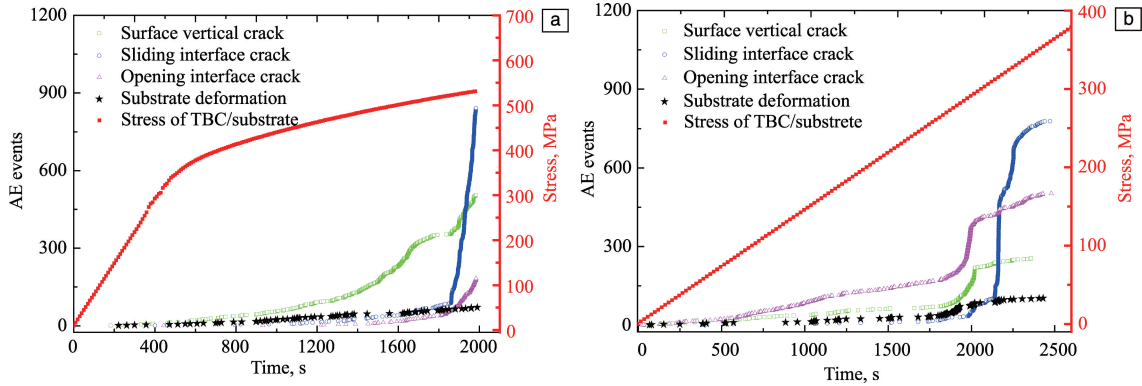


图 9 热障涂层各种裂纹模式的分布<sup>[22, 30]</sup>: (a) 拉伸, (b) 压缩

Fig. 9 The distribution for different crack mode in TBCs under tension (a) and compression (b)<sup>[22, 30]</sup>

## 5 热障涂层关键损伤的定量评价

进一步, 作者针对表面垂直裂纹、界面裂纹(包括错开型和张开型)两种关键模式, 开展了损伤定量评价研究<sup>[31, 43]</sup>。主要的思想是: 不管是表面垂直裂纹还是界面裂纹, 其声发射信号的能量都来源于裂纹形成或扩展时的能量释放, 故有:

$$E_{el} = \alpha E_{AE} \quad (25)$$

式中,  $E_{el}$  为裂纹扩展释放的应变能,  $E_{AE}$  为声发射信号能量,  $\alpha$  为与声发射仪相关的比例系数。建立  $E_{el}$  与表面裂纹、界面裂纹定量参数之间的关联, 则可以建立表面裂纹、界面裂纹定量参数与声发射信号能量之间的关联, 即实现定量评价。

### 5.1 表面裂纹密度定量分析

脆性涂层/韧性基底在拉伸载荷作用下, 会在脆性涂层上逐步形成表面裂纹, 并最终达到饱和。假设两条裂纹之间的距离为  $2a$ , 则可以定义裂纹密度  $\rho = 1/(2a)$ 。基于 McGuigan 脆性薄膜裂纹密度的剪滞模型<sup>[44]</sup>, 考虑热障涂层内应力沿厚度分布不均匀的特性, 作者提出了

可以看出剪切型界面裂纹信号为张开型界面裂纹信号的两倍, 表明在压缩载荷下, 涂层剥落主要是由于剪切型界面裂纹扩展而引起的。表面裂纹信号大约为界面裂纹信号的四分之一, 因此在压缩加载过程中表面断裂不是其失效的主要机制<sup>[30]</sup>。

通过上述分析, 可以总结出基于小波包变换与神经网络技术的热障涂层损伤声发射模式智能识别方法。首先采集损伤声发射信号; 然后采用“db8”小波对声发射信号进行 4 层小波包分解, 提取小波能谱系数为 BP 神经网络输入向量; 最后根据 BP 网络输出向量确定声发射信号损伤模式类别, 用于失效过程的模式识别与机理分析。如出现新的裂纹模式则需要重新选择小波阶数与神经网络结构。

拉伸载荷作用下热障涂层表面裂纹密度的分析模型。

如图 10 所示, 将粘结层和基底看作一层, 将陶瓷层分为  $d_1$  层和应力沿厚度线性分布的  $d_2$  层以及界面层  $d_3$  层。图中  $u_1(x)$ 、 $u_2(x)$  和  $u_3(x)$  分别为  $d_1$ 、 $d_2$  和  $d_3$  层的位移,  $\tau_c(x)$  和  $\tau_s(x)$  为  $d_2$  和  $d_3$  层的剪应力。作者<sup>[45]</sup>在建立分析模型时将陶瓷层和基底分别视作理想弹性和理想弹塑性材料, 考虑到  $d_1$  层较薄, 可以认为该层的正应力分布均匀, 并提出了在断开的小涂层块内  $d_1$  层正应力  $\sigma(x)$  和界面层内剪应力  $\tau_s(x)$  应满足以下平衡关系:

$$\begin{cases} \frac{d\sigma(x)}{dx} + \frac{\tau_c(x)}{d_1} = 0 \\ \tau_c(x) = -\tau_s(x) \end{cases} \quad (26)$$

涂层内应变几何方程如下:

$$\varepsilon_c = \frac{du_1(x)}{dx} + \varepsilon_r \quad (27)$$

$$\varepsilon_s = \frac{du_3(x)}{dx} \quad (28)$$

式中,  $\varepsilon_s$  和  $\varepsilon_c$  分别为  $d_3$  层应变(与基底在界面处的位移

相等)和 $d_1$ 层应变, $\varepsilon_r$ 为陶瓷层内残余应变。据此可以得到 3 个平衡方程:

$$\sigma(x) = E_c \left[ \frac{du_1(x)}{dx} + \varepsilon_r \right] \quad (29)$$

$$\tau_c(x) = \frac{G_c [u_2(x) - u_1(x)]}{d_2} \quad (30)$$

$$\tau_s(x) = \frac{G_s [u_3(x) - u_2(x)]}{d_3} \quad (31)$$

式中, $E_c$ 和 $G_c$ 分别为陶瓷层弹性模量和剪切模量, $G_s$ 为基底剪切模量。

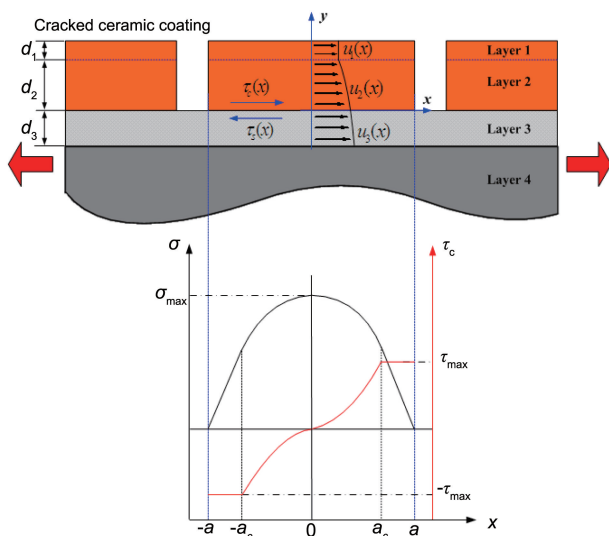


图 10 热障涂层裂纹密度的剪滞模型与应力分布曲线<sup>[43]</sup>

Fig. 10 Shear-lag model of crack density and stress distribution curves for TBCs<sup>[43]</sup>

基于式(25)~(31),可得出(具体推导过程请参见文献[43]):

$$\frac{d^2\sigma(x)}{dx^2} - K^2\sigma(x) = -K^2E_c(\varepsilon_s + \varepsilon_r) \quad (32)$$

