文章编号：1001-4888(2020)04-0650-09

铝合金在不同应力状态下微损伤演化的声发射研究*

李建宇，贾中汇，张扬扬

（天津市轻工与食品工程机械装备集成设计与在线监控重点实验室，天津科技大学 机械工程学院，天津 300222）

摘要：利用声发射技术对不同应力状态下铝合金的微损伤演化规律进行试验研究。首先，对铝合金在正断和切断两种断面取向的试样进行单轴拉伸试验，并同时采集微损伤声发射信号；其次，基于所采集的微损伤声发射信号构建了一个能够表征微损伤能量尺度特征和时间序列特征的随机损伤变量，进而通过对该随机变量的分析来研究铝合金在不同应力状态下的微损伤演化特征；最后，通过计算随机损伤变量在不同外载荷水平下的概率熵给出描述材料微损伤演化过程的一种表征。通过试验并辅以对断面的扫描电镜观测获得的结果是，同一种铝合金材料在两种不同应力状态下获得的微损伤概率熵曲线具有显著差异性，而在相同应力状态下分别针对铝合金材料 1060 和 6063 的微损伤概率熵曲线又具有一致性。上述研究结果可为探索铝合金在不同应力状态下的微损伤演化规律提供参考。

关键词：铝合金；微损伤；声发射；随机变量分析；概率熵

中图分类号：TB302.5 **文献标识码**：A DOI：10.7520/1001-4888-19-021

0 引言

工程结构在受载过程中将逐渐积累损伤直至最终断裂破坏。结构材料的损伤主要表现为具有微观和细观性、无序和随机性等特点的微损伤。微损伤一般占据着结构使用寿命的绝大部分时间，且对于结构材料的强度、疲劳等宏观力学性能往往有着重大影响，因而需要定量评估。

对结构材料的微损伤及其演化进行定量评估，离不开对微损伤及其演化的准确观测。对微损伤进行观测的最直观方法是利用金相学等观测方法，如扫描电镜、CT 扫描、X-射线衍射等手段直接观测固体材料中各种微细观缺陷的数目、形状、分布状态、裂纹性质等[1-5]。但是如何将基于图像信息的微损伤观测数据与损伤物理模型建立联系，目前还是个挑战。为此，一些通过观测结构材料在受载过程中某些物理量和机械性能等的变化来描述损伤及其演化的间接观测方法常被使用，例如通过位移、应变场等形变量测量损伤的电测法、光测法等，通过观测温度场来测量损伤的热像仪等以及声学特征测量的超声、声发射等手段。其中由于声发射检测的高灵敏性、实时连续性等优点而被越来越多地用于微损伤的检测研究。

声发射检测数据量极大，且蕴含丰富的微损伤信息，如何有效利用这些数据进行微损伤评估仍是一个难点。已有工作如通过将声发射事件数、能率等与损伤力学中的损伤内变量建立联系进而构建微损伤及其演化模型的方法[6-8]，尚未充分利用声发射数据所蕴含的丰富信息。近期，齐刚等[9,10]提出利用

* **收稿日期**：2019-01-25；**修回日期**：2019-03-01
基金项目：国家自然科学基金资助项目（11272234）
通讯作者：李建宇(1978－)，男，博士，副教授，主要从事强度计算与检测方面的研究。Email：lijianyu@tust.edu.cn

多元统计学的方法来处理微损伤所激发的海量声发射数据，将具有多尺度特征的损伤声发射信号利用概率熵综合平均为一个宏观量来表征微损伤及其演化，并在骨水泥、铸铁等[11-13]材料的微损伤评估中得到了成功应用。

铝合金以其密度小、易加工、耐腐蚀等优点被广泛应用于航空、交通、建筑等重要场合[14]。已有的工作表明铝合金材料在不同应力状态下具有不同的损伤断裂机理[15-17]。为了从试验的角度验证这一结论，朱浩等[17-19]利用原位加载结合扫描电镜(Scanning Electron Microscope，SEM)进行观测研究，但该试验方法仅仅是针对材料表面、表面的裂纹扩展及断口的研究，而且很难用于动态损伤的在线检测。本文利用声发射(Acoustic Emission，AE)技术并结合多元统计学方法研究铝合金材料的微损伤及其演化机理，该方法不仅可以获得材料内部的微损伤信息，而且可以用于冲击、疲劳等动态情形下微损伤的在线检测和评估。

1　试验方案

1.1　试验材料

试验材料为工程常用铝合金 1060 和 6063，供货状态分别为 H24 和 T4，其化学成分见表 1、表 2。

表 1　铝合金 1060 各元素含量

Tab.1　Typical chemical compositions of Al alloy 1060

化学成分	Si	Fe	Cu	Zn	Mg	Mn	Ti
元素含量/%	0.25	0.35	0.05	0.05	0.03	0.03	0.03

表 2　铝合金 6063 各元素含量

Tab.2　Typical chemical compositions of Al alloy 6063

化学成分	Si	Mg	Fe	Zn	Mn	Ti	Cr	Cu
元素含量/%	0.2～0.6	0.45～0.9	＜0.35	＜0.1	＜0.1	＜0.1	＜0.1	＜0.1

