

基于声发射技术的 Si-Cr-Ti 高温抗氧化 涂层弯曲失效机理研究

张亚晨^{1,2}, 孟佳¹, 蔡坤³, 盛晓晨¹, 乐军¹, 宋力昕^{1,2}

(1. 中国科学院 上海硅酸盐研究所, 中国科学院特种无机涂层重点实验室, 上海 201899; 2. 上海科技大学 物质科学与技术学院, 上海 201210; 3. 中国空间技术研究院 北京控制工程研究所, 北京 100080)

摘要: 本研究借助声发射技术对铌基高温抗氧化涂层在常温下的弯曲失效过程进行了研究。利用 k 均值聚类方法对信号进行了分类, 结合截面扫描电镜观测结果确定高温抗氧化涂层在弯曲载荷下的信号分别对应基体变形、表面垂直裂纹、滑动型界面裂纹和张开型界面裂纹, 通过快速傅里叶变换得到了各类信号的主频分别为 100、310、590 和 450 kHz, 借助小波分析得到了各信号的小波能量系数。涂层弯曲失效过程主要包括四个阶段, 分别为受拉侧表面垂直裂纹萌生的初始损伤阶段、表面垂直裂纹增殖阶段、两侧界面裂纹快速扩展的损伤积累阶段和受压侧涂层明显剥落的宏观剥落阶段。

关键词: 声发射; k 均值聚类分析; 失效机理; 高温抗氧化涂层

中图分类号: TB35 文献标志码: A

Bending Failure Mechanism Study of Si-Cr-Ti High Temperature Oxidation Resistance Coating via Acoustic Emission Technique

ZHANG Yachen^{1,2}, MENG Jia¹, CAI Kun³, SHENG Xiaochen¹, LE Jun¹, SONG Lixin^{1,2}

(1. Key Laboratory of Inorganic Coating Materials CAS, Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201899, China; 2. School of Physical Science and Technology (SPST), ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China; 3. Beijing Institute of Control Engineering, China Academy of Space Technology, Beijing 100080, China)

Abstract: In this study, the bending failure process of niobium-based high-temperature oxidation resistance coatings at room temperature was investigated by the acoustic emission technique. The signals were classified by the k -mean clustering method. Based on the cross-sectional scanning electron microscopy observation results, the signals of the coatings under bending load were classified to substrate deformation, surface vertical cracks, sliding interface cracks, and opening interface cracks. The frequency ranges of various types of signals and the wavelet energy coefficients were obtained by fast Fourier transform and wavelet analysis. The acoustic emission signal frequencies of substrate deformation, surface vertical crack, sliding interface crack, and opening interface crack are 100, 310, 590, and 450 kHz, respectively. The coating bending failure process mainly includes four stages, which are 1) the initial damage stage

收稿日期: 2021-01-18; 收到修改稿日期: 2021-02-25; 网络出版日期: 2021-03-15

基金项目: 北京控制工程研究所先进空间推进技术实验室和北京市高效能及绿色宇航推进工程技术研究中心开放基金 (LabASP-2018-08)

Funded by Advanced Space Propulsion Laboratory of BICE and Beijing Engineering Research Center of Efficient and Green Aerospace Propulsion Technology (LabASP-2018-08)

作者简介: 张亚晨(1995-), 女, 硕士研究生. E-mail: zhangych2@shanghaitech.edu.cn

ZHANG Yachen (1995-), female, Master candidate. E-mail: zhangych2@shanghaitech.edu.cn

通信作者: 孟佳, 高级工程师. E-mail: jiameng@mail.sic.ac.cn; 宋力昕, 研究员. E-mail: lxsong@mail.sic.ac.cn

MENG Jia, senior engineer. E-mail: jiameng@mail.sic.ac.cn; SONG Lixin, professor. E-mail: lxsong@mail.sic.ac.cn

where vertical cracks sprout on the surface of the tensioned side, 2) the surface vertical crack proliferation stage, 3) the damage accumulation stage where the interface cracks on both sides expand rapidly, and 4) the macroscopic spalling stage where the coating on the stressed side is found to spall significantly.

Key words: acoustic emission; k -means cluster; failure mechanism; high temperature oxidation resistance coating

钕合金具有优异的高温力学性能而用作航空航天领域的结构材料^[1-3],但是较差的高温抗氧化性能又制约了钕合金的应用^[4-6]。因此,通常采用涂层包覆的方法来提高合金的高温抗氧化性能^[7-9]。常见的高温防护涂层,如 Si-Cr-Ti 体系涂层已经成功应用多年^[2,10-11]。研究表明,涂层在高温服役过程中结构与组分的演变是涂层失效的主要原因,其中微裂纹的影响最为显著^[12]。随着航天技术的进一步发展,对高温抗氧化涂层提出了更高的要求。为了针对性地提高涂层性能,对其破坏过程中裂纹演化过程的研究十分重要。