其中 $K = \sqrt{\frac{G_s G_c}{d_1 E_c (G_s d_2 - G_c d_3)}}$ 。该方程通解为:

$$\sigma(x) = c_1 e^{Kx} + c_2 e^{-Kx} + E_c(\varepsilon_s + \varepsilon_r) \quad (33)$$

$$\tau_c(x) = -d_1 K (c_1 e^{Kx} - c_2 e^{-Kx}) \quad (34)$$

其中 $c_1$ 和 $c_2$ 均为待定系数,可根据图 10 的应力分布规律与边界条件确定。

当 $x < a_c$ 时,断裂涂层块中心位置正应力最大,对应界面层中心位置剪应力为零,即 $\sigma(0) = \sigma_b$ , $\tau_s(0) = 0$ 。根据这两个已知条件并结合式(33)和(34),求解出待定系数 $c_1$ 和 $c_2$ ,涂层内正应力和界面层内剪应力表达式为:

$$\sigma(x) = [\sigma_b - E_c(\varepsilon_s + \varepsilon_r)] \cosh(Kx) + E_c(\varepsilon_s + \varepsilon_r) \quad (35)$$

$$\tau_c(x) = d_1 K [E_c(\varepsilon_s + \varepsilon_r) - \sigma_b] \sinh(Kx) \quad (36)$$

当 $a_c \leq x \leq a$ 时,断裂涂层块自由边界上正应力为零,界面层内剪应力达到最大值且不随位置变化,即 $\sigma(a) = 0$ , $\tau_s(x) = \tau_b$ 。根据该已知条件,求解涂层内正应力表达式为:

$$\sigma(x) = \frac{\tau_b}{d_1} (a - x) \quad (37)$$

$$\tau_c(x) = \tau_b \quad (38)$$

涂层内最大正应力 $\sigma_b$ 与剪应力 $\tau_c(x)$ 满足以下平衡关系:

$$\sigma_b = \frac{1}{d_1} \int_0^a \tau_c(x) dx \quad (39)$$

图 10 应力分布曲线表明,在 $x = a_c$ 处函数连续,即:

$$\tau_b = d_1 K [E_c(\varepsilon_s + \varepsilon_r) - \sigma_b] \sinh(Ka_c) \quad (40)$$

将(36)和(38)代入(39),联立(40),结合 $\cosh^2(Ka_c) - \sinh^2(Ka_c) = 1$ ,可求解出涂层表面裂纹密度解析表达式:

$$\rho = \frac{1}{2a} = \frac{\tau_b K}{2} [\sigma_b K d_1 - M + \sqrt{M^2 + \tau_b^2} + \tau_b \operatorname{arsinh} \frac{\tau_b}{M}]^{-1} \quad (41)$$

式中, $M = d_1 K [E_c(\varepsilon_s + \varepsilon_r) - \sigma_b]$ 。式(41)表明,热障涂层表面裂纹密度与陶瓷层断裂强度、界面剪切强度、涂层制备过程产生的残余应力以及基底应变相关。

图 11 给出了 3 组等离子喷涂热障涂层表面裂纹密度的理论分析与实验结果<sup>[45]</sup>,其中陶瓷层杨氏模量 $E_c$ 为 48 GPa,基底杨氏模量 $E_s$ 为 165 GPa,陶瓷层泊松比 $\nu_c$ 取 0.22<sup>[46, 47]</sup>,基底泊松比 $\nu_s$ 取 0.3,涂层残余应力(-9.8, -48, -74.7 MPa)、断裂强度(123, 107, 94.3 MPa)及界面剪切强度(23.8, 15.4, 10.2 MPa)的测试方法请参考文献[45]。文献[44]还指出基底应变达到一定值时,陶瓷层内表面开始产生裂纹,且随着应变的增加而增加,最后达到饱和。3 组试样表面裂纹起始的基底应变在 0.3%~0.375% 范围内;裂纹饱和时对应基底应变分别约为 0.50%、0.75% 和 0.90%。分析 3 组试样的实验和计算结果都可以发现,陶瓷层断裂强度 $\sigma_b$ 越大,涂层的抗拉伸断裂性能越好,起始表面裂纹所对应的基底应变 $\varepsilon_s$ 越大;剪切强度 $\tau_b$ 越大,涂层内拉应力传递效果更明显,饱和裂纹密度 $\rho_{\text{sat}}$ 越大,饱和裂纹密度可以由 $\rho \approx \tau_b / 2\sigma_b d_1$ 估算。

至此,可以建立表面裂纹密度与累积的表面裂纹声发射信号能量之间的定量关系。假定陶瓷层内表面垂直裂纹在厚度和宽度方向贯穿,表面裂纹均匀分布。在该假设下,表面裂纹总面积 $S$ 为:

$$S = 2whL\rho \quad (42)$$

式中,  $w$  为涂层宽度,  $h$  为涂层厚度,  $L$  为信号采集的有效距离。在拉伸载荷作用下, 涂层表面裂纹为可以看作 I 型裂纹, 其能量释放率为:

$$G_s = \frac{K_{IC}^2}{E_c} \quad (43)$$

式中,  $K_{IC}$  为陶瓷层表面断裂韧性。结合式 (42), 陶瓷层内表面裂纹释放出的总能量  $E_{total}^s$  可以表示为:

$$E_{total}^s = 2whL\rho \frac{K_{IC}^2}{E_c} \quad (44)$$

结合式 (25), 表面裂纹释放的总能量与声发射的能量最终可以表示为:

$$E_{AE}^s = 2whL\rho \frac{K_{IC}^2}{\alpha E_c} \quad (45)$$

其中单个声发射信号的能量按照下式计算<sup>[54]</sup>:

$$E_{AE} = \int_0^T \frac{U^2(t)}{1 \times 10^{21}} dt \quad (46)$$

式中,  $T$  为信号持续时间,  $U(t)$  为信号的电压幅值。由式 (45) 可以发现, 声发射能量与裂纹密度以及表面断裂韧性呈正相关, 与转换系数和弹性模量呈负相关。

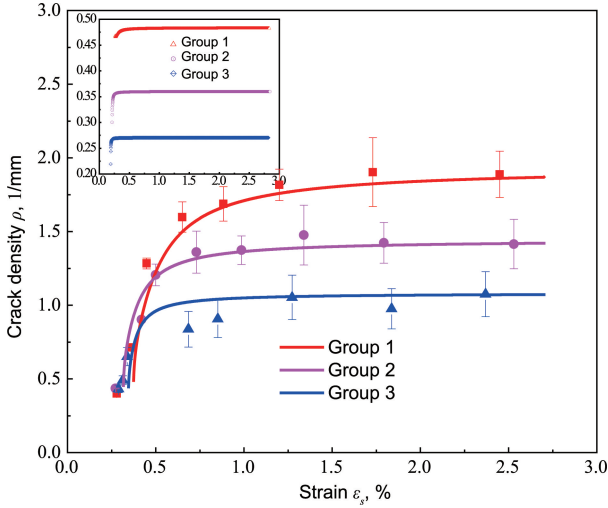


图 11 表面裂纹密度与基底拉伸应变关系曲线<sup>[45]</sup>

Fig. 11 Relation curves between crack density and tensile strain of substrate<sup>[45]</sup>

图 12 给出了 3 类热障涂层表面裂纹密度与声发射信号能量之间的定量关系<sup>[45]</sup>, 可以看出声发射能量与裂纹密度呈现明显的线性关系。3 组试样拟合直线斜率分别为 9.02, 3.62 和 6.34。根据式 (45) 的分析, 线性关系的斜率取决于陶瓷层断裂韧性  $K_{IC}$  和转换系数  $\alpha$ 。由压痕法测试出的陶瓷层断裂韧性  $K_{IC}$  分别为 0.69, 0.60 和 0.53 MPa·m<sup>1/2</sup>, 最后由此计算出的转换系数  $\alpha$  分别为:  $1.56 \times 10^{-10}$ ,  $2.92 \times 10^{-10}$  和  $1.29 \times 10^{-10}$ , 这一差异表明转换系数  $\alpha$  与涂层的制备工艺有关, 而涂层的制备工艺又决定了涂层的微观结构, 如孔洞、缺陷。