1.2　试验试样

通过在铝合金板材上预制两种不同形式的缺陷，使其在相同条件的单轴拉伸试验中实现剪切、正断两种不同的主导应力状态。试样尺寸及缺陷形状如图 1 所示，两种材料试样各 15 个。

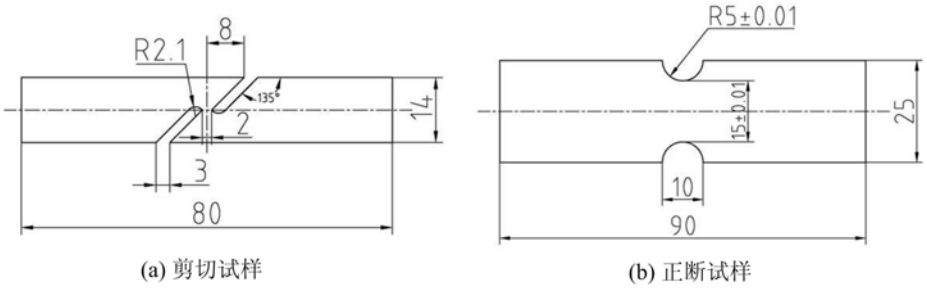


图 1　试样尺寸及预制缺陷示意图[15](单位：mm)

Fig.1　Schematic of sizes and preformed defects of specimens[15] (unit: mm)

1.3　试验过程

如图 2 所示，试验过程示意图以剪切试样为例，使用 MTS E45 电子万能拉伸机对试验试样以 1mm/min 速度进行加载；同时利用 PAC 公司 Micro-Ⅱ Digital AE System 对其微损伤声发射信号进行采集，前置放大器增益为 40dB，采样率为 1MSPS；谐振式传感器 Nano 30，共振频率为 140kHz，频率范围为 125～175kHz，传感器位置为距试样中心线 15mm 处正反两面布置。为了尽可能消除试验过程中的噪声干扰，传感器工作面涂有 AE 专用高效耦合剂，且利用夹子将传感器固定在试样表面，确保在试验过程中传感器位置不随试样的局部拉伸形变而发生松动，避免了传感器与试样表面的相对松动造成

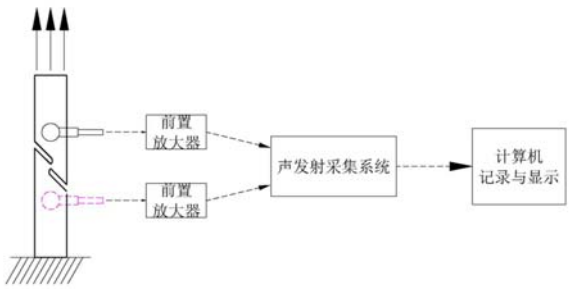


图 2 试验过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the experimental process

可能性摩擦进而引发的噪声信号。在实验室环境噪声极小的情况下,门槛值与模拟滤波器频率的设定需要折中考虑。具体的,设定采集门槛值为30dB,在拉伸机开机的状态下,能够保证 AE 采集系统处于一个没有信号被采集的临界状态;同时将模拟滤波器的频率设置为 1kHz～3MHz,以此经验值过滤设备工作过程中伴随的振动噪声。

2 结果及分析

2.1 声发射原始信号及讨论

通过试验获得如图 3、图 4 所示的两种材料的剪切和正断试样的声发射原始信号。由图可知,随着外载荷水平的增加,声发射信号的涌现过程可大致划分为四个阶段。在第 I 阶段,两种材料的所有试样

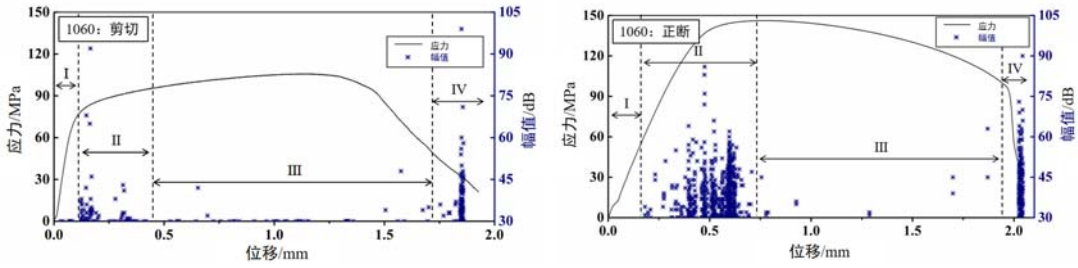


图 3 铝合金 1060 声发射原始信号幅值、应力和时间关系

Fig. 3 The relations among AE amplitude, stress and times for Al alloy 1060 material