对于高温抗氧化涂层失效过程的研究,通常采用分时采样的方法,即对不同服役时间的样品进行机械加工,利用扫描电子显微镜观察氧化前后涂层的形貌与组分的变化情况^[12-16]。但这种方法在制样过程中会对涂层造成二次伤害,干扰分析失效机理。声发射技术(AE)^[17-21]、数字图像相关法(DIC)^[22-25]、光致发光光谱法(PLPS)^[26-30]、红外光谱法^[31-32]和热成像法^[33]等无损检测技术常被用来确定损伤部位以及评价损伤程度。高温抗氧化涂层在高温服役条件下的失效过程是一个与温度场变化、材料成分变化以及微结构演变等联系在一起的动态变化过程,静态研究方式势必会掩盖涂层裂纹结构的真实信息。因此,在这些方法中,声发射技术兼具实时、无损和连续监测的优点,十分适合进行破坏过程机理的研究。目前对于声发射技术在失效过程研究的应用主要集中于岩土材料、复合材料以及热障涂层^[17-21],而对于 Si-Cr-Ti 高温抗氧化涂层失效机理的研究未见报道。尽管同为涂层,由于声发射信号对材料成分以及结构的敏感性,仍然有必要进行 Si-Cr-Ti 高温抗氧化涂层失效机理中声发射信号的研究。

由于声发射信号的特点与裂纹的破坏模式紧密相关,而与引起裂纹的外载荷属性无关^[20],因此常温下声发射信号的特点研究可以作为高温实验的基础先行展开,为开展高温实验提供数据支撑。本研究对钕合金上 Si-Cr-Ti 涂层进行三点弯曲实验,并利用声发射技术获取失效过程中的信号,借助 k 均值聚类的方法对声发射信号进行分类,利用快速傅里叶变换和小波分析得到各类信号的频域特征,引

入了统计参数 b 值,结合截面形貌和声发射信号各个参数变化特点研究弯曲载荷下高温抗氧化涂层的失效机理。

1 实验方法

1.1 试片制备

首先,采用自配混合酸对尺寸为 70 mm×8 mm×1 mm 的钕钨合金基材酸洗以去除表面的氧化层,经过水、无水乙醇冲洗后晾干备用。然后,将 Si、Cr、Ti 粉以一定比例混合球磨制成料浆悬浮液,采用浸涂法在清洗后的基材上均匀涂敷配制的浆料,自然干燥后在真空高温炉中 1500 °C 进行烧结。采用上述方法制备的涂层厚度约为 100 μm,试片如图 1 所示,其截面形貌如图 2 所示。涂层区域可划分为三部分,分别是表面多孔的疏松层、中间均匀的致密层以及与基材互扩散形成的过渡层。

1.2 实验过程

实验使用万能试验机(Instron-5566)进行外力加载,跨距设置为 30 mm,加载速度为 0.05 mm/min。使用 PCI-II 声发射仪对实验过程进行实时信号监

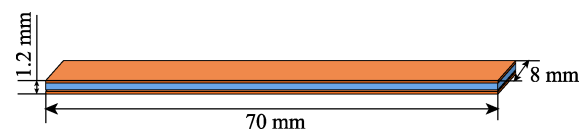


图 1 弯曲实验所用试片示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the bending specimen

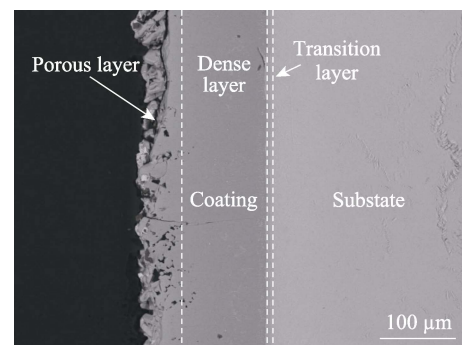


图 2 高温抗氧化涂层截面 SEM 照片

Fig. 2 SEM image of cross-section of high temperature oxidation resistance coating

测。考虑到试片尺寸和响应频率范围, 选择 Nano30 声发射探头, 前置增益设置为 40 dB, 在进行空采集之后将阈值设置为 45 dB, 浮动阈值为 6 dB。实际测试时, 使用真空脂耦合以保证信号质量。为了得到可靠的结论, 共进行了 10 组实验, 以下仅对实验结果的共性部分进行说明。

2 结果与分析

2.1 声发射信号参数分析

声发射信号参数是从声发射信号中提取并计算得到的, 可以反映声发射源的一些特征。图 3 为应力应变曲线以及声发射信号事件数随时间的变化情况。根据声发射信号事件数的特点以及应力应变曲线斜率的变化情况, 可以将整个失效过程分为四个阶段。在第一阶段(0~29 MPa), 应力应变曲线线性良好, 声发射事件数迅速上升到一个较高的水平, 说明在载荷不大时, 众多裂纹源很快达到一个高活跃度状态。这是因为涂层最外部为疏松层, 大量的缺陷使其在很小的力作用下作为裂纹源迅速扩展。第二阶段(29~305 MPa), 事件数由 50 缓慢回落到 25 左右, 应力应变曲线仍然处于线性段, 此时仍为弹性变形阶段, 说明裂纹数量即将达到饱和。第三阶段(305~635 MPa), 能量缓缓下降, 位移载荷曲线斜率变化明显。与混凝土等脆性材料相比, 这一阶段明显更长, 这是由于金属基体阻碍了涂层裂纹的扩展, 一定程度上提高了裂纹密度的最大容许值。在第四个阶段(635~636 MPa), 涂层受压一侧出现肉眼可见的宏观剥落, 声发射事件数达到最大值, 应力应变曲线在 636 MPa 处达到最大, 随后曲线断崖式下降。