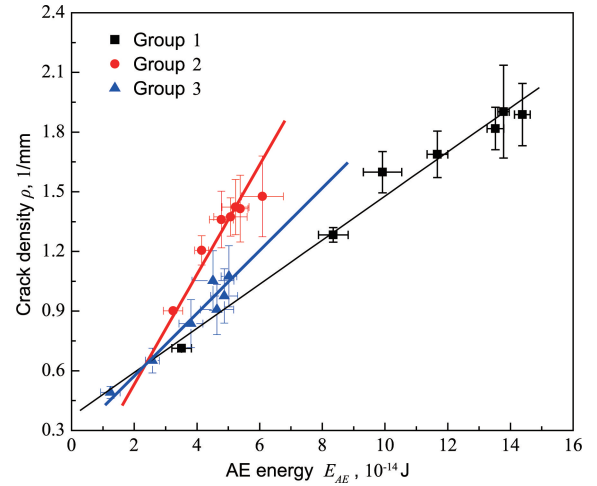


图 12 声发射能量与表面裂纹密度关系曲线<sup>[45]</sup>

Fig. 12 Relation curves between surface crack density and AE energy<sup>[45]</sup>

## 5.2 界面裂纹的定量分析

考虑到涂层厚度远远小于基底厚度, 故在压缩载荷下会发生屈曲剥落失效。基于压缩载荷作用下热障涂层变形的高速摄像 (CCD)、数字散斑等实时检测, 可记录屈曲失效的全过程, 从而分析其界面裂纹的形成与涂层剥落过程, 与此同时, 记录失效过程中的声发射信号, 利用前面所述的模式识别方法, 可建立界面裂纹长度与声发射能量之间的定量关系。此时, 为准确捕捉陶瓷层的屈曲开裂现象, 可在界面处预制一定长度的界面裂纹, 具体制备方法请参照文献[31]。图 13 给出了热障涂层在压缩载荷作用下的屈曲失效过程, 首先对含有界面预制裂纹的热障涂层施加压缩载荷 (图 13a 和 13f), 当压力超过涂层屈曲的临界载荷时, 界面缺陷附近涂层发生屈曲 (图 13b 和 13g), 在泊松比效应作用下产生张开型界面裂纹, 带动附近的涂层内形成部分表面垂直裂纹; 屈曲的脆性涂层 (如图 13c 和 13h) 两端沿偏离涂层垂直方向一定角度方向突然发生断裂, 涂层剥落, 表明该界面裂纹出现了 Kinking 现象<sup>[48]</sup>; 进一步, 在临近界面处因剪应力而形成错开型界面裂纹, 即形成分层, 如图 13d 和 13i; 在外加载荷的作用下, 界面裂纹逐步扩展, 并最终导致涂层的剥落, 如图 13e 和 13j。

假设热障涂层受压应力  $\sigma_0$  作用并处于弹性阶段, 则厚度为  $h$  的陶瓷层内储存的弹性能  $G_0$  表示为:

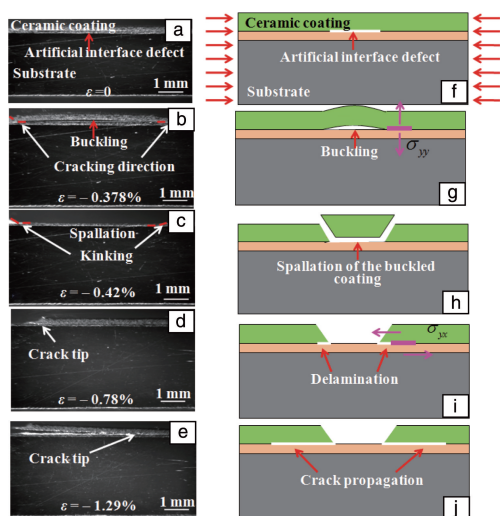
$$G_0 = \frac{1 - \nu_c^2}{2E_c} \sigma_0^2 h \quad (47)$$

式中,  $E_c$  和  $\nu_c$  分别为陶瓷层弹性模量和泊松比。考虑残余压应力后应力可表示为:

$$\sigma = \sigma_0 + E_c \varepsilon \quad (48)$$

式中,  $\varepsilon$  为外加的陶瓷层应变。



图 13 热障涂层屈曲失效过程示意图<sup>[45]</sup>Fig. 13 Buckling failure process for TBCs<sup>[45]</sup>

将陶瓷层屈曲问题简化成一个两端固定的压杆稳定问题,则含有长度为  $2b_0$  界面缺陷的涂层临界屈曲应力为:

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2}{12} \frac{E_c}{1 - \nu_c^2} \left( \frac{h}{b_0} \right)^2 \quad (49)$$

其应变能释放率  $G$  是与屈曲界面半裂纹长度  $b$  有关的函数,表达式为<sup>[49, 50]</sup>:

$$G(b) = G_0 \left( 1 - \frac{\sigma_{cr}}{\sigma} \right) \left( 1 + 3 \frac{\sigma_{cr}}{\sigma} \right) \quad (50)$$

将式(49)代入式(50)有:

$$G(b) = G_0 \left[ 1 + \frac{\pi^2 E_c h^2}{6(1 - \nu_c^2) \sigma} b^{-2} - \frac{\pi^4 E_c^2 h^4}{48(1 - \nu_c^2) \sigma^2} b^{-4} \right] \quad (51)$$

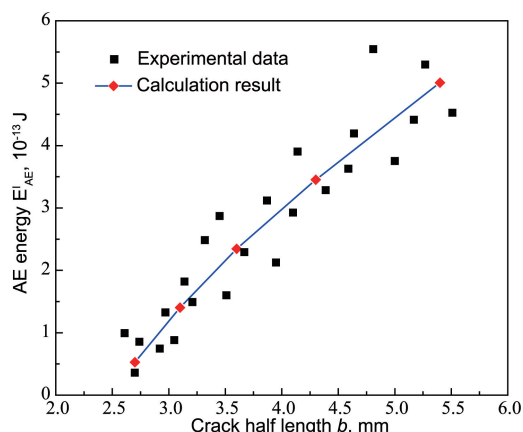
因此,可以根据能量释放率获得界面裂纹扩展时所释放的能量。对有预制裂纹长度为  $b_0$ 、裂纹扩展后半长度为  $b$ 、宽度为  $w$  的界面裂纹,其总能量为:

$$E_{total}^I = 2w \int_{b_0}^b G(b) db \quad (52)$$

界面裂纹释放的能量与声发射的能量最后可以表示为:

$$E_{AE}^I = \frac{1}{\alpha} E_{total}^I = \frac{2w}{\alpha} \left[ \frac{(1 - \nu_c^2) \sigma^2 h}{2E_c} (b - b_0) - \frac{\pi^4 E_c h^5}{288(1 - \nu_c^2)} \left( \frac{1}{b^3} - \frac{1}{b_0^3} \right) - \frac{\pi^2 h^3 \sigma}{12} \left( \frac{1}{b} - \frac{1}{b_0} \right) \right] \quad (53)$$