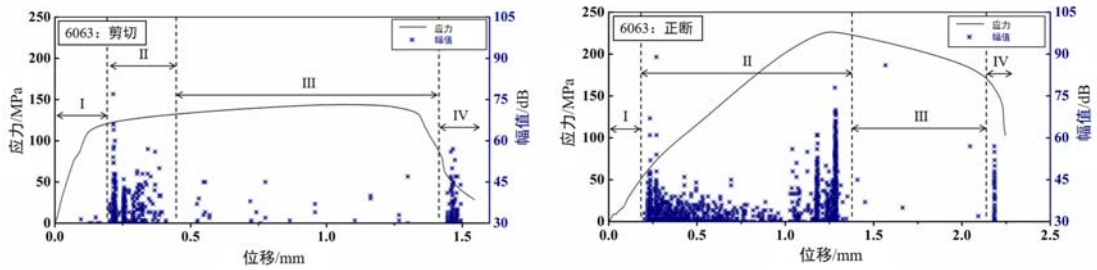


图 4 铝合金 6063 声发射原始信号幅值、应力和时间关系

Fig. 4 The relations among AE amplitude, stress and times for Al alloy 6063 material

均无或极少量声发射信号涌现,它主要对应弹性变形阶段,材料在弹性阶段和塑性阶段初期均会产生损伤事件(位错和滑移),但这些声发射事件数量很少,幅度微弱,频率较低,因此声发射信号不显著;在第 II 阶段,声发射信号大量集中出现,它对应着材料的内部位错运动加剧,密度增加,位错滑移和位错雪崩使得材料发生塑性变形并释放出大量能量;在第 III 阶段,声发射信号较第 II 阶段数量减少、活性变差,随载荷的增加和塑性形变的加剧,材料内部位错运动的自由度大大减少,塑性变得很差;在第 IV 阶段,仅出现少量、高幅值的声发射信号,它对应着材料即将断裂失效,试样已产生极大的塑性变形,位错运动的自由度极大减少,塑性变差,位错塞积和位错纠缠严重。

从原始信号上观察,不同材料不同试样的声发射信号分布特征具有很大相似性,能看出的区别仅仅是剪切试样相比于正断试样的声发射源活性较差,声发射信号数量较少,但这很难从本质上揭示出剪应力或正应力主导作用下微损伤演化机理的差异。

2.2 微损伤演化的统计性描述

2.2.1 随机损伤变量 D 矩阵

基于从声发射原始信号的分布特征上难以区分出同种材料剪切和正断试样微损伤演化机理的差异,因此,通过对声发射原始信号进行处理,并利用统计性方法对其进一步分析显得很有必要。

首先，在测得的一系列声发射信号中，将幅值作为尺度标准，从门槛值 A_{min} 到最大幅值 A_{max} 由小到大依次等分成 n 个子区间：$[A_{min},\ A_{min}+(A_{max}-A_{min})/n$ ，$[A_{min}+(A_{max}-A_{min})/n,\ A_{min}+2(A_{max}-A_{min})/n]$，…，$[A_{min}+(n-1)(A_{max}-A_{min})/n,\ A_{max}]$。我们称每一个区间为以幅值为尺度标准下的尺度向量 $\boldsymbol{X}_j$[10-11]；在材料断裂机理研究方面，损伤演化的推进主要依赖于外部载荷的作用，故选取应力作为观察索引，从而根据索引宽度的大小来确定观察向量 $\mathbf{Y}_i$ 的数量 m[10,11]。

其次，将上述尺度向量系列 $\{X_j\}$ 和观察向量系列 $\{Y_i\}$ 相组合，便可得到随机损伤变量 D 矩阵[10-13]：

$$D=\{X_1,X_2,\cdots,X_j,\cdots,X_n\}=\begin{Bmatrix}Y_1\\Y_2\\\vdots\\Y_i\\\vdots\\Y_m\end{Bmatrix}=[\alpha_{ij}]_{m\times n}=\begin{pmatrix}\alpha_{11}&\cdots&\alpha_{1n}\\\vdots&\ddots&\vdots\\\alpha_{m1}&\cdots&\alpha_{mn}\end{pmatrix}\tag{1}$$

为了研究材料在每个应力阶段的微损伤演化过程，选取 D 作为研究对象进行分析。本文声发射数据的统计计数过程如图 5 所示，可以看到，在一个具体的 D 矩阵中元素 α_{ij} 代表着同时处于尺度区间 j 及观察索引 i 内的声发射事件计数，基于声发射事件与材料微损伤事件的对应关系，α_{ij} 也即所对应的微损伤事件数。

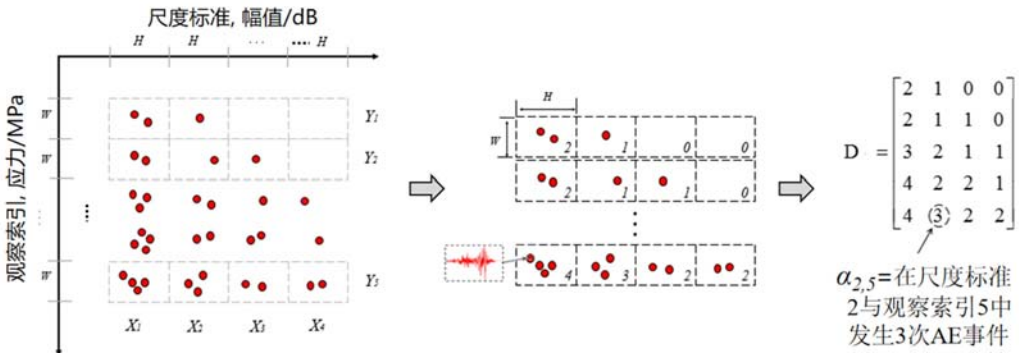


图 5　D 矩阵建立(声发射事件的统计计数)过程示意图

Fig. 5　Schematics of procedure for establishing D matrix (Statistical counts for AE events)