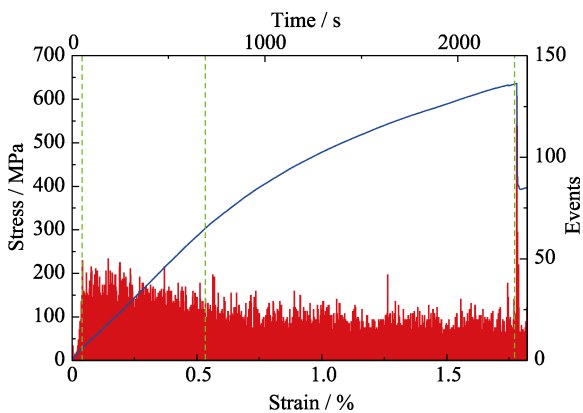


图 3 三点弯曲实验中应力-应变曲线和声发射事件数随时间变化的四个阶段

Fig. 3 Four stages of stress-strain curves and acoustic emission events with time in three-point bending experiments

2.2 k 均值聚类

k 均值聚类分析是一种无监督机器学习算法, 可以有效地对声发射信号进行分类。其具体实现过程如下: 首先确定类别数 k , 并随机选择 k 个聚类中心, 然后计算所有样本点与各个聚类中心的距离。据此将这些样本点分配到与其距离最近的中心所对应的簇中, 然后对得到的簇中样本进行计算, 得到修正后的聚类中心, 最后不断重复上述操作, 直到计算得到的聚类中心不再移动。在进行聚类时, k 值的选择尤为重要。 k 值的评价标准包括肘部法则和轮廓系数等。在众多评价标准中, Davies-Bouldin 指数可以同时反映簇内的紧凑度和簇间的分离度。它的数学表达式如式(1)所示^[34]:

$$DBI = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \max_{i \neq j} \left(\frac{\bar{C}_i + \bar{C}_j}{\|w_i - w_j\|} \right) \quad (1)$$

其中, k 表示类别数, C_i 、 C_j 表示 i 、 j 簇内样本到簇中心的平均距离, w_i 、 w_j 表示 i 、 j 两个簇的中心坐标。DBI 数值小就意味着各簇内部样本聚集度好, 簇间分离度高, k 值的选择合理。选择能量、持续时间、有效值电压(RMS)和计数作为聚类变量计算 DBI, 图 4 为计算结果。

从图 4 中可以看出, 当 $k=4$ 时, DBI 最小, 此时分类效果最好。选择 $k=4$ 对样本进行聚类分析, 当迭代次数达到 200 次之前收敛, 计算结果如图 5 所示。

对于 cluster1, 大部分信号的计数、能量、RMS 和持续时间都较低, 该信号从压头接触试样到试样破坏始终存在; 对于 cluster2, 出现在失效过程第二阶段开始位置, 能量较低; 而 cluster3 对应的信号持续时间超过 700 μ s, 能量较大, 在非线性变形段前期大量出现, 随着破坏的进行又逐渐减少; cluster4 所对应的信号计数小、持续时间短, 且有阶段性出现的明显特点。

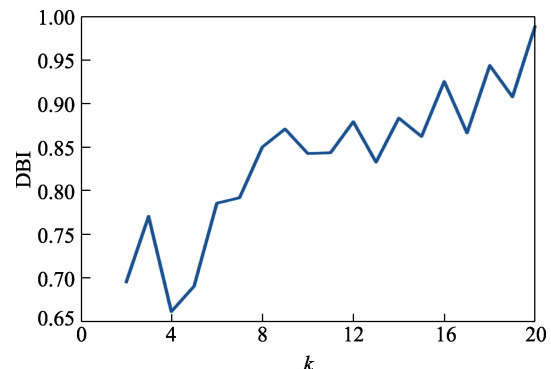


图 4 DBI 随 k 值变化的计算结果

Fig. 4 Calculated results of DBI with change of k

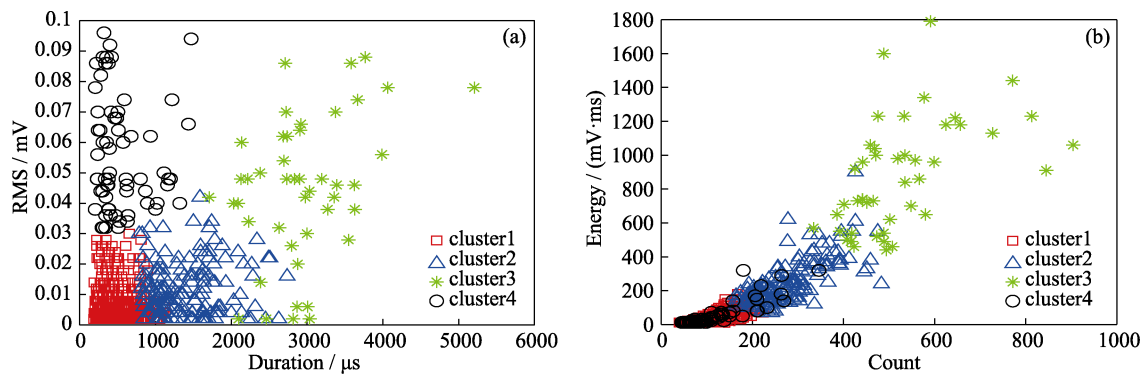


图 5 声发射信号聚类结果

Fig. 5 Clustering result of acoustic emission signal
(a) Duration vs. RMS; (b) Counts vs. energy