图 14 给出了压缩载荷作用下裂纹半长与声发射能量关系的理论与实验结果,可以看出裂纹半长增加,声发射能量增加,整体趋势呈现线性。

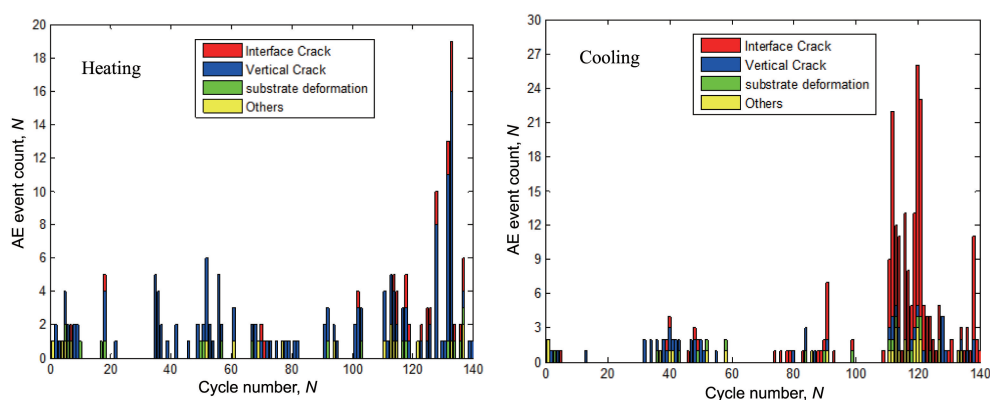
图 14 裂纹半长度和声发射能量关系曲线<sup>[45]</sup>Fig. 14 Relation curve between AE energy and half length of the crack<sup>[45]</sup>

## 6 基于声发射检测的热障涂层失效机理研究

### 6.1 热循环失效机理

热循环是模拟热障涂层起飞、飞行与降落服役状态的最简单、最有效的实验手段。Fu、Ma 等<sup>[12, 21]</sup>用声发射方法对热障涂层热冲击或热疲劳的冷却过程进行了检测。利用波导丝传输技术、小波模式识别方法以及定量评估方法,作者对物理气相沉积制备的热障涂层高温热疲劳失效机理进行了声发射检测与分析<sup>[14]</sup>。选用“db8”小波对声发射信号进行四阶分解, D1: 0.25~0.50 MHz, D2: 0.125~0.25 MHz, D3: 0.0625~0.125 MHz, D4: 0.03125~0.0625 MHz, C4: 0~0.03125 MHz。根据表面垂直裂纹主频 0.23 MHz、张开型界面裂纹主频 0.29 MHz、错开型界面裂纹主频 0.43 MHz,发现对热障涂层热循环过程中损伤信号均为表面垂直裂纹和界面裂纹类型。图 15 给出了加热与冷却阶段的裂纹模式分布,加热过程中出现的声发射信号大多是表面垂直裂纹,冷却过程中,占主导的是界面裂纹。早在 2002 年,周益春教授就从冷却时涂层受压应力而屈曲的理论分析,预测出涂层的剥落发生于冷却阶段<sup>[51]</sup>。但这一结果一直没有得到实验验证,基于热循环失效全过程的声发射实时检测与裂纹模式识别,验证了这一结果。

涂层剥落是由表面垂直裂纹、界面裂纹等微观损伤逐步演化而导致的,是否可以根据前期的损伤信号来预测最终的剥落,是工程上极为关心的问题。作者<sup>[14]</sup>基于重整化理论提出了一种基于前期损伤信号统计规律的临界破坏点预测模型。临界点,可以是破坏时间、临界载荷、循环次数等广义载荷。具体的物理思想是:宏观失效是由损伤逐渐演变而形成的,且各种损伤彼此表现出关联性,因而前期的发展趋势可以用来预测临界的突变

图 15 热循环时各种损伤模式在加热阶段与冷却阶段的分布<sup>[14]</sup>Fig. 15 The distribution of different crack mode for TBCs subjected to thermal cycling both under heating and cooling<sup>[14]</sup>

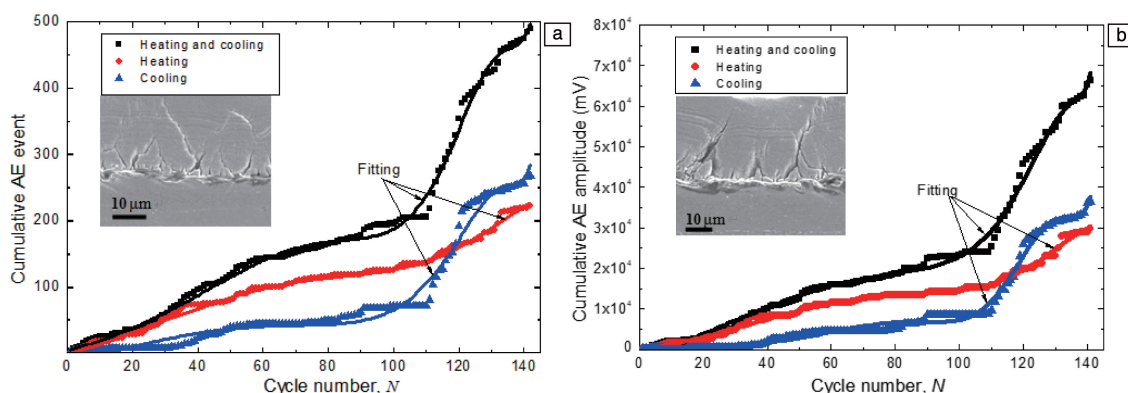
点。具体的数学表达式为:

$$f(N) = A + B(N_f - N)^m \left[ 1 + C \cos \left( 2\pi \frac{\log(N_f - N)}{\log \lambda} + \varphi \right) \right] \quad (54)$$

此处,  $f(N)$  为累积声发射事件数,  $N_f$  为临界循环次数,  $N$  为循环次数,  $A$ ,  $B$  和  $C$  均为无量纲的拟合参数,  $m$  是幂指数,  $\lambda$  是尺度参数,  $\varphi$  是转换参数。上式及 7 个拟合参数的意义请参见文献[52]。

利用式(54)分别对热循环时加热、冷却以及所有声发射信号进行了统计分析, 包括事件数与幅值, 结果如

图 16 所示。可以看出, 所有的拟合曲线与实验结果都吻合, 冷却阶段信号在接近破坏时出现较为分散的点, 意味着裂纹扩展的突变特性。基于加热、冷却和所有信号的统计分析, 预测出的临界循环次数分别是 221、151 和 164。可以看出, 预测的加热阶段的循环次数高于冷却阶段, 但后者更接近实验结果, 如图中 170 个循环后的微观形貌, 已出现了大量的界面裂纹和涂层裂纹。这一结果说明了两个重要现象: ① 对热障涂层而言, 界面裂纹是比表面垂直裂纹更危险的损伤形式; ② 实时检测和预测界面裂纹的演化能更准确地预测涂层剥落的寿命。

图 16 基于累积声发射事件(a)和幅值(b)统计分析的不同阶段热障涂层的临界循环次数预测<sup>[14]</sup>Fig. 16 Predication of the critical cycle number based on the statistical analysis of the cumulative AE event (a) and the cumulative amplitude (b) for TBCs under different stages<sup>[14]</sup>

## 6.2 高温 CMAS 腐蚀失效机理

CMAS 腐蚀被认为是热障涂层最危险的服役环境, 在 CMAS 腐蚀下对涂层剥落过程进行实时检测与定量分析, 是理解其失效机理的关键数据与直接依据。为此, 基于高温波导丝技术以及自主研制的温度梯度高温炉, 对等离子喷涂制备的热障涂层高温 CMAS 腐蚀过程进行

了声发射实时检测, 并采用小波分析、定量分析等方法对其失效机理与失效程度进行了分析<sup>[53, 54]</sup>。

图 17a 给出了涂覆 CMAS 的涂层、未涂覆 CMAS 的涂层和纯基底的声发射事件随腐蚀时间的变化关系。由图中可以发现, 在升温阶段(I), 3 组样品声发射信号均明显随温度的上升而逐渐增多。实验温度达到 1250 °C,