2.2.2　D 矩阵参数

依据上述思路，构建 1060 和 6063 两种铝合金材料分别在正断和剪断两种应力状态下的 D 矩阵，详细参数如表 3 所示。

表 3　D 矩阵参数建立

Tab. 3　The establishment of D matrix parameters

材料	试样类型	观察索引长度 /MPa	观察向量个数 m	尺度标准范围 /dB	尺度向量个数 n
1060	剪切	10	10	30～100	10
1060	正断	15	10	30～100	10
6063	剪切	14	10	30～100	10
6063	正断	23	10	30～100	10

2.2.3　损伤状态轨迹——熵曲线

借用概率熵 S[10-13] 来评估材料在外载荷作用下微损伤演化状态的不确定性。具体的，熵值 S 越大，随机损伤的微观演化不确定性越大，随机损伤事件(Events of Random Damage，ERD)[10,12] 可能性的结果越多，损伤越不稳定；反之，S 越小，随机损伤的微观演化不确定性越小，ERD 可能性的结果越

少，损伤状态越稳定。概率熵 S 的函数公式如下：

$$S=\sum_{j=1}^{n} p_j \ln(1/np_j) \tag{2}$$

其中，n 为所划分的尺度标准子区间数；p_j 为随机损伤事件落入第 j 个子区间的概率。

随着外载荷增加，铝合金材料在承载过程中发生损伤演化直至最终断裂失效，其微观损伤演化过程一定是由每一个瞬态的损伤组合而成。因此，描述每一个微损伤演化瞬态的概率熵值沿着应力序列组合到一起，便可得出铝合金材料在其整个损伤过程中的损伤状态轨迹，即熵曲线 S－σ(熵－应力)。本文试验中铝合金 1060 和 6063 两种试样的熵曲线分别如图 6、图 7 所示。

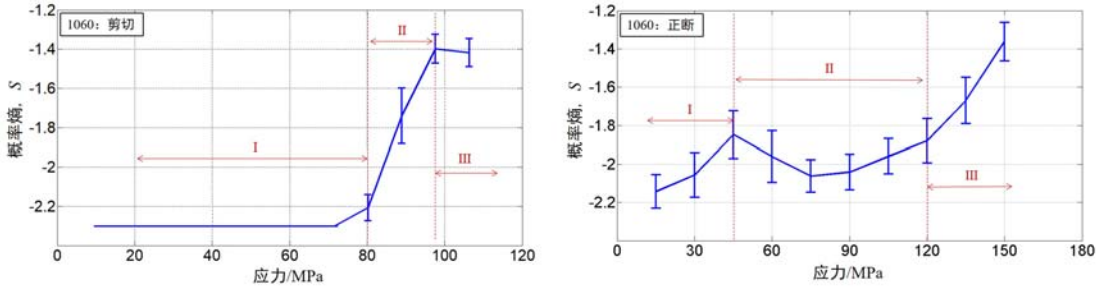


图 6 铝合金 1060 剪切和正断试样损伤状态轨迹曲线

Fig. 6 The trajectory of damage state curves of shear and tensile specimens of Al alloy 1060

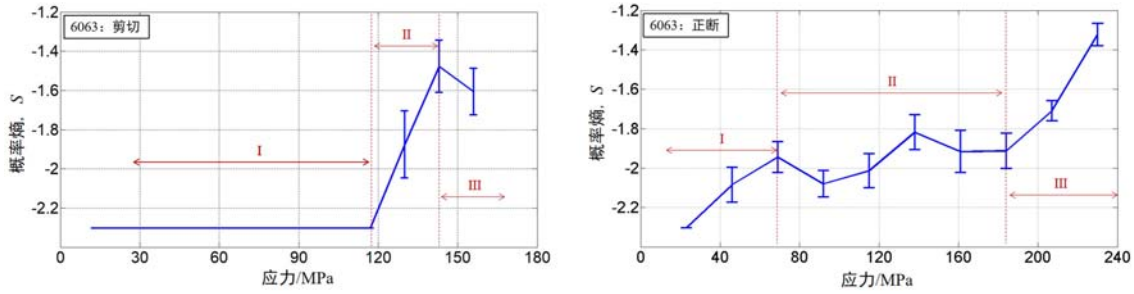


图 7 铝合金 6063 剪切和正断试样损伤状态轨迹曲线

Fig. 7 The trajectory of damage state curves of shear and tensile specimens of Al alloy 6063

