

测试技术

含V型缺口钛合金圆棒拉伸过程声发射特性研究

钟 斌¹, 杨 会¹, 强轩轩¹, 于正洋¹, 赵升吨²

(1. 西安科技大学 机械工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 西安交通大学 机械工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 采用声发射无损检测技术对含环状V型缺口TC4钛合金试样的匀速拉伸过程进行监测, 探讨了含不同V型缺口的TC4钛合金试样在拉伸过程中不同变形阶段对钛合金声发射特征参数的影响。结果表明: 声发射信号的分布情况与拉伸过程中的每个阶段相对应。在整个拉伸断裂过程中, 不同V型缺口试样的幅值信号主要分布在40~70 dB之间, 整个塑性变形过程中仅出现少量高幅值信号, 而试样在断裂瞬间均出现100 dB的高幅值信号。声发射累积计数和累积能量随着损伤的累积而增加。此外, 不同V型缺口的TC4钛合金试样从弹性变形到断裂各阶段的声发射的累积能量和累积计数曲线均有明显的阶段性特征, 曲线斜率大小相似, 累积计数和累积能量数值大小接近。

关键词: V型缺口; TC4钛合金; 拉伸; 声发射; 特征参数

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.02.032

中图分类号: TH142.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 02-0247-08

Study on acoustic emission characteristics of titanium alloy round bar with V-notch during tensile process

Zhong Bin¹, Yang Hui¹, Qiang Xuanxuan¹, Yu Zhengyang¹, Zhao Shengdun²

(1. College of Mechanical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. College of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The uniform tensile process of TC4 titanium alloy samples with circular V-notch was monitored by the acoustic emission non-destructive testing technology, and the influences of different deformation stages on the acoustic emission characteristic parameters of TC4 titanium alloy sample with different V-notches during the tensile process were explored. The results show that the distribution of acoustic emission signals corresponds to each stage of the tensile process. During the entire tensile fracture process, the amplitude signals of samples with different V-notches are mainly distributed between 40~70 dB, only a small amount of high-amplitude signals appear during the entire plastic deformation process, and the high amplitude signals of 100 dB appear at the moment of fracture for all samples. The accumulated count and accumulated energy of acoustic emission increase with the accumulation of damage. In addition, TC4 titanium alloy samples with different V-notches exhibit obvious stage characteristics in the accumulated energy and accumulated count curves of acoustic emission from elastic deformation stage to fracture stage, the slopes of the curves are similar, and the values of accumulated count and accumulated energy are similar.

Key words: V-notch; TC4 titanium alloy; tensile; acoustic emission; characteristic parameter

在实际工程中, 大多数机械结构均存在几何不连续性, 这与结构的功能有关。这些机械结构中存在的许多几何不连续性可以被视为缺口。因为缺口根部存在应力集中和应力多轴度^[1-5], 因此, 裂纹通常始于缺口根部, 目前研究人员对缺口的断裂问题密切关注。不同的缺口形式所引起的应力集中效应不同, 研究表明, 环状的对称V型缺口具有更强

的应力集中效应^[6]。考虑到工业中棒型零件端部一般需要倒角, 所以, 对称环状V型缺口是更适合于工业生产的缺口形式。因此, 对含V型缺口棒料的断裂失效过程进行研究具有重要意义。

目前, 缺口检测中常用的无损检测方法包括超声检测、射线检测和渗透检测等。超声检测适用于开放式裂纹和体积型缺陷的检测, 对于尺寸远低于超声波长的早期微观损伤不敏感, 极易出现缺陷漏检的情况^[7]; 射线检测主要检测材料或工件的内部缺陷, 对面状缺陷并不灵敏, 对厚壁工件的敏感性也较低^[8]; 渗透检测会对表面造成污染而使检测的背景颜色过重, 严重影响显示结果^[9]。

收稿日期: 2023-02-20; 修订日期: 2023-05-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51705416)

作者简介: 钟 斌 (1984-), 男, 博士, 副教授

E-mail: zhongbin2015@xust.edu.cn

相比于上述提到的无损检测方法，声发射无损检测将超声检测与渗透检测的优点相结合，既可以检测开放式裂纹和体积型缺陷，又能检测材料的内部缺陷，而且声发射探测到的能量来自被测试物体本身，而不是像超声或射线检测方法一样由无损检测仪器提供。目前，利用声发射检测技术对金属材料缺口部分的研究，主要集中在对不同金属板材疲劳裂纹的扩展实验，以及金属板材塑性变形和裂纹扩展的声发射信号特征分析。吴克勤等^[10]对钛合金板材进行拉伸实验，得到了钛合金板材断裂过程中幅值的变化规律。张昭等^[11]对 TC18 钛合金材料断裂过程展开研究，结果表明，在裂纹产生初始阶段声发射信号的中心频段与其他阶段有较大差别。龙小江等^[12]对 Q235 钢开展了损伤动态监测实验，并认为根据特征参数的累积量历程图归一化曲线，能够明确反应出材料的拉伸断裂过程演化以及不同力学行为的阶段特征。Mukhopadhyay C K 等^[13]研究了在反向四点弯曲条件下，用声发射和超声波技术监测 304LN 奥氏体不锈钢直管棘轮实验过程中裂纹的产生及扩展，阐述了声发射在管道试件棘轮实验中早期检测疲劳裂纹的超敏感性和可靠性。Elforjani M 等^[14]评估了声学发射技术在探测低速运转轴的自然裂纹方面的潜力。结果表明，声发射技术成功地检测出低速轴上产生的自然裂纹。但在现有文献中利用声发射技术对金属棒材环状缺口部分的研究较少。