保温一段时间(II)后,声发射事件数增长速度逐渐变慢。而当温度开始下降(III)时,声发射事件数明显开始增多。尽管3种试样的声发射事件变化趋势相似,但明显可以看出未涂覆CMAS的涂层与纯金属基底样品在升温阶段和保温阶段,声发射事件数的变化基本保持一致;而在降温阶段,未涂覆CMAS的热障涂层产生的声发射事件数明显较多。这说明升温阶段(I)和保温阶段(II)产生的声发射信号只与基底有关,而降温阶段(III)涂层发生损伤、产生声发射信号使声发射事件的数量比金属基底样品产生得多。另外,在整个实验过程中涂覆CMAS的涂层产生声发射信号的数量明显比其它样品多,这意

味着CMAS腐蚀导致涂层中产生更多的损伤。

进一步,将声发射信号进行小波分解,将能谱系数作为特征参量对CMAS腐蚀升温(I)、保温(II)和降温(III)过程中的声发射信号进行模式识别,结果如图17b所示<sup>[54]</sup>。可以看出,在升温 and 保温阶段,声发射信号较少且都表现为基底塑性变形,降温阶段则出现大量的剪切型界面裂纹、少量的张开型界面裂纹以及表面垂直裂纹。剪切型界面裂纹明显比张开型界面裂纹多,这与Fan等<sup>[55]</sup>利用有限元分析得到界面裂纹相角大于45°,即剪切型界面裂纹占主导的结果一致。

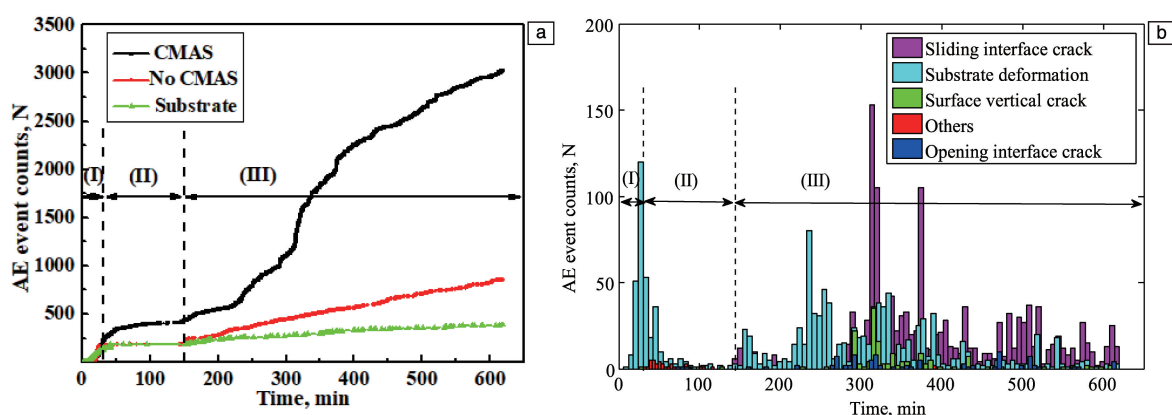


图 17 热障涂层高温 CMAS 腐蚀声发射表征及分析<sup>[54]</sup>: (a) 声发射事件数, (b) 裂纹模式分布

Fig. 17 AE characterization and analysis for TBCs under high temperature CMAS corrosion<sup>[54]</sup>: (a) AE events number, (b) crack mode distribution

Evans 和 Hutchinson (E-H) 提出了温度梯度下的热障涂层分层裂纹模型<sup>[56]</sup>。Krause 等考虑到降温过程中  $ZrO_2$  的  $t \rightarrow m$  相转变引发的应变 ( $\varepsilon_{transf}$ ), 进一步对模型进行了修正<sup>[57]</sup>。利用这一模型, 作者对热障涂层高温 CMAS 腐蚀的分层裂纹进行了分析。CMAS 腐蚀诱导  $ZrO_2$  的  $t \rightarrow m$  相变时, 相变应变  $\varepsilon_{transf} = p\Delta V/3V$  代表体积变化量, 取值为 0.03<sup>[58]</sup>,  $p$  代表  $ZrO_2$  从  $t$  相转变为  $m$  相时的体积系数。假设 CMAS 渗透后改变了涂层的杨氏模量 ( $E$ ), 但热膨胀系数不变, 仅考虑涂层和金属基底热失配, 并基于线弹性各向同性假设, 可得出在降温过程中热障涂层内厚度  $y$  处应力  $\sigma(y)$  为<sup>[56, 57]</sup>:

$$\sigma(y) = \begin{cases} \frac{E_1 \alpha_{TBC} \Delta T_{surf/sub}}{(1-\nu)} \left\{ 1 + \frac{y}{H} - \frac{\Delta \alpha \Delta T_{sub} + \varepsilon_{transf}}{\alpha_{TBC} \Delta T_{surf/sub}} \right\}, & 0 > y > -h \\ \frac{E_2 \alpha_{TBC} \Delta T_{surf/sub}}{(1-\nu)} \left\{ 1 + \frac{y}{H} - \frac{\Delta \alpha \Delta T_{sub}}{\alpha_{TBC} \Delta T_{surf/sub}} \right\}, & -h > y > -H \end{cases} \quad (55)$$

其中, 在降温时样品表面和基底背面的初始温度分别为  $T_{sur}^i$  和  $T_{sub}^i$ , 则样品的表面温差为  $\Delta T_{sur} = T_{sur}^i - T_{sur}$ ,

基底温差为  $\Delta T_{sub} = T_{sub}^i - T_{sub}$ , 表面温差和基底温差的瞬时差值为  $\Delta T_{sur/sub} = \Delta T_{sur} - \Delta T_{sub}$ ;  $\alpha_{TBC}$  和  $\alpha_{sub}$  分别是陶瓷层和金属基底的热膨胀系数, 两者的差值为  $\Delta \alpha = \alpha_{sub} - \alpha_{TBC}$ 。将受高温 CMAS 腐蚀涂层体系看成如图 18 的多层结构, 其中粘结层和基底因为热膨胀系数相近简化为一层, 厚度为  $H$  的涂层中渗透有  $h$  厚的 CMAS, 假设裂纹在  $d$  处形成, CMAS 渗透层和未渗透层的弹性模量分别为  $E_1$  和  $E_2$ , 泊松比为  $\nu$ 。力  $P$  和力矩  $M$  可由应力  $\sigma(y)$  确定:

$$P = \int_{-H}^0 \sigma(y) dy \quad (56)$$

$$M = \int_{-H}^0 \sigma(y) (D + y) dy \quad (57)$$

式中,  $D$  为弯曲时涂层表面到中性轴的距离。I 型和 II 型裂纹尖端应力强度因子  $K_I$  和  $K_{II}$  的表达式分别为<sup>[56]</sup>:

$$K_I = \frac{P}{\sqrt{2AH}} \cos \omega + \frac{M}{\sqrt{2Ih^3}} \sin \omega \quad (58)$$

$$K_{II} = \frac{P}{\sqrt{2AH}} \sin \omega + \frac{M}{\sqrt{2Ih^3}} \cos \omega \quad (59)$$

应变能释放率  $G$  为:

$$G = \frac{1}{2E_2} \left( \frac{P^2}{Ah} + \frac{M^2}{Ih^3} \right) \quad (60)$$

式中,  $A$  为无量纲有效横截面积,  $I$  为惯性矩,  $\omega$  取值为  $52.1^\circ$ <sup>[54]</sup>,  $\bar{E}_2 = E_2 / (1 - \nu^2)$ 。