以往对涂层材料失效过程的研究表明,在三点弯曲破坏实验中可能出现的信号包括:塑性变形、表面垂直裂纹、滑动型界面裂纹和张开型界面裂纹^[19],且在图 6(a, b)所示的失效试样的截面形貌中也可以发现明显的界面裂纹和表面垂直裂纹。以往的研究表明,裂纹信号的频域特征与其类型有关,而与其位置、尺寸和加载方式无关^[19,35-37]。为了得到信号的频域特征进而确定各信号对应的失效模式,运用快速傅里叶变换和小波分析得到了信号对应的频率-幅度图(图 7)和小波能量系数图(图 8)。cluster1 对应的信号主峰频率在 310 kHz 左右,能量主要分布在 d2 小波段(512~256 kHz),且此类信号数量极大且延续了整个失效过程,是典型的脆性裂纹,对应着涂层的表面垂直裂纹。这种裂纹萌生于涂层疏松层,自涂层向基底方向扩展(图 6(c)),待其扩展到界面处时停止扩展,最终形成垂直于试片长轴方向的裂纹。cluster2 所对应的裂纹首次出现于位移载荷曲线非线性初期,信号主峰频率在 100 kHz 附近,最大能量系数出现在 d4 小波段(128~64 kHz),与铝合金塑性变形的声发射信号具有相同的频率波段,该信号稳定出现且数量不多,对应基体的塑性变形。cluster3 所对应的信号在数量上比上述两者少,

而在加载初期和涂层受压侧剥落之前较多,主峰出现在 590 kHz 左右,能量主要集中在 d1 小波段(1024~512 kHz)。cluster4 所对应的信号在数量上与 cluster3 信号相近,此类信号最大的特点是出现明显的间歇性,且在破坏的中后期数量明显减少。它的主峰频率在 450 kHz 附近,能量集中在 d1(1024~512 kHz)和 d2 小波段(512~256 kHz)。涂层受压一侧为典型的屈曲失效,对于屈曲失效导致的界面裂纹,在扩展之初为混合模式裂纹,随着裂纹尺寸增大,后期转变为以滑动型界面裂纹为主,最终以纯滑动型裂纹的形式剥离^[38-39]。而涂层受拉一侧的界面裂纹也是由混合型向后期的滑动型转变^[39]。因此,cluster3 对应滑动型界面裂纹信号,cluster4 对应张开型界面裂纹信号。

2.3 b 值的计算

b 值作为地球物理学中的一个重要参数,描述了地震震级频度和裂纹尺度之间的关系。1941 年, Gutenberg 和 Richter 通过大量的数据得到了 b 值的统计方程式(2)^[40]:

$$\lg N = a - bM \quad (2)$$

在这个公式中, M 表示地震震级, N 表示信号数量。 a 和 $-b$ 是通过线性拟合得到的截距和斜率。随后, b

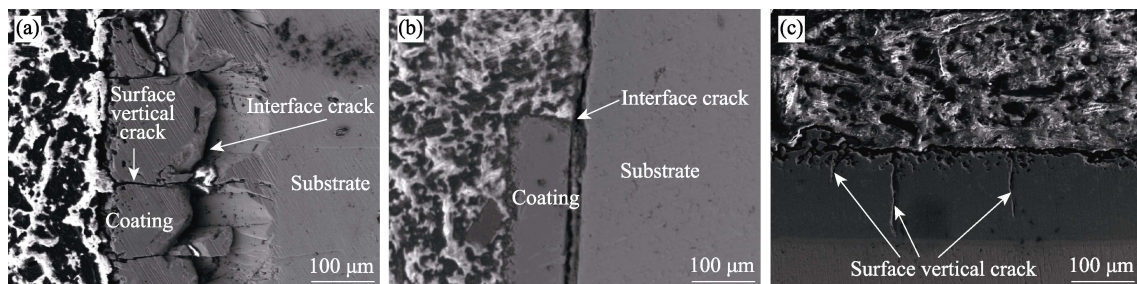


图 6 试片截面的 SEM 照片

Fig. 6 SEM images of specimen

(a) Surface vertical cracks and interface cracks of the coating under tension; (b) Interface cracks of the coating under compression; (c) Surface vertical cracks of the coating under tension