由图 6 可以看出：对于两种材料的剪切试样，其熵曲线按趋势均可大致分为三个阶段：

无损伤阶段(Ⅰ)，此阶段熵值为等熵，数值基本保持在 $S_{min}=\ln(1/10)=-2.3$。代表着损伤状态的不确定性最小，可认为损伤状态的绝对确定性，即无损伤状态，对应材料的弹性阶段。损伤产生及加剧阶段(Ⅱ)，此阶段熵值由最小值快速增加，即$\partial s/\partial\sigma>0$ 且$\partial^2 s/\partial\sigma^2>0$。随外载荷增加，材料内局部微损伤开始产生，导致材料内微损伤模式的产生由单一向多样性发展，微损伤的数量也逐步增加。临近断裂失效阶段(Ⅲ)，此阶段熵值突然减小，熵曲线逆向发展。代表着微损伤演化状态的不确定性突然减小，微损伤事件集中分布在某一个或几个尺度标准上，材料内局部出现明显的应力集中，即将断裂失效。

对于两种材料的正断试样，熵曲线形式均比相应的剪切试样复杂，根据其趋势也可分为三个阶段：

损伤产生初期阶段(Ⅰ)，此阶段熵值快速增加，熵曲线近似线性，即$\partial s/\partial\sigma>0$ 且$\partial^2 s/\partial\sigma^2\approx0$。随着外载荷增加，材料内局部微损伤开始产生，并逐步形成于多个位置，数量逐步增加。损伤发展阶段(Ⅱ)，对于铝合金 1060，该阶段熵值特点为逆向减小后稳定增长。代表着微损伤状态的不确定减小至微损伤事件产生的位置趋于稳定，微损伤事件在某个或几个尺度上的分布开始变的集中。对于铝合金 6063，该阶段熵值小幅增加后分布于－1.9 附近，代表试验进行到一定阶段，材料内的微损伤多基于前期损伤发生，产生新位置损伤的不确定性趋于稳定。临近断裂失效阶段(Ⅲ)，该阶段熵值突然快速增加，即$\partial s/\partial\sigma>0$ 且$\partial^2 s/\partial\sigma^2>0$。此时材料开始颈缩，局部应力集中产生新的少数高幅值微损伤事件，使材料微损伤演化的不确定性显著增加，越发接近宏观塑性断裂的最终结果。

分别对比两种材料的剪切、正断试样熵曲线得出：

（1）对两种材料，相比于正断试样，其剪切试样的熵曲线形式较单一，趋势更清晰，也反映出剪应力与正应力损伤机理本质上的差异[22]，前者主要表现为材料内部剪切面的滑移，后者则主要表现为材料内显微空洞的生核、长大和集聚；

（2）已有研究表明[20,21]：金属塑性材料在静态拉伸的整个损伤过程中，其内部应力状态的演变依次为正应力占主导、正应力作用减弱，剪应力作用逐渐增强的混合应力状态、剪应力作用占主导。结合正断试样熵曲线不难看出：两种材料的熵曲线在起始阶段均为近似线性增加，材料在此阶段所受应力状态为单一应力状态即正应力作用占主导；而随着载荷的增加，两种材料熵曲线分别对比前一阶段，其形式产生变化，也即材料在此阶段所受剪应力作用逐渐增大，两种应力状态所占比重的变化对材料微损伤演化产生影响；熵曲线发展到末尾阶段，随着剪应力作用继续增大，打破两种应力状态的相对作用，熵曲线形式继续上升直至材料断裂失效。

（3）两种材料剪切试样熵曲线的变化趋势基本相同，而两者正断试样熵曲线主要的区别在于损伤的发展阶段。在此阶段，铝合金 1060 的熵曲线形式为逆向发展至保持稳定增长；铝合金 6063 的熵曲线形式则在整体保持增长的同时存在一定的变化。造成这种差异的原因主要为两种应力状态所占比重和材料本身物性特点的不同。剪应力、正应力分别代表着不同的损伤状态及损伤机理，其各自比重大小均影响着材料的微损伤演化状态；而合金材料主要的合金元素、强化相等的不同，代表着材料物性的差异，使其对于相同或不同应力状态的响应也大多不同。

2.3　SEM 断口观测

SEM 断口观测是金属材料断裂机理最直观、最有效且最常用的研究手段。我们希望利用 SEM 断口分析直观、清晰地区分出剪应力或正应力占主导作用时，两者所造成的微损伤类型的不同，进而为两者损伤机理本质上的差异提供有力的佐证。