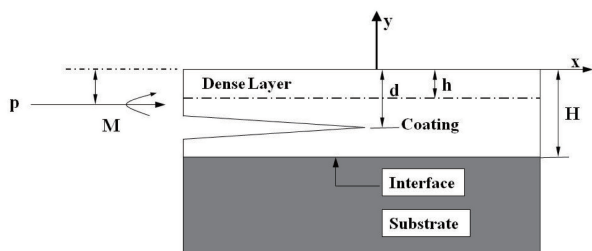


图 18 用于 CMAS 腐蚀的双层涂层示意图<sup>[54]</sup>

Fig. 18 A schematic diagram for two-layer coating system used for CMAS corrosion research<sup>[54]</sup>

由于界面或靠近界面处的分层裂纹为混合型的, 其相角  $\psi$  和混合断裂韧性  $\Gamma_{IC}^i$  的表达式为<sup>[56]</sup>:

$$\psi = \tan^{-1} \left( \frac{K_{II}}{K_I} \right) \quad (61)$$

$$\Gamma_{IC}^i = \Gamma_{IC}^i [1 + \tan^2(1 - \lambda)\psi] t \quad (62)$$

式中,  $\lambda$  是模式混合系数,  $\Gamma_{IC}^i$  是 I 型裂纹断裂韧性。根据  $G = \Gamma_{IC}^i$  可以绘制出分层开裂的边界。

图 19 给出了分层开裂边界与  $p$  之间的关系<sup>[54]</sup>。其中,  $H = 200 \mu\text{m}$ ,  $d = 200 \mu\text{m}$ , 渗透深度  $h = 40 \mu\text{m}$ <sup>[57, 58]</sup>。红色虚线为实验过程中获得的降温拟合曲线, 从  $T_{\text{sur}} = 1250^\circ\text{C}$  和  $T_{\text{sub}} = 1050^\circ\text{C}$  降温到  $T_{\text{sur}} = 79^\circ\text{C}$  和  $T_{\text{sub}} = 61^\circ\text{C}$ 。同种颜色的直线之间的区域为未分层区, 其余为分层区域, 不同颜色的直线代表不同  $p$  值的分层边界。从图中可以发现, 刚开始降温时曲线处于未分层区域, 降到某个温度时开始进入分层区域。在降温过程中  $p$  值越大, 进入分层区时的温度越高, 涂层更早地进入分层区。因为  $p$  值越大, 由相变引起的应变越大, 涂层更容易分层失效。当涂层表面温度达到大约  $400^\circ\text{C}$  时, 温度曲线处于分层区域, 距离分层边界最远, 表明此时涂层最可能产生分层裂纹。在分层区域的黑色五角星为实验中声发射信号最强烈时, 此时的表面温度刚好为  $400^\circ\text{C}$  左右, 与模型中的结果一致。

### 6.3 燃气热冲击失效机理

燃气热冲击实验是模拟发动机燃气速度的重要方式, 气冲击环境下涡轮叶片结构热障涂层的声发射实时检测, 可为其失效机理的理解提供关键依据。为此, 基于高温波导丝技术以及自主研发的涡轮叶片热障涂层静态服役环境试验装置, 开展了涡轮叶片热障涂层燃气热冲击失

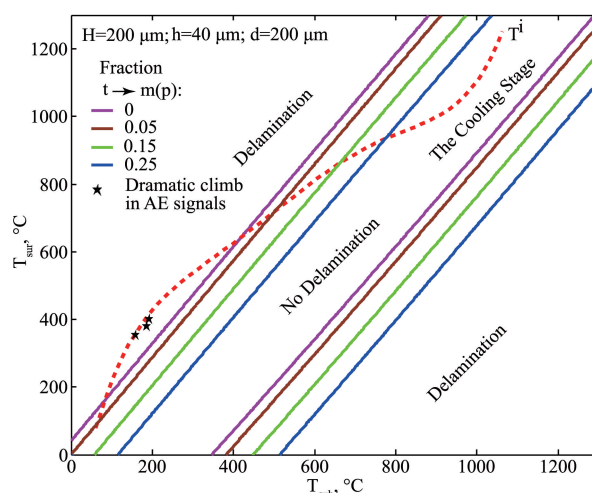


图 19 取  $p = 0 \sim 0.25$  之间的热障涂层分层机制图<sup>[54]</sup>

Fig. 19 Delamination maps of TBCs when  $p$  is varied from 0 to 0.25<sup>[54]</sup>

效过程的声发射检测, 并采用小波分析、定量分析等方法对其失效机理与失效程度进行了分析<sup>[59]</sup>。

实验材料是采用物理气相沉积工艺制备的某型三联涡轮叶片热障涂层, 其基底材料为 CMSX-4, 过渡层为厚度约  $80 \mu\text{m}$  的 NiCoCrAlY, 陶瓷层为  $150 \mu\text{m}$  的 YSZ。热冲击实验通过自主研发的涡轮叶片热障涂层静态服役环境试验装置完成, 其示意图如图 20a 所示, 氧气与助燃气体在超音速燃气喷枪内混合、燃烧, 产生高温火焰并快速冲击在涡轮叶片热障涂层上, 与此同时冷却气体流过涡轮叶片冷却通道, 以模拟涡轮叶片温度梯度的服役环境。热冲击参数为: 燃气速度  $0.3 \sim 1 \text{ Ma}$ ,  $10 \text{ s}$  内升至  $1100^\circ\text{C}$ , 保温  $30 \text{ s}$ , 随后在空气中冷却  $40 \text{ s}$ 。当裂纹长度达到  $10 \text{ mm}$  或者涂层剥落面积达到  $10\%$  时, 认为热障涂层失效, 从而停止实验。

采用如前所述的聚类分析以及小波频谱分析, 对涡轮叶片热障涂层在燃气热冲击作用下的声发射信号进行分析。如图 20b 所示, 涡轮叶片热障涂层受燃气热冲击的损伤形式依然是基底变形、表面垂直裂纹、剪切型界面裂纹和张开型界面裂纹。与热循环实验结果相同, 加热和保温阶段声发射信号数量较少, 大多为表面垂直裂纹, 冷却时为界面裂纹。图 20c 为各种模式随不同循环次数的分布, 可以看出, 声发射事件随热冲击次数的增加而增加。当热冲击次数为  $100$  次时, 主要破坏方式为表面垂直裂纹和剪切型界面裂纹; 当热冲击达到  $300$  个循环时, 张开型界面裂纹快速增加。这说明在热失配应力作用下, 涂层加热时因拉应力出现表面垂直裂纹, 并逐步沿着界面扩展, 到达界面时因冷却时涂层内压应力而屈曲产生的界面拉应力以及界面处的剪切应力, 使得裂纹沿界面扩展, 并逐步导致涂层剥落。