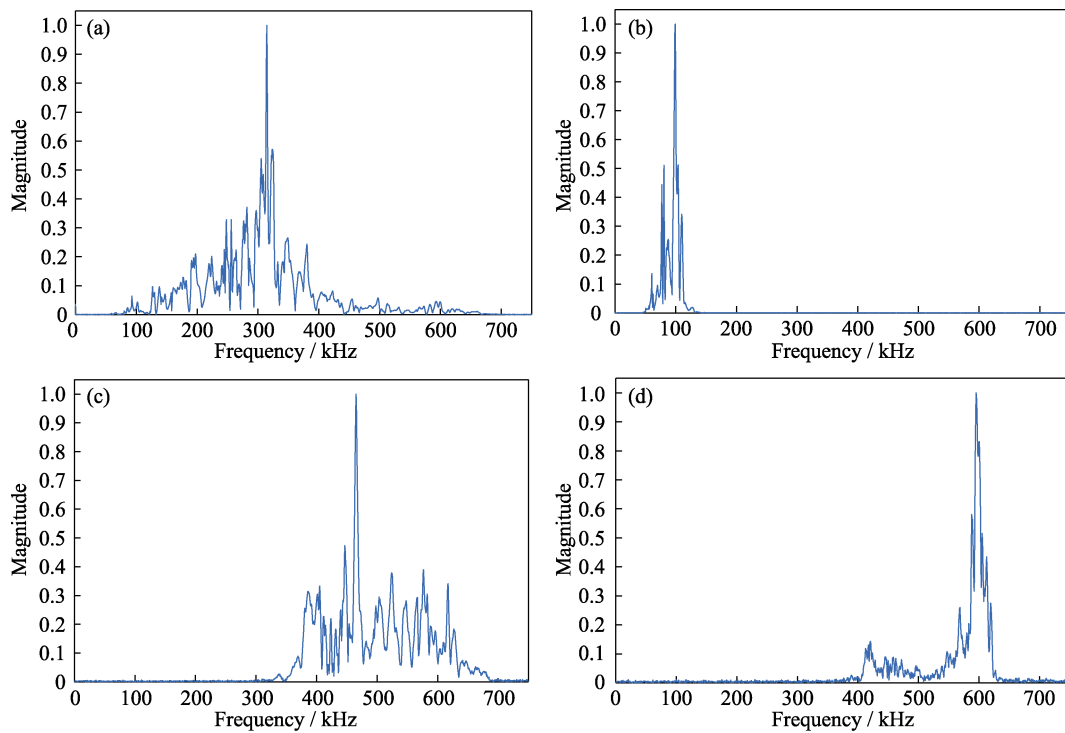


图 7 表面垂直裂纹(a)、基体变形(b)、张开型界面裂纹(c)和滑动型界面裂纹(d)的 AE 信号频谱
Fig. 7 Frequency spectra of the AE signal from (a) surface vertical cracks, (b) substrate deformation, (c) opening interface cracks, and (d) sliding interface cracks

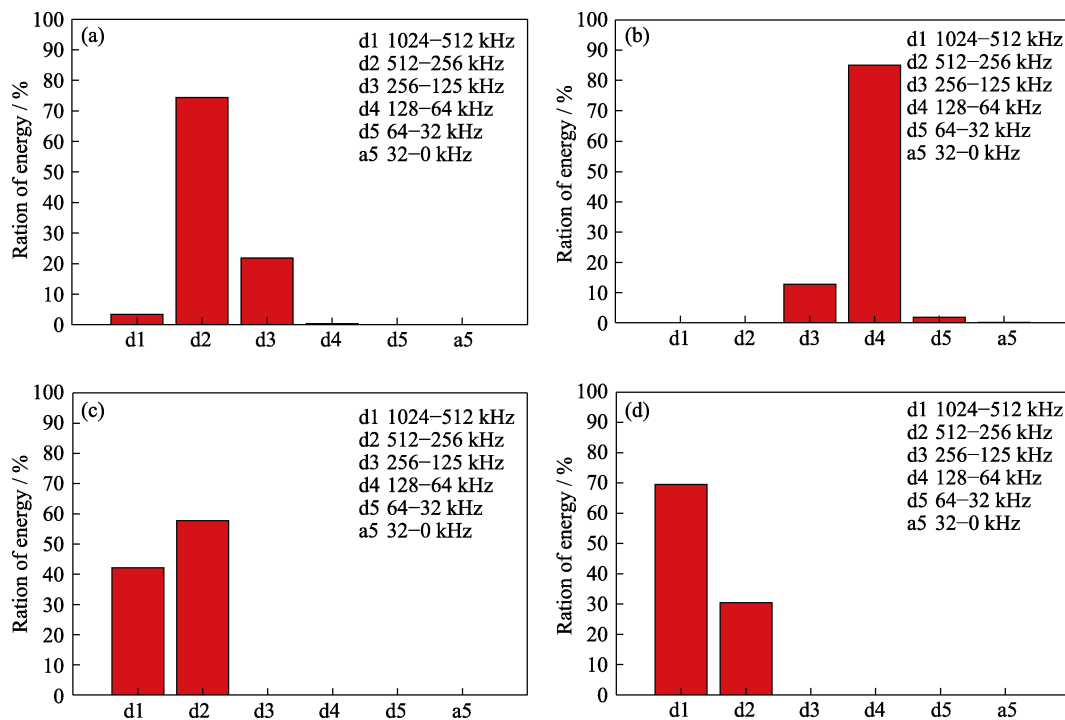


图 8 表面垂直裂纹(a)、基体变形(b)、张开型界面裂纹(c)和滑动型界面裂纹(d)的 AE 小波能量系数
Fig. 8 Wavelet energy spectra of the AE signal from (a) surface vertical cracks, (b) substrate deformation, (c) opening interface cracks, and (d) sliding interface cracks

值也被用于研究岩石和混凝土等脆性材料的失效过程, 在这些研究中 M 代表声发射信号的幅值。研究发现, 当 b 值较大时, 低幅度信号占比大, 对应微观裂纹的传播, 而 b 值较小时, 高幅值信号占比大, 对