基于以上研究内容，本文根据声发射无损检测技术的基本原理，以工程中常用的 TC4 钛合金为研究对象，对其进行拉伸实验，并采用特征参数分析法研究不同几何参数的 V 型缺口圆棒试样在拉伸断裂过程中的声发射特性，为检测表面有缺口试样的内部损伤奠定基础。

1 声发射检测基本原理

缺口试样与能量场演化的耦合作用分析离不开对能量场的监测，声发射检测技术作为能够实现定量、定位分析能量场分布的研究手段得到广泛应用。本文运用声发射检测技术研究金属棒料断裂过程，分析棒料破裂过程中能量场、应力场及声发射场之间的变化规律。声发射（Acoustic Emission，AE）是指材料局部因能量的瞬间释放而发出弹性波的现象，是一种常见的自然物理现象^[15-16]。多数材料发生形变和断裂时均会产生声发射现象^[17]。当工件受

到载荷作用时，其内部会产生一种弹性波，将压电传感器耦合到待测试件上进行信号采集，压电传感器可以将试件产生的机械振动转换为电信号，通过前置放大器对信号进行放大，然后再通过信号处理器在记录装置上显示出来。声发射检测技术是一种新兴的动态无损检测手段，其信号来自缺陷本身。因此，采用声发射检测法可以判断缺陷的活动性和严重性^[18]，可长时间实时检测构件的安全性能。材料在应力作用下的变形损伤是常见的声发射源^[19-20]。单通道声发射检测设备的工作原理如图 1 所示。

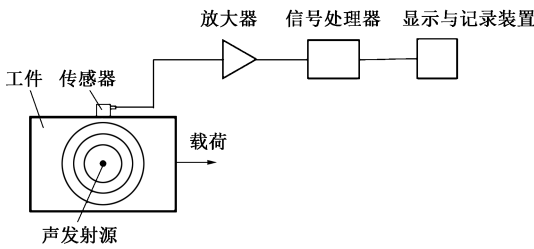


图 1 声发射无损检测的工作原理图
Fig. 1 Work principle diagram of acoustic emission detection

2 实验方案

2.1 实验材料

以 TC4 钛合金作为实验材料，其化学成分见表 1。TC4 钛合金是一种中等强度 α-β 型两相钛合金。TC4 钛合金具有耐蚀性优良、密度小、比强度高以及较好的韧性和焊接性等优点，在航空航天、石油化工、造船、汽车和医药等方面均得到广泛的应用^[21]。

表 1 TC4 钛合金的化学成分（%，质量分数）
Table 1 Chemical compositions of TC4 titanium alloy
（%，mass fraction）

Fe	C	N	H	O	Al	V	Ti
≤0.3	≤0.1	≤0.05	≤0.015	≤0.2	5.5~6.8	3.5~4.5	余量

为了分析含环状 V 型缺口 TC4 钛合金试样在拉伸实验中各变形阶段的声发射信号，根据 GB/T 228.1—2021^[22]制备了 4 组含环状 V 型缺口的拉伸试样，并另外制备了 1 组光滑的拉伸试样作为对照组，如图 2 所示，试样实物图如图 3 所示。

钛合金拉伸试样表面为圆弧，声发射传感器表面为平面，故声发射传感器与钛合金拉伸试样的接触方式为线接触，导致声发射检测信号的采集精度低。因此，在钛合金拉伸试样两个夹持端 10 mm 处