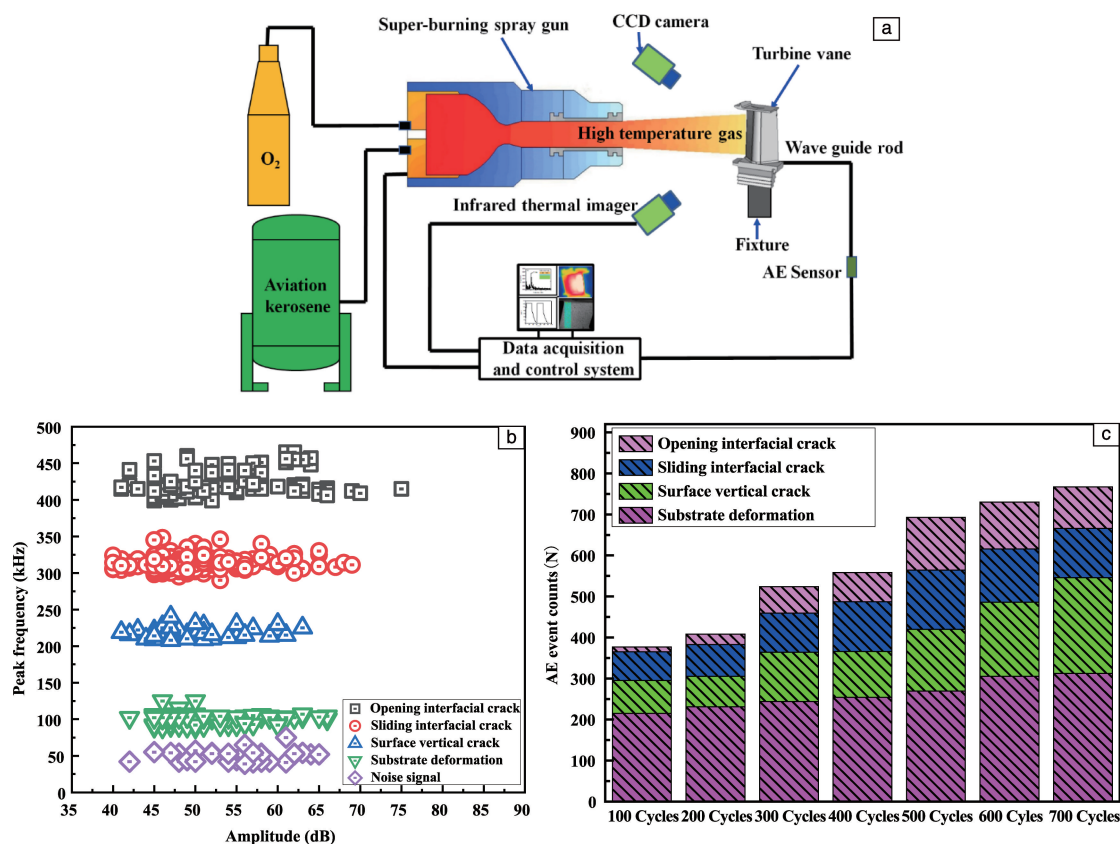


图 20 涡轮叶片热障涂层受燃气热冲击时的声发射表征<sup>[59]</sup>: (a) 实验装置示意图, (b) 裂纹模式, (c) 失效机制

Fig. 20 AE characterization for TBCs on turbine blades when subjected to gas thermal shock<sup>[59]</sup>: (a) test equipment illustration, (b) crack mode, (c) failure mechanism

## 7 结 语

作为提升涡轮叶片承温能力最切实可行的技术, 实现热障涂层在我国航空发动机的安全应用是亟待解决的问题, 采用无损、实时、原位检测技术对其失效过程与机理进行表征和分析, 可为涂层设计和寿命预测提供参考数据。关于热障涂层失效的声发射检测, 未来研究主要有以下几个方面:

(1) 失效模式频率相关性的理论证明。尽管各种实验结果、信号分析等都证明了频率是识别热障涂层失效模式的关键参数, 但如何从理论上予以证明还需进一步研究。

(2) 高温下高速旋转的热障涂层失效过程的声发射检测。高速旋转是工作叶片热障涂层的关键载荷, 但目前的检测还局限于静态高温环境, 发展高速旋转下的声发射信号检测与分析方法, 揭示高温高速旋转下热障涂层失效机理是重要的发展趋势。

(3) 新型热障涂层失效机理的声发射表征。目前 YSZ 涂层只能服役在 1200 °C 下, 满足不了发动机发展的需求, 利用声发射表征方法开展下一代新型热障涂层失效机理的

研究, 可为新型涂层的研制与应用提供有效数据。

## 参考文献 References

- [1] MILLER R A. Journal of Thermal Spray Technology[J], 1997, 6(1): 35.
- [2] 郭洪波, 宫声凯, 徐惠彬. 中国材料进展[J], 2009, 28(9/10): 18-26.
- [3] GUO H B, GONG S K, XU H B. Materials China[J], 2009, 28(9/10): 18-26.
- [4] PADTURE N P, GELL M, JORDAN E H. Science[J], 2002, 296(5566): 280-284.
- [5] CLARKE D R, OECHSNER M, PADTURE N P. MRS Bulletin[J], 2012, 37(10): 891-898.
- [6] ZHU D, MILLER R A. International Journal of Applied Ceramic Technology[J], 2004, 1(1): 86-94.
- [7] HUTCHINSON J W. The 22<sup>th</sup> International Congress of Theoretical and Applied Mechanics[R], [S. I.]: [s. n.], 2008.
- [8] VEAL B W, PAULIKAS A P, HOU P Y. Nature Materials[J], 2006, 5(5): 349-351.
- [9] ZHANG C, ZHOU C, GONG S, et al. Surface and Coatings Technology[J], 2006, 201(1/2): 446-451.