应宏观裂纹的传播^[41-42]。

以 500 个信号为一组, 对信号的幅值进行统计和线性拟合。图 9 为一组数据的拟合结果, 其中斜率的相反数即为 b 值。图 10 为各类信号对应的 b

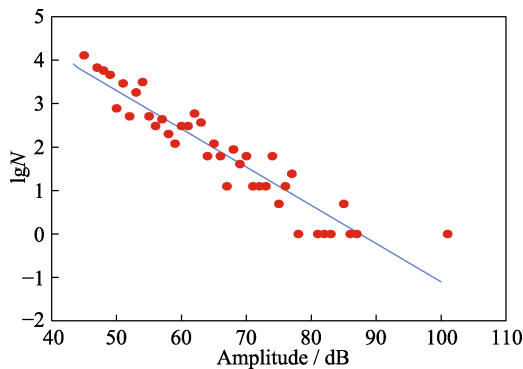


图 9 一组数据的线性拟合结果
Fig. 9 Linear fit results for a set of data

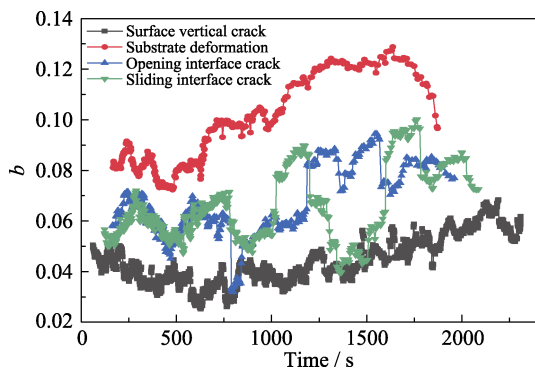


图 10 四类信号的 b 值随时间变化的情况
Fig. 10 Evaluation of b value of 4 types AE signals with time

值变化情况。

从数值大小来看,基体变形对应的 b 值在四种信号中最高。这是由于基体变形释放的能量较少,导致低幅度信号占比大,拟合线斜率较大。而对于三种裂纹信号, b 值的变化情况则对应着扩展裂纹的尺度。在整个失效过程中,表面垂直裂纹对应的 b 值最小且变化不大,这与脆性材料中裂纹的扩展特点相符。曲线不平滑说明存在多个裂纹源,与截面形貌的观察结果相符。对于两种界面裂纹,其 b 值的范围相同,在实验前期同步性较好,这与界面裂纹扩展初期的混合模式有关^[20]。随后,曲线有明显的下降,这是由于涂层受压一面的界面裂纹失稳扩展。界面裂纹的失稳扩展使得界面处释放应力,又导致了两条曲线的上升。曲线后半段的波折变化也

对应着类似的过程, b 值突然下降对应裂纹失稳扩展,突然上升对应应力释放后的微观裂纹扩展。而这种不连续的扩展与涂层的脆性密不可分。

2.4 失效机理分析

综合上述一系列结论可以得到高温抗氧化涂层三点弯曲失效过程。将试样看作涂层-基体-涂层的三明治结构。在实验中,上层涂层在实验中处在受压状态,下层涂层处在受拉状态。图 11 所示为涂层在弯曲失效过程中四个阶段的裂纹发展情况:第一阶段为损伤起始阶段(0~29 MPa),这一阶段的受拉侧涂层中表面垂直裂纹自疏松层开始萌生发展,疏松层内存在丰富的孔洞缺陷使得声发射事件数迅速达到一个较高的水平。表面垂直裂纹所对应的声发射信号事件数快速升高,其他类型信号仍处于一个极低的发展水平。第二阶段为裂纹增值阶段(29~305 MPa),这一阶段表面垂直裂纹信号的事件数继续升高,而两种界面裂纹所对应的声发射信号事件数开始同步升高。随着载荷的增大,由于基体和涂层杨氏模量的差异使得界面处应力集中,当应力达到临界值后,开始出现界面裂纹。实验中,受拉和受压两侧涂层所受到的应力大小相等,方向相反;而表面垂直裂纹可以有效减小界面处的应力,因此受压一侧先出现界面裂纹^[43]。第三阶段为损伤累计阶段(305~635 MPa),试片开始发生塑性变形,在这一阶段,表面垂直裂纹信号的事件数增加速度明显下降,说明裂纹密度逐渐达到饱和,一部分表面垂直裂纹扩展到界面处停止扩展。受拉侧的表面垂直裂纹扩展到界面处后,开始在界面处累计能量,待能量积累到一定数值出现界面裂纹。当裂纹扩展到界面处继续增加载荷,界面裂纹扩展到连接相邻的表面垂直裂纹后,受拉侧部分剥落。两种界面裂纹信号事件数差异较大,但增加速度均明显放缓。第四阶段为宏观剥落阶段(635~636 MPa),试片受压侧出现涂层大面积剥落。声发射事件数最高值出现在最大载荷出现之前(图 3),因此声发射信号可以作为涂层失效的预警信号。由于两侧涂层界面裂纹的扩展在时间上有很大的重叠,受限于技术原因