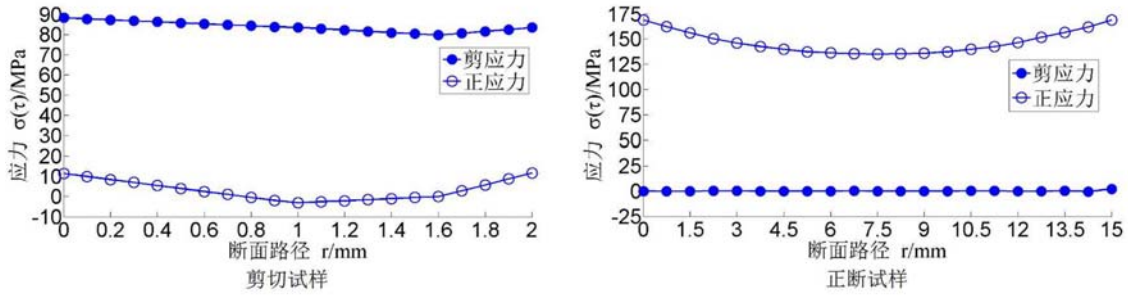


图 8　铝合金 1060 断面应力分布

Fig. 8　The stress distribution of Al alloy 1060 fracture surfaces

2.3.1　试样断口应力分布的有限元验证

为了明确整个断口上剪应力与正应力分布情况，确定断口确为剪应力或正应力占主导作用所造成的，以此为 SEM 观测提供理论依据，在观测之前利用有限元软件 ANSYS 分别计算剪切和正断试样断面上（即两缺口之间的路径 r）剪应力与正应力大小。单元类型采用三维 20 节点固体结构单元（Solid 186），单元尺寸为 1mm，泊松比统一采用 0.35，弹性模量：1060 为 70361MPa，6063 为 71011MPa。计算结果如图 8、图 9 所示。显然，无论哪种材料，其剪切试样的断面均是以剪应力作用占主导，也即断面上微损伤的类型是剪应力为主导作用造成。同样的，铝合金 1060 和 6063 两种材料的正断试样其断面剪应力均接近于 0，而正应力范围约为 135～175MPa 和 210～250MPa。则两种材料正断试样的断面均以正应力作用占主导，也即断面上微损伤的类型是正应力为主导作用造成的。

2.3.2　SEM 断口观测及分析

选取试验得到的断口试样，利用日立公司 SU1510 型 SEM 对两种材料两种类型试样的断口微损伤类型进行观测。结果如图 10 所示，其中（a）（b）分别为铝合金 1060 剪切与正断试样断口的观测结果，（c）（d）分别为铝合金 6063 剪切与正断试样断口的观测结果。

由图 10（a）和（c）可以看出，两种材料剪切试样断口的微损伤类型均为抛物线型的拉长韧窝[22]。造

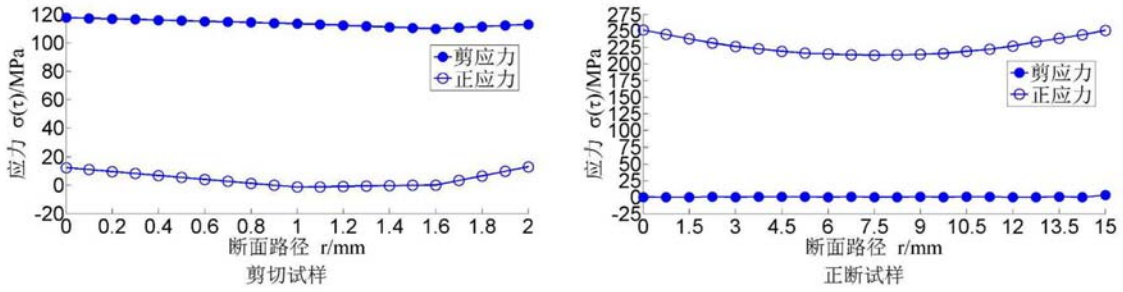


图 9 铝合金 6063 断面应力分布

Fig. 9 The stress distribution of Al alloy 6063 fracture surfaces

成这种微损伤类型的原因主要是:在损伤初期,试样首先在正应力作用下于内部产生微孔洞,随着外载荷的增加,剪应力作用愈发凸显,微孔洞的生长失去了驱动力不再产生和变大,而是在剪应力的作用下,沿着剪应力的方向被拉长,直至断裂失效。由图 10(b)和(d)可以看出,两种材料正断试样断口的微损伤类型均为圆型或椭圆型的等轴韧窝[22]。造成这种微损伤类型的原因主要是:试样在整个损伤过程中,持续性的正应力作用使其内部微孔洞形核、长大、聚集,直至微孔洞的体积不断增加达到其临界体积分数时试样发生断裂。

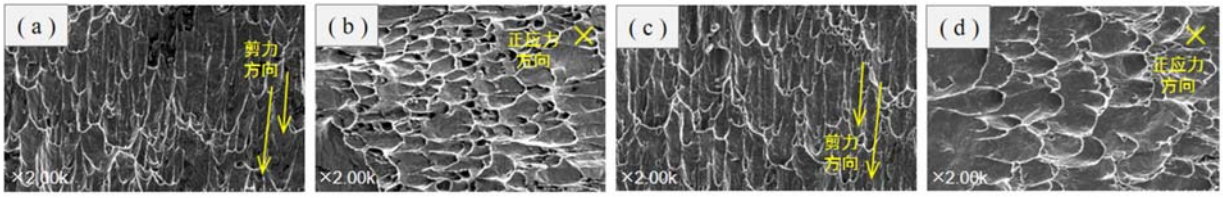


图 10 铝合金 1060 与 6063 SEM 微观断口形貌(剪切和正断试样)

Fig. 10 SEM fracture surfaces micrographs of Al alloy 1060 and 6063(Shear and tensile specimens)

3 结论

本文通过应用不同缺陷布置形式的单轴拉伸试样,控制两种铝合金材料完成分别在剪切、正应力主导条件下的损伤演化过程,基于试验数据的处理及分析,得出:

(1) 借助声发射技术对不同应力状态下造成的损伤数据进行采集并分析,得出由剪应力主导所造成的损伤,相较于正应力,其声发射源活性较差,声发射信号数量较少,损伤机理较单一。

(2) 借助概率熵理论来分别评估不同应力状态下的微损伤演化过程,得出的微损伤演化过程曲线即熵曲线,从形式上能够区分出剪应力相比于正应力作用微损伤过程形式较单一、趋势更清晰。

(3) 通过 SEM 断口观测,清晰地区分出剪应力和正应力主导作用造成的微损伤形式分别为拉长韧窝和等轴韧窝,且剪切试样断口上韧窝与自身所受剪应力方向一致。

同时,本文依旧存有不足之处,比如对概率熵与材料结构变化量化关系的描述,试样的尺寸细节可以进一步优化等,更加细致、深入的研究将会继续。

参考文献:

[1] 盈亮, 刘文权, 王丹彤, 等. 7075-T6 铝合金温成形损伤演化实验与仿真[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(7): 1383－1390 (YING Liang, LIU Wenquan, WANG Dantong, et al. Experimental and simulation of damage evolution behavior for 7075-T6 aluminum alloy in warm forming[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(7):1383－1390 (in Chinese))

[2] 孙怡, 周平, 王恩亮, 等. X 光探伤图像中焊接缺陷的自动检测[J]. 光电子·激光, 2003, 14(3):288－291 (SUN Yi, ZHOU Ping, WANG Enliang, et al. Automatic inspection of weld defects in X-ray images[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2003, 14(3):288－291 (in Chinese))

[3] 田威，党发宁，陈厚群. 单轴压缩条件下混凝土细观损伤演化机理的 CT 试验研究[J]. 实验力学，2011，26(1)：54－60（TIAN Wei，DANG Faning，CHEN Houqun. Experimental study of concrete meso-damage evolution mechanism based on uniaxial compression CT method[J]. Journal of Experimental Mechanics，2011，26(1)：54－60 (in Chinese))

[4] 周尚志，党发宁，陈厚群，等. 基于单轴压缩 CT 实验的混凝土破损细观机理研究[J]. 西安理工大学学报，2006，22(4)：355－360（ZHOU Shangzhi，DANG Faning，CHEN Houqun，et al. Breakage meso mechanism of concrete based on CT test under uniaxial compression[J]. Journal of Xi′an University of Technology，2006，22(4)：355－360 (in Chinese))

[5] 赵芳琴. 材料表征技术在砂岩文物风化研究中的应用[D]. 哈尔滨工业大学，2010（ZHAO Fangqin. Investigations of weathering processing of sandstone monuments by materials characterization techniques：a case study of grottoes[D]. Harbin Institute of Technology，2010 (in Chinese))

[6] 樊保圣. 金属材料损伤过程声发射特征参数及损伤模型研究[D]. 南昌大学，2012（FAN Baosheng. The study on acoustic emission characteristic parameters and damage model during metal material damage process[D]. Nanchang University，2012 (in Chinese))

[7] 徐长航，刘立群，陈国明. 钢制试件拉伸断裂及疲劳开裂声发射特征分析[J]. 中国石油大学学报，2009，33(5)：95－99（XU Changhang，LIU Liqun，CHEN Guoming. Characteristics analysis of acoustic emission signals from steel specimens under tensile fracture and faigue crack condition[J]. Journal of China University of Petroleum，2009，33(5)：95－99 (in Chinese))

[8] 岳亚霖，韦朋余，张炜，等. 船用金属材料声发射信号特性研究[J]. 实验力学，2008，23(6)：496－502（YUE Yalin，WEI Pengyu，ZHANG Wei，et al. Investigation on characteristics of acoustic emission signal for marine metal materials[J]. Journal of Experimental Mechanics，2008，23(6)：496－502 (in Chinese))

[9] 齐刚，樊明. 论固有结构与损伤之间的矛盾在材料受载分析中的主导性[J]. 自然辩证法通讯，2012，34(2)：114－122（QI Gang，FAN Ming. The dominance of the antinomy between the inherent structure and irreversible damage in evaluating material′s performance：an experimental foundation for a novel epistemological methodology in solid mechanics[J]. Journal of Dialectics of Nature，2012，34(2)：114－122 (in Chinese))

[10] Qi G，Wayne S F. A framework of data-enabled science for evaluation of material damage based on acoustic emission[J]. Journal of Nondestructive Evaluation，2014，33(4)：597－615.

[11] Qi G，Wayne S F，Fan M. Measurements of a multicomponent variate in assessing evolving damage states in a polymeric material[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement，2011，60(1)：206－213.

[12] 张亮，李建宇，齐刚. 纸页受力微损伤演化过程的声发射及多元统计特征[J]. 实验力学，2015，30(3)：322－330（ZHANG Liang，LI Jianyu，QI Gang. On the characteristics of acoustic emission and multivariate statistics in micro-damage evolution process of paper sheet subjected to force action[J]. Journal of Experimental Mechanics，2015，30(3)：322－330 (in Chinese))

[13] Qi G，Li J Y，Fan M，et al. Assessment of statistical responses of multi-scale damage events in an acrylic polymeric composite to the applied stress[J]. Probabilistic Engineering Mechanics，2013，33(9)：103－115.