- [9] CHRISTENSEN R J, LIPKIN D M, CLARKE D R, *et al.* Applied Physics Letters[J], 1996, 69(24): 3754–3756.
- [10] YU F, BENNETT T D. Journal of Applied Physics[J], 2005, 98(10): 103501.
- [11] THORNTON J, COOKSON D, PESCOTT E. Surface and Coatings Technology[J], 1999, 120–121: 96–102.
- [12] FU L, KHOR K A, NG H W, *et al.* Surface and Coatings Technology[J], 2000, 130(2/3): 233–239.
- [13] WANG L, MING C, ZHONG X H, *et al.* Surface and Coatings Technology[J], 2019, 367: 58–74.
- [14] YANG L, ZHOU Y C, LU C. Acta Materialia[J], 2011, 59(17): 6519–6529.
- [15] 杨丽. 热障涂层氧化、损伤与断裂的无损评价研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2007.
- YANG L. Non-destructive Evaluation Study on the Oxidation, Damage and Fracture Behavior of Thermal Barrier Coatings[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2007.
- [16] SUN Y, LI J, ZHANG W, *et al.* Surface and Coatings Technology[J], 2013, 216: 237–250.
- [17] KUMAR V, BALASUBRAMANIAN K. Progress in Organic Coatings[J], 2016, 90: 54–82.
- [18] LIANG L H, LI X N, LIU H Y, *et al.* Surface and Coatings Technology[J], 2016, 285: 113–119.
- [19] SHAN X, CHEN W, YANG L, *et al.* Corrosion Science[J], 2020, 167: 108478.
- [20] GUO H B, GONG S K, ZHOU C, *et al.* Surface and Coatings Technology[J], 2001, 148(2/3): 110–116.
- [21] MA X Q, CHO S, TAKEMOTO M. Surface and Coatings Technology[J], 2001, 139(1): 55–62.
- [22] YANG L, ZHOU Y C, MAO W G, *et al.* Applied Physics Letters[J], 2008, 93(23): 231906.
- [23] BENSON P M, VINCIGUERRA S, MEREDITH P G, *et al.* Science[J], 2008, 322(5899): 249–252.
- [24] WOO S C, GOO N S. Composites Science and Technology[J], 2007, 67(7/8): 1499–1508.
- [25] YANG L, KANG H S, ZHOU Y C, *et al.* Surface and Coatings Technology[J], 2015, 264: 97–104.
- [26] 谢中华. Matlab 统计分析与应用: 40 个案例分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010.
- XIE Z H. Matlab Statistical Analysis and Application: 40 Case Studies[M]. Beijing: Beihang University Press, 2010.
- [27] GUTKIN R, GREEN C J, VANGRATTANACHAI S, *et al.* Mechanical Systems and Signal Processing[J], 2011, 25(4): 1393–1407.
- [28] SAUSE M G R, GRIBOV A, UNWIN A R, *et al.* Pattern Recognition Letters[J], 2012, 33(1): 17–23.
- [29] MOEVUS M, GODIN N, R'MILI M, *et al.* Composites Science and Technology[J], 2008, 68(6): 1258–1265.
- [30] 康海松. 基于声发射信号分析的热障涂层损伤模式识别研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2014.
- KANG H S. Intelligent Discrimination of Failure Modes in Thermal Barrier Coatings Based on Acoustic Emission Signals Analysis[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2014.
- [31] YANG L, ZHONG Z C, ZHOU Y C, *et al.* Acta Mechanica Sinica[J], 2016, 32(2): 342–348.
- [32] YANG L, KANG H S, ZHOU Y C, *et al.* Experimental Mechanics[J], 2015, 55(2): 321–330.
- [33] CHUI C K. An Introduction to Wavelets[M]. San Diego: Academic Press, 1992.
- [34] NEWLAND D E. An Introduction to Random Vibrations, Spectral and Wavelet Analysis[M]. New York: Longman Scientific & Technical, 1993.
- [35] DAUBECHIES I. IEEE Transactions on Information Theory[J], 1990, 36(5): 961–1005.
- [36] KHAMEDI R, FALLAHI A, OSKOEI A R. Materials and Design[J], 2010, 31(6): 2752–2759.
- [37] 张德丰. Matlab 神经网络应用设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- ZHANG D F. Matlab Neural Network Application Design[M]. Beijing: China Machine Press, 2009.
- [38] WU J D, WANG Y H, CHIANG P H, *et al.* Expert Systems with Applications[J], 2009, 36(1): 49–56.
- [39] KIM E Y, LEE Y J, LEE S K. Journal of Sound and Vibration[J], 2012, 331(14): 3412–3427.
- [40] KUO C C. Expert Systems with Applications[J], 2009, 36(7): 10304–10311.
- [41] 殷冬萌, 王军, 刘云飞. 应用声学[J], 2007(06): 352–356.
- YIN D M, WANG J, LIU Y F. Applied Acoustics[J], 2007(06): 352–356.
- [42] KANDASWAMY A, KUMAR C S, RAMANATHAN R P, *et al.* Computers in Biology and Medicine[J], 2004, 34(6): 523–537.
- [43] YANG L, ZHONG Z C, ZHOU Y C, *et al.* Acta Mechanica Sinica[J], 2014, 30(2): 167–174.
- [44] MCGUIGAN A P, BRIGGS G A D, BURLAKOV V M, *et al.* Thin Solid Films[J], 2003, 424(2): 219–223.
- [45] 钟志春. 热障涂层表面开裂与界面剥离失效的声发射定量评价[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2013.
- ZHONG Z C. Quantitative Failure Assessment for Surface Cracking and Interface Delamination of Thermal Barrier Coatings by Acoustic Emission[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2013.
- [46] CAO X Q, VASSEN R, STOVER D. Journal of the European Ceramic Society[J], 2004, 24(1): 1–10.
- [47] QIAN L, ZHU S, KAGAWA Y, *et al.* Surface and Coatings Technology[J], 2003, 173(2/3): 178–184.
- [48] WRIGHT P K, EVANS A G. Current Opinion in Solid State and Materials Science[J], 1999, 4(3): 255–265.
- [49] CHOI S R, HUTCHINSON J W, EVANS A G. Mechanics of Materials[J], 1999, 31(7): 431–447.
- [50] HUTCHINSON J W, SUO Z. Advances in Applied Mechanics[J],

- 1991, 29: 64-191.
- [51] ZHOU Y C, HASHIDA T. International Journal of Fatigue[J], 2002, 24(2-4): 407-417.
- [52] BUFE C G, VARNES D J. Journal of Geophysical Research: Solid Earth[J], 1993, 98(B6): 9871-9883.
- [53] 阳甜甜. 热障涂层高温 CMAS 腐蚀失效的声发射检测与模式识别[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2016.
- YANG T T. Acoustic Emission Monitoring and Damage Mode Discrimination of Thermal Barrier Coatings Under High Temperature CMAS Corrosion[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2016.
- [54] YANG L, YANG T T, ZHOU Y C, *et al.* Surface and Coating Technology, 2016, 304: 272-282.
- [55] FAN X, XU R, WANG T J. Ceramics International[J], 2014, 40(9): 13793-13802.
- [56] EVANS A G, HUTCHINSON J W. Surface and Coatings Technology[J], 2007, 201(18): 7905-7916.
- [57] KRAUSE A R, GARCES H F, DWIVEDLI G, *et al.* Acta Materialia[J], 2016, 105: 355-366.
- [58] PUJOL G, ANSART F, BONINO J P, *et al.* Surface and Coatings Technology[J], 2013, 237: 71-78.
- [59] ZHU W, ZHANG C X, YANG L, *et al.* Surface and Coatings Technology[J], 2020, 399: 126151.

(编辑 吴 锐)



专栏特约编辑周益春

**周益春:**男, 1963 年生, 现任湘潭大学党委副书记、博士生导师。国家杰出青年科学基金获得者(2005 年)、国家级教学名师奖获得者(2006 年)、国家级“新世纪百千万人才工程”入选者。自 1994 年于中国科学院力学研究所博士毕业以来, 长期从事铁电薄膜材料与存储器、热障涂层的破坏机理与



特约撰稿人杨 丽

可靠性评价、高性能电池外壳材料及薄膜动力电源的研究, 承担了国家自然科学基金杰出青年基金项目、重大项目、重点项目、面上项目、国家“863”项目, 军委科技委、装发、科工局等项目, 湖南省科技重大专项, 有关大型国有企业委托项目等。先后获省部级自然科学奖一等奖 3 项、科技进步一等奖

1 项、科技进步二等奖 1 项、发明二等奖 2 项。授权国际国内发明专利 80 余项, 出版专著与教材 6 部, 在 *Science Adv.*, *Nature Comm.*, *J. Mech. Phys. Solids*, *Acta Mater.* 等期刊发表 SCI 论文 200 余篇, 被 *Science*, *Nature* 等刊物引用 7000 余次, 完成国家军用标准 1 套(含 11 个标准)。兼任中国力学学会物理力学专业委员会、电子元器件关键材料与技术专业委员会等多个学会的主任委员及 JMST 等多个刊物的编委。在材料与力学领域培养国家杰出青年基金获得者、教育部“长江学者”、军委科技委卓越青年、“青年长江学者”、青年拔尖人才、全

国百篇优秀博士学位论文获奖及提名奖等博士毕业研究生 30 余人和硕士 50 余人。作为第一学术带头人获力学类、材料类一级学科博士点和博士后流动站, 力学类国家重点学科, 教育部创新团队、教育部重点实验室等学科平台。

**杨 丽:**女, 1980 年生, 教授、博士生导师。任西安电子科技大学先进材料与纳米科技学院副院长, 中央军委卓越青年基金获得者、教育部“青年长江学者”、中组部青年拔尖人才。主要从事热障涂层破坏力学研究, 主持国家自然科学基金重大项目、面上项目(3 项)、青年项目, 装发部十三五预研

基金重点项目、国防技术基础研究项目等; 出版英文专著 1 部(第二作者)、国家精品教材 1 部(第三作者); 在包括固体力学领域顶尖期刊 *JMPS*, *IJP* 在内的高水平刊物上发表论文 70 余篇, 他引 1000 余次; 授权美国发明专利 1 项、国家发明专利 42 项; 制定国军标 1 套(含 11 个标准)。获湖南省青年科技奖, 湖南省自然科学一等奖 2 项(分别为第一和第三完成人)、国防技术发明二等奖(第三完成人)等奖励。兼任中国力学学会物理力学专业委员会副主任委员、中国材料研究学会青年委员会常务理事及副秘书长、湖南省青年科协副会长等。