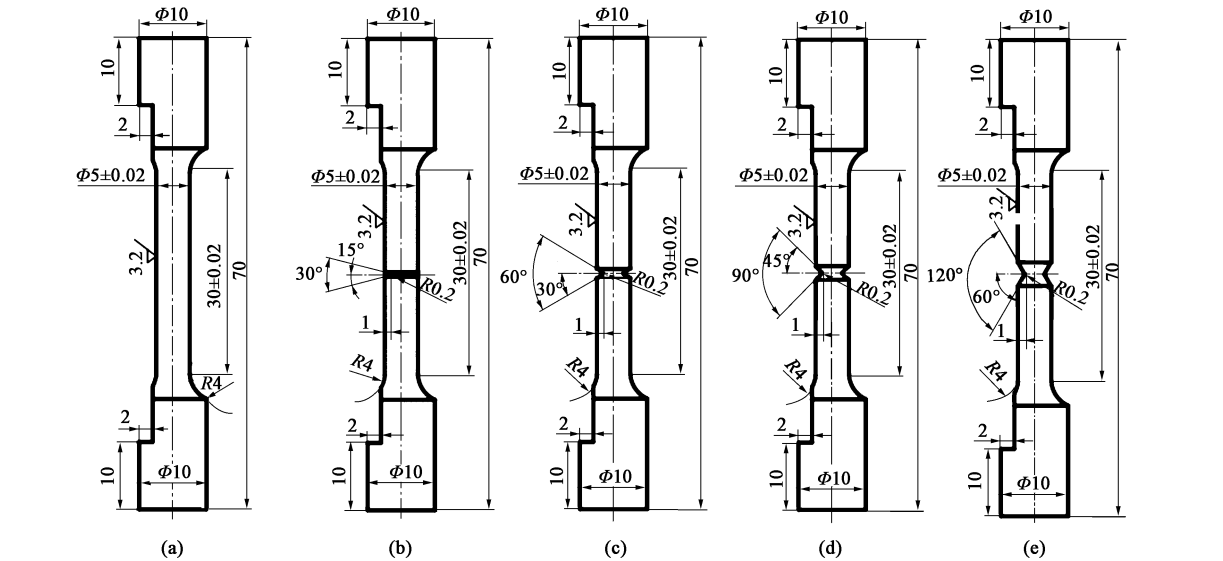


图 2 TC4 钛合金试样的几何尺寸

(a) 对照组试样 (b) 30° V 型缺口试样 (c) 60° V 型缺口试样 (d) 90° V 型缺口试样 (e) 120° V 型缺口试样

Fig. 2 Geometric dimensions of TC4 titanium alloy samples

(a) Control sample (b) 30° V-notched sample (c) 60° V-notched sample (d) 90° V-notched sample (e) 120° V-notched sample



图 3 TC4 钛合金试样实物图

Fig. 3 Physical drawing of TC4 titanium alloy sample

的同一平面内预制两个平台，用于放置声发射传感器，保证声发射传感器与钛合金拉伸试样的接触方式为面接触，极大程度上降低了检测信号的采集难度。图 4 为声发射传感器布置图。

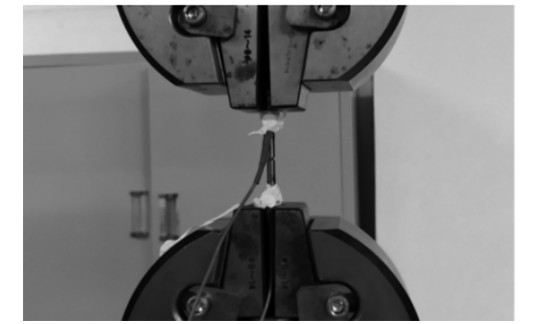


图 4 声发射传感器布置图

Fig. 4 Layout drawing of acoustic emission sensor

2.2 实验过程

实验设备主要由 WDW-190 电子万能实验机、Micro-Ⅱ Digital AE System 声发射采集系统、NANO-30 传感器和 2/4/6 前置放大器组成。TC4 钛合金试

样拉伸断裂声发射测试实验系统示意图如图 5 所示。按图示连接方式将实验机与声发射检测装置连接起来，如图 6 所示。实验开始前需对实验设备进行调试。

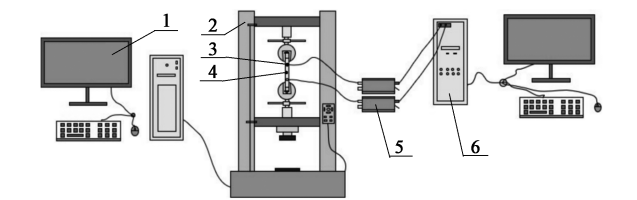


图 5 声发射测试系统示意图

1. 实验机控制终端 2. WDW-190 电子万能实验机
3. NANO-30 传感器 4. 试样 5. 2/4/6 前置放大器
6. 声发射采集系统

Fig. 5 Schematic diagram of acoustic emission test system



图 6 声发射测试现场

Fig. 6 Acoustic emission test site

(1) 灵敏度测试：在距离每个传感器 10 cm 处，以断铅信号作为模拟源，进行传感器灵敏度标定。每次断铅伸出铅芯约 2.5 mm，每个传感器断铅 4 次，记录每次断铅幅度并取平均值作为该传感器的灵敏度数值。要保证每个传感器的灵敏度差值不超过 4 dB，差值过大应重新耦合传感器或更换传感器。

(2) 背景噪声测试：以实验机在空载运行状态下的实验环境噪声水平来确定门槛值。根据规定在噪声幅度增加 5~10 dB 作为检测门限。

(3) 声速测量：选用最大间距的两个传感器，如传感器 1、传感器 2。在传感器 1、传感器 2 的延长线上给出断铅信号，在参数表中找出并记录下两个断铅信号接收到的时间。传感器 1、传感器 2 的距离已知，距离除以两个传感器的到达时间差即可得到声速。

使用 WDW-190 电子万能实验机对试样以 $0.5\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速度进行匀速轴向加载，同时利用美国物理声学公司 Micro-II Digital AE System 对其声发射信号进行采集。试样被拉断时关闭万能实验机和声发射装置。

根据实验材料的基本性能以及实验环境中噪音所产生的影响，结合声发射检测技术和声发射设备设置了相应参数^[23]，本实验具体的声发射参数设定如表 2 所示。

表 2 声发射主要参数设置

Table 2 Setting of main parameters for acoustic emission

参数	数值	参数	数值
门槛值/dB	40	声速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	5000
前置放大增益/dB	40	PDT/ μs	300
模拟滤波器范围/kHz	100~400	HDT/ μs	600
采样率/MSPS	1	HLT/ μs	1000