[14] 李念奎，凌杲，聂波，等. 铝合金材料及热处理技术[M]. 北京：冶金工业出版社，2012（LI Niankui，LING Gao，NIE Bo，et al. Aluminum alloy material and heat treatment technology[M]. Beijing：Metallurgical Industry Press，2012 (in Chinese))

[15] 徐文福，车洪艳，陈剑虹. 6063 铝合金在不同应力状态下的变形及损伤行为[J]. 机械工程材料，2009，33(1)：20－22（XU Wenfu，CHE Hongyan，CHEN Jianhong. Deformation and damage behavior of 6063 aluminum alloy under different stress conditions[J]. Material for Mechanical Engineering，2009，33(1)：20－22 (in Chinese))

[16] 吕丹，朱亮，朱浩，等. 不同应力状态下 6061 铝合金力学性能及断裂行为的研究[J]. 轻合金加工技术，2010，38(4)：52－55（LV Dan，ZHU Liang，ZHU Hao，et al. Study on mechanical properties and fracture behavior of 6061 aluminum alloy under different stress states[J]. Light Alloy Fabrication Technology，2010，38(4)：52－55 (in Chinese))

[17] 朱浩，朱亮，陈剑虹，等. 不同应力状态下铝合金变形及损伤机理的研究[J]. 稀有金属材料与工程，2007，36(4)：597－601（ZHU Hao，ZHU Liang，CHEN Jianhong，et al. The study of deformation and damage mechanism of aluminum alloy under different stress states[J]. Rare Metal Materials and Engineering，2007，36(4)：597－601

(in Chinese))

[18] 朱浩，齐芳娟，张洋. 剪应力状态下6061铝合金的力学性能及断裂行为[J]. 中国有色金属学报，2012，22(6)：1570－1576 (ZHU Hao，QI Fangjuan，ZHANG Yang. Mechanical properties and fracture behavior of 6061 aluminum alloy under shear stress states[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals，2012，22(6)：1570－1576 (in Chinese))

[19] 朱浩，吕丹，朱亮，等. 6061铝合金断裂机理的原位拉伸研究[J]. 机械工程学报，2009，45(2)：94－99 (ZHU Hao，LV Dan，ZHU Liang，et al. Investigation of fracture mechanism of 6061 aluminum alloy by means of in-situ observation[J]. Journal of Mechanical Engineering，2009，45(2)：94－99 (in Chinese))

[20] 汤安民，刘泽明. 铝合金材料断裂形式变化规律的试验分析[J]. 西安理工大学学报，2003，19(3)：227－228 (TANG Anmin，LIU Zeming. The experiment analysis for fracture laws of aluminum alloy materials[J]. Journal of Xi′ an University of Technology，2003，19(3)：227－228 (in Chinese))

[21] 汤安民，王静. 几种金属材料断裂形式变化规律的试验分析[J]. 实验力学，2003，18(4)：440－444 (TANG Anmin，WANG Jing. Several kinds of metal materials fracture mode change rule of test analysis[J]. Journal of Experimental Mechanics，2003，18(4)：440－444 (in Chinese))

[22] 钟群鹏，赵子华. 断口学[M]. 北京：高等教育出版社，2006 (ZHONG Qunpeng，ZHAO Zihua. Fractography [M]. Beijing：Higher Education Press，2006 (in Chinese))

Study on the micro-damage evolution of aluminum alloy under different stress states based on acoustic emission

LI Jian-yu，JIA Zhong-hui，ZHANG Yang-yang

(Tianjin Key Laboratory of Integrated Design and On-line Monitoring for Light Industry & Food Machinery and Equipment，School of Mechanical Engineering，Tianjin University of Science & Technology，Tianjin 300222，China)

Abstract：Acoustic emission experiments are performed to investigate the micro-damage evolution properties of aluminum alloy under different stress states. Firstly，uniaxial tensile tests are implemented for aluminum alloy specimens with tensile and shear orientations respectively，and the acoustic emission signals stemmed from the micro-damage of aluminum alloy are collected in the same time. Secondly，based on the collected acoustic emission signals，a stochastic variate is defined to characterize the multiscale property and the time-series property of the released energy caused by the micro-damage in aluminum alloy. Finally，a probabilistic entropy is calculated from the derived multivariate to describe the micro-damage evolution process of aluminum alloy quantitatively. The results of acoustic emission tests，combined with the scanning electron microscope observation of the specimen's fracture surfaces，show that the curve of probabilistic entropies can effectively distinguish the significant difference of micro-damage evolution of the aluminum alloy under two kinds of stress states. Moreover，the curves of probabilistic entropies for two different kinds of aluminum alloy materials，i. e. aluminum alloy 1060 and aluminum alloy 6063，are consistent under the same stress states. The present results could benefit the understanding of micro-damage evolution of alumina alloy under different stress states.

Keywords：aluminum alloy；micro-damage；acoustic emission；stochastic variate analysis；probabilistic entropy