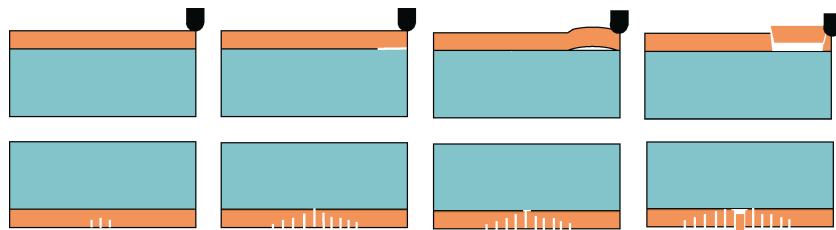


图 11 高温抗氧化涂层失效机理示意图
Fig. 11 Schematic diagram of failure mechanism

尚无法通过 CT 和切割制样观察的方法得到受拉侧失效的真实形貌, 故无法得到受拉侧涂层裂纹发展、剥落的准确时间。

3 结论

1) 通过 k 均值聚类分析, 以能量、持续时间、有效值电压(RMS)和计数作为分类特征, 识别了常温条件下 Si-Cr-Ti 高温抗氧化涂层弯曲失效过程中的基体变形、表面垂直裂纹、滑动型界面裂纹和张开型截面裂纹四种失效模式。

2) 通过对声发射信号的变化特点以及试片截面形貌的观察, 得到高温抗氧化涂层在三点弯曲载荷下的失效过程可以大致分为四个阶段: 初始损伤阶段、裂纹增殖阶段、损伤积累阶段和宏观剥落阶段。

3) 通过傅里叶变换和小波分析得到了四类损伤, 基体变形、表面垂直裂纹、滑动型界面裂纹和张开型截面裂纹的主频率分别为 100、310、590 以及 450 kHz, 通过小波分析得到了信号的小波能量系数, 为后续高温抗氧化涂层高温失效过程的研究以及寿命预测提供数据支撑。

参考文献:

- [1] NARITA T, THOSIN K Z, FENGQUN L, *et al.* Development of Re-based diffusion barrier coatings on nickel-based superalloys. *Materials and Corrosion-Werkstoffe und Korrosion*, 2005, **56(12)**: 923-929.
- [2] RODHAMMER P, KNABL W, SEMPRIMOSCHNIG C, *et al.* Protection of Nb-based and Ta-based alloys against high-temperature oxidation. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 1994, **12(5)**: 283-293.
- [3] 郑欣, 白润, 王东辉, 等. 航天航空用难熔金属材料的研究进展. *稀有金属材料与工程*, 2011, **40(10)**: 1871-1875.
- [4] BOUILLET C, CIOSMAK D, LALLEMANT M, *et al.* Oxidation of niobium sheets at high temperature. *Solid State Ionics*, 1997, **101**: 819-824.
- [5] HELLWIG O AND ZABEL H. Oxidation of Nb(110) thin films on a-plane sapphire substrates: an X-ray study. *Physica B*, 2000, **283(1/2/3)**: 228-231.
- [6] 李丹, 贾中华, 许谅亮. 新型多元铌合金的高温氧化行为. *宇航材料工艺*, 2008, **038(6)**: 73-76.
- [7] TANAKA R, KASAMA A, FUJIKURA M, *et al.* Newly Developed Niobium-based Superalloys for Elevated Temperature Application. Warrendale: Minerals, Metals & Materials Soc, Swiss: TMS. 2004: 89-98.
- [8] WANG YU, GAO JIAPING, LI YUNPENG, *et al.* Microstructure and oxidation-resistance of silicide coatings on C-103 niobium alloys. *Journal of Inorganic Materials*, 2000, **15(1)**: 143-149.
- [9] 唐勇, 杜继红, 李争显, 等. 铌及铌合金高温抗氧化防护涂层研究. *表面技术*, 2009, **38(5)**: 42.
- [10] LORIA E A. Niobium-base superalloys via powder-metallurgy technology. *Journal of Metals*, 1987, **39(7)**: 22-26.
- [11] PERKINS R A, MEIER G H. The oxidation behavior and protection of niobium. *JOM-Journal of the Minerals Metals & Materials Society*, 1990, **42(8)**: 17-21.
- [12] 王禹, 陈日文, 郇嘉平, 等. Ti-Cr-Si 硅化物涂层结构及裂纹扩展. *稀有金属材料与工程*, 2000, **10(05)**: 315-320.
- [13] 张绪虎, 徐方涛, 贾中华, 等. 难熔金属表面高温抗氧化涂层技术现状. *中国材料进展*, 2013, **32(4)**: 21-30.
- [14] 田进鹏, 周小军, 赵刚, 等. 铌钨合金抗高温氧化硅化物涂层的性能. *材料保护*, 2016, **49(5)**: 8-11.
- [15] 唐新阳, 沈统, 肖来荣, 等. Nb521 表面改性 Si-Cr-Ti 涂层的高温氧化行为. *腐蚀与防护*, 2016, **37(5)**: 392-397.
- [16] 潘兆义, 蔡刚, 马双民, 等. 硅化物涂层对铌钨合金的热防护行为研究. *火箭推进*, 2015, **41(3)**: 59-65.
- [17] MA X Q, CHO S, TAKEMOTO M. Acoustic emission source analysis of plasma sprayed thermal barrier coatings during four-point bend tests. *Surface & Coatings Technology*, 2001, **139(1)**: 55-62.
- [18] WANG L, MING C, ZHONG X H, *et al.* Prediction of critical rupture of plasma-sprayed yttria stabilized zirconia thermal barrier coatings under burner rig test via finite element simulation and in-situ acoustic emission technique. *Surface & Coatings Technology*, 2019, **367**: 58-74.
- [19] YANG L, ZHONG Z C, YOU J, *et al.* Acoustic emission evaluation of fracture characteristics in thermal barrier coatings under bending. *Surface & Coatings Technology*, 2013, **232**: 710-718.
- [20] YANG L, ZHONG Z C, ZHOU Y C, *et al.* Acoustic emission assessment of interface cracking in thermal barrier coatings. *Acta Mechanica Sinica*, 2016, **32(2)**: 342-348.
- [21] YAO W B, DAI C Y, MAO W G, *et al.* Acoustic emission analysis on tensile failure of air plasma-sprayed thermal barrier coatings. *Surface & Coatings Technology*, 2012, **206(18)**: 3803-3807.
- [22] MAO W G, WU D J, YAO W B, *et al.* Multiscale monitoring of interface failure of brittle coating/ductile substrate systems: a non-destructive evaluation method combined digital image correlation with acoustic emission. *Journal of Applied Physics*, 2011, **110(8)**: 5.
- [23] WANG L, NI J X, SHAO F, *et al.* Failure behavior of plasma-sprayed yttria-stabilized zirconia thermal barrier coatings under three-point bending test via acoustic emission technique. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2017, **26(1/2)**: 116-131.
- [24] WANG L, WANG H D, DI Y L, *et al.* Research on strain distribution and damage behavior of thermal barrier coatings based on digital image correlation. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2020, **17(5)**: 2156-2161.
- [25] ZHU W, WU Q, YANG L, *et al.* In situ characterization of high temperature elastic modulus and fracture toughness in air plasma sprayed thermal barrier coatings under bending by using digital image correlation. *Ceramics International*, 2020, **46(11)**: 18526-18533.
- [26] MAJEWSKI M S, KELLEY C, HASSAN W, *et al.* Laser induced breakdown spectroscopy for contamination removal on engine-run thermal barrier coatings. *Surface & Coatings Technology*, 2011, **205(19)**: 4614-4619.
- [27] MANERO A, SELIMOV A, FOULIARD Q, *et al.* Piezospectroscopic evaluation and damage identification for thermal barrier coatings subjected to simulated engine environments. *Surface & Coatings Technology*, 2017, **323**: 30-38.
- [28] RINALDI C, DE MARIA L, MANDELLI M. Assessment of the spent life fraction of gas turbine blades by coating life modeling and photostimulated luminescence piezospectroscopy. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power-Transactions of the Asme*, 2010, **132(11)**: 4.