3 实验结果与数据分析

3.1 力学性能分析

材料的力学性能是指材料在外力作用下抵抗断裂和过度变形的能力。图 7 为含缺口试样和光滑试样的工程应力-工程应变曲线。由图 7 可知，TC4 钛合金的弹性变形、塑性变形和断裂过程均受到缺口效应的影响。光滑试样较含缺口试样有明显的弹性变形阶段，这是因为含缺口试样在缺口处产生应力集中效应，使得材料的屈服变形更加困难，导致材料脆化。光滑试样的抗拉强度为 987.12 MPa，30°、60°、90°和 120° V 型缺口试样的抗拉强度分别为 864.78、834.96、720.87 和 913.76 MPa。由此可见，含缺口试样的抗拉强度均小于光滑试样，含缺口试样抵抗变形的能力均小于光滑试样。当缺口角度小于 90°时，试样的抗拉强度随着缺口角度的增大而减小；当缺口角度大于 90°时，试样的抗拉强度随着缺口角度的增大而增大。环状对称 90° V 型缺口试样的抗拉强度和试样拉断所需的力均低于其他含缺口试样，因此，环状对称 90° V 型缺口试样具备更大的应力集中效应，也更适合工业生产中的缺口形式。不同几何参数下 V 型缺口试样的力学性能如表 3 所示。

3.2 声发射特征参数分析

TC4 钛合金试样受到载荷作用发生损伤时，将发生变形产生微裂纹，随着载荷越来越大，裂纹开始扩展，直至最后失稳断裂。这是一个复杂的动态过程，其结果反映了 TC4 钛合金试样相关力学性能的变化。随着应变能的释放，其中一部分应变能以应力波的形式释放出来，于是产生了声发射。在试

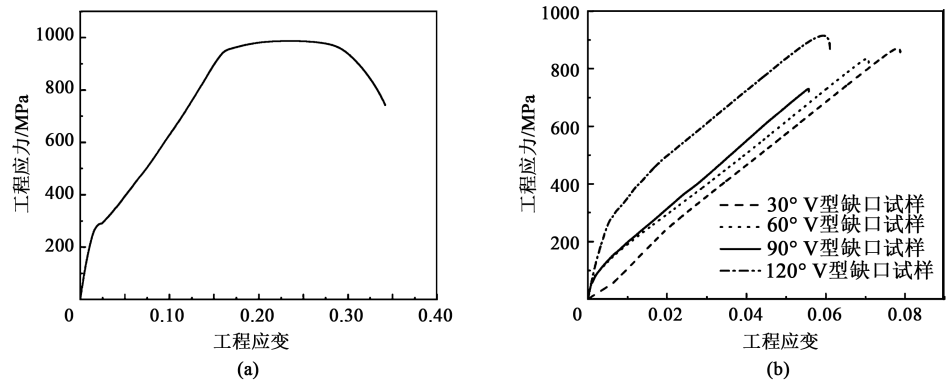


图 7 不同几何参数下 TC4 钛合金 V 型缺口试样的工程应力-工程应变曲线
(a) 对照组试样 (b) 含缺口试样

Fig. 7 Engineering stress-engineering strain curves of TC4 titanium alloy V-notched samples under different geometric parameters
(a) Control sample (b) Sample with notch

表 3 不同几何参数下 V 型缺口试样的力学性能

Table 3 Mechanical properties of V-notched samples under different geometric parameters

缺口角度/(°)	对照组	30	60	90	120
断裂力/kN	19.38	8.82	5.88	5.16	6.46
断裂位移/mm	8.54	1.96	1.77	1.39	1.52
抗拉强度/MPa	987.12	864.78	834.96	720.87	913.76

样损伤的不同阶段产生的应变能不同，即导致了不同的声发射信号特征。在对试样进行声发射检测时，通过分析损伤过程产生的声发射信号的特征，可以了解 TC4 钛合金试样损伤的发生和发展过程，并对损伤程度做出判断。

图 8 为不同 V 型缺口的 TC4 钛合金试样在拉伸过程中的声发射信号幅值在时间上的分布图。从图

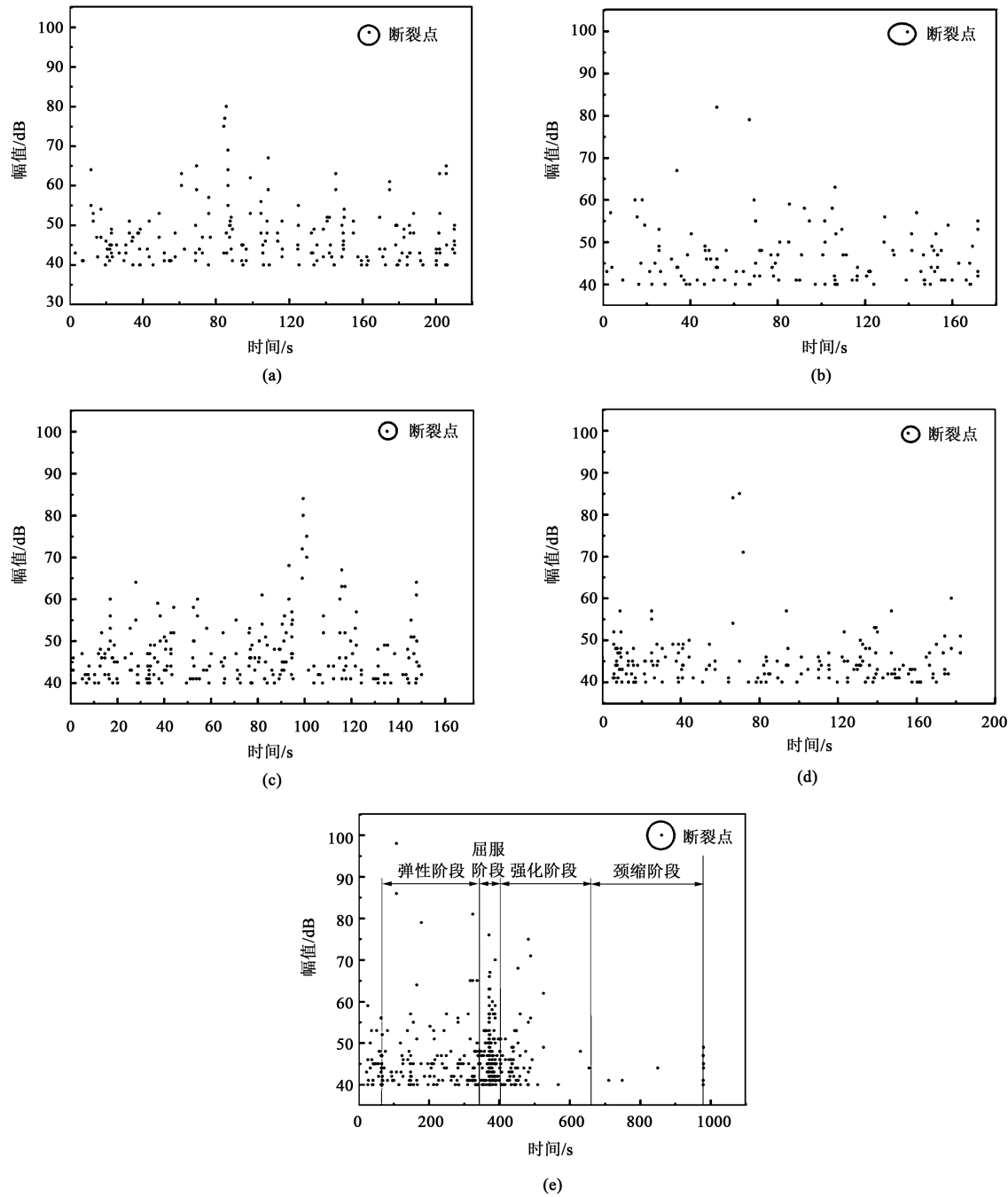


图 8 不同 V 型缺口的钛合金试样的幅值-时间关系图

(a) 30° V 型缺口试样 (b) 60° V 型缺口试样 (c) 90° V 型缺口试样 (d) 120° V 型缺口试样 (e) 对照组试样

Fig. 8 Relationship diagrams of amplitude and time for titanium alloy samples with different V-notches

(a) 30° V-notched sample (b) 60° V-notched sample (c) 90° V-notched sample (d) 120° V-notched sample (e) Control sample

8 中可以看出, 含 30° 、 60° 、 90° 和 120° V 型缺口的 TC4 钛合金试样和对照组试样在拉伸断裂过程中的声发射信号分布区间极为相似, 其幅值主要分布在 40~70 dB 之间, 整个过程仅出现少量高幅值信号。这是由于 TC4 钛合金的韧性较好, 加载时试样处于塑性变形阶段, 产生的信号均为小幅值信号。一些高幅值的声发射信号是由于材料中含有少量的大颗粒非金属夹杂物在加载时断裂而引起的。试样在断裂瞬间均出现 100 dB 左右的高幅值信号, 这是因为此时试样已经发生极大的塑性变形, 材料的塑性变差。

从图 8e 中看出: 光滑试样的幅值信号在 40 s 附近小范围的变化, 这是因为 0~40 s 时夹具与试样发生小幅度位移, 产生摩擦噪声, 这段时间的信号可以忽略; 40~366 s 材料发生弹性形变, 此时声发射信号幅值在 40~65 dB 之间且数量较少; 366~400 s 材料处于屈服阶段, 此时声发射数量明显增多且分布范围在 40~80 dB 之间; 400~676 s 时试样处于强化阶段, 声发射幅值信号数量较多且分布在 40~90 dB 之间; 在 676~980 s 时, 试样处于颈缩阶段, 声发射信号数量减少, 幅值主要分布在 40~50 dB 之间; 980 s 时, 试样发生断裂, 产生 100 dB 的声发射信号。光滑试样的声发射信号分布情况与拉伸过程中的每个阶段相对应, 因此, 可用声发射幅值信号来描述光滑试样拉伸过程。从图 8a~图 8d 中可以看出, 含缺口试样在整个拉伸断裂过程中声发射信号在时间分布上较为均匀, 没有明显集中于某一时间段, 且无明显的弹性变形阶段。这是因为含缺