- [29] WANG X, ATKINSON A, CHIRIVI L, *et al.* Evolution of stress and morphology in thermal barrier coatings. *Surface & Coatings Technology*, 2010, **204(23)**: 3851–3857.
- [30] WANG X, LEE G, ATKINSON A. Investigation of TBCs on turbine blades by photoluminescence piezospectroscopy. *Acta Materialia*, 2009, **57(1)**: 182–195.
- [31] JAYARAJ B, VISHWESWARAIAH S, DESAI V H, *et al.* Electrochemical impedance spectroscopy of thermal barrier coatings as a function of isothermal and cyclic thermal exposure. *Surface & Coatings Technology*, 2004, **177**: 140–151.
- [32] THORNTON J, COOKSON D, PESCOFF E. The measurement of strains within the bulk of aged and as-sprayed thermal barrier coatings using synchrotron radiation. *Surface & Coatings Technology*, 1999, **120**: 96–102.
- [33] YU F L, BENNETT T D. Phase of thermal emission spectroscopy for properties measurements of delaminating thermal barrier coatings. *Journal of Applied Physics*, 2005, **98(10)**: 8.
- [34] DAVIES D L, DON BOULDIN. A cluster separation measure. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 1979, **PAMI-1(2)**: 224–227.
- [35] BENSON P M, VINCIGUERRA S, MEREDITH P G, *et al.* Laboratory simulation of volcano seismicity. *Science*, 2008, **322(5899)**: 249–252.
- [36] YANG L, ZHOU Y C, LU C. Damage evolution and rupture time prediction in thermal barrier coatings subjected to cyclic heating and cooling: an acoustic emission method. *Acta Materialia*, 2011, **59(17)**: 6519–6529.
- [37] YANG L, ZHOU Y C, MAO W G, *et al.* Real-time acoustic emission testing based on wavelet transform for the failure process of thermal barrier coatings. *Applied Physics Letters*, 2008, **93(23)**: 299.
- [38] 李巧莲, 张坤, 张凯, 等. 热喷涂涂层界面断裂韧性的反向三点弯曲法试验. *金属热处理*, 2010, **35(1)**: 114–116.
- [39] 朱旺. 屈服法表征薄膜/韧性基底材料体系的界面结合性能. 湘潭: 湘潭大学博士学位论文, 2014.
- [40] GUTENBERG B, RICHTER C F. Frequency of earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1944, **34(4)**: 185–188.
- [41] COLOMBO S, MAIN I G, FORDE M C. Assessing damage of reinforced concrete beam using “*b*-value” analysis of acoustic emission signals. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2003, **15(3)**: 280–286.
- [42] COX S J D, MEREDITH P G. Microcrack formation and material softening in rock measured by monitoring acoustic emissions. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts.*, 1993, **30(1)**: 11–24.
- [43] 吴多锦. 热障涂层界面破坏实时测试分析及实验模拟系统的研制. 湘潭: 湘潭大学硕士学位论文, 2011.