口试样在缺口处产生应力集中效应, 使得材料的屈服变形更加困难, 导致材料脆化。因此, 通过声发射幅值信号很难分辨含缺口试样断裂的各个阶段。

图 9 为不同 V 型缺口的 TC4 钛合金试样在拉伸过程中声发射信号累积计数在时间上的分布图。如图 9 所示, 声发射累积计数随着损伤的累积, 其数值也会随之增加。在相同的拉伸速率下, 对照组试样在断裂时间上远长于含缺口试样, 在累积计数上也远高于含缺口试样。这是因为含缺口试样在缺口处会产生应力集中效应, 缺口处的最大应力值比平均应力值高, 更容易产生裂纹使试样断裂。如图 9a 所示, 在弹性阶段时, 累积计数增长缓慢, 斜率较小, 此间试样不产生永久性变形, 且出现极少的声发射信号; 在屈服阶段时, 累积计数迅速增长, 此时产生大量声发射信号, 累积计数斜率略大于弹性阶段; 当试样处于强化阶段时, 累积计数增长速度趋于稳定, 但有仍有增长趋势; 在颈缩阶段, 曲线斜率几乎为零, 仅有极少数的声发射信号出现; 在 980 s 时试样断裂产生极大的能量, 累积计数曲线斜率最大。对照组试样和含缺口试样从弹性变形到断裂各阶段的声发射累积计数的曲线均有明显的阶段性特征。如图 9b 所示, 以 90° V 型缺口为例, 试样在弹性阶段时, 累积计数增长缓慢; 屈服阶段的累积计数斜率略大于弹性阶段; 强化阶段和断裂阶段均有明显的特征变化。因此, 通过累积计数可以用来分辨含缺口试样的各个阶段。不同缺口的 TC4 钛合金试样的累积计数数值接近, 且曲线的斜率大小相似, 120° V 型缺口试样的累积计数小于其他 3 种缺口试样。

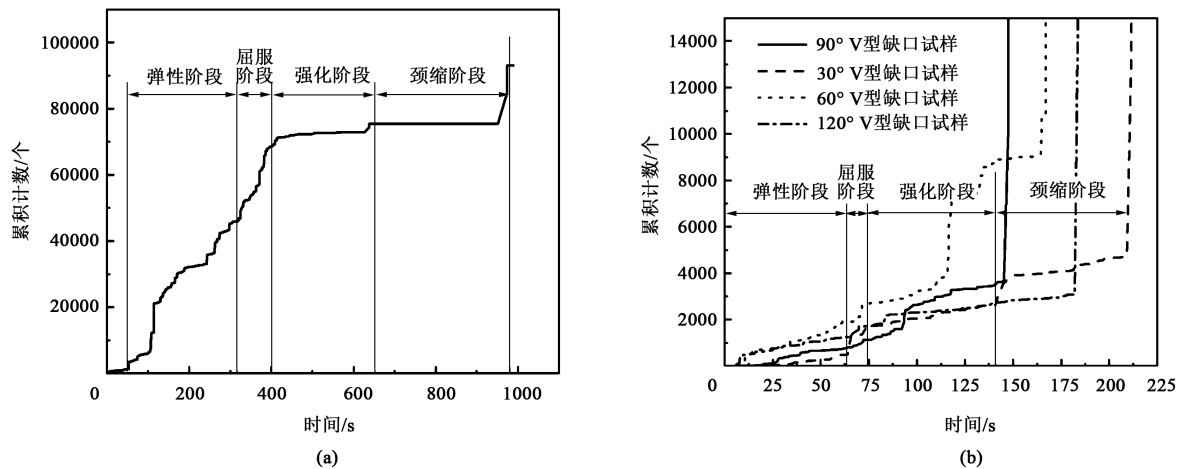


图 9 不同 V 型缺口的钛合金试样的累积计数-时间历程图

(a) 对照组试样 (b) 含缺口试样

Fig. 9 Cumulative count-time history diagram of titanium alloy samples with different V-notches

(a) Control sample (b) Samples with notch

图 10 为不同 V 型缺口的 TC4 钛合金试样在拉伸过程中声发射信号累积能量在时间上的分布图。如图 10 所示, 声发射累积能量随着损伤的累积其数值也会随之增加。声发射累积能量在某一时间段内出现阶段性跳跃, 能量迅速增高后趋于稳定, 随着时间的增长整体呈递增趋势, 曲线斜率较为平缓。曲线的增长趋势对应试样拉伸断裂的各个阶段, 说明

声发射累积能量的变化可以反映试样损伤状态发展的不同进程。累积能量整体变化趋势与累计计数整体变化趋势相似, 试样断裂过程的每个阶段均有明显的特征变化, 因此, 累积能量也可以用来分辨含缺口试样的各个阶段。各缺口的累积能量增长趋势较为相似, 60°V 型缺口试样的累积能量大于其他 3 种缺口试样。

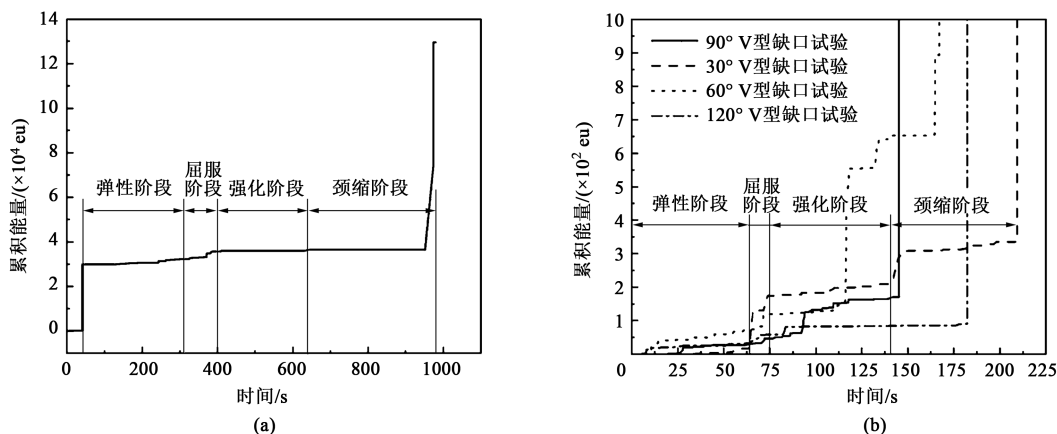


图 10 不同 V 型缺口钛合金试样的累积能量-时间关系图

(a) 对照组试样 (b) 含缺口试样

Fig. 10 Cumulative energy-time relationship of titanium alloy samples with different V-notches

(a) Control sample (b) Sample with notch

4 结论

(1) 含缺口试样的抗拉强度均小于光滑试样的抗拉强度, 因此, 含缺口试样抵抗变形的能力也均小于光滑试样。当缺口角度小于 90°时, 试样的抗拉强度随着缺口角度的增大而减小; 当缺口角度大于 90°时, 试样的抗拉强度随着缺口角度的增大而增大。环状对称 90°V 型缺口试样具有更大的应力集中效应, 也更适合工业生产中的缺口形式。

(2) 含缺口试样和对照组试样在拉伸断裂过程中的声发射信号分布区间极为相似, 其幅值主要分布在 35 ~ 70 dB 之间。材料在断裂瞬间均出现 100 dB 左右的高幅值信号。在整个拉伸断裂过程中含缺口试样的声发射幅值信号在时间分布上较为均匀, 没有明显集中于某一时间段, 断裂过程中各个阶段信号分布不明显。

(3) 声发射累积计数、累积能量随着损伤的累积其数值会随之增加。在相同的拉伸速率下, 对照组试样在断裂时间上远长于含缺口试样, 在累积计数和累积能量上也远高于含缺口试样。从弹性变形到断裂各阶段, 声发射累积能量、累积计数曲线均

有明显的阶段性特征。不同缺口的 TC4 钛合金试样的累积计数、累积能量数值大小接近, 且曲线的斜率大小相似。60°V 型缺口试样的累积计数、累积能量数值最大, 120°V 型缺口试样的累积计数、累积能量数值最小。

参考文献:

- [1] Luo P, Yao W X, Li P. A notch critical plane approach of multiaxial fatigue life prediction for metallic notched specimens [J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2019, 42 (4): 854-870.
- [2] Glinka G, Buczyński A, Ruggeri A. Elastic-plastic stress-strain analysis of notches under non-proportional loading paths [J]. *Archives of Mechanics*, 2000, 52 (4): 589-607.
- [3] Tao Z Q, Zhang M, Zhu Y, et al. Notch fatigue life prediction considering nonproportionality of local loading path under multiaxial cyclic loading [J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2019, 43 (4): 59-67.
- [4] Lazzarin P, Tovo R. A unified approach to the evaluation of linear elastic stress fields in the neighborhood of cracks and notches [J]. *International Journal of Fracture*, 1996, 78 (1): 3-19.
- [5] Susmel L. A unifying approach to estimate the high-cycle fatigue strength of notched components subjected to both uniaxial and mul-

- biaxial cyclic loadings [J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2004, 27 (4): 26–32.
- [6] 赵仁峰, 郑建明, 王权岱, 等. 不同类型缺口对管材精密下料过程中微裂纹萌生的影响 [J]. *塑性工程学报*, 2018, 25 (1): 276–282.
- Zhao R F, Zheng J M, Wang Q D, et al. Effects of different types of notches on microcrack initiation during precise blanking [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2018, 25 (1): 276–282.
- [7] 张鑫明. 受载条件下不锈钢表面微裂纹损伤的非线性超声检测研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- Zhang X M. Study on Nonlinear Ultrasonic Detection of Surface Microcrack Damage of Stainless Steel Under Load [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021.
- [8] 圣兆兴, 刘仕远, 王飞, 等. 铸钢和铸铝件射线照相检测缺陷检出能力研究 [A]. 中国铁道学会材料工艺委员会, 山东瑞祥模具有限公司, 中国铁道科学研究院集团有限公司金属及化学研究所. 中国铁道学会材料工艺委员会第五届无损检测学组磁粉、渗透、涡流及射线无损检测学术交流会论文集 [C]. 济宁: 中车戚墅堰机车车辆工艺研究所有限公司, 2018.
- Sheng Z X, Liu S Y, Wang F, et al. Research on defect detection ability of radiographic inspection of cast steel and cast aluminum [A]. Materials Technology Committee of China Railway Society, Shandong Ruixiang Mold Co., Ltd., Metal and Chemical Research Institute of China Academy of Railway Science Group Co., Ltd.. Proceedings of the 5th Non-destructive Testing Academic Exchange Conference on Magnetic Particle, Permeation, Eddy Current and X-ray Non-destructive Testing of Materials Technology Committee of China Railway Society [C]. Jinan: CRRC Qishuyan Locomotive and Vehicle Technology Research Institute Co., Ltd., 2018.
- [9] 徐桂荣, 刘甜甜, 关雪松. 航空产品磁粉检测与渗透检测分析 [J]. *兵器材料科学与工程*, 2021, 44 (6): 123–127.
- Xu G R, Liu T T, Guan X S. Magnetic particle testing and penetrant testing analysis of aviation products [J]. *Weapon Material Science and Engineering*, 2021, 44 (6): 123–127.
- [10] 吴克勤, 谢里阳, 倪爱伟. 某钛合金材料拉伸过程的声发射特征 [J]. *机械制造*, 2007, (1): 50–52.
- Wu K Q, Xie L Y, Ni A W. Acoustic emission characteristics of a titanium alloy during stretching [J]. *Machinery Manufacturing*, 2007, (1): 50–52.
- [11] 张昭, 肖迎春, 王倩, 等. TC18 钛合金疲劳断裂过程声发射信号特征分析 [J]. *航空工程进展*, 2015, 6 (4): 502–506.
- Zhang Z, Xiao Y C, Wang Q, et al. Analysis of acoustic emission signal characteristics during fatigue fracture of TC18 titanium alloy [J]. *Progress of Aviation Engineering*, 2015, 6 (4): 502–506.
- [12] 龙小江, 李秋锋, 何才厚, 等. 不同拉伸速率下钢材损伤的声发射监测评价 [J]. *振动与冲击*, 2017, 36 (7): 219–225.
- Long X J, Li Q F, He C H, et al. Acoustic emission monitoring and evaluation of steel damage under different tensile rates [J]. *Vibration and Shock*, 2017, 36 (7): 219–225.
- [13] Mukhopadhyay C K, Jayakumar T, Haneef T K, et al. Use of acoustic emission and ultrasonic techniques for monitoring crack initiation/growth during ratcheting studies on 304LN stainless steel straight pipe [J]. *International Journal of Pressure Vessels & Piping*, 2014, 116: 27–36.
- [14] Elforjani M, Mba D. Detecting natural crack initiation and growth in slow speed shafts with the Acoustic Emission technology [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2009, 16 (7): 2121–2129.
- [15] Qin G, Liu Z. Development of acoustic emission testing system [J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2004, 18 (3): 274–279.
- [16] 沈功田. 声发射检测技术及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- Shen G T. Acoustic Emission Detection Technology and Application [M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [17] Al-Dossary S, Hamzah R I R, Mba D. Observations of changes in acoustic emission waveform for varying seeded defect sizes in a rolling element bearing [J]. *Applied Acoustics*, 2009, 70 (1): 58–81.
- [18] 阳能军, 姚春江, 袁晓静, 等. 基于声发射的材料损伤检测技术 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2016.
- Yang N J, Yao C J, Yuan X J, et al. Material Damage Detection Technology Based on Acoustic Emission [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2016.
- [19] 黄华斌, 智伟, 王竹林, 等. 飞机铆接壁板疲劳损伤的声发射检测 [J]. *无损检测*, 2020, 42 (12): 12–14, 75.
- Huang H B, Zhi W, Wang Z L, et al. Acoustic emission detection of fatigue damage of aircraft riveted panel [J]. *Non-destructive Testing*, 2020, 42 (12): 12–14, 75.
- [20] 史悦, 董丽虹, 王海斗, 等. 声发射技术在疲劳失效领域的研究进展 [J]. *材料导报*, 2016, 30 (3): 109–115.
- Shi Y, Dong L H, Wang H D, et al. Research progress of acoustic emission technology in the field of fatigue failure [J]. *Materials Reports*, 2016, 30 (3): 109–115.
- [21] 鲁涛, 敬石开, 聂靖轩, 等. 电弧增材制造钛合金成形工艺与过程控制 [J]. *稀有金属*, 2023, 47 (5): 618–632.
- Lu T, Jing S K, Nie J X, et al. Wire arc additive manufacturing of titanium alloy: Forming process and process control [J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2023, 47 (5): 618–632.
- [22] GB/T 228.1—2021, 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法 [S].
- GB/T 228.1—2021, Metallic materials—Tensile testing—Part 1: Method of test at room temperature [S].
- [23] 魏子航, 李新民, 张先辉. TB6 钛合金疲劳试验过程中的声发射信号特征 [J]. *南昌航空大学学报: 自然科学版*, 2019, 33 (4): 94–100.
- Wei Z H, Li X M, Zhang X H. Acoustic emission signal characteristics during fatigue test of TB6 titanium alloy [J]. *Journal of Nanchang Aviation University: Natural Science Edition*, 2019, 33 (4): 94–100.